

## **Einstein 1905: Movimiento Browniano**

<http://www.smf.mx/boletin/2005/Abr-05/Articulos-VRR.html>

*Víctor*

*Romero*

*Rochín*

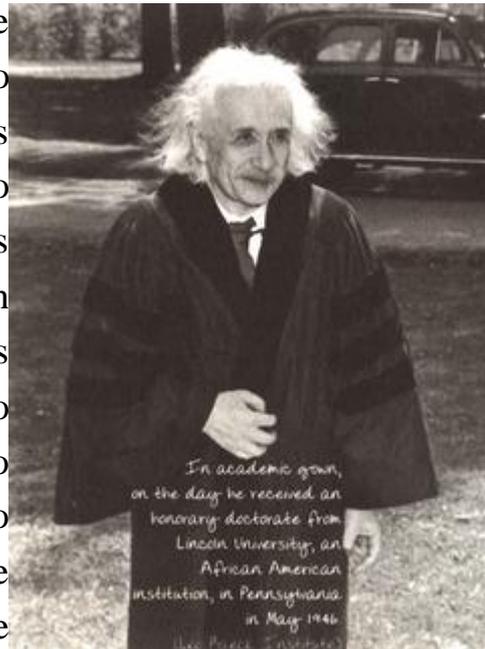
Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México

De los tres trabajos maravillosos de Albert Einstein en 1905, el del Movimiento Browniano es quizás el que aparece más claramente como la culminación de un proyecto de investigación al que había dedicado ya varios años. Este proyecto consistía en proveer a la hipótesis atómica de una solidez contundente, hecho que, por supuesto, logró.

En nuestra época, es un lugar común hablar de la existencia de los átomos y moléculas como los constituyentes básicos de toda la materia; difícilmente alguien se atrevería a dudar de su existencia, ¡a pesar que nadie puede ver a los átomos! Pero no siempre fue así. El Siglo XIX fue escenario de una lucha intelectual, apasionada y sin cuartel, entre aquellos que defendían la hipótesis atómica como la explicación de los resultados experimentales a los que tenían acceso, y sus detractores, que calificaban a dicha hipótesis como una mera "herramienta" o modelo útil pero que carecía de sustento. Tenemos así que, a principios del Siglo XIX, personajes como John Dalton y Joseph Gay-Lussac, mientras descubrían que las leyes de las reacciones químicas se daban en términos de proporciones enteras de sus componentes, Amedeo Avogadro enunciaba que a presión y temperatura fijas, iguales volúmenes de un gas contenían el mismo número de moléculas; volveremos más de una vez al llamado Número de Avogadro, crucial para convencer a muchos y por el que Einstein tenía una clara fijación. Más tarde, a mediados del Siglo XIX, James Clerck Maxwell, Rudolf Clausius y Ludwig Boltzmann, concluían que "eso que llamamos calor", y otras cantidades macroscópicas como la temperatura y la entropía, tenían su origen en el movimiento incesante e insensato de los átomos y moléculas. Estas ideas fueron acompañadas de la formulación teórica de lo que ahora llamamos Teoría Cinética, y con ella, se lograron predicciones y explicaciones que hasta la fecha seguimos usando. Así, otros físicos, empezando con Thomas Young y siguiendo con Lord Kelvin, Loschmidt, el mismo Maxwell, y van der

Waals, realizaron cálculos con los que estimaron el tamaño de los átomos y el Número de Avogadro, hallando entre un Angstrom y un nanómetro para los primeros, y valores entre  $10^{22}$  y  $10^{24}$  para el último; sorprendente, dada la crudeza de sus métodos y de los datos experimentales de su tiempo. Sin embargo, científicos de la talla de Ernst Mach y Wilhelm Ostwald se oponían con vehemencia, no a la *teoría*, sino a la existencia misma de los átomos por la falta de evidencia experimental clara e inequívoca. Cabe mencionar que Ostwald finalmente concedió pero no así Mach, que falleció sin dejar de lado su escepticismo.

Por otro lado, y de manera completamente independiente a los trabajos anteriores, el botánico Robert Brown en 1827, a partir de observaciones hechas con un microscopio, reportó el movimiento errático e ininterrumpido de pequeñas partículas suspendidas en un líquido como el agua, sin importar de *qué* material provinieran las partículas. Y concluyó, por lo tanto, que dicho movimiento no tenía un origen biológico. Como un dato curioso, sospechando que el movimiento no era un "fenómeno vital", llegó al extremo de conseguir polvo de la Esfinge y corroborar que se



movía igual que si fueran granos de polen. Varios investigadores de finales del Siglo XIX, como Louis Gouy, especularon que dicho movimiento era causado por las colisiones entre la partícula "grande", observable en el microscopio, y por la enorme cantidad de átomos o moléculas del agua que, por su tamaño, son imperceptibles aún al microscopio. Sin embargo, tanto las diferentes explicaciones posibles como los métodos teóricos que se utilizaron para analizar el Movimiento Browniano, ya así llamado, fallaron en concluir inequívocamente que dicho movimiento es la evidencia experimental largamente buscada de la existencia de los átomos. El extremo fue que algunos, como Henri Poincare, aseveraron que dicho movimiento era una violación a la Segunda Ley de la Termodinámica!

Y aquí entra Albert Einstein. Es evidente que Einstein era un "atomista" convencido y existen claros indicios que estaban familiarizados con los trabajos de Maxwell y

Boltzmann. Así, entre 1903 y 1904, considerando como un hecho la existencia de los átomos, Einstein desarrolló, independientemente de Josiah W. Gibbs, lo que ahora llamamos "Física Estadística" y por lo que se le da muy poco crédito (¡cómo si lo necesitara!). Él mismo mencionó que si hubiera sabido que Gibbs ya había inventado la Física Estadística, no se habría molestado en hacerla. Einstein, a su temprana edad, era versado también en termodinámica e hidrodinámica, y se daba clara cuenta de la necesidad de diseñar experimentos que mostraran que el movimiento atómico era el responsable de las regularidades, e irregularidades, observadas en el mundo macroscópico.

En realidad, en 1905, Einstein dedicó dos trabajos a la determinación de la existencia molecular y sus dimensiones. Uno, es el trabajo del Movimiento Browniano, y el otro es su Tesis de Doctorado en la que, desarrollando lo que ahora llamaríamos "reología", estudió la dependencia de la viscosidad de una solución de azúcar en agua, determinando el tamaño de las moléculas de azúcar y el Número de Avogadro. Como dato estadístico, es interesante mencionar que el artículo de Einstein más citado en las décadas de los 70s y los 80s del siglo pasado fue el de su Tesis, principalmente por investigadores del área de la reología, otro campo de investigación más que él inició. También, y aunque los detalles se salen del contexto del presente escrito, es pertinente recalcar que el famoso trabajo sobre el efecto fotoeléctrico de 1905, en el que introdujo la idea de los fotones y por el que a la postre recibiría el Premio Nobel, es aún otro trabajo en el que hace uso de su desarrollo de la Física Estadística y en el cual también calcula el Número de Avogadro, obteniendo  $6 \times 10^{23}$ , prácticamente el valor actual. Esto último, por supuesto, es también una consecuencia de, y un elogio a, los excelentes datos experimentales de la época sobre la radiación de Cuerpo Negro, datos mismos que Max Planck, cinco años antes, había usado para deducir la distribución de la energía electromagnética en una cavidad y que dio nacimiento a la Mecánica Cuántica.

Pero volvamos al trabajo de Einstein sobre el Movimiento Browniano. El título del artículo, en una traducción libre, es *Sobre el movimiento de pequeñas partículas suspendidas en líquidos estacionarios como lo requiere la teoría cinética molecular del calor*. No aparece en él ninguna alusión al Movimiento Browniano. De hecho, en la introducción del artículo, Einstein menciona que el problema en cuestión "podría ser idéntico con el llamado Movimiento Browniano", pero añade, "los datos a que tengo

acceso son tan imprecisos que no podría dar una opinión definitiva al respecto". Esto es, el propósito del artículo no es ni describir ni explicar el Movimiento Browniano! el propósito es proponer un experimento y su explicación tal que lo que él llama la Teoría Cinética Molecular del Calor (que ahora llamamos Física Estadística) y que hace uso explícito del papel que juegan los átomos y las moléculas, es correcta. A su vez, sentencia de manera profunda, "si la predicción de este movimiento fuera probado que es incorrecto, este hecho sería un argumento de gran peso en contra de la concepción cinética molecular del calor". En otras palabras, sin falsa modestia, ni más ni menos, el objetivo del artículo es proveer la evidencia final sobre la constitución molecular de la materia. El artículo es un despliegue de conocimiento y de conexiones de diferentes ramas de la física que sólo un genio puede lograr.

El trabajo tiene cinco secciones. Primero, Einstein nos hace ver que si existen átomos y estos constituyen a un fluido como el agua, entonces, cuerpos *macroscópicos* suspendidos que puedan observarse con la ayuda de un microscopio, pero suficientemente pequeños para ser afectados en su movimiento por los choques con los átomos del fluido deben, no sólo realizar movimientos erráticos, sino ejercer una presión similar a la osmótica que ejerce una sustancia disuelta en un fluido como el agua. En la segunda sección, usando su física estadística, deduce que dicha presión obedece lo que llamamos la ecuación de estado de un gas ideal, que relaciona de manera lineal a la presión con la temperatura y la densidad del conjunto de partículas suspendidas. A continuación, en la tercera sección, muestra que variaciones o gradientes en dicha presión tienen que estar equilibradas dinámicamente con la fricción, o viscosidad, del fluido y que el movimiento resultante de las partículas suspendidas es el equivalente a la difusión de una sustancia en otra. Esta sección culmina con lo que ahora llamamos la Relación de Stokes-Einstein, piedra angular de todo nuestro conocimiento moderno sobre la dinámica de sistemas macroscópicos fuera de equilibrio, y que involucra al coeficiente de difusión  $D$  de las partículas suspendidas, y a su tamaño  $a$ , por un lado, con la temperatura  $T$  y viscosidad  $\eta$  del fluido por el otro, y como constantes "universales" que las unen, a la Constante Universal de los gases  $R$  y al Número de Avogadro  $N$ :

$$D = RT/Nl/6\pi\eta a$$

La cuarta sección es, en opinión del autor, la más revolucionaria e impactante a la larga: inventa, una vez más, lo que ahora llamamos Teoría de los Procesos Estocásticos, adelantándose a Andreiv Markov e independientemente de Marian von Smoluchowski. Muestra que la difusión de las partículas puede verse como un proceso probabilístico de su *desplazamiento* (y no de la velocidad como quisieron verlo sus antecesores y por lo que los cálculos previos fallaron). Con esta teoría calcula, de manera explícita, el desplazamiento promedio  $\lambda$  de las partículas suspendidas, en términos del coeficiente de difusión  $D$  y del tiempo  $t$  de observación,

$$\lambda = \sqrt{6Dt}$$

La quinta y última sección la usa para relacionar las dos ecuaciones anteriores y hacer su predicción: supone que el tamaño  $a$  de las partículas suspendidas es una micra (0.001 mm), perfectamente observable en un microscopio de su tiempo; usa como fluido al agua del cual conoce su viscosidad; supone 17 grados centígrados; usa el Número de Avogadro  $6 \times 10^{23}$ , que aunque no da la referencia, podemos suponer que usó el valor que ya había obtenido en su trabajo previo sobre el efecto fotoeléctrico. Predice que en un tiempo de un minuto, las partículas suspendidas deberán haberse desplazado, en promedio, 6 micras aproximadamente. Concluye también que si lo que se mide es el desplazamiento promedio, entonces se puede deducir, una vez más, el Número de Avogadro. Su última frase es una urgencia a algún investigador para que haga el experimento que, expresa, "es de gran importancia para la teoría del calor!".

En contraste con otros trabajos geniales que pasan casi desapercibidos inicialmente, este fue un éxito rotundo. Inmediatamente después de su publicación, el artículo fue apreciado y Einstein inició una rica y fructífera correspondencia con otros investigadores del momento, entre otros, Smoluchowski y Jean Perrin, el último dedicándose a realizar las mediciones tan ansiadas por Albert Einstein y por las que en 1926 recibió el Premio Nobel. Y entonces sí, tan pronto como en 1906, Einstein publicó un segundo artículo llamado *Sobre la Teoría del Movimiento Browniano* y dedicó muchos más años de su vida a refinar y aplicar esas ideas a temas tan variados como la difusión rotacional, la comprensión del azul del cielo, la opalescencia crítica y, finalmente, la introducción de los coeficientes  $A$  y  $B$  de la emisión y absorción de la radiación por la materia.

Debería concluir este escrito haciendo un recuento del impacto del trabajo de Einstein a la física moderna pero me es casi imposible. Baste decir que su impacto ha sido no sólo en la física ni en las ciencias naturales, sino que ha trascendido a toda clase de disciplinas, desde la biología hasta estudios financieros y sociales, pasando por ... lo que usted quiera!