

## LP16 : RAYONNEMENT D'ÉQUILIBRE THERMIQUE : CORPS NOIR (L3)

### Prérequis

- électromagnétisme
- thermodynamique
- physique statistique quantique (statistique de Bose)

### Idées directrices à faire passer

- existence d'un équilibre entre matière et rayonnement
- un corps noir est un modèle d'émetteur : ni nécessaire ni suffisant pour avoir équilibre matière/rayonnement (qui est un postulat du modèle!)

### Commentaires du jury

- lors d'un bilan, les flux doivent être clairement établis
- évoquer des éléments historiques (c'est la naissance de la MQ quand même!)
- faire des AN (ne doit pas rester purement théorique)
- expliquer le processus par lequel les photons thermalisent
- la manip lampe QI avec PVD est appréciée
- ne pas faire rayonnement cosmologique ni bilan thermique de la Terre

### Bibliographie

- [1] Tec & Doc, MP-PT (donne les idées générales mais non utilisé dans la leçon)
- [2] Cours de physique statistique de l'école Polytechnique, Balian, Editions de l'école Polytechnique (parfait pour cette leçon)
- [3] Mécanique quantique I, Aslangul, De Boeck (pour des compléments)
- [4] Physique statistique, Diu (sur un point, plus clair)

**Introduction** : Concept de transfert thermique d'origine radiative : le Soleil qui chauffe la Terre... Dans la suite, on s'intéressera particulièrement au transfert radiatif de sources chauffées. **manipulation** : lampe blanche focalisée sur un thermomètre. Ça chauffe à distance

## I Rayonnement d'équilibre thermique

### 1 Faits expérimentaux et nature physique du rayonnement [3]

p81-85 Attention, Aslangul est clair mais les informations sont distillées. Il faut savoir exactement où et quoi chercher.

- faits : 1) les corps chauffés émettent un rayonnement. 2) Le spectre émis est continu et sa fréquence se décale vers le bleu pour les corps chaud. 3) Définir alors rayonnement thermique
- nature physique : expliquer la nature de ce rayonnement (émission par les dipôles accélérés aléatoirement). Importance du caractère statistique du gaz qui thermalise avec le thermostat **et** le rayonnement. Finalement, on obtient un rayonnement à l'équilibre thermodynamique. Bien insister sur l'importance de la matière dans la thermalisation ! Mais il faut de la matière diluée et à interaction non spécifique.

### 2 Le corps noir [3]

p85-86

- définition et réalisation expérimentale
- donner quelques spectres de corps noirs pour différentes températures
- propriétés remarquables : universalité du spectre (ne dépend que de T) et loi de déplacement de Wien
- manipulation : lampe blanche QI avec PVD. Changer la tension d'alimentation change la position du maximum d'émission (visible qualitativement)

### 3 Loi de Wien - Loi de Stefan [3] et [2]

p89-93

- définir rapidement la luminance (énergie rayonnée par unité de surface et par unité d'angle solide) et donner l'expression (sans démo)  $L = c/4\pi \cdot u$  (petit commentaire : se retrouve par conservation et isotropie du rayonnement facilement)
- donner alors l'expression du pouvoir émissif en fonction de  $u$
- donner la loi **phénoménologique** de Stefan et de donner la valeur (empirique) de la constante de Stefan  $\sigma$
- faire l'exo 12a du Balian : température des planètes. Bilan radiatif rapide. Parler de l'inexactitude de considérer qu'une planète est un corps noir (en particulier en présence d'une atmosphère)

## II Vers la loi de Planck

### 1 Formule de Rayleigh-Jeans [3] et [4]

Utiliser principalement l'Aslangul

- donner le cadre théorique de l'étude : corps noir modèle. Boîte cubique de longueur  $L$
- on suppose des parois parfaitement réfléchissantes : on obtient alors des conditions aux limites strictes simples -> quantification de  $\vec{k}$
- étape 1 : on mène alors le calcul de la densité d'état : nombre de mode de vecteur d'onde  $\vec{k}$ . L'isotropie simplifie le travail. Il suffit de considérer la norme de  $\vec{k}$ . Le volume élémentaire étant le volume du mode fondamental de la cavité. Cette démonstration est plus simple dans le Diu (en 2 lignes claires) si besoin.
- étape 2 : application du théorème d'équipartition de l'énergie à chaque mode du champ. 1 mode est considéré être un OH classique unidimensionnel donc d'énergie  $kT$ .
- on obtient alors une densité spectrale d'énergie

### 2 Accord au spectre réel : le problème de la catastrophe ultraviolette

- remonter un spectre réel
- l'accord basse fréquence est très bon
- mais ensuite, plus aucun accord
- pire encore, l'intégration est divergente ! La contribution des modes hautes fréquences n'est pas tuée. C'est la catastrophe UV

### 3 loi de Planck [3]

La démo d'Aslangul est excellente. Il faut la suivre !

- Planck rejette l'étape 2 du calcul précédent (l'énergie doit dépendre de la fréquence pour éviter la divergence)
- il faut violer le théorème d'équipartition. L'idée de Planck est d'interdire une variation continue de l'énergie de l'oscillateur. Pour cela, il va quantifier l'énergie. C'est le pas décisif
- Ensuite, il mène un calcul classique de physique statistique en utilisant une distribution de Boltzmann avec une sommation discrète.
- on obtient alors la loi de Planck
- préciser que sans surprise (maintenant), on obtient la loi que l'on obtiendrait à partir d'une statistique de Bose (valable pour des photons)
- accord avec les résultats expérimentaux : limite HT et BT en accord avec les limites expérimentales + par intégration sur le spectre, on retrouve la loi de Stefan et la valeur du coefficient  $\sigma$  (la catastrophe UV a donc disparue)
- ajouter enfin qu'un calcul exactement identique dans le cas d'un solide a permis à Einstein de corriger au premier ordre la loi de Dulong et Petit à basse température (en introduisant le concept de quanta de vibration, les phonons)

### III Applications

#### 1 Rendement d'une lampe à incandescence (intérêt historique) [2]

Faire l'exercice 12c du Balian sur l'intérêt d'utiliser des lampes à haute température. Rappeler qu'initialement Planck travaillait à améliorer le rendement des lampes à incandescence !

#### 2 Equilibre thermique du vase Dewar [2]

Faire l'exercice 12b du Balian. Il faut absolument savoir retrouver le coefficient  $(1 - R)/(1 + R)$ . La démonstration se fait par analogie directe avec celle du Fabry-Perot. La puissance qui a effectivement traversé la paroi est la somme

$$P_{\text{perdue}} = \sum_{n=0}^{\infty} PR^{2n}(1 - R)^2 = P \frac{1 - R}{1 + R}$$

**Conclusion :**

- bilan des éléments clés : définition du corps noir, forme et propriétés de son spectre, nécessité de la quantification pour une explication convaincante
- ouverture sur le pas décisif franchi par Planck pour la physique du XXe siècle. Rappeler à quel point la mécanique quantique a été fructueuse aussi bien dans le domaine théorique que dans le domaine des applications pratiques.

**Q/R**

1. Qu'est-ce qu'un flux ?

2. Pourquoi est-ce important que le rayonnement du corps noir soit isotrope ? Quel principe fondamental serait violé sinon ?

3. Dans quel ordre chronologique sont apparues les lois ?

4. Le Soleil est-il à l'équilibre thermique ?

5. En quoi les étoiles sont-elles de bons corps noirs ?

6.  $\mu = 0$  pour les photons. Est-ce aussi vrai hors équilibre ?

7. Montrer la loi de Stefan. Quel est le lien avec la pression de radiation ?

8. Quelles approximations permettent d'arriver à la loi de Planck ?

9. Que signifie rayonnement à la température  $T$  ?

10. Cycle de Rankine, cycle de Hirn ?

11. Diffusion de particules, diffusion thermique et viscosité sont-ils associés à des marches aléatoires ?