

SOBRE LAS LEYES DE NEWTON

Raúl Gómez G, José Marquina F, Vivianne Marquina F.

Facultad de Ciencias, UNAM.

Departamento de Física.

(recibido abril 25, 1983; aceptado diciembre 13, 1983)

RESUMEN

Se discute el contenido de los textos más empleados en las universidades mexicanas en relación a las leyes de Newton. Se hacen observaciones sobre lo que Newton dijo sobre estas leyes. Por último, se hacen una serie de observaciones y proposiciones sobre algunos aspectos cuya importancia debe resaltarse.

ABSTRACT

We discuss the material presented by the more used books in the mexican universities with regard to Newton's laws. We make several remarks of what Newton said about this laws. Finally, we present a series of points of view and propositions with regard to some aspects that we feel important to emphasize.

1. INTRODUCCION

Debido a ciertas discrepancias conceptuales que se han manifestado en torno a las leyes de movimiento de Newton, creemos conveniente ocuparnos de algunos aspectos que con frecuencia surgen en discusiones sobre este tema. Pensamos que estas discrepancias se deben a varias razones, entre las cuales hemos detectado las siguientes: la utilización preferencial de ciertos textos en los cuales se manifiestan interpretaciones, al menos controvertibles, sobre estos temas; la falta de conocimiento de lo que realmente dijo Newton; la perpetuación, tanto oral como escrita, de errores interpretativos.

El trabajo está distribuido en tres secciones. En la primera se hacen algunos comentarios relacionados con los textos más empleados en las instituciones de enseñanza superior de nuestro país. A continuación se hacen varias citas comentadas sobre lo que dijo (y lo que no dijo) Newton ⁽¹⁾ en su libro *Principia Matemática*. Por último, se plantea nuestro punto de vista acerca de las leyes de Newton y de cómo deberían presentarse.

2. LAS LEYES DE NEWTON SEGUN LOS TEXTOS

Parte de la confusión causada radica en el hecho de que en todo libro de texto aparece un contenido filosófico, que con frecuencia no se manifiesta abiertamente y en el cual se recalca un punto de vista particular, sin indicar con claridad que puede existir, y de hecho existen, puntos de vista alternativos. Esto es muy notable en nuestro país, y probablemente en la mayoría de los países de América, pues casi todos los textos empleados en las universidades han sido escritos en los Estados Unidos de América y en ellos se manifiesta con frecuencia el punto de vista del positivismo lógi

co.

Bajo el punto de vista de esta concepción filosófica⁽²⁾,

constituir un concepto quiere decir establecer una regla según la cual hayan de sustituirse todos los enunciados que contienen este concepto por enunciados que contengan otros conceptos. No todos los conceptos son definibles, sino sólo los conceptos de nivel más alto. Los conceptos primitivos indefinibles que constituyen su fundamento son los significados que sólo pueden mostrarse en las vivencias. De acuerdo con esto, todos los enunciados sobre objetos de orden superior han de poder transformarse en enunciados que ya no contengan más que los conceptos primitivos y conceptos lógicos, esto es, formales. La constitución de los conceptos se realiza gradualmente, constituyendo conceptos ulteriores sobre la base de los conceptos que se han constituido en primer término a base de los conceptos primitivos.

En este sentido se intenta construir una genealogía lógica que parta de lo dado en la vivencia, utilizando como criterio empírico de verificabilidad la proposición wittgensteiniana⁽³⁾ que señala que "entender una proposición quiere decir, si es verdadera, saber lo que acaece", el cual transformado por Schlick⁽⁴⁾ señala que "el criterio de verdad o de falsedad de la proposición se hallará en el hecho de que, en circunstancias definidas (dadas en la definición), ciertos datos estarán presentes o no estarán presentes", de manera que si no existe el hecho que debería existir si determinado enunciado fuese cierto, entonces el enunciado es falso.

Establecido pues, de manera muy general, el marco filosófico* en el cual se desarrollan los conceptos físicos en la mayoría de los textos, procedemos a comentar el aspecto general de la presentación de cada una de las leyes.

* Queremos recalcar que más allá de las diferencias que tenemos con los planteamientos de esta corriente filosófica, el objetivo de este trabajo no es el de realizar una crítica a dicha posición, sino señalar la influencia dominante que tiene en la mayoría de los textos.

La primera ley

Prácticamente ninguno de los textos examinados enfatiza la importancia conceptual de la primera ley, reduciéndola a un enunciado simple del principio de inercia de Galileo. Más aún, en ocasiones se llega al grado de decir que esta ley es un caso particular de la segunda ley. Por ejemplo, el libro *Física* ⁽⁵⁾ de A. Reiman dice:

El enunciado de la primera ley es formalmente innecesario, ya que es un caso particular (fuerza cero) de la segunda ley. Sin embargo se justifica que Newton la haya enunciado ya que todos creían en su época, que se requería de una fuerza para mantener el movimiento.

Este punto de vista se ha manifestado en otros textos ⁽⁶⁾, y aun el prestigiado libro de física del P.S.S.C. ⁽⁷⁾ comenta lo siguiente:

Lo que aquí llamamos ley de Newton es lo que con frecuencia se llama su segunda ley, y el principio de inercia de Galileo, que es un caso especial de la ley general, a veces es llamado primera ley de Newton...

Pocos son los textos que establecen que esta ley determina las condiciones que debe cumplir un marco de referencia inercial y prácticamente ninguno resalta que sin la primera ley (y, en consecuencia, sin marcos de referencia inerciales) no se podrían establecer ni la segunda ni la tercera leyes en la forma que las conocemos.

La segunda ley

El planteamiento hecho por los diferentes textos en relación con la segunda ley cubre una amplia gama de posiciones, las cuales pueden resumirse como sigue:

1. Existen textos, dirigidos principalmente a escuelas de ingeniería, que sólo la enuncian para después dedicarse a las aplicaciones de ella⁽⁸⁾.
2. Hay quienes partiendo de una definición operacional de masa (por lo general la masa gravitacional), consideran a esta ley como una definición de la fuerza⁽⁹⁾.
3. Otros consideran primero una definición operacional de fuerza (siempre en situaciones estáticas) y toman a la segunda ley como definición de masa inercial⁽¹⁰⁾.
4. También hay algunos textos que haciendo cierto circo conceptual, primero la consideran como una definición de masa (inercial) y después la retoman como una definición de fuerza, o viceversa⁽¹¹⁾.
5. Inclusive se manifiestan interpretaciones *sui generis* en el sentido de mencionar que lo que Newton consideraba importante de esta ley era la predicción de la aceleración⁽¹²⁾.

Además de las diversas interpretaciones mencionadas, ciertas frases de diferentes textos han contribuido a ampliar más la confusión. Por ejemplo, en la *Física fundamental universitaria* de M. Alonso y E. Finn⁽⁸⁾ se asevera:

La segunda ley es más una definición de fuerza que una ley, ya que es una consecuencia del principio de conservación del ímpetu.

O, en *Physics* de K.R. Atkins⁽¹⁴⁾ se dice que:

La segunda ley de Newton no es un enunciado fundamental acerca del comportamiento físico del universo, sino más bien una definición precisa del concepto de fuerza.

La tercera ley

En este caso los comentarios son bastante reducidos. Por lo general, los textos que tratan de justificarla lo hacen en términos de la conservación del ímpetu⁽¹⁵⁾, sin hacer

referencia a los sistemas de referencia inerciales (primera ley), ni tampoco al aspecto medular de la existencia de la pareja acción-reacción como única característica de las fuerzas planteada por Newton en su teoría. Más aún, en ocasiones mencionan que la tercera ley no siempre es válida⁽¹⁶⁾, sin indicar en qué sentido o en qué circunstancias. Por último, no es raro encontrar aseveraciones en el sentido que la tercera ley implica interacciones a distancia instantáneas.

Con esto cerramos los comentarios y observaciones relacionados con algunos textos típicos y pasamos al planteamiento que hace Newton sobre estas leyes.

3. LAS LEYES DE NEWTON SEGUN NEWTON

Desde luego, el objetivo de esta sección es tratar de aclarar al lector lo que está establecido en el libro de Newton⁽¹⁷⁾, *Principia Matemática*, y, en consecuencia, incluiremos varias citas tomadas de ese libro.

La primera ley

Ya en el *scholium* de los *Principia*, Newton establece:

No defino tiempo, espacio, lugar y movimiento como son bien conocidos por todos. Solamente debo observar, que la gente común concibe estas cantidades bajo ninguna otra noción que no sea la de relacionarlas con los objetos sensibles. Entonces arrastran ciertos prejuicios que para removerlos será conveniente distinguir entre absoluto y relativo, verdadero y aparente, matemático y común.

De esta manera Newton introduce la definición de tiempo absoluto (matemático, verdadero) que es aquel que "por sí mismo y por su propia naturaleza, fluye igualmente sin relación a algo externo"; espacio absoluto el cual "por su propia naturaleza se mantendrá semejante e inmóvil, sin relación

a nada externo"; lugar el cual "es una parte del espacio y como tal puede ser absoluto o relativo, según sea el espacio a que se refiere"; movimiento absoluto que será "la traslación de un cuerpo de un lugar absoluto a otro". Sin embargo, un poco más adelante menciona que "las partes de ese espacio in móvil en las cuales tienen lugar esos movimientos (absolutos), de ninguna manera pueden percibirse por nuestros sentidos". Resulta pues que el concepto de espacio absoluto es esencialmente especulativo y es en este donde Newton plantea sus tres axiomas o leyes de movimiento, ya que dichas leyes se referirán a los conceptos absolutos y no a los relativos puesto que "las causas por las cuales los movimientos verdaderos y los relativos deben distinguirse uno de otro, son las fuerzas que se deben imprimir a los cuerpos para generar movimiento. El movimiento verdadero ni se genera ni se altera excepto cuando al cuerpo en movimiento se le imprime una fuerza; pero el movimiento relativo puede ser generado sin que se imprima ni una fuerza sobre el cuerpo". Así "el movimiento verdadero sufre siempre algún cambio cuando se imprime cualquier fuerza sobre el cuerpo en movimiento, pero el movimiento relativo no necesariamente cambia por tales fuerzas". En realidad podría decirse que la definición de marco de referencia inercial viene dada en este *scholium* a través del concepto de espacio absoluto, aunque en realidad se trataría de un referencial inercial muy especial: absoluto y especulativo. Una vez establecido este concepto Newton plantea la primera ley enunciándola de la siguiente manera.

Todos los cuerpos continúan en su estado de reposo, o de movimiento uniforme en línea recta excepto en la medida de que sean obligados a cambiar dichos estados por fuerzas impresas sobre ellos.

Cabe hacer notar que una vez que se ha establecido la primera ley se cuenta con la característica general que debe tener cualquier sistema inercial y, en consecuencia, ya

no hace falta mantener el concepto de espacio absoluto.

Más aún, todo parece indicar que Newton utilizó este concepto sólo como punto de partida para establecer sus axiomas, sin insistir mayormente en ello. A decir de Einstein⁽¹⁸⁾:

Newton mismo tenía más conciencia de la debilidad inherente de su edificio conceptual que la generación que le siguió. Este solo hecho siempre ha despertado mi admiración.

Resulta entonces muy claro que la primera ley de Newton no se refiere sólo a los "movimientos naturales", en el sentido aristotélico, sino que establece que si existe un sistema de referencia en el cual se cumpla la primera ley, entonces habrá una causa para explicar que un objeto altere su estado de movimiento.

La segunda ley

Para establecer la segunda ley, Newton señala, en la definición I:

La cantidad de materia es la medida de la misma proviniendo de su densidad y de su "corporiedad" conjuntamente,

siendo

... esta cantidad la que denomino, de aquí en adelante, con el nombre de cuerpo o masa.

Luego, pasa a la definición II en la que nos dice:

La cantidad de movimiento es la medida de la misma, proviniendo de la velocidad y la cantidad de materia conjuntamente;

con lo cual enuncia la segunda ley de la forma siguiente:

El cambio de movimiento es proporcional a la fuerza impresa y (se produce) en la dirección de la línea recta en la cual se ha imprimido la fuerza.

En estos términos, parecería que la segunda ley es efectivamente la definición del concepto de fuerza, construida en base a los conceptos primarios de masa y velocidad (a través de la aceleración), pero no es así ya que el mismo Newton, desde la definición III, habla de fuerzas al tratar de la *vis insita**, y en la IV, define (con el mismo carácter de definición utilizado para la masa) fuerza como la "...acción ejercida sobre un cuerpo, en orden de cambiar su estado, tanto de reposo como de movimiento uniforme en línea recta"; siendo la segunda ley una relación entre las cantidades previamente definidas.

Otro hecho importante es que Newton supone que la segunda ley es aplicable en todos los fenómenos, los conocidos y los no conocidos, y sobre todo establece que su propósito es:

a partir de los fenómenos de movimiento, investigar las fuerzas de la naturaleza, y a partir de esas fuerzas demostrar los fenómenos restantes

y continúa diciendo que

...debido a que estas fuerzas son desconocidas, los filósofos han intentado, en vano hasta ahora, la investigación de la naturaleza; pero espero que los principios que aquí establezco proyecten alguna luz sobre este método o sobre algún método más verdadero de filosofar.

Bajo esta concepción

* Para Newton, *vis insita* significa lo que ahora llamamos la inercia.

todo lo que no ha sido deducido a partir de los fenómenos hay que considerarlo como hipótesis*, y las hipótesis, ya sean metafísicas o físicas, ya se refieran a las cualidades ocultas o a las mecánicas, no tienen lugar en la filosofía experimental. En esta filosofía las proposiciones particulares se infieren a partir de los fenómenos y por medio de la inducción adquieren después un carácter general.

Aquí Newton parece indicar que ha intuido una interrelación entre las fuerzas y *los otros fenómenos* y también la posibilidad de que su planteamiento filosófico (método de pensamiento) pueda ser interpretado de otra manera.

Por otra parte, cabe recalcar que el origen de las fuerzas no forman parte de la teoría de Newton, sino que es uno de los problemas abiertos que pretende desentrañar. Cuando adopta la segunda ley como el *instrumento universal* para analizar a *cualquier fuerza*, y tratar con ello de esclarecer su origen, es cuando ésta adquiere un significado más profundo y se puede hablar propiamente de una ley, en el sentido de que se piensa que es aplicable a cualquier fenómeno.

La tercera ley

El único hecho mencionado por Newton en relación a la naturaleza de las fuerzas queda manifiesta en su enunciado de la tercera ley:

Las acciones mutuas de dos cuerpos, uno sobre el otro, son siempre iguales y están dirigidas a las partes contrarias.

En esta ley, Newton establece claramente la idea de

* Esta cita pertenece al *scholium* general, que se encuentra al final del libro III de los *Principia*, la cual ha sido objeto de diversas polémicas ya que en ella Newton trata el problema de la gravedad y no resulta claro si se refiere sólo a este, o hace un planteamiento metodológico general.

interacción; es decir, el hecho de que no existen fuerzas aisladas, sino que éstas siempre se dan en parejas acción-reacción.

Aquí de nuevo, adquiere una importancia fundamental la primera ley, pues resulta claro que sin caracterizar primero un referencial adecuado (uno inercial) en el cual se hagan las observaciones, la aplicación de la segunda ley conduce a las llamadas fuerzas *inerciales o ficticias*, cuyo origen no puede identificarse con ningún cuerpo del entorno y, en consecuencia, carecen de reacción.

Un hecho que creemos importante destacar es que Newton nunca dice, en sus *Principia*, que la interacción (acción-reacción) sea instantánea. Más aún, él menciona que

...es inconcebible que la materia inanimada pueda, sin mediación de algo más que no sea material, actuar sobre, y afectar a, otra materia, sin contacto mutuo, como debe ser si la gravitación, en el sentido epicurista, es esencial e inherente a ella...

De aquí se implica necesariamente un intervalo de tiempo entre el momento en que se ejerce la acción y aquel en el que se produce la reacción (a menos que se piense en velocidades de propagación infinitas).

4. ALGUNAS CONSIDERACIONES SOBRE LAS LEYES DE NEWTON

En esta sección queremos destacar algunos aspectos que normalmente no son considerados en los libros de texto y que desde el punto de vista epistemológico resultan muy importantes.

La primera ley de Newton

En su enunciado de la primera ley, Newton habla del movimiento de un cuerpo material. Como ya se dijo en la sec

ción 2, la metodología común al estudiar el movimiento consiste en dar definiciones operacionales de los conceptos primarios de distancia, tiempo y masa para después definir, en términos de ellos, cantidades tales como la velocidad, la aceleración, la fuerza, etc.

Sin embargo, si se adopta otro punto de vista, no queda más que reconocer que espacio, tiempo, materia y movimiento son conceptos íntimamente relacionados. Este hecho es reconocido aun por positivistas renombrados, como H. Poincaré, quien dice en su libro *Filosofía de la Ciencia* (19):

...difícilmente se puede concebir el espacio sin la materia o el tiempo sin el movimiento de los cuerpos materiales.

Adoptando entonces el punto de vista de que el espacio (Δx), el tiempo (Δt), el movimiento (\bar{v}) y la materia son propiedades indisociables, la ecuación

$$\bar{v} = \frac{d\bar{x}}{d\bar{t}} \quad (1)$$

es una expresión que establece la interrelación cuantitativa entre tres de estas cantidades y, de hecho, les da sentido.

Ahora bien, cuando Newton establece la primera ley, caracteriza a ciertos observadores situados en referenciales especiales para los cuales la velocidad de un cuerpo se mantiene constante, *excepto en la medida* de que sean obligados a cambiar dichos estados por fuerzas impresas sobre él. Las cursivas en este enunciado se han puesto para hacer notar que ésta es la traducción correcta de las palabras *nisi quatenus* del enunciado original en latín, y no a *menos*, que es la forma en que normalmente se traduce. Aunque la diferencia es sutil, vale la pena hacer notar que *en la medida de que* implica la existencia de una ley que relaciona el nuevo estado de movimiento con el anterior, además de indicar que es una fuerza lo que motiva tal cambio. En este sentido es un prin

cipio causal casi completo. Adicionalmente hace ver que el reposo es una idea totalmente relativa y que el aspecto importante es la permanencia o inalterabilidad de un estado de movimiento específico para un observador.

La segunda ley de Newton

Sin entrar en los detalles de la forma explícita en que Newton formuló la segunda ley, consideramos la forma común de esta ley que aparece en la mayoría de los textos:

$$\bar{F} = m\bar{a}. \quad (2)$$

En esta expresión también se puede notar la presencia de tres conceptos: la masa, la fuerza y la aceleración. Cualitativamente la masa está relacionada con una característica de la materia, la aceleración con sus movimientos y la fuerza con la idea de un cambio en el estado de movimiento.

Aquí, de nuevo, se puede adoptar una posición positivista consistente en suponer conocida la masa y considerar entonces a la expresión (2) como una definición de la fuerza; o bien, suponer conocida la fuerza y entonces tomarla como una definición de la masa. Sin embargo, resulta claro que toda medida general de la masa presupone la existencia y validez de la Ec. (2), como también lo hace toda medida general de la fuerza, de tal forma que esta relación *no es una definición* ni de la masa ni de la fuerza, sino que es una expresión que relaciona cuantitativamente a los conceptos interrelacionados de la materia, su cambio de estado de movimiento y el origen de ese cambio. Más aún, si se escribe el enunciado original de Newton en la terminología moderna, la segunda ley queda expresada por

$$\bar{F} = \frac{d\bar{p}}{dt}, \quad (3)$$

en donde el ímpetu $\bar{p} = m\bar{v}$. Aquí se tiene ahora una relación entre la fuerza y el ritmo temporal de cambio de la materia en movimiento. En este caso resulta más dudoso que la segunda ley puede ser una definición de la fuerza, ya que no parece simple pensar en una definición operacional del ímpetu (¿se mediría acaso con un "ímpetuómetro"?). Por otra parte, si se considera a un sistema de masa variable, la definición operacional del ímpetu se oscurece aún más, ya que esta cantidad puede variar no sólo al variar la velocidad, sino también al variar la masa del sistema.

Como el propósito de este trabajo no es el de tratar las aplicaciones de las leyes de Newton, no trataremos aquí las complicaciones que surgen en la formulación $\bar{F} = \dot{\bar{p}}$ de la segunda ley, es decir, con el problema de sistemas de masa variable. Sin embargo deseamos llamar la atención del lector sobre este punto y referir a un artículo de M.S. Tiersten ⁽²⁰⁾, y las referencias ahí indicadas, en el cual se trata este problema en variadas situaciones.

Regresando a nuestro problema, pensamos que la característica que permite llamar ley a la expresión (2), o a su forma más general (3), es la generalización que hizo Newton al suponer que esta expresión es válida en todas las condiciones definidas por la primera ley, basándose tan sólo en una comprobación experimental limitada. Entre otras cosas, esta generalización implica el principio de conservación del ímpetu, aunque Newton no lo formuló explícitamente.

Resulta entonces que las dos primeras leyes de Newton tienen una importancia capital en el sentido de que establecen las interrelaciones cuantitativas entre espacio, tiempo, materia y movimiento, y ambas constituyen el escenario y los actores del *teatro del mundo real*. (Desde luego, plantear que la primera ley es un caso particular de la segunda es un grave error conceptual).

La tercera ley de Newton

La tercera ley es la que viene a dar una coherencia definitiva a las dos primeras leyes, estableciendo la idea de interacciones mutuas entre los cuerpos materiales. Establece una *unidad* del mundo material al atribuir una acción recíproca entre los cuerpos materiales que provoca sus diferentes estados de movimiento, desechando la concepción del mundo como una suma simple de objetos y fenómenos dispersos y desligados entre sí.

5. CONCLUSIONES

- a) Consideramos que es muy importante presentar el desarrollo de las leyes de Newton en su contexto histórico pues se trata de un bello ejemplo de la génesis de ideas científicas.
- b) Creemos conveniente que se haga notar hasta qué punto las leyes de Newton están de acuerdo con una concepción materialista del mundo. De hecho, y a pesar del misticismo de Newton, los planteamientos hechos en los *Principia* son, en gran medida, planteamientos materialistas.
- c) Por último, consideramos que es un error didáctico, sobre todo en cursos elementales, presentar la dinámica newtoniana partiendo de principios generales de conservación (los cuales tuvieron su origen en las leyes de Newton), o de una manera axiomática, pues este tipo de presentaciones produce, por lo general, la impresión de que las ideas se generaron *por inspiración divina* y no como productos de una situación histórico-social particular aunada a un esfuerzo individual.

Quando la mecánica de Newton se instituye sobre la ecuación fundamental de la dinámica, uniendo la masa, la fuerza y la aceleración, ¿no deja de lado todo el pasado de irracionalidad ligado a la idea de fuerza? Cuando se llevan a cabo, en su rigor los lazos matemáticos de los tres conceptos científicos: masa, fuerza, aceleración, ya no hay por qué preguntarse cuál es el concepto primero

REFERENCIAS

1. I. Newton, *Principia Matemática*, University of California Press (1962).
2. V. Kraft, *El Círculo de Viena*, Taurus Ediciones S.A. España (1977). Segunda Parte B (El empirismo).
3. L. Wittgenstein, *Tractatus Logico-Philosophicus*, Alianza Editorial, España (1980) (Proposición 4.024).
4. M. Schlick, "Positivismo y Realismo", en la compilación de Ayer A.J. sobre el *Positivismo Lógico*, Fondo de Cultura Económica (1981).
5. A.L. Reimann, *Física*, Vol. I., CECSA, México (1974) p. 149.
6. Ver por ejemplo: a) F.W. Constant, *Theoretical Physics*, Addison-Wesley (1962) p. 65; b) J.P. Mc. Kelvey, H. Grotch *Física para ciencias e ingeniería*, Vol. I. Harper y Row. Latinoamericana (1980) p. 26; c) R. Resnick y D. Haliday, *Física*, Vol. I. CECSA México (1980) p. 91.
7. P.S.S.C., *Physics*, D.C. Heath Company (1965) pie de la p. 328.
8. Por ejemplo: a) F. Bueche, *Fundamentos de Física*, Mc. Graw Hill México (1970); b) J.L. Synge, A.B. Griffith, *Principios de mecánica*, Mc. Graw Hill, España (1965).
9. Por ejemplo: a) W. Hauser, *Introduction to the Principles of Mechanics*, Addison Wesley (1966); b) K.R. Symon, *Mechanics*, Addison Wesley (1960) c) V. Barger, M. Olsson, *Classical Mechanics: A modern perspective*, Mc. Graw Hill (1973).
10. Ver referencias 6c y 7.
11. J.P. Mc. Kelvey y H. Grotch, *Física para ciencias e ingeniería*, Harper Row Latinoamericana, México (1980).
12. S. Bravo "Sobre la segunda ley de Newton", *Boletín de Enseñanza* No. 4, Facultad de Ciencias U.N.A.M. (1982). Se incluye esta referencia por la gran circulación que tiene este boletín entre los estudiantes.
13. M. Alonso, E. Finn, *Fundamental University Physics, Mechanics*, Addison-Wesley (1967), p. 159.
14. K.R. Atkins, *Physics*, John Wiley and Sons (1967).
15. Ver, por ejemplo, referencia 13.
16. Ver, por ejemplo, referencia 6c.
17. *Ibid* I.
18. A. Einstein, *Essays in Science*, Philosophical Library N.Y. (1934).
19. H. Poincaré, *Filosofía de la Ciencia*, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. México (1981).
20. M.S. Tiersten, *Am. Jour. Phys.*, 37 (1) (1969) 82.
21. G. Bachelard, *El compromiso racionalista.*, Siglo Veintiuno Editores, México (1973) p. 102.