



Ideas que dan forma a la física
Nada se divide indefinidamente.
La naturaleza es cuántica.

Prof. J Güémez
Departamento de Física Aplicada
Universidad de Cantabria

Santander, enero 2019

Nada se divide indefinidamente.
La naturaleza es cuántica.

Aunque la materia macroscópica se percibe como continua, algunos filósofos griegos ya razonaron sobre la imposibilidad de dividir la materia ad infinitum (**Leucipo**), anticipando el carácter atómico de la materia (**Demócrito**). Curiosamente, fue la explicación de un fenómeno aparentemente continuo, el espectro de frecuencias del cuerpo negro, el que indujo a **Planck** a introducir, sin mucha convicción, el concepto de cuanto de luz (posteriormente, fotón). Fue la explicación de un fenómeno aparentemente continuo, el efecto fotoeléctrico, el que convenció a **Einstein** de que la radiación electromagnética se emite, transporta y absorbe en forma de cuantos.

Nada se divide indefinidamente.
La naturaleza es cuántica.

Con la discretización atómica y la cuantización de la energía, se introdujo la idea de la cuantización del momento angular y la discretización de las órbitas electrónicas del átomo (**Bohr**).

Ciertas consideraciones de simetría, y las ideas de la relatividad, llevaron a describir las partículas a nivel atómico como ondas (**De Broglie**), obteniéndose la ecuación que gobernaba dichas ondas (**Schrödinger**), permitiendo desarrollar la idea de un mundo gobernado por la incertidumbre y las probabilidades a los niveles atómico y subatómico.

Número de Avogadro.

$$N_A = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ atom.} \cdot \text{mol}^{-1}$$

4,003 g de He contienen N_A átomos

$$N_A = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ molec.} \cdot \text{mol}^{-1}$$

2,016 g de H_2 contienen N_A moléculas

Constante de Boltzmann

$$k_{\text{B}} = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$$

Constante de los gases. Relación de Planck

$$R = k_{\text{B}} N_{\text{A}} = 8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$$

Bajo presión de 10^5 Pa un mol de un gas (ideal) a la temperatura de 300 K, ocupa un volumen de $2,48 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$

Constante de Planck.

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

Aunque la constante de Planck se introduce en relación con la distribución de frecuencias de un cuerpo negro, dicha constante aparecerá en relación con muy diferentes (efecto fotoeléctrico, átomo de Bohr, relación de De Broglie, etc.)

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,054 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

Química

Todos los átomos de una especie química, por ejemplo, hidrógeno, son iguales, desde el punto de vista de la reactividad química.

Química.

Ley de la proporciones definidas (o de Proust)

Cuando dos, o más, elementos se combinan para formar un determinado compuesto, lo hacen en una relación de peso constante, independientemente del proceso seguido para formarlo.



Química

Ley de las proporciones múltiples (o de Dalton)

Cuando dos elementos, A y B, son capaces de combinarse entre sí para formar varios compuestos diferentes, las distintas masas de B que se unen a una cierta masa de A, están en relación de números enteros sencillos.



Química.

Ley de los volúmenes de combinación (o de Gay- Lussac)

En cualquier reacción química, los volúmenes de todas las sustancias gaseosas que intervienen en la misma, medidos en las mismas condiciones de presión y temperatura, están en una relación de números enteros sencillos.

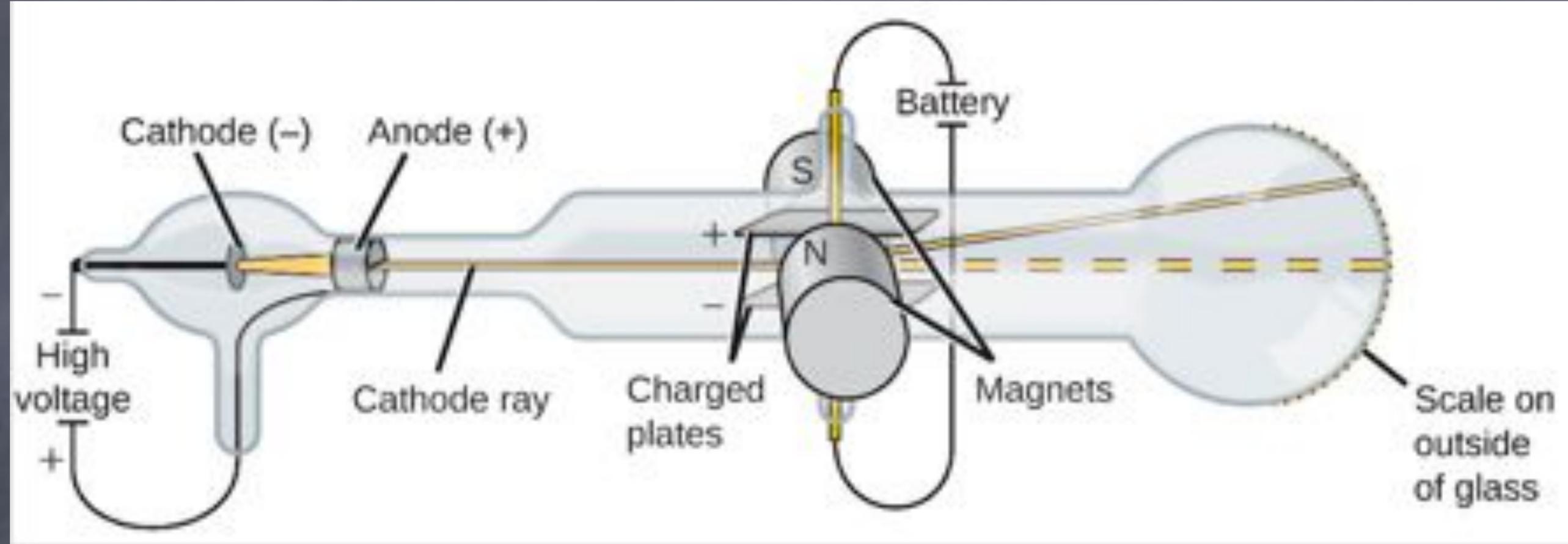


Rayos catódicos. Descubrimiento del electrón

Rayos Catódicos

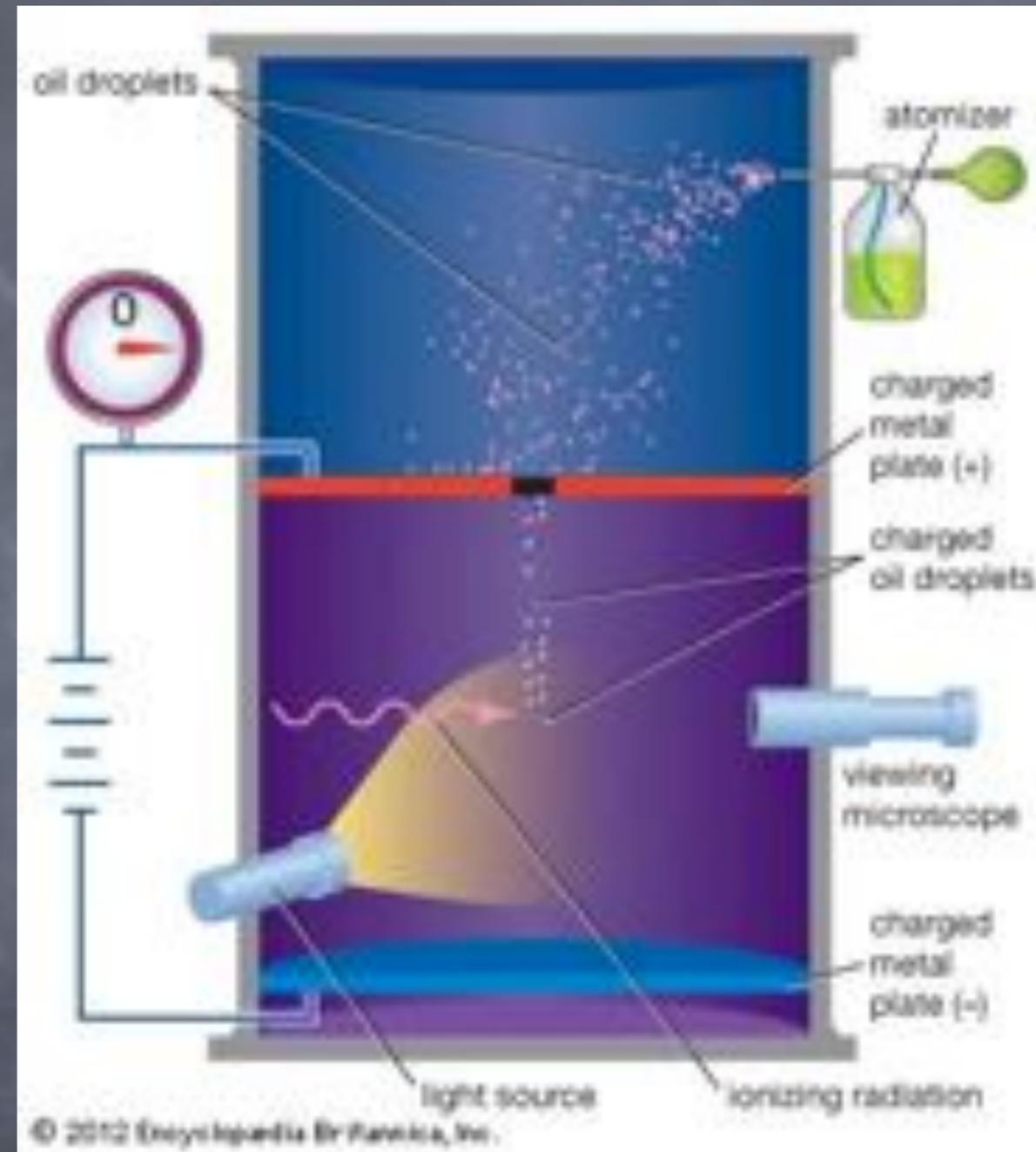
Cuando se aplica una gran diferencia de potencial entre los electrodos de un gas enrarecido, se producen rayos catódicos (electrones), que tienen masa, son desviados por los campos eléctricos y magnéticos y no atraviesan la materia.

Relación carga/masa del electrón. Thomson



$$\frac{e}{m_e} = -1,75881962 \cdot 10^{11} \text{ Ckg}^{-1}$$

Carga del electrón. Millikan

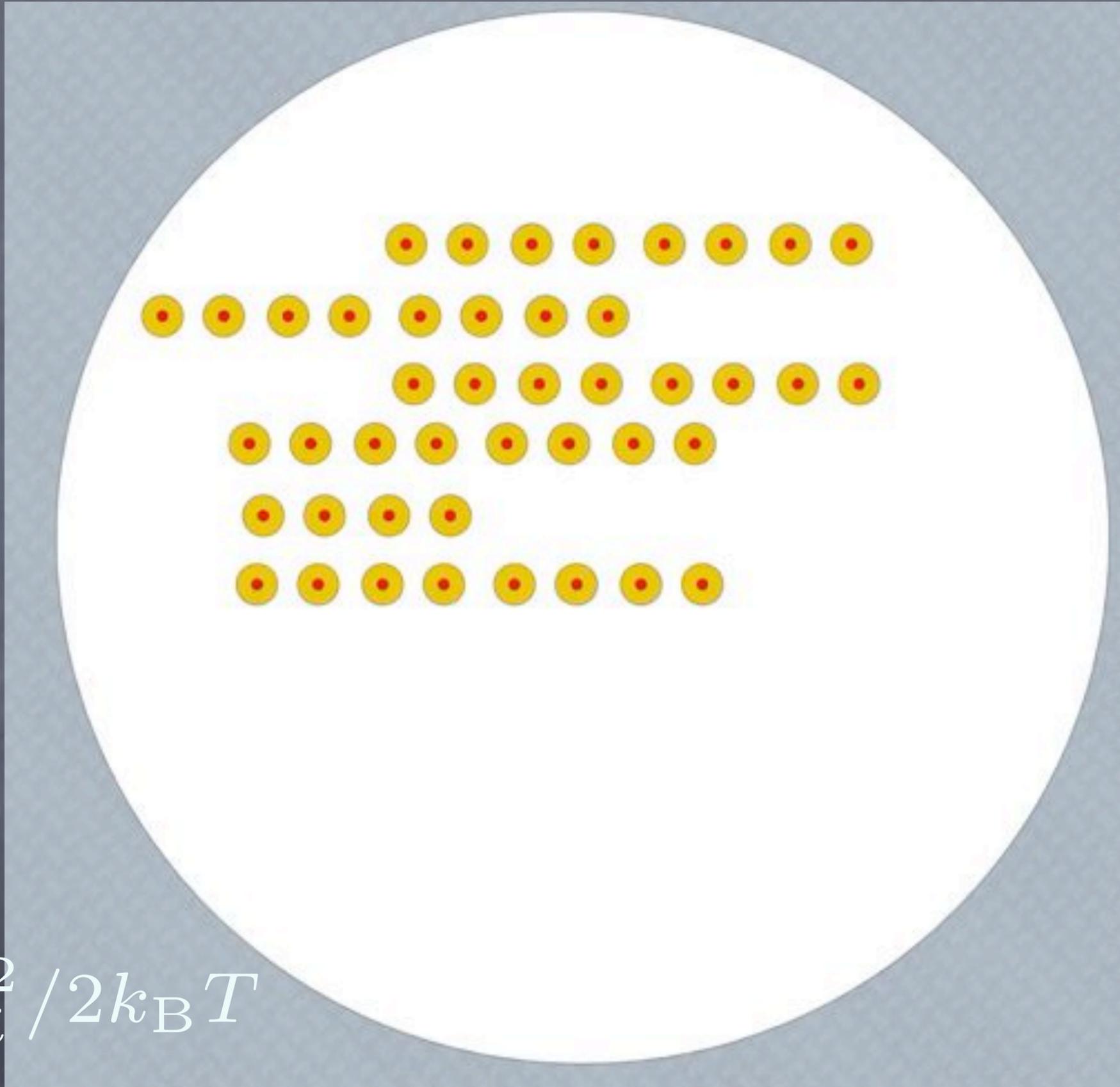


$$e = -1,6021773 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$m_e = 9,1093897 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

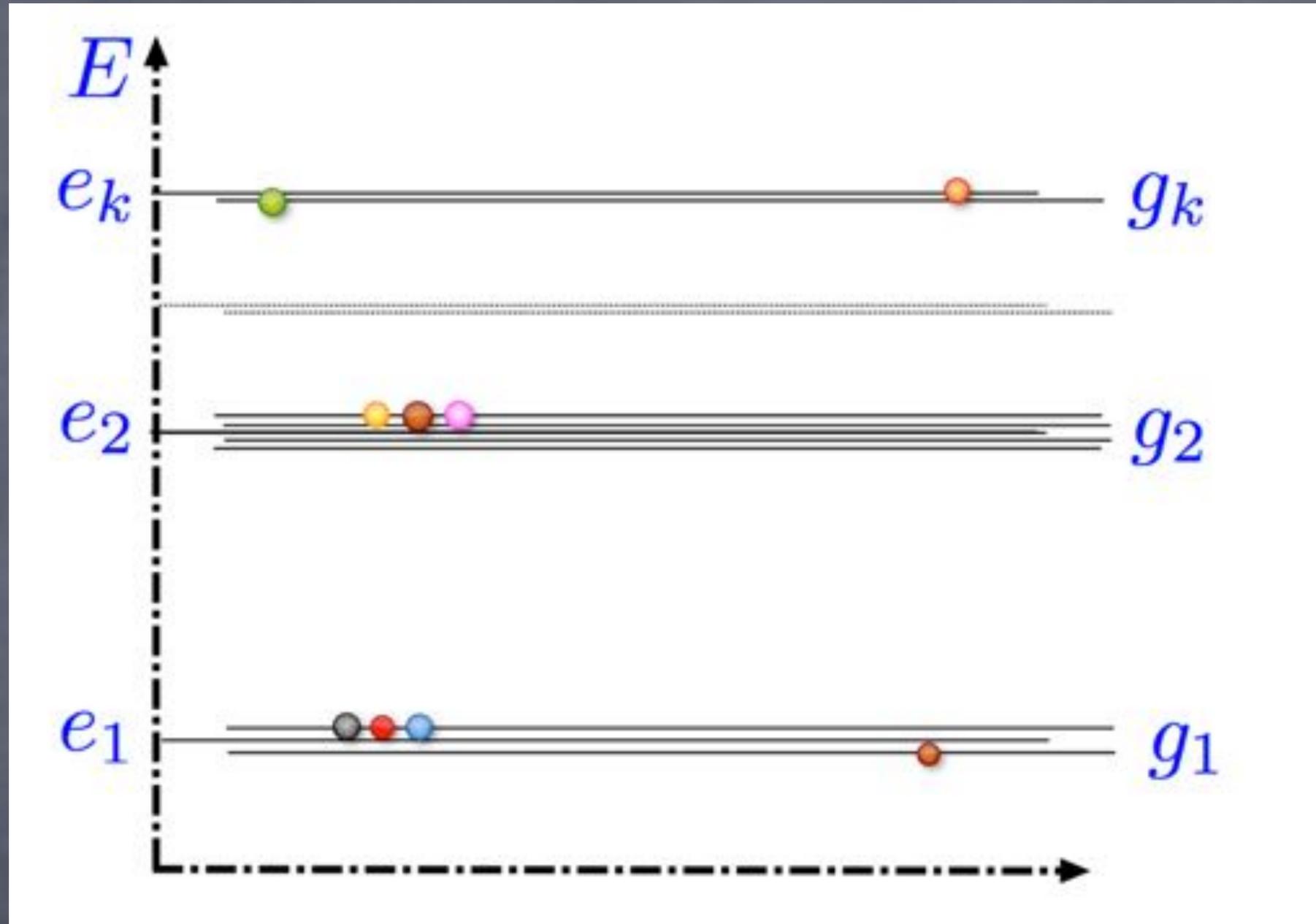
Distribución de velocidades de Maxwell

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



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

Distribución de Maxwell-Boltzmann



$$W = \frac{N!}{n_1! n_2! \cdots n_k!} g_1^{n_1} g_2^{n_2} \cdots g_k^{n_k}$$

Distribución de Maxwell-Boltzmann. Partículas distinguibles.

$$W = \frac{N!}{n_1!n_2!\cdots n_k!} g_1^{n_1} g_2^{n_2} \cdots g_k^{n_k}$$

$$\sum_i n_i = n_1 + n_2 + \cdots + n_k = N$$

$$\sum_i n_i u_i = n_1 u_1 + n_2 u_2 + \cdots + n_k u_k = U$$

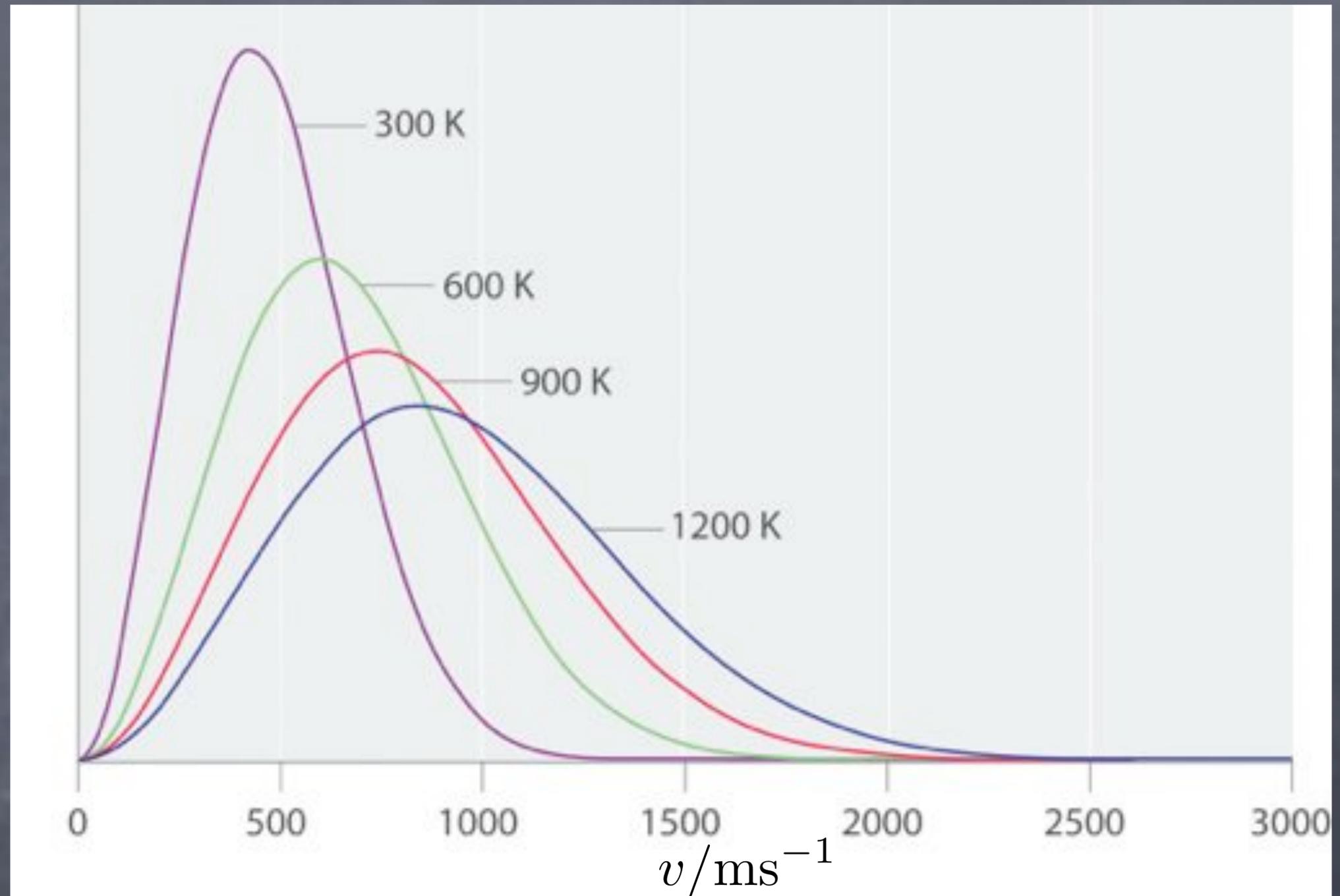
$$n_i = g_i e^{-\alpha} e^{-u_i/k_B T}$$

Distribución de Maxwell de velocidades

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

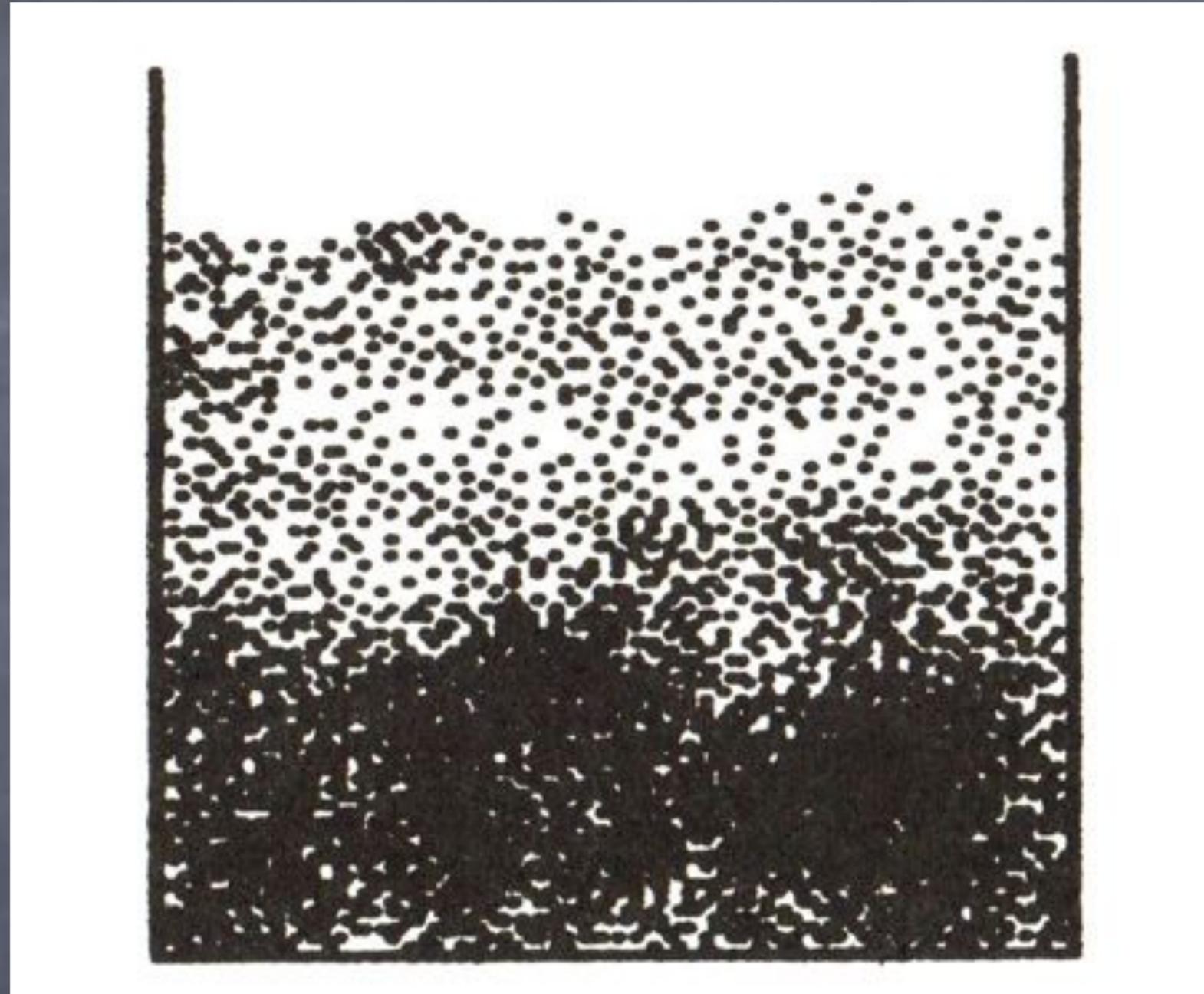
$$E_i = \frac{1}{2} m v_i^2$$

$$g(v_i) = C v_i^2$$



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

Distribución de Boltzmann de alturas



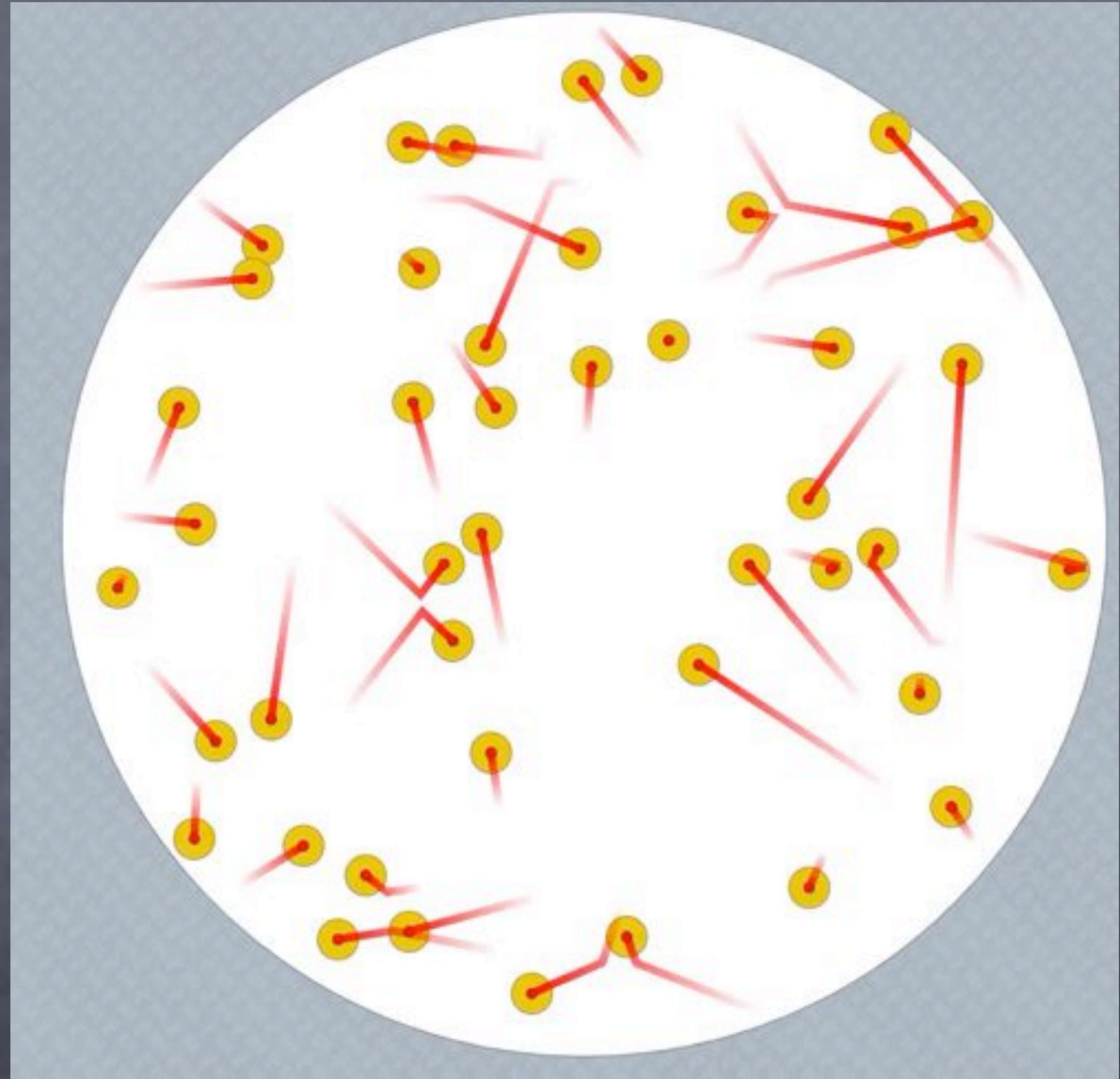
$$\rho(h) = \rho_0 \exp\left(-\frac{mgh}{k_B T}\right)$$

Distribución de alturas de Boltzmann.

Distribución de Boltzmann.

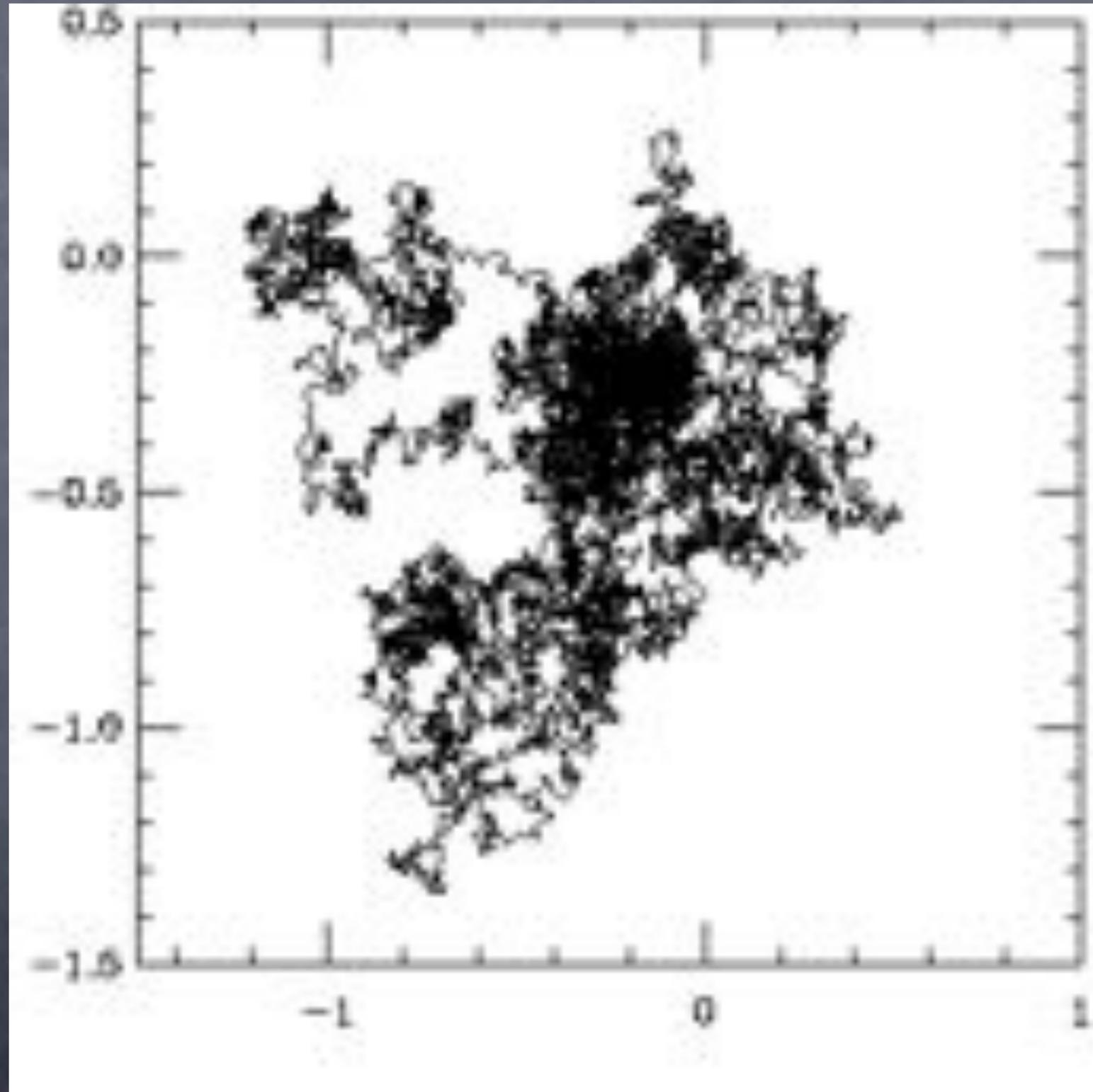
En presencia de un campo gravitatorio, las alturas de las partículas siguen la distribución de Boltzmann.

Atmósferas de los planetas



Número de Avogadro. Einstein y Perrin

Movimiento Browniano



Teorema de equipartición de la energía. Boltzmann.

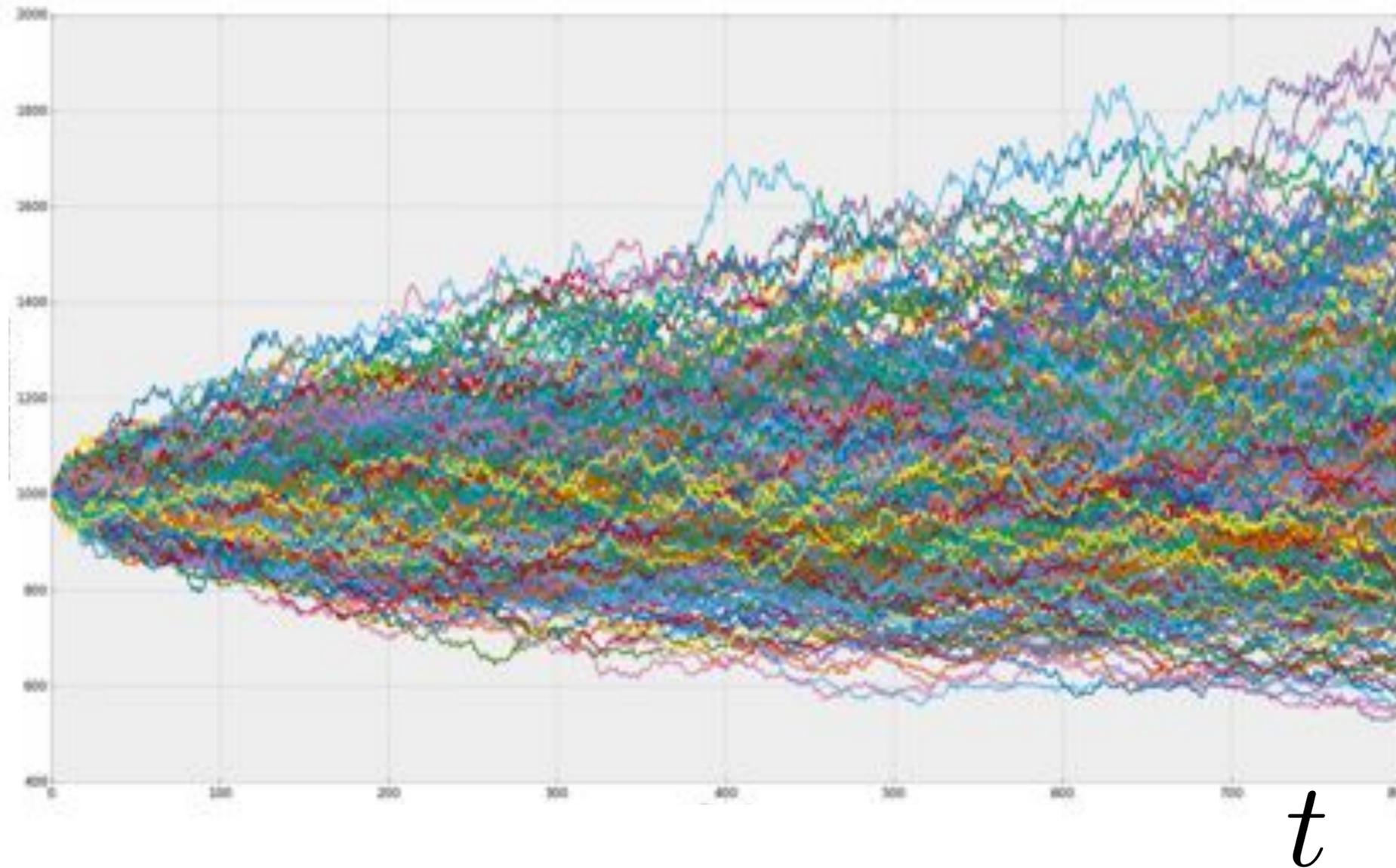
Teorema de equipartición de la energía.

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

Las partículas más masivas tienen menos velocidad.

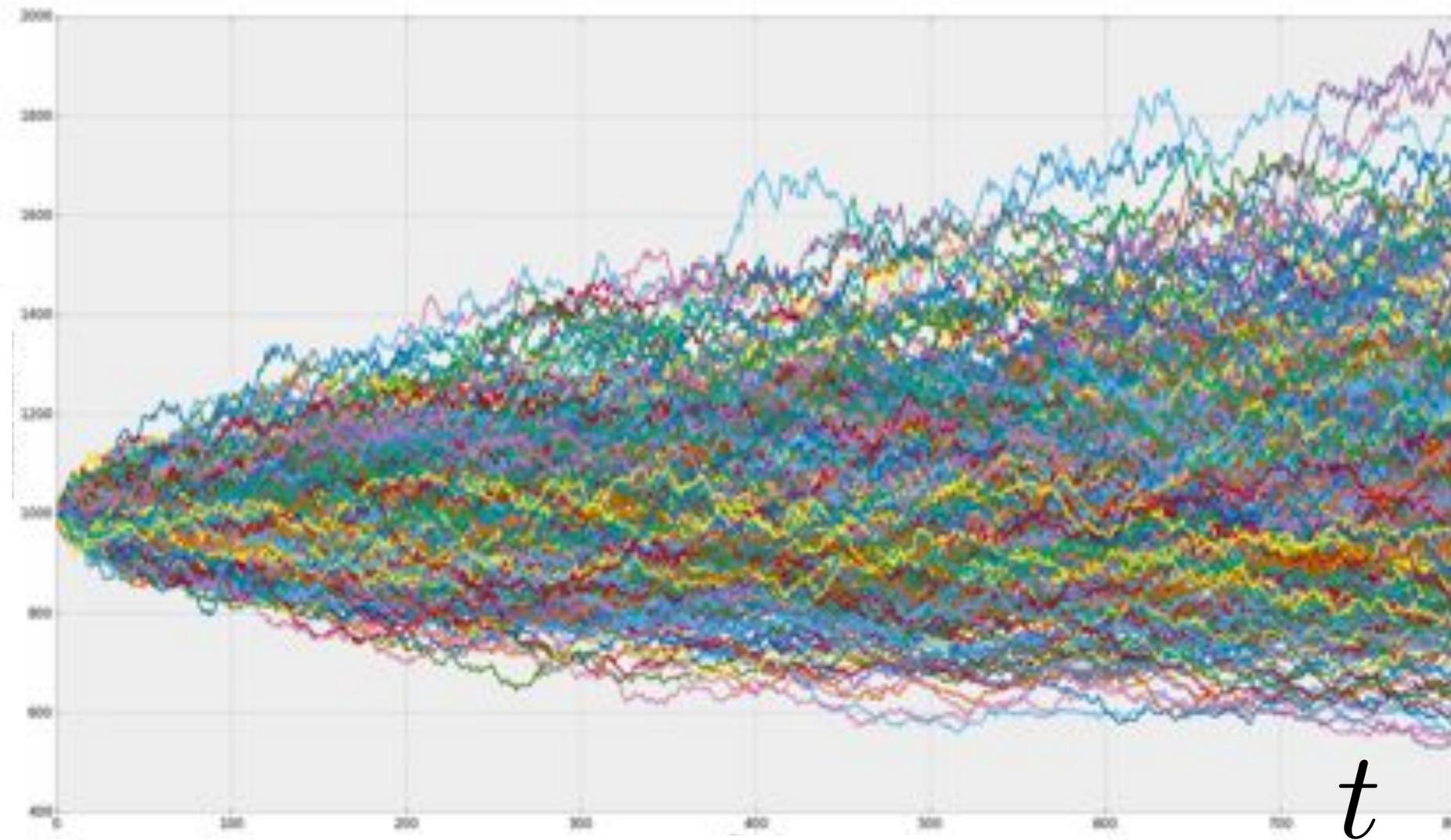


Movimiento browniano. Einstein



$$\rho(x, t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi Dt}} \exp(-x^2 / 4Dt)$$

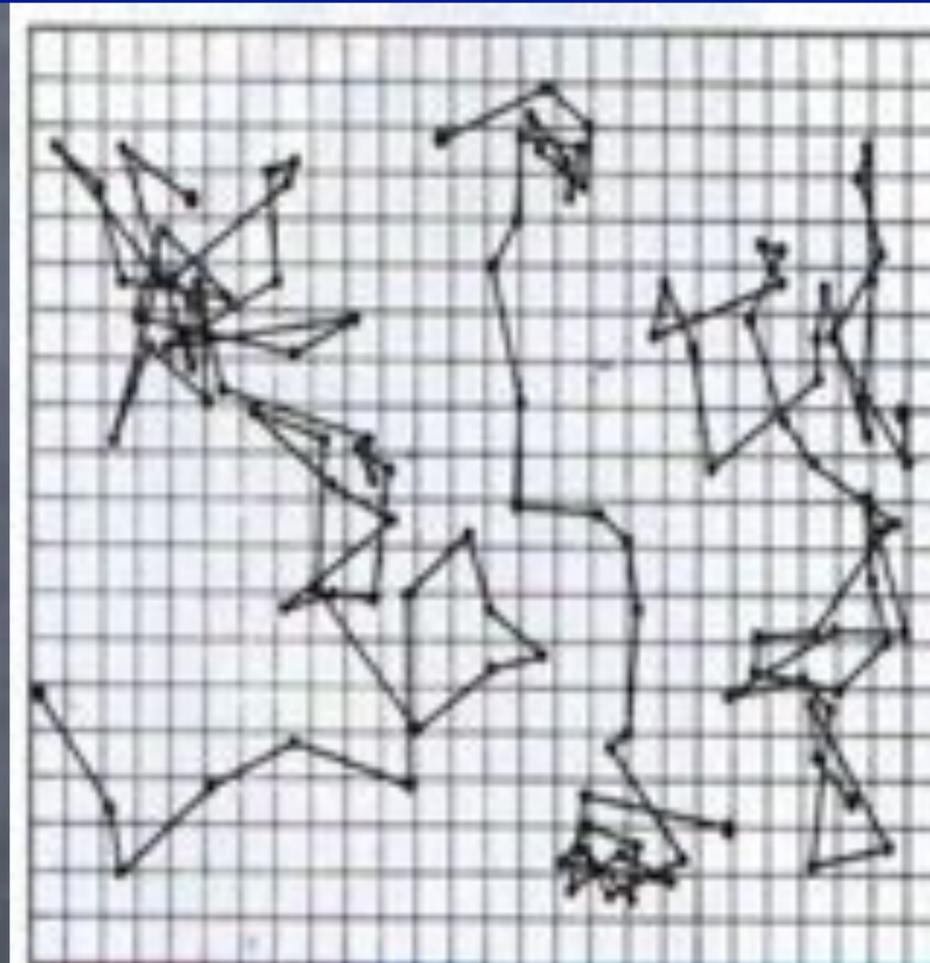
Movimiento browniano. Einstein



$$\langle x^2 \rangle = 2Dt$$

Movimiento browniano. Einstein. Perrin

$$D = \frac{k_B T}{6\pi\eta P}$$

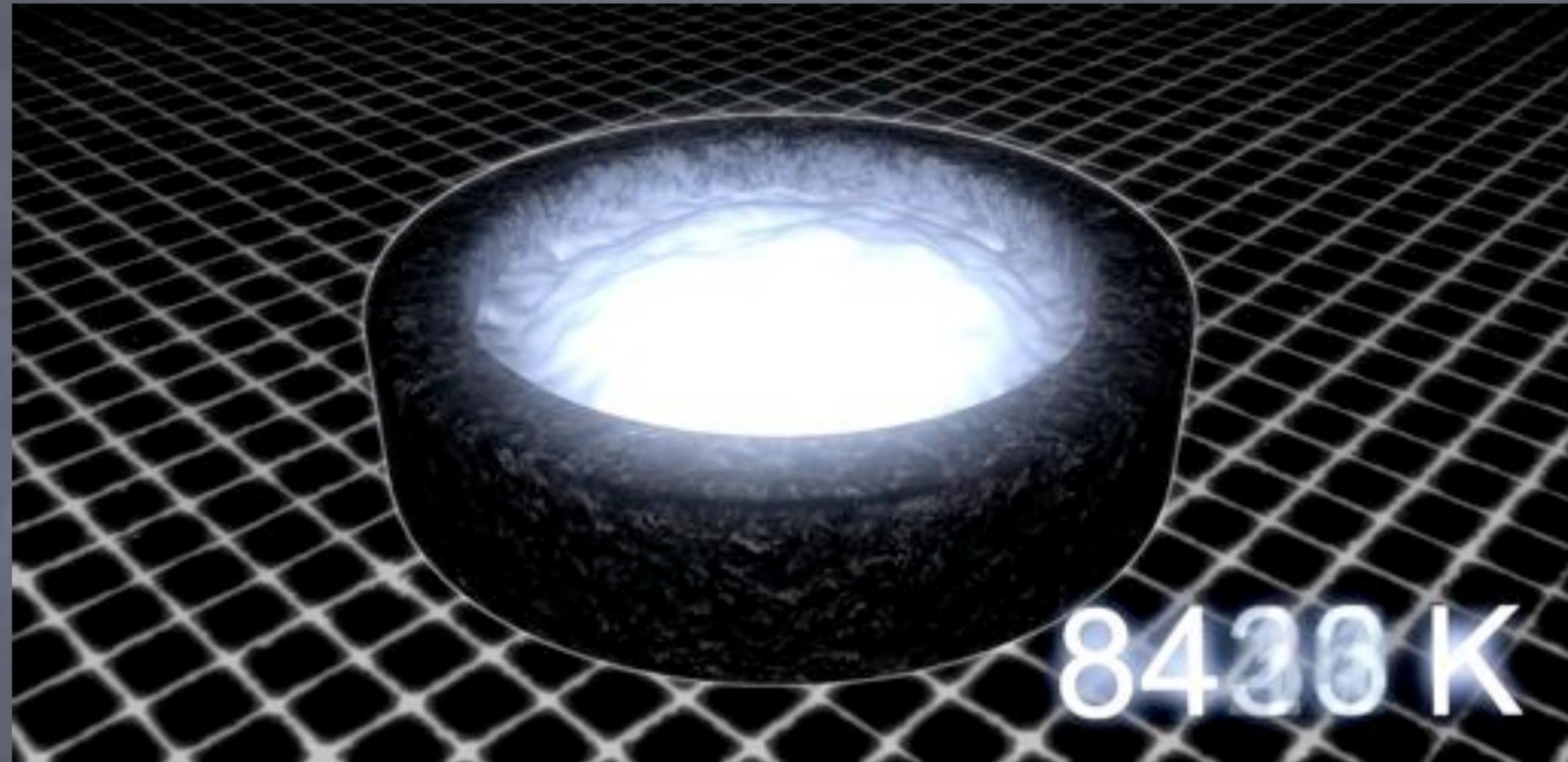


$$\sqrt{\langle x^2 \rangle} = \sqrt{2Dt} = \sqrt{\frac{2RT}{N_A} \frac{t}{6\pi\eta P}}$$

Ley de Stefan-Boltzmann

Ley de Wien.

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

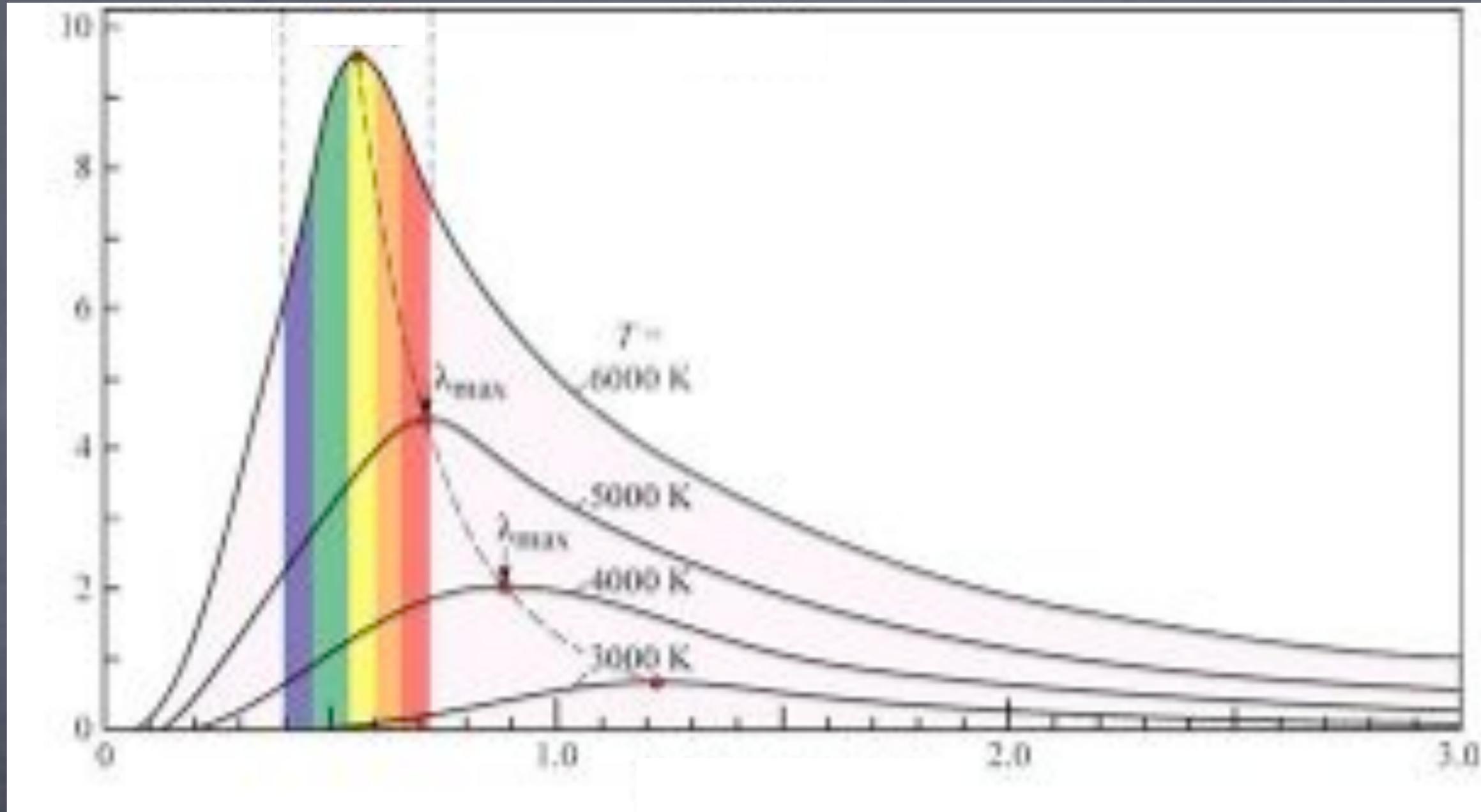


$$E = \epsilon \sigma T^4$$

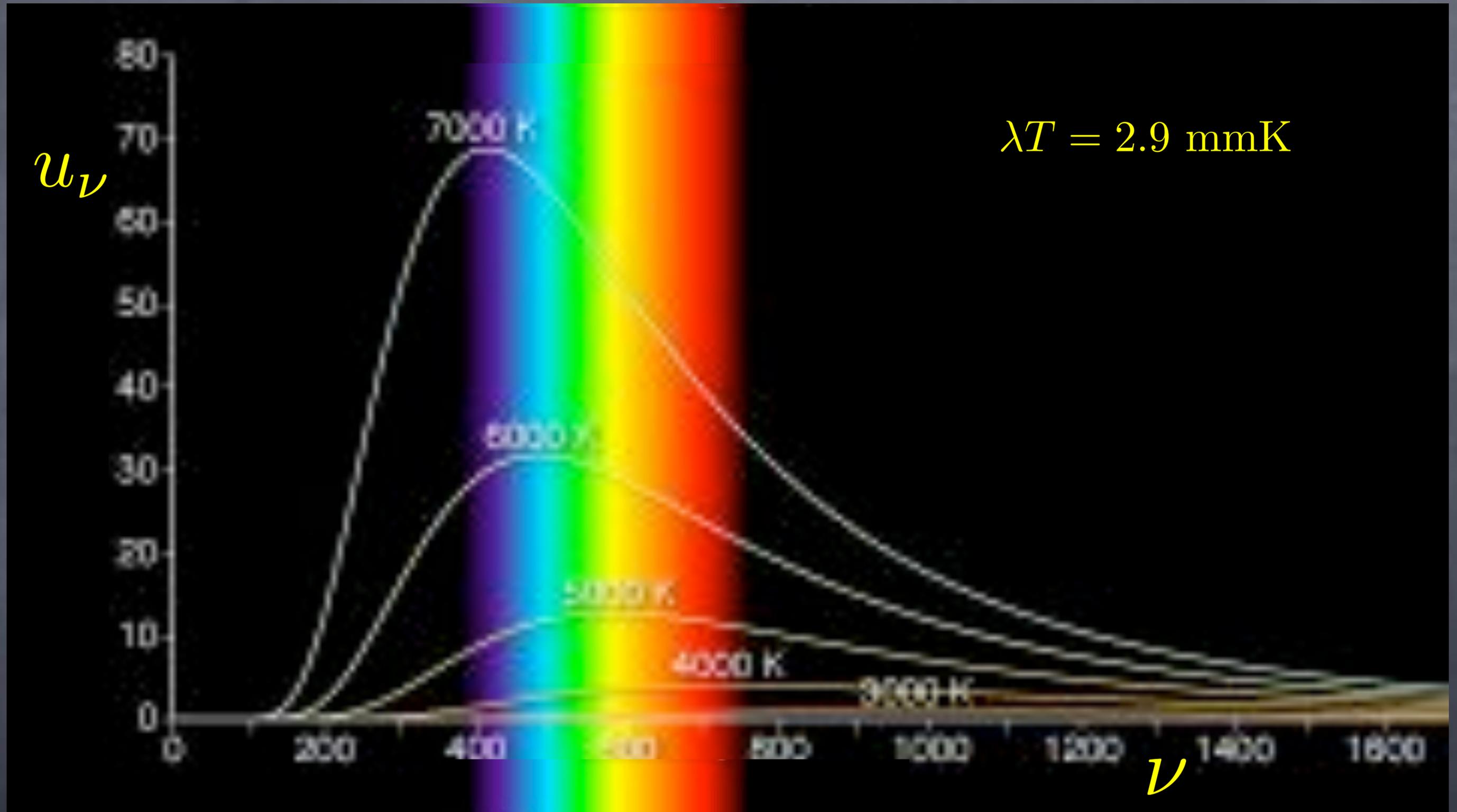
$$\lambda_{\max} T = 2,18$$

$$4 = 3 + 1$$

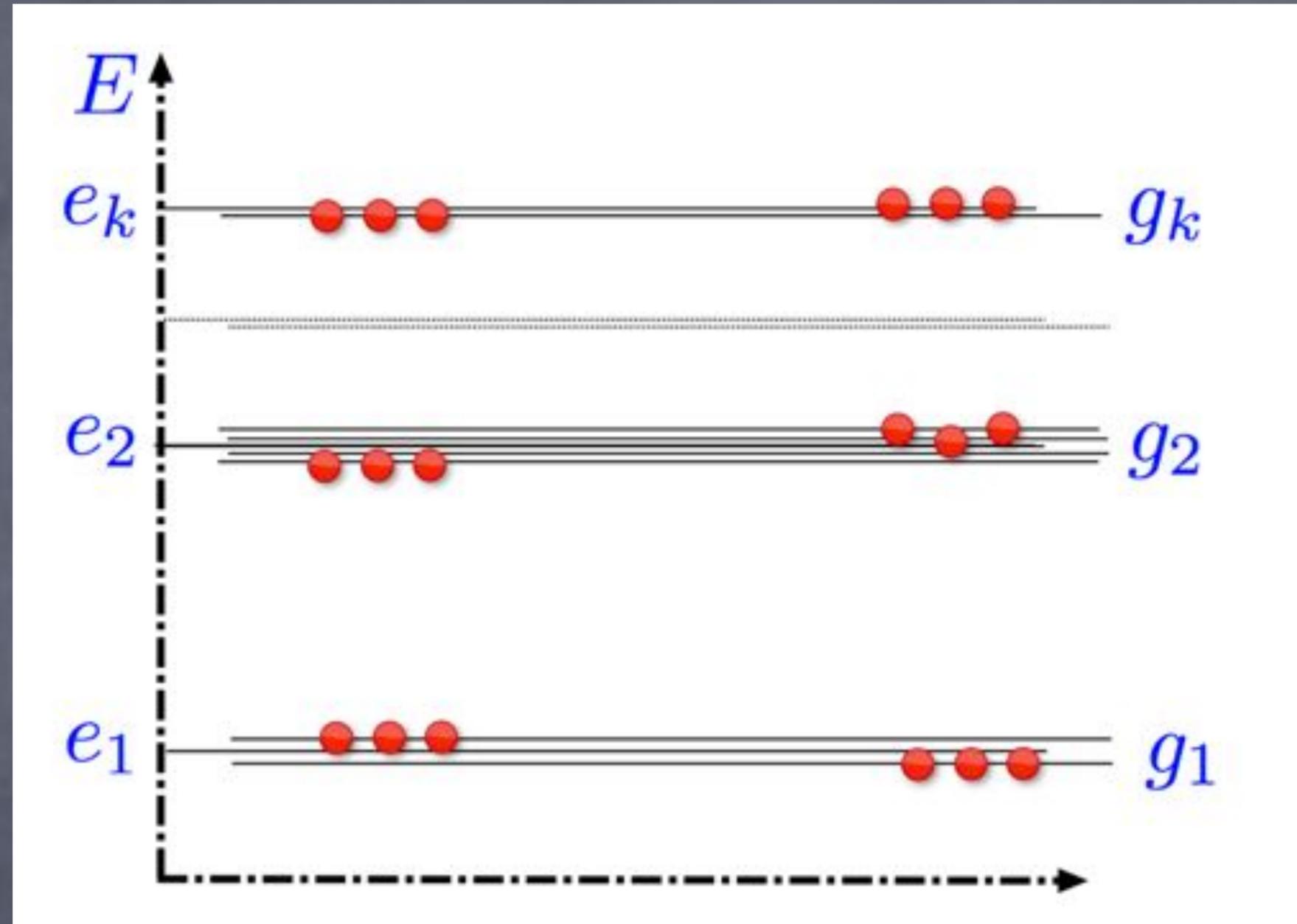
Distribución de frecuencias de Planck



Cuerpo negro. Distribución de Planck

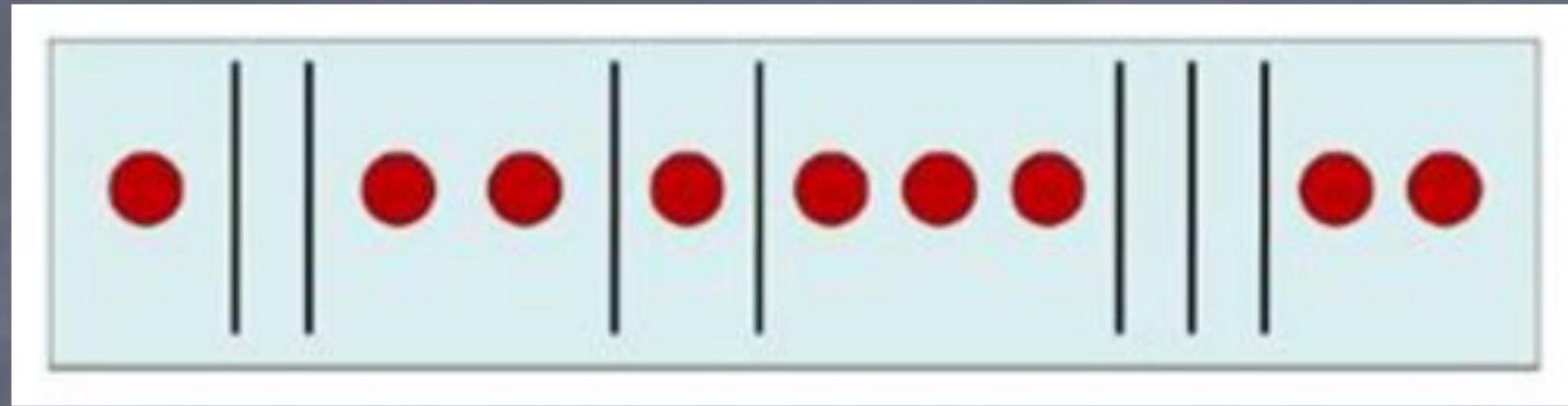


Distribución Bose-Einstein. Partículas indistinguibles.



$$W = \prod \frac{(n_i + g_i - 1)!}{n_i! (g_i - 1)!}$$

Distribución de Bose-Einstein. Partículas indistinguibles.



$$W = \prod \frac{(n_i + g_i - 1)!}{n_i! (g_i - 1)!}$$
$$\sum_i n_i \epsilon = n_1 \epsilon + n_2 \epsilon + \dots + n_k \epsilon = U$$

Distribución de Bose-Einstein

$$n_i = g_i \left(e^{\alpha} e^{n_i \epsilon / k_B T} - 1 \right)^{-1}$$

Distribución de Planck

$$n_i = g_i \left(e^{\alpha} e^{n_i \epsilon / k_B T} - 1 \right)^{-1}$$

$$\epsilon = h\nu$$

$$p_i = h \frac{\nu_i}{c}$$

$$g_i = \frac{8\pi V}{c^3} \nu_i^2$$

$$n(\nu) = \frac{8\pi V}{c^3} \frac{\nu^2}{e^{h\nu/k_B T} - 1}$$

Distribución de Planck

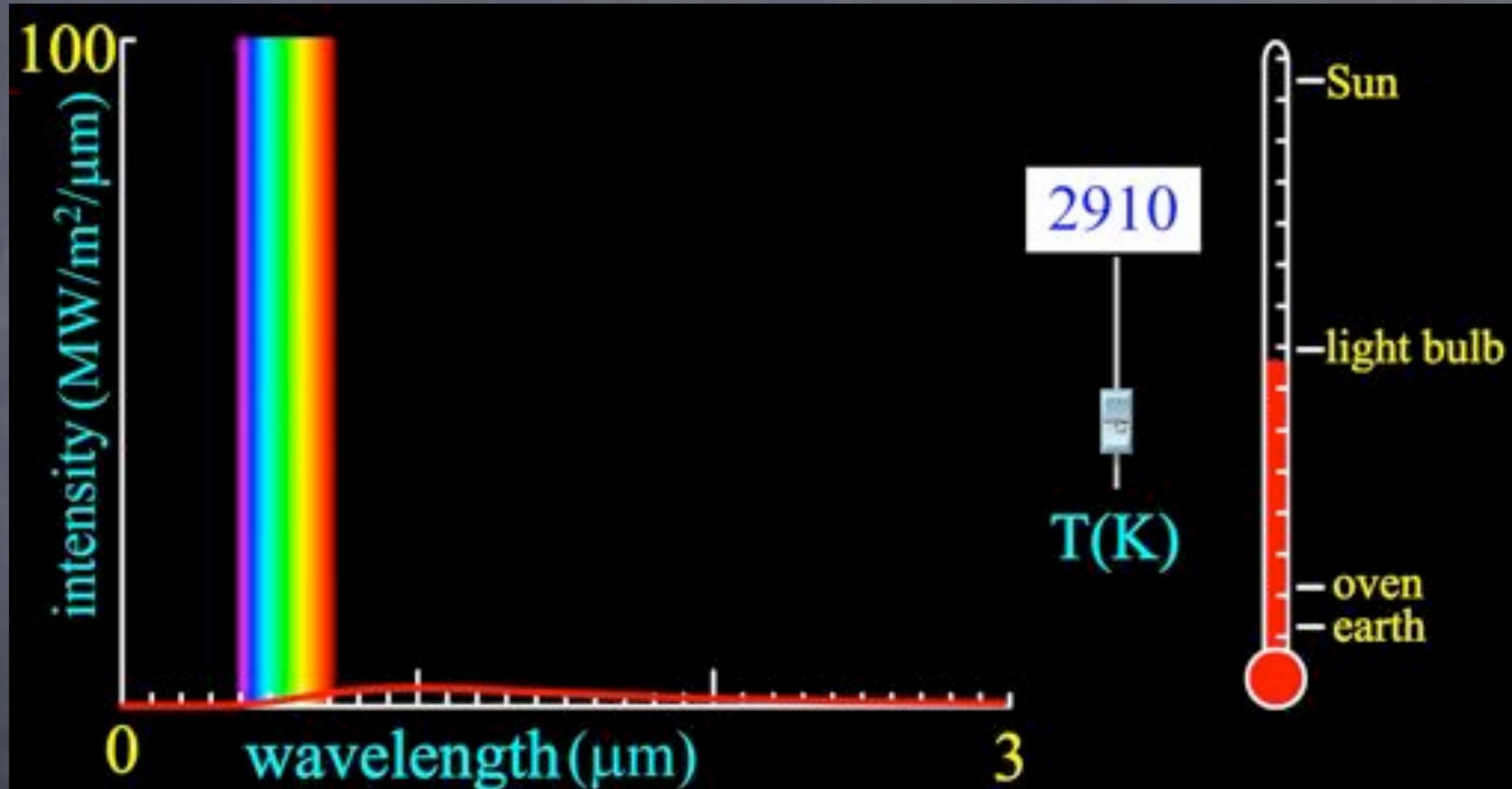
$$u_\nu d\nu = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{\nu^3}{e^{h\nu/k_B T} - 1} d\nu$$

$$u_\lambda d\lambda = \frac{8\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/k_B T \lambda} - 1} d\lambda$$

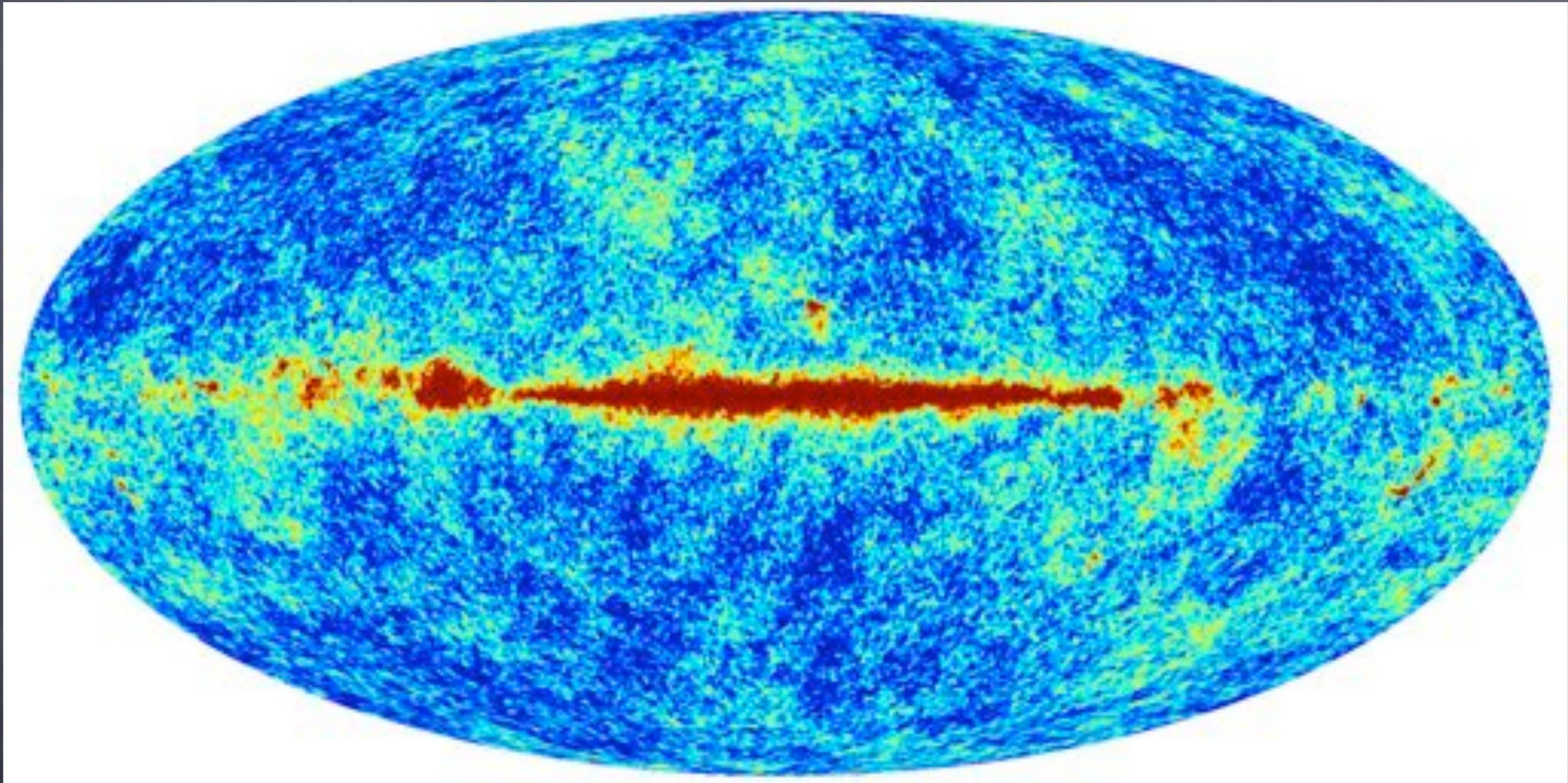
$$E = \epsilon\sigma T^4$$

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

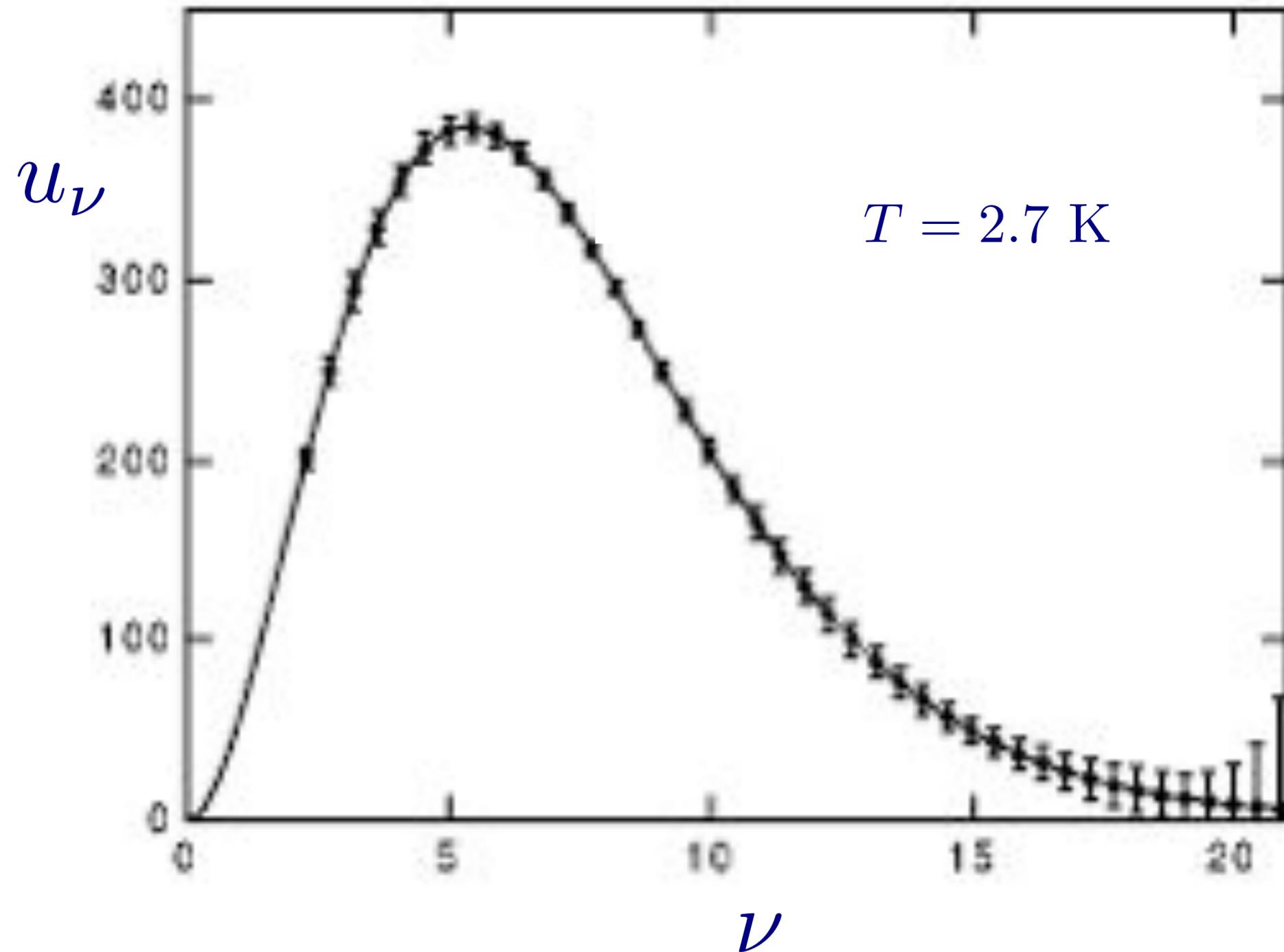
Distribución de Planck



Distribución de Planck a 2,7 K Fondo de microondas del Universo

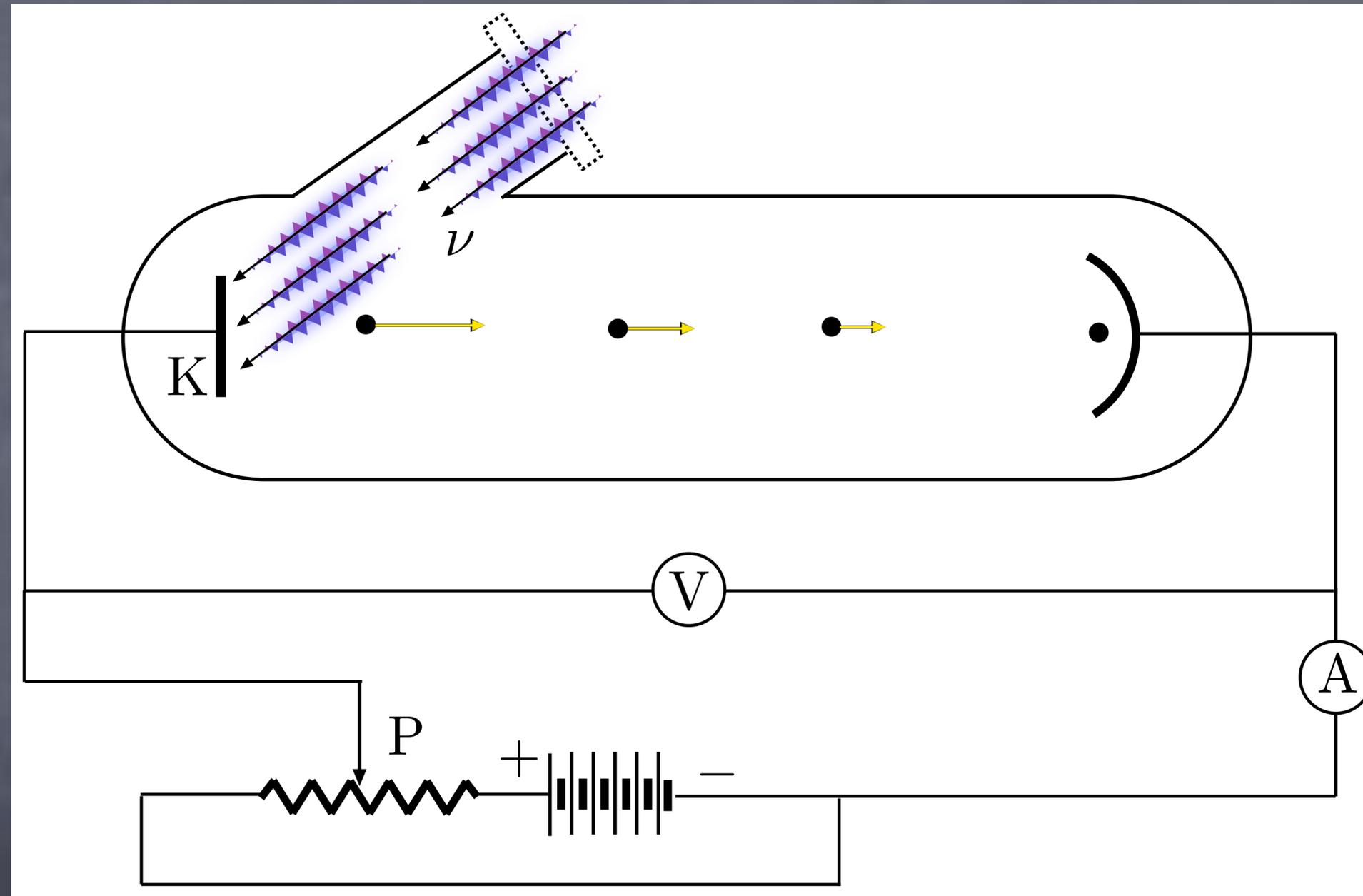


Distribución de Planck a 2,7 K



Efecto fotoeléctrico

Experimentos



Se debe alcanzar una frecuencia umbral para que empiecen a emitirse electrones.

Efecto fotoeléctrico

Experimentos

Se debe alcanzar una frecuencia umbral para que empiecen a emitirse electrones.

La frecuencia umbral depende del metal.

La emisión de electrones es instantánea.

Los electrones se emiten con una velocidad máxima.

Efecto fotoeléctrico. Einstein

Teoría

Un electrón absorbe, o no, la energía de un fotón incidente

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

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

Los electrones deben emitirse con una velocidad máxima

Efecto fotoeléctrico. Einstein

Teoría

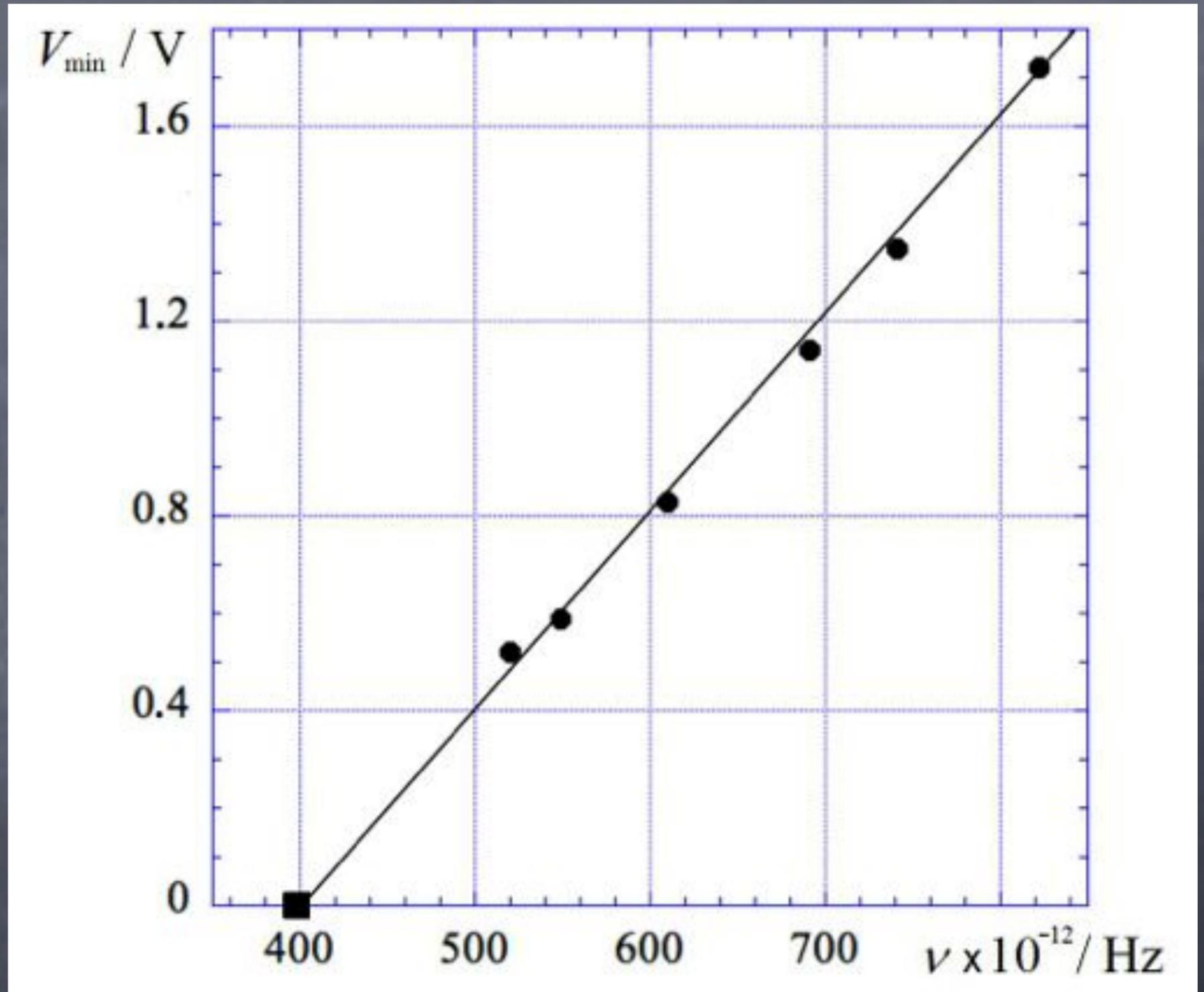
$$\frac{1}{2}m_e v_{\max}^2 = eV_{\min}$$

$$V_{\min} = \frac{h}{e}\nu - \frac{h}{e}\nu_u$$

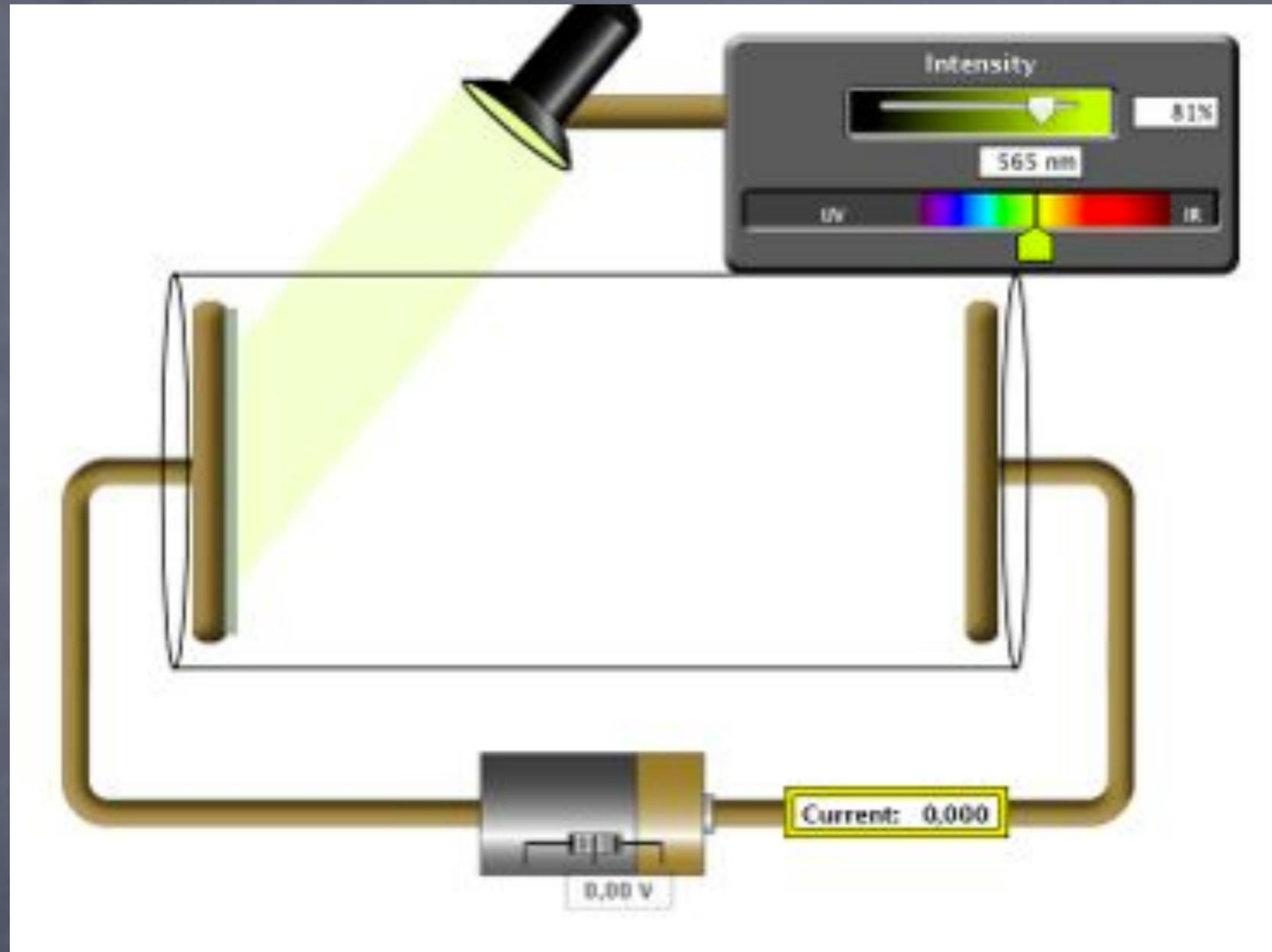
Debe haber un potencial eléctrico mínimo que frene a los electrones emitidos con velocidad máxima

Efecto fotoeléctrico. Millikan Experimento

$$V_{\min} = \frac{h}{e}\nu - \frac{h}{e}\nu_u$$



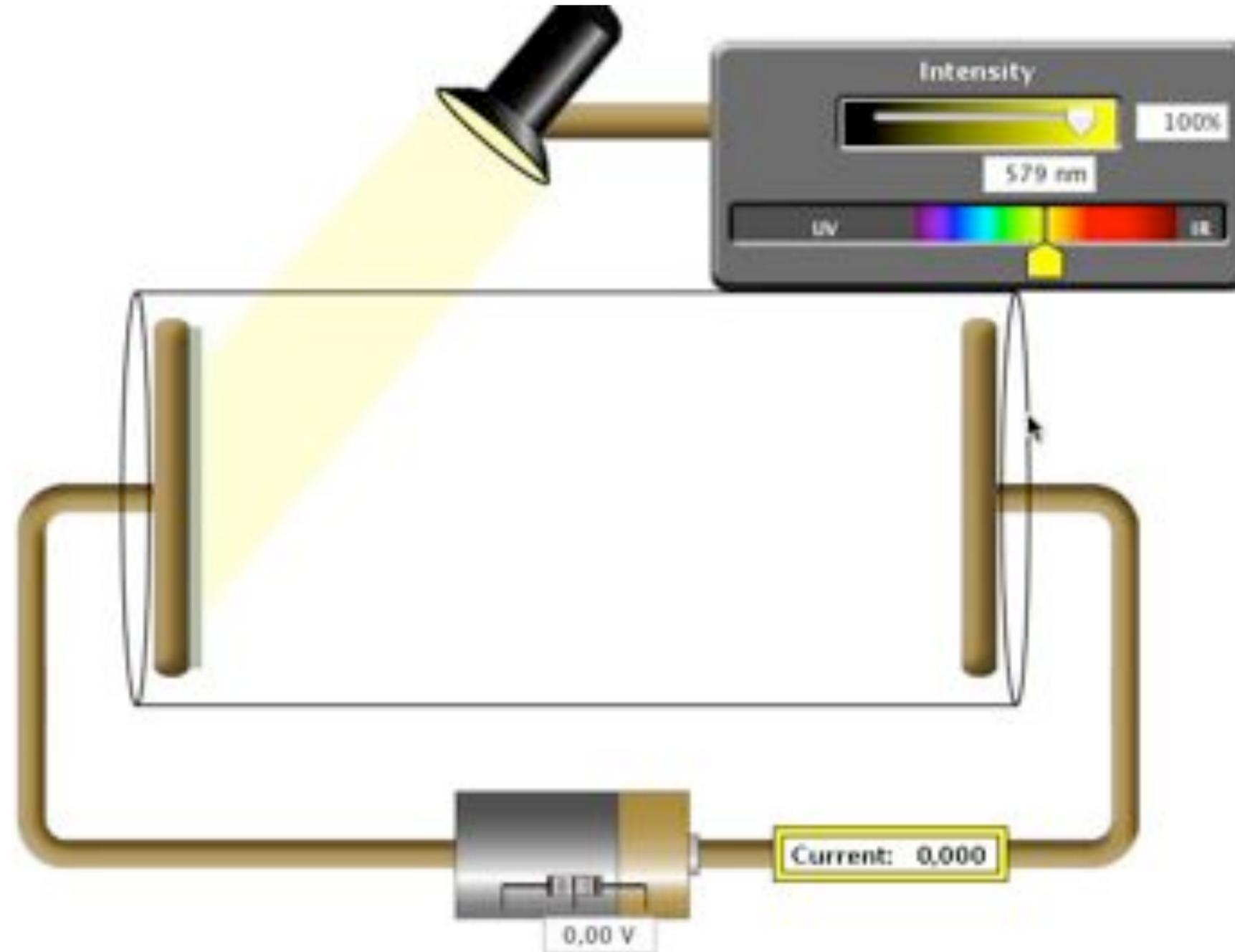
Efecto fotoeléctrico. Experiencia de Millikan



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

Foto. Univ. de Colorado

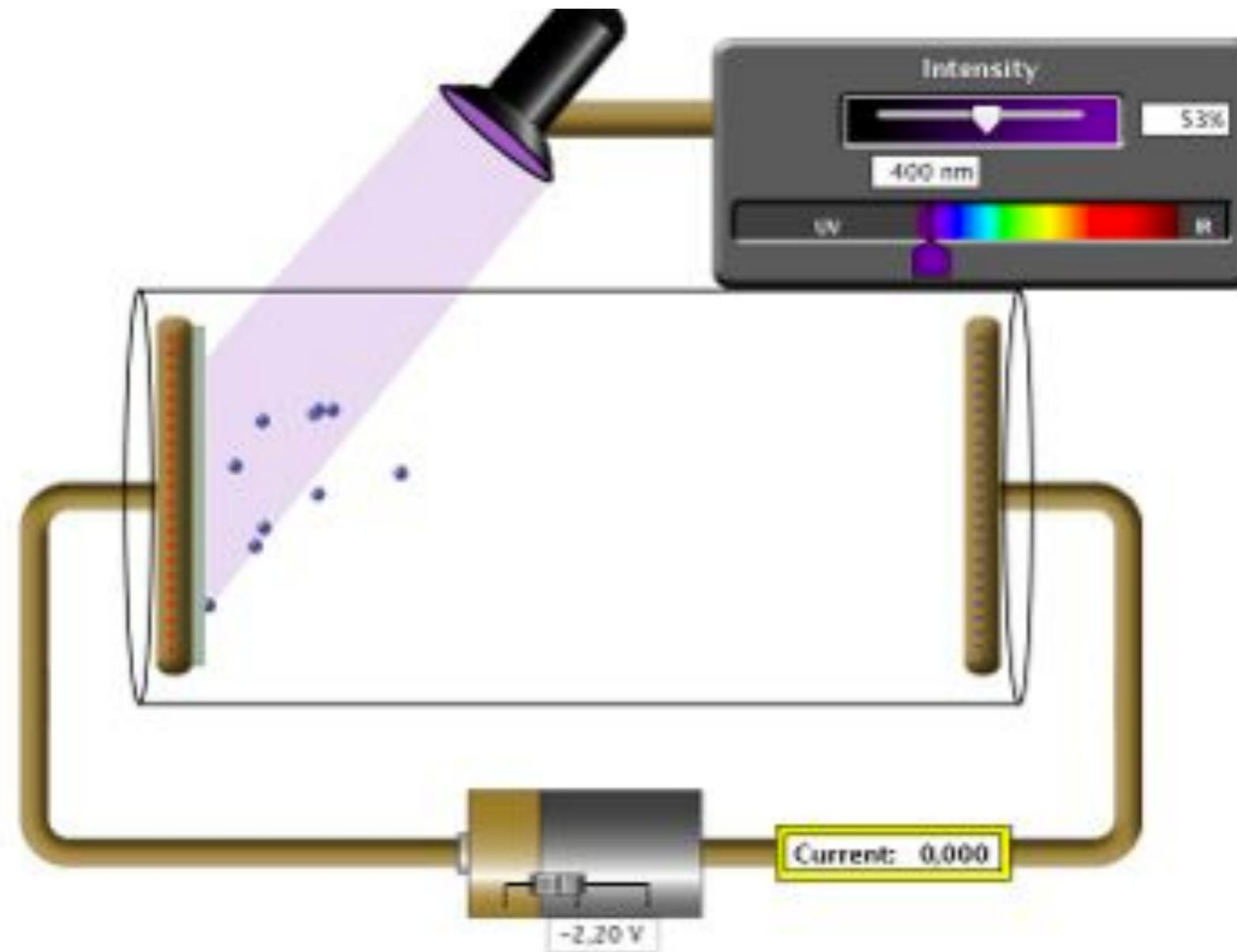
Efecto fotoeléctrico



Sodio. Frecuencia umbral

Video. Univ. de Colorado

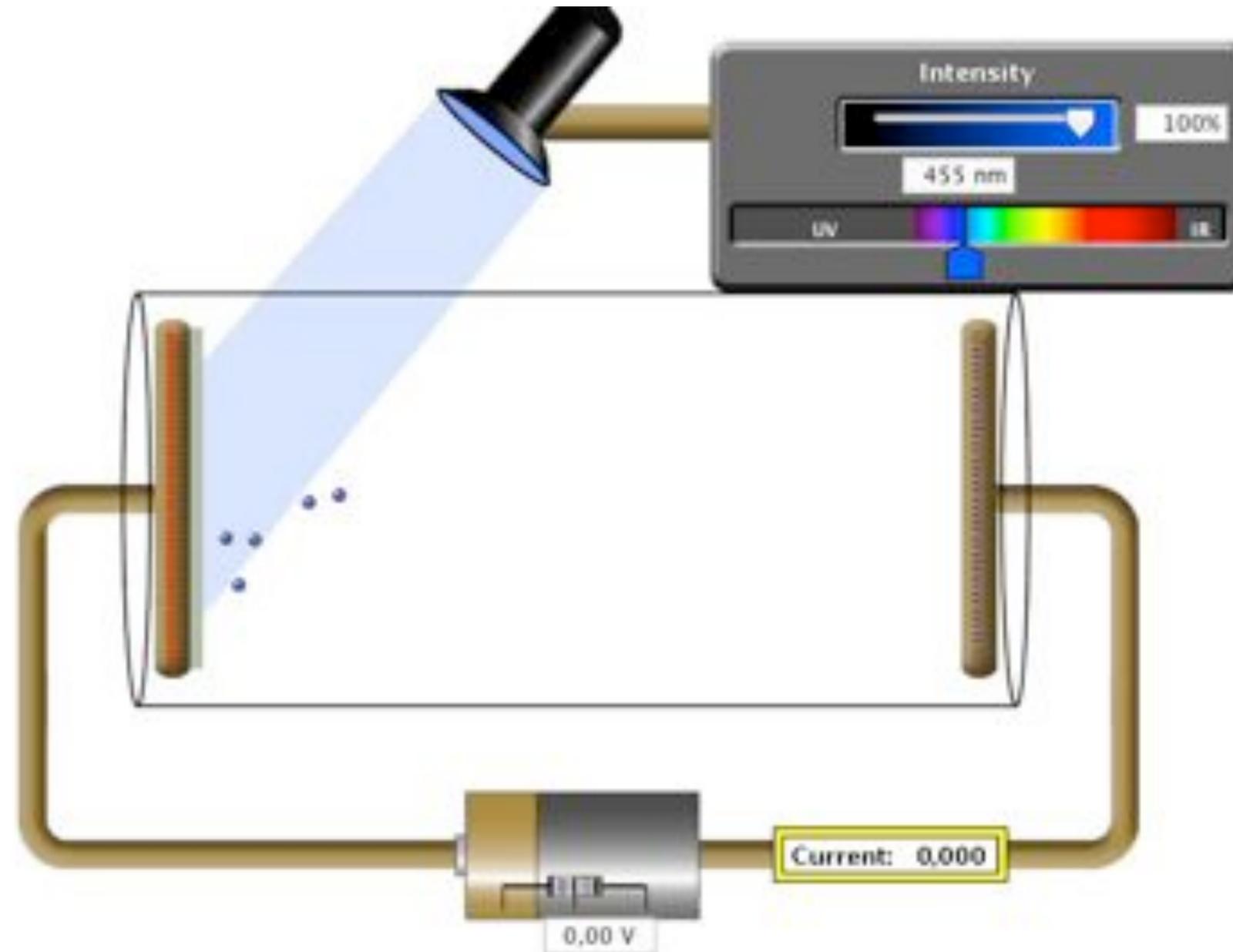
Efecto fotoeléctrico. Simulación



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

Foto. Univ. de Colorado

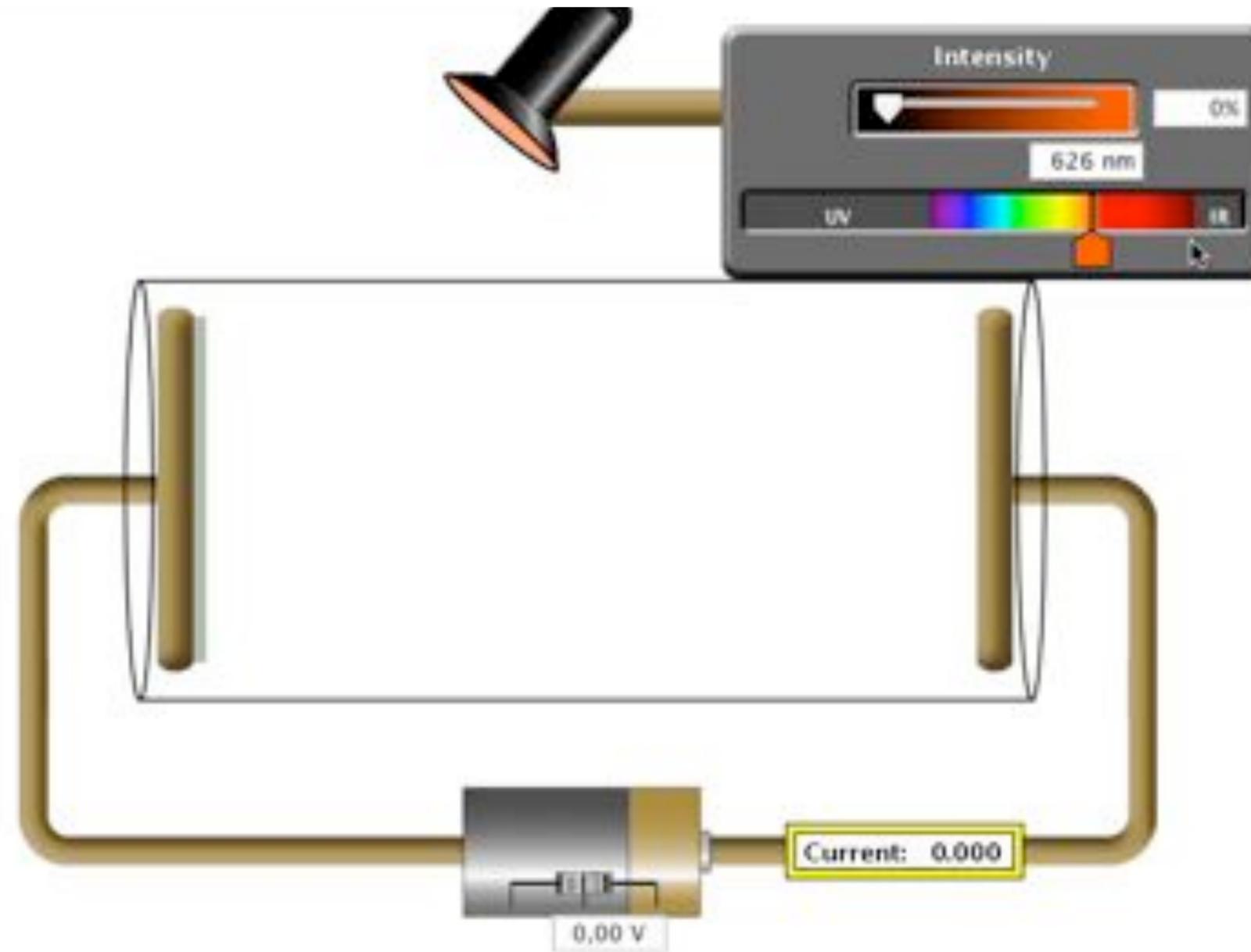
Efecto fotoeléctrico. Simulación



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

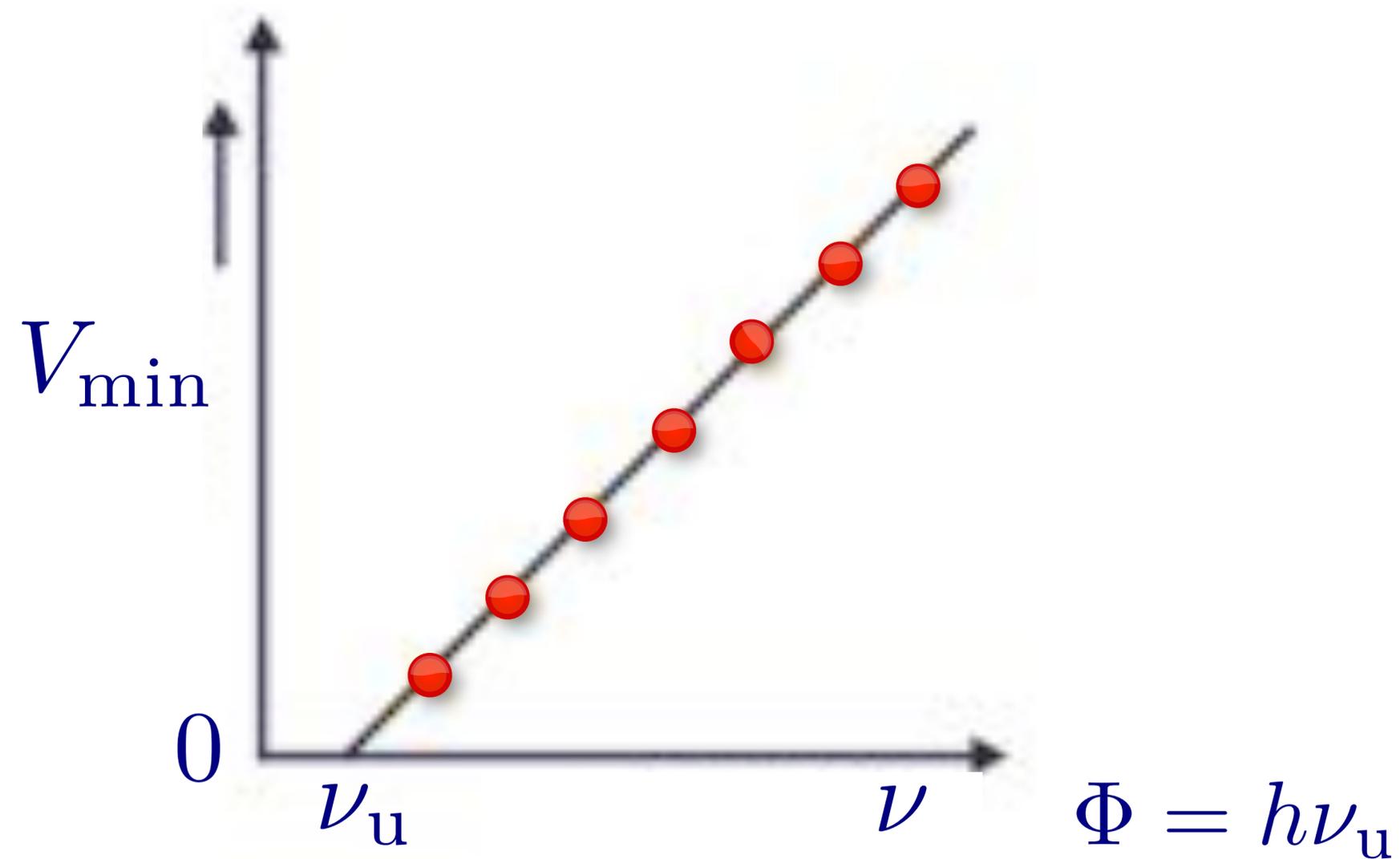


Sodio. Luz violeta. Para una diferencia de potencial de $-1,00\text{ V}$, todos los electrones emitidos son frenados.

Video. Univ. de Colorado

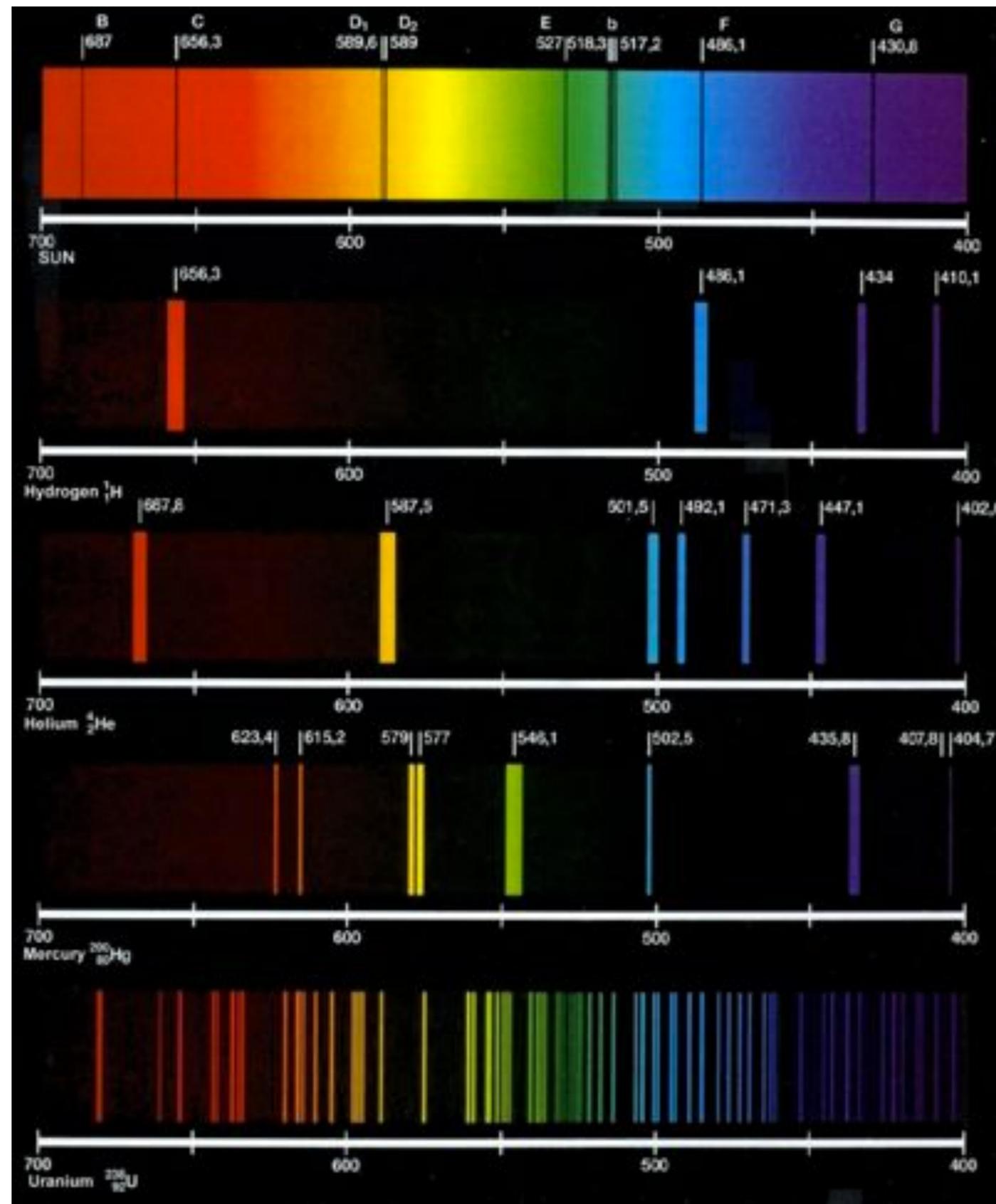
Efecto fotoeléctrico. Experimento Millikan

$$V_{\min} = \frac{h}{e}\nu - \frac{h}{e}\nu_u$$



Espectros atómicos.

Las líneas del espectro de diversos gases.



Fórmula de Balmer

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$n = 3, 4, 5, \dots$$

Constante de Rydberg

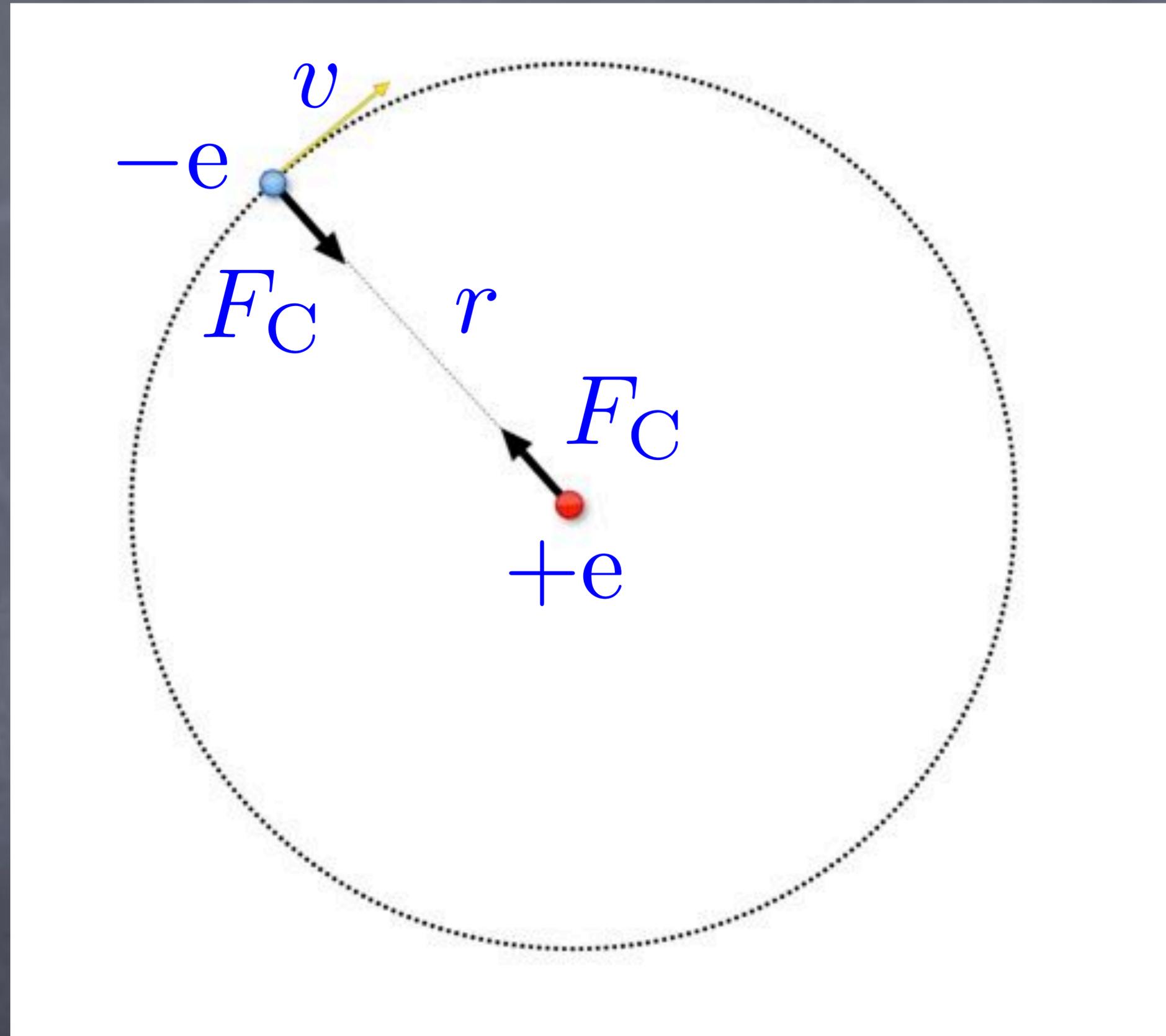
$$R = 1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$$

Órbitas electrónicas

$$F_C = \frac{m_e v^2}{r}$$

$$F_E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}$$

$$\frac{m_e v^2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}$$



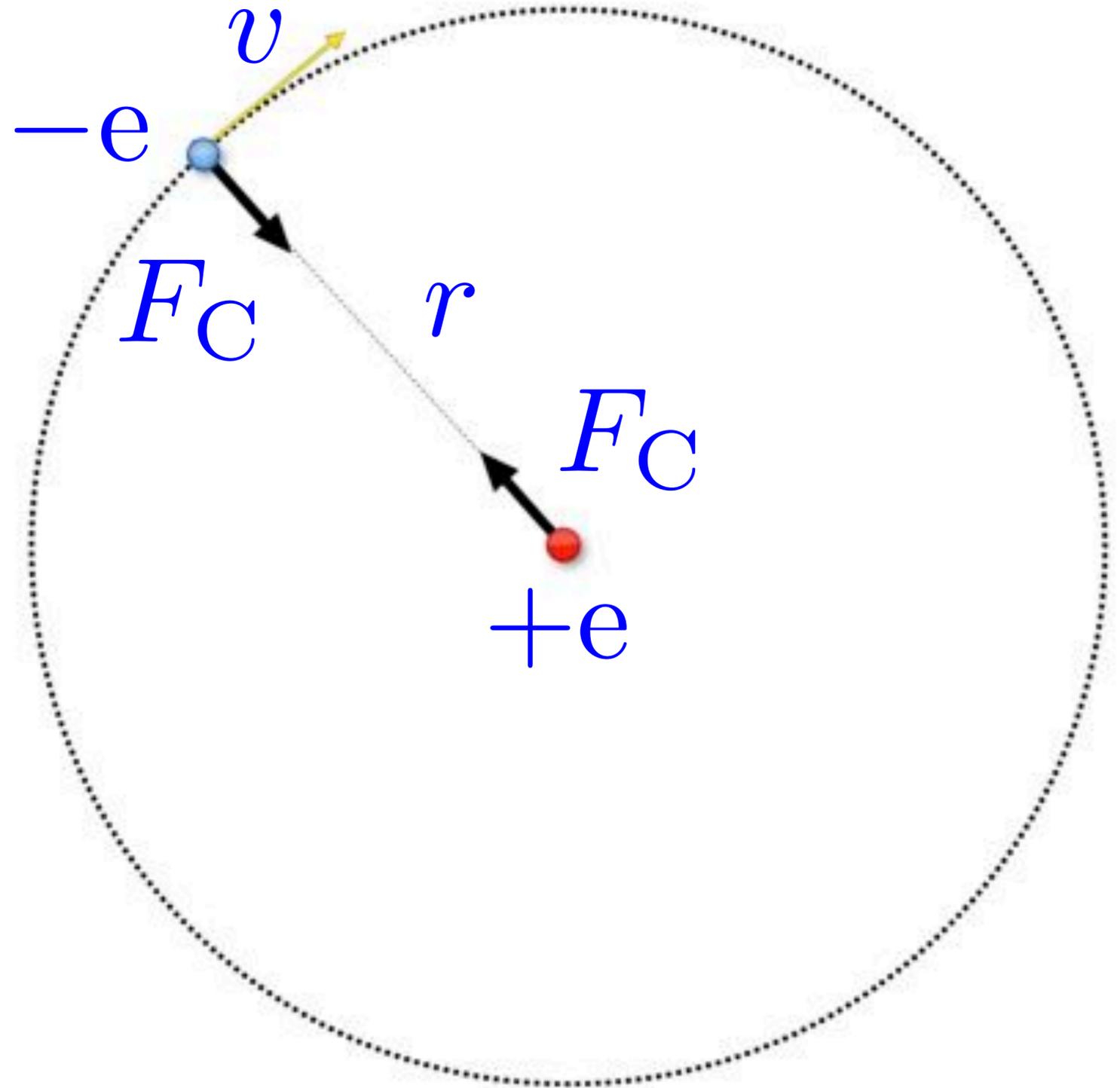
Órbitas electrónicas. Órbitas posibles

$$v = \frac{e}{\sqrt{4\pi\epsilon_0 m_e r}}$$

$$K = \frac{1}{2} m_e v^2$$

$$V = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

$$E = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r}$$



El electrón no radia en su movimiento circular

$$E = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r}$$

En contradicción con las leyes de Maxwell, se postula que, en el interior del átomo, el electrón no radia, a pesar de tener un movimiento acelerado.

