

La teoría cinético molecular de los gases en libros de física: una perspectiva basada en la historia y filosofía de la ciencia

Kinetic molecular theory of gases in physics textbooks: a history and philosophy of science perspective

MARÍA A. RODRÍGUEZ Y MANSOOR NIAZ

Grupo de Epistemología de la Ciencia. Departamento de Química, Universidad de Oriente Apartado Postal 90,
Cumaná, Estado Sucre, Venezuela 6101 A, E-mail: niazma@cantv.net

Resumen

El objetivo de este trabajo es analizar libros de física general con respecto a la presentación de la teoría cinético molecular con una perspectiva basada en la Historia y Filosofía de la ciencia. Con este fin se analizaron 30 libros de texto de física general con nivel universitario. Los resultados obtenidos indican que la mayoría de los textos analizados ignoraron la importancia de las suposiciones de MAXWELL que permitieron simplificar y estudiar el movimiento de las moléculas de los gases. Muchos de los textos le restan importancia a las consideraciones estadísticas de MAXWELL-BOLTZMANN para explicar la distribución de las moléculas con diferentes velocidades. Asimismo un gran número de textos no plantean la importancia de las correcciones de VAN DER WAALS para que ocurriese una transición progresiva desde un gas ideal hacia un gas real. En conclusión podemos decir que los textos de física general carecen de una perspectiva de la Historia y Filosofía de la Ciencia. Se continúa enseñando a los estudiantes de una forma mecánica, ofreciéndole una 'retórica de conclusiones', impidiendo así que adquieran habilidades y cierta capacidad de análisis que les permitan encarar los retos que representa la investigación científica y no simplemente seguir una serie de pasos a modo de recetario, obviando la importancia de la comprensión conceptual.

Palabras clave: historia, filosofía de la ciencia, teoría cinética, textos de física.

Abstract

The objective of this study is to analyze presentation of the kinetic theory in general physics textbooks based on a history and philosophy of science perspective. Thirty university level general physics textbooks were analyzed to evaluate their treatment of the kinetic theory. Results obtained show that most of the textbooks analyzed, ignored Maxwell's simplifying assumptions that facilitated the study of movement of gas molecules. Many textbooks do not recognize the MAXWELL and BOLTZMANN's statistical considerations for explaining the distribution of molecules with different velocities. Similarly, many textbooks ignore the importance of van der Waals' corrections that facilitated a progressive transition from an ideal to a real gas. It is concluded that general physics textbooks lack a history and philosophy of science perspective, and continue to teach students in a mechanical fashion that amounts to rhetoric of conclusions. This impedes the development of students' ability to analyze that can help them to confront challenges posed by scientific research. Such teaching also encourages the rote learning of simple formulae with no conceptual understanding.

Key words: history, philosophy of science, kinetic theory, physics textbooks.

INTRODUCCIÓN

Las investigaciones en la enseñanza de la ciencia han venido enfatizando la importancia de la historia y filosofía de la ciencia (DUSCHL, 1994; MATTHEWS, 1994; McCOMAS, 2000).

La teoría cinética de los gases ha sido objeto de considerable debate y controversia en la literatura de la historia y filosofía de la ciencia (NIAZ, 2000). El desarrollo de la teoría cinética de los gases es un famoso y bien documentado episodio en la historia de la ciencia y de acuerdo con REGT (1996) no puede ser entendido sin tomar en cuenta el rol de la filosofía (p. 33). Durante la última mitad del siglo XIX, la teoría cinética de los gases y

la interpretación de la termodinámica en términos estadísticos fue desarrollada en profundidad por JAMES CLERK MAXWELL y LUDWIG BOLTZMANN. La introducción de métodos estadísticos dentro de la física es, históricamente, un paso de gran importancia y trascendencia. En las manos de MAXWELL, BOLTZMANN y WILLARD GIBBS permitió el desarrollo de la mecánica estadística (MILLIKAN, *et al.*, 1937). Aunque MAXWELL y BOLTZMANN apoyaban ambos la teoría cinética y la doctrina atomística, sus posiciones filosóficas diferían en importantes aspectos (DE REGT, 1996). De acuerdo con LAKATOS (1970) la historia de la ciencia es una historia de programas de investigación rivales. El trabajo de BOLTZMANN estuvo centrado en la física estadística, pero durante los últimos años de su vida, su trabajo fue objeto de grandes ataques de científicos tan renombrados como, ERNST MACH (1838-1916) y WILHELM OSWALD (1853-1932) los cuales sustentaban que lo concerniente a la física teórica eran las cantidades físicas macroscópicamente observables. Ellos opinaban que BOLTZMANN estaba contaminando el asunto con hipótesis innecesarias y sin verificar, sobre la naturaleza atómica de la materia. En tiempos cuando muchos científicos todavía dudaban de la existencia de los átomos BOLTZMANN tomó seriamente a los átomos y fue uno de los fundadores de la mecánica estadística, que explica las propiedades de la materia en términos de sus constituyentes microscópicos. Es interesante ver la filosofía de la ciencia discutida por BOLTZMANN, quien es capaz de apartar detalles formales e ir directo a las ideas importantes (RUELLE, 1999).

Durante su vida JAMES CLERK MAXWELL (1831-79) estuvo intensamente interesado en la filosofía. Él reflexionó en materias filosóficas naturales, tales como ética y metafísica pero sobre todo en la filosofía de la ciencia. Tanto sus publicaciones científicas como sus artículos más populares y lecturas contienen observaciones e ideas sobre los métodos y ayudas de la investigación científica (DE REGT, 1996, p. 33). El pensamiento de MAXWELL acerca de la realidad física refleja su compromiso filosófico. MAXWELL, produjo no una sino dos revoluciones distintas en física. La primera fue su introducción de los métodos estadísticos en los fundamentos de física vía la teoría cinética de los gases. La segunda fue la unificación entre electricidad y magnetismo (EVERITT, 1999). Según REGT (1996, p. 60) se puede pensar que los compromisos filosóficos individuales de MAXWELL y BOLTZMANN jugaron un papel significativo en su trabajo sobre la teoría cinética, mientras que por otra parte el desarrollo científico afectó, hasta cierto punto, sus posiciones filosóficas. Sin embargo, más bien podríamos decir que hubo una mutua y estrecha interacción entre ciencia y filosofía.

"La física es una ciencia experimental, pero la física es más que experimentos, más que medidas exactas, más que matemáticas —éstas son sus herramientas— es un cuidadoso, profundo y exacto pensamiento. Se puede decir que, la importancia de la física radica en la fuerza de la invención" (MILLIKAN *et al.*, 1937).

A pesar del incremento en investigaciones en la naturaleza de la ciencia, actualmente en la educación de la ciencia hay pocos trabajos en los que las imágenes de la ciencia estén relacionadas con la introducción de conceptos y teorías en dominios particulares de la enseñanza de la física. Una importante

fuente de información para analizar cómo son presentados los conceptos y teorías de física, es examinar los contenidos de los libros de texto (GUISASOLA *et al.*, 2003; LEITE, 2002; VAQUERO & SANTOS, 1999).

Basándonos en la perspectiva de la historia y filosofía de la ciencia, nos hemos propuesto estudiar cómo los libros universitarios de física general presentan la teoría cinética molecular de los gases. Para ello vamos a utilizar parte de los criterios previamente elaborados por NIAZ (2000), para evaluar libros de química general.

CRITERIOS PARA LA EVALUACIÓN DE LOS LIBROS DE FÍSICA

1. Suposiciones simplificadas (básicas) de MAXWELL: Las suposiciones de MAXWELL aunque especulativas, fueron un intento para reducir la complejidad del problema, introduciendo las cláusulas *ceteris paribus* (Lakatos, 1970, Las cláusulas *ceteris paribus* juegan un importante rol en el progreso científico, permitiéndonos resolver problemas complejos por la introducción de suposiciones simplificadoras, que forman una parte importante de la metodología de la idealización). Esta metodología ayudó a los científicos a construir una serie de teorías sucesivas basadas en un modelo particular del gas 'ideal'. Cada teoría tentativa fue diseñada para aproximarse cada vez más a las propiedades conocidas, obtenidas para los gases reales (ACHINSTEIN, 1991).
2. Naturaleza inconsistente del programa de investigación de MAXWELL: La teoría de MAXWELL estaba basada en la suposición que el movimiento de las partículas dependía de la mecánica newtoniana. Sin embargo, por lo menos dos de las suposiciones, como el movimiento de las partículas y la consecuente generación de presión del gas, estaban en contradicción con la hipótesis de NEWTON para explicar las leyes de los gases, basadas en las fuerzas de repulsión entre partículas. La historia de la ciencia muestra que muchos programas progresaron de forma similar basados en fundamentos inconsistentes (BRUSH, 1976; LAKATOS, 1970).
3. Consideraciones estadísticas de MAXWELL: Basado en consideraciones estadísticas MAXWELL demostró que las colisiones de las moléculas de los gases, no deberían tender a igualar todas sus velocidades (tal como se esperaría), sino por el contrario, produciría un rango de velocidades diferentes. Esta consideración dio lugar, posteriormente, a la distribución MAXWELL-BOLTZMANN de velocidades moleculares, la cual mostró que las velocidades de la mayoría de las moléculas están en un rango relativamente limitado y una cierta proporción de las moléculas tienen muy bajas y muy altas velocidades. Cuando se aumenta la temperatura la forma general de la curva de distribución permanece sin cambios, pero ocurre un achatamiento del máximo, el cual ahora ocurre a una velocidad más alta. En otras palabras, cuando la temperatura aumenta, hay una distribución más amplia de velocidades y aumenta la fracción de las moléculas poseyendo altas velocidades (PORTER, 1981, 1994).
4. Contribución de VAN DER WAALS: reducción/modificación de las suposiciones básicas: Si las suposiciones básicas de MAXWELL fueron especulativas, VAN DER WAALS siguió la misma metodología, para darle mayor comprensión a la metodología de MAXWELL. Su mayor contribución fue reducir las suposiciones para incluir la continuidad de las fuerzas intermoleculares, que facilitó la transición de gas 'ideal' a gas 'real' — un 'cambio progresivo de problemática' (GAVROGLU, 1990; LAKATOS, 1970).
5. Desde el 'modo algorítmico' al 'cambio conceptual' en la comprensión del comportamiento de los gases: La mayor contribución de MAXWELL y BOLTZMANN fue haber facilitado nuestra comprensión de los gases más allá de las leyes hidrodinámicas observables (BOYLE, CHARLES, GAY-LUSSAC, ...) y explicar las propiedades internas basándose en la teoría cinética molecular. Este criterio evalúa el grado al cual la presentación de los textos (ejemplos, ilustraciones, problemas al final de capítulo, etc.), basándose en un marco teórico, explícitamente reconoce que hay dos formas de resolver los problemas de gases, que son, el modo algorítmico y el cambio conceptual. Por ejemplo, para entender que la presión de un gas es una consecuencia de colisiones moleculares, no es suficiente repetir las suposiciones de MAXWELL. Para que esta propiedad de los gases tenga significado para los estudiantes tendrá que ser incorporado en un problema (HANSON, 1958; NIAZ & ROBINSON, 1992).

La siguiente clasificación fue elaborada para evaluar los libros de texto: Satisfactorio (S): El tratamiento del criterio en los libros de texto se considera satisfactorio si el tópico es descrito considerando las implicaciones educacionales.

Mención (M): Una simple mención del criterio.

No mención (N): Ninguna mención de los tópicos implicados en el

criterio.

Para validar la aplicación de los criterios, los dos autores analizaron siete textos seleccionados al azar. En el primer criterio hubo consenso en cinco libros. En el criterio dos se logró consenso en los siete libros analizados. En el tercer criterio hubo consenso en cuatro libros. En el cuarto criterio se coincidió en seis de los siete libros analizados y en el criterio cinco hubo consenso en cinco libros. Todas las discrepancias fueron resueltas a través de discusión y posteriormente uno de los autores analizó los demás textos.

EVALUACIÓN DE LOS LIBROS DE FÍSICA: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Criterio 1

La tabla 1 muestra que únicamente dos libros describen satisfactoriamente (S) y apenas cinco mencionan (M) la importancia de las suposiciones para reducir la complejidad de un problema determinado y elaborar el modelo que pueda explicar el comportamiento de los gases de una forma más simple.

Es el libro de EISBERG & LERNER (1984) el que de una manera satisfactoria hace hincapié en la importancia de elaborar un modelo simplificando con suposiciones sencillas un problema complejo:

"El modelo es una de las armas más poderosas de que disponen los científicos de la física. Un modelo de un sistema físico real es un sistema más simple, generalmente imaginario cuyo comportamiento se supone que es relevante respecto a lo que ocurre en el sistema real. Aunque el modelo es un producto de la imaginación, tiene una ventaja incomparable: es lo suficientemente simple como para que su comportamiento se pueda analizar con algún detalle utilizando las leyes básicas de la física: si un modelo no tiene contradicciones lógicas y no está en conflicto con estas leyes básicas, su validez se juzga por la medida en que el análisis conduzca a descripciones de su comportamiento que estén de acuerdo con el resultado de las observaciones experimentales efectuadas en el sistema real. Mientras mejor sea el modelo las propiedades predichas en él estarán más de acuerdo con las propiedades observadas en el sistema del cual es modelo. Aún en el caso de un modelo muy bueno, no puede pensarse que el modelo es el sistema. En cambio el modelo se comporta como el sistema en varios aspectos importantes. ... Los modelos cinéticos de los gases se basan en dos suposiciones básicas... Estas dos suposiciones se han confirmado ampliamente por medio de observaciones experimentales desde 1900" (EISBERG & LERNER, 1984, pp. 820-821).

La presentación de EISBERG & LERNER (1984) toma en cuenta el trabajo didáctico relacionado con el rol de los modelos en la educación de la ciencia. Si queremos diseñar una estrategia de enseñanza aprendizaje es importante indicar a los estudiantes, que los modelos deben ser utilizados como instrumentos para pensar y no una simple analogía mecánica de la realidad observable. Tal como señala MÉHEUT (1997) debemos desarrollar modelos como herramientas cognitivas para unificar descripciones y entonces predecir fenómenos físicos.

El siguiente es otro ejemplo de un texto que presenta este criterio satisfactoriamente (S):

Quando los físicos desean entender un sistema complejo a menudo inventan un modelo. Un modelo es una versión simplificada del sistema que permite hacer cálculos pero sin perder su realidad física. ... Puesto que el modelo es una simplificación de la naturaleza, el resultado final no es, por lo general, una descripción verdadera o completa de la naturaleza, pero si hemos sido lo suficientemente cautos en la formulación del modelo, el resultado final puede ser una aproximación muy buena del comportamiento del sistema. ... Desde el punto de vista microscópico nuestro modelo de gas ideal incluye las hipótesis siguientes... (RESNICK *et al.*, 1992, p. 568).

Uno de los libros de texto que mencionan (M) este criterio, es URONE (2001):

Se hizo la suposición (consistente con todas las discusiones previas y soportada por evidencia experimental) que la molécula es pequeña... Nosotros también asumimos que la pared es rígida... Esto no siempre es una buena suposición pero una consideración más detallada del intercambio de energía promedio y momento de las moléculas produce resultados idénticos a los de la suposición simplificada (URONE, 2001, p. 306).

Como se puede deducir de los resultados, la mayoría de los textos de física general obvian la necesidad de comunicarles a los estudiantes la importancia de las teorías y modelos científicos en el desarrollo de la ciencia. La simplificación de los modelos (suposiciones) nos ofrece una forma de interpretar la realidad, pero no necesariamente representa la realidad. La ciencia de esta manera, nos ofrece respuestas a nuestras preguntas. Es importante hacerle ver a los estudiantes que los modelos son una manera de ver la naturaleza y que la ciencia no es un cuerpo acabado de

conocimientos, sino que es un proceso de construcción de conocimientos e interpretaciones en continuo cambio.

Es preocupante que textos de uso masivo entre profesores y estudiantes como: ALONSO & FINN (1992), HALLIDAY *et al.*, (2001), no mencionen siquiera que los postulados de la teoría cinética son suposiciones simplificadas para facilitar la comprensión del comportamiento de los gases. Muy al contrario de lo encontrado por NIAZ (2000) en libros de química general en donde de 22 libros analizados ($S = 3$, $M = 17$) únicamente dos libros dejan de mencionar la importancia de esto.

Criterio 2

Todos los libros de física general evaluados ignoraron que la teoría cinética fue un programa de investigación que evolucionó basado en fundamentos inconsistentes. Muchos de los libros de texto introducen explícitamente la mecánica newtoniana para explicar el movimiento de las moléculas de los gases, sin hacer ninguna referencia a la contradicción que esto representa. Los siguientes son ejemplos de ello:

...Desde el punto de vista microscópico, nuestro modelo de gas ideal incluye ciertas hipótesis. Basados en ellas, empleamos las leyes de NEWTON para analizar la mecánica del gas ideal; este procedimiento constituye la base de la teoría cinética (RESNICK *et al.*, 1992, p. 568).

El modelo cinético molecular se usa para entender la relación entre la ecuación de estado de los gases ideales y las leyes de NEWTON (SEARS *et al.*, 1996, p. 507).

...Ahora aplicaremos la mecánica newtoniana al modelo de gas ideal con el propósito de obtener la ecuación de estado del gas ideal (EISBERG & LERNER, 1984, p. 822).

...La intuición física y la segunda ley de NEWTON sugieren... (ALONSO & FINN, 1992, p. 324).

Aunque MAXWELL tenía alguna razón para pensar que los gases estaban compuestos de partículas no observables en movimiento que satisfacían las leyes de NEWTON él no tenía razón para pensar que tales partículas eran esféricas y que únicamente ejercían fuerzas de contacto, o que su movimiento era lineal mejor que no lineal o que sus componentes de la velocidad eran independientes (ACHINSTEIN, 1987). BOLTZMANN explícitamente señala que en la construcción de teorías podemos usar hipótesis que no pueden ser probadas experimentalmente (FLAMM, 1983, p. 261).

Los resultados obtenidos en el criterio 2, son similares a los reportados por NIAZ (2000) en libros de química. Los libros han olvidado la importancia de la historia y filosofía de la ciencia y que el progreso de la ciencia ha estado basado muchas veces en suposiciones inconsistentes. Mucha gente todavía cree que el propósito de los historiadores es simplemente recoger el proceso de acumulación de conocimiento positivo, olvidando que los errores y confusiones son una forma de evolución de la ciencia. De acuerdo con BRUSH (1974) muchos de los científicos trabajan de una manera subjetiva de forma tal, que la verificación experimental es secundaria en comparación con la importancia de los argumentos filosóficos. Dada esta premisa, BRUSH sugiere que los historiadores deben hacer algo más que simplemente documentar la aplicación de la objetividad a los problemas científicos (p. 1.166). En nuestro caso (teoría cinética) estos argumentos filosóficos están representados en las suposiciones de MAXWELL con las que logró facilitar la comprensión del comportamiento de los gases.

Criterio 3

La creencia que las moléculas de los gases se encontraban en reposo, fue mantenida por prominentes científicos hasta la mitad del siglo XIX. Cuando la ley de BOYLE fue descubierta, en 1662, fue necesario reconciliar la teoría con los experimentos y esto pudo hacerse únicamente asumiendo que las moléculas se repelen unas a otras con fuerzas que son inversamente proporcionales a la distancia entre ellas (MILLIKAN *et al.*, 1937, p. 204). La introducción de métodos estadísticos dentro de la física es históricamente un paso de los de mayor importancia y trascendencia. En las manos de MAXWELL, BOLTZMANN y WILLARD GIBBS permitió el desarrollo de la mecánica estadística (MILLIKAN *et al.*, 1937, p. 213).

Dieciocho libros describen satisfactoriamente (S) las consideraciones estadísticas de MAXWELL, lo que representa un 64% mientras que en los libros de química (NIAZ, 2000) fue de 59%, tres apenas las mencionan (M) y el resto ni siquiera hacen mención (N).

Los siguientes son ejemplos de una presentación satisfactoria:

No deberíamos esperar que todas las moléculas de un gas viajen a la misma velocidad. La forma en que la velocidad varía de molécula a molécula fue primero descubierta por J. C. MAXWELL en 1860 a partir de consideraciones teóricas (BUECHE, 1969, p. 283). ... MAXWELL predijo que la velocidad de las partículas en un gas debería distribuirse entre todos los valores. Las predicciones de MAXWELL fueron confirmadas totalmente por el trabajo experimental posterior de muchos investigadores (BUECHE, 1969, p. 286). ... La teoría cinética describió hechos observables en función de moléculas misteriosas, con

tamaño y masa originalmente desconocidos. Cuando se presentó por primera vez la teoría cinética por MAXWELL, BOLTZMANN y otros, encontró gran oposición ya que era puramente hipotética. Sólo cuando se pudieron medir las propiedades de sus moléculas hipotéticas, la teoría cinética recibió casi aceptación universal (BUECHE, 1969, p. 293).

A una temperatura dada, las moléculas de gas con diferentes masas, tienen la misma energía cinética pero diferente rapidez eficaz (SEARS *et al.*, 1996, p. 510). ... No todas las moléculas de un gas tienen la misma rapidez. La figura... muestra un sistema experimental para medir la distribución de las velocidades moleculares. ... Para describir los resultados de tales mediciones definimos una función $f(v)$ llamada función de distribución (SEARS *et al.*, 1996, p. 517). ... La rapidez de las reacciones químicas a menudo depende mucho de la temperatura y esto se explica con la distribución de MAXWELL-BOLTZMANN (SEARS *et al.*, 1996, p. 520).

Los textos que explican la distribución estadística de MAXWELL-BOLTZMANN aún cuando los hemos señalado como presentaciones satisfactorias, en general, parece simplemente que la muestran como algo más que el estudiante debe aprender, sin tomar en cuenta las implicaciones educacionales para que ocurra la comprensión conceptual, nos atreveríamos a decir que más bien como una 'retórica de conclusiones' (SCHWAB, 1962). En general, los textos no señalan la gran importancia que representó el análisis estadístico de MAXWELL-BOLTZMANN, y que cambió completamente la visión de los físicos con respecto al movimiento de las moléculas gaseosas. Como señala el libro de ALONSO & FINN (1992, p. 362): La mecánica estadística tiende un puente entre la ciencia empírica de la termodinámica y la estructura atómica de la materia.

Como ejemplo de una presentación que significó una mención (M), tenemos el siguiente:

El movimiento de las moléculas en un gas es aleatorio en magnitud y dirección para moléculas individuales, pero un gas con muchas moléculas tiene una distribución de velocidades moleculares con un orden predecible. Esto se llama la distribución de MAXWELL-BOLTZMANN, quienes lo calcularon basándose en la teoría cinética. La ilustración de la distribución es una curva que se hace más amplia a temperaturas más altas (URONE, 2001, p. 308).

Criterio 4

Únicamente un texto describe satisfactoriamente (S), los intentos de VAN DER WAALS para reducir las suposiciones al incluir las fuerzas intermoleculares lo que facilitó la transición de gas ideal a gas real. Cinco textos apenas lo mencionan (M), los demás ni siquiera hacen mención (N).

A continuación, el único ejemplo de presentación satisfactoria (S):

La teoría cinética describe microscópicamente el comportamiento de un gas ideal, aunque ciertas hipótesis de nuestro modelo del gas ideal no son válidas cuando se trata de gases reales. Para corregir estas deficiencias se han sugerido muchas modificaciones a la ecuación de estado del gas ideal (RESNICK *et al.*, 1992, p. 579). ... El modelo de VAN DER WAALS proporciona una mejora sobre el modelo del gas ideal, pero ningún modelo sencillo sirve para explicar el comportamiento del gas bajo todas las circunstancias posibles (RESNICK *et al.*, 1992, p. 580). ... Si bien el modelo de VAN DER WAALS da una descripción mucho más realista que el modelo del gas ideal, para el comportamiento de un gas real como el CO_2 , ello sigue representando únicamente una aproximación del comportamiento real (RESNICK *et al.*, 1992, p. 581).

El libro de RESNICK *et al.* (1992) señala los intentos de VAN DER WAALS para modificar las suposiciones simplificadas de MAXWELL (cláusulas *ceteris paribus*), de la ecuación de los gases ideales para poder aplicarla a los gases reales, lo que llevó a un cambio progresivo de problemática (LAKATOS, 1970).

El siguiente es un ejemplo de presentación que originó una mención (M):

La ecuación de VANDER WAALS hace correcciones aproximadas para las dos omisiones (volumen y fuerzas de atracción) de la ecuación de los gases ideales (SEARS *et al.*, 1996, p. 503).

A continuación pasa a explicar detalladamente las correcciones realizadas por VAN DER WAALS. Sin embargo, no menciona el significado de tales correcciones desde el punto de vista de la filosofía de la ciencia, nuevamente estamos ante una retórica de conclusiones.

... Luego ampliaremos el modelo para incluir partículas que no son puntos (SEARS *et al.*, 1996, p. 507). ... El supuesto que los choques de las moléculas con el recipiente, son perfectamente elásticos es una simplificación excesiva (SEARS *et al.*, 1996, p. 511).

En general estos resultados están bastante alejados de los encontrados por NIAZ (2000) en libros de química general, donde de 22 libros analizados, 14 describieron satisfactoriamente los esfuerzos de VAN DER WAALS para modificar la ecuación de los gases ideales reduciendo las simplificaciones de volumen y presión y así adaptarla al comportamiento de los gases reales.

Criterio 5

Ninguno de los textos evaluados reconoce explícitamente (S) que hay dos formas de resolver problemas de gases, uno es el modo algorítmico y

otro el cambio conceptual. El modo algorítmico significa que los libros se limitan a utilizar los conceptos de forma operativa, exagerando el uso de fórmulas para la resolución de problemas. Cuando nos referimos al cambio conceptual, estamos señalando que los libros exponen el significado físico-cualitativo de los conceptos y leyes para la resolución de los problemas, lo que propicia la comprensión conceptual del estudiante en situaciones novedosas.

El texto de SERWAY & FAUGHN (2001) presenta ejemplos para explicar el comportamiento de los gases que implican comprensión conceptual y otros que se resuelven mediante algoritmos. Sin embargo, no establece la diferencia entre uno y otro, a excepción de una aclaratoria que hace al comienzo del texto y que presentamos a continuación:

Se hizo un esfuerzo concertado para poner más énfasis en la reflexión crítica y la enseñanza de los conceptos físicos. Esto se consiguió mediante el uso de aproximadamente 200 ejemplos conceptuales denominados reflexiones de física y de más de 400 preguntas conceptuales (SERWAY & FAUGHN, 2001, p. vii).

La siguiente es un ejemplo de pregunta conceptual:

Imagine un gas en un cilindro aislado con un émbolo móvil. El émbolo ha sido empujado hacia adentro para comprimir el gas y ahora se le deja libre. Cuando las moléculas de gas chocan con el émbolo, lo desplazan hacia fuera. Desde el punto de vista de la teoría cinética, explique cómo la expansión de este gas causa un descenso en su temperatura (SERWAY & FAUGHN, 2001, p. 325).

Podemos también señalar el libro de ALONSO & FINN (1992), como ejemplo de un ligero intento por ayudar a discernir o establecer cierta diferencia entre lo que es conceptual y lo que no, cuando dice:

“La física de la materia a nivel macroscópico fue desarrollada empíricamente, mucho antes que nuestra comprensión del comportamiento de átomos y moléculas evolucionara a su actual nivel de sofisticación” (p. 317).

El mismo texto presenta dos problemas (15.9 y 15.10, p. 332) que requieren comprensión conceptual. Sin embargo, no hay ningún intento por proponer un marco teórico que establezca claramente la diferencia entre conceptual y algorítmico y lo que esto implica. En la misma tónica, el libro de RESNICK *et al.* (1992) incluye preguntas que pueden considerarse como conceptuales, no obstante carece del marco teórico que permita entender eso. Por otra parte algunos libros no sólo ignoran el cambio, sino que tratan de encajar el pensamiento de los estudiantes en un recetario, como una simple manipulación de las variables de la ecuación de los gases ideales (URONE, 2001, p. 305).

Para comparar los libros de química general, analizados en un estudio previo (NIAZ, 2000) y los libros de física analizados en este estudio, usamos la siguiente escala: Satisfactorio (S) = 2 puntos, Mención (M) = 1 punto, No mención (N) = 0 puntos (véase tabla 1 para los puntos asignados a cada uno de los libros de física). Es interesante señalar que el tratamiento de la teoría cinética, es muy diferente en los libros de química y los libros de física (el puntaje promedio de los libros de química general fue 3,64 y el de los libros de física general fue de 1,90).

CONCLUSIONES

MAXWELL publicó su primer trabajo sobre la teoría cinética en 1860: Muchas de las propiedades de la materia, especialmente en la forma gaseosa, pueden deducirse a partir de las hipótesis que sus pequeñas partes están en continuo movimiento, la velocidad aumenta con la temperatura, y que la naturaleza exacta de este movimiento llegó a ser objeto de curiosidad racional (MAXWELL, 1860, p.19 en NYHOF, 1988, p. 81). Sin embargo, los libros de física examinados, en una gran mayoría, ignoraron la importancia de las suposiciones de MAXWELL para simplificar y así poder estudiar el movimiento de las partículas de los gases.

MAXWELL tomó la premisa que todos los sistemas físicos son sistemas materiales, o sea, sistemas que están sujetos a las leyes fundamentales de la mecánica newtoniana y de la conservación de la energía. Aunque estrictamente hablando estas premisas son hipótesis (DE REGT, 1996). Ninguno de los libros de física evaluados hace siquiera mención de la inconsistencia de esta suposición del modelo de MAXWELL.

BOLTZMANN fue el primero en darle, a una ley fundamental de la física, una interpretación estadística (FLAMM, 1983, p. 264). Esta interpretación estadística de una ley básica impresionó mucho a los físicos —entre ellos a MAX PLANCK (FLAMM, 1983, p. 265). Fue en un memorable debate en el congreso Naturforschergesellschaft en Leipzig en 1895 donde HELM y OSTWALD atacaron la teoría cinética mientras BOLZMANN y FELIX KLEIN la defendían (FLAMM, 1983, p. 267). A pesar de la importancia de las consideraciones estadísticas de MAXWELL-BOLTZMANN para explicar el movimiento de muchas partículas gaseosas y la controversia que suscitó en su momento, muchos de los textos evaluados le restan importancia, otros ni siquiera la toman en cuenta y los que lo hacen la presentan como una retórica de conclusiones a ser memorizada por los estudiantes, sin

considerar las implicaciones filosóficas que ayudarían a una mejor comprensión conceptual.

Con respecto al criterio 4, sorprendentemente los libros de física le restan importancia al trabajo realizado por VAN DER WAALS al mejorar el modelo del gas ideal para poder ser aplicado a los gases reales, lo que demuestra cómo el poder heurístico de las teorías/modelos va aumentando progresivamente (LAKATOS, 1970).

Una situación mucho más grave se encontró en el criterio 5, donde la totalidad de los libros examinados carecen de una visión conceptual en los problemas presentados y en su mayoría siguen utilizando únicamente los algoritmos para su resolución, impidiendo así que los estudiantes adquieran habilidades y cierta capacidad de análisis que les permitan encarar los retos que representa la investigación científica y no seguir una serie de pasos a modo de recetario que la mayoría de las veces se hacen mecánicamente, obviando la importancia de la comprensión conceptual.

Como bien dice MARTÍN (2002): “La ciencia no es un cuerpo acabado de conocimientos, es un proceso de construcción de conocimientos e interpretaciones”. HODSON (1994) señala que los alumnos deben, aprender ciencia, aprender a hacer ciencia y aprender sobre la ciencia.

Tabla 1
Evaluación de libros de física (teoría cinético molecular) basándonos en una perspectiva de la historia y filosofía de la ciencia

No	Textos	Criterios*					Puntos**
		1	2	3	4	5	
1.	Alonso & Finn (1968)	N	N	N	N	N	0
2.	Alonso & Finn (1992)	N	N	S	M	N	3
3.	Anderson (1971)	N	N	S	N	N	2
4.	Beiser (1972)	N	N	S	N	N	2
5.	Brehm & Mullin (1989)	N	N	M	N	N	1
6.	Bueche (1969)	N	N	S	N	N	2
7.	Carr & Weidner (1971)	M	N	N	N	N	1
8.	Cohen (1976)	M	N	S	M	N	4
9.	Cooper (1970)	—	—	—	—	—	—
10.	Cutnell & Johnson (1998)	N	N	S	N	N	2
11.	Eisberg & Lerner (1984)	S	N	S	N	N	4
12.	Feynman, <i>et al.</i> (1963)	N	N	M	N	N	1
13.	Fishbane <i>et al.</i> (1994)	N	N	S	M	N	3
14.	Frautschi <i>et al.</i> (1986)	N	N	N	M	N	1
15.	Giancoli (1997)	N	N	S	N	N	2
16.	Haken & Wolf (1994)	N	N	N	N	N	0
17.	Halliday & Resnick (1970)	N	N	S	N	N	2
18.	Halliday <i>et al.</i> (2001)	N	N	S	N	N	2
19.	Krane (1996)	N	N	S	N	N	2
20.	McGervey (1971)	N	N	N	N	N	0
21.	Ohanian (1987)	N	N	S	N	N	2
22.	Resnick <i>et al.</i> (1992)	S	N	N	S	N	4
23.	Rohlf (1994)	N	N	S	N	N	2
24.	Sears <i>et al.</i> (1996)	M	N	S	M	N	4
25.	Serway & Faughn (2001)	M	N	N	N	N	1
26.	Thumm & Tilley (1970)	N	N	M	N	N	1
27.	Tipler (1999)	N	N	S	N	N	2
28.	Urone (2001)	M	N	S	N	N	3
29.	Williams & Spangler (1981)	N	N	S	N	N	2
30.	Wilson (1994)	N	N	N	N	N	0

* Criterios:

1. Suposiciones simplificadas (básicas) de MAXWELL.
2. Naturaleza inconsistente del programa de investigación de MAXWELL.
3. Consideraciones estadísticas de MAXWELL.
4. Contribución de VAN DER WAALS.
5. Desde el ‘modo algorítmico’ al ‘cambio conceptual’ en la comprensión del comportamiento de los gases.

Nota: S = Satisfactorio; M = Mención; N = No mención; guión (-) el texto no menciona

** Puntos: N = 0; M = 1; S = 2

BIBLIOGRAFÍA

- ACHINSTEIN, P., Scientific discovery and Maxwell's kinetic theory, *Philosophy of Science*, 54, 409-434, 1987.
- ACHINSTEIN, P., *Particles and waves: Historical essays in the philosophy of science*, New York: Oxford University Press, 1991.
- ALONSO, M. & FINN, E.J., *Fundamental university physics*, vol. III, Quantum and Statistical Physics (Spanish ed.), Reading, MA: Addison-Wesley, 1968.
- ALONSO, M. & FINN, E.J., *Physics* (Spanish ed.), Reading, MA: Addison-Wesley, 1992.
- ANDERSON, E.E., *Modern physics and quantum mechanics*, Philadelphia, PA: Saunders, 1971.
- BEISER, A., *Basic concepts of physics* (2nd ed.), Reading, MA: Addison-Wesley, 1972.
- BREHM, J.J. & MULLIN, W.J., *Introduction to the structure of matter. A course in modern physics*. New York: Wiley, 1989.
- BRUSH, S.G., Should the history of science be rated X? *Science*, 183, 1164-1172, 1974.
- BRUSH, S.G., *The kind of motion we call heat: A history of the kinetic theory of gases in the 19th century*, New York: North-Holland, 1976.
- BUECHE, F.J., *Introduction to physics for scientists and engineers* (Spanish ed.), New York: McGraw-Hill, 1969.
- CARR, H.Y. & WEIDNER, R.T., *Physics from the ground up*. New York: McGraw-Hill, 1971.
- COHEN, R.S., *Physical Science*, New York: Holt, Rinehart and Winston, 1976.
- COOPER, L.N., *An introduction to the meaning and structure of physics* (short edition), New York: Harper & Row, 1970.
- CUTNELL, J.D. & JOHNSON, K.W., *Physics*, vol. 1 (4th ed.), New York: Wiley, 1998.
- DE REGT, H.W., Philosophy and the kinetic theory of gases, *The British Journal for the Philosophy of Science*, 47, 31-62, 1996.
- DUSCHL, R.A., Research on the history and philosophy of science. In D. L. Gabel (Ed.), *Handbook of Research on Science Teaching* (pp. 444-465), New York: MacMillan, 1994.
- EISBERG, R.M. & LERNER, L., *Physics: Foundations and applications*, vol. II (Spanish ed.), New York: McGraw-Hill, 1984.
- EVERITT, C.W., Books Reviews: Maxwell: Giant shoulders to stand upon; A "mysteriously prescient" intellect, *Physics Today*, 52, 61, 1999.
- FEYNMAN, R.P.; LEIGHTON, R.B., & SANDS, M., *The Feynman lectures on physics*, vol. 1, (bilingual ed.), Reading, MA: Addison-Wesley, 1963.
- FLAMM, D., Ludwig Boltzmann and his influence on science, *Studies in History and Philosophy of Science*, 14 (4), 255-278, 1983.
- FISHBANE, P.M.; GASIOROWICZ, S. & THORNTON, S.T., *Physics for scientists and engineers*, vol. I (Spanish ed.), Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1994.
- FRAUTSCHI, S.C.; OLENICK, R.P.; APOSTOL, T.M. & GOODSTEIN, D.L., *The mechanical universe. Mechanics and heat* (advanced ed.), Cambridge University Press: Cambridge, UK, 1986.
- GIANCOLI, D.C., *Physics, principles with applications* (4th ed., Spanish), Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1997.
- GUISASOLA, J.; ALMUDI, J.M. & FURIÓ, C., The nature of science and its implications for physics textbooks: the case of classical magnetic field theory, trabajo presentado en: *Seventh International History, Philosophy & Science Teaching Conference*, Winnipeg, Canada, 2003.
- GAVROGLU, K., The reaction of the British physicists and chemists to van der Waals' early work and to the law of corresponding states, *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, 20, 199-237, 1990.
- HAKEN, H. & WOLF, H.C., *The physics of atoms and quanta. Introduction to experiments and theory* (4th ed.), New York: Springer-Verlag, 1994.
- HANSON, N.R., *Patterns of Discovery*, Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 1958.
- HALLIDAY, D. & RESNICK, R., *Fundamentals of physics*, New York: Wiley, 1970.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R. & WALKER, J., *Fundamentals of physics* (sixth edition extended), New York: Wiley, 2001.
- HODSON, D., Hacia un enfoque más crítico del trabajo de laboratorio, *Enseñanza de las Ciencias*, 12, 299-313, 1994.
- KRANE, K.S., *Modern physics* (2nd ed.), New York: Wiley, 1996.
- LAKATOS, I., Falsification and the methodology of scientific research programmes. In I. Lakatos & A. Musgrave (eds.), *Criticism and the growth of knowledge* (pp. 91-195). Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1970.
- LEITE, L., History of science in science education: Development and validation of a checklist for analyzing the historical content of science textbooks, *Science & Education*, 11, 333-359, 2002.
- MARTÍN D., M.J., Enseñanza de las ciencias ¿para qué?, *Revista Electrónica de la enseñanza de las ciencias*, 1, 2002.
- MATTHEWS, M.R., *Science teaching: The role of history and philosophy of science*, New York: Routledge, 1994.
- MC COMAS, W.F. (ed.), *The nature of science in science education rationales and strategies*, Netherlands: Kluwer, 2000.
- MCGERVEY, J., *Introduction to modern physics* (Spanish ed.), New York: Academic Press, 1971.
- MÉHEUT, M., Designing a learning sequence about a prequantitative kinetic model of gases: The parts placed by questions and by a computer-simulation, *Int. J. Sci. Educ.*, 19 (6), 647-660, 1997.
- MILLIKAN, R.A.; ROLLER, D. & WATSON, E.C., *Mechanics, molecular physics, heat and sound*, Boston, MA: The MIT press, 1937.
- NIJAZ, M., A rational reconstruction of the kinetic molecular theory of gases based on history and philosophy of science and its implications for chemistry textbooks, *Instructional Science*, 28, 23-50, 2000.
- NIJAZ, M. & ROBINSON, W.R., From 'algorithmic mode' to 'conceptual gestalt' in understanding the behavior of gases: An epistemological perspective, *Research in Science and Technological Education*, 10, 53-64, 1992.
- NYHOF, J., Philosophical objections to the kinetic theory, *The British Journal for the Philosophy of Science*, 39, 81-109, 1988.
- OHANIAN, H.C., *Modern physics*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1987.
- PORTER, T.M., A statistical survey of gases: Maxwell's social physics, *Historical Studies in Physical Sciences*, 12, 77-116, 1981.
- PORTER, T.M., From Quetelet to Maxwell: Social statistics and the origins of statistical physics. In I. B. Cohen, ed., *Boston Studies in the Philosophy of Science*, 150, 345-362, Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1994.
- RESNICK, R.; HALLIDAY, D. & KRANE, K.S., *Physics*, vol. 1 (4th ed. in Spanish), New York: Wiley, 1992.
- ROHLF, J.W., *Modern physics from a to Z*. New York: Wiley, 1994.
- RUELLE, D., Books Reviews: A life devoted to the enigma of irreversibility. Ludwig Boltzmann: the man who trusted atoms, *Physics Today*, 52, 65, 1999.
- SCHWAB, J.J., *The teaching of science as enquiry*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1962.
- SEARS, F.W.; ZEMANSKY, M.W.; YOUNG, H.D. & FREEDMAN, R.A., *University Physics*, vol. 1 (9th ed in Spanish), Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1996.
- SERWAY, R.A. & FAUGHN, J.S., *College physics* (5th ed. in Spanish), Saunders College Publishing, 2001.
- THUMM, W. & TILLEY, D.E., *Physics: A modern approach*, Menlo Park: California, 1970.
- Tippler, P. A., *Physics* (4th ed.), New York: Freeman, 1999.
- URONE, P.P., *College physics* (2nd ed.), Pacific grove, CA: Brooks/Cole, 2001.
- VAQUERO, J.M. & SANTOS, A., Heat and kinetic theory in 19th-century physics textbooks: The case of Spain, *Science & Education*, 10, 307-319, 1999.
- WILLIAMS, D. & SPANGLER, J., *Physics for science and engineering*, New York: D. Van Nostrand Company, 1981.
- WILSON, J.D., *College physics* (2nd ed. in Spanish), Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1994.

Received 29.10.2003, approved 05.05.2004

PUBLICACIONES DE LA UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS - CENTRO DE INVESTIGACIONES Y DESARROLLO CIENTÍFICO

