Papeles Salmantinos de Educación -Núm. 2, 2003-
Facultad de Pedagogía, Universidad Pontificia de Salamanca

Experiencia en el aula del Movimiento Browniano

Un fenómeno para intuir la agitación molecular bajo el microscopio.

Alejandro del Mazo Vivar

RESUMEN: *Cuando en la primera mitad del siglo XIX Robert Brown descubrió con su microscopio el movimiento caótico de granos de polen suspendidos en agua no pudo imaginar la trascendencia de tan humilde fenómeno. Ocho décadas más tarde, Albert Einstein demostró que ese movimiento era consecuencia de la agitación molecular y abrió el camino para calcular la constante de Avogadro.*

INTRODUCCIÓN

En el año 1827, el botánico inglés Robert Brown, mientras examinaba granos de polen bajo el microscopio, observó que presentaban movimientos aleatorios. En un principio Brown pensó que aquel movimiento podía tratarse de un fenómeno vital. En una época en la que aún se admitía de forma casi unánime que los fenómenos orgánicos y los físico-químicos eran de naturaleza totalmente diferente, de modo que los primeros obedecían a una "fuerza vital", resultaba razonable esa primera interpretación. Pero poco después el propio Brown tuvo ocasión de observar una gota de agua retenida en el interior de un fragmento de cuarzo. Aunque cualquier hecho vital quedaba descartado en aquella gota que había permanecido quizá durante miles de años aislada del exterior, existían pequeñas partículas microscópicas dotadas del mismo movimiento que los granos de polen. Este hecho llevó a Brown a descartar las causas vitales y a admitir que el fenómeno obedecía a razones físicas. A pesar de la aparente insignificancia del movimiento, su interpretación llegó a ser un elemento clave en el conocimiento de la estructura de la materia.

El brillante desarrollo de la Física durante el siglo XIX en campos como la termodinámica y el electromagnetismo se basó sobre todo en el uso de representaciones continuas de la materia y de la energía. Frente a esta visión de la materia que tantos éxitos cosechaba, algunos físicos y químicos iban contracorriente en la defensa de un atomismo que parecía no estar en condiciones de hacer aportaciones significativas al

Universidad Pontificia de Salamanca

conocimiento del mundo material. No era infrecuente la alusión a átomos y moléculas en los escritos de muchos químicos decimonónicos; algunos detractores de esta hipótesis recurrían a la idea de átomo y molécula por sus posibilidades didácticas en la comprensión de los procesos químicos, lo que no significa que admitieran su existencia real. Ciertos físicos como Rudolf Clausius, James C. Maxwell y Ludwig Boltzmann, convencidos de la existencia real de estas partículas, elaboraron teorías cinéticas con las que explicaban con éxito las propiedades macroscópicas de los gases a partir del movimiento aleatorio de un sinnúmero de moléculas. En 1859 Maxwell demostró que la viscosidad de los gases podía interpretarse haciendo uso de la hipótesis molecular y algo más tarde, en 1865, Joseph Loschmidt hizo una estimación del diámetro de las moléculas y encontró que el número de éstas contenido en un mol es del orden de 10^{23}. Contra los esfuerzos de estos físicos "atomistas" se alzaba la oposición de la escuela "energetista", que representaba el punto de vista de la mayoría de los físicos. Los energetistas, influenciados por la filosofía positivista, consideraban que el concepto de energía era lo suficientemente potente como para explicar por sí solo todos los fenómenos naturales, por lo que resultaba innecesaria la introducción de elementos discontinuos que no eran accesibles a la observación. A pesar de esta resistencia, a finales del siglo XIX parecía cada vez más evidente que tras los fenómenos químicos, eléctricos y aquellos que conciernen a los fluidos, se ocultaba la acción de partículas microscópicas inaccesibles a cualquier medio de observación de la época.

Tras haber esbozado el estado de la cuestión molecular en el siglo XIX hemos de retomar el asunto del movimiento browniano. Descartado el origen vital de ese movimiento, las primeras hipótesis recurrieron a las pequeñas corrientes de convección del líquido. Pero aun tomando precauciones para evitar los desequilibrios térmicos, el movimiento seguía produciéndose; además, el movimiento de cada partícula era independiente de las demás, y se mostraba tanto más activo cuanto menor era el tamaño de las partículas. En la segunda mitad del siglo XIX Christian Wiener y William Ramsay sugirieron de forma independiente que el movimiento podía estar producido por el continuo bombardeo de las moléculas del líquido sobre las partículas en suspensión. En el año 1905 Albert Einstein propuso una teoría para explicar el movimiento al que se verían sometidas partículas microscópicas suspendidas en un líquido. El estudio hacía uso explícito de la teoría cinético-molecular, que en esa época aún era rechazada por científicos de primera línea. En el primer párrafo de su artículo, titulado "Sobre el movimiento de partículas pequeñas suspendidas en líquidos en

Universidad Pontificia de Salamanca

reposo exigido por la teoría cinético-molecular del calor" sugiere la posibilidad de que el movimiento browniano responda a esta interpretación.

> En este artículo se demostrará que, de acuerdo con la teoría cinético-molecular del calor, cuerpos de un tamaño microscópico visible, suspendidos en líquidos deben realizar, como resultado de los movimientos moleculares térmicos, desplazamientos de tal magnitud que pueden ser observados fácilmente con un microscopio. Es posible que los movimientos que van a discutirse aquí sean idénticos al denominado movimiento molecular browniano; sin embargo, los datos de los que dispongo sobre el último son tan imprecisos que no podría emitir un juicio sobre la cuestión [1].

El estudio de Einstein conducía a una ecuación que permitía hallar la constante de Avogadro siempre que fueran conocidas algunas variables como la temperatura, el radio de las partículas en suspensión y el desplazamiento cuadrático medio. La principales dificultades que Einstein encontraba para contrastar su ecuación eran la determinación precisa de la temperatura y del desplazamiento cuadrático medio. Por suerte, el ultramicroscopio inventado por Richard Zsigmondy en aquella época ayudó a resolver el problema. A través de una serie de minuciosas medidas realizadas por Jean Perrin poco después del trabajo de Einstein, fue posible obtener un valor para la constante de Avogadro coherente con las medidas obtenidas por otras vías. Otros trabajos llevados a cabo por Perrin de forma independiente, basados en la distribución vertical de partículas en suspensión en un líquido, condujeron a un valor de $6{,}82 \cdot 10^{23}$ para la constante de Avogadro.

Tras la publicación de estos estudios en el año 1908, la realidad de las moléculas parecía estar ya fuera de toda duda. El golpe de gracia a los detractores de esta realidad vendría tras los resultados del experimento de difracción de los rayos X sobre sustancias cristalinas, llevado a cabo por Max von Laue en 1912; pero éste es otro asunto.

* * * *

1 EINSTEIN, Albert: "Uber die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen", *Annalen der Physik und Chemie*, 17, 1905, p.549 . [En STACHEL, J.(ed): *Einstein 1905: un año milagroso. Cinco artículos que cambiaron la física*, Crítica, Barcelona, 2001, p 81.].

Universidad Pontificia de Salamanca

Alejandro del Mazo Vivar

EL MOVIMIENTO BROWNIANO EN LA PRÁCTICA

1. MOVIMIENTO DE PARTÍCULAS EN AGUA

Material

La observación del movimiento browniano de partículas sólidas en agua es muy sencilla. A continuación se indica el material básico, así como el material complementario en el caso de que se quieran hacer observaciones más refinadas u observaciones colectivas.

Material básico

- Microscopio.
- Sistema de iluminación (en el caso de que el microscopio no lo lleve ya incorporado).
- Vidrio portaobjetos.
- Lámina cubreobjetos.
- Vaso de precipitados de 25 ml o bien, recipiente pequeño.
- Pincel.
- Cuentagotas.
- Acuarela o témpera.

Material complementario

- Ocular con retícula para el microscopio.
- Hoja de papel milimetrado o cuadriculado.

Para observaciones colectivas

- Cámara de vídeo, o bien, una pequeña cámara unida a un brazo flexible que se acopla muy fácilmente al ocular del microscopio. La mayoría de las casas de material didáctico ofrecen estas cámaras en sus catálogos.
- Adaptador para conectar la cámara al microscopio.
- Soporte fotográfico o trípode. Resulta útil cuando hay dificultades para unir de forma rígida la cámara al microscopio
- Televisor.
- Hoja de acetato.
- Rotulador para pláticos

Universidad Pontificia de Salamanca

Observación básica

Se pone en el vaso de precipitados un poco de agua. Con el pincel se toma una pequeñísima cantidad de pintura de acuarela o témpera y se dispersa en el agua del vaso. El agua debe presentar sólo una ligera turbidez.

Con el cuentagotas se pone una o dos gotas en un portaobjetos y se tapa con un cubreobjetos. Al examinar con un objetivo de 40X y el diafragma del condensador muy cerrado se ven partículas del pigmento que se mueven de manera aleatoria. Se pone de manifiesto que el grado de agitación de las partículas guarda una relación inversa con el tamaño; el movimiento browniano es muy acusado con partículas de pigmento cuyo tamaño se encuentra al límite de poder resolutivo del microscopio.

Observación avanzada

Para dibujar el desplazamiento de una partícula pueden seguirse dos vías, según sea una observación directa, a través del ocular, o a través del televisor.

1º.- Si se dispone de un ocular de entre 10X y 15X, dotado de un retículo cuadriculado se elige una partícula bajo el microscopio y cada diez segundos se traslada a un papel milimetrado su posición, uniéndola con la posición anterior. Al cabo de veinte o veinticinco tomas se obtiene una representación parecida a lo que se muestra en la figura 1.

2º.- Cuando existe la posibilidad de contar con una cámara de vídeo se realiza el montaje representado en la figura 2 y se examina la imagen sobre un monitor o pantalla de televisión. Se elige una partícula pequeña de modo que su movimiento sea claramente perceptible en la pantalla. Sobre ésta se fija con cinta adhesiva una hoja de acetato y cada diez segundos se marca la posición. Al cabo de unas cuantas tomas tendremos sobre la hoja de acetato el desplazamiento de la partícula.

2. MOVIMIENTO DE PARTÍCULAS EN EL AIRE

En las sustancias gaseosas las moléculas apenas presentan interacciones entre sí, al tiempo que se encuentran en estado de continua agitación. Por ello, cualquier partícula con tamaño suficientemente pequeño que se encuentre en suspensión en un gas presentará un movimiento browniano muy intenso.

Universidad Pontificia de Salamanca

La combustión incompleta de algunas sustancias produce con frecuencia humo. Éste es una dispersión coloidal de partículas sólidas en aire. Dado el pequeño tamaño de las partículas coloidales cabe esperar que las partículas de humo sean excelentes objetos para la observación de este movimiento. Sin embargo, se presenta el problema de que el tamaño de estas partículas se encuentra por debajo del poder de resolución del microscopio óptico. Esto significa que si se examina una disolución coloidal dirigiendo la luz en la dirección del eje óptico del microscopio (figura 3A), lo que en microscopía se denomina iluminación de campo claro, nada se observa. Pero si se dirige la iluminación en dirección perpendicular al eje óptico del microscopio (figura 3B) -iluminación de campo oscuro- la luz directa de la fuente no entra en el objetivo sino únicamente la luz difundida por los objetos. En consecuencia, sobre un fondo oscuro se observan puntos brillantes que corresponden a las partículas coloidales. Este microscopio, recibe el nombre de *ultramicroscopio* (figura 3). El fenómeno es parecido al que permite ver las partículas de polvo en una habitación oscura cuando penetra un rayo de luz por una rendija.

El éxito de un ultramicroscopio reside en que la fuente de iluminación sea muy intensa, ya que sólo una pequeñísima parte resulta difundida. Una forma muy sencilla de conseguir un haz de luz intenso y paralelo consiste en el empleo de un puntero láser. Con un poco de habilidad manual no es difícil construir un sistema de iluminación ultramicroscópica adaptable a cualquier sencillo microscopio. El sistema que propongo y que describiré a continuación puede admitir variantes y, sin duda, el lector interesado podrá encontrarlas sin dificultad.

En la figura 4A se muestra el aparato. Mediante la succión realizada por una jeringuilla, se lleva a una pequeña cámara el humo producido por un cigarrillo. A través de una ventana lateral de la cámara se ilumina el humo con láser. La luz difundida por las partículas de humo es observada mediante un microscopio por otra ventana superior.

Para la construcción del aparato se parte de un soporte en forma de T, que puede ser de metacrilato. Sobre él se pega la cámara de humo y el soporte para el puntero láser. Para la cámara de humo se utiliza un prisma de bakelita, metacrilato o PVC de 2,5 cm x 2,5 cm x 1,0 cm, aproximadamente (figura 4B). Se realizan dos taladros para pegar dos pequeños cilindros metálicos en los que se acoplan luego sendos tubos de polietileno; un tercer taladro, sobre el que se pega una pequeña lámina de vidrio de 1 mm de espesor, sirve como ventana para la luz. Por último, un cuarto taladro de mayor diámetro es la ventana de observación. Cada vez que se trabaja con el aparato se coloca una lámina cubreobjetos sobre esta ventana.

Universidad Pontificia de Salamanca

Para el sistema de iluminación se construye una pequeña caja rectangular de metacrilato en la que encaja el puntero láser (figura 4C). Se realizan dos taladros en la parte superior donde se fijan, con un pegamento fuerte dos tuercas. Con un tornillo se inmoviliza el puntero y con otro se acciona el pulsador de encendido. La caja del puntero se pega sobre la pieza de metacrilato en forma de T asegurando que el haz de luz láser pase exactamente por la ventana de iluminación de la cámara de humo.

Para la observación del movimiento browniano de las partículas de humo se procede de la siguiente forma. Se monta el aparato indicado en la figura 4A y se cubre con una lámina cubreobjetos la ventana de observación. El soporte en T se asegura sobre la platina del microscopio, se enciende el cigarrillo y se succiona el humo con ayuda de la jeringuilla. Se enciende el láser y se observan las partículas de humo con un objetivo de 10X. El movimiento de las brillantes partículas de humo se ve sobre fondo oscuro con extraordinaria calidad.

BIBLIOGRAFÍA

LAVENDA, Bernard H.: "El movimiento browniano", *Investigación y Ciencia*, 103, Prensa Científica, Barcelona, 1985.

GLASSTONE, Samuel: *Tratado de Química Física*, 2ª ed., Aguilar, Madrid, 1957.

STACHEL, John(ed): *Einstein 1905: un año milagroso. Cinco artículos que cambiaron la física*, Crítica, Barcelona, 2001.

Universidad Pontificia de Salamanca

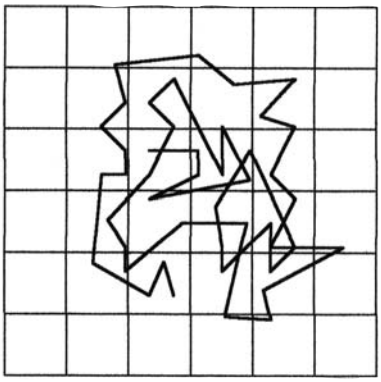

Figura 1

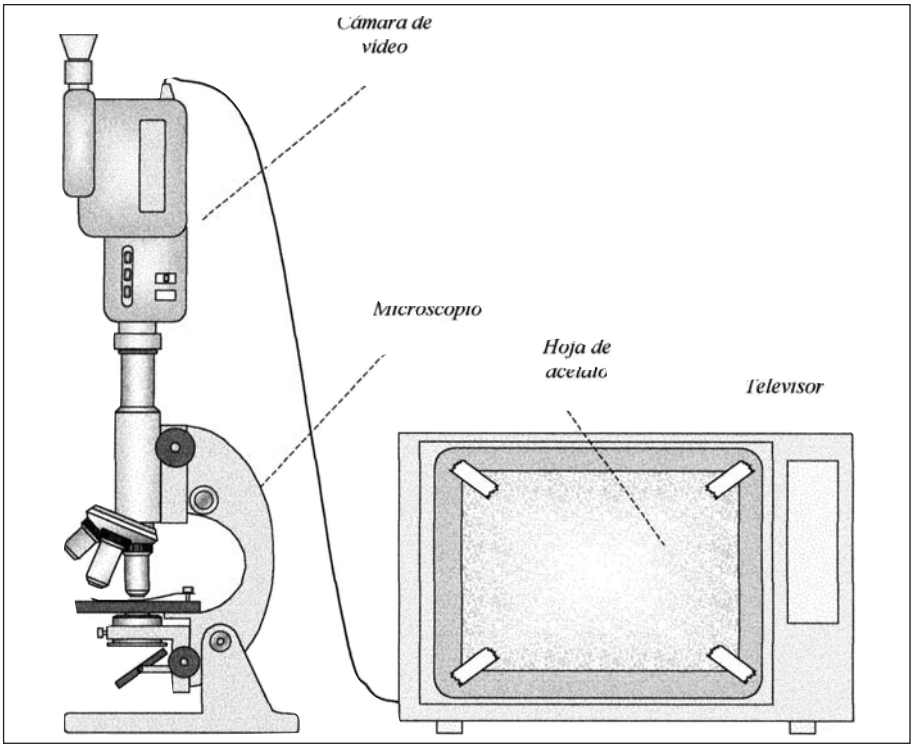

Figura 2

Universidad Pontificia de Salamanca

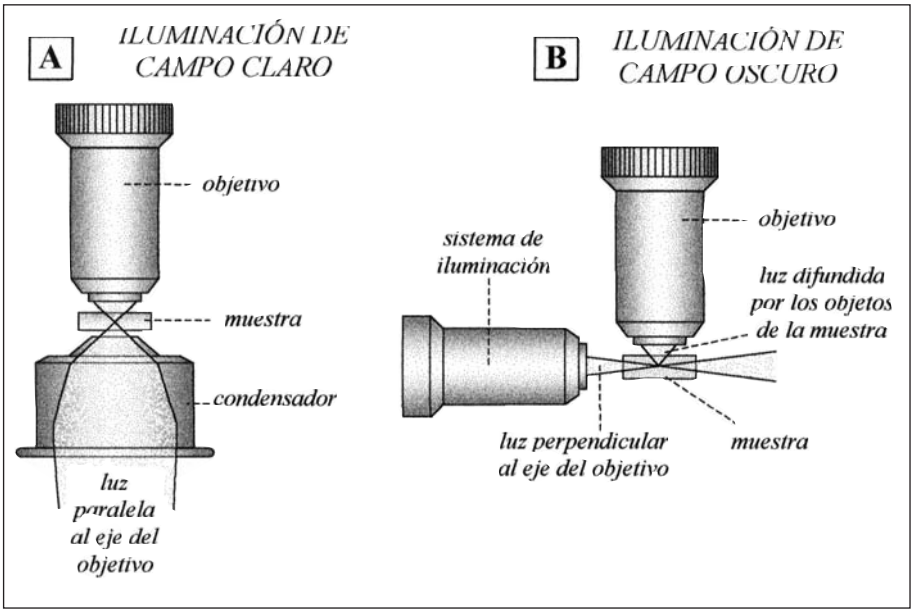

Figura 3

Universidad Pontificia de Salamanca

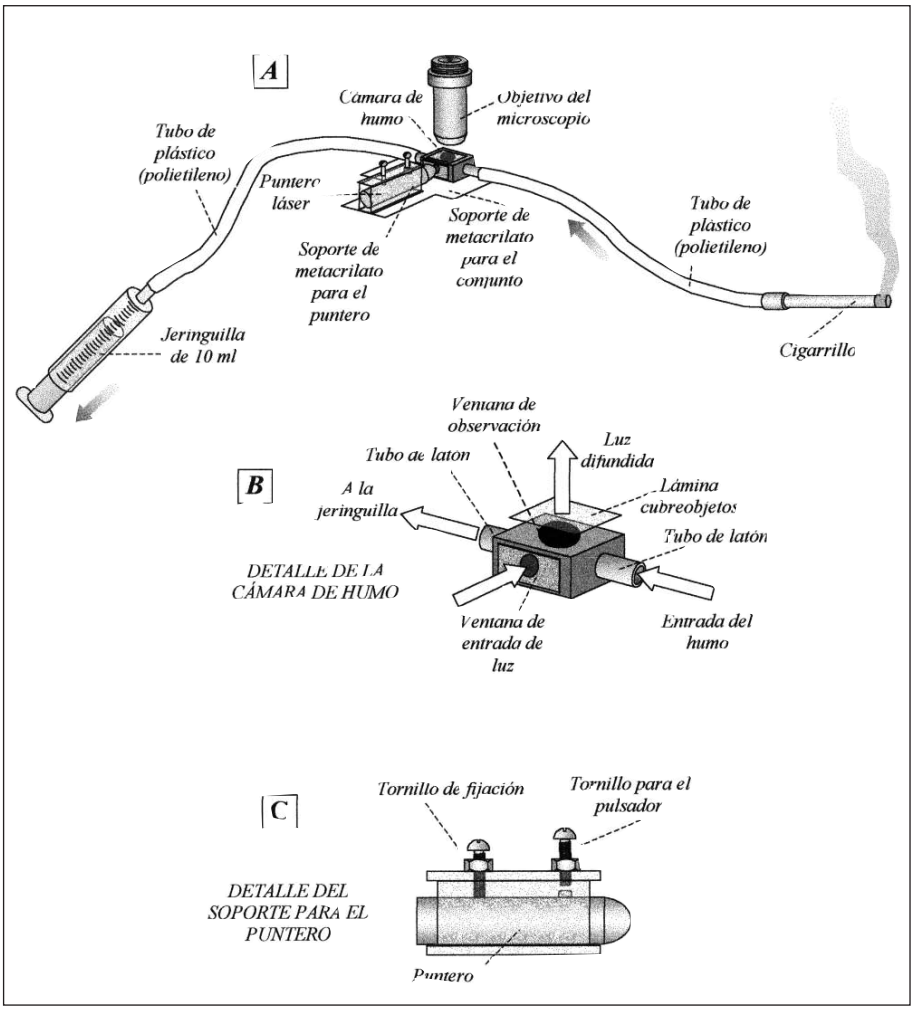

Figura 4

Universidad Pontificia de Salamanca