

Einstein: los trabajos de 1905

Nora Bretón*

Departamento de Física, Cinvestav-IPN, Apartado Postal 14-740, C.P. 07000, México, D.F., MEXICO

En esta contribución se hace una reseña de los trabajos de Albert Einstein de 1905, su *annus mirabilis*, así como de algunos de sus más notables trabajos posteriores.

PACS numbers:

La vida de Albert Einstein es conocida a grandes rasgos por mucha gente. Las anécdotas de su lento desarrollo en la infancia, sus fracasos en sus años de estudiante, su empleo en la oficina de patentes en Berna y su brillante aparición en el mundo de los grandes físicos de principios del siglo XX son hechos ampliamente divulgados.

La manera en que se nos presenta la vida de Albert Einstein nos podría llevar a pensar que esta explosión de creatividad surgió de la nada, sin embargo, antes de su glorioso año 1905, Einstein ya había publicado cinco artículos como autor único en los *Annalen der Physik*, una de las más, o la más, prestigiosa revista de física de esa época [1]; las referencias con los títulos traducidos del alemán son:

-*Conclusions drawn from the phenomena of capillarity.* *Annalen der Physik*, **4** (1901): 513-523.

-*On the thermodynamic theory of the difference in potentials between metals and fully dissociated solutions of their salts and on an electrical method for investigating molecular forces.* *Annalen der Physik*, **8** (1902): 798-814.

-*Kinetic theory of thermal equilibrium and of the second law of thermodynamics.* *Annalen der Physik*, **9** (1902): 417-433.

-*A theory of the foundations of thermodynamics.* *Annalen der Physik*, **11** (1903): 170-187.

-*On the general molecular theory of heat.* *Annalen der Physik*, **14** (1904): 354-362.

Los títulos son bastante ilustrativos y describen las tendencias del trabajo de Einstein, que eran comunes a otros físicos de esa época: se buscaba fundamentar la termodinámica en la teoría cinética del calor o teoría molecular del calor. Su primer artículo ve la luz en 1901, cuando Einstein recién había terminado sus estudios a los 22 años. Estos trabajos son también el prelude de dos de 1905: su tesis doctoral y el artículo donde propone una explicación al movimiento browniano, esto es, al desplazamiento que sufren partículas suspendidas en un solvente, debido al movimiento molecular aleatorio de dicho solvente.

Pero si avanzamos en orden cronológico sobre sus trabajos de 1905, empezaremos con el artículo:

On a heuristic point of view concerning the production and transformation of light. *Annalen der Physik*, **17** (1905): 132-148.

Einstein mismo llamó a éste su artículo más revolucionario. En él Einstein le asigna una realidad física a los cuantos de luz, que anteriormente (1900) Max Planck había ya utilizado para derivar su fórmula para la radiación de cuerpo negro. Recordemos que un cuerpo negro es aquel que absorbe toda la luz que incide en él y a su vez emite radiación. Hacia 1885 existía el problema de determinar una fórmula para la distribución en frecuencia de esa radiación, la cual estuviera en acuerdo con las observaciones. Se conocía la ley de Rayleigh-Jeans que era buena para bajas frecuencias y la ley de Wien que funcionaba para frecuencias grandes. En 1900 Planck publica una expresión analítica que se ajusta perfectamente a los datos observados para todo el rango de frecuencias de emisión del cuerpo negro; para derivar su fórmula a partir de supuestos microscópicos, Planck consideró como una hipótesis de trabajo que las paredes del cuerpo negro estaban formadas por osciladores que emitían radiación de manera discreta. Einstein tomó ese supuesto como una realidad física. Vale la pena leer una parte de la introducción de ese artículo:

Existe una diferencia formal profunda entre los conceptos teóricos que los físicos se han formado acerca de los gases y otros cuerpos ponderables y la teoría de Maxwell para los procesos electromagnéticos en el vacío. Mientras que concebimos que el estado de un cuerpo está completamente determinado por las posiciones y velocidades de un número muy grande pero finito de átomos y electrones, usamos funciones espaciales continuas para determinar el estado electromagnético en un cierto espacio, de manera que un número finito de cantidades no puede considerarse suficiente para dar una descripción completa del estado electromagnético de un espacio. De acuerdo a la teoría de Maxwell, la energía es considerada como una función continua del espacio para todos los fenómenos puramente electromagnéticos, por tanto para la luz, mientras que de acuerdo a los conceptos de los físicos la energía de un cuerpo ponderable es descrita como una suma que se extiende a todos los átomos y electrones. La energía de un cuerpo ponderable no se puede dividir en partes arbitrariamente pequeñas, mientras que de acuerdo a la teoría de Maxwell (o, más generalmente, de acuerdo a cualquier teoría ondulatoria) la energía de un rayo de luz emitida desde una fuente puntual de luz se dispersa continuamente sobre un volumen creciente.

En el siguiente párrafo Einstein nota que esta diferencia en los conceptos de energía discreta y continua lleva a contradicciones cuando se da la interacción radiación-

*Electronic address: nora@fis.cinvestav.mx

materia:

...a pesar de la completa confirmación experimental de las teorías de difracción, reflexión, refracción, dispersión, etc., la teoría de la luz, que opera con funciones continuas del espacio, puede llevar a contradicciones con la experiencia cuando es aplicada a los fenómenos de producción y transformación de luz.

Einstein se refiere concretamente a la radiación de cuerpo negro, fotoluminiscencia, producción de rayos catódicos por luz ultravioleta, fenómenos que presentaban problemas de interpretación; para explicarlos propone que la energía de un rayo de luz no está distribuida continuamente en el espacio sino que consiste de un número finito de cuantos de energía que están localizados en puntos del espacio, se mueven sin dividirse, y pueden ser absorbidos o generados como un todo individual. Aquí Einstein está validando la naturaleza dual de la luz, como onda en los fenómenos de difracción, dispersión, etc. pero como partícula cuando interactúa con cuerpos materiales, anticipándose así veinte años a las ideas de de Broglie sobre la dualidad onda-partícula.

En el parágrafo 8 del mismo artículo: *Sobre la generación de rayos catódicos mediante la iluminación de cuerpos sólidos*, Einstein ofrece la explicación del efecto fotoeléctrico, suponiendo que la luz que incide en el metal está formada por cuantos indivisibles y que como tales son absorbidos por los electrones, adquiriendo éstos así la energía necesaria para abandonar el metal. Esta explicación fue mencionada cuando, en diciembre de 1922, recibió el Premio Nobel de Física: *por su contribución a la física teórica y por su explicación de la ley del efecto fotoeléctrico.*

Su segundo trabajo de ese año es su tesis doctoral, presentada a la Universidad de Zurich en abril y dedicada a su amigo Marcel Grossmann. El tema desarrollado aquí es distinto del anteriormente publicado. El título es *Una nueva determinación de las dimensiones moleculares*. En ella plantea determinar los tamaños moleculares usando fenómenos que se observan en líquidos y no en gases, como generalmente se hacía. Einstein plantea medir el tamaño de las moléculas inmersas en un solvente a partir de los movimientos de fricción entre soluto y solvente, cuando el tamaño de las moléculas disueltas es grande comparado con el tamaño de las moléculas del solvente. El estudio lo aplica a disoluciones de azúcar para las que se tenían datos numéricos abundantes sobre los coeficientes de viscosidad y de difusión, obteniendo una estimación para el número de Avogadro de $N = 2.1 \times 10^{23}$ y para el diámetro molecular obtiene $P = 9.9 \times 10^{-8}$ cm. Fue satisfactorio el orden de magnitud del número de Avogadro. La comprobación experimental de su estimación para el diámetro molecular ocurrió hasta 1911; después de haberse detectado un error en sus cálculos, el físico Bancelin obtuvo un buen acuerdo entre la predicción y el experimento.

El segundo artículo de ese año fue:

Sobre el movimiento de pequeñas partículas suspendidas en líquidos estacionarios exigido por la teoría

cinético-molecular del calor. Annalen der Physik, **17** (1905): 549-560, enviado en mayo. En él utiliza los mismos métodos desarrollados en su tesis pero ahora aplicados a suspensiones, ya que dice : *una molécula disuelta se diferencia de un cuerpo suspendido sólo en su tamaño*. Su método difiere de trabajos análogos hechos por físicos de esa época en que Einstein da una predicción para el desplazamiento cuadrático medio de las partículas en la suspensión, mientras que los otros trabajos se enfocaban en determinar las velocidades de dichas partículas, lo cual era extremadamente difícil de medir. Einstein alentó a algunos colegas experimentales a verificar sus predicciones, en particular hubo mucho interés por J. B. Perrin quien llegó a un buen acuerdo entre experimento y teoría hacia 1909 y en 1926 obtuvo el premio Nobel por ese trabajo.

Los métodos que Einstein usó en esta línea de trabajo de termodinámica estadística fueron básicos para el desarrollo posterior de estas ramas de la física. Un trabajo paralelo lo formuló independientemente Willard Gibbs, en Estados Unidos, que fue publicado en 1902 en su libro *Elementary Principles of Statistical Mechanics*.

En los dos siguientes artículos de ese año, Einstein avanzó en otra dirección: el hacer coherente la mecánica clásica con la electrodinámica de Maxwell. Esos artículos son:

On the electrodynamics of moving bodies, Annalen der Physik, **17** (1905): 891-921. Recibido el 30 de junio y

Does the inertia of a body depend upon its energy content? Annalen der Physik, **18** (1905): 639-641; recibido en septiembre.

Resulta paradójico que aunque a principios de ese año, en su primer artículo, precisamente había marcado un límite para la validez del concepto de luz como un continuo, esto es, al interactuar la luz con la materia, la primera ya no podía ser descrita por una función continua del espacio; sin embargo, en *On the electrodynamics of moving bodies* Einstein se adhiere firmemente a la validez de la teoría de Maxwell y la constancia de la velocidad de la luz en cualquier sistema de referencia, aún a costa de tener que modificar la visión de la mecánica clásica, especialmente el concepto del tiempo. En la introducción postula el *Principio de Relatividad: en todos los sistemas de referencia en los cuales son válidas las ecuaciones de la mecánica, también son válidas las leyes de la electrodinámica y de la óptica*. Le sigue un segundo postulado: *en vacío la luz se propaga siempre con la misma velocidad, la cual es independiente del movimiento del cuerpo emisor*. Estos dos postulados posteriormente fueron conocidos como la Teoría Especial de la Relatividad. En seguida pasa a cuestionar la manera en que medimos longitudes y tiempos y demuestra que el concepto de simultaneidad depende del sistema de referencia, con lo cual toda la mecánica clásica tiene que ser revisada. La física newtoniana no deja de ser válida en tanto no se involucren velocidades comparables con la de la luz. La comprobación experimental de los efectos o consecuencias de esta nueva manera de concebir el espacio y tiempo estaban lejos de alcanzarse a

principios del S. XX; y pasarían muchas décadas antes de poder medir los acortamientos en las longitudes o el atraso de los relojes que predecía la nueva teoría. Sin embargo Einstein apuntaba a la comprobación de efectos en el movimiento de electrones bajo la influencia de campos magnéticos y eléctricos rápidamente oscilantes. Termina este artículo agradeciendo valiosas sugerencias de su amigo Michel Besso.

En el último artículo publicado ese año, *Does the inertia of a body depend upon its energy content?*, Einstein encuentra una relación de proporcionalidad entre la inercia (masa) y la energía total del cuerpo dividida por la velocidad de la luz elevada al cuadrado (la famosa $E = mc^2$); relación que viene a ser una de las consecuencias cinemáticas de los dos postulados de la relatividad del artículo previo. Apuntando siempre a la comprobación experimental de sus resultados, para detectar esa variación en la masa, Einstein mismo menciona un elemento radiactivo en las últimas frases del artículo:

Quizá sea posible probar esta teoría usando cuerpos cuyo contenido de energía sea variable en alto grado (por ej. sales de radio).

Como sabemos una comprobación y aplicación de estos resultados se daría 40 años después en Hiroshima.

En diciembre de ese año todavía envió otro artículo, que fue publicado en 1906: *On the theory of brownian motion*. *Annalen der Physik*, **19** (1906): 371-381. En 1906 publicó otros tres artículos y siete en 1907. De éstos últimos destaca aquél en que explica las anomalías de la ley de Dulong-Petit [3], [4]: Einstein aplicó la hipótesis cuántica al modelo de un sólido como una red de átomos ligados armónicamente a sus posiciones de equilibrio; este modelo da lugar a un calor específico que depende de la temperatura, lo que explicaba la disminución observada de los calores específicos de ciertos sólidos cuando decrece la temperatura; observación que no concordaba con la ley de Dulong-Petit que predice un calor específico constante para los sólidos a cualquier temperatura. Este resultado constituye una extensión de la teoría cuántica a sistemas materiales y no radiativos y le dio un gran impulso al estudio de la física del estado sólido. En 1912 P. Debye refinó el modelo de Einstein tomando en cuenta que las frecuencias con las que vibran las partículas de un cristal no son iguales y de ese modo se pudo predecir un comportamiento en acuerdo cuantitativo con el calor específico observado para los sólidos a bajas temperaturas.

Otro de los artículos de 1907 es una revisión que le solicitó la revista *Zeitschrift für Elektrochemie und angewandte physikalische* sobre el principio de relatividad. Al hacer esta revisión Einstein se dió cuenta de que su formulación del principio de relatividad no tomaba en cuenta la gravedad; es decir, la relatividad estaba formulada para sistemas inerciales, aquéllos que se mueven con velocidad relativa constante; por lo tanto los sistemas acelerados no están incluidos. Entonces Einstein empezó a pensar en cómo introducir las fuerzas de gravedad (equivalentes a un sistema acelerado) al principio de relatividad; o sea, a generalizar la relatividad e inicia la

búsqueda de una formulación de la gravitación que no dependa del sistema de referencia (formulación covariante). Este camino fue largo y azaroso; en 1915, ocho años después, Einstein pudo presentar dicha formulación: la teoría general de la relatividad. Durante ese tiempo Einstein trabajó sucesivamente en Praga, en Zurich y en 1914 se trasladó a Berlín. Para completar la tarea de generalizar la relatividad, Einstein se vió forzado a aprender nuevas matemáticas; nuevas para él, ya que Gauss, Riemann, Levi-Civita y otros las habían desarrollado muchos años antes. Einstein, apoyado una vez más por su amigo Marcel Grossmann, necesitó aprender a describir superficies curvas, para modelar el efecto de la gravitación como modificadora del espacio, curvándolo. Durante todo el año de 1915 se dedicó por completo a terminar este trabajo. Ya en 1912 habían presentado, él y Marcel Grossmann una versión de la formulación de la gravedad en espacios curvos, pero aún había dependencia del sistema de referencia. A principios de 1915, Einstein revisó los cálculos y presentó varias versiones en el transcurso de noviembre de ese año. Hasta que el 25 del mismo mes presentó la versión final y satisfactoria, que no dependía del sistema de referencia, de la gravitación acoplada con materia, modelando ambas la geometría del espacio-tiempo.

Mencionaremos sólo dos más de los trabajos notables de Einstein [2]. En 1917 extendió las leyes estadísticas a los fenómenos electromagnéticos. Einstein consideró un cuerpo negro en equilibrio térmico, constituido por átomos con sólo dos niveles de energía: E_1 y E_2 ; pudiendo pasar el átomo de un nivel a otro emitiendo o absorbiendo un cuanto de energía ($E_2 - E_1$). Exigiendo que el átomo y la radiación estuvieran en equilibrio estadístico, esto es, que el mismo número de átomos pasaran del nivel 2 al 1 y viceversa, en una unidad de tiempo, Einstein supuso que la ocurrencia de estas transiciones está gobernada por cierta probabilidad y calculó probabilidades de emisión tanto espontánea como inducida. La emisión estimulada o inducida es el mecanismo que se usó para la construcción de los láseres treinta años después.

En 1924 recibió una carta del físico hindú Satyendranath Bose, en donde éste le explicaba cómo derivó nuevamente la fórmula de radiación de cuerpo negro pero suponiendo que los cuantos de luz eran indistinguibles unos de otros. En la versión estadística anteriormente dada (Boltzman), para contar las posibles configuraciones del sistema se consideraba cada cuanto con una etiqueta diferente (distinguible). En contraste, en la versión de Bose, al intercambiar el cuanto A con el cuanto B, digamos, no se obtiene una configuración distinta. Einstein tradujo el artículo de Bose del inglés al alemán y lo envió a una revista alemana en donde fue rápidamente publicado. Después en ese mismo año Einstein calculó las fluctuaciones en las energías para un gas de partículas basado en las ideas de Bose. De esta manera nació lo que hoy conocemos como estadística de Bose-Einstein que describe los bosones o partículas de espín

entero (fotones, neutrones, protones, por ej.).

Debido al ascenso al poder del partido nacional socialista en Alemania, Einstein decidió trasladarse a Estados Unidos en 1934, al Instituto de Estudios Avanzados de Princeton; desde allí inició una labor política pacifista, contradictoriamente marcada por su intervención decisiva para impulsar el proyecto Manhattan para construir la bomba atómica. Murió en 1955 mientras trabajaba en su casa de Princeton.

Para concluir esta reseña, notaremos que aunque fue un físico teórico, los trabajos de Einstein estuvieron enfocados a problemas concretos pero las ideas que utilizó para resolverlos trascendieron la particularidad hasta una comprensión más profunda de la naturaleza. En sus últimos años su labor de investigación estuvo dedicada a encontrar una unificación de las fuerzas electromagnéticas y gravitatorias, formulación que, hasta donde sabemos, aún no ha sido encontrada.

-
- [1] *The Collected Papers of Albert Einstein. The Swiss years: Writings, 1900-1909.* Anna Beck, translator; Peter Havas, Consultant. Princeton Univ. Press (1989). Única traducción autorizada, se recomienda ampliamente. Aún hoy en día se emplea en la enseñanza el razonamiento que introdujo en su artículo de revisión del principio de la relatividad en 1907: *On the relativity principle and the conclusions drawn from it.*
- [2] *De los rayos X a los quarks,* Emilio Segré. Folios Ediciones, S. A. (1983).
- [3] J. M. Méndez y P. González, *Física Estadística*, Avance y Perspectiva **23**, 47-53 (2004).
- [4] Eliezer Braun, *Una faceta desconocida de Einstein*, Col. La Ciencia para Todos, **19**, Fondo de Cultura Económica, Tercera Ed. 2003.