

# A CIEN AÑOS DE LA PUBLICACIÓN DEL ARTÍCULO DE EINSTEIN SOBRE LOS CUANTOS DE LUZ

Luis Hernández, Facultad de Física, Universidad de La Habana, La Habana, Cuba

## RESUMEN

Se presenta una breve reseña histórica de los antecedentes que originaron las ideas de Einstein sobre los cuantos de luz, al mismo tiempo que se resalta el significado e impacto del famoso artículo de Einstein de 1905. En el presente trabajo se evidenciará que el concepto de cuanto de luz elaborado por Einstein, fue la coherente concepción de un programa de investigación, independiente de las ideas de Planck, que habría conducido irremediamente a la ley del cuerpo negro y al concepto de los cuantos de energía. Se evidenciará como Einstein utilizó la mecánica estadística para fundamentar la termodinámica del equilibrio con base en la mecánica clásica. La descripción einsteiniana, mecánica-estadística de la interacción radiación-sustancia conllevó a la búsqueda de los componentes elementales de la radiación electromagnética, los cuantos de luz.

## ABSTRACT

A brief historical description regarding the antecedents of the Einstein original ideas about the quantum of light is shown. The present work also stands out the meaning and impact of the Einstein's famous article of 1905. It will be demonstrated that the quantum light idea, elaborated by Einstein, was the coherent conception of a research programme, independent of that developed by Planck, that would have hopelessly lead to the law of the black body and to the concept of the energy quantum. In addition, it will be shown how like Einstein used the statistical mechanical description in order to explain the electromagnetic radiation-substance interaction and to found the elementary components of the electromagnetic radiation: the quantum of light.

## I. INTRODUCCIÓN

Siempre que se enseña la teoría de Albert Einstein (1879-1955) sobre los cuantos de luz, la cual explica el efecto fotoeléctrico, los estudiantes se sienten inmediatamente atraídos, no sólo porque todo aquello que lleva el nombre de Einstein posee un encanto mítico, sino también porque es una teoría sencilla de entender para explicar un problema de gran trascendencia e irresoluto hasta ese entonces.

El artículo de 1905, fue publicado en *Annalen der Physik* (ADP) e intitulado "Sobre un punto de vista heurístico referente a la emisión y a la transformación de la luz" [1] y desde su título ya se está infiriendo cual será su propósito, pues el concepto de heurístico se utiliza como asistencia práctica en la resolución de un problema sin que esté plenamente justificado su empleo.

Hoy se conoce este artículo, como aquel en donde se explica el efecto fotoeléctrico y de seguro que continuará siendo así, pero en verdad ese no fue el objetivo central de Einstein. De hecho antes de 1905, el efecto fotoeléctrico no estaba bien establecido, era muy difícil realizar el experimento con mediciones precisas y reproducibles, en particular por la necesidad de una alta calidad de las superficies metálicas ya que si se encuentran

depositadas pequeñas cantidades de impurezas se afectan grandemente los valores de la frecuencia de corte. Sólo en 1916, el físico norteamericano Robert Millikan [2,3], con trabajos de extraordinaria calidad pudo comprobar experimentalmente la ecuación de Einstein. Confirmada experimentalmente la teoría, Einstein recibió el Premio Nobel en 1921, por el efecto fotoeléctrico y no por su famosa teoría de la relatividad. Millikan lo recibió dos años más tarde.

En el presente trabajo se evidenciará que el concepto de cuanto de luz elaborado por Einstein, fue la coherente concepción de un programa de investigación, independiente de las ideas de Planck, que habría conducido irremediamente a la ley del cuerpo negro y al concepto de los cuantos de energía. En sus estudios iniciales, Einstein utilizó la mecánica estadística para fundamentar la termodinámica del equilibrio con base en la mecánica clásica. La descripción einsteiniana, mecánica-estadística de la interacción radiación-sustancia conllevó a la búsqueda de posibles componentes elementales de la radiación electromagnética y a la existencia de procesos elementales entre los mismos. Los componentes elementales, aunque no en su forma definitiva, se insinúan en el artículo de 1905, pero se establecieron definitivamente en 1916-1917, junto con los procesos elementales de emisión y absorción [4].

## II. ANTECEDENTES

En 1900, después de 50 años de haberse establecido experimentalmente por Gustav Kirchhoff (1824-1887) y otros científicos la distribución espectral de la energía de la radiación del cuerpo negro, Max Planck (1858-1947), alumno de H.L. Helmholtz (1821-94) y del propio Kirchhoff, profesor entonces en la Universidad de Berlín, en un “acto de desesperación”, según él confesó, encontró su famosa ley para explicar la radiación Electromagnética confinada e intercambiando energía en equilibrio con los átomos de la cavidad. En lugar de deducir la fórmula de la radiación electromagnética partiendo de la teoría, Planck propuso, dentro del marco de la termodinámica, ajustar los datos experimentales a una ecuación empírica. Posteriormente, para justificar físicamente la expresión tuvo que suponer dos aspectos fundamentales, primero, admitir la estadística de Maxwell-Boltzmann y por tanto las consideraciones probabilísticas de la física. Segundo, supuso que los átomos se comportaban como osciladores eléctricos que absorbían y emitían energía radiante. Cada oscilador tenía su propia frecuencia de oscilación emitiendo y absorbiendo la radiación a esa frecuencia. Todas las frecuencias están presentes en el espectro, dado el enorme número de diferentes osciladores, y por tanto el espectro es continuo. Planck introdujo una suposición ad hoc para justificar su ecuación empírica: un resonador atómico podía absorber o emitir solamente cantidades discretas de energías que eran proporcionales a su frecuencia de oscilación, “aceptando” la naturaleza discontinua de la energía, aunque para él era más importante las magnitudes continuas de la termodinámica. Planck uno de los exponentes más fieles en su época a la física clásica se convirtió sin proponérselo en su detractor. En 1910, después del trabajo de Einstein, Planck aún escribía: “la teoría de la luz sufriría un retraso de siglos, a los tiempos en que los seguidores de Newton y Huygens luchaban entre sí por la aceptación de la teoría corpuscular u ondulatoria de la luz. Toda la obra de Maxwell quedaría invalidada si se acepta el cuanto de energía radiante”. La teoría cuántica de Planck fue una victoria de su honestidad intelectual sobre sus convicciones científicas.

En el otoño de 1900, Albert Einstein aprobó los exámenes finales y obtuvo el diploma de la facultad de pedagogía del Politécnico de Zürich (E.T.H.) que entonces preparaba profesores de física y matemáticas. Cuatro años antes había ingresado en el instituto después de un primer intento infructuoso. A pesar de las buenas notas (por el sistema de seis puntos): física teórica 5, teoría de las funciones 5.5,

astronomía 5: tesis de grado 4.5; puntuación general 4.9 y de una reputación de investigador talentoso, a Einstein no lo mantuvieron en el Politécnico. Él no asistía frecuentemente a clases y en el laboratorio desdeñaba las instrucciones para la ejecución de los experimentos ejecutándolas a su modo. Pero la más grave violación fue la oportunidad en que llamó a Weber\*, sólo “señor Weber” y no el respetado “señor profesor” [5].

Después de varias suplencias como profesor de física y matemáticas en escuelas preuniversitarias, así como de clases particulares de estas disciplinas, en el verano de 1902 Einstein ocupa una plaza fija en la Oficina de Patentes de Suiza en Berna y en esa época su vida debió ser algo paradisíaca. Allí creó la teoría del movimiento browniano, la teoría de los cuantos de luz y la teoría especial de la relatividad. Sólo época tan fértil científicamente puede compararse con la que pasó Isaac Newton (1642-1727) en Woolsthorpe (1665-1667). Newton llegó en esa época a las ideas del cálculo diferencial, a la ley de gravitación universal y a su modelo corpuscular de la luz.

Es muy significativo que estando Einstein fuera de la Academia, en una simple oficina de patentes, creara tanta revolución en el pensamiento científico. En sus años juveniles de Berna, Einstein no se encontró atado a ninguna institución científica, al tiempo que poseía una libertad de creación fabulosa. Con anterioridad y también con posterioridad a Einstein en Berna, los eminentes físicos han creado sus teorías siempre vinculados a la Academia ya sea como investigador o como profesor. Einstein a lo largo de toda su vida continuó en esencia con la tradición de Berna: elaboraba los problemas de turno sin pensar nunca en la valoración de los resultados, pero esto ya lo pudo hacer en calidad de investigador profesional, profesor en Praga, en Zürich, en Berlín, en Princeton, cuando alcanzó notoriedad por su teoría de la relatividad. En los comienzos de su camino creador, un trabajo en la oficina de patentes no vinculado estrechamente con la física, le facilitó la completa absorción de su intelecto por el contenido de los problemas [6].

Tres días después de que Einstein se iniciara en su nuevo trabajo, el 26 de junio se recibió en ADP, su artículo “Teoría cinética del equilibrio térmico y del segundo principio de la termodinámica” [7], el primero de una triada, en los que se pretendía imprimir una interpretación de la entropía desde un punto de vista microscópico. En el mismo inicio del primer artículo, Einstein establece claramente cual es el objetivo de su investigación:

---

\*Heinrich Friedrich Weber, profesor de física y eminente electrotécnico, pero en la esfera de la física teórica no enseñaba nada nuevo a Einstein.

“No obstante las grandes conquistas de la teoría cinética del calor en el campo de la teoría de los gases, la mecánica no ha logrado proveer una base suficiente para la teoría general del calor al no haber demostrado aún las leyes del equilibrio térmico y el segundo principio utilizando exclusivamente las ecuaciones mecánicas y la teoría de la probabilidad, si bien las teorías de Maxwell y de Boltzmann han estado muy cerca de alcanzar ese fin. El objetivo de este artículo es resolver ese problema. Además proporcionaremos una extensión del segundo principio que es de importancia para las aplicaciones de la termodinámica. También deduciremos la expresión matemática de la entropía desde el punto de vista mecánico”.

El 26 de enero de 1903, siete meses después del primero, se recibe en ADP su segundo artículo, intitulado “Una teoría sobre los fundamentos de la termodinámica” [8]. Otra vez Einstein dejaba claro en la introducción cuales serían los objetivos de su trabajo, al tiempo que precisaba su conexión con el artículo de 1902, en donde había establecido las leyes del equilibrio térmico y el significado de la entropía con ayuda de la teoría cinética del calor. Este artículo estaba consagrado a demostrar que sin el uso de la teoría cinética es posible alcanzar los mismos resultados pero para ello es necesario utilizar “condiciones más generales”. Estas incluían hipótesis adicionales a las de naturaleza mecánica, así como una descripción probabilística más acabada de los sistemas que contenía el cálculo de los promedios y su interpretación física a través de magnitudes establecidas, es decir las bases sobre la cual se asienta la mecánica estadística clásica del equilibrio.

Su último artículo de la triada fue recibido, nuevamente en ADP, el 29 de marzo de 1904, “Sobre una teoría molecular general del calor” [9]. Este artículo es necesario analizarlo un poco más en detalle, porque es aquí donde incorpora Einstein la radiación del cuerpo negro como sistema termodinámico en equilibrio para encontrar los *componentes elementales*.

El artículo, aparte la introducción habitual, está dividido en cinco epígrafes. El primero está referido a la deducción de la expresión de L. Boltzmann (1844-1906), para la entropía, en el segundo, al igual que en los dos artículos anteriores, demuestra nuevamente el segundo principio de la termodinámica. El análisis del significado de la constante  $\chi^*$ , Einstein lo presenta en el tercer epígrafe, el cuarto está dedicado al significado de la misma constante  $\chi$

en las fluctuaciones y el último y más importante para ver su vínculo con el artículo de 1905 [1], es la utilización de la radiación del cuerpo negro como sistema termodinámico en equilibrio para estudiar las fluctuaciones.

A partir del cuarto epígrafe, “Significado general de la constante  $\chi$ ”, es donde Einstein trata por primera vez sus ideas sobre la radiación del cuerpo negro y que lo conducirían hacia la formulación de su teoría sobre los cuantos de luz. Einstein parte de un sistema gaseoso, en equilibrio térmico a la temperatura T (K), en donde el diferencial de la distribución de estados dW en el intervalo de energía E y E + dE viene dado por la actual conocida expresión:

$$dW = Ce^{-\frac{E}{2\chi T}} \omega(E) dE \quad (1)$$

donde C es una constante,  $\omega(E)$  es la hoy denominada densidad de estados y  $\chi$  es la constante universal cuyo significado físico Einstein intentaba esclarecer, y que traducida a su presente equivalente es la mitad de la constante de Boltzmann. Es cierto que en el epígrafe anterior, basándose en la teoría cinética de los gases, Einstein encontró un valor de  $\chi = 6,5 \cdot 10^{-17}$  erg/K\*\*, contra el actual valor de  $2\chi = 1,38 \cdot 10^{-16}$  erg/K, pero él pretendía encontrar un significado de  $\chi$  más general, de manera que entonces empleó el concepto de las fluctuaciones de la energía entre sistemas en equilibrio térmico, un tema que en aquel tiempo no tenía la notabilidad de hoy en día. Por supuesto, que no se detallará, por aparecer en cualquier texto de física estadística, el cálculo mediante el cual, a partir de ecuación 1 se recaba la expresión para las fluctuaciones de la energía, y que Einstein encontró en este epígrafe, a saber:

$$\overline{E^2} - \overline{E}^2 = \overline{\epsilon^2} = 2\chi T^2 \frac{d\overline{E}}{dT} \quad (2)$$

donde

$$E = \overline{E} + \epsilon \quad (3)$$

de manera que  $\overline{E}$  es la energía media recabada mediante la distribución de la ecuación 1, y  $\epsilon$  es la fluctuación de la energía, que a propósito y tal vez como constancia de la poca relevancia de entonces, él la definió entre comillas. Después de demostrar la expresión (2), Einstein recalca que  $\overline{\epsilon^2}$  simboliza una medida numérica de la estabilidad térmica del

\*Se utilizará la misma nomenclatura de los artículos originales, pero se enumerarán las ecuaciones por requisito de las normas de la RCF.

\*\*En su artículo original Einstein no escribió las unidades de  $\chi$  ni asoció explícitamente el valor de N a la constante de Avogadro.

sistema y que ésta se encuentra establecida por la constante  $\chi$  la cual alcanzaba un significado físico concluyente. Tal vez sería conveniente señalar que tanto Boltzmann como J.W. Gibbs (1839-1903) habían estudiado las fluctuaciones de la energía, pero lo hicieron relacionadas a unas meras descripciones estadísticas y coligadas a propiedades un tanto "indeseables". Es cierto que para sistemas de un gran número de componentes elementales, como es el caso de la mayoría de los sistemas termodinámicos macroscópicos, el valor de las fluctuaciones es pequeño y muchas veces intrascendente en la mecánica estadística del equilibrio.

La genialidad de Einstein fue considerar las fluctuaciones  $\overline{\varepsilon^2}$  en un sistema donde fuera relevante su valor y posible realizar su medición, a la vez que permitiera determinar la constante  $\chi$ . El sistema no fue otro que la radiación del cuerpo negro, y la argumentación la brinda el propio Einstein en su artículo:

"Si se considera la radiación térmica en un espacio vacío de dimensiones lineales muy grandes comparadas con la longitud de onda correspondiente al máximo de energía radiada a determinada temperatura, el valor de las fluctuaciones de la energía media será muy pequeño en comparación con la energía media de la radiación en ese espacio. En contraste, si las dimensiones del espacio son del orden de la longitud de onda, la fluctuaciones de la energía serán del mismo orden de magnitud que la energía de la citada radiación".

Con estas consideraciones Einstein encuentra que:

$$\overline{\varepsilon^2} = \overline{E^2} \quad (4)$$

El valor de  $\overline{E^2}$  lo obtuvo a partir de la ley de Stefan-Boltzmann

$$\overline{E} = cVT^4 \quad (5)$$

donde V es el volumen en  $\text{cm}^3$  de la cavidad que contiene a la radiación y c es una constante, cuyo valor es  $7,06 \cdot 10^{-15} \text{ erg/k.cm}^3$ . Einstein sustituyó las ecuaciones. (4) y (5) en ecuación (2), obteniendo:

$$\sqrt[3]{V} = \frac{2 \cdot \sqrt[3]{\chi}}{T} = \frac{0,42}{T} \quad (6)$$

donde las constantes  $\chi$  y c se sustituyeron por sus valores. Si  $\lambda_m$  la longitud de onda correspondiente al

máximo de energía radiada es  $\approx \sqrt[3]{V}$ , el resultado de ecuación (6) es cercano a:

$$\lambda_m = \frac{0,293}{T} \quad (7)$$

la ley del desplazamiento de W. Wien (1864-1928), comprobada experimentalmente por aquella época\*. Este fue un resultado asombroso y que apoyaba la hipótesis de Einstein de utilizar la radiación del cuerpo negro como sistema termodinámico para estudiar las fluctuaciones. En el final del artículo, él escribía:

"Ello demuestra que, mediante la teoría molecular general del calor, no sólo se puede determinar la dependencia de  $\lambda_m$ , respecto a la temperatura, sino también su orden de magnitud, y yo creo que, dada la gran generalidad de nuestras hipótesis, la concordancia no debe ser atribuida a la casualidad".

Lo primero a destacar en este párrafo es la honestidad de Einstein. En la triada de artículos reseñados, siempre escribió en tercera persona, pero aquí escribe en primera persona para resaltar que no cree en la casualidad de este resultado y además que se responsabiliza totalmente con las conclusiones.

Por supuesto, no era muy convincente para aquella época aceptar volúmenes del orden de  $\lambda^3$  ( $\sim 1 \mu\text{m}^3$ ), cuando en la termodinámica siempre se pensaba en volúmenes macroscópicos y por lo tanto continuaron sin aceptación las fluctuaciones. Pero con estas ideas, veinte años más tarde, Einstein estaba preparado para aceptar el nuevo espacio de fase de S. Bose (1894-1974) y a desarrollar la nueva estadística cuántica.

### III. EL ARTÍCULO DE 1905 [1]

En los antecedentes se evidencia como Einstein se encaminaba en su proyecto de investigación a determinar los componentes elementales de la radiación electromagnética del cuerpo negro e independiente de las ideas de Planck. La esencia del artículo de 1905 es mostrar la conclusión de su programa, esto es, que la energía del haz luminoso está discontinuamente distribuida en el espacio. Una vez más, Einstein expone brillantemente en la introducción los objetivos que perseguía. Aunque en verdad merece una cita completa, por cuestión de espacio sólo se reproducirán dos párrafos de la introducción:

\*Si emplean los valores actuales de las constantes de Boltzmann, Stefan-Boltzman y de Wien las ecuaciones 6 y 7 tienen mayor concordancia.

“La teoría ondulatoria de la luz, que opera con funciones espaciales continuas, ha funcionado bien al nivel de fenómenos puramente ópticos y probablemente nunca será sustituida por otra teoría. Debería tenerse presente, no obstante, que las observaciones ópticas están relacionadas a promedios temporales más que a valores instantáneos. A pesar de la total confirmación experimental de la teoría cuando se aplica a la difracción, reflexión, refracción, dispersión, etc., resulta que la teoría de la luz que opera con funciones espaciales continuas puede presentar contradicciones con la experiencia cuando se aplica a fenómenos de emisión y transformación de la luz.

Me parece que las observaciones asociadas a la radiación del cuerpo negro, a la fluorescencia, a la producción de rayos catódicos por luz ultravioleta y otros fenómenos parecidos relacionados con emisión o transformación de la luz se entienden más propiamente si se supone que la energía de la luz está discontinuamente distribuida en el espacio. De acuerdo con la hipótesis que vamos a admitir en este trabajo, la energía de un rayo de luz que emerge de un foco puntual no está continuamente distribuida sobre un espacio cada vez mayor, sino que consiste en un número finito de quanta de energía que están localizados en puntos del espacio, que se mueven sin dividirse y que únicamente pueden ser producidos y absorbidos en unidades completas”.

Dos aspectos de vital trascendencia resaltan de inmediato en esta introducción. Primero, el concepto de quanta de energía de Einstein es muy diferente al de Planck, éste comprende a toda la radiación luminosa y no sólo a la absorción o emisión de los resonadores de la cavidad. Segundo, Einstein deja intacta la validez de la teoría ondulatoria de la luz para explicar fenómenos ópticos como difracción, reflexión, etc. Es casi la idea actual de la unidad onda-partícula para explicar el comportamiento de la luz. Otro aspecto importante de la introducción y que ha sido su hilo conductor, es la referencia al carácter de promedio temporal asociado a las observaciones ópticas que permitiría a Einstein introducir el cálculo de los valores medios de las magnitudes ópticas utilizando la mecánica estadística y relacionarlos, como hizo antes en los artículos precedentes, con los valores experimentales. Entonces su programa utilizando la mecánica estadística queda establecido, primero encontrar los componentes elementales de la radiación del cuerpo negro y explicar posteriormente de la manera más convincente su interpretación física.

El artículo de 1905, aparte de la introducción contiene nueve secciones, la primera, Einstein la intituló “Sobre una dificultad en la teoría de la radiación del cuerpo negro” y se refirió al tratamiento clásico de la radiación que Planck había utilizado en su artículo de 1900 [10]. En esta sección se

consideró un sistema clásico, una cavidad con paredes perfectamente reflectoras y conteniendo moléculas de gas, electrones libres, ligados que sufren colisiones, emitiendo y absorbiendo radiación electromagnética. Bajo esas consideraciones Einstein planteó que si existe el equilibrio dinámico y no se ponen limitaciones a las frecuencias de los osciladores la radiación de dicho espacio debe ser idéntica a la radiación del cuerpo negro. El equilibrio entre el gas y los osciladores, Einstein lo describió mediante el principio de equipartición de la energía y entonces el valor de la energía media de un oscilador viene dada por:

$$\bar{E} = \frac{R}{N} T \quad (8)$$

donde R es la constante universal de los gases y N el número de Avogadro (aunque Einstein nuevamente no identifica la constante por ese nombre).

La electrodinámica clásica había determinado el valor de la energía media para un oscilador de frecuencia  $\nu$  cuando se establecía el equilibrio entre los osciladores y la radiación electromagnética dentro de la cavidad. Esta expresión fue también utilizada en el artículo de Planck, a saber:

$$\bar{E}_\nu = \frac{L^3}{8\pi\nu^2} \rho_\nu \quad (9)$$

donde L es velocidad de la luz en el vacío y  $\rho_\nu d\nu$  es la energía por unidad de volumen de la radiación con frecuencia comprendida en el intervalo  $(\nu, \nu + d\nu)$ . Einstein entonces igualó las ecuaciones 8 y 9 ya que el equilibrio en la cavidad impone tal condición:

$$\frac{R}{N} T = \bar{E} = \bar{E}_\nu = \frac{L^3}{8\pi\nu^2} \rho_\nu, \quad (10)$$

$$\rho_\nu = \frac{R}{N} \frac{8\pi\nu^2 T}{L^3}$$

Einstein expresó su inconformidad con este resultado porque no sólo no coincidía con la experiencia práctica sino que también resultaba incongruente por la divergencia de energía en todo el espectro de frecuencia, como a continuación demostró:

$$\int_0^\infty \rho_\nu d\nu = \frac{R}{N} \frac{8\pi}{L^3} T \int_0^\infty \nu^2 d\nu = \infty \quad (11)$$

La aplicación del principio de equipartición de la energía fue un paso consecuente en su programa de investigación, de claro carácter mecánico-estadístico, del cual por supuesto Planck en su trabajo no hizo mención alguna y por lo tanto

no alcanzó la expresión (10) ni vislumbrar la consecuencia de la ecuación (11). De manera que en este primer apartado Einstein demuestra que si la mecánica estadística presupone la validez de la ecuación (8), la electrodinámica clásica de Maxwell establece la ecuación (9) no existe alternativa desde el punto de vista clásico que no se conduzca a la catástrofe ultravioleta. Como se verá, Einstein recurre nuevamente a la mecánica estadística para resolver la contradicción.

En el segundo apartado Einstein estudia el significado de las constantes en la expresión de Planck para  $\rho_v$ , esto es:

$$\rho_v = \frac{\alpha v^3}{\frac{\beta v}{e^{\frac{v}{T}} - 1}} \quad (12)$$

donde,  $\alpha = 6.10 \cdot 10^{-56}$  y  $\beta = 4.866 \cdot 10^{-11}$ \*. Para el caso de longitudes de ondas largas y altas temperaturas, la ecuación (12) se transforma en:

$$\rho_v = \frac{\alpha}{\beta} v^2 T \quad (13)$$

Entonces igualando las ecuaciones (10) y (12), halla el valor de N a partir de las constantes de Planck,  $\alpha$  y  $\beta$ , coincidiendo su valor con el reportado experimentalmente. De esta forma Einstein demuestra que el principio de equipartición de la energía está implícitamente contenido en la función de Planck, es decir su línea de investigación contiene la expresión de Planck.

En el epígrafe 3, Einstein nuevamente aborda el cálculo de la entropía, esta vez el sistema que estudia es la radiación electromagnética. En un tratamiento muy formal, se relacionan los conceptos de energía, temperatura y entropía, a través de una función  $\varphi(\rho, v)$ , mediante la cual es posible recabar tanto la entropía como la temperatura:

$$S = V \int_0^{\infty} \varphi(\rho, v) dv \quad (14)$$

$$\frac{d\varphi}{d\rho} = \frac{1}{T}$$

donde nuevamente,  $v$  es la frecuencia,  $\rho$  es la densidad espectral de la radiación y  $V$  el volumen donde se encuentra contenida.

Einstein opera en el epígrafe 4 de forma inversa a como lo haría en artículos subsiguientes. A partir de una densidad espectral de la radiación, determina la

función  $\varphi(\rho, v)$  y posteriormente encuentra el valor de la variación de la entropía. Es decir, conocido el resultado macroscópico ( $\rho$ ), se calcula la entropía del sistema e inmediatamente lo esencial, obtener información sobre los *componentes elementales* de la radiación. Lo sorprendente para este autor, es que Einstein en su cálculo no utilizara la Ley de Planck sino la ley de Wien:

$$\rho = \alpha v^3 e^{-\beta \frac{v}{T}} \quad (15)$$

donde  $\alpha$  y  $\beta$  son constantes de ajuste entre los valores experimentales y teóricos. Para justificar su elección, Einstein escribe:

“De los experimentos sobre la radiación del cuerpo negro es claro que la ley postulada por Wien no es exactamente válida. Sin embargo, para grandes valores de  $v/T$ , ha sido bien confirmada experimentalmente. Basaremos nuestro análisis en esta fórmula, teniendo en cuenta que nuestros resultados sólo serán válidos dentro de ciertos límites”.

¿Por qué Einstein no empleó la Ley de Planck, si ésta no tenía las limitaciones de la Ley de Wien y además había sido verificada experimentalmente? La respuesta no puede si quiera especularse, pero lo que es bien conocido, que Planck para alcanzar la ley de la radiación del cuerpo negro, empleó una metodología termodinámica, y asumió una hipótesis cuántica ad hoc, sin investigar su coherencia con el resto de la física. A diferencia, Einstein desarrolló un programa basado en la mecánica estadística que partiendo de la ley de Wien arribó a su objetivo final, esto es, la determinación de los componentes elementales de la radiación. Einstein escribía un año después (1906), en una de sus célebres introducciones:

“Entonces, la teoría de la radiación de Planck me parecía, de alguna manera, opuesta a la de mi trabajo. Sin embargo, nuevos motivos, los cuales presentamos en la primera sección de este trabajo, me han convencido, de que las bases teóricas sobre lo que se funda la teoría de la radiación de Planck son diferentes de las de la teoría de Maxwell y de la teoría de los electrones. Y precisamente, la diferencia radica en que la teoría de Planck se sirve implícitamente de la hipótesis del cuanto de luz que nosotros hemos introducido” [11].

Regresando a los cálculos, Einstein a partir de la ley de Wien encontró por el método anteriormente descrito, la variación de la entropía de la radiación del cuerpo negro ante un cambio de volumen de la cavidad a energía constante  $E$ , a saber:

\*Nuevamente aparecen las constantes sin unidades.

$$S - S_0 = \frac{E}{\beta v} \ln \left( \frac{V}{V_0} \right) \quad (16)$$

Justo a continuación escribe:

“Esta ecuación muestra que la entropía de la radiación monocromática de densidad suficientemente baja varía con el volumen de la misma forma que lo hace la entropía de un gas ideal o de una solución diluida. En lo adelante, esta ecuación se interpretará de acuerdo al principio introducido en física por Boltzmann, según el cual la entropía de un sistema es una función de la probabilidad de su estado”.

Con esto, Einstein dejaba bien claro sus propósitos de emplear un enfoque mecánico-estadístico, de manera que el quinto epígrafe lo dedicó a resolver un problema típico que hoy aparece en muchos textos, esto es, el cálculo de la variación de la entropía de un gas ideal con  $n$  moléculas y energía constante en dependencia de su volumen. Así, Einstein encontró:

$$S - S_0 = R \frac{n}{N} \ln \left( \frac{V}{V_0} \right) \quad (17)$$

Comparando las ecuaciones 16 y 17, Einstein plantea su hipótesis sobre los cuantos:

“La radiación monocromática de baja densidad (dentro del rango de validez de la ley de radiación de Wien) se comporta termodinámicamente como si estuviera constituida por cuanto de energía mutuamente independientemente de valor  $R\beta v/N$ ”.

Es decir, las ecuaciones 15 y 16, son análogas en dependencia, una describe la variación de entropía en función del volumen de un gas ideal, el cual como se sabe está constituido por *componentes elementales*, sus moléculas, en tanto la otra describe la variación de entropía de una radiación monocromática de baja densidad y entonces por analogía la radiación debe también tener sus *componentes elementales*, los cuantos.

Como se ha resaltado, el método mecánico-estadístico fue aplicado por Einstein en su triada de trabajos de 1902-04 al estudio de los gases, en particular al gas ideal, en donde los componentes elementales eran moléculas que cumplen las leyes del movimiento de Newton, logrando explicar desde un nivel microscópico los principales conceptos de la entropía de los sistemas termodinámicos. De tal manera que fue el gas ideal el sistema apropiado para encontrar analogías y al tiempo justificar el enfoque mecánico-estadístico de un sistema tan diferente por aquel entonces como lo es la radiación del cuerpo negro.

Por supuesto la idea de Einstein sobre los cuantos no podría estar basada en la inspiración de ecuaciones análogas; seguramente él tenía el convencimiento físico de que la radiación electromagnética estaba constituida por componentes elementales y el camino fue la interpretación de la entropía desde un punto de vista microscópico. Pero la idea de los cuantos no podría ser remotamente aceptada si no explicara fenómenos experimentales existentes y en su artículo de 1905 Einstein estudió tres de ellos: la regla de Stokes, la emisión de rayos catódicos por iluminación de cuerpos sólidos (efecto fotoeléctrico) y la ionización de gases por luz ultravioleta.

#### IV. EL EFECTO FOTOELÉCTRICO

De los tres hechos experimentales que estudió Einstein para justificar su teoría de los cuantos, sólo se presentará el efecto fotoeléctrico, y esto por dos razones fundamentales, una en aras de no extender en demasía el presente artículo y la otra, por la trascendencia e importancia que alcanzó con el tiempo.

La primera vez, el efecto fotoeléctrico fue presentado por P. Lenard [12], reportando que cuando se ilumina una superficie metálica, la energía de los electrones emitidos resulta independiente de la intensidad de la radiación. Es bien conocido, la forma en que Einstein explica este fenómeno a partir de su teoría de los cuantos, pero lo que resalta de manera asombrosa es que la gran mayoría de los actuales textos prácticamente utilizan las mismas palabras que empleó Einstein: la radiación luminosa constituida de cuantos de energía  $(R/N)\beta v$ , incide sobre la superficie del metal y cada cuanto interactúa con un único electrón, cediéndole la energía para extraerlo del metal y para que alcance una energía cinética. Einstein escribió entonces, que la energía cinética de cada electrón es igual a  $(R/N)\beta v - P$ , donde  $P$  es el trabajo que realiza el electrón para atravesar la superficie. Después de relacionar la energía cinética de los electrones con el potencial  $\Pi$  aplicado entre la superficie catódica metálica y un electrodo anódico, arribó a su famosa ecuación:

$$\Pi \varepsilon = \frac{R}{N} \beta v - P \quad (18)$$

donde  $\varepsilon$  es la carga del electrón. Inmediatamente, utilizando los valores de la carga del ion, Einstein comparó su ecuación (18), con los resultados experimentales que había reportado Lenard, observando coincidencia en el “orden de magnitud”. Inmediatamente propone que en una gráfica de  $\Pi$  versus  $v$  se obtendrá una recta cuya pendiente no depende de las propiedades de la sustancia. A continuación escribía cautelosamente, en concor-

dancia con su enfoque heurístico: “Por todo esto, me parece observar que no existen contradicciones entre nuestras concepciones y las propiedades del efecto fotoeléctrico detectadas por Lenard”.

## V. EPÍLOGO

La teoría de los cuantos de Einstein se demoró en ser aceptada. Su fundamento teórico tenía poco sustento y considerar que la luz transportaba paquetes de energía significaba un gran desacato a toda teoría precursora. Un ejemplo de ello resalta cuando, apoyado por Planck y Nernst entre otros, en 1913 Einstein es promovido a miembro correspondiente de la Academia Prusiana, y en un párrafo de la presentación se puede leer:

“En suma, puede decirse que de los grandes problemas en que es tan rica la física moderna, difícilmente exista uno al que Einstein no haya hecho una contribución notable. Que alguna vez errara en el blanco en sus especulaciones, como por ejemplo en sus hipótesis sobre los cuantos de luz, no puede esgrimirse realmente demasiado en su contra, porque no es posible introducir ideas realmente nuevas, ni aun en las ciencias más exactas, sin correr a veces algún riesgo” [13].

Pero lo más significativo para este autor, fue el talante de Millikan, quien por más de diez años intentó demostrar que la ecuación 18 no era válida, pero contrario a sus pretensiones, en 1916 publicó un par de artículos con su aceptación [2,3], pero eso sí, sin someterse a su fundamento teórico. En ese año Millikan escribió:

“La ecuación fotoeléctrica de Einstein parece predecir exactamente en todos los casos los resultados observados. Pero la teoría semicorpuscular mediante la cual Einstein llegó a la ecuación parece hoy completamente insostenible”.... “A pesar del éxito aparentemente completo de la ecuación de Einstein, la teoría física, de la que estaba destinada a ser expresión simbólica, se halló tan insostenible, que el mismo Einstein, según creo, ya no la mantiene”.

Brevemente es necesario señalar que Einstein continuó ahondando en las ideas relativas a los cuantos de luz y en 1916-17 publica unos trabajos trascendentes donde deduce la ley de Planck y las leyes que gobiernan los procesos de absorción y emisión de la luz que sirvieron de fundamento teórico para la construcción del láser. De tal manera, que tanto el efecto fotoeléctrico como el efecto láser tienen sus cimientos en trabajos esencialmente teóricos, desarrollados por Einstein, la más pura ciencia básica, y hoy constituyen aplicaciones tecnológicas habituales de la vida moderna.

Es sabido que Einstein fue un detractor de la teoría cuántica, ya que no aceptaba el principio del indeterminismo y de aquí su celebre frase de que “Dios no juega a los dados”. Pero este sería otro acercamiento a Einstein y los cuantos, entonces valga sólo esta mención para concluir con sus palabras:

“Un total de cincuenta años de especulación consciente no me ha acercado a la respuesta a la pregunta: ¿qué son los cuantos de luz? Es cierto que hoy día cualquier bribón cree saber la respuesta, pero se equivoca” [15].

## VI. CONCLUSIONES

Una breve reseña histórica de los antecedentes que originaron las ideas de Einstein sobre los cuantos de luz se ha presentado en los epígrafes anteriores. A lo largo del presente trabajo se evidencia que fue la coherente concepción de un programa de investigación, independiente de las ideas de Planck, el que condujo a Einstein a la ley del cuerpo negro y al concepto de los cuantos de energía de la radiación luminosa. La descripción einsteniana, mecánica-estadística de la interacción radiación-sustancia conllevó a la búsqueda de posibles componentes elementales de la radiación electromagnética que Einstein los identificó como cuanto de energía localizados en el espacio.

## AGRADECIMIENTOS

El autor agradece la revisión crítica realizada por la profesora M. T. Pérez Maldonado.

## REFERENCIAS

- [1] EINSTEIN, A. (1905): “Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt”, **Ann. Phys.**, 17, 132.
- [2] MILLIKAN, R.A. (1916): “Einstein’s Photoelectric Equation and Contact Electromotive Force”, **The Physical Review**, 7, 18.
- [3] \_\_\_\_\_ (1916): “A Direct Photoelectric Determination of Planck’s Constant “h”, **Physical Review**, 7, 355.



- [4] NAVARRO VEGUILLAS, L. (1990): **Einstein profeta y hereje**, Tusquets Editores, Barcelona, 95.
- [5] KUZNETSOV, B. (1990): **Einstein Vida, Muerte, Inmortalidad**, Editorial Ciencias Sociales, La Habana, 35-42.
- [6] Ibid., pág 43-44.
- [7] EINSTEIN, A. (1902): "Kinetische Theorie des Wärmegleichgewichtes und des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik", **Ann Phys.**, 9, 417.
- [8] \_\_\_\_\_ (1903): "Eine Theorie der Grundlagen der Thermodynamik", **Ann Phys.**, 11, 170.
- [9] \_\_\_\_\_ (1904): "Zur allgemeinen molekularen Theorie der Wärme". **Ann Phys.**, 14, 351.
- [10] PLANCK, M. (1900): **Ann Phys.** 1, 99.
- [11] EINSTEIN, A. (1906): "Zur Theorie der Lichterzeugung und Lichtabsorption", **Ann Phys.**, 20, 199.
- [12] LENARD, P. (1902): **Ann Phys.**, 8, 169.
- [13] Citado por Navarro Veguillas, L. Ibid, véase pág. 111 y ref. pág, 25, 153.
- [14] Citado por Navarro Veguillas, L. Ibid, véase pág. 112.
- [15] Citado por Navarro Veguillas, L. Ibid, véase pág. 151 y ref.1 pág. 152.