

Radiación de Cuerpo Negro

Un **cuerpo negro** es un cuerpo ideal que absorbe toda la radiación incidente. Cuando la radiación incide sobre el cuerpo negro, la energía cinética (K) de los átomos constituyentes aumenta, lo que provoca un aumento en la temperatura del cuerpo. La ecuación que relaciona la potencia irradiada por unidad área con la temperatura, es la denominada **Ley de Stefan-Boltzmann**:

$$\mathcal{P} = \sigma \cdot A \cdot T^4$$

La potencia irradiada por unidad de área producida por la variación de la temperatura, produce una variación en los picos de las longitudes de onda de la radiación emitida. Esto se conoce como la **Ley de Wien**, que dice que la longitud de onda es inversamente proporcional a la temperatura:

$$\lambda \propto \frac{1}{T}$$

(Gráfico de Temperaturas y picos)

Cuando la longitud de onda disminuye (se va hacia el UV), la intensidad de la radiación emitida aumenta sin límite, lo que provoca la catástrofe del UV, problema que más tarde Planck resolverá. A esto se lo conoce como la Ley de Rayleigh-Jean:

$$I(\lambda, T) = \frac{8\pi kT}{\lambda^4}$$

(Gráfico de curva hacia el infinito)

Hipótesis de Planck

Con sus dos postulados logra mejorar y resuelve la radiación de cuerpo negro.

1. Los elementos constituyentes de la materia actúan como pequeños osciladores, es decir que los átomos vibran. Cada oscilador puede absorber o emitir energía, la cual dependerá de su frecuencia y de una constante (h) llamada Constante de Planck.
2. La energía de los osciladores está cuantizada:

$$E = hf$$

(Gráficos Rayleigh-Jean vs Planck)

Efecto Fotoeléctrico

Este fenómeno explica como la luz está conformada por pequeñas partículas llamadas **fotones**, donde cada fotón lleva con él una cantidad discreta de energía. Cuando un fotón incide sobre la superficie de un metal (ánodo), éste transfiere su energía a un electrón, permitiéndole escapar de la superficie. Para que esto ocurra, la energía del fotón debe de superar la función trabajo.

(Esquema del experimento)

(Tres gráficas: Intensidad vs Potencial, Frecuencia vs Potencial, Cinética vs Frecuencia)

De estos tres gráficos podemos sacar las siguientes conclusiones: El potencial de retardo es totalmente independiente de la intensidad de la corriente de los fotoelectrones, pero dependiente de la frecuencia de la misma. Además, para que el efecto ocurra, la luz debe de superar una cierta frecuencia.

El potencial de frenado es la energía necesaria para detener la corriente de los fotoelectrones.

Propuesta de Einstein

La luz no solamente se emite en forma de cuantos, sino que también se propaga como cuantos individuales:

$$\text{Cuanto energético} = \text{Energía cinética máxima} + \text{Función trabajo}$$

$$hf = K_{\text{máx}} + \phi$$

$$K_{\text{máx}} = hf - \phi$$

Donde (ϕ) es la función trabajo, que es la energía mínima necesaria para desprender un electrón de la superficie del metal.

$$\phi = hf_0 = eV_0$$

Rayos X

Es el proceso inverso del efecto fotoeléctrico, en el cual parte de la energía cinética de los electrones en movimiento se transforman en fotones. Los rayos X son ondas electromagnéticas producidas por la aceleración de electrones cuando chocan con los átomos objetivo. Entonces, para estos rayos, se descubrió que todos los materiales son transparentes en cierto grado.

(Esquema de los Rayos X)

Efecto Compton

Es un experimento de comprobación del efecto fotoeléctrico en donde se estudia el choque entre fotones y electrones.

(Esquema del experimento)

Considerar:

$$\begin{aligned} E &= hf & \vec{p}_0 &= \frac{hf}{c} \\ E &= hf' & \vec{p}_f &= \frac{hf'}{c} \\ E &= \sqrt{(mc^2)^2 + (pc)^2} & \vec{p}_e &= \vec{p}_e \end{aligned}$$

Desarrollo de Fórmula

Hacemos la suma vectorial y descomponemos:

$$\begin{aligned} \vec{p}_0 &= \vec{p}_f + \vec{p}_e \\ \begin{cases} p_0 = p_f \cdot \cos(\phi) + p_e \cdot \cos(\theta) \\ 0 = p_f \cdot \sin(\phi) - p_e \cdot \sin(\theta) \end{cases} \end{aligned}$$

Multiplicamos por (c) ambas ecuaciones:

$$\begin{cases} hf = hf' \cdot \cos(\phi) + p_e c \cdot \cos(\theta) \\ 0 = hf' \cdot \sin(\phi) - p_e c \cdot \sin(\theta) \end{cases}$$

Despejamos (p_e):

$$\begin{cases} p_e c \cdot \cos(\theta) = hf - hf' \cdot \cos(\phi) \\ p_e c \cdot \sin(\theta) = hf' \cdot \sin(\phi) \end{cases}$$

Elevamos al cuadrado ambas ecuaciones:

$$\begin{cases} p_e^2 c^2 \cdot \cos^2(\theta) = (hf)^2 - 2(hf)(hf') \cos^2(\phi) + (hf')^2 \cos^2(\phi) \\ p_e^2 c^2 \cdot \sin^2(\theta) = (hf')^2 \sin^2(\phi) \end{cases}$$

Sumamos ambas ecuaciones:

$$(pc)^2 = (hf)^2 - 2(hf)(hf') \cos^2(\phi) + (hf')^2 \quad (1)$$

Ahora igualamos las dos ecuaciones correspondientes a la energía:

$$E = \sqrt{(mc^2)^2 + (pc)^2} \quad E = K + mc^2$$

Esto es:

$$\begin{aligned} (K + mc^2)^2 &= (mc^2)^2 + (pc)^2 \\ K^2 + 2Kmc^2 + \cancel{(mc^2)^2} &= \cancel{(mc^2)^2} + (pc)^2 \\ K^2 + 2Kmc^2 &= (pc)^2 \end{aligned}$$

Reemplazamos ($K = hf - hf'$) en la expresión anterior:

$$(hf - hf')^2 + 2(hf - hf')mc^2 = (pc)^2$$
$$(hf)^2 - 2(hf)(hf') + (hf')^2 + 2(hf - hf')mc^2 = (pc)^2 \quad (2)$$

Reemplazamos (2) en (1):

$$\cancel{(hf)^2} - 2(hf)(hf') + \cancel{(hf')^2} + 2(hf - hf')mc^2 = \cancel{(hf)^2} - 2(hf)(hf') \cos^2(\phi) + \cancel{(hf')^2}$$
$$(hf - hf')mc^2 = (hf)(hf') - (hf)(hf') \cos^2(\phi)$$
$$(hf - hf')mc^2 = (hf)(hf')[1 - \cos^2(\phi)]$$

Multiplicamos toda la expresión por $\left(\frac{1}{hc}\right)$, resultando en:

$$\left(\frac{f}{c} - \frac{f'}{c}\right) \frac{mc}{h} = \left(\frac{f}{c}\right) \left(\frac{f'}{c}\right) (1 - \cos^2(\phi))$$

Recordando que $\left(\lambda = \frac{c}{f}\right)$ resulta en:

$$\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda'}\right) \frac{mc}{h} = \frac{1 - \cos^2(\phi)}{\lambda\lambda'}$$

Multiplico toda la expresión por $(\lambda\lambda')$, quedando finalmente:

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos^2(\phi))$$

Dualidad Onda-Partícula

La dualidad onda-partícula es un concepto fundamental de la mecánica cuántica que describe como las partículas, como electrones y fotones, exhiben propiedades tanto de partículas como de ondas.

La teoría cuántica sugiere que todas las partículas subatómicas (electrones, protones, fotones, etc.) tienen tanto características de ondas como de partículas. Esto significa que a veces se comportan como partículas discretas (un fotón que se detecta en un punto específico) y otras veces como ondas extendidas (interferencias o difracción).

Un claro ejemplo de esto puede ser el **experimento de la doble rendija**: Cuando se hace pasar una corriente de electrones a través de dos rendijas, en lugar de comportarse como partículas y formar dos franjas detrás de las rendijas, forman un patrón de interferencia similar al de ondas. Sin embargo, cuando se coloca un detector para observar por cual rendija pasa cada electrón, el patrón de ondas desaparece y éstas se comportan como partículas.

Ondas de De Broglie

Si las ondas tienen características corpusculares, las partículas tienen características de ondas. Si tiene frecuencia y longitud de onda, debe haber una función de onda que describa el movimiento de una partícula.

Consideremos un fotón de frecuencia (f) que tiene como momento:

$$E = pc \quad \rightarrow \quad p = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

Usando la definición de momento lineal, despejamos la λ :

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

Donde " m " es la masa relativista.

Función de Onda

La cantidad variable que caracteriza a las ondas de De Broglie se conoce como **función de onda**, y se representa con la letra Ψ .

El valor de la función de onda asociada a un cuerpo en movimiento en un punto particular del espacio (x, y, z) en un instante (t), está relacionado con la probabilidad de encontrar el cuerpo en aquel punto y en ese instante. Sin embargo, Ψ por si misma no tiene ningún sentido físico, ya que la amplitud de una onda puede ser positiva o negativa, y una probabilidad negativa es algo sin sentido.

Este problema desaparece cuando tomamos el valor absoluto de Ψ al cuadrado, es decir, $|\Psi|^2$, la cual se conoce como **densidad de probabilidad**. En el caso de una función de onda compleja, tenemos:

$$\Psi = A + jB \quad \Psi^* = A - jB$$

Donde A y B son funciones reales.

$$\Psi \cdot \Psi^* = A^2 - j^2 B^2 = A^2 + B^2$$

Velocidad de onda de De Broglie

Planteamos una onda donde w es la velocidad:

$$w = f\lambda$$

La longitud de onda de De Broglie está dada por:

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

Y la frecuencia viene dada por:

$$E = hf \quad \rightarrow \quad f = \frac{E}{h} = \frac{mc^2}{h}$$

Reemplazando:

$$w = \frac{h}{mv} \frac{mc^2}{h}$$

$$w = \frac{c^2}{v}$$

Si observamos con atención la expresión anterior, vemos que:

$$\frac{c}{v} > 1 \quad \frac{c \cdot c}{v} > c$$

O lo que es lo mismo que:

$$w > c \quad \text{Velocidad de fase}$$

Lo cual es absurdo que la velocidad de fase supere a la velocidad de la luz. Se concluye que la velocidad de fase carece de sentido físico.

Planteamos una onda unidireccional que depende de (x) y del tiempo:

$$y = A \cdot \cos \left[2\pi f \left(t - \frac{x}{\omega} \right) \right]$$

$$y = A \cdot \cos \left(2\pi f t - \frac{2\pi f x}{\omega} \right)$$

Siendo:

$$\omega = 2\pi f \quad \text{Frecuencia angular}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{Cte. de Propagación}$$

$$\frac{f}{\omega} = \frac{1}{\lambda} \quad \text{Frecuencia espacial}$$

Quedando en:

$$y = A \cdot \cos(\omega t - kx)$$

Velocidad de fase y de grupo

La única función de onda es aquella irregular, ya que la probabilidad no puede ser consistente, entonces vamos a tener un grupo de ondas.

(Gráfico de suma de dos señales. Señal 1 + Señal 2 = Señal 3)

Consideremos las siguientes funciones:

$$y_1 = A \cdot \cos(\omega t - kx)$$

$$y_2 = A \cdot \cos[(\omega + d\omega)t - (k + dk)x]$$

Al sumarlas, mediante las siguientes relaciones trigonométricas:

$$\cos \alpha + \cos \beta = 2 \cos \left(\frac{1}{2}(\alpha + \beta) \right) \cos \left(\frac{1}{2}(\alpha - \beta) \right)$$

$$\cos(-\theta) = \cos \theta$$

Entonces:

$$y_1 + y_2 = 2A \cos\left(\frac{1}{2}((2\omega + d\omega)t - (2k + dk)x)\right) \cos\left(\frac{1}{2}(d\omega t - dkx)\right)$$

Puesto que $d\omega$ y dk son pequeños en comparación de ω y k :

$$2\omega + d\omega \cong 2\omega$$

$$2k + dk \cong 2k$$

Entonces:

$$y = 2A \cos(\omega t - kx) \cos\left(\frac{d\omega}{2}t - \frac{dk}{2}x\right)$$

La ecuación anterior representa una onda de frecuencia angular ω y constante de propagación k que tiene superpuesta una modulación de frecuencia angular $\omega/2$ y constante de propagación $k/2$. El efecto de la modulación es producir grupos de ondas sucesivos. La **velocidad de fase** es:

$$v = \frac{\omega}{k}$$

Y la **velocidad de grupo** es:

$$u = \frac{d\omega}{dk}$$

Analizando la velocidad de grupo, tenemos:

$$\omega = 2\pi f \quad \rightarrow \quad \omega = \frac{2\pi mc^2}{h} \quad \rightarrow \quad \omega = \frac{2\pi m_0 c^2}{h\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \rightarrow \quad k = \frac{2\pi mv}{h} \quad \rightarrow \quad k = \frac{2\pi mv}{h\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Diferenciando estas últimas expresiones respecto de v , obtenemos:

$$\frac{d\omega}{dv} = \frac{2\pi m_0 v}{h\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{\frac{3}{2}}}$$

$$\frac{dk}{dv} = \frac{2\pi m_0}{h\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{\frac{3}{2}}}$$

La velocidad de grupo de las ondas de De Broglie asociadas a un cuerpo es:

$$u = \frac{d\omega}{dk} \frac{dv}{dv} = \frac{\frac{d\omega}{dv}}{\frac{dk}{dv}}$$

$$u = v$$

Principio de Incertidumbre

El hecho de que un cuerpo en movimiento se considere como un grupo de ondas de De Broglie y no como una entidad localizada, sugiere que existe un límite fundamental para la precisión con la que podemos medir sus propiedades corpusculares, posición y momento.

Consideremos dos ondas que se superponen:

$$\Psi_1 = A \cos(\omega t - kx)$$

$$\Psi_2 = A \cos[(\omega + \Delta\omega)t - (k + \Delta k)x]$$

(Gráfico de ondas superpuestas)

De las ondas superpuestas podemos sacar que:

$$k_m = \frac{1}{2} \Delta k \quad \Delta x \cong \frac{1}{2} \lambda_m$$

$$\lambda_m \cong \frac{2\pi}{k_m} \quad \rightarrow \quad \lambda_m \cong \frac{2\pi}{\frac{1}{2} \Delta k} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{2} \lambda_m \cong \frac{2\pi}{\Delta k} \quad \rightarrow \quad \Delta x \Delta k \cong 2\pi$$

Recordemos que la constante de propagación de una onda es:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi p}{h}$$

Si tomamos el diferencial:

$$\Delta k = \frac{2\pi \Delta p}{h}$$

Reemplazando y teniendo en cuenta que $\Delta x \Delta k \cong 1$ (Viene de Fourier):

$$\Delta x \frac{2\pi \Delta p}{h} \cong 1$$

$$\Delta x \Delta p \cong \frac{h}{2\pi}$$

El principio de incertidumbre nos dice que es imposible medir de manera simultánea la posición exacta y la cantidad de movimiento exacto de una partícula.

Mecánica Cuántica

Ecuación de Schrodinger dependiente del tiempo

Cada cuerpo tiene asociado una función de onda Ψ . Sin embargo, Ψ no es una cantidad mensurable por si misma y puede ser compleja. Supondremos que Ψ está en "x" por la siguiente ecuación:

$$\Psi = Ae^{-j\omega\left(t-\frac{x}{v}\right)}$$

Recordar que:

$$\omega = 2\pi f \quad v = \lambda f \quad \int_{-\infty}^{\infty} Prob. dV = 1 \quad E = hf \quad \lambda = \frac{h}{p}$$

Reemplazando:

$$\Psi = Ae^{-j2\pi f\left(t-\frac{x}{\lambda f}\right)}$$

$$\Psi = Ae^{-j2\pi\left(ft-\frac{x}{\lambda}\right)}$$

$$\Psi = Ae^{-j2\pi\left(\frac{E}{h}t-\frac{x}{h/p}\right)}$$

$$\Psi = Ae^{-\frac{j2\pi}{h}(Et-xp)}$$

Haciendo:

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}$$

Entonces:

$$\Psi = Ae^{-\frac{j}{\hbar}(Et-xp)}$$

Diferenciamos respecto de "x" y "t":

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} = -\frac{p}{\hbar} \Psi \quad \rightarrow \quad p^2 \Psi = -\hbar^2 \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} = -j \frac{E}{\hbar} \Psi \quad \rightarrow \quad E \Psi = j \hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}$$

Planteamos la conservación de energía:

$$E = K + U$$

$$E = \frac{p^2}{2m} + U$$

$$E \Psi = \frac{p^2}{2m} \Psi + U \Psi$$

$$j \hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + U \Psi$$

Si estamos en el espacio de tres dimensiones, entonces:

$$j\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} \right) + U\Psi$$

Forma Estacionaria

$$\Psi = Ae^{-\frac{j}{\hbar}(Et - xp)}$$

$$\Psi = Ae^{-\left(\frac{jEt}{\hbar}\right)} e^{\left(\frac{jxp}{\hbar}\right)}$$

Haciendo la siguiente conversión:

$$\psi = Ae^{\left(\frac{jxp}{\hbar}\right)}$$

Entonces:

$$\Psi = \psi e^{-\left(\frac{jEt}{\hbar}\right)}$$

$$E\psi e^{-\left(\frac{jEt}{\hbar}\right)} = -\frac{\hbar^2}{2m} e^{-\left(\frac{jEt}{\hbar}\right)} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + U\psi e^{-\left(\frac{jEt}{\hbar}\right)}$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U)\psi = 0$$

Modelo atómico de Dalton

Sugiere que toda la materia está constituida por átomos: pequeñas bolas sólidas que pueden unirse entre sí químicamente. Fue un modelo prematuro y que no explicaba muchas cuestiones.

(Esquema del modelo – Esfera)

Modelo atómico de Thomson

Propone que el átomo se representa como una esfera cargada positivamente con electrones distribuidos a su alrededor. Este modelo no explica las propiedades espectroscópicas ni la estabilidad del átomo.

(Esquema del modelo – Esfera positiva con electrones alrededor)

Modelo atómico de Rutherford

Con su experimento, el cual consistía en disparar partículas alfa a una lámina delgada de oro, observó que algunas partículas se desvían considerablemente. Rutherford descubrió que los átomos son espacio vacío en su gran mayoría, con un pequeño y denso núcleo en su centro, cargado positivamente, y con los electrones girando a su alrededor. Este modelo no explicaba la estabilidad de los electrones en órbitas, ni las líneas espectrales del átomo, ya que, según la física clásica, los electrones deberían perder energía al moverse en órbitas y caer en el núcleo.

(Esquema del modelo – Modelo planetario)

Modelo atómico de Bohr

Introdujo la idea de que los electrones se mueven en órbitas cuantizadas alrededor del núcleo. Esto significa que los electrones pueden ocupar órbitas con energías específicas y definidas, evitando que pierdan energía y caigan al núcleo.

Según De Broglie:

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad v = \frac{e}{\sqrt{4\pi\epsilon_0 r m}}$$

$$\lambda = \frac{h}{m} \frac{\sqrt{4\pi\epsilon_0 r m}}{e} = \frac{h}{e} \sqrt{\frac{4\pi\epsilon_0 r}{m}}$$

Se concluye entonces que un electrón puede girar indefinidamente alrededor del núcleo sin irradiar energía, siempre que su órbita contenga un número entero de longitudes de onda de De Broglie.

Describimos la estabilidad orbital como:

$$\begin{aligned} n\lambda &= 2\pi r_n \\ n \frac{h}{m} \frac{\sqrt{4\pi\epsilon_0 r m}}{e} &= 2\pi r_n \\ \frac{n^2 h^2 \epsilon_0}{\pi m e^2} &= r_n \end{aligned}$$

$$r_n = n^2 a_0$$

Este modelo funcionó muy bien para el átomo de hidrógeno, pero no podía explicar el comportamiento de átomos con más de un electrón.

(Esquema del modelo – Modelo orbital)

Mecánica Estadística

Espacio Fase

Para cualquier partícula, necesitamos saber la posición y la cantidad de movimiento. El espacio fase es una función.

(Gráfica del espacio fase)

$$\begin{aligned} x &= x \cos(\omega t) & y &= -x\omega \sin(\omega t) \\ (x, p) &= (x, mx') \end{aligned}$$

En tres dimensiones (x, y, z, p_x, p_y, p_z) describen una partícula o un sistema de partículas.

$$\tau = dx dy dz dp_x dp_y dp_z$$

Donde:

$$dx dp_x \geq \hbar$$

$$dy dp_y \geq \hbar$$

$$dz dp_z \geq \hbar$$

Por tanto, un punto en el espacio fase es una celda cuyo volumen mínimo es:

$$\tau \geq \hbar^3$$

Ley de Distribución de Maxwell-Boltzmann (gases ideales)

Nos interesa encontrar distribuciones y modelar de a grupos de partículas ya que nos sería imposible contar a todas las partículas.

Tenemos una cantidad N de partículas con unos niveles energéticos $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$, etc. Buscamos la energía promedio del conjunto. Tenemos W formas de maneras de distribuir las partículas:

$$W \propto g_1(\varepsilon_1)g_2(\varepsilon_2)g_3(\varepsilon_3) \quad \text{donde} \quad n_i = n_1 + n_2 + \dots = N$$

$$W \propto \prod g_i^{n_i} \propto N! \propto \frac{1}{\prod n_i!}$$

Donde g_i celdas tienen una energía ε_i con una cantidad de partículas n_i .

$$W = N! \prod \frac{g_i^{n_i}}{n_i!}$$

Nos interesa saber el $W_{\text{máx}}$ ya que será la distribución más probable:

$$\frac{\partial W}{\partial n_i} = 0$$

Vamos a hacer una aproximación, para ello usaremos logaritmos y sus propiedades:

$$\ln(W_{\text{máx}}) = (\ln W)_{\text{máx}}$$

$$\ln W = \ln \left(N! \prod \frac{g_i^{n_i}}{n_i!} \right)$$

$$\ln W = \ln N! + \ln \left(\prod g_i^{n_i} \right) - \ln \left(\prod n_i! \right)$$

$$\ln W = N \ln N - N + \sum \ln(g_i^{n_i}) - \sum \ln(n_i!)$$

$$\ln W = N \ln N - N + \sum n_i \ln(g_i) - \sum (n_i \ln(n_i) - n_i)$$

$$\ln W = \cancel{N \ln N} - \cancel{N} + \sum n_i \ln(g_i) - \sum n_i \ln(n_i) + \cancel{\sum n_i}$$

$$\frac{\partial \ln W}{\partial n_i} = \sum \ln(g_i) dn_i - \sum \ln(n_i) dn_i - \sum dn_i$$

$$0 = \sum (\ln(g_i) - \ln(n_i) - \alpha - \beta \varepsilon_i) dn_i$$

Igualamos lo remarcado a cero y resolvemos:

$$0 = \ln(g_i) - \ln(n_i) - \alpha - \beta \varepsilon_i$$

$$e^0 = e^{\ln(g_i) - \ln(n_i) - \alpha - \beta \varepsilon_i}$$

$$1 = \frac{g_i}{n_i} e^{-\alpha} e^{-\beta \varepsilon_i}$$

$$n_i = g_i e^{-\alpha} e^{-\beta \varepsilon_i}$$

La distribución de Maxwell-Boltzmann sirve para modelar tratando a los electrones como si fuesen gases ideales.

Ley de Distribución de Bose-Einstein (fotones y bosones)

Hacen una nueva distribución que, al aplicarla a los fotones, sirve para describir la radiación de cuerpo negro. Los fotones son distintos y se les asigna el spin.

$$n_i = \frac{g_i}{e^{\alpha} e^{\varepsilon_i/kT} - 1}$$

Ley de Distribución de Fermi-Dirac (fermiones y electrones)

Ninguna de las distribuciones anteriores puede describir a los electrones, ya que tienen un spin fraccionario.

$$n_i = \frac{g_i}{e^{\alpha} e^{\varepsilon_i/kT} + 1}$$

Problema del Tipler

Se usa la siguiente ecuación para resolverlo:

$$n = \frac{\rho N_A}{M}$$

n : Número de átomos

ρ : Densidad

N_A : Número de Avogadro ($6,022 \times 10^{23}$) átomos/mol

M : Masa molar del elemento.