

J. Clerk Maxwell

Biografía y principales contribuciones científicas

Rodrigo Alcaraz de la Osa



Biografía

James Clerk Maxwell fue un matemático y científico escocés, responsable de la UNIFICACIÓN de la ELECTRICIDAD, el MAGNETISMO y la LUZ como distintas manifestaciones del mismo fenómeno. Nació el 13 de junio de 1831 en Edinburgo (Escocia). Mostrando una curiosidad insaciable desde una edad temprana, fue enviado a la prestigiosa Edinburgh Academy, donde se interesó especialmente por la GEOMETRÍA. Con 16 años comenzó a asistir a clases en la Universidad de Edinburgo, donde estudió las propiedades de la LUZ POLARIZADA. En 1850 ingresó en la Universidad de Cambridge, donde se graduó en MATEMÁTICAS y se interesó por la naturaleza y la percepción del COLOR. Entre 1856 y 1860 fue profesor en el Marischal College de Aberdeen, donde demostró que los ANILLOS DE SATURNO estaban compuestos de numerosas partículas pequeñas. Probablemente, su etapa más productiva fueron los cinco años que pasó en el King’s College entre 1860 y 1865, periodo en el que mostró al mundo la primera FOTOGRAFÍA EN COLOR, investigó la TEORÍA CINÉTICA DE LOS GASES y entró en contacto con MICHAEL FARADAY, realizando grandes avances en los campos de la ELECTRICIDAD y el MAGNETISMO (llegando a sus famosas ECUACIONES DE MAXWELL). Maxwell murió en Cambridge de cáncer abdominal el 5 de noviembre de 1879 a la edad de 48 años.

Electromagnetismo

En su artículo de 1855, “*On Faraday’s lines of force*”, Maxwell presentó un modelo simplificado del trabajo de Faraday y mostró cómo la electricidad y el magnetismo estaban relacionados. En 1862 calculó que la velocidad de propagación de una onda electromagnética es aproximadamente la de la velocidad de la luz, algo que consideró que era más que una simple coincidencia. Su unificación de los fenómenos observables de la electricidad, el magnetismo y la luz se considera uno de los grandes logros de la física matemática del s. XIX.

Ecuaciones de Maxwell

Las ecuaciones de Maxwell son un conjunto de ECUACIONES DIFERENCIALES PARCIALES ACOPLADAS que, junto con la fuerza de Lorentz, constituyen la BASE del ELECTROMAGNETISMO clásico, la ÓPTICA clásica y los CIRCUITOS ELÉCTRICOS. Las ecuaciones proporcionan un modelo matemático para las tecnologías eléctrica, óptica y de radio, como la generación de energía, los motores eléctricos, la comunicación inalámbrica, las lentes, el radar, etc.

Aunque las ecuaciones más importantes de Maxwell ya habían aparecido en su trascendental artículo de 1861 titulado “*On Physical Lines of Force*”, no fue hasta su artículo de 1865, “*A Dynamical Theory of the Electro-magnetic Field*”, que Maxwell creó una lista clara de OCHO ECUACIONES VECTORIALES:

NOMBRE	ECUACIÓN
Corriente eléctrica total	$\mathbf{J}_{\text{total}} = \mathbf{J}_{\text{conducción}} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$
Fuerza magnética	$\nabla \times \mathbf{A} = \mu \mathbf{H}$
Corriente eléctrica	$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_{\text{total}}$
Fuerza electromotriz	$\mathbf{E} = \mu \mathbf{v} \times \mathbf{H} - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \psi$
Ecuación de la elasticidad eléctrica	$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$
Ley de Ohm	$\mathbf{E} = R \mathbf{J}_{\text{conducción}}$
Ley de Gauss	$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$
Ecuación de continuidad	$\nabla \cdot \mathbf{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$

OLIVIER HEAVISIDE redujo la complejidad de la teoría de Maxwell a las CUATRO ECUACIONES que actualmente se conocen como las ECUACIONES DE MAXWELL, las cuales describen cómo se generan los campos eléctricos y magnéticos a partir de cargas, corrientes y cambios de los campos:

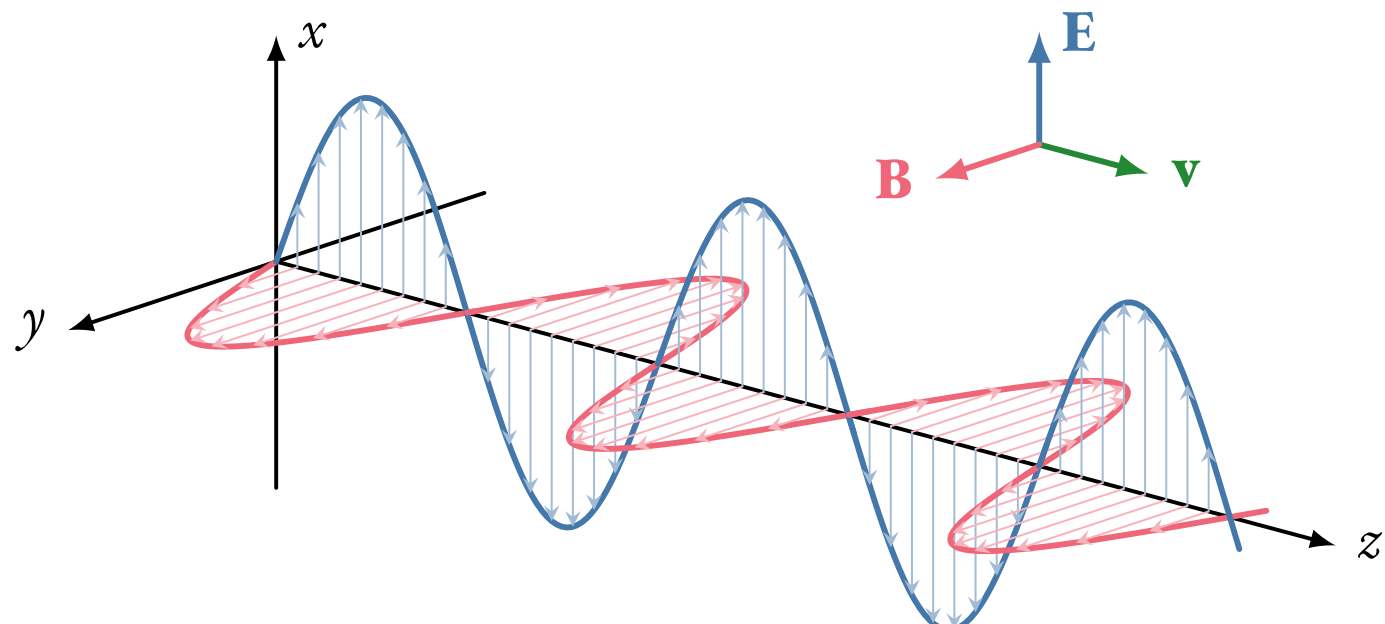
NOMBRE	FORMA INTEGRAL	FORMA DIFERENCIAL
Ley de Gauss	$\oiint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{Q}{\epsilon_0}$	$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$
Ley de Gauss para el campo magnético	$\oiint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$
Ecuación de Maxwell-Faraday	$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\boldsymbol{\ell} = -\frac{d}{dt} \oiint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$	$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$
Ley de Ampère-Maxwell	$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\boldsymbol{\ell} = \mu_0 \left(\oiint_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} + \epsilon_0 \frac{d}{dt} \oiint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} \right)$	$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \left(\mathbf{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right)$

Ondas electromagnéticas

En el VACÍO (una región sin cargas, $\rho = 0$, ni corrientes, $\mathbf{J} = 0$) las ecuaciones de Maxwell se reducen un par de ecuaciones cuya forma es la de dos ECUACIONES DE ONDA estándar:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - \nabla^2 \mathbf{E} = 0$$
$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} - \nabla^2 \mathbf{B} = 0$$

donde $c = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ es la velocidad de propagación de la onda, que coincide con la velocidad de la luz en el vacío (299 792 458 m/s por definición).



Representación de una ONDA ELECTROMAGNÉTICA transversal, una oscilación sincronizada de campos eléctricos (**E**) y magnéticos (**B**) perpendiculares entre sí y a la dirección de propagación.

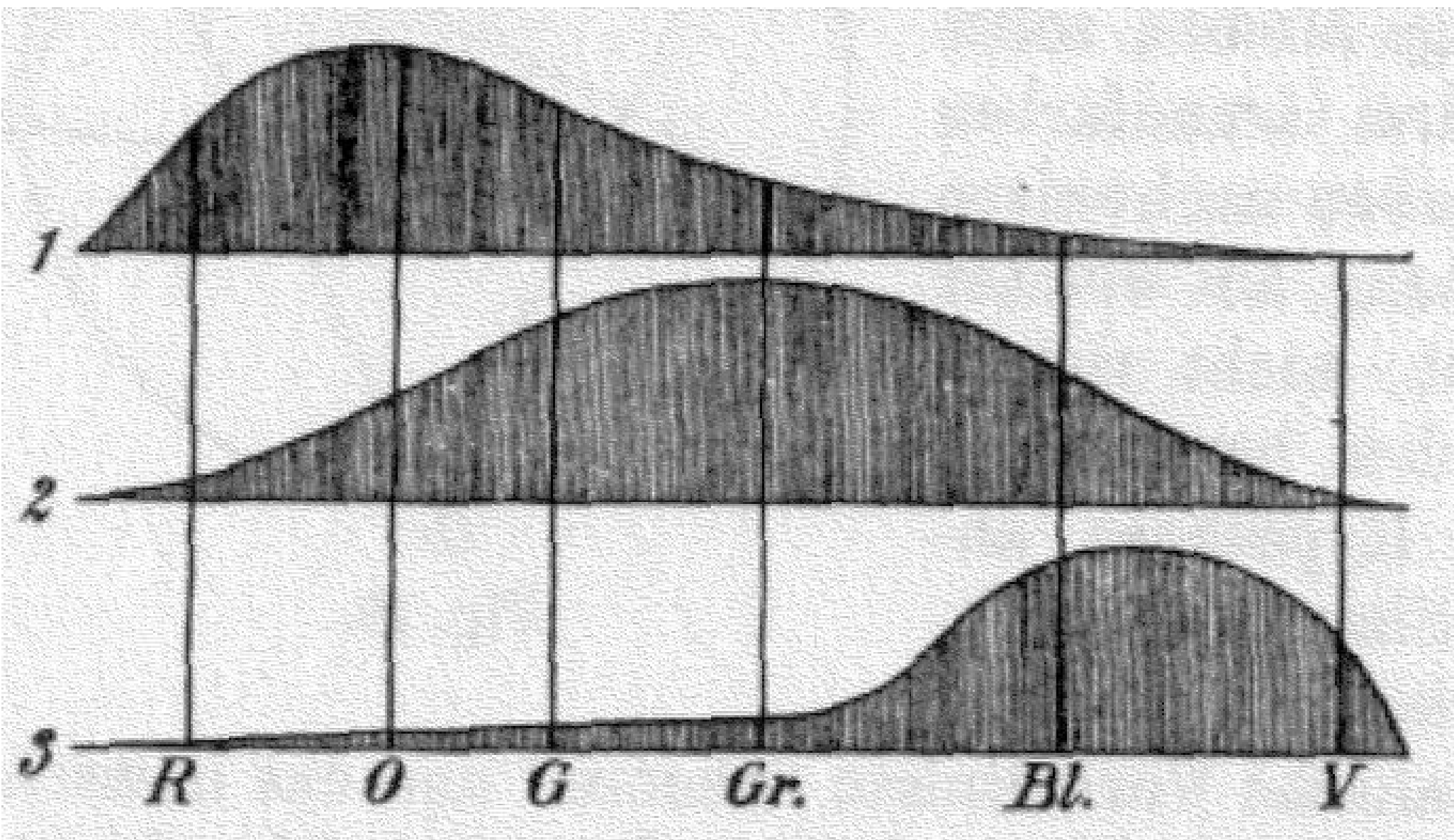
Adaptada de https://tikz.net/electromagnetic_wave/.

Percepción del color

Siguiendo los pasos de Isaac Newton y Thomas Young, Maxwell se interesó especialmente por el estudio del COLOR, tema que investigó entre 1855 y 1872.

Teoría tricromática

Basada en los trabajos de Thomas Young y Hermann von Helmholtz, se trata de una teoría que explica la forma en la que el sistema visual da lugar a la experiencia fenomenológica del color, postulando la existencia de tres tipos de fotorreceptores (conos) en el ojo, con una respuesta diferente pero superpuesta a diferentes longitudes de onda de la luz visible.

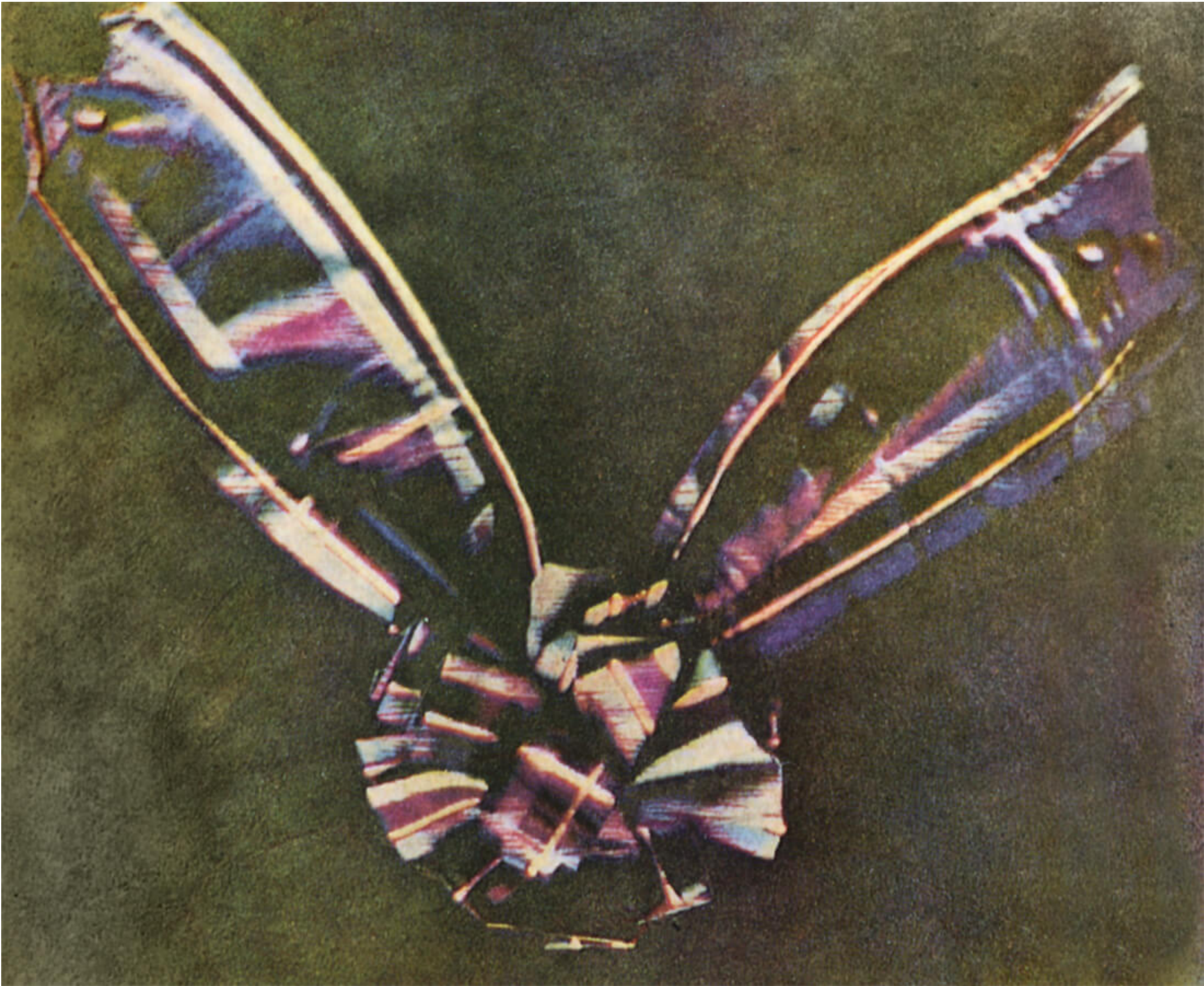


Sensibilidad a la luz espectral de los conos del ojo humano. Fuente: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:YoungHelm.jpg>.

En 1857, Maxwell utilizó el álgebra lineal recientemente desarrollado para demostrar la teoría tricromática. Cualquier luz monocromática que estimule tres receptores debería poder ser igualmente estimulada por un conjunto de tres luces monocromáticas diferentes (de hecho, por cualquier conjunto de tres luces diferentes). Demostró que así era, inventando los experimentos de IGUALACIÓN DE COLOR y la COLORIMETRÍA.

Fotografía en color

Maxwell también se interesó en aplicar su teoría del color, concretamente a la FOTOGRAFÍA EN COLOR. Durante una conferencia de la Royal Institution de 1861 sobre la teoría del color, Maxwell presentó la primera demostración mundial de una fotografía en color.



Cinta de tartán fotografiada en 1861 por Thomas Sutton según las instrucciones de Maxwell. Considerada la primera fotografía en color permanente, fue realizada con tres negativos obtenidos con filtros de color azul, rojo y verde.

Fuente: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Tartan_Ribbon.jpg.

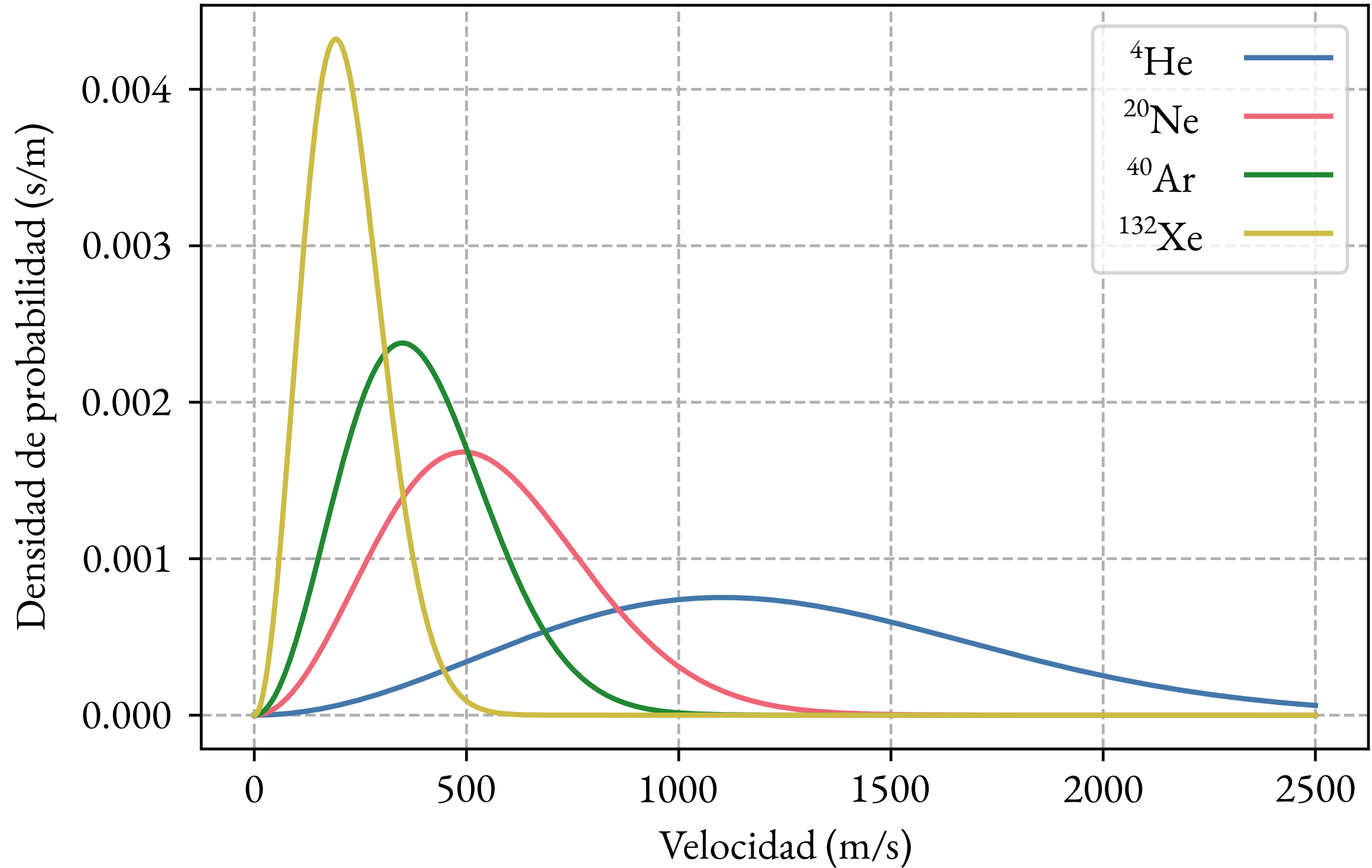
Teoría cinética y termodinámica

Distribución de Maxwell-Boltzmann

Maxwell investigó la TEORÍA CINÉTICA DE LOS GASES, desarrollando la teoría de la distribución de velocidades de las partículas de un gas, generalizada después por Ludwig Boltzmann. La conocida como DISTRIBUCIÓN DE MAXWELL-BOLTZMANN da la probabilidad de encontrar una partícula de masa *m* con una velocidad cercana a *v* a una temperatura absoluta *T*:

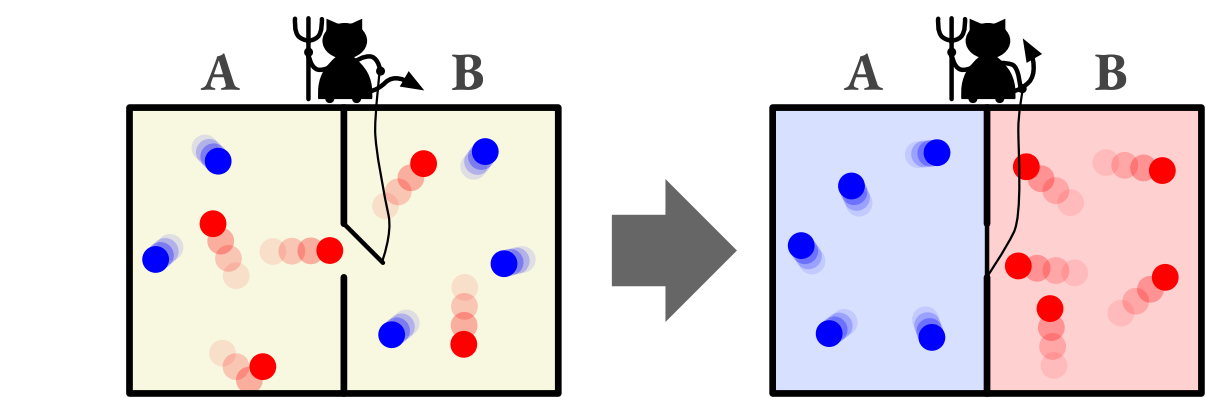
$$f(v) = \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} 4\pi v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}},$$

donde $k = 1.380\,649 \times 10^{-23}$ J/K es la constante de Boltzmann.



Distribución de velocidades de unos pocos gases nobles a temperatura ambiente (25 °C). Traducida y adaptada de <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:MaxwellBoltzmann-en.svg>.

Su trabajo en TERMODINÁMICA le llevó a idear el experimento mental que hoy conocemos como DEMONIO DE MAXWELL, un proceso imaginario que clasifica las partículas según su velocidad, disminuyendo la entropía del sistema y violando por tanto el segundo principio de la termodinámica.



DEMONIO DE MAXWELL. Adaptada de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Maxwell%27s_demon.svg.

Relaciones de Maxwell

En 1871 Maxwell estableció las llamadas RELACIONES DE MAXWELL, un conjunto de ecuaciones termodinámicas que relacionan las segundas derivadas de los potenciales termodinámicos —energía interna *U*(*S*,*V*), entalpía *H*(*S*,*P*), energía de Helmholtz *F*(*T*,*V*) y energía de Gibbs *G*(*T*,*P*)— con sus variables naturales térmicas (temperatura *T* o entropía *S*) y mecánicas (presión *P* o volumen *V*):

$$\begin{aligned} +\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S &= -\left(\frac{\partial P}{\partial S}\right)_V = +\frac{\partial^2 U}{\partial S \partial V} \\ +\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_S &= +\left(\frac{\partial V}{\partial S}\right)_P = +\frac{\partial^2 H}{\partial S \partial P} \\ +\left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T &= +\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V = -\frac{\partial^2 F}{\partial T \partial V} \\ -\left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T &= +\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P = +\frac{\partial^2 G}{\partial T \partial P} \end{aligned}$$

Teoría del control

Su artículo de 1868, “*On governors*”, publicado en los Proceedings of the Royal Society (PRS), se considera un trabajo central de los primeros tiempos de la TEORÍA DEL CONTROL, donde Maxwell estudió los REGULADORES CENTRÍFUGOS que se utilizaban para controlar las máquinas de vapor.