

# Correction TD1 Physique quantique

## Exercice de cours : Catastrophe ultraviolette

Le corps noir est l'objet théorique suivant : il absorbe parfaitement la totalité de l'énergie électromagnétique qu'il reçoit et, atteignant l'équilibre thermique à une température  $T$ , la restitue entièrement sous forme d'un rayonnement thermique constitué d'un spectre de longueurs d'onde  $\lambda$ , rayonnées chacune à une intensité, donnée par la fonction  $u(\lambda, T)$ , appelée densité spectrale d'énergie.

La thermodynamique classique a proposé de décrire le rayonnement du corps noir en considérant les molécules comme de petits oscillateurs, rayonnant chacun une énergie  $E$  avec une certaine probabilité. La physique classique propose que l'énergie rayonnée  $E$  prend ses valeurs dans  $[0; +\infty]$  ; des valeurs donc continues. On note  $\langle E \rangle$  l'énergie moyenne d'un oscillateur.

## Partie 1 : Description par la loi de Rayleigh-Jeans (Énergie continue)

Dans le cadre de la thermodynamique classique, la loi de Rayleigh-Jeans aboutit à l'expression suivante pour la densité spectrale d'énergie:

$$u(\lambda, T) = \frac{8\pi}{c\lambda^2} \langle E \rangle$$

- $u$ : densité spectrale ( $\text{W}\cdot\text{m}^3$ )
- $c$ : célérité de la lumière dans le vide ( $3\times 10^8 \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

L'énergie moyenne  $\langle E \rangle$  d'un oscillateur se calcule de la manière suivante:

$$\langle E \rangle = \frac{\int_0^{+\infty} E e^{-\frac{E}{k_B T}} dE}{\int_0^{+\infty} e^{-\frac{E}{k_B T}} dE}$$

- $k_B$ : constante thermodynamique
- $T$ : température du rayonnement

Le numérateur représente l'intégrale de la densité de probabilité de l'énergie  $E$ , et le dénominateur permet de normaliser le résultat.

1. Montrer que le terme  $\langle E \rangle$  a pour valeur  $k_B T$ , en utilisant une intégration par parties.

Posons  $Nm$  et  $D$  tel que  $\langle E \rangle = \frac{Nm}{D}$

$$D = \int_0^\infty e^{-\frac{E}{k_B T}} dE = [-k_B T \times e^{-\frac{E}{k_B T}}]_0^\infty = -k_B T(0-1) = k_B T$$

$Nm = \int_0^\infty E \times e^{-\frac{E}{k_B T}} dE$ , par intégration par parties, on obtient :

$$Nm = [-k_B T \times E \times e^{-\frac{E}{k_B T}}]_0^\infty - (\int_0^\infty -k_B T \times e^{-\frac{E}{k_B T}} dE)$$

$$= k_B T [-E e^{-\frac{E}{k_B T}}]_0^\infty + k_B T [-k_B T e^{-\frac{E}{k_B T}}]_0^\infty$$

$$= k_B T [0 - 0] - (k_B T)^2 [e^{-\frac{E}{k_B T}}]_0^\infty$$

$$= -(k_B T)^2 [e^\alpha - e^0] = -(k_B T)^2 (0 - 1) = (k_B T)^2$$

$$\text{Donc } \langle E \rangle = \frac{Nm}{D} = \frac{(k_B T)^2}{k_B T} = k_B T$$

L'énergie totale du rayonnement émis par le corps noir est donnée par l'intégration de la densité d'énergie sur toutes les longueurs d'ondes:

$$U(\lambda, T) = \int_0^{+\infty} u(\lambda, T) d\lambda$$

$U(\lambda, T)$  est l'intensité rayonnée par le corps noir (en  $W \cdot m^2$ )

2. Expliquer à partir de cette intégrale pourquoi la loi de Rayleigh-Jeans a marqué un tournant nommé "Catastrophe ultraviolette".

$$\int_0^{+\infty} u(\lambda, T) = \int_0^\alpha \frac{8\pi}{c\lambda^2} \times k_B T d\lambda$$

$$= \frac{8\pi}{c} \times k_B T \times \int_0^\alpha \frac{1}{\lambda^2} d\lambda = \frac{8\pi}{c} \times k_B T \times \left[ \frac{-1}{\lambda} \right]_0^\alpha$$

$$\implies \lambda \rightarrow 0 \implies U(\lambda, T) \text{ diverge.}$$

### Partie 2: Description par la loi de Planck (Énergie discontinue)

Nous allons maintenant nous intéresser à la loi de Planck, qui a proposé de corriger la loi de Rayleigh-Jeans en introduisant la quantification de l'énergie du système corps noir : le terme  $\langle E \rangle$  est alors calculé en supposant que l'énergie  $E$  d'un oscillateur ne peut prendre qu'un nombre discret de valeurs, multiples d'une énergie  $E_0$ .

3. Réécrire la relation donnant  $\langle E \rangle$  dans ces conditions.  
E ne peut prendre qu'un nombre discret de valeurs, multiples d'une énergie  $E_0$ , càd :  $E = n \times E_0$ ,  $n \in \mathbb{N}$ .

$$\langle E \rangle = \frac{\sum_{n=0}^{+\infty} n E_0 e^{-\frac{n E_0}{k_B T}}}{\sum_{n=0}^{+\infty} e^{-\frac{n E_0}{k_B T}}}$$

4. Calculer ce terme, en utilisant un résultat sur les suites géométriques au numérateur, puis en remarquant un lien de dérivation entre le dénominateur et le numérateur.

Posons  $Nm$  le numérateur et  $D$  le dénominateur.

$$e^{-\frac{n E_0}{k_B T}} = \left( e^{-\frac{E_0}{k_B T}} \right)^n ; \text{ on pose } q = e^{-\frac{E_0}{k_B T}} \text{ et on obtient } Nm = E_0 \sum_{n=0}^{+\infty} n q^n$$

$$\implies Nm = E_0 \times \frac{1}{1-q} = E_0 \times \frac{1}{1 - e^{-\frac{E_0}{k_B T}}}$$

Or  $(D)' = Nm \times -k_B T$  (pas réussi la question)

5. On obtient donc la densité spectrale d'énergie suivante :

$$u(\lambda, T) = \frac{8\pi}{c\lambda^2} \langle E \rangle = \frac{8\pi}{c\lambda^2} \times \frac{E_0}{e^{\frac{E_0}{k_B T}} - 1}$$

avec  $E_0$  un quanta (plus petite quantité indivisible d'énergie)

Pour corriger la loi de R-J, il faut corriger la divergence  $u(\lambda, T)$  pour les petites longueurs d'ondes.

Justifier la proposition de Planck:  $E_0 = \frac{hc}{\lambda}$  avec  $h$  la constante de Planck.

*Remarques: Avec la loi de Planck, l'on trouve une énergie totale rayonnée  $U(T) \propto T^4$ , ce qui est en accord avec les observations, et revient à la loi de Stefan-Boltzman, antérieure à la catastrophe ultraviolette.*

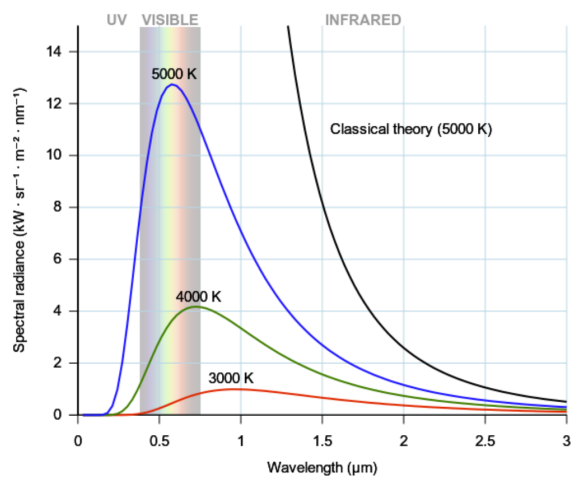


Figure 1: Spectre du rayonnement du corps noir (intensité du rayonnement en fonction de la longueur d'onde) pour des températures données (couleurs : modèle de Planck ; noir : modèle de Rayleigh-Jeans)