

Planck y el gran inicio de la sinfonía cuántica

Carlos Velázquez

En 1900 un destacado profesor de física de la Universidad de Berlín propuso un modelo que explicaba un pequeño problema que había intrigado a algunos estudiosos de la termodinámica, y sin darse cuenta desató la más formidable de todas las revoluciones de la física. Max Planck inauguró así la época de la mecánica cuántica.

La sinfonía clásica

Los años que vieron el nacimiento de Máximo Carlos Ernesto Ludovico Planck, mejor conocido como Max Planck, fueron los últimos años dorados de la física clásica. El electromagnetismo, la carrera por llegar al cero absoluto, el estudio del calor, de la fluorescencia y de las líneas de emisión para encontrar nuevos elementos, todas estas áreas se desarrollaban dentro de la sinfonía de la física clásica.

Tuvieron que pasar varios siglos para que la física llegara a un estado tan formidable de desarrollo. Desde sus inicios con las audaces ideas de Galileo, que a sus contemporáneos debió parecerles un endiablado maestro de violín que desafiaba a las monótonas melodías medievales, la física había ido creciendo en complejidad y poder explicativo. No pasó mucho tiempo después de que Galileo mostró que el estado natural de los cuerpos era el movimiento rectilíneo, y no el reposo como Aristóteles pensaba, para que Newton, un nuevo virtuoso, pusiera los cimientos que sostendrían a la física hasta el inicio del siglo XX; sus nuevas ideas se aplicarían a los fluidos, al sonido y a desentrañar el movimiento de los astros. Su intervención fue tan portentosa como haber desechado los anticuados clavicordios y sustituirlos por los nuevos y poderosos pianos.

Y así, de la mano del desarrollo tecnológico y la colonización europea, la gran orquesta de la ciencia se fue enriqueciendo e incorporó a la termodinámica –el estudio del calor y la manera de utilizarlo en las nuevas máquinas de vapor, y que en la orquesta eran los metales cuya potente voz se hacía oír en toda la sociedad–; incorporó también a la óptica, que estudia a la luz, y que era como los instrumentos de madera para la orquesta de la física. Muchas otras áreas se fueron agregando, a tal punto que muchos creyeron que no pasaría mucho para que la física tocara su último acorde *en crescendo* y la humanidad triunfara conociendo los misterios del universo. Pero la gran directora de la orquesta, la naturaleza, les tenía preparada una sorpresa a sus músicos.

El prodigioso ejecutante de las notas del diablo

Planck nació en 1858 y vivió su infancia en la tranquila ciudad de Kiel, en Alemania, en el seno de una familia de gran tradición, donde la excelencia académica, la incorruptibilidad, el conservadurismo político y cierta tendencia filosófica al idealismo marcaron su espíritu. Planck mostró ser un digno representante de su familia y fue un estudiante destacado con inclinación natural hacia la música, la filología, las matemáticas y la física. A los 17 años se enfrentó al reto de decidir a qué se dedicaría en cuerpo y alma. Después de una apasionada discusión consigo mismo, supo que su futuro estaría ligado para siempre a la física. Aun así la música lo acompañó siempre y disfrutaba interpretando al piano obras de Brahms o Schubert.

La decisión de Planck tomó por sorpresa a muchos, por ejemplo a su profesor Phillip von Jolly quien había dicho: "En este campo ya casi todo ha sido descubierto, lo único que falta es completar sólo algunos pocos hoyos sin importancia". Pero Planck escribiría más adelante: "la decisión de dedicarme a la ciencia (...) fue por el descubrimiento de que las leyes del razonamiento coinciden con las leyes que gobiernan los mecanismos del mundo que nos rodea." Para él la segunda ley de la termodinámica que enuncia que existen procesos que ocurren de manera espontánea, como la transferencia del calor de los cuerpos de mayor temperatura a los de menor temperatura, pero jamás a la inversa, era uno de los principios rectores de la naturaleza (ver en *Cienciorama* "La termodinámica del bolillo"). Planck decidió dedicarse a la física desde la abstracción, tratando de entender los mecanismos detrás de los fenómenos que se descubrían en los laboratorios; era lo que hoy consideramos un físico teórico, aunque en ese tiempo eso no estaba tan definido.

Logró su grado de doctor a la sorprendente edad de 21 años y siguió con su meteórica carrera hasta que en 1889, a los 31 años, logró ser nombrado catedrático de física en la Universidad de Berlín. Ahí fue donde su gran idea revolucionaria saldría de su mente políticamente conservadora.

La dulce melodía del caos: la canción del cuerpo negro

La otra rama que se entrelaza en esta historia es la investigación de un fenómeno de gran relevancia científica aunque no tecnológica: la radiación del cuerpo negro. Este cuerpo es un objeto capaz de absorber toda la radiación electromagnética que incide sobre él. Si un cuerpo absorbiera toda la luz visible que le llega sería negro y de ahí su nombre, ya que los colores que percibimos se deben principalmente a la reflexión de luz en la superficie de los objetos. Pero ésta es la primera parte del asunto. Si un cuerpo absorbe toda la energía electromagnética que incide en él, entonces debe hacer algo con esa energía, y lo que hará es aumentar su temperatura y por ende sus moléculas aumentarán su movimiento. Finalmente llegará a una situación de equilibrio en que la temperatura deja de aumentar, y esto ocurre cuando los átomos y moléculas del cuerpo negro emiten la energía que les ha llegado en forma de una nueva radiación electromagnética. Esta radiación que emiten las moléculas no tiene por qué ser parecida a la que el

cuerpo absorbió. De hecho esto es lo más interesante: la radiación que un cuerpo negro emite no depende del material del que está hecho ni de la radiación que incida desde el exterior sobre él, sólo depende de la temperatura que logre adquirir.



Figura 2. La radiación de cuerpo negro se observa al aumentar la temperatura de cualquier material.

Como puedes imaginar, el cuerpo negro es tan sólo una idealización, pero hay varios sistemas que se le asemejan bajo ciertas circunstancias. Por ejemplo un pedazo de metal no es un buen cuerpo negro a temperatura ambiente, ya que refleja gran parte de la luz que le llega, pero si lo calentamos paulatinamente adquirirá primero un color rojizo, luego anaranjado y luego un amarillo intenso. Ésta es la emisión característica de un cuerpo negro cuando pasa de cerca de $3,500\text{ }^{\circ}\text{C}$ a unos $4500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Si pudiéramos seguir calentándolo hasta llegar a $7,500\text{ }^{\circ}\text{C}$, notaríamos que toma un color blancuzco tan intenso que nos lastimaría la vista (figura 2). Pero la radiación de cuerpo negro está presente en muchas otras situaciones. La emisión de luz de las estrellas se debe únicamente a su temperatura, y por tanto podemos decir que ¡ellas son inmensos cuerpos negros con temperaturas entre $3,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ y unos $30,000\text{ }^{\circ}\text{C}$!

La radiación de cuerpo negro fue estudiada durante la segunda mitad del siglo XIX por grandes científicos como John Tyndall, Gustav Kirchhoff y Josef Stefan, pero las mediciones más precisas de la frecuencia y la energía de la radiación del cuerpo negro se hicieron durante los últimos años de la década de 1890 por Otto Lummer, Ernst Pringsheim, Heinrich Rubens y Ferdinand Kurlbaum en el Instituto de Física-Técnica (Physikalisch-Technische Reichsanstalt) de Berlín, lo cual le permitió a Planck estar al tanto de los adelantos en sus mediciones. Cuando Planck supo

que aún no había una explicación para la radiación de cuerpo negro se interesó en la explicación de las observaciones de sus compañeros. Esto ocurrió en 1895.

La extraña solución de las notas cuánticas

Para Planck era claro que el cuerpo negro emitía radiación porque había algún tipo de osciladores electromagnéticos en él. Hoy día sabemos que estos osciladores son dipolos atómicos y moleculares. Un dipolo es una carga positiva y una carga negativa separadas por una distancia, y decimos que el dipolo oscila cuando la distancia entre las cargas varía, aunque en el tiempo de Planck no estaba tan claro que estos dipolos eran moléculas agitadas por la energía térmica.

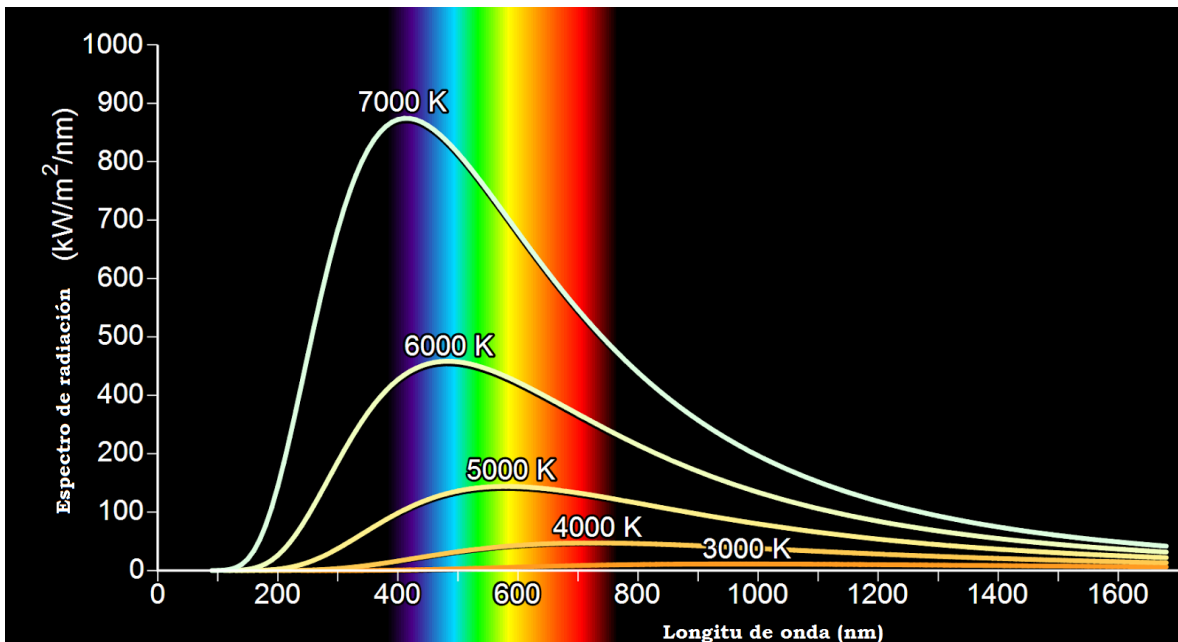


Figura 3. Un cuerpo negro a diferentes temperaturas emite luz en distintas longitudes de onda. En esta ilustración las curvas indican la composición espectral (contenido de longitudes de onda) para distintos cuerpo a temperaturas desde 3000 K hasta 7000 K.

El gran problema del cuerpo negro es que su emisión electromagnética tiene dos zonas con un comportamiento completamente distinto: uno para radiaciones de onda larga –microondas, ondas de radio, infrarrojo– y otro comportamiento completamente distinto para ondas cortas –luz ordinaria, luz ultravioleta, rayos X y rayos gamma (figura 3)–.

Existen varios modelos teóricos y experimentales con los que podemos simular un cuerpo negro. Uno de ellos es una cavidad metálica a una temperatura determinada dentro de la cual tenemos la radiación electromagnética que hemos descrito (figura 4). Podemos pensar en el cuerpo negro como si tuviéramos un concierto dentro de la cavidad donde está la radiación. Los osciladores de las paredes son los músicos, un grupo inmenso de violinistas, violistas, chelistas y contrabajistas, y la música que producen sería la radiación electromagnética.

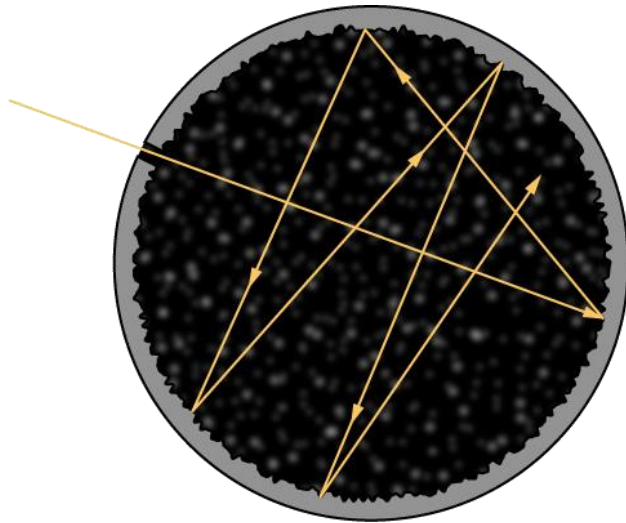


Figura 4. Uno de los modelos para la radiación de cuerpo negro es una cavidad donde ingresa radiación que luego será absorbida y reemitida.

Hasta aquí no tenemos nada raro, pero estos músicos son un poco extraños, un poco alocados (figura 5). Si vemos a uno solo de ellos, veríamos que está moviendo su mano por el diapasón de su instrumento de manera aleatoria todo el tiempo, sin importarle tocar una nota en particular. Son músicos a los que no les importa la escala musical ni tampoco el ritmo, y pueden tocar a cualquier nivel de volumen. Sin embargo todos ellos sí siguen una regla: aunque estén tocando arbitrariamente, le ponen atención al volumen total de la orquesta y cuidan que este volumen sea siempre constante.



Figura 5: Los osciladores de las paredes de la cavidad son como músicos locos.

Analicemos con más detenimiento esta caótica orquesta. Las orquestas ordinarias emiten notas con frecuencias determinadas; por ejemplo la nota La₄ tiene una frecuencia exacta de 440 Hertz o 440 vibraciones por segundo de la cuerda. Esto en el caso de la radiación electromagnética equivaldría a tener un color bien determinado, por ejemplo azul. Tanto la música como las pinturas que estamos acostumbrados a observar están compuestas de pequeñas secciones con frecuencias bien determinadas; en la música las frecuencias de sonido o notas musicales, y en las pinturas las frecuencias de radiación electromagnética o colores del arco iris. Pero la naturaleza no tiene por qué seguir nuestros convencionalismos, y así como los sonidos en el exterior son una combinación arbitraria que no tiene nada que ver con nuestras notas, la radiación electromagnética en la naturaleza, y especialmente en el cuerpo negro, no utiliza frecuencias determinadas sino de cualquier valor. Esto se traduce en nuestra analogía en que los músicos ponen sus manos al azar en los diapasones de sus instrumentos (figura 6).

Lo siguiente que debemos notar es que estos músicos tocan a cualquier volumen. Éste lo podemos asociar directamente con la energía: a mayor volumen del sonido, mayor energía. Con esto podemos entender por qué estos músicos locos se preocupan de que el volumen total se mantenga constante: es equivalente a que la energía total del sistema también sea constante para así mantener el sistema en equilibrio.

Conociendo este comportamiento de los osciladores moleculares, equivalentes a los músicos, a Planck sólo le faltaba aplicar las técnicas de dos poderosas ramas de la física para resolver su misterio: la termodinámica y las nuevas ideas de la teoría cinética de Boltzmann (ver en *Cienciorama* "De una partida de billar al martirio de Boltzmann",). Planck pensaba que todas estas ideas serían la clave para explicar el cuerpo negro, pero al hacer las matemáticas obtuvo una discrepancia entre sus predicciones y las mediciones experimentales en el caso de bajas frecuencias. O para decirlo con otras palabras, cuando quiso dirigir la orquesta él mismo, se dio cuenta de que su melodía sonaba diferente de la del cuerpo negro, sobre todo en el caso de los violonchelos y los contrabajos, los sonidos de baja frecuencia. Esta discrepancia fue completamente inesperada para Planck, y por mucho tiempo meditó sobre que podría estar mal. Al final consideró que alguna de las suposiciones sobre la manera en que tocan los músicos locos (los osciladores moleculares) debía ser incorrecta. Después de mucho pensarlo llegó a una de las conclusiones más increíbles: los músicos locos (osciladores moleculares) no podían tocar (vibrar) con cualquier volumen (energía), sino con valores de volumen determinados dependiendo de la frecuencia que tocaban.

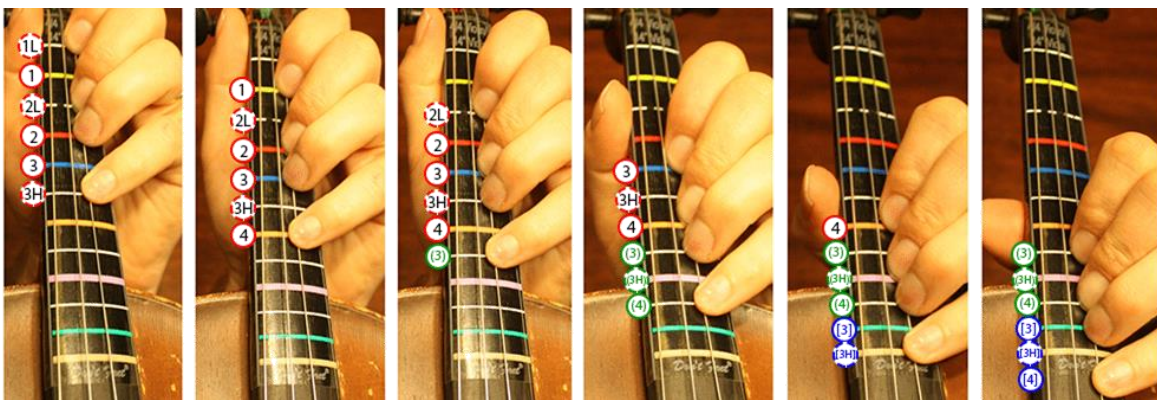


Figura 6. En la música que estamos acostumbrados a escuchar las notas tienen una frecuencia determinada asociada a posiciones exactas en las que hay que poner los dedos en el diapasón de un instrumento. Los músicos locos de la melodía del cuerpo negro pueden poner sus dedos donde quieran.

Tenemos que detenernos un poco aquí para que no nos confundamos. En los violines normales, si pasamos el arco con poca velocidad presionando suavemente la cuerda tenemos un sonido tenue, de poco volumen o energía sonora; cuando

Si algún día lees un libro de física, notarás que la fórmula de Planck para h se suele escribir de la siguiente manera:

$$E = h \cdot \nu$$

Donde la E es la energía, y ν (la letra griega *nu*), es la frecuencia.

Aunque Planck estaba convencido de que había encontrado la solución, se percató de que al hacerlo tuvo que suponer algo que estaba fuera de toda lógica para la física de su tiempo ¿Por qué a un oscilador le iba a interesar mantener una relación determinada entre la frecuencia y la energía? Sería tanto como pedirle a un resorte que al vibrar sólo pudiera estirarse hasta una longitud de 10 cm, 20cm, etc., pero jamás valores intermedios. Al final, Planck pensó que esta suposición se podría explicar más adelante, o que un nuevo modelo matemático podría explicar todo en términos físicos plausibles, pero el tiempo demostraría que ésta era una esperanza vana.

El diablo está en los fotones

Aunque la explicación de Planck fue bienvenida por muchos y entendida por pocos, y que de ella tenía serias dudas su propio creador, el destino se sellaría tan solo cinco años después, cuando un desconocido empleado de una oficina de patentes mandó a una revista de física un pequeño artículo donde proponía utilizar las ideas de Planck para explicar otro fenómeno donde la radiación electromagnética –luz– y la materia interactuaban: el efecto fotoeléctrico (ver en *Cienciorama* "1905 y el rompimiento einsteniano: efecto fotoeléctrico"). Este empleado llegaría a ser el físico más conocido de todos los tiempos: Albert Einstein.

El efecto fotoeléctrico consiste en irradiar una superficie metálica con radiación electromagnética (figura 7). Cuando la frecuencia de la radiación rebasa cierto valor, entonces del metal empiezan a desprenderse electrones como por arte de magia. Einstein propuso que la energía de la radiación electromagnética debía estar relacionada directamente con la frecuencia mediante la fórmula de Planck. En términos de nuestra analogía, lo que Einstein propuso era tan loco como decir que no era que los músicos no pudieran tocar con cualquier valor de volumen ¡sino que era el aire mismo el que no admitía transportar las ondas a menos que éstas

cumplieran con la condición mencionada! Pero esto fue lo de menos, lo peor del caso es que tenía razón, y de hecho iría más lejos. Ahora sabemos que asociadas a la radiación electromagnética hay partículas que llamamos fotones, cuya energía obedece la fórmula de Planck. Pero eso es sólo el inicio, ahora también sabemos que partículas como los electrones y los protones también tienen una onda asociada a ellas y que su energía también está dictada por la fórmula de Planck. Hoy en día, cuando un sistema obedece a esta fórmula decimos que es un sistema cuántico y que su energía está cuantizada.

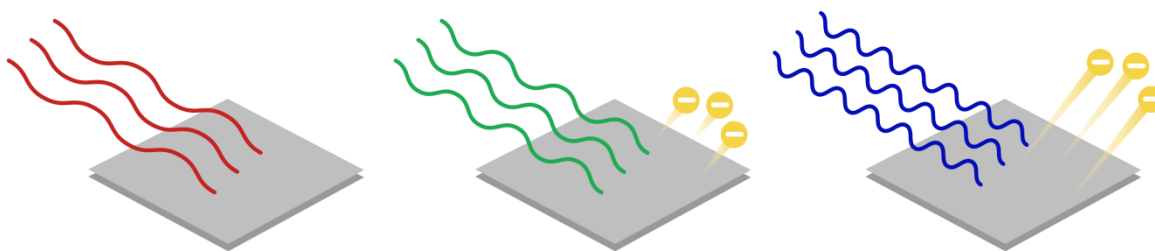


Figura 7. El efecto fotoeléctrico consiste en el desprendimiento de electrones de una superficie y para su explicación se debe de usar la fórmula de Planck.

Cuando Einstein propuso esta idea casi nadie le hizo caso, pero en ese mismo año publicó otro artículo sobre el movimiento browniano– el que hacen las partículas de polvo en el aire– y demostró de manera definitiva la existencia de las moléculas, también publicó otro en el que afirmaba que el espacio y el tiempo eran relativos, y otro más en el que decía que la masa de los cuerpos y su energía estaba relacionadas. Estos dos últimos artículos fueron el fundamento de lo que sería llamado Teoría Especial de la Relatividad. Y todos estos artículos llegaron a oídos de Planck, que fue uno de los primeros en darse cuenta de su importancia y también el primero en brindarle a Einstein la posibilidad de incorporarse a los grandes círculos académicos de la física. Irónicamente Einstein asentó de manera definitiva las ideas de Planck, aunque éste nunca las aceptó por completo. O para decirlo de otra manera, Planck le puso fin a la gran sinfonía de la física clásica y fue el iniciador involuntario de la sinfonía cuántica. Planck ganó el premio Nobel en 1919 “en reconocimiento a sus servicios prestados a la física por el descubrimiento de los *quantos* de energía”.

El músico exiliado... en su propio país

La gran carrera de Planck lo mantuvo siempre en un lugar predominante dentro de la física, pero su país y él mismo estaban por vivir grandes desgracias... iniciaba el adagio. Su mujer Marie Merk murió en 1909 posiblemente de tuberculosis. En 1911 se casó por segunda ocasión con Marga von Hoesslin. Pocos años después Europa se sumergió en la sangría y estupidez de la guerra, en la que pereció su hijo Karl. En 1917 una de sus hijas gemelas, Margarete, murió al dar a luz, y lo mismo pasó dos años después con Emma, su otra hija.

En la década de 1930, un nuevo peligro se empezaba a cernir sobre Europa: el ascenso del fascismo, cuya cara en Alemania era el nazismo. Planck fue uno de los más acérrimos defensores de la ciencia alemana ante la ola de ataques de los fanáticos de Hitler, y logró que durante varios años los físicos judíos pudieran seguir trabajando dentro de Alemania. En 1944 su casa fue reducida a escombros por bombardeos, pero su dolor debió ser mucho peor al ver cómo su hijo murió de manera cruenta en manos de la Gestapo por participar en el complot del 20 de julio de 1944 para tratar de matar a Hitler.

Planck vivió para ver la destrucción del régimen que tanto lo persiguió. Finalmente murió en Göttingen, Alemania, en 1947 a los 89 años. Planck es uno de los pocos científicos que siempre tuvo un pie dentro del siglo XIX y otro dentro del siglo XX, y en la física fue el último gran científico clásico y el primer gran científico cuántico.

Referencias

- Manuel Cardona y Werner Marx, *Max Planck –A conservative revolutionary*, Max Planck Institute for Solid State Research, Heisenbergstraße 1, D-70569 Stuttgart (Alemania)
- Helge Kragh, *Max Planck: the reluctant revolutionary*, Physics World, Reino Unido, 2000.
- Clayton A. Gearhart, “Planck, the Quantum, and the Historians”. *Physics in perspective* 4:170-215, Birkhäuser Verlag, Basilea, 2002.
- Alejandro Mayorga, *Planck*, “Einstein y el nacimiento de la teoría cuántica 1900-1905”, *Rev. Filosofía Univ.*, Costa Rica, XL(100),145-152, 2002.
- Roger H. Stuewer, “Max Planck. German physicist”, *Enciclopedia Britannica*, 2017.

Créditos de las imágenes

Figura 1: <http://enteratede.com.mx/wp-content/uploads/2015/06/orquesta250615.jpg>

Figura 2: http://fancyfrindle.com/first-quantum-theory-black-body-radiation-max-planck/http://spiff.rit.edu/classes/phys212/lectures/spec_interp/spec_interp.html

Figura 3: <http://260h.pbworks.com/w/page/69071363/Beginnings%20of%20Quantum%20Mechanics>

Figura 4: <https://cnx.org/contents/OjoA1o37@2/Blackbody-Radiation>

Figura 5: <https://www.youtube.com/watch?v=uT3SBzmDxGk>

Figura 6: <https://bluegrassdaddy.com/wp-content/uploads/2015/03/finger-positions3.png>
<https://qph.ec.quoracdn.net/main-qimg-4ce24289cd757dbba2fbeb5b77840f28-c>

Figura 7: <https://www.khanacademy.org/science/physics/quantum-physics/photons/v/photoelectric-effect>