

LP 16 : Rayonnement d'équilibre thermique, Corps noir

Bibliographie :

- C. ASLANGUL, mécanique quantique tome 1, ed. de Boeck
- B. DIU et al., Physique Statistique, ed. Hermann
- Thermodynamique 2ème année, collection H-prépa
- Sextant, Optique Expérimentale, ed. Ellipse

Plan détaillé :

Introduction : phénomène d'incandescence => les matériaux portés à hautes températures (braises, filaments d'ampoule...) émettent de la lumière.

I) Rayonnement d'équilibre thermique

1) Position du problème

- la lumière est décrite par une densité volumique d'énergie u_λ .
- pas d'interaction entre les ondes lumineuses, donc l'équilibre ne peut s'établir que grâce aux parois qui absorbent et remettent la lumière (il en est de même pour un gaz parfait).
- corps noir = interaction matière rayonnement NON spécifique, i.e. indépendante de λ .

2) Mise en œuvre expérimentale : les mesures de Wien

- four à la température T avec un petit trou => absorption de toutes les longueurs d'ondes donc modélisable par un corps noir
- résultats expérimentaux de Wien, vers 1900 :
 - $\sim u_\lambda$ est isotrope
 - $\sim u_\lambda$ est indépendant de la forme et du matériaux du four
 - $\sim u_\lambda$ a une forme universelle $u_\lambda(\lambda, T) = aT^5 f(\lambda T)$ où f est une fonction empirique dont le maximum (qui est du coup celui de u_λ) est donné par la loi du déplacement de Wien : $\lambda_{max} \cdot T = 2898 \mu m \cdot K$
- illustration expérimentale du déplacement de Wien : prendre une lampe Quartz-Iode dont on peut régler la tension. Placer une fente puis un prisme à vision directe et projeter le spectre obtenue sur un écran. On voit qu'en augmentant la tension (donc la température au sein de l'ampoule), la lumière passe du rouge au jaune puis au blanc car le maximum d'intensité, d'abord dans l'IR, passe petit à petit dans le visible.

3) Approche théorique : loi de Planck

- Rayleigh et Jeans (1900) (approche « classique ») $u_\nu(T) = \frac{8\pi^2}{c^3} \nu^2 k_B T$,

bon accord à basse fréquence mais diverge à haute fréquence (« catastrophe UV »)

- Planck (même année) reprend l'approche de ses prédécesseurs mais discrétise les échanges d'énergie (sans pouvoir le justifier de manière physique) entre matière et rayonnement : $\Delta E = n h \nu$ avec n entier et h une (nouvelle) constante fondamentale.

Il obtient $u_\nu(T) = \frac{8\pi^2}{c^3} \nu^2 \frac{h \nu}{e^{h\nu/k_B T} - 1}$ dont l'accord avec l'expérience est très bon.

II) Émission du corps noir

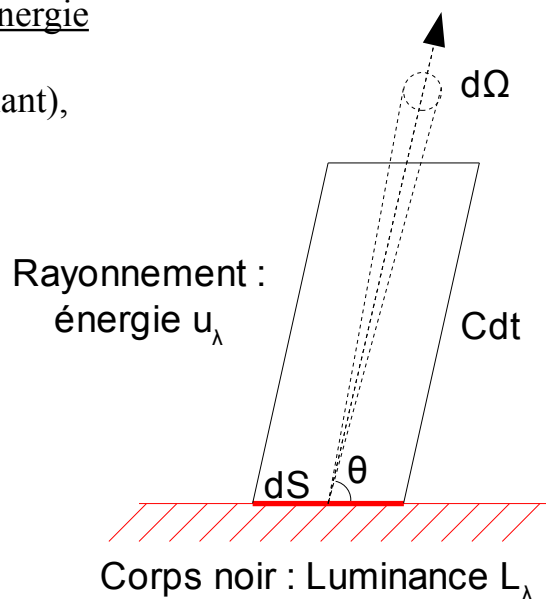
1) Lien entre émission et densité d'énergie

- notion de luminance spectrale L_λ (cf. Sexant),

qu'il faut relier à la densité d'énergie volumique u_λ : l'énergie émise dans la direction Ω (à $d\Omega$ près) par une surface dS de corps noir est égale à l'énergie contenue dans le cylindre de base dS et de côté $C \cdot \sin(\theta) dt$ et se propageant dans la direction Ω (calcul inspiré du H-prépa) :

$$u_\nu d\nu dS C \sin(\theta) dt \frac{d\Omega}{4\pi} = L_\nu \sin(\theta) dS d\Omega dt$$

d'où $L_\nu = \frac{C}{4\pi} u_\nu$



2) Application au corps noir

- intégration sur les direction de l'espace : excitation (anciennement émittance) spectrale M_ν . Pour un émetteur lambertien (L_ν isotrope) comme le corps noir, on obtient : $M_\nu = \pi L_\nu$

- intégration sur les fréquences : excitation M. Le calcul donne la loi de Stefan-Boltzmann (Stefan : découverte empirique, Boltzmann : a démontré cette relation par des considérations purement thermodynamique (cf. Aslangul)) : $M = \sigma T^4$

3) Cas des autres corps : loi de Kirchoff

- on place un corps quelconque dans l'enceinte d'un corps noir et on cherche son excitation M en fonction de celle du corps noir ici notée $B(T)$.

=> bilan de (flux) d'énergie : à l'équilibre, le flux absorbé est égal au flux émis. c'est la loi de Kirchoff : $M(\Omega, \nu, T) = k(\Omega, \nu) \cdot B(T)$ où k est l'absorptivité du corps ($0 \leq k < 1$)

- aucun corps n'émet plus qu'un corps noir, car c'est ce dernier qui interagit le plus avec le rayonnement ($k=1$)

III) Bilan radiatif de la Terre

1) Terre sans atmosphère

- hypothèse : le Soleil émet comme un corps noir à $T_s=5800K$
- la Terre réfléchit 30% de la lumière incidente (à cause des nuages, des étendues glacées et des déserts)
- bilan radiatif : on obtient une température de surface de la Terre, supposée uniforme, $T_T = 255K \Rightarrow$ beaucoup trop faible ($T_{T,réel} = 288K$)

2) Terre avec atmosphère

- on ajoute autour de la Terre une couche d'atmosphère à la température T_A transparente au rayonnement solaire (majoritairement dans le visible) mais absorbante au rayonnement terrestre (dans l'IR).
- bilan radiatif : $T_A = 255K$, mais $T_T = 303K \Rightarrow$ déjà plus réaliste

Questions :

- Pourquoi T_T est-elle uniforme ?

Non, la température de jour et de nuit est différente, et l'éclairement solaire n'est pas le même à l'équateur et au pôle du fait de l'angle d'incidence de la lumière. Mais l'atmosphère, par convection horizontale et verticale, a tendance à homogénéiser sa température. On peut donc considérer T_T uniforme en première approximation.

- et pour T_A ?

Là encore le modèle est simpliste. Le profil de température vertical n'est pas uniforme. T_A décroît jusqu'à environ 10km, puis croît jusqu'à 30km (maximum de la couche d'ozone) puis redécroit.

- Le Soleil est-il un corps noir ?

Si on utilise un spectromètre à haute résolution, on voit se dessiner les raies d'absorption des composants de la matière solaire. Mais globalement oui (le plasma solaire est très absorbant) bien que ce soit un système hors équilibre.

- A quelles constantes physiques est liée k_B ?

$k_B \cdot N_A = R$ constante des gaz parfaits

- Deux longueurs d'ondes différentes ne peuvent interagir ?

C'est vrai dans le vide car les équations de Maxwell sont linéaires, qui est le cas qui nous intéresse ici, mais c'est possible dans certains milieux matériels.

- Pourquoi faut-il efficacement absorber à une longueur d'onde donnée pour émettre efficacement à cette longueur d'onde ?
C'est un phénomène de résonance du couplage matière-rayonnement.

- Autres modes de transfert d'énergie ?
Conduction, convection libre ou forcée.

Commentaires :

Autre expérience possible en introduction : focaliser la lumière d'une lampe Quartz-Iode sur un thermomètre et observer la monter de la température. Pour tout savoir de la lampe Quartz-Iode, se référer au Sextant.

Pour le III, prendre aussi d'autres exemples si possibles comme le fond diffus cosmologique (cf. le livre d'exercice de KRIVINE). On peut alors parler des missions spatiales de mesure de ce fond diffus et de son intérêt en cosmologie, ce qui est un sujet de recherche actuel (à la différence de la lampe à incandescence).

Bien distinguer spectre discret (atomes) et spectre continu (corps noir).

Bien insister sur la nécessité du couplage matière/rayonnement pour la thermalisation.

Discuter pourquoi dans certains cas on utilise des matériaux noirs (forte interaction avec le rayonnement) et absorbants et dans d'autres des matériaux réfléchissants (faible interaction, pensez au Thermos, au couvertures de survie...)

Application à la mesure de hautes températures : pyrométrie à disparition de filament (on chauffe un filament jusqu'à ce qu'il ait le même spectre que le matériau dont on veut connaître la température) => cf l'Encyclopédia Universalis.

On peut faire le spectre du Soleil en live avec le spectromètre à fibre.

Le problème du corps noir est un problème historique. Planck en particulier l'a étudié dans le but d'augmenter le rendement des ampoules à incandescence inventées par Edison vers 1880.

k_B est lié à l'hypothèse atomiste de la matière, très controversée à l'époque (Planck lui était contre...).

Il faut savoir redémontrer les lois de Planck et de Rayleigh-Jeans, bien qu'il ne faille pas le faire dans la leçon.

Passage u_ν à u_λ : on a $u_\nu(\nu, T) d\nu = u_\lambda(\lambda, T) d\lambda$, d'où

$$u_\lambda(\lambda, T) = u_\nu(\nu, T) \left| \frac{d\nu}{d\lambda} \right|$$

Pour l'effet de serre, voir l'épreuve A de 2013.

On peut parler de la loi de Kirchoff dès l'introduction du modèle du corps noir : un bon émetteur doit forcément être un bon absorbant.