Prefacio

La astronomía es una ciencia dichosa; según la expresión del sabio francés Arago[1], no necesita elogios. Sus éxitos son tan cautivadores que no hay necesidad de llamar la atención sobre ellos. Sin embargo, la ciencia del cielo no está sólo constituida por descubrimientos maravillosos y teorías audaces. Su fundamento lo constituyen hechos comunes que se repiten día a día. Las personas que no son aficionadas al estudio del cielo tienen, en la mayoría de los casos, un conocimiento bastante vago de este aspecto ordinario de la astronomía y se interesan poco por él, ya que es difícil concentrar la atención en aquello que se halla siempre delante de los ojos.

Esta parte vulgar, cotidiana, de la ciencia del cielo, es su primera y no su última frontera, y constituye una parte importante, aunque no exclusiva, del contenido de la Astronomía recreativa. Este libro se esfuerza ante todo en ayudar al lector a aclarar y comprender los hechos astronómicos fundamentales. Esto no quiere decir que sea semejante a un texto elemental de introducción. La manera de tratar el tema lo distingue fundamentalmente de un libro de texto. Hechos comunes; conocidos a medias, son presentados aquí en una forma no acostumbrada, a menudo paradójica, desde puntos de vista nuevos, inesperados, lo cual despierta el interés y aumenta la atención hacia ellos. La exposición está exenta en lo posible de términos especializadas y de todas esas fórmulas complicadas que son un obstáculo habitual entre el lector y el libro de astronomía.

Con frecuencia se hace a los libros de divulgación el reproche de que en ellas no es posible aprender nada seriamente. El reproche es en cierta medida justo, y se fundamenta (si se tienen en cuenta las obras sobre ciencias naturales exactas) en la costumbre de eludir en ellos todo cálculo numérico. Y; sin embargo, el lector empezará a dominar el tema del libro cuando empiece a comprender, aunque sólo

---

1 François Jean Dominique Arago (1786-1853). Matemático, físico, astrónomo y político francés.

Fue nombrado por el emperador como uno de sus astrónomos del Observatorio Real de París, lugar en el que dio sus famosas y populares clases de astronomía desde 1812 hasta 1845.

En 1819 procedió con Biot a ejecutar operaciones geodésicas en la costa de Francia así como en Inglaterra y Escocia. Midió los segundos de un péndulo en Leite, Escocia, así como en las islas Shetland. Los resultados de las observaciones realizadas en España fueron publicados en 1821. Arago fue elegido miembro del Bureau des Longitudes tras ello, y contribuyó con sus anuarios astronómicos durante 22 años, dando a conocer importantes aportaciones de Astronomía. *(N. del E.)*

sea en forma elemental, los valores numéricos que en él se hallan. Por esto, en la Astronomía recreativa, como en sus otros libros de la misma serie, el autor no elude los cálculos sencillos, y sólo se preocupa porque sean expuestos en forma elemental y al alcance de quienes han estudiado las matemáticas de la segunda enseñanza. Los ejercicios de este género no sólo consolidan los conocimientos adquiridos, sino que, además, preparan para la lectura de libros más profundos.

En el presente manual se incluyen capítulos referentes a la Tierra, la Luna, los planetas, las estrellas y la gravitación. Por otra parte, el autor ha dado preferencia a temas que habitualmente no se exponen en las obras de divulgación: Los temas no tratados en este manual piensa desarrollarlos el autor, a su tiempo, en un segundo libro de Astronomía recreativa. Por lo demás, las obras de este género no se proponen agotar en forma sistemática el riquísimo contenido de la astronomía contemporánea.

Nota preliminar

El libro de Y. I. Perelman pone al lector en contacto con problemas aislados de la astronomía, con sus maravillosos progresos científicos, y describe en forma seductora los fenómenos más importantes del cielo estrellado. El autor trata muchos fenómenos habituales, de observación diaria, desde un punto de vista totalmente nuevo e inesperado, y revela su verdadera esencia.

El propósito del libro es desplegar ante el lector el inmenso cuadro del espacio sideral y los hechos notables que en él tienen lugar, y despertar interés hacia una de las ciencias más cautivadoras, la ciencia del firmamento.

Y. I. Perelman murió en 1942, durante el sitio de Leningrado, y no tuvo tiempo de llevar a cabo su propósito de escribir una continuación de este libro.

Capítulo 1

La tierra, su forma y movimientos

Contenido:

19. ¿Dónde comienzan los meses y los años?

20. ¿Cuántos Viernes hay en febrero?

1. El camino más corto: en la Tierra y en el mapa

La maestra dibuja con tiza dos puntos en la pizarra. Le pregunta a un pequeño alumno que hay frente a ella si sabe cuál es la distancia más corta entre esos dos puntos.

El chico vacila un momento y después dibuja con cuidado una línea curva.

— ¿Ese es el camino más corto? —le pregunta la maestra sorprendida.— ¿Quién te lo enseñó?

— Mi Papá. Es taxista.

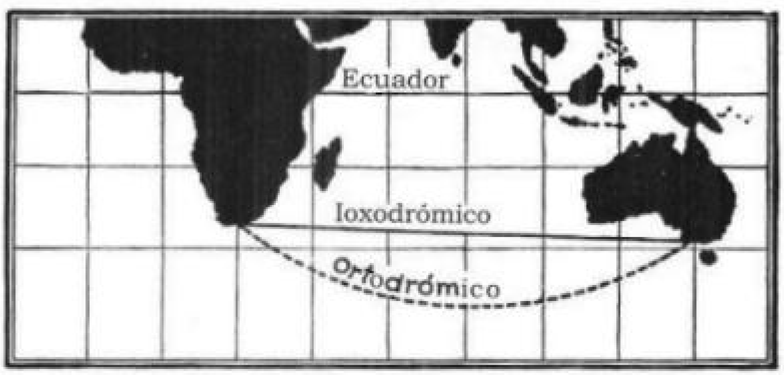


Figura 1. Las cartas náuticas no designan el camino más corto del Cabo de Buena Esperanza a la punta sur de Australia por una línea recta ("loxodrómica") sino por una curva ("ortodrómica").

El relato sobre el dibujo del ingenuo colegial es, por supuesto, un chiste. ¡Pero supongo que también sonreirás con incredulidad, cuando te digan que la línea discontinua y arqueada de la Fig. 1 representa el camino más corto desde el Cabo de Buena Esperanza hasta la punta sur de Australia!

¡Te asombrarás aún más, al saber que el camino más corto desde Japón hasta el Canal de Panamá, es la línea curva que se muestra en la Fig. 2, y no la línea recta entre estos dos lugares trazada en el mismo mapa!

Podrás pensar que se trata de un chiste, pero lo antedicho es totalmente cierto, hecho que todos los cartógrafos atestiguarían.

Para dejar las cosas claras debemos decir unas palabras sobre los mapas en general y sobre las cartas náuticas en particular. No resulta fácil dibujar una sección de la superficie de la Tierra, porque esta tiene forma esférica.

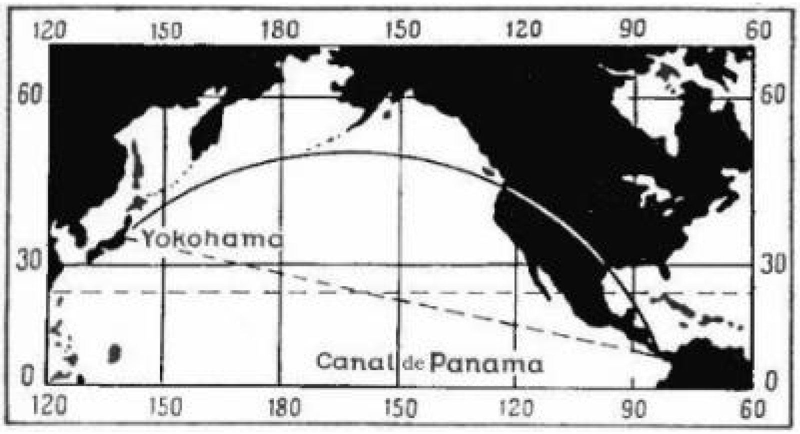


Figura 2. Parece increíble que la curva que une Yokohama con el Canal de Panamá es más corta en la carta náutica que la línea recta entre estos dos puntos.

Nos guste o no tenemos que aceptar las inevitables distorsiones cartográficas. Se han desarrollado muchos métodos para trazar los mapas, pero todos presentan defectos en un sentido u otro.

Los marinos usan mapas trazados al modo de Mercator[2], cartógrafo y matemático flamenco del siglo XVI. Este método se conoce como la Proyección de Mercator. Las cartas marinas se reconocen fácilmente por su red de líneas entrelazadas; tanto meridianos como paralelos y latitudes, se indican con líneas rectas; paralelos y latitudes son horizontales y forman ángulos rectos con los meridianos cuyo trazo es vertical[3].

Imagina que ahora debes encontrar la ruta más corta entre un puerto y otro, ambos situados sobre el mismo paralelo. Podrás navegar en el mar en cualquier dirección, siempre que sepas hallar el camino más corto. Quizás pienses que viajas por el camino más corto, navegando sobre el paralelo que une ambos puertos, una línea

---

2 Gerardus Mercator (1512-1594), conocido como Mercator o Gerardo Mercator. Cartógrafo flamenco, famoso por idear la llamada proyección de Mercator, - esta consiste en representar la superficie esférica de la Tierra sobre una superficie cilíndrica, tangente al ecuador, que al desplegarse genera un mapa terrestre plano-. (N. del E.)

3 Los Meridianos son los círculos máximos que pasan por los polos; en los mapas se representan por líneas verticales, paralelas entre sí. Los Paralelos son círculos paralelos al ecuador; en los mapas se representan por líneas horizontales, paralelas entre sí. La Latitud es el ángulo entre un paralelo y el ecuador –en los mapas las líneas de latitud se representan por líneas rectas horizontales, paralelas al ecuador-. (N. del E.)

recta en nuestro mapa. Después de todo, que puede ser más corto que una línea recta. Pero cometes un error; la ruta a lo largo del paralelo no es la más corta. De hecho, el camino más corto entre dos puntos sobre la superficie de una pelota, es el arco de confluencia del círculo máximo[4]. Sin embargo, la latitud es un círculo menor. El arco del círculo máximo es menos curvado que el arco de cualquier círculo menor que pase por esos dos puntos; el radio más grande pertenece a la curva más pequeña. Coge un trozo de hilo y estíralo a través del globo entre los dos puntos que hayas elegido (ver Figura 3): notarás que no sigue la línea del paralelo. Nuestro trozo de hilo incuestionablemente nos muestra la ruta más corta, así que si no coincide con el paralelo, lo mismo sucederá en las cartas náuticas, donde los paralelos están indicados como líneas rectas. La ruta más corta no será una línea recta, así que solo puede ser una línea curva.

Figura 3. Una manera simple de encontrar el camino más corto entre dos puntos es estirar un trozo de hilo entre los puntos dados en un globo.

Según nos cuenta la historia, los ingenieros no conseguían ponerse de acuerdo para elegir una ruta para el ferrocarril entre San Petersburgo y Moscú. El Zar Nicolás I resolvió la situación dibujando una línea recta entre los dos puntos. Si se hubiera empleado un mapa con la proyección de Mercator, el resultado habría sido

4 "El círculo máximo en una superficie esférica es cualquier círculo cuyo centro coincida con el centro de la esfera. Todos los demás se denominan círculos menores."

embarazoso. La vía férrea hubiera resultado curva y no recta.
Mediante un cálculo simple, se puede ver que una línea curva en un mapa es, de hecho, más corta que una línea recta. Imaginemos que nuestros hipotéticos puertos están en la misma latitud que Leningrado, aproximadamente en el paralelo 60 y separados unos 60º entre sí.
En la Figura 4, el punto O designa el centro del globo y AB el arco de 60º de la línea latitudinal donde se encuentran los puertos A y B. El punto C designa el centro de ese círculo latitudinal.

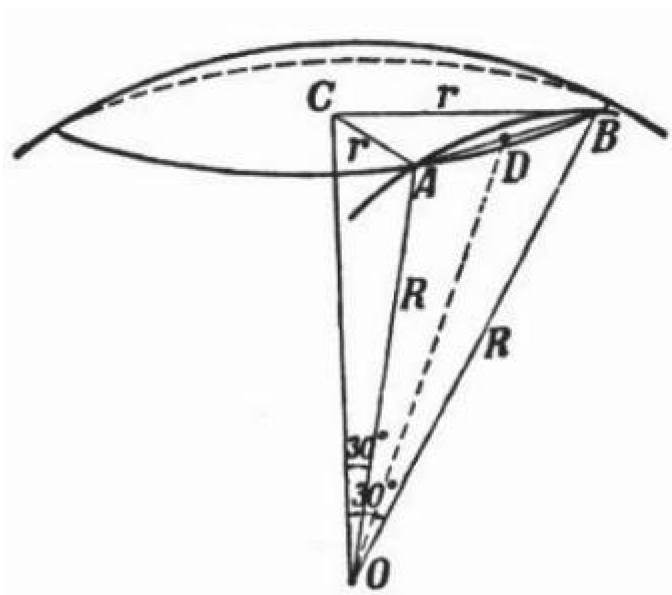


Figura 4. Cómo calcular las distancias entre los puntos A y B de una esfera, a lo largo de los arcos del paralelo y el círculo máximo.

Al dibujar a través de los dos puertos un gran arco del círculo imaginario con su centro en *O*, el centro del globo, su radio resulta *OA* = *OB* = *R*, aunque no coincida exactamente con el arco *AB*, su valor será bastante aproximado.
Calculamos ahora la longitud de cada arco. Como los puntos *A* y *B* están a 60º de latitud, los radios *OA* y *OB* forman un ángulo de 30º con *OC*, siendo este último el eje terrestre imaginario. En el triángulo rectángulo *ACO*, el lado *CA* (= *r*), adyacente al ángulo recto y opuesto al ángulo de 30º, es igual a la mitad de la hipotenusa *AO*, de modo que *r* = *R*/2.
Como la longitud del arco *AB* es una sexta parte de la longitud del círculo latitudinal,

esa longitud es la siguiente:

$$AB = \frac{1}{6}\,\frac{40.000}{2} = 3.333\ kilómetros$$

Para determinar la longitud del arco del mayor de los círculos, debemos encontrar el valor de ángulo *AOB*.

Como la cuerda del arco *AB*, es el lado de un triángulo equilátero inscrito en el mismo pequeño círculo, *AB* = *r* = *R*/2. Si dibujamos una línea recta *OD*, uniendo el punto *O*, el centro del globo, con el punto medio *D*, de la cuerda del arco *AB*, obtenemos el triángulo rectángulo *ODA*.

Si *DA* es ½ *AB* y *OA* es *R*, entonces el seno ∠*AOD* = *AD* ÷ *AO* = *R*/4 ÷ *R* = 0,25.

Encontramos (de las tablas trigonométricas) que ∠*AOD* = 14º 28′ 40″ y que ∠*AOB* = 28º 57′.

Ahora será fácil encontrar el camino más corto, tomando la longitud de un minuto del gran círculo del globo como una milla náutica[5], más o menos 1,85 kilómetros. Por lo tanto,

$$28^{o}\ 57' = 1.737' \approx 3.213\ \text{km.}$$

De este modo hemos encontrado que la ruta a lo largo del círculo latitudinal, indicada en las cartas náuticas mediante una línea recta, es de 3.333 km., mientras que la ruta a lo largo del círculo máximo, una línea curva en el mapa, es de 3.213 km., es decir que la trayectoria curva es 120 km. más corta que la trayectoria recta sobre el mapa.

---

5 La milla náutica, también llamada milla marítima, se introdujo en la náutica hace siglos, y fue adoptada, con ligeras variaciones, por todos los países occidentales, siendo definida como la longitud de un arco de 1′ de meridiano terrestre. Una milla náutica equivale a 1.852 m. (1,852 km). Todavía la emplean todos los navegantes del mundo, incluso los que están acostumbrados al sistema métrico. Se emplea igualmente para navegación aérea.

No debe confundirse la milla náutica con la milla terrestre. Esta última es una unidad de longitud que no forma parte del sistema métrico decimal. De origen muy antiguo, fue heredada de la Antigua Roma y equivalía a la distancia recorrida con mil pasos, siendo un paso la longitud el avance de un pie al caminar -el doble de lo que ahora se considera un paso-. La milla romana medía unos 1.480 m, y por tanto, un paso simple era de unos 73 cm (N. del E.)

Con un trozo de hilo y un globo terrestre de escuela, podrás comprobar que nuestros dibujos son correctos y verás que los arcos de circunferencia son iguales a los que hemos mostrado. La ruta marítima "recta", trazada en la Figura 1, desde África hasta Australia, es de 6.020 millas, en tanto que la ruta curva es de sólo 5.450, es decir, que esta última mide unas 570 millas (1.050 km.) menos que la primera.

En la carta de navegación la línea aérea "recta" que une Londres con Shangai pasa a través del Mar Caspio, teniendo en cuenta que el camino más corto es el norte de Leningrado. Podemos imaginar cuán importante resulta la elección de la trayectoria curva y no la recta, desde el punto de vista de ahorro de tiempo y combustible.

En la era de los grandes veleros, el hombre no apreciaba la relación entre el tiempo y el dinero. Sin embargo, con la llegada del buque de vapor, cada tonelada extra de carbón que se emplea para mover el barco, se traduce en una pérdida de "dinero". Eso explica por qué los barcos toman el camino más corto, y en lugar de confiar en los mapas de la Proyección de Mercator, se ciñen a los mapas de Proyección "Central"[6] que indican los grandes arcos del círculo mediante líneas rectas. ¿Entonces por qué los marineros de antiguos tiempos usaron esos mapas engañosos y se introdujeron en rutas poco ventajosas? Si crees que los marineros de antiguos tiempos no conocían nada sobre las propiedades específicas de las Cartas de Navegación que acabamos de mencionar, estás en un error. Naturalmente, esa no es la verdadera razón. El caso es que, pese a presentar algunos inconvenientes, los mapas con la Proyección de Mercator poseen varias ventajas para los marineros. En primer lugar, estos mapas conservan los contornos, sin distorsiones, dentro de cada fracción del globo, encerrado entre líneas longitudinales y latitudinales adyacentes. Este resultado no se ve afectado por el hecho de que cuanto mayor es la distancia desde el Ecuador, más alargados son los contornos. En las latitudes altas la distorsión es tan grande que una persona que no conozca los rasgos característicos

---

6 La Proyección de Mercator o Proyección Cartográfica Cilíndrica, proyecta la superficie esférica terrestre sobre una superficie cilíndrica, tangente al ecuador, que al desplegarse genera un mapa terrestre plano. Esta proyección presenta una buena aproximación en su zona central, pero las zonas superior e inferior correspondientes a norte y sur presentan grandes deformaciones.

La Proyección Central o Proyección Cónica Cartográfica se obtiene proyectando los elementos de la superficie esférica terrestre sobre una superficie cónica tangente, tomando el vértice en el eje que une los dos polos. (N. del E.)

de las Cartas de Navegación creerá que Groenlandia es tan grande como África, o Alaska más grande que Australia; realmente Groenlandia es 15 veces más pequeña que África, mientras que Alaska y Groenlandia juntos, no son mayores que la mitad de Australia. Esa persona tendrá por lo tanto, una concepción completamente errónea del tamaño de los diversos continentes. Pero el marinero avezado, al corriente de estas particularidades, no estará en desventaja, porque como ya hemos dicho, dentro de cada pequeña sección del mapa, la Carta de Navegación proporciona un cuadro exacto (Figura 5).

La Carta náutica es un recurso para resolver tareas prácticas de navegación. Es a su modo, el único mapa en el que se indica el verdadero curso recto de un navío, mediante una línea recta. Seguir un curso recto significa mantener la misma dirección, a lo largo del mismo rumbo; en otras palabras, cruzar todos los meridianos con el mismo ángulo.

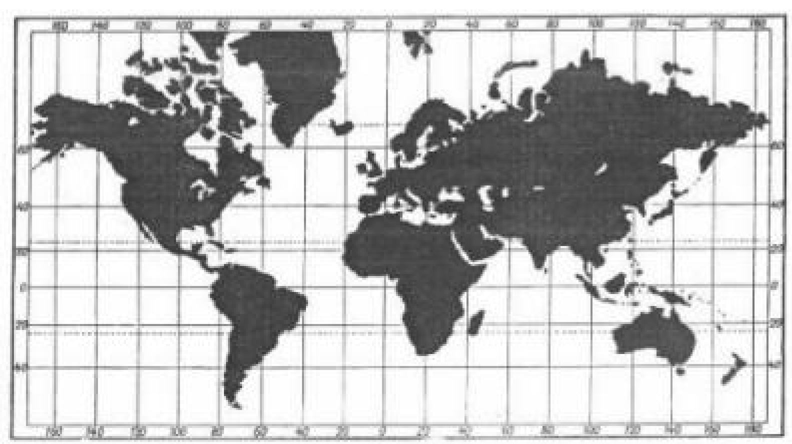


Figura 5. Una carta náutica o proyección de Mercator del mundo. Estos mapas dilatan enormemente los contornos de los territorios alejados del Ecuador. Cuál es más grande: ¿Groenlandia o Australia? (Vea la respuesta en el texto)

Este rumbo, conocido como línea loxodrómica, solo puede indicarse como una línea recta, en un mapa donde los meridianos sean líneas rectas paralelas. Puesto que los meridianos se cruzan con las latitudes en ángulos rectos sobre el globo, este mapa también debe mostrar las latitudes como líneas rectas, perpendiculares a los meridianos.

Ahora entiendes por qué los marineros se sienten tan atraídos por la Proyección de Mercator. Para trazar el rumbo hacia el puerto de destino, el navegante une los puntos de salida y destino con una regla, y calcula el ángulo entre esa línea y el meridiano. Siguiendo este curso en el mar, el navegante llevará su nave infaliblemente a su meta. Por consiguiente, se verá que mientras que el "loxodromo" no es el camino más corto o el modo más económico, en cierto modo, es un rumbo muy conveniente para el marino. Para alcanzar, por ejemplo, el extremo sur de Australia partiendo del Cabo de Buena Esperanza (ver Figura 1), debemos seguir, sin desviaciones, el rumbo S 87º50'. Pero si queremos llegar allí por el camino más corto, conocido como "ortodromo"[7], nos vemos forzados a cambiar el rumbo continuamente, como puede verse en el dibujo, iniciando con rumbo S 42º50' y terminando con rumbo N 53º50' (esto sería intentar lo imposible ya que nuestro rumbo más corto nos llevaría hacia las paredes de hielo del Océano Antártico).

Los dos rumbos, el "loxodrómico", y el "ortodrómico", coinciden con una línea recta cuando el desplazamiento se realiza a lo largo del ecuador o de cualquiera de los meridianos que se indican en el mapa náutico. En los restantes casos siempre divergen.

2. El grado de longitud y el grado de latitud

Pregunta

Doy por sentado, que los lectores estarán al corriente de lo que son la longitud y la latitud geográfica. Pero temo que no todos podrán dar la respuesta correcta a la siguiente pregunta: ¿Es siempre mayor un grado de latitud que un grado de longitud?

Respuesta

La mayoría de las personas cree que cada paralelo es más corto que el meridiano. Como los grados de longitud se miden en los paralelos, y los de latitud, en los meridianos, se deduce que bajo ninguna circunstancia podrá ser el primero más largo que el último.

Pero la gente olvida que la Tierra no es una esfera perfecta, sino un elipsoide, ligeramente combado hacia afuera en el ecuador. En este elipsoide, no sólo el

---

7 Ortodromo: camino más corto que puede seguirse en la Navegación entre dos puntos.

ecuador, sino que también sus paralelos adyacentes son más largos que los meridianos. Según los cálculos, a unos 5º de latitud, los grados de los paralelos, es decir la longitud, resultan más largos que los grados del meridiano, o lo que es lo mismo, la latitud.

3. ¿En qué dirección voló Amundsen?

Pregunta

¿Qué dirección tomó Amundsen cuándo regresó del polo Norte, y cual en la vuelta atrás desde el polo Sur?
Debes responder sin ojear a escondidas el diario de este gran explorador.

Respuesta

El Polo Norte es el punto que se encuentra más al norte del globo terrestre. De modo que por cualquier camino que tomemos desde allí, siempre nos moveremos hacia el sur. En su regreso desde el Polo Norte, Amundsen solo podría ir hacia el sur, no existiendo ninguna otra dirección. A continuación tenemos una sección del diario de su vuelo del polo Norte a bordo del Norge:

> *"El Norge circulaba en las proximidades del Polo Norte. Entonces continuamos nuestro vuelo.... Tomamos dirección al sur por primera vez desde que nuestro dirigible dejó Roma"*

De igual manera, Amundsen sólo podría ir hacia el norte, al regresar del polo Sur. Hay una anécdota bastante antigua sobre el Turco que se encontró en un país del Extremo Oriente. "El Este al frente, Este a la derecha, Este a la izquierda. ¿Y qué hay del Oeste? También tiene el Este a sus espaldas. Para abreviar, por todas partes no hay nada más que un interminable este.
Es imposible encontrar en nuestra Tierra, un país con el Este en todas las direcciones. Pero existe un punto con una sola dirección a su alrededor: el Sur; así mismo, hay un punto en nuestro planeta rodeado por un Norte "sin fin". En el Polo Norte es posible construir una casa cuyas cuatro paredes señalen al sur. De hecho, ésta es una tarea que los exploradores soviéticos al Polo Norte podrían realizar en la

actualidad.

4. Cinco maneras de contar el tiempo

Estamos tan acostumbrados a utilizar los relojes que a veces no nos damos cuenta de la importancia de sus indicaciones. Creo que tengo razón si digo que no muchos lectores sabrán explicar lo que alguien quiere decir cuando afirma: En este momento son las 7 pm.

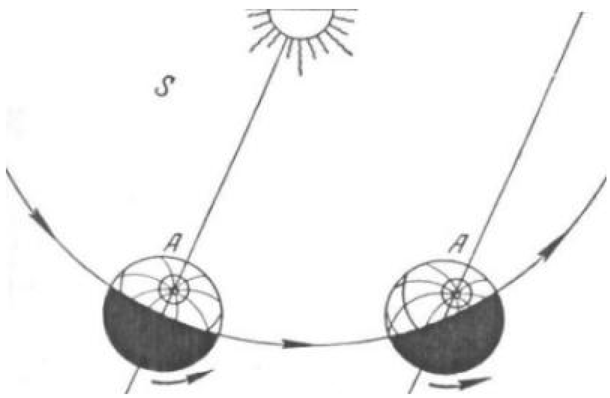


Figura 6. ¿Por qué son los días solares más largos que los días siderales? (Vea el texto para los detalles)

¿Es solo que la manecilla pequeña marca la figura del siete? ¿Y qué significa realmente esta figura? Muestra que después del mediodía, ha pasado una buena parte del día. ¿Pero después de que mediodía y, en primer lugar, buena parte de qué día? ¿Qué es un día? El día es la duración de una rotación completa de nuestra esfera con respecto al Sol. Desde un punto de vista práctico se mide como: dos pasadas sucesivas del Sol (para ser más exacto, de su centro) a través de una línea imaginaria en el cielo que conecta el punto que se encuentra directamente en lo alto, el cenit, con el punto sur del horizonte. La duración varía con el cruce del Sol por esta línea, un poco más temprano o más tarde. Es imposible poner un reloj a funcionar con este "mediodía verdadero". Ni siquiera el artesano más experimentado puede hacer un reloj que mantenga el tiempo en concordancia con el Sol; es demasiado inexacto. "El Sol muestra un tiempo equivocado" era hace un siglo el lema de los relojeros de París.

Nuestros relojes no son fijos al Sol real sino que funcionan con relación a un Sol ficticio que ni brilla ni calienta, pero que se ha inventado con el único propósito de evaluar el tiempo correctamente. Imagina que un cuerpo celeste cuyo movimiento a lo largo del año es constante, tarda exactamente el mismo período de tiempo que el Sol real en pasar por la Tierra. En Astronomía este cuerpo ficticio se conoce como el Sol Medio. El momento en que cruza la línea Cenit — Sur, se llama mediodía medio, el intervalo entre dos mediodías medios se conoce como el día solar medio; el tiempo así medido se denomina tiempo solar medio. Nuestros relojes se regulan según este tiempo solar medio. El reloj de Sol, sin embargo, muestra el verdadero tiempo solar por la situación que presenta la sombra del Sol.

De todo lo antedicho, el lector podrá pensar que el globo gira irregularmente alrededor de su eje, y que a esto obedece la variación en la longitud del verdadero día solar. De afirmar esto cometerá una equivocación, ya que esta variación se debe al desnivel de otro de los movimientos de la Tierra en su viaje alrededor del Sol. Si el lector medita un poco, verá por qué afecta esta variación la longitud del día. Regresa a la Figura 6. Allí verás dos posiciones sucesivas del globo.

Primero la posición izquierda. La flecha inferior derecha muestra la dirección de la rotación de la Tierra, en sentido contrario a las aguas del reloj, si lo observamos desde el Polo Norte. En el punto A es ahora mediodía; este punto está directamente opuesto al Sol.

Imagina ahora que la Tierra ha efectuado una rotación completa; en este tiempo se ha desplazado hacia la derecha alcanzando la segunda posición. El radio de la Tierra con respecto al punto A es el mismo que el día anterior, pero por otro lado, el punto A ya no se encuentra directamente frente al Sol. No es mediodía para nadie en el punto A; desde que el Sol se aparta de la línea Cenit — Sur, la Tierra tiene que girar unos minutos más para que el mediodía alcance el punto A.

¿Qué implica esto entonces? Que el intervalo entre dos mediodías solares verdaderos es más largo que el tiempo que necesita la Tierra para completar un movimiento de rotación.[8]

La Tierra viaja alrededor del Sol a lo largo de una órbita circular, con el Sol en el centro, de modo que la diferencia entre el período real de rotación y el que nosotros

8 Las diferencias anuales entre el mediodía Solar verdadero y el mediodía Solar medio se representan en una curva, denominada Ecuación del Tiempo. Esta ecuación se suele dar en tablas referidas a cada lugar en función de su latitud y de la fecha. (N. del E.)

suponemos con respecto al Sol, es constante todos los días, sin excepción. Esto se comprende fácilmente, si se tiene en cuenta el hecho de que estas pequeñas fracciones de tiempo, suman en el curso de un año, un día entero (en su movimiento orbital la Tierra realiza una rotación extra al año); por consiguiente la duración real de cada rotación es igual a:

$$365\ \tfrac{1}{4} \text{ días} \div 366\ \tfrac{1}{4} = 23 \text{ hrs. } 56 \text{ min. } 4 \text{ seg.}$$

A propósito, deberíamos notar que la longitud "real" de un día simplemente es el período de rotación de la Tierra con relación a cualquier estrella: de aquí el término de día "sideral."[9]

Así que el día sideral, en promedio, es 3 min. 56 seg., o sea, unos cuatro minutos más corto que el día solar. La diferencia no es uniforme, en primer lugar, porque la órbita de la Tierra alrededor del Sol no es circular sino elíptica; la Tierra efectúa un movimiento con velocidad variable, más rápido cuando se encuentra más cerca del Sol, y más lento cuando se halla más lejos de éste; y en segundo lugar, porque el eje de rotación de la Tierra está inclinado con respecto a la elíptica[10]. Éstas son las dos razones por las qué en diversas épocas, varían en cuestión de minutos, los días solares verdaderos y los días solares medios, alcanzando hasta 16 minutos de diferencia en ciertos momentos. Las dos medidas de tiempo solo coinciden cuatro veces al año: el 15 de abril, el 14 de junio, el 1 de septiembre y el 24 de diciembre. Y recíprocamente, se da la máxima diferencia entre ellos, el 11 de febrero y el 2 de noviembre —alcanzando cerca de un cuarto de hora de diferencia—. La curva de la Figura 7, muestra las diferencias en los diferentes momentos del año.

Antes de 1919, las personas de la URSS ajustaban sus relojes con relación al tiempo solar local.

En cada meridiano existía un tiempo diferente (el mediodía "local"), de modo que cada población tenía su propio tiempo local; los itinerarios de tren se regían por la

---

9 Un día, es el lapso que tarda la Tierra desde que el Sol está en el punto más alto sobre el horizonte hasta que vuelve a estarlo. Dependiendo de la referencia que se use para medir un giro, se habla de tiempo Solar o de tiempo sideral. El primero toma como referencia al Sol y el segundo toma como referencia a las estrellas-. Cuando se hace referencia a un "día", se entiende como un día Solar medio. (N. del E.)

10 Se denomina elíptica a la órbita que sigue un astro que gira alrededor de otro, describiendo una elipse. El astro central se sitúa en uno de los focos de la elipse. A este tipo pertenecen las órbitas de los planetas del Sistema Solar. (N. del E.)

hora de Petrogrado, y ésta se estableció como hora estándar para todo el país.

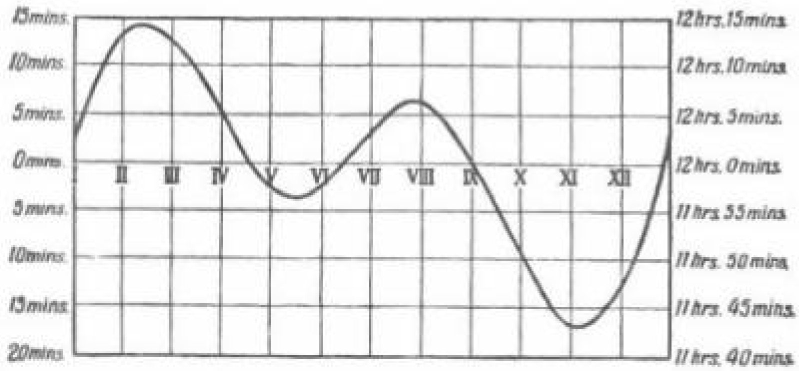


Figura 7. Este mapa, conocido como "mapa de ecuación de tiempo", muestra las diferencias entre el verdadero mediodía solar y el mediodía solar medio, en cada día del año. Por ejemplo, el 1 de abril, al mediodía verdadero, un reloj que mida el tiempo con exactitud, debe mostrar las 12:05.

Por esta razón, los residentes urbanos establecieron dos tiempos distintos, el "tiempo del pueblo" y "el tiempo del ferrocarril", siendo el primero de éstos el tiempo medio solar de cada localidad, es decir, el que indicaba el reloj de cada lugar, y siendo el último, el de Petrogrado, es decir, el tiempo medio solar que mostraban los relojes de todas las estaciones ferroviarias, correspondiente a la hora estándar de la URSS. Hoy en día los itinerarios ferroviarios en la URSS se rigen por la hora de Moscú.

Desde 1919 el control horario en la URSS no se basa en el tiempo local, sino en el tiempo zonal. Los meridianos dividen el globo en 24 zonas iguales, de modo que las localidades ubicadas dentro de cada zona, tienen la misma hora.

Así que hoy en día, el globo tiene simultáneamente 24 horas diferentes, y no la legión de horarios que existía antes de que se introdujera el tiempo zonal.

A estas tres maneras de contar el tiempo:

1. el tiempo solar verdadero,
2. el tiempo solar medio local, y
3. el tiempo zonal

debemos agregar una cuarta, usada solamente por los astrónomos, el tiempo "sideral", basado en el antes comentado, día sideral, que como ya sabemos, es unos cuatro minutos más corto que el día solar medio. El 22 de septiembre coinciden el tiempo sideral y solar. A partir de esta fecha, el primero salta diariamente cuatro minutos hacia adelante.

Finalmente, hay una quinta forma de contar el tiempo, conocida como tiempo de verano, empleada durante todo el año en la URSS, y en verano, en la mayoría de países europeos.

El tiempo de verano se ubica exactamente una hora antes del tiempo zonal. Este tiempo permite hacer ahorro en el combustible empleado en la iluminación artificial, al empezar y acabar el día laboral más pronto, durante el periodo más luminoso del año, entre primavera y otoño. En el Oeste, se utiliza todas las primaveras, a la una am la manecilla horaria se mueve a las dos, mientras en otoño el movimiento de la manecilla se invierte.

En la URSS, los relojes han estado adelantados durante el ciclo anual, verano e invierno.

Aunque esto no permite ahorrar más electricidad, asegura un trabajo más rítmico en las fábricas.

El tiempo de verano se introdujo por primera vez en la Unión Soviética en 1917[11]; durante algún tiempo los relojes estuvieron adelantados dos e incluso tres horas. Tras un descanso de varios años, durante la primavera de 1930, se decretó nuevamente el tiempo de verano en la URSS y esto significa estar una hora por delante del tiempo zonal[12].

---

11 En función de los cálculos hechos por el propio autor.

12 En 1928 se estableció como referencia para los tiempos el GMT, hora en el meridiano de Greenwich; hoy se emplea otra forma de medida llamada UTC, Hora Universal Coordinada y, en el contexto de la aviación se conoce como hora zulú (Hora “Zero”).

Ahora bien, esa hora no es la misma en todos los países del mundo. La Tierra se dividió en una serie de 24 partes o husos horarios en los cuales la hora legal es diferente a la GMT. Hacia el oeste, la hora legal disminuye, y hacia el este, aumenta.

En aviación, para llevar un seguimiento más coordinado de los vuelos se trabaja con la hora zulú, es decir, tanto pilotos como torres de control utilizan la hora universal, UTC, para operar con una medida del tiempo común y no depender de la hora de cada país.

El Tiempo Universal Coordinado, o UTC, también conocido como tiempo civil, es el tiempo de la zona horaria de referencia respecto a la cual se calculan todas las otras zonas del mundo. Es el sucesor del GMT (Greenwich Mean Time: tiempo promedio del Observatorio de Greenwich, en Londres) aunque algunas veces se le denomina así. La nueva denominación fue acuñada para eliminar la inclusión de una ubicación específica en un estándar internacional, así como para basar la medida del tiempo en los estándares atómicos, más que en los

5. La duración de la luz diurna

Para efectuar un cálculo exacto de la duración de la luz diurna en cualquier parte del mundo y en cualquier día del año, uno debe referirse a las tablas apropiadas en un almanaque astronómico. Pero seguramente el lector no necesita tal nivel de exactitud; para realizar un cálculo rápido y correcto le bastará con referirse a la tabla mostrada en la Figura 8.

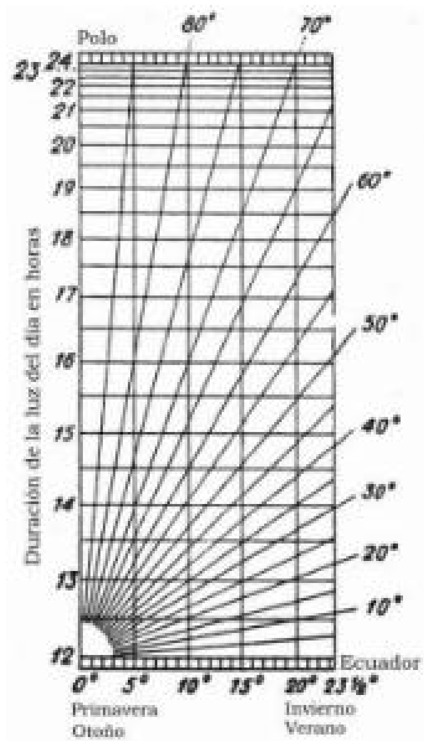


Figura 8. Una tabla de duración de la luz diurna. (vea el texto para los detalles)

A la izquierda se indica la luz del día, en horas. En la base se tiene la "declinación" solar, ángulo en grados, que forma el Sol con el ecuador celeste. Por último, las líneas que cortan el dibujo, corresponden a las diferentes latitudes de observación.

Para usar el dibujo debemos conocer la distancia angular del Sol ("declinación") con respecto al ecuador para los diferentes días del año. (Ver la tabla mostrada a continuación)

---

celestes.

A diferencia del GMT, el UTC no se define por el Sol o las estrellas, sino que se mide por los relojes atómicos. (N. del E.)

Día del año	**Declin. del Sol (°)**	**Día del año**	**Declin. del Sol (°)**
21 enero	— 20	24 julio	+20
8 febrero	— 15	12 agosto	+15
23 febrero	— 10	28 agosto	+10
8 marzo	— 5	10 septiembre	+ 5
21 marzo	0	23 septiembre	0
4 abril	+ 5	6 octubre	— 5
16 abril	+10	20 octubre	— 10
1 mayo	+15	3 noviembre	— 15
21 mayo	+20	22 noviembre	— 20
23 junio	+23,5	22 diciembre	— 23,5

Veamos cómo se emplea, mediante algunos ejemplos.

1) Hallar la duración de la luz diurna a mediados de abril, en Leningrado (latitud 60°).

La tabla nos da la declinación del Sol a mediados de abril como + 10º, (es decir, su distancia angular con respecto al ecuador celeste en este momento específico). Ahora encontramos la marca correspondiente a los 10º en la base de nuestro gráfico y trazamos una línea perpendicular que corte la línea que corresponde al paralelo 60. Una vez obtenido el punto de intersección entre ambas líneas nos dirigimos hacia la izquierda del gráfico para encontrar que el punto de intersección se corresponde con el valor 14 ½, lo que significa que la duración de la luz diurna que buscamos es aproximadamente 14 hrs. 30 min. Decimos "aproximadamente", ya que el dibujo no tiene en cuenta el efecto de la "refracción atmosférica" (ver Figura 15).

2) Encontrar la duración de la luz del día durante el 10 de noviembre en Astrakán (46° Latitud Norte.).

La declinación del Sol durante el 10 de noviembre es — 17º (está ahora en el Hemisferio Sur). Aplicando el método anterior encontramos una duración de 14 horas y media. Sin embargo, debido al estado actual de la declinación, el valor obtenido implica la duración, no de luz del día, sino de la oscuridad nocturna. Así que tendremos que restar 14 ½ a 24 y así obtenemos que la luz del día dura 9 horas y media.

De este modo, también podemos calcular el tiempo de salida del Sol. Dividiendo las 9 ½ horas entre dos, obtenemos 4 horas y 45 minutos. De la Figura 7 sabemos que para el mediodía verdadero, el 10 de noviembre, el reloj mostrará las 11 y 43 minutos. Para encontrar la salida del Sol restaremos 4 horas y 45 minutos, y determinaremos que el Sol subirá a las 6 y 58 minutos.

El ocaso, por otro lado, lo obtendremos del siguiente cálculo. 11 horas y 43 minutos + 4 horas y 45 minutos = 16 horas y 28 minutos, es decir, a las 4 y 28 p.m.

Usando este método, se puede generar un gráfico de la salida y puesta del Sol durante un año entero para una latitud determinada. En la Fig. 9 se presenta un ejemplo para el paralelo 50, dando también la duración de la luz del día. Un cálculo meticuloso te ayudará a dibujar un mapa similar acorde a tus requerimientos.

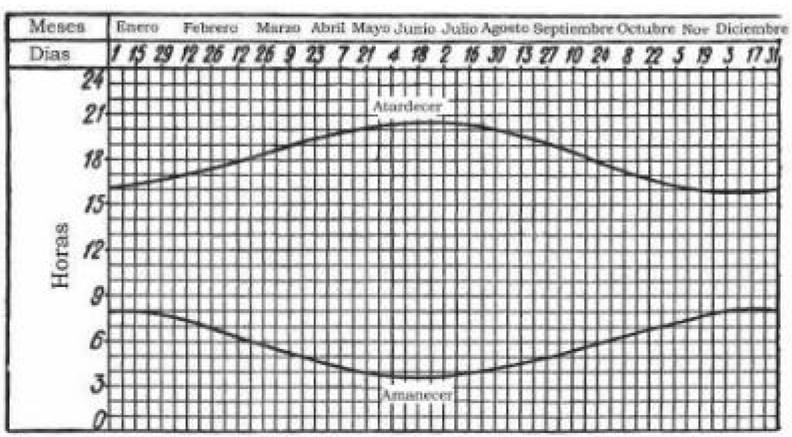


Figura 9. Un mapa anual para la salida y ocaso del Sol en el paralelo 50.

Habiendo hecho esto, echando un vistazo rápido a tu gráfico, podrás decir, la hora aproximada de salida del Sol o del ocaso, en cualquier día dado.

6. Sombras extraordinarias

La Fig. 10 puede resultarte bastante extraña. El marinero que está de pie bajo la intensa luz del Sol, prácticamente carece de sombra.

No obstante, ésta es una imagen real, no realizada en nuestras latitudes, sino en el ecuador, cuando el Sol se encontraba casi en lo más alto, en lo que se conoce como el "cenit".

En nuestras latitudes el Sol nunca alcanza el cenit, por lo que una imagen como la de la Figura 10 queda fuera de tema.

Figura 10. Casi sin sombra. El dibujo reproduce una fotografía tomada cerca del Ecuador

En nuestras latitudes, cuando el Sol de mediodía alcanza lo más alto el 22 de junio, encontraremos el cenit en el límite norte de la zona tórrida, en los 23º 1/2 Latitud Norte (el Trópico de Cáncer). Seis meses después, el 22 de diciembre, el cenit se encontrará en los 23º 1/2 Latitud Sur (el Trópico de Capricornio).

Entre estos límites, en los trópicos, el Sol del mediodía alcanza el cenit dos veces por año, brillando de modo tal que no produce sombras, o para ser más exacto, coloca las sombras justamente debajo de los cuerpos que ilumina. La Fig. 11 traslada este efecto a los Polos.

Aunque se trata de una imagen fantástica, a diferencia de la situación anterior, no obstante resulta bastante instructiva. Un hombre no puede tener, por supuesto, la sombra en seis lugares diferentes.

Figura 11. En el Polo las sombras son de la misma longitud alrededor del reloj.

El artista pretende mostrar de forma llamativa, la singular característica del Sol Polar, que permite que las sombras tengan exactamente la misma longitud alrededor del reloj. Esto se debe a que en los Polos el Sol no se inclina hacia el horizonte a medida que avanza el día, como lo hace en nuestras latitudes, sino que toma un camino casi paralelo al horizonte. De todos modos, el artista se equivoca, al mostrar una sombra demasiado corta en comparación con la altura del hombre. Para que esto fuera así, el Sol debería encontrarse sobre los 40º, algo que es imposible en los Polos, donde el Sol nunca brilla por encima de los 23º 1/2. El lector con conocimientos de trigonometría puede comprobar con sus cálculos, que la sombra más corta en los Polos tiene por lo menos 2,3 veces la altura del objeto que desarrolla esa sombra.

7. El problema de los dos trenes

Pregunta

Dos trenes totalmente idénticos que viajan a la misma velocidad se cruzan viniendo de direcciones opuestas, uno va hacia el oeste y el otro hacia el este. ¿Cuál de los dos es el más pesado?

Respuesta

El más pesado de los dos trenes, es decir el que más presión ofrece sobre la vía, es el tren que se desplaza en sentido contrario a la dirección de rotación de la Tierra, es decir, el tren que se mueve hacia el oeste.

Figura 12. El problema de los dos trenes.

Al moverse lentamente alrededor del eje de la Tierra, debido al efecto centrífugo, pierde menos peso que el expreso que se dirige hacia el este.

¿Qué tan grande es la diferencia? Tomaremos dos trenes que viajan sobre el paralelo 60, a 72 kilómetros por hora, o sea a 20 metros por segundo. La Tierra se mueve alrededor de su eje, en ese paralelo, a una velocidad de 230 metros por segundo.

Por lo tanto el expreso que se desplaza hacia el este tiene una velocidad total de 230 + 20 m/s, es decir, de 250 m/s, y el que se desplaza hacia el oeste, tiene una velocidad de 230 — 20 m/s, es decir, de 210 m/s. La aceleración centrífuga para el primer tren será:

$$a_{c1} = \frac{V_1^2}{R} = \frac{25.000^2}{320.000.000}\ cm/seg^2$$

Teniendo en cuenta que el radio de la circunferencia en el paralelo 60, es de 3.200 km.

Para el segundo tren la aceleración centrífuga sería:

$$a_{c2} = \frac{V_2^2}{R} = \frac{21.000^2}{320.000.000}\ cm/seg^2$$

La diferencia en el valor de aceleración centrífuga entre los dos trenes es:

$$\frac{V_2^2 - V_1^2}{R} = \frac{25.000^2 - 21.000^2}{320.000.000}\ cm/seg^2$$

Puesto que la dirección de la aceleración centrífuga forma un ángulo de 60º respecto a la dirección de la gravedad, sólo tendremos en cuenta la componente tangencial a la superficie terrestre, de esa aceleración centrífuga, o sea:

0,6 cm/s^2 $\times$ cos 60º, que es igual a 0,3 cm/s^2.

Esto da una fracción de la aceleración de la gravedad igual a 0,3/980, aproximadamente 0,0003.

Por consiguiente el tren que se dirige al este es más ligero que el que va al oeste en una fracción igual a 0,0003 de su peso. Supongamos, por ejemplo, que cada tren está conformado por 45 vagones cargados, es decir unas 3.500 toneladas métricas. Entonces la diferencia de peso sería 3.500 $\times$ 0,0003 = 1,05 kg.

Para un tren de 20.000 toneladas, que se desplaza a una velocidad de 34 kilómetros por hora (20 nudos), se obtienen 3 toneladas de diferencia. De este modo, la disminución en el peso del tren que se dirige al este, también se reflejaría en el barómetro; en el caso anterior, el mercurio sería 0,00015 $\times$ 760, ó, 0,1 mm más bajo en el tren que se dirige hacia el este. Un ciudadano de Leningrado que camina en dirección al este a una velocidad de 5 km/h, se vuelve aproximadamente 1 gramo y medio más liviano que si se desplazara en la dirección opuesta.

8. El reloj de bolsillo como brújula

Muchas personas saben encontrar un rumbo en un día soleado usando un reloj. Se coloca la esfera de modo que la manecilla horaria apunte hacia el Sol. Entonces se divide en dos partes el ángulo formado por esta manecilla y la línea que separa las

12 de las 6. La bisectriz indica el sur. No es difícil entender por qué. Considerando que el Sol tarda 24 horas en cruzar su camino completo en los cielos, la manecilla que marca la hora se desplaza por nuestro reloj en la mitad el tiempo, en 12 horas, o dobla el arco en el mismo tiempo. De hecho, si al mediodía la manecilla de la hora indica el Sol, después lo habrá dejado atrás y habrá doblado el arco. De este modo, sólo tenemos que bisecar este arco para encontrar donde se encontraba el Sol a mediodía, o en otros términos, la dirección sur (Fig. 13).

La comprobación nos mostrará que este método es bastante impreciso, dando incluso a veces, desviaciones de una docena de grados. Para entender por qué, examinaremos el método propuesto.

La razón principal para la inexactitud es que el reloj, la cara que ponemos boca arriba, se sostiene paralela al plano horizontal, considerando que el Sol en su paso diario sólo toca ese plano en los Polos. Por otra parte, su trayectoria cae angularmente en relación con el plano, alcanzando 90º en el ecuador. Por esta razón, el reloj sólo da el rumbo exacto en los polos; en los demás lugares, es inevitable una desviación mayor o menor. Miremos el dibujo (Fig. 14, a).

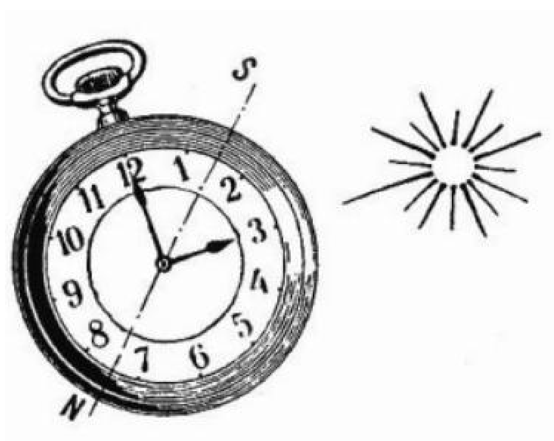


Figura 13. Una manera simple pero inexacta de encontrar los puntos de la brújula con la ayuda de un reloj de bolsillo.

Supongamos que nuestro observador se encuentra en M. El punto N indica el polo, y el círculo HASNRBQ que representa el meridiano celeste, pasa a través del cenit del observador y del polo.

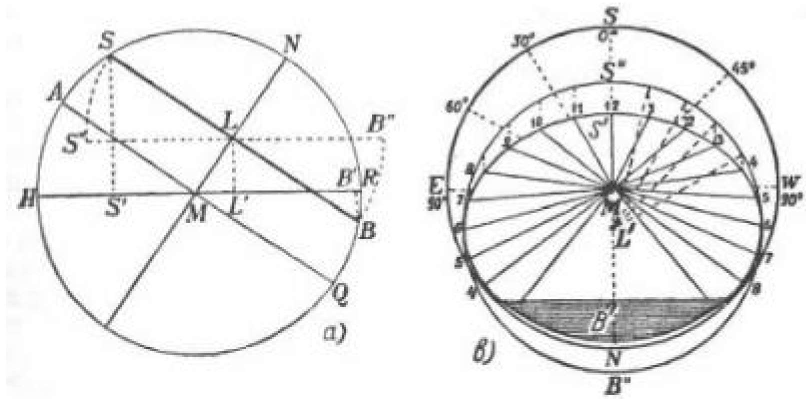


Figura 14. a y b. Por qué el reloj es inexacto, cuando se emplea como brújula.

El paralelo del observador puede determinarse fácilmente: la medida de la prolongación de la altura del polo sobre el horizonte NR, es igual a la latitud del punto en el que se ubica el observador. Dirigiendo su mirada en dirección del punto H, el observador, situado en M, estará mirando al sur. El dibujo muestra el desplazamiento del Sol, durante un día completo, como una línea recta; la parte ubicada sobre el horizonte corresponde a la posición del Sol durante el día, mientras que la otra parte, ubicada por debajo del horizonte, corresponde a la posición del Sol durante la noche. La línea recta AQ indica el paso del Sol en los equinoccios, cuando el día y la noche tienen la misma duración. SB, paralelo a AQ, corresponde al paso del Sol en Verano, la mayor parte del tiempo se encuentra por encima del horizonte (día de verano), y sólo una pequeña parte quedan por debajo de éste (corresponde a lo que se conoce como noches cortas de verano). El Sol cruza 1/24 parte de la circunferencia cada hora, o 360º/24 =15º.

No obstante, a las tres de la tarde, el Sol no se encontrará exactamente al Suroeste, como habíamos predicho (15º × 3 = 45º), esta divergencia se debe a que los arcos descritos por el paso del Sol, no son iguales al proyectarlos sobre el plano horizontal.

Para verlo con claridad nos remitimos a la Figura 14, b. Aquí SWNE es el círculo horizontal visto desde el cenit, y la línea recta SN el meridiano celeste. M es la ubicación de nuestro observador, y L el centro del círculo descrito por el Sol al transcurrir un día completo, proyectado sobre el plano horizontal. El círculo real del camino descrito por el Sol, se proyecta formando la elipse S’B’.

Proyectemos ahora las divisiones horarias de SB, la ruta del Sol, sobre el plano horizontal. Para hacer esto, llevamos el círculo SB paralelo al horizonte, a la posición S"B", como se muestra en la Figura 14, a. A continuación, dividamos este círculo en 24 partes equidistantes y proyectemos los puntos hacia el plano horizontal. Dibujemos ahora desde estos puntos divisorios, líneas paralelas a SN que corten la elipse S'B', la cual, si recuerdan, era el círculo descrito por el paso del Sol, proyectado sobre el plano horizontal. Claramente percibiremos, que los arcos obtenidos tienen diferente ancho. A nuestro observador le parecerá esta diferencia mucho mayor, debido a que él no se encuentra en el punto L', centro de la elipse, sino que está ubicado en el punto M, a un lado de L'.

Estimemos ahora el error obtenido al determinar los puntos de la brújula, para nuestra latitud escogida (53º), mediante un reloj en un día de verano. En este momento del año, el Sol sale entre las 3 am y las 4 am. (el límite del segmento sombreado indica la noche). El Sol alcanza el punto E, este (90º), no a las 6 am como muestra nuestro reloj, sino que lo hace a las 7:30 am Alcanzará los 60º, a las 9:30 am. y no a las 8 am., y el punto 30º, a las 11 am. y no a las 10 am. El Sol estará al SW (45º al otro lado del punto S) a la 1:40 pm y no a las 3 pm, y no se encontrará al Oeste (punto W) a las 6 pm sino a las 4:30 pm

Es más, si nos damos cuenta de que nuestro reloj marca la hora de verano, la cual coincide con la hora solar real, el error será aún mayor.

Por lo tanto, aunque se pueda el reloj como una brújula, es poco fiable. Esta brújula improvisada será más precisa en los equinoccios (la ubicación de nuestro observador no será excéntrica) y durante el invierno.

9. Noches "blancas" y días "negros"

A mediados del mes de abril, llega a Leningrado, una temporada de noches "blancas", "crepúsculo transparente" y "brillo sin luna", cuya fantástica luz ha engendrado tantos vuelos de la imaginación poética.

Las blancas noches de Leningrado se asocian estrechamente con la literatura, tanto es así que muchos se muestran propensos a pensar que este particular prodigio, es prerrogativa exclusiva de esta ciudad. Como fenómeno astronómico, las noches "blancas" se presentan en cada punto de una latitud definida.

Pasando de la poesía a la prosa astronómica, aprendemos que la noche "blanca" es la mezcla del crepúsculo y alba. Pushkin definió este fenómeno correctamente como la reunión de dos crepúsculos – la mañana y la tarde.

As tho' to bar the night's intrusion
And keep it out the golden heavens,
Doth twilight hasten for its fusion
With its fellow...[13]

En las latitudes dónde cae el Sol, en su viaje por los cielos, unos 17 ½º bajo el horizonte, el ocaso es seguido casi de inmediato por el alba, dando a la noche escasa media hora, a veces incluso menos.

Este fenómeno no es exclusivo de Leningrado ni de cualquier otro lugar determinado.

Un estudio astronómico muestra el límite de la zona de las noches "blancas", a gran distancia, al sur de Leningrado.

Los moscovitas, también, pueden admirar sus noches "blancas" — entre mediados de mayo y finales de julio. Aunque no tan luminosas como en Leningrado, las noches "blancas" que se presentan en Leningrado, en mayo, se pueden observar en Moscú, durante el mes de junio y a comienzos de julio.

El límite sur de la zona de las noches "blancas" en la Unión Soviética pasa a través de Poltava[14], a 49º latitud norte (66 1/2 — 17 ½º), dónde se presenta una noche "blanca" al año, a saber, el 22 de junio. Al norte de este paralelo, las noches "blancas" son más ligeras y más numerosas; pueden observarse las noches "blancas" en Kuibyshev, Kazan, Pskov, Kirov y Yeniseisk[15]. Pero como todos estos pueblos se encuentran al sur de Leningrado, tienen menos noches "blancas" (antes o después del 22 de junio) y no son tan luminosas. Por otro lado, en Pudozh son más luminosas que en Leningrado, mientras en Arkhangelsk, que está cerca de la

---

13 *Cuando aquellos interrumpen la llegada de la noche*
Y mantienen los cielos dorados,
Los puntos del crepúsculo apresuran su fusión
Unos con otros…

14 Poltava es una ciudad ubicada en Ucrania, país situado al Oeste de Rusia. (N. del E.)

15 Kuibyshev, antes Samara, ciudad al sureste de Rusia. Kazan, capital de la República de Tartaristán; desde el 2.009, ostenta el título de "Tercera Capital de Rusia"; situada al suroeste de Rusia. Pskov, ciudad al noroeste de Rusia, cerca de la frontera con Estonia. Kirov, ciudad ubicada en el centro de la Rusia europea, al oeste de Rusia. Yeniseisk, ciudad situada hacia el sur de Rusia. (N. del E.)

tierra del Sol que nunca se pone, estas son muy brillantes[16]. Las noches "blancas" de Estocolmo son análogas a las de Leningrado.

Cuando el Sol en su punto más bajo, no se inclina por debajo del horizonte sino que lo roza, no solo tenemos la fusión de la salida del Sol y de su ocaso, sino que la luz del día continúa. Esto se observa al norte de los 65º 42', dónde comienza el dominio del Sol de medianoche. Más al norte, en los 67º 24', también podemos dar testimonio de la noche continua, cuando el amanecer y el crepúsculo se funden al mediodía, y no a la medianoche.

Éste es el día "negro", el episodio opuesto a la noche "blanca", aunque su brillo es el mismo.

La tierra de la "oscuridad del mediodía" también es la tierra del "Sol de media noche", sólo que en una época diferente del año. Considerando que el Sol nunca se pone en junio[17], en diciembre, cuando el Sol nunca sube, la oscuridad prevalece durante días.

10. La luz del día y la oscuridad

Las noches "blancas" son prueba clara de que la noción que conservamos desde nuestra niñez sobre la secuencia de las noches y los días, en espacios iguales de tiempo en la Tierra, resulta demasiado facilista. Realmente, la secuencia continua entre la luz del día y la oscuridad es más intrincada y no encaja en el modelo típico del día y la noche. Por esta razón, el mundo en que vivimos se puede dividir en cinco zonas, cada una con sus propias variaciones entre la luz diurna y la oscuridad.

La primera zona, exterior al ecuador en cualquier dirección, se extiende hasta los paralelos 49. Aquí, y solo aquí, se da un día completo y una noche completa cada 24 horas.

La segunda zona, entre el paralelo 49 y el 65 ½, abarca el conjunto de la Unión Soviética, el norte de Poltava, tiene un crepúsculo continuo alrededor del solsticio de verano[18]. Esta es la zona de las noches "blancas."

---

16 Pudozh. Ciudad en la República de Karelia, cerca de la frontera con Finlandia. Arkhangelsk o Arcángel, ciudad al norte de la Rusia Europea. Se encuentra sobre el círculo polar ártico. (N. del E.)

17 Sobre la Bahía de Ambarchik, el Sol no se pone del 19 de mayo al 26 de julio y en la proximidad de la Bahía de Tixi del 12 de mayo al 1 de agosto.

18 Los Solsticios son aquellos momentos del año en los que el Sol alcanza su máxima posición meridional o boreal, es decir, una máxima declinación norte (+23º 27') y máxima declinación sur (-23º 27') con respecto al

Dentro de la estrecha tercera banda, entre los paralelos 65 ½ y 67 ½, el Sol no se pone durante varios días alrededor del 22 de junio. Ésta es la tierra del Sol de media noche.

La característica de la cuarta zona, entre 67 ½º y 83 ½º, aparte del día continuo en junio, se presenta la larga noche de diciembre, cuando hay días sin ninguna salida del Sol, y la mañana y el crepúsculo de la tarde duran todo el día. Ésta es la zona de los días "negros."

La quinta y última zona, al norte del paralelo 83 ½, tiene una notable variación entre la luz diurna y la oscuridad. Aquí, la ruptura que producen las noches "blancas" de Leningrado, en la sucesión de días y noches, perturba completamente el orden normal. Los seis meses entre el Verano y el Solsticio de Invierno, del 22 de junio al 22 de diciembre, se pueden dividir en cinco períodos o estaciones. Primero, el día continuo; segundo, los cambios entre el día y el crepúsculo de media noche, sin las noches propiamente dichas (las noches "blancas" de verano en Leningrado, son una ligera imitación de este período); tercero, el crepúsculo continuo, sin noches apropiadas o días en absoluto; cuarto, un crepúsculo continuo que alterna con una verdadera noche alrededor de la medianoche; y quinto y último, oscuridad completa todo el tiempo. En los seis meses siguientes, de diciembre a junio, estos períodos siguen en orden inverso.

Al otro lado del ecuador, en el Hemisferio Sur, se observan los mismos fenómenos, lógicamente, en las latitudes geográficas correspondientes.

Si nunca hemos oído hablar de las noches "blancas" en el "Lejano Sur", es sólo porque el allí reina el océano.

El paralelo en el Hemisferio Sur correspondiente a la latitud de Leningrado no cruza absolutamente nada de tierra; hay agua por todas partes; de modo que sólo los navegantes polares han tenido la oportunidad de admirar las noches "blancas" en el sur.

11. El enigma del Sol polar

Pregunta

Los exploradores polares notan un rasgo curioso de los rayos del Sol en verano, en

---

ecuador celeste. En los días de Solsticio, la longitud del día y la altura del Sol al mediodía son máximas (en el Solsticio de verano) y mínimas (en el Solsticio de invierno) comparadas con cualquier otro día del año. (N. del E.)

las latitudes altas. Aunque calientan débilmente la superficie de la Tierra, su efecto es más pronunciado, en todos los objetos dispuestos verticalmente, en esa zona del mundo. Los precipicios escarpados y las paredes de las casas se calientan demasiado, se presentan quemaduras de Sol en la cara, y se pueden documentar muchos casos más. ¿Cuál es la explicación?

Respuesta

Esto puede explicarse por una ley de la física según la cual cuanto menos inclinados son los rayos, más fuerte es su efecto. Incluso en verano, en las latitudes polares, el Sol se eleva muy poco sobre el horizonte.

Más allá del círculo polar, su altura no excede la mitad de un ángulo recto — a mayor latitud su elevación es aún menor.

Tomando esta observación como nuestro punto de partida, no resulta difícil establecer que los rayos del Sol forman un ángulo superior a medio ángulo recto, con un objeto vertical (erguido); en otras palabras, los rayos del Sol caen de forma empinada sobre una superficie vertical.

Esto deja claro por qué los rayos del Sol en los Polos, calientan débilmente la superficie, al tiempo que lo hacen de forma intensa sobre los objetos verticales.

12. ¿Cuándo comienzan las estaciones?

Si está cayendo nieve, la escala de mercurio indica temperaturas bajo cero, o el tiempo es suave, las personas del Hemisferio Norte consideran el 21 de marzo como el final del Invierno y el comienzo de la Primavera, afirmación astronómicamente cierta. Muchas personas no comprenden por qué razón se escoge esta fecha particular como línea divisoria entre el Invierno y la Primavera, si podemos darnos cuenta cuando tenemos un tiempo lleno de escarcha insoportable y cuando llega un tiempo caluroso y agradable.

Lo cierto es que el principio de la primavera astronómica no tiene nada que ver con los caprichos y las vicisitudes del tiempo. El hecho de que se inicie la Primavera al mismo tiempo, en todos los lugares de este hemisferio, nos basta para mostrar que los cambios del tiempo no tienen ninguna importancia esencial. ¡De hecho, las condiciones meteorológicas no pueden ser idénticas en medio mundo!

Al fijar el punto de llegada de las estaciones, los astrónomos no tomaron como referencia los fenómenos meteorológicos sino los astronómicos, por ejemplo, la altitud del Sol del mediodía y la duración de la luz diurna. El tiempo, es solo una condición complementaria.
El 21 de marzo difiere de los otros días del año en que en esta fecha el límite entre la luz y la oscuridad corta los dos polos geográficos. Si sostenemos un globo junto a una lámpara, veremos que el límite del área iluminada sigue el meridiano, cruzando el ecuador y todos los paralelos, en ángulo recto. Sostén el globo y gíralo sobre su eje: cada punto de su superficie describirá un círculo, del cual una mitad queda en la sombra, y la otra mitad en la luz. Esto quiere decir que en ese momento particular del año, el día y la noche tienen igual duración. En todo el mundo, desde el Polo Norte hasta el Polo Sur, se observa esta igualdad entre la noche y el día.
Así que el 21 de marzo se caracteriza porque en dicha fecha, en todo el mundo, el día y la noche tienen la misma duración. Este fenómeno notable se conoce como Equinoccio Vernal (Primaveral) — vernal porque no es el único equinoccio. Seis meses después, el 23 de septiembre de nuevo tenemos un día y una noche iguales, el Equinoccio Otoñal, con el que finaliza el Verano y llega el Otoño. Cuando se da en el Hemisferio Norte el Equinoccio de Primavera, en el Hemisferio Sur se da el Equinoccio Otoñal, y viceversa. En un lado del Ecuador el Invierno da paso a la Primavera, en el otro, el Verano se convierte en Otoño.
Las estaciones en el Hemisferio Norte no se corresponden con idénticas estaciones en el Hemisferio Sur.
Veamos cómo cambia la longitud comparativa del día y la noche, a lo largo del año. Comenzamos con el Equinoccio Otoñal, es decir, el 23 de septiembre, cuando en el Hemisferio Norte el día es más corto que la noche. Esto dura unos seis meses, cada día es más corto que el anterior hasta llegar al 22 de diciembre, cuando el día se empieza a prolongar, hasta el 21 de marzo, cuando el día alcanza a la noche. Desde ese momento, durante la otra mitad del año, el día del Hemisferio Norte es más largo que la noche, alargándose cada vez más, hasta el 22 de junio, y a partir de entonces empieza a reducirse de nuevo el día frente a la noche, pero permanece más largo que esta, hasta que se alcanza nuevamente el Equinoccio Otoñal, el 23 de septiembre.

Estas cuatro fechas marcan principio y fin de las estaciones astronómicas. Para el Hemisferio Norte se tienen las siguientes fechas:

- 21 de marzo, el día iguala a la noche. Comienza la Primavera.
- 22 de junio, el día más largo. Comienza el Verano.
- 23 de septiembre, el día iguala a la noche. Comienza el Otoño.
- 22 de diciembre, el día es más corto. Comienza el Invierno.

Debajo del ecuador, en el Hemisferio Sur, la Primavera coincide con nuestro Otoño, el Invierno con nuestro Verano, y así sucesivamente.

Para el beneficio del lector sugerimos algunas preguntas que le ayudarán a asimilar y memorizar lo que se ha dicho.

¿En nuestro planeta, dónde iguala el día a la noche durante todo el año?

¿El 21 de marzo, a qué hora —hora local— subirá el Sol en Tashkent, en Tokio y en Medellín?[19]

¿El 23 de septiembre, a qué hora —hora local— se pondrá el Sol en Novosibirsk, en Nueva York, y en el Cabo de Buena Esperanza?[20]

¿A qué hora subirá el Sol en los puntos del ecuador el 2 de agosto y el 27 de febrero?

¿Es posible tener escarcha en julio y una ola de calor en enero?[21]

13. Tres "si"

A veces es más duro entender lo usual que lo extraño. Comprendemos la utilidad de la numeración decimal que aprendemos en la escuela, sólo cuando intentamos usar algún otro sistema, basado por ejemplo en el siete o en el doce. Para apreciar realmente el papel que juega la gravedad en nuestra vida, imaginemos una fracción, o al contrario, un múltiplo de lo que realmente es, artificio al que

---

19 Tashkent (41º 16' N; 69º 13' E). Tokio (35º 40' N; 139º 46' E). Medellín (6º 13' N; 75º 34' W). (N. del E.)

20 Novosibirsk (55º 01' N; 82º 56' E). Nueva York (41º 23' N; 74º 40' W). Cabo de la Buena Esperanza (18º 28' S; 34º 21' E). (N. del E.)

21 Respuestas:

1) El día y la noche siempre tienen una longitud igual en el ecuador, como el límite entre la luz y la oscuridad que también divide el ecuador en dos mitades iguales, independiente de la posición de la Tierra.

2 y 3) Durante los equinoccios el Sol sube y pasa por el mundo a las mismas horas, 6 am y 6 pm -hora local-.

4) El Sol sale en el Ecuador a las 6 am todos los días a lo largo del año.

5) Las escarchas de julio y las olas de calor de enero son episodios comunes en las latitudes del sur.

acudiremos después. Entretanto recurramos a los “si” para comprender bien las condiciones del movimiento de la Tierra alrededor del Sol.

Comencemos con el axioma, que determina que el eje de la Tierra forma un ángulo de 66 ½º, o aproximadamente ¾ de un ángulo recto, con respecto al plano orbital de la Tierra. Tú apreciarás lo que esto significa imaginando este ángulo no como tres cuartos de un ángulo recto, sino como un ángulo recto completo. En otras palabras, supón que el eje de rotación de la Tierra sea perpendicular a su plano orbital. ¿Qué cambios introducirá esta suposición en la rutina de la Naturaleza si el Eje de la Tierra Fuera Perpendicular al Plano Orbital?

Bien, supón que los artilleros de Julio Verne han logrado su proyecto de “enderezar el eje” de la Tierra, y le hacen formar un ángulo recto al plano del vuelo orbital de nuestro planeta alrededor del Sol. ¿Qué cambios observaríamos nosotros en la Naturaleza?

En primer lugar, la Estrella Polar — ɑ Ursae Minoris Polaris — dejaría de ser polar, ya que la continuación del eje de la Tierra no pasaría cerca de ella, sino cerca de algún otro punto de giro de la cúpula celeste.

Además, la sucesión de las estaciones sería completamente diferente, o incluso no existiría ninguna alternancia. ¿Qué causa las estaciones? ¿Por qué el Verano es más caluroso que el Invierno? No evadamos esta pregunta tan común. En la escuela obtuvimos una vaga idea de ello, y después de la escuela muchos de nosotros estábamos demasiado ocupados en otras cosas y no disponíamos de tiempo como para molestarnos en pensar sobre el tema.

El Verano en el Hemisferio Norte es caluroso, en primer lugar, porque la inclinación del eje de la Tierra, hace los días más largos y las noches más cortas. El Sol calienta la tierra durante un tiempo más largo y no hay ningún enfriamiento pronunciado durante las pocas horas de oscuridad — el flujo de calor aumenta y las disminuciones del mismo disminuyen. En segundo lugar, (debido de nuevo a la inclinación del eje de la Tierra hacia el Sol), como el Sol se encuentra muy alto durante el día, sus rayos caen directamente sobre la Tierra.

De modo que, en verano el Sol proporciona más y más calor, mientras que la pérdida de calor durante la noche, es muy ligera. En invierno, sucede lo contrario, la duración del calor es más corta y, además, es más débil, ya que durante la noche, el enfriamiento es más pronunciado.

En el Hemisferio Sur este proceso tiene lugar seis meses después, o antes, si lo prefieres.

En Primavera y Otoño los dos polos son equidistantes respecto a los rayos del Sol; el círculo de luz casi coincide con los meridianos; el día y la noche prácticamente son iguales; y las condiciones climáticas están a medio camino entre el Invierno y el Verano.

a. ¿Qué sucedería si el eje de la Tierra fuera perpendicular al plano orbital?

¿Tendríamos esta alternancia? No, porque el globo siempre se enfrentaría a los rayos del Sol con el mismo ángulo, y tendríamos la misma estación en todos los momentos del año. ¿Qué sería esta estación? Podríamos llamarlo Primavera en las zonas templadas y polares aunque con tendría igual derecho a llamarse Otoño.

Siempre y en todas las partes del globo, día y noche serían iguales, el día igualaría a la noche, como sucede ahora sólo en el caso de la tercera semana de marzo y septiembre. (Éste es, de forma aproximada, el caso de Júpiter; su eje de rotación es casi perpendicular al plano de su desplazamiento alrededor del Sol.)

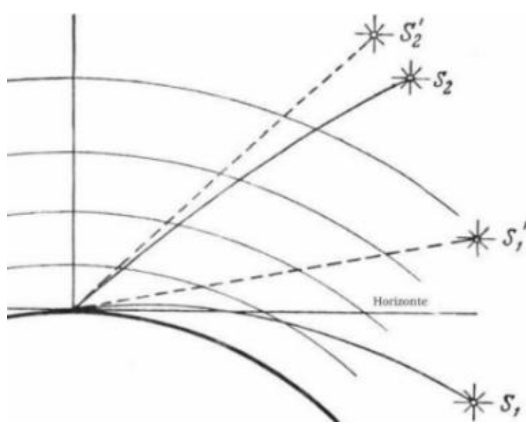


Figura 15. La refracción atmosférica. El rayo del astro S_2 se refracta y se curva al atravesar las capas de la atmósfera terrestre, pensando el observador que se emite desde el punto S'_2 punto más alto. Aunque el astro, S_1 ya se ha hundido por debajo del horizonte, el observador todavía lo ve, debido a la refracción.

Ése sería el caso de la zona templada. En la zona tórrida, el cambio de clima no sería tan notable; en los polos sucedería lo contrario. Aquí debido a la refracción atmosférica, el Sol se elevaría ligeramente sobre el horizonte (Figura 15), en lugar de salir completamente, solo rozaría el horizonte. El día, o para ser más exactos, el comienzo de la mañana, serían perpetuos. Aunque el calor emitido por el Sol a tan baja altitud, sería ligero, ya que nunca dejaría de emitirlo durante todo el año; el clima polar, ahora yermo, sería mucho más apacible. Pero esa sería una pobre compensación para el daño que recibirían las áreas bastante desarrolladas del planeta.

b. Si el eje de la tierra se inclinara 45° en el plano orbital.

Imaginemos ahora una inclinación de 45º del eje de la Tierra con respecto al plano orbital.

Durante los equinoccios (alrededor del 21 de marzo y el 23 de septiembre) el día se alternaría como ahora con la noche. Sin embargo, en junio el Sol alcanzaría el cenit hacia el paralelo 45 y no en el 23 y medio; esta latitud llegaría a ser tropical. A la latitud de Leningrado (60º) el Sol estaría a no más de 15º del cenit, una altitud solar verdaderamente tropical. La zona tórrida limitaría directamente con la zona frígida, no existiendo la zona templada. En Moscú y Cracovia el mes de junio sería un continuo y largo día.

Al contrario, en invierno, la oscuridad polar prevalecería durante semanas en Moscú, Kiev, Kharkov y Poltava. Y la zona tórrida en esta estación sería más templada porque el Sol al mediodía no subiría por encima de los 45º. Naturalmente, las zonas tórridas y templadas perderían mucho con este cambio. Las regiones Polares, sin embargo, ganarían. Aquí, después de un invierno sumamente severo, peor que los actuales, habría un verano ligeramente caluroso, teniendo en cuenta que en el Polo el Sol al mediodía estaría sobre los 45º y brillaría durante más de la mitad del año. Los hielos eternos del ártico se retirarían de forma apreciable bajo la acción benéfica de los rayos del Sol.

c. Si el eje de la Tierra coincidiera con el plano Orbital

Nuestro tercer experimento imaginario es poner el eje de la Tierra en su plano orbital (Fig. 16). La Tierra giraría “acostada” alrededor del Sol, girando sobre su eje, de la misma manera que lo hace un miembro remoto de nuestra familia planetaria,

Urano. ¿Qué pasaría en este caso?
En las proximidades de los polos habría un día de seis meses durante el cual, el Sol subiría en espiral del horizonte al cenit, y luego descendería de la misma forma hacia el horizonte.
Tras esto viviríamos una noche de seis meses. Día y noche quedarían divididos por un crepúsculo de varios días de duración. Antes de desaparecer bajo el horizonte, el Sol cruzaría los cielos durante varios días, rozando el horizonte. Un verano así fundiría todo el hielo acumulado durante el invierno.

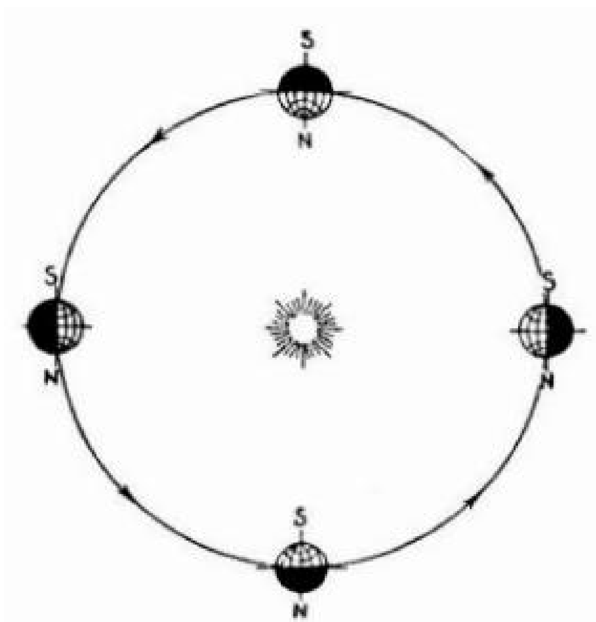


Figura 16. Así se movería la Tierra alrededor del Sol si el eje de rotación estuviera en su plano Orbital.

En las latitudes medias los días rápidamente se harían más largos con el comienzo de la Primavera; tras esto, tendríamos luz diurna durante varios días. Ese largo día significaría aproximadamente el número de días que coincidiera con el número de grados que distan del Polo y su duración sería aproximadamente el número de días igual a los grados del doble de la latitud.
En Leningrado, por ejemplo, esta luz diurna continua, empezaría 30 días después del 21 de marzo, y duraría 120 días. Las noches reaparecerían 30 días antes del 23 de septiembre. En invierno sucedería lo contrario; una continua luz diurna sería reemplazada por una oscuridad continua de aproximadamente la misma duración.

Sólo en el ecuador la noche y el día serían siempre iguales.

El eje de Urano se inclina sobre su plano orbital más o menos como se describe anteriormente; su inclinación hacia su propio plano en su camino alrededor del Sol es de sólo 8º. Uno podría decir de Urano que gira alrededor del Sol "echándose a su lado."

Estos tres "si", con toda seguridad, pueden dar una buena idea al lector, de la relación entre el clima y la inclinación del eje de la Tierra. No es accidental que en griego la palabra "clima" signifique "inclinación".

d. Un "Si" más

Regresemos a otro aspecto de los movimientos de nuestro planeta, la forma de su órbita. Como cada planeta, la Tierra cumple la primera ley de Kepler, según la cual, cada planeta sigue un camino elíptico, del que el Sol, es uno de los focos.

¿Cómo es la elipse de la órbita terrestre? ¿Difiere significativamente de un círculo?

Los libros de texto y los folletos de astronomía elemental muestran a menudo la órbita del globo como una elipse bastante extendida. Esta imagen, mal entendida, queda fija en la mente de muchos lectores para toda la vida; muchas personas permanecen convencidas que la órbita de la Tierra es una elipse notablemente larga. Sin embargo, esto no es así en absoluto; la diferencia entre la órbita de la Tierra y una circunferencia es tan despreciable que no puede dibujarse de otra forma que no sea una circunferencia. Supongamos que en nuestro dibujo el diámetro de la órbita es de un metro. La diferencia entre la órbita mostrada y una circunferencia sería menor que el espesor de la línea trazada para ilustrarla. Incluso el ojo perspicaz del dibujante no distinguiría entre esta elipse y una circunferencia.

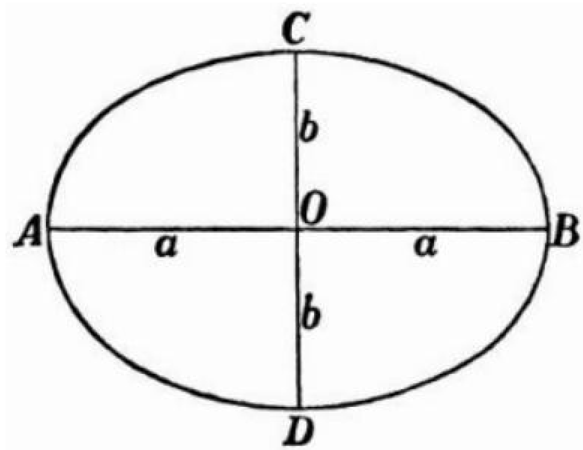


Figura 17. Una elipse y sus ejes, mayor (AB) y menor (el CD). El Punto O designa su centro

Sumerjámonos por un momento en la geometría elíptica. En la elipse de la Fig. 17, AB es su “eje mayor”, y CD, su “eje menor”. Además del centro O, la elipse tiene dos puntos importantes, los “focos”, ubicados simétricamente en el eje mayor a ambos lados del centro. Los focos se localizan tal como se indica a continuación (Fig. 18). Se abren los brazos del compás de modo que sus extremos cubran una distancia igual al semieje principal OB. Con una punta en C, en el extremo del eje menor, describimos con la otra punta un arco que corta en dos puntos el eje mayor. Dichos puntos de intersección, F y F_1, son los focos de la elipse.

Las distancias iguales OF y OF_1 se indican con c, y los ejes, mayor y menor, 2a y 2b. La relación entre el segmento c y la longitud del semieje mayor, a, que corresponde a la fracción c/a, representa la medida del achatamiento de la elipse y se llama “excentricidad”. Cuanto mayor sea la diferencia entre la elipse y el círculo, mayor será la excentricidad[22].

Tendremos una idea exacta de la forma de la órbita terrestre cuando conozcamos el valor de su excentricidad. Esto se puede determinar sin medir el valor de la órbita. El Sol, ubicado en uno de los focos de la órbita, se variar en tamaño desde la Tierra, debido a que varia la distancia de cada punto de la órbita hasta dicho foco.

---

22 La excentricidad se calcula mediante la fórmula: e = c/a, donde: e es la excentricidad, c es la distancia del centro al foco y a es la distancia del centro al vértice. Si e<0, es una elipse. Si e = 1, es una circunferencia. Si e > 1, es una hipérbola. (N. del E.)

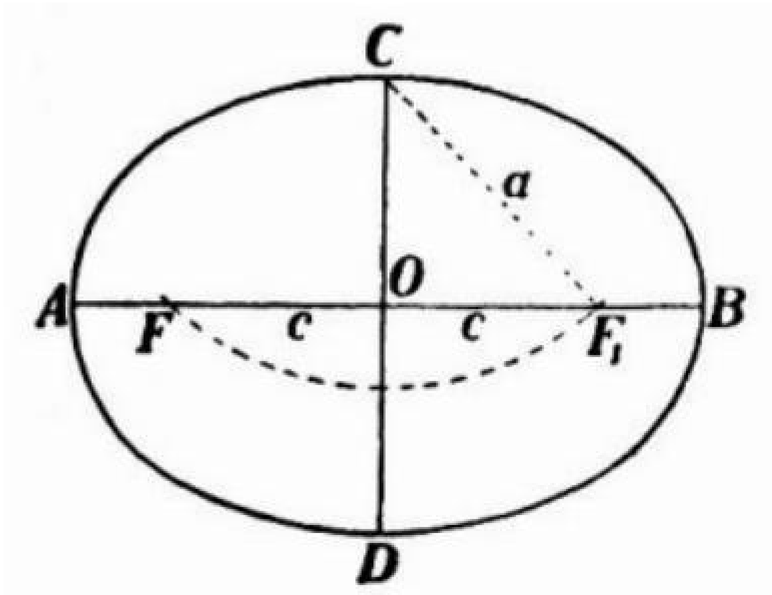


Figura 18. Cómo se localizan los focos de una elipse

Unas veces aumenta el tamaño del Sol, y otras veces disminuye; su tamaño varía proporcionalmente a la distancia entre la Tierra y el Sol, al realizar cada observación. Asumamos que el Sol se encuentre en el foco F_1 de nuestra elipse (Fig. 18).

La Tierra pasa por el punto A de la órbita, el 1 de julio, cuando vemos el disco del Sol más pequeño, su tamaño angular es de 31′ 28″. La Tierra pasa por el punto B, el 1 de enero, cuando el disco del Sol alcanza su mayor tamaño angular, 32′ 32″.

De acá se obtiene la siguiente proporción:

$$\frac{31'28''}{32'32''} = \frac{BF_1}{AF_1} = \frac{a-c}{a+c}$$

de donde conseguimos la proporción derivativa:

$$\frac{(a-c)-(a+c)}{(a+c)+(a-c)} = \frac{31'28''-32'32''}{31'28''+32'32''}$$

ó:

$$\frac{64''}{64'} = \frac{c}{a}$$

Esto significa que:

$$\frac{c}{a} = \frac{1}{60} = 0{,}017$$

De donde se concluye que la excentricidad de la órbita de la Tierra es 0,017. Todo lo que necesitamos, por consiguiente, es tomar una medida cuidadosa del disco visible del Sol para determinar la forma de la órbita de la Tierra.

Ahora demostraremos que la órbita de la Tierra difiere muy poco de una circunferencia. Imaginemos un dibujo enorme cuyo semieje mayor, a, mide un metro. ¿Cuál será la longitud del semieje menor de la elipse? Del triángulo del ángulo recto OCF_1 (Fig. 18) encontramos:

$$c^2 = a^2 - b^2$$

ó:

$$\frac{c^2}{a^2} = \frac{a^2 - b^2}{a^2} = 0{,}0017^2$$

pero *c/a* es la excentricidad de la órbita de la Tierra, es decir, 1/60. Reemplazamos la expresión algebraica $a^2 - b^2$ por $(a - b)\cdot(a + b)$, y $(a + b)$ por $2a$, ya que b difiere ligeramente de a. Así obtenemos:

$$\frac{1}{60^2} = \frac{2a(a-b)}{a^2} = \frac{2(a-b)}{a}$$

y por lo tanto:

$$a - b = \frac{a}{2 \cdot 60^2} = \frac{1000}{7200}$$

es decir, menor que 1/7 mm.

Hemos encontrado que incluso a gran escala, la diferencia de longitudes entre el semieje mayor y el semieje menor de la órbita de la Tierra es de menos de 1/7 mm.

(Más delgada que una línea trazada con un lápiz fino)
Así que no estamos muy equivocados si dibujamos la órbita de la Tierra como una circunferencia.
¿Pero dónde encaja el Sol en nuestro esquema? ¿Para colocarlo en un foco de la órbita, a qué distancia debe estar del centro? ¿En otras palabras, cual debe ser la longitud de OF o de OF_1, en nuestro dibujo imaginario? El cálculo es bastante simple:

$$c/a = 1/60$$

$$c = a/60 = 100/60 = 1{,}7 \text{ cm}$$

En nuestro dibujo el centro del Sol debe estar alejado del centro de la órbita 1,7 cm. Pero como el propio Sol debe dibujarse como un círculo de 1 cm. de diámetro, sólo los ojos entrenados del pintor se darán cuenta de que no está en el centro de la circunferencia.
La conclusión práctica a la que llegamos, es que podemos dibujar la órbita de la Tierra como una circunferencia, colocando al Sol ligeramente al lado del centro.
¿E insignificante asimetría en la posición del Sol, podría influir en el clima de la Tierra?
Para descubrir el efecto probable, realizaremos otro experimento imaginario, jugando de nuevo al "Si." Supongamos que la excentricidad de la órbita de la Tierra es mayor que la que hemos calculado, por ejemplo, 0,5. Aquí el foco de la elipse divide su semieje por la mitad; esta elipse se parecerá a un huevo. Ninguna de las órbitas de los planetas mayores del sistema solar tiene esta excentricidad; La órbita de Plutón, la más achatada, tiene una excentricidad de 0,25. (Los asteroides y los cometas, sin embargo, siguen elipses más pronunciadas.)

14. Si la trayectoria de la Tierra fuera más pronunciada

Imaginemos la órbita de Tierra notoriamente alargada, de modo tal que cada foco divida al semieje mayor correspondiente, por la mitad. Esta órbita se muestra en la figura 19. La Tierra estará en el punto A, el más cercano al Sol, el 1 de enero, y en el punto B, el más lejano, el 1 de julio. Ya que FB es tres veces FA, el Sol estará tres veces más cerca de nosotros en enero que en julio. Su diámetro en enero sería el triple del diámetro en julio, y la cantidad de calor emitido en enero, será nueve veces mayor que la emitida en julio (la proporción inversa del cuadrado de la longitud). ¿Qué pasará con nuestros Inviernos del Norte? Sólo que el Sol estará más bajo en el cielo, los días serán más cortos y las noches más largas. Pero, no tendremos un tiempo frío, ya que la proximidad del Sol compensa el déficit de luz diurna.

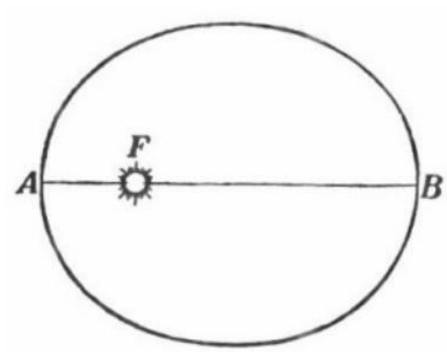


Figura 19. Ésta es la forma que tendría la órbita de la Tierra, si su excentricidad fuera 0,5. El Sol estaría en el foco F.

A esto debemos agregar otra circunstancia, proveniente de la segunda ley de Kepler, que dice que el "radio—vector" barre áreas iguales en tiempos iguales.

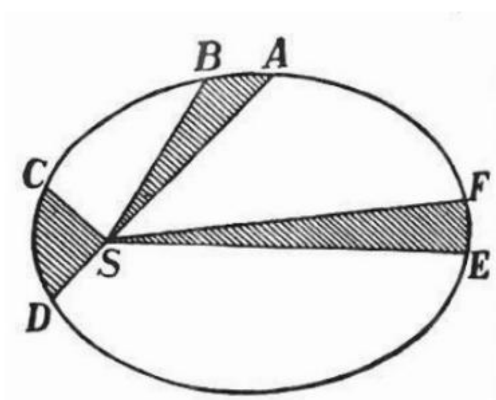


Figura. 20. Una ilustración de la segunda ley de Kepler: Si el planeta viaja a lo largo de los arcos AB, CD y EF en tiempos iguales, los sectores sombreados deben tener áreas iguales.

El “radio vector” de una órbita es la línea recta que une el Sol con el planeta, la Tierra en nuestro caso. La Tierra se desplaza a través de su órbita junto a su radio—vector, barriendo cierta área con este último. Sabemos por la segunda ley de Kepler que las secciones de un área de la elipse, barridas en el mismo tiempo, son iguales. En puntos cercanos al Sol, la Tierra tiene que moverse más rápido a lo largo de su órbita que en puntos más lejanos, en caso contrario, el área barrida por un radio—vector más corto no igualaría el área cubierta por uno más largo. (Fig. 20).

Aplicando esto a nuestra órbita imaginaria deducimos que entre diciembre y febrero, cuando la Tierra está más cerca del Sol, se mueve más rápido a través de su órbita que entre junio y agosto. En otros términos, el invierno del Hemisferio Norte es de corta duración. Mientras que el verano al contrario, es de larga duración, como si estuviera compensando el poco calor ofrecido por el Sol.

La Fig. 21 presenta una idea más exacta de la duración de las estaciones bajo nuestras condiciones imaginadas. La elipse muestra la nueva órbita de la Tierra, con una excentricidad 0,5. Los puntos 1 al 12 dividen la trayectoria de la Tierra, en las secciones que cruza, a los intervalos iguales; según la segunda ley de Kepler, las secciones de la elipse divididas por los radios—vectores tienen áreas iguales.

La Tierra alcanzará el punto 1, el 1 de enero; el punto 2, el 1 de febrero; el punto 3, el 1 de marzo; y así sucesivamente.

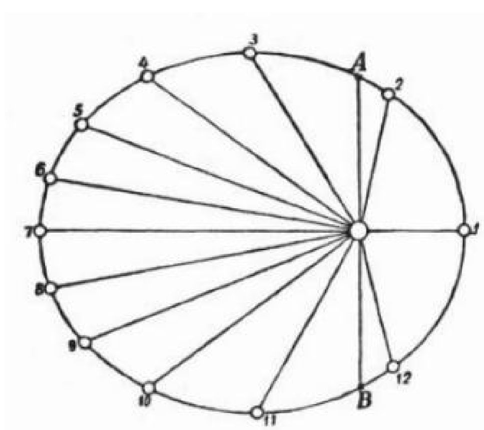


Figura 21. Así giraría la Tierra alrededor del Sol, si su órbita fuese una elipse muy prolongada. (El planeta cubre las distancias entre cada punto, en el mismo tiempo, un mes.)

El dibujo nos muestra que en esta órbita el equinoccio primaveral (A) debe darse al principio de febrero, el otoñal (B) al final de noviembre. Así el Invierno del Hemisferio Norte durará poco más de dos meses, desde finales de noviembre a comienzos de febrero. Por otro lado la estación de días largos y un Sol de mediodía alto, durará desde el equinoccio primaveral hasta el otoñal, y por lo tanto serán más de 9 meses y medio.

Lo contrario sucederá en el Hemisferio Sur. El Sol permanecerá bajo y los días serán cortos, cuando la Tierra se encuentre más lejos del Sol diurno y el calor de este mengüe, al menos una novena parte. El Invierno será mucho más riguroso y más largo que en el Norte. Por otro lado, el Verano, aunque corto, será demasiado caliente.

Otra consecuencia de nuestro "Si." En enero el movimiento orbital rápido de la Tierra hará que el mediodía medio y el verdadero mediodía sean tiempos considerablemente distintos, con diferencia de varias horas. Esto hará inadecuado seguir el tiempo solar medio que observamos ahora.

Ahora comprendemos los efectos de la posición excéntrica del Sol, en la órbita de la Tierra. En primer lugar, el Invierno en el Hemisferio Norte es más corto y más suave, y el Verano más largo que en el Hemisferio Sur. ¿Realmente es así? Indiscutiblemente, sí.

En enero la Tierra está más cerca del Sol que en julio por 2×1/60, es decir, 1/30. Por eso, la cantidad de calor recibida se incrementa (61/59)2 veces, es decir, en un 6%.

Esto alivia un poco la severidad del Invierno en el Hemisferio Norte.

Además, el Otoño y el Invierno del Hemisferio Norte juntos, son aproximadamente ocho días más cortos que las mismas estaciones del Hemisferio Sur; mientras que el Verano y la Primavera en el Hemisferio Norte, son ocho días más largos que en el Hemisferio Sur.

Quizás sea esta la razón por la que el hielo es más denso en el Polo Sur.

Seguidamente encontramos una tabla que nos muestra la longitud exacta de las estaciones en los Hemisferios Norte y Sur:

Hemisferio Norte	**Longitud**	**Hemisferio Sur**
Primavera	92 días 19 horas	Otoño

Verano	93 días 15 horas	Invierno
Otoño	89 días 19 horas	Primavera
Invierno	89 días 0 horas	Verano

Como se puede ver, el Verano en el Hemisferio Norte es 4,6 días más largo que el Invierno, y la Primavera 3 días más larga que el Otoño.

El Hemisferio Norte no tendrá esta ventaja eternamente. El eje mayor de la órbita de la Tierra está cambiando gradualmente de posición en el espacio, en consecuencia, los puntos más cercano y más lejano a lo largo de la órbita del Sol se transfieren a otro lugar. Estos movimientos representan un ciclo completo cada 21.000 años y se calcula que 10.700 después de Cristo, el Hemisferio Sur disfrutará las ventajas antes dichas que ahora posee el Hemisferio Norte[23].

La excentricidad de la órbita de la Tierra tampoco es fija; vacila despacio a lo largo de las épocas entre casi cero (0,003), cuando la órbita es casi un círculo, y 0,077, cuando la órbita es mas alargada, en esto se parece a Marte[24]. Actualmente su excentricidad esta menguando; disminuirá durante otros 24 milenios hasta quedar en 0,003, e invertirá el proceso durante 40 milenios. Estos cambios son tan lentos que solo tienen importancia teórica.

15. ¿Cuándo estamos más cerca del Sol, al mediodía o por la tarde?

Si la órbita terrestre fuera estrictamente circular, con el Sol en su punto central, la respuesta sería muy simple. Estaríamos a mediodía más cerca del Sol, cuando los puntos correspondientes de la superficie del globo, pertenecientes a la rotación axial de la Tierra, estuvieran en conjunción con el Sol. Los puntos más cercanos al Sol estarían sobre el ecuador, a 6.400 km. más cerca del Sol; este valor corresponde a la longitud del radio de la Tierra.

Pero la órbita de la Tierra es una elipse con el Sol en uno de sus focos (Fig. 22).

---

23 El cambio en la dirección del eje de la Tierra, que gira en 25.800 años alrededor del eje de la eclíptica, se conoce como precesión de los equinoccios. A este período se le conoce como año platónico. (N. del E.)

24 El cambio de la excentricidad de la órbita terrestre, altera la duración de las estaciones. Actualmente, el verano es la estación más larga y el invierno la más corta. En la época de las pirámides, la más larga era la primavera y la más corta el otoño. (N. del E.)

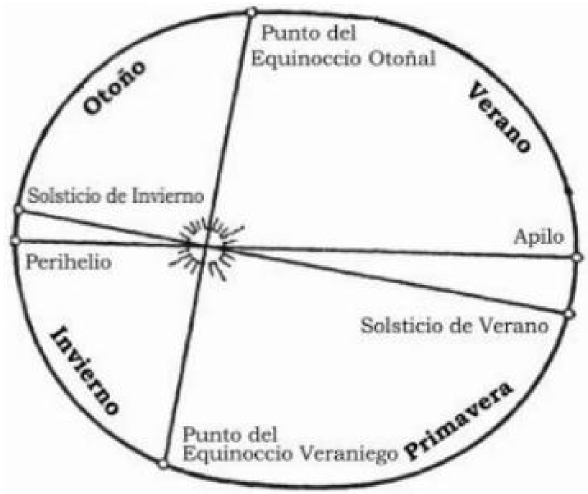


Figura 22. Un diagrama del tránsito de la Tierra alrededor del Sol.

Como consecuencia, a veces la Tierra está más cerca del Sol y a veces más lejos. Durante los seis meses, entre el 1 de enero y el 1 de julio, la Tierra se mueve alejándose del Sol y durante los otros seis meses se aproxima. La diferencia entre la distancia más grande y la más pequeña es de

2 x 1/60 × 150.000.000, es decir, 5.000.000 kilómetros.

Esta variación en la distancia promedia unos 28.000 km al día. Por consiguiente, entre el mediodía y el ocaso (en un cuarto de día) la distancia recorrida de ese promedio es de 7.500 km, es decir, más que la distancia de la rotación axial de la Tierra.

De aquí se deduce la respuesta: entre enero y julio estamos más cerca del Sol al mediodía, y entre julio y enero estamos más cerca por la tarde.

16. Agregando un metro

Pregunta

La Tierra se mueve alrededor del Sol, a una distancia de 150.000.000 km. Supongamos que agregamos un metro a esta distancia.

¿Cuánto se alargaría el camino de la Tierra alrededor del Sol y cuánto se alargaría el año, con tal de que la velocidad del movimiento orbital de la Tierra permaneciera invariable (ver Fig. 23)?

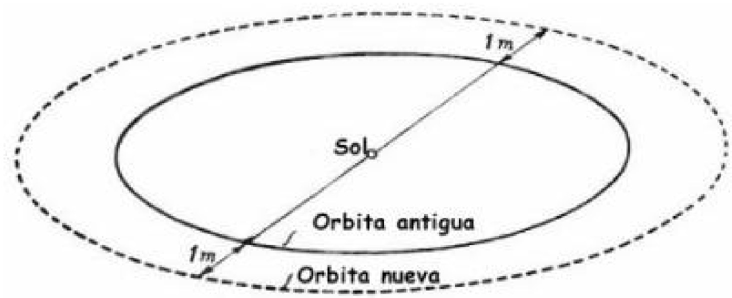


Figura 23. ¿Cuánto se alargaría la órbita de la Tierra, si nuestro planeta estuviera 1 metro más lejos del Sol? (ver el texto para la respuesta).

Respuesta

Un metro no es mucha distancia, pero, teniendo en cuenta la enorme longitud de la órbita de la Tierra, podríamos pensar que al agregar esta insignificante distancia, aumentaría notoriamente la longitud orbital e igualmente la duración del año.

Sin embargo, el resultado, es tan infinitesimal que nos inclinamos a dudar de nuestros cálculos. Pero no hay razón para sorprenderse; la diferencia es realmente muy pequeña.

La diferencia en la longitud de dos circunferencias concéntricas no depende del valor de sus radios, sino de la diferencia entre ellos. Para dos circunferencias trazadas en el suelo el resultado será exactamente igual que para dos circunferencias cósmicas, siempre que la diferencia entre los radios sea de un metro, en ambos casos. Un cálculo nos mostrará cómo es posible esto.

Si el radio de la órbita de la Tierra (aceptada como un círculo) es, R metros, su longitud será $2\pi R$. Si nosotros hacemos ese radio 1 metro más largo, la longitud de la nueva órbita será:

$$2\pi(R+1) = 2\pi R + 2\pi$$

La suma a la órbita es, por consiguiente, sólo 2π, en otras palabras, 6,28 metros, y no depende de la longitud del radio.

De aquí que la trayectoria de la Tierra alrededor del Sol, al agregar ese metro, será solo 6 1/4 metros más larga. El efecto práctico de esta variación en la longitud del año será nulo, ya que la velocidad orbital de la Tierra es de 30.000 metros por segundo. El año será sólo 1/5.000 parte de un segundo, más largo qué el actual, por lo que lógicamente nunca lo notaríamos.

17. Desde diferentes puntos de vista

Siempre que dejes caer algo, observarás que cae verticalmente. Te parecerá raro que otra persona haya observado que dicho objeto no caía en línea recta. Hay algo que si es cierto, en el caso de que el observador no esté involucrado con nosotros en los movimientos de la Tierra.

Imaginemos que estamos mirando un cuerpo que cae, a través de los ojos del mencionado observador. La figura 24 muestra una pesada bola que se deja caer libremente desde una altura de 500 metros. Al caer, participa naturalmente y de forma simultánea, de todos los movimientos terrestres.

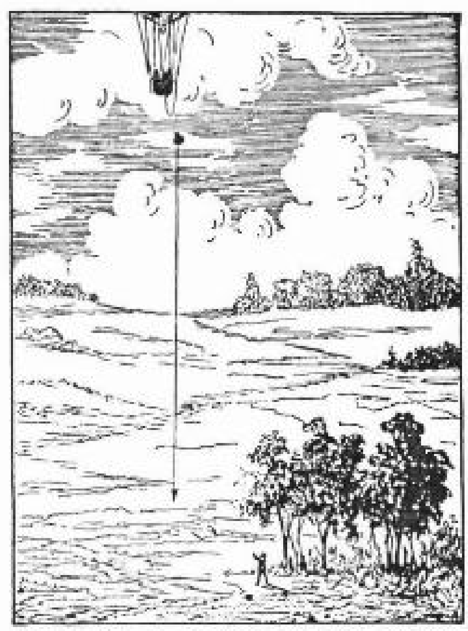


Figura 24. Cualquier observador ubicado en nuestro planeta, verá caer libremente un objeto, a lo largo de una línea recta

La única razón por la qué no notamos esos movimientos suplementarios y rápidos del cuerpo que cae, es porque nosotros también estamos envueltos en ellos. Si pudiéramos evitar la participación en uno de los movimientos de nuestro planeta, veríamos que ese cuerpo no cae verticalmente, sino que sigue otro camino.

Supongamos que no estamos mirando el cuerpo que cae desde la superficie de la Tierra, sino desde la superficie de la Luna. Aunque la Luna acompaña a la Tierra en su movimiento alrededor del Sol, no está implicada en su rotación axial. Así que desde la Luna veremos a ese cuerpo hacer dos movimientos, uno vertical, hacia abajo y otro, qué no habíamos observado antes, hacia el este en una dirección tangente a la superficie de la Tierra. Los dos movimientos simultáneos se suman, de acuerdo con las reglas de la mecánica, y, como uno es variable y el otro uniforme, el movimiento resultante nos dará una curva. La figura 25 muestra la curva con la que un hombre con una vista muy aguda, vería desde la Luna, un cuerpo que cae en la Tierra.

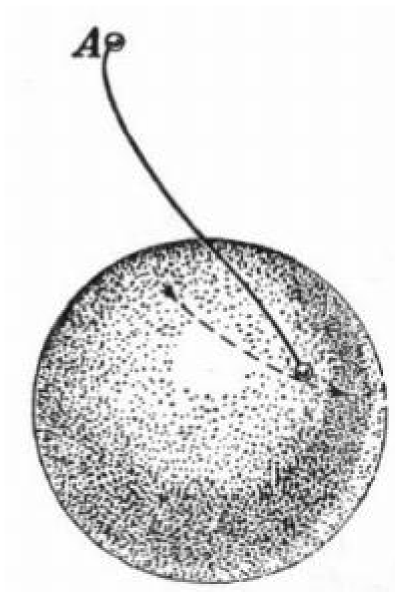


Figura 25. El hombre en la Luna vería la caída como una curva

Supongamos que nos alejamos de la Tierra y llegamos al Sol, y que observamos desde allí, a través de un telescopio muy potente, la caída sobre la tierra, de esta pelota pesada. En el Sol estaremos fuera de la rotación axial de la Tierra y de su revolución orbital. Veremos simultáneamente tres movimientos del cuerpo que cae (Fig. 26):

1) una caída vertical hacia la superficie de la Tierra,

2) un movimiento hacia el este a lo largo de una tangente con la superficie de la Tierra y

3) el giro debido al movimiento del Sol.

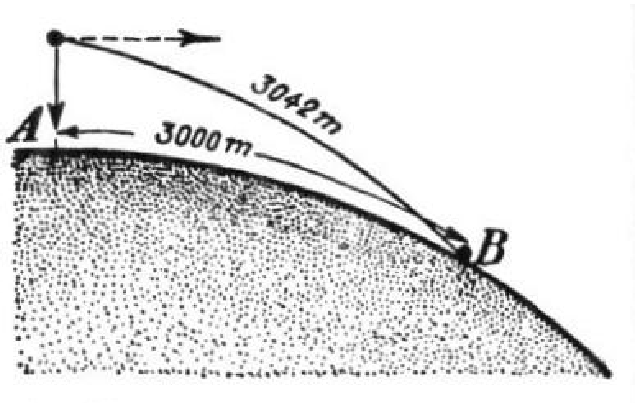


Figura 26. Un cuerpo que cae libremente hacia la Tierra al mismo tiempo se mueve en una dirección vertical y otra dirección tangencial, descrita por los puntos de la superficie de la Tierra debido a la rotación.

El movimiento número 1 cubre 0,5 km. El movimiento número 2, durante los 10 segundos que tarda el descenso del cuerpo, cubre, a la latitud de Moscú, 0,3 × 10 = 3 km.

El tercero, y más rápido de los movimientos, será de 30 kilómetros por segundo, por lo que en los 10 segundos que dura el descenso del cuerpo a la Tierra, viajará 300 km. a lo largo de la órbita terrestre.

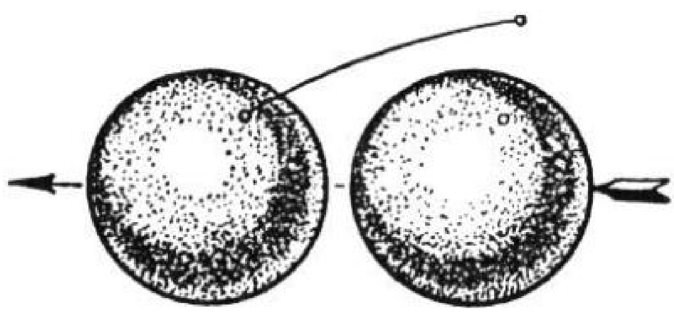


Figura 27. Esto es lo que vería cualquier observador desde el Sol, al contemplar el cuerpo que cae, mostrado en la Figura 24 (no se ha tenido en cuenta la escala).

En comparación con este pronunciado movimiento, los otros, de 0,5 km. hacia abajo y de 3 km. a lo largo de la tangente, apenas serían perceptibles, desde un mirador en el Sol, es decir, que solo veríamos el vuelo principal. ¿Qué tendríamos? Aproximadamente lo que vemos en la Figura 27 (no se ha respetado la escala real).

La Tierra se desplaza hacia la izquierda, mientras el cuerpo cae desde un punto sobre la Tierra en la posición mostrada a la derecha, a un punto correspondiente en la Tierra mostrada a la izquierda. Como se dijo anteriormente, la escala correcta no ha sido respetada — en los 10 segundos de caída, el centro de la Tierra no se habrá desplazado 14.000 kilómetros, como nuestro artista ha reflejado en el dibujo persiguiendo una mayor claridad, sino sólo 300 kilómetros.

Permítanos dar otro paso e imaginarnos en una estrella, por ejemplo, en un Sol remoto, más allá incluso de los movimientos de nuestro propio Sol. Desde allí observaríamos, aparte de los tres movimientos expuestos anteriormente, un cuarto movimiento del cuerpo que cae con respecto a la estrella en la que nosotros nos encontrásemos. El valor y la dirección del cuarto movimiento dependen de la estrella que nosotros hayamos escogido, es decir, en el movimiento de todo el sistema solar con respecto a esa estrella.

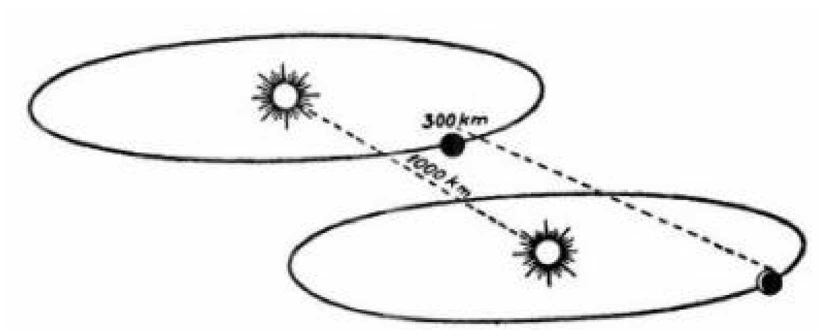


Figura 28. Cómo vería un observador situado en una estrella distante un cuerpo cayendo hacia la Tierra.

La Figura 28 es un caso probable cuando el sistema solar se mueve con respecto a la estrella escogida en un ángulo agudo respecto a la eclíptica, a una velocidad de 100 kilómetros por segundo (las estrellas tienen velocidades de este orden.) En 10 segundos este movimiento desplazaría al cuerpo que cae unos 1.000 kilómetros y, naturalmente, complicaría su vuelo. La observación desde otra estrella nos daría para esta misma trayectoria, otro valor y otra dirección.

Podríamos ir incluso más lejos e imaginar que características podría tener el vuelo de un cuerpo que cae hacia nuestro planeta, para un observador que se encuentra más allá de la Vía Láctea, y que por lo tanto no estaría involucrado en el rápido

movimiento de nuestro sistema estelar con respecto a otras islas del universo.
Mas no existe finalidad alguna para hacerlo. A estas alturas, los lectores ya sabrán que, observando desde diferentes puntos el vuelo de un cuerpo que cae, este vuelo se verá de forma diferente.

18. Tiempo no terrenal

Usted ha trabajado una hora y después ha descansado durante una hora. ¿Son estos dos tiempos iguales? Indiscutiblemente sí, si utilizamos un buen reloj, la mayoría de las personas así lo dirían. ¿Pero qué reloj deberíamos usar? Naturalmente, uno verificado por la observación astronómica, o en otros términos, uno que repique con el movimiento de un globo que gira con la uniformidad ideal, volviendo a los mismos ángulos en exactamente el mismo tiempo.
¿Pero cómo, puede uno preguntarse, sabemos que la rotación de la Tierra es uniforme? ¿Por qué estamos seguros de que las dos rotaciones axiales consecutivas de nuestro planeta tardan en realizarse el mismo tiempo? Lo cierto es que no podemos verificar esto mientras que la rotación de la Tierra sea una medida de tiempo.
Últimamente algunos astrónomos han encontrado útil en algunos casos reemplazar de forma provisional este modelo de movimiento uniforme por otro. A continuación se exponen las razones y las consecuencias de este paso.
Un cuidadoso estudio reveló que en sus movimientos, algunos de los cuerpos celestes no se comportan de acuerdo a las suposiciones teóricas, y que la divergencia no puede explicarse por las leyes de la mecánica celestial. Se encontró que la Luna, los satélites de Júpiter I y II, Mercurio, e incluso los movimientos anuales del Sol, es decir, el movimiento de nuestro propio planeta a lo largo de su propia órbita, tenían variaciones para las que no había ninguna razón aparente.
Por ejemplo, la Luna se desvía de su órbita teórica al menos 1/6ª parte de un minuto de un arco en algunas épocas, y el Sol llega a un segundo de arco. Un análisis de estas incongruencias descubrió un rasgo común entre todos: en un período determinado, la velocidad de estos movimientos aumenta y, más tarde, se ralentiza. Naturalmente se dedujo que estas desviaciones tenían una causa común.
¿No se deberá esto a la “inexactitud” de nuestro reloj natural, a la desafortunada

opción de la rotación terrestre como un modelo de movimiento uniforme?

La cuestión de reemplazar el "reloj terrestre" fue planteada. Provisionalmente este quedó descartado, y el movimiento investigado pasó a medirse por otro reloj natural basado en los movimientos de los satélites de Júpiter, la Luna, o Mercurio (los movimientos de ambos o de uno u otro de estos elementos). Esta acción inmediatamente introdujo el orden satisfactorio en el movimiento de los cuerpos celestiales antes nombrados. Por otro lado, la rotación de la Tierra medida por este nuevo reloj resultó ser desigual – desacelerando durante unas docenas de años, ganando velocidad en las próximas docenas, y reduciendo después esa velocidad una vez más.

En 1897 el día era 0,0035 segundos más largo que en años anteriores y en 1918 esta cantidad ya era menor que entre 1897 y 1918. El día es ahora aproximadamente 0,002 segundos más largo que hace cien años.

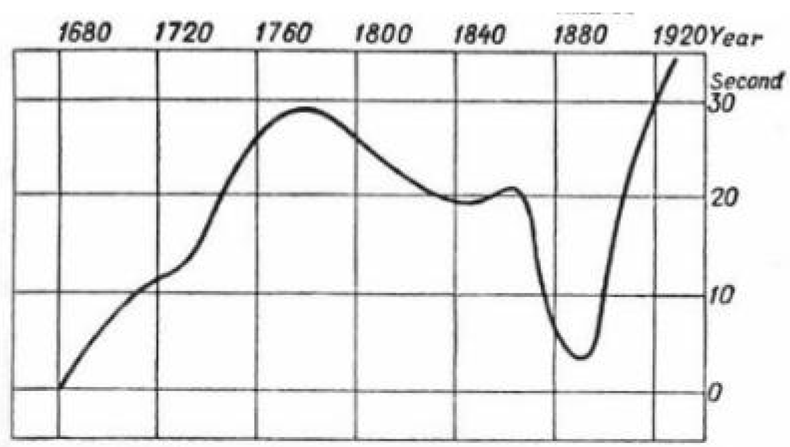


Figura 29. La línea nos muestra lo lejos que la Tierra se desvió del movimiento uniforme entre 1680 y 1920. Si la Tierra realizase este movimiento uniformemente, este quedaría reflejado en el gráfico como una línea horizontal. Sin embargo, el gráfico nos muestra un día más largo cuando la velocidad de rotación de la Tierra se redujo, y un día más corto cuando la velocidad de rotación empezó a incrementarse.

En este sentido podemos decir que nuestro planeta gira irregularmente con respecto a otros de sus movimientos y también con respecto a los movimientos en nuestro sistema solar convencionalmente aceptados como movimientos regulares. El valor de las desviaciones de la Tierra si tenemos en cuenta un movimiento estrictamente regular (en el sentido antes indicado) es sumamente despreciable: durante los cientos años entre 1680 y 1780 la Tierra giró más lentamente, los días eran más largos y nuestro planeta acumuló una diferencia de unos 30 segundos entre su tiempo de ese momento y al tiempo del pasado; entonces, a mediados del siglo XIX, los días se acortaron, y esa diferencia se redujo en aproximadamente 10 segundos; hacia comienzos del siglo XX otros 20 segundos se perdieron. Sin embargo, en el primer cuarto del siglo XX el movimiento de la Tierra redujo de nuevo la velocidad, los días se alargaron y la diferencia aumentó de nuevo en casi medio minuto (Fig. 29).

Se han aducido varias razones para esos cambios, por ejemplo, las mareas lunares, los cambios en el diámetro de la Tierra[25] y así sucesivamente.

Es bastante posible que el estudio completo de este fenómeno nos ofrezca importantes descubrimientos.

19. ¿Dónde comienzan los meses y los años?

La medianoche ha llegado a Moscú, introduciendo el Nuevo Año. Hacia el oeste de Moscú todavía es 31 de diciembre, mientras que hacia el este ya es 1 de enero. Sin embargo, en nuestra Tierra esférica, el Este y el Oeste deben encontrarse inevitablemente. Esto significa que debe haber en alguna parte una línea que divida los días 1 de 31, enero de diciembre y el Año Nuevo del Año viejo.

Esta línea se conoce como Línea de Fecha Internacional. Atraviesa el Estrecho de Bering, a través del Océano Pacífico, aproximadamente a lo largo del meridiano 180º. Se ha definido exactamente por acuerdos internacionales.

A lo largo de esta línea imaginaria, cortando el Pacífico, los días, los meses y los años cambian por primera vez en el globo.

Aquí yace lo que puede llamarse el umbral de nuestro calendario; es desde este punto desde donde comienzan todos los días del mes. Es la cuna del Nuevo Año. Cada día del mes aparece aquí antes que en cualquier otra parte; desde aquí se extiende hacia el oeste, circunnavega el globo y de nuevo regresa a su lugar de nacimiento para desaparecer.

---

25 Sería suficiente si el diámetro de la Tierra se volviese unos metros más largo o más corto, para causar los cambios mencionados anteriormente en la duración del día.

La Unión Soviética lidera el mundo como anfitrión de cada nuevo día del mes. En el cabo Dezhnev el día recién nacido en las aguas del Estrecho de Bering es bienvenido al mundo y empieza su marcha por todo el globo. Y es también aquí, en la punta oriental del Asia soviética, donde el día acaba, tras sus 24 horas de existencia.

Así, los días cambian en la Línea de Fecha Internacional. Los primeros marineros que circunnavegaron el mundo (antes de que se estableciera esta línea) calcularon mal los días.

Veamos una historia real contada por Antonio Pigafetta, quien acompañó a Magallanes en su viaje alrededor del mundo:

> *"El 19 de julio, miércoles, vimos las Islas de Cabo Verde y dejamos caer el ancla... Ansiosos por saber si nuestros diarios de a bordo eran correctos, preguntamos qué día de la semana era. Nos dijeron que era jueves. Esto nos sorprendió, porque nuestro libro indicaba que estábamos en Miércoles. Parecía improbable que todos nosotros hubiéramos cometido el mismo error de un día...*
>
> *Aprendimos después que nosotros no habíamos cometido ningún error en absoluto en nuestros cálculos. Navegando continuamente hacia el oeste, habíamos seguido al Sol en su camino y al a nuestro punto de salida se deben haber ganado 24 horas. Uno sólo necesita pensar un poco sobre esto para estar de acuerdo."*

¿Qué hace el marinero ahora cuándo cruza la línea de fecha? Para evitar el error, "resta" un día al navegar del este al oeste, y "suma" un día, al volver. Por consiguiente la historia contada por Julio Verne en su obra *La Vuelta al Mundo en Ochenta Días* sobre el viajero que habiendo navegado alrededor del mundo "regresó" un domingo cuando todavía era sábado, no podría pasar. Esto sólo podía ocurrir en tiempos de Magallanes, cuando no había ningún acuerdo sobre la línea de determinación de la fecha. Igualmente inconcebible en nuestro tiempo es la aventura descrita por Edgar Allan Poe en sus Tres domingos en una Semana, sobre el marinero que después de ir alrededor del mundo del este al oeste se encontró, al regresar a casa, a otro que había hecho el viaje en la dirección inversa. Uno mantenía la postura de que el día antes había sido domingo, el otro estaba convencido de que el día siguiente sería domingo, mientras que un amigo que había permanecido en tierra insistía en que ese día era domingo.

Por lo tanto para no reñir con el calendario en un viaje alrededor del mundo uno debe, cuando viaje hacia el este, tómese su tiempo para calcular los días, permitiendo al Sol ponerse al día, o en otras palabras, cuente dos veces el mismo día; por otro lado, cuando viaje al oeste, debe, al contrario, perder un día, para no retrasarse detrás del Sol.

Aunque esto es común, incluso en nuestros días, cuatro siglos después del viaje de Magallanes, no todo el mundo es consciente de ello.

20. ¿Cuántos Viernes hay en febrero?

Pregunta

¿Cuál es el mayor y el menor número de viernes que se pueden dar en el mes de febrero?

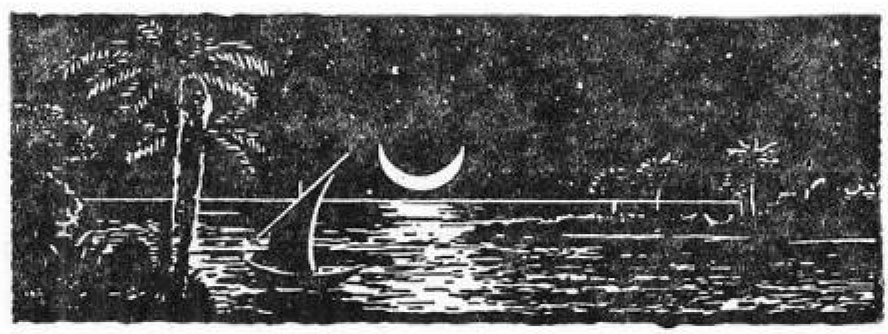
Respuesta

La respuesta común es que el mayor número de viernes en el mes de febrero es de cinco y el menor, cuatro. Sin duda alguna, es cierto que si en un año bisiesto el 1 de febrero cae en viernes, el 29 también será viernes, sumando por lo tanto cinco viernes en total.

Sin embargo, es posible calcular el doble de viernes de un mes de febrero. Imagine una nave recorriendo el camino existente entre Siberia y Alaska y dejando la orilla Asiática regularmente todos los viernes. ¿Cuántos viernes contará su capitán en el mes de febrero de un año bisiesto en el que además el día 1 es viernes? Desde que cruza la línea de fecha internacional de oeste a este y lo hace durante un viernes, contará dos viernes todas las semanas, sumando así 10 viernes en todo el mes. Al contrario, el capitán de una nave que deja Alaska todos los jueves y se dirige hacia Siberia perderá los viernes en sus cálculos, con el resultado de que no tendrá un solo viernes en todo el mes.

Así que la respuesta correcta es que el mayor número de posibles viernes en el mes de febrero es de 10, y el menor es de ninguno.

Capítulo 2
La luna y sus movimientos



Contenido:

1. ¿Cuarto creciente o cuarto menguante?

Pocos son los que viendo en el cielo el disco incompleto de la Luna, pueden decir sin

equivocarse, si la Luna está en creciente o en menguante.
La hoz de la "Luna creciente" y la hoz de la "Luna menguante" se distinguen solamente porque tienen la convexidad en sentido contrario. En el hemisferio Norte la Luna creciente siempre tiene la convexidad dirigida hacia la derecha, y la Luna menguante tiene la convexidad orientada hacia la izquierda. ¿Cómo podemos recordar fácilmente, sin temor a equivocarnos, hacia dónde mira cada fase de la Luna?
En ruso, en francés y en otras lenguas existen diferentes artificios mnemotécnicos que se basan en el parecido de la hoz o de la media luna con las letras -P y C, p y d-, iniciales de palabras que indican claramente si la Luna está en cuarto creciente o en cuarto menguante (figura 30).
Para los que hablan español en el hemisferio Norte, las hoces de la Luna pueden representar una C o una D, iniciales de Creciente y de Decreciente. Ahora bien, nosotros hemos de tomar estas letras con significado contrario, es decir, que cuando la Luna tiene la forma de C, inicial de Creciente; está en menguante; y cuando tiene la forma de una D, inicial de Decreciente, está en creciente. (También podemos servirnos al efecto del conocido dicho: "Luna creciente, cuernos a Oriente".)

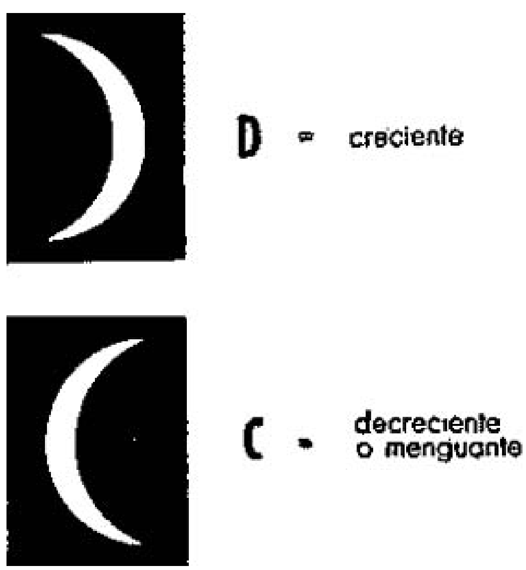


Figura 30. Procedimiento sencillo para distinguir el cuarto creciente del cuarto menguante en el hemisferio Norte

En el hemisferio Sur, en cambio, la correspondencia entre las iniciales C y D y el cuarto de Luna que simbolizan es perfecta, pues el observador de ese hemisferio ve siempre a nuestro satélite en posición invertida con respecto al observador del hemisferio Norte.

Por otra parte, todos estos signos mnemotécnicos resultan inaplicables en las latitudes más bajas. Ya en Crimea y en Transcaucasia, la hoz y la media luna se inclinan fuertemente hacia un lado, y más al Sur, están completamente acostadas. Cerca del Ecuador, la hoz de la Luna, colgada sobre el horizonte, parece una góndola columpiándose sobre las olas (la "barca de la Luna" de los cuentos árabes) o un arco brillante. Aquí no sirven signos de ninguna clase; con el arco acostado se puede formar indiferentemente una letra u otra: C y D, p y d. No en vano en la antigua Roma llamaban "engañosa" (Luna fallax) a la Luna inclinada.

Para no equivocarnos en este caso, en las fases de la Luna, debemos valernos de la astronomía: la Luna creciente es visible de noche en la parte occidental del cielo; la Luna menguante se ve de mañana en la parte oriental del cielo.

2. La Luna en las banderas

Problema

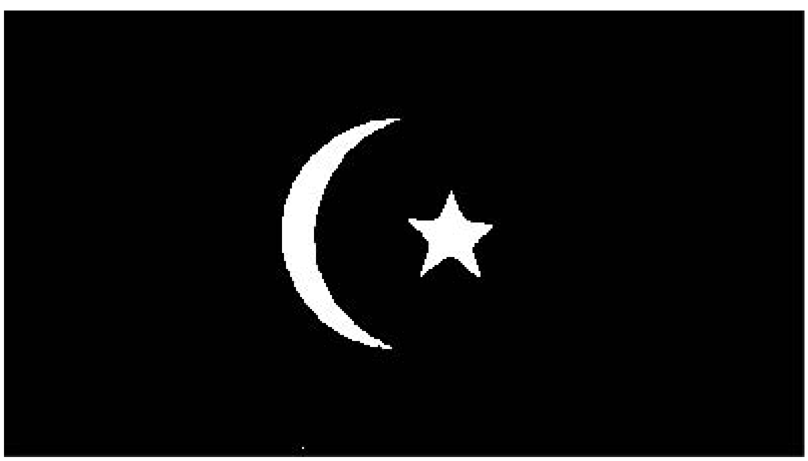


Figura 31. La antigua bandera de Turquía

En la figura 31 vemos la antigua bandera de Turquía. En ella están representadas la hoz de la Luna y una estrella. Esto nos sugiere los siguientes problemas:

- *¿Qué fase de la Luna representa la hoz de la bandera, creciente o* *menguante?*

- *¿Pueden observarse la hoz de la Luna y la estrella en el cielo, tal como aparecen representadas en la bandera?*

Solución

Recordando los signos mnemotécnicos antes indicados y teniendo en cuenta que la bandera pertenece a un país del hemisferio Norte, podemos decir que la Luna de la bandera es menguante.

No se puede ver la estrella dentro del círculo que resulta prolongando la hoz de la Luna hasta cerrar la circunferencia (figura 32a).

Todos los astros del cielo están mucho más lejos de la Tierra, que la Luna y, por consiguiente, o quedan ocultos por ella, o sólo se pueden ver fuera de los límites del área no iluminada de la Luna, como se indica en la figura 32b.

Es de señalar que en la bandera actual de Turquía, que también muestra la hoz de la Luna y una estrella, la estrella está separada de la hoz como se muestra en la figura 32b.

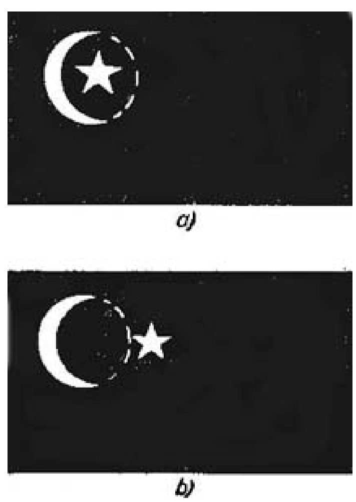


Figura 32. El por qué no se puede ver la estrella en los cuernos de la luna

3. Los enigmas de las fases de la Luna

La Luna recibe su luz del Sol, y por esta razón el lado convexo de la hoz de la Luna debe estar dirigido hacia el Sol. Los artistas se olvidan de este hecho con frecuencia.

Figura 33. ¿Cuál es el error astronómico cometido por el pintor en este paisaje? (Respuesta en el texto)

En las exposiciones de pinturas, no es raro ver paisajes en los cuales la media luna dirige hacia el Sol, la línea recta que une sus extremos; también se encuentra a veces la hoz de la Luna con sus cuernos dirigidos hacia el Sol (figura 33).

Es necesario observar, por otra parte, que dibujar correctamente la Luna creciente no es tan sencillo como parece.

Incluso artistas experimentados dibujan el arco exterior y el arco interior de la hoz de la Luna, en forma de semicírculo (figura 34 b). Sin embargo, solamente el arco exterior tiene forma semicircular; el arco interior es una semielipse, porque es una semicircunferencia (límite de la parte iluminada) visto en perspectiva (figura 34 a).

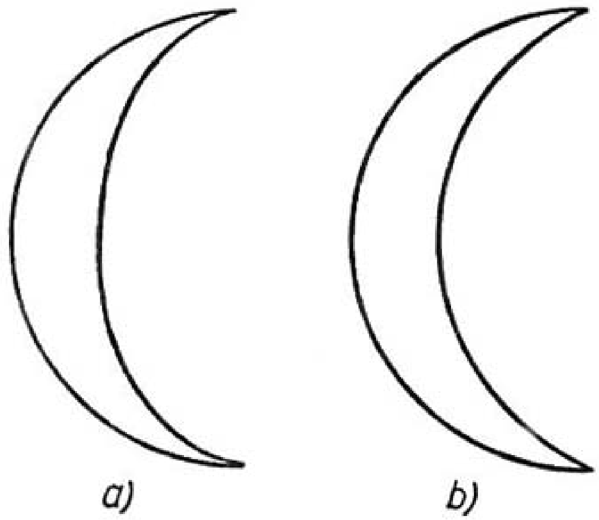


Figura 34. Cómo se debe, a), y cómo no se debe, b), representar la hoz de la Luna

No es fácil tampoco dar la posición correcta a la hoz de la Luna en el cielo. Con frecuencia se colocan la media luna y la hoz de la Luna, en forma bastante discordante con relación al Sol.

Figura 35. Posición de la hoz de la Luna con respecto al Sol

Como el Sol ilumina la Luna, nos hace pensar que la línea recta que une los extremos de la Luna debe formar un ángulo recto con el rayo que va del Sol a su punto medio (figura 35).

En otras palabras, parece ser que el centro del Sol se encuentra en la perpendicular trazada por el punto medio de la recta que une los extremos de la Luna. Sin embargo, esto sólo se cumple cuando la hoz es estrecha.

En la figura 36 se muestran las posiciones de la Luna en distintas fases con relación a los rayos del Sol. Da la impresión de que los rayos del Sol se curvan antes de alcanzar a la Luna.

La clave del enigma se reduce a lo siguiente: el rayo que va del Sol a la Luna, realmente es perpendicular a la línea que une los extremos de la Luna y constituye en el espacio una línea recta.

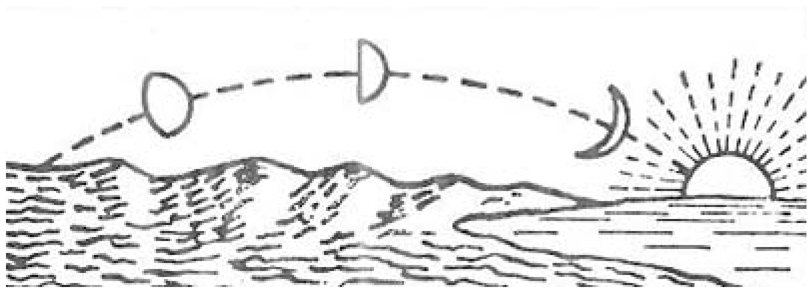


Figura 36. Posiciones de la Luna con respecto al Sol, en las que vemos la Luna en sus distintas fases

Pero nuestro ojo no dibuja en el cielo la mencionada recta, sino su proyección en la bóveda celeste que es cóncava, es decir, una línea curva. Por esta razón nos parece que la Luna está "colgada de forma incorrecta" en el cielo. El artista debe conocer estos detalles y saber trasladarlos al lienzo.

4. Planeta doble

La Tierra y la Luna forman un planeta doble[26]. Reciben esta denominación porque nuestro satélite, la Luna, se distingue de los satélites de los demás planetas por su magnitud y por su masa, porque predomina con relación a su planeta central.

En el sistema solar existen satélites más grandes y más pesados en valor absoluto, pero, en comparación con su planeta central, lo son mucho menos que nuestra Luna con relación a la Tierra.

En efecto, el diámetro de nuestra Luna mide más de un cuarto del diámetro del planeta Tierra, mientras que el diámetro del más grande de los satélites de otros planetas es sólo la décima parte del diámetro de su planeta. (Tritón, satélite de Neptuno.) Además, la masa de la Luna constituye 1/81 de la masa de la Tierra, en tanto que el más pesado de los satélites que se encuentran en el sistema solar, el satélite III de Júpiter, tiene menos de una diezmilésima parte de la masa de su

26 La expresión "planeta doble" hace referencia a dos planetas que orbitan el uno al otro en torno a un centro de masas, localizado por fuera de los dos cuerpos. Oficialmente se le denomina *sistema binario*. De igual manera, existen sistemas de *asteroides dobles* (o *planeta menor doble*) tales como (90) Antíope. *(N. del E.)*

planeta central.

La tabla siguiente muestra la proporción de la masa de los grandes satélites con respecto a su planeta central.

Planeta	**Satélite**	**Masa [27]**
Tierra	Luna	0,01230
Júpiter	Ganimedes	0,00008
Saturno	Titán	0,00021
Urano	Titania	0,00003
Neptuno	Tritón	0,00129

Comparando los valores mostrados en esta tabla vemos que nuestra Luna, por su masa, tiene la proporción más elevada con respecto a su planeta central.

Otra razón para que el sistema Tierra-Luna tienda a considerarse como un planeta doble, es la gran proximidad entre ambos cuerpos celestes. Muchos satélites de otros planetas giran a distancias mayores: algunos satélites de Júpiter (por ejemplo, el noveno, figura 37) giran 65 veces más lejos que la distancia entre la Tierra y la Luna.

Figura 37. El sistema Tierra-Luna comparado con el sistema de Júpiter. (Las dimensiones de los cuerpos celestes están indicadas sin tener en cuenta la escala real)

A esto se debe el hecho interesante de que la trayectoria descrita por la Luna alrededor del Sol difiera muy poco de la que sigue la Tierra. Esto tiende a parecernos inverosímil, si tenemos en cuenta que la Luna se mueve alrededor de la Tierra a una distancia de casi 400.000 km.

---

27 En proporción a la masa del planeta

Sin embargo, no olvidemos que al tiempo que la Luna da una vuelta alrededor de la Tierra, la Tierra misma ha tenido tiempo de trasladarse con ella aproximadamente 1/13 de su trayecto anual, es decir, 70.000.000 de kilómetros.

Imagínese la trayectoria circular de la Luna, 2.500.000 kilómetros, extendida a lo largo de una distancia 30 veces mayor. ¿Qué queda de su forma particular? Nada. Por esta razón, el camino de la Luna alrededor del Sol tiende a confundirse con la órbita de la Tierra, de la que sólo diverge en 13 puntos en los que apenas se observa su convexidad. Se puede demostrar con un cálculo sencillo (que no hacemos aquí para no recargar la exposición) que esta trayectoria de la Luna tiene su concavidad dirigida hacia el Sol. Se podría decir que se parece, a grandes rasgos, a un polígono de trece lados con ángulos ligeramente redondeados.

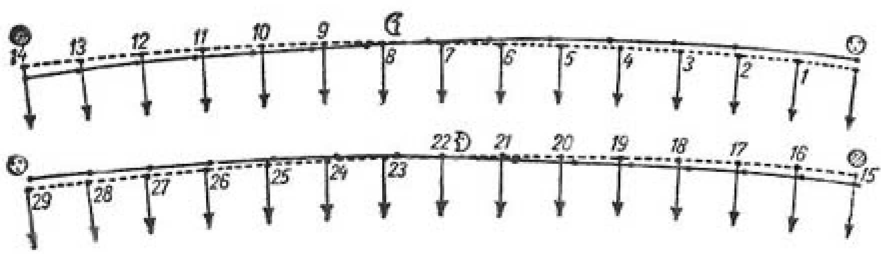


Figura 38. El recorrido mensual de la Luna (línea continua) y de la Tierra (punteada) alrededor del Sol

En la figura 38 se ve una representación precisa de las trayectorias de la Tierra y de la Luna a lo largo de un mes. La línea punteada es la trayectoria de la Tierra, y la línea continua, la de la Luna. Están tan cerca una de otra, que para representarlas de forma separada, fue necesario hacer un dibujo a una escala muy grande: el diámetro de la órbita de la Tierra mide 1/2 m en dicho dibujo. Si se tomara un diámetro de 10 cm, la separación máxima entre ambas trayectorias, en el dibujo, sería menor que el espesor de la línea que las representa. Observando este dibujo, uno se convence de que la Tierra y la Luna se mueven alrededor del Sol casi en la misma trayectoria y que la denominación que les otorgaron los astrónomos, de “planeta doble”, es completamente valedera[28].

---

28 Mirando atentamente el dibujo, se puede observar que el movimiento de la Luna representado en él no es exactamente uniforme. Igual situación ocurre en la realidad. La Luna se mueve alrededor de la Tierra describiendo una elipse, en uno de cuyos focos se encuentra la Tierra, y por esta razón, de acuerdo con la segunda ley de Kepler,

5. Por qué la luna no cae sobre el sol

La pregunta puede parecer ingenua. ¿En virtud de qué habría de caer la Luna sobre el Sol?

Si la Tierra atrae a la Luna con más fuerza que el lejano Sol, la obliga, naturalmente, a girar alrededor de ella.

Los lectores que piensan de esta manera, se sorprenderán al saber que ocurre lo contrario: la Luna es atraída con más fuerza por el Sol que por la Tierra.

El cálculo así lo demuestra. Comparemos las fuerzas de atracción que ejercen el Sol y la Tierra sobre la Luna. Ambas fuerzas dependen de dos factores: de la magnitud de la masa que la atrae y de la distancia de esta masa a la Luna. La masa del Sol es 330.000 veces mayor que la masa de la Tierra, y atraería a la Luna con una fuerza un número igual de veces mayor que la Tierra, si tanto el Sol como la Tierra estuvieran a igual distancia de la Luna. Pero el Sol se encuentra cerca de 400 veces más lejos de la Luna que la Tierra. La fuerza de atracción disminuye proporcionalmente al cuadrado de la distancia; por esto, la atracción del Sol debe disminuir en (400)2, es decir, en 160.000 veces. Lo cual significa que la atracción del Sol es mayor que la terrestre en:

$$160.000/330.000$$

es decir, en poco más de dos veces.

Por lo tanto, la Luna es atraída por el Sol con una fuerza dos veces mayor que la fuerza con la que la atrae Tierra. ¿Entonces por qué la Luna no se precipita sobre el Sol? ¿Por qué la Tierra obliga a la Luna a girar alrededor de ella y no predomina la acción del Sol?

La Luna no cae en el Sol por la misma razón por la cual la Tierra tampoco cae en él. La Luna gira alrededor del Sol junto con la Tierra, y toda la acción gravitacional del Sol se consume en llevar a ambos cuerpos, constantemente, de una trayectoria recta a una órbita circular, es decir, en transformar el movimiento lineal recto en lineal curvo. Basta echar una mirada a la figura 38 para convencerse de lo dicho.

---

cuando está más cerca de la Tierra se mueve más rápido que cuando se encuentra alejada de ésta al máximo. La excentricidad de la órbita de la Luna es bastante elevada: 0,055.

Quizás a algunos lectores les quede alguna duda, ¿Cómo sucede esto? La Tierra atrae a la Luna con una determinada fuerza y el Sol atrae a la Luna con una fuerza mayor, pero la Luna, en vez de caer en el Sol, gira alrededor de la Tierra. Esto sería extraño si el Sol solo atrajera a la Luna; pero atrae a la Luna y también a la Tierra, es decir, a todo el "planeta doble", y podemos decir que no interfiere con las relaciones internas de los miembros de esta pareja.

Hablando en sentido riguroso, el Sol atrae al centro común de gravedad del sistema Tierra-Luna; este centro (llamado "baricentro") gira también alrededor del Sol bajo la influencia de la atracción solar. Se encuentra a una distancia de 2/3 de radio terrestre del centro de la Tierra, en dirección a la Luna. La Luna y el centro de la Tierra giran alrededor del baricentro completando una vuelta durante un mes.

6. El lado visible y el lado invisible de la luna

Entre los efectos proporcionados por el estereoscopio, ninguno es tan llamativo como el aspecto de la Luna. Con el estereoscopio uno comprueba que la Luna es esférica, mientras que al mirarla directamente, parece plana, es decir, con forma de plato.

Pero muchos ni siquiera imaginan cuán difícil es obtener una fotografía estereoscópica de nuestro satélite. Para lograrla es necesario conocer muy bien las características de los caprichosos movimientos del astro nocturno.

El problema consiste en que la Luna da vueltas alrededor de la Tierra de tal modo que siempre dirige la misma cara hacia nuestro planeta. Mientras gira alrededor de la Tierra, la Luna gira al mismo tiempo alrededor de su eje, y ambos movimientos se completan en el mismo espacio de tiempo[29].

En la figura 39 se ve una elipse que representa la órbita de la Luna. En el dibujo se exagera, de manera intencional, el estiramiento de la elipse de la trayectoria que

---

29 La cara oculta de la Luna, es la superficie lunar que no se puede observar desde la Tierra: cada vez que miramos hacia la Luna vemos siempre la misma cara, y hay un lado que nunca vemos, comúnmente denominado *el lado oscuro de la Luna*.

¿Por qué vemos siempre la misma cara? Esto se debe a que la Luna rota sobre sí misma en el mismo tiempo que se traslada alrededor de la Tierra, es decir, que su período de rotación es igual al período de traslación, lo cual hace que siempre veamos la misma cara.

Esta cara permaneció oculta para la humanidad, hasta que la sonda soviética Lunik 3, la fotografió por primera vez el 10 de octubre de 1959.

La cara oculta de la luna es una zona mucho más accidentada que la cara visible, debido a que al estar orientada hacia el espacio, está más expuesta a la caída de bólidos, fenómeno que no ocurre con tanta frecuencia en la cara visible gracias al campo gravitatorio de la Tierra. *(N. del E.)*

describe la Luna; realmente la excentricidad de la órbita de la Luna es de 0,055 ó 1/18. Resulta imposible representar en un pequeño dibujo, la órbita de la Luna, de manera que se pueda distinguir de una circunferencia: dando al semieje mayor una magnitud de 1 m, el semieje menor sería más corto que él solo en 1,5 mm; la Tierra distaría del centro solo 5,5 cm. Para que resulte más fácil entender la explicación que sigue, en el dibujo se ha trazado una elipse más estirada.

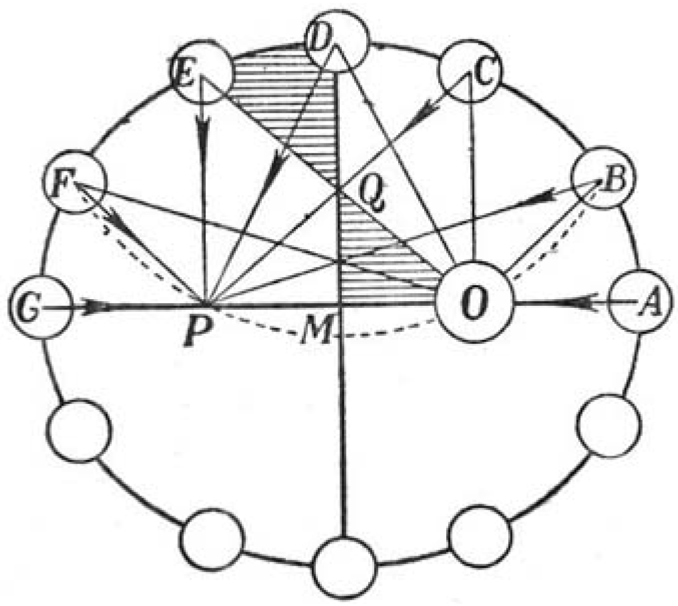


Figura 39. Movimiento de la Luna en su órbita alrededor de la Tierra (Detalles en el texto)

Imaginemos que la elipse de la figura 39 corresponde a la trayectoria de la Luna alrededor de la Tierra. La Tierra está situada en el punto O, en uno de los focos de la elipse. Las leyes de Kepler no se refieren solamente al movimiento de los planetas alrededor del Sol, sino también al movimiento de los satélites alrededor de los planetas centrales, en particular a la revolución de la Luna. De acuerdo con la segunda ley de Kepler, la Luna, en un cuarto de mes, recorre un camino AE tal que la superficie OABCDE es igual a un cuarto de la superficie de la elipse, es decir, a la superficie MABCD (se confirma la igualdad de las superficies OAE y MAD de nuestro dibujo, por la igualdad aproximada de las superficies MOQ y EQD). De modo que en un cuarto de mes, la Luna recorre el camino que va de la A a la E. La rotación de la Luna (como se produce, en general, la rotación de los planetas, a diferencia de su revolución alrededor del Sol) se produce de manera uniforme: en un cuarto de mes gira exactamente 90º. Por esto, cuando la Luna se encuentra en E, el radio de la Luna dirigido hacia la Tierra en el punto A habrá descrito un arco de 90º y estará dirigido no hacia el punto M, sino hacia algún otro punto a la izquierda de M, no lejos del otro foco P de la órbita de la Luna. Si bien, la Luna oculta un poco su cara al observador ubicado en la Tierra, por la izquierda, éste puede ver por el lado derecho una franja estrecha de la otra mitad de la Luna, no visible antes. En el punto F, la Luna muestra al observador ubicado en la Tierra, una franja más estrecha, de su cara oculta, porque el ángulo OFP es menor que el ángulo OEP. En el punto G, en el "apogeo" de la órbita, la Luna ocupa la misma posición con relación a la Tierra, que en el "perigeo" A[30].

En sus movimientos posteriores, la Luna se vuelve respecto a la Tierra en sentido contrario, y muestra al observador ubicado en nuestro planeta, otra estrecha franja de su cara oculta; esta franja se ensancha al principio, luego se reduce, y, en el punto A, la Luna vuelve a ocupar la posición anterior.

Vemos así que, a consecuencia de la forma elíptica de su órbita, nuestro satélite no tiene siempre la misma cara dirigida hacia la Tierra. Invariablemente, la Luna tiene la misma cara dirigida hacia el otro foco de su órbita, y no hacia la Tierra. Para nosotros la Luna oscila alrededor de su posición media en forma semejante a una balanza, y de ahí que los astrónomos llamen a este balanceo "libración", de la palabra latina "libra", que significa balanza. La magnitud de la libración en cada punto se mide por el ángulo correspondiente; por ejemplo, en el punto E, la libración es igual al ángulo OEM. El valor máximo de la libración es de 7º 53', es decir, casi 8º.

Es interesante observar cómo aumenta y disminuye el ángulo de libración, con el desplazamiento de la Luna a través de su órbita. Pongamos la punta de un compás en D, y tracemos un arco que pase por los focos O y P. Este arco corta la órbita en los puntos B y F. Los ángulos OBP y OFP, por ser inscritos, son iguales a la mitad del ángulo central ODP. De donde deducimos que, durante el movimiento de la Luna de

---

30 *Perigeo* es el punto en el cual un objeto celeste que gira alrededor de la Tierra se encuentra a su mínima distancia de nuestro planeta. El punto de máxima distancia es el *Apogeo*.

La Luna, cuya órbita tiene una Excentricidad de 0,0549, en el *perigeo* está a 356.410 km. de la Tierra, y en el *apogeo*, á 406.740 km. Estos dos puntos extremos de la órbita se llaman *Apsides*. *(N. del E.)*

A a D, la libración crece al principio rápidamente, en el punto B alcanza la mitad del máximo y, después, continúa creciendo lentamente; entre D y F disminuye la libración, al principio lentamente, luego rápidamente. En la segunda mitad de la elipse, la libración cambia de magnitud con el mismo ritmo, pero en sentido inverso. (El valor de la libración en cada punto de la órbita es proporcional a la distancia de la Luna al eje mayor de la elipse.)

El balanceo de la Luna que acabamos de examinar, se llama libración en longitud. Nuestro satélite está sujeto también a otra libración en latitud. El plano de la órbita de la Luna está inclinado sobre el plano del Ecuador de la Luna 6½º. Por eso vemos la Luna en unos casos desde el Sur y en otros desde el Norte, y podemos observar una franja pequeñísima de la cara "oculta" de la Luna, más allá de sus polos. Esta libración en latitud alcanza 6½º.

Expliquemos ahora cómo aprovecha el astrónomo el suave balanceo de la Luna alrededor de su posición media para obtener fotografías estereoscópicas.

El lector se da cuenta seguramente de que para esto es necesario elegir dos posiciones de la Luna tales que en una de ellas presente un giro con relación a la otra suficientemente grande.

En los puntos A y B, B y C, C y D, etc., la Luna ocupa posiciones tan distintas con relación a la Tierra, que hacen posibles las fotografías estereoscópicas. Pero aquí tenemos una nueva complicación: en estas posiciones la diferencia de tiempo de la Luna (de 1½ a 2 días) es demasiado grande, al punto que la franja de la superficie de la Luna próxima al círculo iluminado, ya sale de la sombra. Esto es inadmisible en fotografías estereoscópicas (esa franja brillaría como si fuera de plata). Surge un difícil problema: encontrar dos fases iguales de la Luna con una diferencia de libración (en longitud) tan pequeña, que el borde del círculo iluminado pase por los mismos puntos de la superficie lunar. Pero esto tampoco es suficiente; en ambas posiciones, la libración también debe tener igual latitud[31].

Ya vemos lo difícil que es obtener buenas estereofotografías de la Luna, y no se sorprendan al saber que a menudo una fotografía de un par estereoscópico se hace unos años después de la otra.

31 Para obtener fotografías estereoscópicas basta que la Luna presente un giro de 1º. (Más detalles de esto se pueden ver en mi Física Recreativa.)

Nuestros lectores quizá no piensen hacer estereofotografías de la Luna. Acá se explica el procedimiento para obtenerlas, naturalmente, no con una finalidad práctica, sino sólo para mostrar que las características del movimiento de la Luna, dan a los astrónomos la posibilidad de ver una franja no muy grande de su cara oculta desde nuestro satélite. Gracias a ambas libraciones de la Luna, vemos el 59% de su superficie, y no su mitad. Inaccesible a nuestra vista, queda el 41%. Nadie sabe que apariencia tiene esta parte de la superficie lunar; puede suponerse, a lo sumo, que no difiere de la parte visible[32].

Se han hecho ingeniosos ensayos, prolongando hacia atrás, las cordilleras y las franjas iluminadas de la Luna, que salen de la parte invisible a la parte visible, para hacer conjeturas de algunos detalles de la mitad que no podemos ver. Resulta imposible por ahora, probar tales conjeturas. Decimos que por ahora, y no sin fundamento, pues hace tiempo que se estudian procedimientos para volar alrededor de la Luna en algún vehículo que sea capaz de superar la atracción de la Tierra y desplazarse en el espacio interplanetario (ver mi libro Viajes interplanetarios). Ya no estamos muy lejos de la realización de esta audaz empresa. Por el momento se sabe una cosa: que carece de fundamento la hipótesis, tantas veces planteada, sobre la existencia de atmósfera y agua en el lado invisible de la Luna, y contradice las leyes de la física; si no hay atmósfera y agua en un lado de la Luna, no puede haberlas tampoco en el otro lado. Luego volveremos a tratar este tema.

7. La segunda Luna y la Luna de la Luna

La prensa presenta, de vez en cuando, informes referentes a que un observador u otro consigue ver un segundo satélite de la Tierra, es decir, su segunda Luna. Aunque tales noticias nunca se han confirmado, resulta interesante, sin embargo, detenerse en este tema.

El planteamiento de la existencia de un segundo satélite de la Tierra no es nuevo. Tiene tras de sí una larga historia. Quien haya leído la novela de Julio Verne: Alrededor de la Luna, recordará seguramente, que ya se menciona la segunda Luna en esta novela. Es una Luna tan pequeña y su velocidad tan grande, que los

---

32 Conviene recordar que este libro fue escrito mucho antes de que fueran lanzados los cohetes lunares soviéticos, uno de los cuales fotografió la cara oculta de la Luna. (N. R.)

habitantes de la Tierra no pueden observarla. El astrónomo francés Petit, dice Julio Verne, sospechó su existencia y fijó su período de revolución alrededor de la Tierra en 3 horas 20 minutos. Su distancia a la superficie de la Tierra es igual a 8.140 km. Es interesante señalar que la revista inglesa Science, en un artículo sobre la astronomía de Julio Verne, considera la segunda Luna y al mismo Petit, como simples fantasías. Ciertamente, en ninguna enciclopedia se menciona al citado astrónomo. Y, sin embargo, la información del novelista no es inventada. El director del observatorio de Tolosa, Petit, alrededor del año 50 del siglo pasado, sostuvo en efecto la existencia de una segunda Luna, un meteorito con un período de revolución de 3 horas 30 minutos, que se movía a 5.000 km, y no a 8.000, de la superficie de la Tierra. Esta opinión, compartida por unos pocos astrónomos, cayó en el olvido[33].

Teóricamente, en la admisión de la existencia de un segundo satélite de la Tierra muy pequeño, no hay nada anticientífico. Pero un cuerpo celeste de estas características, se debe observar en todo momento, no sólo en el instante en que atraviesa (de manera aparente), el disco de la Luna o del Sol.

Incluso si girará tan cerca de la Tierra que se sumergiera en cada vuelta, en la ancha sombra de nuestro planeta, también se vería en el cielo matutino y el vespertino, como una estrella brillante, por efecto de los rayos del Sol. El rápido movimiento y la frecuente aparición de esta estrella llamarían la atención de muchos observadores. En los momentos de eclipse total de Sol, la segunda Luna tampoco escaparía a la observación de los astrónomos.

En síntesis: si la Tierra tuviera realmente un segundo satélite, se le podría observar con mucha frecuencia. Sin embargo, no se ha presentado observación fidedigna alguna.

Junto a la hipótesis de la segunda Luna, surge el interrogante acerca de si nuestra Luna tiene a su vez su pequeño satélite, la “Luna de la Luna”.

---

33 El 14 de septiembre de 2006 se descubrió un objeto alrededor de nuestro planeta, llamado 6R10DB9, cuyo origen aún se trata de dilucidar. Se desconoce si es natural, como un asteroide, o artificial, como un desecho espacial. El objeto se observó a 2,2 Distancias Lunares. Su órbita presentaba una excentricidad geocéntrica inferior a 1.

Los cálculos muestran que previo a su captura por parte de la Tierra, 6R10DB9 estaba en una órbita de baja inclinación alrededor del Sol, cuyo período fue de 11 meses; lo que suele ocurrir con los desechos de las naves espaciales de los 60 y 70. Pero si 6R10DB9 es un desecho de una nave espacial, resulta vulnerable a la presión de la radiación solar y exhibe notables cambios en su órbita. Los análisis de las mediciones de posición, indican que se parece más a un cuerpo rocoso que a basura espacial. *(N. del E.)*

Pero resulta muy difícil verificar directamente la existencia de este satélite de la Luna. El astrónomo Malton dice al respecto lo siguiente:

> *"Cuando la Luna brilla al máximo, su luz o la luz del Sol no permiten distinguir un cuerpo muy pequeño en su vecindad. Sólo en los eclipses de Luna el satélite de ésta podría ser iluminado por el Sol, ya que entonces las partes cercanas del cielo estarían libres de la influencia de la luz difusa de la Luna. Así, pues, sólo se puede esperar el descubrimiento de un cuerpo pequeño que gire alrededor de la Luna, durante los eclipses lunares. Ya se han efectuado Tales investigaciones, pero no han arrojado resultados positivos."*

8. ¿Por qué la luna no tiene atmósfera?

Este interrogante se aclara mejor si revertimos la pregunta. Antes de hablar de por qué no hay atmósfera alrededor de la Luna, preguntémonos: ¿por qué se mantiene la atmósfera alrededor de nuestro propio planeta?

Recordemos que el aire, como todo gas, está constituido por un caos de moléculas libres que se mueven impetuosamente en distintas direcciones. Su velocidad media, a 0º, es de cerca de ½ km por segundo (la velocidad inicial de una bala de fusil). ¿Por qué no se dispersan esas moléculas en el espacio? Por la misma razón por la cual tampoco se escapa al espacio una bala de fusil. Habiendo agotado la energía de su movimiento en vencer la fuerza de la gravedad, las moléculas caen de nuevo hacia la Tierra. Imagínese el lector una molécula que vuele verticalmente hacia arriba, cerca de la superficie terrestre, con una velocidad de ½ km por segundo. ¿Hasta qué altura puede llegar? Es fácil calcularlo; la velocidad v, la altura h del ascenso y la aceleración g de la fuerza de la gravedad, están relacionadas por la fórmula siguiente:

$$v^2 = 2gh$$

Sustituyamos v por su valor: 500 m/s, y g por: 10 m/s²; tenemos

$$250.000 = 20h$$

de donde:

$$h = 12.500 \text{ m} = 12½ \text{ km.}$$

Pero si las moléculas de aire no pueden volar más de 12½ km, ¿cómo puede haber moléculas de aire a una altura mayor?

El oxigeno que entra en la composición de nuestra atmósfera se forma cerca de la superficie terrestre (a partir del gas carbónico, gracias a la actividad de las plantas).

¿Qué fuerza lo eleva y lo mantiene a una altura de 500 kilómetros o más, donde ha sido comprobada la presencia de trazas de aire?

La física nos da la misma respuesta que nos daría la estadística si se lo preguntáramos: "*La duración media de la vida humana es de 40 años, ¿cómo puede haber personas de 80 años*?"

Todo se reduce a que el cálculo que efectuamos se refiere a una molécula promedio y no a una molécula real. La molécula promedio posee una velocidad de ½ km por segundo, pero las moléculas reales se mueven unas más lentas y otras más rápidas que la molécula promedio. Es cierto que no es muy grande el porcentaje de moléculas cuya velocidad se aparta visiblemente de la molécula promedio y que disminuye rápidamente con el crecimiento de la magnitud de esta desviación. De las moléculas contenidas en un volumen dado de oxígeno a 0º, sólo el 20% posee una velocidad entre 400 y 500 m/s. Aproximadamente, otras tantas moléculas se mueven a velocidades entre 300 y 400 m/s, un 17% con una velocidad entre 200 y 300 m/s, un 9% con velocidades entre 600 y 700 m/s, un 8% con velocidades entre 700 y 800 m/s y un 1 % con la velocidades entre 1.300 y 1.400 m/s.

Una pequeña parte (menos de una millonésima) de las moléculas tiene una velocidad de 3.500 m/s, y esta velocidad es suficiente para que las moléculas puedan alcanzar una altura de 600 km.

En efecto,

$$3.500^2 = 20h$$

Donde:

$$h = 12.250.000/20 = 612.500$$

es decir, más de 600 km.

Resulta así comprensible la presencia de trazas de oxígeno a cientos de kilómetros de altura de la superficie terrestre; como vemos, es consecuencia de las propiedades físicas de los gases. Sin embargo, las moléculas de oxígeno, de nitrógeno, de vapor de agua, de gas carbónico, no poseen velocidades que les permitan escapar de la esfera terrestre. Para eso se requiere una velocidad superior á 11 km por segundo, y solo algunas moléculas aisladas de los gases mencionados, poseen estas velocidades, a bajas temperaturas. Es por esto que la Tierra mantiene tan firme su capa atmosférica. Se ha calculado que para perder la mitad del volumen del hidrógeno, el más liviano de los gases de la atmósfera terrestre, deben pasar tantos años, que dicho tiempo se expresa con 25 cifras. En millones de años no se manifiesta ningún cambio en la composición ni en la masa de la atmósfera terrestre.

No hay mucho que agregar, para explicar ahora por qué la Luna no puede mantener a su alrededor una atmósfera similar. La fuerza de atracción de la Luna es seis veces más débil que la de la Tierra; de modo que la velocidad que se requiere en la Luna para superar la fuerza gravitacional, es también menor, y es igual a 2.360 m/s. Y como la velocidad de las moléculas de oxígeno y de nitrógeno, a temperaturas moderadas, puede superar este valor, queda claro que la Luna iría perdiendo constantemente su atmósfera, si la tuviera. Cuando se volatilizaran las moléculas más rápidas, otras moléculas alcanzarían la velocidad crítica (como consecuencia de la ley de distribución de las velocidades entre las partículas de un gas), y así estarían escapando continuamente al espacio nuevas, partículas de la capa atmosférica. Al cabo de un período de tiempo prudencial, sumamente pequeño a escala del universo, toda la atmósfera abandona la superficie de un cuerpo celeste que tenga una fuerza de atracción tan pequeña.

Se puede demostrar matemáticamente que si la velocidad media de las moléculas de la atmósfera de un planeta fuera tres veces menor que la velocidad límite (es decir, si fuera para la Luna 2.360÷3 = 790 m/s), la mitad de la atmósfera se dispersaría al cabo de unas pocas semanas. (Solo se puede mantener la atmósfera de un cuerpo celeste si la velocidad media de sus moléculas es cinco veces menor que la velocidad límite.)

Se ha apuntado la idea, mejor dicho, la fantasía, de que cuando el hombre visite y conquiste la Luna, la rodeará de una atmósfera artificial y la hará habitable. De lo antes dicho, el lector notará claramente que tal empresa es irrealizable. La ausencia de atmósfera de nuestro satélite no es casual, no es un capricho de la naturaleza, sino una consecuencia obligada de las leyes de la física.

Se comprende también que la causa por la cual no es posible la existencia de atmósfera en la Luna, determina igualmente la ausencia de ésta, en general, en todos los cuerpos celestes cuya fuerza de atracción es bastante débil, tales como los asteroides y la mayoría de los satélites de los planetas[34].

9. Las dimensiones del mundo lunar

Sobre esto, naturalmente, hablan con total exactitud los datos numéricos; la magnitud del diámetro de la Luna (3.500 kilómetros), su superficie y su volumen.

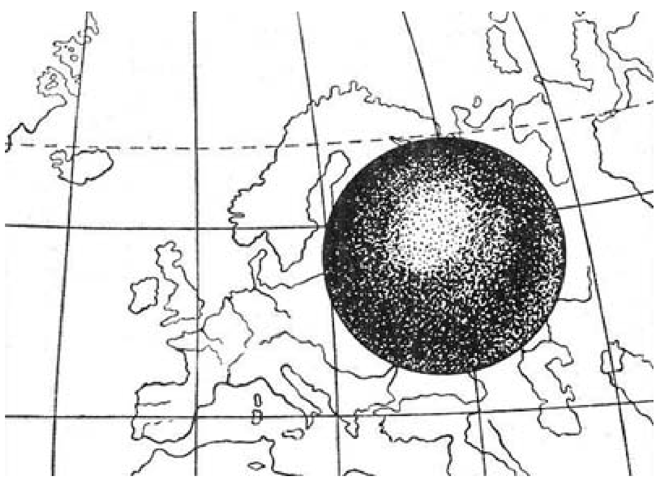


Figura 40. Las dimensiones de la Luna comparadas con el continente europeo. (No debe deducirse, sin embargo, que la superficie del globo lunar sea menor que la superficie de Europa)

34 En 1948 el astrónomo moscovita, Y. N. Lipski, demostró, al parecer, la presencia de trazas de atmósfera en la Luna.

Pero los números, necesarios para efectuar los cálculos, no son capaces de darnos la idea concreta de las dimensiones que exige nuestra mente. Será útil hacer comparaciones concretas.

Comparemos el continente lunar (pues la Luna es un continente macizo) con los continentes del globo terrestre (figura 40).

Esto nos dirá mucho más que la afirmación abstracta de que la superficie total del globo lunar es 14 veces menor que la superficie de la Tierra. Por el número de kilómetros cuadrados la superficie de nuestro satélite es apenas algo menor que la superficie de América. Y la superficie de la parte de la Luna que está dirigida hacia la Tierra y es accesible a nuestra observación, resulta ser casi exactamente igual a la de América del Sur.

La masa total de la atmósfera de la Luna no puede exceder de una cienmilésima de la atmósfera terrestre. (N. R.)

Para hacer evidente las dimensiones de los "mares" de la Luna en comparación con los terrestres, en el mapa de la Luna (figura 41) están representados a igual escala los contornos del mar Negro y del mar Caspio.

Figura 41. Los mares de la Tierra comparados con los de la Luna. El Mar Negro y el Mar Caspio transportados a la Luna serían mayores que todos los mares de ésta. (Los números indican: 1, Mar de las Nubes; 2, Mar de la Humedad; 3, Mar de los Vapores; 4, Mar de la Serenidad.)[35]

35 El *Mar de las Nubes* (Mare Nubium) se encuentra en la cara visible de la Luna. Tiene un diámetro de 715

Enseguida se echa de ver que los "mares" de la Luna no son muy grandes, a pesar de que ocupan una parte apreciable del disco.
El mar de la Serenidad (170.000 km2) por ejemplo, es aproximadamente dos veces y media menor que el mar Caspio.

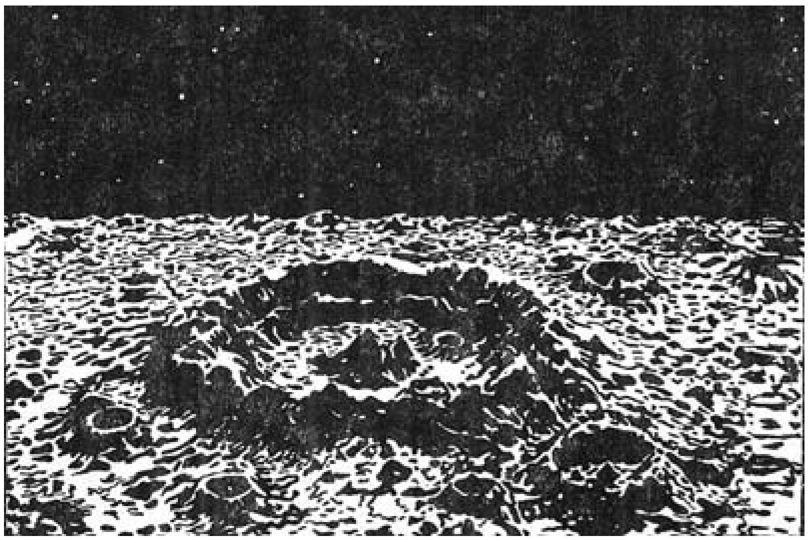


Figura 42. Montañas anulares frecuentes en la Luna

En compensación, entre las montañas anulares de la Luna hay verdaderos gigantes, como no se encuentran en la Tierra. Por ejemplo, el valle circular de la montaña de Grimaldi engloba una superficie mayor que la del lago Baikal. Dentro de esta montaña cabría enteramente un estado no muy grande, por ejemplo, Bélgica o Suiza.

10. Paisajes lunares

Las fotografías de la superficie de la Luna se ven con tanta frecuencia en los libros, que seguramente nuestros lectores conocen el aspecto de las particulares características del relieve lunar, las montañas y los cráteres o "circos" (figura 42). Es posible que algunos hayan observado también las montañas de la Luna con un pequeño telescopio; para esto es suficiente un telescopio con un objetivo de 3 cm.
Pero ni las fotografías ni la observación con el telescopio dan una idea exacta de

---

km, y es una de las cuencas circulares más antiguas de la Luna.

cómo vería la superficie lunar, un observador que estuviera en la Luna misma. Al estar al lado de las montañas lunares, el observador las vería en una perspectiva distinta de la que le da el telescopio. Una cosa es observar un objeto desde gran altura y otra cosa, completamente distinta, tenerlo al lado. Ilustremos con algunos ejemplos, como se manifiesta esta diferencia.

El cráter de Eratóstenes se ve desde la Tierra en forma de pared anular con un pico dentro del valle.

En el telescopio, el cráter aparece en relieve y escarpado, gracias a que las sombras lo hacen destacar bien en la superficie lunar.

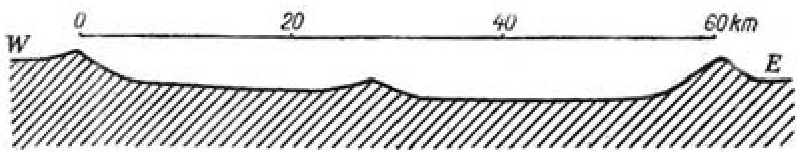


Figura 43. Perfil de un gran cráter lunar

Obsérvese, sin embargo, su perfil (figura 43): se ve que, en comparación con el gigantesco diámetro del circo (60 km), la altura de la pared y la del cono interior son muy pequeñas; la inclinación de las laderas disimula más aún, su altura.

Imagínense que ahora están paseando dentro de este circo y recuerden que su diámetro es igual a la distancia existente entre el lago Ladoga y el golfo de Finlandia. Apenas si notarían la forma anular de la pared; la misma convexidad del suelo les escondería su parte inferior, ya que el horizonte lunar es dos veces más reducido que el de la Tierra (en correspondencia con el diámetro de la Luna, 4 veces menor). Sobre la Tierra, un hombre de estatura mediana, de pie, en un lugar llano, no puede ver en torno suyo á más de 5 km de distancia.

Este valor surge de la fórmula de la distancia del horizonte[36]:

$$D = \sqrt{2Rh}$$

en la que D es la distancia en km, h la altura de los ojos en kilómetros y R el radio del planeta en km.

36 Sobre el cálculo de la distancia del horizonte, ver en mi Geometría Recreativa, el capítulo "Donde la tierra se junta con el cielo" (Capítulo sexto).

Sustituyendo estas letras por sus valores para la Tierra y para la Luna, resulta que la distancia del horizonte, para un hombre de estatura mediana[37], es

en la Tierra	4,8 km
en la Luna	2,5 km

La figura 44 muestra el panorama que se ofrecería a un observador dentro de un circo lunar grande (representa el paisaje de un gran circo, el de Arquímedes).

Figura 44. Panorama que vería un observador colocado en el centro de un gran circo lunar.

¿No es cierto que esa vasta llanura con la cadena de colinas en el horizonte, poco se parece a la imagen que uno se hace de un circo lunar?

Mirándolo desde el otro lado de la pared, desde fuera del circo, el observador también vería algo distinto de lo que espera. La ladera exterior de una montaña anular (ver la figura 43) se eleva tan suavemente, que al viajero no le parecería una montaña y no podría convencerse de que la cadena de colinas que él ve es una montaña anular que encierra una depresión circular. Para ello sería necesario que atravesara la cresta; pero, como ya hemos dicho, una vez dentro nada sorprendente se ofrecería a la vista del alpinista lunar.

Además de esos gigantescos circos, en la Luna hay también un gran número de

37 Se asume un hombre de 1,75 m de estatura. El radio de la *Tierra* de 6.400 km y el radio de la *Luna* de 1.800 km. *(N. del E.)*

circos pequeños, los cuales se abarcan fácilmente con una mirada, incluso estando muy cerca de ellos. Pero su altura es muy pequeña; ante ellos el observador no experimentaría nada extraordinario. En cambio, las cordilleras montañosas de la Luna, que llevan las denominaciones de las montañas de la Tierra: Alpes, Cáucaso, Apeninos, etc., rivalizan por su altura con las terrestres y alcanzan de 7 a 8 km. En relación con la pequeña Luna, su altura es impresionante.

La ausencia de atmósfera en la Luna y la nitidez de las sombras que de ello se deriva dan lugar en la observación telescópica a una interesante ilusión: las más pequeñas desigualdades del suelo se exageran y aparecen con un relieve desmesurado. Pongamos medio guisante con la convexidad hacia arriba. No es, por cierto, muy alto. Sin embargo, obsérvese la larga sombra que arroja (figura 45).

Figura 45. Medio guisante, arroja iluminado lateralmente, una sombra larga

Con una iluminación lateral, en la Luna la sombra se hace 20 veces mayor que la altura del cuerpo que la origina.

Figura 46. El Monte Pico (Mons Pico) se observa a través del telescopio, como una roca afilada y abrupta

Este fenómeno es de gran ayuda para los astrónomos: gracias a la longitud de las sombras, es posible observar en la Luna, con el telescopio, objetos de una altura de

30 m. Pero la misma circunstancia nos lleva a exagerar las variaciones del relieve lunar. El Monte Pico (Mons Pico), por ejemplo, se observa tan escarpado a través del telescopio, que da la impresión de ser una roca afilada y abrupta (figura 46).

Así se representaba antes. Pero observándolo desde la superficie lunar, se ve de forma completamente distinta, tal cual se representa en la figura 47.

Figura 47. A un observador situado en la superficie de la Luna, el Monte Pico (Mons Pico) le parecerá de suaves pendientes

En cambio, otras particularidades del relieve de la Luna son, a la inversa, subestimadas. Con el telescopio observamos en la superficie de la Luna grietas estrechas, apenas visibles, y nos parece que no pueden jugar un papel importante en el paisaje lunar. Pero transportados a la superficie de nuestro satélite, veríamos en tales sitios, a nuestros pies, un profundo precipicio negro que se extendería lejos; más allá del horizonte.

Otro ejemplo: sobre la Luna se encuentra la Cordillera Recta (Montes Recti), escalón vertical que corta una de sus llanuras. Mirando esta pared en el mapa (figura 48), olvidamos que tiene 300 m de altura; situados en las cercanías, nos sentiríamos defraudados por su poca altura.

Figura 48. La "Cordillera Recta" (Montes Recti) de la Luna vista a través del telescopio

En la figura 49 el artista intentó representar esta pared vertical, vista desde abajo: su extremo se pierde a lo lejos, en el horizonte, pues se extiende por más de 100 km.

Figura 49. Como vería la "Cordillera Recta" (Montes Recti), un observador que se encontrara cerca de su base

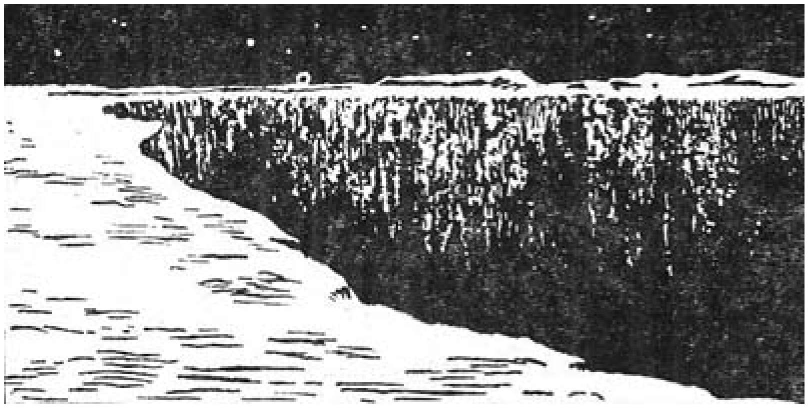


Figura 50. Una "grieta" lunar observada de cerca

De igual manera, las estrechas grietas que se distinguen en la superficie de la Luna con potentes telescopios, vistas de cerca se ven como hendiduras gigantescas (figura 50).

11. El cielo de la luna

Un firmamento negro

Si un habitante de la Tierra se encontrara en la Luna, llamarían su atención, tres circunstancias extraordinarias.

Notaría en primer lugar el extraño color del cielo diurno en la Luna: en lugar de la cúpula azul habitual, vería extenderse un firmamento completamente negro sembrado de innumerables estrellas, claramente visibles y sin el más pequeño centelleo, y esto aun brillando el Sol. La causa de este fenómeno está en la ausencia de atmósfera en la Luna.

> *"Bóveda celeste de un cielo sereno y diáfano, dice Flammarion*[38] *con su característico lenguaje animado, suave rubor de las auroras, majestuoso resplandor de los ocasos, encantadora belleza de los paisajes solitarios, brumosa perspectiva de los campos y praderas, y vosotras, aguas especulares de los lagos que reflejáis melancólicas el lejano cielo azulado encerrando toda su infinitud en vuestras profundidades, sabed que vuestra existencia y toda su belleza dependen sólo de ese ligero fluido extendido sobre la esfera terrestre. Sin él, ninguna de estas delicias, ninguna de estas*

---

38 Nicolas Camille Flammarion (1842 - 1925). Astrónomo francés, conocido por sus obras de popularización de la astronomía. *(N. del E.)*

suntuosas bellezas existiría.

“En lugar del cielo azulado nos rodearía un espacio negro insondable; sin los sublimes crepúsculos, se sucederían bruscamente, sin transiciones, los días y las noches; en vez de los suaves matices que vemos allí donde no llegan directamente deslumbrantes rayos de Febo, habría sólo una brillante claridad en los sitios iluminados por el astro refulgente y reinarían las tinieblas en todos los demás.”

Basta un discreto enrarecimiento de la atmósfera para que el color azulado del cielo se oscurezca visiblemente. El capitán del globo estratosférico soviético “Osoaviajim”, trágicamente desaparecido en 1934, a la altura de 21 km veía sobre sí un cielo casi negro.

El cuadro fantástico sobre la iluminación de la naturaleza, descrito en el fragmento que antecede, se realiza de manera plena en la Luna: un cielo negro, ausencia de auroras y ocasos, brillo deslumbrante de los lugares iluminados y oscuridad intensa y sin medios tonos en las sombras.

La Tierra en el cielo de la Luna

En segundo lugar, vería desde la Luna, el disco gigante de la Tierra colgando en el cielo. Al viajero le parecería extraño que el globo terrestre que al partir hacia la Luna dejó aquí abajo, se encuentre inesperadamente allá arriba.

En el espacio no hay para ninguno de los mundos: ni arriba ni abajo, y no deberías sorprenderte si, dejando la Tierra abajo, la vieras arriba cuando llegaras a la Luna.

El disco de la Tierra que pende en el cielo de la Luna es inmenso: su diámetro es aproximadamente cuatro veces mayor que el diámetro del disco lunar que nosotros vemos en el cielo de la Tierra. Este será el tercer hecho sorprendente que espera al viajero lunar.

Si en las noches de Luna nuestros paisajes están bien iluminados, las noches de Luna deben ser extraordinariamente claras, con los rayos de la “Tierra llena” y cuyo disco es 14 veces mayor que el de la Luna. El brillo de un astro depende no sólo de su diámetro, sino también de la capacidad de reflexión de su superficie. En este aspecto la superficie de la Tierra supera 6 veces a la de la Luna[39]; por esta razón, la luz de la "Tierra llena" debe iluminar a la Luna con una luz 90 veces más fuerte que la luz con la que la Luna llena ilumina la Tierra. En las "noches de claro de Tierra" en la Luna sería posible leer impresos en pequeños caracteres. La iluminación del suelo de la Luna por la Tierra es tan brillante, que nos permite distinguir a una distancia de 400.000 km la parte nocturna o no iluminada del globo lunar, en forma de un confuso centelleo, dentro de una hoz estrecha; este centelleo es lo que se llama "luz cenicienta" de la Luna. Imagina 90 Lunas llenas arrojando su luz desde el cielo, ten presente además, la ausencia de atmósfera en nuestro satélite, que absorbería parte de la luz, y podrás formarte así una idea del cuadro fantástico que han de ofrecer los paisajes lunares, inundados en medio de la noche, por el brillo de la "Tierra llena".

¿Podría distinguir un observador situado en la Luna, en el disco de la Tierra, los contornos de los continentes y de los océanos? Existe un concepto erróneo bastante difundido, según el cual, la Tierra, en el cielo de la Luna, constituye algo parecido al globo terrestre escolar. Así la representan los artistas cuando tienen que dibujar la Tierra en el espacio; con los contornos de los continentes, con copos de nieve en las regiones polares y otros detalles semejantes.

Todo esto pertenece al terreno de la fantasía. Observando desde afuera la esfera terrestre, no se pueden distinguir esos detalles. Sin hablar de las nubes, que habitualmente cubren la mitad de la superficie terrestre, la misma atmósfera dispersa fuertemente los rayos solares; por esta razón la Tierra debe aparecer tan brillante y tan inescrutable a la vista como Venus.

El astrónomo de Pulkovo[40], G. A. Tijov, tras haber estudiado este problema, escribió:

> *"Si miráramos a la Tierra desde el espacio, veríamos un disco de color blanco intenso en el cielo y apenas distinguiríamos algunos detalles de su superficie.*

---

39 El suelo de la Luna, por consiguiente, no es blanco, como a menudo se piensa, sino más bien oscuro. Esto no contradice el hecho de que brilla con luz blanca. -"La luz solar, reflejada incluso por un objeto negro, se mantiene blanca. Si la Luna estuviera revestida de terciopelo negro, embellecería igualmente el cielo como un disco plateado"

40 Pulkovo es un observatorio astronómico de antigua tradición, próximo a la antigua ciudad de Leningrado. Fundado en 1839 por el astrónomo F. G. Struve, operó con telescopios refractores, que en aquellos tiempos eran los más grandes y perfeccionados del mundo. Durante muchos años fue símbolo y orgullo de la Rusia imperial. Destruido por los bombardeos de la segunda guerra mundial y reconstruido en 1954. *(N. del E.)*

Una inmensa parte de la luz que el Sol envía a la Tierra se dispersa en el espacio, debido a la atmósfera y sus componentes, antes de alcanzar la superficie de la Tierra. Y la luz que refleja la superficie misma, se debilita fuertemente otra a vez, a causa de una nueva dispersión en la atmósfera."

Escribe Tyndall[41] en su libro sobre la luz: La capacidad del suelo lunar, de dispersar los rayos del Sol que lo iluminan, es por término medio, igual a la capacidad de dispersión de las rocas volcánicas oscuras.

Así, pues, mientras que la Luna nos muestra en forma precisa todos los detalles de su superficie, la Tierra esconde su faz a la Luna y a todo el universo, bajo el velo brillante de su atmósfera.

Pero no sólo por esto se distingue el astro nocturno lunar del terrestre. En nuestro cielo, la Luna sale y se pone, recorre su camino junto con la bóveda estrellada. En el cielo de la Luna, la Tierra no realiza este movimiento. Allí la Tierra no sale ni se pone, ni toma parte en el armonioso y extremadamente lento, cortejo de estrellas. Pende en el cielo casi inmóvil, ocupando una posición definida para cada punto de la Luna, mientras las estrellas se deslizan lentamente detrás de ella. Esto es consecuencia de la propiedad ya examinada del movimiento de la Luna, según la cual, nuestro satélite dirige hacia la Tierra siempre la misma cara de su superficie. Para un observador lunar, la Tierra está colgada casi inmóvil de la cúpula del cielo. Si la Tierra está en el cenit de algún cráter lunar, no abandona nunca su posición Cenital. Si es visible desde algún punto en el horizonte, permanece eternamente en el horizonte para dicho punto. Solo la libración de la Luna, sobre la cual ya hemos hablado, interrumpe ligeramente esta inmovilidad. El cielo estrellado realiza detrás del disco de la Tierra su lenta rotación, en 27 1/3 de nuestros días. El Sol da una vuelta al cielo en 29 ½ días; los planetas ejecutan movimientos similares y sólo la Tierra permanece casi inmóvil en el cielo negro.

Pero aunque la Tierra se mantiene en un mismo sitio, gira rápidamente alrededor de su eje en 24 horas, y si su atmósfera fuera transparente, nuestro planeta podría

41 John Tyndall. (1820 - 1893). Físico irlandés. Ejerció como ingeniero, luego estudió filosofía natural y se hizo profesor. Junto a Michael Faraday, realizó diversos experimentos sobre el magnetismo, pero es conocido especialmente por sus estudios sobre la conducción del calor en gases y vapores. Durante tales estudios identificó el fenómeno de la difusión de la luz por parte de las partículas suspendidas en una solución coloidal (efecto o fenómeno de Tyndall). *(N. del E.)*

servir de cómodo reloj celeste a los futuros pasajeros de las naves interplanetarias. Aparte de esto, la Tierra tiene las mismas fases que las que muestra la Luna en nuestro cielo. Es decir, que nuestro mundo no siempre brilla en el cielo de la Luna como un disco entero; aparece también en forma de semicírculo, en forma de hoz más o menos estrecha, en forma de círculo incompleto, dependiendo de qué área de la mitad de la Tierra iluminada por el Sol, esté dirigida hacia la Luna.

Dibujando las posiciones respectivas del Sol, la Tierra y la Luna, te convencerás fácilmente de que la Tierra y la Luna deberán mostrar fases opuestas, la una a la otra.

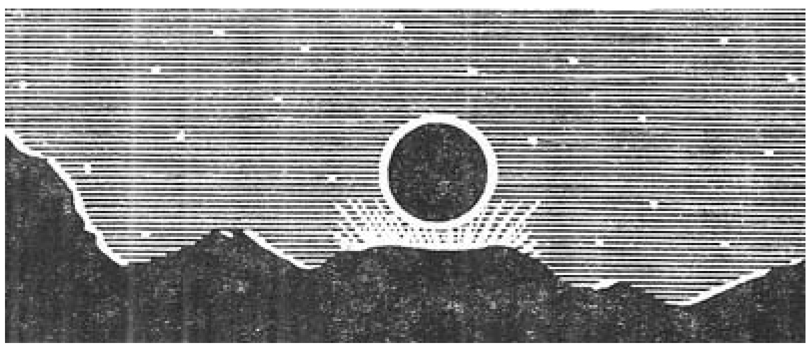


Figura 51. "Tierra nueva" en la Luna. El disco negro de la Tierra está rodeado de un borde brillante debido al fulgor de la atmósfera terrestre

Cuando observamos la Luna nueva, el observador lunar debe ver el disco entero de la Tierra, "Tierra llena"; y recíprocamente, cuando nosotros tenemos Luna llena, en la Luna hay "Tierra nueva" (figura 51); cuando veamos la hoz afilada y estrecha del cuarto creciente, desde la Luna se podrá observar la Tierra en cuarto menguante, y a nuestro astro le faltará, para completar el disco, una hoz similar a la que en ese momento nos enseña la Luna. Las fases de la Tierra no tienen contornos tan precisos como las de la Luna, la atmósfera terrestre hace borrosos los límites de la luz y da lugar a esa lenta transición del día a la noche, y viceversa, que nosotros observamos en la Tierra en forma de crepúsculo.

Otra diferencia entre las fases de la Luna y las de la Tierra es la siguiente. En la Tierra nunca vemos la Luna en el momento mismo de aparecer la Luna nueva. A pesar de que habitualmente se encuentra en ese momento más alta o más baja que el Sol (a veces 5º, es decir, 10 diámetros lunares) de modo que se podrá ver un estrecho borde de la esfera lunar iluminado por el Sol, sin embargo, la Luna permanece invisible a nuestra vista, pues el brillo del Sol ahoga el discreto brillo del hilo de plata de la Luna nueva.

Figura 52. La "Tierra creciente" en el cielo la Luna. El círculo blanco que está debajo de la Tierra, es el Sol

Usualmente no observamos la Luna nueva hasta dos días después, cuando ya se ha separado a suficiente distancia del Sol, y sólo en casos muy raros (en primavera), un día después. Esto no sucederá para quien observe la "Tierra nueva" desde la Luna; allá no hay atmósfera que disperse los rayos del Sol, para que pueda crear alrededor del astro diurno una aureola brillante. Allá no se pierden las estrellas y los planetas en los rayos del Sol y pueden distinguirse bien en el cielo, en su vecindad inmediata.

Por esto, cuando la Tierra no se halle en línea recta frente al Sol (es decir, que no esté al momento de ocurrir un eclipse), sino un poco más alta o más baja que él, siempre será visible en el cielo negro sembrado de estrellas de nuestro satélite, en forma de una hoz estrecha, con los cuernos dirigidos en dirección opuesta al Sol (figura 52). A medida que la Tierra se desplaza hacia la izquierda del Sol, la hoz parece girar hacia la izquierda.

Pueden verse fenómenos correspondientes a los aquí descritos, observando la Luna con un pequeño anteojo: en la Luna llena, el disco del astro nocturno no se ve en forma de círculo completo; como los centros de la Luna y del Sol no se encuentran en línea recta con los ojos del observador, en el disco de la Luna falta una hoz delgada que, como una franja oscura, se desliza hacia la izquierda cerca del borde del disco iluminado a medida que la Luna se mueve hacia la derecha.

Pero la Tierra y la Luna siempre se muestran entre sí, fases opuestas, y por esto, en el momento descrito, el observador lunar verá una estrecha hoz correspondiente a la “Tierra nueva”.

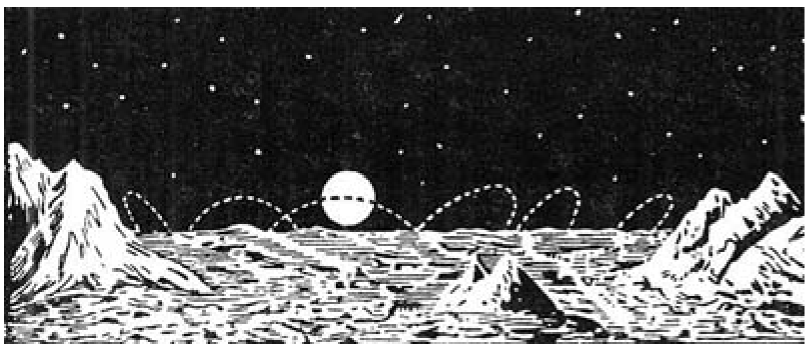


Figura 53. Lentos movimientos de la Tierra cerca del horizonte lunar a consecuencia de la libración. La línea punteada es la trayectoria del centro del disco terrestre

Hemos dicho de paso, que se siente la libración de la Luna porque la Tierra no está totalmente inmóvil en el cielo de la Luna: nuestro planeta oscila, alrededor de una posición media, 14º en dirección Norte-Sur y 16º en dirección Oeste-Este.

Por la misma razón, en los puntos de la Luna desde los cuales se ve la Tierra en el horizonte, nuestro planeta parece ponerse, y poco después sale nuevamente, describiendo extrañas curvas (figura 53). Estas salidas y puestas de la Tierra en un lugar del horizonte, sin dar la vuelta alrededor del cielo, pueden durar muchos días terrestres.

Los eclipses en la Luna

El cuadro recién esbozado del cielo lunar se completa con la descripción de esos espectaculares fenómenos celestes llamados eclipses. En la Luna hay dos clases de eclipses: “de Sol” y “de Tierra”. Los primeros son parecidos a los eclipses solares conocidos por nosotros, pero resultan extraordinariamente llamativos. Se producen en la Luna cuando ocurren eclipses de Luna en la Tierra, ya que la Tierra se sitúa en la línea que une los centros del Sol y de la Luna. Nuestro satélite se sumerge en ese momento dentro de la sombra arrojada por la esfera terrestre. Quien haya visto la Luna en dichos eclipses, sabe que nuestro satélite no se ve privado totalmente de luz, no desaparece de la vista; generalmente es visible debido a la penetración de los rayos rojo cereza dentro del cono de sombra de la Tierra. Si en ese momento nos trasladáramos a la superficie de la Luna y observáramos desde allá la Tierra, comprenderíamos claramente la causa de la iluminación rojiza; en el cielo de la Luna el globo terrestre, situado delante del Sol brillante, aunque mucho menor que éste, aparece como un disco negro rodeado por el borde purpúreo de su atmósfera. Este borde es precisamente el que ilumina con luz rojiza a la Luna sumergida en la sombra (figura 54).

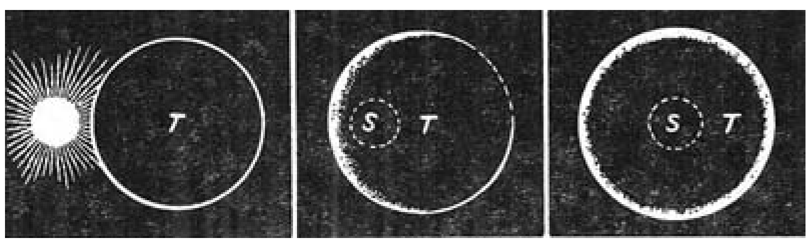


Figura 54. Curso de un eclipse solar en la Luna: el Sol, S, pasa lentamente detrás del disco de la Tierra, T, que pende inmóvil en el cielo de la Luna

Un eclipse de Sol dura en la Luna más de 4 horas y no sólo unos minutos como ocurre en la Tierra; es decir, tanto como un eclipse de Luna para nosotros, pues en realidad no es más que nuestro eclipse lunar observado, no desde la Tierra, sino desde la Luna.

En cuanto a los eclipses "de Tierra", son tan pequeños que apenas si merecen la denominación de eclipses. Se producen en los momentos en que se ven los eclipses de Sol en la Tierra. En el enorme disco de la Tierra el observador lunar verá un pequeño círculo negro móvil, que cubre los lugares de la superficie de la Tierra desde los cuales se puede contemplar el eclipse de Sol.

Es de señalar que no se pueden observar eclipses de Sol como los que vemos desde la Tierra, en ningún otro lugar del sistema planetario. Nosotros disfrutamos de estos espectáculos excepcionales por una circunstancia casual: la Luna que oculta al Sol está exactamente tantas veces más cerca de nosotros que del Sol como veces el diámetro lunar es menor que el solar, coincidencia que no se repite en ningún otro planeta.

12. ¿Para qué observan los astrónomos los eclipses?

Gracias a la casualidad que acabamos de mencionar, la longitud del cono de sombra que permanentemente lleva consigo nuestro satélite, alcanza a veces la superficie de la Tierra (figura 55). A decir verdad, la longitud media del cono de sombra de la Luna es menor que la distancia media de la Luna a la Tierra, y si solo tuviéramos en cuenta las magnitudes medias, llegaríamos a la conclusión de que nunca habría eclipses totales de Sol.

Estos se producen en realidad porque la Luna se mueve alrededor de la Tierra siguiendo una elipse, lo que hace que en algunas partes de su órbita se encuentre 42.200 km más cerca de la superficie de la Tierra que en otras; pues la distancia de la Luna varía entre 356.900 y 399.100 km.

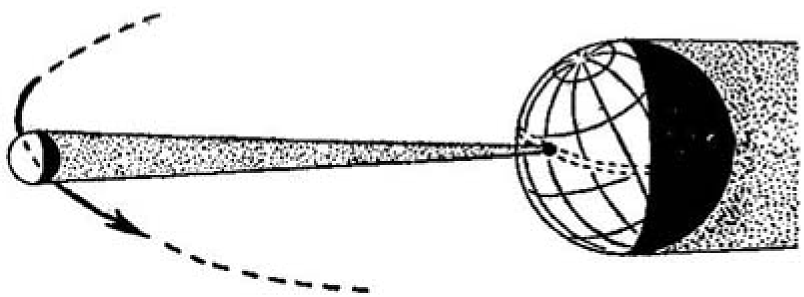


Figura 55. El extremo del cono de sombra de la Luna se desliza por la superficie de la Tierra; en los lugares cubiertos por esa sombra, resulta visible el eclipse de Sol

Conforme se desliza el extremo de la sombra de la Luna sobre la superficie de la Tierra, traza sobre ésta, la “zona de visibilidad del eclipse solar”. Esta zona no tiene más de 300 km de ancho y, por lo tanto, es bastante limitado el número de lugares desde los que se puede admirar el espectáculo del eclipse de Sol. Si a esto se agrega que la duración total del eclipse solar se cuenta en minutos (no más de 8 minutos), se comprende por qué tal eclipse resulta ser un espectáculo extraordinariamente raro. Sucede una vez cada dos o tres siglos, para cada punto del globo terrestre.

Por esta razón, los hombres de ciencia se lanzan literalmente a la caza de eclipses solares, y organizan expediciones especiales a lugares, algunas veces muy alejados, desde donde se puede observar este fenómeno. El eclipse de Sol de 1936 (19 de junio) solo se vio como eclipse total en los límites de la Unión Soviética, y para poderlo observar durante dos minutos, vinieron a nuestro país setenta hombres de ciencia extranjeros, de diez países distintos. Los esfuerzos de cuatro expediciones resultaron vanos debido al tiempo nublado. El esfuerzo desplegado por los astrónomos soviéticos para la observación de este eclipse fue extraordinario. Se enviaron cerca de 30 expediciones soviéticas a la zona del eclipse total.

En el año 1941, a pesar de la guerra, el gobierno soviético organizó una serie de expediciones que se distribuyeron a lo largo de la zona de eclipse total, desde el lago Ladoga hasta Alma-Atá[42]. Y en 1947 una expedición soviética se dirigió al Brasil para la observación del eclipse total de Sol, del 20 de mayo de ese año. El trabajo que se realizó en la Unión Soviética para la observación de los eclipses totales de Sol, del 25 de febrero de 1952 y del 30 de junio de 1954, fue bastante intenso.

Aunque los eclipses de Luna se producen ocasionalmente, una vez y media más que los de Sol, se observan sin embargo mucho más a menudo. Esta paradoja astronómica se explica fácilmente.

Solo se puede observar el eclipse de Sol en nuestro planeta, en la zona circunscrita, en la que la Luna oculta al Sol; en los límites de esta estrecha zona, el eclipse es total en algunos puntos, y parcial en otros (es decir, que el Sol se oculta parcialmente). El eclipse de Sol comienza en momentos diferentes, en distintos puntos de la zona, no por la diferencia que existe en cuanto a las zonas horarias, sino porque la sombra de la Luna se desplaza sobre la superficie de la Tierra y va cubriendo sucesivamente, a distintas horas, los diferentes puntos en los que es visible el eclipse.

El eclipse de Luna transcurre de manera totalmente distinta. Se observa al mismo tiempo, en toda la mitad del globo terrestre en que es visible la Luna en ese momento, es decir, en que la mitad de la Tierra que está sobre el horizonte. Las

---

42 *Almá-Atá*, conocida como *Almatý* durante la existencia de la República Socialista Soviética de Kazajistán y *Verni* o *Viernyi* en tiempos de la Rusia Imperial, es la ciudad más poblada de Kazajistán. *Almá-Atá* significa *Padre de las Manzanas*, ya que la manzana es nativa de la región donde se encuentra la ciudad. Fue capital de Kazajistán y de su predecesora, la República Socialista Soviética de Kazajistán, entre 1.929 y 1.998. *(N. del E.)*

fases consecutivas del eclipse lunar se producen para todos los puntos de la superficie de la Tierra en el mismo instante; la diferencia entre los lugares en los que es visible, solo está condicionada por sus husos horarios.

Por esta razón los astrónomos no tienen que “lanzarse a la caza” de los eclipses de Luna; estos se les presentan en su propia casa. Pero para cazar un eclipse de Sol, algunas veces se hace necesario realizar enormes viajes. Los astrónomos preparan expediciones a islas del trópico, muy remotas, tanto al Este como al Oeste, para poder observar sólo por unos minutos, el ocultamiento del disco solar detrás del disco negro de la Luna.

¿Tiene sentido preparar expediciones tan costosas para realizar tan breves observaciones?

¿No será posible realizar esas mismas observaciones sin esperar el ocultamiento casual del Sol detrás de la Luna? ¿Por qué los astrónomos no simulan artificialmente eclipses de Sol, ocultando en el telescopio su imagen con círculos que les permitan observar esa periferia solar que tanto les interesa durante los eclipses?

Este eclipse solar artificial no permite alcanzar los resultados que se observan durante el ocultamiento real del Sol detrás de la Luna. Porque los rayos del Sol, antes de llegar a nuestros ojos, pasan a través de la atmósfera terrestre y las partículas de aire los dispersan. A esto se debe que veamos el cielo, durante el día, como una cúpula celeste clara y no negra y sembrada de estrellas, como lo veríamos, incluso de día, en ausencia de atmósfera.

Si ocultamos el Sol con una pantalla y dejamos en el fondo el océano de aire, aunque protejamos nuestra vista de los rayos directos del astro diurno, la atmósfera continuará como antes, sobre nosotros, sumergida en la luz solar, y seguirá dispersando los rayos e imposibilitando la visión de las estrellas. Esto no sucede si la pantalla eclipsante se encuentra fuera de los límites de la atmósfera. La Luna es una pantalla de este tipo, por hallarse lejos de nosotros, mil veces más lejos que el límite de la atmósfera. Los rayos del Sol se detienen en esa pantalla antes de penetrar en la atmósfera terrestre, y en consecuencia, no se produce la dispersión de la luz en la zona del eclipse. En realidad, esto no es totalmente cierto; en la zona de sombra penetran siempre algunos rayos dispersos por los territorios iluminados próximos, y ésta es la razón de que el cielo, en un eclipse total de Sol, nunca esté

tan negro como en una noche cerrada. En esas circunstancias sólo son visibles las estrellas más brillantes.
¿Qué buscan los astrónomos con la observación del eclipse total de Sol? Señalemos lo más importante. Su primer objetivo es la observación de la "inversión" de las líneas espectrales en la capa exterior del Sol. Las líneas del espectro solar, que se ven oscuras en la franja clara del espectro, se vuelven claras sobre un fondo oscuro, durante algunos segundos, tan pronto se produce el ocultamiento total del Sol detrás del disco de la Luna: el espectro de absorción se transforma en un espectro de emisión.
Se le llama "espectro relámpago". Este fenómeno, que proporciona valiosos datos para juzgar la naturaleza de la capa superficial del Sol, se manifiesta durante el eclipse de forma tan nítida, que los astrónomos hacen todo lo posible para no perder semejante oportunidad, aunque también se puede observar en las condiciones señaladas y no sólo en el momento en que se presenta el eclipse.

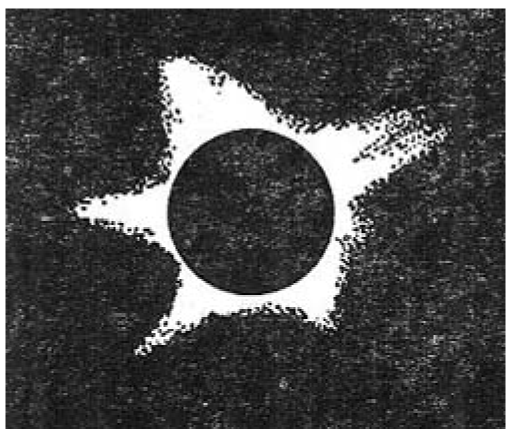


Figura 56. Durante los eclipses totales de Sol, alrededor del disco negro de la Luna aparece la "corona solar".

Su segundo objetivo es la investigación de la corona solar. La corona es el más importante de los fenómenos observables en un eclipse total de Sol: alrededor del círculo completamente negro de la Luna ribeteada con los salientes ígneos (protuberancias) de la superficie exterior del Sol, brilla una aureola perlada de diversos tamaños y formas en los distintos eclipses (figura 56).
Los rayos de esta aureola, con frecuencia, tienen una longitud varias veces mayor

que el diámetro solar, y su brillo, sólo la mitad del brillo de la Luna llena.
Durante el eclipse de 1.936, la corona solar apareció excepcionalmente brillante, más brillante que la Luna llena, lo cual sucede muy raras veces. Los rayos de la corona, bastante largos y un poco borrosos, se extendían a tres y más diámetros solares; en conjunto, la corona tenía la forma de una estrella pentagonal cuyo centro ocupaba el disco oscuro de la Luna.
Hasta la fecha no se ha aclarado la naturaleza de la corona solar. Durante los eclipses, los astrónomos toman fotografías de la corona, miden su brillo y estudian su espectro. Todo esto ayuda a investigar su estructura física.
Su tercer objetivo hace referencia a un planteamiento surgido en los últimos decenios. Se trata de comprobar una de las consecuencias de la teoría general de la relatividad. De acuerdo con la teoría de la relatividad, los rayos de las estrellas que pasan cerca del Sol experimentan la influencia de su gigantesca atracción y sufren una desviación, que debe manifestarse en un desplazamiento aparente de las estrellas cercanas al disco solar (figura 57). Solo se puede comprobar esta consecuencia, durante un eclipse total de Sol.

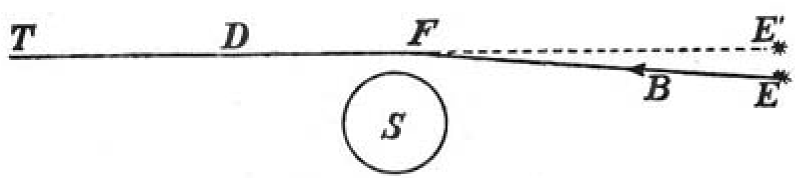


Figura 57. El Sol desvía la trayectoria de los rayos de las estrellas que pasan cerca de él, por esto, las estrellas cercanas al disco solar sufren una desviación aparente de su posición.

Las medidas efectuadas en los eclipses de 1.919, 1.922, 1.926 y 1.936, no arrojaron resultados decisivos, en sentido riguroso, y aún sigue pendiente la confirmación experimental de esta consecuencia derivada de la teoría de la relatividad[43].
Éstos son los principales objetivos por los que los astrónomos abandonan sus

---

43 El hecho mismo de la desviación se confirma, pero no se ha podido establecer un acuerdo cuantitativo total con la teoría. Las observaciones del profesor A. A. Mijailov condujeron a la necesidad de revisar en algunas partes la teoría misma de este fenómeno. (N. R.)

observatorios y se dirigen a lugares alejados, a veces inhóspitos, para observar los eclipses solares. En cuanto al espectáculo del eclipse total de Sol, en nuestra literatura hay una estupenda descripción de este raro fenómeno natural (V. G. Korolenko[44], El eclipse. La descripción se refiere al eclipse de agosto de 1.889; la observación se efectuó a orillas del Volga, en la ciudad de Yuriévets.) Damos a continuación un extracto del relato de Korolenko, con algunas omisiones sin importancia:

> *"El Sol se sumerge en un instante en una amplia mancha nebulosa y se muestra más allá de las nubes visiblemente reducido…*
>
> *Ahora se puede mirar directamente, y ayuda a ello el fino vapor que por todas partes humea en el aire y suaviza el brillo cegador.*
>
> *Silencio. En alguna parte se oye una respiración pesada, nerviosa…*
>
> *Pasa media hora. El día brilla por doquier igual que antes; algunas nubecillas cubren y descubren el Sol, que boga ahora por el cielo en forma de hoz.*
>
> *"Entre los jóvenes reina una animación despreocupada, con una mezcla de curiosidad.*
>
> *Los ancianos suspiran; las ancianas, como histéricas, se quejan a gritos, y algunas incluso gimen y lanzan alaridos como si les dolieran las muelas.*
>
> *El día comienza a palidecer en forma ostensible. Los rostros toman un tinte de miedo; las sombras de las figuras humanas yacen pálidas sobre la tierra, sin brillo. Un barco que se desliza por la corriente pasa como un fantasma. Sus contornos se hacen vagos, sus colores se vuelven menos definidos. La cantidad de luz, al parecer, disminuye; pero como las sombras densas del atardecer están ausentes y no hay juego de luces reflejadas por las capas inferiores de la atmósfera, este crepúsculo resulta extraño e inusual. El paisaje parece desvanecerse; la hierba pierde su verdor y las montañas toman un aspecto irreal.*
>
> *Sin embargo, aún se ve un estrecho borde brillante de Sol en forma de hoz, y se tiene la impresión de que el día continúa, aunque muy apagado. Me parece*

---

44 Vladímir Galaktiónovich Korolenko (1853 - 1921). Novelista y periodista ruso. Figura entre los más distinguidos escritores de su país. Sus novelas constituyen una fiel reproducción de la vida rusa en la segunda mitad del siglo XIX. Emotivo y realista, describe vidas y paisajes con vigor y sentimiento. Aparece como maestro literario de Máximo Gorki, con el que le unió gran amistad. Sus obras han sido traducidas a casi todos los idiomas. *(N. del E.)*

que los relatos sobre la oscuridad que reina durante los eclipses son exagerados. '¿Es posible -me dije- que esta ínfima chispa de Sol que aún queda encendida, como una última vela olvidada, sea capaz de iluminar tanto este inmenso mundo?... ¿Acaso cuando ella se extinga va a caer bruscamente la noche?

Pero he aquí que la chispa desapareció. De pronto, como si se desprendiera con esfuerzo de un apretado abrazo, brilló como una gota de oro y se extinguió. Y entonces se esparcieron sobre la Tierra densas tinieblas. Capté el momento en que la oscuridad completa cayó sobre el crepúsculo. Apareció por el Sur y, como un velo gigantesco, pasó rápidamente, extendiéndose sobre las montañas, sobre los ríos, sobre las praderas, abarcando todo el espacio celeste; nos envolvió por todas partes y en un instante se cerró por el Norte. Yo estaba entonces abajo, en un banco de arena de la orilla, y observaba la muchedumbre. Reinaba un silencio sepulcral... Los hombres formaban una masa oscura... Pero ésta no era una noche como las demás.

Había tan poca luz, que las miradas buscaban involuntariamente el brillo plateado de la Luna que invade la oscuridad azul de una noche normal. Pero por ninguna parte se veían rayos luminosos. Era como si una ceniza liviana, imperceptible para la vista, se desparramara desde lo alto sobre la Tierra, o como si una red de malla muy fina pendiera en el aire. Allá arriba, en las capas superiores de la atmósfera, se adivina un espacio luminoso que penetra en la oscuridad y funde las sombras, a las que priva de forma y densidad. Y por encima de toda una naturaleza asombrada por el milagroso panorama corren nubes que parecen entregarse a una lucha cautivante... Un cuerpo enemigo, redondo y oscuro como una araña, se agarró al Sol ardiente, y ambos corren juntos más allá de las nubes. Un cierto resplandor, que sale en forma de reflejos cambiantes de detrás del escudo de sombras, da movimiento y vida al espectáculo, y las nubes refuerzan aún más la ilusión con su silenciosa e inquieta carrera."

Los eclipses de Luna no poseen para los astrónomos contemporáneos tanto interés como los eclipses de Sol. Nuestros antepasados veían en los eclipses de Luna un medio cómodo para convencerse de la forma esférica de la Tierra. Recordemos el papel que jugó esta prueba en el viaje de circunnavegación de Magallanes.

Cuando después de largos y agotadores días de viaje por las desiertas aguas del océano Pacífico los marineros cayeron en la desesperación, convencidos de que se alejaban cada vez más de la tierra firme por un mar que no tenía fin, sólo Magallanes conservó el coraje.

“Aunque la Iglesia siempre sostuvo, basándose en las Sagradas Escrituras, que la Tierra es una planicie rodeada por agua -relata uno de los compañeros del gran navegante-, Magallanes extrajo fuerzas del siguiente razonamiento: en los eclipses de Luna la sombra arrojada por la Tierra es circular, y si tal es la sombra, tal debe ser el objeto que la arroja...”

En los libros antiguos de astronomía encontramos también dibujos que explican la relación entre la forma de la sombra de la Luna y la forma de la Tierra (figura 58).

Ahora ya no necesitamos estas demostraciones. Hoy en día, los eclipses de Luna nos dan la posibilidad de conocer la naturaleza de las capas superiores de la atmósfera terrestre, por el brillo y el color de la Luna.

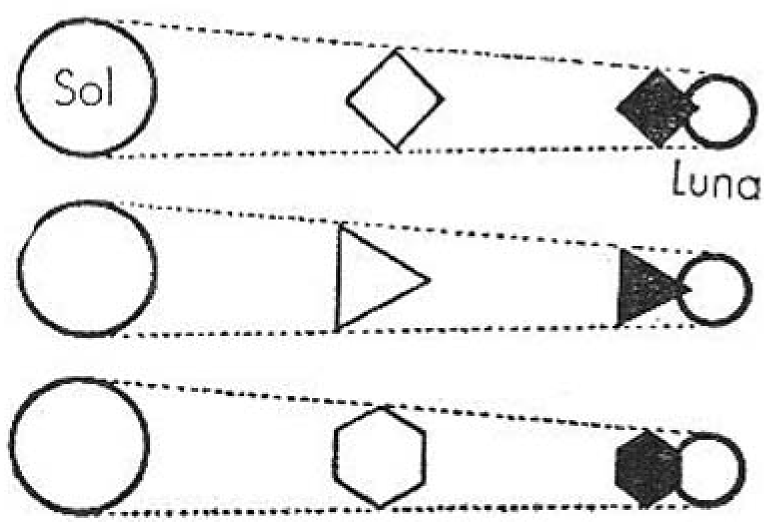


Figura 58. Dibujo antiguo que ilustra la idea de que por la forma de la sombra de la Tierra en el disco de la Luna se puede juzgar la forma del nuestro.

Como bien se sabe, la Luna no desaparece totalmente en la sombra de la Tierra y continúa siendo visible debido a los rayos del Sol refractados dentro del cono de sombra. La intensidad de la iluminación de la Luna en ese momento y sus matices, resultan de gran interés para los astrónomos, y según se ha podido comprobar, guardan una sorprendente relación con el número de las manchas solares. En los últimos tiempos también se aprovechan los eclipses de Luna, para medir la velocidad de enfriamiento de su superficie, cuando se ve privada del calor del Sol. Más adelante volveremos a hablar sobre esto.

13. ¿Por qué los eclipses se repiten cada 18 años?

Mucho antes de nuestra era, los observadores babilónicos del cielo notaron que los eclipses de Sol y de Luna se repiten en serie cada 18 años y 10 días. Ellos llamaron "saros" a este período[45]. Sirviéndose del saros, los antiguos predecían la aparición de los eclipses, pero no sabían a qué se debía una periodicidad tan regular ni por qué tienen esta duración y no otra.

Mucho más tarde se encontró la causa de la periodicidad de los eclipses, como resultado del estudio cuidadoso de los movimientos de la Luna. ¿Cuánto tiempo dura una revolución de la Luna alrededor de su órbita? La respuesta a esta pregunta puede variar, dependiendo del momento que se tome como término de una vuelta de la Luna alrededor de la Tierra. Los astrónomos distinguen cinco tipos de meses[46], de los cuales nos interesan ahora sólo dos:

- El mes "sinódico", es decir, el intervalo de tiempo en que la Luna realiza una vuelta completa alrededor de su órbita, si se sigue este movimiento desde el

45 *Saros* es un período caldeo de 223 lunas, lo que equivale a 6.585,32 días (algo más de 18 años y 10 u 11 días) tras el cual la Luna y la Tierra regresan aproximadamente a la misma posición en sus órbitas, y se pueden repetir los eclipses. Por definición un *saros* son 223 meses sinódicos (*S*) (período de una Luna nueva a la siguiente). Conocido desde hace miles de años, es una manera de predecir futuros eclipses. *(N. del E.)*

46 Los astrónomos hablan de cinco tipos de meses: Mes anomalístico, mes *draconítico, mes sideral, mes sinódico* y *mes trópico.*

Mes anomalístico. Tiempo en el que la Luna da una vuelta entre sus puntos extremos, perigeo y apogeo. Dura aproximadamente 27 ½ días.

Mes draconítico. Tiempo que tarda la Luna en regresar al mismo nodo. Dura aproximadamente 27 1/5 días.

Mes sideral. Tiempo que toma la Luna para volver a la misma posición entre las estrellas fijas en la esfera celeste. Dura aproximadamente 27 1/3 días.

Mes sinódico. Se relaciona con el ciclo de las fases de la Luna. Dura aproximadamente 29,53 días.

Mes trópico. Tiempo que requiere la Luna para volver al equinoccio. Es ligeramente menor que el mes sideral. *(N. del E.)*

Sol. Este es el período de tiempo que transcurre entre dos fases iguales de la Luna, por ejemplo, de una Luna nueva a otra Luna nueva. Es igual a 29,5306 días.

- El mes "draconítico", que es el espacio de tiempo al cabo del cual la Luna vuelve al mismo "nodo" de su órbita (los nodos son las intersecciones de la órbita de la Luna con el plano de la órbita de la Tierra). La duración de este mes es de 27,212 días.

Resulta fácil comprender que los eclipses sólo se producen cuando la Luna se encuentra en uno de los nodos, en las fases de Luna nueva o de Luna llena: su centro se encuentra en línea recta con los centros de la Tierra y del Sol. Es evidente que si hoy se produce un eclipse, deberá producirse nuevamente al cabo de un espacio de tiempo en el cual se cumpla un número entero de meses sinódicos y draconíticos, pues se repetirán las condiciones en las cuales se produce un eclipse.
¿Cómo encontrar este espacio dé tiempo? Para esto es necesario resolver la ecuación:

$$29{,}5306\ x = 27{,}2122\ y$$

donde x e y son números enteros. Planteándola en forma de proporción,

$$x/y = 272.122/295.306$$

Se observa que la solución más simple es:

$$x = 272.122,\ y = 295.306.$$

Resulta así un período enorme de decenas de milenios, sin valor práctico. Los antiguos astrónomos se conformaron con una solución aproximada. El medio más cómodo para hallar esa aproximación lo dan las fracciones continuas.
Transformemos el quebrado:

$$272.122/295.306$$

en fracción continua. Para ello extraemos la parte entera, así:

$$295.306/272122 = 1 + 23.184/272.122$$

En el último quebrado dividimos el numerador y el denominador por el numerador:

$$\frac{295.306}{272.122} = 1 + \frac{1}{11\,\frac{17.098}{23.184}}$$

El numerador y el denominador del quebrado 17.098/23.184 los dividimos por el numerador y así procederemos en adelante.
Obtenemos como resultado final:

$$\frac{295.306}{272.122} = 1 + \cfrac{1}{11\,\cfrac{1}{1+\cfrac{1}{2+\cfrac{1}{1+\cfrac{1}{4+\cfrac{1}{4+\cfrac{1}{17+\cfrac{1}{1+\frac{1}{7}}}}}}}}}$$

De esta fracción, tomando los primeros términos y despreciando los restantes, obtenemos las siguientes aproximaciones consecutivas:

12/11, 13/12, 38/35, 51/47, 242/223, 1019/ 939, etc.

El quinto quebrado de esta serie ya da suficiente precisión. Si nos detenemos en él, es decir, si se toman los valores x = 223 e y = 242, se obtiene un período de repetición de los eclipses igual á 223 días sinódicos o a 242 draconíticos. Esto constituye 6.585 días, es decir, 18 años 11,3 días (ó 10,3 días)[47].
Este es el origen del saros. Sabiendo de donde procede, podemos dejar de lado el

47 Según que entren en este período 4 ó 5 años bisiestos

cálculo y predecir por medio de él, con bastante precisión, los eclipses. Vemos que, tomando el saros igual a 18 años 10 días, despreciamos 0,3 días[48]. Esto se debe tener en cuenta, ya que el eclipse predicho con este período simplificado caerá a una hora del día, diferente a la del eclipse anterior (aproximadamente 8 horas más tarde), y sólo al emplear un período igual al triple del saros, el eclipse se repetirá casi en el mismo momento del día. Además de esto, el saros no tiene en cuenta los cambios de distancia de la Luna a la Tierra y de la Tierra al Sol, cambios que tienen su periodicidad; de estas distancias depende que el eclipse de Sol sea total o no. El saros solo nos da la posibilidad de predecir qué día determinado ha de ocurrir un eclipse, pero no permite augurar si será total, parcial o anular, o si podrá ser observado en los mismos lugares que el eclipse anterior.

Finalmente, sucede también que un eclipse parcial de Sol que es insignificante, 18 años después disminuye hasta cero, es decir, deja de observarse totalmente, y a la inversa, a veces se hace visible un pequeño eclipse parcial de Sol, que antes no era observable.

En nuestros días los astrónomos no utilizan el saros. Los movimientos caprichosos del satélite de la Tierra están tan bien estudiados, que se predice el eclipse con exactitud de segundos. Si no se cumple la predicción de un eclipse, los hombres de ciencia contemporáneos estarán dispuestos a admitir cualquier cosa antes que aceptar que sus cálculos han fallado.

Esto fue muy bien señalado por Julio Verne, quien, en su novela El país de las pieles[49], nos hace el relato de un astrónomo que se dirigió al polo para observar un

---

48 Es natural que un período que repita los eclipses sea un múltiplo de mes *sinódico* (*S*):

223 *S* = 6585,3211 días

Pero el periodo debe llevar el Sol a los nodos, así que debe ser múltiplo del mes *draconítico* (*D*):

242 *D* = 6585,3567 días

Como las irregularidades del movimiento de la Tierra y de la Luna en su órbita son tan grandes, ambos astros podrían estar alejados más de 9º. Esto se compensa con el *saros*. Por fortuna un múltiplo del mes *anomalístico* (*A*), está cercano al *Saros*:

239 *A* = 6585,5374 días

Es una suerte que un múltiplo común de *S*, *D* y *A* tan perfecto ocurra prácticamente al cabo de 18 años, por lo que la Tierra está prácticamente en el mismo punto de su órbita, es decir, a la misma distancia del Sol, haciendo las circunstancias aún más similares. Sin embargo, la fracción decimal (0,32) que no alcanza un día completo hace que la tierra rote aproximadamente un tercio de su revolución diaria por lo que los eclipses no se producen en el mismo lugar en cada ciclo. *(N. del E.)*

49 El país de las Pieles. Novela del escritor francés Jules Verne, publicada en Magasin d'Education et de Récréation del 20 de septiembre de 1872 (volumen 16, número 186) al 15 de diciembre de 1873 (volumen 18, número 216) y en un volumen doble el 13 de noviembre de 1873. En la novela el astrónomo se llama Thomas Black. *(N. del E.)*

eclipse de Sol que, a pesar de haber sido previsto, no se produjo. ¿Qué conclusión sacó de esto el astrónomo? Explicó a sus acompañantes que la superficie helada en que se encontraban no era un continente, sino un hielo flotante que había sido transportado por las corrientes marinas fuera de la zona del eclipse. Esta afirmación resultó ser correcta. He ahí un ejemplo de profunda convicción en la ciencia.

14. ¿Es posible?

Testigos oculares refieren que durante un eclipse de Luna han podido observar sobre el horizonte, en un lado del cielo, el disco del Sol y en el otro lado, al mismo tiempo, el disco oscurecido de la Luna.

Este fenómeno también se observó en 1936, en el eclipse parcial de Luna del 4 de julio.

Uno de mis lectores me escribió lo siguiente:

> *"El 4 de julio, ya tarde, a las 20 horas y 31 minutos, salió la Luna, y a las 20 horas y 45 minutos se puso el Sol; en el momento de la salida de la Luna ocurrió el eclipse lunar, aunque la Luna y el Sol eran visibles al mismo tiempo sobre el horizonte. Esto me asombró mucho, porque los rayos de luz se propagan en línea recta."*

El espectáculo en verdad resulta enigmático: a pesar de que la muchacha de Chejov afirma que a través de un vidrio ahumado no se puede "ver la línea que une los centros del Sol y de la Luna", es posible trazar mentalmente esta línea cuando el Sol y la Luna están al lado de la Tierra. ¿Si la Tierra no intercepta a la Luna y al Sol, puede producirse un eclipse? ¿Puede creerse el testimonio del testigo ocular?

En realidad, en una observación como esta no hay nada de inverosímil. Que el Sol y la Luna sean visibles en el cielo al mismo tiempo, durante un eclipse, depende de la curvatura de los rayos de luz en la atmósfera terrestre. Gracias a esta curvatura, llamada "refracción atmosférica", cada astro nos parece estar algo más alto que su verdadera posición (figura 15, Capítulo 1). Cuando vemos al Sol o a la Luna cerca del horizonte, geométricamente se encuentran por debajo de él. Así, pues, es posible que los discos del Sol y de la Luna sean visibles sobre el horizonte al mismo tiempo, durante un eclipse.

"Habitualmente -escribe con motivo de esto Flammarion- se citan los eclipses de 1666, 1668 y 1750, en los que esta rara particularidad apareció en su forma más visible. Sin embargo, no hay necesidad de remontarse tan lejos. El 15 de febrero de 1877, la Luna salió en París a las 5 horas y 29 minutos y el Sol se puso a las 5 horas y 39 minutos, cuando ya comenzaba un eclipse total. El 4 de diciembre de 1880 hubo un eclipse total de Luna en París; ese día la Luna salió a las 4 horas y el Sol se puso a las 4 horas y 2 minutos, y esto ocurrió casi en la mitad del eclipse, que se prolongó desde las 3 horas y 3 minutos hasta las 4 horas y 35 minutos. Si este hecho no se observa mucho más a menudo, es simplemente por falta de observadores. Para ver la Luna en eclipse total antes de la puesta del Sol o después de su salida, se necesita simplemente elegir en la Tierra un lugar tal que la Luna se encuentre sobre el horizonte hacia la mitad del eclipse."

15. Lo que no todos saben acerca de los eclipses

Preguntas

1. ¿Cuánto pueden durar los eclipses de Sol? ¿Y cuánto los eclipses de Luna?
2. ¿Cuántos eclipses pueden producirse a lo largo de un año?
3. ¿Hay años sin eclipses de Sol? ¿Y sin eclipses de Luna?
4. ¿Desde qué lado avanza sobre el Sol el disco negro de la Luna durante el eclipse, desde la derecha o desde la izquierda?
5. ¿Por qué borde empieza el eclipse de Luna, por el derecho o por el izquierdo?
6. ¿Por qué las manchas de luz en la sombra del follaje tienen forma de hoz durante el eclipse de Sol? (figura 60).
7. ¿Qué diferencia hay entre la forma de la hoz del Sol durante un eclipse y la forma ordinaria de la hoz de la Luna?
8. ¿Por qué se mira el eclipse solar a través de un vidrio ahumado?

Respuestas

1. La mayor duración de la fase total de un eclipse de Sol es de 7½ minutos (en el Ecuador, en las latitudes altas es menor). Todas las fases del eclipse pueden abarcar hasta 4½ horas (en el Ecuador).

La duración de todas las fases del eclipse de Luna alcanza hasta 4 horas; el tiempo de ocultamiento total de la Luna no dura más de 1 hora y 50 minutos.

2. El número total de eclipses de Sol y de Luna a lo largo de un año no puede ser mayor de 7 ni menor de 2 (en el año 1935 se contaron 7 eclipses: 5 solares y 2 lunares).

3. No hay ningún año sin eclipses de Sol; anualmente se producen por lo menos 2 eclipses solares. Los años sin eclipses de Luna son bastante frecuentes; aproximadamente, uno cada 5 años.

4. En el hemisferio Norte de la Tierra el disco de la Luna se desplaza sobre el Sol de derecha a izquierda. El primer contacto de la Luna con el Sol debe esperarse por el lado derecho. En el hemisferio Sur, por el lado izquierdo (figura 59).

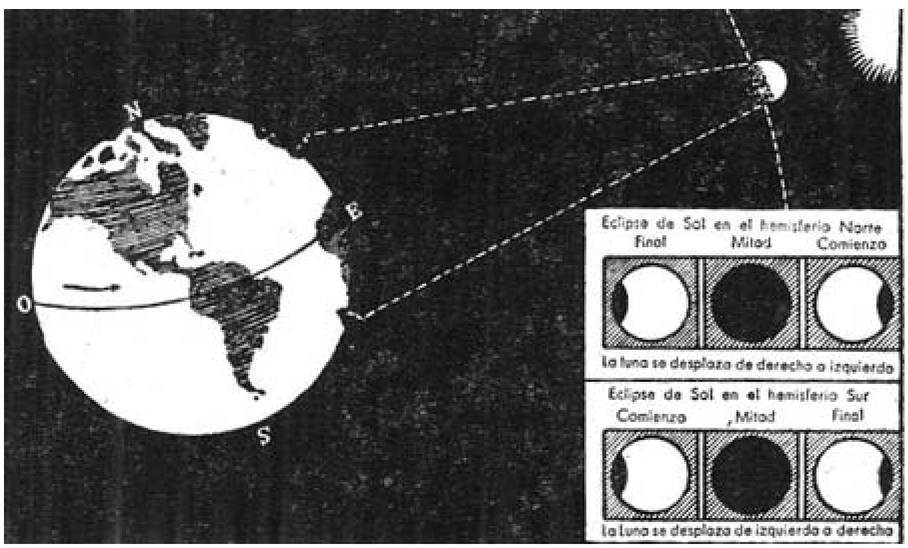


Figura 59. Para un observador en el hemisferio Norte de la Tierra, el disco de la Luna se desplaza durante el eclipse sobre el Sol desde la derecha y para un observador en el hemisferio Sur, desde la izquierda

5. En el hemisferio Norte la Luna entra en la sombra de la Tierra por su borde izquierdo; en el hemisferio Sur, por el derecho.
6. Las manchas de luz en la sombra del follaje no son otra cosa que imágenes del Sol. Durante el eclipse el sol tiene forma de hoz, y esa misma forma tiene que tener su imagen en la sombra del follaje (figura 60).

7. La hoz de la Luna está limitada exteriormente por un semicírculo e interiormente por una semielipse. La hoz del Sol está limitada por dos arcos de circunferencia, de igual radio. (ver en este capítulo: "3. Los enigmas de las fases de la Luna".)

Figura 60. Las manchas de luz en la sombra del follaje de los árboles durante la fase parcial de un eclipse tienen forma de hoz

8. El Sol, aunque esté parcialmente oculto por la Luna, no se puede mirar sin proteger adecuadamente los ojos. Los rayos solares afectan a la parte más sensible de la retina y disminuyen sensiblemente la agudeza visual durante cierto tiempo, y a veces, para toda la vida. Ya a comienzos del siglo XIII, un escritor de Novgorod[50] observaba:

   "A causa de este mismo hecho, en la Gran Novgorod algunos hombres casi perdieron la vista.".

   Sin embargo, es fácil evitar la quemadura, empleando como lente un vidrio densamente ahumado. Se debe ahumar con una vela, de manera que el disco del Sol aparezca a través del vidrio como un círculo claramente dibujado, sin rayos y sin aureola. Resulta más cómodo si se cubre el vidrio ahumado con otro vidrio limpio y se pegan ambos vidrios por los bordes, con un papel. Como no se puede prever cuáles serán las condiciones de visibilidad del Sol

---

50 *Nóvgorod* ("Ciudad Nueva"), llamada también *Veliki Nóvgorod* ("La Gran Nóvgorod"), ciudad situada a 155 kilómetros al sureste de San Petersburgo, a orillas del río Voljov. *(N. del E.)*

durante el eclipse, conviene preparar varios vidrios ahumados con distinta densidad.

Se pueden utilizar también vidrios coloreados, colocando dos vidrios de distintos colores, el uno sobre el otro (preferiblemente "complementarios"). Los lentes oscuros de sol habituales no sirven para este fin. Finalmente, resultan también muy adecuados para la observación del Sol, los negativos fotográficos que tengan partes oscuras con la densidad adecuada[51].

16. ¿Cuál es el clima de la luna?

Hablando con propiedad, en la Luna no existe clima, si se toma esta palabra en el sentido corriente. ¿En qué clima hay ausencia total de atmósfera, nubes, vapor de agua, precipitaciones y viento? De lo único que se puede hablar es de la temperatura de la superficie lunar.

Figura 61. En la Luna, la temperatura llega a ser en el centro del disco visible, de +110 °C y desciende rápidamente hacia los bordes hasta -50 °C, y aún más

Pues bien, ¿qué tan caliente está el suelo de la Luna? Los astrónomos disponen

51 A quien desee conocer con más detalles cómo se desarrolla un eclipse total de Sol y qué observaciones llevan a cabo los astrónomos durante él, se le recomienda el libro Eclipses solares y su observación, escrito por un grupo de especialistas bajo la dirección general del profesor A. A. Mijailov. El libro está dirigido a los aficionados a la astronomía, a los profesores y a los estudiantes de cursos superiores. En forma más sencilla está escrito el libro de V. T. Ter-Oranezov, Eclipses solares, Editorial Técnica del Estado, 1954 (Biblioteca Científica Popular).

actualmente de un aparato que les da la posibilidad de medir la temperatura no sólo de los astros lejanos, sino de algunos de sus sectores, por separado. La construcción del aparato se basa en el efecto termoeléctrico: en un conductor formado por dos metales diferentes se genera una corriente eléctrica cuando uno de los metales está más caliente que el otro; la intensidad de la corriente originada depende de la diferencia de las temperaturas y permite medir la cantidad de calor recibido.

La sensibilidad del aparato es sorprendente. Es de dimensiones microscópicas (la parte fundamental del aparato no es mayor de 0,2 mm y pesa 0,1 mg), puede detectar incluso la acción calórica de estrellas de 13 ava magnitud, que elevan la temperatura en diezmillonésimas de grado. Estas estrellas solo son visibles a través del telescopio; brillan 600 veces más débilmente que las estrellas que se encuentran en el límite de la visibilidad a simple vista.

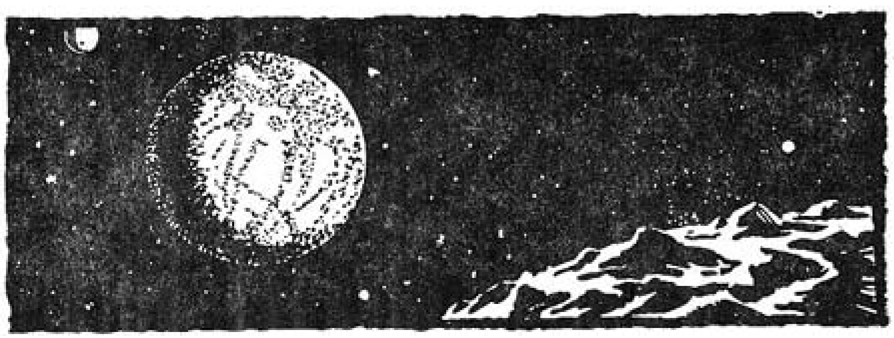
Detectar una cantidad de calor tan sumamente pequeña, es lo mismo que captar el calor de una vela desde una distancia de varios kilómetros.

Disponiendo de este maravilloso instrumento de medición, los astrónomos lo aplicaron en distintos puntos de la imagen telescópica de la Luna, midieron el calor recibido y apreciaron así la temperatura de sus distintos sectores (hasta con 10º de precisión). He aquí los resultados (figura 61): En el centro del disco de la Luna llena, la temperatura es mayor de 100 °C; si se colocara agua en dicha parte de la Luna, herviría a presión normal. "En la Luna no tendríamos necesidad de preparar la comida en el reverbero -escribe un astrónomo-; cualquier roca cercana podría desempeñar el papel de éste." A partir del centro del disco, la temperatura desciende regularmente en todos los sentidos, pero a 2.700 km del punto central, no baja de 80 °C. A una distancia mayor, se hace más rápida la caída de temperatura, y cerca del borde del disco iluminado, reina un frío de -50 °C. Aún más fría es la cara oscura de la Luna, la que se halla en dirección contraria al Sol, donde el frío alcanza a -160 º C.

Ya hemos dicho que durante los eclipses, cuando la esfera de la Luna se sumerge en la sombra de la Tierra, la superficie lunar que se ve privada de la luz del Sol, se enfría rápidamente. Se ha medido la magnitud de este enfriamiento; en un caso, la temperatura durante el eclipse bajó de +70 °C a -117 °C, es decir, casi 200 °C, en un período de 1½ á 2 horas. En la Tierra, en cambio, en condiciones similares, durante un eclipse de Sol, se registra un descenso de temperatura de 2º, a lo sumo de 3º. Esta diferencia se atribuye a la influencia de la atmósfera terrestre, que es relativamente transparente a los rayos visibles del Sol pero que retiene los rayos “caloríficos” invisibles que irradia el suelo caliente.

El hecho de que la superficie de la Luna pierda con tanta rapidez el calor acumulado, muestra al mismo tiempo, la baja capacidad calórica y la mala conductividad térmica del suelo de la Luna, de lo cual se desprende que durante el calentamiento, nuestro satélite sólo puede acumular una pequeña reserva de calor.

Capítulo 3
Los planetas



Contenido:

1. Planetas a la luz del día

¿Es posible ver de día, a la luz del Sol, los planetas? Con el telescopio, desde luego: los astrónomos efectúan frecuentemente observaciones diurnas de los planetas, los que se pueden ver incluso, con telescopios de potencia mediana; aunque no en forma tan clara y conveniente como en la noche. Con un telescopio que tenga un objetivo de 10 cm de diámetro, no solo es posible ver a Júpiter durante el día, sino también distinguir sus franjas características.

Mercurio se observa mejor en el día, cuando el planeta se encuentra a cierta altura del horizonte; después de la puesta del Sol, Mercurio permanece visible en el cielo a tan baja altura, que la atmósfera terrestre perturba enormemente la imagen telescópica.

Algunos planetas se pueden ver de día, a simple vista, en condiciones favorables. En particular, es usual observar en el cielo diurno a Venus, el más brillante de los planetas, desde luego, en la época de su mayor brillo. Es bien conocido el relato de Arago[52] sobre Napoleón I, quien una vez, durante un desfile por las calles de París, se ofendió porque la multitud sorprendida por la aparición de Venus al mediodía, prestó más atención a este planeta que a su imperial persona.

Con frecuencia, durante las horas del día, Venus resulta más visible desde las calles de las grandes ciudades, que desde los espacios abiertos: las casas altas ocultan el Sol, protegiendo los ojos del deslumbramiento de sus rayos directos. La eventual visibilidad de Venus durante el día fue señalada también por escritores rusos. Así, un escritor de Novgorod dice que en el año 1331, a plena luz del día, "se vio en los cielos una señal, una estrella que brillaba encima de la iglesia". Esta estrella (según las investigaciones de D. C. Sviatski y N. A. Biliev) era Venus.

Las épocas más favorables para ver a Venus de día se repiten cada 8 años. Los observadores que miran el cielo con atención, seguramente han tenido oportunidad de ver en pleno día, a simple vista, no sólo a Venus, sino también a Júpiter, e incluso a Mercurio.

Es conveniente detenerse ahora en el problema del brillo comparativo de los planetas. Entre los no especializados surge a veces la duda: ¿Cuál de los planetas alcanza mayor brillo Venus, Júpiter o Marte? Si brillaran al mismo tiempo y se les pusiera uno al lado del otro, resulta obvio que no existiría este problema. Pero cuando se les ve en el cielo en distintos momentos, no es fácil decidir cuál de ellos es más brillante. He aquí cómo se distribuyen los planetas por orden de brillo:

---

52 François Jean Dominique Arago (1786 - 1853). Matemático, físico, astrónomo y político francés. *(N. del E.)*

$$\left.\begin{matrix}\text{Venus}\\ \text{Marte}\\ \text{Júpiter}\end{matrix}\right\} \rightarrow \left\{\begin{matrix}\text{Varias veces}\\ \text{más brillante}\\ \text{que Sirio}\end{matrix}\right. \qquad \left.\begin{matrix}\text{Mercurio}\\ \text{Saturno}\end{matrix}\right\} \rightarrow \left\{\begin{matrix}\text{Más débiles que Sirio}\\ \text{pero más brillantes que}\\ \text{estrellas de primera magnitud}\end{matrix}\right.$$

Ya volveremos sobre este tema en el capítulo siguiente, cuando abordemos el estudio del valor numérico del brillo de los cuerpos celestes.

2. Los símbolos de los planetas

Para designar al Sol, la Luna y los planetas, los astrónomos contemporáneos utilizan signos de origen muy antiguo (figura 62).

Estos signos exigen una explicación, salvo el signo de la Luna, que se comprende fácilmente. El signo de Mercurio es la imagen simplificada del cetro del dios mitológico Mercurio, dueño protector de este planeta. Como signo de Venus sirve la imagen de un espejo de mano, emblema de la feminidad y de la belleza, inherentes a la diosa Venus.

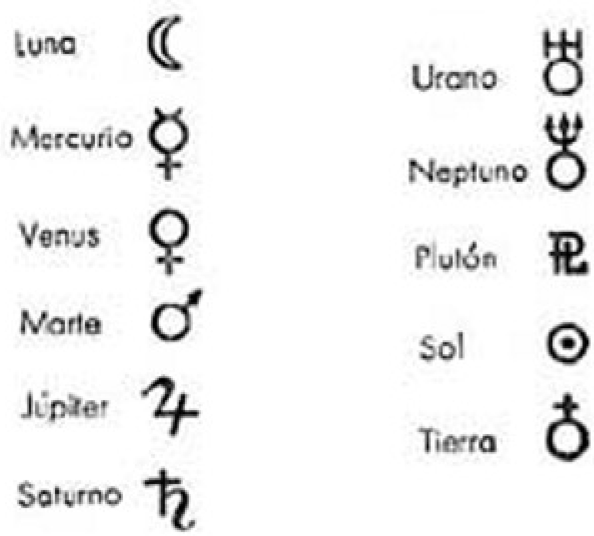


Figura 62. Signos convencionales para el Sol, la Luna y los planetas

Como símbolo de Marte, que era el dios de la guerra, se usa una lanza cubierta con un escudo, atributos del guerrero. El signo de Júpiter no es otra cosa que la inicial

de la denominación griega de Júpiter (Zeus), una Z manuscrita. El signo de Saturno, según lo interpretó Flammarion, es la representación deformada de la "guadaña del tiempo", atributo tradicional del dios del destino.
Los signos enumerados hasta ahora se utilizan desde el siglo IX.
El signo de Urano, como bien se puede comprender, tiene un origen posterior: este planeta fue descubierto a fines del siglo XVIII. Su signo es un círculo con la letra H, que nos recuerda el nombre de Herschel, descubridor de Urano. El signo de Neptuno (descubierto en 1846) es un tributo a la mitología, el tridente del dios de los mares. El signo para el último planeta, Plutón, se comprende por sí mismo.
A estos símbolos planetarios se debe añadir el signo del planeta en que vivimos, y también, el signo del astro central de nuestro sistema, el Sol. Este último signo, el más antiguo, era utilizado ya por los egipcios hace varios milenios.
Seguramente les parecerá extraño a muchas personas, que los astrónomos occidentales empleen los mismos signos de los planetas para indicar los días de la semana, a saber:

el domingo con el signo del	Sol
el lunes con el signo de la	Luna
el martes con el signo de	Marte
el miércoles con el signo de	Mercurio
el jueves con el signo de	Júpiter
el viernes con el signo de	Venus
el sábado con el signo de	Saturno

Esta coincidencia resulta muy natural si se confrontan los nombres de los planetas con los de los días de la semana, no en ruso, sino en latín o en español, lenguas en que esos nombres han conservado su relación con las denominaciones de los planetas (lunes, día de la Luna; martes, día de Marte, etc.).
Pero no vamos a detenernos en este tema tan interesante, que pertenece más a la filología y a la historia de la cultura que a la astronomía.
Los símbolos de los planetas eran utilizados por los antiguos alquimistas para designar los metales, como sigue:

el signo del Sol	para el oro
el signo de la Luna	para la plata
el signo de Marte	para el hierro
el signo de Mercurio	para el mercurio
el signo de Júpiter	para el estaño
el signo de Venus	para el cobre
el signo de Saturno	para el plomo

Esta relación se explica teniendo en cuenta que los alquimistas relacionaban cada metal con uno de los antiguos dioses mitológicos.

Finalmente, un eco del respeto medieval por los símbolos de los planetas, es el uso que hacen de ellos los botánicos y los zoólogos contemporáneos, quienes emplean los símbolos de Marte y de Venus para distinguir el macho y la hembra en los ejemplares de una misma especie. Los botánicos usan también el símbolo astronómico del Sol para señalar las plantas anuales; para las bienales utilizan el mismo signo, pero algo cambiado (con dos puntos en el círculo); para las yerbas vivaces, el signo de Júpiter; para los arbustos y los árboles, el signo de Saturno.

3. Algo que no se puede dibujar

Entre las cosas que no se pueden representar en el papel, se encuentra el plano exacto de nuestro sistema planetario. Lo que encontramos en los libros de astronomía, denominado plano del sistema planetario, es un dibujo de las trayectorias de los planetas, pero no, en modo alguno, del sistema solar; los planetas mismos, en esos dibujos, no se pueden representar sin una pronunciada alteración de las escalas. Los planetas, en relación con las distancias que los separan, son tan sumamente pequeños, que incluso es difícil hacerse una idea exacta de esta relación. Facilitamos el trabajo de nuestra imaginación si elaboramos un modelo a escala del sistema planetario. De este modo comprendemos fácilmente por qué es imposible trasladar el sistema planetario al papel. Lo más lejos que podemos llegar en el dibujo, es a mostrar las dimensiones relativas de los planetas y el Sol (figura 63).

Tomemos como referencia la Tierra, asumamos que ella tiene el tamaño de una cabeza de alfiler, es decir, una esferita de cerca de 1 mm de diámetro. Hablando más exactamente, vamos a utilizar una escala aproximada de 15.000 km por 1 mm ó 1:15.000.000.000.

Será necesario colocar la Luna de ¼ de mm de diámetro, a 3 cm de la cabecita del alfiler. El Sol, del tamaño de una pelota de croquet (10 cm), debe distar 10 m de la Tierra.

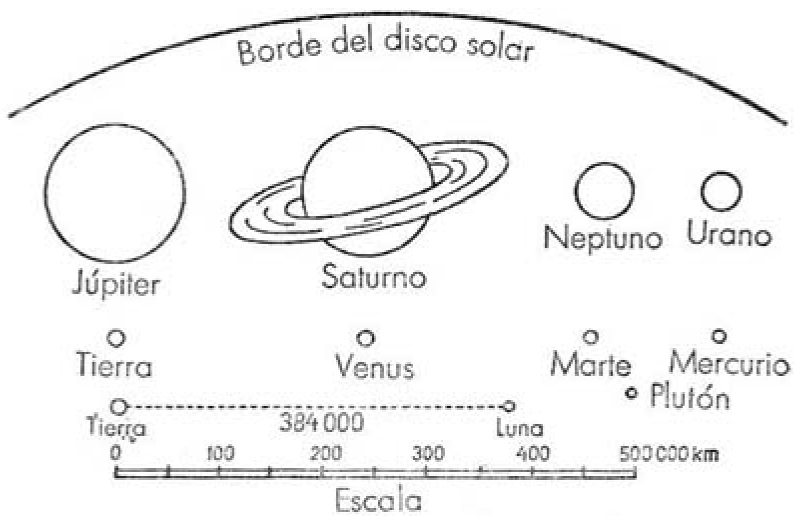


Figura 63. Dimensiones relativas de los planetas y del Sol. El diámetro del disco del Sol es igual a 19 cm en esta escala

Si colocamos la pelota en una esquina de una habitación bien espaciosa y la cabecita del alfiler en otra, tendremos un modelo relativo de lo que son la Tierra y el Sol en el espacio sideral. Veremos claramente que es mucho mayor el vacío que la materia.

Es cierto que entre el Sol y la Tierra hay dos planetas, Mercurio y Venus, pero uno y otro contribuyen poco a rellenar el vacío. Entonces tendremos que colocar en nuestra habitación dos granitos más: uno de 4 de mm de diámetro (Mercurio), a una distancia de 4 m de la pelota del Sol, y el segundo, como una cabecita de alfiler (Venus), a 7 m.

Pero también habrá más granitos del otro lado de la Tierra. A 16 m de la pelota del Sol, gira Marte, un granito de 0,5 mm de diámetro. Cada 15 años, ambos granitos, la Tierra y Marte, se aproximan hasta una distancia de 4 m; es decir, que ambos

planetas se encuentran a la mínima distancia entre ellos.
Marte tiene dos satélites; pero resulta imposible representarlos en nuestro modelo, pues en la escala elegida ¡deberán tener las dimensiones de una bacteria! En el modelo los asteroides también tendrán un tamaño muy pequeño, son más de 1.500 diminutos planetas conocidos que giran entre Marte y Júpiter. Su distancia media al Sol en nuestro modelo será de 28 m. Los más grandes tendrán, en el modelo, el espesor de un cabello (1/20 mm), y los más pequeños, las dimensiones de una bacteria.
El gigante, Júpiter, estará representado con una esferita del tamaño de una avellana (1 cm) que quedará a 52 m de la pelota del Sol. Alrededor de él, a las distancias de 3, 4, 7 y 12 cm, girarán sus 12 satélites más grandes. Las dimensiones de estas grandes lunas serán de cerca de 1 mm; las restantes resultarán en el modelo, del tamaño de bacterias. El más alejado de sus satélites, el IX, deberá situarse a 2 m de la avellana de Júpiter, lo que equivale a decir que todo el sistema de Júpiter tiene, en nuestro modelo, 4 m de diámetro.
Esto es demasiado en comparación con el sistema Tierra-Luna (6 cm de diámetro), pero es bastante moderado si se compara con el diámetro de la órbita de Júpiter (104 m) en nuestro modelo.
Ahora se ve claramente resultado tan pobre darán los intentos de elaboración de un plano del sistema planetario en un solo dibujo. Esta imposibilidad resulta más convincente aún si proseguimos el modelo. El planeta Saturno deberá situarse a 100 m de la pelota del Sol, en forma de una avellana de 8 mm de diámetro. El anillo de Saturno tendrá un ancho de 4 mm y un espesor de 1/250 mm, y se encontraría a 1 mm de la superficie de la avellana. Los 9 satélites quedarían distribuidos alrededor del planeta en una extensión de 21 m, en forma de granitos de 1/10 mm o menos de diámetro.
El vacío que separa los planetas aumenta progresivamente cuando nos aproximamos a los confines del sistema solar. En nuestro modelo, Urano estará separado 196 m del Sol; será un guisante de 3 mm de diámetro, con 5 particulitas-satélites distribuidas a una distancia de 4 cm del granito central.
A 300 m de la pelota central giraría lentamente en su órbita un planeta que hasta hace poco era considerado como el último en nuestro sistema: Neptuno, un

guisante con dos satélites (Tritón y Nereida) situados a 5 y 70 cm de él.

Más lejos aún gira un planeta no muy grande, Plutón, cuya distancia al Sol en nuestro modelo será de 400 m y cuyo diámetro habría de ser, aproximadamente, la mitad del de la Tierra.

Pero ni siquiera la órbita de este último planeta se podría contar como límite de nuestro sistema solar. Además de los planetas, pertenecen a él los cometas, muchos de los cuales se mueven en trayectorias cerradas alrededor del Sol. Entre estas "estrellas con cabellera" (significado original de la palabra cometa) hay un grupo cuyo período de revolución alcanza hasta 800 años. Son los cometas que aparecieron el año 372 antes de nuestra era y los años 1106, 1668, 1680, 1843, 1880, 1882 (dos cometas) y 1897.

La trayectoria de cada uno de ellos se representaría en el modelo con una elipse alargada, cuyo extremo más próximo (perihelio) se encontraría, a lo sumo, a 12 mm del Sol y cuyo extremo alejado (afelio) a 1.700 m, cuatro veces más lejos que Plutón. Si en las dimensiones del sistema solar consideramos los cometas, nuestro modelo crecerá hasta 3½ km de diámetro y ocupará una superficie de 9 km^2, asumiendo la magnitud de la Tierra como una cabecita de alfiler.

En estos 9 km^2 haremos este inventario:

1 pelota de croquet
2 avellanas
2 guisantes
2 cabecitas de alfiler
3 granitos pequeñísimos

La materia de los cometas, cualquiera que sea su número, no entra en el cálculo, pues su masa es tan pequeña que con razón fueron llamados la "nada visible".

Así, pues, nuestro sistema planetario no se puede representar en un dibujo a una escala verdadera.

4. ¿Por qué Mercurio no tiene atmósfera?

¿Qué vínculo puede existir entre la presencia de atmósfera en un planeta y la duración de su rotación alrededor de su eje? Aparentemente ninguna. Sin embargo, el ejemplo del planeta más próximo al Sol, Mercurio, puede convencernos de que en algunos casos existe esta relación.

Por la intensidad que alcanza la gravedad en su superficie, Mercurio puede retener una atmósfera de una composición similar a la de la Tierra, aunque quizás no tan densa.

La velocidad requerida para superar totalmente la fuerza de la gravitación de Mercurio es igual a 4900 m/s en su superficie, y esta velocidad, a temperaturas no muy elevadas, ni siquiera es alcanzada por las moléculas más veloces de nuestra atmósfera[53].

Sin embargo, Mercurio está desprovisto de atmósfera. Esto obedece a que Mercurio se mueve alrededor del Sol de la misma forma en que se mueve la luna alrededor de la Tierra, es decir, que presenta siempre la misma cara al Sol. El tiempo que tarda en dar una revolución sobre su órbita es de 88 días, el mismo tiempo que tarda en dar una rotación alrededor de su eje. Por esto, en la cara que siempre está dirigida hacia el Sol, Mercurio tiene un día permanente y un verano eterno; y en la otra cara, vuelta en dirección contraria al Sol, dominan una noche ininterrumpida y un invierno sin pausa. Resulta fácil imaginar el calor que reina en la parte diurna del planeta. El Sol dista de allí 21 veces menos de lo que dista de la Tierra y la fuerza abrasadora de los rayos deberá crecer en 2,5 × 2,5, es decir, en 6,25 veces. En la cara nocturna, aquella donde no llegó ni un rayo de Sol en el transcurso de millones de años, por el contrario, tiene que reinar un frío cercano al del espacio sideral[54] (alrededor de -264º C), ya que el calor del lado diurno no puede atravesar el espesor del planeta. En el límite entre los lados diurno y nocturno, hay una franja de un ancho de 23º, en la que, a consecuencia de la libración,[55] aparece el Sol de cuando en cuando.

En condiciones climáticas tan fuera de lo común, ¿qué sería de la atmósfera del

---

53 Ver el capítulo 2, "8. ¿Por qué la Luna no tiene atmósfera?"

54 Los físicos llaman "temperatura del espacio sideral" a la temperatura que marcaría en el espacio un termómetro ennegrecido, protegido contra los rayos del Sol. Esta temperatura es un poco más alta que el cero absoluto (-273°) a consecuencia de la acción de calentamiento de la irradiación estelar. Ver el libro de Y. I. Perelman: ¿Sabe usted física?

55 Sobre la libración, ver la sección "6. El lado visible y el lado invisible de la Luna", Capítulo Segundo. Para la libración en latitud, de Mercurio, tiene valor la misma regla aproximada que rige para la Luna: Mercurio dirige constantemente la misma cara, no hacia el Sol, sino hacia el otro foco de su elipse, bastante alargada.

planeta?

Evidentemente, en la mitad nocturna, bajo la influencia del intenso frío reinante, la atmósfera se condensaría pasando al estado líquido, y luego se solidificaría. A consecuencia del pronunciado descenso de la presión atmosférica, hacia esa parte se dirigiría la capa gaseosa del lado diurno del planeta, la que también se solidificaría.

En resumen, toda la atmósfera debería juntarse en forma sólida en el lado nocturno del planeta, en la cara donde el Sol nunca penetra. De este modo, la ausencia de atmósfera en Mercurio, surge como una consecuencia inevitable de las leyes físicas.

Siguiendo este mismo razonamiento, según el cual es imposible la existencia de atmósfera en Mercurio, debemos descifrar el enigma planteado más de una vez acerca de si hay atmósfera en la cara oculta de la Luna. Se puede afirmar con absoluta seguridad, que si no hay atmósfera en una cara de la Luna, no puede haberla tampoco en la cara opuesta. En este punto, la novela fantástica de Wells[56], Los primeros hombres en la Luna[57], se aparta de la verdad. El novelista supone que en la Luna hay aire, el cual, al cabo de la noche, de 14 días de duración, llega a condensarse y solidificarse, y luego, con la aparición del nuevo día, pasa al estado gaseoso y da lugar a una atmósfera. Sin embargo, esto no puede suceder.

> *"Si, escribía en relación con esto el profesor O. D. Jvolson[58], en el lado oscuro de la Luna el aire se solidifica, entonces casi todo el aire debe irse del lado iluminado al oscuro y solidificarse allí también. Bajo la influencia de los rayos solares, el aire cálido debe transformarse en gas, el cual inmediatamente se dirigirá al lado oscuro, donde se solidificará... Debe*

---

56 Herbert George Wells. (1866 – 1946). Escritor, novelista, historiador y filósofo británico. Famoso por sus novelas de ciencia ficción; considerado junto a Julio Verne, uno de los precursores de este género. Por sus escritos relacionados con ciencia, en 1970 se llamó en su honor, H. G. Wells, a un astroblema lunar -cráter de impacto- ubicado en la cara oscura de la Luna. *(N. del E.)*

57 Los primeros hombres en la luna. Novela publicada en 1901, escrita por H. G. Wells. Relata el viaje a la Luna del empobrecido empresario Mr. Bedford, y el brillante pero excéntrico científico Dr. Cavor. Al llegar descubren que la Luna está habitada por una civilización extraterrestre que deciden llamar "selenitas". *(N. del E.)*

58 Orest Danilovich Jvolson. (1852 - 1934). Físico ruso. Escribió sobre electricidad, magnetismo, fotometría y actinometría -medida de la intensidad de las radiaciones solares-. Diseñó los actinómetros que se usaron durante mucho tiempo en las estaciones meteorológicas soviéticas.

Estudió el concepto de lente gravitatoria. En su honor, la observación de una lente gravitatoria, donde la luz procedente de un objeto lejano adquiere la forma de anillo por la influencia gravitatoria de otro objeto más cercano situado entre el primero y el observador, se denomina *anillo de Jvolson*. Un cráter de la Luna también lleva su nombre. *(N. del E.)*

producirse una permanente destilación de aire, y nunca y en ningún lado puede alcanzar una fluidez significativa."

Si bien, se puede considerar demostrada la ausencia de atmósfera para Mercurio y la Luna, en cambio para Venus, el segundo de los planetas de nuestro sistema a partir del Sol, se puede garantizar la presencia de atmósfera, sin que quepa duda alguna.

Se ha determinado incluso que en la atmósfera de Venus, más precisamente en su estratosfera, hay mayor cantidad de gas carbónico que en la atmósfera terrestre.

5. Las fases de Venus

El famoso matemático Gauss[59] cuenta que una vez invitó a su madre a contemplar con un telescopio a Venus, que brillaba intensamente en el cielo de la tarde. El matemático pensaba dar una sorpresa a su madre, pues en el telescopio Venus se veía en forma de hoz. Sin embargo, él fue el único sorprendido. Mirando a través del ocular, la madre no mostró ninguna sorpresa a causa de la forma del planeta y sólo dijo que le extrañaba ver la hoz dirigida hacia el lado opuesto en el campo del telescopio... Gauss nunca había sospechado que su madre pudiera distinguir las fases de Venus, incluso a simple vista. Raramente se encuentra tal agudeza visual; por esto, hasta la invención de los catalejos, nadie sospechaba la existencia en Venus, de fases semejantes a las de la Luna.

Una particularidad de las fases de Venus es que el diámetro del planeta en las distintas fases, es desigual: la delgada hoz tiene un diámetro mucho mayor que el disco entero (figura 64).

La causa de ello es nuestro mayor o menor alejamiento de este planeta, en sus distintas fases. La distancia media de Venus al Sol es de 108 millones de km, y la de la Tierra es de 150 millones de km. Es fácil comprender que la distancia más corta entre ambos planetas será igual a la diferencia (150 - 108), es decir, a 42 millones de km, y que la distancia más grande será igual a la suma (150 + 108), es decir, a

59 Johann Carl Friedrich Gauss, (1777 - 1855). Matemático, astrónomo y físico alemán. Contribuyó significativamente en muchos campos, incluida la teoría de números, el análisis matemático, la geometría diferencial, la geodesia, el magnetismo y la óptica. Considerado "el príncipe de las matemáticas" y "el matemático más grande desde la antigüedad". *(N. del E.)*

258 millones de km. Por consiguiente, el alejamiento entre Venus y nosotros varía dentro de estos límites.

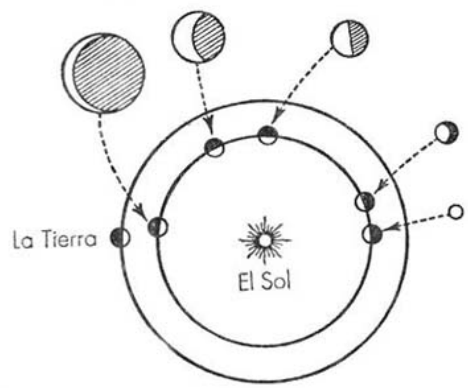


Figura 64. Las fases de Venus vistas a través del telescopio. En las diferentes fases, Venus tiene distintos diámetros aparentes como consecuencia del cambio de su distancia a la Tierra.

En su posición más próxima a la Tierra, Venus dirige hacia nosotros su cara no iluminada, y por esto la más grande de sus fases nos es totalmente invisible. Al salir de esta posición de "Venus nuevo", el planeta toma un aspecto falciforme, el de una hoz cuyo diámetro es tanto menor cuanto más ancha es la hoz. Venus no alcanza su mayor brillo cuando es visible como un disco entero, ni tampoco cuando su diámetro es máximo, sino en una fase intermedia. El disco entero de Venus es visible con un ángulo visual de 10"; la hoz mayor, con un ángulo de 64". El planeta alcanza su mayor brillo treinta días después de "Venus nuevo", cuando su diámetro angular es de 40" y el ancho angular de la hoz de 10". Entonces brilla 13 veces más intensamente que Sirio, la más brillante de todas las estrellas del cielo.

6. Las oposiciones

Son muchos los que saben que la época de mayor brillo de Marte y de su mayor aproximación a la Tierra se repite aproximadamente cada quince años[60].

También es muy conocida la denominación astronómica de esta fase: "oposición de Marte".

---

60 A veces diecisiete años. (N. de la E.)

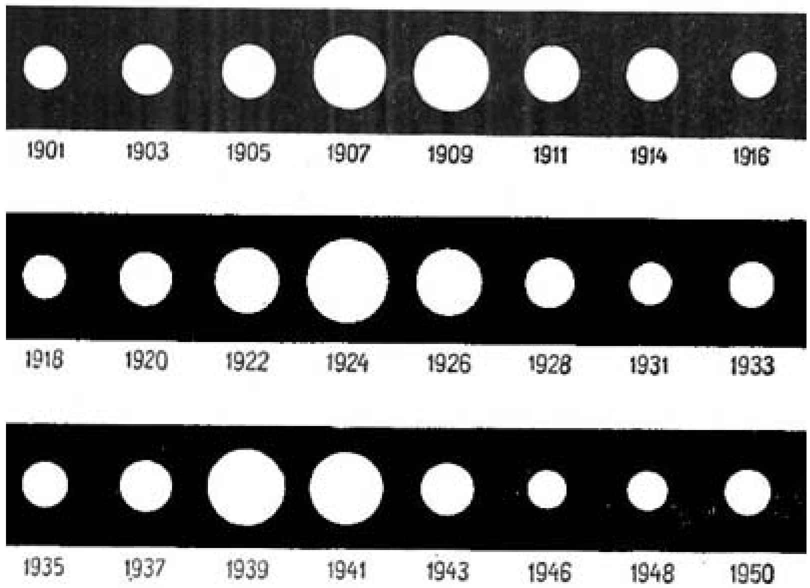


Figura 65. Cambios del diámetro aparente de Marte en el siglo XX. En 1909 1924 y 1939 hubo "oposiciones".

Los años en que se produjeron las últimas "oposiciones" del planeta rojo fueron 1924, 1939 (figura 65) y 1956[61]. Pero pocos saben por qué este hecho se repite cada 15 años. Sin embargo, la explicación matemática de este fenómeno es muy sencilla.

La Tierra completa una vuelta alrededor de su órbita en 365 días y Marte en 687 días. Si ambos planetas se encuentran una vez a la menor distancia, deben encontrarse nuevamente después de un espacio de tiempo que incluya un número entero de años, tanto terrestres como marcianos.

En otras palabras, es necesario resolver en números enteros las ecuaciones

$$365\tfrac{1}{4} \cdot x = 687\, y$$

o

61 La distancia de Marte a la Tierra oscila entre los 55 millones y los 400 millones de kilómetros. Las aproximaciones de Marte a la Tierra no siempre son iguales; cada 17 años, por ejemplo, se produce una aproximación entre los planetas que resulta más favorable para la observación. A tal aproximación se le denomina "oposición". Las oposiciones al planeta rojo, a comienzos del siglo XXI, se presentan en el 2.003, el 2.018 y el 2.035 *(N. del E.)*

$$x = 1{,}88\, y$$

de donde

$$x/y = 1{,}88 = 47/25$$

Transformando la última fracción en continua; tenemos:

$$\frac{47}{25} = 1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{7 + \frac{1}{8}}}$$

Tomando los tres primeros términos, tenemos la aproximación

$$1 \frac{1}{1 + \frac{1}{7}} = \frac{15}{8}$$

y deducimos que 15 años terrestres son iguales a 8 años marcianos, es decir, que las épocas de mayor aproximación de Marte deben repetirse cada 15 años. (Hemos simplificado un poco el problema, tomando como relación de ambos períodos de revolución 1,88 en lugar del valor más exacto, 1,8809.)

Empleando el mismo procedimiento se puede calcular también el período en que se repite la mayor aproximación de Júpiter. El año joviano es igual a 11,86 años terrestres (más exactamente 11,8622). Transformemos este número racional en una fracción continua:

$$11{,}86 = 11\frac{43}{50} = 11 + \frac{1}{1 + \frac{1}{6 + \frac{1}{7}}}$$

Los tres primeros términos dan una aproximación de 83/7. Esto significa que la oposición de Júpiter se repite cada 83 años terrestres (o cada 7 años de Júpiter). En esos años Júpiter alcanza también su mayor brillo aparente. La última oposición de Júpiter se produjo a fines del año 1927. La siguiente se da en el año 2010. La distancia de Júpiter a la Tierra en ese momento es igual a 587 millones de km. Esta es la menor distancia a que se puede encontrar de nosotros el más grande de los planetas del sistema solar.

7. ¿Planeta o Sol pequeño?

Esta pregunta se puede plantear respecto a Júpiter, el más grande de los planetas de nuestro sistema. Este gigante; del cual podrían hacerse 1300 esferas del mismo volumen que la Tierra, con su colosal fuerza de gravitación mantiene girando en torno suyo un enjambre de satélites. Los astrónomos han descubierto en Júpiter 12 lunas: las cuatro mayores, que ya fueron descubiertas por Galileo hace tres siglos, se designan con los números romanos I, II, III, IV. Los satélites III y IV, por sus dimensiones, no desmerecen frente a un planeta verdadero como Mercurio. En la tabla siguiente se dan los diámetros de estos satélites, comparados con los diámetros de Mercurio y de Marte; al mismo tiempo se indican los diámetros de los dos primeros satélites de Júpiter y, también, el de nuestra Luna.

Cuerpo	Diámetro (km)
Marte	6.600
IV satélite de Júpiter	5.150
III satélite de Júpiter	5.150
Mercurio	4.700
La Luna	3.700
I satélite de Júpiter	3.480
II satélite de Júpiter	3.220

La figura 66 nos da una ilustración de esa misma tabla. El círculo mayor es Júpiter; cada uno de los circulitos alineados en su diámetro representa a la Tierra; a la derecha está la Luna.

Los circulitos del lado izquierdo de Júpiter son sus cuatro satélites mayores. A la derecha de la Luna están Marte y Mercurio. Al examinar este grabado debe tenerse en cuenta que no se trata de un diagrama, sino de un simple dibujo: las relaciones entre las superficies de los círculos no dan una idea exacta de las relaciones entre los volúmenes de las esferas. Los volúmenes de las esferas se relacionan entre sí como los cubos de sus diámetros.

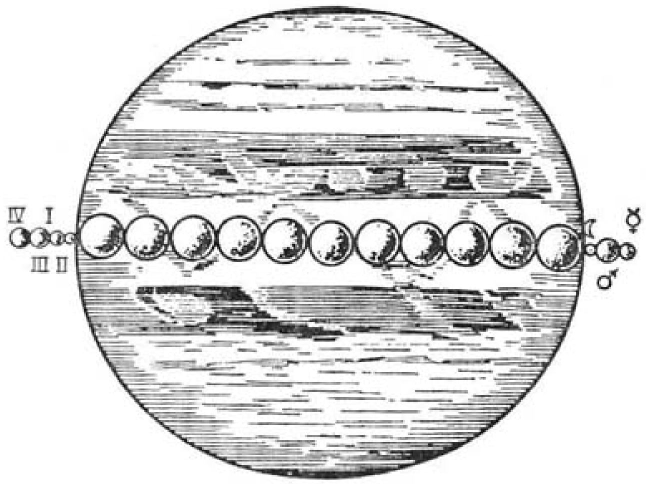


Figura 66. Las dimensiones de Júpiter y de sus satélites (a la izquierda) en comparación con las de la Tierra (a lo largo del diámetro) y las de la Luna, Marte y Mercurio (a la derecha).

Si el diámetro de Júpiter es 11 veces mayor que el diámetro de la Tierra, su volumen es 113 veces mayor, es decir, 1300 veces mayor.

De acuerdo con esto, se debe corregir la impresión visual de la figura 66, y entonces se pueden apreciar debidamente las gigantescas dimensiones de Júpiter.

En lo que se refiere a la potencia de Júpiter como centro de gravitación, resulta enorme, si se consideran las distancias a que giran sus lunas alrededor de este planeta gigante. He aquí una tabla de estas distancias

Distancias	**Kilómetros**	**Comparación**
De la Tierra a la Luna	380.000	1
Del III satélite a Júpiter	1.070.000	3
Del IV satélite a Júpiter	1.900.000	5
Del IX satélite a Júpiter	24.000.000	63

Se ve que el sistema de Júpiter tiene unas dimensiones 63 veces mayores que el sistema Tierra-Luna; Ningún otro planeta posee una familia tan extensa de satélites.

No sin fundamento se compara a Júpiter con un Sol pequeño. Su masa es 3 veces mayor que la masa de todos los planetas restantes tomados en conjunto, y si de golpe desapareciera el Sol, su lugar podría ser ocupado por Júpiter, que mantendría a todos los planetas girando a su alrededor, si bien lentamente, como nuevo cuerpo central del sistema.

Hay también rasgos de semejanza entre Júpiter y el Sol en cuanto a la estructura física. La densidad media de su materia es de 1,35 con relación al agua, próxima a la densidad del Sol (1,4). Sin embargo, el fuerte aplastamiento de Júpiter hace suponer que posee un núcleo denso, rodeado de una gruesa capa de hielo y de una gigantesca atmósfera.

No hace mucho tiempo, la comparación entre Júpiter y el Sol fue llevada más lejos; se supuso que este planeta no está cubierto por una corteza sólida y que apenas si acaba de salir del estado de incandescencia. La idea que en la actualidad se tiene de Júpiter es precisamente la contraria: la medida directa de su temperatura mostró que es extremadamente baja: ¡140 centígrados bajo cero! En verdad se trata de la temperatura de las capas de nubes que nadan en la atmósfera de Júpiter.

La baja temperatura de Júpiter dificulta la explicación de sus particularidades físicas: las tormentas de su atmósfera, las franjas, las manchas, etc. Los astrónomos se encuentran ante una verdadera madeja de enigmas.

No hace mucho, en la atmósfera de Júpiter (y también en la de su vecino Saturno) se descubrió la presencia indudable de una gran cantidad de amoníaco y metano[62].

8. La desaparición de los anillos de Saturno

En el año 1921 se propagó un rumor sensacional: ¡Saturno había perdido sus anillos! Y no sólo esto: los fragmentos de los anillos destruidos volaban por el espacio sideral en dirección al Sol y en su camino caerían sobre la Tierra. Se indicaba incluso el día en que debía producirse el encuentro catastrófico...

Esta historia sirve de ejemplo característico de como se propagan las falsas noticias.

El origen de este rumor sensacional es muy simple: en el año mencionado el triple anillo de Saturno dejó de ser visible durante un corto tiempo, "desapareció", según

---

62 Aún más significativo es el contenido en metano de la atmósfera de los planetas más alejados, de Urano y, particularmente, de Neptuno. En el año 1944 se descubrió una atmósfera de metano en Titán, el más grande de los satélites de Saturno. (N. R.)

la expresión del calendario astronómico; se interpretó esta expresión literalmente, como una desaparición física, es decir, como una ruptura del anillo, y se adornó posteriormente el suceso con detalles que llegaban incluso a la catástrofe universal, hablándose de la caída de los fragmentos del anillo en el Sol y de su inevitable encuentro con la Tierra.

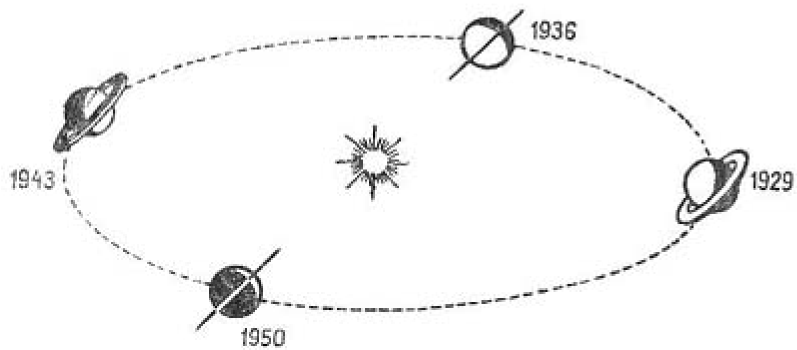


Figura 67. Posiciones que ocupan los anillos de Saturno con relación al Sol durante una revolución de este planeta alrededor de su órbita (29 años).

¡Qué gran alboroto originó la inocente información del calendario astronómico que anunciaba la desaparición óptica de los anillos de Saturno! Pero ¿cuál era la causa de esta desaparición? Los anillos de Saturno son muy delgados, su espesor mide sólo dos o tres decenas de kilómetros; en comparación con su ancho, tienen el grosor de una hoja de papel. Por esto, cuando los anillos se colocan de perfil al Sol, éste no ilumina sus superficies superiores e inferiores, y los anillos se hacen invisibles. También resultan invisibles cuando se colocan de perfil al observador terrestre.

Los anillos de Saturno presentan una inclinación de 27º respecto al plano de la órbita de la Tierra, pero a lo largo de una revolución alrededor de su órbita (29 años), en dos puntos diametralmente opuestos, el planeta coloca los anillos de perfil al Sol y al observador terrestre (figura 67), y, en otros dos puntos situados a 90º de los primeros, los anillos, por el contrario, muestran al Sol y a la Tierra su mayor ancho, "se abren", al decir de los astrónomos.

9. Anagramas astronómicos

La desaparición de los anillos de Saturno dejó en su momento perplejo a Galileo, al que faltó muy poco para descubrir este rasgo particularmente notable del planeta, pero que no pudo llegar a hacerlo debido a la incomprensible desaparición de los anillos.

Esta historia es muy interesante. En aquel tiempo era muy frecuente tratar de reservarse el derecho de primacía en cualquier descubrimiento sirviéndose de un original artificio. Cuando llegaba a descubrir algo que aún necesitaba de confirmación posterior, el hombre de ciencia, por temor a que otro se adelantara, recurría a la ayuda de anagramas (trasposiciones de letras): comunicaba sucintamente la esencia de su descubrimiento en forma de anagrama, cuyo verdadero sentido era conocido sólo por él mismo. Si el hombre de ciencia no tenía tiempo de confirmar su descubrimiento, podía demostrar su prioridad en el caso de que apareciera otro pretendiente. Cuando finalmente se convencía de la legitimidad del hallazgo original, descubría el secreto del anagrama.

Observando con su imperfecto telescopio que Saturno tenía cerca algún cuerpo agregado, Galileo se apresuró a "patentar" este descubrimiento e hizo público el siguiente juego de letras

Smaismrmielmepoetaleumibuvnenugttaviras

Adivinar lo que se esconde tras estas letras es totalmente imposible[63]. Naturalmente, se pueden ensayar todos los cambios de lugar de estas 39 letras y de este modo descifrar la frase que proponía Galileo; pero eso exigiría realizar un trabajo enorme. Quien conozca la teoría combinatoria puede calcular el número total de las distintas permutaciones (con repetición) posibles[64]. Son

$$\frac{39!}{3!\,5!\,4!\,4!\,25!\,2!\,3!\,3!\,2!\,2!}$$

Este número está formado aproximadamente por 35 cifras (recordemos que el

63 La palabra clave de Galileo consta de 39 letras. El número de veces que se repite cada letra es: S=3, M=5, A=4, I=4, R=2, E=5, L=2, P=1, O=1, T=3, U=3, B=1, V=2, N=2 y G=1.

64 Quizá no lo hizo público, sino que lo envió por carta a Kepler, detalle interesante por lo que sigue. (Nota de la Editorial soviética.)

número de segundos de un año ¡está formado sólo por 8 cifras!). Se ve claramente lo bien que Galileo se aseguró el secreto de su hallazgo.

Un contemporáneo del sabio italiano, Kepler[65], con paciencia incomparable, dedicó muchos esfuerzos a descubrir el sentido oculto de la comunicación de Galileo, y creyó haberlo logrado luego de eliminar dos letras del mensaje publicado por Galileo, formando esta frase en latín:

Salve, umbistineum geminatum Martia proles

(Os saludo, hijos gemelos de Marte)

Kepler quedó convencido de que Galileo había descubierto los dos satélites de Marte cuya existencia él mismo sospechaba (en realidad, fueron descubiertos dos siglos y medio después). Sin embargo, el ingenioso Kepler esta vez no llegó a la verdad. Cuando Galileo dejó finalmente al descubierto el secreto de su comunicación resultó que la frase, luego de eliminar dos letras, era la siguiente:

Altissimum planetam tergeminum observavi

(Observé triple el más alto de los planetas)

Por la escasa potencia de su telescopio, Galileo no podía explicarse el verdadero significado de esta "triple" aparición de Saturno[66], y cuando pasados algunos años estos agregados laterales del planeta desaparecieron completamente, Galileo creyó que se había equivocado y que Saturno no tenía ningún cuerpo agregado.

La gloria de descubrir los anillos de Saturno le cupo medio siglo después a

---

65 Es evidente que Johannes Kepler utilizó para esto la suposición de una progresión en el número de los satélites de los planetas; pensando que la Tierra tenía un satélite y que Júpiter tenía 4, creyó natural la existencia de dos satélites en el planeta intermedio, Marte. Un razonamiento similar llevó también a otros pensadores a sospechar la presencia de dos satélites en Marte. En la fantasía astronómica Micromegas, de Voltaire -François Marie Arouet- (1750), encontramos una alusión a esto, pues el viajero imaginario, al acercarse a Marte, vio "dos lunas tributarias de este planeta hasta entonces escondidas a la mirada de nuestros astrónomos". En los Viajes de Gulliver, escritos años antes por Jonathan Swift (1.720), se tiene algo parecido: los astrónomos de Lupata "descubrieron dos satélites que giran alrededor de Marte". Estos interesantes hallazgos tuvieron plena confirmación solamente en 1877, cuando Asaph Hall descubrió la existencia de los dos satélites de Marte -Deimos y Fobos-, con ayuda de un potente telescopio. *(N. del E.)*

66 El telescopio de Galileo tenía baja resolución, por ello no le permitía saber a ciencia cierta qué era lo que veía. Como consecuencia de esto y dado que Galileo ya había descubierto las lunas de Júpiter, pensó que Saturno era un planeta "triple". En otras palabras, Galileo creyó que Saturno era un planeta grande con otros dos planetas más pequeños "adosados" a sus costados. *(N. del E.)*

Huygens[67]. A semejanza de Galileo, no publicó inmediatamente su descubrimiento, sino que ocultó su hallazgo en escritura cifrada:

Aaaaaaacccccdeeeeeghiiiiiiiiiimmnnnnnnnnnnoooppqrrstttttuuuu

Pasados tres años, convencido de la validez de su descubrimiento, Huygens aclaró el sentido de su comunicación:

Annulo cingitur, tenui, plano, nusquam cohaerente, ad eclipticam inclinato.

(Rodeado por un anillo delgado, aplastado, que no lo toca en ninguna parte, inclinado sobre la eclíptica).

10. Un planeta situado más allá de Neptuno

En la primera edición de este libro (1929) escribí que el último planeta conocido del sistema solar era Neptuno, que se encuentra 30 veces más lejos del Sol que la Tierra. Ahora no puedo repetir esto, pues en 1930 se agregó a nuestro sistema solar un nuevo miembro, el noveno planeta mayor, que gira alrededor del Sol más allá de Neptuno.

Este descubrimiento no fue totalmente inesperado. Hacía tiempo que los astrónomos se inclinaban a pensar en la existencia de un planeta desconocido más allá de Neptuno. Hace poco más de cien años se consideraba a Urano como el último planeta del sistema solar.

Algunas irregularidades en su movimiento llevaron a sospechar la existencia de un planeta más lejano aún, cuya atracción alteraba la trayectoria calculada de Urano.

A la investigación matemática del problema por el matemático inglés Adams y por el astrónomo francés Le Verrier[68] siguió un brillante descubrimiento; el planeta sospechado fue visto en el telescopio. Un mundo descubierto por el cálculo, "con

---

67 Christiaan Huygens (1629 - 1695). Astrónomo, físico y matemático holandés. *(N. del E.)*

68 John Couch Adams (1819 - 1892). Matemático y astrónomo inglés. Especialmente conocido por haber predicho la existencia y la posición del planeta Neptuno, utilizando únicamente las matemáticas.

Urbain Jean Joseph Le Verrier (1811 - 1877). Matemático francés que se especializó en mecánica celeste. Su logro más importante fue su colaboración en el descubrimiento de Neptuno usando sólo matemáticas, es decir, a base de cálculos sobre el papel, y las observaciones astronómicas. *(N. del E.)*

lápiz y papel", se manifestó a la vista humana.

Así fue descubierto Neptuno. Posteriormente se vio que la influencia de Neptuno no explicaba completamente todas las irregularidades del movimiento de Urano. Entonces surgió la idea de la existencia de otro planeta transneptuniano. Era necesario hallarlo, y los matemáticos empezaron a trabajar en este problema. Fueron propuestas varias soluciones que situaban al noveno planeta a diferentes distancias del Sol y que atribuían distintas masas al cuerpo celeste buscado.

En el año 1930 (más exactamente, a finales de 1929), el telescopio sacó por fin de las tinieblas en los confines del sistema solar un nuevo miembro de la familia planetaria, al que se le dio el nombre de Plutón. Este descubrimiento fue hecho por el joven astrónomo Tombaugh[69].

Plutón gira en una trayectoria muy próxima a una de las órbitas que le fueron asignadas previamente. Sin embargo de acuerdo con los especialistas, en este resultado no se puede ver un éxito del cálculo; la coincidencia de las órbitas en este caso no es más que una feliz casualidad.

¿Qué sabemos de este mundo recién descubierto? Hasta ahora, poco. Se encuentra tan alejado de nosotros y es iluminado tan débilmente por el Sol, que aun con los más potentes instrumentos resulta difícil medir su diámetro, que resultó ser igual a 5.900 km, o sea, a 0,47 diámetros terrestres.

Plutón se mueve alrededor del Sol siguiendo una órbita bastante alargada (de excentricidad 0,25), notablemente inclinada (17º) respecto al plano de la órbita terrestre, a una distancia del Sol 40 veces mayor que la Tierra. Cerca de 250 años emplea el planeta en recorrer este enorme camino.

En el cielo de Plutón el Sol brilla 1.600 veces más débilmente que en la Tierra. Sé ve como un pequeño disco en un ángulo de 45", es decir, aproximadamente del mismo tamaño que vemos a Júpiter. Resulta interesante, sin embargo, establecer

---

69 Clyde William Tombaugh (1906 - 1997). Astrónomo norteamericano que descubrió el planeta enano Plutón en 1930. Para su descubrimiento utilizó un microscopio de parpadeo, con el cual comparó fotografías de una región del cielo que habían sido tomadas con varios días de diferencia.

Tombaugh trabajaba en la búsqueda sistemática de cuerpos más allá de la órbita de Neptuno. Buscaba el Planeta X, un hipotético planeta capaz de explicar por sus interacciones gravitatorias con Neptuno algunos detalles de la órbita de este último. La existencia del Planeta X había sido predicha por Percival Lowell y William Pickering. Plutón recibió su nombre del dios romano del mundo de los muertos, capaz de volverse invisible. El nombre fue favorecido entre una lista de varios otros en parte por iniciarse con las letras PL, iniciales de Percival Lowell. El asteroide (1604) Tombaugh, descubierto en 1931, fue nombrado en su honor. Tombaugh descubrió 14 asteroides en su búsqueda de Plutón y otros planetas. (N. del E.)

quién brilla más, si el Sol en Plutón o la Luna llena en la Tierra.
Resulta que el lejano Plutón no está tan desprovisto de luz solar como podría pensarse. La Luna llena brilla en la Tierra 440.000 veces más débilmente que el Sol. En el cielo de Plutón, el astro diurno es 1.600 veces más débil que en la Tierra. Esto quiere decir que el brillo de la luz solar en Plutón es igual a

$$440.000/1.600 = 275$$

es decir, 275 veces más intensa que la luz de la Luna llena en la Tierra. Si el cielo de Plutón resultara ser tan claro como en la Tierra (esto es verosímil, ya que Plutón al parecer está desprovisto de atmósfera), la iluminación diurna de este planeta sería igual a la iluminación de 275 Lunas llenas, y, al mismo tiempo, 30 veces más brillante que la más clara de las noches blancas de Leningrado. Por lo tanto, es erróneo llamar a Plutón el rey de la noche eterna.

11. Los planetas enanos

Los nueve planetas mayores de que hasta ahora hemos hablado no constituyen toda la población planetaria de nuestro sistema solar. Sólo son sus más notables representantes desde el punto de vista de las dimensiones. Aparte de esto, alrededor del Sol giran, a diversas distancias, numerosos planetas de tamaño mucho menor. Estos enanos del mundo de los planetas se llaman asteroides (literalmente, "parecidos a estrellas"), o también, "planetas menores". El más notable de ellos, Ceres, tiene un diámetro de 1.030 km[70]; es de volumen mucho menor que la Luna, aproximadamente, un número de veces igual al que la Luna es menor que la Tierra.
Ceres, el primero de los planetas menores, fue descubierto en la primera noche del siglo pasado (el 1º de enero del año 1801). Durante el siglo XIX fueron descubiertos más de 400 asteroides. Todos los planetas menores giran alrededor del Sol, entre las órbitas de Marte y Júpiter. Por esta razón, hasta no hace mucho tiempo se daba por cierto que los asteroides estaban concentrados, en forma de anillo, en el ancho

70 Los asteroides de mayor tamaño y más representativos son: Ceres, con un diámetro de unos 1.030 kilómetros, y Palas y Vesta, con diámetros de unos 450 kilómetros. Aproximadamente 200 asteroides tienen diámetros de más de 100 kilómetros, y existen miles de asteroides más pequeños. *(N. del E.)*

espacio existente entre las órbitas de los dos planetas mencionados.

En el siglo XX, y en particular en los últimos años, se ampliaron los límites de la franja de asteroides. Ya Eros[71], descubierto a fines del siglo pasado (en el año 1898), apareció fuera de dichos límites, puesto que gran parte de su órbita se encuentra dentro de la órbita de Marte. En 1920 los astrónomos dieron con el asteroide Hidalgo[72], cuyo camino cruza la órbita de Júpiter y llega cerca de la órbita de Saturno. El asteroide Hidalgo es notable por otro motivo: entre todos los planetas conocidos, posee una de las órbitas más extraordinariamente alargadas (su excentricidad es igual a 0,66), y muy inclinada respecto al plano de la órbita terrestre, con la que forma un ángulo de 43º.

Observemos de paso que el nombre dado a este planeta lo fue en honor de Hidalgo y Costilla, glorioso héroe de las luchas de Méjico por su independencia, muerto en el año 1811[73].

Todavía se ensanchó más la zona de los planetas menores en el año 1936, cuando fue descubierto un asteroide con una excentricidad de 0,78. El nuevo miembro de nuestro sistema solar recibió la denominación de Adonis. Una particularidad de este nuevo planeta menor es que, en el punto más alejado de su camino, se separa del Sol casi a la distancia de Júpiter y, en su punto más próximo, pasa cerca de la órbita de Mercurio.

Finalmente, en 1949 fue descubierto el planeta menor Ícaro, que tiene una órbita excepcional. Su excentricidad es igual a 0,83; su máximo alejamiento del Sol es dos veces mayor que el radio de la órbita terrestre, y el mínimo, alrededor de un quinto de la distancia de la Tierra al Sol. Ninguno de los planetas conocidos se acerca tanto

---

71 Eros es un asteroide de aproximadamente 33 × 13 × 13 kilómetros de tamaño. Gira sobre su eje cada 5 horas y 16 minutos. Eros muestra numerosos cráteres provocados por el choque con otros asteroides más pequeños.

El 14 de febrero de 2.000, la nave espacial Near orbitó alrededor de Eros, convirtiéndose en el primer satélite artificial en orbitar alrededor de un asteroide.

En la actualidad, pocos científicos creen que los asteroides sean restos de un planeta destruido. Lo más probable es que ocupen el lugar en donde se pudo formar un planeta de gran tamaño, lo que no ocurrió por la influencia de Júpiter. *(N. del E.)*

72 Hidalgo es el nombre de un asteroide descubierto por el astrónomo alemán Walter Baade (1893 - 1960), el 31 de octubre de 1920. Su peculiar órbita excéntrica oscila entre los 300 millones y los 870 millones de km y es poco propia de un asteroide, lo cual ha llevado a pensar a los expertos que se trata de un cometa extinto. *(N. del E.)*

73 Miguel Gregorio Antonio Ignacio Hidalgo y Costilla Gallaga Mondarte Villaseñor (1753 - 1811). Sacerdote y militar que destacó en la primera etapa de la Guerra de Independencia de México. Dirigió la primera parte del movimiento independentista, pero tras una serie de derrotas fue capturado, hecho prisionero, juzgado y finalmente fusilado. *(N. del E.)*

al Sol como Ícaro.

El sistema de registro de los planetas recién descubiertos resulta de interés general, puesto que también se puede emplear para fines no astronómicos. En primer lugar se escribe el año del descubrimiento del planeta, y luego la letra que señala la mitad del mes de la fecha de su descubrimiento (el año está dividido en 24 medios meses, que se indican con las sucesivas letras del alfabeto).

Como en el transcurso de medio mes se descubren frecuentemente varios planetas menores, se señalan con una segunda letra, por orden alfabético. Si las segundas letras no bastan, se les agregan números al lado. Por ejemplo 1932 EA1, es el asteroide número 25, descubierto en el año 1932, en la primera mitad de marzo. Tras el cálculo de la órbita del planeta recién descubierto, éste recibe un número de orden y después un nombre[74].

De la totalidad de los planetas menores, hasta ahora seguramente sólo una, pequeña parte es asequible a los instrumentos astronómicos; los restantes escapan a las redes de los cazadores. De acuerdo con los cálculos, el número de asteroides existentes en el sistema solar debe ser del orden de 40 a 50.000.

Hasta el momento el número de planetas enanos descubiertos por los astrónomos pasa de mil quinientos; de ellos, más de cien fueron descubiertos por los astrónomos del observatorio de Simeiz (en Crimea, a orillas del mar Negro)[75], principalmente por el esfuerzo del entusiasta cazador de asteroides Grigory Nikolaevich Neuymin. El lector no se sorprenderá si encuentra en la lista de los planetas menores nombres tales como "Vladilen" (en honor de Vladimir Ilich Lenin), y también "Morosov" y "Figner"[76] (en honor de los célebres revolucionarios rusos),

---

74 1932 EA1 es la designación alterna del asteroide Amor, asteroide número 1.221. Descubierto por el astrónomo belga Eugène Joseph Delporte, el 12 de marzo de 1932. Su diámetro es de un kilómetro y da nombre al grupo de los asteroides Amor, que se acercan bastante a la órbita de la Tierra sin atravesarla. *(N. del E.)*

75 En 1839 se inauguró el Observatorio astronómico de Pulkovo, principal observatorio astronómico de la Academia Rusa de las Ciencias.

Para observar las estrellas meridionales que no podían verse en la latitud del observatorio, los científicos organizaron dos estaciones anexas: Simeiz y Nikolaev.

La estación Simeiz se convirtió en parte del nuevo Observatorio astrofísico de Crimen, de la Academia Soviética de las Ciencias, en 1945. *(N. del E.)*

76 *Pavel Trofímovich Morózov* (1.918-1.932). Joven soviético glorificado por la propaganda soviética como un mártir. A los 13 años de edad denuncia a su padre, alcalde de Gerasimovka, a las autoridades por alta traición ("*falsificando documentos y vendiéndolos a los bandidos y enemigos del poder soviético*") y es asesinado por su familia.

Vera Nikoláievna Figner (1852- 1942). Revolucionaria rusa. Fundadora de la asociación terrorista Tierra y Libertad, atentó contra el zar Alejandro II y que causó su muerte en 1881. Es autora de las Memorias de una revolucionaria. *(N. del E.)*

“Simeiz” y otros. Por el número de los asteroides descubiertos, Simeiz ocupa uno de los principales lugares entre los observatorios del mundo; por el estudio de los problemas teóricos relativos a los asteroides, la astronomía soviética también ocupa un puesto de gran importancia en la ciencia mundial.

El Instituto de Astronomía Teórica de la Academia de Ciencias de la URSS (en Leningrado), predice desde hace muchos años las posiciones de gran número de planetas menores y rectifica la teoría de sus movimientos. El Instituto publica anualmente las posiciones prefijadas (llamadas “efemérides”) y las envía a todos los observatorios del mundo.

Las dimensiones de los planetas menores varían en extremo. Los grandes, como Ceres o Palas (930 y 532 km de diámetro), son pocos. Unos 70 asteroides poseen un diámetro mayor de 100 km. La mayor parte de los planetas menores conocidos tienen un diámetro de 20 a 40 km. Pero hay muchos del todo “minúsculos” (entre comillas, porque en labios del astrónomo esta palabra tiene un valor relativo). Aunque falta mucho aún para descubrir todos los miembros del anillo de asteroides, hay sin embargo razones para afirmar que la masa total de los asteroides, tanto descubiertos como no descubiertos, constituye cerca de 4/100 de la masa del globo terrestre. Se supone que hasta ahora no se ha descubierto más del 5% del número de asteroides que pueden ser captados por los telescopios contemporáneos.

“Pudiera pensarse -escribe nuestro mejor conocedor de estos pequeños planetas, G. N. Neuymin, que todos los asteroides poseen propiedades físicas bastante similares. En realidad, nos encontramos con una variedad sorprendente. Así, por ejemplo, la capacidad de reflexión que se ha determinado para los cuatro primeros asteroides indica que Ceres y Palas reflejan la luz como las rocas montañosas oscuras de la Tierra, Juno como las rocas claras y Vesta en forma semejante a las nubes blancas. Esto resulta más enigmático en cuanto los asteroides, por su pequeñez, no pueden mantener una atmósfera a su alrededor. Sin duda están desprovistos de ella, y toda la diferencia en la capacidad de reflexión se debe atribuir a los materiales mismos de que está constituida la superficie del planeta.”

Algunos planetas menores presentan fluctuaciones de brillo que son testimonio de su movimiento de rotación y de su forma irregular.

12. Nuestros vecinos más próximos

El asteroide Adonis mencionado anteriormente se distingue de los demás asteroides por su órbita, la que además de ser extraordinariamente grande, es alargada como la de un cometa. Es notable también porque pasa muy cerca de la Tierra. En el año de su descubrimiento, Adonis pasó a una distancia de 1½ millones de km de la Tierra. Es cierto que la Luna está más cerca de nosotros; pero la Luna, aunque es mucho mayor que los asteroides, no tiene el rango de éstos, no es un planeta independiente, sino el satélite de un planeta. Otro asteroide, Apolo, integra la lista de los pequeños planetas más próximos a la Tierra. Este asteroide pasó, el año en que fue descubierto, a una distancia de sólo 3 millones de km de la Tierra. Esta distancia se considera muy corta en la escala planetaria, puesto que Marte no se aproxima a la Tierra a menos de 55 millones de kilómetros y Venus nunca pasa a menos de 40 millones de kilómetros de nosotros.

Es interesante notar que este asteroide se acerca todavía más a Venus: a sólo 200.000 km, ¡la mitad de la distancia de la Luna a la Tierra! No conocemos otro acercamiento mayor entre los planetas de nuestro sistema.

Este asteroide vecino nuestro también se destaca por ser uno de los más pequeños planetas catalogados por los astrónomos. Su diámetro no supera los 2 km, o quizás menos.

En 1937 fue descubierto el asteroide Hermes, que en ocasiones puede acercarse a la Tierra a una distancia del mismo orden que la que nos separa de la Luna (500.000 km). Su diámetro no excede de 1 km. Conviene observar en este ejemplo el valor que tiene en el lenguaje astronómico la palabra "pequeño". Si un asteroide minúsculo como éste, con un volumen de sólo 0,52 km2, es decir, de 520.000.000 m3, fuera de granito, pesaría aproximadamente 1.500.000.000 toneladas.

Con este material se podrían levantar 300 monumentos como la pirámide de Keops. Ya vemos cómo ha de entenderse la palabra "pequeño" cuando se habla en términos astronómicos.

13. Los acompañantes de Júpiter

Entre los 1.600 asteroides conocidos hasta ahora se destaca por sus notables movimientos un grupo formado por quince planetas menores que recibieron denominaciones de héroes de la guerra de Troya: Aquiles, Patroclo, Héctor, Néstor, Príamo, Agamenón, etc. Cada "troyano" gira alrededor del Sol de tal modo, que el asteroide, Júpiter y el Sol, en cualquier momento, ocupan los vértices de un triángulo equilátero. Los "troyanos" se pueden considerar como acompañantes particulares de Júpiter, al que escoltan manteniéndose a gran distancia: algunos se encuentran 60º delante de Júpiter; otros van detrás, igual número de grados, y todos completan una vuelta alrededor del Sol en el mismo tiempo.

El equilibrio de ese triángulo planetario es interesante. Si un asteroide saliera de su posición, la fuerza de gravitación lo haría regresar a su sitio.

Mucho antes del descubrimiento de los "troyanos", la posibilidad de semejante equilibrio móvil de tres cuerpos sometidos a la gravitación fue predicha por el matemático, francés Lagrange, en virtud de investigaciones teóricas por él realizadas. Lagrange estudió este caso como un problema matemático interesante, y pensó que quizás en algún lugar del espacio se daba realmente una relación semejante. La búsqueda meticulosa de los asteroides condujo al descubrimiento, dentro de los límites del sistema planetario, de un ejemplo real del caso predicho teóricamente por Lagrange[77]. Esto pone claramente de manifiesto la importancia que tiene para el desarrollo de la astronomía el estudio cuidadoso de los numerosos cuerpos celestes denominados planetas menores.

14. Los cielos ajenos

Ya hemos efectuado un vuelo imaginario a la superficie de la Luna y hemos echado desde allá una mirada a nuestra Tierra y a otros astros.

Visitemos ahora mentalmente los planetas del sistema solar y admiremos desde allí el espectáculo del cielo.

Empecemos por Venus. Si la atmósfera es suficientemente transparente, veremos el disco del Sol con doble superficie de como lo vemos en nuestro cielo (figura 68).

En correspondencia con esto, el Sol derrama sobre Venus doble cantidad de calor y de luz que sobre la Tierra. En el cielo nocturno de Venus nos sorprendería una

77 Joseph Louis Lagrange (1736 - 1813). Matemático, físico y astrónomo francés nacido en Turín (Italia) que después vivió en Prusia. Lagrange trabajó para Federico II de Prusia, en Berlín, durante veinte años. Lagrange demostró el teorema del valor medio, desarrolló la mecánica Lagrangiana y tuvo una importante contribución en astronomía. *(N. del E.)*

estrella de brillo extraordinario. Es la Tierra, que brilla allí con luz mucho más intensa que Venus para nosotros, aunque las dimensiones de ambos planetas son casi las mismas. Es fácil comprender por qué esto es así.

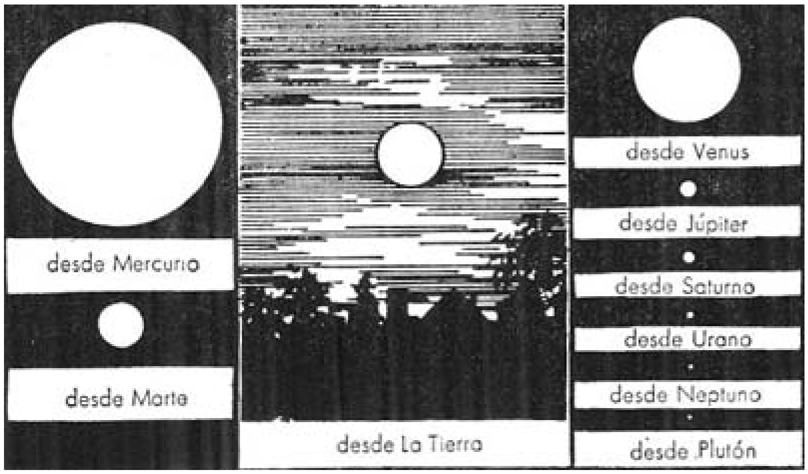


Figura 68. Dimensiones aparentes del Sol desde la Tierra y desde otros planetas.

Nuestra Tierra, en el cielo de Venus, en la época de su mayor aproximación a éste, brilla como un disco completo, igual que para nosotros Marte cuando se halla en oposición. En resumen, la Tierra, en el cielo de Venus, cuando de encuentre en su fase plena, brillará seis veces más intensamente que Venus para nosotros en la época de su mayor brillo, siempre que el cielo de nuestro vecino sea completamente claro. Sin embargo, resulta erróneo pensar que el brillo de la Tierra, regando copiosamente la cara oscura de Venus, puede ser la causante de su "luz cenicienta". La Tierra ilumina a Venus con la misma intensidad con la que una bujía normal alumbra a 35 m de distancia. Evidentemente, esto no es suficiente para producir el fenómeno de la "luz cenicienta".

En el cielo de Venus, a la luz de la Tierra se le añade frecuentemente la luz de nuestra Luna, la cual brilla allí cuatro veces más que Sirio. Es dudoso que haya en todo el sistema solar un cuerpo más brillante que el astro doble Tierra-Luna, que embellece el cielo de Venus. Un observador situado en Venus verá, una buena parte del tiempo, la Tierra y la Luna separadas, y con el telescopio distinguirá además detalles de la superficie lunar.

Otro planeta que brilla mucho en el cielo de Venus es Mercurio, que viene a ser su lucero matutino y vespertino. A propósito de esto, digamos que también desde la Tierra Mercurio se ve como una estrella brillante, ante la cual resulta pálida la luz de Sirio. Este planeta brilla en Venus casi una intensidad tres veces mayor que en la Tierra. En compensación, Marte brilla con luz 2½ veces más débil; casi más apagado que para nosotros, resulta Júpiter.

En lo que se refiere a las estrellas fijas, el contorno de las constelaciones es exactamente el mismo en el cielo de todos los planetas del sistema solar. Desde Mercurio, desde Júpiter, desde Saturno, desde Neptuno, desde Plutón, veremos los mismos esquemas formados por las estrellas. Las estrellas están muy alejadas en comparación con las distancias planetarias.

Salgamos de Venus hacia el pequeño Mercurio; entramos en un extraño mundo desprovisto de atmósfera que no conoce la sucesión de los días y las noches. El Sol pende allí inmóvil en el cielo, como un disco gigantesco, seis veces mayor (en superficie) que en la Tierra (figura 68). Nuestro planeta, en el cielo de Mercurio, brilla aproximadamente con doble intensidad que Venus en nuestro cielo. El mismo Venus brilla allí con fulgor poco común. Ninguna otra estrella o planeta en ninguna parte de nuestro sistema brilla tan deslumbrante como Venus en el cielo negro y sin nubes de Mercurio.

Dirijámonos a Marte. El Sol, visto desde allí, parecerá un disco tres veces más pequeño que si visto desde la Tierra (figura 68). Nuestro propio planeta brilla en el cielo de Marte como lucero matutino y vespertino, igual que Venus para nosotros, pero más pálido que éste, casi como vemos a Júpiter. La Tierra nunca se verá desde allí en su fase llena. Los marcianos no podrán ver en un momento dado más de las ¾ partes de su disco. Desde Marte, nuestra Luna será visible a simple vista como una estrella casi tan brillante como Sirio. Con el telescopio se verán las fases de la Tierra y las de la Luna. Fobos, el satélite próximo a Marte, a pesar de sus ínfimas dimensiones (10 km de diámetro), se encuentra tan cerca de Marte que, en el período de "Fobos lleno", brilla 25 veces más claro que Venus para nosotros. El segundo satélite, Deimos, es mucho menos brillante, pero también eclipsa la luz de la Tierra en el cielo de Marte. A pesar de sus pequeñas dimensiones, Fobos está tan cerca de Marte que desde éste sus fases se verán claramente. Un hombre de buena agudeza visual observará con absoluta seguridad, las fases de Deimos (Deimos sería visible desde Marte con un ángulo de 1′, y Fobos, con un ángulo de cerca de 6′).

Antes de dirigirnos más lejos, detengámonos un momento en la superficie del satélite más próximo a Marte. Veremos desde allí un espectáculo absolutamente excepcional: en el cielo brillará, cambiando rápidamente sus fases, un disco gigante, algunos miles de veces más brillante que nuestra Luna. Es el planeta Marte. Su disco ocupa en el cielo 41º, es decir, 80 veces mayor que la Luna para nosotros. Sólo en el satélite más próximo a Júpiter se podrá observar un espectáculo celeste semejante.

Traslademonos ahora a la superficie del planeta gigante que acabamos de mencionar. Si el cielo de Júpiter es claro, el Sol se verá en como un disco de superficie 25 veces menor que en nuestro cielo (figura 68), y brillará otras tantas veces menos. Al breve día de 5 horas le sigue rápidamente la noche. Si nos ponemos a buscar sobre el fondo de estrellas los planetas conocidos, los encontraremos, pero ¡qué cambiados!

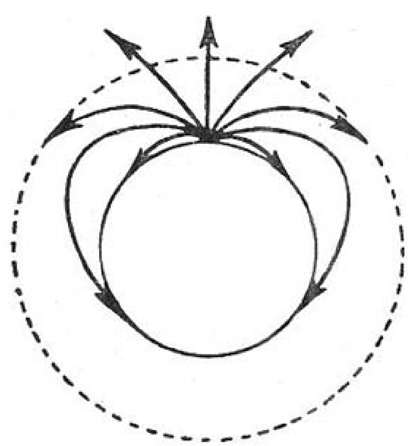


Figura 69. Posible curvatura de los rayos luminosos en la atmósfera de Júpiter. (Ver en el texto las consecuencias de este fenómeno).

Mercurio se perderá totalmente en los rayos del Sol; se podrán observar con el telescopio Venus y la Tierra, sólo en los crepúsculos, pues se pondrán al mismo tiempo que el Sol[78]; y Marte apenas será visible. En compensación, Saturno rivalizará en brillo, con enorme ventaja, con Sirio.

En el cielo de Júpiter ocupan un lugar importante sus lunas; los satélites I y II son

78 La Tierra brilla en el cielo de Júpiter como una estrella de octava magnitud.

casi tan brillantes como la Tierra en el cielo de Venus, el III es tres veces más brillante que la Tierra vista desde Venus, y los IV y V, son varias veces más brillantes que Sirio.

En cuanto a sus dimensiones, los diámetros aparentes de los cuatro primeros satélites serán mayores que el diámetro aparente del Sol. Los tres primeros satélites se sumergen en cada revolución, en la sombra de Júpiter, de modo que nunca serán visibles en las fases disco lleno. En este planeta también se producen eclipses totales de Sol, pero la zona de visibilidad de esos eclipses ocupa sólo una estrecha franja en la superficie de Júpiter.

La atmósfera de Júpiter quizás no sea tan transparente como la de la Tierra, pues es demasiado alta y densa. La gran densidad de la atmósfera puede dar lugar en Júpiter a fenómenos ópticos muy originales debidos a la refracción de la luz. En la Tierra resulta de poca importancia la refracción de los rayos luminosos, provocada por la atmósfera; ésta solo ocasiona una elevación (óptica) de los astros en el cielo.

Pero debido a la mayor altura y densidad de su atmósfera, en Júpiter son posibles fenómenos ópticos mucho más apreciables. Los rayos que salen muy inclinados de un punto de su superficie (figura 69) no abandonan la atmósfera y se curvan hacia la superficie del planeta como las ondas de radio en la atmósfera terrestre. Un observador que se encuentre en este punto podrá ver algo inusitado. Le parecerá que está en el fondo de una taza gigantesca. Dentro de la taza estará distribuida casi toda la superficie del gigantesco planeta, cuyos contornos cerca de los bordes estarán muy apretados. Y sobre la taza se extenderá el cielo, no la mitad del cielo que vemos, sino casi todo el cielo, aunque borroso y poco definido en los bordes de la taza. El astro diurno nunca abandonará este extraño cielo y se podrá ver el Sol de medianoche desde cualquier punto del planeta. Que realmente se den en Júpiter estas condiciones excepcionales, es cosa que hasta ahora, naturalmente, nadie puede afirmar con certeza.

Un espectáculo igualmente inusitado resultará el mismo Júpiter visto desde sus satélites más próximos (figura 70).

Por ejemplo, desde el V satélite (el más cercano) el disco gigante del planeta tendrá un diámetro casi noventa veces mayor que nuestra Luna[79] y brillará sólo seis o siete

---

79 El diámetro angular de Júpiter observado desde este satélite es mayor de 44º.

veces más débilmente que el Sol. Cuando se desplace sobre el horizonte sobre su borde inferior, su borde superior aparecerá en la mitad de la bóveda celeste, y al sumergirse en el horizonte, el disco ocupará la octava parte de éste. Sobre este disco, que girará rápidamente, aparecerán ocasionalmente circulitos oscuros, las sombras de las lunas de Júpiter, que como es natural, no pueden oscurecer en forma notable al planeta gigante.

Figura 70. Júpiter observado desde su tercer satélite.

Trasladados al siguiente planeta, a Saturno, estudiemos en qué forma se presentarán, a un observador situado en él, los famosos anillos de este planeta. Resulta, ante todo, que los anillos no serán visibles desde todos los puntos de la superficie de Saturno. Desde los polos hasta los paralelos 64º serán totalmente invisibles. En el límite de estos casquetes polares, apenas podrá verse el borde exterior del anillo externo (figura 71). A partir del paralelo 64º y hasta el paralelo 50º, aumentarán las condiciones de visibilidad de los anillos; siempre será visible su mayor parte, y en el paralelo 50º, el observador podrá admirar toda la extensión de los anillos, los cuales se presentarán allí en su ángulo mayor: 12º. Más cerca del ecuador del planeta, los anillos se reducirán para el observador, aunque se elevarán mucho más en el horizonte. En el ecuador mismo de Saturno, se podrán ver en forma de una franja muy estrecha que cruza la bóveda celeste de Oeste a Este y pasa por el cenit.

Lo dicho hasta acá, todavía no da una idea completa de las condiciones de visibilidad de los anillos. Es necesario recordar que sólo uno de los lados de los anillos está iluminado; el otro queda en la sombra. La parte iluminada es visible sólo desde la mitad de Saturno a la cual está dirigida.

Así, pues, durante una mitad del largo año de Saturno será posible ver los anillos sólo desde una mitad del planeta (el resto del año serán visibles desde la otra mitad), principalmente de día. En las breves horas en que los anillos sean visibles de noche, se eclipsarán parcialmente en la sombra del planeta.

Finalmente, todavía queda un detalle interesante: la zona ecuatorial, durante varios años terrestres, queda oscurecida por los anillos.

El cuadro más fantástico del cielo, sin duda alguna, es el que descubrirá un observador desde uno de los satélites más próximos a Saturno. Este planeta, con sus anillos, particularmente en las fases no llenas en que Saturno sea visible en forma de hoz, constituirá un espectáculo como no se podrá contemplar desde ningún otro punto de nuestro sistema planetario. En el cielo se dibujará una hoz gigante cruzada por las franjas estrechas de los anillos, que se observarán de perfil y, alrededor de ellos, aparecerá un grupo de satélites de Saturno, también en forma de hoz pero de dimensiones mucho más reducidas.

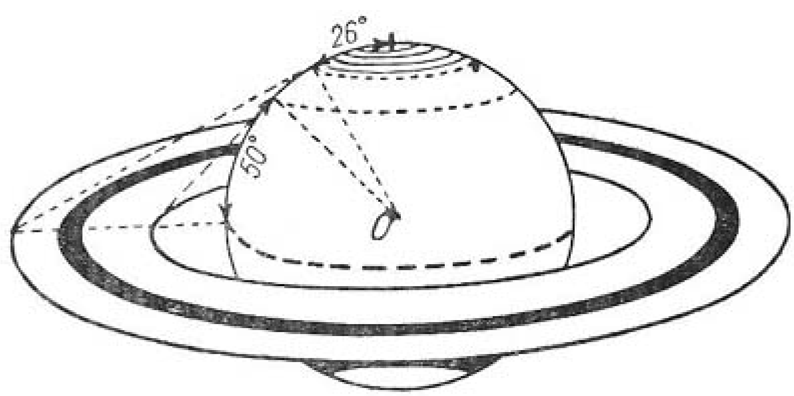


Figura 71. La visibilidad de los anillos de Saturno desde distintos puntos de la superficie de este planeta. En las regiones polares, hasta el paralelo 64, los anillos son totalmente invisibles.

La siguiente lista indica, en orden decreciente, los brillos comparativos de distintos astros vistos desde diversos planetas.

1	Venus desde Mercurio	8	Mercurio desde Venus
2	La Tierra desde Venus	9	La Tierra desde Marte
3	La Tierra desde Mercurio	**10**	**Júpiter desde la Tierra**
4	**Venus desde la Tierra**	11	Júpiter desde Venus
5	Venus desde Marte	12	Júpiter desde Mercurio
6	Júpiter desde Marte	13	Saturno desde Júpiter
7	**Marte desde la Tierra**		

Hemos resaltado los números 4, 7 y 10, los planetas vistos desde la Tierra, porque, como su brillo nos es conocido, pueden servirnos como punto de comparación para apreciar la visibilidad de los astros en otros planetas.

La lista nos indica claramente, que nuestro propio planeta, la Tierra, ocupa en cuanto a brillo, uno de los primeros lugares en el cielo de los planetas más próximos al Sol; incluso en el cielo de Mercurio brilla con luz más viva que Venus y Júpiter para nosotros.

En la sección "*10. La magnitud estelar de los planetas en el cielo terrestre y en los cielos ajenos*" (Capítulo 4), volveremos a hablar con mayor precisión sobre la intensidad del brillo de la Tierra y demás planetas.

Finalmente, damos una serie de datos numéricos relativos al sistema solar, que pueden servir como información para el lector[80].

En las tablas siguientes se presentan datos sobre los planetas del sistema solar.

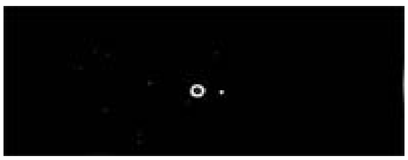
En la figura 72 se da una idea de cómo se ven los planetas con un telescopio no muy grande, de 100 aumentos. Para efectos de comparación, debajo se muestra la Luna tal cual se ve con un aumento similar (es necesario mantener el dibujo a la distancia de visión tridimensional, es decir, a 25 cm de los ojos).

	Sol	Luna
Diámetro km	1.390.600,00	3.473,0000
Volumen (Tierra = 1)	1.301.200,00	0,0203
Masa (Tierra = 1)	333.434,00	0,0123

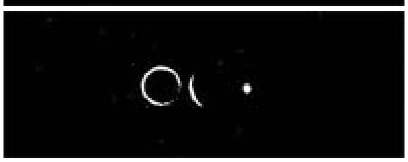
80 A quien desee completar sus conocimientos sobre el sistema solar, puedo recomendarle el detallado Curso de Astronomía General, del profesor S. N. Blazhko, Editorial Técnica del Estado, 1947

Densidad (agua = 1)	1,41	3,3400
Distancia media de la Tierra, km		384.400,0000

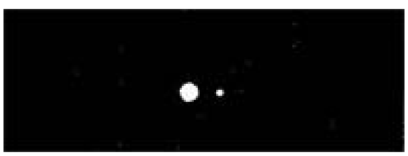
Arriba, se muestra Mercurio, con el aumento indicado, en su mayor y en su menor alejamiento de nosotros. Debajo de él, Venus, y después, Marte, el sistema de Júpiter y Saturno con sus satélites mayores. (Para detalles sobre las dimensiones aparentes de los planetas, ver mi obra Física recreativa, libro 2, capítulo IX.)



Mercurio en la posición más cercana (invisible) y en la más alejada

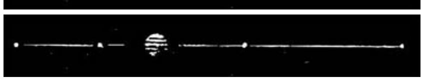


Venus en la posición más cercana (invisible), la mayor hoz visible y en la posición más alejada



Marte en la posición más cercana y en la más alejada

Júpiter con los 4 satélites mayores



Saturno con el satélite mayor

Figura 72. Cómo se ven la Luna y los planetas con un telescopio de 100 aumentos. El dibujo debe situarse a 25 cm de los ojos; los discos de los planetas y la Luna (página anterior), aparecerán entonces como se ven en un telescopio del aumento indicado

EL SISTEMA PLANETARIO EN CIFRAS

Dimensiones. Masa. Densidad. Satélites

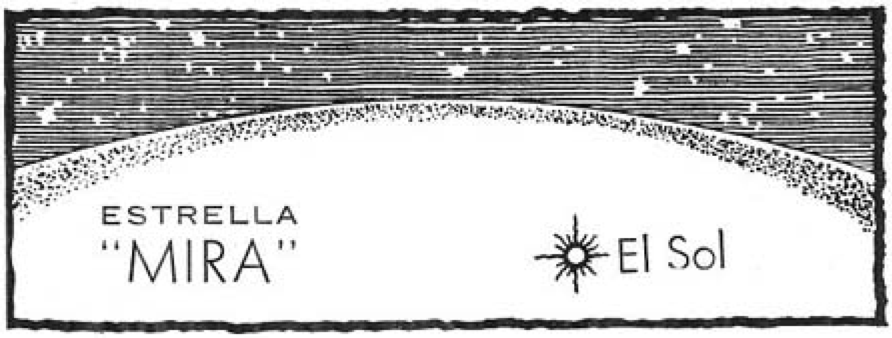
Nombre del planeta	*Diámetro medio*			*Volumen (Tierra = 1)*	*Masa (Tierra=1)*	*Densidad*		*No. de satélites*
	Para la vista, en segundos	*Verdadero*				*Tierra = 1*	*Agua = 1*	
		en km	*Tierra = 1*					
Mercurio	13 — 4.7	4700	0.37	0.05	0.054	1.00	5.5	—
Venus	64 — 10	12400	0.97	0.90	0.814	0.92	5.1	—
La Tierra	—	12757	1.00	1.00	1.000	1.00	5.52	1
Marte	25 — 3.5	6600	0.52	0.14	0.107	0.74	4.1	2
Júpiter	50 — 30.5	142000	11.2	1 295	318.4	0.24	1.35	12
Saturno	20.5 — 15	120000	9.5	745	95.2	0.13	0.71	9
Urano	4.2 — 3.4	51000	4.0	63	14.6	0.23	1.30	5
Neptuno	2.4 — 2.2	55000	4.3	78	17.3	0.22	1.20	2
Plutón	0.2 ?	5900	0.47	0.1	?	?	?	?

Distancia. Revolución. Rotación. Gravedad

(Continuación de la página anterior)

Nombre del planeta	*Distancia media*		*Excentricidad de la órbita*	*Duración de la revolución alrededor del Sol en años terrestres*	*Velocidad media orbital en km/s*	*Período de rotación alrededor del eje*	*Inclinación del ecuador respecto al plano de la órbita*	*Intensidad de la gravedad (Tierra=1)*
	en unidades astronómicas	*en millones de km*						
Mercurio	0.387	57.9	0.21	0.24	47.8	88 días	?	0.26
Venus	0.723	108.1	0.007	0.62	35	30 días?	?	0.90
La Tierra	1.000	149.5	0.017	1.00	29.76	23h 56mn	23° 27′	1.00
Marte	1.524	227.8	0.093	1.88	24	24h 37mn	25° 10′	0.37
Júpiter	5.203	777.8	0.048	11.86	13	9h 55mn	3° 1′	2.64
Saturno	9.539	1 426.1	0.056	29.46	9.6	10h 14mn	26° 45′	1.13
Urano	19.191	2 869.1	0.047	84.02	6.8	10h 48mn	98° 0′	0.84
Neptuno	30.071	4 495.7	0.009	164.8	5.4	15h 48mn	29° 36′	1.14
Plutón	39.458	5 899.1	0.25	247.7	4.7	?	?	?

Capítulo 4
Las estrellas



Contenido:

1. ¿Por qué las estrellas parecen "estrelladas"?

Mirando las estrellas a simple vista, las vemos rodeadas de rayos de luz. La causa de este aspecto radiante de las estrellas está en nuestros ojos, en la insuficiente transparencia del cristalino, que no tiene una estructura homogénea como un buen cristal, sino filamentosa.

He aquí lo que decía sobre esto Helmholtz[81] (en el tratado Los progresos de la teoría de la visión)

> *"Las imágenes de los puntos luminosos percibidas por los ojos presentan rayos irregulares.*
>
> *La causa de esto se encuentra en el cristalino, cuyas fibras están dispuestas radialmente en seis direcciones. Los rayos de luz que parecen salir de los puntos luminosos, por ejemplo, de las estrellas, de fuegos lejanos, no son más que una manifestación de la estructura radiada del cristalino. Una prueba de lo general que es esta deficiencia de los ojos consiste en que casi todo el mundo llama 'estrellada' a una figura radial".*

Hay un procedimiento para poner remedio a esta deficiencia de nuestro cristalino y ver las estrellas desprovistas de rayos sin tener que recurrir a la ayuda del telescopio. Este procedimiento fue indicado hace 400 años por Leonardo da Vinci.

> *"Mira, escribía él, las estrellas sin rayos luminosos. Esto se puede conseguir observándolas a través de una pequeña abertura hecha con la punta de una aguja fina y colocada lo más cerca posible del ojo. Verás las estrellas tan pequeñas, que ninguna otra cosa puede parecer menor."*

Esto no contradice lo dicho por Helmholtz sobre el origen de los "rayos de las estrellas". Por el contrario, la experiencia descrita confirma su teoría; mirando a través de una abertura muy pequeña, en el ojo solamente penetra un fino hacecillo luminoso que pasa a través de la parte central del cristalino y que por esto no sufre

81 Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821 - 1894). Médico y físico alemán. *(N. del E.)*

la influencia de su estructura radial[82].

Si nuestro ojo estuviera construido en forma más perfecta, no veríamos en el cielo "estrellas" sino puntos brillantes.

2. ¿Por qué las estrellas titilan y los planetas brillan serenos?

Distinguir a simple vista las estrellas fijas de las "errantes", es decir, de los planetas[83], es muy fácil, aún sin conocer el mapa del cielo. Los planetas brillan con luz serena; las estrellas titilan ininterrumpidamente como si se encendieran y oscilaran, cambian su brillo, y las estrellas que brillan a escasa altura sobre el horizonte también cambian incesantemente de color.

> *"Esta luz, dice Flammarion, ya brillante, ya débil, con fulgores intermitentes, ora blanca, ora verde, ora roja, como los chispeantes reflejos de un límpido diamante, anima la inmensidad del cielo y nos incita a ver las estrellas como ojos que miran hacia la Tierra."*

Particularmente brillantes y hermosas titilan las estrellas en las noches de invierno y en la época de primavera, y también, después de las lluvias, cuando el cielo se queda rápidamente sin nubes[84]. Las estrellas cercanas al horizonte titilan más que las que brillan en lo alto del cielo; las estrellas blancas titilan más que las amarillentas y las rojizas.

Como el aspecto radiante, el centelleo no es una propiedad inherente a las estrellas mismas; se origina en la atmósfera terrestre, a través de la cual deben pasar los rayos provenientes de las estrellas antes de alcanzar el globo del ojo. Si nos eleváramos por encima de la capa gaseosa variable, a través de la cual miramos el espacio, no observaríamos el centelleo de las estrellas: allá arriba brillan serenas, con luz fija.

La causa del centelleo es la misma que hace oscilar los objetos alejados cuando el Sol calienta fuertemente el suelo en el verano.

---

82 Al hablar de los "rayos de las estrellas" no consideramos el rayo que parece extenderse hasta nosotros desde una estrella cuando la miramos con los ojos entornados; este fenómeno se debe a la difracción de la luz en las pestañas.

83 El significado original de la palabra griega "planeta" es "errante".

84 En verano el centelleo intenso constituye una señal de la proximidad de la lluvia, e indica también la proximidad de un ciclón. Antes de la lluvia, las estrellas tienen más bien coloración azul; antes de un período de sequía, coloración verde. (Janevsky, Fenómenos luminosos en la atmósfera.)

La luz de las estrellas tiene que pasar entonces a través, no de un medio homogéneo, sino de capas gaseosas de diferentes temperaturas, de diferente densidad, que es lo mismo que decir, capas con distinto índice de refracción. Es como si en la atmósfera estuvieran esparcidos innumerables prismas ópticos, lentes convexas y cóncavas, que cambian incesantemente de posición. Los rayos de luz sufren innumerables desviaciones de la línea recta, ya concentrándose, ya dispersándose, lo cual da lugar a los cambios rápidos en el brillo de las estrellas. Y como la refracción se acompaña de la dispersión de los colores, junto con la fluctuación del brillo se observan también los cambios de color.

> *"Existen, escribe el astrónomo de Pulka, G. A. Tijov, después de estudiar el fenómeno del centelleo, procedimientos que permiten contar el número de cambios de coloración que en determinado tiempo se producen en las estrellas que titilan.*
>
> *Resulta que estos cambios son extraordinariamente rápidos, y que su número oscila en muchos casos desde algunas decenas hasta cien y más por segundo. Se puede verificar mediante un sencillo procedimiento. Tomen un binocular y miren a través de él una estrella brillante, dando al extremo del objetivo un rápido movimiento circular.*
>
> *Entonces, en lugar de una estrella, se ve un anillo formado por muchas estrellas separadas y de variados colores. Con un menor centelleo o con un movimiento muy rápido del binocular, el anillo estará formado por arcos de distintos colores, de longitudes grandes y pequeñas."*

Queda por explicar por qué los planetas, a diferencia de las estrellas, no titilan, sino que brillan serenos, con luz fija. Los planetas están mucho más cerca de nosotros que las estrellas; por eso no se les ve como puntos, sino como circulitos luminosos, como discos, aunque de medidas angulares tan pequeñas a consecuencia de su brillo deslumbrante, que estas dimensiones angulares son casi imperceptibles.

Cada punto separado de uno de esos circulitos titila; pero los cambios de brillo y de color de los puntos separados se realizan independientemente unos de otros, en distintos momentos, y así se compensan; la disminución del brillo de un punto coincide con el aumento del brillo de otro y, por lo tanto, la intensidad total de la luz del planeta no varía. De lo cual resulta el brillo constante, sin centelleo, de los planetas. Es como decir que no se ve titilar a los planetas porque titilan en muchos puntos a la vez, pero a distintos tiempos.

3. ¿Son visibles las estrellas durante el día?

Durante el día se encuentran sobre nuestras cabezas las mismas constelaciones que medio año atrás eran visibles de noche y que, seis meses más tarde, nuevamente embellecerán el cielo nocturno.

La atmósfera iluminada de la Tierra nos impide verlas, ya que las partículas de aire dispersan los rayos solares en mayor cantidad que la luz que nos envían las estrellas[85].

Un sencillo experimento puede hacernos ver claramente esta desaparición de las estrellas a la luz del día. En la pared lateral de un cajoncito de cartón se hacen agujeritos dispuestos en forma semejante a alguna constelación y se pega por fuera una hoja de papel blanco. El cajón se coloca en una pieza oscura y se ilumina interiormente. En la pared agujereada aparecen entonces nítidamente los agujeritos iluminados desde el interior, que son como las estrellas en el cielo nocturno. Pero, sin dejar de iluminar interiormente, basta encender en la pieza una lámpara suficientemente luminosa, para que las estrellas artificiales de la hoja de papel desaparezcan del todo, esto mismo viene a hacer la "luz del día" que apaga las estrellas.

A menudo se oye hablar de que, desde el fondo de una mina profunda, de un pozo, de una chimenea alta, etc., se pueden distinguir las estrellas durante el día. Esta versión tan extendida, apoyada en la autoridad de personas de renombre, hace poco tiempo fue sometida a comprobación, pero no resultó confirmada.

En realidad, ninguno de los autores que escribió sobre esto, desde Aristóteles en la antigüedad hasta John Herschel en el siglo XIX, observó las estrellas en estas condiciones. Todos confiaron en el testimonio de terceras personas. Sin embargo,

---

85 Observando el cielo desde una montaña alta, es decir, teniendo debajo la parte más densa y polvorienta de la atmósfera, las estrellas más brillantes se pueden ver también durante las horas del día. Así, desde la cumbre del Ararat (5 km de altura), se distinguen bien las estrellas de primera magnitud a las dos de la tarde; el cielo es allí azul oscuro. (De modo extraño, sin embargo, el capitán del estratóstato "Osoaviajim", encontrándose a una altura de 21 km, señaló que ninguna estrella era visible, aunque el cielo era allí "negro violáceo" según los apuntes de Fedoseenko y Vasenko.)

cuán poco se puede esperar del testimonio de estos testigos presenciales, lo indica el interesante ejemplo siguiente. En un diario americano apareció un artículo relativo a la visibilidad diurna de las estrellas desde el fondo de los pozos, a la que consideraba una fantasía. Esta opinión fue refutada enérgicamente en una carta de un granjero, que afirmaba que él mismo había visto de día a Capela y a Algol desde el fondo de un silo de 20 metros de altura. El estudio demostró, sin embargo, que en la época del año indicada, a la latitud en que se encontraba la granja del observador, ninguna de las dos estrellas mencionadas se halla en el cenit, y por consiguiente, ninguna de ellas se podía ver desde el fondo del silo.

Teóricamente carece de fundamento que un pozo o una mina puedan ayudar a ver las estrellas durante el día. Como ya hemos dicho, las estrellas no son visibles de día porque están inmersas en la luz del Sol. Esta condición no cambia para los ojos, en el fondo de un pozo. En él se elimina solamente la luz lateral; pero los rayos difundidos por las partículas de las capas de aire que están encima de la boca del pozo, impedirán como antes, la visibilidad de las estrellas.

Sin embargo, como las paredes del pozo protegen la vista contra los rayos brillantes del Sol, esto puede facilitar la observación de los relucientes planetas, pero no la de las estrellas.

Las estrellas son visibles de día con el telescopio, pero de ningún modo como algunos piensan, porque miran "desde el fondo del tubo", sino porque la refracción de los rayos en los lentes o su reflexión en los espejos, debilita mucho el brillo de la parte que se examina del cielo. Por el contrario, se aumenta el brillo de las estrellas, que se presentan en forma de puntos. En un telescopio con un objetivo de unos 7 cm de diámetro, se pueden ver de día, estrellas de primera y aun de segunda magnitud. Pero en un pozo, una mina o una chimenea no tiene aplicación lo dicho.

Otra cosa sucede con los planetas más brillantes: Venus, Júpiter y Marte en oposición. Éstos brillan mucho más que las estrellas, y por esta razón, en condiciones favorables, se pueden ser ver también en el cielo diurno (ver sobre esto la sección "Planetas a la luz del día")

4. ¿Qué es la magnitud estelar?

Hasta las personas más alejadas de la astronomía han oído hablar de estrellas de primera, de segunda y de otras magnitudes; es ése un concepto muy difundido.

Pero rara vez han oído hablar de estrellas más brillantes que las de primera magnitud, estrellas de magnitud cero, e incluso de magnitud negativa; hasta les parece incomprensible que entre las estrellas de magnitud negativa se encuentren los astros más brillantes del cielo y que nuestro Sol sea una estrella de "-27ªva magnitud".

Algunos verán en esto, quizás, incluso una tergiversación del concepto de número negativo.

Y, sin embargo, aquí tenemos precisamente un ejemplo muy claro de aplicación lógica de la teoría de los números negativos.

Detengámonos detalladamente en la clasificación de las estrellas de acuerdo a sus magnitudes. Quizás sea necesario recordar que con la palabra "magnitud", se entiende en este caso su brillo aparente, y no una medida geométrica de las estrellas. Ya en la antigüedad se distinguían en el cielo las estrellas más brillantes, las que se encendían en el cielo del atardecer antes que las demás, y señaladas como estrellas de primera magnitud. Tras ellas seguían las estrellas de segunda, de tercera, etc., hasta las estrellas de sexta magnitud, apenas perceptibles a simple vista. Esta clasificación subjetiva de las estrellas de acuerdo a su brillo, no satisfizo a los astrónomos de los tiempos modernos. Se establecieron bases más firmes para la clasificación de las estrellas según su brillo. Se basan en lo siguiente. Se halló que las estrellas más luminosas, por término medio, ya que no todas tienen igual brillo, son exactamente 100 veces más brillantes que las estrellas más débiles a simple vista.

Se confeccionó la escala de brillo de las estrellas, de modo que la relación entre el brillo de las estrellas de dos magnitudes inmediatas, sea constante. Llamando n a esta "relación entre las intensidades luminosas", tenemos:

1. Las estrellas de 2ª magnitud son n veces más débiles que las estrellas de 1ª magnitud.
2. Las estrellas de 3ª magnitud son n veces más débiles que las estrellas de 2ª magnitud.
3. Las estrellas de 4ª magnitud son n veces más débiles que las estrellas de 3ª magnitud, etc.

Si se compara el brillo de las estrellas de las demás magnitudes con el brillo de las estrellas de primera magnitud, tenemos:

1. Las estrellas de 3ª magnitud son n^2 más débiles que las estrellas de 1ª magnitud.
2. Las estrellas de 4ª magnitud son n^3 más débiles que las estrellas de 1ª magnitud.
3. Las estrellas de 5ª magnitud son n^4 más débiles que las estrellas de 1ª magnitud.
4. Las estrellas de 6ª magnitud son n^5 más débiles que las estrellas de 1ª magnitud.

De las observaciones resultó que $n^5 = 100$. Calcular ahora la magnitud de la relación entre las intensidades luminosas es fácil (con ayuda de los logaritmos):

$$n = \sqrt[5]{100} = 2{,}5$$

Así, las estrellas de cada magnitud estelar son 2½ veces más débiles que las estrellas de la magnitud estelar anterior[86].

5. Álgebra estelar

Consideremos un poco más en detalle, el grupo de estrellas más brillantes. Ya hemos señalado que el brillo de estas estrellas es diferente: unas brillan con intensidad varias veces mayor que el término medio, otras son de brillo más débil (el grado medio de su brillo es 100 veces mayor que el brillo de las estrellas apenas distinguibles a simple vista).

Hallemos la manera de indicar el brillo de las estrellas que son 2½ veces más brillantes que el término medio de las estrellas de primera magnitud. ¿Cuál es la cifra que antecede al 1? La cifra 0.

Esto quiere decir que a estas estrellas hay que considerarlas como estrellas de

---

86 Un valor más exacto de la relación entre las intensidades luminosas es 2,512.

magnitud “cero”. ¿Y dónde poner las estrellas que son más brillantes que las de primera magnitud, no 2½ veces, sino 1½ ó 2 veces? Su lugar está entre 1 y 0, es decir, que la magnitud estelar de un astro tal se expresa mediante un número fraccionario positivo; como, “estrella de magnitud 0,9”, “de magnitud 0,6”, etc. Estas estrellas son más brillantes que las de primera magnitud.

Ahora se hace clara también, la necesidad de introducir los números negativos, para indicar el brillo de las estrellas. Como hay estrellas que por la intensidad de su luz superan a las de magnitud cero, es evidente que su brillo debe ser expresado con números que están del otro lado del cero, es decir, con números negativos. De ahí que haya brillos definidos como “-1”, “-2”, “-1,6”, “-0,9”, etc.

En astronomía, la “magnitud” de las estrellas se determina con la ayuda de aparatos especiales, los fotómetros; el brillo de un astro se compara con el brillo de determinada estrella cuya luminosidad es conocida o con una “estrella artificial” del aparato.

La estrella más brillante de todo el cielo, Sirio, tiene una magnitud estelar de -1,6. La estrella Canopo (visible sólo en las latitudes del Sur) tiene una magnitud estelar de -0,9. La más brillante de las estrellas del hemisferio Norte, Vega, tiene una magnitud de 0,1; Capeta y Arturo, 0,2; Rigel, 0,3; Proción, 0,5; Altair, 0,9. (Téngase presente que las estrellas de magnitud 0,5 son más brillantes que las estrellas de magnitud 0,9, etc.)

Damos seguidamente una lista de las estrellas más brillantes del cielo, con el valor de sus magnitudes estelares (entre paréntesis se indican los nombres de las constelaciones a que pertenecen)

Sirio (del Can Mayor)	-1,6	Betelgeuse (α de Orión)	0,9
Canopo (de Argos)	-0,9	Altaír (α del Águila)	0,9
α del Centauro	0,1	Aldebarán (α del Tauro)	1,1
Vega (α de la Lira)	0,1	Pólux (β de Géminis)	1,1
Capela (α del Cochero)	0,2	Espiga (α de Virgo)	1,2
Arturo (α del Boyero)	0,2	Antares (α de Escorpión)	1,2
Rigel (β de Orión)	0,3	Fomalhaut (α del Pez Austral)	1,2

Proción (α del Can Mayor)	0,5	Deneb (α del Cisne)	1,3
Achernar (α de Erídano)	0,6	Régulo (α de Leo)	1,3
α del Centauro	0,9		

Examinando esta lista vemos que no hay ninguna estrella que sean exactamente de primera magnitud: de las estrellas de magnitud 0,9, la lista pasa a las estrellas de magnitud 1,1, 1,2, etc., saltando la magnitud 1,0 (primera). Por consiguiente, la estrella de primera magnitud no es más que un patrón convencional del brillo, pero no hay ninguna en el cielo.

No debe pensarse que la clasificación de las estrellas en magnitudes está determinada por las propiedades físicas de las estrellas mismas. La clasificación surge de las características de nuestra visión y es consecuencia de una ley común a todos los órganos de los sentidos, llamada "ley psicofísica" de Weber-Fechner[87]. Aplicada a la visión, esta ley dice que cuando la intensidad de un foco de luz cambia en progresión geométrica, la sensación de brillo cambia en progresión aritmética. (Es cosa curiosa que los físicos midan la intensidad de los sonidos y de los ruidos, siguiendo el mismo principio empleado para medir el brillo de las estrellas. El lector encontrará más detalles sobre este tema en mis libros (Física recreativa y Álgebra recreativa.)

Conociendo ya la escala astronómica de brillo de las estrellas, hagamos algunos cálculos útiles. Calculemos, por ejemplo, cuántas estrellas de tercera magnitud debemos juntar para que brillen como una de primera magnitud. Sabemos que las estrellas de tercera magnitud son más débiles que las de primera magnitud, 2,52, es decir, $2n = 2^2 = (2{,}52)^2$, o sea, 6,3 veces; esto nos dice que para igualar el brillo de una estrella de primera magnitud son suficientes 6,3 de tales estrellas. Para tener el brillo de una estrella de primera magnitud, es necesario tomar 15,8 de la cuarta magnitud, etc. Con cálculos similares[88] se hallaron los números que figuran en la tabla siguiente.

---

87 La ley de Weber-Fechner establece una relación cuantitativa entre la magnitud de un estimulo físico y cómo se percibe éste. Fue propuesta por Ernst Heinrich Weber (1.795-1.878), y elaborada en su forma actual por Gustav Theodor Fechner (1.801-1.887). *(N. del E.)*

88 Los cálculos resultan fáciles porque el logaritmo de la relación entre las intensidades luminosas es un número sencillo, log (2,52) = 0,4.

Para remplazar a una estrella de primera magnitud son necesarios los siguientes números de estrellas de otras magnitudes[89]:

De 2ª	2,5
De 3ª	6,3
De 4ª	16
De 5ª	40
De 6ª	100
De 7ª	250
De 10ª	4.000
De 11ª	10.000
De 16ª	1.000.000

Con la séptima magnitud entramos ya en el mundo de las estrellas que son imperceptibles a simple vista. Las estrellas de 16 ava magnitud sólo se distinguen con los telescopios más potentes; para que fuera posible verlas a simple vista, la sensibilidad del ojo debería aumentar 10.000 veces. Entonces las veríamos tal cual vemos ahora las estrellas de sexta magnitud.

En la tabla anterior no figuran, evidentemente, las estrellas que están "antes de las de primera" magnitud.

Llegamos el cálculo también para algunas de ellas. Las estrellas de magnitud 0,5 (Proción) son más brillantes que las de primera magnitud 2,5/0,5, es decir, una vez y media. Las estrellas de magnitud -0,9 (Canopo) son más brillantes que las de primera magnitud 2,51/9, o sea, 5,8 veces, y las estrellas de magnitud -1,6 (Sirio), 2,52/6, es decir, 10 veces.

Finalmente, es interesante este otro cálculo: ¿cuántas estrellas de primera magnitud serían necesarias para remplazar la luz de todo el cielo estrellado visible a simple vista?

Supongamos que en un hemisferio celeste hay 10 estrellas de primera magnitud. Se ha observado que el número de estrellas de una magnitud es aproximadamente tres

89 En general, una estrella de magnitud *M*, equivale a tener $(2,5)^{M-1}$ estrellas de primera magnitud, siempre que $M \geq 1$. Recíprocamente, equivale a tener $(2,5)^{1-M}$ estrellas de primera magnitud en los demás casos. *(N. del E.)*

veces mayor que el número de estrellas de la magnitud anterior, y que su brillo es 2,5 veces menor. Por lo tanto, el número de estrellas buscado es igual a la suma de los términos de la progresión[90]:

$$10 + \left(10 \cdot 3 \cdot \frac{1}{2{,}5}\right) + \left(10 \cdot 3^2 \cdot \frac{1}{2{,}5^2}\right) + \cdots + \left(10 \cdot 3^5 \cdot \frac{1}{2{,}5^5}\right)$$

Tenemos:

$$10\left[\frac{\left(\frac{3}{2{,}5}\right)^6 - 1}{\frac{3}{2{,}5} - 1}\right] \approx 100$$

Por lo tanto, el brillo total de todas las estrellas visibles a simple vista en un hemisferio es aproximadamente igual a cien estrellas de primera magnitud (o una estrella de magnitud - 4)[91].

Si se hace un cálculo similar, teniendo en cuenta no sólo las estrellas visibles a simple vista, sino todas las que son accesibles a los telescopios contemporáneos, resulta que su luz total es igual en intensidad al brillo de 1.100 estrellas de primera magnitud (o una estrella de magnitud -6,6).[92]

6. El ojo y el telescopio

Comparemos la observación de las estrellas, a través del telescopio, con la observación a simple vista.

Fijemos en 7 mm el diámetro de la pupila del ojo humano para observaciones

---

90 Si en una *proporción geométrica*, el primer término es ***a*** y la razón es ***r***, entonces la suma ***S***, de sus ***n*** primeros términos, será:

$$S = a\left(\frac{r^{n+1} - 1}{r - 1}\right)$$

(N. del E.)

91 El número *n* de veces que una estrella de magnitud *M* es más brillante que *una estrella de primera magnitud* es $n = (2{,}5)^{1 - M}$, de donde: Por lo tanto, *M* = 1 - log(*n*) / log(2,5), o sea que: *M* = 1 - 2,5 log(*n*). Así que, la luz del cielo estrellado, cuyo brillo equivale a 100 estrellas de primera magnitud, equivale a una estrella de magnitud: *M* = 1 - 2,5 log(100) = - 4 *(N. del E.)*

92 Empleando la fórmula antes indicada, hacemos el cálculo para la luz del cielo estrellado, cuyo brillo equivale a 1100 estrellas de primera magnitud; en este caso dicho brillo equivale a una estrella de magnitud: ***M* =** 1 **-** 2,5 log(1.100) = - 6,6 *(N. del E.)*

nocturnas, como término medio. Un telescopio con un objetivo de 5 cm de diámetro, deja pasar más rayos que la pupila

$$(50/7)^2$$

veces, es decir, aproximadamente, 50 veces más, y con un diámetro de 50 cm, 5.000 veces más. He ahí las veces que el telescopio aumenta el brillo de las estrellas observadas a través de él.

(Lo dicho se refiere solamente a las estrellas y no a los planetas, que tienen un disco visible.

Además de esto, para el cálculo del brillo de los planetas se debe tener en cuenta el aumento óptico del telescopio.

Sabiendo esto, puedes calcular cuál debe ser el diámetro del objetivo de un telescopio para ver a través de él las estrellas de determinada magnitud; pero para esto es necesario saber hasta qué magnitud son visibles las estrellas en un telescopio con un objetivo de diámetro conocido. Supongamos, por ejemplo, que en un telescopio con abertura de 64 cm de diámetro se pueden distinguir estrellas hasta de 15ª magnitud inclusive. ¿Qué objetivo se requiere para ver estrellas de la magnitud siguiente, es decir, de 16ª magnitud?

Establezcamos la proporción

$$\frac{x^2}{64\quad 2} = 2{,}5$$

donde x es el diámetro buscado del objetivo. Tenemos:

$$x = 64\sqrt{2{,}5} = 100 \text{ cm}$$

Se necesita un telescopio con un objetivo de un metro de diámetro. Generalizando, para aumentar la visibilidad del telescopio en una magnitud estelar, es necesario multiplicar el diámetro de su objetivo por √2,5, es decir, aumentarlo 1,6 veces.

7. Las magnitudes estelares del Sol y de la Luna

Prosigamos nuestra excursión algebraica por el cielo. La escala que se utiliza para apreciar el brillo de las estrellas puede ser usada también para otros astros: los planetas, el Sol y la Luna. Más adelante hablaremos del brillo de los planetas; ahora nos referiremos a las magnitudes estelares del Sol y de la Luna. La magnitud estelar del Sol se expresa con el número -26,8, y la de la Luna llena[93], con el número -12,6. Por lo dicho anteriormente, el lector sin duda comprende por qué ambos números son negativos. Pero puede ser que quedes perplejo ante una diferencia que no parece ser muy grande entre las magnitudes estelares del Sol y de la Luna. La primera parece ser sólo dos veces mayor que la segunda.

No olvidemos, sin embargo, que el valor de la magnitud estelar es en realidad un logaritmo (de base 2,5). Y como para comparar dos números no podemos dividir sus logaritmos entre sí, no tiene sentido que dividamos la magnitud de una estrella entre la magnitud de otra cuando queremos comparar su brillo. El siguiente cálculo muestra el resultado de una comparación correcta.

La magnitud estelar del Sol es de -26,8. Esto quiere decir que el Sol es más brillante que una estrella de primera magnitud

2,527,8 veces

La Luna misma es más brillante que una estrella de primera magnitud

2,513,6 veces

O sea, que el brillo del Sol es mayor que el brillo de la Luna llena

$$\frac{2{,}5^{27{,}8}}{2{,}5^{13{,}6}} \approx 2{,}5^{14{,}2}\ veces$$

Calculada esta potencia (con ayuda de la tabla de logaritmos) resulta 447.000. Ésta es, por consiguiente, la relación exacta entre los brillos del Sol y de la Luna: el astro

93 En el primero y en el último cuartos de la Luna, su magnitud estelar es igual a -9.

diurno, en un día claro, ilumina a la Tierra 447.000 veces más intensamente que la Luna llena en una noche sin nubes.

Admitiendo que la cantidad de calor desprendido por la Luna es proporcional a la cantidad de luz que emite (lo cual, sin duda, se aproxima a la realidad), hay que suponer que la Luna nos envía también una cantidad de calor 447.000 veces menor que el Sol. Es sabido que cada centímetro cuadrado, en el límite de la atmósfera terrestre, recibe del Sol cerca de 2 calorías pequeñas[94] por minuto. De donde resulta que la Luna irradia sobre 1 cm^2 de la Tierra, en cada minuto, menos de 1/225.000 de caloría pequeña (es decir, que puede calentar 1 gramo de agua en 1 minuto a 1/225.000 °C). Esto nos dice claramente que los intentos por atribuir a la luz de la Luna, influencia en el clima de la Tierra, carecen de fundamento[95].

La opinión bastante generalizada de que las nubes se esfuman frecuentemente bajo la acción de los rayos de la Luna llena, es un error craso que se explica, porque solo se pueden observar a la luz de la Luna, las nubes que desaparecen durante la noche (fenómeno originado realmente por otras causas).

Dejemos la Luna y calculemos cuántas veces brilla más el Sol que Sirio, la más brillante de las estrellas de todo el cielo. Razonando como antes, tenemos la relación de sus brillos

$$\frac{2{,}5^{27{,}8}}{2{,}5^{2{,}6}} = 10.000.000.000$$

es decir, que el Sol es diez mil millones de veces más brillante que Sirio.

Es muy interesante también el cálculo siguiente: ¿cuántas veces es más brillante la iluminación proveniente de la Luna llena que la iluminación de todo el cielo estrellado, es decir, de todas las estrellas visibles a simple vista en un hemisferio celeste? Ya hemos calculado que las estrellas de primera a sexta magnitud inclusive, brillan juntas como un centenar de estrellas de primera magnitud. Por consiguiente, el problema se reduce a calcular cuántas veces es más brillante la Luna que cien

---

94 *Caloría pequeña* o *caloría-gramo*, que es la energía calorífica necesaria para incrementar un grado centígrado la temperatura de un gramo de agua. Esta definición corresponde a la caloría propiamente dicha y equivale a 4,1868 julios. *(N. del E.)*

95 El problema de si puede o no influir la Luna en el clima con su fuerza gravitacional será examinado al final del libro (ver “La Luna y el clima”).

estrellas de primera magnitud.

Esta relación es igual a

$$\frac{2{,}5^{13{,}6}}{100} = 2.700$$

Así, pues, en una noche clara sin Luna, recibimos de las estrellas del cielo sólo 1/2.700 de la luz que nos envía la Luna llena, y 1/(2.700 x 447.000) es decir, 1.200 millones de veces menos de la que nos llega del Sol un día sin nubes.

Agreguemos también que la magnitud estelar de una bujía normal internacional a la distancia de 1 m es igual a -14,2; de donde resulta que a la distancia indicada, la bujía ilumina con más brillo que la Luna llena

$$\frac{2{,}5^{14{,}2}}{2{,}5^{12{,}6}} = 4$$

O sea, cuatro veces.

También es interesante anotar, que un proyector de un faro, con una potencia de 2 mil millones de bujías, será visible a la distancia de la Luna, como una estrella de magnitud 4,5, es decir, que se podrá distinguir a simple vista.

8. El brillo verdadero de las estrellas y del Sol

Todos los análisis del brillo, que hemos hecho hasta ahora, se refieren sólo al brillo aparente.

Los números dados expresan el brillo de los astros a las distancias a la que se encuentran realmente. Pero sabemos que las estrellas se hallan a diferentes distancias de la Tierra; el brillo aparente de las estrellas no nos permite juzgar su brillo verdadero, ni su alejamiento de nosotros; hasta tanto no hayamos deslindado bien ambos factores. Entretanto, es importante saber cuál es el brillo comparativo, o mejor, la “luminosidad” de las distintas estrellas, si todas se encuentran a igual distancia de nosotros.

Los astrónomos introducen el concepto de magnitud estelar “absoluta” de las estrellas, para dar solución al problema así planteado. La magnitud estelar absoluta de una estrella, es la que tendría dicha estrella, si se encontrara á 10 "pársecs" de nosotros. El "pársec" es una medida especial de longitud que se emplea para expresar las distancias estelares[96].

Sobre su origen hablaremos más adelante. Ahora diremos solamente que un pársec es igual, aproximadamente, a 30.800.000.000.000 km. El cálculo de la magnitud estelar absoluta no es difícil de realizar si se conoce la distancia de las estrellas y se tiene en cuenta que el brillo disminuye proporcionalmente al cuadrado de la distancia[97].

Ilustraremos los cálculos con dos ejemplos: el de Sirio y el de nuestro Sol.

La magnitud absoluta de Sirio es +1,3 y la del Sol es +4,8. Es decir que, desde una distancia de 30.800.000.000.000 km, Sirio brillará para nosotros como una estrella de magnitud 1,3, y nuestro Sol como una estrella de magnitud 4,8, o sea, más débil que Sirio

$$\frac{2{,}5^{4,8}}{2{,}5^{1,3}} = 2{,}5^{3,5} = 25\ veces$$

aunque el brillo aparente del Sol es 10.000.000.000 de veces mayor que el de Sirio.

Acabamos de ver que el Sol no es, ni remotamente, la más brillante de las estrellas del cielo.

Sin embargo, no debemos considerar a nuestro Sol, como un pigmeo entre las estrellas que lo rodean: su luminosidad es superior a la media. Según la fórmula:

$$2{,}5^{M} = 2{,}5^{m}\left(\frac{p}{0{,}1}\right)^{2}$$

---

96 Pársec o pársec. Unidad de longitud utilizada en astronomía. Pársec significa "paralaje de un segundo de arco" (parallax of one arc second).

Una estrella dista un pársec si su paralaje es igual a 1 segundo de arco.

1 pársec = 206.265 ua = 3,2616 años luz = 3,0857 × 1016 m

97 El cálculo se puede hacer por la fórmula mostrada en el texto, cuyo fundamento comprenderá claramente el lector, más adelante, cuando conozca mejor lo que es el "pársec" y lo que es el "paralaje".

donde M es la magnitud estelar absoluta de la estrella m su magnitud aparente y 2p el paralaje de la estrella en segundos. Podemos efectuar las transformaciones siguientes:

$$2{,}5^{M} = 2{,}5^{m} \cdot 100p^{2}$$

$$M \cdot \log(2{,}5) = \ m \cdot \log(2{,}5) + \log(100) + 2\log\,(p)$$

$$M \cdot \log(2{,}5) = \ m \cdot \log(2{,}5) + 2 + 2\log\,(p)$$

0,4 M = 0,4m+ 2+ 2·$log(p)$

De donde:

$$M = m + 5 + 5 \cdot log(p)$$

Para Sirio, por ejemplo, m = -1,6, p = 0,38”. Su magnitud absoluta es,

$$M = -1{,}6 + 5 + 5\ log\ (0{,}38) = 1{,}3$$

Según los datos de la estadística estelar, la luminosidad media de las estrellas que rodean al Sol, a una distancia de 10 pársecs, es igual a la luminosidad de una estrella de novena magnitud absoluta. Como la magnitud absoluta del Sol es igual a 4,8, éste es más brillante que el promedio de las estrellas “vecinas”[98]:

$$\frac{2{,}5^{8}}{2{,}5^{4{,}8}} = 2{,}5^{3{,}2} = 20\ veces$$

Siendo en valor absoluto, 25 veces menos brillante que Sirio, el Sol, sin embargo, es 20 veces más brillante que el brillo medio de las estrellas que lo rodean.

---

98 A 10 parsecs las estrellas que rodean al Sol presentan la luminosidad de una estrella de 9ª magnitud absoluta, es decir: $(2{,}5)^{9-1} = (2{,}5)^{8}$ *(N. del E.)*

9. La más brillante de las estrellas conocidas

La mayor luminosidad conocida es la de una estrellita de octava magnitud, imperceptible a simple vista, en la constelación de la Dorada, designada con la letra S. La constelación de la Dorada se encuentra en el hemisferio Sur del cielo, y no es visible en las zonas templadas del hemisferio Norte. La estrellita mencionada, forma parte de un sistema estelar vecino de la Tierra, la Pequeña Nube de Magallanes, cuya distancia a nosotros es, aproximadamente, 12.000 veces mayor que la distancia de Sirio. A esa distancia, dicha estrella tiene que poseer un brillo excepcional para parecer de octava magnitud. Si Sirio, se situara a esa misma distancia, brillaría como una estrella de 17ª magnitud, es decir, que apenas sería visible con el más potente de los telescopios.

¿Cuál es la luminosidad de tan notable estrella? El cálculo da este resultado: - 1/8 de magnitud. Esto quiere decir que nuestra estrella es en valor absoluto ¡unas 400.000 veces más brillante que el Sol! Con brillo tan excepcional, si esta estuviera a la distancia de Sirio, parecería nueve magnitudes más brillante que éste, o sea que tendría aproximadamente el brillo de la Luna en cuarto creciente. Una estrella que a la distancia de Sirio derramaría sobre la Tierra una luz tan brillante, sin duda alguna se puede considerar como la más brillante de las estrellas conocidas.

10. La magnitud estelar de los planetas en el cielo terrestre y en los cielos ajenos

Volvamos ahora al viaje imaginario a otros planetas (expuesto en la sección "*14. Los cielos ajenos*", del Capítulo 3) y calculemos con mayor precisión el brillo de los astros que alumbran en ellos. Ante todo, indiquemos la magnitud estelar de los planetas, cuando estos lucen con su máximo brillo en el cielo de la Tierra. He aquí la tabla:

<u>En el cielo Terrestre</u>	
Venus	-4,3
Marte	-2,8
Júpiter	-2,5

Mercurio	-1,2
Saturno	-0,4
Urano	+5,7
Neptuno	+7,6

Examinando esta tabla, vemos que Venus es más brillante que Júpiter casi dos magnitudes estelares, es decir, 2,52 = 6,25 veces; más que Sirio, 2,52,7 = 13 veces (el brillo de Sirio es de magnitud -1,6).

En el cielo de Marte

El Sol	-26,0
Fobos	-8,0
Deimos	-3,7
Venus	-3,2
Júpiter	-2,8
La Tierra	-2,6
Mercurio	-0,8
Saturno	-0,6

En el cielo de Venus

El Sol	-27,5
La Tierra	-6,6
Mercurio	-2,7
Júpiter	-2,4
La Luna	-2,4
Saturno	-0,3

En el cielo de Júpiter

El Sol	-23,0
Satélite I	- 7,7
Satélite II	- 6,4
Satélite III	- 5,4

Satélite IV	3,3
Satélite V	- 2,8
Saturno	-2,0
Venus	- 0,3

De esta tabla resulta también que el pálido planeta Saturno es aún más brillante que todas las estrellas fijas, con excepción de Sirio y de Canopo. Aquí encontramos una explicación del hecho de que los planetas (Venus, Júpiter) son a veces visibles de día a simple vista, cosa imposible para las estrellas.

Damos igualmente tablas del brillo de los astros en los cielos de Venus, de Marte y de Júpiter, sin nuevas aclaraciones, puesto que ellas constituyen solamente una expresión cuantitativa de lo que ya hemos dicho en la sección "14. Los cielos ajenos", en el Capítulo 3.

Al evaluar el brillo de los planetas en el cielo de sus propios satélites, debe ubicarse, en primer lugar, a Marte "lleno" en el cielo de Fobos (-22,5); después, a Júpiter "lleno" en el cielo del satélite V (-21), y a Saturno "lleno" en el cielo de su satélite Mimas (-20). En este satélite, Saturno es ¡sólo cinco veces menos brillante que el Sol!

Por último, es interesante la siguiente tabla del brillo de los planetas observados unos desde otros, en la que aparecen dispuestos por orden decreciente de brillo.

Magnitud estelar

Venus desde Mercurio	-7,7	Mercurio desde Venus	- 2,7
La Tierra desde Venus	-6.6	La Tierra desde Marte	-2,6
La Tierra desde Mercurio	-5,0	Júpiter desde la Tierra	-2,5
Venus desde la Tierra	-4,3	Júpiter desde Venus	-2,4
Venus desde Marte	- 3,2	Júpiter desde Mercurio	-2,2
Júpiter desde Marte	-2,8	Saturno desde Júpiter	- 2,0
Marte desde la Tierra	-2,8		

La tabla indica que en el cielo de los planetas mayores, los astros más brillantes son: Venus observado desde Mercurio, la Tierra vista desde Venus y la Tierra vista desde Mercurio.

11. ¿Por qué el telescopio no agranda las estrellas?

A las personas que por primera vez dirigen un catalejo a las estrellas fijas, les llama la atención que el tubo, que aumenta notablemente la Luna y los planetas, en nada aumenta las dimensiones de las estrellas, y que incluso las disminuye, convirtiéndolas en un punto brillante que no forma disco. Esto lo notó ya Galileo, que fue el primer hombre que observó el cielo con un telescopio. Describiendo las primeras observaciones realizadas con el anteojo de su invención, dice:

> *"Es digno de ser señalado que la observación con el telescopio resulta distinta para los planetas y para las estrellas fijas. Los planetas aparecen como circulitos claramente dibujados, como pequeñas lunas. Las estrellas fijas no tienen contornos perceptibles. El telescopio aumenta solamente su brillo, de modo que las estrellas de 5ª y 6ª magnitud se hacen por el brillo, iguales a Sirio, que es la más brillante de las estrellas fijas."*

Para explicar esta limitación del telescopio, referente a las estrellas, es necesario recordar algo de la fisiología y de la física de la visión. Cuando seguimos con la vista a un hombre que se aleja de nosotros, su imagen en nuestra retina, se hace cada vez más pequeña. A cierta distancia, la cabeza y las piernas del hombre se aproximan tanto en la retina, que no caen ya en distintos elementos (terminaciones nerviosas), sino en uno solo, y entonces la figura del hombre nos parece un punto desprovisto de forma.

A la mayoría de las personas les sucede esto cuando el ángulo según el cual observan el objeto disminuye hasta 1'. La finalidad del telescopio es agrandar el ángulo con el que el ojo ve el objeto o, lo que es lo mismo, llevar la imagen de cada detalle del objeto, a algunos elementos próximos de la retina.

De un telescopio se dice que "aumenta 100 veces" si el ángulo según el cual vemos un objeto con dicho telescopio, es 100 veces mayor que el ángulo con que lo vemos a la misma distancia, a simple vista.

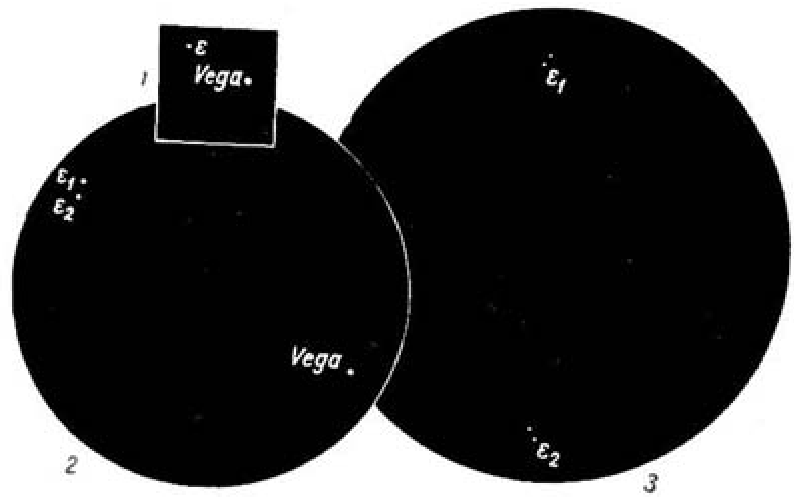


Figura 73. La misma estrella ε de la Lira (que se halla cerca de Vega), vista a simple vista (1), con el catalejo (2) y con el telescopio (3)

Si aún con este aumento, aparece un detalle con un ángulo menor de 1′, el telescopio es inadecuado para la observación de ese detalle.

Resulta fácil calcular, que el más pequeño detalle que podemos distinguir a la distancia de la Luna, con un telescopio que aumenta 1000 veces, tiene un diámetro de 110 m, y a la distancia del Sol, un diámetro de 40 km. Pero efectuamos el mismo cálculo para la estrella más próxima, tendremos una magnitud enorme: 12.000.000 km.

El diámetro del Sol es 8½ veces menor que esta magnitud. De esto resulta que, si trasladáramos el Sol a la distancia de las estrellas más próximas, aparecería como un punto, incluso con un telescopio de 1.000 aumentos. La estrella más próxima deberá tener un volumen 600 veces mayor que el Sol, para que los telescopios potentes puedan mostrar su disco. A la distancia de Sirio, una estrella deberá ser 5.000 veces mayor que el Sol, en volumen. Como la mayoría de las estrellas se hallan mucho más allá de las distancias mencionadas y sus dimensiones no superan por término medio en dicho grado a las del Sol, esas estrellas, aun con los telescopios más potentes, tienen que verse como puntos.

> *"En el cielo -escribe Jeans- ninguna estrella tiene una medida angular mayor que una cabecita de alfiler a la distancia de 10 km, y no hay telescopio con el que un objeto de medidas tan pequeñas se pueda ver como un disco."*

Por el contrario, los grandes cuerpos celestes que forman parte de nuestro sistema solar, observados con el telescopio, muestran un disco tanto mayor cuanto mayor es el aumento.

Pero como ya tuvimos ocasión de señalar, el astrónomo se encuentra con otro inconveniente: a la vez que aumenta la imagen se debilita su brillo (a consecuencia de la distribución de los haces de luz en una superficie mayor), y al disminuir el brillo, resulta más difícil distinguir los detalles. Por esto, para observar los planetas, y particularmente, los cometas, es conveniente utilizar telescopios de mediano aumento.

El lector quizá se haga esta pregunta: si el telescopio no agranda las estrellas, ¿por qué lo utilizan para observarlas?

Después de lo antedicho, solo resta detenerse en la respuesta. El telescopio es incapaz de aumentar las dimensiones aparentes de las estrellas, pero aumenta su brillo y, por consiguiente, multiplica el número de estrellas accesibles a la vista.

En segundo lugar, gracias al telescopio se consigue mejorar la resolución de las estrellas que aparecen a simple vista como una sola. El telescopio no puede aumentar el diámetro aparente de las estrellas, pero aumenta la distancia aparente entre ellas; y así, el telescopio nos permite descubrir estrellas dobles, triples y aun estrellas más complejas, allí donde a simple vista vemos una sola (figura 73). Los enjambres de estrellas que a simple vista se pierden en la lejanía como manchas brumosas, y en la mayoría de los casos son totalmente invisibles, en el campo del telescopio se resuelven en muchos miles de estrellas separadas.

Finalmente, el tercer servicio que presta el telescopio para estudiar el mundo de las estrellas, es que da la posibilidad de medir los ángulos con extraordinaria precisión; en las fotografías obtenidas con los grandes telescopios contemporáneos, los astrónomos miden ángulos de 0,01” de magnitud. Con tales ángulos se puede ver un kopek que esté a una distancia de 300 km y un cabello humano a la distancia de 100 m(!).

12. ¿Cómo se midieron los diámetros de las estrellas?

En los más potentes telescopios, como hemos explicado, es imposible ver el diámetro de las estrellas fijas. Hasta hace poco tiempo, todas las consideraciones sobre las dimensiones de las estrellas eran simples conjeturas. Se suponía que cada estrella tenía, por término medio, la magnitud de nuestro Sol, pero nada confirmaba esta suposición. Y como son imprescindibles los telescopios más potentes de nuestra época para distinguir los diámetros de las estrellas, parecía imposible determinar los diámetros verdaderos de dichas estrellas.

Esta era la situación que se tenía en 1920, año en que nuevos métodos e instrumentos de investigación abrieron a los astrónomos el camino para tomar las verdaderas dimensiones de las estrellas.

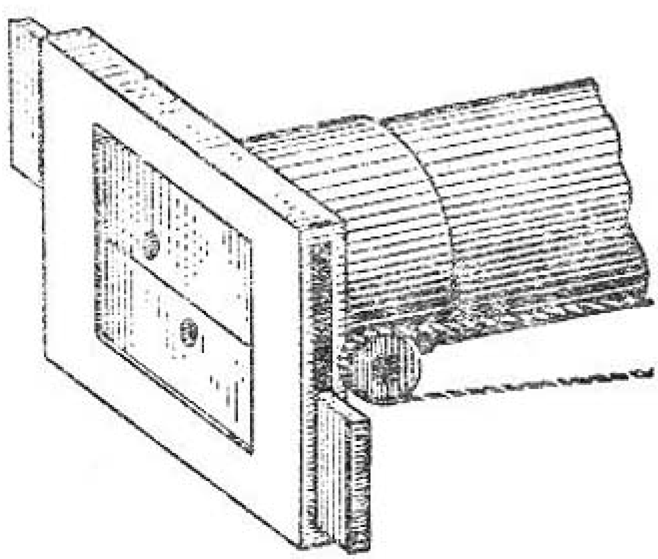


Figura 74. Esquema del mecanismo del "interferómetro para la medida de los diámetros angulares de las estrellas (Explicación en el texto)

Con esta reciente adquisición de la astronomía está vinculada su fiel compañera, la física, que tantas veces le ha prestado los más valiosos servicios.

Expondremos seguidamente los fundamentos de este método, basado en el fenómeno de la interferencia de la luz.

Para aclarar el principio en que se basa este método de medida, realicemos un experimento que requiere el empleo de algunos instrumentos: un pequeño telescopio de 30 aumentos y una fuente luminosa brillante, frente a una pantalla con una estrecha ranura vertical (de unas décimas de mm). Coloquemos el telescopio a una distancia de 10 á 15 m de la fuente de luz. Cubramos el objetivo con una tapa opaca que lleve dos orificios circulares de unos 3 mm de diámetro dispuestos horizontalmente, de manera simétrica, con relación al centro del objetivo, separados 15 mm uno del otro (figura 74).

Si observamos a través del telescopio, sin la tapa, la mencionada ranura forma en el telescopio una franja estrecha, con rayas mucho más tenues a los lados. Si observamos nuevamente a través del telescopio, colocando previamente la tapa, la franja central brillante presenta franjas oscuras verticales. Estas franjas aparecen como consecuencia de la interferencia de los dos hacecillos luminosos que pasan a través de los orificios de la tapa del objetivo. Si se tapa uno de los orificios, estas franjas desaparecen: Si los orificios del objetivo se hacen móviles, de modo que se pueda variar la distancia entre ellos, entonces, a medida que se separan, las franjas oscuras se vuelven cada vez menos claras y finalmente desaparecen. Conociendo la distancia que hay entre los orificios en este momento, se puede determinar la anchura angular de la ranura, es decir, el ángulo con que el observador ve el ancho de la ranura. Si se conoce la distancia hasta la ranura, se puede calcular su ancho real. Si en lugar de la ranura tenemos un orificio pequeño, para determinar el ancho de esta "ranura circular" (es decir, el diámetro del circulito) se efectúa el mismo procedimiento, pero debe multiplicarse el ángulo obtenido, por 1,22.

Para medir los diámetros de las estrellas, procedemos de igual manera, pero debido a la enorme pequeñez del diámetro angular de las estrellas, se deben utilizar telescopios muy potentes.

Además del método que acabamos de describir, basado en el "interferómetro", hay otro procedimiento menos directo para la determinación del diámetro verdadero de las estrellas, basado en el estudio de sus espectros.

Por el espectro de una estrella, los astrónomos conocen su temperatura, y con ella se puede calcular el valor de la irradiación por cada cm2 de superficie. Si, además de esto, se conoce la distancia de la estrella y su brillo aparente, se puede determinar la magnitud de la irradiación de toda su superficie. La relación entre esta irradiación y la primera, da la medida de la superficie de la estrella, o lo que viene a ser lo mismo, de su diámetro. Por este método se encontró, por ejemplo, que el diámetro de Capeta es 16 veces mayor que el del Sol, el de Betelgeuse 350 veces, el de Sirio, 2 veces y el de Vega 2½ veces. El diámetro del satélite de Sirio es igual a 0,02 del diámetro del Sol.

13. Los gigantes del mundo estelar

La determinación de los diámetros de las estrellas, arrojó resultados verdaderamente extraordinarios.

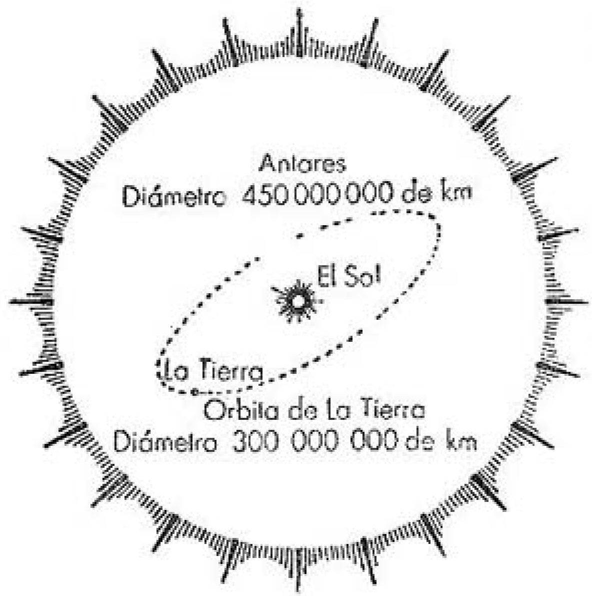


Figura 75. La estrella gigante Antares (α del Escorpión) podría encerrar a nuestro Sol con la órbita de la Tierra

Los astrónomos no sospechaban antes, que en el espacio pudiera haber estrellas de tan gigantesco tamaño. La primera estrella de la que de determinaron sus verdaderas dimensiones, en 1920, fue la brillante estrella α de Orión, que lleva el nombre arábigo de Betelgeuse. Su diámetro resultó ser mayor que el de la órbita de Marte (!). Otro gigante es Antares, la estrella más brillante de la constelación del Escorpión: su diámetro es aproximadamente una vez y media mayor que el diámetro de la órbita de la Tierra (figura 75). Entre las estrellas gigantes descubiertas hasta ahora se puede colocar también a la maravillosa Mira, estrella de la constelación de la Ballena, cuyo diámetro es 400 veces mayor que el de nuestro Sol.

Detengámonos un poco en la estructura física de estos gigantes. El cálculo muestra que estas estrellas, a pesar de sus colosales dimensiones, contienen poca cantidad de materia. Son pocas veces más pesadas que nuestro Sol, y dado que su volumen, Betelgeuse por ejemplo, es 40.000.000 veces mayor que el del Sol, la densidad de esta estrella tiene que ser insignificante. Y si la materia del Sol tiene como promedio una densidad igual a la del agua, la densidad de la materia de las estrellas gigantes, viene a ser, proporcionalmente, la del aire enrarecido. Estas estrellas, de acuerdo con la expresión de los astrónomos, "recuerdan a esos gigantescos aeróstatos extraordinariamente ligeros, de densidad mucho menor que la del aire".

14. Un cálculo sorprendente

Es interesante examinar, en relación con lo anterior, cuánto espacio ocuparían en el cielo todas las estrellas, si se juntaran sus imágenes aparentes.

Ya sabernos que el brillo conjunto de todas las estrellas observables a través del telescopio, es igual al brillo de una estrella de magnitud -6,6. Una estrella como ésta brilla 20 magnitudes estelares más débilmente que nuestro Sol, es decir, 100.000.000 de veces menos que él. Si se considera al Sol como una estrella media, de acuerdo a la temperatura de su superficie, se puede decir que la superficie aparente de nuestra estrella imaginaria, es menor que la superficie aparente del Sol el número de veces antes indicado. Y como los diámetros de los círculos son proporcionales a las raíces cuadradas de sus superficies, el diámetro aparente de nuestra estrella debe ser 10.000 veces menor que el diámetro aparente del Sol, es decir, debe ser de

$$30':10.000 \approx 0,2''$$

El resultado es sorprendente: la superficie aparente total de todas las estrellas ocuparía en el cielo la extensión de un circulito con un diámetro angular de 0,2". El cielo contiene 41.253 grados cuadrados[99]; por esto resulta fácil calcular que las estrellas visibles a través de un telescopio cubren solamente la

$$1/20.000.000.000$$

99 El grado cuadrado es una unidad de medida de los ángulos sólidos.
Superficie esférica = 4 π radianes^2 = 4 $\times$ π (180 / π)^2 = 4 $\times$ (180)^2 / π = 41.253 grados cuadrados. *(N. del E.)*

parte de todo el cielo (!).

15. La materia más pesada

Entre las curiosidades que encierra el espacio en sus profundidades, seguramente figurará siempre en lugar destacado, una diminuta estrella cercana a Sirio. Esta estrella está constituida por una materia ¡60.000 veces más pesada que el agua!

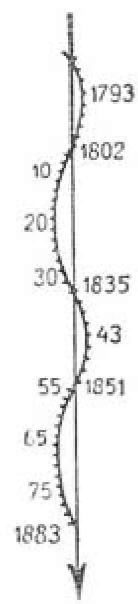


Figura 76. La trayectoria de Sirio entre las estrellas, desde 1793 hasta 1883

Cuando cogemos con la mano un vaso de mercurio, nos sorprende su peso, cercano a los 3 kg. Pero ¿qué diríamos de un vaso de materia que pesara 12 toneladas, y que exigiera para su transporte, una plataforma de ferrocarril? Esto parece absurdo y, sin embargo, es uno de los descubrimientos de la astronomía contemporánea.

Este descubrimiento tiene una larga historia, muy instructiva. Desde hace mucho tiempo se ha observado que el brillante Sirio no realiza su movimiento entre las estrellas en línea recta, como la mayoría de las demás estrellas, sino que sigue una extraña trayectoria sinuosa (figura 76). Para aclarar este movimiento singular, el famoso astrónomo Bessel supuso que Sirio iba acompañado de un satélite cuya atracción altera su movimiento. Esto ocurrió en 1844, dos años después de que fuera descubierto Neptuno en la "punta de la flecha" en 1862, figura 76, después de la muerte de Bessel; su hipótesis recibió plena confirmación, pues el supuesto satélite de Sirio fue visto con el telescopio.

El satélite de Sirio, el llamado Sirio B, da una vuelta completa alrededor de la estrella principal cada 49 años, a una distancia 20 veces mayor que la de la Tierra al Sol, es decir, aproximadamente a la distancia de Urano (figura 77). Es una estrellita de octava magnitud; pero su masa es enorme, casi 0,8 de la masa de nuestro Sol. A la distancia de Sirio, nuestro Sol debería brillar como una estrella de magnitud 1,8; pero si el compañero de Sirio tuviera una superficie menor que la superficie solar correspondiente a la relación de las masas de estos astros, debería brillar a la misma temperatura como una estrella de segunda magnitud. Los astrónomos explicaron en comienzo que su brillo débil se debía a la baja temperatura de la superficie de dicha estrella; la consideraron como una estrella en proceso de enfriamiento, cuya superficie ya está cubierta con una corteza sólida.

Pero esta suposición resultó errónea. Hace 30 años se pudo determinar que el modesto satélite de Sirio no es en modo alguno una estrella en extinción, sino que, por el contrario, pertenece a las estrellas que tienen una elevada temperatura superficial, mucho más elevada que la de nuestro Sol. Esto cambia totalmente el problema. Su débil brillo debe atribuirse sólo a la pequeña magnitud de la superficie de esta estrella. Se calculó que irradia 360 veces menos luz que el Sol, lo cual quiere decir que su superficie debe ser, por lo menos, 360 veces menor que la superficie del Sol, y su radio,$\sqrt{360}$ veces menor, o sea, 19 veces más pequeño que el del Sol. De donde se deduce que el volumen del satélite de Sirio debe ser de menos de 1/6.800 del volumen del Sol, mientras que su masa constituye apenas 0,8 de la masa del astro diurno. Esto muestra claramente la enorme condensación que debe tener la materia de esta estrella. Un cálculo más preciso indica que la estrella debe tener un diámetro de sólo 40.000 km y, por consiguiente, su densidad, el valor gigantesco que mencionamos al principio es: 60.000 veces mayor que la densidad del agua (figura 78).

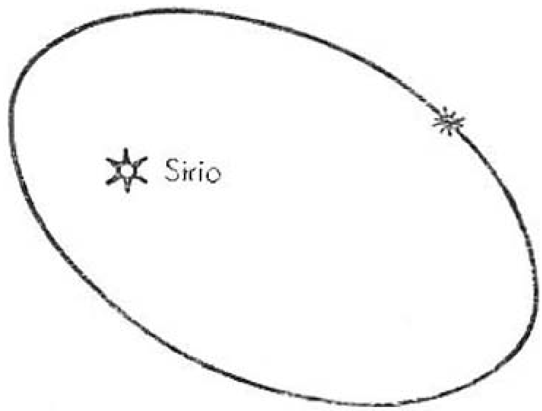


Figura 77. Órbita del satélite de Sirio con respecto a éste. (Sirio no se encuentra en un foco de la elipse aparente porque la proyección desfigura la elipse, y la vemos según cierto ángulo).

"Desconfiad, físicos; pretenden invadir vuestros dominios", habría que decir recordando las palabras pronunciadas por Kepler, aunque iban dirigidas con otro motivo. En realidad, nada semejante podía haberse imaginado hasta ahora un físico. En las condiciones normales, una densidad tan grande es absolutamente inconcebible, ya que los intersticios entre los átomos de los cuerpos sólidos son tan pequeños, que no podría tener lugar ninguna condensación apreciable de la materia. Pero el problema es distinto si se trata de átomos "mutilados", desprovistos de los electrones que giran alrededor del núcleo. La pérdida de los electrones disminuye el diámetro del átomo miles de veces sin disminuir su masa de modo apreciable; el núcleo desnudo es menor que el átomo normal tantas veces como viene a serlo una mosca respecto a un gigantesco edificio.

Aproximados por las enormes presiones que reinan en las entrañas de la esfera de una estrella, estos átomos-núcleos reducidos, podrían acercarse miles de veces más que los átomos normales, y formar una materia de tan inusitada densidad como la descubierta en el satélite de Sirio. Pero aún hay más: esta densidad es superada por la de la estrella de Van Maanen. Esta estrellita de 12ª magnitud no supera por sus dimensiones al globo terrestre, pero está constituida por una materia que es 400.000 veces más pesada que el agua.

Figura 78. El satélite de Sirio está constituido por una materia 60.000 veces más densa que el agua. Algunos centímetros cúbicos de esta materia podrían equilibrar el peso de 30 hombres

Y éste no es el grado máximo de densidad. Teóricamente puede suponerse la existencia de materia aún mucho más densa. El diámetro del núcleo atómico constituye no más de 1/10.000 del diámetro del átomo, y el volumen, por consiguiente, no más 1/1012 del volumen del átomo. Un m^3 de metal contiene a lo sumo cerca de 1/1.000 mm^3 de núcleos atómicos, y en este minúsculo volumen se concentra toda la masa del metal. 1 cm^3 de núcleos atómicos debe pesar, aproximadamente, 10 millones de toneladas (figura 79).

Después de lo dicho, no debe parecer inverosímil el descubrimiento de una estrella cuya materia tiene una densidad media 500 veces mayor que la de la estrella Sirio B. Nos referimos a una pequeña estrella de 13ª magnitud de la constelación Casiopea, descubierta a fines de 1935. Siendo menor que Marte en volumen, y ocho veces menor que el globo terrestre, esta estrella posee una masa que supera casi tres veces la de nuestro Sol (más exactamente, 2,8 veces).

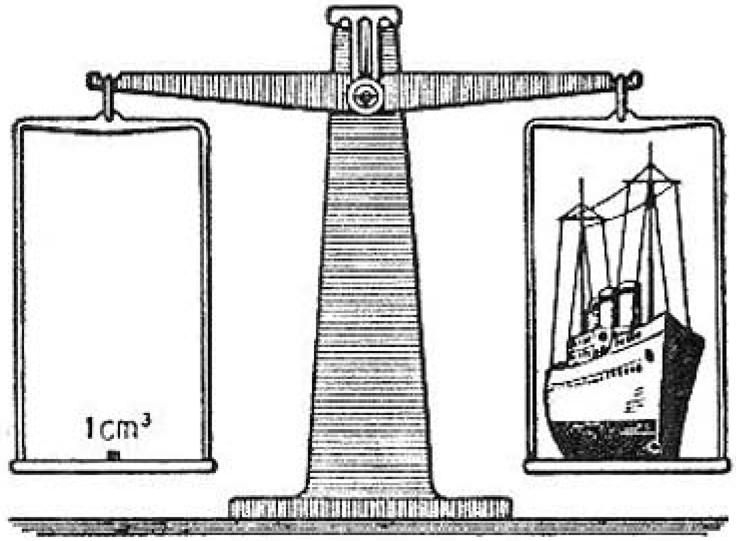


Figura 79. Un cm3 de núcleos atómicos, incluso sin estar comprimidos, podría equilibrar el peso de un barco trasatlántico. Colocados apretadamente en un volumen de 1 cm3, los núcleos pesarían ¡10 millones de toneladas!

En las unidades habituales la densidad media de su materia es de 36.000.000 g/cm^3. Esto significa que 1 cm^3 de esta materia pesaría en la Tierra 36 toneladas (!). Esta materia, por consiguiente, es casi 2 millones de veces más densa que el oro[100]. En el Capítulo V analizaremos cuanto debe pesar un centímetro cúbico de esta materia, pesado en la superficie de la estrella misma.

Pocos años atrás, los sabios probablemente hubieran considerado del todo imposible la existencia de materia con densidad varios millones de veces mayor que la del platino. Los abismos del universo seguramente esconden todavía muchas curiosidades similares.

16. ¿Por qué las estrellas se llaman fijas?

Cuando se dio en la antigüedad, este epíteto a las estrellas, se quería subrayar con esto que, a diferencia de los planetas, las estrellas mantienen en la bóveda celeste una posición invariable.

Naturalmente, toman parte en el movimiento diario de todo el cielo alrededor de la Tierra; pero este movimiento aparente no altera sus posiciones relativas. Los

---

100 En el centro de esta estrella, la densidad de la materia debe alcanzar un valor enorme, aproximadamente, miles de millones de gramos por cm^3.

planetas, en cambio, modifican continuamente sus posiciones con respecto a las estrellas, errando entre ellas, por lo cual recibieron ya en la antigüedad esa denominación de planetas (la voz planeta significa “errante”).

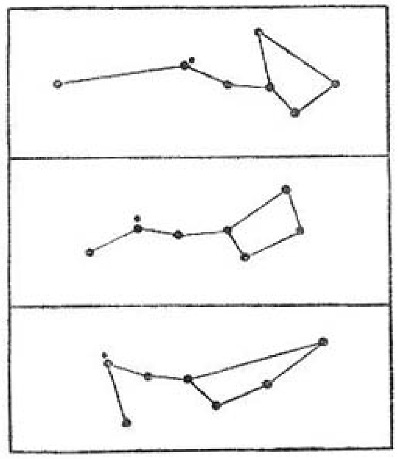


Figura 80. La forma de las constelaciones cambia con el correr del tiempo. El dibujo del centro representa el carro de la Osa Mayor en la actualidad. El dibujo superior representa el mismo carro, 100.000 de años atrás, y el dibujo inferior, lo representa dentro de 100.000 años.

Sabemos ahora que la representación del mundo estrellado, como un conjunto de soles fijos inmóviles, es totalmente errónea.

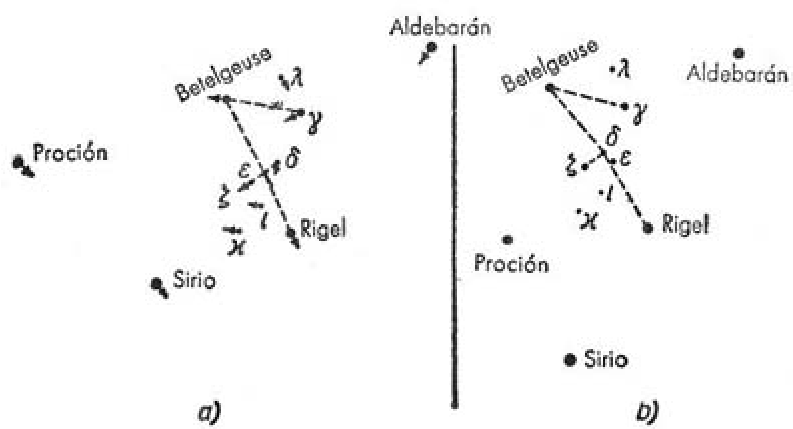


Figura 81. Direcciones en que se desplazan las brillantes estrellas, próximas a la constelación de Orión (a). El cambio en el aspecto de la constelación, producirá estos movimientos al cabo de 50.000 años (b)

Todas las estrellas[101] y entre ellas también nuestro Sol, se mueven una con relación unas con otras, con velocidades del orden de los 3,0 km/s, por término medio, es decir, con la misma velocidad con la que gira nuestro planeta en su órbita.

Las estrellas, como los planetas, para nada son inmóviles. En el mundo de las estrellas nos encontramos con casos aislados de velocidades verdaderamente colosales, que no las hay en la familia de los planetas; se conocen estrellas, llamadas "veloces", que se trasladan con relación a nuestro Sol. a la formidable velocidad de 250 á 300 km/s. Mas si todas las estrellas visibles se mueven en forma caótica, a gigantescas velocidades, desplazándose miles de millones de kilómetros anualmente, ¿por qué no nos damos cuenta de este rápido movimiento? ¿Por qué el cielo estrellado siempre nos ha parecido un cuadro de majestuosa inmovilidad?

No es difícil descubrir la causa: ello se debe al inconcebible alejamiento de las estrellas.

¿No has observado desde un sitio elevado un tren que se mueve a lo lejos, cerca del horizonte? ¿Acaso no te pareció entonces que el expreso se desplazaba como una tortuga? La velocidad vertiginosa para un observador situado al pie de la vía, se transforma en paso de tortuga para un observador a gran distancia. Lo mismo sucede con el desplazamiento de las estrellas, sólo que en este caso el alejamiento relativo del observador de los cuerpos en movimiento es infinitamente mayor.

Las estrellas más brillantes están alejadas de nosotros alrededor de 800 billones de kilómetros (según Kapteyn)[102]. El desplazamiento de estas estrellas en un año es de unos 1.000 millones de kilómetros, es decir, 800.000 veces menor. Se puede ver ese desplazamiento desde la Tierra, en un ángulo menor de 0,25", magnitud apenas perceptible con los instrumentos astronómicos más precisos. A simple vista es totalmente inobservable, incluso durante siglos. Sólo a través de laboriosas mediciones realizadas con instrumentos especiales, se pudo descubrir el movimiento de muchas estrellas (figuras 80, 81, 82).

---

101 Se trata de las estrellas de "nuestro" enjambre estelar, la Vía Láctea.

102 Jacobus Cornelius Kapteyn, (1851 - 1922). Astrónomo holandés, conocido por sus estudios en torno a la Vía Láctea y por descubrir la primera evidencia de su rotación. *(N. del E.)*

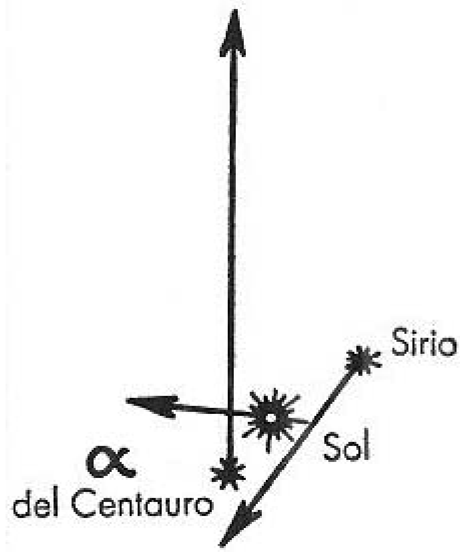


Figura 82. El movimiento de tres estrellas próximas: el Sol, a del Centauro y Sirio

Así, pues, las estrellas, aunque están animadas de movimientos inconcebiblemente rápidos, tienen pleno derecho a llamarse fijas, en tanto se trata de la observación a simple vista. De lo dicho, el lector mismo puede sacar la conclusión de cuán ínfima es la posibilidad de que las estrellas choquen, a pesar de su rápido movimiento (figura 83).

Figura 83. La comparación de los movimientos estelares. Dos pelotas de croquet, una en Leningrado y la otra en Tomsk, moviéndose con la velocidad de 1 km por siglo, nos dan, a escala, una imagen del acercamiento de dos estrellas. Este ejemplo muestra claramente que la probabilidad de que se produzca un choque entre dos estrellas es mínima.

17. Unidades de medida de las distancias interestelares

Nuestras grandes medidas de longitud -el kilómetro, la milla marítima (1.852 m) y la milla terrestre (1.609 m)- son suficientes para medir distancias en la superficie de la Tierra, pero resultan insignificantes para efectuar medidas celestes. Medir con ellas las distancias en el cielo es tan poco práctico, como medir en milímetros el largo de una vía férrea. Por ejemplo, la distancia de Júpiter al Sol, en kilómetros, se expresa con el número 780 millones, y el largo del ferrocarril de octubre, en milímetros, con el número 640 millones.

Para no tener que operar con números terminados en largas series de ceros, los astrónomos utilizan unidades de longitud mucho más grandes. Para medir, por ejemplo, los límites del sistema solar, se toma como unidad de longitud la distancia media de la Tierra al Sol (149.500.000 km). Se le llama "unidad astronómica". Con esta medida, la distancia de Júpiter al Sol es igual a 5,2; la de Saturno al Sol es igual a 9,54; la de Mercurio al Sol es igual a 0,387, etc.

Pero para las distancias de nuestro Sol a los otros soles, tal medida resulta demasiado pequeña. Por ejemplo, la distancia hasta la estrella más cercana a nosotros (llamada Próxima, en la constelación del Centauro[103], una estrellita rojiza de 11ª magnitud), se expresa en dicha unidad de medida con este número 260.000. Y esto para la más próxima de las estrellas: las demás se encuentran mucho más lejos. El empleo de unidades mucho mayores, facilitó el recordar los números y operar con ellos. En astronomía se usan las siguientes unidades de distancia: el "año-luz" y el "pársec", que tiende a remplazar al primero.

Año-luz es el trayecto recorrido en el vacío espacial por un rayo de luz, durante un año.

Nos haremos una idea de la magnitud de esta medida, recordando que del Sol a la Tierra, la luz tarda en llegar 8 minutos. Un año-luz, por consiguiente, es tantas veces mayor que el radio de la órbita terrestre cuantas un año es mayor que 8 minutos. En kilómetros, esta medida de longitud se expresa con el número

9.460.000.000.000,

es decir, que el año-luz es aproximadamente igual á 9½ billones de km. La otra unidad empleada en las distancias estelares, de origen más complicado y que los astrónomos aceptan de buen grado, es el pársec. Un pársec es la distancia a que es preciso alejarse, para ver un semidiámetro de la órbita de la Tierra, con un ángulo de un segundo de arco. El ángulo con que se ve desde una estrella, el semidiámetro

103 Se encuentra casi al lado de la brillante estrella a del Centauro.

de la órbita terrestre, se llama en astronomía "paralaje anual" de esta estrella. De la combinación de las palabras "paralaje" y "segundo" se formó la palabra "pársec".
El paralaje de la antes mencionada, ɑ del Centauro, es 0,76"; y, por lo tanto, la distancia de esta estrella es de 1,31 pársecs. Es fácil calcular que un pársec debe abarcar 206.265 distancias de la Tierra al Sol. La correspondencia entre el pársec y las otras unidades de longitud es la siguiente

1 pársec = 3,26 años-luz = 30.800.000.000.000 km.

He aquí la distancia de algunas estrellas brillantes, expresadas en pársecs y en años-luz:

De 2ª	2,5
De 3ª	6,3
De 4ª	16,0
De 5ª	40,0
De 6ª	100,0
De 7ª	250,0
De 10ª	4.000,0
De 11ª	10.000,0
De 16ª	1.000.000,0

Estas son estrellas relativamente cercanas. Su grado de "proximidad" lo podrán comprender si recuerdan que, para expresar las distancias dadas en kilómetros, es necesario aumentar cada uno de los números de la primera columna, 30 billones de veces. Sin embargo, el año luz y, el pársec no son las medidas más grandes utilizadas en la ciencia de los astros.
Cuando los astrónomos emprendieron la medida de las distancias y las dimensiones de los sistemas estelares, es decir, de universos enteros formados por muchos millones de estrellas, necesitaron una medida aún más grande. La derivaron del pársec, del mismo modo que el kilómetro se deriva del metro; surgió el "kilo pársec", igual a 1.000 pársecs o a 30.800 billones de kilómetros. En esta medida, el

diámetro de la Vía Láctea, por ejemplo, se expresa con el número 30, y la distancia de la Tierra a la nebulosa de Andrómeda resulta de unos 300 kilo pársecs.

Pero también el kilo pársec resultó pronto una medida corta; hubo que poner en uso el "megaparsec", que con tiene un millón de pársecs.

He aquí una tabla con las medidas estelares de longitud

1 megaparsec	=	1.000.000 de pársecs
1 kilo pársec	=	1.000 pársecs
1 pársec	=	206.265 unidades astronómicas
1 unidad astronómica	=	149.500.000 km.

Imaginarse gráficamente el megaparsec es imposible. Incluso si se disminuye el kilómetro hasta el grosor de un cabello (0,05 mm), el megaparsec superará la capacidad de imaginación humana, ya que resulta igual a 1½ miles de millones de kilómetros, es decir, 10 veces la distancia de la Tierra al Sol.

Haremos una comparación más, que quizá nos ayude a comprender la magnitud inimaginable del megaparsec. Un hilo de tela de araña, extendido desde Moscú hasta Leningrado, pesaría 10 g; desde la Tierra hasta la Luna pesaría 6 kg. El mismo hilo, estirado hasta el Sol, tendría un peso de 2,5 toneladas, pero extendido en a lo largo de un megaparsec, debería pesar

¡500.000.000.000 de toneladas!

18. El sistema de las estrellas más próximas

Hace ya bastante tiempo, unos 100 años atrás, se supo que el sistema estelar más próximo es una estrella doble de primera magnitud, de la constelación austral Centauro.

Los últimos años enriquecieron nuestros conocimientos sobre este sistema con detalles interesantes.

Fue descubierta cerca de α del Centauro una pequeña estrella de 11ª magnitud, que con las dos estrellas α del Centauro constituye un sistema de estrella triple. Que esa tercera estrella pertenece físicamente al sistema a del Centauro, a pesar de que la separa en el cielo una distancia de más de 4 años-luz de la Tierra, se confirma por la igualdad de sus movimientos: las tres estrellas se desplazan con la misma velocidad, en la misma dirección. La característica más notable de la tercera estrella de este sistema, es que está situada en el espacio más cerca de nosotros, que las otras dos, y por esto debe considerarse como la más próxima de todas las estrellas cuyas distancias han sido determinadas hasta ahora. Esta estrellita se llama así: "Próxima".

Se encuentra más cerca de nosotros que las estrellas ɑ del Centauro (las llamadas a del Centauro A y a del Centauro B) 3960 unidades astronómicas. He aquí sus paralajes:

α del Centauro (A y B)	0,751
Próxima del Centauro	0,762

Como las estrellas A y B están separadas una de otra por una distancia de sólo 34 unidades astronómicas, todo el sistema tiene una forma bastante extraña, representada en la figura 84. Las estrellas A y B están separadas entre sí un poco más que Urano del Sol.

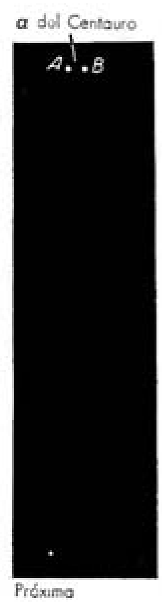


Figura 84. El sistema de las estrellas más próximas al Sol: ɑ del Centauro A y B, y próxima del Centauro

Próxima dista de ellas 59 años-luz. Estas estrellas cambian lentamente de posición: el período de revolución de las estrellas A y B alrededor de su centro común de gravitación es igual a 79 años. Próxima realiza una vuelta en más de 100.000 años, de modo que no hay por qué temer que dentro de poco tiempo deje de ser la estrella más cercana a nosotros y ceda su lugar a una de las α del Centauro.

¿Qué se sabe de las propiedades físicas de las estrellas de este sistema? Alfa del Centauro A, en cuanto a brillo, masa y diámetro, apenas es un poco mayor que el Sol (figura 85). Alfa del Centauro B posee una masa un poco menor, tiene un diámetro 1/5 mayor que el Sol, pero brilla tres veces menos, y, en correspondencia con esto, también su temperatura superficial (4.400º) es más baja que la del Sol (6.000º).

Aún más fría es Próxima: su temperatura superficial es de 3.000º; es una estrella de luz rojiza. Su diámetro es 14 veces menor que el del Sol, es decir, que esta estrellita es incluso un poco más pequeña que Júpiter y Saturno (en masa, sin embargo, los supera centenares de veces). Si nos transportáramos a α del Centauro A, veríamos desde allí a la estrella B aproximadamente con las mismas dimensiones con que nuestro Sol brilla en el cielo de Urano. Próxima parecería desde allí, una pequeña y pálida estrellita, pues está 250 veces más lejos que Plutón del Sol y 1.000 veces más lejos que Saturno.

Después de la estrella triple α del Centauro, el vecino más próximo de nuestro Sol es una estrella muy pequeña (de magnitud 9,7) de la constelación del Dragón, llamada "Estrella voladora". Recibió esta denominación por el movimiento que posee, visible, de extraordinaria rapidez. Esta estrella se halla una 1 ½ veces más lejos de nosotros que el sistema α del Centauro, pero en el hemisferio Norte es nuestra vecina más próxima. Su vuelo al movimiento del Sol, en dirección oblicua, es tan rápido, que en menos de diez mil años la distancia que nos separa de ella se reducirá a la mitad, y entonces estará más cerca que la estrella triple α del Centauro.

19. La escala del universo

Volvamos al modelo reducido del sistema solar que hemos construido mentalmente, según las indicaciones del capítulo sobre los planetas (Capítulo 3), e intentemos terminarlo incluyendo en él al mundo de las estrellas. ¿Qué resultará?

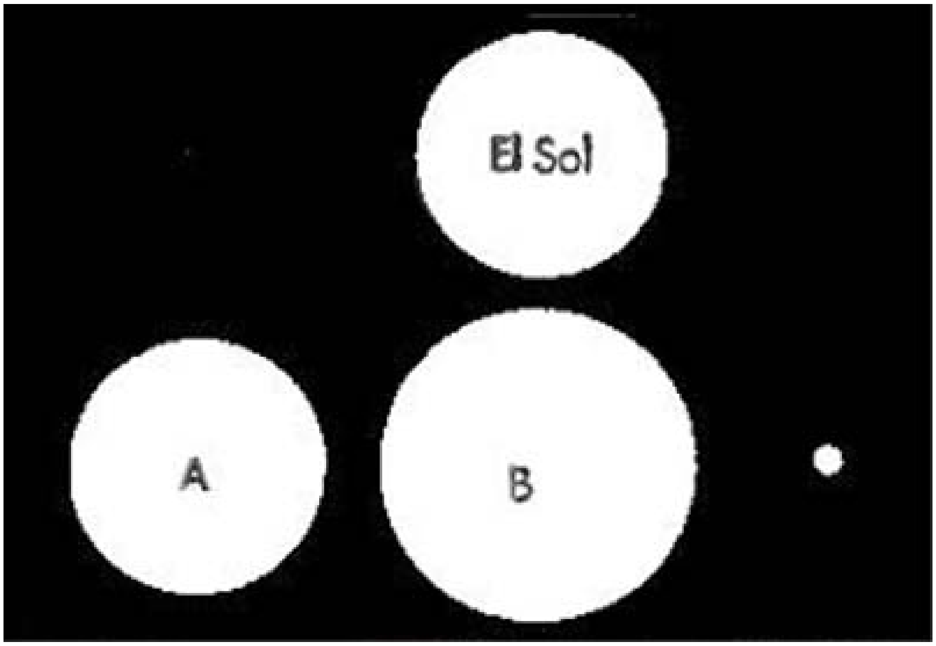


Figura 85. Dimensiones comparadas del Sol y las estrellas que forman el sistema α del Centauro

Recordarás que en nuestro modelo, el Sol se representaba con una bola de 10 cm de diámetro, y todo el sistema planetario, con un círculo de 800 m de diámetro. ¿A qué distancia del Sol habría que colocar las estrellas si se quisiera mantener exactamente la misma escala? Es fácil calcular que, por ejemplo, Próxima del Centauro -la estrella más cercana- estaría a una distancia de 2.700 km; Sirio, a 5.500 km; Altair, a 9.700 km. Incluidas estas estrellas más cercanas, el modelo apenas cabría en Europa. Para estrellas más alejadas tomamos una unidad de medida mayor que el kilómetro, a saber, los 1.000 km, unidad que recibe el nombre de "megámetro" (Mm). En la circunferencia del globo terrestre, hay en total 40 de estas unidades, y 380 entre la Tierra y la Luna. En nuestro modelo, Vega estaría a 17 Mm, Arturo a 23 Mm, Capela a 28 Mm, Regulo a 55 Mm, Deneb (α del Cisne) a más de 350 Mm.

Consideremos este último número: 350 Mm = 350.000 km, es decir, un poco menos que la distancia a la Luna. Como se ve, nuestro modelo reducido, en el que la Tierra era una cabecita de alfiler y el Sol una pelota de croquet, también adquiere dimensiones cósmicas.

Nuestro modelo todavía no está terminado. Las estrellas más alejadas de la Vía Láctea se hallarían en él, a una distancia de 30.000 Mm, casi 100 veces más lejos que la Luna. Pero la Vía Láctea no es todo el universo. Más allá de sus límites hay otros sistemas estelares, por ejemplo, el sistema visible a simple vista, en la constelación de Andrómeda, o los sistemas, también perceptibles por nuestros ojos, de las Nubes de Magallanes. En nuestro universo reducido habría que representar la Pequeña Nube de Magallanes por un objeto de 4.000 Mm de diámetro, y la Nube Mayor, por otro con un diámetro de 5.500 Mm, alejados, en el modelo, 70.000 Mm de la Vía Láctea. A la nebulosa de Andrómeda, deberíamos darle en el modelo, un diámetro de 60.000 Mm y separarla de la Vía Láctea 500.000 Mm, es decir, una distancia ¡casi igual a la que separa a Júpiter de la Tierra!

Los cuerpos celestes más alejados de que actualmente se ocupa la astronomía, son las nebulosas estelares, que son acumulaciones de innumerables estrellas situadas mucho más allá de los límites de nuestra Vía Láctea. Su distancia al Sol supera los 1.000.000.000 de años-luz. Invitamos al lector a calcular por cuenta propia, cómo se deberían representar estas distancias en nuestro modelo. De este modo, el lector se formará una idea de las dimensiones de la parte del espacio que está al alcance de los medios ópticos de la astronomía contemporánea. En mi libro ¿Sabe usted física?, el lector encontrará también una serie de comparaciones, relacionadas con lo expuesto hasta aquí.

A quien le interesen particularmente las estrellas y la estructura del universo le aconsejo leer atentamente los siguientes libros:

- *Vorontzov - Veliaminov B. A., Ensayo sobre el universo, Editorial Técnica del Estado, 1955.*
- *Pola, I. F., Curso de Astronomía General, Editorial Técnica del Estado, 1955.*

Capítulo 5
La gravitación

Contenido:

1. Un cañonazo hacia arriba

¿Dónde caería una granada, disparada verticalmente, hacia arriba, por un cañón situado en el Ecuador? (figura 86).

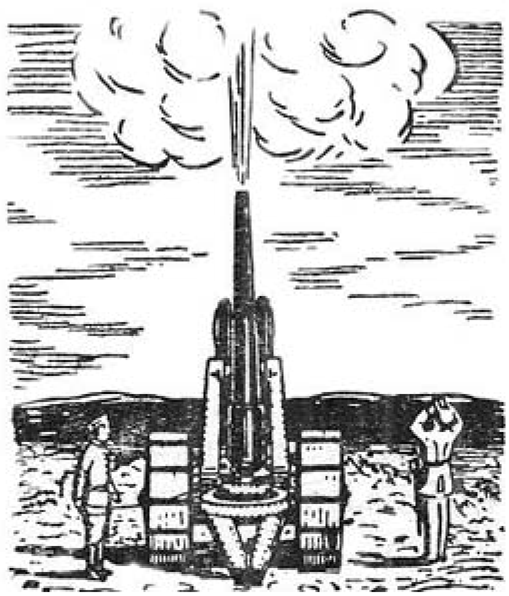


Figura 86. El problema de la bala de cañón disparada verticalmente

Este problema se debatía veinte años atrás en una revista con referencia a una granada imaginaria arrojada con una velocidad de 8.000 m/seg; esta granada, a los 70 minutos, debería alcanzar una altura de 6.400 km (radio terrestre). He aquí lo que decía la revista:

> *"Si la granada se arroja verticalmente, hacia arriba, en el Ecuador, al salir del cañón poseerá además la velocidad angular de los puntos del Ecuador en dirección al Este (465 m/s).*
>
> *La granada se trasladará con esta velocidad, paralelamente al Ecuador. El punto que se encontraba en el momento del disparo, a la altura de 6.400 km, verticalmente sobre el punto de partida de la granada, se trasladará en un círculo de radio doble con doble velocidad lineal. Por consiguiente, dicho punto aventajará a la granada en dirección al Este. Cuando la granada alcance el punto más alto de su trayectoria, se encontrará verticalmente, no sobre el punto de partida del disparo, sino que estará desviada hacia el Oeste*

de dicho punto. Lo mismo sucede en la caída de retorno de la granada. Como resultado, al cabo de los 70 minutos empleados en el ascenso y el descenso, la granada se habrá atrasado aproximadamente 4.000 km hacia el Oeste del punto de partida.

En este punto es donde se debe esperar su caída. Para hacer que la granada vuelva al punto de partida -es necesario dispararla, no verticalmente, sino en dirección ligeramente inclinada, en nuestro caso con una inclinación de 5º."

De manera completamente distinta, resuelve Flammarion[104] un problema similar, en su Astronomía.

"Si se dispara un cañonazo verticalmente hacia el cenit, la bala caerá nuevamente en el alma del cañón, aunque durante su elevación y descenso se traslada con la Tierra hacia el Este. La causa es evidente. La bala, elevándose hacia arriba, no pierde nada de la velocidad que el movimiento de la Tierra le comunica. Los dos impulsos recibidos no se oponen: puede ir 1 km hacia arriba y al mismo tiempo hacer, por ejemplo, 6 km hacia el Este. Su movimiento en el espacio seguirá la diagonal de un paralelogramo, uno de cuyos lados es de 1 km y el otro de 6 km. Al caer, por efecto de la gravedad, se moverá según otra diagonal (más exactamente, siguiendo una curva, a consecuencia de la aceleración) y caerá nuevamente en el alma del cañón, el cual, como antes, se encuentra en posición vertical."

Flammarion añade:

"Realizar con éxito semejante experiencia resultaría, sin embargo, bastante laborioso, porque sería difícil encontrar un cañón bien calibrado y nada fácil ponerlo en posición totalmente vertical. Mersenne y Petit[105] intentaron hacer esto en el siglo XVII, pero ni siquiera encontraron su bala después del disparo.

---

104 Nicolas Camille Flammarion, (1842 - 1925). Astrónomo francés, conocido por sus obras de popularización de la astronomía. *(N. del E.)*

105 Marin Mersenne, Marin Mersennus o le Père Mersenne –el Padre Mersenne- (1588 - 1648). Filósofo francés del siglo XVII que estudió diversos campos de la teología, las matemáticas y la teoría musical. Pierre Petit. Ingeniero francés, intendente de fortificaciones, interesado en las ciencias. *(N. del E.)*

Varignon[106], en la página inicial de su obra Nuevas conjeturas sobre la gravedad (1.690), insertaba un dibujo relativo a esto. En dicho dibujo, dos observadores -un monje y un militar- están de pie al lado de un cañón que apunta hacia el cenit y miran hacia arriba, como siguiendo la bala disparada. En el grabado está escrito (en francés) ¿Retombera-t-il? (¿Volverá a caer?). El monje es Mersenne; el militar es Petit. Esta peligrosa experiencia la efectuaron varias veces, y como nunca les resultó bastante acertada como para que la bala les cayera en la cabeza, sacaron la conclusión de que el proyectil se quedaba para siempre en el aire. Varignon se sorprende del hecho:

¡Una bala pendiendo sobre nuestras cabezas! Es verdaderamente asombroso.

Repitiendo la experiencia en Estrasburgo[107], la bala cayó a varios cientos de metros del cañón. Es evidente que el arma no había sido dirigida exactamente en dirección vertical."

Las dos soluciones del problema, como vemos, difieren mucho. Un autor afirma que la bala caerá lejos, hacia occidente del lugar del disparo; otro indica que deberá caer en el alma misma del cañón. ¿Quién tiene razón?

En rigor son falsas ambas soluciones, pero la de Flammarion está mucho más cerca de la verdad. La bala debe caer hacia el oeste del cañón; sin embargo, no tan lejos como afirmaba el primer autor y no en el cañón mismo como afirmaba el segundo.

El problema, lamentablemente, no se puede resolver con los recursos de la matemática elemental. Por esta razón nos limitaremos a dar el resultado final[108].

Si llamamos v a la velocidad inicial de la bala, w a la velocidad angular de rotación del globo terrestre y g a la aceleración de la gravedad, la distancia x del punto de caída de la bala al oeste del cañón se obtiene con las expresiones correspondientes, en el Ecuador:

---

106 Pierre Varignon (1654 - 1722). Matemático francés. Precursor del cálculo infinitesimal, desarrolló la estática en su obra Nueva mecánica o estática (1.725), estableció la regla de composición de fuerzas y formuló el principio de las velocidades virtuales. *(N. del E.)*

107 Se reproduce como viñeta en la cabecera de este capítulo (N. R.).

108 Para este fin es imprescindible un cálculo complementario especial, que a petición mía fue efectuado por especialistas. No es posible dar aquí este cálculo en forma detallada

$$x = \frac{4}{3} w \frac{v^3}{g^2}$$

Y en la latitud φ:

$$x = \frac{4}{3} w \frac{v^3}{g^2} cos\varphi$$

Aplicando la fórmula al problema propuesto por el primer autor, tenemos[109]

$$w = \frac{2\pi}{86.164}$$

v = 8.000 m/s

g = 9,8 m/s^2

Sustituyendo estos valores en la primera fórmula, resulta x = 520 km: la bala caerá 520 km al oeste del cañón (y no a 4.000 km, como pensaba el primer autor).

¿Qué resultado da la fórmula para el caso examinado por Flammarion? El disparo no era efectuado en el Ecuador, sino cerca de París, a 48º de latitud. Supondremos la velocidad inicial de la bala del viejo cañón igual a 300 m/s. Sustituyendo en la segunda fórmula:

$$w = \frac{2\pi}{86.164}$$

v = 300 m/s

g = 9,8 m/s^2, φ = 48°

109 El período de rotación de la Tierra es de 24 horas aproximadamente; el valor real equivale a un *día sideral* – un *día sideral* es 4 minutos más corto que el *día solar*-, es decir , á 23,9344 horas, o sea, a 86164 segundos. *(N. del E.)*

resulta x = 18 m

La bala caerá a 18 m al oeste del cañón (y no en el alma misma, como suponía el astrónomo francés). En estos cálculos, como se ve, no se ha tenido en cuenta la posible acción de las corrientes de aire, capaces de alterar notablemente el resultado.

2. El peso a gran altura

En los cálculos anteriores hicimos figurar una circunstancia sobre la cual no hemos llamado hasta ahora la atención del lector. Se trata de que a medida que un cuerpo se aleja de la Tierra, la fuerza de la gravedad disminuye.

La gravedad no es otra cosa que una manifestación de la gravitación universal, y la fuerza recíproca de atracción de dos cuerpos disminuye rápidamente cuando la distancia entre ellos aumenta. De acuerdo con la ley de Newton, la fuerza de atracción disminuye proporcionalmente al cuadrado de la distancia; en nuestro caso debe contarse la distancia desde el centro de la esfera terrestre, porque la Tierra atrae a todos los cuerpos como si su masa estuviera concentrada en su centro. Por esto, la fuerza de atracción a la altura de 6.400 km, es decir, en un punto alejado 2 radios terrestres del centro de la Tierra, es cuatro veces menor comparada con la fuerza de atracción en la superficie de la Tierra.

Esto se debe manifestar para una bala de cañón arrojada hacia arriba, haciendo que la bala se eleve más que en el caso de que la gravedad no disminuya con la altura. Para la bala arrojada verticalmente, hacia arriba, con una velocidad de 8.000 m por segundo, aceptamos que se elevará a una altura de 6.400 km. En cambio, si se calcula la altura de la elevación de este proyectil por la fórmula conocida, sin tener en cuenta la disminución de la gravedad con la altura, se obtiene una altura dos veces menor. Hagamos este cálculo. En los textos de física y de mecánica se encuentra la fórmula para el cálculo de la altura h a la que se eleva un cuerpo arrojado verticalmente, hacia arriba, con una velocidad v, para una aceleración constante g, de la fuerza de la gravedad:

$$h = \frac{v^2}{2g}$$

En nuestro caso v = 8.000 m/s, g = 9,8 m/s^2, y tenemos

$$h = \frac{8.000^2}{2 \cdot 9{,}8} = 3.265.000 = 3.265\ km$$

Esta es casi la mitad de la altura indicada anteriormente. La divergencia obedece, como acabamos de decir, a que al utilizar la fórmula dada en los libros de texto, no tenemos en cuenta la disminución de la gravedad con la altura.

Queda claro que si la Tierra atrae la bala más débilmente, ésta tiene que elevarse a mayor altura, a la velocidad dada.

No debe concluirse precipitadamente que las fórmulas que figuran en los libros de texto para el cálculo de la altura que alcanza un cuerpo arrojado hacia arriba, no son exactas. Son exactas dentro de los límites previstos para ellas, y resultan inexactas tan pronto como el calculista se sale de los límites indicados. Estas fórmulas son aplicables cuando se trata de alturas muy pequeñas, para las que la disminución de la gravedad es tan insignificante, que se puede despreciar. Así, en el caso de la bala arrojada hacia arriba con una velocidad inicial de 300 m/s, la disminución de la gravedad es imperceptible.

Pero he aquí un interesante problema: ¿Se percibe la disminución de la fuerza de la gravedad a las alturas alcanzadas por los aviones y los aeróstatos modernos? ¿Se observa a estas alturas la disminución del peso de los cuerpos? En el año 1936 el aviador Vladimir Kokkinaki[110], subió con su aeronave, algunas cargas a gran altura: ½ tonelada á 11.458 m de altura; 1 tonelada á 12.100 m de altura, y 2 toneladas á 11.295 m de altura. Surge la pregunta: ¿a las alturas indicadas, mantenían estas cargas su peso original, o disminuían notablemente su peso allá arriba? A primera vista da la impresión de que la elevación sobre la superficie de la Tierra, a un poco más de diez kilómetros, no disminuye el peso de una carga de manera apreciable, en un planeta tan grande como la Tierra. En la superficie de la Tierra el peso dista

110 Vladimir Konstantinovich Kokkinaki (1904 – 1985). Fue el piloto de prueba más famoso se la Unión Soviética, ostentó la marca de 22 vueltas alrededor del mundo y fue presidente de la Fédération Aéronautique Internationale (Federación Aeronáutica Internacional). *(N. del E.)*

del centro de nuestro planeta 6.400 km; un ascenso de 12 km aumenta esta distancia hasta 6.412 km; el aumento parece demasiado pequeño para que pueda influir en el peso. Sin embargo, el cálculo dice otra cosa: se presenta una pérdida apreciable de peso.

Hagamos el cálculo para uno de los casos descritos, por ejemplo, para el ascenso de Kokkinaki con una carga de 2.000 kg á 11.295 m. (Su distancia al centro de la Tierra será: 6.400 kms + 11,295 km ≈ 6.411,3 km).

A esta altura el avión se encuentra una 6.411,3/6.400 veces más lejos del centro del globo terrestre que en el momento de su partida. La fuerza de atracción disminuye allí (de acuerdo con la ley de Newton, la fuerza de atracción disminuye proporcionalmente al cuadrado de la distancia):

$$(6.411{,}3/6.400)^2$$

es decir

$$1 + (6.411{,}3/6.400)^2 \text{ veces}$$

Por consiguiente, el peso a la altura indicada debe ser:

$$2000/(6.411{,}3/6.400)^2 \text{ kg}$$

Si se efectúa este cálculo (para lo cual es cómodo utilizar los métodos del cálculo aproximado)[111], se ve que la carga de 2.000 kg a la altura indicada pesaría sólo 1.993 kg, con lo que sería 7 kg más liviana. La disminución del peso es bastante sensible. Una pesa de un kilogramo a esa altura tiraría en una balanza de resorte sólo como 996,5 g; se perderían 3,5 g de peso.

Nuestros aeronautas, que alcanzaron una altura de 22 km, debieron encontrar una

111 Pueden utilizarse las igualdades aproximadas:

$$(1 + a)^2 = 1 + 2a$$

y

$$1 / (1 + a) = 1 - a$$

en donde ɑ es una cantidad muy pequeña. Por esto

$$2.000 /(1 + 11{,}3/6.400)^2 = 2.000/(1 + 11{,}3/6.400) = 2.000-11{,}3/1{,}6 = 2.000 - 7$$

pérdida de peso mayor: 7 g por kilogramo.

En el ascenso "record" del aviador Iumashev, que se elevó en 1936 con una carga de 5.000 kg a una altura de 8.919 m, puede calcularse para este peso una pérdida global de 14 kg.

En el mismo año 1936 el aviador M. Y. Alekseev elevó a una altura de 12.695 m una carga de 1 toneladas, el aviador N. Nyujtikov elevó a una altura de 7.032 m una carga de 10 toneladas, etc.

Utilizando lo expuesto antes, el lector puede efectuar fácilmente el cálculo de la pérdida de peso en cada uno de estos casos.

3. Las trayectorias de los planetas con el compás

De las tres leyes de los movimientos planetarios arrancadas a la naturaleza con gigantesco esfuerzo por el genio de Kepler, la primera puede ser la menos comprensible para muchos.

Esta ley afirma que los planetas se mueven describiendo elipses. ¿Por qué precisamente elipses? Uno pudiera pensar que si se hace sentir por todas partes la misma fuerza en torno al Sol y ésta disminuye con el alejamiento en igual medida, los planetas deberían dar vuelta alrededor del Sol siguiendo círculos y no trayectorias cerradas y estiradas, en las cuales el Sol no ocupa una posición central.

La cuestión queda perfectamente clara luego de estudiar matemáticamente el problema. Pero sólo algunos de los aficionados al estudio del cielo poseen los conocimientos de matemática superior necesarios para afectar dicho análisis. Intentaremos hacer comprensible la validez de las leyes de Kepler para aquellos lectores que sólo conocen las matemáticas elementales.

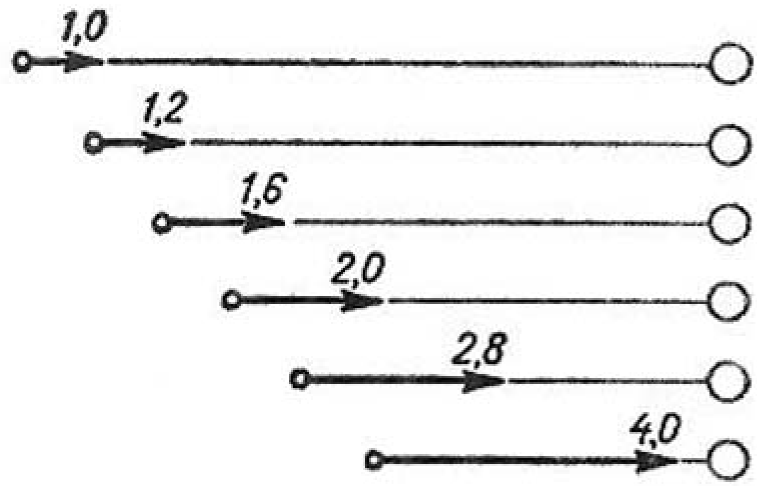


Figura 87. La fuerza de atracción del planeta por el Sol aumenta con la disminución de la distancia

Armados de un compás, una regla graduada y una hoja grande, de papel, vamos a construir nosotros mismos las órbitas de los planetas y a comprobar así gráficamente que esas trayectorias resultan tal como deben ser, de acuerdo con las leyes de Kepler.

El movimiento de los planetas está gobernado por la fuerza de la gravitación. Estudiemos esto. El circulito de la derecha en la figura 87 representa un Sol imaginario; a la izquierda de él está un planeta también imaginario. La distancia entre ambos, que suponemos de 1.000.000 km, está representada en el dibujo por 5 cm; la escala es, pues, de 200.000 km por 1 cm.

La flecha de 0,5 cm de longitud representa la fuerza con que el Sol atrae a nuestro planeta (figura 87). Supongamos que bajo la acción de esta fuerza, el planeta se acerca al Sol, y se encuentra á 900.000 km de distancia de él, es decir, 4,5 cm en nuestro dibujo.

Se intensifica entonces la atracción del planeta por el Sol, de acuerdo con las leyes de la gravitación, en:

$$(10/9)^2$$

o sea, 1,2 veces. Si antes se representaba la atracción con una flecha de 1 unidad de longitud, ahora deberá darse a la flecha una longitud de 1,2 unidades. Cuando la distancia disminuye a 800.000 km, es decir, a 4 cm en nuestro dibujo, la fuerza de la atracción crece

$$(5/4)^2$$

es decir, 1,6 veces y se representa con una flecha de 1,6 unidades. Para posteriores aproximaciones del planeta al Sol, hasta las distancias de 700, 600 y 500 mil kilómetros, la fuerza de atracción se representará respectivamente con flechas de 2, de 2,8 y de 4 unidades de longitud.

Se puede suponer que las flechas representan no sólo las fuerzas de atracción, sino también los desplazamientos que el cuerpo sufre bajo la influencia de estas fuerzas, en la unidad de tiempo (en este caso los desplazamientos son proporcionales a las aceleraciones, y por consiguiente, también a las fuerzas). En nuestras construcciones posteriores vamos a utilizar este esquema como patrón de los desplazamientos del planeta.

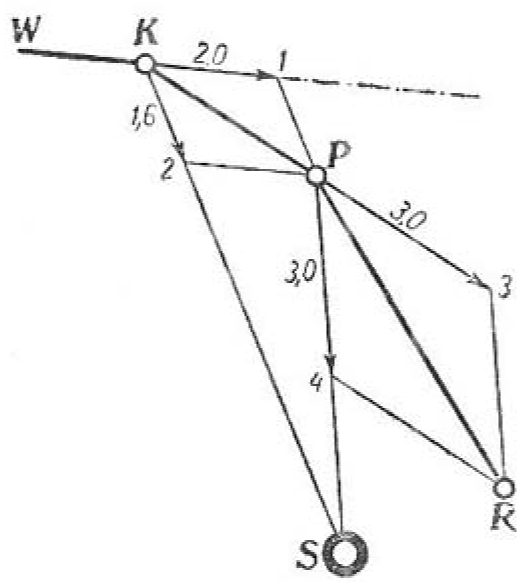


Figura 88. Cómo hace el Sol S que el camino WKPR del planeta, sea curvo

Procedamos ahora a la construcción de la trayectoria de un planeta que gira alrededor del Sol. Supongamos que se trata de un planeta de la misma masa que el anteriormente considerado, que se mueve en la dirección WK con velocidad de 2 unidades de longitud y se encuentra en el punto K, a 800.000 km de distancia del Sol (figura 88). A esta distancia la atracción del Sol actuará sobre el planeta con una fuerza tal, que lo obligará a desplazarse en una unidad de tiempo en dirección al Sol 1,6 unidades de longitud; en el mismo espacio de tiempo el planeta se adelanta 2 unidades en la dirección original WK. Como resultado de ambos movimientos se desplazará según la diagonal KP del paralelogramo construido con los desplazamientos K1 y K2, diagonal que es igual a 3 unidades de longitud (figura 88).

Encontrándose en el punto P, el planeta tratará de moverse más lejos en la dirección KP con una velocidad de 3 unidades.

Pero al mismo tiempo, por efecto de la atracción del Sol a la distancia SP = 5,8, deberá efectuar en la dirección SP el camino P4 = 3. Como resultado, recorre la diagonal PR del paralelogramo.

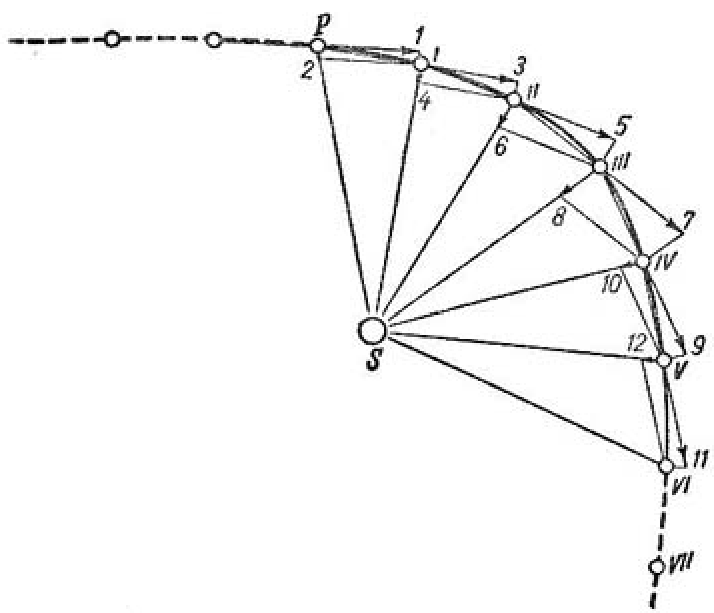


Figura 89. El Sol desvía al planeta P de su trayectoria recta original y lo obliga a describir una línea curva

No nos detendremos en llevar más adelante la construcción en el mismo dibujo: la escala es demasiado grande. Se comprende que cuanto menor es la escala, tanto mayor es la parte de la trayectoria del planeta que se puede representar en el esquema y tanto menor la variación brusca de los ángulos que alteran el parecido de nuestro esquema con la trayectoria real del planeta. En la figura 89 se muestra el mismo esquema, con una escala mucho menor, para el caso imaginario del encuentro del Sol con un cuerpo celeste de masa igual a la del planeta considerado antes. Se ve claramente que el Sol desvía al planeta extraño de su trayectoria inicial y lo obliga a seguir la curva P-I-II-III-IV-V. Los ángulos de la trayectoria trazada aquí no son tan bruscos y no resulta difícil unir las posiciones sucesivas del planeta, mediante una línea curva suave.

¿Qué curva es ésta? La geometría nos ayuda a contestar esta pregunta. Pongamos sobre el dibujo (figura 89) una hoja de papel transparente y calquemos en ella seis puntos, elegidos arbitrariamente, del camino del planeta.

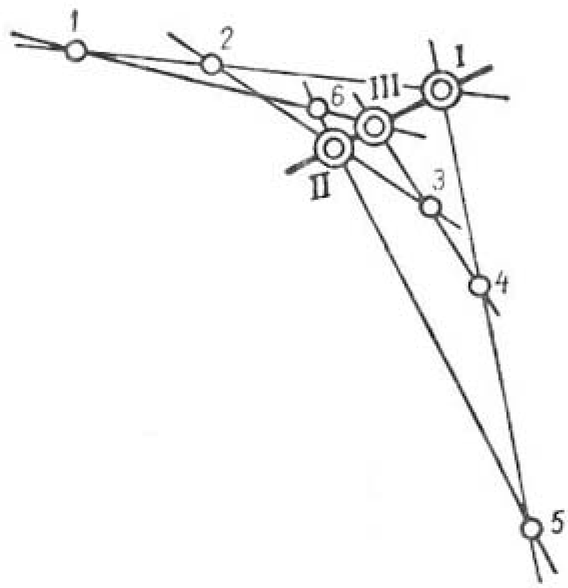


Figura 90. Demostración geométrica de que los planetas se mueven alrededor del Sol, siguiendo una sección cónica. (Detalles en el texto)

Numeramos los seis puntos elegidos (figura 90) en cualquier orden y los unimos entre sí en ese mismo orden con segmentos rectos. Nos resultará una figura hexagonal inscrita en el camino del planeta, algunos de cuyos lados se cruzan.

Prolonguemos ahora la recta 1-2 hasta la intersección con la línea 4-5 en el punto I. Del mismo modo, tendremos el punto II en la intersección de las rectas 2-3 y 5-6, y después el punto III en las intersecciones 3-4 y 1-6. Si la curva examinada es una de las llamadas "secciones cónicas", es decir, una elipse, una parábola o una hipérbola, los tres puntos I, II y III deben estar en línea recta. Este teorema geométrico se denomina "hexágono de Pascal".

Con una ejecución cuidadosa del dibujo, los puntos de intersección indicados quedan siempre en línea recta. Esto demuestra que la curva examinada es una elipse, una parábola o una hipérbola. La curva de la figura 89, evidentemente, no puede ser una elipse (la curva no es cerrada), y esto quiere decir que el planeta se movería en tal caso por una parábola o por una hipérbola. La relación entre la velocidad inicial y la fuerza de la atracción es tal que el Sol sólo desvía al planeta de su trayectoria en línea recta, pero no es capaz de hacerlo girar a su alrededor, dicho de otro modo, no es capaza de "prenderlo", como dicen los astrónomos.

Intentemos ahora aclarar por un procedimiento similar la segunda ley del movimiento de los planetas, la llamada ley de las áreas. Examinemos atentamente la figura 21 (Ver capítulo 1. "*14. Si la trayectoria de la Tierra fuera más pronunciada*"). Doce puntos marcados en ella la dividen en doce partes de diferente longitud, pero ya sabemos que el planeta las recorre en tiempos iguales.

Uniendo los puntos 1, 2, 3, etc. con el Sol, se obtienen 12 figuras cuyas superficies son aproximadamente iguales a las de los triángulos que resultan si se unen esos puntos con cuerdas. Midiendo las bases y las alturas, puedes calcular las áreas. Comprobarás que todos los triángulos tienen la misma área. En otras palabras, has verificado la segunda ley de Kepler:

> *"Los radios vectores de las órbitas de los planetas barren áreas iguales en períodos de tiempo iguales."*

Así, pues, el compás, hasta cierto punto, ayuda a comprender las dos primeras leyes de los movimientos de los planetas. Para aclarar la tercera ley cambiemos el compás por la pluma y efectuemos algunos ejercicios numéricos.

4. La caída de los planetas en el Sol

¿Te has puesto a pensar alguna vez en lo que sucedería con nuestra Tierra si al encontrarse con un obstáculo repentinamente se detuviera en su camino alrededor del Sol?

Ante todo, naturalmente, la gigantesca reserva de energía latente en nuestro planeta como cuerpo en movimiento se transformaría en calor y encendería el globo terrestre.

La Tierra se mueve sobre su órbita decenas de veces más veloz que una bala, y fácilmente se puede calcular que la transformación de la energía de este movimiento en calor produciría una extraordinaria elevación de temperatura que instantáneamente transformaría nuestro mundo en una nube gigantesca de gases incandescentes...

Pero aun si la Tierra en su detención brusca escapara a este destino, estaría igualmente condenada a una catástrofe ígnea; atraída por el Sol, se dirigiría hacia él con una velocidad creciente y perecería en un abrazo de fuego.

Esta fatal caída empezaría lentamente, con velocidad de tortuga; en el primer segundo la Tierra se aproximaría al Sol sólo 3 mm. Pero, en cada segundo, la velocidad crecería progresivamente y alcanzaría en el último segundo 600 km. Con esta inconcebible velocidad se precipitaría el globo terrestre sobre la superficie incandescente del Sol.

Es interesante calcular cuánto tiempo duraría este vuelo fatal. ¿Se prolongaría mucho la agonía de nuestro mundo? La tercera ley de Kepler nos ayuda a efectuar este cálculo; dicha ley se refiere al movimiento no sólo de los planetas, sino también de los cometas y de todos los cuerpos celestes que se mueven en el espacio sometidos a la gravitación universal. Esta ley relaciona el período de revolución de un planeta (su "año") con su distancia al Sol, y dice:

> *"Los cuadrados de los períodos de revolución de los planetas se relacionan entre sí como los cubos de los semiejes mayores de sus órbitas."*

En nuestro caso podemos comparar el globo terrestre volando en línea recta hacia el Sol con un cometa imaginario que se mueve por efecto de la gravitación según una elipse ceñida y muy aplastada, cuyos puntos extremos están situados: uno, en la órbita de la Tierra, y el otro, en el centro del Sol. El semieje mayor de la órbita de este cometa, evidentemente, es igual a la mitad del semieje mayor de la órbita de la Tierra. Calculemos cuál debe ser el período de revolución de este cometa imaginario.

Formemos la proporción, basados en la tercera ley de Kepler

$$\frac{(Periodo\ de\ revolución\ de\ la\ Tierra)^2}{(Periodo\ de\ revolución\ del\ cometa)^2} = \frac{(Semieje\ mayor\ de\ la\ órbita\ de\ la\ Tierra)^3}{(Semieje\ mayor\ de\ la\ órbita\ del\ cometa)^3}$$

El período de revolución de la Tierra es igual a 365 días; tomemos el semieje mayor de su órbita igual a la unidad y entonces el semieje mayor de la órbita del cometa será igual a 0,5.

Nuestra proporción toma ahora la siguiente forma:

$$\frac{(365)^2}{(Periodo\ de\ revolución\ del\ cometa)^2} = \frac{1}{(0{,}5)^3}$$

de donde:

$$(Periodo\ de\ revolución\ del\ cometa)^2 = \frac{365^2}{(0{,}5)^3}$$

Por consiguiente,

$$Periodo\ de\ revolución\ del\ cometa = \frac{365^2}{2\sqrt{2}}$$

Nos interesa propiamente no el período entero de revolución de este cometa imaginario, sino la mitad de su período, es decir, la duración del vuelo en un sentido: de la órbita de la Tierra hasta el Sol. Éste será el tiempo de duración de la caída de la Tierra en el Sol que buscamos. Calculémoslo

$$\frac{\frac{365}{\sqrt{8}}}{2} = \frac{365}{2\sqrt{8}} = \frac{365}{\sqrt{32}} = \frac{365}{5{,}65}$$

Por lo tanto, para saber en cuánto tiempo la Tierra caería en el Sol es necesario dividir la duración del año por √32, o sea, por 5,65. Esta operación da, en números redondos, 65 días.

Así, pues, hemos calculado que la Tierra, súbitamente detenida en su movimiento por su órbita, caería en el Sol al cabo de algo más de dos meses.

Es fácil comprender que la sencilla fórmula obtenida más arriba, basándonos en la tercera ley de Kepler, no solo se aplica a la Tierra, sino a cualquier otro planeta y aun a cada uno de los satélites. En otras palabras, que para saber en cuánto tiempo caería un planeta o un satélite sobre su astro central es necesario dividir su período de revolución por $\sqrt{32}$, o sea, por 5,65.

Así, por ejemplo, Mercurio, el planeta más próximo al Sol caería en el Sol en 15½ días Neptuno, cuyo "año" es igual a 165 años terrestres, caería en el Sol en 29 años, y Plutón, en 44 años.

¿En cuánto tiempo caería sobre la Tierra la Luna si detuviera bruscamente su carrera?

Dividamos el tiempo de revolución de la Luna, 27,3 días, por 5,6, y nos da, casi exactamente, 5 días. Y no sólo la Luna, sino cualquier otro cuerpo que se encontrara a la misma distancia de nosotros que la Luna caería en la Tierra al cabo de 5 días, siempre que no poseyera ninguna velocidad inicial y sólo estuviera sometido a la influencia de la atracción terrestre (despreciamos la influencia del Sol, para simplificar). Utilizando la misma fórmula, es fácil calcular el tiempo que duraría el viaje a la Luna de que habla Julio Verne en su novela De la Tierra a la Luna[112].

5. El yunque de Vulcano

La fórmula indicada nos permitirá resolver un curioso problema mitológico: El antiguo mito griego de Vulcano nos cuenta que dicho dios dejó caer cierta vez su yunque y que éste cayó desde el cielo durante 9 días seguidos antes de llegar a la Tierra. A juicio de los griegos, este plazo correspondía a la gran altura del cielo en que moraban sus dioses; pues de la cúspide de la pirámide de Keops, el yunque habría caído a la Tierra en sólo 5 segundos.

Es fácil ver, sin embargo, que el espacio celeste de los antiguos griegos, si se le mide de acuerdo con ese dato, era un tanto reducido en comparación con los conocimientos actuales.

112 Los cálculos están en mi libro Viajes interplanetarios.

Sabemos que la Luna caería en la Tierra al cabo de 5 días y que el yunque mítico cayó en 9 días. Esto quiere decir que el "cielo" desde el cual cayó el yunque se encuentra más allá de la órbita de la Luna. ¿Estará muy lejos? Si multiplicamos 9 días por √32, sabremos el período de tiempo en que el yunque daría una vuelta alrededor del globo terrestre, como si fuera un satélite de nuestro planeta: 9 x 5,6 = 51 días.

Apliquemos ahora a la Luna y a nuestro yunque-satélite imaginario la tercera ley de Kepler.

Planteemos la proporción:

$$\frac{(Periodo\ de\ revolución\ de\ la\ Luna)^2}{(Periodo\ de\ revolución\ del\ yunque)^2} = \frac{(Semieje\ mayor\ de\ la\ órbita\ de\ la\ luna)^3}{(distancia\ del\ yunke)^3}$$

Sustituyendo por los valores correspondientes, tenemos

$$\frac{(27{,}3)^2}{(51)^2} = \frac{(380.000)^3}{(distancia\ del\ yunke)^3}$$

En donde es fácil calcular la distancia desconocida del yunque a la Tierra:

$$distancia\ del\ yunque = \sqrt[3]{\frac{51^2 \cdot 380.000^3}{27{,}3^2}} = 380.000\sqrt[3]{\frac{51^2}{27{,}3^2}}$$

El cálculo, da el siguiente resultado: 580.000 km.

Vemos, pues, cuán pequeña sería, a juicio de un astrónomo contemporáneo, la distancia a que se encontraba el cielo de los antiguos griegos: en total, una vez y media la distancia que nos separa de la Luna. El mundo de los antiguos terminaba donde, según las ideas actuales; apenas si empieza.

6. Los límites del sistema solar

La tercera ley de Kepler da también la posibilidad de calcular a qué distancia está la frontera de nuestro sistema solar, si se toman como límites de éste los puntos más alejados (afelios) de las órbitas de los cometas. Ya hemos hablado antes sobre esto; ahora haremos el cálculo correspondiente. En el capítulo Tercero hablamos de los cometas que tienen un período de revolución muy largo: 776 años. Calculemos la distancia x del afelio de uno de esos cometas, sabiendo que su distancia menor al Sol, el perihelio, es igual a 1.800.000 km.

Tomemos en calidad de segundo astro a la Tierra y hagamos la siguiente proporción:

$$\frac{(776)^2}{(1)^2} = \frac{\left(\frac{1}{2}(x + 1.800.000)\right)^3}{(150.000.000)^3}$$

de donde:

$$x + 1.800.000 = 2 \cdot 150.000.000\sqrt[3]{776^2}$$

y por consiguiente

$$x = 25.318.000.000 \text{ km}$$

Vemos que el cometa alcanza una distancia 182 veces mayor que la de la Tierra -al Sol, o sea, que llega cuatro veces y media más lejos que el más distante de los planetas conocidos por nosotros, que es Plutón.

7. Un error en una novela de Julio Verne

El cometa imaginario "Galia", en el que Julio Verne desarrolla la acción de su novela Héctor Servadac, da una vuelta completa alrededor del Sol exactamente en dos años[113]. Otra indicación que se encuentra en la novela es la distancia del afelio de este cometa, 820 millones de kilómetros del Sol. Aunque la distancia del perihelio

113 Héctor Servadac. Novela de Jules Verne, publicada por entregas en Magasin d'Education et de Récréation del 1 de enero de 1877 al 15 de diciembre de 1877 y en forma de libro de dos volúmenes el 16 de noviembre de 1877 con el subtítulo Viajes y aventuras a través del mundo solar.

no se indica en la novela, con estos dos datos podemos afirmar que tal cometa no puede existir en nuestro sistema planetario. Esto lo prueba un sencillo cálculo hecho de acuerdo con la tercera ley de Kepler.
Llamemos x a la distancia desconocida del perihelio en millones de km. El eje mayor de la órbita del cometa será x + 820 millones de km, y el semieje mayor

$$(x + 820)/2$$

millones de km. Comparando el período de revolución y la distancia del cometa con el período y la distancia de la Tierra, tenemos, de acuerdo con la ley de Kepler

$$\frac{(2)^2}{(1)^2} = \frac{(x+820)^3}{(2 \cdot 150)^3}$$

de donde:

$$x = -343$$

Un resultado negativo para la magnitud de la menor distancia del cometa al Sol indica que hay alguna discordancia en los datos iniciales del problema. En otras palabras, un cometa con un período de revolución tan corto, 2 años, no podría, alejarse tanto del Sol como se indica en la novela de Julio Verne.

8. ¿Cómo fue pesada la Tierra?

Se cuenta humorísticamente el caso de un hombre ingenuo que se admiraba, más que de ningún otro conocimiento astronómico, de que los sabios supieran cómo se llaman las estrellas. Hablando en serio, la más sorprendente conquista de los astrónomos parecería ser que hayan podido pesar la Tierra y los lejanos astros del cielo. En realidad, ¿de qué manera, en qué balanza pesaron la Tierra y los demás astros?
Empecemos con el peso de la Tierra. Ante todo, digamos qué debe entenderse con la expresión “peso de la esfera terrestre”. Llamamos peso de un cuerpo a la presión

que ejerce sobre su apoyo o a la tensión que ejerce en el punto de que está suspendido. Pero ni uno ni otro de estos conceptos es aplicable al globo terrestre; la Tierra no se apoya en nada ni está suspendida de nada. Es tanto como decir que, en este sentido, la esfera terrestre no tiene peso.

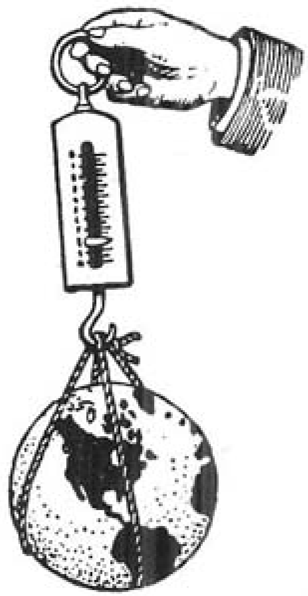


Figura 91. ¿En qué balanza se pudo pesar la Tierra?

¿Qué determinaron, pues, los hombres de ciencia "al pesar" la Tierra? Determinaron su masa. En realidad, cuando nosotros pedimos pesar en el almacén 1 kg de azúcar, en nada nos interesa la fuerza con que el azúcar presiona sobre el platillo o tira del resorte.

Del azúcar nos interesa otra cosa: pensamos solamente en cuántos vasos de té podemos beber con ese azúcar; en otras palabras, nos interesa la cantidad de materia que contiene.

Pero para medir la cantidad de materia hay un único procedimiento: determinar la fuerza con que el cuerpo es atraído por la Tierra. Aceptamos que pesos iguales corresponden a cantidades iguales de materia y juzgamos la masa de un cuerpo sólo por la fuerza con que es atraído, ya que la atracción es proporcional a la masa.

Volviendo al peso de la Tierra diremos qué se determina su "peso" cuando se logra conocer su masa es decir; el problema de la determinación del peso de la Tierra hay que entenderlo como el problema del cálculo de su masa.

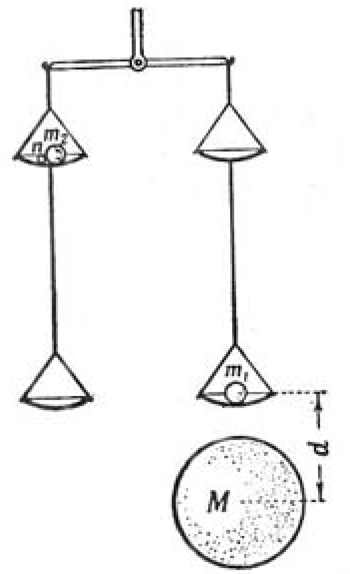


Figura 92. Uno de los procedimientos para la determinación de la masa de la Tierra: la balanza de Jolly

Describamos uno de los procedimientos para resolverlo (método de Jolly, 1871). En la figura 92 se ve una balanza de platillos muy sensible, en la que, de cada uno de los extremos de la cruz, están colgados dos platillos livianos, uno superior y otro inferior. La distancia del superior al inferior es de 20 a 25 cm. En el platillo inferior derecho colocamos una carga esférica de masa m1. Para equilibrarla, en el platillo superior izquierdo colocamos una carga m2. Estas cargas no son iguales, ya que, encontrándose a distinta altura, son atraídas por la Tierra con distinta fuerza.

Si debajo del platillo inferior derecho colocamos una esfera grande de plomo de masa M, entonces el equilibrio de los pesos se altera, ya que la masa m1 será atraída por la masa M de la esfera de plomo con la fuerza F proporcional al producto de estas masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia d que separa sus centros

$$F = k\frac{m_1 M}{d^2}$$

en donde *k* es la llamada constante de gravitación.

Para restablecer el equilibrio alterado, colocamos en el platillo superior izquierdo de la balanza una pequeña carga de masa n. La fuerza con que ella presiona sobre el platillo de la balanza, es igual a su peso, es decir, es igual a la fuerza de atracción que ejerce sobre esta carga la masa toda de la Tierra. Esta fuerza *F'* es igual a

$$F' = k\frac{m_1 M_T}{R^2}$$

donde M_T es la masa de la Tierra y *R* su radio.

Despreciando la ínfima influencia que la presencia de la esfera de plomo ejerce sobre las cargas que se encuentran en el platillo superior izquierdo, podemos escribir la ecuación de equilibrio en la forma siguiente:

$$F = F' = k\frac{m_1 M}{d^2} = k\frac{n M_T}{R^2}$$

En esta relación se pueden medir todas las magnitudes, con excepción de la masa de la Tierra, M_T. Esto permite determinar M_T. En una de las experiencias realizadas se tuvo:

M = 5.775,2 kg, R = 6.366 km, d =56,86 cm, m_1 = 5.000 kg

n = 589 mg

Y, finalmente, la masa de la Tierra resultó ser igual a 6,15 x 10^{27} g. La masa de la Tierra, según numerosos cálculos recientes, basados en un gran numero de mediciones, es: M_T = 5,974 x 10^{27}g, es decir, cerca de 6.000 trillones de toneladas. El error posible de estos cálculos no es mayor de 0,1%.

Así determinaron los astrónomos la masa del globo terrestre. Tenemos pleno derecho a decir que pesaron la Tierra, pues cada vez que pesamos un cuerpo en la balanza de brazos, en realidad no determinamos su peso ni la fuerza con que es atraído por la Tierra, sino su masa: comprobamos solamente qué masa del cuerpo es igual a la masa de las pesas.

9. ¿Cuál es la composición del interior de la Tierra?

Aquí es oportuno señalar un error que se suele encontrar en libros y artículos de divulgación.

Tratando de simplificar la cuestión, los autores exponen el problema del peso de la Tierra de este modo: los sabios determinaron el peso medio de 1 cm3 de nuestro planeta (es decir, su peso específico) y, tras haber calculado geométricamente su volumen, determinaron el peso de la Tierra multiplicando su peso específico por su volumen. El camino indicado, sin embargo, es irrealizable no se puede medir directamente el peso específico de la Tierra, ya que solo podemos acceder a su parte externa, su capa superficial[114], relativamente delgada, y nada sabemos de los materiales que constituyen la parte restante de su volumen, que corresponde a una fracción mucho mayor.

Y sabemos que el problema se resolvió a la inversa: se determinó primero la masa del globo terrestre y luego su densidad media. Ésta resultó igual a 5,5 g por cm^3, valor superior al de la densidad media de las rocas que forman la corteza terrestre, lo cual prueba que en las profundidades del globo terrestre yacen materiales muy pesados. Antes se pensaba, con base en un peso específico supuesto y en otros factores, que el núcleo de nuestro planeta estaba constituido por hierro fuertemente condensado por la presión de la masa que está encima. Actualmente se supone que, en líneas generales, la parte central de la Tierra no se distingue de la corteza por su composición, pero que su densidad es mayor a consecuencia de la gigantesca presión que soporta.

10. El peso del Sol y el de la Luna

Aunque parezca extraño, el peso del lejano Sol resulta mucho más fácil de determinar que el de nuestra vecina la Luna. (Se entiende que tomamos en el mismo sentido convencional la palabra “peso”, en relación con estos astros, que para la Tierra: se trata de la determinación de la masa.)

---

114 Solo se han investigado los minerales de la corteza terrestre hasta una profundidad de 25 km; el cálculo indica que en cuanto a la composición mineralógica, solo se ha estudiado 1/83 del volumen del globo terrestre.

La masa del Sol se determinó mediante el siguiente razonamiento.

La experiencia prueba que 1 g atrae 1 g a la distancia de 1 cm con una fuerza igual a 1/15.000.000 dinas.

La atracción mutua f de los dos cuerpos de masa M y m a la distancia D, de acuerdo con la ley de la atracción universal, se expresa así

$$f = \frac{1}{15.000.000}\frac{Mm}{D^2}\ dinas$$

Si *M* es la masa del Sol (en gramos), *m* la masa de la Tierra (en gramos), *D* la distancia entre ambos (en centímetros), igual a

$$\frac{1}{15.000.000}\frac{Mm}{15.000.000.000.000^2}\ gr$$

Por otra parte, esta fuerza de atracción es la fuerza centrípeta que mantiene a nuestro planeta en su órbita, la cual, de acuerdo con las reglas de la mecánica, es igual a

$$mv^2/D$$

donde *m* es la masa de la Tierra (en gramos), *v* su velocidad circular (igual a 30 km/s = 3.000.000 cm/s) y *D* la distancia de la Tierra al Sol. Por consiguiente,

$$\frac{1}{15.000.000}\frac{Mm}{D^2} = m\frac{3.000.000^2}{D}$$

De esta ecuación resulta, para la incógnita M (expresada, como se dijo, en gramos:

$$M = 2 \cdot 1.033 \text{ gms} = 2 \times 1.027 \text{ toneladas}$$

Dividiendo esta masa por la masa del globo terrestre, es decir, calculando

$$2 \times 1027 / 6 \text{ x } 1021 = 1.000.000 / 3$$

o sea, que la masa del Sol es unas 330.000 veces mayor que la de la Tierra.

Otro procedimiento para la determinación de la masa del Sol está basado en la utilización de la tercera ley de Kepler.

De la ley de la gravitación universal, se deduce la tercera ley en la forma siguiente

$$\frac{(M_s + m_1)T_1^2}{(m_1 + m_2)T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}$$

en donde MS es la masa del Sol, T el período de revolución sinódica[115] del planeta, a la distancia media del planeta al Sol, , a2 la distancia media del satélite al planeta, m1 la masa del planeta y m2 la masa del satélite del planeta. Aplicando esta ley a la Tierra y a la Luna, tenemos

$$\frac{(M_s + m_T)T_T^2}{(m_T + m_L)T_L^2} = \frac{a_T^3}{a_L^3}$$

Sustituyendo a_T, a_L, T_T y T_L, por sus valores, deducidos de observaciones, y despreciando, para una primera aproximación en el numerador la masa de la Tierra (pequeña si se compara con la masa del Sol) y en el denominador la masa de la Luna (pequeña comparada con la masa de la tierra), resulta,

$$M_S / m_T = 330.000$$

Sabiendo la masa de la Tierra, deducimos la masa del Sol. Así, pues, el Sol es un tercio de millón de veces más pesado que la Tierra. Es fácil calcular también la densidad media del globo solar: para esto basta dividir su masa por, su volumen. Resulta que la densidad del Sol es, aproximadamente, cuatro veces menor que la de

115 El *período sinódico* es el tiempo que tarda el objeto en volver a aparecer en el mismo punto del cielo respecto del Sol, cuando se observa desde la Tierra. *(N. del E.)*

la Tierra[116].

Por lo que se refiere a la masa de la Luna, como dijo un astrónomo, "aunque está tan cerca de nosotros, más que todos los demás cuerpos celestes, es más difícil pesarla que pesar a Neptuno, el más alejado (en aquel entonces) de los planetas". La Luna no tiene satélite que ayude a calcular su masa, como acabamos de calcular la masa del Sol. Los hombres de ciencia tuvieron que acudir a otros métodos mucho más complejos, de los cuales citaremos uno solo. Se reduce a la comparación de la altura de las mareas producidas por el Sol con la de las mareas producidas por la Luna.

La altura de las mareas depende de la masa y de la distancia del cuerpo que las produce, y como la masa y la distancia del Sol son conocidas y la distancia de la Luna también, por la comparación de las alturas de las mareas se determina la masa de la Luna. Ya volveremos a este cálculo cuando hablemos de las mareas. Ahora damos solamente el resultado final.

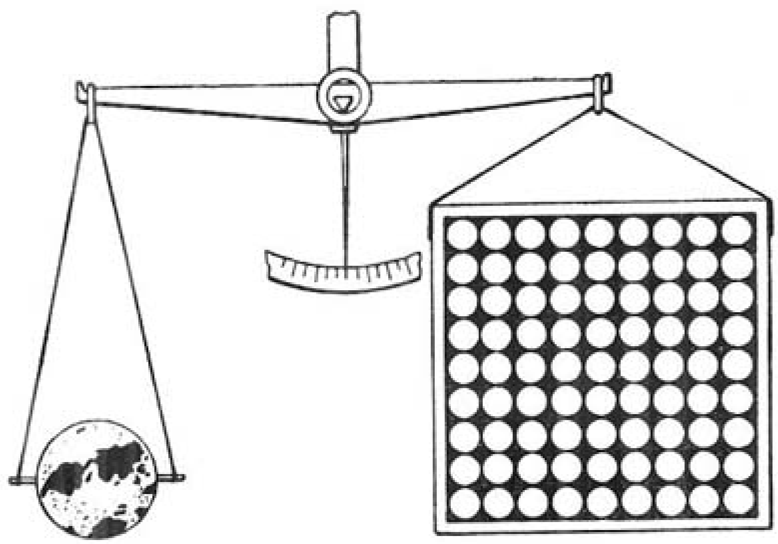


Figura 93. La Tierra "pesa" 81 veces más que la Luna

La masa de la Luna es 1/81 de la masa de la Tierra (figura 93). Sabiendo el diámetro de la Luna, calculamos su volumen: resulta ser 49 veces menor que el

---

116 La densidad de la Tierra se estima en: 5,5153 g/cm^3. La densidad del sol se estima en: 1.411 Kgm/m^3 = 1,4110 g/cm^3. La relación entre estas densidades es: densidad terrestre/densidad solar = 5,5153 g/cm^3 / 1,4110 g/cm^3 =*3,9 ≈ 4. (N. del E.)*

volumen de la Tierra.

De acuerdo con esto, la densidad media de nuestro satélite es 49/81 = 0,6 de la densidad de la Tierra.

Lo cual quiere decir que la Luna está constituida en conjunto por una materia más liviana que la de la Tierra, pero mucho más densa que la del Sol. Luego veremos que la densidad media de la Luna es superior a la densidad media de la mayoría de los planetas.

11. El peso y la densidad de los planetas y de las estrellas

El procedimiento seguido para determinar el "peso" del Sol es aplicable a la determinación del peso de cualquier planeta que tenga por lo menos un satélite.

Sabiendo la velocidad media v del movimiento del satélite por su órbita y su distancia media D al planeta, igualamos la fuerza centrípeta que mantiene al planeta en su órbita,

$$F = \frac{mv^2}{D}$$

con la fuerza de la atracción mutua del satélite y el planeta, es, decir

$$F = k\frac{mM}{D^2}$$

expresión en la que k es la fuerza de atracción de 1 g á 1 g á la distancia de 1 cm, m es la masa del satélite y M la masa del planeta:

$$\frac{mv^2}{D} = k\frac{mM}{D^2}$$

de donde

$$M = Dv^2$$

fórmula con la cual es fácil calcular la masa *M* del planeta.

La tercera ley de Kepler, aplica a este caso, nos da

$$\frac{(M_s + m_p)T_p^2}{(m_p + m_s)T_s^2} = \frac{a_p^3}{a_s^3}$$

Y de aquí, despreciando en los paréntesis los sumandos pequeños, obtenemos la relación de la masa del Sol a la masa del planeta M_S/m_p. Conociendo la masa del Sol, se puede determinar fácilmente la masa del planeta.

Un cálculo semejante es aplicable a las estrellas dobles, con la única diferencia de que entonces, como resultado del cálculo, no se obtiene por separado la masa de cada estrella del par dado, sino la suma de sus masas.

Mucho más difícil es determinar la masa de los satélites de los planetas y, también, la masa de los planetas que no tienen satélites.

Por ejemplo, las masas de Mercurio y de Venus se calcularon partiendo de la influencia perturbadora que ejercen uno sobre otro, sobre la Tierra y sobre el movimiento de unos cometas.

Para los asteroides, cuyas masas son tan pequeñas que no ejercen unas sobre otras, ninguna influencia perturbadora notable, el problema de la determinación de la masa, en general, sigue sin resolver. Sólo se conoce de forma incierta, el límite superior de la masa total de todos estos minúsculos planetas.

Por la masa y el volumen de los planetas es fácil calcular su densidad media. Los resultados se dan en la tabla siguiente:

Densidad de la Tierra = 1	
Mercurio	1,00
Venus	0,92
La Tierra	1,00
Marte	0,74
Júpiter	0,24
Saturno	0,13

Urano	0,23
Neptuno	0,22

La tabla nos dice que la Tierra y Mercurio son los planetas más densos de nuestro sistema[117].

Las reducidas densidades medias de los planetas mayores se explican porque el núcleo central sólido de cada planeta mayor está cubierto por una atmósfera gigantesca que es de masa pequeña, pero que aumenta mucho el volumen del planeta.

12. La gravedad en la Luna y en los planetas

Las personas poco conocedoras de la astronomía manifiestan a menudo asombro porque los hombres de ciencia que no han visitado la Luna y los planetas, hablan en tono seguro sobre la fuerza de la gravedad existente en sus superficies. Es muy fácil, no obstante, calcular cuántos kilogramos deberá pesar una pesa transportada a otro astro. Para esto sólo se necesita conocer el radio y la masa del cuerpo celeste.

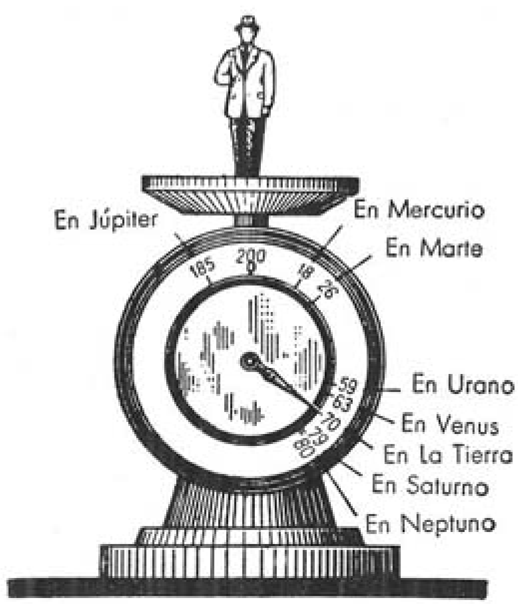


Figura 94. Lo que pesaría un hombre en los distintos planetas[118]

117 La densidad de Plutón –no indicada en el texto original de Y. I. Perelman- oscila entre 0,18 y 0,27, tomando como referencia la densidad de la Tierra = 1.

118 Una persona que pesa 70 Kg en la Tierra (la persona de la figura 94), pesará: 26,4 Kg. en Mercurio; 63,4 Kg. en Venus; 11,6 Kg. en la Luna; 26,5 Kg. en Marte; 177,3 Kg. en Júpiter; 74,6 Kg. en Saturno; 63,3 Kg. en

Determinemos, por ejemplo, la intensidad de la gravedad en la Luna. La masa de la Luna, como sabemos, es 81 veces menor que la masa de la Tierra. Si la Tierra poseyera una masa tan pequeña, la tensión de la fuerza de la gravedad en su superficie sería 81 veces menor que la actual. Pero, de acuerdo con la ley de Newton, una esfera atrae como si toda su masa estuviera concentrada en su centro.
El centro de la Tierra dista de su superficie un radio terrestre; el centro de la Luna dista de su propia superficie un radio lunar[119]. Pero el radio lunar constituye los 27/100 del terrestre, y por la disminución de la distancia 27/100 veces, la fuerza de atracción se aumenta (100/27)2 veces. Esto significa, en resumen, que la fuerza de atracción en la superficie de la Luna es de la terrestre

$$\frac{100^2}{27^2 \cdot 81} \approx \frac{1}{6} \; de\ la\ terrestre$$

Así, una pesa de 1 kg transportada a la superficie de la Luna no pesaría allí más que 1 de kg, pero, naturalmente, la disminución del peso sólo podría ponerse de manifiesto mediante una balanza de resorte (figura 94), y no con una de brazos.
Una curiosidad interesante es que, si en la Luna hubiera agua, un nadador se sentiría en el agua de la Luna igual que en la Tierra. Su peso disminuiría seis veces. Pero como también disminuiría igual número de veces él peso del agua desplazada por él, la relación entre estos pesos sería la misma que en la Tierra y el nadador se sumergiría en el agua lunar lo mismo que en el agua terrestre.
En cambio, el esfuerzo para elevarse sobre el agua le daría en la Luna un resultado mucho mayor; como el peso del cuerpo del nadador disminuye, puede ser levantado con un menor esfuerzo de los músculos.
A continuación se da una tabla del valor de la gravedad en los distintos planetas, en comparación con la Tierra[120].

Urano; 79,3 Kg. en Neptuno; 4,6 Kg. en Plutón; 1.895 Kg. en el Sol. *(N. del E.)*

119 El radio de la Tierra es de 6.371 Km El radio de la Luna es de 1.738 Km Es decir que: Radio de la Luna/Radio de la Tierra = 1.738 Km/6.371 Km = 0,27 = 27/100. *(N. del E.)*

120 La gravedad de un planeta se calcula con la fórmula: $g = G. M / r^2$, siendo: g la gravedad del planeta, M

Mercurio	0,38
Venus	0,91
La Tierra	1,00
Marte	0,38
Júpiter	2,64
Saturno	1,19
Urano	0,93
Neptuno	1,22
Plutón	0,20

Como indica la tabla, la Tierra ocupa en lo tocante a gravedad el cuarto lugar en el sistema solar, después de Júpiter, Neptuno y Saturno[121].

13. Gravedad "record"

La gravedad alcanza su mayor valor en la superficie de aquellas "enanas blancas", del tipo de Sirio B, de que hablamos en el capítulo 4. Se comprende fácilmente que la gigantesca masa de estos astros, en relación con su pequeño radio, debe determinar una fuerza de atracción sumamente intensa en sus superficies. Hagamos el cálculo para la estrella de la constelación de Casiopea cuya masa es 2,8 veces mayor que la masa de nuestro Sol y cuyo radio es dos veces menor que el radio de la Tierra. Recordando que la masa del Sol es 330.000 veces mayor que la de la Tierra, deducimos que la fuerza de la gravedad en la superficie de la estrella mencionada supera la de la Tierra en

$$2,8 \times 330.000 \times 22 = 3.700.000 \text{ veces.}$$

1 cm^3 de agua, que pesa en la Tierra 1 g, pesaría en la superficie de esta estrella casi 3¾ toneladas (!); 1 cm^3 de materia de la misma estrella (que es 36.000.000 de veces más densa que el agua) debe tener, en ese asombroso mundo, el peso

---

la masa del planeta, *r* el radio del planeta y *G* la constante de gravitación universal: $6,67 \times 10^{-11}$ Newton $\times$ m^2/ kg^2. *(N. del E.)*

121 Quien desee conocer más detalladamente las manifestaciones de la gravitación en el universo, encontrará muchas informaciones valiosas en el libro, escrito en un lenguaje al alcance de todos, del profesor K. L. Baev: La gravitación universal, 1936.

excepcional de

$$3.700.000 \times 36.000.000 = 133.200.000.000.000 \text{ g.}$$

Una pizca de materia que pesa más de cien millones de toneladas; he aquí una curiosidad sobre cuya existencia en el universo no pensaban hasta hace poco ni los más audaces fantaseadores.

14. La gravedad en el interior de los planetas

¿Cómo variaría el peso de un cuerpo si fuera transportado a las profundidades de un planeta, por ejemplo, al fondo de una mina de extraordinaria profundidad?
Muchos creen erróneamente que en el fondo de esta mina el cuerpo debería hacerse más pesado, pues está más cerca del centro del planeta, es decir, del punto hacia el cual son atraídos todos los cuerpos. Este razonamiento, sin embargo, no es correcto: la fuerza de atracción hacia el centro del planeta no crece con la profundidad, sino que, a la inversa, disminuye. En mi Física recreativa, podrá encontrar el lector una explicación de este fenómeno, al alcance de todos. Para no repetir lo allí dicho, me limitaré a indicar lo que sigue.

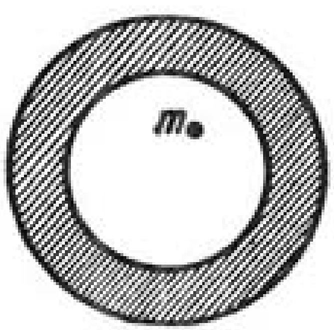


Figura 95. Un cuerpo que se halle dentro de una capa esférica, no tiene peso

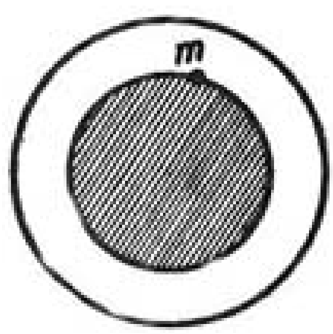


Figura 96. ¿De qué depende el peso del cuerpo en el interior del planeta?

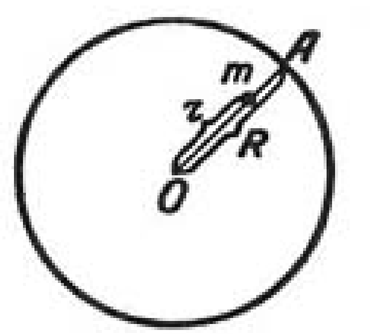


Figura 97. Cálculo de la variación del peso de un cuerpo como consecuencia de su acercamiento al centro del planeta

En mecánica se demuestra que un cuerpo situado en la cavidad de una capa esférica homogénea está totalmente desprovisto de peso (figura 95). De donde se deduce que un cuerpo que se encuentra dentro de una esfera maciza y homogénea, sólo está sujeto a la atracción de la porción de materia comprendida en la esfera de radio igual a la distancia del cuerpo al centro (figura 96).

Apoyándose en esto, es fácil deducir la ley según la cual varía el peso de un cuerpo a medida que se aproxima al centro del planeta. Llamemos R al radio del planeta (figura 97); y r a la distancia del cuerpo al centro del planeta. La fuerza de atracción del cuerpo en este punto deberá crecer veces

$$(R/r)^2 \text{ veces}$$

y al mismo tiempo disminuir

$$(R/r)^3 \text{ veces}$$

ya que la parte del planeta que ejerce atracción disminuye este número de veces (R), es decir, r veces. En conclusión, la fuerza de atracción deberá disminuir

$$(R/r)^3 / (R/r)^2$$

es decir,

$$(R/r) \text{ veces}$$

Esto significa que en el interior de los planetas el peso de un cuerpo debe disminuir tantas veces cuantas disminuya su distancia al centro. Para un planeta de las dimensiones de la Tierra, que tiene un radio de 6.400 km, un descenso de 3.200 km debe acompañarse de una reducción del peso a la mitad; un descenso de 5.600 km, de una reducción del peso igual a

$$6.400/(6.400 - 5.600)$$

es decir, ocho veces.
En el centro mismo del planeta, el cuerpo debería perder su peso por completo, ya que

$$6.400/(6.400-6.400) = \infty$$

Por otra parte, este resultado era de prever sin necesidad de cálculo, puesto que en el centro del planeta el cuerpo es atraído en todos los sentidos con la misma fuerza, por la materia que lo rodea.
Los razonamientos anteriores se refieren a un planeta imaginario homogéneo en cuanto a densidad. A los planetas verdaderos sólo se pueden aplicar con reserva. En particular, para el globo terrestre, cuya densidad en las capas profundas es mayor que cerca de la superficie, la ley de la variación de la gravedad con la aproximación al centro se aparta algo de lo que acabamos de decir: hasta cierta profundidad (relativamente no muy grande), la atracción crece, y sólo para las profundidades siguientes empieza a disminuir.

15. El problema del barco
Pregunta
¿Cuándo pesa menos un barco, en una noche con Luna o en una noche sin Luna?

Solución
El problema es más complejo de lo que parece. No se puede contestar inmediatamente que en una noche con Luna el barco, como todos los objetos que se hallan en la mitad del globo terrestre iluminada por ella, debe ser menos pesado que en una noche sin Luna porque la "Luna lo atrae". Pues, al mismo tiempo que atrae al barco, la Luna atrae también a toda la Tierra.
En el vacío, todos los cuerpos sometidos a la gravitación se mueven con la misma velocidad; la Tierra y el barco reciben por efecto de la atracción de la Luna aceleraciones iguales, y no debería manifestarse una disminución del peso del barco. Y, sin embargo, el barco iluminado por la Luna es más liviano que en una noche sin Luna.

Expliquemos por qué. Sea *O* (figura 98) el centro del globo terrestre, A y B el barco en puntos diametralmente opuestos de la esfera, *r* el radio de la esfera y *D* la distancia del centro *L* de la Luna al centro *O* del globo terrestre.

Llamaremos *M* a la masa de la Luna y *m* a la masa del barco. Para simplificar el cálculo, tomemos los puntos A y B de modo que la Luna se encuentre para ellos, respectivamente, en el cenit y en el nadir.

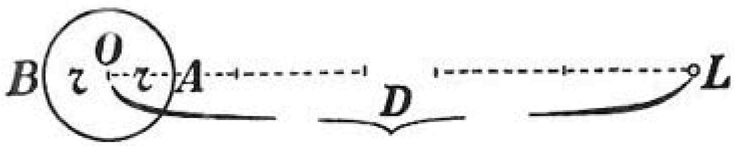


Figura 98. El efecto de la atracción lunar sobre las partículas del globo terrestre

La fuerza con que la Luna atrae al barco en el punto A (es decir, en una noche con Luna) es igual a

$$F = k\frac{mM}{(D-r)^2}$$

donde k = 1/15.000.000

En el punto B en una noche sin Luna), el mismo barco es atraído por la Luna con la fuerza

$$F = k\frac{mM}{(D+r)^2}$$

la diferencia de ambas atracciones es igual a

$$kmM\frac{4r}{D^3\left[1-\left(\frac{r}{D}\right)^2\right]^2}$$

Como $(r/D)^2 = (1/60)^2$ es una magnitud muy pequeña, se puede despreciar. De este modo, la expresión se simplifica mucho y toma la forma

$$kmM\frac{4r}{D^3}$$

que transformamos así:

$$\frac{kmM}{D^2}\frac{4r}{D}=\frac{kmM}{D^2}\frac{1}{15}$$

¿Qué representa $\frac{kmM}{D^2}$?

Se comprende fácilmente que es la fuerza con que la Luna atrae al barco a la distancia D de su centro.

En la superficie de la Luna, el barco cuya masa es igual a *m* pesa *m*/6

A la distancia D de la Luna, es atraído por ésta con la fuerza $m/6D^2$. Como D = 220 radios lunares, se tiene que

$$\frac{kmM}{D^2}=\frac{m}{6\cdot 220^2}\approx\frac{m}{300.000}$$

Volviendo ahora al cálculo de la diferencia de las atracciones, tenemos

$$\frac{kmM}{D^2}=\frac{m}{6\cdot 220^2}\approx\frac{1}{300.000}\frac{m}{4.500.000}$$

Si el peso del barco es de 45.000 toneladas, la diferencia entre el peso de una noche con Luna y el de una noche sin Luna es igual a

45.000.000 / 4.500.000 = 10 kg

Resulta, pues, que en una noche con Luna el barco pesa menos que en una noche sin Luna, aunque una cantidad insignificante.

16. Las mareas lunares y solares

El problema que acabamos de examinar nos ayuda a comprender la causa fundamental de las mareas. No se debe pensar que la ola de la marea se eleva simplemente porque la Luna o el Sol atraen directamente al agua. Ya hemos explicado que la Luna atrae no sólo lo que se encuentra sobre la superficie de la Tierra, sino toda la esfera terrestre. Lo cierto es, sin embargo, que el astro que ejerce la atracción está más lejos del centro de la Tierra que de las partículas de agua que se hallan en la cara de la Tierra que mira hacia la Luna. La diferencia entre las fuerzas de atracción se calcula del misma modo que calculamos antes la diferencia entre las fuerzas de atracción en el caso del barco. En un punto en cuyo cenit está la Luna.

Cada kilogramo de agua es atraído por ella con

$$\frac{2kMr}{D^3}$$

más fuerza que un kilogramo de materia en el centro de la Tierra, y el agua situada en un punto diametralmente opuesto de la Tierra, con tanta menos fuerza.

Como consecuencia de esta diferencia el agua se eleva en ambos casos sobre la superficie sólida de la Tierra: en el primero, porque el agua se desplaza más hacia la Luna que la parte sólida del globo terrestre; en el segundo, porque la parte sólida de la Tierra se desplaza hacia la Luna más que el agua[122].

Una acción parecida ejerce también sobre el agua del océano la atracción del Sol. Pero ¿cuál de las acciones es más fuerte: la del Sol o la de la Luna? Si se comparan sus atracciones por separado resulta que la acción del Sol es más fuerte. En efecto, la masa del Sol es 330.000 veces mayor que la masa de la Tierra; la masa de la Luna es 81 veces menor, o sea, es menor que la solar 330.000 x 81 veces. La distancia del Sol a la Tierra es igual a 23.400 radios terrestres, y la de la Luna a la Tierra, a 60 radios terrestres. Esto quiere decir que la atracción que sobre la Tierra ejerce el Sol con respecto a la atracción que ejerce la Luna es igual a

122 Aquí se indica solamente la causa fundamental del flujo y el reflujo; en conjunto el fenómeno es más complejo, pues está condicionado también por otras causas (efecto centrífugo de la rotación del globo alrededor del centro común de las masas de la Tierra y la Luna, etc.).

$$\frac{\frac{330.000}{23.400^2}}{\frac{1}{60^2}} \approx 170$$

Así pues, el Sol atrae todos los objetos terrestres con fuerza 170 veces mayor que la Luna.

Se podría pensar por esto que las mareas solares son más altas que las lunares. En realidad, sin embargo, se observa lo contrario: las mareas lunares son mayores que las solares. Esto concuerda totalmente con el cálculo si se aplica la fórmula

$$\frac{2kMr}{D^3}$$

Si llamamos MS a la masa del Sol, ML a la masa de la Luna, DS a la distancia del Sol y DL a la de la Luna, la relación entre las fuerzas del Sol y de la Luna que engendran las mareas será

$$\frac{\frac{2kM_Sr}{D_S{}^3}}{\frac{2kM_Lr}{D_L{}^3}} = \frac{M_s}{M_L}\frac{D_s^3}{D_L^3}$$

Supongamos que la masa de la Luna es conocida e igual a 1/80 de la masa de la Tierra.

Sabiendo que el Sol está 400 veces más lejos que la Luna tenemos:

$$\frac{M_s}{M_L}\frac{D_s^3}{D_L^3} = 330.000 \cdot 81 \frac{1}{400^3} = 0{,}42$$

Lo cual significa que las mareas producidas por el Sol deben ser aproximadamente 21 veces más bajas que las lunares.

Es oportuno exponer aquí la forma en que, por comparación de las alturas de las mareas lunares y solares, fue determinada la masa de la Luna. Observar separadamente la altura de unas y otras mareas no es posible; el Sol y la Luna siempre actúan en conjunto. Pero se puede medir la altura de las mareas cuando las acciones de ambos astros se suman (es decir, cuando la Luna y el Sol están colocados en línea recta con la Tierra) y cuando dichas acciones se oponen (la recta que une al Sol con la Tierra es perpendicular a la recta que une a la Luna con la Tierra). Las observaciones mostraron que en el segundo caso las mareas son de altura igual a 0,42 de las primeras. Si la fuerza de la Luna que engendra las mareas es igual a x, y la del Sol a y, tenemos la proporción

$$(x + y) : (x - y) = 100 : 42$$

de donde

$$x : y = 71 : 29$$

Como la masa del Sol, M_S = 330.000 M_T, (M_T es la masa de la Tierra), de la última anterior se deduce fácilmente que la masa de la Luna es 1/80 de la masa de la Tierra.

17. La Luna y el estado del tiempo

Muchas personas se interesan por el problema de saber cuál es la influencia que sobre la presión atmosférica pueden ejercer las mareas producidas por la Luna en el océano aéreo de nuestro planeta. El problema tiene una larga historia. Las mareas de la atmósfera terrestre fueron descubiertas por el gran sabio ruso N. V. Lomonósov[123], que las llamó "olas aéreas". Se han ocupado de estas olas muchos hombres de ciencia; sin embargo, existen ideas erróneas muy extendidas sobre el papel que desempeñan las mareas aéreas. Los no especializados creen que en la ligera y móvil atmósfera de la Tierra, la Luna provoca gigantescas olas de marea, que cambian sensiblemente la presión de la atmósfera y que, por tanto, deben tener un efecto decisivo en la meteorología.

---

123 Mikhail Vasilievich Lomonósov (1711 - 1765). Poeta, científico y gramático ruso, considerado el primer gran reformador de la lingüística rusa. También realizó valiosas contribuciones a las ciencias naturales, reorganizó la Academia Imperial de Ciencias de San Petersburgo, fundó en Moscú la Universidad que hoy lleva su nombre, y creó los primeros mosaicos de vidrio de colores de Rusia. *(N. del E.)*

Esta opinión es completamente errónea. Se puede demostrar teóricamente que la altura de la marea atmosférica no supera la altura de la marea en medio del océano. Esta afirmación resulta desconcertante, pues si el aire, incluso en las capas inferiores más densas, es casi mil veces más ligero que el agua, ¿cómo es posible que la atracción lunar no lo levante a una altura mil veces mayor? Sin embargo, esto no es más paradójico que las velocidades iguales con que caen en el vacío los cuerpos de pesos diferentes.

Recordemos el experimento que se hace en las escuelas con el tubo al vacío, dentro del cual una bolita de plomo cae al mismo tiempo que una pluma. El fenómeno de la marea, en fin de cuentas, viene a ser como una caída en el espacio universal del globo terrestre y sus capas más livianas por efecto de la gravitación de la Luna (y del Sol). En el vacío sideral todos los cuerpos, los pesados y los ligeros, caen con la misma velocidad, reciben de la fuerza de gravitación la misma aceleración, si son iguales sus distancias al centro de atracción.

Lo dicho nos lleva a pensar que la altura de las mareas atmosféricas deberá ser la misma que la de las mareas oceánicas lejos de las costas. En realidad, si reparamos en la fórmula que sirve para calcular la altura de las mareas, vemos que en ella figuran solamente las masas de la Luna y de la Tierra, el radio del globo terrestre y las distancias de la Tierra y de la Luna. Ni la densidad del líquido que se levanta, ni la profundidad del océano, entran en esta fórmula. Si remplazamos el océano de agua por el aire, no alteramos el resultado del cálculo y obtenemos para la marea atmosférica la misma altura que para la marea oceánica.

Sin embargo, esta última es insignificante. La altura teórica de la mayor marea en mar abierto es de medio metro aproximadamente, y sólo la configuración de las costas y del fondo, al estrechar la ola de la marea, la levantan en algunos puntos aislados hasta diez metros o más. Hay aparatos muy interesantes para la predicción de la altura de la marea, en un sitio dado y en cualquier momento, según las posiciones del Sol y de la Luna.

En el inmenso océano del aire nada puede alterar el cuadro teórico de la marea lunar y cambiar su máxima altura teórica, que es de medio metro. Una elevación tan pequeña sólo puede ejercer en la magnitud de la presión atmosférica una influencia de poca importancia.

Laplace, que se ocupó de la teoría de las mareas aéreas, llegó a la conclusión de que las oscilaciones de la presión atmosférica debidas a ellas, no deben ser mayores de 0,6 mm en la columna de mercurio, y que el viento producido por las mareas atmosféricas puede alcanzar una velocidad no mayor de 7,5 cm/s.

Resulta evidente que las mareas aéreas no pueden desempeñar ningún papel importante como factores del clima.

Estos razonamientos muestran la falta de fundamento de los intentos de los diversos "profetas de la Luna", de predecir el tiempo por la posición de nuestro satélite en el cielo.