



Experimentos importantes en la Historia de la Física

Física cuántica y nuclear

Prof. J Güémez
Departamento de Física Aplicada
Universidad de Cantabria

Facultad de Ciencias, enero 2019

Física Cuántica

En un sentido amplio, se puede decir que la física cuántica trata del estudio de la interacción de la luz (fotones) con la materia (átomos).

Richard Feynman



Nadie comprende la física cuántica.

Tenemos que abandonar el sentido común con el fin de percibir lo que está sucediendo a nivel atómico.

Si solo pudiéramos transmitir una idea científica a las próximas generaciones, yo elegiría esta: la materia está hecha de átomos, pequeñas partículas en perpetuo movimiento.

Física Cuántica

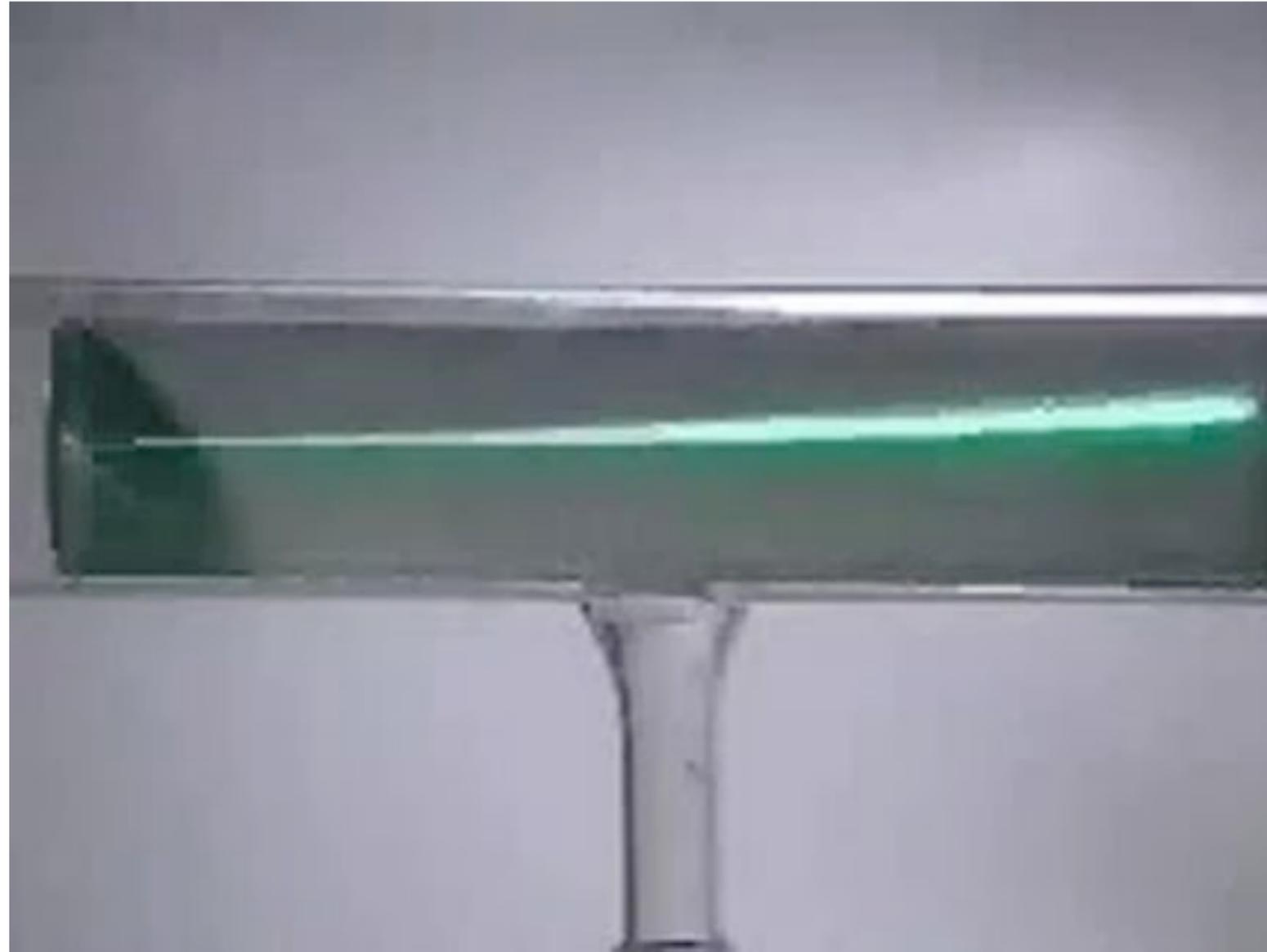
Ludwig Boltzmann	1844 --1906
Max Planck	1858--1947
Albert Einstein	1879 -- 1955
Ernest Rutherford	1871 -- 1937
Niels Bohr	1885 -- 1962
Louis de Broglie	1892 -- 1987
Werner Heisenberg	1901 -- 1976
Erwin Schrödinger	1887 -- 1961
Max Born	1882 -- 1970
Enrico Fermi	1901 -- 1954
Paul Dirac	1902 -- 1984

Rayos catódicos. Descubrimiento del electrón

Rayos Catódicos

Cuando se aplica una gran diferencia de potencial entre los electrodos de un gas enrarecido, se producen rayos catódicos (electrones), que tienen masa, son desviados por los campos eléctricos y magnéticos y no atraviesan la materia.

Rayos catódicos. Descubrimiento del electrón



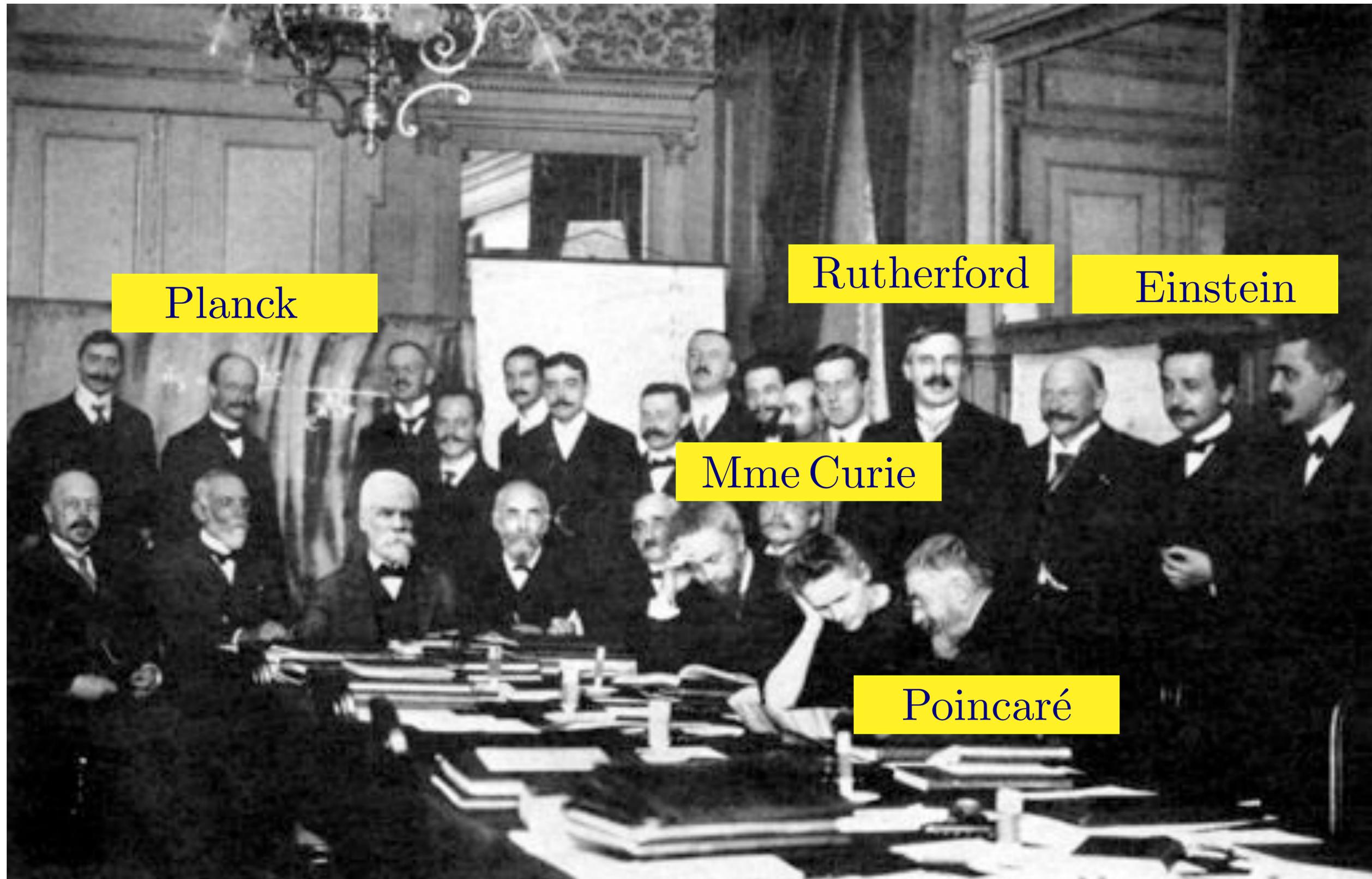
Cuando se aplica una gran diferencia de potencial entre los electrodos de un gas enrarecido, se producen rayos catódicos (electrones), que tienen masa, son desviados por los campos eléctricos y magnéticos y no atraviesan la materia.

Rayos X. Rayos Roentgen



Rayos X. Rayos Roentgen





Planck

Rutherford

Einstein

Mme Curie

Poincaré

Conferencia Solvay 1911

Conferencia Solvay 1911

El primer congreso tuvo lugar en Bruselas en otoño de 1911, el presidente de la conferencia fue Hendrik Lorentz. El tema principal fue la "*Radiación y los Cuantos*". Esta conferencia consideró los problemas de tener dos ramas, la física clásica y la teoría cuántica. Albert Einstein era el segundo físico más joven de todos los presentes (después de Frederick Lindemann). Otros miembros importantes de este Primer Congreso Solvay fueron Marie Curie y Henri Poincaré.

Conferencia Solvay 1927

Fue la conferencia más famosa y se celebró en octubre de 1927 en Bruselas. El tema principal fue "*Electrones y Fotones*", donde los mejores físicos mundiales discutieron sobre la recientemente formulada teoría cuántica, dieron un sentido a lo que no lo tenía, construyeron una nueva manera de entender el mundo y se dieron cuenta que para describir y entender a la naturaleza se tenían que abandonar gran parte de las ideas preconcebidas por el ser humano a lo largo de toda su historia.

Fue una generación de oro de la ciencia, posiblemente como no ha habido otra en la historia. Diecisiete de los veintinueve asistentes eran o llegaron a ser ganadores de Premio Nobel, incluyendo a Marie Curie, que había ganado los premios Nobel en dos disciplinas científicas diferentes.

Ludwig Boltzmann



(Viena, 1844 - Decino, 1906) Físico austriaco cuyas aportaciones en el campo de la teoría cinética de gases marcaron el desarrollo posterior de diversos campos de la Física.

Su novedosa aplicación de métodos probabilísticos a la mecánica permitió una fundamentación teórica de las leyes fenomenológicas de la termodinámica.

Boltzmann fue, así, uno de los fundadores de la mecánica estadística, labor que realizó independientemente de Willard Gibbs.

Fue en la década de 1870 cuando Boltzmann publicó los artículos donde exponía cómo la segunda ley de la termodinámica se puede explicar aplicando las leyes de la mecánica y la teoría de la probabilidad a los movimientos de los átomos. Dejó claro el carácter esencialmente estadístico de la segunda ley de la termodinámica, dedujo el teorema de equipartición de la energía (ley de distribución de Maxwell-Boltzmann) y derivó una ecuación para el cambio en la distribución de energía entre los átomos de un sistema debido a las colisiones entre ellos.

Ludwig Boltzmann. El primer físico teórico

Ecuación de Boltzmann.

La entropía de un sistema es proporcional al logaritmo neperiano del número de estados accesibles o configuraciones.

La constante de proporcionalidad es la constante de Boltzmann .

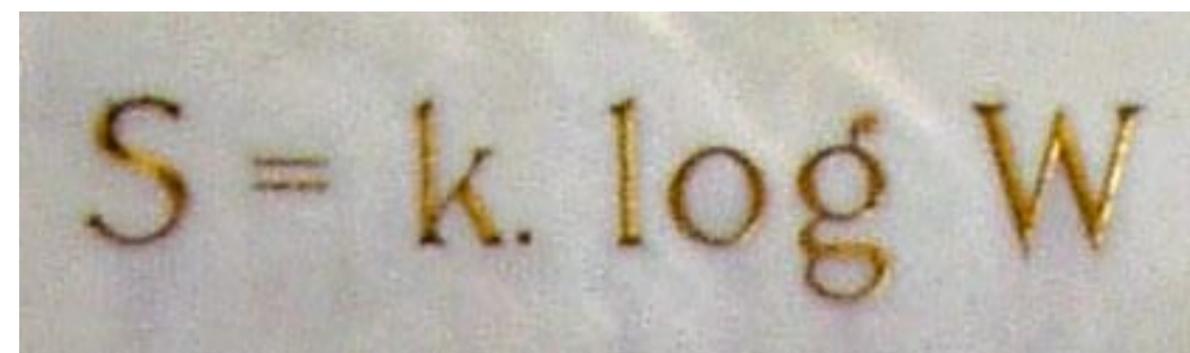
$$k_B = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$$

Constante del gas ideal.

La constante de los gases es igual a la constante de Boltzmann por el número de Avogadro (Planck).

$$R = N_A k_B$$

$$8.31 = 1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 6.02 \cdot 10^{23}$$



Distribución de energías de Boltzmann.

$$p_i = \frac{1}{Z} e^{-E_i / k_B T}$$

Probabilidad de una energía.

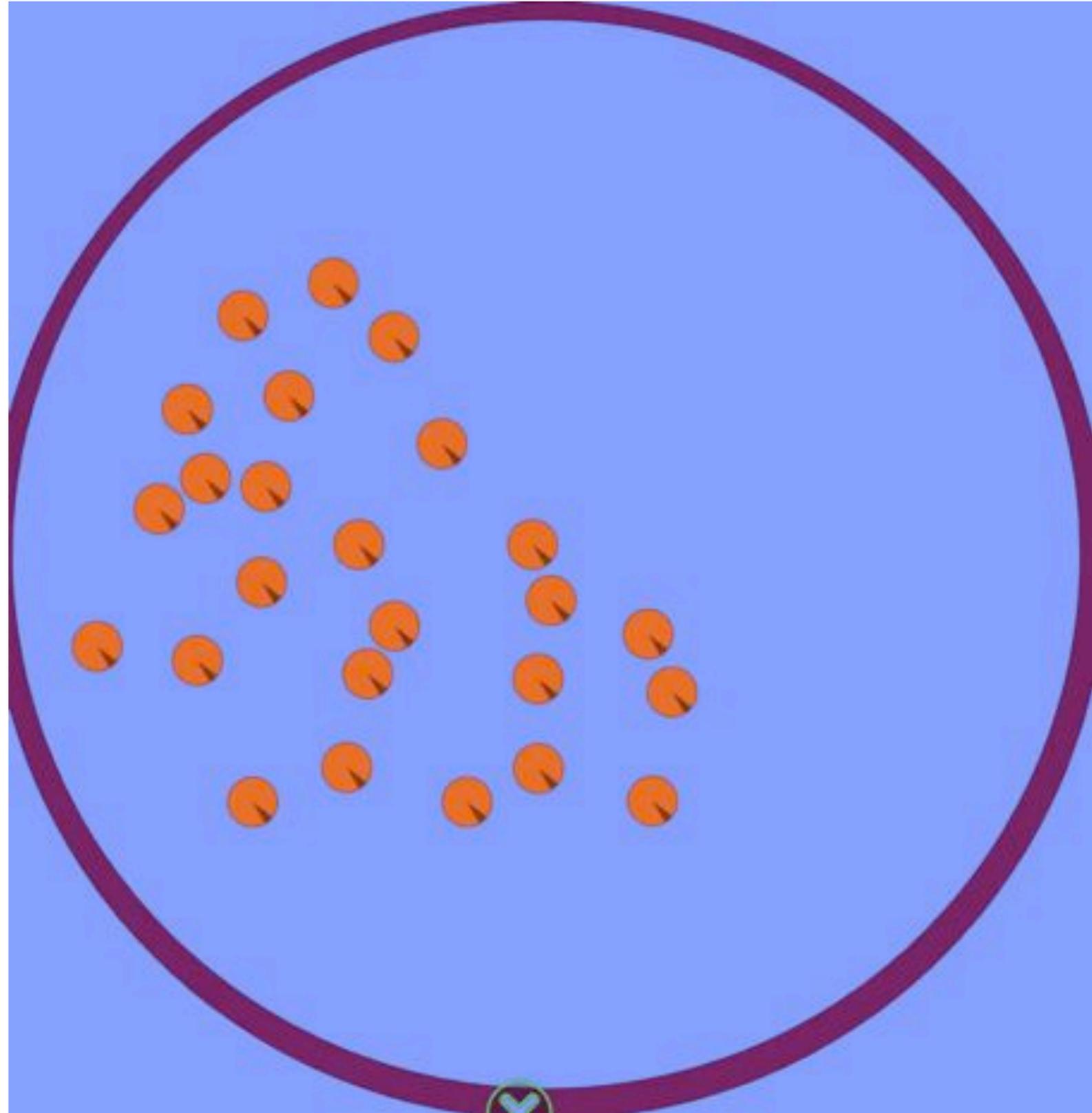
$$Z = \sum_i e^{-E_i / k_B T}$$

Función de partición.

Distribución de velocidades de Maxwell-Boltzmann.

Distribución de velocidades de Maxwell-Boltzmann.

La probabilidad de encontrar en el equilibrio una partícula con una determinada velocidad, sigue la distribución de velocidades de Maxwell



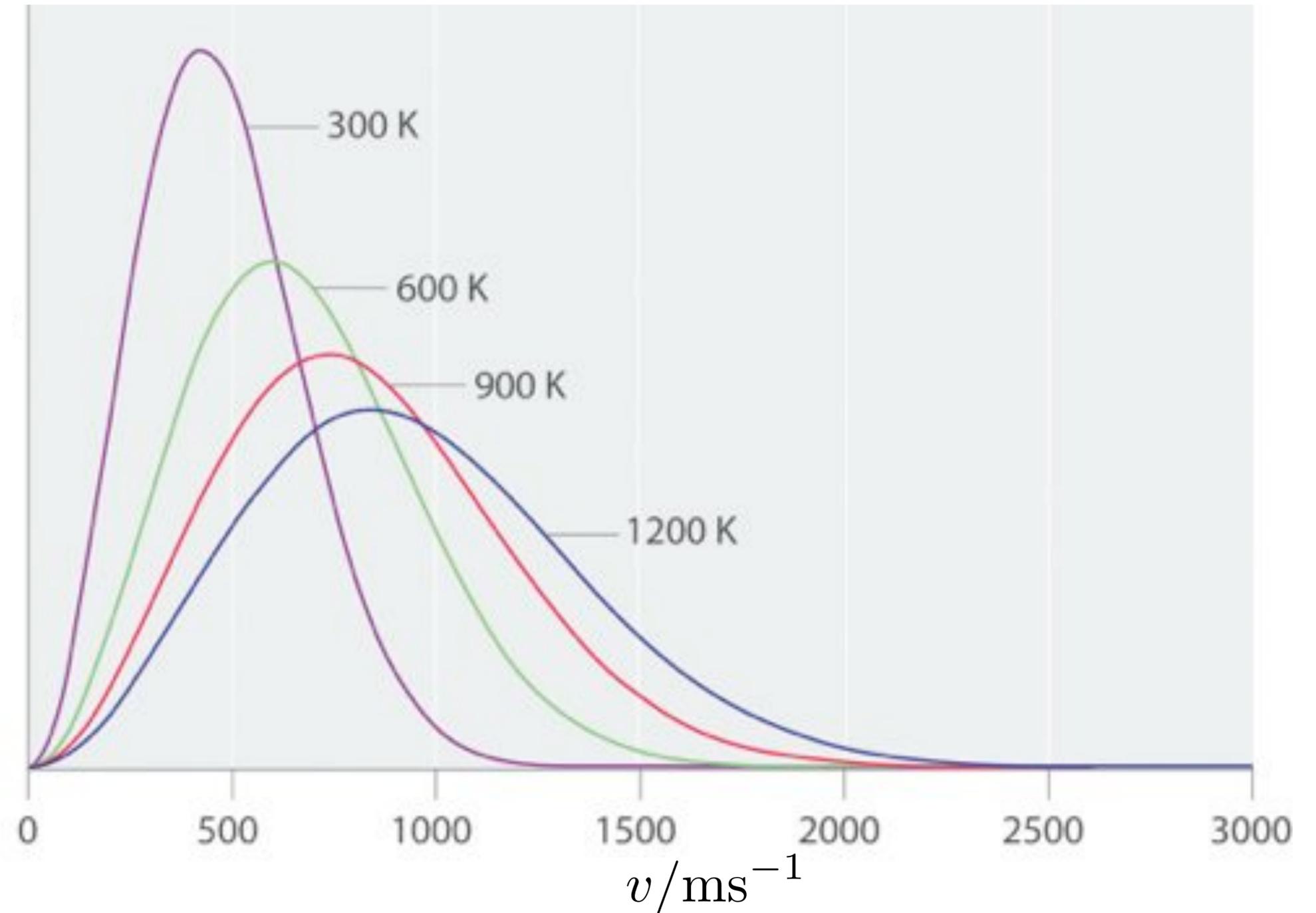
Ludwig Boltzmann

Distribución de velocidades de Maxwell-Boltzmann.

$$p_i = \frac{1}{Z} e^{-E_i/k_B T}$$

$$E_i = \frac{1}{2} m v_i^2$$

$$p(v_i) = A v_i^2 e^{-m v_i^2 / 2 k_B T}$$

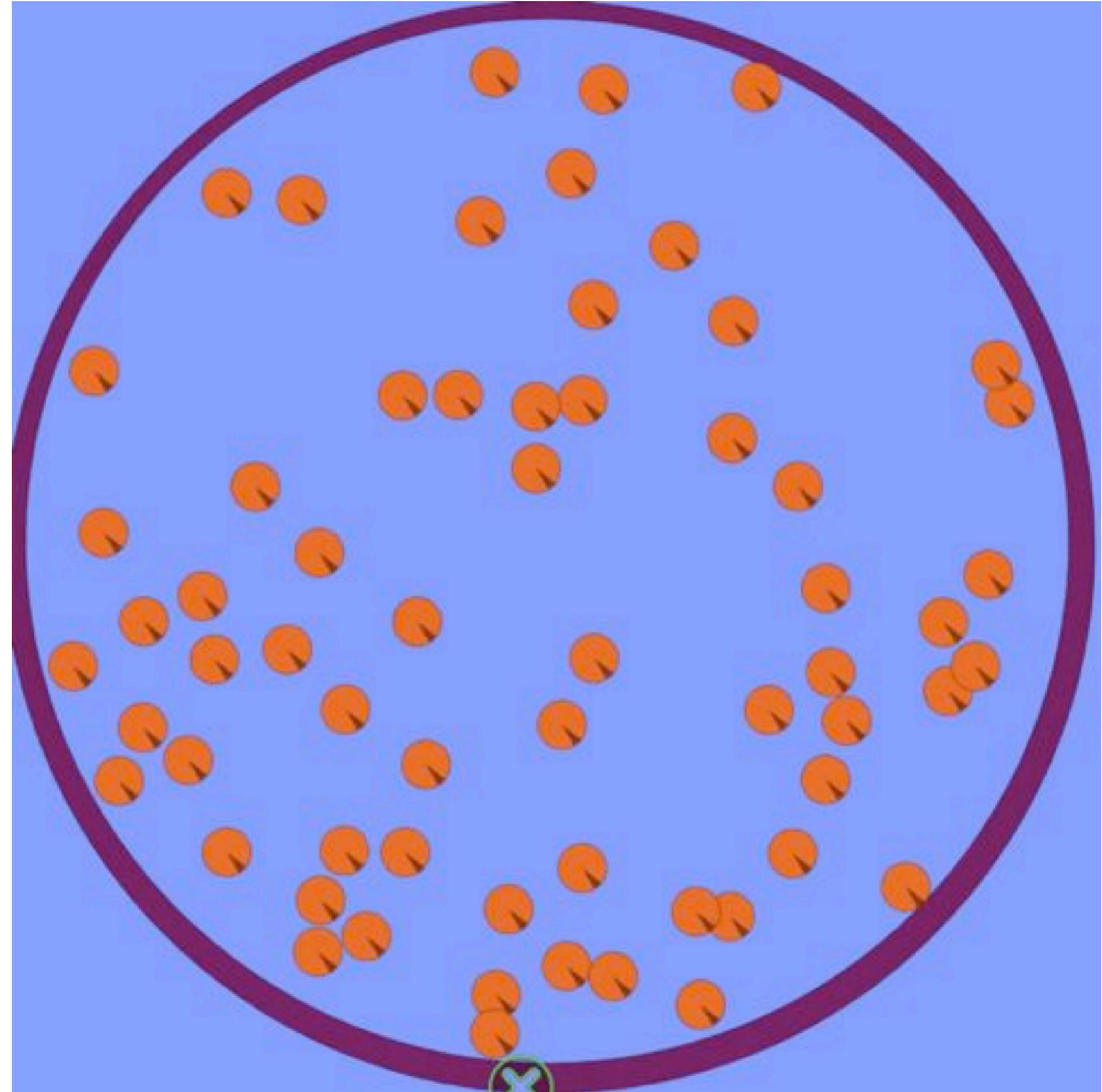


Distribución de alturas de Boltzmann.

Distribución de Boltzmann.

En presencia de un campo gravitatorio, las alturas de las partículas siguen la distribución de Boltzmann.

Atmósferas de los planetas

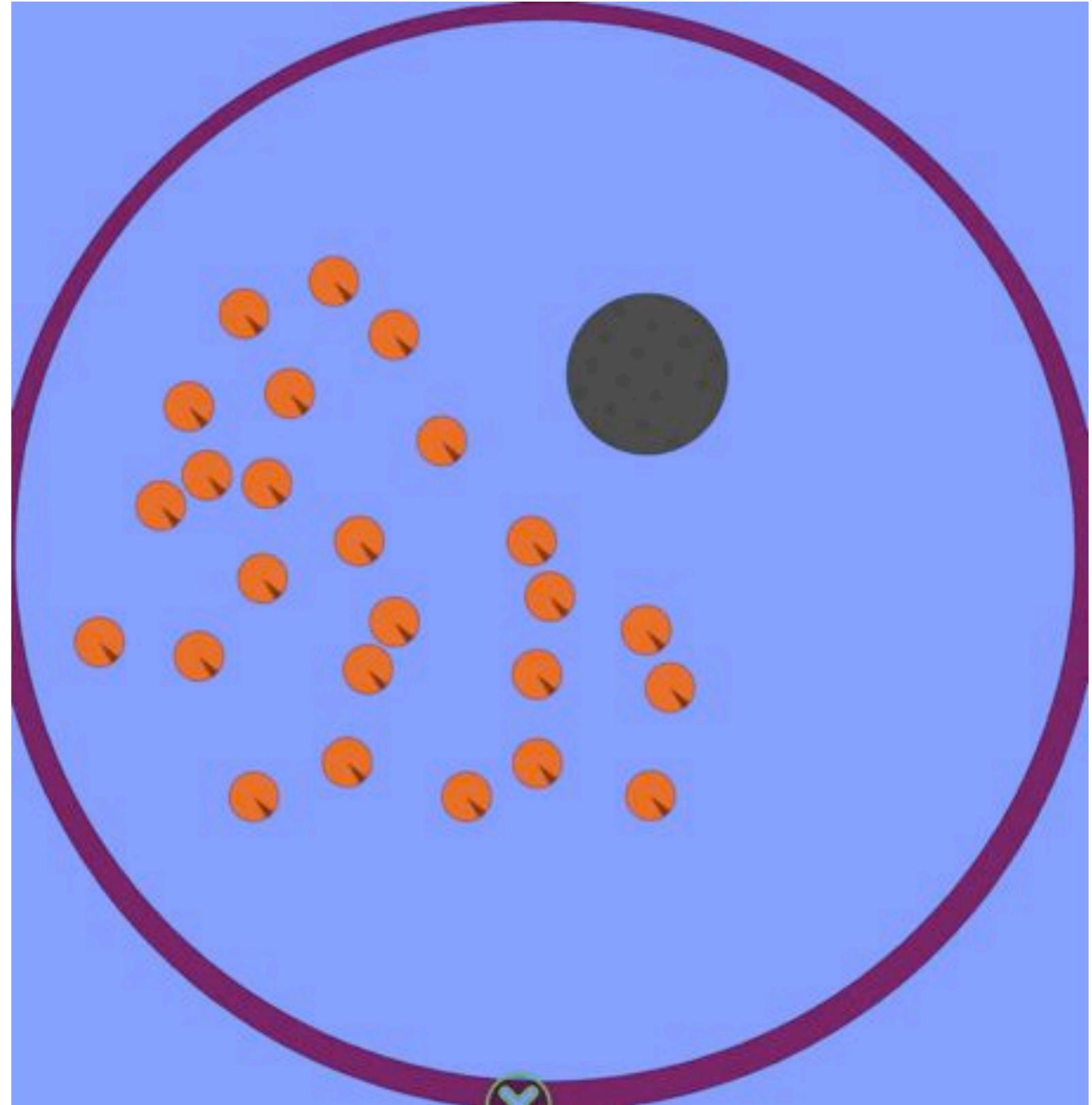


Teorema de equipartición de la energía. Boltzmann.

Teorema de equipartición de la energía.

Cada partícula tiene, en promedio, la misma energía cinética.

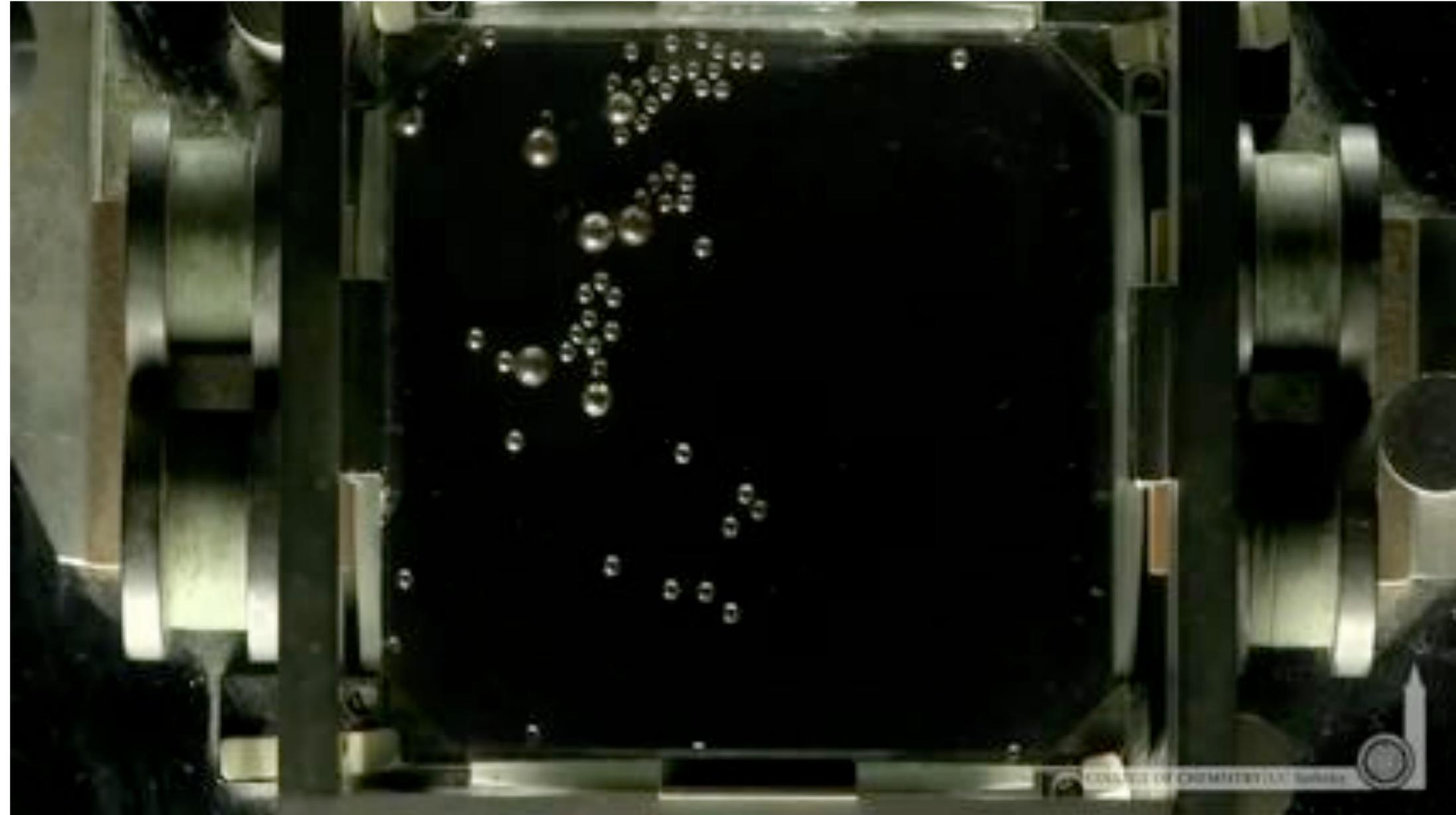
Las partículas más masivas tienen menos velocidad.



Ludwig Boltzmann

Teorema de equipartición de la energía.

Las bolas tienen, en promedio, la misma energía cinética. Las más grandes tienen menos velocidad que las pequeñas.



$$\bar{K} = \frac{1}{2} M \bar{v}^2 = \frac{1}{2} m \bar{V}^2$$

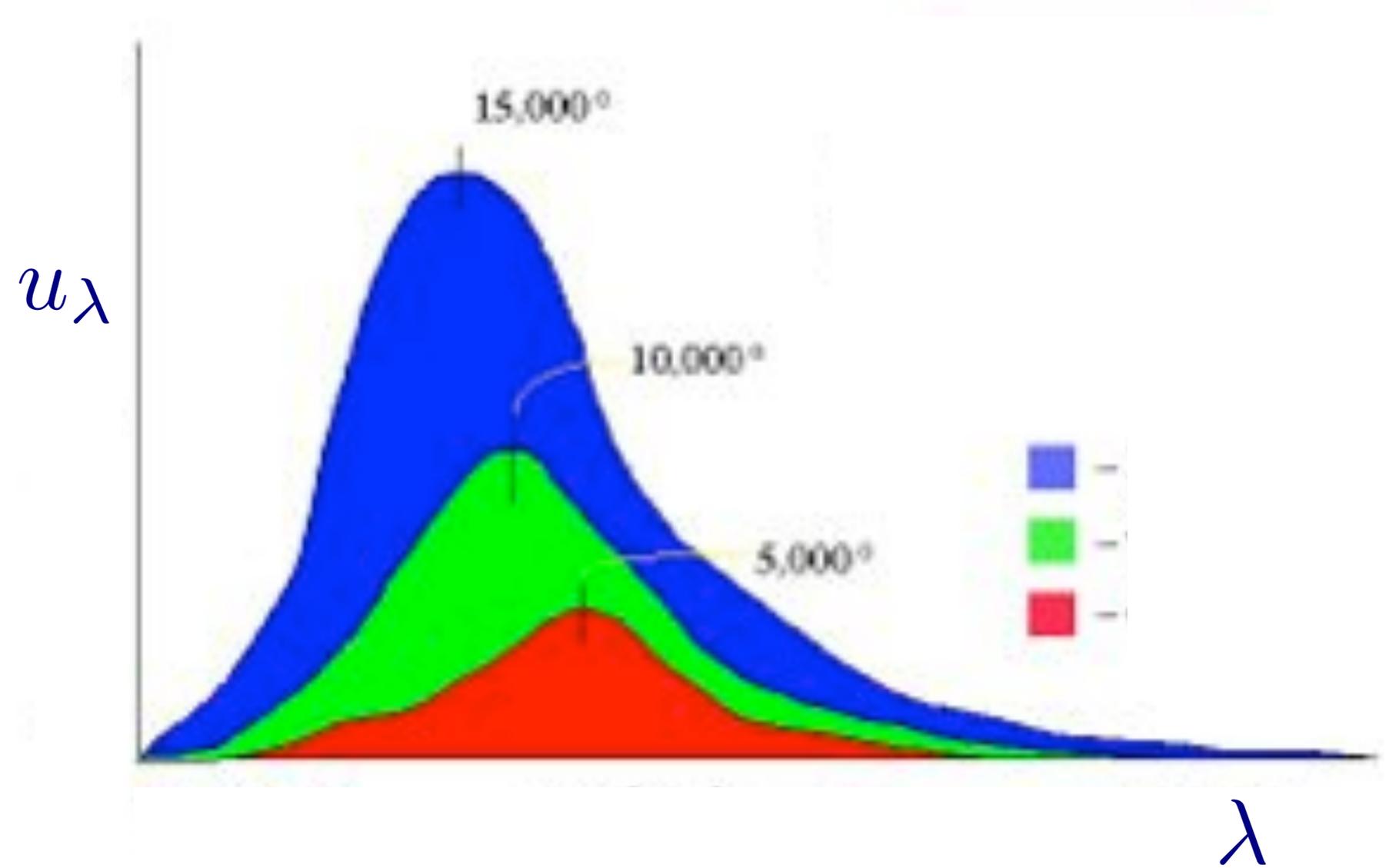
Ley de Stefan-Boltzmann.

La energía emitida por un cuerpo en forma de radiación electromagnética es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta.

La constante de proporcionalidad es la constante de Stefan-Boltzmann.

El 4 es la suma de 3 dimensiones espaciales y 1 dimensión temporal.

$$4 = 3 + 1$$

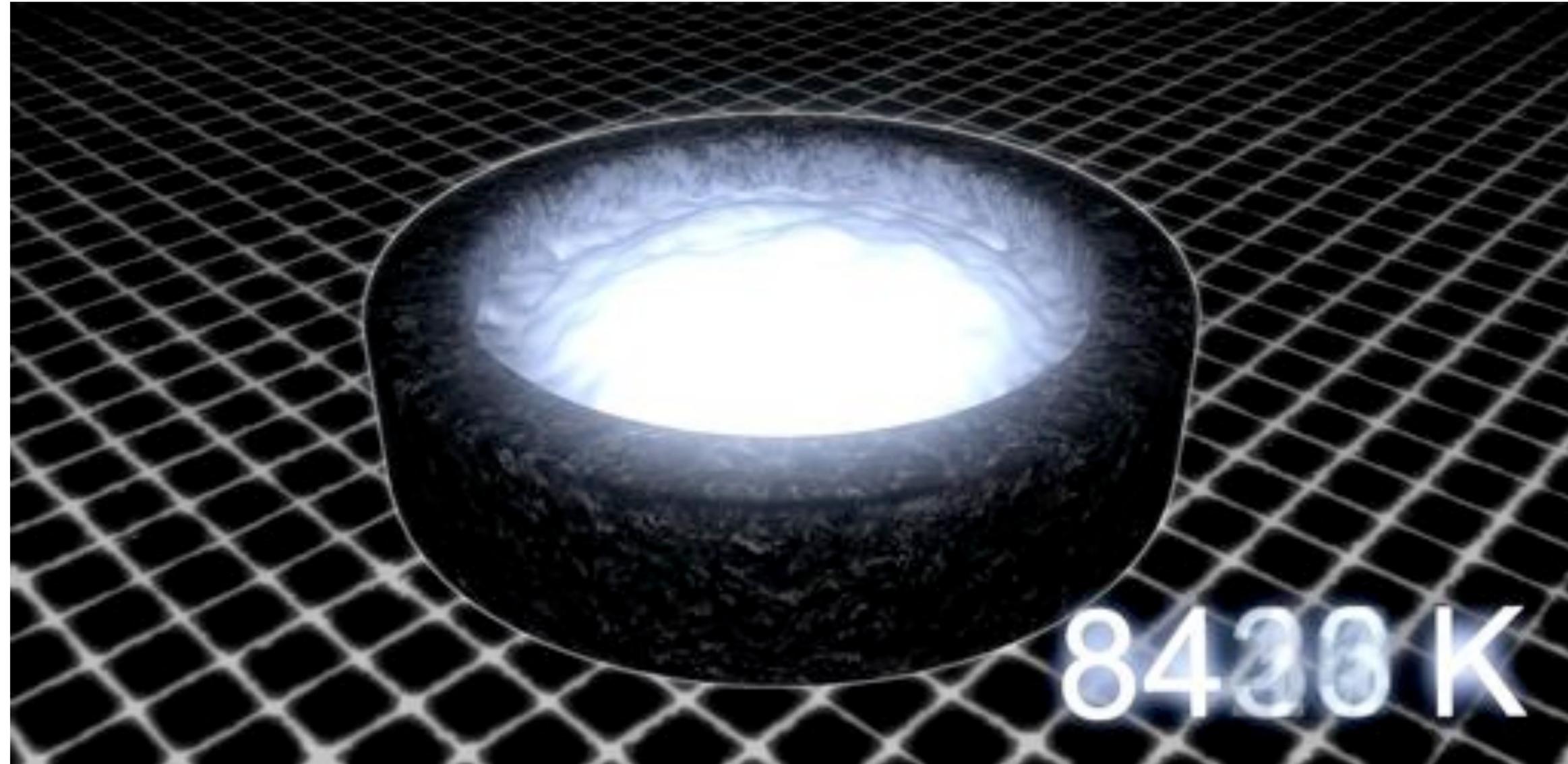


$$E = \epsilon\sigma T^4$$

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$$

Ley de Wien.

El color de la luz emitida por un cuerpo incandescente depende de su temperatura.

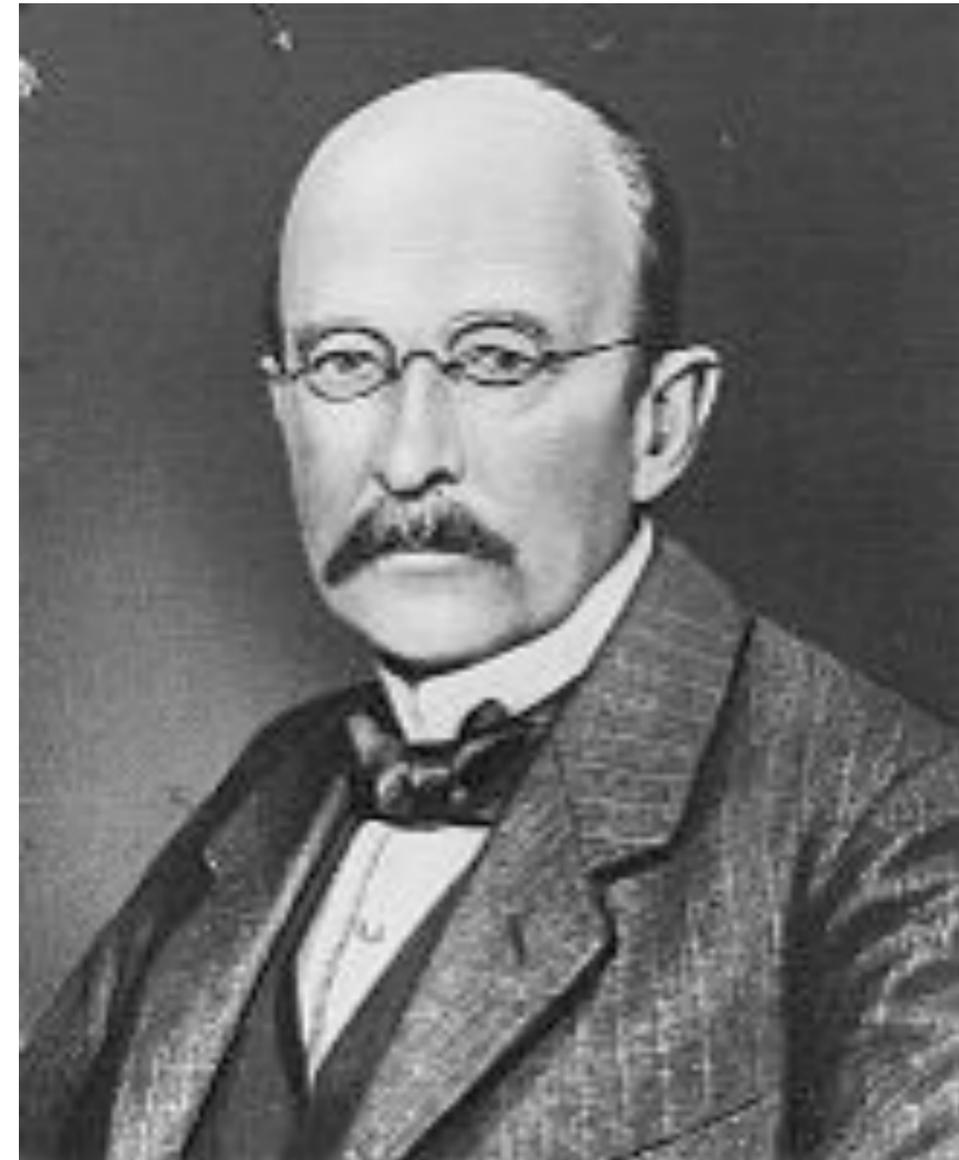


$$\lambda_{\max} T = 2,18$$

$$E = \epsilon \sigma T^4$$

$$4 = 3 + 1$$

Max Planck



(Ernst Karl Ludwig Planck; Kiel, actual Alemania, 1858-Gotinga, Alemania, 1947) Físico alemán.

Como termodinámico enunció el **principio de no disminución de la entropía** de un sistema aislado.

Dado un sistema aislado, los posibles intercambios de energía entre sus diversas partes, deben producirse con conservación (procesos reversibles) o incremento (procesos irreversibles) de la entropía total del sistema.

Aunque en una parte del sistema disminuya la entropía, conservándose la energía, en otras partes del sistema debe aumentar la entropía, de tal forma que la entropía total no disminuya.

Max Planck

$$\Delta S_H + \Delta S_V \geq 0$$

Cualquier proceso que se produzca espontáneamente, evolucionará con aumento de la entropía del universo, conservándose la energía interna. Si se utilizan máquinas térmicas reversibles, se puede tener un proceso que evolucione con conservación de la entropía del sistema y disminución de su energía interna

Max Planck

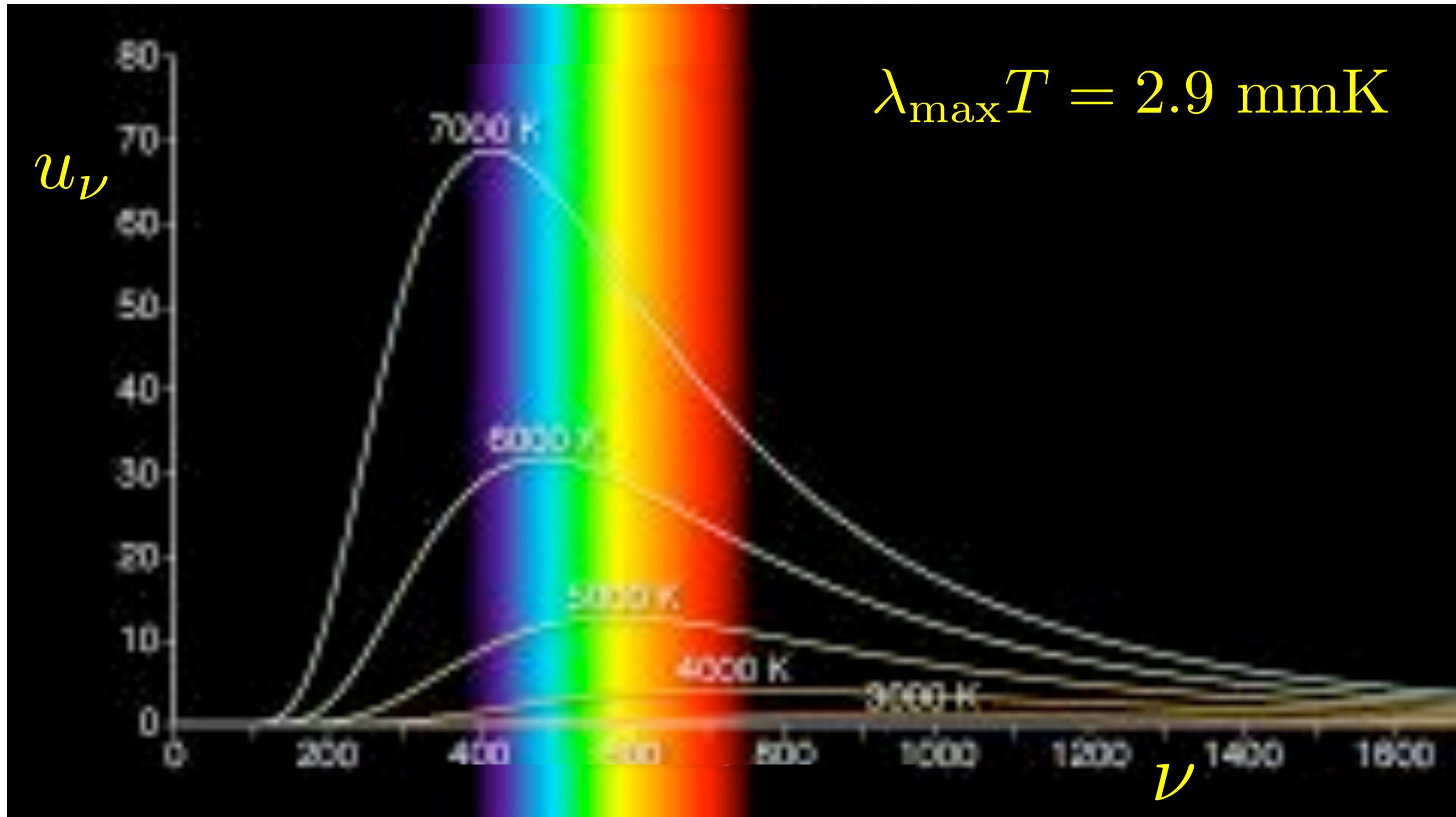


(Ernst Karl Ludwig Planck; Kiel, actual Alemania, 1858-
Gotinga, Alemania, 1947) Físico alemán.

Ocupado en el estudio de la radiación del cuerpo negro, trató de describir todas sus características termodinámicas, e hizo intervenir, además de la energía, la entropía. Conforme a la opinión de L. Boltzmann de que no lograría obtener una solución satisfactoria para el equilibrio entre la materia y la radiación si no suponía una discontinuidad en los procesos de absorción y emisión, logró proponer la «fórmula de Planck», que representa con exactitud la distribución espectral de la energía para la radiación del llamado cuerpo negro. Para llegar a este resultado tuvo que admitir que los electrones no podían describir movimientos arbitrarios y que sus energías radiantes se emitían y se absorbían en cantidades finitas iguales, que estaban cuantificadas.

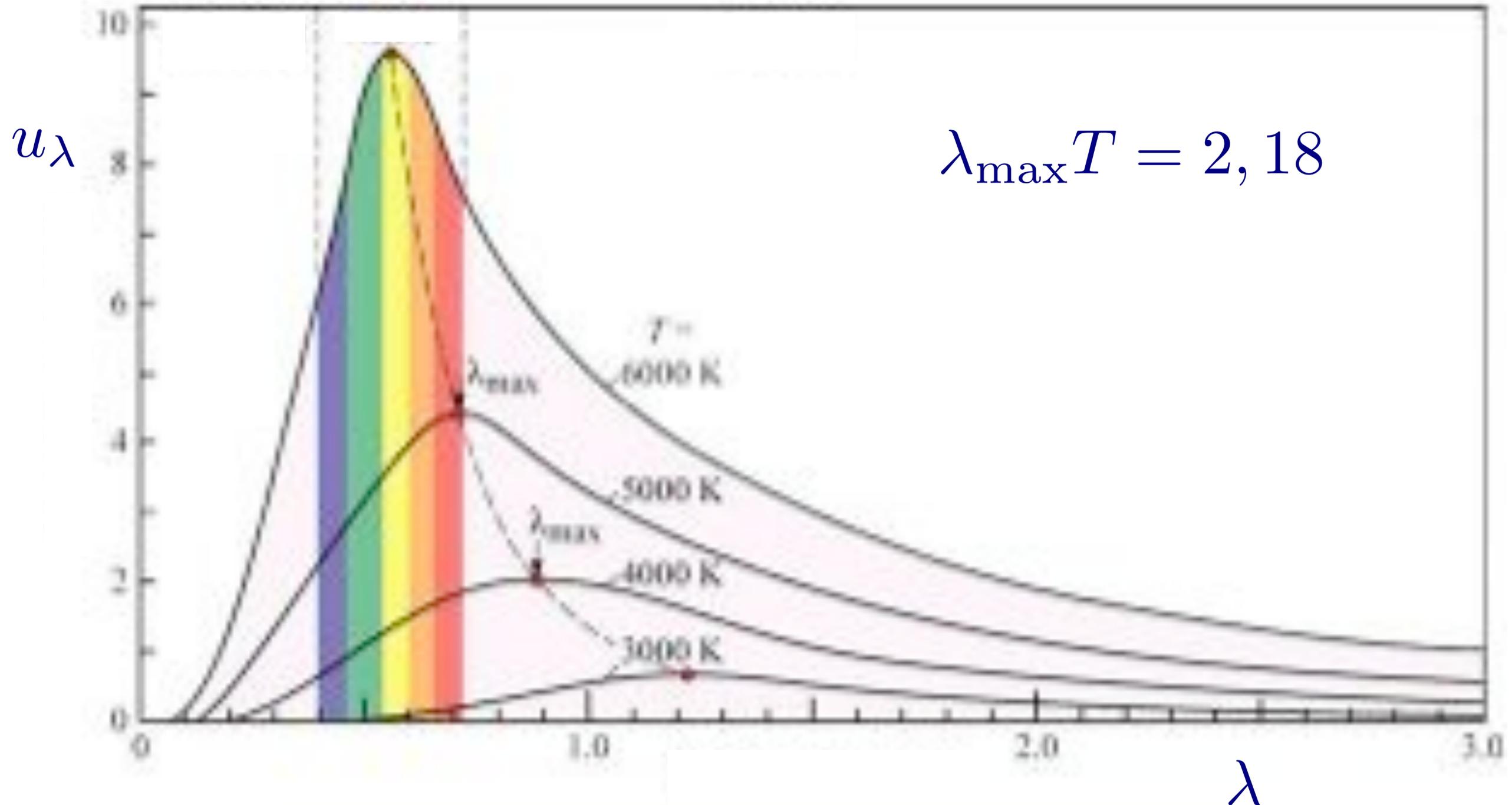
La hipótesis cuántica de Planck influyó tanto en Einstein (efecto fotoeléctrico) como en Niels Bohr (modelo de átomo de Bohr)

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/k_B T} - 1}$$



Ley de Wien.

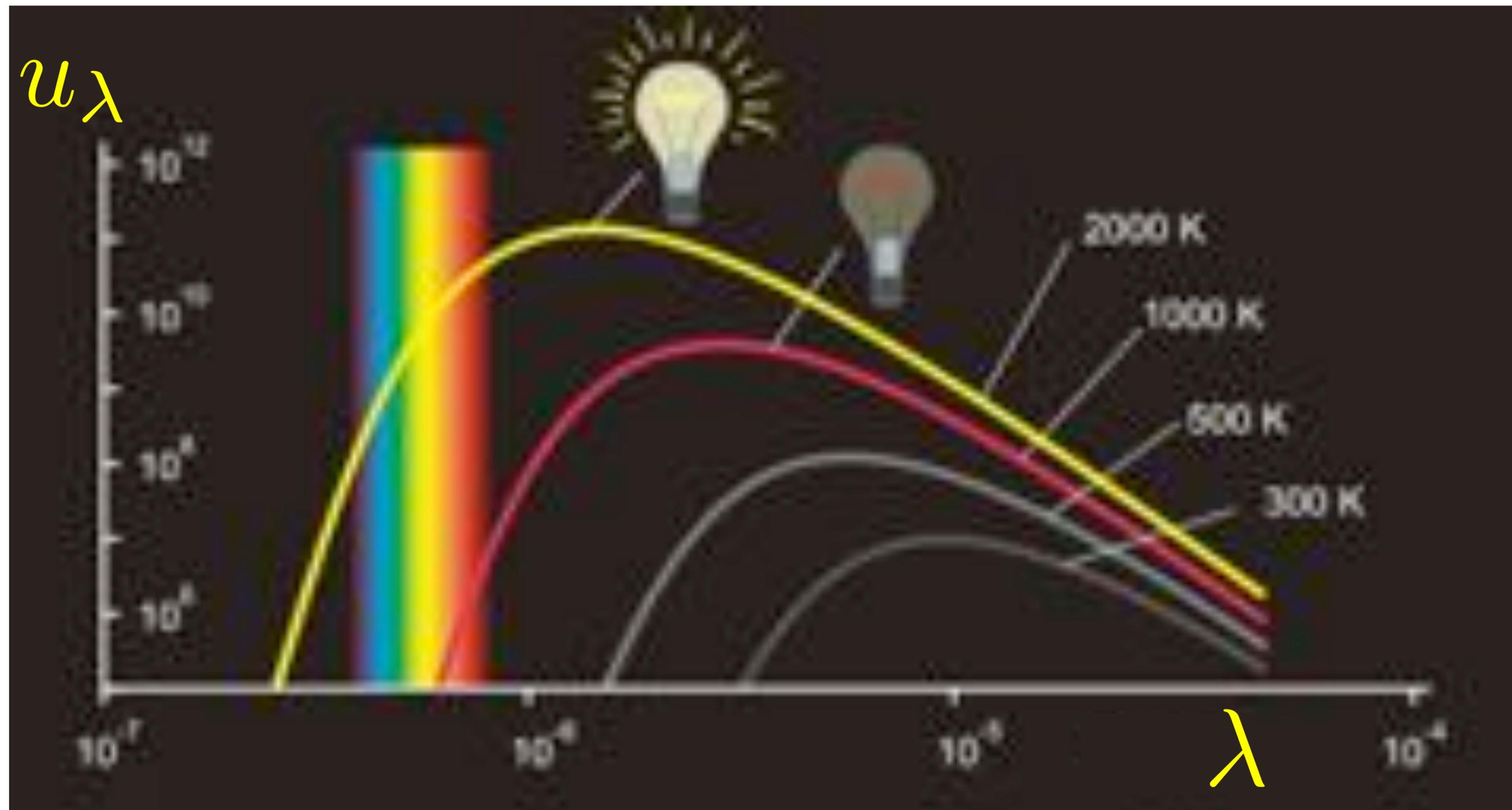
El color de la luz emitida por un cuerpo incandescente depende de su temperatura.



$$u_\lambda = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/k_B T \lambda} - 1}$$

Emisiones de radiación de ciertos cuerpos.

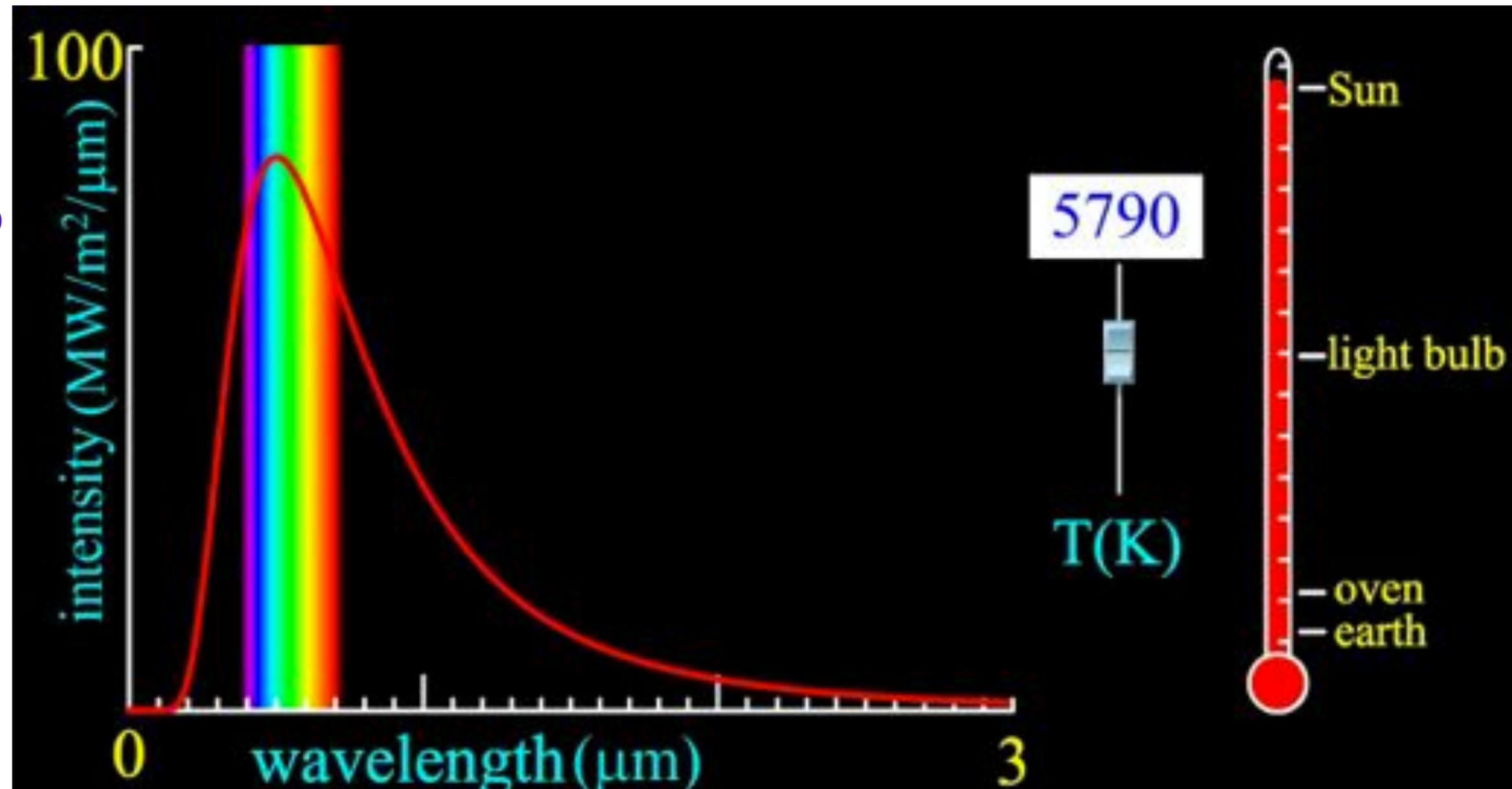
Una bombilla incandescente, a unos 2500 K, emite preferentemente su energía en las microondas y, un poco, en el visible.



Emisiones de radiación de ciertos cuerpos.

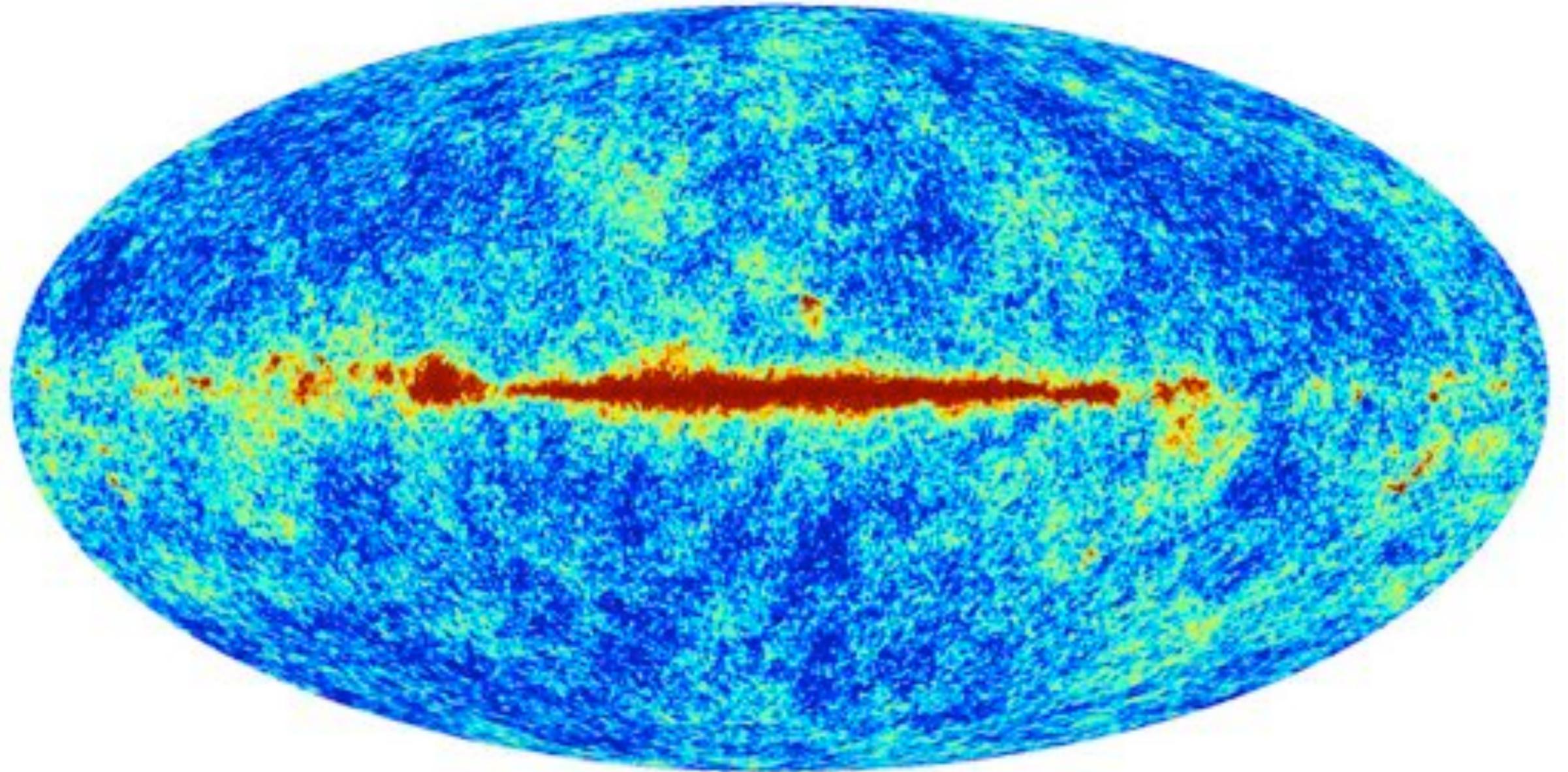
El Sol, a unos 6000 K de temperatura en su exterior, emite preferentemente en el verde.

Si el color verde es el que reflejan las hojas de los árboles, ¿por qué son verdes las hojas de los árboles?



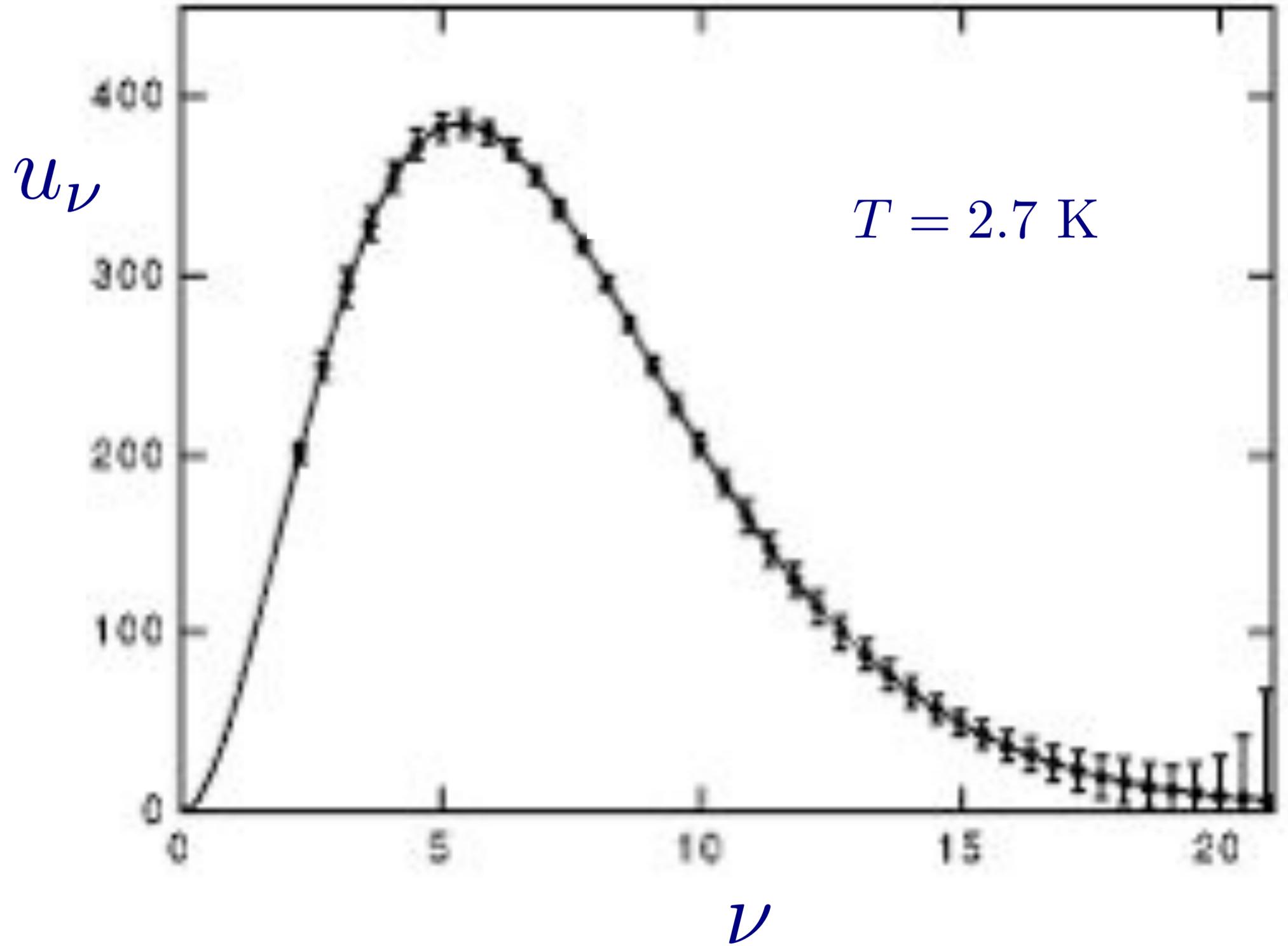
Fondo de microondas del Universo.

Con ciertas fluctuaciones, el universo está lleno de un fondo de microondas a una temperatura de unos **2.7 K**



Fondo de microondas del Universo.

La temperatura del Universo de 2.7 K se obtiene aplicando la ley de Wien al espectro de Planck del fondo de microondas



Heinrich Hertz



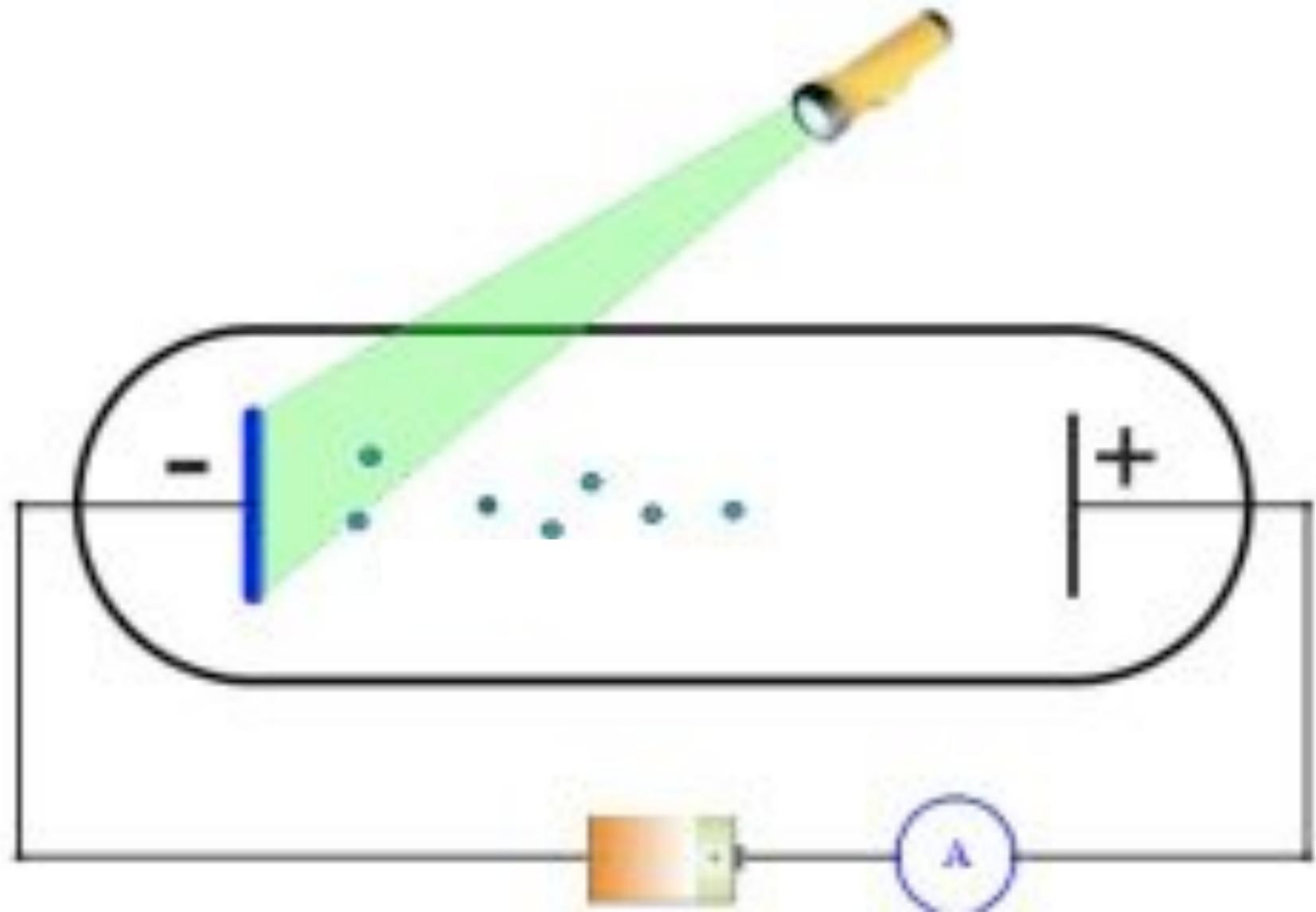
Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) Se le considera el descubridor del *efecto fotoeléctrico*, en el que una superficie pulida de zinc emite electrones al ser iluminada con luz ultravioleta.

Físico alemán que descubrió las ondas de radio cuando intentaba comprobar el funcionamiento de la teoría de Maxwell sobre las ondas electromagnéticas. Ha dado nombre a la unidad de frecuencia, el *hercio*, igual a un ciclo por segundo.

Efecto fotoeléctrico.

Cuando una placa de un cierto metal es iluminada con luz por encima de cierta frecuencia, se empiezan a emitir electrones, con mayor velocidad cuanto mayor es la frecuencia. Dicha velocidad no depende de la intensidad de la luz. De la intensidad de la luz depende el número de fotones emitidos.

Hertz-Einstein-Millikan



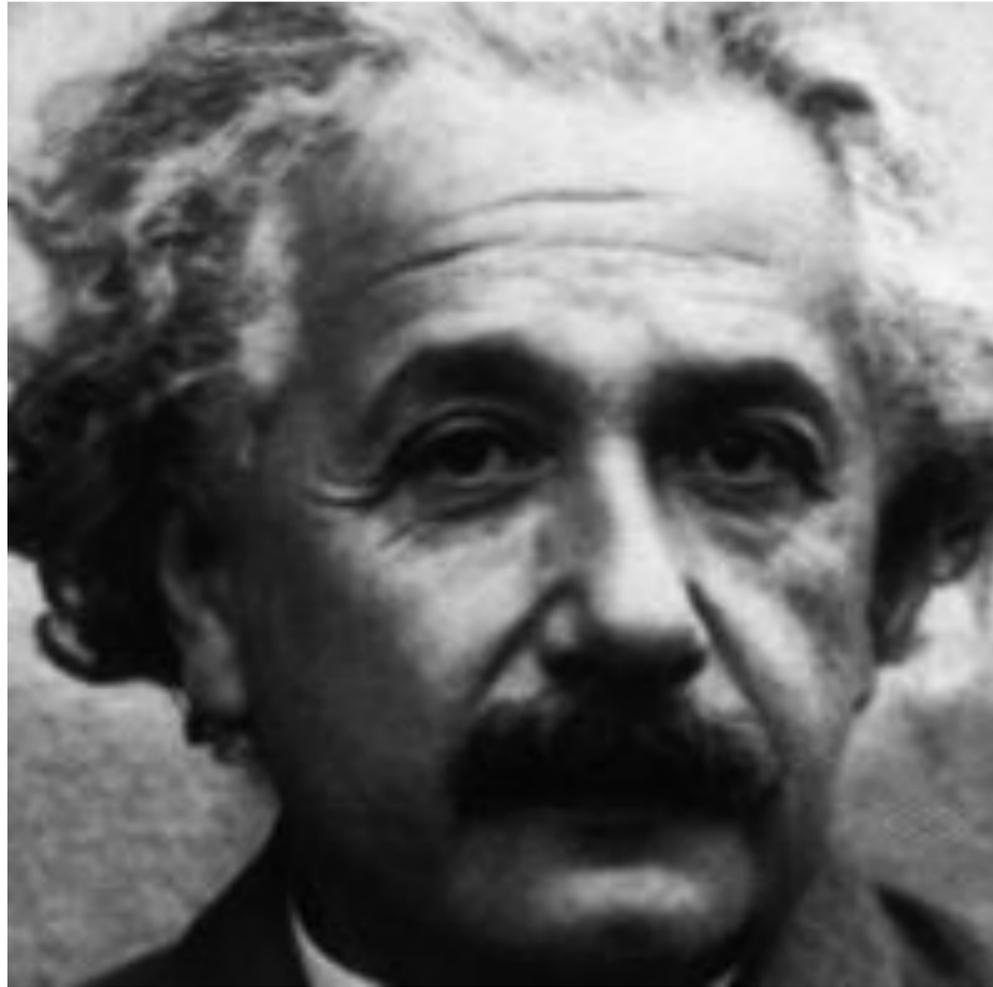
PHOTOELECTRIC EFFECT

Efecto fotoeléctrico.

Cuando una placa de un cierto metal es iluminada con luz por encima de cierta frecuencia, se empiezan a emitir electrones, con mayor **velocidad límite** cuanto mayor es la frecuencia. Dicha **velocidad máxima** no depende de la intensidad de la luz.

De la intensidad de la luz depende el número de fotones emitidos.

Albert Einstein



(Ulm, Alemania, 1879 - Princeton, USA, 1955) Científico estadounidense de origen alemán. Obtenida la ciudadanía suiza (1901), encontró un empleo en el Departamento de Patentes.

En 1905 publicó en *Annalen der Physik* sus primeros trabajos **sobre la teoría de los quanta**, la de la relatividad y los movimientos brownianos. En 1913, nombrado miembro de la Academia de Prusia, se trasladó a Berlín. En 1916 publicó *Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie*.

En 1924 entregó a la imprenta *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie* y el año siguiente recibió el **premio Nobel por su teoría sobre el efecto fotoeléctrico**. Enseñó en el Instituto de Estudios Superiores de Princeton (Nueva Jersey).

EFEECTO FOTOELÉCTRICO

Superada la barrera de potencial de extracción, los electrones emitidos por el metal surgen del mismo a diferentes velocidades (debido a choques, etc.), habiendo una **velocidad máxima** de los electrones emitidos para una frecuencia de iluminación dada.

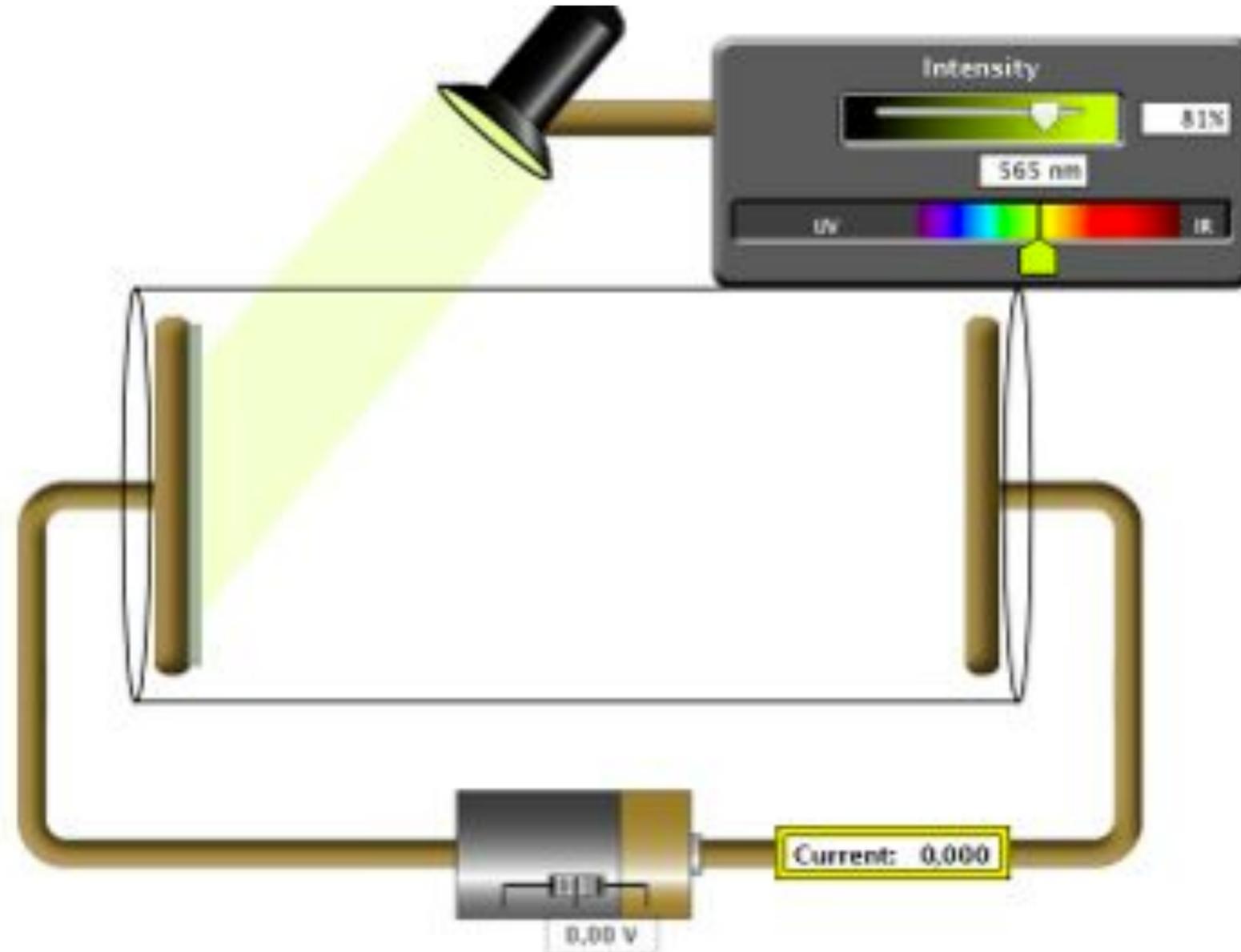
Cuando un fotón de frecuencia mayor que la **frecuencia umbral** de un metal es absorbido por dicho metal, se produce el fenómeno cuántico: **un electrón, un fotón**. En este proceso, un electrón toma, en su caso, la energía de **un sólo fotón incidente**.

Esta velocidad máxima de los electrones emitidos se pone de manifiesto demostrando que, para una frecuencia de iluminación del metal dada, todos los electrones emitidos son frenados si se aplica una **cierta mínima diferencia de potencial** a los mismos.

$$h\nu - h\nu_u = K$$

$$h\nu - \Phi = \frac{1}{2}m_e v_{\max}^2$$

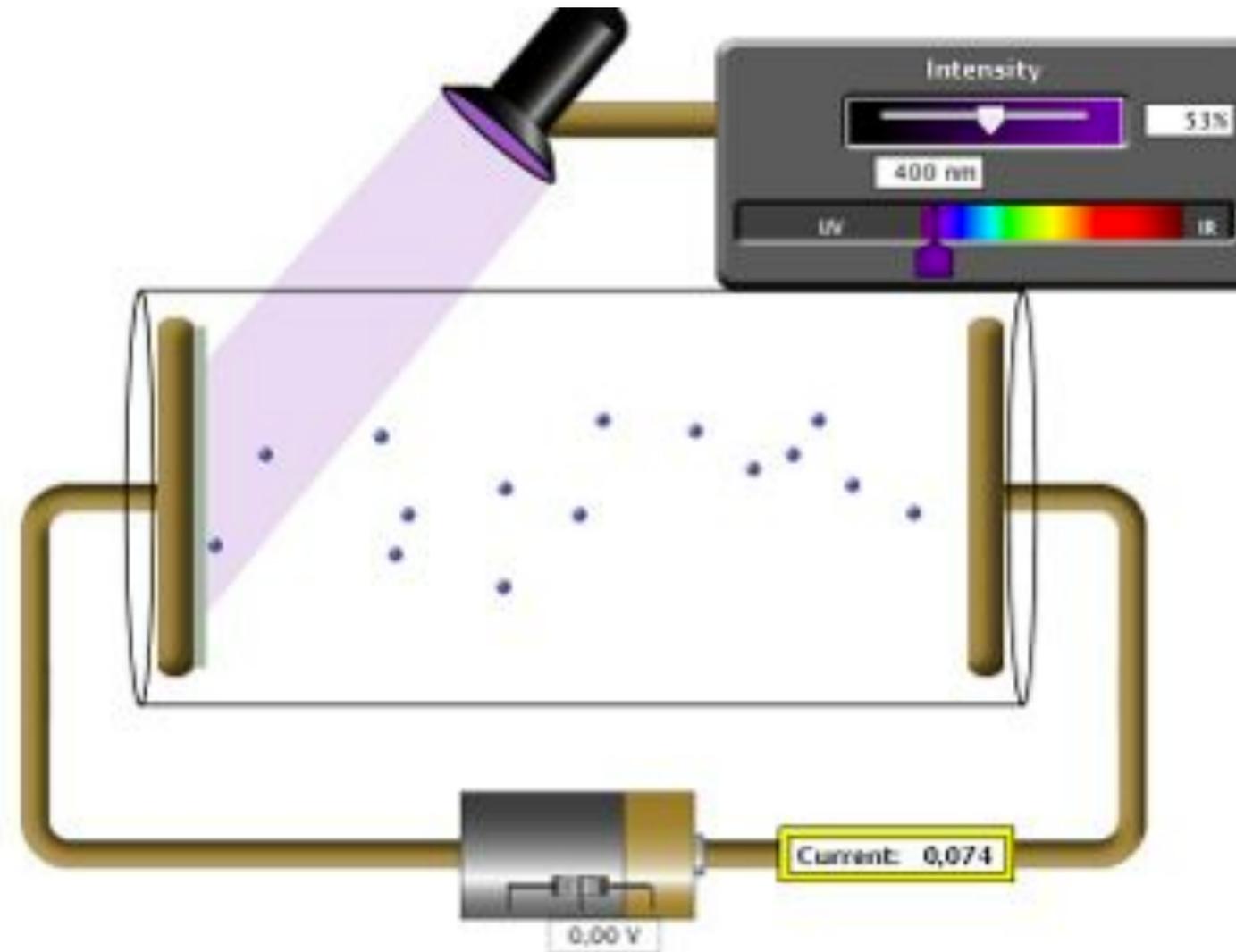
Efecto fotoeléctrico. Experiencia de Millikan



Sodio. Para una frecuencia por debajo de la frecuencia umbral, no se emiten electrones por parte del metal.

Foto. Univ. de Colorado

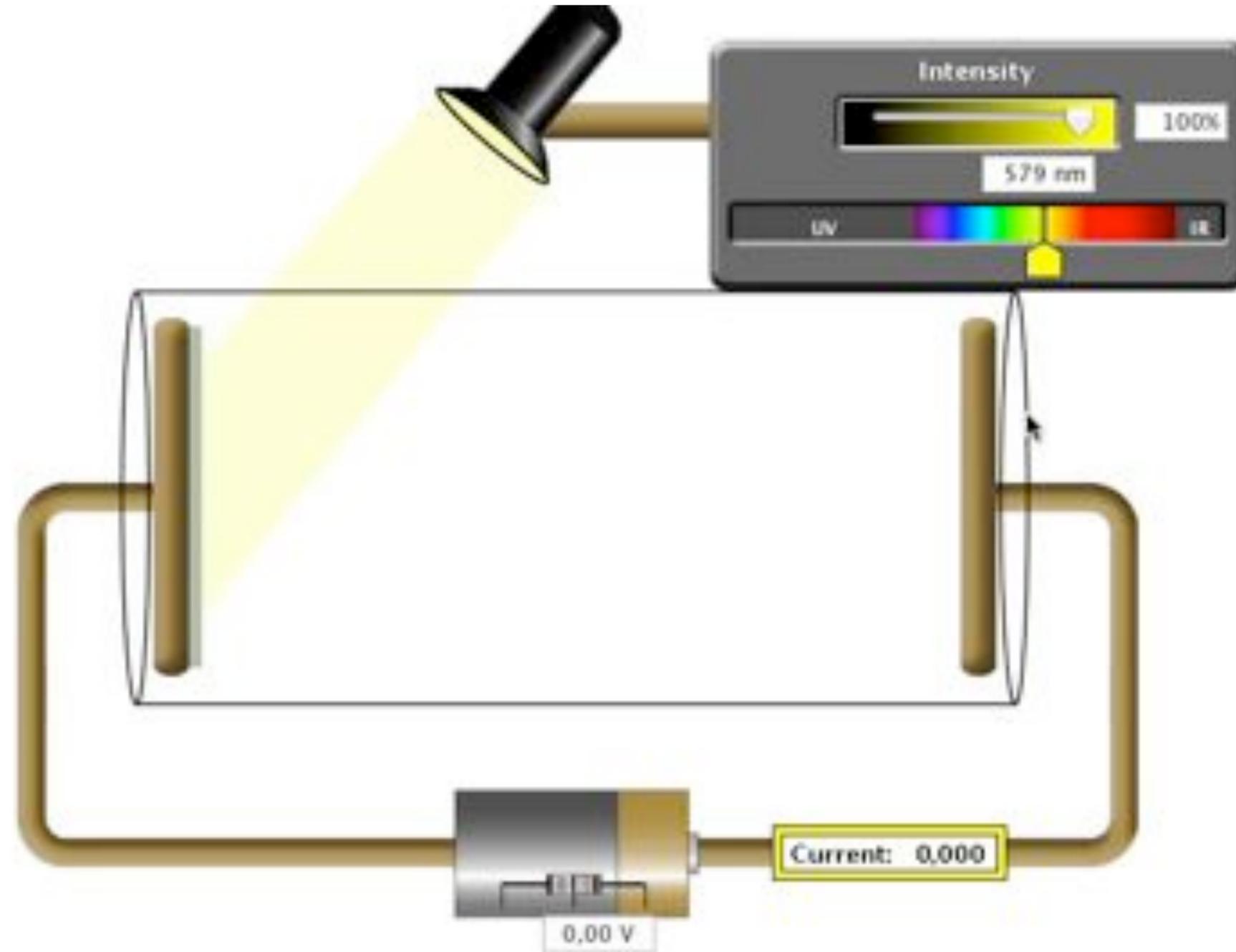
EFFECTO FOTOELÉCTRICO. SIMULACIÓN



Sodio. Para una frecuencia por encima de la frecuencia umbral, se emiten electrones por el metal.

Foto. Univ. de Colorado

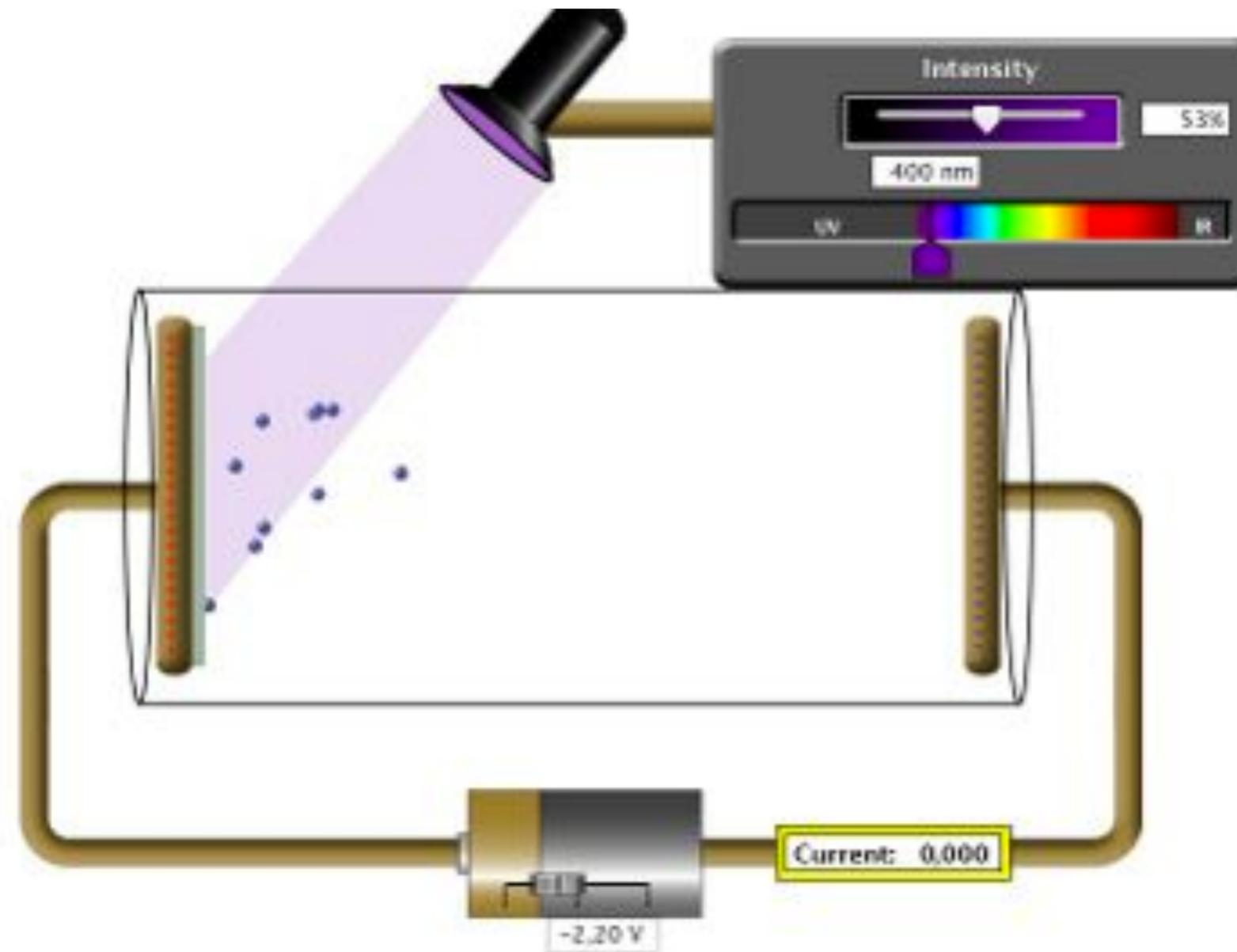
Efecto fotoeléctrico



Sodio. Frecuencia umbral

Video. Univ. de Colorado

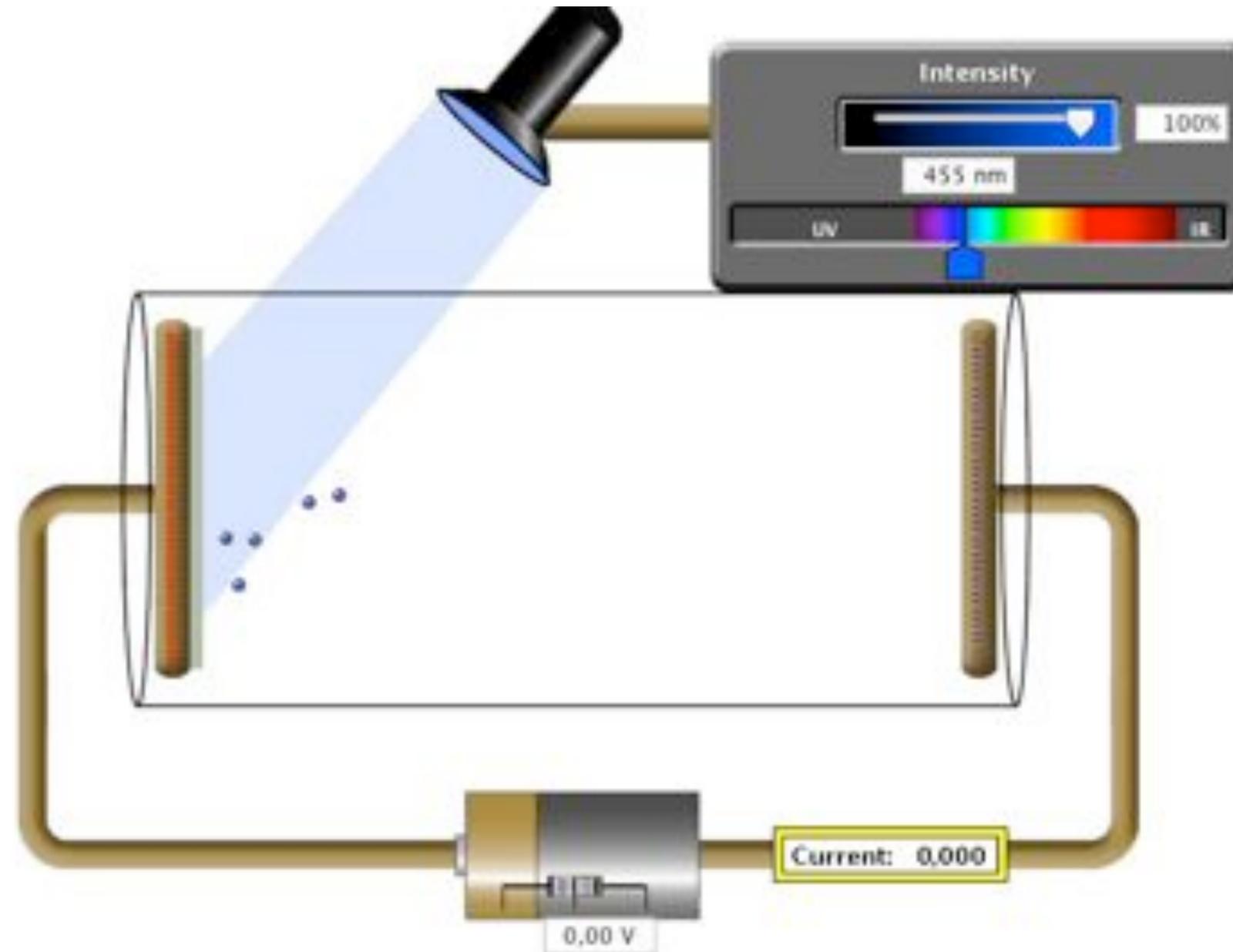
EFFECTO FOTOELÉCTRICO. SIMULACIÓN



Sodio. Para una diferencia de potencial mínima, todos los electrones emitidos son frenados.

Foto. Univ. de Colorado

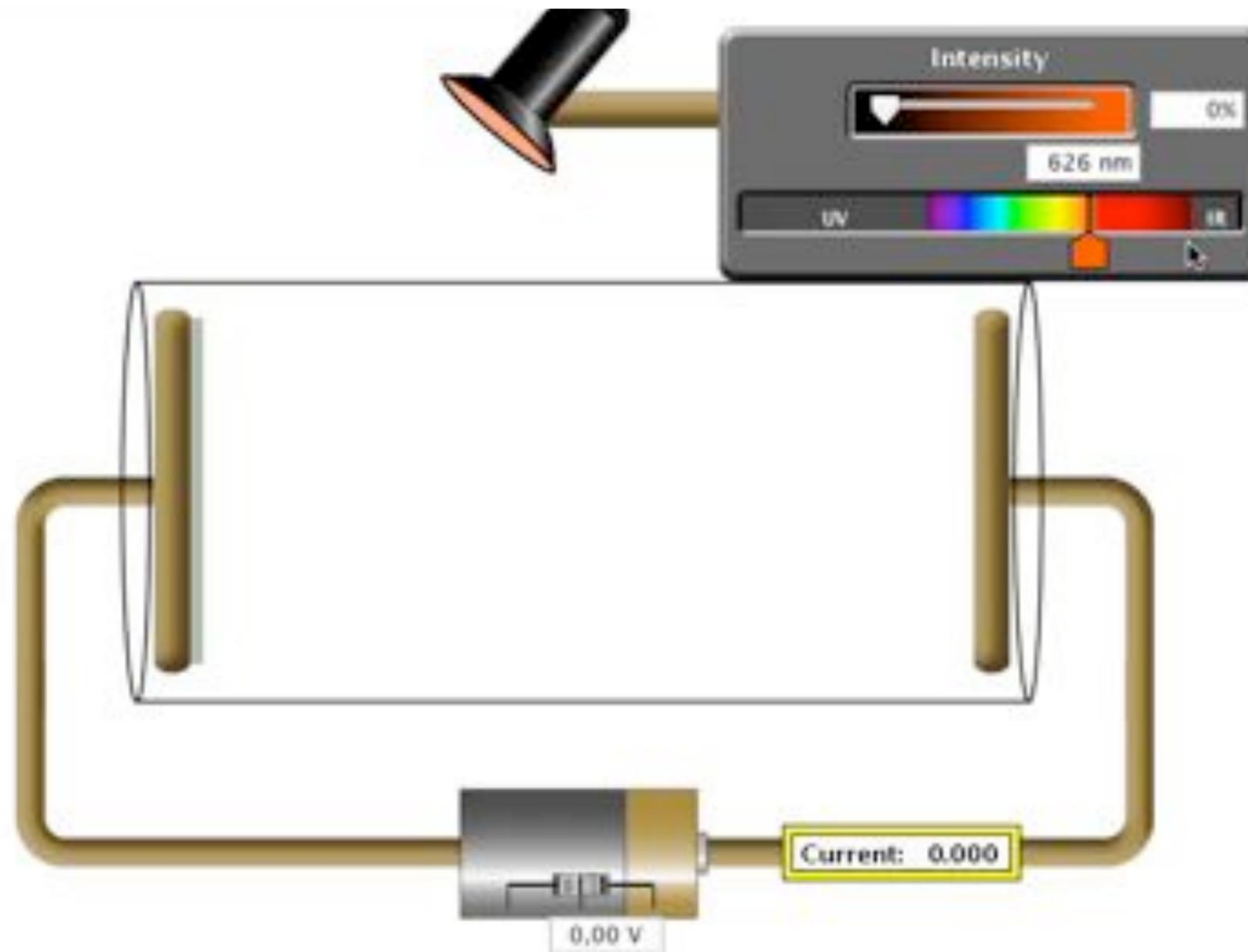
EFECTO FOTOELÉCTRICO. SIMULACIÓN



Sodio. Luz azul. Para una diferencia de potencial de $-0,40\text{ V}$, todos los electrones emitidos son frenados.

Video. Univ. de Colorado

EFECTO FOTOELÉCTRICO. SIMULACIÓN



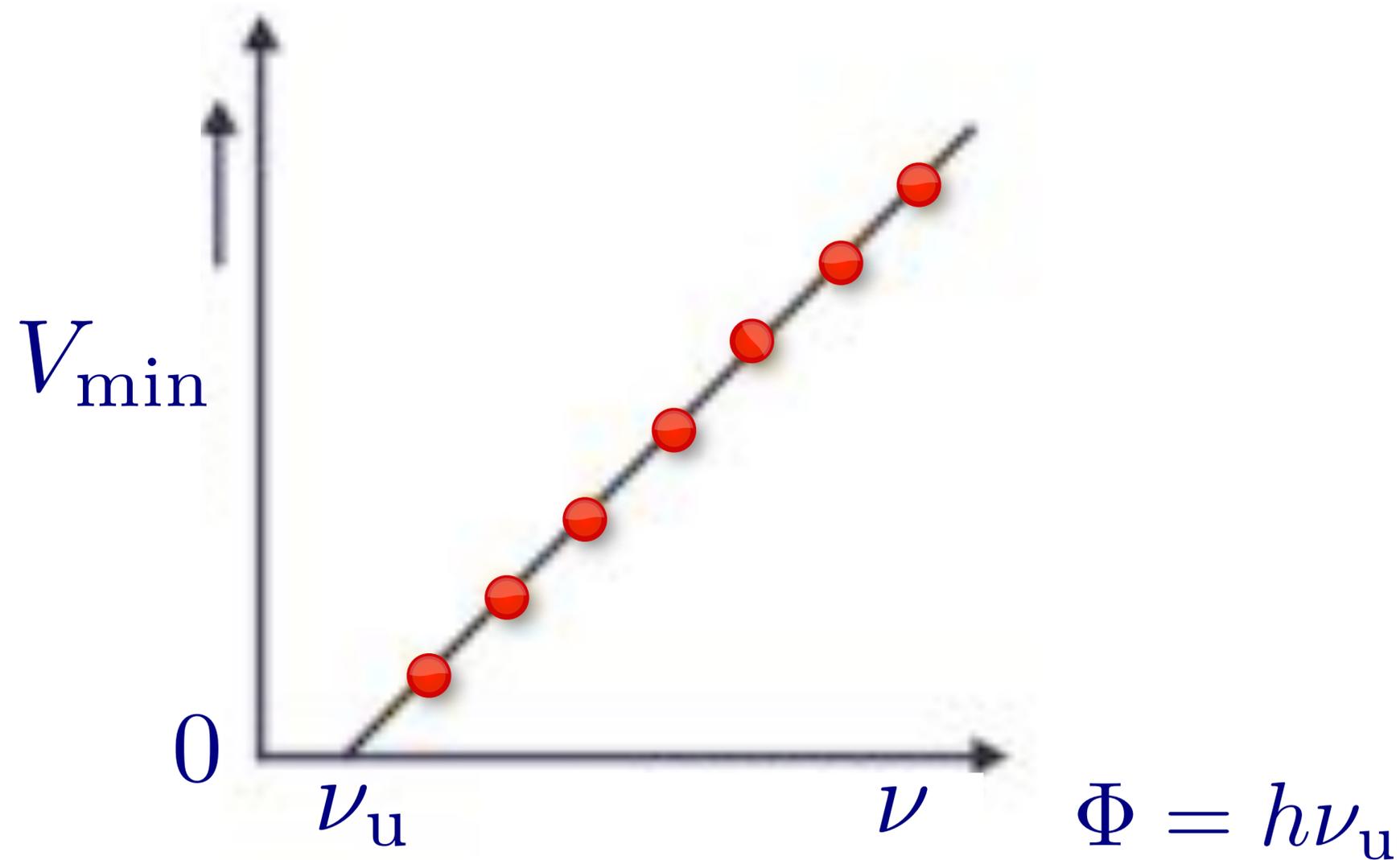
Sodio. Luz violeta. Para una diferencia de potencial de $-1,00\text{ V}$, todos los electrones emitidos son frenados.

Video. Univ. de Colorado

Efecto fotoeléctrico. Experimento Millikan

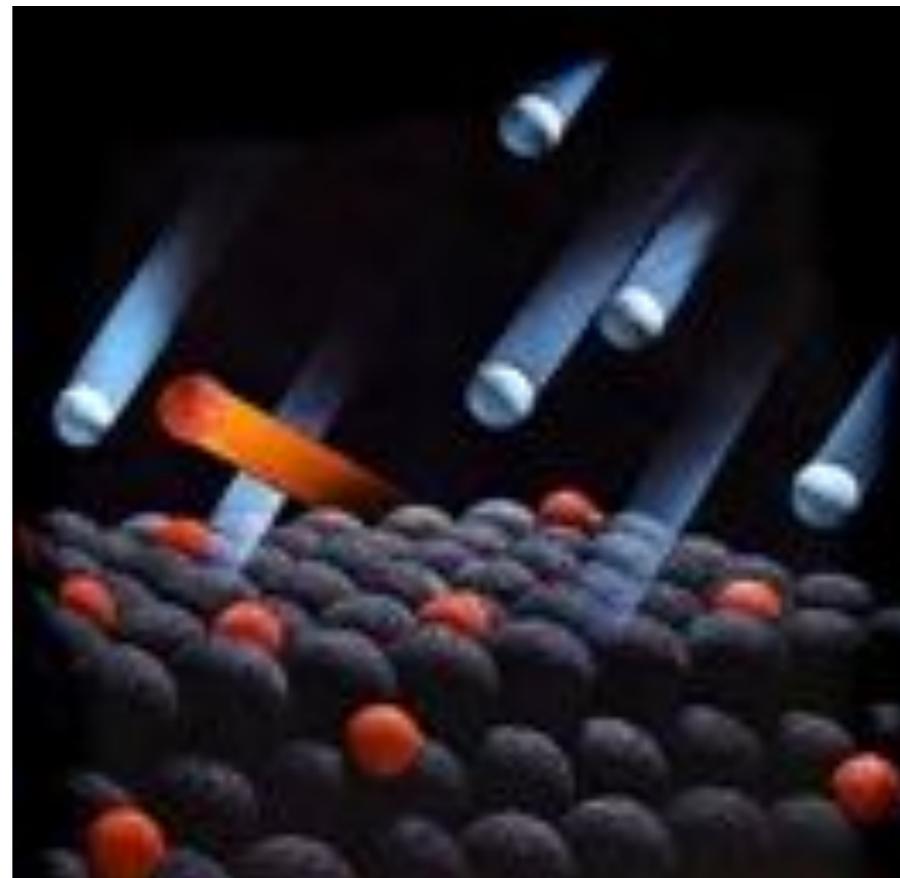
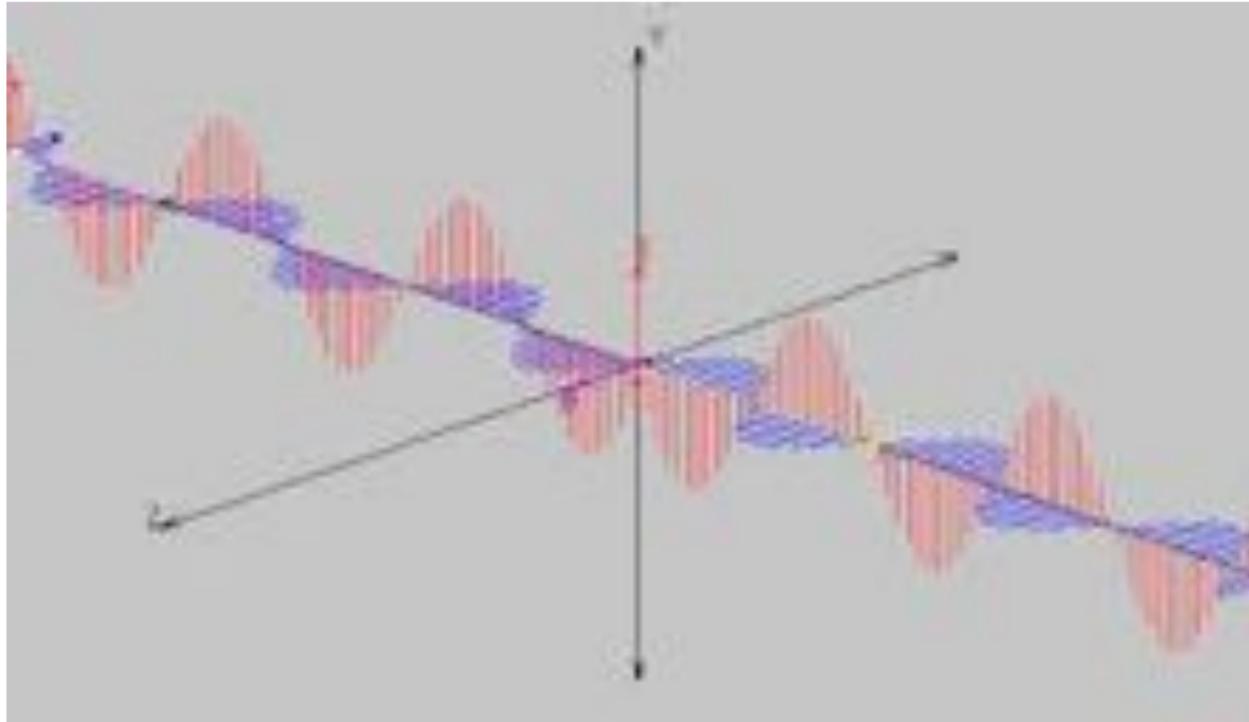
$$h\nu - \Phi = \frac{1}{2}m_e v_{\max}^2$$

$$\frac{1}{2}m_e v_{\max}^2 = eV_{\min}$$



Huygens-Planck-Einstein

Dualidad onda-corpúsculo en la luz.
En ciertas circunstancias la luz se comporta como una onda (Huygens) y en otras circunstancias la misma luz se comporta como una partícula (Planck, Einstein).



María Skłodowska-Curie



Manya Skłodowska, que luego sería conocida como Marie Curie, nació en Varsovia el 7 de noviembre de 1867. Era la menor de los cinco hijos (cuatro mujeres y un varón) de un matrimonio dedicado a la docencia: su padre era profesor de secundaria de física y matemáticas y su madre directora de un colegio de señoritas. Su infancia estuvo marcada por la coincidencia con un implacable período de rusificación de Polonia, a causa del cual su padre hubo de abandonar el puesto de subinspector que ocupaba en un instituto; las necesidades económicas le obligaron a tomar como huéspedes a muchachos en edad escolar, a los que daba también clases particulares.

En 1903 les concedieron el **Premio Nobel de Física** por el descubrimiento de los elementos radiactivos. Muy reservados los dos, devorados por la misma pasión por la investigación, sufren al verse apartados de ella y al ver su laboratorio asaltado por gente inoportuna, su modesto pabellón parisino invadido por los periodistas y los fotógrafos. A las frivolidades que les pesan, se añade un correo cada vez más voluminoso, del que se ocupan los domingos. Marie Curie se convirtió en la primera mujer que recibía este premio.

En 1911 le otorgaron un premio **Nobel de Química** por sus investigaciones sobre el radio y sus compuestos. Fue nombrada directora del Instituto de Radio de París en 1914 y se fundó el Instituto Curie.

María Slodowska-Curie

Desintegración radiactiva. Carbono 14.

El **carbono-14**, ^{14}C es un isótopo radiactivo del carbono, descubierto el 27 de febrero de 1940 por Martin Kamen y Sam Ruben. Su núcleo contiene 6 protones y 8 neutrones. Willard Libby determinó un valor para el periodo de semidesintegración o semivida de este isótopo: 5568 años. Determinaciones posteriores en Cambridge produjeron un valor de 5730 años. Debido a su presencia en todos los materiales orgánicos, el carbono-14 se emplea en la datación de especímenes orgánicos.

El método de datación por radiocarbono está basado en la ley de decaimiento exponencial de los isótopos radiactivos. El isótopo carbono-14 (^{14}C) es producido de forma continua en la atmósfera como consecuencia del bombardeo de átomos de nitrógeno por rayos cósmicos. Este isótopo creado es inestable, por lo que, espontáneamente, se transmuta en nitrógeno-14 (^{14}N). Estos procesos de generación-degradación de ^{14}C se encuentran prácticamente equilibrados, de manera que el isótopo se encuentra homogéneamente mezclado con los átomos no radiactivos en el dióxido de carbono de la atmósfera. El proceso de fotosíntesis incorpora el átomo radiactivo en las plantas, de manera que la proporción $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ en éstas es similar a la atmosférica. Los animales incorporan, por ingestión, el carbono de las plantas. Ahora bien, tras la muerte de un organismo vivo no se incorporan nuevos átomos de ^{14}C a los tejidos, y la concentración del isótopo va decreciendo conforme va transformándose en ^{14}N por decaimiento radiactivo.

María Slodowska-Curie

Desintegración radiactiva. Carbono 14.

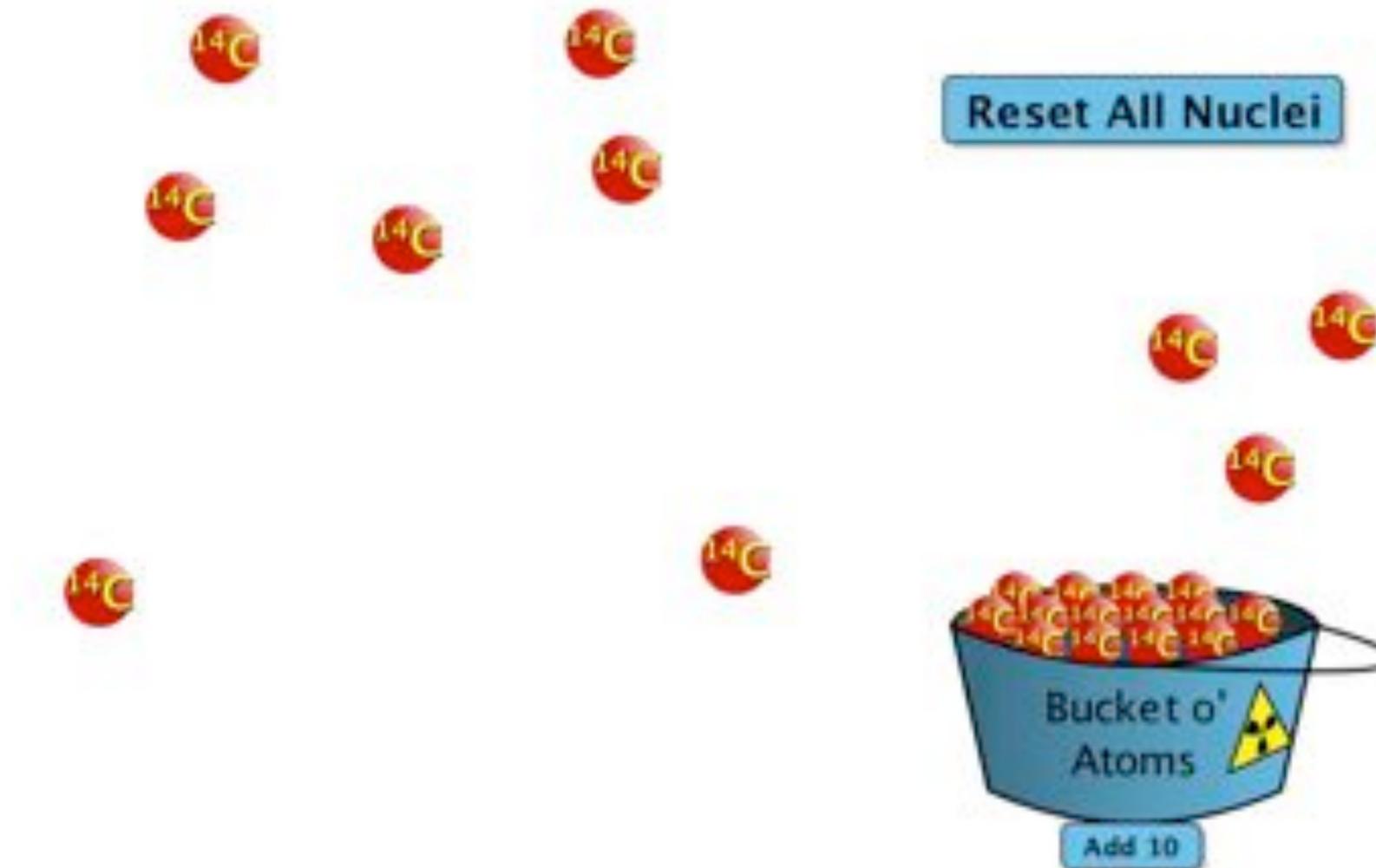
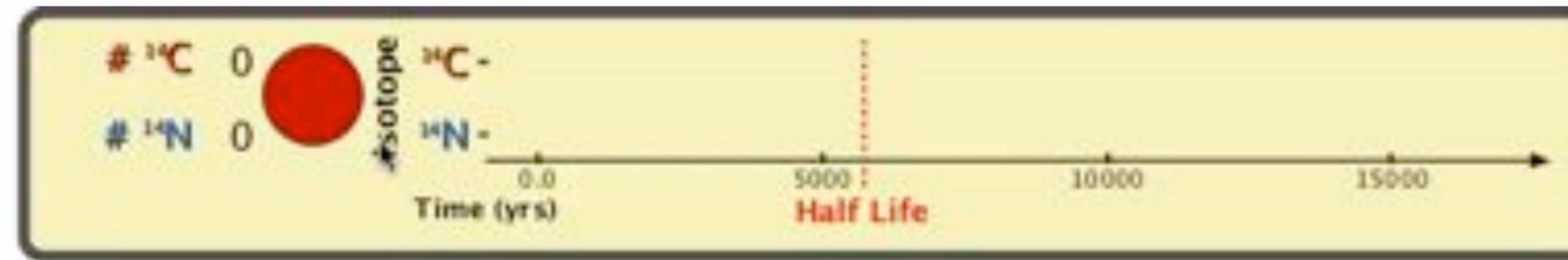
La masa en isótopo ^{14}C de cualquier espécimen disminuye a un ritmo exponencial, que es conocido: a los 5730 años de la muerte de un ser vivo la cantidad de ^{14}C en sus restos se ha reducido a la mitad. Así pues, al medir la cantidad de radiactividad en una muestra de origen orgánico, se calcula la cantidad de ^{14}C que aún queda en el material. Así puede ser datado el momento de la muerte del organismo correspondiente. Es lo que se conoce como "edad radiocarbónica" o de ^{14}C , y se expresa en *años BP* (*Before Present*). Esta escala equivale a los años transcurridos desde la muerte del ejemplar hasta el año 1950 de nuestro calendario. Se elige esta fecha por convenio y porque en la segunda mitad del siglo XX los ensayos nucleares provocaron severas anomalías en las curvas de concentración relativa de los isótopos radiactivos en la atmósfera.

Al comparar las concentraciones teóricas de ^{14}C con las de muestras de maderas de edades conocidas mediante dendrocronología, se descubrió que existían diferencias con los resultados esperados. Esas diferencias se deben a que la concentración de carbono radiactivo en la atmósfera también ha variado respecto al tiempo. Hoy se conoce con suficiente precisión (un margen de error de entre 1 y 10 años) la evolución de la concentración de ^{14}C en los últimos 15.000 años, por lo que puede corregirse esa estimación de edad comparándolo con curvas obtenidas mediante interpolación de datos conocidos. La edad así hallada se denomina "edad calibrada" y se expresa en *años Cal BP*.

María Slodowska-Curie

Desintegración radiactiva. Carbono 14.

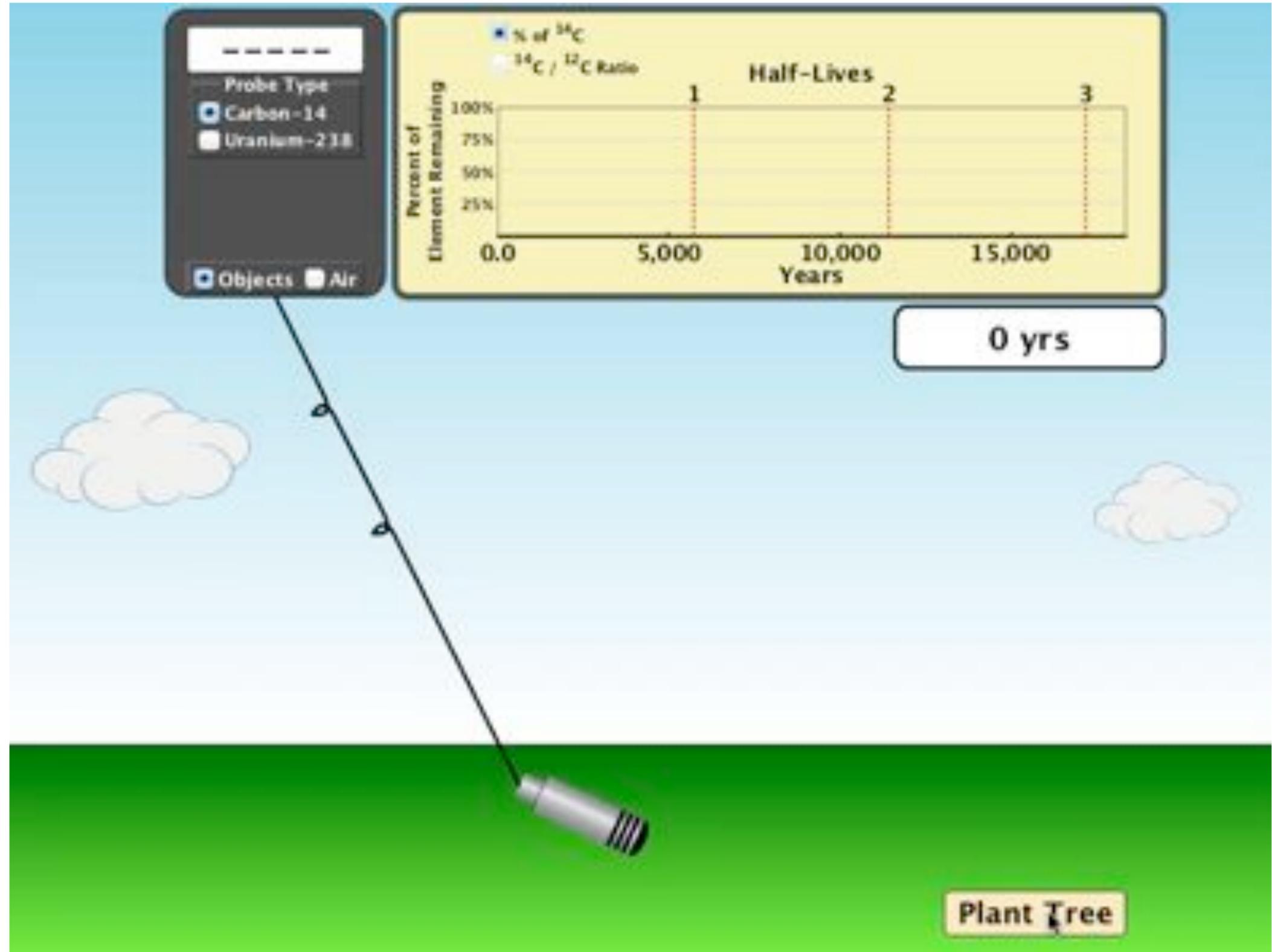
Cuando un ser vivo muere, sus átomos de carbono 14 se desintegran. El porcentaje de átomos de carbono 14 sin desintegrar indica el tiempo transcurrido desde su muerte



María Slodowska-Curie

Desintegración
radiactiva.
Carbono 14.

Cuando el árbol
muere, empieza a
perder carbono 14.
El porcentaje de
C14 que
permanece, indica
los años
transcurridos desde
su muerte.



María Slodowska-Curie

Desintegración radiactiva. Uranio 238.

Por ejemplo, si un isótopo llamado Uranio-238, que tiene una probabilidad de un 100 % de desintegrarse mediante emisión alfa, como el Uranio tiene 92 protones y 146 neutrones, un decaimiento alfa que implica perder 2 protones y 2 neutrones, haría llegar al núclido con 90 protones y 144 neutrones, es decir, al Torio-234. El elemento químico cambia debido a que es el número de protones (y electrones cuando el elemento se encuentra en un estado neutro eléctricamente) el que determina esto.

Ese isótopo a su vez tampoco es estable, sino que se desintegra mediante un modo beta menos (un neutrón se desintegra en un protón, un electrón y un antineutrino electrónico), también con un 100 % de probabilidad, tendremos un nuevo isótopo cuando se desintegre con 91 protones y 143 neutrones. Ese isótopo es el Protactinio-234.

Así sucesivamente, hasta llegar al Plomo-206 cuya vida media es demasiado larga para poder ser medida, es decir, un isótopo que se supone estable.