

Planck Strahlungsgesetz

Wir möchten das Planck Strahlungsgesetz aus der Photonen-Zustandsdichte herleiten. Wir betrachten Bosonenteilchen für die gilt

$$\omega = c|\vec{k}| \quad \epsilon = \hbar\omega = \hbar ck \quad (1)$$

Die Definition der Zustandsdichte für 3 Dimensionen lautet

$$\mathcal{N}(\epsilon) = \frac{1}{V} \sum_{\vec{k}} \delta(\epsilon - \epsilon(\vec{k})) \quad (2)$$

Machen wir die klassische Ersetzung der Summe durch das Integral so folgt

$$\mathcal{N}(\epsilon) = \int \frac{d^3k}{(2\pi)^3} \delta(\epsilon - \epsilon(\vec{k})) \quad (3)$$

Wir nehmen dazu die Kugelkoordinaten $d^3k = k^2 dk \sin\theta d\theta d\phi$ und da die Zustandsdichte nicht von Winkeln abhängt, liefert die Integration $\int \sin\theta d\theta d\phi = 4\pi$. Dies in Gleichung (3) eingesetzt ergibt

$$\begin{aligned} \mathcal{N}(\epsilon) &= \frac{2}{(2\pi)^2} \int dk k^2 \delta(\epsilon - \epsilon(\vec{k})) \quad \text{mit } k = \frac{\epsilon}{\hbar c}, \quad dk = \frac{1}{\hbar c} d\epsilon \\ &= \frac{2}{(2\pi)^2} \int \frac{1}{\hbar c} d\epsilon \frac{\epsilon^2}{\hbar^2 c^2} \delta(\epsilon - \epsilon(\vec{k})) \\ &= \frac{2}{(2\pi)^2 \hbar^3 c^3} \int d\epsilon \epsilon^2 \delta(\epsilon - \epsilon(\vec{k})) \\ &= \frac{2\epsilon^2}{(2\pi)^2 \hbar^3 c^3} \end{aligned} \quad (4)$$

Wir müssen noch berücksichtigen dass es 2 Polarisationen für das Licht gibt, deswegen müssen wir das Ergebnis mit Faktor 2 multiplizieren und erhalten somit

$$\mathcal{N}(\epsilon) = \frac{\epsilon^2}{\pi^2 \hbar^3 c^3} \quad (5)$$

Für die weitere Berechnung ist es geschickt die Zustandsdichte in Abhängigkeit der Kreisfrequenz ω auszudrücken. Mit Hilfe der Gleichung (1) erhalten wir

$$\mathcal{N}(\omega) = \frac{\omega^2}{\pi^2 \hbar c^3} \quad (6)$$

Das Plancksche-Gesetz beschreibt die Energiedichte pro Frequenzintervall. Die Innere Energie lässt sich bestimmen mit

$$U = V \int d\epsilon \mathcal{N}(\epsilon) \epsilon \frac{1}{e^{\beta\epsilon} - 1} \quad (7)$$

Ersetzen wir die Abhängigkeit von ϵ durch die Abhängigkeit von ω so folgt

$$U = \hbar^2 V \int d\omega \mathcal{N}(\omega) \omega \frac{1}{e^{\beta\hbar\omega} - 1} \quad \text{mit } \epsilon = \hbar\omega, \quad d\epsilon = \hbar d\omega \quad (8)$$

Betrachten wir ferner die Innere Energie pro Frequenz-Intervall

$$u(\omega) = \frac{dU}{d\omega} = \hbar^2 V \mathcal{N}(\omega) \omega \frac{1}{e^{\beta\hbar\omega} - 1} \quad (9)$$

Setzen wir noch die Zustandsdichte aus Gleichung (6) ein

$$\begin{aligned}
u(\omega) &= \hbar^2 V \frac{\omega^2}{\pi^2 \hbar c^3} \frac{1}{e^{\beta \hbar \omega} - 1} \\
&= V \frac{\hbar \omega^3}{\pi^2 c^3} \frac{1}{e^{\beta \hbar \omega} - 1}
\end{aligned} \tag{10}$$

Im wesentlichen stellt die Gleichung (10) das schon aus der klassischen Physik bekannte **plancksche Strahlungsgesetz** dar. In der Literatur wird das plancksche Strahlungsgesetz oft als Energiedichte pro Frequenzintervall und pro Volumen angegeben. Damit ändert sich die Gleichung (10) zu

$$\boxed{u(\omega) = \frac{\hbar \omega^3}{\pi^2 c^3} \frac{1}{e^{\beta \hbar \omega} - 1}} \tag{11}$$

Als weiteres betrachten wir zwei Grenzfälle.

$\hbar \omega \ll k_B T$ Hieraus folgt

$$\begin{aligned}
u(\omega) &= \frac{\hbar \omega^3}{\pi^2 c^3} \frac{1}{\underbrace{\exp\{\frac{\hbar \omega}{k_B T}\}}_{\approx 1 + \frac{\hbar \omega}{k_B T} + \dots} - 1} \\
&\approx \frac{\hbar \omega^3}{\pi^2 c^3} \frac{1}{1 + \frac{\hbar \omega}{k_B T} - 1} \\
&= \frac{k_B T \omega^2}{\pi^2 c^3}
\end{aligned} \tag{12}$$

Die Gleichung (12) ist als **Rayleigh-Jeans-Gesetz** bekannt. Es zeigt die sogenannte Ultraviolett-Katastrophe (UV-Katastrophe), da es für große Frequenzen ω divergiert also $u(\omega \rightarrow \infty) = \infty$. Dies würde bedeuten dass unendlich viel Leistung bei einem Schwarz-Körper abgestrahlt würde. Was gegen die Energieerhaltung spricht.

$\hbar \omega \gg k_B T$ Hieraus folgt

$$\begin{aligned}
u(\omega) &= \frac{\hbar \omega^3}{\pi^2 c^3} \frac{1}{\underbrace{\exp\{\frac{\hbar \omega}{k_B T}\}}_{\text{groß gegenüber der -1, somit vernachlässige -1}} - 1} \\
&\approx \frac{\hbar \omega^3}{\pi^2 c^3} e^{-\frac{\hbar \omega}{k_B T}}
\end{aligned} \tag{13}$$

Diese Gleichung (13) ist unter dem Begriff **Wiensches Strahlungsgesetz** bekannt.

Die Funktion $\frac{x^3}{e^x - 1}$ hat bei $x = 2.82$ ihr einziges Maximum. Daraus folgt das Wiensche Verschiebungsgesetz $\hbar \omega_{\max} = 2.82 k_B T$ das eine stricte Proportionalität zwischen ω_{\max} und T

Referenzen

- http://t1.physik.tu-dortmund.de/uhrig/teaching/tus_ws0910/tus-ws0910.pdf
- http://www.tkm.uni-karlsruhe.de/~rachel/MV_StatPhys.pdf