

Física

La gran efemérides:
Einstein (1905-2005)

A finales de mayo de 1905, Conrad Habicht recibió una carta de su amigo Albert Einstein. Difícilmente podía imaginar Habicht que tenía ante sí el resumen de algunas ideas que iban a cambiar por completo la física del siglo XX. En efecto, la carta decía:

Te prometo cuatro artículos ..., el primero de los cuales podría enviarte pronto, puesto que pronto recibiré las copias gratuitas. El artículo trata de la radiación y las propiedades energéticas de la luz y es muy revolucionario, como tú verás.... El segundo artículo es una determinación de los tamaños verdaderos de los átomos a partir de la difusión y la viscosidad de disoluciones diluidas de sustancias neutras. El tercero demuestra que, sobre la hipótesis de la teoría molecular [cinética] del calor, cuerpos de un tamaño del orden de 1/1000 mm, suspendidos en líquidos, deben ejecutar un movimiento aleatorio observable que es debido al movimiento térmico; de hecho, los fisiólogos han observado el movimiento de cuerpos pequeños e inanimados, suspendidos, al que denominan "movimiento molecular browniano". El cuarto artículo es tan sólo un borrador en este momento, y es una electrodinámica de los cuerpos en movimiento, que emplea una modificación de la teoría del espacio y el tiempo; la parte puramente cinemática de este artículo seguramente te interesará.

En otra carta escrita algunos meses más tarde, Einstein decía:

También se me ha ocurrido otra consecuencia del artículo sobre electrodinámica. El principio

de relatividad, en combinación con las ecuaciones de Maxwell, requiere que la masa sea una medida directa de la energía contenida en un cuerpo; la luz transporta masa. Una disminución apreciable de masa debería producirse en el caso del radio. El argumento es divertido y seductor; pero por lo que yo se, todo podría ser una broma del Señor que me está tomando el pelo.

Efectivamente el primer artículo ya había sido publicado con el prudente título "Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la producción y transformación de la luz" (*Annalen der Physik*, 17 [1905], 132-148). Cinco años antes Max Planck había hecho otra propuesta "revolucionaria": los osciladores materiales sólo podían absorber energía en cantidades discretas proporcionales a sus frecuencias. Con ello obtenía una expresión adecuada para la radiación de cuerpo negro.

¿Qué es un cuerpo negro? En 1859 Kirchhoff había demostrado que la razón entre $e(\nu, T)$, energía radiada por un cuerpo a temperatura T en un intervalo de frecuencias $(\nu, \nu + d\nu)$, y el coeficiente de absorción $a(\nu)$, que depende de la frecuencia y es característico de cada cuerpo, era una función universal:



Retrato de Albert Einstein en la Oficina de Patentes de Berna, 1905.

$e(\nu, T)/a(\nu) = \rho(\nu, T)$, la misma para todos los cuerpos. De lo contrario, decía Kirchhoff, podrían establecerse diferencias de temperatura espontáneas a partir de las cuales podría construirse un móvil perpetuo. Un cuerpo negro era un cuerpo ideal que absorbiera toda la radiación que le llegara, es decir, para el que $a(\nu) = 1$ para todas las frecuencias; por lo tanto, la función universal $\rho(\nu, T)$ era la radiación emitida por un cuerpo negro. Kirchhoff demostró también que esta función universal era la densidad de energía radiante contenida en una cavidad encerrada por cuerpos en equilibrio térmico a la misma temperatura T .

Por supuesto, cuando Kirchhoff planteó el problema todavía no se sabía que la energía se radiaba en forma de ondas electromagnéticas, pero esto ya estaba claro a finales del siglo XIX, cuando Planck abordó el problema. Precisamente lo que atraía a Planck en este problema era estudiar cómo se llegaba al equilibrio termodinámico. Las puras leyes mecánicas parecían incapaces de explicar la tendencia al equilibrio y Planck creía que en el caso del cuerpo negro esto podría explicarse si se introducían los procesos de interacción entre materia y radiación. Para ello supuso que las paredes de la cavidad estaban constituidas por osciladores cargados que podían absorber y emitir radiación de acuerdo con las leyes del electromagnetismo. Un oscilador podría absorber radiación de una frecuencia y devolverla a una frecuencia distinta, hasta alcanzar finalmente un equilibrio en el que la densidad de energía en la cavidad se mantuviera invariable en el tiempo. Sin embargo, Planck fracasó en su intento de explicar la tendencia al equilibrio de esta manera. Por el contrario, sí pudo llegar a una relación entre la densidad de energía de la radiación en equilibrio y la energía media de un oscilador. Si, como parecería lógico, Planck hubiese

aplicado el principio de equipartición a los osciladores, habría llegado a una expresión para la densidad de energía totalmente contradictoria con la experiencia, como vieron Rayleigh, Jeans o el propio Einstein. (Quizá por ello fuera afortunado que Planck no eligiera este camino tan simple). En realidad Planck trataba de justificar una fórmula que él ya había propuesto previamente y que básicamente interpolaba dos expresiones ya conocidas, una válida a bajas frecuencias y la otra válida a altas frecuencias. Para ello abandonó, con cierta reticencia, la pura termodinámica y utilizó la definición probabilística de Boltzmann para la entropía, basada en un recuento del número de maneras de distribuir energía entre los osciladores. Pero para poder hacer un recuento finito necesitaba en primer lugar tratar la energía absorbida en porciones discretas. Y para llegar a la fórmula deseada necesitaba suponer, “en un acto de desesperación”, que estas porciones eran proporcionales a la frecuencia de los osciladores, $E = h\nu$ (siendo h lo que hoy llamamos constante de Planck).

Suele considerarse este momento como el inicio de la revolución cuántica, pero lo cierto es que entonces nadie hizo mucho caso de esta idea y durante muchos años la expresión de Planck fue considerada simplemente como una fórmula empírica que ajustaba perfectamente los datos experimentales. De hecho, el razonamiento de Planck tampoco estaba libre de sospechas, como quedaría de manifiesto más tarde, pues suponía implícitamente que los paquetes de energía que se distribuían entre los osciladores eran indistinguibles, algo para lo que entonces no había ninguna justificación.

Ya se ha dicho que Planck no pensó nunca en el principio de equipartición. (A finales del siglo pasado lord Kelvin ya había llamado la atención sobre el fracaso del principio de equipartición para explicar los calores específicos de algunos gases poliatómicos a bajas temperaturas, aunque pocos dudaban de su

aplicación a simples osciladores). Einstein iniciaba su artículo precisamente señalando este hecho, algo que independientemente habían señalado lord Rayleigh y Jeans. La expresión de Rayleigh-Jeans-Einstein ajustaba los datos experimentales para bajas frecuencias, pero fracasaba violentamente a altas frecuencias donde divergía, lo que años más tarde Ehrenfest bautizaría como la “catástrofe ultravioleta”.

Por lo tanto, era el comportamiento de la radiación a altas frecuencias el que requería una modificación radical de los conceptos clásicos. Por ello, Einstein no parte de la ley de Planck sino de una expresión más simple propuesta por Wien y que a altas frecuencias se comporta como la expresión de Planck. Einstein prescinde de los osciladores materiales y aplica directamente conceptos termodinámicos a la radiación. A partir de la expresión para la energía es fácil obtener, por pura termodinámica, una expresión para la entropía de la radiación. (De hecho, Planck había utilizado en trabajos anteriores una expresión similar para la entropía de sus osciladores materiales, aunque luego la desechó). Y es aquí donde interviene una intuición genial.

Steven Weinberg decía que los grandes físicos actúan a veces como sabios y a veces como magos. “El físico-sabio razona de una forma ordenada basándose en ideas fundamentales sobre el modo en que la naturaleza debería comportarse. (...) Los físicos-magos no parecen estar razonando en absoluto, sino que se saltan todos los pasos intermedios para llegar a una nueva intuición acerca de la naturaleza. (...) Los autores de libros de texto normalmente se ven obligados a rehacer el trabajo de los magos para que puedan aparecer como sabios”.

Weinberg afirma también que en este caso Einstein actuaba como un mago. ¿Cuál es la idea mágica de Einstein? Sencillamente afirma que si la densidad de radiación a altas frecuencias obedece a la ley de Wien, su entropía depende del volumen ocupado de forma similar a la

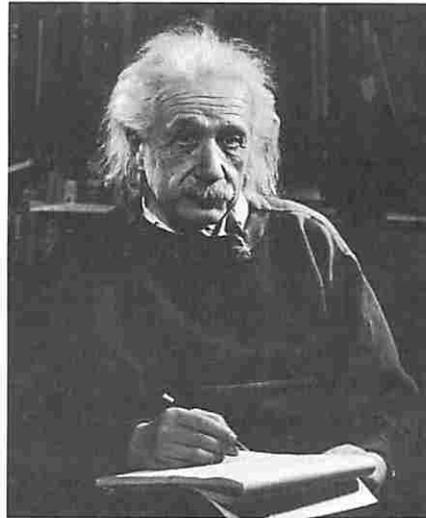
entropía de un gas de partículas discretas. Efectivamente, la probabilidad de que n partículas ocupen solamente un volumen v dentro de un volumen mayor v_0 es proporcional a $(v/v_0)^n$ y así, según lo que Einstein llama “el principio de Boltzmann”, la entropía de un gas en dicho estado es $S \propto n \ln(v/v_0)$. Pero esta misma dependencia del volumen aparece en la entropía de la radiación. De ahí que, dice Einstein, “parece razonable investigar si las leyes que gobiernan la emisión y transformación de la luz están también construidas como si la luz consistiera en tales cuantos de energía”. Con esta idea, Einstein pasa a explicar la ley de Stokes de la resonancia, el efecto fotoeléctrico y la ionización de gases por luz ultravioleta.

Si el artículo de Planck no había sido muy apreciado, el artículo de Einstein no tuvo mejor suerte. Muy pocos científicos le prestaron atención. Todavía en 1913, cuando Einstein ya era ampliamente conocido en la Europa continental, especialmente la de habla alemana, hasta el punto de ser propuesto para ocupar un puesto en el Instituto del Kaiser Wilhelm en Berlín, sus propios defensores, entre los que se encontraban figuras de la física alemana como Planck, Warburg, Rubens o Nernst afirmaban: “En suma, puede decirse que de los grandes problemas en que es tan rica la física moderna, difícilmente hay uno al que Einstein no haya hecho una contribución notable. Que alguna vez haya errado el blanco en sus especulaciones, como por ejemplo con su hipótesis de los cuanta de luz, no puede realmente esgrimirse demasiado en su contra, porque no es posible introducir ideas realmente nuevas, ni aún en las ciencias más exactas, sin correr a veces algún riesgo.” Incluso más de un físico, malinterpretando las afirmaciones siempre cautas del propio Einstein, llegó a pensar que éste había renunciado a su idea.

Por otra parte, no es infrecuente ver minimizado el alcance de este artículo reduciéndolo a la explicación del efecto fotoeléctrico. Ya he-

mos visto que el artículo es mucho más que eso. Pero además, Einstein no sólo explica sino que predice. El efecto fotoeléctrico era un tema de investigación importante desde su descubrimiento por Hertz en 1887 y ya Philipp Lenard había recibido el Premio Nobel de 1905 por su trabajo experimental sobre el mismo. Pero Lenard solo había demostrado de forma concluyente que existe una frecuencia umbral para la producción de fotoelectrones, frecuencia que es característica de cada metal. Por encima de dicha frecuencia umbral no estaba claro cómo dependía exactamente la energía de los electrones expulsados de la frecuencia. Einstein afirmaba que era una dependencia lineal y que la recta que la representaba tendría la misma pendiente para todos los metales. En 1914 Millikan se propuso investigar este problema detalladamente esperando refutar las ideas de Einstein. Pero, en contra de sus expectativas iniciales, su trabajo confirmó plenamente la teoría.

En los años posteriores a 1905 Einstein estudió las fluctuaciones en un espejo inmerso en un campo de radiación y llegó a expresiones en las que, además de una componente típica de las fluctuaciones en un continuo, aparecía también una componente similar a la que se daría en un gas de partículas. Lo más extraño, sin embargo, es que hasta 1917 Einstein no asignó explícitamente un momento lineal a sus cuantos de luz, algo que, visto retrospectivamente, parece una consecuencia lógica de la relatividad especial. Einstein lo hizo para demostrar la compatibilidad entre la ley de distribución de velocidades de Maxwell para un gas de partículas y la ley de Planck para la radiación. Poco más tarde, Debye y Compton, independientemente, vieron que, asignando momento al cuanto de luz, la simple aplicación de los principios de conservación de energía y momento daba una relación precisa para la variación de la frecuencia en la dispersión de radiación por electrones libres, relación que Compton verificó experi-



Albert Einstein (1879-1955).

mentalmente. Este fue el empujón final para la concesión a Einstein del Premio Nobel en 1921. A primera vista esto puede parecer extraño pues el trabajo experimental de Compton apareció publicado en 1923; pero la realidad es que el Premio Nobel de 1921 fue anunciado (junto con el de 1922, concedido a Niels Bohr) en noviembre de 1922, y para entonces ya se tenía noticia de los resultados de Compton (que eran mencionados explícitamente en la nota de prensa que justificaba la concesión).

Cabe señalar una curiosa paradoja en este artículo. Las únicas referencias que figuran en el mismo, además de Planck, son Philipp Lenard y Johannes Stark. En los años inmediatamente posteriores Einstein mantuvo frecuente correspondencia con ambos. Sin embargo, tras la llegada de los nazis al poder, Lenard y Stark se convirtieron en los más acérrimos enemigos de Einstein y de lo que llamaban "física judía".

Una de las cosas que más había llamado la atención de Planck cuando estableció su fórmula para el cuerpo negro era la aparición en la misma de una segunda constante k , además de la constante de Planck h . De hecho, una vez introducida h era necesaria esta segunda constante para tener un exponente adimensional $h\nu/kT$. Pero esta constante era también el factor de proporcionalidad que aparecía en la definición de la entropía en términos del número

de estados accesibles a un sistema $S = k \ln W$. (En realidad, aunque esta expresión está grabada en la tumba de Boltzman en Viena, fue Planck el primero en escribirla así, y el primero en introducir la constante que hoy llamamos constante de Boltzman). Cuando se comparaba la entropía así calculada con la calculada por pura termodinámica, para el caso de un gas perfecto, resultaba que el valor de k era igual a la constante de los gases, R , dividida por el número de Avogadro, N_A . Resultaba así el hecho bastante sorprendente de que midiendo la densidad de energía en una cavidad podía obtenerse algo tan aparentemente ajeno como el número de moléculas contenidas en un mol de gas (y con buena precisión, pues se obtenía un valor de $N = 6,17 \times 10^{23}$).

Boltzman había llegado a esa expresión para la entropía a partir de la teoría cinética, cuya hipótesis fundamental era la constitución atómica de la materia. Sin embargo, y por extraño que hoy pueda parecer, esta idea no era universalmente aceptada en su época.

Decía Feynman que si por algún cataclismo se perdiera casi todo el conocimiento y sólo se pudiese transmitir una frase a las generaciones futuras, la frase más informativa sería que "todas las cosas están hechas de átomos, pequeñas partículas que se mueven en movimiento perpetuo, atrayéndose mutuamente cuando están a pequeña distancia, pero repeliéndose al ser apretadas unas contra otras". La idea de que la materia estaba constituida por partículas minúsculas e indivisibles (*ατομος*) de diversas formas y tamaños fue introducida por Demócrito en el siglo V a.C. y adoptada por los epicúreos. Sin embargo, pronto fue olvidada hasta que fue resucitada por Gassendi a principios del siglo XVII y así llegaron a Boyle y Newton. En su *Óptica* de 1704, Newton afirma: "Me parece probable que Dios creó al principio la materia sólida, masiva, dura, impenetrable, con partículas móviles de tales dimensiones y forma, ... y estas partículas primitivas, siendo sólidas,

son incomparablemente más duras que cualquier cuerpo poroso compuesto de ellas. Y tan sumamente duras que nunca pueden romperse en trozos”. No obstante, en sus *Principia* Newton trataba fundamentalmente de explicar las propiedades físicas no tanto a partir del movimiento de las partículas sino de las fuerzas que actúan entre las mismas y que dependen de la distancia. De hecho, para explicar la ley de Boyle en los gases en equilibrio Newton tenía que suponer que las partículas que constituían un gas estaban fijas y se repelían con una fuerza inversamente proporcional a la distancia.

En 1809 Dalton introdujo el atomismo en química. Con esta hipótesis explicaba las relaciones entre los pesos equivalentes de los diferentes compuestos que podían obtenerse a partir de unas mismas sustancias. Pero Dalton no creía que esto pudiera explicar propiedades físicas y, de hecho, se negaba a aceptar la idea de Avogadro de que todos los gases en las mismas condiciones tenían el mismo número de moléculas.

Faltaba el segundo ingrediente esencial de la teoría cinética y es que es básicamente el movimiento de los átomos el que explica las propiedades físicas de los fluidos. En 1856 Krönig explicó las leyes básicas de los gases perfectos suponiendo que éstos estaban constituidos por partículas que se movían libremente en las tres direcciones de los ejes cartesianos y rebotaban elásticamente en las paredes del recipiente, lo que a todas luces eran hipótesis excesivamente simplistas. Más tarde Clausius introdujo la idea de recorrido libre medio y Maxwell el cálculo de probabilidades, con lo que la teoría se hizo mucho más completa. Con ello Maxwell dedujo que, para gases enrarecidos, la viscosidad de un gas debía ser independiente de su densidad. Aunque este resultado era contraintuitivo, fue verificado por los experimentos, y esto dio un respaldo a la teoría cinética, y de rebote a la hipótesis atómica. Así Maxwell, un poco en la línea de Newton ya mencionada,

afirmaba. “Aunque en el transcurso de las edades han ocurrido y pueden ocurrir todavía catástrofes en los cielos, aunque los sistemas antiguos se hayan aniquilado, y otros nuevos hayan surgido de sus ruinas, las moléculas con las cuales estos sistemas (la Tierra y todo el Sistema Solar) se han construido —piedras fundamentales del universo material— permanecen enteros y sin desgaste. Como fueron creadas permanecen hasta hoy: perfectas en número, en medida y en peso...”

Pero la teoría cinética se tropezaba con un problema importante: explicar la Segunda Ley de la Termodinámica. En efecto, la Segunda Ley establece que hay una magnitud termodinámica, la entropía, que aumenta siempre (o, mejor dicho, nunca disminuye) en todos los procesos naturales; es decir, hay una diferencia esencial entre pasado y futuro. Sin embargo, las leyes del movimiento y los choques entre partículas no distinguen entre pasado y futuro. Pese a todo, Boltzman llegó a construir una función de las posiciones y velocidades de las partículas que presentaba este comportamiento unidireccional hasta que se alcanzaba el equilibrio. ¿Cómo era posible obtener un comportamiento irreversible a partir de leyes reversibles? La respuesta es que además de las leyes de la mecánica Boltzman recurría a hipótesis probabilistas que no siempre se daban. De acuerdo con esto, la Segunda Ley era solo una ley estadística: el aumento de la entropía en cualquier proceso natural era extraordinariamente probable pero no absolutamente cierto. Pero esta interpretación era rechazada radicalmente por los “energetistas”, como Ostwald y Helm, que veían en la Segunda Ley una ley absoluta que el mecanicismo nunca podría explicar. La Termodinámica permitía explicar todos los procesos mediante transferencias de energías sin necesidad de acudir a hipótesis sobre la constitución de los sistemas.

Junto a estas razones científicas había otras de orden epistemológico. Para el empiriocriticismo de Mach y

Avenarius, los elementos del mundo eran las sensaciones, y la tarea de la física se reducía a establecer relaciones entre las sensaciones. Esta tarea debía realizarse con “economía de pensamiento”, lo que significaba que no había que otorgar realidad a conceptos inobservables. El empiriocriticismo gozaba de gran aceptación. Incluso caló en los círculos marxistas hasta el punto de que en 1909 el propio Lenin tuvo que “poner orden” con un libro titulado *Materialismo y empiriocriticismo* en el que defendía a Boltzman (para entonces ya muerto) y atacaba la filosofía de la ciencia de Mach, Poincaré o Duhem. (Muchos años más tarde, Philip Franck, que había sucedido a Einstein en Praga y luego se exiló en los Estados Unidos, pudo esgrimir que había sido citado desfavorablemente por Lenin ante los agentes del Comité de Actividades Antiamericanas). Lo curioso, sin embargo, es que Lenin, que pasó buena parte de esos años exilado en Ginebra, estaba muy lejos de saber que, muy cerca de allí, Einstein había encontrado una demostración palpable de las teorías de Boltzman.

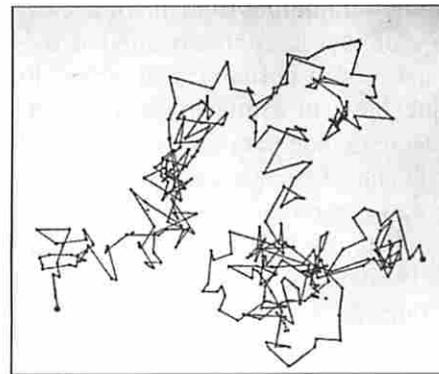
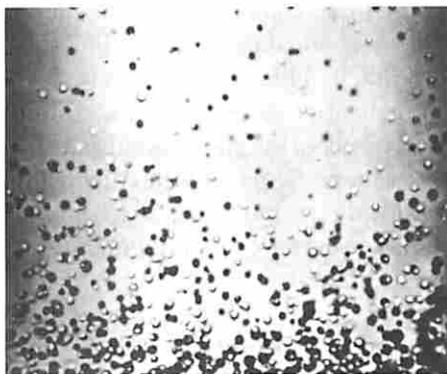
Durante los años anteriores a 1905 Einstein había estudiado en profundidad la termodinámica estadística y, sin conocer el libro fundamental que Gibbs había escrito años antes, había deducido por su cuenta algunas expresiones para las desviaciones típicas de la energía en un sistema termodinámico, expresiones que iba a utilizar en años posteriores para calcular las fluctuaciones en un espejo sometido a radiación. También había estudiado un hecho notable descubierto por van t’Hoof en 1886: que la presión osmótica en las disoluciones diluidas obedecía a una ley similar a la de los gases perfectos, independientemente de la naturaleza del solvente. Es decir, la presión osmótica que ejercía una disolución sobre una membrana semipermeable era la misma que la que ejercería un gas constituido por las moléculas del soluto moviéndose libremente en el mismo volumen. Planck, que también ponía reparos a la teoría cinéti-

ca, se quejaba de que esta teoría no sólo no había predicho este hecho sino que tampoco tenía una explicación clara para el mismo.

Einstein vio que la ley de van t'Hoof proporcionaba un método para estimar el número de Avogadro y el tamaño de las moléculas del soluto en una disolución. Éste era el objetivo de la tesis que Einstein presentó a finales de abril a la Universidad de Zurich y que, ligeramente corregido, envió para su publicación en *Annalen der Physik* en agosto de 1905. (No obstante, el artículo no se publicaría hasta 1906: *Annalen der Physik*, **19** [1906], 289.) Lo que había que hacer era expresar dos cantidades medibles experimentalmente en términos de N_A y r (el radio de las moléculas, supuestas esféricas). Lods Schmidt ya había utilizado un método semejante basado en la medida del recorrido libre medio y la fracción de volumen de las moléculas en un gas, pero ambas medidas eran muy imprecisas. En el método de Einstein, la primera constante medible es el coeficiente de difusión D del soluto en una disolución. Para escribir este coeficiente en términos de N_A y r se hace el siguiente razonamiento: si sobre las partículas del soluto actúa una fuerza F en el sentido de las x positivas, dichas partículas se desplazarán hacia la derecha, aunque su movimiento estará frenado por la fricción que ejerce el solvente. Si se acepta la ley de Stokes, las moléculas se moverán con una velocidad $v = F/6\pi\eta r$; siendo η la viscosidad del solvente puro. Si la concentración del soluto es ρ habrá una corriente de convección de intensidad $\rho F/6\pi\eta r$ por unidad de área. Pero este desplazamiento originará un gradiente de concentración, y con ello una corriente de difusión $D(\partial\rho/\partial x)$ en sentido contrario. En el equilibrio ambas corrientes se neutralizan, es decir:

$$\frac{\rho F}{6\pi\eta r} = D \frac{\partial\rho}{\partial x}$$

Supongamos ahora que las moléculas de soluto constituyen un gas



Experimento de Perrin (1908).

ideal sobre las que actúa la misma fuerza F que antes. Entonces hay un gradiente de presión $(\partial p/\partial x) = F\rho N_A/m$, y de acuerdo con la ley de los gases perfectos:

$$\frac{F\rho N_A}{m} = \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{RT}{m} \frac{\partial\rho}{\partial x}$$

Si las disoluciones y los gases perfectos obedecen a la misma ecuación resulta finalmente:

$$D = \frac{RT}{N_A} \frac{1}{6\pi\eta r}$$

La segunda cantidad medible es la viscosidad de la disolución η^* . Un cálculo que, según uno de los evaluadores de las tesis "está entre los más difíciles en hidrodinámica", muestra que la relación entre la viscosidad de la disolución y la del solvente puro es $\eta^* = \eta(1 + \phi)$, siendo ϕ la fracción de volumen ocupado por las moléculas de soluto. Este volumen es simplemente el volumen de cada molécula multiplicado por el número de moléculas de soluto por unidad de volumen; es decir, $\phi = (4\pi r^3/3)(N_A\rho/m)$. En resumen, si se miden η , η^* y D , obtenemos N y r . Con los datos entonces disponibles se obtenía un valor $N = 3,3 \times 10^{23}$ que, aunque daba el orden de magnitud correcto, era bastante menor que el que se obtenía a partir de la ley de Planck. Probablemente esto era debido a la imprecisión de las medidas y a que la aproximación de Stokes no era muy buena para moléculas de un tamaño tan pequeño. (Más adelante, Einstein corregiría algunos errores que se habían desli-

zados y que afectaban a la contribución del volumen ϕ , y obtuvo un valor mucho mejor.)

Este trabajo, por sí solo, ya era de enorme interés. Pero una vez terminada su tesis, Einstein da un paso más. Supongamos que, en lugar de una disolución diluida, tenemos una suspensión coloidal de partículas. Desde el punto de vista de la termodinámica clásica estas partículas no dan lugar a una presión osmótica. Sin embargo, desde el punto de vista cinético-molecular, la única diferencia entre una disolución y una suspensión coloidal está en el tamaño de las moléculas. Por ello, la expresión $D = (RT/N_A) \cdot (1/6\pi\eta r)$ sigue siendo válida para la suspensión, e incluso mejor que para una disolución, ya que el tamaño mucho mayor de las partículas suspendidas hace más válida la utilización de la ley de Stokes. En este caso, no obstante, Einstein obtiene esta expresión a partir de un argumento termodinámico, exigiendo la minimización de la energía libre de la suspensión.

Pero lo mejor está por llegar. Algunos investigadores habían tratado de calcular los valores moleculares a partir de la velocidad observada de las partículas suspendidas y la aplicación del principio de equipartición, pero estos razonamientos fallaban por varias razones. En primer lugar, el movimiento de las partículas suspendidas es tal que no es posible definir una velocidad media (ni una velocidad cuadrática media). La partícula suspendida está recibiendo impactos continuos y en todas direcciones por parte de las molé-

culas del líquido. Evidentemente estos impactos tampoco pueden tratarse como colisiones binarias, lo que llevaría a una masa absurdamente grande para las moléculas del solvente. En cada instante la partícula suspendida está recibiendo los impactos de muchísimas partículas del solvente que proceden de direcciones diferentes. Ahora bien, si nos fijamos en una partícula suspendida en particular, vemos que su desplazamiento neto aumenta con el tiempo. Parecería así que a partir del movimiento desordenado de las moléculas del solvente obtenemos un movimiento neto de la partícula suspendida. Y puesto que el movimiento molecular desordenado es “el tipo de movimiento que llamamos calor” (en famosa frase de Clausius) parecería que estamos obteniendo un trabajo neto a partir de un único foco térmico, violando así la Segunda Ley. Pero la interpretación probabilista tiene explicación para esto. La distribución de las velocidades moleculares presenta fluctuaciones respecto de la distribución de equilibrio, y el tamaño relativo de las fluctuaciones es mayor cuanto menor es el sistema considerado. En particular, en el entorno de una partícula suspendida las fluctuaciones pueden ser relativamente importantes y, por consiguiente, los múltiples impactos que la partícula recibe en cada instante no se compensan exactamente sino que tienen una resultante no nula. (Lo que sí ocurre, no obstante, es que las fluctuaciones en diferentes regiones de la suspensión no están correlacionadas y, por ello, los impactos netos resultantes sobre cada partícula suspendida en cada instante son independientes.) Por otra parte, si el movimiento de las partículas del solvente es aleatorio, tampoco hay correlación entre las fluctuaciones en diferentes instantes y la dirección media de los impactos variará de un intervalo de tiempo al siguiente: en lugar de ser continua, la trayectoria de la partícula es una trayectoria en zig-zag para la que no puede definirse una velocidad. En palabras de Einstein: “Obviamente, debemos su-

poner que cada partícula [suspendida] individual ejecuta un movimiento que es independiente de los movimientos de todas las demás partículas; los movimientos de la misma partícula en diferentes intervalos de tiempo también deben considerarse procesos mutuamente independientes, siempre que consideremos que dichos intervalos de tiempo no se escogen demasiado pequeños. (...) Introducimos ahora un intervalo de tiempo τ , que es muy pequeño comparado con intervalos de tiempo observables pero suficientemente grande para que los movimientos ejecutados por una partícula durante dos intervalos de tiempo sucesivos τ puedan considerarse sucesos mutuamente independientes.” (En los libros actuales suele visualizarse un proceso de este tipo como la “caminata del borracho”: el borracho sigue una trayectoria en zig-zag; en cada instante el borracho tiene la misma probabilidad de dar un paso a la izquierda que a la derecha, pero cada paso que da es completamente independiente del anterior). Con estas hipótesis, Einstein deduce una ecuación para la evolución temporal de la densidad de partículas suspendidas, que es una ecuación de difusión: “La distribución de probabilidad de los desplazamientos resultantes durante un instante arbitrario t es así la misma que la distribución de errores aleatorios, como era de esperar”. Tal distribución es una curva de Gauss cuya anchura aumenta con el tiempo en la forma $\bar{x}^2 = 2Dt$. De hecho, esta anchura corresponde físicamente al desplazamiento cuadrático medio λ_x^2 , de modo que, sustituyendo esta expresión en la expresión anterior para el coeficiente de difusión, se obtiene finalmente (*Annalen der Physik*, 17 [1905], 549-560):

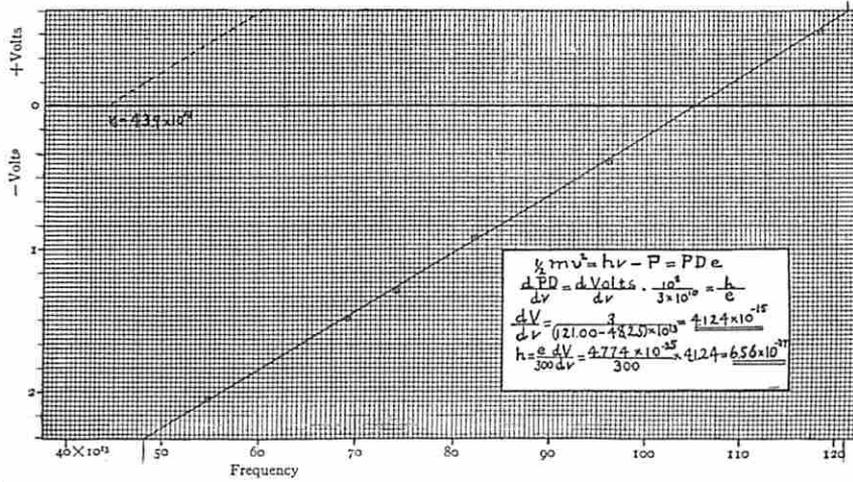
$$N_A = \frac{t}{\lambda_x^2} \cdot \frac{RT}{3\pi k r}$$

Einstein concluía su artículo: “Esperamos que algún investigador consiga pronto resolver el problema aquí presentado, que tan importante es para la teoría del calor”. Ese in-

vestigador iba a ser Jean Perrin. Perrin utilizó varias expresiones para comparar sus datos experimentales sobre partículas en suspensión, en particular una expresión que obtuvo Einstein tras su artículo seminal que permitía relacionar la densidad de partículas suspendidas con la altura. (De hecho, Perrin obtuvo el Premio Nobel en 1926 por sus estudios del equilibrio de sedimentación). Perrin también fue capaz de medir el movimiento browniano rotacional, algo que entonces parecía imposible. Los resultados experimentales confirmaron plenamente la teoría de Einstein. Fue entonces cuando adversarios tan declarados de la hipótesis atómica como Ostwald tuvieron que rendirse a la evidencia. Pero, además de esto, la aproximación de Einstein abría el campo de la teoría de procesos estocásticos que en poco tiempo impregnaría toda la física y las matemáticas. (Ver el artículo de Ricardo Vélez en este mismo número.)

Los artículos citados hasta ahora tienen un nexo común, y es que en su base están las ideas de la mecánica estadística. El siguiente artículo, por el que Einstein es más conocido (“Sobre la electrodinámica de cuerpos en movimiento”, *Annalen der Physik*, 17 [1905], 891-921), es totalmente ajeno a esto e incluso plantea alguna paradoja. Para empezar, los artículos anteriores abrían nuevas vías a partir de fenómenos bien conocidos pero que no ocupaban el centro de la reflexión teórica. (Ni siquiera la teoría del cuerpo negro era vista entonces como un problema esencial para la física clásica.) Por el contrario, el problema del éter ocupaba un lugar principal en la agenda de los físicos.

Desde que Maxwell había establecido las ecuaciones del campo electromagnético muchos físicos quisieron verlas como una mecánica del éter. El éter era el medio “necesario” para la propagación de la luz. Si la luz era una onda que se propagaba en el éter con velocidad c , debería ser posible detectar la velocidad de un sistema (por ejemplo, la Tierra) con respecto al éter a partir



Potencial de frenado frente a la frecuencia para el sodio. Resultados experimentales originales de Millikan que corroboraron la explicación de Einstein del efecto fotoeléctrico.

de medidas de la velocidad de la luz realizadas en dicho sistema. El propio Maxwell propuso en 1879 algunos experimentos en este sentido, pero concluía que la determinación de la velocidad respecto al éter a partir de medidas realizadas en la Tierra requeriría una precisión del orden de $(v/c)^2$. En efecto, supongamos un rayo de luz que se mueve entre dos espejos A y B situados en la Tierra y separados una distancia d . Si la Tierra está en reposo con respecto al éter, la velocidad de la luz medida en la Tierra es c , tanto cuando va de A a B como cuando va de B a A. Por lo tanto, el tiempo que tarda el rayo de luz en un viaje de ida y vuelta entre A y B es $\Delta t = 2d/c$. Sin embargo, si la Tierra, y con ella los espejos, se mueve con velocidad v respecto al éter, la velocidad de la luz respecto a la Tierra en el trayecto de ida será $c + v$ y en el trayecto de vuelta $c - v$, de modo que el tiempo total del viaje de ida y vuelta es ahora $\Delta t' = d/(c + v) + d/(c - v) = \Delta t/(1 - v^2/c^2)$.

Si suponemos v del orden de la velocidad orbital de la Tierra en torno al Sol resulta $v^2/c^2 \sim 10^{-8}$. Maxwell pensaba entonces que semejante precisión $O(v^2/c^2)$ estaba fuera del alcance experimental. Sin embargo, Albert Michelson, entonces en Alemania, aceptó el reto y construyó un interferómetro en el que la diferencia entre las velocidades de la luz en diferentes direcciones se traducían en un desplazamiento de las

frangas de interferencia. Con ello podía obtener resultados del orden requerido. El primer experimento, realizado en 1881 en Postdam, no mostró ningún desplazamiento de franjas. Tampoco llamó mucho la atención en un primer momento. No obstante, algunos años más tarde Lorentz advirtió un defecto en la realización del experimento que había que corregir antes de dar una interpretación inequívoca. En 1887, Michelson, entonces en Cleveland y con la ayuda de Edward Morley, repitió el experimento con más precisión pero el resultado siguió siendo negativo. Lord Kelvin señaló la importancia del problema en una famosa conferencia pronunciada en 1900 con el título "Dos nubes del siglo XIX sobre la teoría dinámica del calor y la luz". La primera se refería al aparente fallo del principio de equipartición aunque, como ya se ha dicho, Kelvin no se refería explícitamente a la teoría del cuerpo negro sino a la de los calores específicos de los gases a bajas temperaturas. La segunda nube era el fracaso de los experimentos por detectar la velocidad de la Tierra con respecto al éter.

El problema del éter tenía otras vertientes. En la teoría original de Maxwell la carga eléctrica era una consecuencia de un "desplazamiento" en el éter, pero más adelante se descubrió que la carga eléctrica estaba intrínsecamente asociada a partículas materiales. Los "maxwellia-

nos" estrictos trataron de explicar las partículas como estructuras singulares o vórtices en el éter, pero pronto se vio que esto era imposible. Lorentz trató de reformular el electromagnetismo de Maxwell en una teoría microscópica dualista en el que el campo coexistía con partículas, algunas de ellas cargadas, llamadas electrones. El soporte del campo era un éter que llenaba todo el espacio, incluso allí donde había partículas. Las partículas cargadas eran fuentes para el campo que, a su vez, actuaba sobre las partículas. Existía así un sistema de referencia privilegiado que era el sistema del éter en reposo, en el que eran válidas las ecuaciones de Maxwell. Según la mecánica clásica, para pasar de un sistema de referencia a otro que se moviese a una velocidad uniforme v respecto al primero bastaba con aplicar las transformaciones de Galileo. Sin embargo, si se procedía así, las ecuaciones de Maxwell dejaban de ser válidas. Lorentz desarrolló un teorema de estados correspondientes que establecía qué transformaciones había que aplicar para que los campos conservasen su forma al pasar de un sistema a otro. Asimismo obtuvo una relación entre las fuerzas que actuaban sobre las partículas y la forma de los campos en un sistema de referencia dado. Con ello Lorentz explicaba el fracaso de los experimentos para detectar el movimiento a través del éter con precisión a orden v/c , como, por ejemplo, los experimentos de Fizeau y Arago. Sin embargo, para explicar el fracaso de los experimentos basados en efectos de orden v^2/c^2 , como era el caso del experimento de Michelson-Morley, era necesaria una hipótesis adicional. Como había hecho FitzGerald, Lorentz supuso que los cuerpos se contraían en la dirección del movimiento cuando se movían a través del éter. Esta contracción debería explicarse por el distinto comportamiento de las fuerzas en distintos sistemas de referencia, pues "las fuerzas moleculares se propagan a través del éter, al igual que las electromagnéticas."

Lorentz había introducido un “tiempo local”, diferente del “tiempo absoluto” newtoniano medido en el sistema del éter en reposo. Para él, este “tiempo local” era un mero artificio matemático sin significado físico. Para Poincaré, sin embargo, el tiempo local de Lorentz era el tiempo que medía un reloj que se moviera con el observador, y no tenía sentido decir que un tiempo fuera preferible a otro. En un artículo titulado “La medida del tiempo” (cuya primera versión data de 1898), Poincaré había expuesto la idea de que toda medida del tiempo era relativa y había que desechar el tiempo absoluto. Si dos relojes marchaban a ritmos diferentes, no se podía decir que uno fuera mejor que el otro porque se ajustaba más a un supuesto “tiempo absoluto”. Si se decía que el tiempo de un reloj era mejor que el del otro era simplemente porque permitía expresar las leyes físicas de forma más simple. Asimismo, decimos sin problemas que un suceso es anterior a otro cuando el primero es causa del segundo, pero esta afirmación, además de implicar cierta circularidad, no puede realizarse con sucesos distantes para los que no hay una relación causal evidente. En definitiva, decía Poincaré, “la simultaneidad de dos acontecimientos, o el orden de su sucesión, la igualdad de dos duraciones deben ser definidos de tal suerte que el enunciado de las leyes naturales sea lo más simple posible. En otros términos, todas estas reglas, todas estas definiciones no son más que el fruto de un oportunismo inconsciente”. También Poincaré había sugerido que la velocidad de la luz podría ser una velocidad insuperable. Sin embargo, el convencionalismo radical de Poincaré ocultaba una contradicción. En efecto, si el tiempo se define de modo que el enunciado de las leyes sea lo más simple posible, habría que ver si existe una definición del tiempo que hiciera innecesaria la introducción de nuevas hipótesis dinámicas. Pero, en lugar de ello, Poincaré da un paso atrás y admite, con Lorentz, la necesidad de una contracción real

de los cuerpos, dependiente de la velocidad de los mismos con respecto a un sistema privilegiado. En resumen, es necesaria una nueva dinámica.

Aquí es donde aparece de nuevo la intuición extraordinaria de Einstein. “La parte puramente cinemática de este artículo seguramente te interesará”, le había dicho a Habicht. En efecto, no se trata de crear una nueva teoría de las interacciones electromagnéticas: sencillamente hay que cambiar la base cinemática de toda la física. Y ello supone renunciar al tiempo absoluto y admitir que la marcha de los relojes depende del sistema de referencia:

“Debemos tener en cuenta que todos nuestros juicios que implican al tiempo son siempre juicios sobre sucesos simultáneos. Si, por ejemplo, yo digo que «el tren llega aquí a las 7 en punto», eso significa, más o menos, «la manecilla pequeña de mi reloj apuntando a las 7 y la llegada del tren son sucesos simultáneos» ... Podría parecer que todas las dificultades implicadas en la definición de «tiempo» podrían superarse si sustituyo «posición de la manecilla pequeña de mi reloj» por «tiempo». Semejante definición es suficiente si va a definirse un tiempo exclusivamente para el lugar en el que está localizado el reloj; pero la definición ya no es satisfactoria cuando tienen que enlazarse temporalmente series de sucesos que ocurren en localizaciones diferentes, o —lo que es equivalente— cuando hay que evaluar temporalmente sucesos que ocurren en lugares remotos del reloj.

(...) Hasta aquí hemos definido sólo un «tiempo-A» y un «tiempo-B», pero no un «tiempo» común para A y B. El último puede ahora determinarse estableciendo por definición que el «tiempo» requerido por la luz para viajar de A a B es igual al «tiempo» que requiere para viajar de B a A.”

De este modo, la hipótesis de constancia de la velocidad de la luz

permite sincronizar dos relojes situados en lugares distantes A y B pero ambos en reposo con respecto al observador. (Curiosamente, estudios recientes han mostrado cómo la sincronización de relojes era un tema candente en la época, en un momento que las grandes ciudades y las líneas de tren necesitaban un tiempo de referencia fiable. El propio Einstein, como perito en la Oficina de Patentes, tuvo que examinar varias propuestas en este sentido.) Pero si se admite que *la velocidad de la luz es la misma para todos los observadores*, ya estén o no en movimiento, dos relojes sincronizados para un observador en reposo respecto a ellos ya no lo estarán para un observador en movimiento, pues ahora el tiempo requerido para que la luz vaya de A a B no es el mismo que el requerido para que vaya de B a A, ya que en un caso el reloj va al encuentro de la luz y en el otro el reloj trata de alejarse de la luz.

Esta relatividad de la sincronización se traduce en una relatividad de las medidas de longitud. Un observador puede utilizar una regla de medir en cuyas marcas hay relojes sincronizados para él (es decir, en su sistema de referencia, de acuerdo con la estipulación anterior). La medida de la longitud de un objeto es entonces la distancia entre las marcas de la regla de medir que coinciden *simultáneamente* con los extremos del objeto a medir. Pero estas coincidencias ya no serán simultáneas para un segundo observador en movimiento con respecto al primero, pues los relojes de la regla ya no están sincronizados para este segundo observador. Por lo tanto, la longitud que mide el observador en reposo no es la misma que mide el observador en movimiento. Ahora, un simple razonamiento permite obtener unas relaciones de transformación de un sistema de referencia a otro que recuperan las transformaciones de Lorentz (que, en realidad, ya había descubierto Waldemar Voigt en 1887) bajo las que eran invariantes las ecuaciones de Maxwell.

El artículo de Einstein provocó una respuesta rápida nada menos

que de Planck, quien le escribió pi-diéndole algunas aclaraciones. El propio Planck impartió lecciones sobre el tema ese mismo año y ya en 1906 se presentó una tesis en la Universidad de Berlín. Laue, entonces ayudante de Planck en Berlín, sería el primero en escribir una exposición detallada del tema. También se interesaron o citaron el trabajo Drude, Röntgen o Stark. El nombre de Einstein empezó a hacerse famoso dentro del continente (más especialmente, en los países de habla alemana). En 1909 la Universidad de Ginebra nombró a Einstein Doctor Honoris Causa y ya en 1910 Einstein fue propuesto para el Premio Nobel (y desde entonces lo sería ininterrumpidamente salvo en los años 1911 y 1915).

Esto no quiere decir, no obstante, que todos los que valoraban a Einstein reconocieran exactamente lo que aportaba de nuevo su teoría. A pesar del título del artículo, la teoría no era una teoría del electromagnetismo, sino que presentaba un nuevo marco cinemático universal al que debía ajustarse cualquier teoría dinámica. Pese a todo, incluso en Alemania se siguió hablando durante varios años de la teoría de Lorentz-Einstein, y se seguía vinculando básicamente la teoría con los fenómenos electromagnéticos.

¿Y qué pasa con la famosa $E = mc^2$? La equivalencia entre masa y energía viene enunciada, como dice la segunda carta a Habicht, en un breve artículo escrito unos meses después (*Annalen der Physik*, **18** [1905], 639-641) pero en ningún momento aparece formulada en esta forma compacta. En su artículo anterior, Einstein había demostrado que la masa, y con ello la energía cinética, del electrón variaba con la velocidad. De hecho, esta variación ya era conocida y se habían propuesto varias explicaciones. Lorentz había hecho la analogía con una esfera que se mueve en un fluido perfecto: la masa efectiva de la esfera es mayor que la masa real pues debe desplazar al fluido. De la misma forma, una partícula cargada que se moviera en el éter tendría una masa



Placa conmemorativa de la estancia de A. Einstein en Praga (1911-1912).

efectiva mayor. Otra forma de verlo es que una esfera cargada actúa como fuente de un campo que, a su vez, actúa sobre la esfera. El problema es más complicado porque el éter no es necesariamente un fluido perfecto y coexiste en el espacio con la esfera. Por si fuera poco, la variación de la masa dependería también de si la esfera mantenía su forma o experimentaba una contracción de Fitz Gerald-Lorentz. Los resultados experimentales de Kaufmann y Bucherer eran contradictorios y no ofrecían una solución concluyente. Pero era generalmente aceptado que una parte de la inercia del electrón (y en algunas teorías, incluso toda!) era de origen electromagnético.

Como se ha dicho, Einstein demostró que la masa del electrón varía efectivamente con la velocidad, pero esto es consecuencia de la nueva cinemática y, por lo tanto, no tiene nada que ver con que sea una partícula cargada: lo mismo debe ocurrir con cualquier partícula. En el artículo posterior Einstein demuestra que si un cuerpo irradia una energía L , su energía cinética disminuye en una cantidad que es independiente de las propiedades del cuerpo, y que dicha energía depende de la velocidad de la misma forma que la energía cinética de un electrón. Hasta segundo orden en v/c , esta variación es $\Delta K = (1/2)(L/c^2)v^2$. (En realidad, Einstein utiliza V en

lugar de c ; el convenio de utilizar c para la velocidad de la luz es bastante más tardío). De ello concluye que “si la energía de un cuerpo cambia en L , su masa cambia en $L/9 \times 10^{20}$ si la energía se mide en ergios y la masa en gramos”. Así, “la radiación transporta inercia entre cuerpos emisores y absorbentes”. Einstein sugería también que el efecto de reducción de masa podría observarse en el radio. Planck criticó el argumento de Einstein por insuficiente, ya que generalizaba una conclusión que sólo se había establecido para el caso de energía radiante, y presentó su propio argumento para demostrar que una transferencia de calor implicaba también un cambio de masa. También Planck fue el primero en destacar que la energía de ligadura de un sistema afectaba a su masa. (De hecho Stark, y esta vez no por mala voluntad, atribuyó a Planck el descubrimiento de la relación entre masa y energía, y Einstein tuvo que escribirle para aclararle la situación). No obstante, las energías de ligadura entonces conocidas eran las moleculares, y éstas apenas tenían en importancia en términos de masa equivalente. Todavía no se conocía la estructura del núcleo atómico (tendrían que pasar más de 25 años para ello) y por lo tanto todavía era ciencia-ficción pensar en la enorme energía almacenada en el núcleo. Rutherford llegó incluso a calificar de “pamplinas” la posibilidad de una utilización práctica de la energía nuclear. (Por supuesto, Rutherford murió antes de Hiroshima, e incluso antes del descubrimiento de la fisión nuclear.)

Ya hemos dicho que el artículo sobre la electrodinámica se diferencia claramente de los otros. En efecto, en el artículo “revolucionario” sobre el cuanto de luz, Einstein, aunque con cautelas, pone en duda la teoría electromagnética clásica: “La teoría ondulatoria de la luz, que opera con funciones espaciales continuas, se ha mostrado soberbia para describir fenómenos puramente ópticos y probablemente nunca será reemplazada por otra teoría. Debe-

ríamos tener en cuenta, sin embargo, que las observaciones ópticas se refieren a promedios temporales antes que a valores instantáneos; y es perfectamente concebible, pese a la completa confirmación experimental de la teoría de la difracción, reflexión, refracción, dispersión, etc., que la teoría de la luz, que opera con funciones espaciales continuas, lleve a contradicciones cuando se aplique a los fenómenos de emisión y transformación de la luz". Sin embargo, la validez de las ecuaciones de Maxwell (en el espacio vacío) en todos los sistemas inerciales es un elemento esencial en el artículo sobre electrodinámica. Asimismo, en este artículo Einstein utiliza argumentos diferentes para deducir cómo se transforman la frecuencia de una onda y la energía de los rayos luminosos al pasar de un sistema a otro. Ambos se transforman de la misma forma, pero Einstein pasa por alto que eso es lo que cabría esperar con su hipótesis del cuanto de radiación, cuya energía es proporcional a la frecuencia. Finalmente, ya hemos señalado que Einstein no asigna momento al cuanto de radiación hasta 1917, cuando ya la propia teoría de Maxwell afirmaba que la radiación transporta momento.

Estas últimas omisiones se entienden si se tiene en cuenta que en el artículo de 1905 está gran parte de la física de la relatividad especial pero falta un ingrediente importante: el espacio-tiempo que iba a introducir Minkowski en 1908. A partir de entonces, las formulaciones tetradimensionales de la relatividad aclararon muchos conceptos. En particular, energía y momento iban a ser componentes de un mismo cuadrivector cuyo módulo era sencillamente la masa en reposo. De este modo, para partículas de masa en reposo nula se recuperaba la relación entre momento y energía que salía de la teoría electromagnética clásica.

Resulta curioso que la primera reacción de Einstein a la idea de Minkowski fue que era una sofisticación innecesaria. Sin embargo, no tardó en darse cuenta de que sin ello era

imposible avanzar hacia la relatividad general.

Pero eso es otra historia.

J. Javier García Sanz

Dpto. de Física Fundamental

De Einstein al futuro

Los cien últimos años han supuesto un salto enorme en la civilización. Los descubrimientos en ciencia básica y en las ciencias aplicadas han transformado la vida del hombre. Cien años parece una brizna dentro de la historia de la humanidad pero nunca el hombre había dado un salto tan gigantesco en ese periodo de tiempo. Quizá no podemos decir qué va a pasar en este siglo que estamos casi comenzando, pero de lo que sí estamos seguros es de que la humanidad va a seguir transformando la vida, y su vida, de forma acelerada.

Se ha dicho que el siglo XIX ha sido el siglo de la Química y el XX el de la Física. Si analizamos los

avances producidos dentro de esta ciencia y originados por ella, esto es verdad. Estamos finalizando el Año Mundial de la Física en el que hemos, entre otras cosas, celebrado el aniversario del "Annus Mirabilis" de Einstein. En 1905 él escribió cinco trabajos que transformaron la física del siglo XX y que siguen influyendo en la que se está desarrollando en el siglo XXI.

Sin embargo, en pureza, el siglo para la Física nace el 14 de diciembre de 1900 cuando Planck presenta en Berlín, durante la reunión de la sociedad alemana de física, una hipótesis *ad hoc* sobre la absorción y emisión de la radiación para explicar la radiación del cuerpo negro. En el centenario del trabajo de Planck un científico francés, Claude Cohen-Tannoudji, decía "El artículo en el cual Max Planck introdujo la constante universal que llevó su nombre, fechado en 1900, inauguró un periodo de intensa actividad intelectual, de donde emergió a finales de los años veinte un profundo cambio conceptual de la física, la teoría de los cuanta. Todas las ciencias del siglo XX, desde lo infinitamente pequeño de las partículas elementales a lo infinitamente grande de la astrofísica y de la cosmología, de la física atómica y molecular a la física de la materia condensada, de la química a la biología así como todas las tecnologías que hacen progresar nuestras sociedades... están profundamente marcadas por este cambio conceptual; ellas le deben lo esencial de su vitalidad actual. Todo parece indicar que se está todavía lejos de haber agotado todo el potencial de implicaciones conceptuales y de aplicaciones prácticas de la física cuántica."

Los trabajos de Einstein de 1905 y los de Bohr en 1913 llevaron a los físicos a considerar que la radiación electromagnética y las órbitas electrónicas alrededor del núcleo están cuantificadas con expresiones formalmente análogas a las de los elementos de energía de Planck. Max Planck fue considerado desde entonces como el padre de la teoría de

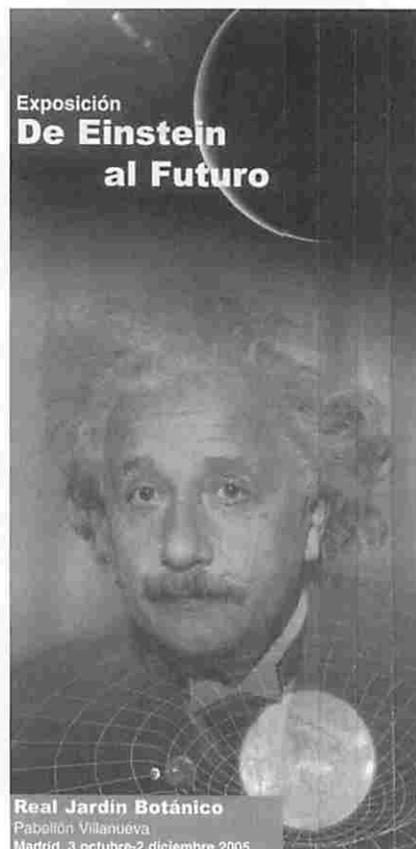


Figura 1. Díptico de la Exposición "De Einstein al Futuro".