X

# LOS MÉTODOS EN ASTRONOMÍA

**Cómo se miden las distancias de los astros, cómo se calculan sus volúmenes y sus pesos.**

Es creencia general, que nada es tan difícil como comprender los métodos empleados para obtener tan maravillosos resultados. ¡Estamos tan lejos de los astros! ¿Cómo el habitante de un hormiguero tan minúsculo como el de la Tierra puede medir alturas inaccesibles, determinar las verdaderas distancias de esos mundos lejanos, medir sus volúmenes, calcular sus pesos y descubrir hasta su constitución física y química?

Tales métodos son muy sencillos, mucho menos complicados que gran nómero de cosas muy vulgares de la vida terrestre, y basta regular atención para comprenderlos. Desde luego la cues-

tión lo merece, y bien se puede comprar al precio de un ligero esfuerzo de inteligencia el deleite de comprender las más grandes leyes de la naturaleza.

Dediquemos antes de pasar más adelante algunos segundos á la geometría.

Para medir las distancias, se utilizan ángulos, y no de medida determinada, como el metro, por ejemplo. En efecto, la magnitud aparente de un objeto, depende de su dimensión real y de su distancia. Decir, por ejemplo, que la Luna nos parece grande como un plato (lo cual he oido decir á menudo á los auditores de mis cursos populares), no da idea suficiente de su tamaño. Muchas personas que se admiran del resplandor de una estrella errante, ó de un bólido, suelen describir su observación asegurando que el meteoro debía tener un metro de largo y un decímetro de ancho en su extremo anterior. Tales expresiones no satisfacen del todo á las condiciones del problema.

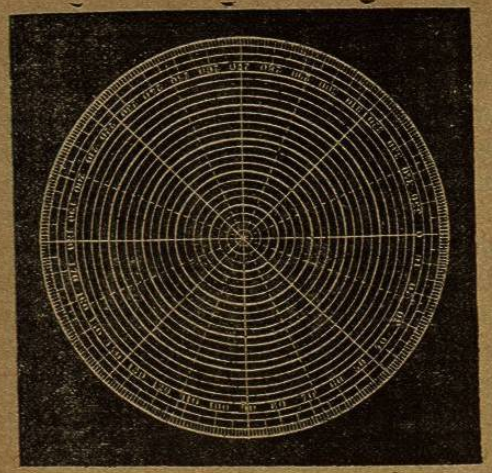
Cuando no se conoce la distancia á un objeto, y ese es el caso general para los astros. no hay más que un solo medio para expresar su tamaño aparente: medir el ángulo que ocupa; si después se puede medir la distancia, combinando ésta con el tamaño aparente, se encuentra la dimensión real.

La medida de toda distancia y de toda magnitud, está íntimamente ligada á la del ángulo. Para un ángulo dado, el tamaño corresponde exactamente á la distancia. Para una distancia dada, la magnitud real corresponde igualmente al ángulo medido. Se concibe, pues, fácilmente que la medida de los ángulos sea el primer paso de la geometría celeste. Aquí se realiza el viejo proverbio. «Nada hay tan difícil como el primer paso». En efecto, el examen de un ángulo no tiene nada de poético ni de seductor, pero no por eso es absolutamente desagradable y fastidioso. Todo el mundo sabe lo que es un ángulo, tal como lo representa la figura, y que la medida de un ángulo se expresa en partes de la circunferencia.

**Un ángulo.**

La circunferencia se ha dividido en 360 partes, que se llaman *grados*, por lo cual la semicircunferencia representa 180 grados; la cuarta parte, ó ángulo recto, 90 grados.

Un grado es, pues, la 360ª partesde una circunferencia. He aquí una medida independiente de la distancia. Sobre una mesa de 360 centímetros de contorno, un grado es un centímetro, visto desde el centro de la mesa. Un grado tiene de longitud la 57ª parte del radio del círculo, ó de la distancia al centro. Ese es un principio geométrico que importa no olvidar.



División de la circunferencia en 360 grados.

El ángulo no cambia con la distancia, y, por tanto, un grado medido sobre el cielo ó sobre cualquier cuerpo. es siempre un grado.

Como á menudo es preciso medir ángulos más pequeños que el de un grado, se ha convenido en dividir éste en 60 partes, á las cuales se ha dado el nombre de minutos. Cada una de esas partes ha sido igualmente dividida en otras 60, llamadas segundos. Tales denominaciones no tienen nada que ver con los minutos y los segundos de la medida del tiempo.

Acabamos de aprender bien fácilmente lo que



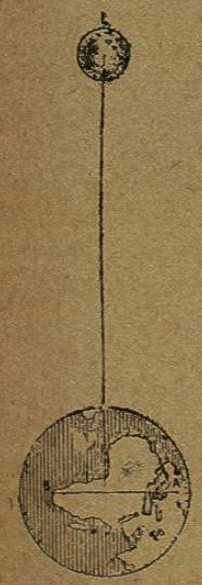
es un ángulo. Pues bien, como el disco de la Luna mide 31' 8" (31 minutos 8 segundos) de diámetro, es decir, un poco más de medio grado, se necesitaría una cadena de 344 lunas llenas para dar la vuelta al cielo, de un punto del horizonte al diametralmente opuesto.

Si queremos ahora darnos cuenta de las relaciones que ligan las dimensiones reales de los objetos á las aparentes, nos bastará observar que todo objeto parece tanto más pequeño cuanto más lejos se halla; y cuando está á la distancia de 57 veces su diámetro, cualesquiera que sean sus dimensiones reales, mide exactamente un ángulo de un grado. Por ejemplo, un círculo de un metro de diámetro, mide un grado si se le ve á 57 metros de distancia. La Luna mide un poco más de medio grado, por lo que se reduce que está alejada de nosotros un poco menos del doble de 57 veces su diámetro, ó sea 110 veces.

Pero esta noción no nos enseñaría nada aun acerca de la *distancia real* ni de las *dimensiones reales* del astro de la noche, si no pudiéramos medir directamente la distancia.

Esta distancia está apreciada hace *dos mil años*, con una aproximación notable; pero á mediados del siglo último, en 1752, fué determinada definitivamente por dos astrónomos, observando en dos puntos muy distantes uno de otro: en Berlín y en

el Cabo de Buena Esperanza. Esos dos astrónomos fueron dos franceses, Lalande y Lacaille. Consideremos un instante la figura. La Luna está arriba y la Tierra abajo. El ángulo formado por la Luna será tanto más pequeño, cuanto más distante se encuentre, y el conocimiento de este ángulo nos dará *el diámetro aparente que la Tierra presenta, vista desde la Luna.*



Medida de la distancia á la Luna.

Ahora bien; el semidiámetro de la Tierra visto desde la Luna, es inferior á un grado. Esto *prueba* que la distancia de la Luna es de 60 1/4 semidiámetros ó radios de la Tierra (60,27). En números redondos es treinta veces el espesor de la Tierra. Como el radio terrestre es de 6.371 kilómetros, esta distancia es, pues, de 384.000 kilómetros ó 96.000 leguas de á cuatro kilómetros.

Se puede afirmar que esta distancia así calculada por la geometría, se ha determinado con precisión mayor que la que se admite en la medición de las distancias terrestres, tales como la longitud de una carretera ó de un



camino de hierro. Aunque esta afirmación parezca exagerada á muchos, es muy cierto que la distancia que separa la Tierra de la Luna en un momento cualquiera, es más exactamente conocida que la longitud del camino de París á Marsella. (Podríamos agregar, sin comentarios, que los astrónomos verifican con mucha más precisión y tienen más conciencia en sus mediciones que los comerciantes más escrupulosos).

El conocimiento de la distancia de la Luna nos permite calcular su volumen exacto por la medida de su volumen aparente. El semidiámetro de la Tierra visto desde la Luna mide 57 minutos, y el simediámetro de la Luna visto desde la Tierra mide 15' 34"; y como los diámetros de estos dos globos están entre sí en la misma proporción, haciendo el cálculo exacto, se encuentra que el diámetro de nuestro satélite está con el de la Tierra en la relación de 273 á 1.000; es un poco más del cuarto de diámetro de nuestro mundo, el cual mide 12.732 kilómetros. El diámetro de la Luna es, por consiguiente, de 3.484 kilómetros.

Acabamos de ver cuán sencillo es el procedimiento para determinar la distancia á la Luna, pero no puede utilizarse para calcular la distancia al Sol, por ser ésta demasiado grande. El diámetro entero de la Tierra no es suficiente para formar la base del triángulo. Supongamos que se

trazan de dos extremidades diametralmente opuestas del globo terrestre, dos líneas al centro del Sol; estas dos líneas estarían casi en contacto en la mayor parte de su longitud, por ser el diámetro de la Tierra un punto con relación á ellas. No habría, pues, triángulo ni medida posible. De aquí al astro del día hay cerca de 12.000 veces el diámetro de la Tierra, es como si se pretendiera construir un triángulo tomando por lado una línea de un milímetro de longitud y en cada extremidad se trazaran dos líneas rectas á un punto situado á 12 metros de distancia; se comprende que esas líneas serían casi paralelas y que los dos ángulos que formarían en la base del triángulo serían casi rectos.

Ha sido preciso eludir la dificultad y se han descubierto seis métodos diferentes para resolver el problema.

El primero es el de pasos de Venus por delante del Sol. Hemos dicho ya que Venus está más cerca del Sol que nosotros y circula en derredor del astro central, describiendo una órbita interior á la nuestra. Ahora bien; cuando Venus pasa precisamente entre el Sol y la Tierra, dos observadores colocados en dos extremidades de nuestro globo, no la ven proyectarse sobre el mismo punto del Sol; la diferencia de los dos puntos conduce al conocimiento de un ángulo que da la distancia del Sol.



Supongamos que dos observadores estén colocados en las dos extremidades de un diámetro terrestre; cada cual verá á Venus seguir un camino diferente delante del Sol. Simple fenómeno de perspectiva. Extendiendo la mano y levantando el índice verticalmente, nos ocultará tal objeto cuando cerremos el ojo izquierdo y miremos con el derecho, y tal otro, si cerramos el derecho y miramos con el izquierdo. Para el ojo derecho se proyectará hacia la izquierda; para el ojo izquierdo se proyectará hacia la derecha. La diferencia de las proyecciones depende de la distancia á que colocamos nuestro dedo. En esta comparación familiar, la distancia que separa las dos retinas son los dos observadores; nuestro índice representa Venus, y las dos proyecciones de nuestro dedo los lugares diferentes. Desde los cuales los astrónomos ven el planeta sobre la superficie del Sol. Para que la comparación fuese completa, sería mejor, en lugar de extender el dedo, tener un alfiler de cabeza bien gruesa, á distancia del ojo, de tal suerte, que su cabeza se proyectase sobre un disco de papel, colocado á varios metros, y después mover esta cabeza de alfiler delante del disco, mirándola sucesivamente con uno y otro ojo.

Este método de pasos de Venus delante del Sol, no es el único empleado para calcular la distancia del astro radiante; varios otros muy diferentes, é

independientes, han sido aplicados á la misma investigación, y sus resultados se verifican mutuamente. Daremos de ellos una idea ligera.

Los dos primeros se fundan en la velocidad de la luz. Se ha comprobado que la luz emplea cierto tiempo en transmitirse de un punto á otro, y que para venir, por ejemplo, de Júpiter á la Tierra, emplea de 30 á 40 minutos, según la distancia del planeta. Examinando los eclipses de los satélites de Júpiter, se ha observado que hay 16 minutos y 26 segundos de diferencia, entre los momentos de llegada cuando Júpiter está del mismo lado del Sol que la Tierra, á cuando se halla al lado opuesto. La luz emplea, pues, 16 minutos 26 segundos en cruzar el diámetro de la órbita terrestre; es decir, la mitad, ú 8 minutos y 13 segundos para venir del Sol, situado en el centro. Mas como los físicos han medido directamente esta velocidad, y han calculado que es de 300.000 kilómetros por segundo, se deduce que la distancia de aquí al Sol, es próximamente 149.000.000 de kilómetros.

Otro método, fundado también en la rapidez de la luz, puede darnos esa distancia. Un ejemplo muy conocido nos lo hará comprender perfectamente. Supongámonos colocados bajo una lluvia vertical; si estamos inmóviles, tendremos nuestro paraguas verticalmente; pero si andamos, lo inclinaremos hacia delante, y si corremos, lo inclinaremos aún más. El grado de inclinación de nuestro paraguas dependerá de la relación de la velocidad de nuestra marcha, con las de las gotas de agua. Se observa el mismo efecto en un tren, por las líneas oblícuas que hace la lluvia en las portezuelas, y cuya oblicuidad es la resultante del movimiento del tren, combinado con la caída de las gotas. Lo mismo sucede con la luz. Los rayos luminosos son lanzados de las estrellas á través del espacio; la Tierra se mueve con gran velocidad, y nosotros nos vemos obligados á inclinar los telescopios en la dirección que la Tierra gira. Es el fenómeno de la aberración de la luz, el cual muestra que la velocidad de nuestro planeta sobre su órbita, es diez mil veces menor que la de la luz. Se puede, pues, calcular por la velocidad de la luz la de la Tierra, encontrándose que viene á ser 30 kilómetros por segundo, y también determinar la longitud de la órbita recorrida en 365 días, y, finalmente, el diámetro de esta órbita y su mitad, que es precisamente la distancia al Sol.



El cuarto método nos lo facilitan los movimientos de la Luna. La regularidad del movimiento mensual de nuestro satélite está alterada por la atracción del Sol; pero como la atracción varía en razón inversa del cuadrado de la distancia, se concibe que, analizando escrupulosamente la ac-

ción del Sol sobre la Luna, se pueda llegar á conocer la distancia al astro del día.

El quinto método, puede deducirse de las masas de los planetas, cuyos movimientos están íntimamente ligados á la masa del Sol y á su distancia. Las influencias planetarias producen perturbaciones sensibles en las observaciones; cuando las masas han sido determinadas por un método independiente, la magnitud de las pertubaciones da á conocer las distancias.

El sexto método lo ofrece la observación de Marte y de los pequeños planetas exteriores á la Tierra; estos planetas pasan delante de las estrellas lejanas, y situadas, por decirlo así, detrás de ellos, en el infinito, y si se observan sus posiciones desde dos países de la Tierra muy alejados uno de otro, se proyectan en dos puntos diferentes. La separación angular de los puntos indica la distancia de la Tierra á Marte ó á los otros planetas observados.

Todas esas medidas concuerdan con precisión notable. La distancia al Sol es de 11.700 veces el diámetro de la Tierra; es decir, en números redondos 149.000.000 de kilómetros.

Conocida la distancia al Sol, nada es más sencillo que calcular su dimensión real, valiéndose de la aparente, exactamente como lo hemos visto para la Luna. El diámetro de la Tierra, visto desde el Sol, es de 17", 6 y el del Sol, visto desde la Tierra, es de 32 4"; es decir, en segundos 1.924". Tal es, pues, la relación entre los dos diámetros. Dividiendo el último número por el primero, resulta que le contiene 108 veces y media (108,55). Queda, pues, *demostrado*, que el diámetro real del Sol mide 108 veces y media, 12.732 kilómetros; es decir, 1.382.000 kilómetros.



El mismo principio geométrico se aplica para medir distancias á las *estrellas*. En este problema la dimensión del globo terrestre no puede servir de base al triángulo, como en la medida de la distancia á la Luna, y la dificultad no puede ser eludida como en el caso del Sol, con el auxilio de otro planeta. Pero felizmente, para nuestro juicio, sobre las dimensiones del Universo, la construcción del sistsma del mundo ofrece un medio de medida para esas lejanas perspectivas, y ese medio, al mismo tiempo que demuestra una vez más el movimiento de traslacíón de la Tierra en derredor del Sol, se utiliza para la solución de los más altos problemas astronómicos.

En efecto, la Tierra girando alrededor del Sol á la distancia de 37.000.000 de leguas, describe al año una circunferencia (en realidad es una elipse) de 241.000.000 de leguas. El diámetro de la órbita es, pues, de 74.000.000 de leguas, Como la revolución de la Tierra dura un año, nuestro plane-

ta está, en cualquier momento que se considere, en el punto opuesto al en que se hallaba seis meses antes, y del punto en que estará seis meses más tarde. En otros términos: la distancia de un punto cualquiera de la órbita terrestre, al punto en que pase con seis meses de intervalo, es de 74.000.000 de leguas, y esa es una longitud respetable, que puede servir de base á un triángulo que tenga po vértice la estrella.

El procedimiento para medir la distancia de una estrella consiste en observar minuciosamente ese pequeño punto brillante con seis meses de intervalo, ó más bien durante un año entero, y ver si la estrella permanece fija ó bien si sufre algún movimiento aparente de perspectiva, por la traslación anual de la Tierra alrededor del Sol. Si queda fija, es por hallarse á una distancia casi infinita de nosotros, pues 74.000.000 de leguas son como cero con relación á esa distancia. Si se ha movido, se comprueba que ha descrito una pequeña elipse durante el año, reflejo de la traslación anual de la Tierra.

Hasta el año de 1840 no se ha empezado á conocer la distancia de algunas estrellas. El descubrimiento es reciente, y ahora empezamos á formarnos idea aproximada de las distancias reales que separan las estrellas entre sí.

Se puede comprender fácilmente, por el examen de la figura que publicamos, la relación que une

Pequeñas elipses aparentes descritas por las estrellas en el cielo á consecuencia del movimiento anual de la Tierra.

la distancia de una estrella al ángulo observado. El ángulo con que se ve de frente el diámetro de la órbita terrestre, es tanto más pequeño cuanto más alejada esté la estrella, y el movimiento aparente de la estrella que refleja en perspectiva el movimiento real de la Tierra, disminuye en la misma proporción. Así, la estrella más baja de esta figura muestra un movimiento anual efectuado en un espacio angular de 20 grados, la segunda en uno de 15 grados y la más elevada un uno de 11 grados. De la relación geométrica ya citada resulta inmediatamente la distancia. Las proporciones de la figura son muy exageradas,

porque el ángulo de un grado corresponde á 57 veces el tamaño de la base. Luego el movimiento angular de la estrella más próxima, no es de dos segundos; en la escala adoptada para esta figura, la estrella más cercana de nosotros debería hallarse á lo menos a 100.000 veces la base de nuestro triángulo, que es de dos centímetros, es decir, á dos kilómetros, por lo cual sería difícil de colocar tal figura en una obra.

La estrella más cercana á nosotros es la alfa de la constelación Centauro, que está á 275.000 veces la distancia de nosotros al Sol, es decir, á 10.000 millares de leguas de nuestra mansión terrestre. A pesar de su inimaginable rapidez de 300.000 kilómetros por segundo, la luz marcha, corre, vuela, durante cuatro años y 128 días, para venir de ese Sol hasta nosotros. El sonido emplearía más de tres millones de años para franquear ese abismo. A la velocidad constante de 60 kilómetros por hora, *un tren expreso no llegaría al sol alfa del Centauro, sino después de una carrera no interrumpida de cerca de setenta y cinco millones de años.*

Para formar un puente de aquí al Sol, serían necesarios 16.600 arcos del ancho de la Tierra; y para llegar á otro Sol, el más cercano, sería preciso reunir 275.000 puentes del tamaño citado, y colocarlos uno tras otro. Y esta es nuestra estrella *vecina*; las demás están más alejadas... hasta el infinito.



Tales son los métodos empleados para medir las distancias y las dimeusiones de los astros. Se ve que son geométricos, y que, cuando se conoce el procedimiento, es imposible dudar de la exactitud de los resultados.

Pesar los mundos es también muy sencillo.

¿Cómo, por ejemplo, se ha pesado la Luna?

El peso de la Luna se determina por el análisis de los efectos atractivos que produce sobre la Tierra. El primero y el más evidente de esos efectos, es la *marea.* El agua de los mares se sleva dos veces al dia, obedeciendo al llamamiento silencioso de nuestro satélite. Estudiando con precisión la altura de las aguas, se encuentra la intensidad de la fuerza necesaria para levantarlas, y, por consiguiente, el poder, el peso (que es lo mismo), de la causa que los produce; he ahí un primer método.

Otro método se funda en la influencia que la Luna ejerce sobre los movimientos del globo terrestre; cuando está delante de la Tierra, atrae nuestro globo y lo hace marchar más aprisa; cuando se encuentra detrás, por el contrario, le retarda. Por la posición del Sol se ve este efecto en el primero y último cuarto; el astro parece que se ha mudado en el cielo la 290ª parte de su diámetro.

Por esta mudanza se calcula también la masa de la Luna.

El tercer método está basado en el cálculo de la atracción que la Luna ejerce en el ecuador, y que produce los fenómenos astronómicos de la nulación y de la precesión de los equinocios.

*Todos estos métodos se verifican entre sí y han probado que la masa de la Luna es 81 veces más pequeña que la de la Tierra.*

Así, *la Luna pesa 81 veces menos que nuestro globo.* Su peso es aproximadamente 74 sextrillones de kilogramos; los materiales que la componen son menos densos que los que constituyen la Tierra, próximamente su densidad es 0,6 de la de los nuestros. Comparada con el agua, la Luna pesa 3,27, es decir, tres veces y un cuarto más que un globo de agua de las mismas dimensiones.

Se nos puede preguntar de la misma manera, *cómo se ha pesado el Sol.* He aquí un método.

Ya hemos visto que los planetas circulan con tanta menos rapidez, cuanto más alejados estén del Sol: la ley de esta disminución de velocidad, se expresa por la fórmula siguiente: los cuadrados de los tiempos de revolución son entre sí como los cubos de las distancias. O dicho en otra forma: Un cuerpo situado dos veces más lejos que otro, gira en un período indicado por la raíz cuadrada de 8 (cubo de 2); un cuerpo cuatro veces más alejado



por la raíz cuadrada de 64 (cubo de 4), y así sucesivamente. ¿Queréis adivinar, por ejemplo, cuánto tiempo una Luna situada á distancia doble que la nuestra giraría alrededor de la Tierra? El cálculo es fácil: 2 por 2 por 2 igual á 8; la raíz cuadrada de 8 es 2,84; luego giraría 2,84 veces más lentamente, es decir, en sesenta y siete días.

Para conocer la diferencia que existe entre la atracción de la Tierra y la del Sol, es preciso deducir en cuánto tiempo giraría en derredor de nosotros un cuerpo situado á 149 millones de kilómetros, que es 385 veces la distancia á la Luna. Hagamos el cálculo, 385 por 385 por 385 igual á 57.066.625; la raíz cuadrada de este número es 7.553; esta luna giraría, pues, alrededor nuestro, 7.553 veces menos veloz que la luna actual, es decir, en 206.330 días, ó en 566 años.

Si los valores de las masas directoras se juzgasen solamente por el tiempo de las revoluciones, puesto que la Tierra sólo tendría fuerza para hacer girar un satélite en 566 años, y como el Sol puede hacer girar á la Tierra en un año (á la misma distancia de 149 millones de kilómetros), deduciríamos inmediatamente que el Sol es sólo 566 veces más poderoso que la Tierra. Pero no son los períodos los que deben compararse, sino los períodos multiplicados por sí mismos.

Multipliquemos, pues, 566 por sí mismo, y en-

contraremos en números redondos 320.000 para relación aproximada entre la masa del Sol y la de la Tierra. Si hubiésemos tenido en cuenta las decimales y las fracciones, habríamos encontrado 324.000.

*Sabemos, pues, matemáticamente, que el Sol pesa 324.000 veces más que la Tierra.*

Puesto que la Tierra pesa 5.875 sextrillones de kilogramos, como hemos dicho, el Sol pesa 324.000 veces más, ó sean 1.900 octillones, ó, en números redondos, dos nonillones de kilogramos. Como se ve, todo es muy sencillo.

Los planetas se pesan de la misma manera, por la velocidad del movimiento de sus satélites alrededor de ellos; los que no tienen satélites han sido pesados por la atracción que ejercen sobre los otros planetas ó sobre los cometas.

Las estrellas se pesan igualmente cuando se puede observar la revolución de otra estrella regida por su atracción. Así, pues, medir y pesar los astros no es un mito, sino verdadera realidad.

XI

# DESCRIPCIÓN DE LOS PLANETAS DE NUESTRO SISTEMA

Examinemos ahora en detalle, en un rápido viaje astronómico, cada uno de los mundos que constituyen nuestra gran familia celeste. Es natural empezar el viaje por el centro del sistema, por el planeta más próximo al foco; es decir, por Mercurio.

## MERCURIO

Mercurio es, como ya hemos dicho, el primer planeta que se encuentra, partiendo del Sol: á 15 millones de leguas. Su órbita, siendo interior á la de la Tierra, unas veces se halla entre el Sol y nosotros, otras del otro lado del Sol, con relación á nuestro globo, otras formando ángulo recto, etc. Resulta, pues, que sus fases son análogas á las de la Luna, viéndose con auxilio del telescopio. Cuando está entre el Sol y la Tierra no podemos verlo en el cielo, porque tiene entonces un hemisferio obscuro vuelto hacia nosotros (no brilla co-