

Materia, espacio, tiempo y campos: una reflexión sobre los conceptos fundamentales de la física clásica

M. A. Ocampo

*Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada, Universidad Nacional Autónoma de México,
Boulevard Juriquilla 3001, 76230 - Querétaro, México.*

Received 24 November 2023; accepted 3 January 2024

Se presenta una reflexión sobre los conceptos de materia, espacio, tiempo y campos, sobre los que se fundamentan las descripciones de la física clásica. Se enfatizan el papel de la experiencia humana para su consolidación y la importancia de observar su establecimiento bajo una idea de concomitancia; la comprensión de dichos conceptos requiere reconocer que son inseparables y complementarios.

Descriptor: Materia; espacio; tiempo; campos.

A reflection on the concepts of matter, space, time and fields, on which the descriptions of classical physics are based, is presented. The role of human experience for its consolidation and the importance of observing its establishment under an idea of concomitance are emphasized; understanding these concepts requires recognizing that they are inseparable and complementary.

Keywords: Matter; space; time; fields.

DOI: <https://doi.org/10.31349/RevMexFis.21.020209>

1. Introducción

La descripción clásica de la naturaleza se sustenta en tres conceptos fundamentales: materia, espacio y tiempo. Y, cuando pretendemos conformar un marco teórico capaz de predecir el movimiento de los cuerpos materiales, incorporamos la noción de fuerza, que al ser analizada sobre sus características sustanciales, da lugar al concepto de campo, de valor teórico más productivo y fundamental. Siendo tan básicos para nuestra comprensión del mundo, estos conceptos requieren ser establecidos con precisión y sin ambigüedades, sin embargo, al no contar con nociones de carácter más fundamental, su definición resulta habitualmente ambigua y circular.

En este artículo presentamos una reflexión sobre estos conceptos considerando la visión de la física clásica, brevemente complementada mediante notas al pie de página, con algunos comentarios que rebasan este marco y en los que se consideran puntos de vista de la teoría de la relatividad o de la mecánica cuántica.

2. Materia, espacio y tiempo

La ciencia aborda la solución al problema epistémico de establecer los conceptos más fundamentales aludiendo a la experiencia sensorial directa, rebasando esencialmente, el ámbito teórico. Al plantear el problema de realizar la descripción de nuestro entorno, es decir, al preguntarnos por lo que percibimos cuando exploramos nuestro alrededor, la respuesta genérica es que lo que vemos son múltiples objetos, con características diversas; piedras, plantas y animales, a otras personas, nubes, cuerpos de agua y, haciendo uso de nuestra imaginación, un cielo en el que se contienen el sol, la luna y las estrellas. A lo que es tangible, o podemos pensar que lo es, lo

caracterizamos como material, y la “sustancia” que lo compone decimos, genéricamente, que es materia.

En el ámbito de la percepción humana directa, la caracterización general de la materia es complicada, pues aunque en una primera descripción podemos pensar que muchos cuerpos presentan bordes que definen sus formas y que parecen impenetrables, también observamos que se pueden disolver o incorporar en otros cuerpos o se modifican de diversas maneras. En todo caso, a pesar de estas y otras dificultades, nuestra experiencia nos permite establecer, mediante un proceso de inducción, cuando algo concreto es materia y, por ello, podemos notar que los cuerpos materiales se ubican de diversas maneras unos con respecto a otros, y que sus posiciones, orientaciones y formas pueden cambiar.

La teoría atómica, que plantea que los cuerpos materiales están constituidos por unidades submicroscópicas indivisibles, los átomos, que existen en una variedad limitada, los elementos, y que componen la totalidad de la materia como la percibimos sensorialmente, permite comprender la gran diversidad de formas que presenta la materia en el contexto de la experiencia humana directa y explicar su comportamiento bajo condiciones convencionales [1]. Aunque imperceptibles directamente para el humano, la existencia de los átomos nos permite modelar los múltiples procesos de transformación macroscópica de la materia, y explicar la disolución, recomposición y deformación de los cuerpos materiales¹.

Sobre las consideraciones planteadas, y mediante un proceso de abstracción, podemos decir que la materia permite definir al espacio como el ámbito en que ésta se presenta y al tiempo como el parámetro que indica el estado evolutivo de la disposición y forma de los cuerpos materiales. Sin embargo, consideramos fundamental resaltar que ninguno de estos conceptos se puede establecer de manera independien-

te; no podemos concebir al espacio sin la existencia de la materia ni el transcurso del tiempo sin la percepción del movimiento que ofrece el cambio de la disposición espacial de los cuerpos materiales. Materia, espacio y tiempo aparecen de manera concomitante e inseparable, es sólo la abstracción de nuestras experiencias sensoriales la que nos permite darles sentidoⁱⁱ.

La operatividad de estos conceptos en los marcos teórico y experimental, requerida para el estudio sistemático de la naturaleza deriva en un siguiente nivel conceptual, en el que el espacio es caracterizado mediante un sistema coordinado abstracto, que se localiza y orienta de manera conveniente sobre algún cuerpo. Las posiciones de otros cuerpos o, más precisamente, de los puntos asociados con ellos (como pueden ser sus centros geométricos, algunos vértices u otros puntos relevantes), se establecen como las coordenadas de dichos puntos en el sistema de coordenadas referido. La evolución de tales posiciones se puede establecer al relacionarlas con el estado de un sistema material, cuya evolución se considera periódica y que llamamos “reloj”. La conjunción de un sistema coordinado y de un reloj para efectuar la caracterización del movimiento de los cuerpos se conoce como sistema de referencia. En el ámbito de las teorías clásicas, consideramos que las posiciones y tiempos asociados con cada estado de los cuerpos se pueden determinar instantáneamente y de tal manera que el momento en que percibimos que un cuerpo ocupa una posición, es independiente de la manera en que es observado; del lugar y del movimiento que pudieran tener los diversos observadoresⁱⁱⁱ.

La asignación y calibración de las unidades de los sistemas coordinados y de los relojes empleados para estudiar la evolución de los cuerpos bajo estudio, requiere el establecimiento de las unidades de medida correspondientes y de procedimientos para su subdivisión o escalamiento. Su definición y materialización es abordada con detalle y claridad en múltiples textos, v.gr. [5], en el contexto de la presente reflexión consideramos que se conocen las definiciones y los procedimientos metodológicos correspondientes.

Ya que la descripción del movimiento de cuerpos de tamaño finito puede ser compleja, por sus posibles cambios de orientación o forma, es conveniente limitar su estudio, en una primera aproximación, a cuerpos suficientemente pequeños, o a casos en que sus giros o deformaciones se puedan considerar irrelevantes. Es bajo estas consideraciones que se introduce el concepto de un cuerpo puntual, que es caracterizable sólo por su posición, y al que, por extensión y abstracción de nuestras nociones cotidianas también llamamos partícula. La sustitución de un cuerpo real por una partícula constituye un modelo por lo que es importante reconocer el grado en que es aplicable en casos particulares. En todo caso, la aplicación del modelo a situaciones concretas debe ser consistente con la idea de que la posición y velocidad de los cuerpos bajo consideración son bien descritas por las coordenadas de sus puntos representativos correspondientes. En el contexto de las consideraciones establecidas, podemos considerar que los átomos son un caso límite de los cuerpos puntuales, pero

en la práctica, son un conjunto de ellos los que podrían definir una partícula. La descripción del estado dinámico de un cuerpo finito mediante su subdivisión geométrica en partículas infinitesimales cohesionadas por los mecanismos internos relevantes, constituye así una aplicación productiva del concepto. Este procedimiento permite describir procesos de deformación y de flujo de cuerpos elásticos y fluidos. Las teorías desarrolladas para abordar la descripción de cuerpos deformables permiten reconocer formas características de su dinámica, entre las que se encuentran las ondas en medios elásticos y diversos tipos de flujo en el caso de los fluidos [6].

3. Las fuerzas y su efecto en el movimiento de los cuerpos

La observación de que los cuerpos interactúan entre sí, es decir, de que el estado de un cuerpo puede ser afectado por la presencia de otros en su entorno, nos ofrece un indicio para identificar los elementos causales del movimiento. Dicha observación constituye una buena base para introducir la idea de fuerza, concebida como una extensión de la sensación del esfuerzo que realizamos los humanos para mover los objetos y como una abstracción que la establece como agente causal del movimiento. En su inclusión inicial dentro del marco teórico que nos permite el estudio del movimiento se reconocen diversos tipos de fuerza; la gravedad, la flotación o la fricción, por ejemplo. Sin embargo, su estudio detallado en los ámbitos microscópico y submicroscópico ha permitido concluir que sólo hay cuatro tipos fundamentales [7], de los cuales se derivan todas las fuerzas que se pueden ejercer entre los cuerpos: la gravitacional, la electromagnética y las nucleares (que se subdividen en las interacciones fuerte y débil). Las fuerzas nucleares, sólo se presentan entre las partículas que constituyen los núcleos atómicos y sólo son relevantes, en dicho contexto, para determinar los elementos químicos de que están hechos todos los materiales conocidos^{iv}. Ya que en este artículo sólo nos hemos planteado el análisis de los conceptos de la física clásica, nos limitaremos a los casos de las fuerzas relevantes en el ámbito de la experiencia humana directa: la gravitacional y la electromagnética.

Las fuerzas son cantidades vectoriales, es decir, tienen magnitud y dirección y cuentan entre sus características fundamentales que son aditivas; la fuerza neta que actúa sobre una partícula es la suma vectorial de las fuerzas que ejerce sobre ella cada una de las partículas con que interactúa. Decimos que las fuerzas, independientemente de su tipo, obedecen el Principio de superposición.

Otra característica fundamental de las fuerzas, el Principio de acción y reacción, es que si un cuerpo ejerce una fuerza sobre otro, este otro cuerpo ejerce también una fuerza sobre el primero, y ambas fuerzas tienen la misma magnitud pero dirección contraria^v.

Una última observación, que conviene considerar para abordar la manera en que las fuerzas que se ejercen sobre los cuerpos determina su movimiento, es que las fuerzas que

un cuerpo ejerce sobre los demás depende de las posiciones relativas entre sí^{vi}. Tanto la fuerza gravitacional como la electromagnética son proporcionales al inverso del cuadrado de la separación entre partículas. Esta característica es particularmente importante para abordar el problema experimental del aislamiento de los cuerpos para estudiar las características del movimiento.

El primer y más fundamental principio del movimiento de los cuerpos, el Principio de inercia, aborda el caso del movimiento de los cuerpos sobre los que no se ejerce influencia alguna. Dicha condición de aislamiento sólo se puede concebir como una idealización, que en la práctica consiste en la extrapolación del comportamiento de cuerpos a los que se ha reducido al máximo su interacción con otros cuerpos en su entorno. En la Tierra, esta situación conlleva el problema de que la fuerza gravitatoria no se puede apantallar para evitar que ejerza su influencia en el movimiento, sólo es posible contrarrestar su efecto con uno opuesto. El análisis de múltiples experimentos realizados para minimizar la influencia entre los cuerpos bajo estudio, y la abstracción de los elementos esenciales en las observaciones realizadas, permiten expresar este principio mediante la proposición de que “El movimiento de los cuerpos sobre los que no se aplican fuerzas por otros cuerpos, o agentes capaces de hacerlo, realizan movimientos rectilíneos y uniformes, cuando estos son referidos a un sistema fijo a alguno de los otros cuerpos libres de interacción, o a sistemas de referencia que se mueven uniformemente con respecto a alguno de estos cuerpos”. Dichos sistemas, que sólo pueden existir como idealización o aproximación, ya que no hay cuerpos estrictamente libres de interacción, se denominan Sistemas inerciales. En esta proposición, se considera el reposo de un cuerpo, como aquel estado en el que sus velocidad es nula. Con esta manera de expresar el principio de inercia enfatizamos que los sistemas de referencia para la caracterización del movimiento siempre se encuentran asociados a algún cuerpo material, no existe algún otro elemento en la naturaleza al que puedan ser referidos. En el caso de los experimentos realizados en nuestro entorno, es común fijar el sistema de coordenadas del sistema de referencia sobre los objetos que se encuentran en la Tierra, y los relojes empleados en la determinación del tiempo son sistemas de movimiento periódico calibrados apropiadamente.

Tomando como base el principio de inercia, podemos preguntarnos por el efecto que ejercen las fuerzas. Procediendo heurísticamente, la pregunta planteada nos dirige a indagar sobre cómo las fuerzas aplicadas sobre un objeto pueden cambiar su velocidad; la experiencia muestra que los cambios de velocidad que pueden experimentar los cuerpos es mayor conforme mayor es la fuerza aplicada y que en intervalos de tiempo pequeños, dicho cambio es proporcional al tiempo transcurrido, por lo que, de la manera más simple posible, se puede plantear que

$$\Delta \mathbf{v} \sim \mathbf{F} \Delta t.$$

Esta relación expresa que el efecto de la fuerza aplicada

sobre el cuerpo en cuestión manifiesta su carácter direccional, cambiando su velocidad en la misma dirección de ésta. Ello es razonablemente evidente si el cuerpo bajo consideración se encuentra originalmente en reposo, en cuyo caso, la experiencia muestra que la fuerza que se ejerce sobre él produce un cambio en su posición, y en consecuencia en su velocidad, en la misma dirección de dicha fuerza. La relación de proporcionalidad entre el cambio de velocidad y la fuerza aplicada es la más simple posible consistente con el principio de superposición^{vii}.

La forma precisa del efecto de la fuerza sobre el cambio de velocidad hace referencia, nuevamente, a la experiencia. Los experimentos muestran que, mientras más masivo sea un cuerpo costará más trabajo cambiar su velocidad^{viii}, de manera que, considerando que no se tiene alguna otra consideración sobre el cambio de velocidad producido por la fuerza, podemos precisar la expresión propuesta como^{ix}:

$$\frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} \equiv \frac{\mathbf{F}}{m}.$$

La relación de equivalencia en esta expresión se puede establecer haciendo uso de la definición de las unidades de fuerza y de masa. La ecuación correspondiente, obtenida mediante argumentos heurísticos apoyados en observaciones experimentales, es la conocida Ley de movimiento de la mecánica Newtoniana, o Segunda ley de Newton. Como lo hemos señalado, los argumentos esgrimidos para proponerla, son de carácter eurístico, el carácter de ley se establece en el marco teórico de la mecánica clásica y se sustenta con un gran número de observaciones experimentales. Ya que consideramos que dicha ley se aplica para cualquier cuerpo material, ésta tiene un carácter universal.

Es importante notar que, en la argumentación presentada para obtenerla, se considera implícitamente el uso de uno de los sistemas de referencia en los que vale el principio de inercia, por lo que la ecuación correspondiente también debe ser resuelta en dicho sistema.

4. El concepto de campo

La forma concreta de la fuerza que una partícula ejerce sobre otra, es determinada por parámetros característicos de cada partícula; la carga en el caso de la fuerza electromagnética y la masa en el caso de la gravitatoria. En cada caso, se observa que la magnitud de la fuerza es proporcional al parámetro en cuestión y depende de las posiciones relativas entre las partículas, que a su vez pueden cambiar en el tiempo. Así, la fuerza ejercida sobre una partícula de carga q y masa m , situada en el punto \mathbf{r} al tiempo t , por otras partículas en su entorno se puede escribir como:

$$\mathbf{F}_{q,m} = q(\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) + \mathbf{v} \times \mathbf{B}(\mathbf{r}, t)) + m\mathbf{G}(\mathbf{r}, t),$$

donde \mathbf{v} es la velocidad de la partícula y las funciones $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$, $\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)$ y $\mathbf{G}(\mathbf{r}, t)$ son los denominados campo eléctrico, magnético y gravitacional, respectivamente en el

punto en que se encuentra la partícula, en el instante considerado. Dichos campos son determinados por las variables dinámicas y parámetros físicos de las partículas con que interactúa la partícula en cuestión [8,9].

Aunque la idea de campo así presentada es, en una primera instancia, de naturaleza matemática, es posible reconocerle un carácter físico. Es evidente que la manera en que una partícula responde a la presencia de otras en su entorno implica que ésta puede tener información de la ubicación de las otras y de sus características relevantes. Esto nos lleva a la consideración de que deben haber un medio y un mecanismo asociados con la interacción y, en consecuencia, podemos asignarle un carácter físico sustancial. La naturaleza de este medio es inmaterial, o distinta de la de los cuerpos materiales, empezando por la observación de que no es perceptible, salvo por el hecho de que determina la interacción entre partículas. Asimismo, se debe considerar que se encuentra presente en todo el espacio, permeando incluso a los cuerpos materiales^x. Cada partícula establece un campo a su alrededor y es este campo el que actúa directamente sobre las demás partículas en el entorno.

Debido a que los mecanismos de interacción de los campos le confieren una velocidad finita a su propagación, las expresiones generales para los campos asociados con un conjunto de partículas en movimiento son complejas. Los campos en un punto r del espacio al tiempo t , dependen en general de la posición, velocidad y aceleración de las partículas en tiempos anteriores a t (llamados tiempos reducidos), aunque son siempre proporcionales a los parámetros característicos de la interacción en cuestión; la carga en el caso electromagnético y la masa en el gravitacional [8,9].

Bajo las consideraciones presentadas, podemos plantear que, además de la materia, existen los campos como elementos sustanciales del mundo y, con el espacio y el tiempo, completan un marco descriptivo completo. Además, ya que la fuente de los campos son las partículas materiales, y que las partículas sólo pueden interactuar por mediación de los campos, consideramos que ambas entidades son insepara-

bles; podríamos pensar que los campos son una extensión de las partículas o que éstas son inclusiones en los campos. En todo caso, materia y campo resultan ser concomitantes entre sí, y con el espacio y el tiempo.

El programa de la física queda establecido como la determinación del movimiento de las partículas materiales y de los campos correspondientes como función de la posición y del tiempo, obtenidos ambos de manera consistente. La dinámica de ambas entidades queda inevitablemente entrelazada, a grado de que la validación de principios fundamentales, como las conservaciones de la energía, el momento y el momento angular, requieren que se considere que tanto la materia como los campos tengan asociadas estas cantidades y que las puedan intercambiar entre sí [8], es decir, la energía, el momento y el momento angular de un conjunto de partículas puede ser transferida a los campos y viceversa^{xi}.

5. A manera de conclusión

Con base en las ideas expuestas, podemos concluir que la definición de los conceptos de materia, espacio, tiempo y campos, siendo los más fundamentales de la física, sólo se puede establecer cuando los concebimos como entidades inseparables, y que es con base en la estructuración lógica de las teorías físicas relevantes, y con el sustento de las nociones experienciales correspondientes, que adquieren la precisión que da coherencia al marco teórico-experimental que subyace el conocimiento científico del mundo. Las disciplinas que indagaban sobre la estructura de la materia, proponiendo un conjunto de partículas elementales que la constituye, o el comportamiento y naturaleza de los campos, mediante su conformación en modos característicos del sistema en cuestión, ofrecen una manera de fundamentar tales conceptos, pero lo hacen mediante la introducción de elementos que nos alejan de la experiencia humana directa y nuevamente sólo cobran significado por la coherencia estructural de las teorías correspondientes, y su marco interpretativo asociado, que permite dar sentido a las observaciones experimentales^{xii}.

-
- i.* Aunque los átomos tienen a su vez una estructura, su comprensión rebasa el marco de las teorías clásicas, y no es necesaria para explicar las propiedades en que se sustenta el comportamiento mecánico de los cuerpos materiales. Para el propósito aquí establecido, es suficiente considerar que la materia está compuesta por una pequeña diversidad de elementos, cuya unidad básica es el tipo de átomo correspondiente.
 - ii.* Esta concepción es fundamentalmente materialista. En la propuesta Newtoniana, y en algunas de sus reformulaciones, el espacio se concibe mediante una abstracción de base teológica o filosófica, como aquello que contiene todo lo existente y tiene un carácter absoluto, es decir no requiere hacer referencia al marco material para ser concebido [2].
 - iii.* Esta consideración supone que el mecanismo que nos informa

sobre el estado de los cuerpos materiales bajo consideración responde con una velocidad infinita. Aunque esta afirmación es objetada por diversos experimentos que derivaron en la Teoría de la Relatividad [3,4], en el ámbito de la física clásica, básicamente el de la experiencia humana en nuestro entorno cercano, se puede considerar consistente con lo observado.

- iv.* Las fuerzas nucleares tienen un alcance extremadamente pequeño: La interacción fuerte se modela por funciones exponenciales que decaen en distancias del orden del tamaño de los núcleos atómicos, $\sim 10^{-15}$ m, y son las responsables de mantener unidas a las partículas de los núcleos atómicos. La interacción débil tiene un alcance aún menor, $\sim 10^{-17}$ m, y es responsable del decaimiento radiactivo beta de los núcleos.
- v.* Este principio no es general, ya que las fuerzas magnéticas en-

- tre partículas en movimiento no son necesariamente colineales, y en consecuencia, no pueden tener direcciones contrarias. v.g. [8].
- vi.* Aunque en el caso de las fuerzas electromagnéticas, además de su dependencia espacial, también dependen de las velocidades y aceleraciones de las partículas [8]. Sin embargo, también bajo esta consideración la fuerza entre partículas disminuye como el inverso del cuadrado de su separación.
- vii.* Si hubiera una relación de orden superior al lineal, la superposición de las fuerzas ejercidas por varios cuerpos produciría una respuesta que contendría términos cruzados entre las fuerzas originales, lo que experimentalmente no se observa.
- viii.* La noción de masa implícita en la argumentación presentada corresponde con la de cantidad de materia, lo que resulta intuitivo si consideramos el caso de cuerpos del mismo material pero diferentes volúmenes, en los que el volumen del cuerpo se puede considerar proporcional a la cantidad de materia que lo constituye. Al tratar el caso de cuerpos de distinta composición, la expresión obtenida se puede utilizar para cuantificar su masa y establecer relaciones entre las densidades de materia de los diferentes materiales. La asociación entre la masa y la cantidad de materia obtiene un carácter más fundamental bajo las consideraciones de la teoría atómica, que relaciona a la masa con el número de las partículas elementales que componen a un material.
- ix.* La existencia de otros parámetros, adicionales a la masa en esta relación, podría implicar que, desde el punto de vista de su dinámica, la materia pudiera presentarse en más de un tipo. Esta posibilidad sólo se ha establecido con base en que los diferentes tipos de fuerza, así, la carga está asociada con la interacción electromagnética, el sabor con la débil y el color con la fuerte. Es interesante notar que la masa además de ser un parámetro dinámico que determina la inercia de las partículas también caracteriza la interacción gravitacional, de tal manera que todos los cuerpos materiales son susceptibles a interactuar gravitacionalmente, mientras que, por ejemplo, sólo los cargados pueden tener una interacción electromagnética.
- x.* Aunque las partículas que constituyen a los cuerpos materiales que son susceptibles a un campo determinado, pueden reaccionar a este y apantallar o modificar el campo aplicado en el interior o en el exterior del cuerpo bajo consideración.
- xi.* Dicho proceso de transferencia es esencialmente cuantitativo, es decir, el valor de la energía de un sistema de partículas podría disminuir, aumentando el valor de la energía que se asocia con los campos en el sistema; no hay una entidad física asociada con esta cantidad, que sólo es un parámetro dinámico de los sistemas.
- xii.* ¿Cómo podríamos concebir a un protón o un electrón, si no es con base en la extrapolación de los conceptos formulados en el ámbito de la escala humana, o los campos electromagnéticos asociados con su interacción en la conformación de un átomo?
1. R. Feynman, *Six easy pieces* (Basic Books, New York, N.Y., 1995), pp. 4-21.
 2. J. Marquina, Euler y los absolutos, *Rev. Mex. Fis.* **61** (2015) 41.
 3. H. Goldstein, *Classical Mechanics* (Addison-Wesley, Reading, Mass., 1972), pp. 185-205.
 4. M. Born, *Einstein's Theory of relativity* (Dover, New York, N.Y., 1965).
 5. M. S. R.P. Feynman, R.B. Leighton, *The Feynman Lectures on Physics, Vol. I* (Addison-Wesley, Reading, Mass., 1963), pp. 5-1.
 6. L. D. D.S. Chandrasekharaiah, *Continuum mechanics* (Academic Press, San Diego, CA, 1994).
 7. D. Griffiths, *Introduction to elementary particles*, 2nd ed. (Wiley-VCH Verlag, Weinheim, Germany, 2008), pp. 59-88.
 8. D. Griffiths, *Introduction to electrodynamics*, 3rd ed. (Prentice Hall, Saddle River, NJ, 1999), pp. 345-361.
 9. E. L. L.D. Landau, *Teoría clásica de los campos*, 2nd ed. (Editorial Reverté, Barcelona, España, 1973), pp. 331-334.
 10. M. S. R.P. Feynman, R.B. Leighton, *The Feynman Lectures on Physics, Vol. II* (Addison-Wesley, Reading, Mass., 1964), pp. 17-4.