

T3-Cours

Rayonnement thermique

Tous les corps chauds rayonnent de l'énergie sous forme électromagnétique. Par exemple, un être humain rayonne dans l'infrarouge (lunette « thermique » dans les films d'espionnage, ou caméras infrarouges), une braise très chaude ou une étoile rayonnent principalement dans le visible.

Dans ce chapitre on discute un modèle de rayonnement thermique : celui du **corps noir** à l'équilibre thermique.

Table des matières

1 Rayonnement de corps noir	1
1.1 Corps noir	1
1.2 Équilibre radiatif	2
1.3 Rayonnement d'équilibre du corps noir	2

1 Rayonnement de corps noir

1.1 Corps noir

Le rayonnement d'un matériau chaud dépend du matériau. On étudie dans ce chapitre le corps noir, qui est un modèle universel, dont le rayonnement est très bien compris et qui s'applique à de nombreuses situations d'intérêt.

C'est également un modèle d'une grande importance historique, puisque c'est en étudiant ce modèle que Planck a introduit la constante h dont on connaît la postérité. En ce sens, l'étude du corps noir constitue la naissance de la physique quantique.

En général, un corps qui reçoit une onde électromagnétique peut faire trois choses : la réfléchir, la transmettre ou l'absorber.

Définition : Corps noir. On appelle corps noir un corps qui **absorbe intégralement** le rayonnement électromagnétique qu'il reçoit, quelque soit la longueur d'onde de celui-ci. En conséquence, il ne le réfléchit pas et ne le transmet pas.

Remarque 1. En tant que modèle, le corps noir n'existe pas, mais sur certaines gammes de longueur d'onde on peut considérer que certains corps approchent ce modèle en très bonne approximation, notamment :

- une plaque recouverte de noir de fumée dans le visible ;
- des briques dans l'infrarouge.

puisque ces matériaux sont de très bons absorbeurs opaques.

Remarque 2. Un corps noir n'est pas noir ! Sa couleur dépend de sa température. À température ambiante il émet effectivement trop peu dans le visible et apparaît noir à l'œil.

Remarque 3. En pratique, l'universalité et la généralité des lois qui découlent du modèle du corps noir permettent de les appliquer à des systèmes qui s'éloignent du modèle strict. On extrapolera ainsi souvent les résultats du corps noir à d'autres systèmes (soleil, qui n'est pas à l'équilibre thermique (sa surface est plus froide que son cœur), ciel qui est transparent,...

1.2 Équilibre radiatif

Définition : Flux surfacique. Le flux surfacique φ d'énergie électromagnétique est donné par

$$d\mathcal{P} = \varphi dS$$

avec $d\mathcal{P}$ la puissance électromagnétique traversant la surface élémentaire dS (c'est-à-dire l'énergie électromagnétique qui traverse dS par unité de temps, en W). φ s'exprime en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Définition : Densité spectrale de flux surfacique. Un flux surfacique φ peut être décomposé selon les longueurs d'onde. Le flux surfacique élémentaire entre λ et $\lambda + d\lambda$ s'écrit

$$d\varphi = F(\lambda) d\lambda \quad \text{et le flux surfacique total est donc} \quad \varphi = \int_0^{\infty} F(\lambda) d\lambda$$

F est en $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$.

Définition. Équilibre radiatif. Pour être à l'équilibre thermodynamique, un corps doit évacuer l'énergie qu'il reçoit du rayonnement électromagnétique. Pour cette raison, il rayonne lui-même.

Pour un corps noir à l'équilibre radiatif, **la puissance absorbée et la puissance émise sont égales.**

1.3 Rayonnement d'équilibre du corps noir

À l'équilibre thermodynamique, le corps noir à la température T émet un rayonnement dont la densité spectrale s'écrit (l'expression n'est pas à connaître)

$$F(\lambda) = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{k_B T \lambda}\right) - 1}$$

Cette expression est appelée **loi de Planck** (formule hors-programme). À partir de cette expression originelle, on en déduit deux autres lois (et celles-ci sont à connaître par contre) : la loi de déplacement de Wien et la loi de Stefan (-Boltzmann). Les démonstrations à partir de la loi de Planck sont proposées en TD T3-04.

Loi de déplacement de Wien. Le flux émis est maximal pour une longueur d'onde λ_{\max} donnée par

$$\lambda_{\max} T \approx 2900 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

Quelques exemples : un être humain de température $T \approx 300 \text{ K}$ rayonne principalement à $\lambda_{\max} \approx 9 \mu\text{m}$ (dans l'infrarouge donc). Le Soleil de température de surface $T = 5900 \text{ K}$ rayonne principalement autour de $\lambda_{\max} \approx 500 \text{ nm}$ (dans le visible). Le fond diffus cosmologique à $T \approx 3 \text{ K}$ rayonne dans les ondes radios ($\lambda_{\max} \approx 900 \mu\text{m}$).

Loi de Stefan. Le flux surfacique émis est donné par

$$\varphi = \sigma T^4 \quad \text{avec} \quad \sigma = 5,670 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4} \quad \text{la constante de Stefan.}$$

Attention. Le rayonnement thermique d'un corps noir est une propriété de surface : c'est la **température de surface** qui intervient dans la loi de Stefan ou de Wien.

Remarque 1. En pratique, on utilisera ces lois mêmes pour des systèmes hors-équilibre (le soleil par exemple), et même pour des corps qui ne sont pas parfaitement absorbant (le ciel par exemple).

Remarque 2. La loi de Planck donne un rayonnement très dissymétrique.