

enfoque nace, posiblemente, de motivos psicológicos, y tiene sus raíces en nuestra dificultad en imaginar un «plano» (que se extiende hasta el infinito y que, por ello, representamos, incluso mentalmente, como una especie de hoja plana rectangular finita) en comparación con la facilidad de «visualizar» un punto. Sería ciertamente fascinante examinar, con profundidad y extensión adecuadas, si esta limitación de nuestra percepción es una cualidad inherente de nuestra mente o bien una tendencia adquirida, y cómo influye en nuestra imagen de la realidad externa (por ejemplo, su responsabilidad en el retraso del descubrimiento de la Mecánica Cuántica).

[5] Debería aconsejarse a los jóvenes licenciados que se dediquen, si son ambiciosos, a las investigaciones cristalográficas. Hasta 1985 ya se habían concedido 21 Premios Nobel a físicos y químicos asociados con rayos X y con cristales, a pesar de que por entonces se contaba con unos diez mil cristalógrafos (Physics Today, Dec. 1986).

[6] Este relato abarca hasta 1914 y el protagonista era tan sólo Max Laue, aunque tuviese ya un gran prestigio, pues, entre otras cosas, había escrito la primera monografía completa y rigurosa sobre la teoría de la relatividad: *Das Relativitätssprinzip*, Vieweg, Braunschweig, 1907 (que el propio Einstein confesaba no entender del todo). En 1914 el padre de Max, recibía un título nobiliario por el que podía añadir el «von» delante del apellido. A partir de esta fecha ya tendrá que hablarse de Herr Professor Max von Laue.

Antonio Bernalte Miralles
Depto. de Física de los Materiales

La UNED y el radio de La Tierra

El geógrafo, poeta, filósofo, músico, matemático y astrónomo griego ERATÓSTENES (*Σπρατοσθένης*), que nació en Cirene el año 276 antes de J.C. y que vivió en Atenas hasta que su fama hizo que Tolomeo

Evergetes lo llamara para dirigir la biblioteca de Alejandría, donde murió hacia el año 195 antes de J.C., además de proporcionarnos la famosa «criba» que utilizábamos en el bachillerato para construir la tabla de los números primos, de inventar la esfera armilar y de idear el calendario juliano, fue el primero que midió el radio terrestre. Hoy, más de dos mil años después, nos disponemos a rememorar su experimento utilizando la red de Centros Asociados de la UNED.

Cuando Eratóstenes hizo su medida, utilizó las dos hipótesis siguientes:

- La Tierra es redonda.
- El Sol se encuentra muy lejos de ella, de manera que los rayos que alcanzan su superficie pueden considerarse paralelos.

Si escogemos los puntos 1 y 2 de la superficie terrestre (ver

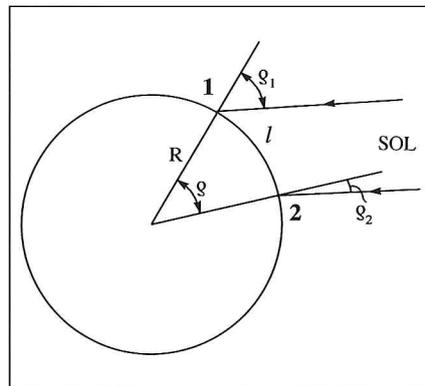


Figura 1.

Figura 1) de manera que se encuentren sobre el mismo meridiano, la determinación de los ángulos ρ_1 y ρ_2 , que forman los rayos del Sol con las respectivas verticales en el mismo instante del día, permite obtener el ángulo $\rho = \rho_1 - \rho_2$, diferencia de ambos, que corresponde al arco de meridiano definido por dichos puntos. Si se mide la longitud l de este arco (distancia entre los puntos 1 y 2 sobre la esfera) la relación entre ρ y l nos permite determinar el radio R de La Tierra:

$$R = \frac{l}{\rho}$$

Para garantizar la simultaneidad de las medidas, lo más adecuado es determinar los ángulos en el instante en que el Sol pasa por su altura máxima durante el día, ya que esto corresponde al paso por el meridiano del lugar.

En aquella época se conocía el hecho de que en la ciudad de Asuán, situada al sur de Alejandría sobre su mismo meridiano, un día del año, en el solsticio de verano, se veía la imagen del Sol reflejada en el agua de un pozo profundo. Esto quería decir que los rayos solares coincidían en ese momento con la vertical del lugar (ver Figura 2), y el ángulo medido en Alejandría a la misma

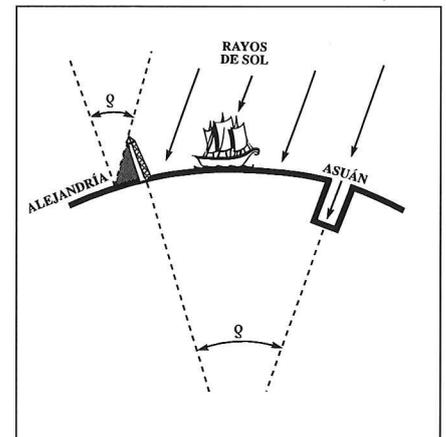


Figura 2.

hora era, precisamente, el ángulo ρ correspondiente al arco Alejandría-Asuán.

Este ángulo fue determinado midiendo la longitud L de la sombra de un obelisco de altura H conocida ($\text{tg } \rho = L/H$) y resultó ser de $7,2^\circ$.

La distancia Alejandría-Asuán fue calculada midiendo el tiempo que tardaban unos soldados en cubrirla. Los datos que quedan de la época indican que su valor era de 5.000 estadios, una unidad de medida que, desgraciadamente para nuestra historia, no sabemos exactamente a qué corresponde en metros. Si se tratase del estadio egipcio, que vale 157,5 m, resultaría un valor para el radio de la Tierra de $R = 6.267$ km extraordinariamente próximo al admitido actualmente: $R = 6.378$ km. Pero si el estadio a que se refiere Eratóstenes fuera el griego,

que podía oscilar entre 177 m y 185 m, el resultado sería peor.

Lo que nos proponemos actualmente es repetir la medida utilizando lugares que no se encuentren necesariamente en el mismo meridiano. En este primer intento hemos colaborado los Profesores **Nicolás Betancor** (C. A. de Las Palmas), **Julio Rodríguez** (C. A. de Pontevedra), **Fernando Sendra** (C. A. de Denia), **Christian Wagner** (C. A. de Cádiz) y yo mismo en la Sede Central en Madrid.

Lo que hemos hecho es seguir la evolución de la sombra de un palo vertical, de uno o dos metros de altura, en un día predeterminado. De esta manera se conoce la tangente del ángulo que forman los rayos solares con la vertical en función del tiempo. En la Figura 3 se indica un ejemplo de resultado.

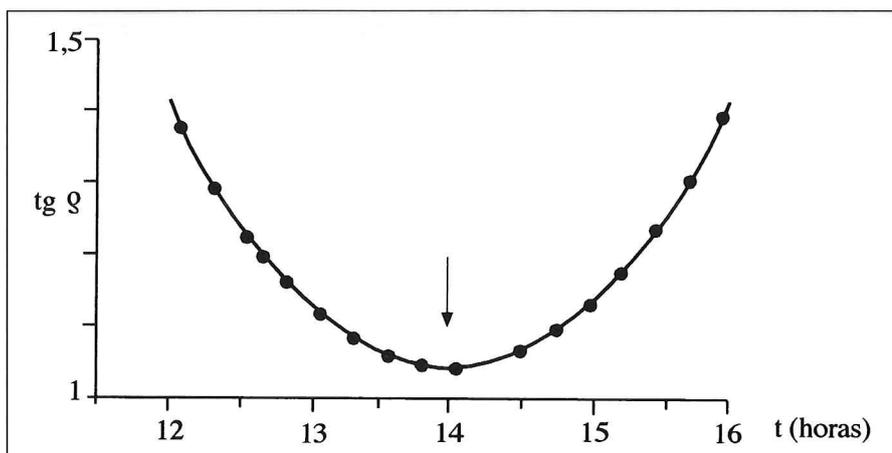


Figura 3.

El mínimo de la curva permite determinar la hora del paso del Sol por el meridiano del lugar y el ángulo que forman sus rayos con la vertical en ese instante. Este ángulo es el mismo para todos los lugares que se encuentran en el mismo paralelo. Por consiguiente, si hacemos esta medida en dos puntos, **1** y **2**, que no pertenezcan al mismo meridiano (ver Figura 4), determinando sobre el mapa la distancia del punto **1** al **2'** (cruce del paralelo del punto **2** con el meridiano del punto **1**) o del punto **2** al punto **1'** (cruce del paralelo del punto **1** con el meridiano del punto **2**), podemos obtener el radio de La Tierra como lo hizo Eratóstenes.

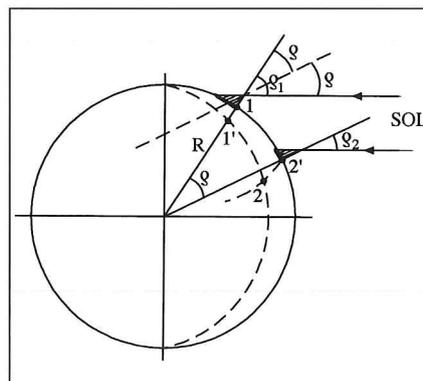


Figura 4.

Hay que advertir que al utilizar los mapas actuales hacemos una pequeña trampa, puesto que dichos mapas han sido realizados haciendo uso del valor del radio terrestre. En definitiva, lo único que hacemos nosotros es determinar la diferencia de latitud entre los puntos **1** y **2**, que es la misma cualquiera que sea el

El ángulo ρ , diferencia entre las latitudes de las dos ciudades, es, por consiguiente: $\rho = 12,7^\circ \pm 0,4^\circ$. Como la distancia entre los respectivos paralelos, medida en el mapa, es de unos 1.370 km, el valor del radio de La Tierra que se obtiene resulta ser:

$$R = 6.200 \text{ km} \pm 200 \text{ km}$$

Aunque el resultado es alentador, nosotros no estamos del todo satisfechos y nos proponemos repetir la experiencia invitando a todos los lectores a participar en ella. Nuestro plan de trabajo es el siguiente:

- A partir de la salida de la revista (probablemente al final de la primavera del 97) todos los primeros sábados y domingos de mes seguiremos la evolución de la inclinación de los rayos solares tres horas antes y tres horas después del paso del Sol por el meridiano del lugar¹. Este proceso lo repetiremos a lo largo de todo el curso 97/98.

- Se tomarán también medidas en los solsticios de verano (hacia el 21 de junio) y de invierno (hacia el 21 de diciembre).

- Los datos obtenidos por los participantes deben ser enviados al buzón de la Revista de la Facultad de Ciencias, Sección *Taller y Laboratorio*, para proceder a su análisis.

Para aquéllos que se animen a participar queremos hacerles dos recomendaciones a la hora de tomar las medidas:

- Los errores más importantes provienen de la determinación del extremo de la sombra del palo y de su verticalidad. Esto último se resuelve utilizando la plomada, pero lo primero resulta un poco más complicado. Confiamos en el ingenio de los lectores para resolverlo.

- Es conveniente tomar medidas cada media hora al principio y al

¹ No es preciso hacerlo los dos días; basta con tomar las medidas uno de ellos.

radio de la esfera, mientras que Eratóstenes medía también el arco de meridiano. Su medida era absoluta y la nuestra es sólo la comprobación de que La Tierra es redonda.

Desgraciadamente, debido a inconvenientes meteorológicos, en este primer intento no pudimos realizar el mismo día más que las medidas de Las Palmas y Madrid, que se efectuaron el 16 de noviembre de 1996. Los resultados se indican en la Tabla siguiente:

Ciudad	Hora de paso por el meridiano	Ángulo (°)
Las Palmas	13 ^h 50 ^{min}	46,2 ± 0,1
Madrid	13 ^h 4 ^{min}	58,9 ± 0,3

final de la operación, y cada cuarto de hora cuando estamos cerca del mínimo. A partir de los puntos experimentales se determinará la hora de paso del Sol por el meridiano, que varía a lo largo del año, y la inclinación de sus rayos en dicho instante.

Esperamos que este experimento colectivo encuentre suficientes seguidores entre los lectores de la revista para poder hacer honor al título de este artículo: *La UNED y el radio de La Tierra*.

Manuel Yuste Llandres
Depto. de Física de los Materiales

Sonoluminiscencia

Motivados por sendos artículos publicados en la revista *Investigación y Ciencia* de abril de 1995 ([1] y [2]), hemos considerado la posibilidad de reproducir el fenómeno de la *sonoluminiscencia*. Nos ha interesado, además del fenómeno en sí, el hecho de que «aún desafie incluso una explicación heurística» [3] y la simplicidad del dispositivo experimental, que permitiría reproducirlo en los laboratorios de un Primer Ciclo de la Licenciatura en Ciencias Físicas.

DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO

La sonoluminiscencia es un fenómeno, descubierto hace más de sesenta años, que entraña la conversión de energía acústica en energía luminosa. Se puede definir como la emisión de pulsos de luz por una o varias burbujas de aire en el agua, cuando sobre ellas actúa una onda sonora de una frecuencia correspondiente a los ultrasonidos. Para producir la sonoluminiscencia se necesita sobrepasar un cierto umbral de presión de la onda sonora, que está en torno a 1,3 atm. La duración de los pulsos de luz es del orden de algunas decenas de picosegundo

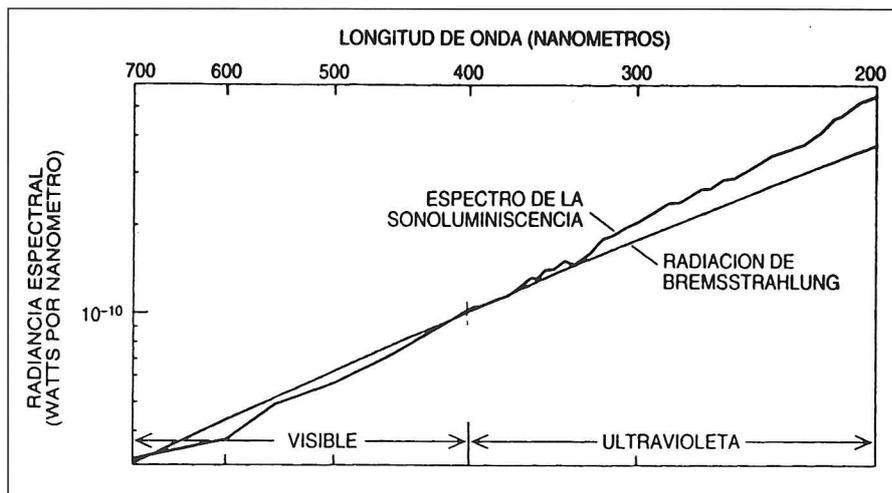


Fig. 1. Espectro de la sonoluminiscencia.

[4]. La burbuja luminosa puede apreciarse a simple vista.

Para estudiar más cómodamente los factores que intervienen en el fenómeno, se ha conseguido aislar una sola burbuja en el centro de un matraz esférico lleno de agua, en el que se establece una onda esférica sonora resonante que comprime y expande la burbuja. Durante esta expansión-compresión se produce la emisión luminosa en forma de pulsos, cuya repetición coincide con la frecuencia sonora y cuyo espectro viene indicado en la Figura 1. Este espectro es continuo y la intensidad luminosa emitida aumenta paulatinamente desde el rojo hasta el ultravioleta, no observándose ningún máximo por encima de 200 nm.

Se piensa que la sonoluminiscencia es un fenómeno asociado a la cavitación, es decir, a la implosión de la burbuja por la acción de la onda sonora [3]. Durante la compresión, en el interior de la burbuja se forma una onda de choque debido a que a partir de un cierto instante la velocidad radial de la pared de la burbuja supera a la del sonido. La aparición de la onda de choque es la que provocaría la emisión luminosa.

Dos son los mecanismos que se proponen para explicar esta emisión:

Modelo de radiación de frenado (bremsstrahlung): dadas las condiciones físicas imperantes en el inte-

rior de la burbuja (presión y temperatura muy elevadas), se produce una disociación de los átomos del gas; entonces la onda de choque que implosiona cumple un doble papel: por una lado es la responsable del calentamiento del gas y, por otro, al rebotar y atravesar el plasma que se forma frena bruscamente a los iones que radian energía siguiendo un patrón bremsstrahlung.

Modelo de cuerpo negro: debido a la compresión de la burbuja, el núcleo de ésta alcanza unas condiciones extremas de presión y temperatura similares a las del interior de una estrella [5]. Tenemos entonces un núcleo muy caliente y una envoltura más fría responsable de la emisión.

El primer mecanismo es el que actualmente cuenta con un mayor consenso entre los grupos que investigan el fenómeno.

Entre las muchas peculiaridades de la emisión sonoluminiscente cabe mencionar tres: en primer lugar, la intensidad de la luz depende crucialmente de la temperatura del agua, aumentando de una manera importante cuando esta temperatura disminuye por debajo de la temperatura ambiente; en segundo lugar, se ha podido apreciar una dependencia parecida frente a la presencia de trazas de gases nobles; y, por último, existe una fuerte dependencia del fenómeno frente a ligeras variaciones de la presión de la onda sonora excitadora, de su frecuencia o del radio inicial de la burbuja.