

El misterio del polvo

Carlos Velázquez

Durante el siglo XIX la comunidad científica estuvo dividida en dos bandos: una minoría que decía que la materia estaba compuesta de moléculas y átomos, y una vasta mayoría que no creía en ellos. Finalmente en 1905 un desconocido empleado de una oficina de patentes creó un modelo para describir el movimiento de un grano de polen en un vaso de agua que demostró de una vez y para siempre la existencia de los átomos, su nombre era Albert Einstein.

Si alguna vez has aventado un puño de tierra hacia arriba, habrás notado que una parte cae y que en el aire queda polvo en el que se pueden observar a contraluz pequeños fragmentos que se mueven de arriba a abajo, sin que se pueda predecir la dirección de su movimiento. Éste es un ejemplo de movimiento browniano. Muchas veces se ha pensado que este movimiento se debe a microcorrientes de aire, pero incluso en un ambiente controlado

sin corrientes, al liberar partículas de pocas micras de tamaño éstas se quedan flotando. Esto es tan general que te sorprenderá saber que las "microgotas" de agua que forman las nubes flotan debido a este mismo fenómeno. Prepárate para descubrir el misterio escondido en el polvo y en las nubes.

El baile misterioso de las partículas de polen

En 1828 un botánico inglés estaba por hacer un descubrimiento que lo dejaría azorado: al verter en un vaso de agua algunos granos de polen de una planta que estaba estudiando (*Clarkia pulchella*, figura 1) y observarlos con el microscopio, se dio cuenta de que por más tiempo que dejara pasar y por más calmados que estuvieran el agua y los alrededores, los granos de polen se movían constantemente en zigzag dentro del vaso y no parecían tener ningunas ganas de bajar y asentarse en el fondo como él hubiera esperado. Asombrado, repitió varias veces el experimento, controlando cada vez más las condiciones de temperatura, de luz y corrientes dentro del vaso, pero jamás logró que se detuviera el movimiento de los diminutos granos. El botánico se dio cuenta de que se encontraba ante un fenómeno digno de atención y suspendió sus investigaciones botánicas para tratar de desentrañarlo.

Su primer impulso consistió en comprobar si el fenómeno ocurría con otros pólenes, y en efecto, así fue. Durante un tiempo pensó que tal vez se debía a que los pólenes tenían algún nuevo tipo de movimiento interno no observado hasta entonces, pero desechó la idea cuando al verter en agua polvo de rocas recién trituradas ¡vio que los fragmentos más pequeños hacían el mismo movimiento que los granos de polen!



Figura 1. *Clarkia pulchella*, Robert Brown observó por primera vez el movimiento browniano con el polen de esta planta.

El botánico acababa de descubrir el llamado movimiento browniano, y como ya te imaginarás, la identidad de este héroe científico es nada más y nada menos que Robert Brown. A las partículas con un tamaño de unas pocas micras que realizan este movimiento se les conoce como partículas brownianas.

La segunda ley y las partículas rebeldes

Los trabajos de Brown acerca de este movimiento captaron la atención de la comunidad científica décadas más tarde, en 1863, cuando sus experimentos fueron retomados por Christian Weiner y otros científicos, y causaron muchas discusiones. En una de ellas se desecharon como explicación de este movimiento las diferencias de temperatura dentro del líquido o las fuerzas capilares dentro del vaso -la fuerza capilar es la que le permite ascender a un líquido dentro de un tubo de pocas micras de diámetro. Quizás el experimento más sorprendente y elegante fue el que realizaron los físicos Cantoni y Oehl, quienes sellaron un recipiente con partículas brownianas y lo dejaron reposar por un año en un lugar perfectamente tranquilo. Cuando volvieron a abrirlo encontraron que las partículas seguían realizando el mismo movimiento.

Aunque los hechos son sorprendentes en sí mismos, vale la pena que nos preguntemos qué dificultades veían en el movimiento browniano los científicos de la segunda mitad del siglo XIX. Para empezar, debemos recordar que en ese tiempo muchos de ellos no creían en la existencia de las moléculas, y de hecho los más escépticos eran los físicos. Las moléculas son uniones químicas de unos cuantos átomos y su tamaño es muchísimo menor que el tamaño de las partículas brownianas. La diferencia de tamaño entre una partícula browniana y una molécula sería equivalente a la diferencia entre un edificio y una canica, esta es la razón por la que las partículas brownianas sí se pueden observar con un microscopio y las moléculas y los átomos no.

Por otra parte, la teoría más desarrollada de la materia en ese tiempo era la termodinámica, así que todos trataron de explicar este movimiento usando esta teoría; sin embargo este bailoteo era la más viva imagen de un rebelde de la termodinámica. Aunque ésta es una disciplina compleja y llena de explicaciones fantásticas, podemos resumir por el momento sus contribuciones en dos enunciados: la primera y la segunda ley. La primera dice que la suma de todas las energías de un sistema, incluyendo la térmica, siempre se debe de conservar; pero aquí hay que tener cuidado: hoy en día solemos pensar en el calor como movimiento molecular, pero en ese tiempo el calor era una forma de energía que se podía cuantificar midiendo temperaturas y otras características de los materiales, como calores específicos, o sea cuánta energía absorben por cada grado de temperatura que cambian. Lo importante es que para los científicos del siglo XIX no había ningún problema en definir el calor sin la participación de las moléculas.

La segunda ley es más interesante, y en pocas palabras indica que en nuestro universo existen procesos irreversibles; o sea, que ocurren de manera espontánea en una sola dirección. Por ejemplo siempre hemos visto que si ponemos un objeto caliente cerca de uno frío, como nuestro café en una taza, el objeto frío se calienta y el caliente se enfría (figura 2). Esto parece obvio, pero si sólo existiera la primera ley, nada nos impediría pensar

que el café podría quitarle un poquito de energía calorífica a la taza y ponerse más caliente, pero esto jamás ha sido observado. Para ponerlo desde otro ángulo la segunda ley plantea que si la energía ya está repartida entre los componentes de un sistema, no podemos esperar que todos se pongan de acuerdo y transfieran su energía a sólo alguno de ellos de manera espontánea.



Figura 2. La segunda ley plantea que el calor fluye de los cuerpos de alta temperatura a los de baja temperatura, pero jamás en sentido inverso.

Todo esto suena muy natural pero en el caso del movimiento browniano parece que estamos frente al milagro de que las partículas de polen sí le pueden extraer energía al agua o al aire y la usan para ponerse en movimiento constante y no caer al fondo del recipiente. Esto era lo que tenía realmente consternados a los científicos: parecía que después de todo la segunda ley no era absoluta.

El dilema microscópico

Los científicos que no creían en la existencia de los átomos y las moléculas, se veían en la penosa necesidad de admitir que una de sus amadas leyes tal vez no era del todo cierta. Sin embargo para los pocos que sí creían en la existencia de los átomos y moléculas las cosas no iban mejor. Desde mediados del siglo XIX ya se había calculado el número tentativo de moléculas que debía haber en un gramo de materia, y científicos como Karl Nägeli mostraron usando estos datos, que si acaso existían las dichas moléculas, entonces el golpe de una sola de ellas a una partícula browniana sería ridículamente pequeño. Para darnos una idea, una molécula de agua pegándole a una partícula de polen sería algo así como ¡una canica pegándole a un tráiler! Sin lugar a dudas esto convenció a más de uno de que incluso si las moléculas existían no eran las causantes del baile de las partículas de polen.

Aun sin una explicación definitiva para el movimiento browniano, las mediciones y los experimentos siguieron. Uno de los resultados más importantes obtenidos a finales del siglo XIX fue que si tenemos varias muestras del mismo líquido a la misma temperatura, e inicialmente ponemos en todas las muestras la misma cantidad de polen u otras partículas brownianas, entonces éstas se difundirán en todo el líquido a la misma velocidad. Puesto de otra manera, la velocidad con la que se ensancha la mancha de partículas brownianas es siempre la misma.

Los borrachos caminando

El estudio del movimiento browniano había llegado a un callejón sin salida, parecía un tema aparte que desafiaba leyes y se resistía a ser explicado, y era imposible relacionarlo con todos los conceptos anteriores de la física, pero pronto todo iba a cambiar. En 1905 un físico que no había encontrado lugar como profesor en ninguna universidad debido a su estrafalaria forma de pensar, trabajaba junto con su esposa en algunos problemas de física mientras se ganaba la vida como empleado de una oficina de patentes. El

primer trabajo de este novato consistió en dar una explicación sobre la naturaleza de la luz estudiando el llamado efecto fotoeléctrico. Esta explicación con el tiempo revolucionó nuestra forma de ver la naturaleza (ver en *Cienciorama* "1905 y el rompimiento einsteniano: efecto fotoeléctrico"), pero al principio no le hicieron mucho caso, así que preparó un segundo artículo, que trataba sobre el elusivo movimiento browniano, y para investigarlo utilizó la hipótesis molecular más o menos desarrollada pero aún no aceptada en aquellos tiempos.

Para fortuna de nuestro físico oficinista, muchos científicos antes que él habían hecho progresos sobre cómo se moverían las moléculas que componen un fluido, si acaso existieran. Uno de los resultados más obvios era que las moléculas debían moverse en todas direcciones y con todas las velocidades posibles, pero con la mayoría moviéndose a una velocidad promedio que dependía de la temperatura y la viscosidad del fluido. También se había calculado el número y el peso tentativo de las moléculas del fluido, y haciendo una revisión cuidadosa de estos números nuestro físico se dio cuenta de que la objeción de Nägeli podía ser fácilmente desestimada, ya que el número de moléculas que colisionaban con la partícula browniana era ¡ $10^{20} = 100'000,000'000,000'000,000$ cada segundo! O para ponerlo en términos de canicas y tráileres, quizás no podamos mover un tráiler con una canica ¡pero seguro que sí lo podemos mover si le dejamos caer una montaña de canicas cada segundo!

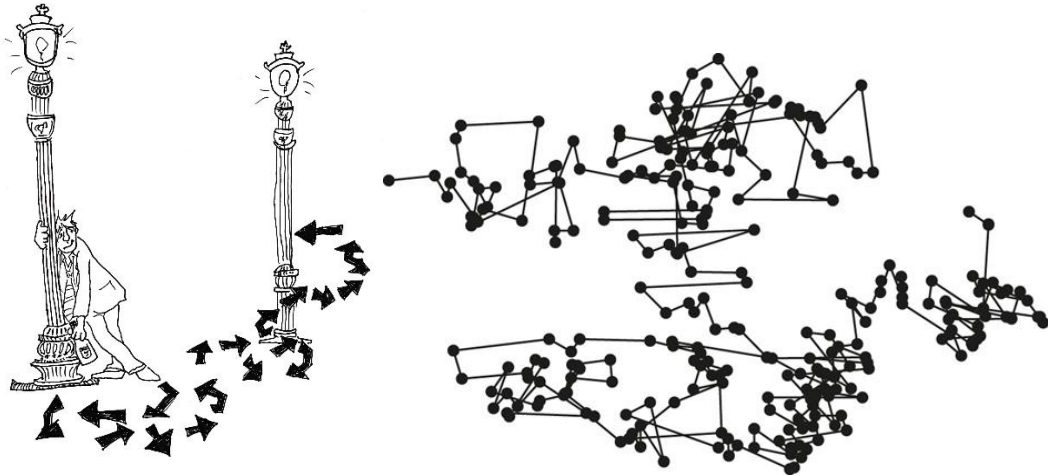


Figura 3. Las partículas de polen se desplazan como borrachos que dan pasos al azar.

Según lo anterior ¿cómo se vería entonces un vaso de agua desde un punto de vista molecular? Imaginemos que le quitamos toda el agua al mar y lo llenamos de canicas de acero. Estas canicas no estarían quietas, se moverían en todo momento a una velocidad promedio de 1000 km/h, lo cual sería el fluido. Si en estas condiciones hacemos que un submarino pequeño se sumerja en este mar de acero, las violentas colisiones de las canicas cuya cantidad sería extremadamente grande, golpearían en todo momento el submarino agitándolo continuamente de un lado a otro y no podríamos predecir hacia donde lo arrojarían. Eso pensó nuestro físico que le pasaba a las partículas brownianas que eran constantemente bombardeadas por las moléculas.

A nuestro físico sólo le faltaba hacer las matemáticas, y al hacerlas fue capaz de demostrar lo que ya intuía: que las partículas brownianas caminan como si dieran pasos hacia un lado y hacia otro al azar, sin que sea posible saber en qué dirección se van a desplazar (figura 3). Pero aunque no sepamos en qué dirección darán el siguiente paso, nuestro físico demostró que lo que sí podemos saber es que si en un instante de tiempo estaban en un lugar, entonces un tiempo después las hallaremos a una distancia promedio que depende sólo de la temperatura, la viscosidad del fluido, el peso de las moléculas del fluido, el peso de las partículas brownianas y

algunos parámetros de la teoría molecular como el número de Avogadro, que es precisamente el número de moléculas en una muestra estándar de materia.

Para relacionar todo esto con un fenómeno medible nuestro físico calculó cual sería la velocidad con la que un enjambre de estas partículas borrachas se difundiría en un líquido si inicialmente las ponemos a todas cerca de un punto. La predicción resultó igual que lo que ya se había medido en los experimentos *voilà!* ¡El misterio de las partículas brownianas estaba resuelto! (figura 4). La identidad de nuestro desconocido físico era Albert Einstein, como ya habrás sospechado.

El célebre movimiento browniano

La explicación del movimiento browniano fue una prueba definitiva de la existencia de las moléculas, y por ende de los átomos, que convenció a la mayor parte de los científicos, y es uno de los pilares en los que se sustenta la fama de Einstein. Entre otras cosas su modelo permitió volver a calcular el valor del llamado número de Avogadro, que se refiere al número de moléculas en una muestra estándar de materia; y fue la coincidencia de su valor con estimaciones anteriores y pruebas experimentales lo que se consideró como un éxito. Además, en todas sus explicaciones Einstein también logró rescatar la segunda ley de la termodinámica demostrando que las partículas brownianas no la violan.

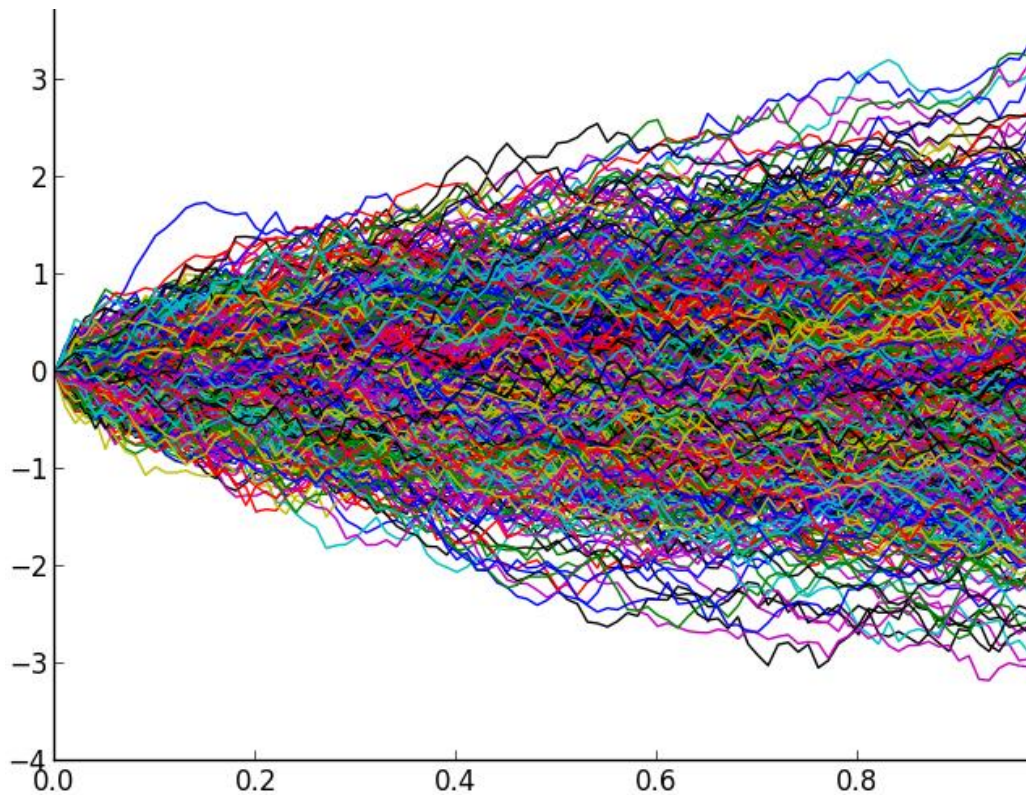


Figura 4. Cuando ponemos varias partículas de polen y las dejamos desplazarse como borrachos caminando, poco a poco van difundiéndose en el líquido.

La importancia del movimiento browniano no acaba aquí. Al ser un efecto que se puede observar a simple vista, ha sido un fenómeno perfecto para estudiar de cerca los fenómenos irreversibles. Además, aunque no lo podemos desarrollar aquí más extensamente, con el movimiento browniano también comenzó una nueva rama de las matemáticas: el estudio de las funciones que fluctúan de manera impredecible, o sea, ¡los pasos de los borrachos que dijimos más arriba! Estas funciones se conocen con el nombre rimbombante de funciones estocásticas.

El movimiento browniano es uno de los fenómenos más célebres de la física, y aún hoy en día se utiliza en disciplinas tan distantes como el estudio de los láseres y de los entes matemáticos llamados fractales, que están entre los tópicos de las fronteras de la ciencia, así que la próxima

vez que veas cómo el polvo se eleva en el aire, recuerda que ahí mismo está guardado uno de los grandes logros de la ciencia.

Bibliografía

- Eliezer Braun, *Un movimiento en zigzag*, Fondo de Cultura Económica, 1986.
- Peter Mörters, Yuval Peres. Brownian Motion. Universidad de Berkeley, disponible en: <https://www.stat.berkeley.edu/~peres/bmbook.pdf>.
- Andy Dahl. A Rigorous Introduction to Brownian Motion. Universidad de Chicago, disponible en: <http://www.math.uchicago.edu/~may/VIGRE/VIGRE2010/REUPapers/Dahl.pdf>.
- Don S. Lemons. An introduction to Stochastic Processes in Physics. containing On Brownian Motion. The John Hopkins University Press, 2002.
- Albert Einstein, “On the Motion of Small Particles Suspended in Liquids at Rest Required by the Molecular-Kinetic Theory of Heat”, *Annalen der Physik* 17, 1905, 549-560.

Créditos por imágenes

Imagen inicial: <https://i.ytimg.com/vi/EZgbcQtnXME/maxresdefault.jpg>

Figura 1: http://www.e-herbar.net/main.php?g2_itemId=56110

<http://physerver.hamilton.edu/Research/Brownian/Jigglyread.html>

Figura 2: <http://www.vix.com/es/btg/curiosidades/4390/la-segunda-ley-de-la-termodinamica>

Figura 3: <http://www.quantinterview.com/brownian-motion-stuff/>

https://www.ld-didactic.de/phk/images/versuche/VC1131_Grafik.jpg

Figura 4: <http://phenomena.nationalgeographic.com/2015/07/07/sunshines-crazy-sloppy-path-to-you/>

Figura 5: <https://espaciociencia.com/siembra-de-nubes-que-es/>

<http://elkortxo.es/blog/wp-content/uploads/2008/05/tormenta-de-arena-02.jpg>