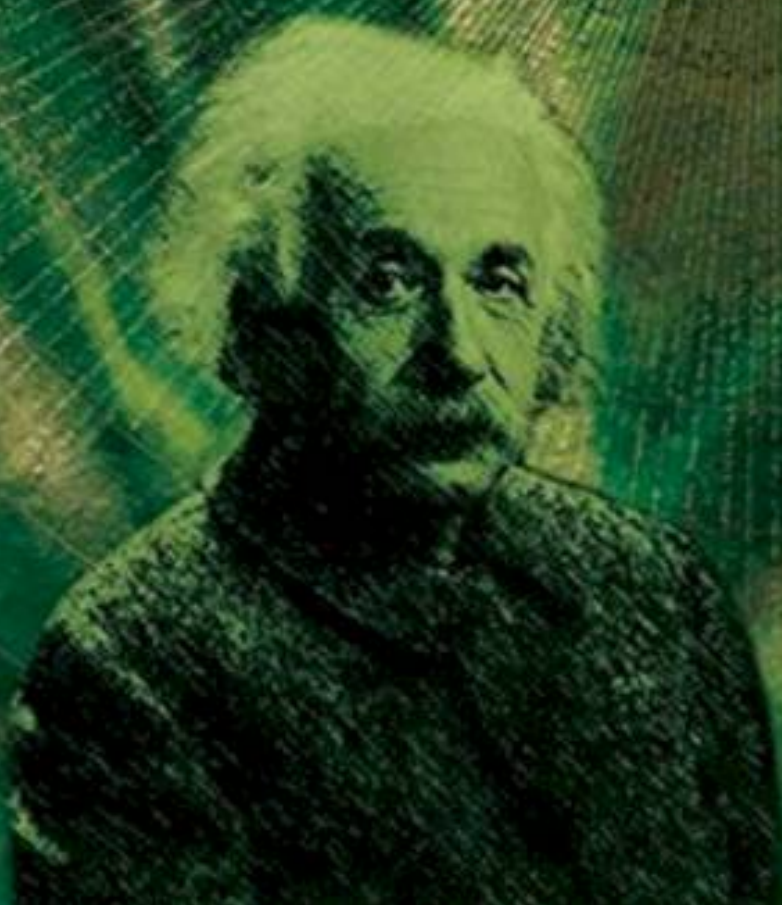


Una faceta desconocida de Einstein

19
CIENCIA
PARA
TODOS

LIBRO

ELIEZER
BRAUN



El propósito de esta obra es divulgar aquellos trabajos científicos de Einstein menos conocidos en comparación con la popular teoría de la relatividad. Para tal efecto, el profesor Braun nos ofrece un recorrido por las vertientes poco exploradas que tienen relación con descubrimientos y teorías que han gozado de menor difusión. La teoría de la relatividad hizo despuntar la figura de Albert Einstein como una de las más influyentes en la historia de la ciencia. No obstante —debido en parte al brillo de este gran aporte—, generalmente se ignora qué otras de sus indagaciones a lo largo de su trayectoria académica fueron relevantes, entre ellas sus trabajos sobre física cuántica, principalmente.

Con el fin de dar a conocer esta otra faceta de Einstein, Eliezer Braun relata los sucesos que entre 1900 y 1926 dieron forma a la teoría cuántica. Así, a lo largo de esta obra, explica cómo Einstein sintetizó diversos problemas sobre termodinámica y óptica a través de la teoría del efecto fotoeléctrico, y cuáles han sido las repercusiones de las contribuciones científicas del genio alemán hasta nuestros días.

Introducción

Se presenta en este libro un aspecto poco conocido de la obra científica de Albert Einstein (1879-1955). La mayoría de la gente asocia el nombre de Einstein con la teoría de la relatividad. Efectivamente esta teoría, cuya primera parte —la teoría de la relatividad especial— fue presentada en 1905, constituyó un hito en la historia de la física que colocó a Einstein a la altura de Isaac Newton (1642-1727) y de James Clerk Maxwell (1831-1879). Newton puso los fundamentos de la mecánica y Maxwell sintetizó genialmente la teoría del electromagnetismo.

Hacia fines del siglo pasado se creía que, en esencia, la física ya estaba hecha. Esto se puede ilustrar con una anécdota en la que interviene Max Planck, de quien hablaremos en este libro, cuando de joven, en 1874, se informaba sobre los estudios universitarios de física en la Universidad de Munich, Alemania. El representante de la institución trató de convencerlo de que escogiera otros estudios con el argumento de que «en la física ya estaba investigado todo lo esencial y que solamente quedaban por rellenar algunos huecos».

Es en este ambiente que Einstein revolucionó las ideas de la física publicando en 1905 la teoría de la relatividad. En este mismo año apareció, también bajo su firma, un trabajo sobre la naturaleza cuántica de la luz y, por si esto fuera poco, publicó además su famoso trabajo sobre el movimiento browniano.

Con la segunda publicación mencionada, Einstein inició, de hecho, como se verá en este libro, otra revolución con la teoría cuántica. A diferencia de lo que ocurrió con la relatividad, el conjunto de ideas de Einstein sobre los «cuanta» no fue fácilmente aceptado por sus colegas. Durante mucho tiempo Einstein estuvo solo. A pesar de eso, no se rindió sino que con grandes bríos publicó otro notable trabajo en 1907 en el que presentó la teoría cuántica de los calores específicos, generalizando las ideas ya expresadas en 1905 para aplicarlas también a la materia. Posteriormente, en 1909, fue el primero en hablar de la dualidad partícula-onda que presenta la naturaleza de la luz. En 1924 volvió a contribuir sobre este tema, pero ahora haciendo ver que también en la materia se da esta dualidad. Fue Einstein quien, de hecho, formuló algunas de las ideas esenciales de la teoría cuántica.

Una característica del enfoque que hacía Einstein al intentar resolver algún problema fue su interés, no tanto en los detalles muy particulares del sistema con el que estaba trabajando, sino en descubrir hechos generales y fundamentales. Así, al estudiar las características de la luz no se interesó particularmente en el efecto fotoeléctrico, sino en lo que podría descubrir sobre la naturaleza fundamental de la luz. Asimismo, al estudiar en 1907 el calor específico de sustancias a bajas temperaturas, no se interesó solo en el comportamiento particular de esta cantidad, quiso ver si era posible pensar que también las sustancias materiales en general participaban de la llamada cuantización. De manera muy característica, trató modelos físicos bastante sencillos y de ellos sacó consecuencias muy generales.

De manera similar a lo que ocurre con la relatividad, con la teoría cuántica se enfrenta uno a efectos completamente extraños a nuestra experiencia cotidiana. Sin embargo, estos efectos los presenta la naturaleza y cualquiera que desee hacer una descripción de ella tendrá que confrontarlos. Fue Einstein el que tuvo la mente abierta para destacar los

prejuicios mentales que tenemos y hacer ver que no se pueden aplicar a toda la gama de fenómenos que ocurren en la naturaleza. Cuestionó, además, lo que se suele llamar «el sentido común». Hoy en día, a pesar de que todavía nos parecen muy extrañas algunas de las ideas de la física cuántica, se la ha aplicado a tantos campos que ya no existe la menor duda de su validez. Es más, existe un buen número de aplicaciones prácticas que usamos cotidianamente que tienen su base en fenómenos cuánticos, entre las que podemos mencionar el láser, los transistores y chips de estado sólido que han dado un notable impulso a la microelectrónica, etcétera.

En este libro, al hablar de la contribución de Einstein a la física cuántica, estaremos reseñando en realidad el desarrollo de este campo desde sus inicios en 1900 hasta la culminación de su formulación final en 1926, periodo que forma uno de los capítulos más brillantes del pensamiento humano.

Para poder apreciar las ideas con las que se trabaja es necesario exponer sus antecedentes. En la formulación de la teoría cuántica, se dieron dos caminos completamente alejados uno del otro que, con el tiempo, Einstein hizo que convergieran. Uno, el de las propiedades termodinámicas de las sustancias, como por ejemplo el calor específico. El otro, completamente aparte del anterior, el de la radiación de luz y sus propiedades térmicas. Cada uno de estos campos se desarrolló en forma independiente, sin que se sospechara que los problemas irresolubles que se presentaban en cada uno de ellos tenían una causa común. Fue Einstein quien pudo aclarar estas cuestiones.

En vista de lo anterior y como una orientación, se revisarán algunos de los desarrollos históricos de ambos temas. Asimismo, se intentará explicar, de manera simple, los conceptos físicos involucrados, sin utilizar para nada las matemáticas.

En el capítulo I se presentan algunos conceptos de la termodinámica, como el calor específico que tendrá un papel importante en el desarrollo del relato. En el II se habla sobre las primeras mediciones que se hicieron de los calores específicos para algunas sustancias. Los resultados que así se obtuvieron intentaron ser fundamentados posteriormente en términos microscópicos por medio de la teoría cinética, tema que se trata en el capítulo III.

Hacia mediados del siglo pasado no había manera de disminuir apreciablemente la temperatura ya que todavía no existían los refrigeradores. Con el desarrollo de la termodinámica se pudieron diseñar y construir estos aparatos que, una vez disponibles, hicieron posible medir las propiedades termodinámicas de las sustancias a bajas temperaturas, y como se verá en el capítulo IV se encontraron contradicciones con las predicciones de la teoría cinética entonces conocida. Los resultados de estas mediciones fueron el fundamento de la formulación de la tercera ley de la termodinámica, tema que se trata en el capítulo V. En el VI se resume la situación que imperaba en este campo de la física hacia fines del siglo XIX.

Independientemente de lo anterior, otro campo de la física que se había estado desarrollando era el de la óptica en el que, entre otras cosas, se intentó entender la naturaleza de la luz. En el capítulo VII revisaremos algunas de las ideas más importantes al respecto, y en el VIII se tratan algunos fenómenos relacionados con la luz, como la radiación. Es justamente cuando trataba de explicar el comportamiento térmico de esta radiación que Max Planck se vio en la necesidad de formular una hipótesis, la cuantización de la energía, con la que se inició la física cuántica. En el capítulo IX se presenta la contribución de Einstein a lo que después se denominó explicación del efecto fotoeléctrico. Con este trabajo se da por primera vez realidad física a la cuantización de la energía. En el capítulo X hablamos sobre la otra contribución fundamental de Einstein al hacer ver

que una consecuencia de suponer que también la materia se cuantiza es el comportamiento experimental que muestra el calor específico de las sustancias a bajas temperaturas. El capítulo XI reseña las repercusiones que tuvo el pensamiento de Einstein al irse convenciendo sus colegas de la bondad de sus ideas. El capítulo XII detalla las subsecuentes etapas del desarrollo de la física cuántica, en las que Einstein tuvo un papel muy importante, tanto contribuyendo con novedosas ideas, como erigiéndose en crítico muy severo de las ideas presentadas por otros científicos.

I. Algo sobre la termodinámica. ¿Qué es el calor específico?

Una experiencia muy común ocurre cuando ponemos al fuego una olla que contiene agua: después de cierto tiempo, el agua se calienta. Esto quiere decir que su temperatura aumenta. Se puede verificar fácilmente esta afirmación poniendo dentro del agua un termómetro. Nos daremos cuenta de que, efectivamente, la temperatura aumenta. También sabemos, de nuestra experiencia, que mientras más tiempo dejemos el agua sobre la llama, más aumentará su temperatura.

¿Cómo se puede describir este experimento que nos es tan familiar? En este caso hay una transferencia de calor de la llama al agua. Esto significa que la llama transfiere energía al agua. Claramente, mientras más tiempo dejemos el agua sobre la llama, más energía se transferirá, es decir, habrá mayor transferencia de calor. En estas circunstancias, el agua *absorbe* esta energía y como consecuencia, responde aumentando su temperatura.

Figura 1. Distintas sustancias tienen distintas capacidades de absorber calor.

Supóngase ahora que hacemos lo siguiente. Tomemos la misma cantidad, por ejemplo, un kilogramo, de dos sustancias distintas, digamos agua y aluminio (figura 1); las colocamos sobre una llama el mismo intervalo de tiempo, digamos quince minutos y ponemos cada una de las sustancias en contacto con un termómetro. Al principio ambas

sustancias tienen la misma temperatura, por ejemplo, la ambiente (figura 1(a)). Al finalizar el intervalo de tiempo leemos los termómetros (figura 1(b)) y observamos dos cosas:

- i) Las dos sustancias aumentaron sus temperaturas.
- ii) Los aumentos que experimentaron cada una de las sustancias no fueron los mismos. Así, por ejemplo, el agua habría aumentado su temperatura en $12\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que el aluminio en $55\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Lo anterior nos indica que el agua y el aluminio absorbieron el calor que les transfirió la correspondiente llama. La cantidad de calor absorbida por cada una de las sustancias fue la misma, ya que estuvieron colocadas de la misma forma sobre llamas idénticas y durante los mismos intervalos de tiempo.

La segunda conclusión nos indica que cada una de las sustancias respondió de manera diferente a la misma cantidad de calor transferida. Una de ellas, el aluminio, experimentó un cambio de temperatura mayor que la otra sustancia, el agua.

La experiencia anterior nos hace ver que las sustancias tienen, entonces, una propiedad que es la de cambiar su temperatura a causa de una absorción de calor. Esta propiedad se mide por medio de la capacidad calorífica. Por tanto, la capacidad calorífica del agua es distinta a la del aluminio.

Por otro lado, nos damos cuenta que si colocamos en estufas idénticas, durante el mismo intervalo de tiempo, dos cantidades distintas de la misma sustancia, por ejemplo agua, cada una de las muestras aumentará su temperatura en cantidades distintas. Así por ejemplo, si colocamos en la misma estufa de antes 1 kg de agua y en la otra, 20 kg de agua, después de quince minutos la primera muestra habrá aumentado su temperatura en $12\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que la otra habrá aumentado solamente $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esto es claro, pues las mismas cantidades de calor fueron transferidas a cantidades distintas de agua. A pesar de haber encontrado dos

aumentos de temperatura distintos, no podríamos decir en este caso que las dos muestras de agua tienen distintas capacidades de absorber calor, pues ambas están formadas de la misma sustancia. Para poder hablar, sin riesgo de confusión, sobre la propiedad de absorber calor que tiene una sustancia se define el *calor específico* como la cantidad de calor que es necesario que absorba un gramo de una sustancia para aumentar su temperatura en $1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

De lo anterior se puede afirmar que cada sustancia tiene un calor específico bien determinado. Los valores numéricos del calor específico de distintas sustancias son distintos. Así, por ejemplo, el calor específico del agua es:

$$\text{Calor específico del agua} = 1 \text{ caloría / gramo } (^{\circ}\text{C})$$

Esto quiere decir que para que un gramo de agua aumente su temperatura un grado centígrado es necesario transferirle una caloría de energía térmica. El calor específico del aluminio es $0.219 \text{ caloría}/(\text{gramo } ^{\circ}\text{C})$, o sea, que para que un gramo de aluminio aumente su temperatura en $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ se tienen que transferir 0.219 calorías. De manera análoga, cada sustancia tiene un valor particular del calor específico.

Hasta este punto hemos hablado solamente del caso en que se transfiere calor de una fuente, como por ejemplo una llama, a una sustancia. En este caso la sustancia absorbe calor. También puede ocurrir que una sustancia transfiera calor a otra, por ejemplo, si se tiene un vaso con agua caliente y lo dejamos a la intemperie, sabemos que el agua se enfría. Es decir, el agua disminuye su temperatura. En este caso, el agua transfiere calor a la atmósfera. Se dice que el agua emitió calor. Al igual que en el caso de la absorción, se puede llegar al concepto de calor específico para la emisión, que sería el calor necesario que debe emitir un gramo de una sustancia para disminuir su temperatura en $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pues resulta que los calores específicos tanto de absor-

ción como de emisión de una sustancia son iguales. En consecuencia solamente se habla de calor específico sin especificar si es de absorción o de emisión.

II. Primeras mediciones del calor específico

El físico y químico inglés Joseph Black (1728-1799) fue quien adelantó el concepto de calor específico. En el transcurso de sus investigaciones se dio cuenta de que diferentes cuerpos, de masas iguales, requerían de diferentes cantidades de calor para elevarlos a la misma temperatura. Así es como alrededor de 1760 inventó el concepto de calor específico. A pesar de que su trabajo no fue publicado sino hasta después de su muerte, en 1803, en sus clases de química en Edimburgo, durante el último tercio del siglo XVIII, enseñó la utilidad de su descubrimiento. Un buen número de científicos británicos recibieron parte de su educación en Edimburgo y fue de esta manera que pudo propagar sus ideas al respecto.

Hacia fines del siglo XVIII, el científico francés Antoine Lavoisier (1743-1794) hizo los primeros intentos de medir el calor específico de algunos gases. Empleó métodos calorimétricos que proporcionaron resultados muy inciertos. Joseph Gay-Lussac (1778-1850) diseñó un interesante método para comparar calores específicos entre gases, cuyos resultados, sin embargo, malinterpretó. Concluyó erróneamente de sus experimentos que volúmenes iguales de gases tenían el mismo calor específico. Fue Gay-Lussac quien posteriormente, usando otro método, concluyó que volúmenes iguales de hidrógeno, bióxido de carbono, aire, oxígeno y nitrógeno tenían el mismo valor de sus calores específicos.

Sin embargo, no pudo dar el valor numérico. Estos resultados son correctos, excepto para el bióxido de carbono.

Casi simultáneamente con los hechos anteriores, F. De-laroche y J. E. Bérard hicieron determinaciones directas de los calores específicos del aire, oxígeno, hidrógeno, monóxido de carbono, óxido nitroso y etileno a la temperatura de 100 °C, usando un calorímetro mucho más refinado que los entonces conocidos y proveyeron los primeros resultados confiables. Efectivamente, encontraron que volúmenes iguales de los entonces llamados gases permanentes (aire, oxígeno y monóxido de carbono) tenían los mismos calores específicos. Lo que no pudieron establecer era cómo variaba el calor específico al cambiar la temperatura del gas.

En el año de 1819 P. L. Dulong y A. T. Petit publicaron el trabajo titulado *Los átomos de todos los cuerpos simples tienen exactamente la misma capacidad para el calor*. En este trabajo presentaron extensivos resultados experimentales hechos en sustancias monoatómicas, haciendo ver que si se define adecuadamente el calor específico, todas ellas tienen el mismo valor. La forma en que ellos definieron el calor específico fue algo distinta a la definición que presentamos en el capítulo anterior. En efecto, arriba se dijo que se tomó un gramo de la sustancia y se vio cuánto calor había que transferirle para aumentarle su temperatura en 1 °C. Sin embargo, hablando en lenguaje moderno, si se toma un gramo de dos sustancias distintas, cada una de ellas tiene un número distinto de átomos. Por tanto, la comparación entre los valores de sus calores específicos no se está haciendo en igualdad de condiciones.

Fueron Dulong y Petit quienes se dieron cuenta de esto y obtuvieron, a partir de sus resultados experimentales, que si en lugar de un gramo se toman muestras de cuerpos distintos que tengan el *mismo* número de átomos, entonces los calores específicos de todos ellos son iguales. A este resultado se le ha conocido como la *ley de Dulong-Petit*. Es claro que dos muestras de sustancias distintas que contie-

nen el mismo número de átomos tienen masas distintas, ya que los átomos de cada muestra tienen masas distintas. Así, por ejemplo 32 g de oxígeno tienen el mismo número de partículas que 2 g de hidrógeno. En el lenguaje de la química actual diríamos que se escogen muestras que tengan el mismo número de moles. Por tanto, el calor específico que mencionan Dulong y Petit es el referido al mismo número de moles y no a la misma masa.

En consecuencia, se puede expresar la ley de Dulong-Petit como sigue: «Los calores específicos molares de todas las sustancias son iguales». Esto es equivalente a decir que el calor por partícula que es necesario dar a un cuerpo para incrementar su temperatura en 1 °C es el mismo para todas las sustancias.

Posteriormente, en los años de 1840 y 1841, Y. Regnault realizó una serie extensiva de mediciones más precisas de los calores específicos molares de muchas sustancias confirmando la ley de Dulong-Petit. Nadie pareció dudar de que esta ley era correcta para un buen número de sustancias.

Sin embargo, en esas épocas se sabía ya que existen sustancias, como el bióxido de carbono, para las cuales la ley de Dulong-Petit no predice el valor correcto del calor específico. Curiosamente a estas discrepancias no se les prestó mayor atención durante mucho tiempo.

Todos los resultados arriba mencionados fueron encontrados teniendo las sustancias temperaturas iguales a la ambiente o superiores, pues en esas épocas éstas eran las únicas temperaturas que se podían alcanzar en un laboratorio. Era relativamente fácil aumentar la temperatura de un cuerpo, pero lo que era difícil era bajarla mucho, ya que no existían entonces medios para ello.

Esta era la situación experimental hacia mediados del siglo pasado. La explicación que se dio a la ley de Dulong-Petit fue proporcionada con el desarrollo concurrente de la teoría cinética que se estaba dando en ese entonces.

III. ¿Qué nos dice la teoría cinética?

Al expresar la ley de Dulong-Petit, como resumen de un número importante de resultados experimentales, no se ha hecho ninguna consideración específica sobre la estructura microscópica de las sustancias que están bajo estudio. Es decir, tal como se han presentado las cosas, no ha tenido ninguna relevancia que las sustancias estén formadas por átomos o no. Se dice que estos resultados son macroscópicos. Sin embargo, por otro lado se sabe que efectivamente las sustancias están formadas por átomos, por lo que uno podría preguntarse lo siguiente: ¿qué efecto en las propiedades macroscópicas de las sustancias tiene este hecho? Con más precisión, si uno supone que las partículas microscópicas se mueven siguiendo las leyes de la mecánica de Newton, entonces ¿es el comportamiento microscópico compatible con las leyes macroscópicas que rigen el comportamiento de las sustancias? La parte de la física que ha estudiado esta pregunta es la teoría cinética.

Hagamos un breve paréntesis para presentar el contexto histórico a mediados del siglo pasado.

Desde la antigüedad griega muchos pensadores elucubrarón acerca de la composición de la materia. Diversas hipótesis se propusieron, sin que, en general, tuvieran verdaderas bases científicas. Además, estas hipótesis tampoco tuvieron aceptación general. Fue de hecho hasta principios del siglo XIX que con los trabajos de John Dalton (1766-1844) se empezaron a dar los primeros pasos serios en el estudio de la estructura atómica de la materia. Posterior-