LP 16 – Rayonnement d'équilibre thermique. Corps noir.

Plan

Bien discuter pourquoi on applique la loi de Planck : rayonnement d'équilibre radiatif et thermique, ou corps noir à l'équilibre thermodynamique, ou corps noir à l'équilibre thermodynamique local. Faire attention aux flux qui sont intégrés sur 2π.

Bibliographie :

- **Augier**, Tec&Doc MP ancienne édition : indispensable.
- Gié Thermodynamique : bon complément.
- Hprepa Brébec PC thermodynamique : pour le pyromètre.
- Diu physique statistique : pour revoir la démonstration de la loi de Planck.
- Diu Thermodynamique.
- **Portelli**, La physique en applications : thermos.

Manips :

- Deux thermomètres et une QI.
- Éventuellement, QI réglable en intensité, fente et prisme : le bleu disparait en premier lorsque l'on diminue la température du filament (voir MP11, émission, absorption de la lumière).

Niveau L2, pré-requis :

- Électromagnétisme.
- Thermodynamique .
- Conduction et convection.

Introduction

On a vu la convection et la conduction. Manip avec deux thermomètres, dont un éclairé par une QI.
La Terre est chauffée par le Soleil.

I - Bilan radiatif

1 Les différents flux
Définir un flux (qui sont intégrés sur 2π)
Corps opaques et transparents (OG pour le verre dans le Gié).

II - Rayonnement d'équilibre thermique et radiatif

1 Définitions des équilibres
Thermique : même température.
Radiatif : $\phi_R = 0$.
On pourrait supposer l'équilibre thermodynamique qui imposerait les deux (car pas de flux), mais c'est un peu fort (on n'a pas besoin des équilibres mécaniques, osmotiques, ...).
Faire remarquer que ça implique beaucoup d'interactions matière-rayonnement (comme un GP), sans interactions "fortes" (de type raie atomique qui domine, fluorescence).
Ce rayonnement ne dépend que de T : $u_\nu(T)$ universelle.
Il concerne $d\phi/d\lambda = d\phi_p/d\lambda$.

2 La loi de Planck
Sans démonstration (mais avoir une idée). Donner ou pas le lien entre ϕ et u (habituellement avec le facteur $1/6$ simplifié, sauf dans le Gié).

3 Conséquences : lois de Wien et de Stefan.

III - Le corps noir

1 Définition et réalisation pratique : brique dans l'IR, enceinte en général.

2 Corps noir à l'équilibre thermodynamique

3 Corps noir à l'équilibre thermodynamique local (Gié)
ϕ_e est seulement dû à l'émission spontanée de la matière, et est donc indépendant des interactions avec l'extérieur : pour une portion du corps à l'équilibre thermodynamique local, ϕ_e est toujours le même. On peut donc se resservir de la loi démontrée dans le cas à l'équilibre.

4 Ordres de grandeurs
Flux surfacique solaire sur Terre : panneaux solaire.
Flux en W d'une ampoule, comparer à la fenêtre du visible.

IV - Applications

1 Le thermos avec le coefficient de réflexion (Portelli), on peut intégrer l'équation en Python, cf code LP18. Ou version plus simple : le refroidissement d'un litre d'eau.

2 Pyromètre à disparition de filament, manip si temps ? Cf Hprépa.

Conclusion et ouverture

Le meilleur exemple de corps noir que l'on observe est le fond diffus cosmologique. Mesure des températures en astrophysique. Mesure de la température dans l'échelle T90 à haute température (par la loi de Wien).

Remarques

Équilibre radiatif VS corps noir

Pour le rayonnement sur un corps : ϕ_i flux incident, ϕ_a flux absorbé, ϕ_r flux réfléchi, ϕ_p flux partant, flux émis (par émission spontanée) ϕ_e.

On a $\phi_i = \phi_a + \phi_r$ et $\phi_p = \phi_e + \phi_r$.

En régime stationnaire, $\phi_i = \phi_p$, donc $\phi_a = \phi_e$.

Équilibre radiatif

Pour un corps à la température T, à l'équilibre thermodynamique avec le rayonnement, on a $\phi_i = \phi_p =$ loi de Planck. Mais ϕ_e (et ϕ_a) sont quelconques.

Corps noir

La définition de prépa : c'est un corps à la température T, à l'équilibre thermodynamique avec le rayonnement, qui ne réfléchit rien.

Donc c'est comme dans le paragraphe d'avant, mais cette fois comme $\phi_r = 0$ on a $\phi_i = \phi_p = \phi_a = \phi_e =$ loi de Planck.

Bien noter que seul $\phi_r = 0$ va être utile, pas la peine d'en dire plus.

L'intérêt pratique est de pouvoir appliquer ceci à un corps a peu près noir, à l'équilibre thermodynamique *local*, et pas à l'équilibre avec un environnement qui est ouvert. Le Soleil par exemple (qui n'est pas à l'équilibre puisqu'il émet plus qu'il ne reçoit), ou un corps à T. Dans un tel cas, on applique le résultat du corps noir qui dit que $\phi_e =$ Planck (et pas seulement ϕ_a et ϕ_i).

Résumé de la démarche :

On montre que pour un corps placé dans une enceinte à l'équilibre radiatif et thermique, le flux partant ϕ_p est donné par la loi de Planck. Mais ceci n'est pas très utile en pratique, car on rencontre rarement de telles conditions. On introduit alors la notion de corps noir, corps opaque pour lequel le flux réfléchi ϕ_r est nul. Le flux émis ϕ_e est alors égal au flux partant, donc *le flux émis est donné par la loi de Planck*. Ça c'est pour le corps noir dans l'enceinte à l'équilibre radiatif et thermique.

Maintenant si on sort le corps noir de l'enceinte, on voudrait encore utiliser le fait que le flux émis ϕ_e est donné par la loi de Planck. À quelle condition est-ce le cas ? Il faut se souvenir que le flux émis est dû à l'émission spontanée des atomes constituants le matériau, émission qui interagit au sein du matériau avant d'en sortir (et qui interagit nécessairement beaucoup car le matériau est opaque [1]). Le flux émis est donc fixé uniquement par la répartition en énergie de ces atomes (qui agissent à la fois en tant qu'émetteurs et en tant que centres d'interaction rayonnement-matière). Cette répartition est donnée en gros par le facteur de Boltzmann dès que l'on est à l'équilibre thermique, même local. On arrive donc à ce que l'on voulait : on peut utiliser la loi de Planck pour le flux émis par un corps noir (c-à-d un corps opaque tel que $\phi_r = 0$) qui est à l'équilibre thermique local (c-à-d dont les couches superficielles ont une température suffisamment uniforme pour que les niveaux d'énergie des atomes suivent une distribution d'équilibre à T).

On peut enfin être plus précis à propos de "dont les couches superficielles ont une température suffisamment uniforme pour que les niveaux d'énergie des atomes suivent une distribution d'équilibre à T". Ceci sera réalisé si l'échelle donnée par gradient de température est grande devant le libre parcours moyen entre deux collisions (car ce sont les collisions qui assurent la relaxation vers l'équilibre). La condition d'opacité impose par ailleurs une profondeur optique de ces couches supérieure à 1, c'est-à-dire un libre parcours moyen pour les photons petit devant la taille de ces couches. En bref, il faut pouvoir dégager une zone où T varie peu, dans laquelle il y a beaucoup de collisions matière-matière et matière-photon.

Conditions d'équilibre

Pour avoir l'équilibre thermodynamique matière-rayonnement, il faut :
1- Matériau à la température T,
2- La lumière produite ou absorbée interagit de très nombreuses fois avant de quitter le corps (ce

1. Cette interaction est essentielle, car de la matière à l'équilibre thermique n'émet pas, sans ce "reprocessing", un rayonnement qui suit la loi de Planck. Cf par exemple le spectre du rayonnement de Bremsstrahlung thermique : des électrons suivants une distribution de Maxwell à T et étant déviés par une population d'ions (distribution de Maxwell à T également) produisent un rayonnement dont on peut calculer le spectre, et qui n'est pas du tout celui de Planck. Cf également un gaz d'atomes neutres à T : ils émettent un spectre de raies, certes élargies, mais pas un spectre de Planck. C'est donc la thermalisation du rayonnement par la matière qui amène le rayonnement vers l'équilibre thermique, et donc vers la loi de Planck. Ceci ce voit très bien si l'on écrit l'équation du transfert radiatif (cf Ribicky&Lightmann) où l'on voit que pour des profondeurs optiques supérieures à 1 *dans un matériau à l'équilibre thermique* le spectre tend vers celui de Planck suite à la balance émission/absorption(corrigée de l'émission stimulée).

Une autre conséquence de ceci est que quel que soit le corps, les couches très superficielles, pour lesquelles le rayonnement n'interagit pas beaucoup avant de s'échapper, n'émettent pas un spectre de Planck. Mais dans les situations pratiques cette contribution est faible.

qui est habituellement résumé en : le matériau absorbe toute radiation). Ainsi, les photons sont thermalisés et atteignent la distribution de Planck. (voir Landau et Lifshitz, statistical physics).

On peut le voir en écrivant l'équation du transfert radiatif, et en utilisant la loi de Kirchoff (voir par ex. Rybicki et Lightman, Radiative processes in astrophysics).

Voir Aslangul pour les processus d'émission dans la matière condensée ?

Pourquoi pas un spectre de raies ?

— Un gaz parfait à T émet un spectre de raie.

— Pour une cavité de volume V, δk est en $1/V$ très très petit.

— Pour un métal ou le Soleil, les processus d'émission émettent quasi-continûment ou continûment (bandes d'énergies continues dans un métal, diffusion Compton photons-électrons qui répartissent l'énergie continûment, élargissement des raies par effet Doppler ou par couplage avec l'environnement, surtout pour des molécules, ...).

Pourquoi un potentiel chimique nul ?

Le nombre de photons n'est pas conservé pour un système isolé (attention, c'est très différent d'une situation d'échange de particules entre un réservoir et le système, où le nombre total reste constant, ici ce n'est pas pareil car le système est isolé). Donc, en canonique, N ne peut pas apparaître dans les variables caractéristiques. Donc on a $F(T, V)$. Écrire μ n'a donc en fait pas de sens.

Pour réutiliser des résultats d'autres fluides, on dit quand même que $\mu = 0$ puisque c'est formellement le cas : si on a $F(T, V, N)$, alors $\mu = \partial F/\partial N = 0$. (Voir Diu physique statistique.)

De plus, l'existence de processus, à l'équilibre thermodynamique, de type $\gamma + \gamma \to \gamma + \gamma + \gamma$ indique que $2\mu = 3\mu$, donc $\mu = 0$.

Le CMB

$T \propto a^{-1}$. La densité volumique d'énergie est bien celle d'un CN à 3 K, et elle est $\propto T^3 \propto a^{-3}$ (où a est le facteur d'échelle).