La revolución cuántica

2016

Esta página ha sido
intencionalmente dejada en blanco

El centenario de la publicación del artículo de Robert Millikan «A Direct Photoelectric Determination of Planck's "h". Phys. Rev. 7, 355», fue una excusa perfecta para investigar uno de los periodos más apasionantes de la física, el nacimiento de la física cuántica.

Ediciones Bob and Trash

27 de junio de 2016.

Max Planck

1900

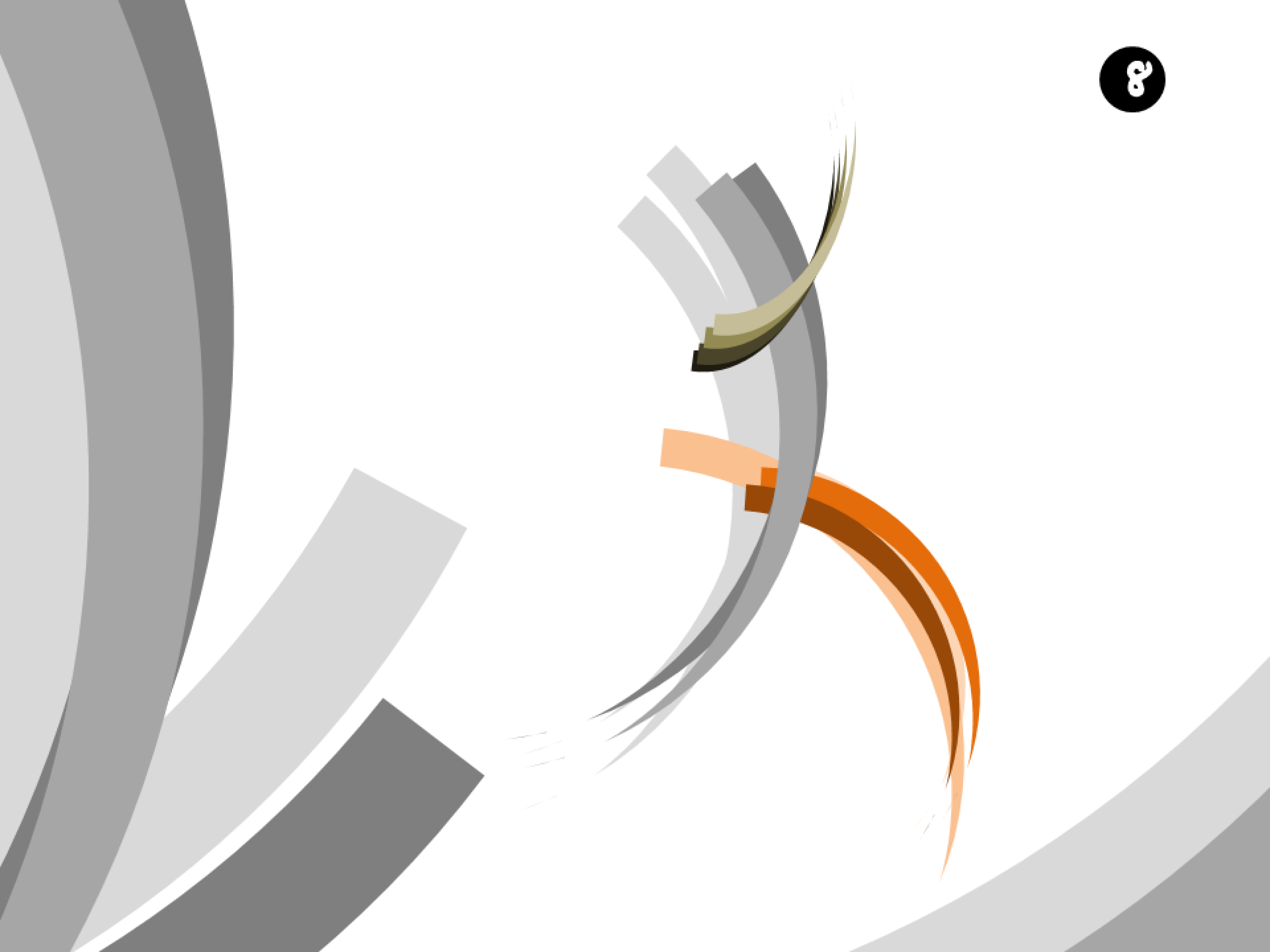
Albert Einstein

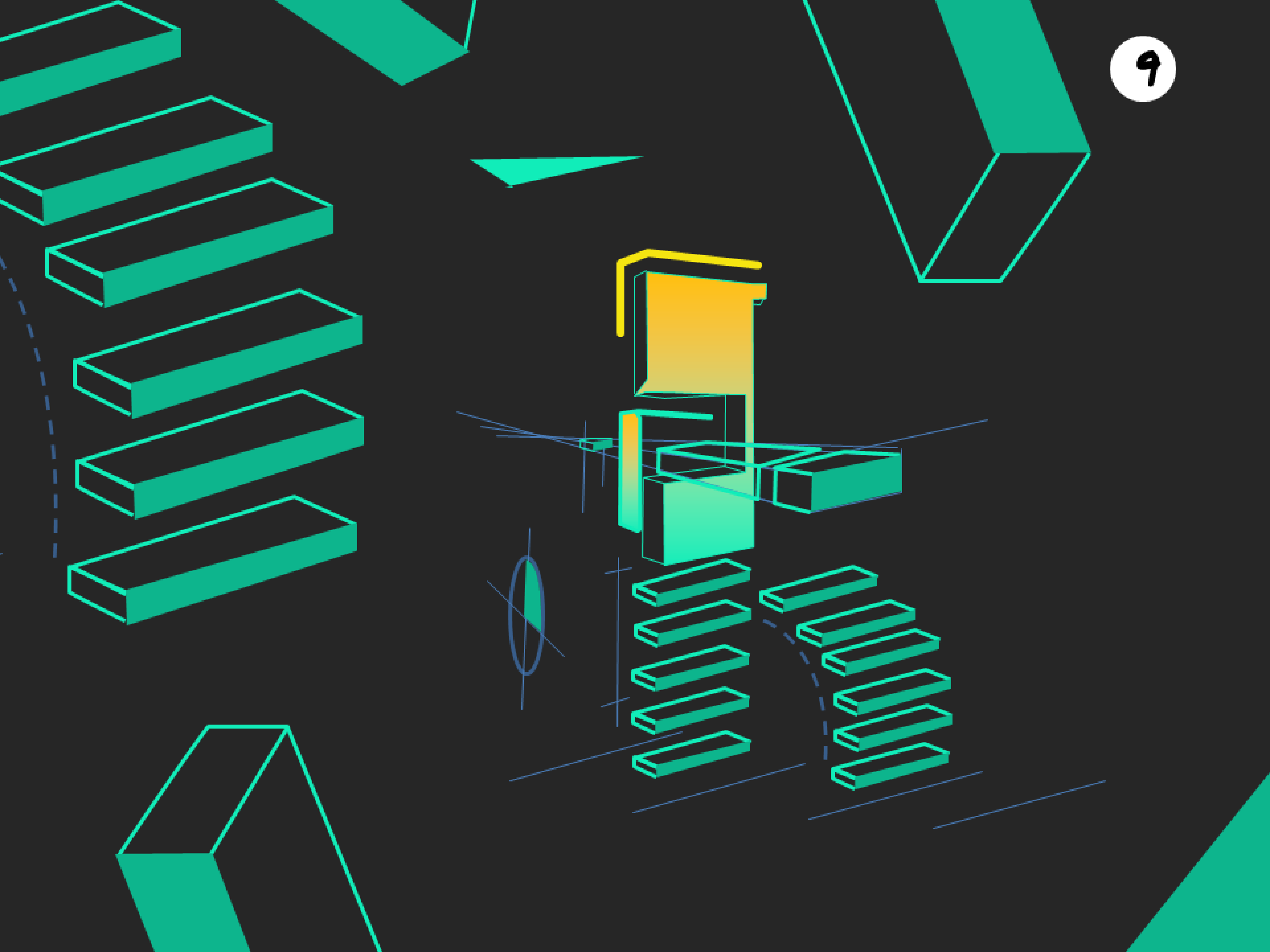
1905

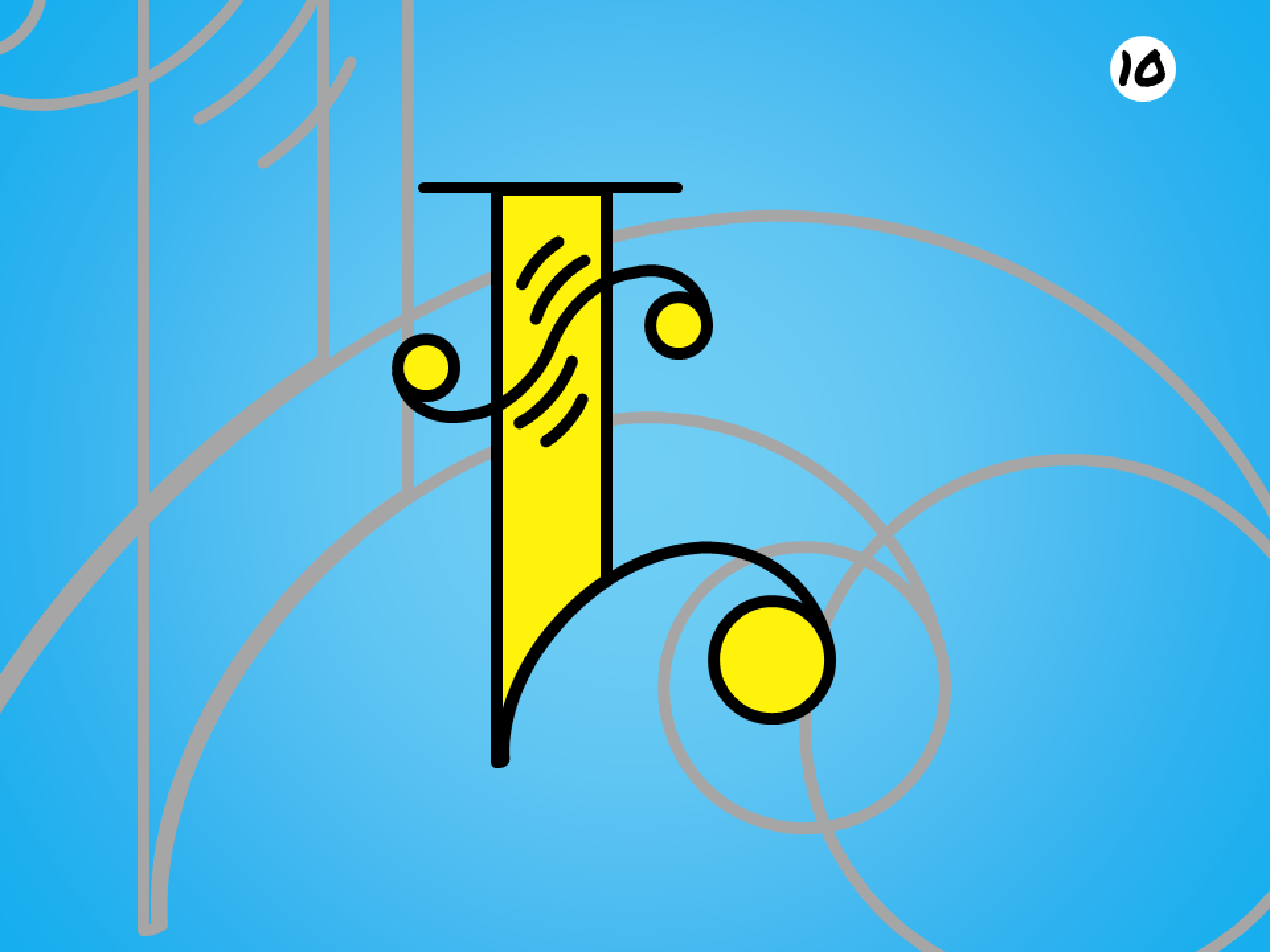
Robert Millikan

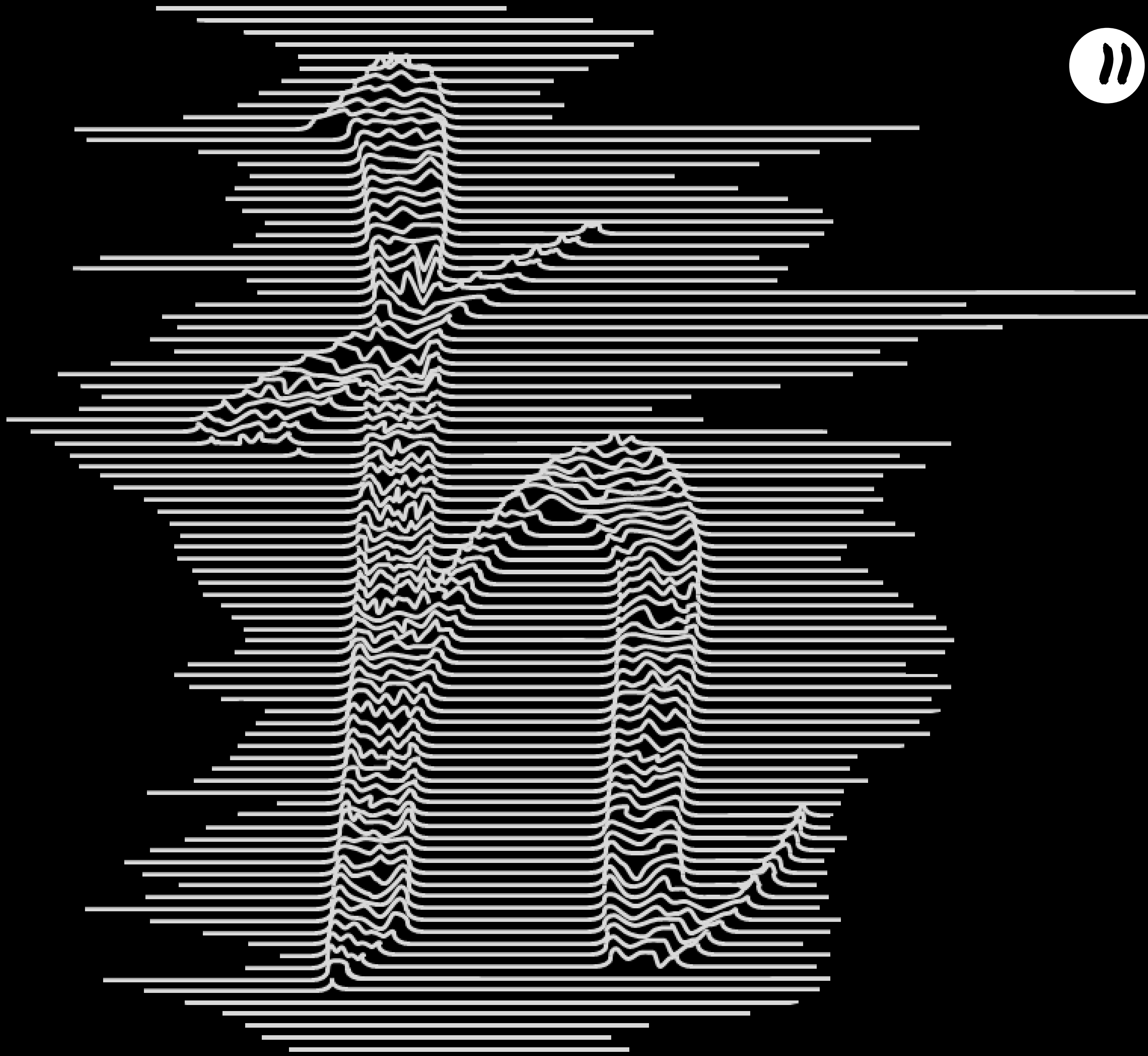
1916

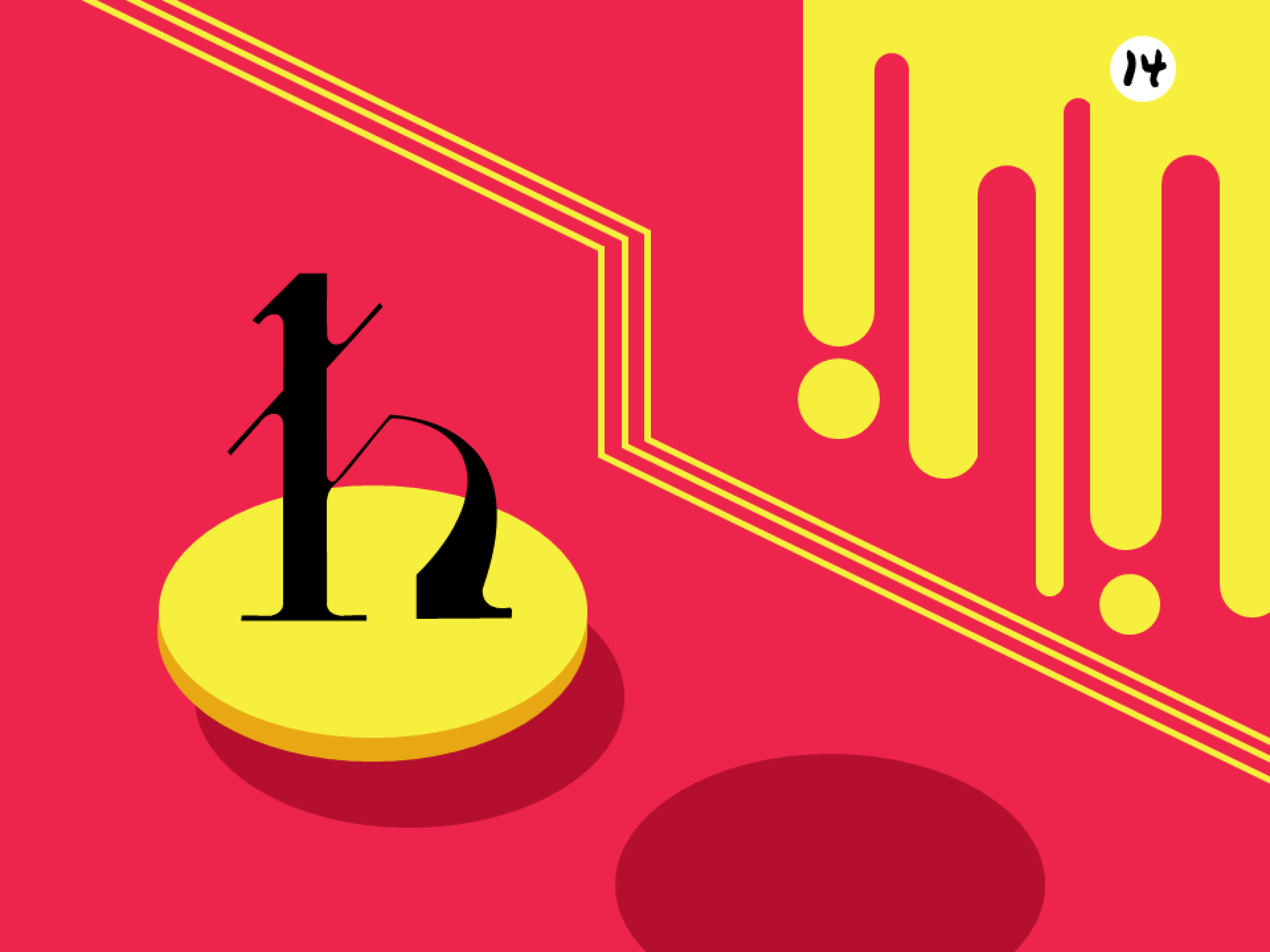
th




9






h

El tema de investigación inicial que condujo al concepto de los cuantos de energía es el llamado problema del cuerpo negro. Imaginemos la siguiente situación:

Supongamos una cavidad cuyas paredes se encuentran en equilibrio térmico a una temperatura $\boldsymbol{T}$. El interior de la cavidad se llenará de radiación electromagnética y sobre cada fracción del interior de la cavidad incidirá una cierta cantidad de energía radiante por unidad de tiempo. Llamemos $\boldsymbol{K}$ a la cantidad de energía que incide sobre la superficie por segundo y por metro cuadro de superficie. De ella, la superficie absorberá una fracción $\boldsymbol{a}$ (coeficiente de absorción). Para que la pared mantenga su temperatura constante, debe emitir energía al mismo ritmo que la absorbe. Llamaremos $\boldsymbol{E}$ a la energía emitida por segundo y por metro cuadrado de superficie, se obtiene así, la siguiente expresión:

$$\boldsymbol{aK = E}$$

La cual representa que la superficie absorbe energía en la misma cantidad que emite. La intensidad de la radiación $\boldsymbol{K}$, está en equilibrio dentro de la cavidad, por lo que es independiente de la naturaleza del material. La ecuación anterior puede expresarse como:

$$\boldsymbol{K = \frac{E}{a}}$$

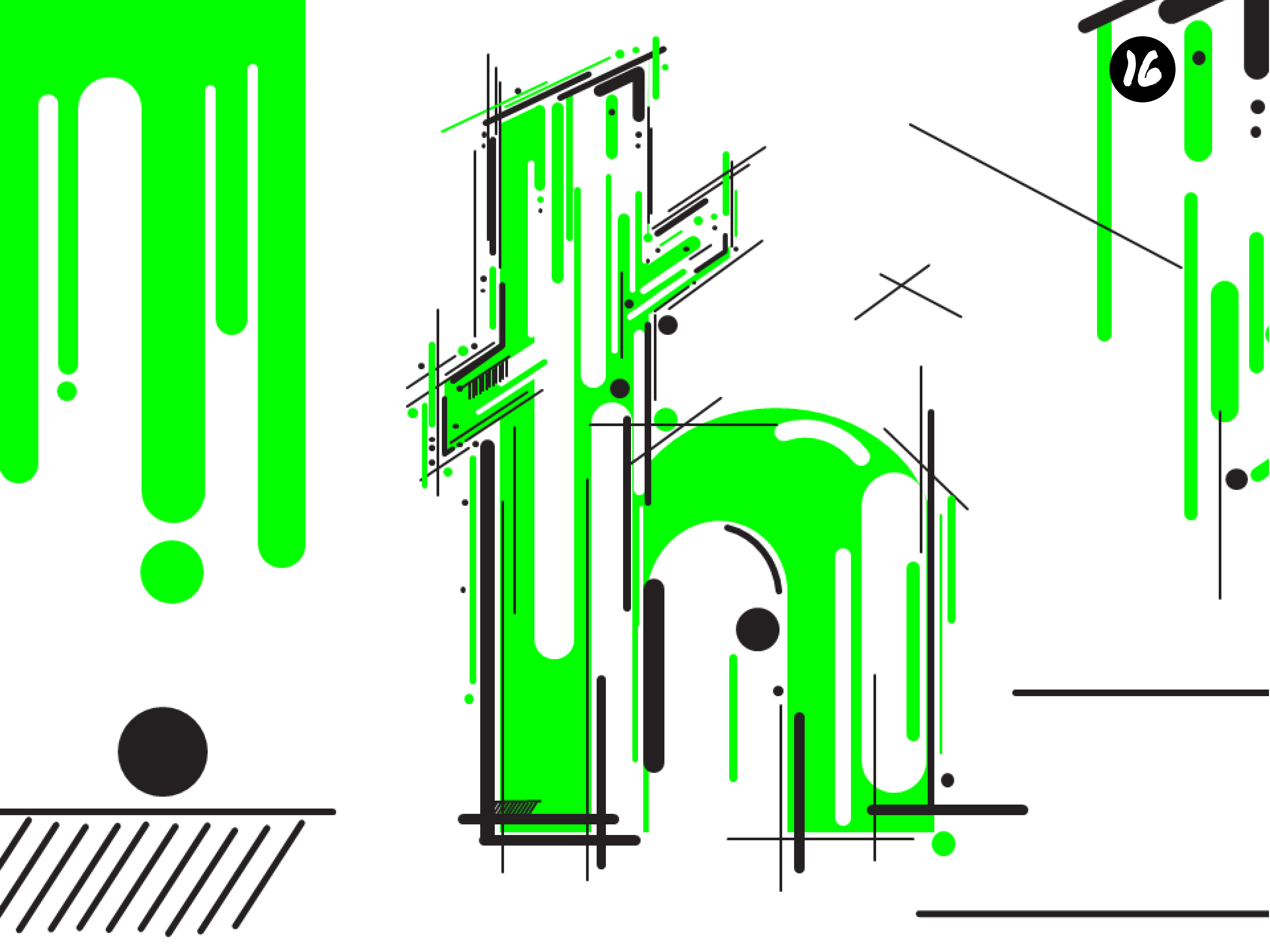
Que se conoce con el nombre de Ley de Kirchhoff, en honor a Gustav Kirchhoff, quién desarrollo el concepto de cuerpo negro en 1860. Además, Kirchhoff demostró que la relación anterior se verifica para cada frecuencia $\boldsymbol{\nu}$, es decir:

$$\boldsymbol{K_\nu(T) = \frac{E_\nu}{a_\nu}}$$

La distribución de intensidades $\boldsymbol{K_\nu(T)}$ es una función que no está relacionada con la naturaleza concreta de la sustancia con la que están hechas las paredes de la cavidad, ni a su forma o tamaño. Es una función universal que solo depende de la naturaleza de la radiación térmica.

La determinación de la expresión de la distribución de intensidades llevó a cuestionar los conceptos clásicos y condujo a una verdadera revolución en la Física, en palabras de Max Planck:

Gustav Kirchhoff demostró que el estado de la radiación térmica en el interior de una cavidad delimitada por una sustancia, de cualquier naturaleza, que la absorba y la emita, a una temperatura uniforme, es totalmente independiente de la naturaleza de la sustancia. Se demostró así la existencia de una función universal la cual dependía solo de la temperatura y la longitud de onda, pero en ninguna modo de las propiedades de sustancia alguna. Y el descubrimiento de esta función extraordinaria prometía una compresión más profunda de la relación entre la energía y la temperatura que es, de hecho, el problema más importante de la termodinámica, y por lo tanto, de toda la física molecular.



¿Qué sucede si en vez de tener una cavidad o recipiente lleno de radiación electromagnética, tenemos un recipiente lleno de gas?

Nos interesa saber, como el gas alcanza el equilibrio termodinámico y cuál es la energía promedio de cada partícula. Para averiguarlo nada mejor que utilizar nuestros conocimiento de física clásica.

Si introducimos dentro de un recipiente un poco de gas caliente, y otro poco de gas más frio, las colisiones mutuas entre moléculas en unos pocos instantes frenarán a las más veloces y acelerarán a las más lentas, llegándose entonces a una distribución pareja de energía. Las partículas de gas una vez que hayan alcanzado el equilibrio, tendrán una energía promedio proporcional a la temperatura a la cual se encuentran. De acuerdo con el *principio de equipartición*, cada partícula tendrá un valor promedio de energía de $\frac{3}{2}kT$, donde k es la constante de Boltzmann*. Para un número total N de partículas la energía total del sistema será $N\,{}^{3}/_{2}\,kT$.

Volvamos a nuestro problema inicial, una cavidad llena de radiación, e intentemos aplicar los razonamientos anteriores para entender cual es la distribución de equilibrio de la radiación contenida en nuestro recipiente. En el gas, el equilibrio se alcanza por el intercambio de energía que experimentan las partículas en innumerables colisiones entre si. En el caso de ondas luminosas la situación es distinta, porque dos haces de luz que se entrecruzan, no se afectan ni interactúan entre si. Para conseguir que exista un intercambio de energía entre ondas estacionarias de diferentes longitudes de onda, hay que introducir dentro del recipiente un material que pueda absorber y emitir todas las longitudes de onda, permitiendo así, que la energía se distribuya entre todas las longitudes de onda. Un simple granito de carbón puede servir.

Para obtener la situación de equilibrio debemos calcular dos cosas:
por un lado la cantidad de ondas estacionarias presentes en la cavidad, y por otro, la energía promedio asociada a cada frecuencia ν. De acuerdo con la física clásica, tenemos que el número de ondas estacionarias para una frecuencia ν es $\frac{8\pi\nu^2}{c^3}$, donde c es la velocidad de la luz**. Aplicando el *principio de equipartición* de la energía, a cada modo o frecuencia le corresponde una energía promedio kT. Con ambos resultados, calculamos la energía u_ν asociada a cada frecuencia dentro de la cavidad, es decir:

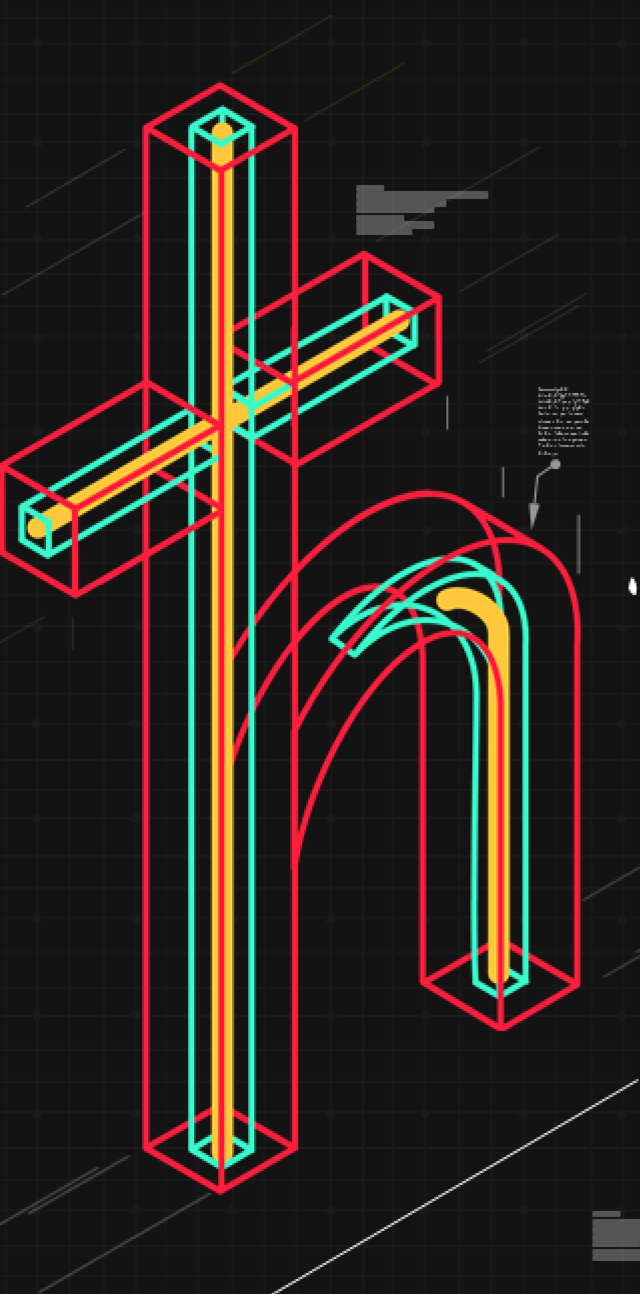
$$u_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3}kT$$

Analicemos el resultado obtenido. La expresión anterior nos dice que si llenamos la cavidad inicialmente con luz roja por ejemplo, esta luz comenzará a convertirse por virtud de absorción y emisión en rayos ultravioletas, rayos X, rayos gamma, etc.

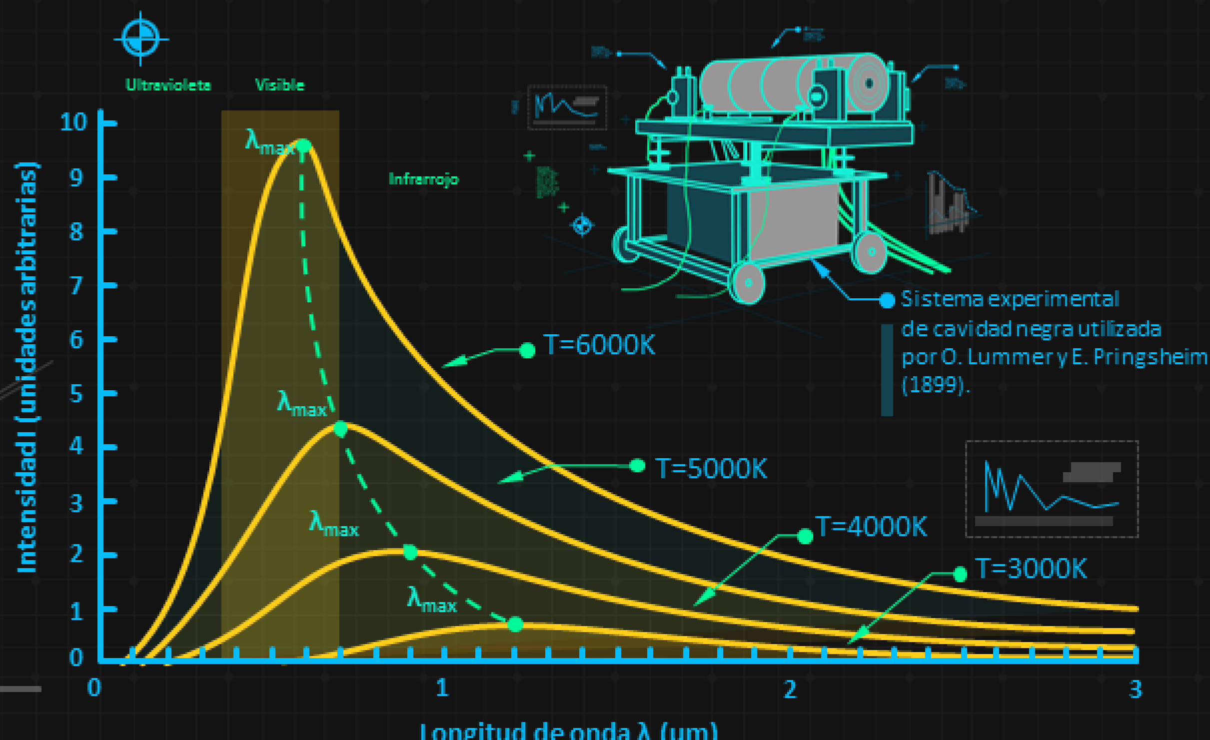
Una situación similar ocurriría dentro del horno de nuestra casa. Así, si después de esperar los 15 minutos de cocción nos disponemos a disfrutar de nuestras masitas recién horneadas, al abrir el horno, seriamos alcanzados por una dosis mortal de radiación, muriendo al instante, UNA VERDADERA CATÁSTROFE. ¿En qué nos equivocamos?.

* $k = 1{,}3806488x10^{-23} JK^{-1}$
** $c = 3x10^{8} m/s$


18
CLASSICAL
OVEN



Las primeras mediciones experimentales del espectro de un cuerpo negro fueron realizadas en 1886 por el astrónomo S. P. Langley. Su objetivo consistía en determinar el efecto que provoca sobre la radiación solar su absorción y reemisión por la superficie relativamente fría de un planeta. Langley utilizó esferas de cobre recubiertas de negro de humo, realizando mediciones en un rango de temperaturas entre 100 y 1000C.
En ese rango de temperaturas, el espectro medido se encuentra casi en su totalidad en el infrarrojo. Posteriormente F. Paschen mejoró la medición del espectro utilizando nuevas técnicas de espectroscopia.
En 1899 O. Lummer y E. Pringsheim, rediseñaron el sistema experimental, utilizando una cavidad negra, de esta manera la radiación alcanza su equilibrio antes de realizar la medición. Formas típicas del espectro de emisión de un cuerpo negro se ilustran en la figura inferior.
Las mejoras en el diseño experimental y en los sistemas de medición continuaron en los años posteriores, especialmente por los trabajos realizados por dos expertos en espectroscopia de infrarrojo, F. Kurlbaum y H. Rubens. Los nuevos y precisos datos experimentales tendrían efectos decisivos sobre la evolución subsiguiente de la física.



Sistema experimental de cavidad negra utilizada por O. Lummer y E. Pringsheim (1899).


th

Wilhelm Wien, nació en Prusia Oriental en 1864. Trabajó inicialmente bajo la tutela de H. Helmholtz y después se incorporó al Instituto Imperial de Física y Tecnología. Allí, se interesó por el problema de la radiación de cuerpo negro. Wien hizo dos grandes contribuciones en este tema, por los cuales recibió el premio Nobel de Física en 1911.

La primera contribución de Wien, fue demostrar que la intensidad de la radiación emitida por un cuerpo negro K_v, no dependía de la frecuencia v y la temperatura T de manera independiente, sino a través de una combinación de ambas, en la que se conoce actualmente como la *ley de desplazamiento de Wien*.

Según esta ley, a medida que aumentamos la temperatura, la longitud de onda λ de la energía radiada se desplaza hacia longitudes de ondas más cortas.

La ley de Wien se expresa de la siguiente manera:

$$\lambda_{max} T = cte. = 2{,}898 mmK$$

Donde λ_{max} representa la longitud de onda con mayor intensidad radiada por el cuerpo negro a una determinada temperatura.

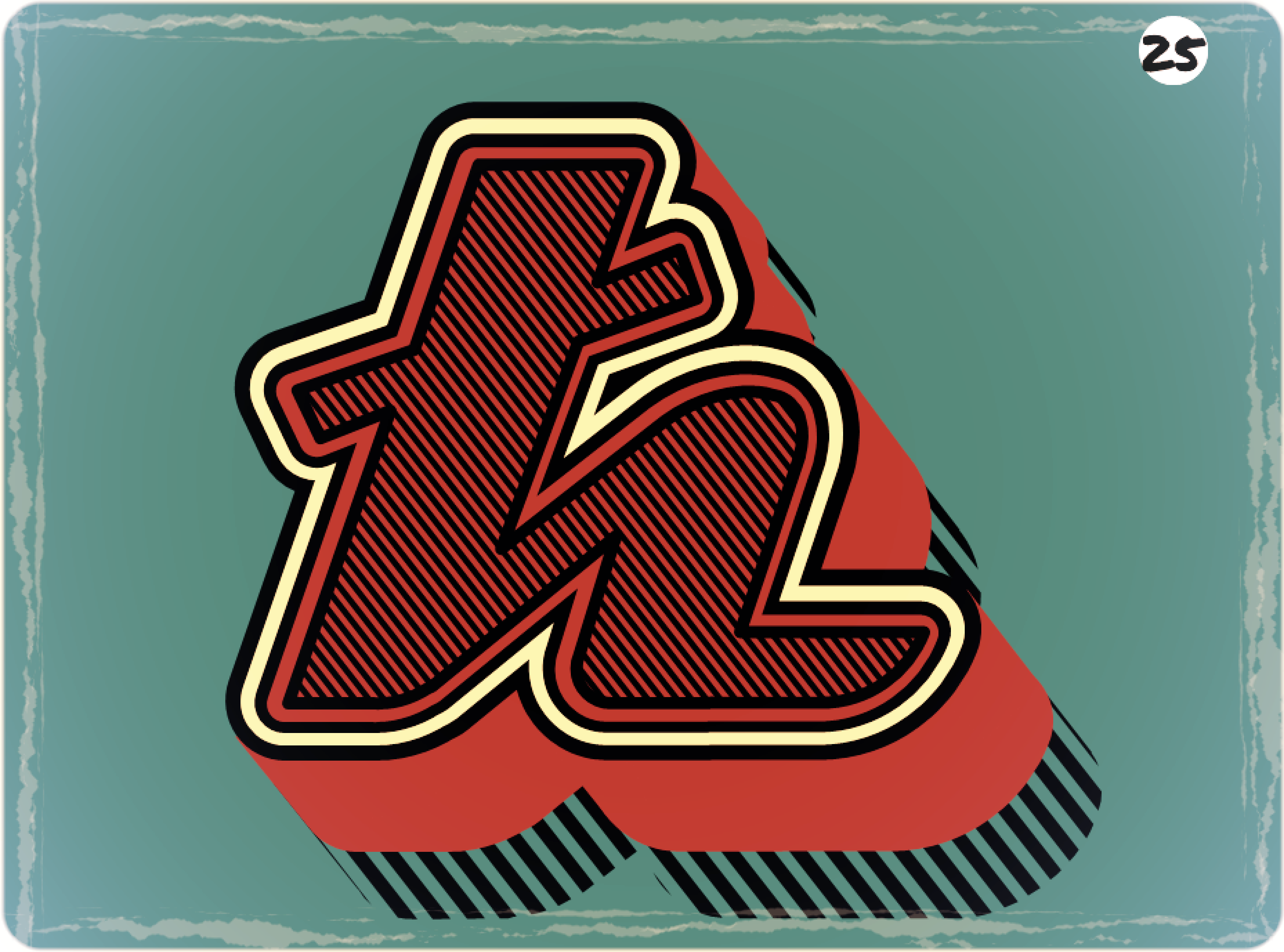
La ley de Wien se puede visualizar fácilmente observando la luz que emitida por cuerpos incandescentes, que se desplaza desde el rojo hacia el extremo violeta del espectro a medida que se calienta. Por ejemplo, un trozo de carbón utilizado en un asado, cuya temperatura ronda los 300°C, presenta el máximo de emisión en el infrarrojo ($\lambda_{max} = 5\mu m$), mientras que el Sol cuya temperatura superficial alcanza los 5770°C emite en el amarillo visible ($\lambda_{max} = 0{,}48\mu m$).

La segunda gran contribución de Wien en la resolución del problema del cuerpo negro fue el desarrollo de una ley para la distribución espectral, que se ajustaba muy bien a los datos experimentales por entonces conocidos. Sin embrago, la deducción teoría era poco satisfactoria. La ley dictamina que la intensidad de la radiación térmica decae exponencialmente con la frecuencia, y por ello a menudo se la conoce como *ley exponencial de Wien*.

"Como siempre
había considerado la
búsqueda de lo absoluto
como el objetivo más
elevado de toda
actividad científica,
me apresté
ansiosamente a
trabajar*"

Max Planck
luego de prepararse unos mates,
y listo a trabajar en el problema
del cuerpo negro.

*Max Planck, Autobiografía Científica, 1987.


25

En 1896, Wien propuso una expresión de tipo exponencial para la función del espectro de un cuerpo negro:

$$u_\nu = \alpha \nu^3 e^{-\beta\nu/T}$$

Donde α y β eran constantes independientes de la frecuencia ν a ajustar con los datos experimentales.
La ecuación fue deducida por Wien admitiendo que la distribución espectral de la radiación del cuerpo negro era análoga a la distribución de Maxwell para las velocidades de las moléculas de un gas. Aunque la concordancia con los datos experimentales era buena para frecuencias elevadas, sin embargo, las discrepancias se hacían evidentes en el resto del espectro. Fue Planck quien en 1900, dio el paso decisivo en la obtención de la fórmula del espectro.

En su modelo de cuerpo negro, Planck asimiló los átomos que constituían las paredes de la cavidad a cargas moviéndose como osciladores lineales, los cuales interactuaban intercambiando energía con la radiación térmica existente en el interior de dicha cavidad. Esto encajaba perfectamente con la electrodinámica clásica y la teoría de la emisión y absorción de radiación por dipolos oscilantes desarrollada por Hertz. De hecho, igualando las tasas de emisión y absorción de los osciladores elementales se obtiene:

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

Donde $E(\nu,T)$ representa la energía promedio de tales osciladores. Obsérvese que el término que multiplica a $E(\nu,T)$ es idéntico al obtenido de manera clásica, en el caso de asociar a cada modo de oscilación una energía de magnitud kT, obtenemos la expresión clásica de Rayleigh-Jeans.
Basándose en ecuaciones fundamentales de la Termodinámica y haciendo uso de las fórmulas de Wien, la cual describe de manera correcta la radiación a frecuencias elevadas, y la formulación clásica a frecuencias bajas, Planck comprobó que se cumplían las siguientes relaciones :

$$\frac{d^2S}{dE^2} \propto \frac{1}{E}$$

$$\frac{d^2S}{dE^2} \propto \frac{1}{E^2}$$

Donde S es la entropía de los osciladores.
La idea central de Planck fue interpolar entre ambas fórmulas, proponiendo la siguiente expresión:

$$\frac{d^2S}{dE^2} = \frac{1}{E(a(\nu)+E)}$$

Donde $a(\nu)$ es una constante independiente de T pero dependiente de la frecuencia. Imponiendo la condición de que la expresión debe ajustarse con las expresiones anteriores en ambos extremos de frecuencia, obtenemos:

$$E = \frac{a(\nu)}{e^{a(\nu)/T} - 1}$$

Y por lo tanto

$$u_\nu = C\,\frac{\nu^3}{e^{A\nu/T} - 1} \quad con\ a = A\nu \text{ y } \mathrm{C} = \text{cte}$$

El acuerdo de esta fórmula con los precisos datos experimentales de Rubens y Kurlbaum fue completo. Si embargo la fórmula era una fórmula empírica, determinada mediante tanteo. Era preciso encontrar su justificación teórica sin importar el costo.


27

¨Había estado peleándome con el problema del equilibrio entre la materia y la radiación durante seis años (desde 1894), sin ningún éxito; sabía que el problema era de una importancia fundamental en física; conocía la fórmula que reproducía la distribución espectral de la energía; tenía que encontrar una interpretación teórica a cualquier precio, no importa lo alto que fuese¨*

Max Planck

fragmento de una carta dirigida a un amigo donde describe su lucha por encontrar una formulación teórica a la ley espectral de cuerpo negro.

*Max Planck, Autobiografía Científica, 1987.

¨Caballeros¨, dijo Planck, a las 5 en punto de la tarde el viernes 14 de diciembre de 1900, a los miembros de la Sociedad de Física Alemana, cuando empezó su conferencia titulada ¨Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum¨, es decir Acerca de la teoría de la ley de distribución de energía del espectro normal. ¨Hace varias semanas -prosiguió- tuve el privilegio de llamar su atención sobre una nueva ecuación que parecía, en mi opinión, adaptarse a la ley de distribución de la energía radiante de todas las regiones del espectro.¨ , para luego esbozar la física sobre la que parecía asentarse su nueva fórmula.
A continuación revisaremos las ideas básicas del trabajo de Planck.
¨Ya que la entropía de un resonador está determinada por la manera en que la energía se distribuye a la vez sobre muchos resonadores, yo tengo la sospecha de que uno debe evaluar esta cantidad introduciendo consideraciones probabilísticas en la teoría electromagnética de la radiación, cuya importancia para la segunda ley de la termodinámica fue originalmente descubierta por el señor L. Boltzmann.¨

Planck propone considerar, ¨...un gran número de resonadores lineales que vibran monocromáticamente: N de frecuencia ν, N' de frecuencia ν',... con todos los N grandes números, los cuales están apropiadamente separados y encerrados en un medio diatérmico y acotados por paredes reflectantes. Dejemos que el sistema contenga una cierta cantidad de energía, la energía total E_t, la cual está presente parcialmente en el medio como radiación libre y parcialmente en los resonadores como energía vibracional¨.
El problema que plantea Planck, es, ¿Cómo se distribuye la energía en un estado estacionario entre las vibraciones de los resonadores y sobre las diversas frecuencias de la radiación presente en el medio?.
Para ello, considera las vibraciones de los resonadores, y le asigna ciertas energías arbitrarias: (E,N), (E',ν'), ... (E^k,N^k) ...,tal que $\sum_k E^k = E_0$, donde $\Delta E = E_t - E_0$ es la radiación libre presente en el medio. A continuación, calcula la energía entre los resonadores de cada grupo, ¨Si E se considera una cantidad continuamente divisible, esta distribución es posible en un número infinito de formas. Sin embargo, consideremos que E se compone de un número bien definido de partes iguales y utilizaremos la cte. h de la naturaleza...[la cual] multiplicada por la frecuencia común ν de los resonadores suministra el elemento de energía ε, y dividiendo E por ε, obtenemos el número P de elementos de energía que deben estar distribuidos entre los N resonadores¨($P = {}^{E}/_{\varepsilon}$, con $\varepsilon = h\nu$).
El número de maneras de distribuir P elementos de energía entre los N resonadores, resulta:

$$R = \frac{(P+N-1)!}{P!\,(N-1)!} \approx \frac{(P+N)^{P+N}}{P^P N^N}$$

Si para el valor estacionario de la energía de un resonador asignamos el valor $U = {}^{E}/_{\varepsilon}$, la densidad espacial de energía de radiación correspondiente en un medio diatérmico es:

$$\rho_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3}U \qquad \text{donde} \qquad U = \frac{P\varepsilon}{N} \rightarrow \frac{U}{\varepsilon} = \frac{P}{N}$$

Así, tomando S_N como la entropía del sistema de N resonadores y S con la entropía de un resonador y evaluando $S_N = k ln R$, se obtiene:

$$S = \frac{S_N}{N} = k\left[\left(1+\frac{U}{\varepsilon}\right) ln\left(1+\frac{U}{\varepsilon}\right) - \frac{U}{\varepsilon}\, ln\left(\frac{U}{\varepsilon}\right)\right]$$

$$\frac{dS}{dU} = \frac{1}{T} = \frac{k}{\varepsilon} ln\left(1+\frac{\varepsilon}{U}\right) = \frac{k}{h\nu} ln\left(1+\frac{h\nu}{U}\right)$$

Resolviendo para U:

$$U = \frac{h\nu}{\exp\left[\frac{h\nu}{kT}\right] - 1}$$

Y finalmente, se obtiene la fórmula buscada:

$$\rho_\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3}\frac{1}{\exp\left[\frac{h\nu}{kT}\right] - 1}$$


$\varepsilon =$
$\hbar\omega$

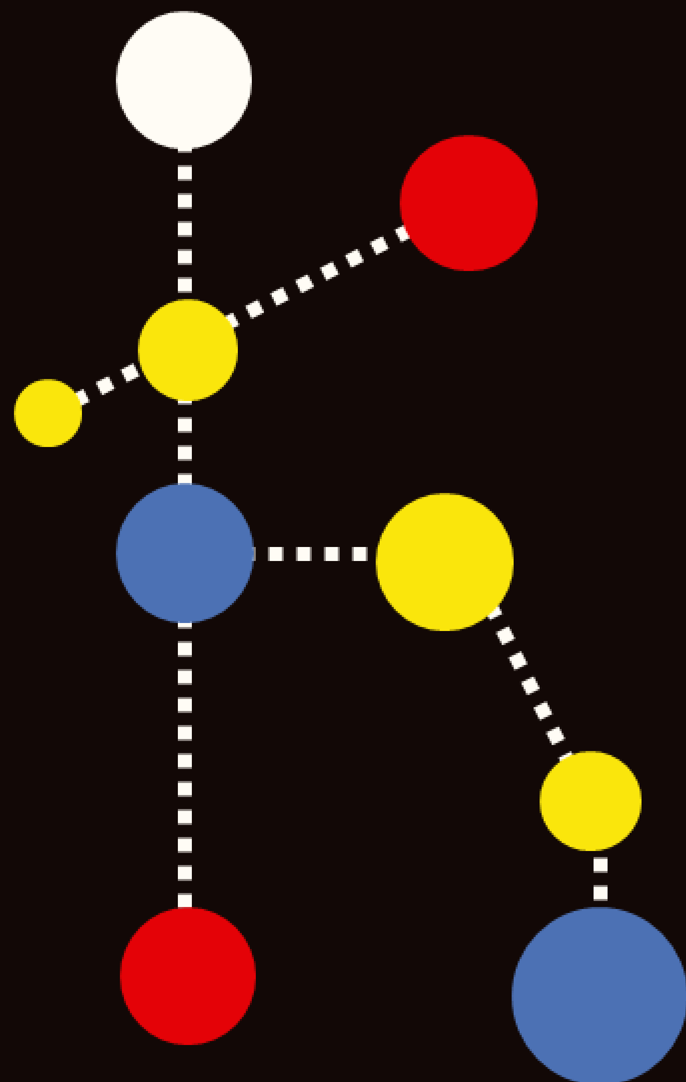
¨Fue como si el suelo que nos sostuviera se hubiese esfumado y nada pudiera, en ausencia de todo fundamento sólido, erigirse*¨

Albert Einstein

Fueron las palabras con las que
Einstein describió el modo
en que se sintió después de haber
leído el artículo de Max Planck.
.

*Einstein Albert, ¨Autobiographical Notes¨,1969.

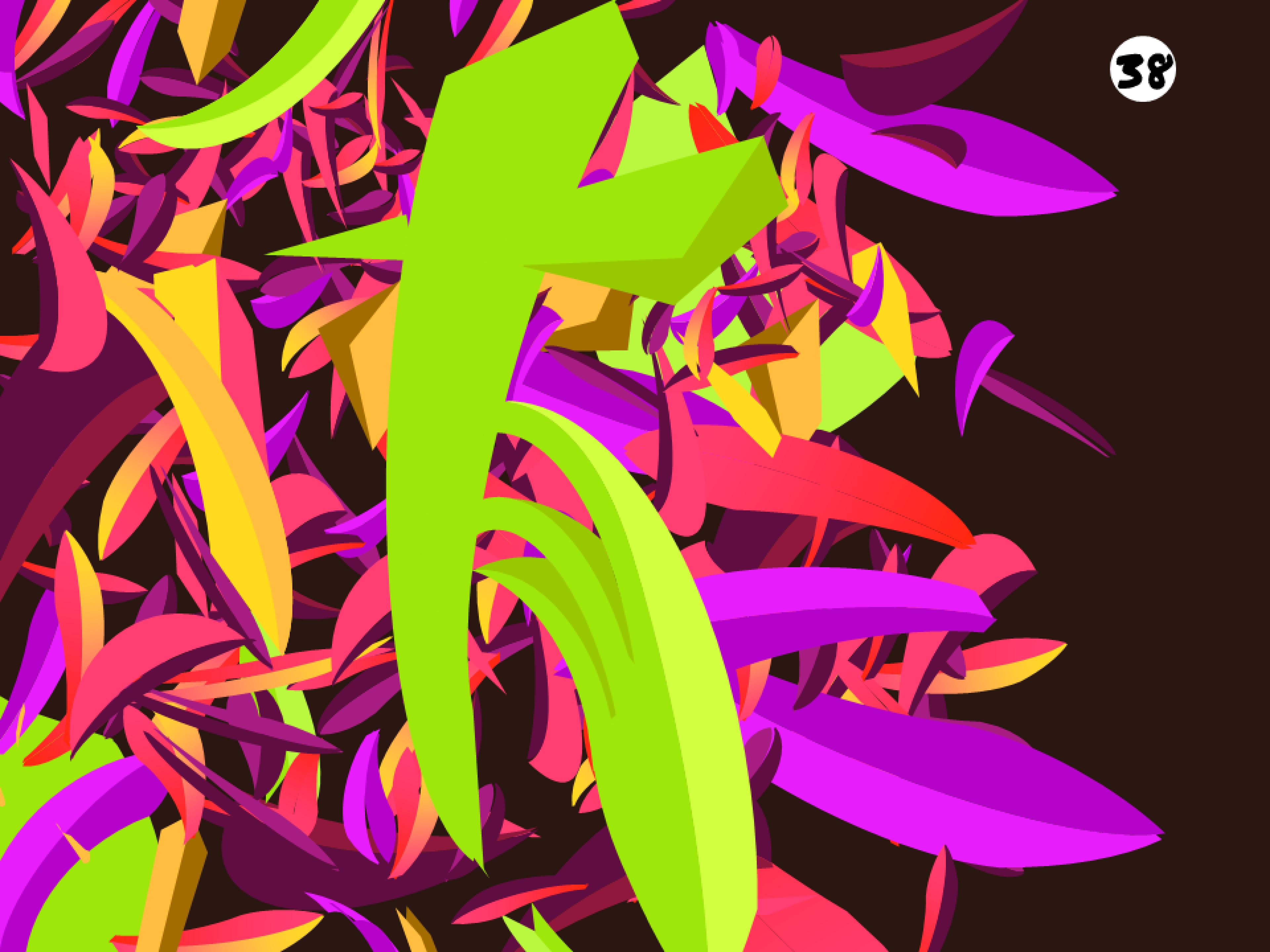

K

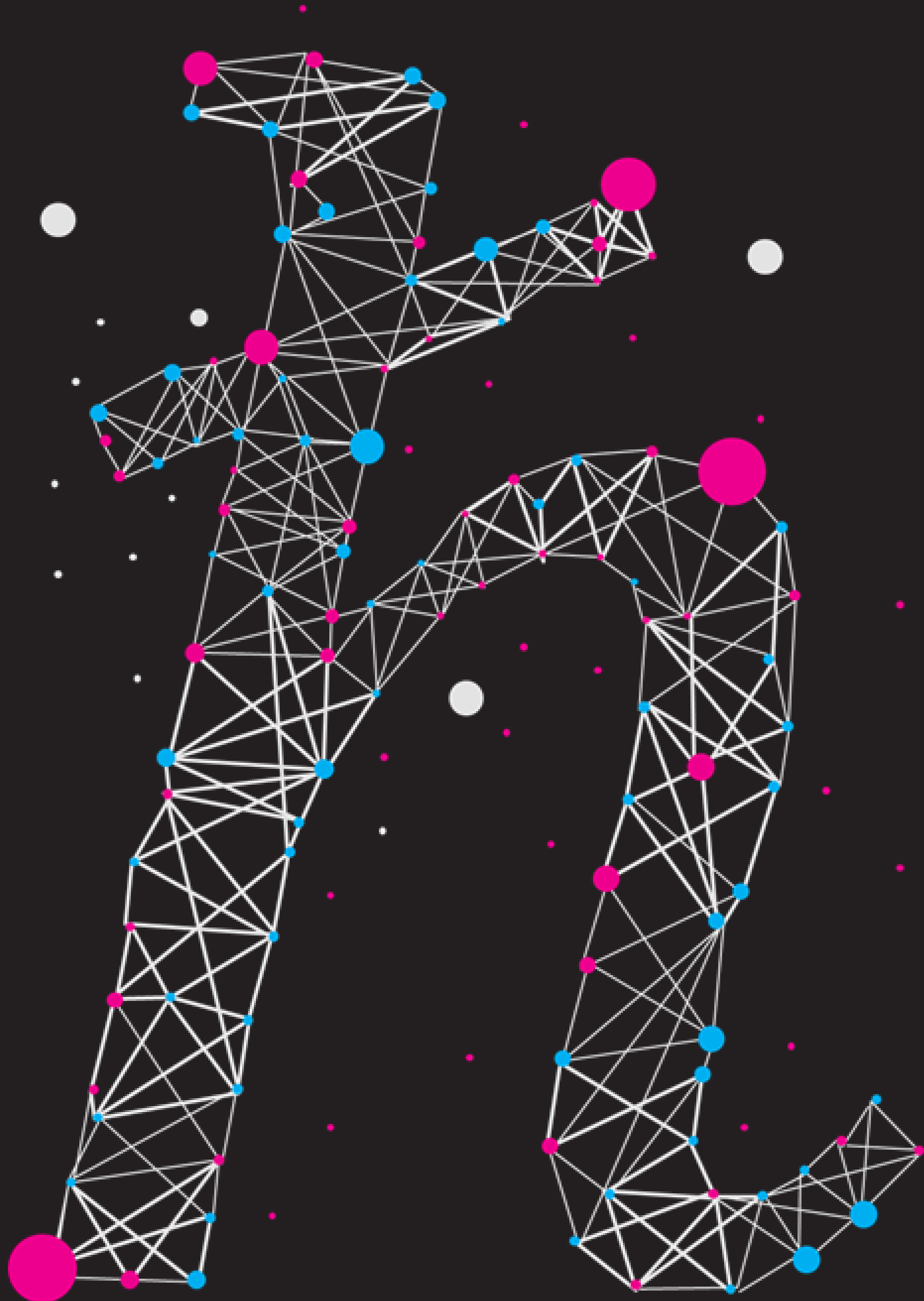



36

En 1905 Albert Einstein publicó siete artículos, cuatro de ellos transcendentales. En particular nos interesa el artículo que lleva por nombre «Über emem die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heug ristichen Gesishtspunk», Annalen der Physík 17 (1905), pp. 132-148 [Sobre un punto de vista eurístico concerniente a la producción y transformación de la luz]. En este trabajo, Einstein extiende el concepto de cuantificación a la radiación, en la introducción del artículo podemos leer:

> La teoría ondulatoria de la luz, que opera con funciones espaciales continuas, se ha mostrado soberbia para describir fenómenos puramente ópticos y probablemente nunca será reemplazada por otra teoría. Deberíamos tener en cuenta, sin embargo, que las observaciones ópticas se refieren a promedios temporales antes que a valores instantáneos; y es perfectamente concebible, pese a la completa confirmación experimental de la teoría de la difracción, reflexión, refracción, dispersión, etc., que la teoría de la luz, que opera con funciones espaciales continuas, lleve a contradicciones cuando se aplique a los fenómenos de emisión y transformación de la luz. De hecho, creo que las observaciones de la «radiación de cuerpo negro», fotoluminiscencia, producción de rayos catódicos por luz ultravioleta, y otros fenómenos relacionados asociados con la emisión y transformación de luz parecen entenderse más fácilmente si se supone que la energía de la luz está distribuida por el espacio de forma discontinua. De acuerdo con la hipótesis aquí considerada, en la propagación de un rayo de luz emitido desde una fuente puntual la energía no está distribuida de forma continua sobre volúmenes de espacio cada vez mayores, sino que consiste en un número finito de cuantos de energía localizados en puntos del espacio que se mueven sin dividirse, y solo pueden ser absorbidos o generados como unidades completas.





"En este artículo deseo presentar la línea de pensamiento y citar los hechos que me llevaron por este camino, con la esperanza de que el enfoque que aquí se presenta se mostrará útil para algunos investigadores en sus trabajos"

Albert Einstein

frase final de la introducción del artículo publicado en 1905, sobre un punto de vista heurístico concerniente a la producción y transformación de la luz


th

En la primer parte de su trabajo, Einstein muestra que cualquier acercamiento clásico al problema del cuerpo negro, lleva a contradicciones con la realidad. Para avanzar Einstein propone *¨considerar los hechos experimentales relativos a la radiación del cuerpo negro sin recurrir a ningún modelo para la emisión y propagación de la radiación.¨*

Diseña un plan sencillo pero muy ingenioso. Un gas no es más que un conjunto de partículas y, cuando está en equilibrio térmico, son las propiedades de esas partículas las que determinan por ejemplo la presión ejercida en una pared a una dada temperatura.

Si se establecen semejanzas con las propiedades de un gas, podría afirmarse, que la radiación electromagnética se asemeja a las partículas.

¨Las observaciones existentes de la «radiación de cuerpo negro» muestran que la ley

$$\rho = \alpha\nu^3 exp[-\beta\, {}^{\nu}/_{T}]$$

originalmente postulada por el señor Wien para la «radiación de cuerpo negro» no es estrictamente válida. Sin embargo, ha sido completamente confirmada por experimentos para altos valores de ν/T. Basaremos nuestros cálculos en dicha fórmula, teniendo en cuenta, no obstante, que nuestros resultados son válidos solo dentro de ciertos límites.¨

¨...Si nos restringimos a investigar la dependencia de la entropía respecto del volumen ocupado por la radiación, y denotamos por S_0 la entropía de la radiación a volumen υ_0, obtenemos

$$S - S_0 = \frac{E}{\beta\nu}\ln[\frac{\upsilon}{\upsilon_0}]$$

Esta ecuación muestra que la entropía de la radiación monocromática de densidad suficientemente baja varía con el volumen de acuerdo con la misma ley que la entropía de un gas ideal o de una solución diluida. En lo que sigue, interpretaremos esta ecuación sobre la base del principio introducido en la física por el señor Boltzmann, según el cual la entropía de un sistema es una función de la probabilidad de su estado.¨

A continuación, Einstein compara la fórmula obtenida para la dependencia de la entropía de la radiación monocromática respecto del volumen con la expresión de la entropía desarrollada por Boltzmann. *¨Si reescribimos esta fórmula en la forma*

$$S - S_0 = \frac{R}{N}\ln[\left(\frac{\upsilon}{\upsilon_0}\right)^{\frac{R}{N}\frac{E}{\beta\nu}}]$$

y la comparamos con la fórmula general que expresa el principio de Boltzmann

$$S - S_0 = \frac{R}{N}\ln[W]$$

llegamos a la siguiente conclusión: si (mediante paredes reflectantes) en el volumen υ_0 hay encerrada radiación monocromática de frecuencia ν y energía E, la probabilidad de que en un instante de tiempo escogido aleatoriamente la energía de radiación total se encuentre en la parte υ del volumen υ_0 es

$$W = \left(\frac{\upsilon}{\upsilon_0}\right)^{\frac{N}{R}\frac{E}{\beta\nu}}$$

A partir de esto concluimos, además, que la radiación monocromática de baja densidad (dentro del rango de validez de la fórmula de radiación de Wien) se comporta termodinámicamente como si consistiera en cuantos de energía mutuamente independientes de magnitud $R\beta\nu/N$.¨
¨Si la radiación monocromática (de densidad suficientemente baja) se comporta en lo que concierne a la dependencia de su entropía respecto del volumen, como si la radiación fuera un medio discontinuo consistente en cuantos a energía de magnitud $R\beta\nu/N$, entonces parece razonable investigar si las leyes que gobiernan la emisión y transformación en tales cuantos de energía.¨

El artículo finaliza mostrando que la aplicación del concepto de cuantos de luz describe correctamente el efecto fotoeléctrico. Según las investigaciones de Einstein, la energía con que los electrones escapan del cátodo iluminado aumenta linealmente con la frecuencia de la luz incidente, siendo independiente de la intensidad de iluminación. La demostración experimental de este resultado la realizó el físico estadounidense Robert Millikan entre los años 1905 y 1915.

En el año 1900, Max Planck descubrió que solo podía derivar su fórmula de la distribución de cuerpo negro, si los osciladores que conformaban las paredes de la cavidad ideada como modelo de cuerpo negro, absorbían y emitían radiación electromagnética en paquetes de energía proporcionales a su frecuencia de oscilación.

Sin embargo, consideró a este hecho como un ¨supuesto puramente formal¨, sobre el que ¨realmente no he pensado mucho.¨

En 1905 Albert Einstein demostró que la radiación electromagnética presentaba un carácter corpuscular, y que ¨los fenómenos asociados con la emisión y transformación de la luz parecen entenderse más fácilmente si se supone que la energía de la luz está distribuida por el espacio de forma discontinua¨. Utilizó esta idea para explicar el efecto fotoeléctrico.

Pero la explicación de Einstein iba mucho más allá del efecto fotoeléctrico. Al utilizar el cuanto para explicar un fenómeno no relacionado con la radiación de cuerpo negro, Einstein mostró que la idea de los cuantos tenía una trascendencia fundamental. Había nacido la física cuántica.


ћ
44

¨Que alguna vez errara en el blanco de 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 de verdad nuevas, ni aun en las ciencias más exactas, sin correr a veces algún riesgo¨*

Max Planck

fragmento del discurso de bienvenida a Einstein a la Academia Prusiana de Ciencias en 1913, donde Planck señala el ¨error¨ de los cuantos de luz.

.

*CPAE, vol. 5, págs. 337-8. Propuesta de ingreso de Einstein a la Academia Prusiana deCiencias, fechada el 12 de junio de 1913 Y firmada por M. Planck, W. Nernst, H. Rubens y E. Warburg.

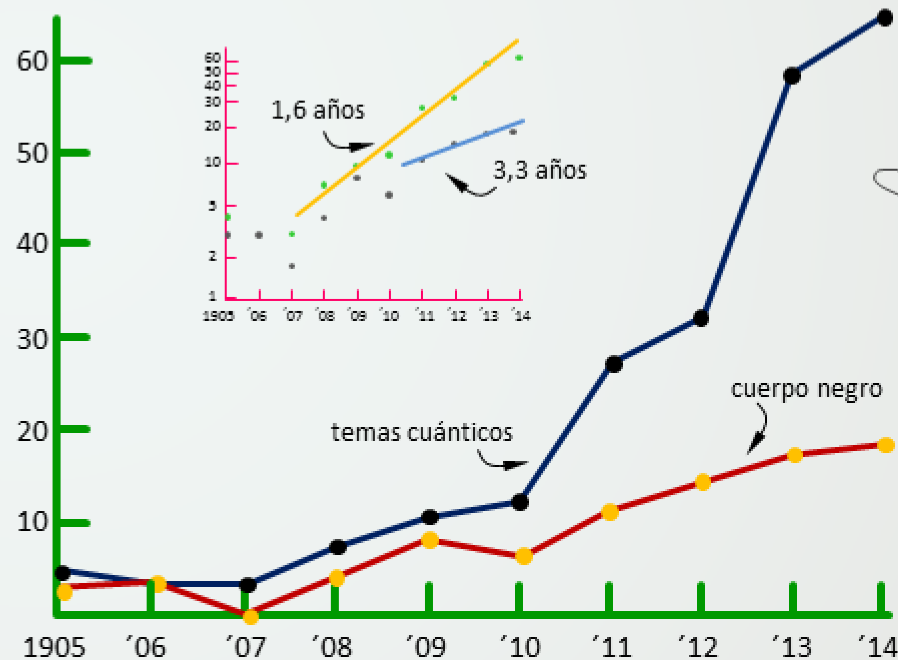

ħ

Antes de 1905, el único autor cuántico es el propio Planck, y en ese papel sólo aparece en los años 1900 y 1901. Exceptuando referencias de pasada sobre la ley de Planck, la publicación continuada sobre el cuanto no comienza hasta 1905, con la intervención de Einstein, Ehrenfest, Lorentz y Jeans. A partir de entonces las publicaciones son continuas y se suceden a un ritmo creciente.

Podemos citar a Peter Debye, quien siguiendo las indicaciones contenidas en los primeros artículos de Rayleigh y Jeans, demostró en 1910 como derivar la ley de Planck, incluido el factor $8\pi\nu^2/c^3$, a base de cuantificar los modos de vibración del campo electromagnético sin recurrir a osciladores.

Paul Ehrenfest obtuvo ese mismo año una prueba, más completa que ninguna de las anteriores, de que era imposible derivar ninguna ley de radiación que concordara con la de Planck, en los límites de altas y bajas frecuencias sin recurrir a la discontinuidad cuántica. Ehrenfest demostró que la ley clásica de Rayleigh-Jeans solo es válida para frecuencias bajas, si la ley fuera válida en todo el rango del espectro, todos los cuerpos incandescentes radiarían intensamente en el rango ultravioleta en contraste con la experiencia cotidiana. Ehrenfest llamó a esta ¨catástrofe¨, la *catástrofe ultravioleta*.

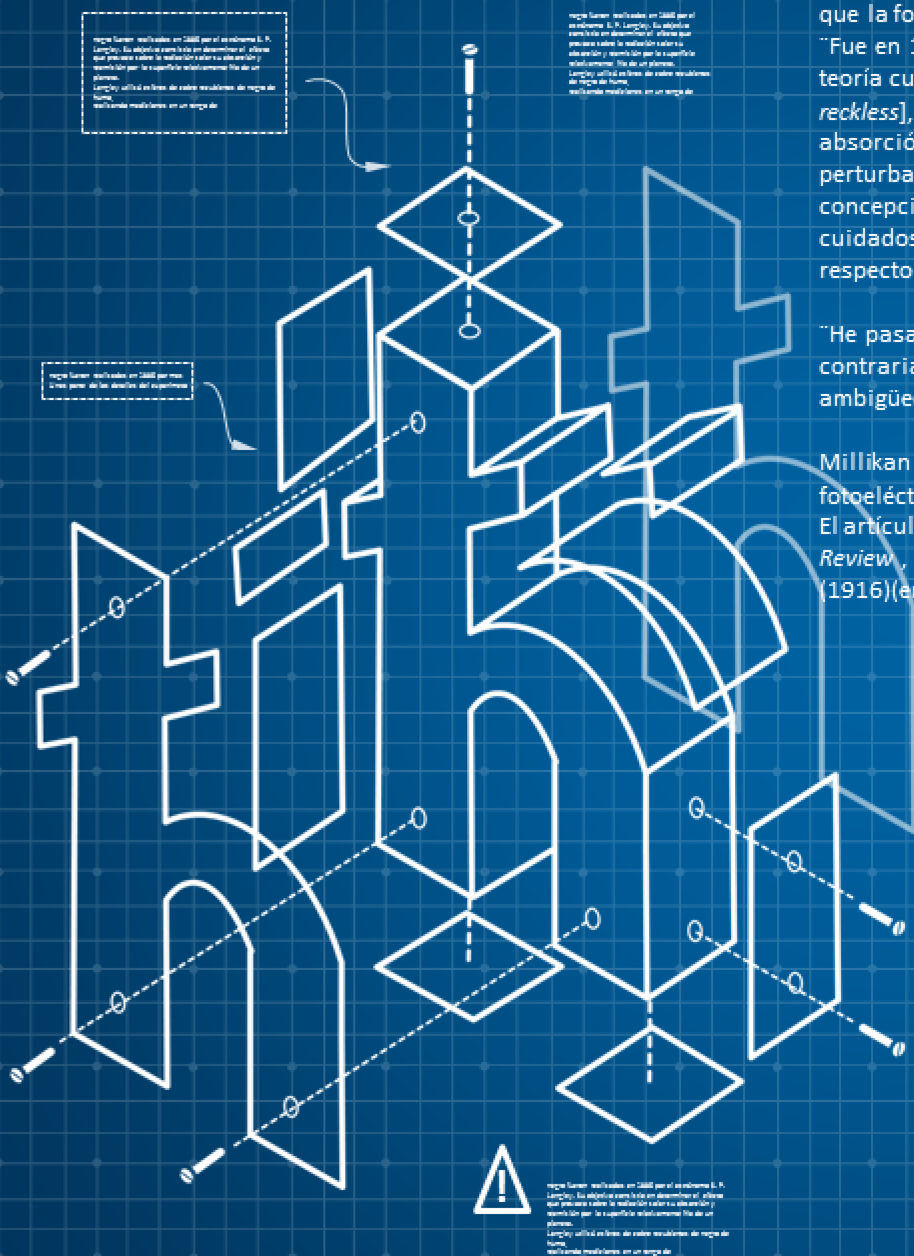
La separación del tema que dio origen al concepto de los cuanntos, el cuerpo negro, y la nueva física emergente se puede visualizar en el siguiente gráfico donde se representa el recuento de autores que publicaban en la revista *abstracts Fortschritte der Physik,* sobre temas relacionados al problema del cuerpo negro y a los cuantos. El gráfico está extraído y adaptado del libro *La teoría del cuerpo negro y la discontinuidad cuántica, 1894-1912* de Thomas Kuhn.

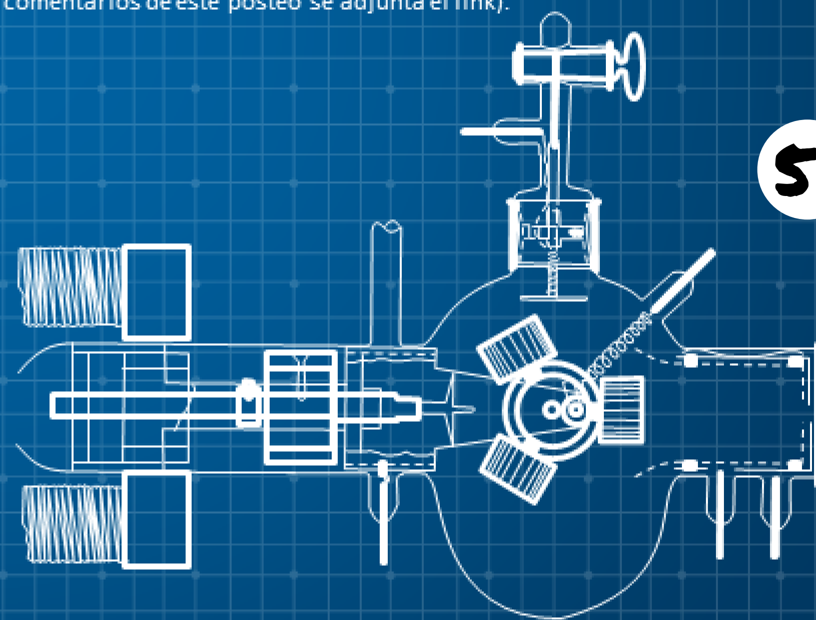


En 1916 Robert Millikan, presentó ante la Asociación Americana de Física sus resultados sobre el estudio experimental minucioso del efecto fotoeléctrico. El propio Millikan había manifestado públicamente que uno de sus objetivos era desterrar la hipótesis cuántica en los términos en que la formulaba Einstein. Precisamente en la introducción del artículo podemos leer:
¨Fue en 1905 cuando Einstein estableció la primera relación entre el efecto fotoeléctrico y la teoría cuántica introduciendo la atrevida, por no decir imprudente [Millikan usa la palabra *reckless*], hipótesis de un corpúsculo de luz de energía $h\nu$, cuya energía es transferida por absorción al electrón. La hipótesis se puede calificar [...] de imprudente[...] porque una perturbación electromagnética que permanece localizada en el espacio parece violar la concepción misma de perturbación electromagnética¨. Sin embargo, los resultados de sus cuidadosos experimentos, verificaron plenamente la ley de Einstein del efecto fotoeléctrico, al respecto Millikan expresó:

¨He pasado diez años de mi vida comprobando las predicciones que Einstein hizo en 1905 y, contrariamente a todas mis expectativas, me vi obligado a afirmar en 1915 su verificación sin ambigüedad, a pesar de toda su irracionalidad.¨

Millikan finaliza su trabajo presentando el valor de la constante de Planck obtenida de manera fotoeléctrica con un valor de $6{,}57x10^{-27}\,ergioxs$ y una precisión del 0.5 por ciento.
El artículo de Millikan se puede consultar gratuitamente desde la página de la revista *Physical Review*, R. A. Millikan, A Direct Photoelectric Determination of Planck's "h". Phys. Rev. 7, 355 (1916)(en los comentarios de este posteo se adjunta el link).



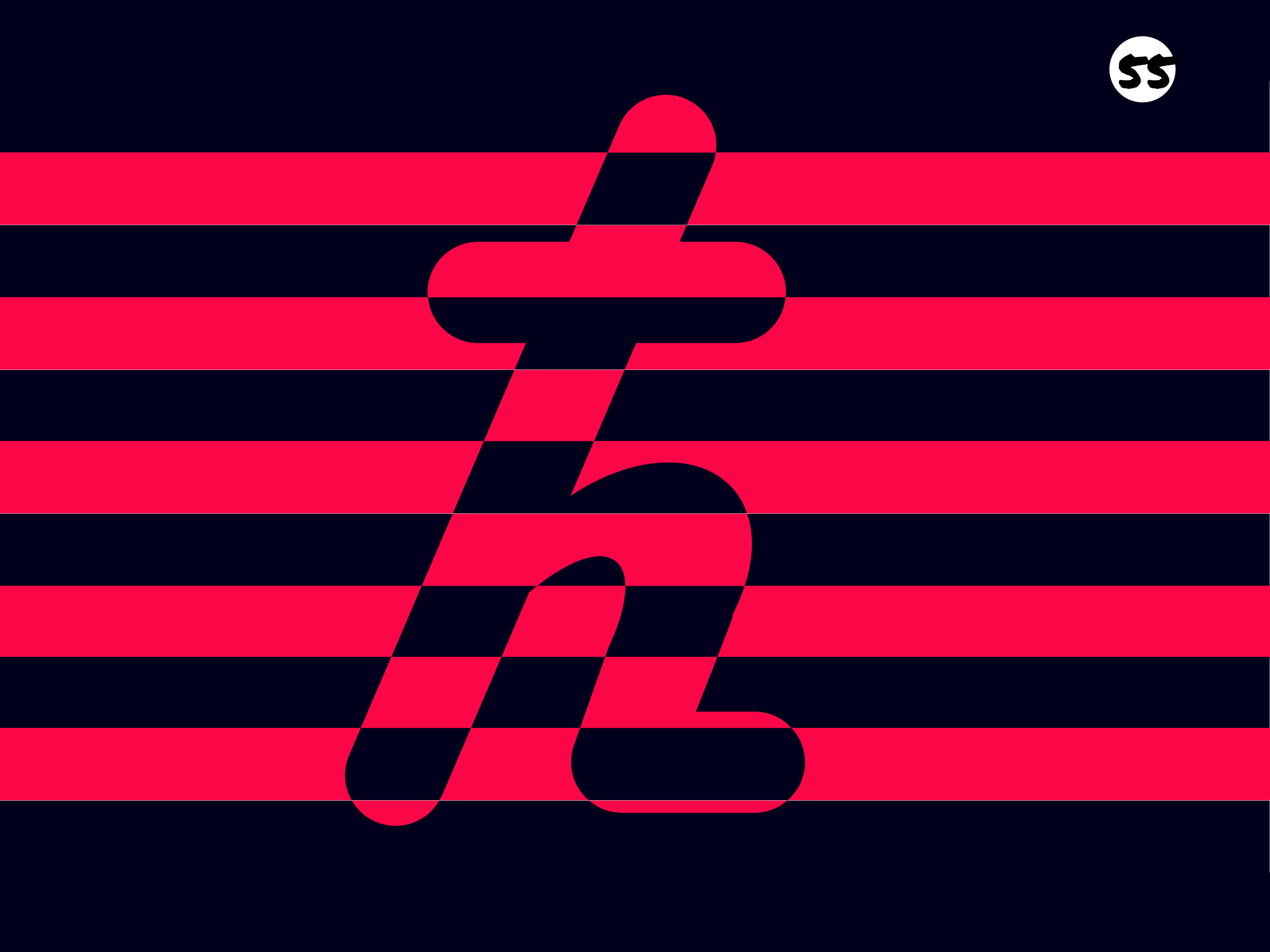


R. A. Millikan, A Direct Photoelectric Determination of Planck's "h". Phys. Rev. 7, 355 (1916).

¨La ecuación de Einstein del efecto fotoeléctrico ha sido sometida a test muy exigentes y parece en todos los casos predecir exactamente los resultados observados¨*

Robert Millikan
frase final del articulo publicado
por Millikan en 1916.

*R. A. Millikan, A Direct Photoelectric Determination of Planck's "h“. Phys. Rev. **7, 355** (1916).



Dpto. Física-UNS. Av. Alem 1253
Bahía Blanca. Bs.As.

www.fisica.uns.edu.ar

Departamento de Física-UNS

Ediciones Bob and Trash