

## Teoría atómica y realismo científico

C.F. Gutiérrez Canales

*División de Ciencias e Ingenierías, Campus León, Universidad de Guanajuato,  
Loma del Bosque 103 Col. Lomas del Campestre, 37150 León, Gto.*

*e-mail: gutierrezcc2014@licifug.ugto.mx*

O. Obregón Díaz

*Grupo de Gravitación y Física Matemática, Campus León, Universidad de Guanajuato,  
Loma del Bosque 103. Col. Lomas del Campestre, 37150 León, Gto.*

*e-mail: obregon@fisica.ugto.mx*

V. Aboites

*División de Fotónica, Centro de Investigaciones en Óptica,  
Loma del Bosque 115 Col. Lomas del Campestre, 37150 León, Gto.*

*e-mail: aboites@cio.mx*

Received 27 June 2018; accepted 18 July 2018

En este artículo se discute la pregunta: ¿Cómo sabemos que los átomos existen? Esto a partir de un análisis físico y filosófico de algunas de las pruebas y argumentos históricamente más relevantes, incluyendo, en orden cronológico: 1) la Ley de las proporciones definidas o Ley de Proust, 2) La Teoría Cinética de los Gases, 3) El Movimiento Browniano y, 4) imágenes de microscopio de efecto túnel. La discusión filosófica se centra en los argumentos de realismo y antirrealismo científico, así como en diversos argumentos metodológicos, por ejemplo: i) ¿Debemos confiar en una afirmación sobre la naturaleza solamente porque es parte de una teoría científica empíricamente exitosa? y ii) si las teorías científicas están diseñadas para el éxito empírico y la adecuación matemática ¿Qué tiene de extraño que a veces se encuentren enormes evidencias experimentales y otras veces no? Pocas personas pueden exponer dudas razonables sobre la existencia o no, de átomos y este artículo presenta algunas de las aristas más destacadas de esta relevante discusión científica, histórica y filosófica.

*Descriptores:* Teoría atómica; filosofía de la ciencia; historia de la ciencia.

In this article the question: How do we know atoms exist? Is discussed. This is done starting from a physical and philosophical analysis of some of the most relevant historical evidences and arguments. In chronological order they are: 1) The Law of Definite Proportions or Proust's Law, 2) The Kinetic Theory of Gases, 3) The Brownian Motion and, 4) Images taken by STM (Scanning Tunneling Microscope). The philosophical discussion is focused on arguments regarding scientific realism and anti-realism, as well as on methodological arguments, for example: i) Should we believe a statement about nature only because it follows from an empirically successful scientific theory? And ii) If the scientific theories are designed to achieve empirical success and mathematical adequacy. Why should be strange that sometimes they have huge empirical evidence and sometimes not? Very few people can provide reasonable doubts about the existence (or non-existence) of atoms and this article present some of the most prominent issues of this important scientific, historic and philosophical discussion.

*Keywords:* Atomic theory; philosophy of science; history of science.

PACS: 31.15.-p; 01.70.+w; 01.65.g

### 1. Introducción

La física y la filosofía pretenden explicar el mundo que nos rodea. Por otra parte, el papel de la ciencia en la sociedad es central, sin embargo, no así el de la reflexión filosófica y generalmente se acepta que la física suele representar el mejor ejemplo de rigor y claridad. Para la mayoría de las personas la ciencia, entendida como una complicidad entre física, química y biología, representa la manera más confiable de conocer el mundo. Sin embargo ¿A qué se debe tal consideración? La respuesta más común consiste en afirmar que el conocimiento científico es conocimiento probado [1]. Pero ¿Cómo se da tal comprobación? Generalmente mediante la experimentación. Es decir, el conocimiento científico aceptado es el que razonablemente coincide con los hechos mostrados por la evidencia experimental y la experiencia.

La noción de que el conocimiento científico se basa en los hechos corre el peligro de conducir a la noción de que el conocimiento científico surge de los hechos. Esta última consideración probablemente sea la idea más común sobre la ciencia, y es deudora de la gran tradición filosófica empirista de los siglos XVII y XVIII [2]. Sin embargo, el conocimiento científico no surge exclusivamente de la percepción de los hechos, sino también de conocimientos previos. La suposición ingenua de que primero se establecen los hechos y que de ellos surge el conocimiento es insostenible debido a que las percepciones de los hechos dependen de los conocimientos previos que se tengan, pues los enunciados relacionados a hechos observacionales se dan siempre en el contexto de alguna teoría o estructura conceptual. Por ejemplo, la experiencia visual de dos personas que ven la misma imagen, digamos una radiografía, no es la misma. Para una de las per-

sonas, supongamos ajena a la práctica médica, la radiografía no significará nada más que una extraña imagen en blanco y negro, mientras que, para la otra persona, supongamos un médico experto, la imagen representará una gran cantidad de información. Ambas personas ven el mismo objeto, pero la percepción de este difiere para cada una de ellas en función del conocimiento previo que cada una tiene. Todo enunciado observacional, por simple que sea, presupone cierta cantidad de conocimiento teórico, aunque no sea muy complejo, por ejemplo: “Una barra de cobre se expande al calentarse” requiere saber que existen barras de cobre, así como la relación entre el calor y el fenómeno de la dilatación. De este modo enunciados observacionales más precisos y relevantes, como la existencia de átomos, solo pueden formularse si se posee una base teórica más completa y general [3].

Aunque el conocimiento científico no surge exclusivamente de la observación, se acepta que este efectivamente se basa en la comprobación de los enunciados observacionales. Si se puede probar la verdad o falsedad de un enunciado observacional, entonces, el que estos enunciados presupongan algún tipo de teoría no afecta en absoluto la tarea de comprobación. Sin embargo, lo arduo de esta tarea depende del enunciado observacional. Por ejemplo, si se tratara de probar el siguiente enunciado: “un gato blanco ha entrado a la habitación”, la comprobación consistirá simplemente en ver si, efectivamente, un gato blanco ha entrado a la habitación. Aquí se hace ver que, en general en la ciencia, algo es verdad si y sólo si corresponde con la realidad (esta es la llamada *teoría de verdad como correspondencia*). No obstante, en la física actual se hace referencia a objetos como quarks, neutrinos y antipartículas, mismos que escapan a nuestra percepción, así que la comprobación de un enunciado observacional del tipo: “He aquí un neutrino” no podrá darse de manera directa, como en el ejemplo anterior, sino a partir de una *inferencia causal*, en la que se usarán todos los conocimientos teóricos que han permitido realizar tal enunciado.

En este artículo se discute la pregunta: ¿Cómo sabemos que los átomos existen? Esto a partir de un análisis de algunas de las pruebas y argumentos históricamente más relevantes, incluyendo, en orden cronológico: 1) La Ley de las proporciones definidas o Ley de Proust, 2) La Teoría Cinética de los Gases, 3) El Movimiento Browniano y las 4) Imágenes de microscopio de efecto túnel. Vale subrayar que a lo largo de la historia numerosas personas han dudado de la existencia de los átomos incluyendo a destacados científicos como Kelvin [4], Helmholtz [5] y Planck [6]. En este artículo la reflexión filosófica se centra en los argumentos del realismo y antirrealismo científico, así como en diversos argumentos metodológicos, por ejemplo: i) ¿Debemos confiar en una afirmación sobre la naturaleza solamente porque es parte de una teoría científica empíricamente exitosa? y ii) si las teorías físicas están diseñadas para el éxito empírico y la adecuación matemática ¿Qué tiene de extraño que a veces se logren increíbles evidencias experimentales y a veces no? Pocas personas pueden exponer dudas razonables sobre la existencia, o no, de átomos y este artículo presenta algunas de las aristas

más destacadas de esta relevante discusión científica, histórica y filosófica. En la sección 2 se presentan sucintamente y solo como referencia las principales consideraciones respecto al realismo y antirrealismo científico. En la sección 3 se exponen las pruebas científicas históricamente más importantes de la existencia de los átomos. Finalmente, en la última sección se presentan las conclusiones de este trabajo.

## 2. Consideraciones básicas sobre el realismo y antirrealismo científico

Esta sección no pretende en modo alguno presentar una detallada exposición sobre el realismo y antirrealismo científico (una revisión detallada de este tema puede encontrarse en [7]), sino solo mencionar algunos de los rasgos principales que serán relevantes para la siguiente sección de este artículo.

El realismo es una de las posturas filosóficas más amplias y abundantemente usadas en la historia de la filosofía. Su definición, interpretación y alcance varían dependiendo del autor y siguen siendo fuente de debate [8]. No obstante, hay un común denominador en todas las formas de realismo, lo que posibilita entenderlo de una forma específica. El realismo tradicionalmente se ha relacionado con cualquier posición filosófica que defienda racionalmente creer en la realidad externa de algo. Por ejemplo, el realismo del mundo, donde se argumenta la realidad de las piedras, las sillas, las mesas, etc. Es decir, el mundo y las cosas en este existen a pesar de lo que pensemos. De este modo, el realismo del mundo externo plantea uno de los problemas filosóficos de mayor importancia. Este problema es el de demostrar la existencia del mundo externo. A pesar de lo ocioso que pudiera parecer este problema a primera vista, lo cierto es que ha prevalecido durante siglos sin que se tenga una respuesta definitiva. Parecería ridículo dudar de la existencia de, digamos, la silla en la que se está sentado o del libro que se está leyendo. Sin embargo, puede argumentarse con total validez que en realidad ese libro no existe, sino que solamente es un conjunto de impresiones sensoriales que recibimos y llegan a nuestro cerebro, en donde se construye la idea de ese objeto llamado “libro”. Así, esta construcción está en nuestro cerebro, y no hay garantía de que exista en el mundo externo.

El problema de la realidad del mundo externo ha sido abordado por muchos filósofos a lo largo de la historia. Uno de los intentos más reconocidos por resolverlo es el de Descartes, quien acudió a la autoridad de Dios. En su libro *Meditaciones Filosóficas*, Descartes afirma “En su perfección, Dios no puede engañarnos, y no puede permitir que en nosotros haya ideas que no representen nada” [9]. Kant también se interesó por este problema, y afirmar que: “El escándalo de la filosofía es que no haya sido capaz de demostrar la existencia del mundo externo” [10]. Sin embargo, en general en la ciencia se evita incursionar en este importante problema filosófico, pues se da por sentado que existe un único mundo externo e independiente a nosotros. Esta y otras consideraciones del realismo científico se exponen en seguida, así como

los principales argumentos antirrealistas científicos, donde se rechazan la validez de la existencia de las entidades propuestas por las teorías científicas.

### 2.1. Realismo científico

De manera general, en el realismo científico se defiende la realidad de “lo que sea que describan nuestras mejores teorías científicas” [11]. El realismo científico consta además de una “actitud epistemológica positiva hacia los resultados que tengan las teorías científicas sobre los entes observables y no observables del mundo” [12]. Tener una actitud epistemológica positiva hacia las teorías científicas consiste en confiar en que estas proporcionan conocimiento auténtico sobre lo que afirman. Por otra parte, la distinción entre entes observables e inobservables se ha relacionado con las capacidades sensoriales de las personas. Un ente observable es algo que se puede ver o percibir sin el uso de aparatos o *inferencias causales*, y un ente inobservable es simplemente un ente que no se puede ver a simple vista. A lo largo de los años, esta distinción ha sido atacada por varios filósofos de la ciencia, como Grevor Maxwell<sup>i</sup> y Peter Lipton [13]. De acuerdo con Stathis Psillos, el realismo científico posee tres dimensiones: una dimensión epistemológica, una metafísica (u ontológica) y una semántica [14]. Estas dimensiones y algunas de sus objeciones son:

*Dimensión Epistemológica:* Epistemológicamente, el realismo científico se relaciona con la idea de que las teorías científicas constituyen verdaderamente una fuente de conocimiento sobre el mundo externo. Es decir, si en una teoría científica se afirma algo acerca de un conjunto de entes no observables, entonces dicha afirmación se considerará como conocimiento válido acerca de esos entes. Las objeciones de la dimensión epistemológica se presentan con teorías escépticas que ponen en tela de juicio si en verdad las teorías científicas son una fuente legítima de conocimiento, o si resultaría mejor que ese conocimiento sólo deba atribuirse exclusivamente a entidades observables y a circunstancias relacionadas con la experiencia inmediata.

*Dimensión Metafísica:* Metafísicamente, el realismo científico está relacionado con admitir la existencia de un único mundo independiente de nuestra mente, el cual es el investigado por la ciencia. La principal objeción de esta dimensión se basa en aceptar que no existe un único mundo externo independiente de nosotros, sino que más bien somos nosotros quienes creamos el mundo al experimentarlo. Una versión menos contundente de esto consiste en aceptar que el mundo en que vivimos no es independiente de nuestra mente. Esta objeción se basa en aceptar que el mundo investigado por la ciencia depende de las ideas, creencias o prejuicios de los científicos al momento de investigarlo.

*Dimensión Semántica:* Semánticamente, el realismo científico está relacionado con la interpretación literal de las afirmaciones que en las teorías científicas se

hacen sobre el mundo. Afirmaciones sobre procesos, eventos, objetos observables y objetos inobservables se deben tomar como literales y verdaderas a priori. La postura filosófica del instrumentalismo representa la principal objeción de esta dimensión. En el instrumentalismo se sostiene que las teorías científicas son sólo instrumentos de predicción que sirven para relacionar distintos eventos observables del mundo.

El instrumentalismo representa un contraste anti-realista del realismo científico. En el instrumentalismo más radical se pueden generar claras distinciones entre entes no observables de las teorías científicas y los entes observables del mundo. Como señala Chalmers [15]:

*[En el instrumentalismo] la finalidad de la ciencia es producir teorías que constituyan mecanismos o instrumentos convenientes para relacionar un conjunto de situaciones observables con otro. Las descripciones del mundo que conllevan entidades observables describen cómo es en realidad el mundo, pero no ocurre así con las descripciones de los sistemas que conllevan conceptos teóricos. Estos últimos han de ser interpretados como ficciones útiles que facilitan nuestros cálculos.*

El instrumentalismo, sin ese nombre, ha existido desde la antigüedad. E.g: Simplicius reporta que, en la Academia, Platón pidió a sus alumnos describir la más simple explicación para el movimiento observable de algunos cuerpos celestes, “proponiendo hipótesis para sus movimientos ordenados y uniformes que puedan dar las apariencias de los movimientos planetarios” [16]. Sin embargo, la formalización de la postura instrumentalista está relacionada con el llamado círculo Viena, un grupo de filósofos empiristas de la primera mitad del siglo XX que negaron la dimensión semántica del realismo científico al no interpretar literalmente las afirmaciones de las teorías científicas acerca de entes no observables. Esto los condujo a argumentar que las afirmaciones sobre entes no observables únicamente cobrarían sentido cuando éstos estuvieran relacionados con objetos o fenómenos observables. Por ejemplo, afirmaciones acerca de electrones cobrarían sentido si por electrones se entendiera, digamos, una trayectoria brillante en el interior de una cámara de Wilson, o un haz de rayos catódicos en un arreglo experimental de Thomson<sup>ii</sup>.

La crítica más poderosa contra el instrumentalismo se basa en la distinción entre entes observables y no observables. Mientras más se acepte la existencia de algo por su carácter observacional, más se acerca el instrumentalista a la noción inductivista ingenua de que el conocimiento proviene de la observación. Por otro lado, si se respeta la dimensión semántica del realismo científico, entonces se confía en la existencia de las entidades no observables presentes en las teorías científicas y se evita la mencionada crítica del instrumentalismo. Además, si se respetan las dimensiones del realismo científico (actitud epistemológica positiva), se pueden

desarrollar avances tecnológicos considerables. Por ejemplo, si se tiene una actitud epistemológica positiva hacia el modelo de quarks, entonces se aceptará la realidad de las partículas descritas en ese modelo, por lo que su detección será necesaria, y se desarrollarán detectores para ello, como sucedió en 1977, en Fermilab, cuando se detectó por primera vez el quark bottom [17].

A partir de lo anteriormente mencionado, se puede por tanto dar la siguiente definición: El realismo científico es un tipo de realismo que afirma que las teorías científicas describen de manera verdadera, o aproximadamente verdadera, aspectos y entes observables, o no observables, en un único mundo externo. Con esta definición general, a continuación, se exponen los principales argumentos a favor del realismo científico y sus más importantes objeciones, así como los principales argumentos antirrealistas científicos.

## 2.2. Argumentos a favor del realismo científico

### 2.2.1. Argumento del no milagro

El argumento más importante a favor del realismo científico es el argumento del no milagro. La siguiente cita de Hilary Putnam lo ilustra: “El realismo científico es la única filosofía que no hace ver al éxito de la ciencia como un milagro” [18]. Este argumento parte de la premisa ampliamente aceptada de que las teorías científicas han logrado ser increíblemente exitosas (como ejemplo de este éxito se puede pensar en los enormes avances tecnológicos de los últimos 100 años, como las telecomunicaciones, los viajes espaciales, la energía nuclear etc.). Es así como surge la siguiente pregunta: ¿cómo se explica el increíble éxito de la ciencia? En la respuesta de los realistas científicos se considera a las teorías científicas como evidentemente correctas, y es por esto mismo que son exitosas. Ya que si las teorías científicas no fueran correctas (si no describieran verdaderamente al mundo) entonces el éxito de las teorías científicas sería un auténtico milagro. Por tanto, dos posibles explicaciones para el éxito de la ciencia son: el éxito es debido a un milagro, o, el éxito es debido a que las teorías son correctas y describen la realidad del mundo.

Las objeciones más sólidas en contra del argumento del no milagro se basan en considerar las explicaciones del éxito de la ciencia como innecesarias. Un ejemplo es la postura de Bas Van Fraassen [19] con el empirismo constructivo, donde argumenta, entre otras cosas, que las teorías científicas exitosas son análogas a los organismos vivos bien adaptados a su entorno, y dado que sólo los organismos bien adaptados sobreviven, entonces es natural y nada sorprendente, que una teoría científica tenga éxito, pues las que no tienen éxito han dejado de existir, de la misma manera en que un organismo mal adaptado a su entorno termina por extinguirse. El empirismo constructivo de Van Fraassen de hecho representa el principal antagonista al argumento del no milagro. Evadiendo las críticas de otras formas de empirismo al aceptar la dimensión semántica del realismo científico, en el empirismo constructivo se sostiene la idea de que el objetivo de la ciencia es

solamente la adecuación empírica. Así, Van Fraassen afirma: “una teoría es empíricamente adecuada de manera exacta si lo que dice sobre eventos y entidades observables del mundo es verdad” [20]. De esta forma, a diferencia del instrumentalismo, en el empirismo constructivo las teorías científicas se interpretan de la misma manera que en el realismo científico, pero se opta por confiar en las afirmaciones de las teorías científicas solo en la medida en que describan entes observables, negando así la dimensión epistemológica del realismo científico, y se mantiene una actitud agnóstica acerca de cualquier ente o fenómeno no observable. Así, los empiristas constructivos reconocen como verdaderas o falsas afirmaciones acerca de entes no observables, pero no sienten necesidad alguna en aceptar que estos puedan existir. Sin embargo, uno de los ataques más directos al empirismo constructivo es el de Alan Musgrave [21], quien argumenta ingeniosamente que el empirista constructivo no puede aceptar muchos de los enunciados que necesita aceptar para ser empirista constructivo. El argumento va como sigue: con el objetivo de distinguir entre lo observable y lo no observable, el empirista constructivo se ve en la necesidad de aceptar enunciados del tipo “W no es observable”, que es precisamente un enunciado acerca de entes no observables, y por tanto imposible de aceptar para un empirista constructivo dada su posición agnóstica hacia las afirmaciones de lo no observable. Como consecuencia, dado que la distinción entre lo observable y lo no observable es fundamental para el empirista constructivo, y dado que esta distinción fundamental es incompatible con lo que puede creer, Musgrave juzga de insostenible al empirismo constructivo de Van Fraassen<sup>ii</sup>.

### 2.2.2. Comprobación experimental

Otro importante argumento a favor del realismo científico es el de la comprobación experimental, también llamado corroboración. De acuerdo con este, si una entidad no observable es detectada por varios instrumentos y medios de detección, o es indispensable a la luz de distintas teorías científicas, entonces esto constituye una base considerablemente sólida para aceptar la realidad de esa entidad. Un ejemplo de esto lo constituyen los distintos medios de detección de electrones, como la cámara de niebla, (o de Wilson), y la cámara de burbujas (o de Glasser), para afirmar la existencia del electrón dado el siguiente razonamiento: Si un electrón incide en, digamos, una cámara de niebla, se espera que éste interactúe con la niebla de la cámara y ionice a los átomos con los que logre interactuar, luego los átomos ionizados se volverán centros de condensación alrededor de los cuales se forman gotitas de agua y, finalmente, el electrón formará una traza de gotitas de agua durante su interacción con la cámara de niebla. En cambio, lo que se espera para un electrón que interactúe con una cámara de Glasser es que forme una traza de burbujas a su paso, pues en este tipo de cámaras se utiliza un fluido a una temperatura muy cercana a su punto de ebullición, generalmente hidrógeno líquido. Así pues, se concluye que el electrón existe a partir de la siguiente inferencia causal: Da-

do que la teoría que supone la existencia del electrón predice exitosamente lo que sucedería si esta partícula interactúa con el medio de la cámara de detección, se sigue que la suposición de la existencia del electrón no puede ser sino verdadera (esto apelando a la *teoría de verdad como correspondencia*), es decir, se concluye que el electrón efectivamente existe. Mientras más detecciones por distintos medios se hagan de una entidad inobservable, más fuerte será el argumento en favor de la realidad de esa entidad a pesar de que nunca será del cien por ciento. Aquí el argumento de la comprobación experimental es muy parecido al de no milagros en el sentido de que, si las entidades detectadas no existieran, entonces sería un auténtico milagro que distintos aparatos y medios de detección mostraran evidencia de la existencia de exactamente la misma entidad.

### 2.3. Argumentos en contra del realismo científico

#### 2.3.1. Argumento de incompatibilidad o indeterminación

El principal argumento contra el realismo científico es el de la incompatibilidad o indeterminación de las teorías científicas, el cual se basa en considerar teorías científicas rivales y empíricamente exitosas. El centro de este argumento es el de reconocer lo increíblemente difícil que puede llegar a ser determinar qué teoría es la “correcta” entre un grupo de teorías con equivalentes éxitos empíricos y cuyos postulados resultan opuestos y por lo tanto incompatibles entre sí. Es probable que el siguiente ejemplo histórico aporte claridad para explicar este argumento: Durante el siglo XVIII, la teoría del calórico fue la teoría dominante en cuanto al estudio de los gases y sus propiedades. Se aceptaba que el calórico era un fluido compuesto de partículas que se rechazaban unas a otras y que estaba irremediamente atraído por las partículas de la materia ordinaria. Se consideraba que el calórico era capaz de difundirse sin fricción y que cualquier cantidad de materia estaría rodeada de una “atmósfera de calórico” [22]. Científicos como Lagrange y Laplace fueron partidarios de esta teoría, este último utilizó la teoría del calórico para explicar cómo  $PV_\gamma$  permanece constante para expansiones y compresiones adiabáticas. Vale recordar que  $\gamma$  es el coeficiente de dilatación adiabática, el cual se obtiene al dividir el calor específico a presión constante ( $C_p$ ) entre el calor específico a volumen constante ( $C_v$ ).

Laplace pudo calcular la velocidad del sonido en el aire asumiendo compresiones y expansiones adiabáticas en el aire cuando una onda de sonido se propaga por él, concluyendo que el valor reportado en los *Principia* por Newton<sup>iii</sup> debía multiplicarse por  $\sqrt{\gamma}$  para obtener un valor más apegado al experimental<sup>iv</sup>. Sin embargo, para principios del siglo XIX, la teoría del calórico se vio enfrentada a los resultados de la teoría de la conservación de la energía. Del experimento de la expansión libre de Joule, ejemplo de una expansión adiabática, y la teoría de la conservación de la energía, fue posible deducir la relación  $\gamma = C_p/C_v$  y calcular la velocidad del sonido en el aire. Esta velocidad concordaba con la obtenida a

partir de la teoría del calórico. De esta manera, ambas teorías coexistieron y fueron usadas para explicar exitosamente distintos problemas. Dado su equivalente éxito empírico, decidir qué teoría era mejor, o qué teoría era la correcta, estaba indeterminado por las evidencias, además, ambas teorías contenían afirmaciones que no podían ser representadas ni entendidas en términos de la otra teoría, de manera que ambas resultaban ser incompatibles desde el punto de vista epistemológico. Una analogía tomada de la física teórica actual para explicar este argumento es la siguiente: La relatividad general Einstein postula que la gravedad no es una fuerza, sino una consecuencia de la curvatura del espacio-tiempo debida a objetos masivos. Así mismo, en el Modelo Estándar de Partículas Elementales se postula que la gravedad es efectivamente una fuerza, cuya partícula transmisora es el gravitón, aunque no haya sido detectado. Así, dos explicaciones distintas de la gravedad se ven encontradas, y dado que son fundamentalmente contrarias, la Relatividad General y el Modelo Estándar de Partículas Elementales, que se entiende a partir de la Teoría Cuántica de Campos, son incompatibles.

Una importante consecuencia del argumento de la indeterminación/incompatibilidad es la siguiente: al no saber qué teoría elegir de entre varias teorías con sólidas evidencias empíricas, se llegaría a la conclusión de que son verdaderas, o probablemente verdaderas, todas las afirmaciones de las teorías científicas en cuestión, incluyendo las que resulten incompatibles entre sí. Por tanto, podría afirmarse que existen tantas verdades como teorías científicas empíricamente consistentes. Lo cual es absurdo.

La principal objeción del argumento de la incompatibilidad, o indeterminación, surge precisamente de la definición de indeterminación: Aunque se acepte la indeterminación entre teorías rivales empíricamente exitosas, solo basta con esperar a que aparezca evidencia experimental capaz de proporcionar un criterio plausible de elección. Es decir, es posible la coexistencia de varias teorías científicas empíricamente exitosas simplemente porque no se tiene la suficiente evidencia experimental para seleccionar una sola teoría. Retomando el ejemplo dado anteriormente, la teoría del calórico no fue reemplazada por la propuesta basada en la conservación de la energía debido a evidencia empírica decisiva, sino más bien por falta de ella, pues finalmente se reconoció la existencia del calórico como una hipótesis totalmente *ad-hoc*. Además, todos los resultados de la teoría del calórico fueron derivados exitosamente de la conservación de la energía por Clausius [23].

#### 2.3.2. Inducción pesimista

Otro importante argumento en contra del realismo científico es el de la inducción pesimista expuesto por el filósofo de la ciencia Larry Laudan [24]. Este argumento es consecuencia de un análisis histórico de la ciencia, pues si se analiza la historia de las teorías científicas de cualquier disciplina, no sólo de la física, se encuentra un constante reemplazo de teorías pasadas por teorías nuevas, esto en virtud del desarrollo del

conocimiento científico. Diversas teorías bien establecidas y aceptadas han sido descartadas y reemplazadas por otras nuevas. Así, se puede decir que la mayoría de las teorías científicas del pasado son actualmente consideradas como “falsas”, aunque pueda admitirse que algunas de ellas lograron predecir algunos fenómenos observables. Realizando un proceso de inducción, se llegará a la conclusión de que éste proceso de reemplazo de teorías viejas por nuevas se dará nuevamente, lo que lleva a la conclusión de que es bastante probable que nuestras teorías científicas actuales sean eventualmente también reemplazadas por otras teorías en el futuro. Henri Poincaré contribuyó a este argumento al describir la llamada “quiebra de la ciencia” [25] dada la aparente “naturaleza efímera de las teorías científicas” [26], que son abandonadas “una atrás de otra” [27]. Como ejemplo de esto se puede considerar las distintas teorías que han descrito a la naturaleza de la luz: En la teoría Newtoniana se sostenía que la luz estaba hecha de corpúsculos, mientras que en la teoría ondulatoria de Young y Fresnel se consideraba a la luz como ondas propagándose en el éter mecánico; finalmente, la existencia del éter no pudo ser comprobada y este fue rechazado; de este modo, la teoría cuántica definió a la luz como partículas con propiedades ondulatorias llamadas fotones.

### 3. Evidencia científica

En seguida se exponen algunas de las evidencias científicas históricamente más célebres y reconocidas para demostrar la existencia de los átomos y moléculas. Estas son, en orden cronológico: La Ley de Proust, la Teoría Cinética de los Gases, El movimiento Browniano y las imágenes de átomos tomadas con microscopio de efecto túnel.

#### 3.1. Ley de Proust

La ley de Proust es también conocida como la *ley de las proporciones definidas*. Fue enunciada en 1799 por el químico francés Joseph Louis Proust [28] y formalizada en años posteriores por su alumno Jöns Jakob Berzelius. La ley de Proust fue enunciada como sigue [29]:

*Debemos concluir que la naturaleza no opera de otra manera en las profundidades del mundo que en su superficie o en las manos del hombre. Estas proporciones siempre invariables, estos atributos constantes, que caracterizan los verdaderos compuestos del arte o de la naturaleza, en una palabra, este pondus naturae [naturaleza del peso]... digo, no está más en el poder del químico que la ley de elección que preside todas las combinaciones.*

Durante buena parte del siglo XVIII, los químicos consideraban dos tipos de procesos químicos. Si dos sustancias se lograban mezclar, y su mezcla producía calor y/o luz, se consideraba que habían experimentado una unión química (actualmente, a una reacción de este tipo se le conoce como reacción exotérmica). Por otra parte, si la mezcla de dos

substancias no era capaz de producir calor ni luz, y además las sustancias eran capaces de distinguirse después de haber sido mezcladas y/o se lograban separar por medios físicos o mecánicos, se consideraba que estaban mezcladas físicamente. Sin embargo, muchos compuestos conocidos eran inclasificables con este criterio, por ejemplo, las aleaciones de los metales o el vidrio.

A finales del siglo XVIII se sabía que algunos compuestos químicos contienen en proporciones fijas los pesos de sus constituyentes. Es decir, que sin importar la cantidad de compuesto que se tome, la proporción de los pesos de sus componentes siempre se mantiene constante. Este hecho de conservación de proporciones le permitió al químico alemán Jeremias Richter enunciar lo que se podría considerar como el principal antecedente de la ley de Proust: *la ley de los equivalentes químicos*, que puede enunciarse como sigue [30]:

*Cuando dos soluciones neutrales se mezclan y ocurre una descomposición, los productos generados son, casi en su mayoría, también neutros. Los elementos deben, por lo tanto, tener en ellos una cierta y fija proporción de masas.*

No obstante, la posterior generalización de Proust no fue aceptada en un principio, pues distintas teorías químicas coexistían durante la época y la más aceptada era la teoría de la *afinidad química*. Así, las ideas de Proust eran consideradas simplemente otra teoría más. Sin embargo, al final del siglo XVIII, se dio un acalorado debate entre Proust y Claude Louis Bertholet, senador de la nueva república francesa y reconocido químico partidario de la teoría de la afinidad y alumno de Lavoisier. En el debate, Proust defendía que las reacciones químicas se daban siempre en proporciones fijas, mientras que Bertholet sostenía lo contrario. Ambos lograron mostrar evidencias experimentales que apoyaban sus argumentos. Sin embargo, se considera que el debate fue un “diálogo de sordos” [31], pues donde Bertholet veía un compuesto químico en proporciones variables, Proust encontraba una mezcla física de sustancias o una solución [32]. El problema era que Bertholet consideraba a las soluciones como auténticos compuestos químicos, pues sostenía la hipótesis *ad-hoc* de que las mezclas y las soluciones “eran producidas por la misma fuerza que actuaba en cualquier reacción, pero que en este caso se ejercía de una manera extraordinariamente débil” [33]. La controversia entre Bertholet y Proust continuaría. Al paso del tiempo, Bertholet se volvió cada vez más insistente hacia Proust para que elaborara una definición de compuesto químico y así distinguir un compuesto de una solución. De ese modo, Proust enunciaría una definición de compuesto químico en 1806. La definición no sólo sería una respuesta a las críticas de Bertholet, sino también a las dudas que había despertado el recién descubierto coivre gris, un compuesto que presentaba una composición muy particular de proporciones variables. La definición de Proust es la siguiente [34]:

*He de argumentar que el coivre gris no es un compues-  
to. un compuesto, de acuerdo con nuestros principios,  
(...) es algo como el sulfido de plata, o el antimonio,  
o el mercurio, o el cobre; es una substancia combus-  
tible acidificada... es un producto privilegiado al cual  
la naturaleza le ha asignado proporciones fijas (...).*

Como se ve, la definición de Proust dista de ser especí-  
fica. Sin embargo, puede considerarse que esta controversia  
es solo un intento por responder una pregunta fundamen-  
tal: ¿qué es una substancia? El posterior desarrollo de la teoría  
atómica de John Dalton y los consecuentes experimentos de  
Berzellius y Stanislaw Cannizaro en recabar pesos atómicos  
se enfocarían en esta interrogante.

En la controversia descrita fue que Dalton comenzó a for-  
mular su teoría atómica. Dalton, que no era químico sino me-  
teorólogo, estaba interesado en resolver los problemas de la  
absorción de gases y de agua en la atmósfera. Advertía que  
las mezclas resultantes de los gases en la atmósfera resulta-  
ban bastante homogéneas a pesar de la diferencia de densi-  
dades, y pensó que podría resolver dicho problema conocien-  
do los pesos y tamaños relativos de los componentes de los  
gases mezclados. La idea de considerar partículas como com-  
ponentes fundamentales parece tomada de Newton. El primer  
capítulo de la *Optika* es prueba de esto. un pasaje relevante  
es el siguiente [35]:

*Considerando todas estas cosas, me parece probable  
que Dios en el principio formó materia en partículas  
sólidas, macizas, duras e impenetrables, de tales ta-  
maños y figuras, y con tales otras propiedades, y en tal  
proporción y espacio (...) que estas partículas primiti-  
vas, siendo sólidos, son incomparablemente más duras  
que cualquier cuerpo poroso compuesto de ellas.*

Estas consideraciones concuerdan con la siguiente afir-  
mación de A.N. Meldrum: “Dalton había formado una teoría  
atómica física antes que una teoría atómica química” [36].  
La regla más importante de la teoría atómica de Dalton es  
que los elementos químicos se mezclan de átomo en átomo.  
Dalton crearía una clasificación de compuestos con relación a  
la cantidad de átomos presentes. Así, a un compuesto forma-  
do únicamente por un átomo de un elemento y un átomo de  
otro elemento lo denominó *binario*. un ejemplo de este tipo  
de compuesto sería la molécula de Cloruro de Sodio, NaCl en  
la nomenclatura actual. La teoría de Dalton fue cuestionada  
durante años y en particular fue retado a justificar su regla de  
combinación átomo a átomo. Argumentó que, si un elemento  
A se mezclaba con un elemento B, entonces la repulsión de  
los átomos de B tendería a formar, en principio, solo un com-  
puesto binario. La respuesta textual es la siguiente: “(...) los  
compuestos binarios son los primeros que se forman, luego  
los terciarios y así sucesivamente hasta que la repulsión de los  
átomos de B no permita más formación de compuestos” [37].

Dalton y otros científicos de la época como Thomas  
Thomson [38] trataron de poner la teoría atómica sobre ba-  
ses experimentales. Sin embargo, sería Berzellius quien daría

a la teoría atómica de Dalton un giro conceptual, relaciona-  
do con fenómenos electrostáticos, y terminaría obteniendo el  
sustento experimental que necesitaba para ser aceptada por  
la comunidad científica. En 1807, Dalton recabó su propia  
tabla de masas atómicas relativas, la primera de la que se ten-  
ga registro. Para realizarla, consideró al Hidrógeno como un  
elemento con masa de valor 1, y las masas de los demás ele-  
mentos conocidos fueron obtenidas en función del Hidróge-  
no. Dalton crearía su propia nomenclatura, utilizando círcu-  
los y líneas para diferenciar compuestos y elementos.

Dalton consideraría en un principio al agua como un com-  
puesto binario, es decir, en notación actual, Dalton pensaba  
que el agua era HO y no H<sub>2</sub>O. La relación de masas relativas  
que permitió a Dalton llegar a esa conclusión acerca del agua  
es la siguiente:

$$\frac{m_{\text{O}}}{m_{\text{H}}} = \frac{A_{r\text{O}}N_{\text{O}}}{A_{r\text{H}}N_{r\text{H}}} \quad (3.1.1)$$

Donde  $m$  es la masa del elemento,  $N$  el número de áto-  
mos y  $A_r$  es la masa atómica del elemento. Así,  $(A_{r\text{O}}/A_{r\text{H}})$   
representa la masa relativa del oxígeno en relación con la  
masa del hidrógeno. Dalton advirtió la proporción de 7:1  
del Oxígeno respecto al Hidrógeno<sup>vi</sup>. Es decir,  $(m_{\text{O}}/m_{\text{H}}) =$   
 $7/1$ . Lo que implica  $(N_{\text{O}}/N_{\text{H}}) = 1$ , de lo que se sigue que el  
agua es un compuesto binario. Esto indica que la masa atómi-  
ca relativa del oxígeno es  $(A_{r\text{O}}/A_{r\text{H}}) = 7$ . En años posterio-  
res, Dalton advertiría que el agua también podría correspon-  
der a un compuesto ternario, con dos átomos de Hidrógeno y  
uno de Oxígeno. Vería que la proporción  $(m_{\text{O}}/m_{\text{H}}) = 7$ , que  
siempre era constante, resultaría igual si  $(N_{\text{O}}/N_{\text{H}}) = 1/2$  y  
por tanto  $(A_{r\text{O}}/A_{r\text{H}}) = 14$ . Dalton trabajaría de esta misma  
forma en la determinación de las masas relativas de los ele-  
mentos conocidos, lo que le permitiría publicar una tabla con  
sus resultados.

La Ec. (3.1.1) representa una gran herramienta para cono-  
cer las masas relativas de elementos y, por tanto, conocer la  
fórmula química de los compuestos que contengan elemen-  
tos conocidos. Además, la Ec. (3.1.1) relaciona directamente  
la masa macroscópica  $m$  con la magnitud microscópica del  
número de átomos  $N$ .

Berzellius corregiría el modelo atómico y la tabla de ma-  
sas atómicas de Dalton. Además, crearía una nueva nomen-  
clatura química nombrando a los elementos con las primeras  
letras de sus nombres en latín. Por ejemplo, Berzellius nom-  
bró a la plata con el nombre de “Ag” (*Argentum*) y al oro lo  
nombró “Au” (*Aurum*). Estos nombres estaban relacionados  
con el volumen que cada elemento ocupa en un compuesto.  
Así, Berzellius escribía la fórmula del sulfato de cobre como  
sigue: (CuO + SO<sub>3</sub>), donde el subíndice 3 del oxígeno indi-  
caba la cantidad de unidades de oxígeno presentes y el volu-  
men que ocupaban. Para desarrollar su nomenclatura, Berze-  
lius ideó una teoría atómica propia, influenciada por la teoría  
atómica de Dalton y por los experimentos de electrólisis de  
Michael Faraday. La teoría atómica de Berzellius es conside-  
rada la primera teoría atómica electroquímica de la que se

tenga registro. Como escribe al inicio de uno de sus más citados artículos [39]:

*El hecho de que los cuerpos se combinan en proporciones definidas cuando otras fuerzas no se oponen a su unión (...) nos lleva a concluir la existencia de una causa en consecuencia de la cual todas las demás combinaciones se vuelven imposibles. Ahora ¿cuál es esa causa? Es obvio que la respuesta a esta pregunta debe constituir la base principal de la teoría química.*

Para Berzelius, esa causa está constituida por las repulsiones electrostáticas entre los átomos. Es decir, la ley de Proust se cumple debido a fuerzas electrostáticas de los elementos. Esto también explica el argumento de Dalton de que los elementos forman compuestos binarios, luego ternarios y así sucesivamente, pues se considera que las repulsiones electrostáticas han de cesar cuando los compuestos se hallan completamente formados.

Durante los años posteriores a 1850, surgiría el concepto de *cantidad de sustancia* y la unidad que la ha de ponderar: el *mol*. A su vez, el concepto de *número de Avogadro*, anterior y olvidado por entonces, se uniría a los otros dos para generar un nuevo sistema de nomenclatura y estudio de la química. La hipótesis de Avogadro es la siguiente: “En las mismas condiciones de temperatura y presión, diferentes gases que ocupen el mismo volumen tienen el mismo número de moléculas” [40]. Avogadro nunca utilizó la palabra *átomo*, pues distinguía entre dos tipos de moléculas: *moléculas elementales* y *moléculas compuestas*. Una de las razones por las que se abandonó esta hipótesis fue debido a que el químico francés Jean Baptiste Dumas la usaría y advertiría anomalías [41]. Debido a esto, Dumas rechazaría la hipótesis de Avogadro. De este modo surgiría una teoría rival al atomismo, conocida como *equivalentismo*, donde se consideraba a la materia como continua. Los equivalentistas desarrollaron una nomenclatura lo suficientemente clara como para ser ampliamente aceptada, pues se sabe que: “En 1844, la notación atómica había sido eclipsada por la notación equivalente en ‘*Annales de Chimie*’ [Anales de Química] revista de la que Lavoisier fue editor. Casi todos los químicos franceses resolvieron adoptar la notación equivalentista” [42]. Esta nomenclatura estaba relacionada con las masas de los elementos involucrados en los compuestos, en oposición a la nomenclatura propuesta por Berzelius, relacionada con el volumen que ocupan los átomos en un compuesto. De esta manera, se generó un conflicto entre dos teorías con éxitos empíricos comparables (*i.e. argumento de indeterminación*). Este conflicto se resolvería a favor del atomismo después del célebre congreso de Karlsruhe (en este congreso se adoptó un sistema unificado de masas atómicas) donde Cannizzaro inclinó la balanza al recuperar la hipótesis atómica/molecular de Amedeo Avogadro. Ahora bien, el primero en usar el mol fue el fisicoquímico alemán Wilhem Ostwald, uno de los defensores minoritarios de la notación equivalentista. Su definición de mol es la siguiente: “La masa de una sustancia, expresada

en gramos, numéricamente igual a su masa molar relativa” [43]. Sería el mismo Ostwald quien usaría por primera vez el término cantidad de sustancia. Finalmente, una vez abandonado el equivalentismo, el concepto de mol comenzó a ser entendido como “la cantidad de sustancia que contiene el mismo número de unidades que el número de átomos contenidos en 12 gr de carbono 12” [44], que es el número de Avogadro.

### 3.1.1. Apoyo a la hipótesis atómica

La ley de Proust surgió de manera empírica durante el siglo XVIII, y no implicaba, en primera instancia, ningún tipo de consideración atómica, aunque se pueda admitir que de ella se podían desprender nociones, ahora consideradas vagas, de átomos, equivalentes y volúmenes. No obstante, lo que Proust señalaba era solamente una explicación de sus experimentos relacionados con los pesos de los elementos presentes en distintos compuestos químicos. Sería con las ideas atómicas de Dalton, que abarcaban una gran generalidad de situaciones, que se logró utilizar y explicar la ley de Proust y muchos otros fenómenos, como la formación de compuestos, el balance de masas, etc., utilizando su modelo de repulsión atómica. Después, con los experimentos de Berzelius, la ley de Proust terminaría por ser comprendida a la luz de las repulsiones electrostáticas de los átomos. De este modo, la teoría atómica permitió la explicación y predicción de muchos fenómenos con un enorme éxito, el cual puede ser usado como un argumento del no-milagro por un filósofo realista, notando que sería un auténtico milagro que los átomos no existieran cuando la teoría que los propone posee un enorme éxito empírico.

Por otra parte, como se mencionó anteriormente, la teoría atómica coexistió con teorías rivales, como la afinidad química y el equivalentismo. De hecho, la coexistencia de esta última con la teoría atómica derivó en un ejemplo del argumento de *incompatibilidad/indeterminación*. Sin embargo, se descartó el *equivalentismo* y la teoría atómica fue preferida debido a las enormes posibilidades de desarrollo que ofrecía, mismas que surgían del éxito empírico de Dalton y Berzelius y del poder teórico de la hipótesis de Avogadro. Sin embargo, vale recordar ahora que el atomismo de Dalton no era precisamente el mismo que el de Berzelius, y ambos no estaban relacionados con la hipótesis de Avogadro. En este sentido, los átomos aparecen como entidades indispensables para varias teorías con gran éxito empírico y que permitieron el desarrollo del conocimiento científico. Este hecho puede tomarse como un argumento de *corroboración* de la existencia de los átomos.

Así pues, el hecho de que la teoría atómica logre explicar de manera exitosa una gran cantidad de situaciones (argumento del *no milagro*) y resulte indispensable a la luz de distintas teorías con considerables éxitos empíricos (argumento de la *comprobación experimental*), sugiere, de una manera muy poderosa, la existencia de los átomos y su papel como las partículas fundamentales de la materia.

### 3.2. Teoría cinética de los gases

En la Teoría Cinética de los Gases (de ahora en adelante se le llamará simplemente Teoría Cinética) se pretende explicar las propiedades macroscópicas de los gases y sistemas a partir de la hipótesis atómica/molecular de los mismos. Es decir, la teoría cinética aborda los mismos problemas que la termodinámica, pero supone la existencia de átomos y moléculas como los componentes fundamentales de la materia. Por otra parte, las leyes de la teoría cinética son las mismas leyes de la mecánica clásica, pero aplicadas estadísticamente a los átomos y/o moléculas que, por hipótesis, asumimos que constituyen el sistema. Además, para lograr explicar con éxito los fenómenos macroscópicos de los gases, la teoría cinética establece las siguientes siete hipótesis relacionadas a los átomos y moléculas que los constituyen [45]:

- 1.- Cualquier volumen finito de un gas consiste en un número muy grande de átomos/moléculas. El número de átomos/moléculas se denota por la letra "N" y  $N \approx 1 \times 10^{22}$ .
- 2.- Las moléculas se encuentran separadas por distancias muy grandes comparadas con sus propias dimensiones y están en movimiento constante.
- 3.- Las moléculas no ejercen fuerza entre sí, excepto cuando colisionan.
- 4.- Las colisiones entre moléculas o entre moléculas y paredes son perfectamente elásticas.
- 5.- En ausencia de fuerzas externas las moléculas están distribuidas uniformemente en el recipiente.
- 6.- Todas las direcciones de las velocidades moleculares son igualmente probables.
- 7.- Las magnitudes de las velocidades moleculares cambian continuamente como consecuencia de las colisiones, pero en equilibrio, el número de moléculas comprendidas dentro de un cierto intervalo permanece constante.

En las secciones siguientes se expondrán los resultados elementales más significativos de la teoría cinética, entendidos con relación a las siete hipótesis presentadas, que se basan en suponer la existencia de los átomos. La importancia de los siguientes resultados radica en lo matemática y empíricamente exitosas que resultan las explicaciones de propiedades macroscópicas de la materia a partir de consideraciones microscópicas de la misma.

#### 3.2.1. Interpretación cinética de la presión

Considérese un gas dentro de un recipiente cúbico con una longitud de arista igual a  $b$  dentro de un sistema coordena-

do  $x, y, z$ . Ahora supóngase que todas las colisiones de los átomos del gas con las paredes del recipiente serán perfectamente elásticas, denotando como  $A_1$  y  $A_2$  a las áreas de las dos caras que son perpendiculares al eje  $x$  del sistema coordinado, en donde  $A_1 = b^2 = A_2$ . Una partícula con velocidad  $\vec{v} = (v_x, v_y, v_z)$  dentro del recipiente cúbico se dirige de  $A_2$  hacia  $A_1$ . Cuando la partícula choque con  $A_1$ , rebotará hacia el lado opuesto con la misma velocidad, pero su componente en  $x$  ahora será negativa ( $-v_x$ ). Las componentes  $v_y$  y  $v_z$  no son afectadas en ningún momento. De este modo, el cambio de momento de la partícula después de la colisión será:

$$\Delta p = p_f - p_i = -2mv_x \quad (3.2.1)$$

La totalidad de momento que se aplica sobre  $A_1$  será entonces  $p = 2mv_x$ . Si se considera que la partícula viaja a  $A_2$  sin chocar con ninguna otra partícula dentro del cubo, su componente  $v_x$  volverá a ser positiva después de chocar con  $A_2$ , de manera que el tiempo requerido para que la partícula realice un trayecto de ida y vuelta a  $A_1$  será  $t = (2b/v_x)$ . Por lo tanto, la frecuencia con que la partícula golpea a la cara  $A_1$  es  $1/t = \nu = v_x/2b$ . Así, la rapidez con la que se aplica momento en  $A_1$  es

$$\frac{p}{t} = 2mv_x \frac{v_x}{2b} = \frac{mv_x^2}{b} \quad (3.2.2)$$

Esta ecuación es la fuerza que ejerce la partícula considerada sobre  $A_1$ . Para obtener una expresión de la fuerza que ejercen todas las partículas del gas sobre  $A_1$ , es decir, para obtener una expresión de la rapidez con que se ejerce momento sobre por todas las partículas del gas, se debe sumar  $(mv_x^2/b)$  por cada partícula del gas. Así, para obtener la presión total sobre  $A_1$ , se debe dividir la expresión para la fuerza total sobre el área de  $A_1$ , la cual es  $b^2$ . Si  $m$  se considera la masa de cada molécula, entonces la presión total  $P$  será:

$$P = \frac{m}{b^3}(v_{x1}^2 + v_{x2}^2 + v_{x3}^2 + \dots) \quad (3.2.3)$$

Donde  $v_{x1}$  es la componente en  $x$  de la velocidad de la primera partícula,  $v_{x2}$  es la componente en  $x$  de la velocidad de la segunda partícula, etc. Se considerará ahora que  $N$  es el número de partículas del gas dentro del recipiente y que  $n$  es el número de partículas por unidad de volumen, es decir,  $n = N/b^3$ . Por lo tanto, se sigue que  $b^3 = N/n$ . De las ecuaciones anteriores se sigue que la expresión obtenida para la presión se convierte en:

$$P = mn \left( \frac{v_{x1}^2 + v_{x2}^2 + v_{x3}^2 + \dots}{N} \right) \quad (3.2.4)$$

Pero  $mn$  es la masa multiplicada por el número de partículas por unidad de volumen, es decir,  $mn$  es  $n$  veces la densidad de cada partícula del recipiente, de manera que  $mn$  es la densidad total del gas. A esta cantidad se le designará  $\rho$ . Ahora, a la cantidad  $(v_{x1}^2 + v_{x2}^2 + v_{x3}^2 + \dots/N)$  se le

llamará “velocidad cuadrática media en dirección  $x$ ” y se denotará por  $\bar{v}_x^2$ , y representará la componente en  $x$  de  $v_x^2$  para todas las partículas. Por lo tanto:

$$P = \rho \bar{v}_x^2 \tag{3.2.5}$$

Ahora, para una partícula cualquiera sucede que:  $\bar{v}^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$ . Por lo tanto, para el número total de partículas del gas dentro del recipiente:  $\bar{v}_x^2 = (1/3)\bar{v}^2$ , de manera que:

$$P = \rho \bar{v}_x^2 = \frac{\rho}{3} \bar{v}^2 \tag{3.2.6}$$

Vale subrayar que este resultado fue obtenido sin tomar en cuenta las colisiones de las moléculas entre sí, sin embargo, este resultado no cambia si efectivamente se consideran las colisiones, pues el intercambio de velocidades entre dos partículas idénticas que colisionan de manera elástica no evita que al menos una partícula choque contra  $A_2$ . Además, se ha calculado solamente la presión sobre una cara del cubo, pero por el principio de Pascal se deduce que la presión es igual en todas las caras, siempre y cuando la densidad del gas sea constante.

### 3.2.2. Interpretación cinética de la temperatura.

Si multiplicamos la Ec. (3.2.6) por el volumen total del sistema, se obtiene lo siguiente:

$$PV = \frac{\rho V}{3} \bar{v}^2 \tag{3.2.7}$$

Ahora, la cantidad  $(\rho V/3)\bar{v}^2$  representa las dos terceras partes de la energía cinética traslacional de todas las moléculas del gas, pues  $(2/3)((\mu\omega/2)\bar{v}^2) = ((\mu\omega/3)\bar{v}^2)$ . Donde  $\mu$  es el número de moles y  $\omega$  es la masa molar del gas. Así:

$$PV = \frac{2}{3} \left( \frac{\mu\omega}{2} \bar{v}^2 \right). \tag{3.2.8}$$

Esta ecuación se puede reescribir para obtener el resultado de Clausius:

$$\frac{3}{2}PV = \frac{1}{2}\mu\omega\bar{v}^2. \tag{3.2.9}$$

Recordando ahora la ecuación del gas ideal:

$$PV = \mu RT. \tag{3.2.10}$$

Igualando (3.2.10) y (3.2.9) se obtiene:

$$\frac{3}{2}RT = \frac{\omega\bar{v}^2}{2}. \tag{3.2.11}$$

Si ahora se divide esta ecuación entre el número de Avogadro,  $N_0$ , se obtiene:

$$\frac{3}{2} \left( \frac{R}{N_0} \right) T = \frac{\omega}{N_0} \left( \frac{\bar{v}^2}{2} \right) \tag{3.2.12}$$

Recordando ahora que  $(R/N_0 = K)$ , donde  $K$  es la constante de Boltzmann y que  $(\omega/N_0) = m$ , donde  $m$  es

la masa de una sola partícula del gas, se obtiene la famosa ecuación:

$$\frac{3}{2}KT = \frac{m}{2}\bar{v}^2 \tag{3.2.13}$$

Donde  $(m/2)\bar{v}^2$  es la energía cinética traslacional de cada partícula del gas,  $T$  es la temperatura del gas y  $K$  es la constante de Boltzmann.

### 3.2.3. Apoyo a la hipótesis atómica

Las Ecs. (3.2.6) y (3.2.13) resultan de suma importancia, pues relaciona la energía cinética traslacional de las moléculas de un gas con la presión y la temperatura del propio gas, respectivamente. Es decir, la presión y la temperatura de un gas, cantidades macroscópicas medibles, pueden relacionarse y tienen una explicación basada en el movimiento de las partículas microscópicas que se acepta componen el gas. Estas ecuaciones representan entonces un puente entre fenómenos macroscópicos y microscópicos. Estos resultados pueden relacionarse directamente con la ecuación del gas ideal presente en la termodinámica. Se puede entonces argumentar que la teoría cinética es una teoría más general que la termodinámica, pues a partir de la teoría cinética pueden ser derivados los resultados de la termodinámica y al mismo tiempo surgen nuevos aspectos teóricos y experimentales por investigar. Por ejemplo, de las Ecs. (3.2.6) y (3.2.13) es posible obtener valores para la velocidad promedio de los átomos o moléculas que componen algún gas, para esto solo se necesita saber su presión, temperatura y densidad. Es decir, las Ecs. (3.2.6) y (3.2.13) poseen una asombrosa cantidad de información acerca de la estructura microscópica de los gases. Esta adecuación matemática hace a la teoría cinética increíblemente poderosa para explicar y predecir exitosamente fenómenos observables. Este éxito constituye la base necesaria para afirmar que los átomos existen a partir del argumento del no milagro. Entendiendo que sería un completo milagro que los átomos y moléculas no existieran si la teoría cinética posee tanto poder explicativo.

Además, a partir de la existencia de los átomos es posible explicar el origen de la presión y la temperatura de un sistema. Por lo tanto, de la existencia de los átomos también es posible generar explicaciones de otras propiedades de la materia, como el calor específico o de varios fenómenos, como las expansiones y compresiones adiabáticas o la estructura de los objetos. Todo esto se podrá utilizar como un ejemplo del argumento de comprobación experimental en favor de la existencia de los átomos.

### 3.3. Movimiento Browniano

El nombre de *movimiento Browniano* se debe al cirujano y botánico escocés Robert Brown, quien fue el primero en señalar el movimiento que experimentan granos de polen en agua [46]. Sin embargo, el nombre general para el movimiento aleatorio de cualquier partícula microscópica en un fluido estacionario es “pedesis”.

### 3.3.1. Explicación teórica de Einstein

En 1905, Albert Einstein publicó un artículo sobre el movimiento Browniano donde argumentaría que la teoría cinética explica adecuadamente ese fenómeno [47]. La explicación se basa en considerar que las moléculas de agua estacionaria golpean en todas direcciones a los granos de polen que flotan en el agua, generando en estos un movimiento aleatorio. Einstein relacionó el cambio de la posición de un grano con una variable aleatoria  $x$  (o  $\Delta$  bajo un cambio de coordenadas donde el origen del sistema se halla en la posición inicial de la partícula), una función de densidad de probabilidad  $\varphi(\Delta)$  y la conservación del número de partículas durante todo el movimiento. El cambio en la posición de cada partícula se consideró estrictamente unidimensional. Finalmente, Einstein consideró el cambio de la densidad del conjunto de partículas en función del cambio de posición de cada una con respecto al tiempo. Esto se representa por medio de la siguiente expansión en serie de Taylor:

$$\begin{aligned} \rho(x, t) + \tau \frac{\partial \rho(x)}{\partial t} + \dots &= \rho(x, t + \tau) \\ &= \rho(x + \Delta, t) \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\Delta) d\Delta \end{aligned} \quad (3.3.1)$$

Donde

$$\int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\Delta) d\Delta = 1,$$

dado que  $\varphi(\Delta)$  es una función de densidad de probabilidad normalizada. Así, se puede multiplicar cada miembro de la serie por esta integral. Ahora, la función  $\rho(x + \Delta, t)$  también puede estar integrándose, así que puede estar dentro de la integral de la función de densidad de probabilidad. Ahora, se obtiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} \rho(x, t) &= \rho(x, t) \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\Delta) d\Delta + \frac{\partial \rho}{\partial x} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \Delta \varphi(\Delta) d\Delta \\ &+ \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\Delta^2}{2} \varphi(\Delta) d\Delta + \dots \end{aligned} \quad (3.3.2)$$

Pero

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Delta \varphi(\Delta) d\Delta = 0$$

debido a que el integrando de esta integral impropia es una función impar. Luego, la expansión en serie queda:

$$\rho(x, t) = \rho(x, t) + \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\Delta^2}{2} \varphi(\Delta) d\Delta + \dots \quad (3.3.3)$$

Recordando ahora que  $\rho(x, t) = \rho(x, t) + \tau(\partial \rho(x)/\partial t)$ , se sigue que:

$$\frac{\partial \rho(x)}{\partial t} = \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\Delta^2}{2\tau} \varphi(\Delta) d\Delta \quad (3.3.4)$$

La Ec. (3.3.4) resulta de suma importancia, pues gracias a ella Einstein pudo definir el coeficiente  $D$ , la integral impropia que está multiplicando a  $(\partial^2 \rho/\partial x^2)$ . Es decir:

$$D = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\Delta^2}{2\tau} \varphi(\Delta) d\Delta. \quad (3.3.5)$$

Este coeficiente representa la *difusión de la masa*. Una vez definido, se obtiene la siguiente ecuación para la densidad de la mezcla de agua y partículas que experimentan el movimiento Browniano:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} \quad (3.3.6)$$

Cuya solución es

$$\rho(x, t) = (N/\sqrt{4\pi Dt})e^{(-x^2/4Dt)},$$

una distribución normal con  $\mu = 0$  y  $\sigma^2 = 2Dt = (RT/6\pi\eta r N)$ . La varianza  $\sigma^2$  es el desplazamiento cuadrático medio de las partículas que experimentan el movimiento, y también puede expresarse como  $\bar{x}^2$ .

### 3.3.2. Experimentos de Perrin

Jean Baptiste Perrin realizó los experimentos necesarios en cuanto al movimiento Browniano para que éste fuera considerado como una evidencia de la existencia de átomos y moléculas. Como menciona Statis Psillos, "Perrin buscaba un fenómeno que le permitiera obtener directamente el número de Avogadro" [48]. Su solución teórica se presenta en seguida: Supóngase que tenemos una suspensión en equilibrio de modo que llena un cilindro de sección transversal  $s$ . Supóngase ahora que se tiene una tapa del cilindro en los niveles:  $\langle h, h + dh \rangle$  del cilindro, esta tapa está sujeta por dos pistones que dejan pasar el agua de la suspensión, pero no las partículas sólidas presentes. Cada pistón experimenta una presión osmótica por las colisiones de las partículas de la suspensión; sin embargo, la tapa no cae, pues debe haber un equilibrio entre la fuerza hacia arriba (la diferencia de presión osmótica en los pistones) y la fuerza hacia abajo (peso de las partículas menos la fuerza boyante que ejerce el líquido). Con estas consideraciones, Perrin obtuvo la siguiente ecuación:

$$\frac{2}{3} W \log \left( \frac{n_0}{n} \right) = \varphi(\Delta - \delta) gh \quad (3.3.7)$$

Donde  $W$  es la energía media de las partículas de solución (gránulos),  $\varphi$  el volumen de cada gránulo,  $\Delta$  la densidad de cada gránulo,  $\delta$  la densidad del líquido y  $n$  y  $n_0$  son las concentraciones de gránulos separados una distancia  $h$ . Así, Perrin se dedicaría a obtener las cantidades necesarias para obtener  $W$ .

La Ec. (3.3.7) conduce a una relación exponencial: La concentración de gránulos es mayor en el fondo que en la cima del cilindro. Algo parecido ocurre con la densidad del aire conforme aumenta la altura. Debido a esta analogía, Perrin utilizaría una suposición muy importante: La energía media  $W$  de los gránulos es la misma que la energía molecular media  $W^*$  de las partículas de un gas. Es decir, los gránulos del movimiento Browniano se comportan como las moléculas de un gas. Lo conveniente de esta suposición es que  $W^*$  está en función del número de Avogadro. Recordando la Ec. (3.2.13), que relaciona la temperatura de un gas con la energía cinética media de sus moléculas:  $(3/2)KT = (m/2)v^2 = W^*$

Donde  $T$  es la temperatura total del gas,  $m$  la masa de cada partícula,  $v^2$  es la velocidad cuadrática media y  $K$  es la constante de Boltzmann, que se define como  $K = R/N_0$ , donde  $R$  es la constante de los gases y  $N_0$  es el número de Avogadro. De este modo, Perrin recurrió al resultado de la teoría cinética que establece que gases a la misma temperatura poseen energías cinéticas medias idénticas para asumir que, necesariamente,  $W = W^*$ .

Perrin utilizaría gránulos esféricos de gomorresina en sus experimentos, de manera que la Ec. (3.3.7) se convirtió en:

$$\frac{2}{3}W \log\left(\frac{n_0}{n}\right) = \frac{4}{3}\pi r^3(\Delta - \delta)gh \quad (3.3.8)$$

Donde  $r$  es el radio de cada partícula. Así, determinar el radio  $r$  y las concentraciones  $n$  y  $n_0$  era una tarea crucial. Como menciona Charlotte Bigg: “esta parte del trabajo de Perrin resultó ser terriblemente dura, y fue su éxito en esta tarea lo que le garantizó el reconocimiento de la comunidad científica” [49]. Para saber las concentraciones de gomorresina, Perrin utilizaría un microscopio muy especial y una cámara lúcida. Este microscopio era el recientemente inventado: *Ultramikroskopie für Kolloid* [Ultramicroscopio para coloides], creado por Zeiss en 1902 y anunciado como “el único microscopio con el que se pueden ver partículas 500 veces más pequeñas que las partículas más pequeñas vistas por los microscopios ordinarios” [50]. Para determinar el radio de las partículas utilizaría tres métodos: El primero basado en la ley de Stokes y los otros dos en el uso del mismo Ultramicroscopio. Sin embargo, Perrin no quedaría muy satisfecho con el método de la ley de Stokes, pues necesitaba consideraciones poco plausibles. Así que decidió utilizar un “método más directo” [51], el de tomar fotografías con el ultramicroscopio.

Una vez obtenidas las concentraciones y obtenido los radios, Perrin determinó el número de Avogadro a partir de la siguiente expresión, que resulta de igualar la Ec. (3.2.13) con la Ec. (3.3.8):

$$\frac{RT}{N_0} \log\left(\frac{n_0}{n}\right) = \frac{4}{3}\pi r^3(\Delta - \delta)gh \quad (3.3.9)$$

Luego:

$$N_0 = \frac{3RT \log\left(\frac{n_0}{n}\right)}{4\pi r^3(\Delta - \delta)gh} \quad (3.3.10)$$

El valor obtenido por Perrin de  $N_0$  resultó equivalente al obtenido por Van der Waals, es decir,  $N_0 = 6.022 \times 10^{23}$  [52].

Una parte distinta del trabajo experimental de Perrin fue la de corroborar los resultados teóricos de Einstein ya mencionados. Sin embargo, los resultados de Perrin entraron en conflicto con los de Einstein, especialmente con el coeficiente de difusión  $D$ . Debido a esto, Perrin argumentaría que los resultados de Einstein usaban suposiciones que no fueron consideradas en los experimentos [53]. Sin embargo, Perrin y su asistente M. Chaudesaigues realizarían el cálculo del número de Avogadro a partir de los resultados de Einstein [54]. Para este cálculo, Perrin usaría el desplazamiento de las partículas como el parámetro a considerar, y no la velocidad de estas. Para esto, usó una cámara lúcida para proyectar el desplazamiento de las partículas sobre una hoja milimétrica, como se muestra en la Fig. 1.

De la expresión para el desplazamiento cuadrático medio se pudo obtener la siguiente expresión donde está presente el número de Avogadro:

$$\frac{\bar{x}^2}{2t} = D = \frac{RT}{6\pi\eta r N_0} \quad (3.3.11)$$

Donde  $R$  es la constante de los gases,  $T$  es la temperatura absoluta del sistema,  $\eta$  es la viscosidad y  $N_0$  es el número de Avogadro. Así, Perrin solo debía obtener el desplazamiento de las partículas, obtener su promedio, elevarlo al cuadrado y obtener el número de Avogadro de la Ec. (3.3.11) (ver Fig. 1). Finalmente, Perrin recibiría el premio Nobel de física por “sus trabajos acerca de la estructura discontinua de la materia” [55].

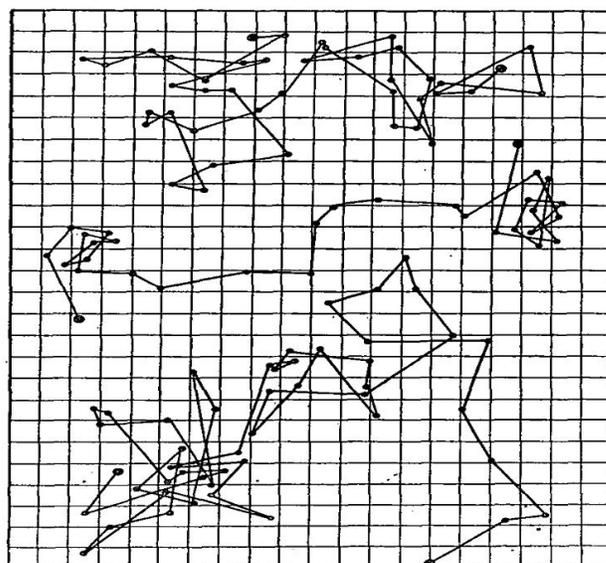


FIGURA 1. Desplazamiento de tres partículas Brownianas. Mediante una cámara lúcida, Perrin marcó los desplazamientos de tres partículas cada 30 segundos en una hoja graduada y luego los unió con una línea.

### 3.3.3. Apoyo a la hipótesis atómica

Con la obtención del número de Avogadro a partir de su procedimiento experimental, Perrin se convencería a sí mismo y a la comunidad científica, de la existencia de los átomos. De hecho, después de ganar el Premio Nobel, Perrin afirmaría: “[en estos momentos] resulta muy complicado dudar de la realidad objetiva de los átomos y las moléculas” [56]. Sin embargo ¿Qué hace a los experimentos de Perrin tan decisivos? La respuesta surge de dos consideraciones. La primera es la sorprendente concordancia numérica de sus experimentos con la teoría. Es decir, la asombrosa obtención del número de Avogadro por dos métodos distintos: A partir de la suposición de que las partículas Brownianas se comportan como los átomos y moléculas de un gas, y de la utilización de las ideas de Einstein acerca de los caminos aleatorios que experimentan las partículas suspendidas. De este modo, un científico realista apelará al argumento del *no milagro* para explicar esta enorme concordancia, pues sería un auténtico milagro que no existieran los átomos cuando suponer su existencia permite llegar a resultados matemática y empíricamente tan elegantes y consistentes. Respecto a esto, Emile Picard escribiría a Perrin una carta en la que le diría: “Si las cosas existen cuando es posible relacionar números con ellas, entonces la existencia de los átomos y moléculas no puede ser puesta en duda durante más tiempo” [57]. Además, el mismo científico realista puede usar el argumento de *comprobación experimental* para afirmar la existencia de los átomos tomando en cuenta la obtención del número de Avogadro a partir de dos métodos distintos: El método del desplazamiento cuadrático medio de Einstein y el de la energía media de las partículas Brownianas.

Por otra parte, la segunda consideración de la respuesta a la pregunta ¿Qué hace a los trabajos de Perrin tan decisivos? está constituida por la enorme importancia que Perrin le daba al carácter visual de sus experimentos, pues no hay duda de que estos resultaron tan convincentes debido a la facilidad con que Perrin usaba las imágenes que obtenía para demostrar la existencia de los átomos. Así, el empleo de la cámara lucida, y sobre todo del ultramicroscopio, representó el hecho central de su trabajo y de sus posteriores demostraciones públicas. Perrin coleccionó fotografías y películas de sistemas de partículas Brownianas, mismas que mostraba allá donde fuera a dictar alguna conferencia sobre sus experimentos. Con ellas, Perrin resaltaba la enorme importancia que para él tenía la visualización en la investigación científica. En este sentido, Perrin fue un verdadero entusiasta acerca del uso y desarrollo de técnicas de visualización en la ciencia. El microscopio de efecto túnel puede considerarse como la cima de ese entusiasmo. Así pues, lo que en un principio era una película de partículas flotando en una gota de agua, al final de una conferencia de Perrin el contenido de esa película resultaba una prueba contundente de la existencia de los átomos. Todo esto muestra que los trabajos de Perrin sobre el movimiento Browniano constituyen una prueba muy

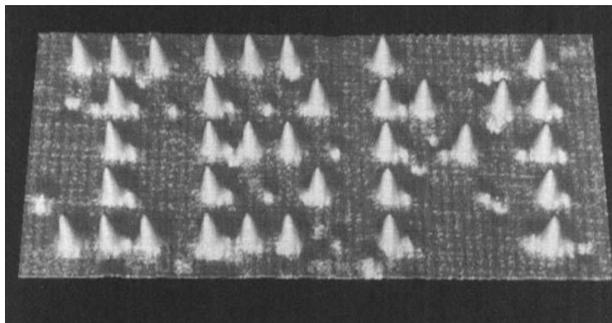


FIGURA 2. Esquema de un microscopio de efecto túnel. En la imagen se muestra que un voltaje bias (corriente de polarización) es aplicado entre la muestra y la punta de la aguja para así inducir una corriente de tunelización entre la aguja y la muestra. El motor piezo es controlado por un sistema de retroalimentación para mantener una corriente de tunelización constante. El voltaje en el piezo  $z$  representa la altura de lo que se mida en la topografía.

sólida de la existencia de los átomos solamente si se les ve *correctamente*. Es decir, su trabajo experimental sólo corresponde una prueba de la hipótesis atómica si se aceptan y comprenden los enunciados teóricos de esa hipótesis. De esta manera, los experimentos de Perrin representan una prueba bastante elaborada y muy bien fundamentada de la realidad atómica solamente si se los analiza a la luz de la teoría atómica.

### 3.4. Imágenes de átomos tomadas por microscopios de efecto túnel

El microscopio de efecto túnel, o STM por las siglas en inglés de *scanning tunneling microscope*, es un tipo de microscopio utilizado para visualizar imágenes de objetos a nivel atómico. El primer STM fue desarrollado y construido en el año de 1981 por los físicos Gerd Binnig y Heinrich Rohrer en las instalaciones de los laboratorios de IBM en Zúrich, Suiza [58,59]. La primera ocasión que el efecto túnel fue observado en un laboratorio ocurrió en el año 1927 por los físicos soviéticos Leonid Mandelstam y Mikhail Leontovich [60]. El efecto túnel se utilizó posteriormente para explicar el decaimiento alfa de ciertos núcleos atómicos. George Gamow propuso que la salida de partículas subatómicas del núcleo se debía a que éstas “tuneleaban” y lograban escapar [61].

El principio de operación del STM consiste en colocar una aguja conductora muy delgada cerca de la superficie de algún material, de manera que los electrones de ese material realicen el efecto túnel hacia la aguja conductora, creando así una corriente eléctrica de tunelización que es registrada y usada como una función de la posición de la aguja conductora. La corriente de tunelización es convertida a voltaje por un amplificador de corriente, este voltaje es comparado con un valor de referencia. La diferencia entre voltajes es amplificada para controlar el motor *piezo* de la aguja. El amplificador de corriente se calibra de tal modo que el voltaje producido es negativo: Si el voltaje producido por la corriente de tuneliza-

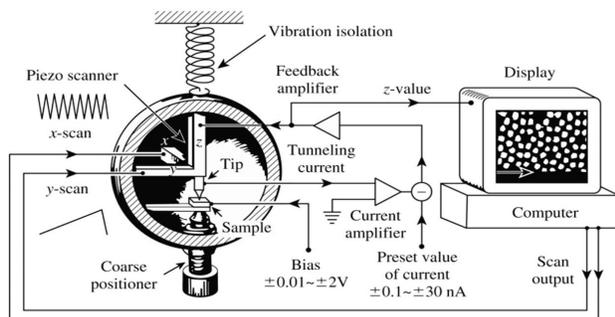


FIGURA 3. Logo de IBM construido con 35 átomos de Xenón sobre una superficie de cobre. La imagen fue obtenida con un microscopio de efecto túnel. (Imagen cortesía de IBM en IBM spelled with 35 Xenon atoms. (2009). Recuperado de <http://www-03.ibm.com/press/us/en/photo/28500.wss>).

ción es mayor que el voltaje de referencia, entonces el voltaje aplicado al *piezo* tiende a retirar la aguja de la superficie de muestra y *viceversa*. Si el voltaje producido es menor que el voltaje de referencia, entonces la aguja se acerca a la muestra. Es posible entonces establecer una posición de equilibrio para la aguja controlando el voltaje del motor *piezo*. A medida que la punta de la aguja escanea el plano *xy* de una superficie, un arreglo bidimensional de posiciones de equilibrio para la aguja es obtenida y presentada en una pantalla como una gráfica de contorno de puntos. La imagen mostrada en la pantalla es generalmente una imagen en escala de grises. Los puntos más brillantes representan lugares de un mayor valor de voltaje *z* para el *piezo*, mientras que los puntos más oscuros representan valores más pequeños de voltaje. En la Fig. 2 se presenta un esquema del funcionamiento de un STM y de la obtención de una imagen en escala de grises.

#### 3.4.1. Apoyo a la hipótesis atómica

Es probable que las imágenes de átomos tomadas por los microscopios de efecto túnel sean consideras las pruebas más contundentes de la existencia de los átomos, pues la imagen de un átomo no da lugar a dudas acerca de su existencia. Sin embargo, las imágenes de átomos tomadas con STM no son tanto fotografías sino construcciones de una superficie en escala de grises. Como se ha mencionado, la corriente de tunelización del STM es monitoreada y con ella es posible generar una imagen de la superficie que se está explorando, esta imagen tendrá zonas más claras que otras en función del valor de la corriente de tunelización producida. De este modo, no es posible observar el *verdadero* aspecto de un átomo con un STM, pero sí es posible conocerlo indirectamente, mediante *inferencias causales*. Por ejemplo, en la Fig. 3 se observa un conjunto de átomos de silicio que forman el logo de la compañía IBM sobre una placa metálica. Esos átomos fueron manipulados con el mismo STM que generó la imagen en escala de grises. Puede observarse que cada supuesto átomo es de un color más claro que el fondo y que cada uno tiene una forma determinada. De este modo, solo puede asegurarse que los “átomos” de la imagen solamente representan zonas

en las que la corriente de tunelización fue más intensa que en cualquier otro lado de la superficie. Este aumento en la corriente de tunelización se interpreta como la presencia de átomos en la superficie, cuyos electrones lograron “tunear” hacia la aguja. De este modo, la existencia de los átomos queda confirmada, pues ¿De qué otra manera se puede explicar esta corriente de tunelización? Para los científicos realistas no existe una mejor explicación disponible que la de considerar la existencia de los átomos, después de todo ¿Qué más podría ser? Ciertamente la existencia de los átomos no puede ser puesta en duda en este sentido. Además, es importante señalar que en un resultado experimental como este hay una gran cantidad de implicaciones, deducciones y suposiciones teóricas sobre el comportamiento del complejo equipo experimental que compone la totalidad del aparato. Tenemos teorías que explican todo lo que ocurre dentro de él, desde la ley de Ohm hasta la ecuación de Schrödinger, así como para el análisis digital de las señales eléctricas generadas y el procesamiento de imágenes. Un filósofo realista tomará todo esto como un argumento de *no milagro* en el sentido de que tendría que ser un verdadero milagro que todo ese aparato funcionara correctamente de acuerdo con nuestras teorías si estas resultaran ser equivocadas.

## 4. Conclusiones

Demostrar la existencia de los átomos resulta bastante complejo en el sentido de la enorme cantidad de supuestos teóricos y experimentales que se deben de tomar en cuenta. Puede decirse que, en general, demostrar la existencia de algo (cualquier cosa) resulta complicado. Sobre esto, Chalmers ofrece un ejemplo bastante ilustrativo, en el que un profesor trata de mostrar que un objeto blanco junto al pizarrón de su salón de clases es un trozo de gis [62]. Para su demostración, el profesor comienza haciendo notar que los objetos blancos junto a los pizarrones de clase suelen ser gises, notando la falta de convencimiento de ese argumento, procede ahora a trazar una línea blanca en el pizarrón con el supuesto gis, argumentando que los gises dejan un rastro blanco en los pizarrones. Viendo que sigue sin convencer a ningún alumno, el profesor se dedica ahora a hacer una prueba química. Advierte que los gises verdaderos están hechos en su mayoría de carbonato de calcio, por lo que al agregarles ácido se producirá  $\text{CO}_2$  y alguna sal, el profesor sabe además que el  $\text{CO}_2$  vuelve lechosa el agua de cal; así, lo que finalmente tiene que hacer el profesor es sumergir el supuesto gis en ácido, capturar el  $\text{CO}_2$  emitido y ponerlo en contacto con agua de cal para ver si se vuelve lechosa.

El ejemplo de Chalmers muestra los considerables conocimientos científicos necesarios para comprobar el aparentemente simple enunciado observacional “He aquí un trozo de gis”. Así, el enunciado observacional “He aquí un átomo” supone una cantidad mayor de suposiciones teóricas, por lo que su comprobación resultará más ardua. Esto en virtud de que mientras más general sea la teoría utilizada, más precisos serán los enunciados observacionales.

Sin embargo, como ya se ha mencionado, que los enunciados observacionales se dan siempre bajo algún contexto teórico puede llevar a argumentar que, por ejemplo, la imagen de un átomo obtenida con un microscopio de efecto túnel constituye una prueba de la existencia atómica solamente si se la *ve correctamente*, es decir, si se tiene el suficiente conocimiento para entender el funcionamiento del microscopio y de las imágenes que de él se obtienen. En este mismo sentido, la Ley de Proust, la Teoría Cinética de los Gases, el Movimiento Browniano y las imágenes por Microscopio de Efecto Túnel resultan pruebas poderosas de la existencia de átomos solamente si se entienden en el contexto de una teoría general y de gran éxito empírico como es la teoría atómica. Sin embargo, esto último sugiere que las pruebas científicas solo existen si se las comprenden, lo que es antirrealista científico. Un ejemplo de esto es cómo Perrin desdeñó los experimentos de Richard Zsigmondy y Henry Siedentopf como pruebas de la realidad atómica. Aunque ambos científicos utilizaron el ultramicroscopio para realizar experimentos relacionados con coloides, y a pesar de que en ellos aparecía el movimiento Browniano, ninguno consideró la hipótesis atómica para explicarlos. Debido a esto, Perrin afirmaría de ambos: “[el ultramicroscopio] los colocó directamente en el eje de un rayo de luz, pero estaban completamente ciegos” [63]. De este modo, los únicos experimentos de esa época que constituyen una prueba de la realidad atómica son los experimentos de Perrin, pues usó el fundamento teórico adecuado para explicarlos. Sin embargo, los científicos realistas no pueden aceptar esto, así que argumentarán que la existencia de algo no depende de si se lo conozca o no, y por tanto afirmarán que el movimiento Browniano siempre ha constituido una prueba de la hipótesis atómica, aunque no se lo haya advertido antes. Sin embargo, se debe notar que este argumento está viciado, pues solo puede darse si se comprenden los supuestos teóricos de la teoría atómica, de otro modo, no se podría dar.

Por otra parte, ya se ha mostrado que los científicos realistas apelan sobre todo al argumento del *no milagro* para comprobar la existencia de los átomos, pues se considera como imposible que los átomos no existan cuando todos los experimentos resultan como deberían resultar si los átomos existen. Es incluso probable que los científicos realistas argumenten que los átomos *deben* existir, ya que, por ejemplo, el microscopio de efecto túnel utiliza como principio de operación un efecto solo teóricamente posible a escala atómica, el efecto túnel. ¿Cómo no van a existir los átomos -se preguntarán- si todo esto funciona de maravilla? De este modo resulta muy arriesgado dudar de la existencia de los átomos. Sin embargo, aquí debe notarse cierta circularidad en el argumento: Debido a que se proponen teorías que suponen la existencia de

átomos y dado que estas teorías son empíricamente exitosas, entonces concluimos que los átomos existen. Se está probando la existencia de algo a partir de la suposición de que ese algo existe.

Aunque parezca en absoluto intuitivo, se ha visto que existen argumentos filosóficos antirrealistas que pueden contravenir los resultados mostrados acerca de la existencia de los átomos. En este sentido, si se realiza la siguiente pregunta: “¿Debemos confiar en una afirmación sobre la naturaleza solamente porque es parte de una teoría científica empíricamente exitosa?” [64] a un grupo de científicos, es probable que la mayoría respondan afirmativamente, sin embargo, la respuesta histórica es, en general, negativa. La historia de la ciencia ha mostrado teorías siendo abandonadas por otras empíricamente más exitosas (*inducción pesimista*). De este modo, las sólidas pruebas de la existencia de átomos expuestas en este trabajo se consideran como tales solamente porque ninguna teoría científica ha sustituido a la teoría atómica. Por otra parte, debemos tomar en cuenta ahora la siguiente consideración metodológica: Si las teorías científicas están diseñadas para el éxito empírico y la adecuación matemática, ¿Qué tiene de extraño que a veces se obtengan enormes evidencias experimentales (argumento del *no milagro*) y otras no?<sup>vii</sup> El conocimiento científico no está libre de imprecisiones teóricas ni de fracasos experimentales, esto mismo conduce a aceptar que la crítica metodológica sobre la circularidad de las pruebas de la existencia de los átomos no socava el enorme logro científico que representa el desarrollo de la teoría atómica. Aún más, el hecho de que no haya una metodología infalible no frena de ninguna manera la generación de conocimiento científico, como señala Alexander Koyré: “un exceso de metodología es peligroso, y muy a menudo, si no la mayor parte de las veces, conduce a la esterilidad (...) pienso que el lugar de la metodología no está en el principio del desarrollo científico. Ninguna ciencia ha comenzado nunca con un *Tractatus de Methodo*”. [65]. El éxito experimental y la profundidad de las explicaciones que ofrece la teoría atómica son sin ninguna duda asombrosas. Además, el formalismo matemático resulta tan elegante y apropiado que la intuición de cualquier físico vuelve a la realidad atómica un hecho. Vale subrayar que la elegancia matemática es una característica deseable en las teorías de la física. De esta forma, la existencia de los átomos ha pasado de ser un asunto meramente filosófico y metafísico a algo totalmente consolidado para la investigación científica actual. Sin embargo, no puede negarse la posibilidad estrictamente lógica de que nuevas teorías surjan y expliquen fenómenos descritos por la teoría atómica sin la necesidad de suponer la existencia de átomos.

i. En su artículo “*The Ontological Status of Theoretical Entities*”. *Minnesota Studies in the Philosophy of Science*, III, 3-27, Maxwell afirma que se llegarían a dudosas conclusiones de ser cierta

la contundente distinción entre entes observables y no observables descrita en el texto; por ejemplo, se llegaría a la conclusión de que un objeto cambiaría constantemente de observable a no

- observable a medida que, quien lo estuviera viendo, se quitara o colocara un par de anteojos o algún otro aparato que no le permita usar su visión directamente.
- ii. Esta argumentación es en realidad el *quid* de un tipo de instrumentalismo radical denominado operacionalismo, cuyo principal defensor fue el ganador del premio Nobel de Física de 1946 P.W. Bridgman, quien escribió un libro llamado: “*The logic of modern Physics*”, donde aboga por esta postura filosófica y establece que nunca se conocerá el verdadero significado de un concepto hasta que logre medirse, además de considerar a los conceptos no susceptibles de medición como sin sentido. El operacionalismo fue ampliamente criticado dado su extremo empirismo y consecuentemente no sobrevivió a las críticas ya mencionadas del instrumentalismo. Una manera simple de refutar al operacionalismo es por reducción al absurdo: Si se acepta la afirmación de que el verdadero significado de un concepto sólo podrá conseguirse midiéndolo, entonces, al intentar medir el concepto de operacionalismo se encontrará con que dicho concepto es imposible de medir, y, por tanto, jamás se conocerá su verdadero significado.
- iii. “*Principia Mathematica*” pp. 371-372. El valor reportado por Newton para la velocidad del sonido en aire es un intervalo que va de 920 a 1085 pies ingleses por segundo (280 a 330.7 metros por segundo). El cálculo de Newton se basó en considerar a la velocidad del sonido en aire como:  $U = \sqrt{E/\rho}$ . Donde  $E$  es la elasticidad del aire y  $\rho$  es la densidad del aire. Newton consideró  $E = \rho(dP/d\rho)$ , donde  $P$  es la presión que el sonido ejerce sobre el aire. Así, la ecuación de la velocidad del sonido queda como sigue:  $U = \sqrt{dP/d\rho}$ . Si se aplica la ley de Boyle ( $P = k\rho$ ), se obtiene que  $U = \sqrt{K(dP/d\rho)} = \sqrt{K} = \sqrt{P/\rho}$ . En su *Principia*, Newton no advirtió que la compresión del sonido sobre el aire generaba calor, y que por la rapidez de la compresión ese calor no escapaba, aumentando así la temperatura y la presión. Ahora se considerará lo siguiente: Para cualquier proceso calorífico,  $PdV + VdP = Rd\theta$ , luego,  $dQ = (\partial Q/\partial V)dV + (\partial Q/\partial P)dP$ . De lo anterior se obtienen los dos calores específicos:  $C_P = (\partial Q/\partial V)(R/P)$ ,  $C_V = (\partial Q/\partial P)(R/V)$ . Pero para un proceso adiabático,  $dQ = 0$ , así:  $V(dP/dV) = P(C_V/C_P)$ . Sustituyendo lo anterior para  $U$  y considerando  $\rho = m/V$ :  $U = \sqrt{(P/\rho)(C_P/C_V)}$
- iv. P. S. Laplace, “*Developpement de la the'orie des fluides elastiques et application de cette theorie a la vitesse du son*”, *Connaissance des temps*, 1825, 1822, también en *Oeuvres complètes*, vol. 13 (Paris, 1904), pp. 291-301. Laplace usa aquí un valor de  $\gamma = 1.5$  debido a los valores de  $C_p = 0.36$  y  $C_v = 0.24$  que obtuvieron Delaroché y Bérard en una serie de experimentos realizados en 1813 (F. Delaroché and J. E. Berard, “*Memoire sur la determination de la chaleur specifique des differens gaz*”, *Annales de Chimie*, 1813, 85: 84.)
- v. Una aparente respuesta a este argumento de Musgrave fue dada por Lipton y Dicken en su artículo: “*What can Bas believe? Musgrave and Van Fraassen on observability*”. La respuesta se basa en considerar que el problema en realidad no es tan grave. Para solucionarlo basta con simplemente cambiar todas las afirmaciones del tipo “ $W$  es no observable” por otras del tipo “ $W$  es observable”, para así generar una distinción entre lo observable y lo no observable que pueda ser aceptada por los empiristas constructivos sin problema alguno. Sin embargo, como los propios Lipton y Dicken señalan, esta respuesta puede que no sea todo lo que los empiristas constructivos necesitan, pues, aun que la afirmación “ $W$  es observable” sea cierta, aún se está refiriendo a entidades no observables, dado que la característica de observabilidad no es observable.
- vi. En una nota al pie en la página 226 de su *Chemical Philosophy*, Dalton menciona lo siguiente: “El diámetro de una partícula elástica es  $\sqrt[3]{\text{masa del átomo/gravedad específica del fluido}}$ . Dado que la masa del átomo de Hidrógeno es 1, y también lo es su gravedad específica, se sigue que la masa del átomo de Oxígeno es 7 y su gravedad específica es 14, así que  $\sqrt[3]{7/14}$ : 1, es decir, 7.94: 1 (...).” Esta manera de expresar el diámetro de una partícula resulta bastante ingeniosa, ya que, al poseer la gravedad específica unidades de densidad, la raíz cúbica de la masa del átomo entre la gravedad específica posee unidades de longitud.
- vii. Los autores agradecen al árbitro de la Revista Mexicana de Física haber propuesto esta pregunta tan fundamental y oportuna.
1. A.F. Chalmers, *¿Qué es esa cosa llamada ciencia? Una valoración de la naturaleza y el estatuto de la ciencia y sus métodos*, (Editores siglo XXI, 1983) p. 11.
  2. V. Aboites, G. Aboites, *La ciencia y el mundo físico de acuerdo a W. T. Stace*, Valenciana, **21** (2018) 187-205.
  3. H. Newton-Simth, *The rationality of Science*. Ed. Taylor & Francis (2003)
  4. W. Thomson, *American Journal of Science* **148** (1870) 38-44.
  5. H. Helmholtz, *von Vorlesungen über theoretische Physik Vol. 5: Dynamik kontinuierlich verbireiteter Massen*, ed. OKrigarMenzel (Leipzig, 1902).
  6. M. Planck, *Ann. d. Physik* **15** (1882) 446-475.
  7. Stasis Psillos, *Scientific Realism: How Science Tracks Truth*, (London: Routledge 1999).
  8. R. Descartes, *Meditationes* Med IV, Diversas Ediciones (1647).
  9. I. Kant, *Crítica de la Razón pura* Diversas Ediciones (1787).
  10. Anjan Chakravartty, *Scientific Realism* The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Summer 2017 Edition), Edward N. Zalta (ed.), <https://plato.stanford.edu/archives/sum2017/entries/scientific-realism/>
  11. Ibid.
  12. P. Lipton, y P. Dicken, *On Observability* (2006) 226-233.
  13. Stasis Psillos, *Scientific Realism: How Science Tracks Truth* (London: Routledge 1999).
  14. Alan F. Chalmers, *¿Qué es esa cosa llamada ciencia? Una valoración de la naturaleza y el estatuto de la ciencia y sus métodos*, Editores siglo XXI, (1983) p: 205
  15. V. Aboites, *Introducción a la filosofía de las Matemáticas* (Ed. Libros a Cielo Abierto 2017).
  16. I. Mueller, *Mathematical method and philosophical truth* in; *The Cambridge Companion to Plato*, (Cambridge: Cambridge University Press, 1999).
  17. S. W. Herb *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* (1977).
  18. Putnam, Hilary, *Mathematics, Matter and Method*, (Cambridge: Cambridge University Press 1975).
  19. Bas C. Van Fraassen, *The Scientific Image* (Oxford: Oxford University Press 1980).

20. Ibid.
21. Alan Musgrave, *Realism versus Constructive Empiricism* Ed. University of Chicago Press, (1985).
22. L. García-Colín Scherer, L. Dagdug, J.R.G. Sánchez López, *Introducción a la teoría Cinética* (El Colegio Nacional 2011), p. 8.
23. R. J. E. Clausius, *Ann. d. Phys.* **125** (1865) 353-400.
24. Larry Laudan *A confutation of convergence realism.* (The University Chicago Press 1985).
25. H. Poincaré, *Science* **20** (1905) 306.  
<https://doi.org/10.1126/science.20.520.833>
26. Ibid.
27. Ibid.
28. *A Source Book in Chemistry*, (Cambridge, MA: Harvard, 1952). p. 1400-1900.
29. J.L. Proust, *Annales du Chimie* **32** (1799) 26-54.  
<http://websserver.lemoyne.edu/faculty/giunta>
30. J.R. Pattington, *A short history of chemistry* (Segunda edición, Londres) 1951. Pp. 161-163.
31. T.S. Kuhn, *La estructura de las revoluciones científicas* Ed. Fondo de Cultura Económica (2013).
32. A.N. Meldrum, The Development of the Atomic Theory (1): Berthollet's Doctrine of Variable Proportions *Manchester Memoirs* LIV (1910) 1-16.
33. K. Padilla y C. Furio-Mas, *Science and Education*, **17** (2008) 403-424. <https://doi.org/10.1007/s11191-007-9098-2>
34. J.L. Proust, *Journal Physique* **63** (1806) 566-568. Website: Classic chemistry compilado por Carmen Giunta, Le Moyne College 15 Febrero 2002, <http://websserver.lemoyne.edu/faculty/giunta>
35. I. Newton, *Optik.* (1704) 31
36. A. Meldrum, The development of the atomic theory (4). Dalton's physical atomic theory. *Manchester Memoris* **55** 1-22 (p. 13)
37. J. Dalton, *Nicholson's Journal* **29** (1811) 143-151.
38. Ibid.
39. J. Berzelius, *Annals of Philosophy* **2** 443-454 (1813) **3**, 51-2, 93-106, 244-255, 353-364 (1814) [de David M. Knight, ed., *Classical Scientific Papers* (New York: American Elsevier, 1968)
40. A. Avogadro, *Journal de Physique* **73** (1881) 58-78.
41. K. Padilla y C. Furio-Mas, *Science and Education* **17** (2008) 403-424. <https://doi.org/10.1007/s11191-007-9098-2>
42. Ibid.
43. B.B. King, *Sci Educ* **75** (1991) 135-141.
44. E.A. Guggenheim, *J Chem Educ* **38** (1961) 86-87.
45. L. García-Colín Scherer, L. Dagdug, y J. R. G. Sánchez López, *Introducción a la teoría cinética* (Ed. El Colegio Nacional 2011). pp. 44-46.
46. R. Brow, *The miscellaneous botanic work of Robert Brown* **Vol. 1**. Ed. John J. Bennet.
47. A. Einstein, *Ann. Phys.* **17** (1905) 549.
48. Bas van Fraassen's Approach to Representation and Models in Science, Editor Wenceslao J. Gonzalez, Psillos, Statis *The view from within and the view from above: Looking at Van Fraassen's Perrin.* (Ed. Springer 2014).
49. C. Brigg, Event atoms in *Jean Perrin's Brownian motion research Studies in History and Philosophy of Science* (2008) p. 312-322.
50. C. Brigg, Event atoms in *Jean Perrin's Brownian motion research Studies in History and Philosophy of Science*, (2008) p. 312-322.
51. M. J. Perrin, *Annales de Chimie et de Physique* **18** (1909) 5-114.
52. S. Psillos, *The View from Within and the View from Above: Looking at van Fraassen's Perrin* W.J. Gonzalez (ed.), Bas van Fraassen's Approach to Representation and Models 143 in *Science*, Synthese Library (2014).
53. Ibid.
54. Ibid.
55. J. Perrin, *The discontinuous structure of matter* Nobel Lecture Physics, (Elsevier Publishing Company, 1965) 1922-1941.
56. C. Brigg, Event atoms in *Jean Perrin's Brownian motion research Studies in History and Philosophy of Science*, (2008) p.p. 319.
57. Emile Picard to Jean Perrin, 30 de Noviembre 1909, Fonds Jean Perrin 54J, *Arch. Acad. Sci.*, Paris.
58. G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber, and E. Weibel, *Appl. Phys. Lett.* **40** (1982) 178-180.
59. G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber, and E. Weibel, *Phys. Rev. Lett.* **49** (1982) 57-61.
60. L. Mandelstam, M. Leontowitsch, *Zeitschrift für Physik.* **47** (1928) 131-136.
61. G. Gamow, *Ann. d. Physik.* **51** (1928) 204-212.
62. A. F. Chalmers, *¿Qué es esa cosa llamada ciencia? Una valoración de la naturaleza y el estatuto de la ciencia y sus métodos*, Editores siglo XXI, (1983) p. 49-50.
63. C. Brigg, Evident atoms in Jean Perrin's Brownian motion research *Studies in History and Philosophy of Science*, (2008) p.p. 321
64. P.K. Stanford, *The British Journal for the Philosophy of Science* **60** (2009) 253-270.
65. A. Koyré, *Estudios de historia del pensamiento científico* Editores siglo XXI (1973), p. 66-67.