

La constante de Planck

José C. Zamarripa Rodríguez.

Abstract

En este artículo se habla brevemente del trabajo de Planck el cual en un inicio consistió en pensar que la luz viaja en pequeños paquetes los cuales el llamo quantos y que posteriormente Einstein nombró fotones, se parte definiendo la constante que la constante de Planck para después definir las unidades en las cuales Planck desarrollo su trabajo también trata la relación que encontró Planck entre la energía y las frecuencias en que oscila un fotón , incluye la ley cuántica que lleva su nombre, esta fue base de lo que el día de hoy se conoce como teoría cuántica, que describiendo el problema de cuerpo negro, por último se habla de el efecto fotoeléctrico el cual no era posible explicar usando la mecánica clásica pero que con la mecánica cuántica Einstein logró hacerlo.

Palabras clave.

Constante de Planck, cuerpo negro, efecto fotoeléctrico.

Resultado.

Se analiza y se explica con ejemplos el efecto fotoeléctrico y la radiación emitida por un cuerpo negro.

Originalidad.

En este trabajo se trata de dar una introducción a lo que fue la base del trabajo Planck para después explicar de manera no tan profunda la ley que lleva su nombre de un cuerpo negro y el efecto fotoeléctrico.

Introducción.

“Cualquier teoría física es siempre provisional, en el sentido de que es solo una hipótesis: nunca se puede probar. A pesar de que los resultados de los experimentos concuerden muchas veces con la teoría, nunca podremos estar seguros de que la próxima vez el resultado no vaya a contradecirla”. Stephen Hawking. [1]

Desde hace mucho tiempo la humanidad ha tratado de explicar los sucesos que ocurren a su alrededor y el universo no es la excepción, desde los griegos se tenían ideas de cómo era la tierra y el comportamiento de los astros, algunas de ellas iban desde que era plana y que unas tortugas gigantes la sostenían.

Mas tarde Aristóteles concluye que la tierra era una esfera pero el la situaba en el centro del universo, de este modo la lunas y el Sol eran quienes giraban describiendo círculos entorno a la Tierra. Posteriormente Ptolomeo incorporo la idea de que los movimientos que hacían los astros esta idea fue bastante aceptada en parte por que la iglesia Cristina la tomo como imagen de un Universo que estaba en concordancia con las Escrituras pues proporcionaba bastante espacio para situar en él lugares como el Cielo y el Infierno.

Fue hasta el año 1514 que el Astrónomo Polaco Nicolás Copérnico propuso que el Sol era el centro del Universo y no la Tierra pero su idea no fue muy aceptada sino hasta que Johannes Kepler y Galileo Galilei incorporaron sus aporte observacionales los cuales indicaban que a la Tierra no era el centro del Universo sino el Sol, mas aun Kepler demostró que los movimientos que los planetas describen entorno al Sol tenían el comportamiento de elipses en lugar de círculos. Sin embargo Kepler aunque tenía la conjectura de que dichos movimientos eran por alguna fuerza que actuaba sobre los planetas no pudo demostrarlo fue entonces donde Sir Newton dio respuesta a dicho planteamiento en 1687, generando así lo que se conoce como mecánica clásica y con ella una constante de Gravitación Universal (G).

Newton en su teoría consideraba al tiempo absoluto , en otras palabras el creía que se podía medir el tiempo de algún evento y que sin importar quien observara dicho evento el tiempo seria el mismo para cualquier observador siempre y cuando tuviesen por así decirlo un buen reloj .

Pero la teoría de Newton tenía un problema pues esta no sirve para poder explicar el movimiento de objetos que viajan a velocidades muy altas por el ejemplo que se mueven cerca de la velocidad de la luz, en esos momentos no se tenia una buena teoría de la propagación de la luz hasta que en 1865 Maxwell logro unificar las teorías parciales de electricidad y magnetismos, con esto el predecía que la luz debería viajar con una velocidad fija y determinada , aun así se consideraba que existía el éter es decir que había algo en el espacio que servía de medio para que las ondas (luz) viajaran a través del espacio y que si la luz viajaba en dirección del éter esta tendría una velocidad mayo que si lo hiciera en sentido opuesto. Pero en el año de 1887 Michelson y Morley hicieron un experimento en el cual calculaban la velocidad de luz en cierto tiempo del año y posterior mente esperaron la mitad de un año para realizar su mismo experimento, en el cual encontraron que no había variación de la velocidad de la luz con lo que concluyeron que la velocidad de la luz era constante, la denotaremos por c y mas aun que dicho éter no existía.

A pesar de estos hubo quienes intentaron seguir con la idea de que existía el éter y trataron de ajustar contracciones de los objetos o retardo de los reloj cuando se movían a través del éter , hasta que en 1905 Albert Einstein señaló que el éter era innecesario con tal de que se abandonara la idea de que exista un tiempo absoluto , dicha teoría se conoció como teoría de relatividad en la cual su primer postulado es considerar a la velocidad de la luz constante para cualquier observador inercial.

Una idea muy notable de la relatividad es el modo como revolucionó la idea que hasta el momento se tenía del espacio tiempo, pues antes de ella se consideraba que eran dos cosas separadas el espacio y el tiempo, pero la teoría de Einstein establecía que eran parte de un mismo

todo, es decir que el espacio-tiempo poseía 4 dimensiones, en su ecuación Einstein describió la relación que existe entre el curvatura del espacio y la materia que hay en el con la siguiente ecuación

$$R_{\alpha\beta} - Rg_{\alpha\beta} + \Lambda g_{\alpha\beta} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\alpha\beta}.$$

Donde $R_{\alpha\beta}$ es el tensor de Riemann, R es el escalar de curvatura de Ricci, $g_{\alpha\beta}$ es el tensor métrico, Λ es la constante cosmológica y por ultimo tenemos a $T_{\alpha\beta}$ es el tensor energía momento.

Retomando el trabajo que hizo Maxwell con el electromagnetismo surgió un problema , era de determinar con precisión las leyes de la radiación electromagnética y para ello se propuso un cuerpo que emitiera y absorbiera radiación térmica que se conoce como cuerpo negro el cual fue lo que dio inicio al trabajo de Planck ,en el que supuso que la luz no viaja como partícula sino como paquetes de luz los cuales el denominó como cuantos , esto fue la base sobre la cual se cimentó lo que hoy se conoce como teoría cuántica.

Constante de Planck

Para comenzar a hablar de Planck y su trabajo comencemos primero hablando de la constante que lleva su nombre, la cual denotaremos por una h y se define de la siguiente manera :

$$h = 6.620 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} .$$

Donde j es joule y s son los segundos, es decir h tiene unidades de $\frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}}$ o de energía por tiempo, cabe destacar que en algunos casos se encontrara en algunos artículos o libros se trabaja con una \hbar la cual se conoce como constante de Dirac y tiene la siguiente forma:

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} .$$

Planck descubrió que su constante está íntimamente ligada con la energía y en una de sus ecuaciones formula que lo siguiente:

$$E = h\nu .$$

Donde ν es la frecuencia, en este caso lo que se quiere decir es que la energía absorbida o emitida en un proceso de interacción de un oscilador es proporcional a una constante por la frecuencia en que oscila.

Además la longitud de onda tiene una relación con \hbar de la siguiente manera

$$\lambda = \frac{\hbar}{p} .$$

Donde p es el momento lineal de una partícula, recordando que p no es mas que la masa de una partícula por su velocidad, de este modo tenemos que si conocemos el momento lineal de una partícula podemos conocer su longitud de onda.

Una vez definida la constante de Planck podemos comenzar a definir las unidades en que Planck desarrollo su teoría.

Unidades de Planck.

En la física siempre existen unidades fundamentales las cuales sirven como pauta para la modelación matemática de cualquier suceso tales como lo son el tiempo, la masa y la longitud, la combinación de ellas son las unidades en las que se describe la física. Dado que la teoría de Planck esta definida para escalas muy pequeñas, trabajar con las unidades cotidianas de tiempo, masa y longitud resultaban un tanto imprácticas por lo que Planck definió nuevas unidades las cuales obtuvo de las combinación de su constante y de otras dos más, la constante de gravitación de Newton G y la constante de la velocidad de la luz c , donde:

$$G = 6.6738 \times 10^{-11} \frac{N \cdot m^2}{Kg^2}$$

$$c = 3 \times 10^8 \frac{m}{s} .$$

De este modo es posible comenzar a definir [2] las unidades de Planck.

El tiempo de Planck se define de la siguiente forma:

$$m_p = \left(\frac{\hbar c}{G} \right)^{1/2} = 2.2 \times 10^{-5} g \quad 1g = 4.6 \times 10^4 m_p .$$

De manera similar se definen la masa y el la longitud de Planck

$$l_p = \left(\frac{G \hbar}{c^3} \right)^{1/2} = 1.6 \times 10^{-33} cm \quad 1cm = 6.3 \times 10^{32} l_p .$$

$$t_p = \left(\frac{G \hbar}{c^5} \right)^{1/2} = 5.4 \times 10^{-44} s \quad 1s = 1.9 \times 10^{43} t_p .$$

Una vez definidas las unidades en que Planck desarrollo su teoría es posible comenzar a hablar de su trabajo.

Ley de Planck.

Partamos definiendo que es un cuerpo negro. Un cuerpo negro es un objeto ideal que absorbe toda la luz y toda la energía que incide en el, pensemos en un momento en una playera que llevemos puesta si la tonalidad de dicha prenda es clara no absorbe tanta energía es decir si caminamos bajo los rayos del Sol no se calienta pues mucha radiación que incide en ella se refleja, en cambio si la tonalidad de la playera fuese oscura esta se calentaría con gran facilidad pues absorbe mayor cantidad de radiación algo similar ocurre en un cuerpo negro, nada de la radiación que incide en el se ve reflejada , tampoco pasa a través de el , aun que el nombre pudiera causar ambigüedades un cuerpo negro si emite luz, dicha luz recibe el nombre de radiación de cuerpo negro. La luz emitida se puede calcular con la Ley de Planck:

$$E(\nu, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right) - 1}$$

Donde $E \equiv$ Radiación espectral.

$T \equiv$ A la temperatura del cuerpo negro.

λ = Longitud de onda.

$k \equiv$ Constante de Boltzmann.

Ejemplo

Se desea determinar la radiación de un cuerpo negro que se encuentra a $527^\circ C$ de temperatura, si la longitud de onda de su radiación es de $2\mu m$.

Sea

$$T = 257^\circ C + 273^\circ C = 800^\circ K$$

$$\lambda = 2\mu m = 2 \times 10^{-6} m$$

$$c = 3 \times 10^8 m/s$$

$$K = 1.38 \times 10^{-23} J/K$$

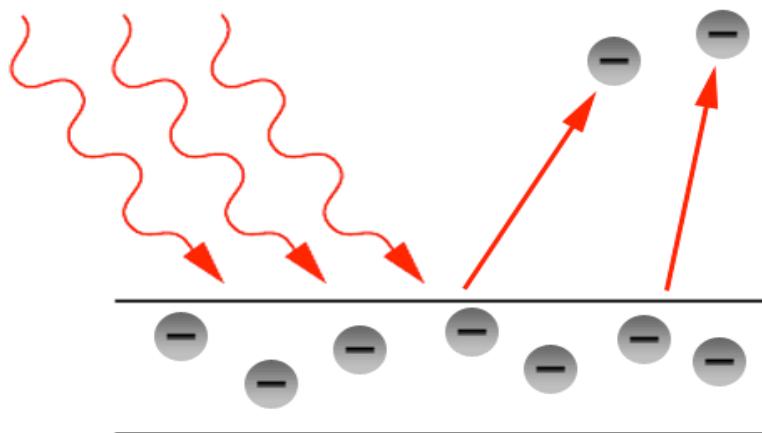
$$\begin{aligned}
 \text{Entonces } E(v, T) = & \frac{2(3.14)(3 \times 10^8)^2 (6.62 \times 10^{-34}) \frac{jm^2}{ss^2}}{(2 \times 10^{-6})m^5 \left\{ \exp \left\{ \frac{(6.62 \times 10^{-34})(3 \times 10^8) \frac{jsm}{s}}{(2 \times 10^{-6})(800)(1.38 \times 10^{-28}) \frac{mjk}{k}} \right\} - 1 \right\}} \\
 & = 1.44 \times 10^9 \frac{w}{m^2}.
 \end{aligned}$$

Donde w denota los watt emitidos de radiación y tienen unidades $\frac{kgm^2}{s^3}$, en este caso este cuerpo negro emite $1.44 \times 10^9 \frac{w}{m^2}$ watt sobre metro al cuadrado.

La teoría de Planck no solo dio respuesta al problema del cuerpo negro sino que ayudo a Einstein a poder explicar el efecto fotoeléctrico y todo gracias a la idea de considerar que la luz no viaja como partícula sino como quantos.

Efecto fotoeléctrico.

En 1887 Heinrich Hertz descubrió en un experimento, al incidir radiación electromagnética sobre dos electrodos, es decir a conectarlos a altas tensiones que el arco que se formaba entre dichos electrodos era mayor cuando estos se iluminaban con luz ultravioleta que cuando se realizaba el experimento en la oscuridad, dicho efecto recibió el nombre de efecto fotoeléctrico.



Pero este efecto no tuvo explicación alguna sino hasta casi 20 años después cuando Einstein en 1905, consideró que la luz viaja no como partícula sino como quantos los cuales el renombro

como fotones, esto lo hizo valiéndose de los trabajos de Planck, llegando a la siguiente ecuación [4].

$$h\nu = E_{c\max} + W.$$

Donde $E_{c\max}$ es la energía cinética máxima W se conoce como función de trabajo y representa la energía que necesita una partícula para desprenderse es decir $h\nu_0$. En otras palabras lo que quiere decir esta ecuación es que la energía del fotón es igual a la energía cinética mas una función de trabajo, es decir a la cantidad de energía que se necesita para que el electrón se desprenda del electrodo o superficie a la cual se le incide radiación.

Pero como suele pasar en la física un resultado no es aceptado sino hasta años después y esta teoría tuvo el mismo trato hasta que en 1916 Robert Millikan verificó experimentalmente que dicha teoría era consistente, cabe destacar que Einstein obtuvo el premio nobel por el efecto fotoeléctrico.

Ejemplo

Sobre una superficie e de aluminio se incide una luz cuya longitud de onda es de 2×10^{-7} si para extraer un electrón se requiere 4.2 eV ¿Cuál es la energía cinética de fotoelectrón más rápido que se emite?

Datos

$$\lambda = 2 \times 10^{-7}$$

$$W = 4.2 \text{ eV}$$

Sabemos que $\nu = \frac{c}{\lambda}$ así mismo $h = 4.14 \times 10^{-15} \text{ eV s}$ [5], entonces tenemos la siguiente ecuación:

$$\frac{hc}{\lambda} = W + E_{c\max}$$

$$\frac{(4.14 \times 10^{-15}) \text{ eV} \cdot s (3 \times 10^8) \text{ m/s}}{2 \times 10^{-7} \text{ m}} = 4.2 \text{ eV} + E_{c\max}$$

$$\Rightarrow 6.21 \text{ eV} - 4.2 \text{ eV} = E_{c\max}$$

$$E_{c\max} = 2.01 \text{ eV}$$

Por lo tanto la energía cinética del fotón es de 2.01 eV.

Ahora bien el trabajo que hizo Planck como ya lo hemos mencionado fue el parte aguas y la base para la teoría cuántica, a su vez las leyes y ecuaciones que proporcionaron tanto el cómo Einstein para describir la radiación son muy aplicables en el campo de la cosmología en específico para estudiar la radiación cósmica de fondo que básicamente es el estudio de las fluctuaciones de la radiación en el espacio.

Conclusión

Actualmente la teoría cuántica de campos da una valor para la constante cosmológica de Einstein la cual es de $\Lambda \approx 10^{122} m^{-2}$, contrario a lo que las observaciones apuntan que es $\Lambda \approx 10^{-52} m^{-2}$, este problema de tratar de unificar la teoría cuántica de campos con las observaciones es un problema abierto, en el cual estoy trabajando actualmente en mi tesis.

Bibliografía

- [1] Hawking, S. (2010). *Historia del tiempo. Del Big Bang a los agujeros negros*. Espasa.
- [2] Wesson, P. S. (2007). *Space-time-matter: modern higher-dimensional cosmology* (Vol. 3). World Scientific.
- [3] Mayorga, A. (2002). Planck, *Einstein y el nacimiento de la teoría cuántica* (1900-1905). *Revista de filosofía de la Universidad de Costa Rica*, 40(100), 145-152.
- [4] Gasiorowicz, S. (2007). *Quantum physics*. John Wiley & Sons.
- [5] Beiser, A., Mahajan, S., & Choudhury, S. R. (2003). *Concepts of modern physics*. Tata McGraw-Hill Education.