

EL EFECTO FOTOELÉCTRICO

M.A. Rodríguez-Meza¹ y J.L. Cervantes-Cota
 Depto. De Física, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares
 Apdo. Postal 18-1027, México D.F. 11801, México

Resumen

Presentamos una revisión del trabajo de Albert Einstein de 1905 y por el cual se le otorgó el premio Nobel del año de 1921, es decir, del trabajo que popularmente se conoce como del efecto fotoeléctrico. Mostramos que para Einstein el trabajo en sí no era importante, sino que estaba interesado en entender los procesos de emisión y absorción de radiación por la materia. Veremos, también, que al entender la termodinámica de la radiación electromagnética en una cavidad en equilibrio térmico a una temperatura dada, Einstein pudo plantear su hipótesis de los cuantos la cual procedió a aplicar a tres fenómenos de interés en esos años, entre ellos el efecto fotoeléctrico.

Para comenzar

Cuando nos hablan de Einstein viene a nuestra mente la imagen del viejo genio con cabellera blanca, bigote tupido y mirada inteligente. Viene a nuestra mente el nombre de relatividad, tanto la *especial* con su famosa fórmula $E = mc^2$ y su consecuencia desastrosa, la bomba atómica, como la *general* con su predicción de la curvatura de la trayectoria de un haz luminoso al pasar cerca de el sol. Predicción corroborada espectacularmente en 1919 en ocasión de un eclipse de sol. Bueno, esta vez no hablaremos de eso, vamos a hablar de su artículo por el cual le fue concedido el premio Nobel de Física en el año de 1921, el *Efecto Fotoeléctrico*.

Hablaremos del efecto fotoeléctrico sí, pero en el contexto de lo que podríamos decir fue su línea de pensamiento, por cierto no muy conocida, que lo guió desde sus primeras investigaciones y hasta los años veintes. Este proyecto estuvo basado en su propia metodología mecánico estadística, donde por cierto introdujo el ensamble canónico y mostró la importancia de las fluctuaciones. Podríamos pensar que Einstein fue el padre de lo que hoy se conoce como teorema de fluctuación-disipación, esencial en la teoría de respuesta lineal.

El efecto fotoeléctrico se puede entender de manera sencilla como sigue. Si iluminamos una superficie metálica con un haz luminoso de frecuencia apropiada (por ejemplo, se ilumina sodio con luz a una frecuencia de 6×10^{14} /seg) se emiten electrones de la superficie. Esta

¹ Correo electrónico: mar@nuclear.inin.mx; Página web: <http://www.astro.inin.mx/mar>.

emisión de electrones desde la superficie por la acción de la luz se le denomina *efecto fotoeléctrico*.

¿A quién le interesaba el efecto fotoeléctrico?

A Albert Einstein el efecto no le interesaba en sí mismo, además de que su teoría por la primera década del siglo pasado provocaba serias críticas negativas. Por ejemplo, Planck, Nernst, Rubens, y Warburg escribieron en 1913: "...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 el blanco en sus especulaciones, como por ejemplo en su hipótesis de los *quanta* 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...". Por otro lado es importante resaltar el hecho de que uno de los autores de este comentario sea el propio Planck, quien a fin de cuentas introdujo por primera vez la idea de los cuantos de luz en sus trabajos sobre la radiación de cuerpo negro.

Al final de la década de los 1910's Einstein ya esperaba el premio Nobel, ya que él había sido propuesto por varios físicos desde 1910 para que se le otorgase esta distinción. Pero él esperaba este premio por sus contribuciones sobre la relatividad. La academia Sueca estaba confusa por las controversias causadas por la teoría de la relatividad. El físico Oseen propuso que se le otorgara el premio Nobel por su deducción del efecto fotoeléctrico. Recibió el premio de forma efectiva hasta 1923 pero el dinero pasó a manos de Mileva ya que este había sido comprometido en el contrato de divorcio firmado a principios de 1919: "...El dinero del hipotético Premio Nobel será para Mileva y mis hijos...", escribió en una carta dirigida a su amigo Michele Besso a mediados de 1918.

El efecto fotoeléctrico en la vida diaria

Es muy curioso que en los lugares menos esperados o sin que siquiera lo notemos, las ideas revolucionarias de Einstein están presentes. Las aplicaciones del efecto fotoeléctrico las encontramos en: Cámaras, en el dispositivo que gobierna los tiempos de exposición; en detectores de movimiento; en el alumbrado público; como regulador de la cantidad de tóner en las máquinas copiadoras; en las celdas solares muy útiles en satélites, calculadoras, y relojes. Las aplicaciones las encontramos, también, cuando asistimos a una función de cine ya que el audio que escuchamos es producido por señales eléctricas que son provocadas por los cambios de intensidad de la luz al pasar por la pista sonora que viene en la cinta cinematográfica. Pero es muy interesante que el efecto fotoeléctrico se aplica en los ¡alcoholímetros! en donde la reacción del alcohol con una sustancia de prueba provoca cambios de color los cuales son medidos por el dispositivo, la lectura nos permite entonces saber la concentración de alcohol en el individuo. Estamos inmersos en un mundo tecnológico que Einstein descubrió para nosotros.

¿Quién descubrió el efecto fotoeléctrico?

Se dice que fue observado por primera vez en 1839 en Francia [1]. Sin embargo, hoy día se atribuye el descubrimiento a Heinrich Hertz en 1887. Hertz descubrió el efecto fotoeléctrico por accidente, al tratar de probar la teoría de Maxwell sobre la radiación electromagnética, en esencia ondulatoria. ¡Qué contradicción! ya que fue la primera prueba experimental contundente a favor de la teoría de Maxwell pero a su vez abrió el camino para los experimentos que mostraron el carácter corpuscular de la luz. El experimento consistía en provocar una chispa con una bobina de inducción y detectar los efectos de la radiación electromagnética emitida observando la existencia de otra chispa entre las puntas de un alambre enrollado en forma de círculo y a cierta distancia del emisor. Para observar mejor la pequeña chispa en el receptor Hertz solía usar una cubierta oscura. Al hacerlo notó que la chispa cambiaba de longitud y bajo ciertas condiciones incluso desaparecía. Él concluyó acertadamente que la luz proveniente de la chispa emisora era la causante de este extraño fenómeno. De hecho con un prisma descompuso la luz del emisor y descubrió que la chispa en el emisor era más intensa al ser expuesta a la luz ultravioleta.

Alguién le sugirió Hertz usar ancas de rana como mecanismo detector de la radiación electromagnética. Así, este descubrimiento pudo no haber ocurrido si el uso de ancas de rana como receptores de la radiación electromagnética hubiera tenido éxito.

Otro físico experimental en Dresden, Wilhelm Hallwachs al año siguiente repitió el experimento con un arreglo experimental más simple. Lo que Hallwachs investigó fue el efecto de radiación electromagnética sobre objetos cargados negativamente. Hallwachs ciertamente clarificó mucho el fenómeno pero no dió más explicaciones sobre las posibles causas ni propuso ninguna explicación teórica. El efecto fotoeléctrico también suele ser llamado efecto Hallwachs.

Más de una década después J.J. Thomson probó que la luz ultravioleta, en los experimentos sobre el efecto fotoeléctrico, provocaba que las mismas partículas encontradas en los rayos catódicos fueran expulsadas del material, es decir, electrones. Ese mismo año Philipp Lenard, quien fuera estudiante de Hertz, comenzó una serie de experimentos sistemáticos que permitieron entender mejor este fenómeno de foto-emisión de electrones. Lenard, cargando una de las placas negativamente, agregó un potencial que tenía la función de oponerse al movimiento de los electrones foto-emitidos, el potencial de frenado, cuyo valor de umbral es la energía cinética máxima de los electrones fotoemitidos. Encontró que esta energía máxima no dependía de la intensidad del haz luminoso incidente, pero sí dependía de su frecuencia. Estos hallazgos experimentales fueron la razón por la que Albert Einstein en su famoso trabajo de 1905 citará a Lenard.

En 1905 a Lenard se le otorgó el premio Nobel en Física por sus trabajos sobre rayos catódicos y se podría decir que los trabajos de Lenard le valieron a Einstein el Nobel en 1921. Lenard paso de admirarle a detestarlo, e incluso formó parte en los años veintes de la sociedad anti-Einstein. Los miembros de esta sociedad decían que Einstein y sus teorías

formaban parte de un complot bolchevique, lo cuales habían llevado a la derrota a Alemania. Lenard por su lado decía que la física relativista era más “judía” que “bolchevique”. Por su lado los Marxistas decían que la relatividad era más bien una teoría idealista.

¿Quién comprobó la teoría de Einstein?

En 1912 Arthur Lewelyn Hughes, Owes William Richardson y Karl Taylor Compton demostraron experimentalmente el crecimiento lineal con la frecuencia de la energía cinética de los electrones fotoemitidos. Pero fue Robert Andrews Millikan quien midió, en 1916, tanto la frecuencia de la luz como la energía de los electrones emitidos, y obtuvo un valor de la constante de Planck en buen acuerdo con el obtenido en experimentos de radiación de cuerpo negro. Karl Taylor Compton fue el hermano mayor de Arthur Holly Compton, quien descubrió y explicó el efecto que lleva su nombre. Los resultados satisfactorios de los estudios del efecto Compton terminaron por dejar por sentado el carácter corpuscular de la radiación. Por su parte K.T. Compton estuvo posteriormente involucrado en el proyecto de la bomba atómica.

Millikan intentaba demostrar que la teoría de Einstein era incorrecta, ya que estaba a favor de la teoría de Maxwell y del carácter ondulatorio de las ondas electromagnéticas. Para esto realizó una serie de experimentos en donde puso todo su ingenio y destrezas experimentales. No lo consiguió, pero pudo medir con mucha exactitud la constante de Planck. De consolación se le otorgó el premio Nobel de Física correspondiente al año de 1923 por sus contribuciones al entendimiento del efecto fotoeléctrico.

¿Qué es el efecto fotoeléctrico?

Comunmente se considera que el efecto fotoeléctrico es la emisión de electrones de una superficie metálica cuando ésta es iluminada por luz. Un arreglo experimental para estudiar el efecto consiste de dos placas metálicas paralelas dentro de una botella a la que se le ha practicado vacío, ver diagrama en la Fig. 3. Estas placas son conectadas a un amperímetro y a una batería con un potenciómetro que permite no sólo variar el potencial entre las placas sino además su signo. El experimento se lleva a cabo iluminando la superficie del cátodo (emisor), y como resultado se mide una pequeña corriente eléctrica en el amperímetro. Si hay una lectura de corriente, entonces hubo transferencia de electrones de una placa a la otra. Posteriormente se varía el potencial entre las placas, lo cual modifica la intensidad de la corriente medida por el amperímetro. Cuando este potencial se hace negativo, oponiéndose al movimiento de los electrones, se encuentra que existe un potencial de umbral, V_0 , para el cual la corriente cesa. Este potencial multiplicado por la carga del electrón es la energía cinética máxima de los electrones foto-emitidos.

Básicamente los experimentos muestran que: (1) La energía cinética de los fotoelectrones son independientes de la intensidad de la luz; (2) La energía cinética máxima de los fotoelectrones, $K_{\max} = eV_0$, depende solamente de la frecuencia o longitud de onda de la radiación incidente; (3) La función de trabajo w_0 del material emisor determina la frecuencia de umbral de la luz que puede liberar a los electrones. (4) El número de fotoelectrones liberados es proporcional a la intensidad de la luz.

¿Qué nos dice la teoría clásica?

La teoría clásica establece los siguientes tres hechos. Primero, el vector eléctrico oscilante \mathbf{E} de la onda luminosa aumenta en amplitud conforme aumenta la intensidad del haz luminoso. La fuerza aplicada al electrón es $e\mathbf{E}$, entonces, la energía cinética de los fotoelectrones también debería aumentar de acuerdo con el aumento en intensidad del haz luminoso. Sin embargo, el resultado experimental dice que K_{\max} es independiente de la intensidad.

Segundo, según la teoría ondulatoria, el efecto fotoeléctrico debería ocurrir para cualquier frecuencia de la luz tomando en cuenta solamente que la intensidad de la luz sea lo suficientemente intensa como para dar la energía necesaria para emitir los fotoelectrones. Los resultados experimentales muestran que para cada tipo de superficie material existe una frecuencia de corte característica tal que por debajo de ésta el efecto fotoeléctrico no ocurre, sin importar la intensidad del haz luminoso.

Tercero, si la energía adquirida por un fotoelectrón es absorbida de la onda que incide sobre la placa de metal, el “área efectiva del blanco” para un electrón en un metal está limitada y probablemente no sea mucho mayor que un círculo de un diámetro atómico. En la teoría clásica la energía luminosa se encuentra uniformemente distribuida sobre el frente de onda. Entonces, si la luz es suficientemente débil existirá un tiempo de retraso mensurable entre el instante en que la luz empieza a incidir sobre la superficie y la expulsión del fotoelectrón. Durante este intervalo el electrón deberá absorber energía del haz hasta acumular la suficiente para escapar. Sin embargo, nunca se ha medido un tiempo de retraso.

Radiación de cuerpo negro y la catástrofe del ultravioleta

En su artículo de 1905[3] y que popularmente se conoce como su artículo sobre el efecto fotoeléctrico, Einstein estaba interesado en entender los fenómenos de absorción y emisión de la radiación por la materia. Señaló claramente la diferencia de estos con el caso de los fenómenos puramente ondulatorios, como la difracción o la reflexión de ondas electromagnéticas. Para entender estos fenómenos de interacción materia-radiación, Einstein tomó como caso de estudio la radiación de cuerpo negro en una cavidad, en particular estudió los cambios de entropía de la radiación al cambiar el volumen y comparó su expresión matemática con la correspondiente al cambio de entropía de un gas ideal al

cambiar el volumen contenedor. La similitud le llevó a postular su hipótesis de los *quanta* de luz, que veremos más adelante. Por lo tanto, y por completez debemos hablar sobre la radiación térmica de los cuerpos, en particular de los cuerpos negros y de la hipótesis e ideas de Planck, cosa que hacemos a continuación.

Un cuerpo por el hecho de estar a una temperatura T emite radiación térmica o *calor radiante*. Esta radiación es electromagnética cuya intensidad y longitud de onda predominante varía con la temperatura del cuerpo. Todos los cuerpos simultáneamente emiten y absorben radiación. Entre 1859-60 Gustav Kirchhoff había definido un *cuerpo negro* como un objeto que re-emite toda la energía radiante que incide sobre él; es decir, es tanto un perfecto emisor como un perfecto absorbedor de radiación. Por lo tanto debería de haber algo absoluto o universal en la radiación de cuerpo negro. Ya en 1890 varios experimentos y desarrollos teóricos fueron hechos para determinar su distribución espectral de energía – la curva que muestra cuanta energía radiante es emitida a diferentes frecuencias para una temperatura dada del cuerpo negro. Antes en 1879 Josef Stefan, un físico austriaco, había obtenido de manera empírica que la potencia total emitida en la radiación era proporcional a la cuarta potencia de la temperatura a la que se encuentra el cuerpo negro. Cinco años después Boltzmann la obtuvo teóricamente, y por esta razón a esta ley se le conoce como de Stefan-Boltzmann.

Otro paso importante fue dado por Wilhelm Wien, quien en 1894 con argumentos termodinámicos mostró que la densidad de energía, ε , del cuerpo negro satisface la relación

$$\varepsilon(\nu, T) = \nu^3 f\left(\frac{\nu}{T}\right)$$

donde la función $f(\nu/T)$ no se conoce, pero de la que se deduce la relación $\lambda_{\max} T = \text{cte}$, entre la longitud en donde ocurre la máxima emisión de radiación y la temperatura del cuerpo, conocida como la ley de desplazamiento de Wien. La ley de Stefan-Boltzmann también se puede deducir del espectro general de Wien haciendo la integral sobre todas las frecuencias y empleando un cambio de variable sencillo. Wien concluyó finalmente que la termodinámica no permitía hacer nada más. Lo más que avanzó fue en obtener que la función desconocida debía de ser

$$f\left(\frac{\nu}{T}\right) = \alpha e^{-\beta \nu / T}$$

Wilhelm Wien fue premio Nobel en 1911 por su ley de desplazamiento. Por otro lado Lord Rayleigh y James Jeans dedujeron otra relación para el espectro de energía del cuerpo negro

$$\varepsilon(\nu, T) = \frac{8\pi \nu^2}{c^3} kT$$

donde k es la constante de Boltzmann y c es la velocidad de la luz en el vacío. En la Fig. 1 mostramos los resultados experimentales a los que tuvimos acceso [2], y que fueron obtenidos por Coblentz en 1916. Hicimos el ajuste con el espectro Wien el cual muestra un buen acuerdo con los puntos experimentales. El espectro de Rayleigh-Jeans también está

dibujado y claramente muestra que falla para longitudes de onda corta. Esta falla fue denominada por Paul Ehrenfest como la *catástrofe del ultravioleta*.

A Planck le atrajo la fórmula deducida en 1896 por su colega Wilhelm Wien, y por su parte hizo varios intentos para obtener la ley de Wien sobre la base de la segunda ley de la termodinámica. Sin embargo, por Octubre de 1900 varios otros colegas experimentales, en el mismo instituto en el que trabajaba Wien, Otto Richard Lummer, Ernst Pringsheim, Heinrich Rubens, y Ferdinand Kurlbaum, habían encontrado evidencias definitivas de que la ley de Wien, aunque válida a altas frecuencias, fallaba a bajas frecuencias.

El 19 de Octubre de ese año, y previo a la reunión de la Sociedad Alemana de Física, Planck supo de estos resultados. Sabía como la entropía de la radiación debería depender matemáticamente de la energía en la región de altas frecuencias si la ley de Wien debería valer allí. También, vió cómo esta dependencia debería ser en la región de bajas frecuencias y que estuviera en acuerdo con los resultados experimentales. Con las dos expresiones Planck pudo adivinar cual podría ser la combinación más simple, y transformó el resultado en una fórmula que relacionaba la energía de la radiación con su frecuencia.

El resultado se conoce como la ley de radiación de Planck y resultó ser indisputablemente correcta. Para Planck ésto fue simplemente un afortunada corazonada. Si la debía tomar en serio, ésta debía ser obtenida de alguna manera de primeros principios. A esa tarea se dedicó inmediatamente y el 14 de Diciembre de 1900 tuvo éxito - pero a un costo muy alto. Había tenido que sacrificar una de sus creencias más preciadas, que la segunda ley de la termodinámica era una ley absoluta de la naturaleza. En vez, tuvo que aceptar la interpretación de Ludwig Boltzmann, de que la segunda ley era una ley estadística. Además, Planck tuvo que suponer que los osciladores que formaban parte del cuerpo negro debería absorber y emitir la energía radiante, no en forma continua, sino en forma de paquetes discretos de energía, llamados *cuantos*, cada uno conteniendo una energía $h\nu$, proporcional a su frecuencia. Distribuyendo estadísticamente estos cuantos sobre todos los osciladores presentes en el cuerpo negro Planck pudo derivar la fórmula que había obtenido antes con pura termodinámica. Al ajustar su ley a los experimentos encontró no sólo el valor numérico de h sino también los valores de la constante de Boltzmann (la constante fundamental en la teoría cinética de los gases y de la mecánica estadística), el número de Avogadro, y la carga del electrón. La pequeñez de la constante de Planck es lo que hace que en el mundo macroscópico no se manifiesten sus consecuencias, sólo bajo ciertas condiciones, como altas frecuencias en los experimentos de radiación de cuerpo negro. En la siguiente sección damos una explicación un poco más detallada de las ideas que siguió Planck.

La técnica computacional de Planck

¿Cuál fue la propuesta de Planck? Hablando coloquialmente podríamos decir que Planck fue el creador del método de la “cuchara” o que fue de los primeros en hacer uso de la

constante de “Wilson”, que en este caso es la constante h . Para dar la explicación de lo que Planck hizo, consideremos una cavidad con un agujero pequeño en comparación con sus dimensiones y que la conecta con el exterior, ver Fig. 1. Cualquier rayo de luz que penetre a la cavidad a través del agujero será muy probable que primero sea absorbido por las paredes antes que salga por el agujero, siendo este lo suficientemente pequeño. Por lo cual este sistema puede considerarse un buen modelo de cuerpo negro. Si calentamos las paredes de la cavidad de tal manera que su temperatura sea T tendremos procesos de emisión de radiación electromagnética por las paredes. Si la cavidad está en equilibrio térmico con la radiación en ella, la razón de emisión será igual a la de absorción y cualquier haz de radiación que logre salir por el agujero, tendrá el espectro de cuerpo negro. Para completar el marco de trabajo, démonos cuenta de que para determinar la densidad de energía, dos ingredientes son esenciales: (1) el número de modos en un intervalo de frecuencias y (2) La energía promedio asociada a ese modo, que para una cavidad en equilibrio térmico está dada por el teorema de equipartición de la energía, y que en nuestro caso es $\langle \epsilon \rangle = kT$. Haciendo esto y después de un procedimiento un tanto cuanto laborioso obtenemos el espectro clásico de Rayleigh-Jeans, el cual como ya vimos falla para frecuencias altas o longitudes de onda corta de la radiación.

Para resolver el problema de la discordancia de la teoría clásica con los resultados experimentales, Planck pensó que había que modificar de alguna manera el cálculo de la energía promedio por modo de radiación, la cual en términos de la distribución de Boltzmann,

$$P(\epsilon) = \frac{e^{-\epsilon/kT}}{kT}$$

se escribe como

$$\langle \epsilon \rangle = \frac{\int_0^{\infty} \epsilon P(\epsilon) d\epsilon}{\int_0^{\infty} P(\epsilon) d\epsilon}$$

Si hacemos las integrales obtenemos el resultado dado por el teorema de equipartición.

Entonces, la pregunta es, como modificar este cálculo para que obtengamos el espectro de radiación experimental. Después de varios cálculos numéricos, Planck concluyó que el procedimiento para calcular la energía promedio debía de hacerse siguiendo los pasos que se muestran en la Fig. 3. Es decir, hacemos una partición del eje de las energías en intervalos de igual tamaño $\Delta\epsilon$. Las integrales son, entonces, sustituidas por sumatorias. En el caso (a) de la Fig. 3, $\Delta\epsilon \ll kT$ y el área bajo la curva, que es $\langle \epsilon \rangle \approx kT$, en concordancia con el resultado clásico. En (b) de la Fig. 3, $\Delta\epsilon \approx kT$ se encuentra que $\langle \epsilon \rangle < kT$; y cuando $\Delta\epsilon \gg kT$ tenemos $\langle \epsilon \rangle \ll kT$, caso (c). Si uno supone que $\Delta\epsilon \propto \nu$, se ha construido un procedimiento por medio del cual a medida que la frecuencia aumenta el valor promedio de la energía disminuye y eventualmente se hace cero, lo cual evitaría la catástrofe del ultravioleta. Llevemos la idea a la práctica para obtener el espectro de radiación.

Queremos evaluar:

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon P(\varepsilon) \Delta \varepsilon}{\sum_{n=0}^{\infty} P(\varepsilon) \Delta \varepsilon}$$

Si $\varepsilon = 0, \Delta \varepsilon, 2\Delta \varepsilon, 3\Delta \varepsilon, \dots$, con $\Delta \varepsilon = h\nu$ (la hipótesis de los *cuantos*), obtenemos

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1},$$

que es el espectro de Planck para la radiación de cuerpo negro. La hipótesis de Planck es que la radiación es emitida y absorbida en cuantos de energía de tamaño $h\nu$.

Aplicación al espectro de radiación de cuerpo negro

Con esta técnica computacional Planck encontró la distribución de energías del espectro de radiación de cuerpo negro, la cual, si uno conoce por otros medios la constante de Boltzmann, sólo dependía de un parámetro, pero de carácter universal. Y es que una vez que fue ajustado a un experimento este valor hizo que el espectro de radiación teórico encajara perfectamente en todos los espectros observados experimentalmente. En la Fig. 4 mostramos el ajuste que nosotros obtuvimos al espectro de radiación experimental de Coblentz. El valor obtenido por Coblentz de la constante de Planck fue de 6.57×10^{-34} Joules-seg, nosotros obtuvimos el valor 6.59×10^{-34} Joules-seg. Planck en su trabajo original de 1900 reportó el valor 6.63×10^{-34} Joules-seg, que es muy cercano al valor actual. La diferencia puede entenderse, ya que nosotros ajustamos a experimentos diferentes a los que Planck aplicó su teoría, sin embargo, el acuerdo es muy razonable.

El artículo de 1905

En 1905 Einstein publicó cinco artículos, todos ellos trascendentales, pero sólo a uno de ellos lo calificó como revolucionario, y éste fue su trabajo *Sobre un punto de vista heurístico referente a la emisión y la transformación de la luz* que apareció en Annalen der Physik en su volumen 17 y recibido el 18 de Marzo por la revista[3]. En este trabajo Einstein da muestras de su dominio sobre las ideas mecánico estadísticas. Después de revisar la teoría de Wien sobre la radiación de cuerpo negro muestra, usando el espectro obtenido por Wien, que el cambio en la entropía de la radiación de frecuencia ν en la cavidad, al cambiar el volumen de V al volumen V_0 , está dado por

$$S - S_0 = \frac{\varepsilon}{\beta \nu} \ln\left(\frac{V}{V_0}\right)$$

Hace, entonces, un cálculo, que hoy día es estándar en mecánica estadística, el cual consiste en obtener el cambio en la entropía de un gas ideal compuesto por n moléculas y energía constante al cambiar su volumen de V a V_0 . La expresión que obtuvo es

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

donde R es la constante de los gases y N el número de Avogadro. Este par de hechos muestran que la entropía de la radiación monocromática a una frecuencia ν de densidad suficientemente baja en una cavidad se comporta ante cambios de volumen como un gas ideal de moléculas. Entonces, da el paso revolucionario y postula: La radiación monocromática de baja densidad se comporta termodinámicamente como si estuviera constituida por *quanta* de energía, mutuamente independientes, de valor $R\beta\nu/N$, que es equivalente a $h\nu$ en nuestra notación actual. Así, supuso que los quanta o paquetes de energía están localizado inicialmente en un volumen pequeño especial y que así se mantienen mientras se mueven apartándose de la fuente con velocidad c .

Hasta aquí Einstein había revisado el fenómeno de radiación de cuerpo negro y había llegado a la conclusion anterior. Faltaba entonces ejercitar su teoría. Para esto considero tres problemas no explicados por la teoría clásica y de actualidad en esos años: La regla de Stokes, el efecto fotoeléctrico y la ionización de gases por luz ultravioleta. Como podemos ver y hay que señalarlo, a pesar de la creencia popular, la explicación del efecto fotoeléctrico no era la principal motivación de Einstein en este trabajo. El objetivo de Einstein era comprender como está constituida la radiación, en particular, cuando ésta está expuesta a fenómenos de absorción o de emisión, es decir, cuando ésta interacciona con la materia. Entendido ésto la explicación del efecto fotoeléctrico se explica invocando al principio de conservación de la energía.

Por lo tanto, en el efecto fotoeléctrico, un quantum cede toda su energía, $h\nu$, a un electrón. Una parte de esta energía se traduce en el trabajo necesario para sacar al electrón del metal, w y la parte restante se traduce en energía cinética, esto es,

$$K = h\nu - w$$

y la energía cinética maxima es

$$K_{\max} = h\nu - w_0$$

donde w_0 es una energía característica del metal conocida como función de trabajo, la cual es la energía mínima necesaria para que el electron pase a través de la superficie del metal y escape a las fuerzas atractivas que lo mantienen fijo al metal. Recordando que $K_{\max} = eV_0$, i.e., al trabajo necesario que hay que realizar para frenar a los electrones, tenemos que

$$V_0 = \frac{h}{e} \nu - \frac{w_0}{e}$$

donde e es la carga del electrón.

En la Fig. 5 mostramos los datos experimentales obtenidos por Millikan en 1916 en experimentos del efecto fotoeléctrico[2]. Son mediciones del potencial de frenado V_0 versus la frecuencia para el caso de sodio. Hemos hecho el ajuste con la ley del efecto fotoeléctrico de Einstein y obtuvimos que la constante de Planck es 6.37×10^{-34} Joules-seg, mientras que el valor que encontró Millikan es 6.2×10^{-34} Joules-seg. Millikan hizo un análisis más cuidadoso y de éstos y otros datos encontró el valor 6.57×10^{-34} Joules-seg con una precisión de 0.5%. Comparando este valor con el obtenido de ajustar los experimentos de radiación de cuerpo negro vemos que el acuerdo es muy sorprendente. El valor actual de la constante de Planck obtenido por diversos experimentos es $6.62606876 \times 10^{-34}$ Joules-seg[4].

Comentarios finales

¿Cuál es la comparación entre las ideas de Planck y Einstein? Planck analizó la radiación de cuerpo negro comenzando con un punto de vista termodinámico y obtuvo su espectro teórico. Su concepción de los cuantos fue que la radiación se emitía como cuantos de energía pero se propagaba en la cavidad como ondas. En cambio Einstein desde un principio adoptó un punto de vista mecánico estadístico y señaló la importancia de las fluctuaciones. Además, postuló que los cuantos de radiación se emitían como cuantos y como cuantos localizado en el espacio se propagaban en la cavidad. De hecho Planck escribió sobre su hipótesis: "...Se trataba de una hipótesis puramente formal y ciertamente yo no le dediqué mucha atención; lo único que me interesaba, a toda costa, era llegar a un resultado positivo...". Einstein, no tuvo esta visión y fué más allá estudiando las consecuencias de su postulado, lo que lo llevó a aplicarlo a situaciones que no tenían nada que ver el fenómeno de radiación del cuerpo negro, como el ya señalado efecto fotoeléctrico.

Planck tenía 42 años cuando propuso su teoría de los cuantos y jugó un papel menor en el desarrollo posterior de la física cuántica. Einstein era un joven de 26 años y siguió estudiando los fenómenos de interacción materia-radiación. Así, en 1916 publicó su trabajo que sentó las bases teóricas del laser. En 1924, y habiendo conocido la demostración, hecha por Satyendra Nath Bose, del espectro de Planck considerando a los fotones como partículas indistinguibles, extendió estas ideas estadísticas a partículas materiales y predijo la condensación de un gas ideal de bosones, ahora conocida como la condensación de Bose-Einstein.

Podemos pensar que cinco revoluciones ha habido en la historia de la física. (1) La de los griegos - geometría euclídea, cuerpos rígidos y las configuraciones estáticas; (2) la mecánica de Galileo-Newton; (3) La teoría del campo electromagnético de Maxwell-Faraday; (4) La mecánica cuántica; (5) La relatividad (especial y general). Einstein participó en dos, la que cambió nuestros conceptos sobre el espacio y el tiempo, y la que

nos hizo ver la naturaleza unificada de la materia y la radiación (el comportamiento onda-corpúsculo en ambos casos). ¿Qué clase de físico fue para ser capaz de lograr esto? Era un físico con una comprensión e intuición física profunda de la naturaleza, sabía que su desarrollo debería ser guiado por cuestiones de simplicidad (no trivialidad) y alta simetría. Comprendía casi todas las áreas relevantes de la física clásica, la mecánica, el electromagnetismo, y la termodinámica, y estaba muy al tanto de los desarrollos en física estadística y teoría cinética. Sabía que la naturaleza se dividía en dos clases de sistemas físicos: materia y radiación. Y que para entenderlos deberíamos saber cuáles eran los constituyentes elementales en el caso dado, y como éstos interactuaban entre ellos mismos y con el medio ambiente, y como podíamos extraer la información observable o medible a partir de promedios estadísticos de la información detallada de los constituyentes.

Referencias

- [1] P. Yam, Scientific American, **291**, 34 (2004).
- [2] R. Eisberg y R. Resnick, Física Cuántica (Limusa, México, D.F., 1983).
- [3] A. Einstein, Ann. d. Phys. **17**, 132 (1905).
- [4] National Institute of Standards and Technology (<http://physics.nist.gov/cuu>).

Lista de Figuras

- Fig. 1. Cavidad de cuerpo negro.
- Fig. 2. Espectro de radiación de un cuerpo negro a $T = 1595^\circ\text{K}$. Datos experimentales de Coblentz[2]. La densidad de energía radiante está en Joules/m³-m. Se muestran también las curvas teóricas de los espectros de Wien y de Rayleigh-Jeans. La teoría clásica de Rayleigh-Jeans claramente falla en la región de longitudes de onda corta.
- Fig. 3. Se muestra el ajuste que da la teoría de Planck. El valor de la constante de Planck, que mejor ajusta a estos experimentos es: $h = 6.59 \times 10^{-34}$ Joules - seg.
- Fig. 4. Diagrama esquemático para detectar el efecto fotoeléctrico.
- Fig. 5. Cálculo del promedio de la energía (a) cuando la discretización es pequeña comparada con kT . (b) Cuando es del orden de kT . (c) Cuando es mayor que kT . Las flechas indican la posición del promedio de la energía y del valor kT . En (a) casi coinciden; en (b) el promedio se desplaza a la izquierda del valor kT ; y en (c) se desplaza aun más, siendo casi cero.
- Fig. 6. Se muestran los datos experimentales obtenidos por Millikan, en 1916, del efecto fotoeléctrico[2]. Están, también mostrados la curva teórica predicha por Einstein, la frecuencia de corte y el valor de la función de trabajo del metal. El valor de la constante de Planck que se obtuvo del ajuste es: $h = 6.37 \times 10^{-34}$ Joules - seg.

Lista de fotos

1. Albert Einstein
2. Heinrich Hertz
3. Wilhelm Hallwachs
4. Philipp Lenard
5. Robert Andrews Millikan
6. Gustav Robert Kirchhoff
7. Rayleigh (John William Strutt, 3er. Barón).
8. Sir James Jeans
9. Wilhelm Wien
10. Max Planck

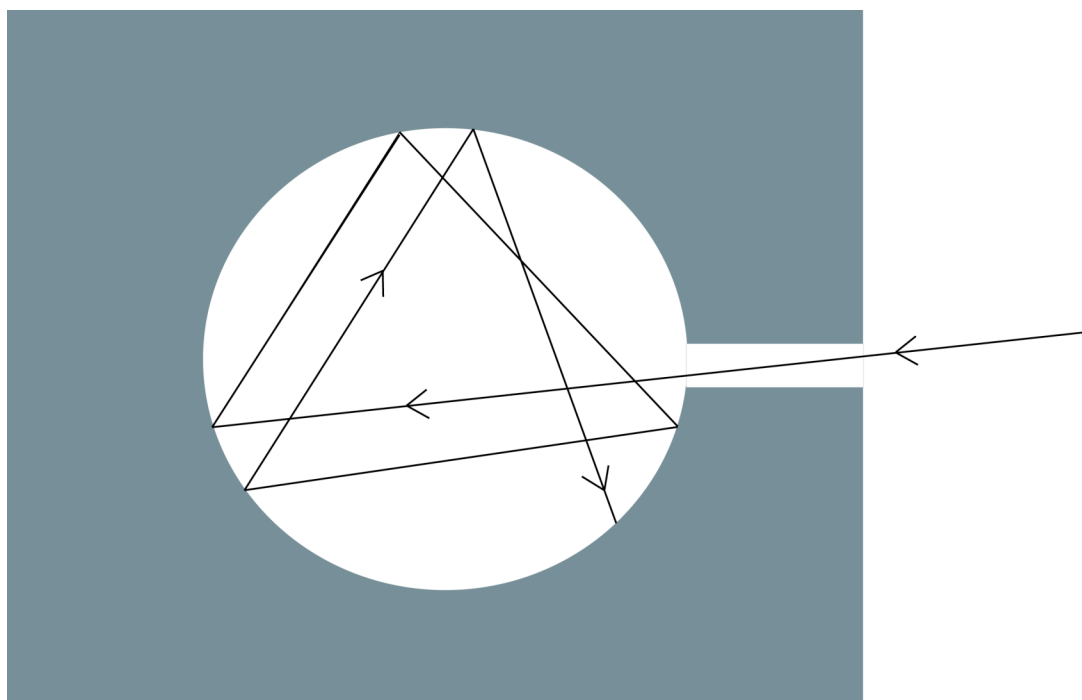


Fig. 1.

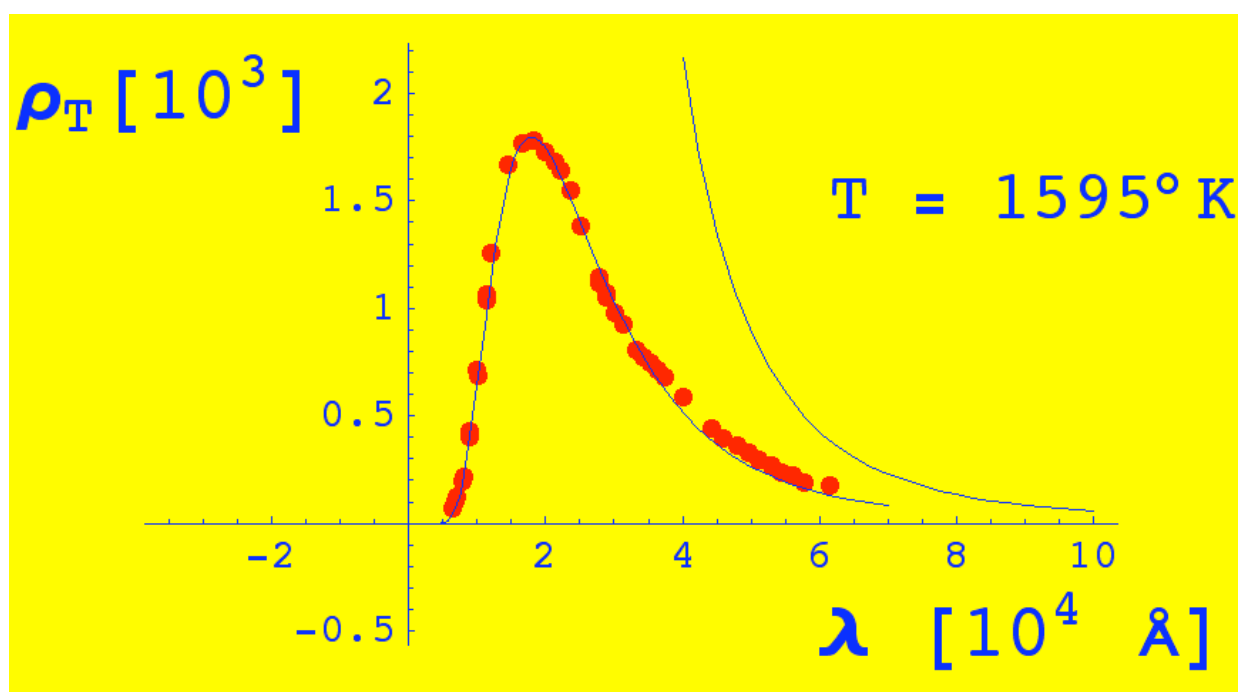


Fig. 2.

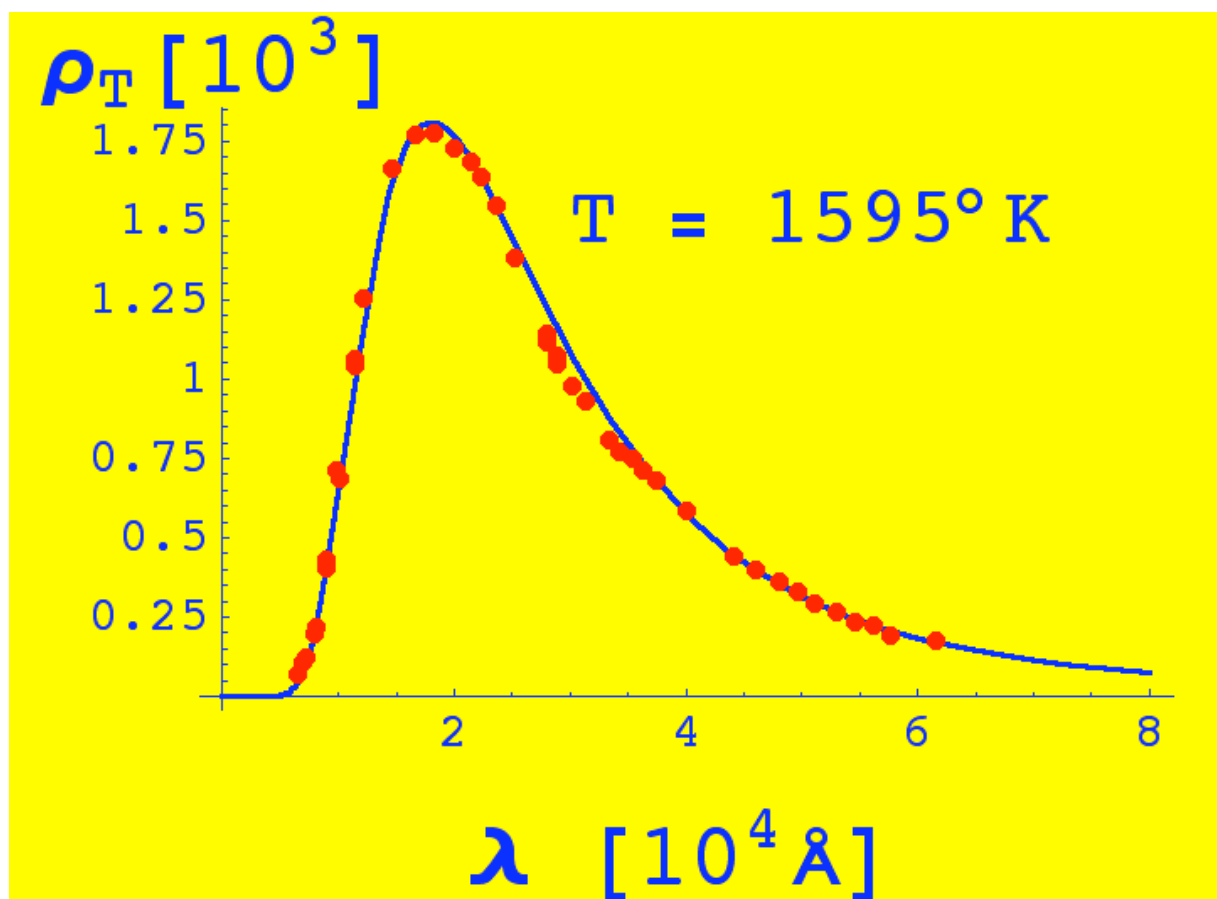


Fig. 3.

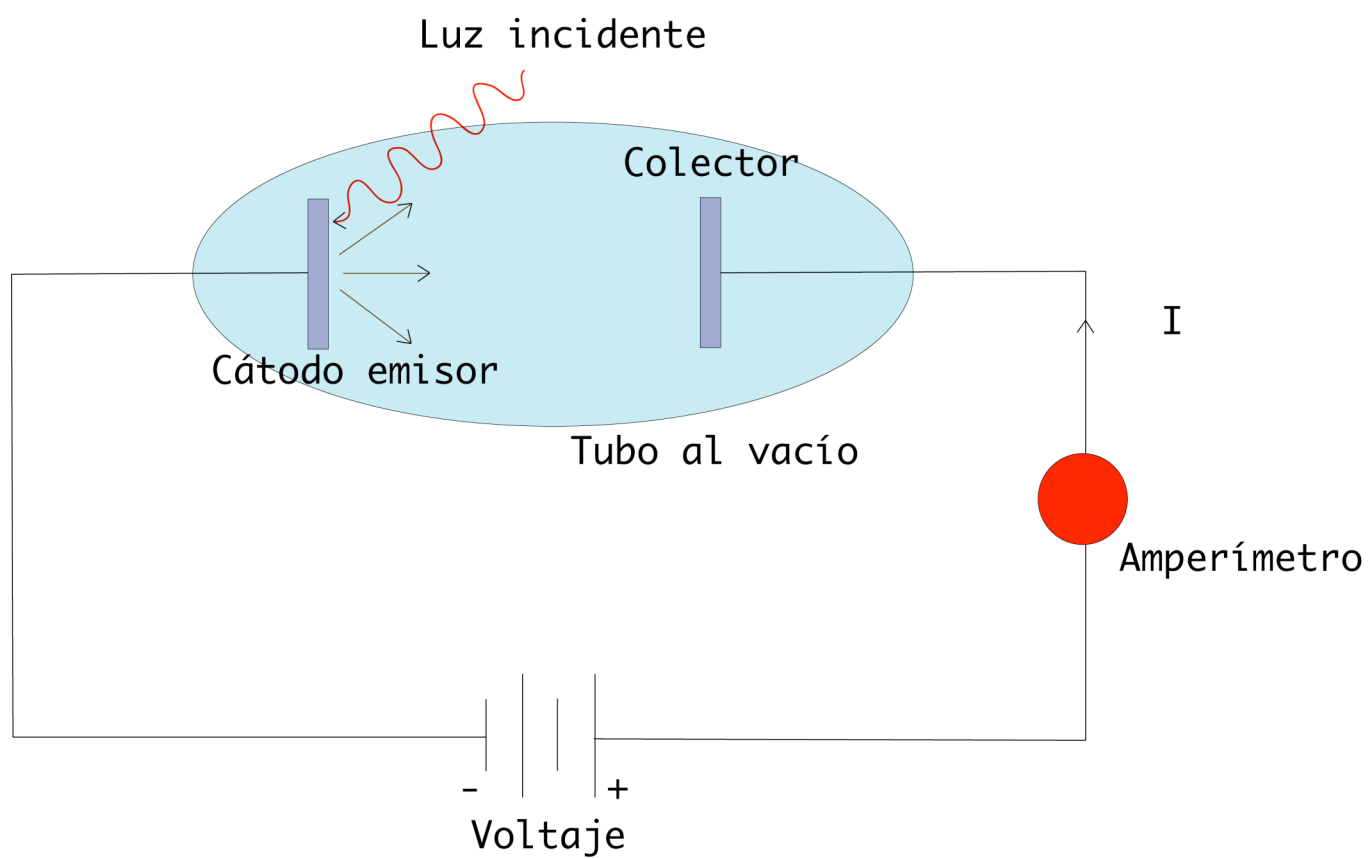


Fig. 4

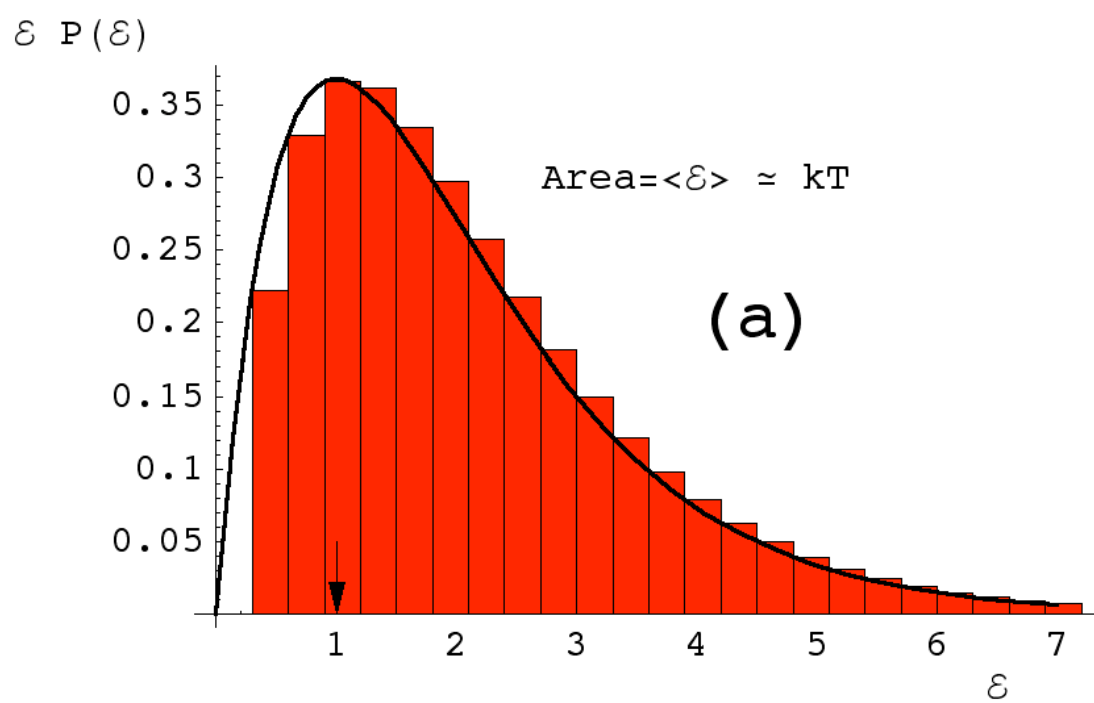


Fig. 5(a).

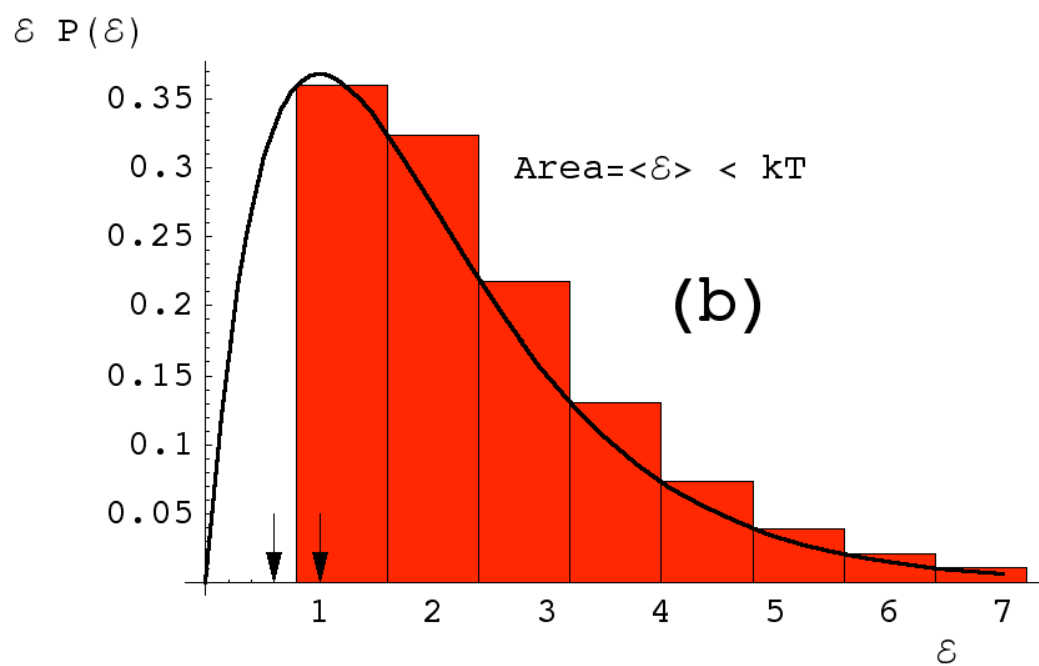


Fig. 5(b).

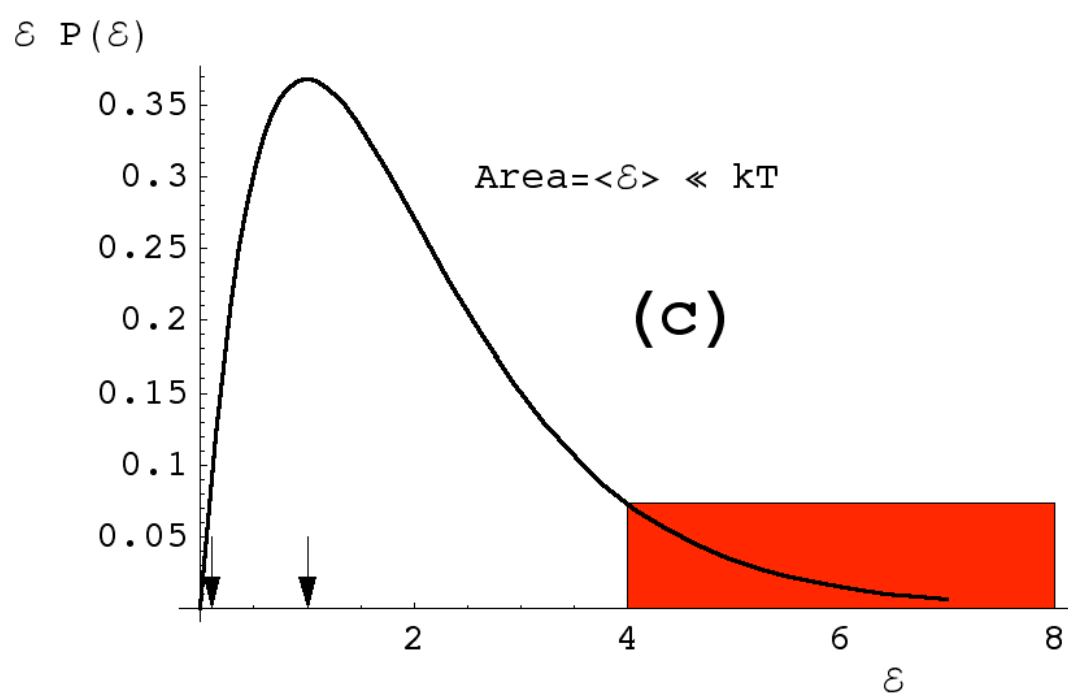


Fig. 5(c).

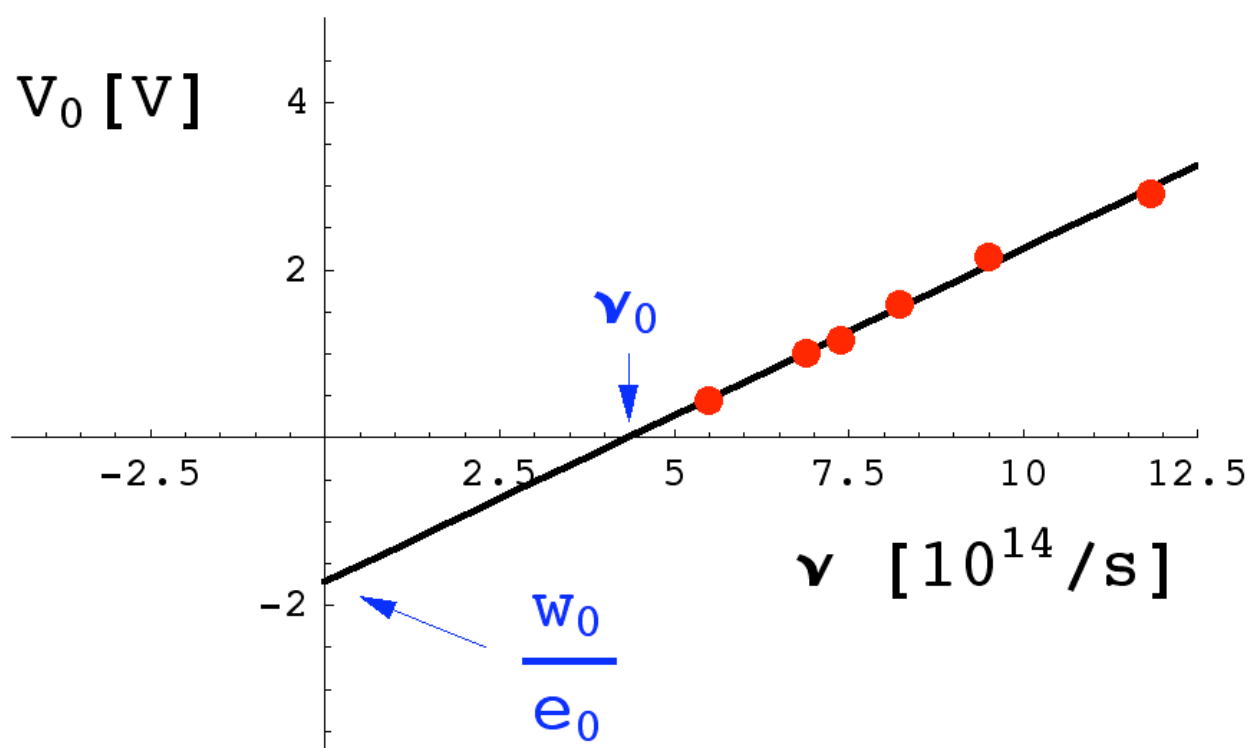
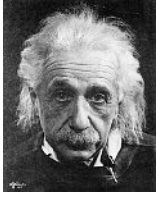


Fig. 6.



Einstein



Hertz



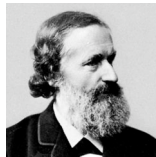
Hallwachs



Lenard



Millikan



Kirchhoff



Rayleigh



Jeans



Wien



Planck