

**LP n° 17 Titre :** Rayonnement d'équilibre thermique, Corps noir

**Présentée par :** MANSARD Juliette

**Rapport écrit par :** SCHATT Hugo

**Correcteur :** LEVRIER François

**Date :** 28/09/2018

### Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Éditeur	Année
Toute la Thermodynamique, la Mécanique des fluides et les ondes Mécaniques	Lydéric Bocquet, Jean-Pierre Faroux, Jacques Renault.	DUNOD	2002
J'intègre, Physique tout-en-un	Marie-Noëlle Sanz, François Vandenbrouck, Bernard Salamito, Dominique Chardon	DUNOD	2016
Thermodynamique, Fondements et applications	José-Philippe Pérez	DUNOD	2001

### Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon : CPGE Seconde année

Pré-requis : Thermodynamique (1<sup>ère</sup> année)  
Mécanique Quantique (1<sup>ère</sup> année)  
Notions sur le rayonnement électromagnétique

Plan détaillé :

**I. Corps Noir** (5min)

1) Réflexion, Transmission, Absorption (1min)

Tranche de matériau -> flux incident -> une partie réfléchi, une transmise et une absorbée.

2) Le modèle du corps noir (4min)

Corps noir : qui absorbe entièrement le rayonnement électromagnétique qu'il reçoit.

Enceinte aux parois opaques maintenues à la température T et possédant qu'une petite ouverture.

## II. Rayonnement d'équilibre thermique (18min)

### 1) Quelques définitions (9min)

Rayonnement d'équilibre thermique : Rayonnement d'équilibre à la température  $T$  est le rayonnement EM qu'on aurait dans une enceinte vide dont les parois seraient opaques et maintenues à la température  $T$ . (Gaz de photons).

Densité d'énergie volumique : Relie un petit volume  $dV$  à la quantité d'énergie présente à l'intérieur :  $dU_{em} = u_{em}(T) \cdot dV$ .

Flux surfacique d'énergie.

Relation entre flux surfacique d'énergie et densité d'énergie volumique (rapport de  $c/4$ ).

Densité Spectrale (raisonnement en longueur d'onde ou en fréquence).

### 2) Loi de Planck (4min)

Formule de la loi de Planck (en fonction des fréquences ou des longueurs d'onde).

Loi de Rayleigh Jeans.

### 3) Loi de Stefan-Boltzmann (3min)

Formule de la loi de Stefan-Boltzmann.

Constante de Stefan =  $5.670 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^2.\text{K}^{-4}$

### 4) Loi de Wien (1min)

Formule de la loi de Wien.

### 5) Flux surfacique émis par un corps noir (1min)

Proportionnel à la Température à la puissance quatre.

## III. Applications (15min)

### 1) Température du soleil (2min)

Diapositive : spectre de rayonnement du rayonnement solaire.

### 2) L'effet de serre (13min)

- Terre sans atmosphère : (faire les calculs)

Puissance(soleil) =  $4.3 \cdot 10^{23} \text{ W}$

Flux(soleil-terre) =  $1500 \text{ W/m}^2$

Puissance(reçue sur terre) =  $6.2 \cdot 10^{16} \text{ W}$

Albédo :  $A = 0.31$

$T_0 = 290\text{K} = -17^\circ\text{C}$  (température de surface trop faible)

- Terre avec atmosphère :

Epaisseur atmosphère :  $e = 30\text{km} \ll \text{Rayon de la Terre}$

Albédo du système Terre-Atmosphère = Albédo de la Terre

$T_0 = 30^\circ\text{C}$  (température de surface trop élevée)

- Amélioration du modèle :

Atmosphère pas totalement transparente et réfléchit une fraction ( $1/3$ ) du rayonnement solaire.

$T_0 = 17^\circ\text{C}$  (plus proche du modèle)

Conclusion (<1min) :

Voile solaire, volcanologues se servent de la couleur de la lave pour déterminer sa température.

### Questions posées par l'enseignant

- 1) Pourquoi quand on chauffe ça rayonne ? Qu'est-ce qui physiquement fait qu'il y a émission d'un rayonnement électromagnétique ?
- 2) En quoi l'agitation thermique produit un tel rayonnement ?
- 3) Dans la déf du corps noir, est-ce que les parois jouent un rôle dans l'établissement de l'équilibre ?
- 4) Est-ce qu'un gaz de photons sans parois peut se mettre spontanément à l'équilibre ?
- 5) Est-ce qu'on peut établir un équilibre dans un gaz de photons indépendamment du fait qu'il y ait des parois autour ?
- 6) Est-ce que les molécules de cette pièce se mettent à l'équilibre thermique si je les isole par la pensée ?
- 7) Définition de la densité d'énergie volumique : lien avec le champ électromagnétique ?
- 8) Comment on sait que cette énergie ne dépend que de la température du corps noir ? et pas de la forme de l'enceinte par exemple, le photon interagit bien avec les parois lorsqu'il rentre non ? Comment on montre que cela n'intervient pas ?
- 9) Relation entre le flux et la densité d'énergie volumique : d'où sort la vraie relation ?
- 10) Revient sur le lien entre densité d'énergie volumique selon les fréquences et selon les longueurs d'onde ?
- 11) Pourquoi parle-t-on de catastrophe ultraviolette ?
- 12) Pourquoi peut-on supposer que le soleil est un corps noir ? Est-ce qu'il y a une raison physique du modèle qui permettrait de l'affirmer ?
- 13) Schéma des flux qui arrivent sur la Terre, sans et avec l'atmosphère.
- 14) Parlez-moi de l'effet de serre. Que devient le flux  $A_{\text{phi}0}$  ? Est-il absorbé par l'atmosphère ?
- 15) A quoi est dû l'albédo sur la Terre ?
- 16) Est-ce que l'atmosphère ne réémet que vers la Terre ?
- 17) Vous pouvez revenir en détail sur le dernier modèle ?

### Commentaires donnés par l'enseignant

Partie sur l'effet de Serre pas très clair, rajouter des schémas peut être très utile !  
Plan est pas mal sinon, ça a un peu péché sur les applications à cause du manque de schéma.  
Faire des schémas en vue de coupe des différents modèles, où on voit les différents flux qui rentrent dans l'atmosphère et la Terre et qui en sortent.

Manque une définition du flux.

La mise en équilibre du gaz de photons se fait par relation transitive avec les parois. Donc oui les parois ont une importance. Il n'y a que très peu d'interactions directes photon-photon pour qu'ils se mettent à l'équilibre sans qu'il y ait besoin d'un intermédiaire (la matière des parois)

Constante de Planck :  $h$  vient de help constant.

Régime de Rayleigh-Jeans :  $kT \gg h \cdot \nu$ , la constante de Planck n'apparaît pas. Le caractère discret de l'énergie lumineuse n'est pas important dans ce régime.

Au contraire elle apparaît dans le régime de Wien (chaque photon porte une énergie importante par rapport à l'énergie caractéristique  $kT$ )

On pouvait parler des différentes couleurs des étoiles.

Les photons émis par la surface du soleil ont mis très longtemps à sortir du soleil. Le libre parcours moyen dans le soleil est de 1cm, pour un rayon de  $7 \cdot 10^8$  m. Ainsi la trajectoire des photons dans le soleil est une marche aléatoire. Le nombre d'interaction nécessaire pour sortir est de  $N = (R/l)^2 = 10^{22}$  (où  $l$  = libre parcours moyen).

## Partie réservée au correcteur

### **Avis sur le plan présenté**

Le plan est raisonnable. Pas de défaut majeur, même si on peut regretter un petit manque d'originalité. Il faut essayer de trouver des illustrations originales du concept.

### **Concepts clés de la leçon**

Flux (définition, incident, transmis, absorbé, réfléchi, émis) – Bilan de flux – Cas du corps noir – Loi de Kirchhoff – Distribution spectrale du corps noir – Limites (Rayleigh-Jeans et Wien) – Loi du déplacement de Wien et applications (Soleil, étoiles, émission du corps humain) – Loi de Stefan – Un exemple de bilan

### **Concepts secondaires mais intéressants**

Parmi les exemples possibles, on peut calculer la température des planètes comme cela a été fait (en incluant albedo, effet de serre, ozone), mais on peut aussi considérer l'influence de la rotation synchrone (Mercure, par exemple : seul un demi-hémisphère re-rayonne l'énergie reçue). On peut mentionner la température des grains interstellaires (qui absorbent dans le visible/UV et ré-émettent en IR). On peut aussi parler du fond diffus cosmologique, qui a une émission la plus proche d'un corps noir.

### **Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur)**

RAS, mais il y a un programme python pour montrer Planck et ses limites haute et basse fréquence.

### **Points délicats dans la leçon**

Pour les applications, il est indispensable de faire des schémas clairs, sinon on s'embrouille. Le point central n'est pas le calcul de la distribution spectrale du corps noir, il vaut mieux l'avoir sur un transparent au clair.

### **Bibliographie conseillée**

Landau & Lifchitz « Physique Statistique » §7 et §63  
Krügel « The physics of interstellar dust »  
Rubino Martin « Le fond diffus cosmologique »