

Titre : TM5 Rayonnement d'équilibre thermique, corps noir

Présentée par : Bernard Chelli

Rapport écrit par : Raphaël Leriche

Correcteur :

Date : 27/09/2019

Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Éditeur	Année
Thermodynamique, Fondements et applications	José-Philippe Pérez	DUNOD	2001
J'intègre, Physique tout-en-un	Marie-Noëlle Sanz, François Vandenbrouck, Bernard Salamito, Dominique Chardon	DUNOD	2014
Elements de Physique Statistique	Bernard Diu, Claudine Guthmann, Danielle Lederer, Bernard Roulet	HERMANN	1989

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon : CPGE

Pré-requis : Physique des ondes, Thermodynamique

Introduction : Idée de la leçon consiste à déterminer la température à la surface de la Terre. Définition de la notion de flux (flux incident, flux transmis, flux absorbé, flux réfléchi, flux émis)

1'49 "

I) Modèle du corps noir

Définition : Corps dont le pouvoir absorbant est égal à 1 pour tout ω et k .

2'45''

Schéma explicatif de la réalisation expérimentale d'un corps noir (cavité thermostatée à la température T et percée d'un petit trou. Les rayons lumineux venant de l'extérieur et passant par le trou sont réfléchis de nombreuses fois dans l'enceinte et finissent par être absorbé. Un tel système représente bien un pouvoir absorbant de 1.

Introduction à la notion de puissance reçue par un élément de surface élémentaire dS : $dP_{\text{reçue}} = \beta dS p$ avec β le coefficient d'absorption (égal à 1 pour un corps noir) et p le flux de puissance incident.

5'27 "

Introduction à la notion de puissance rayonnée par un élément de surface élémentaire dS : $dP_{\text{rayonnée}} = \eta dS$ avec η l'émissivité.

Pour un corps noir, comme la température T est fixée : $dP_{\text{reçue}} = dP_{\text{rayonnée}}$. Loi de Kirchhoff : le flux de puissance est indépendant des propriétés de la surface.

6'51''

Schéma explicatif du rayonnement de la réalisation expérimentale du corps noir.

7'40''

Définition de l'équilibre thermodynamique (équilibres mécanique, thermique et chimique).

8'49''

Justification que le Soleil est un corps noir en raison du libre parcours moyen de 1cm de la lumière à la surface du Soleil (qui est donc à l'équilibre thermodynamique).

10'12''

II) Rayonnement du corps noir

Présentation de la loi de Planck sous sa forme intégrale (intégration sur les pulsations)

L'allure de la courbe est montrée à l'aide du vidéo projecteur.

12'27''

Point historique sur la loi de Rayleigh-Jeans et sur la catastrophe ultraviolette

14'20''

Loi du déplacement de Wien : $\lambda_{\text{max}} T = 2898 \mu\text{m.K}$

En appliquant cette loi pour le Soleil, on trouve un excellent accord théorie/expérience.

16'12''

Calcul de la puissance rayonnée par un élément de surface dS dans la direction θ (explication avec schéma).

22'30'' Démonstration de la loi de Stefan-Boltzmann $u = \sigma T^4$ (puissance surfacique rayonnée par un corps noir à la température T)

25'41''

III) Calcul de la température à la surface de la Terre

Hypothèses : on considère que le Soleil est un corps noir et que la Terre est un corps gris du fait de son albedo (dû aux calottes glacières et à l'eau en haute atmosphère)

28'22''

Schéma explicatif introduisant les notations pour la distance Terre-Soleil le rayon de la Terre, mais aussi la « section efficace » de la Terre captant le rayonnement du Soleil.

Bilan de puissance en appliquant la loi de Stefan-Boltzmann pour la Terre (en prenant en compte l'albedo) et pour le Soleil.

31'44''

Application numérique : on trouve une température pour la surface de la Terre de -18°C , ce qui est trop bas. Il faut donc raffiner le calcul en prenant en compte l'effet de serre engendrée par l'atmosphère terrestre. L'atmosphère est également perçue comme un corps noir n'absorbant cependant que le rayonnement émis par la Terre et pas par le Soleil. Sa propriété de corps noir implique un rayonnement isotrope de l'atmosphère et donc l'introduction d'une puissance rayonnée $\phi(\text{atmosphère} \rightarrow \text{espace}) = \phi(\text{atmosphère} \rightarrow \text{Terre})$.

Nouveau schéma expliquant les différents flux de puissance en jeu en présence de l'atmosphère.

37'41''

Bilans de puissance conduisant à une seconde application numérique estimant maintenant un température plus raisonnable de 30°C à la surface de la Terre.

Conclusion : Discussion sur les limites du modèle évoqué lors de la leçon.

Questions posées par l'enseignant

- Pourquoi avoir choisi des prérequis aussi larges alors qu'un nombre réduit de notions de physique des ondes et de thermodynamiques est utilisé dans la leçon ?
- La leçon respecte-t-elle le programme de CPGE ?
- Le Soleil rayonne une puissance de 10^{26} W. Pouvez-vous donner un ordre de grandeur de la puissance rayonnée par une ampoule ?
- A quelle distance (à peu près) faut-il approcher sa main d'une ampoule pour retrouver la sensation d'un bain de Soleil ?
- Avec ces considérations, pouvez-vous retrouver la valeur de la puissance rayonnée par le Soleil ?
- Quelle est la différence entre l'émission d'ondes électromagnétiques et leur diffusion ?
- Attention à bien donner des prérequis précis.
- Certaines parties de la leçon qui a été donnée ne sont plus au programme de CPGE : exemple de l'angle solide.
- Comment algébrise-t-on les flux de puissance ?
- Si l'algébrisation n'apparaît pas à travers les flux, où se situe-t-elle ?

- Comment peut-on garantir un rayonnement efficace à grande distance ?
- Ils y avaient deux parties dans le titre. Qu'est-ce que le rayonnement d'équilibre thermique ?
- Définissez rigoureusement le système présenté pendant la leçon.
- Vous avez défini l'équilibre thermodynamique pendant la leçon. A l'équilibre thermodynamique, que peut-on dire des potentiels thermodynamiques ?
- Vous avez parlé de densité d'énergie dans la cavité. De quelle énergie s'agit-il ?
- Pouvez-vous donner l'ordre de grandeur du diamètre du Soleil ?
- Quel est le lien entre les quantités totales et les quantités spectrales (qui dépendent de ω et \mathbf{k}) ?
- Remontez le spectre d'émission du Soleil. Celui-ci vérifie en première approximation la loi du corps noir. En revanche il semblerait que l'on observe des « discontinuités ». Pouvez-vous donner leur origine ?
- Quelle information cruciale pouvons-nous tirer du spectre émis par une étoile ?
- Pourquoi une flamme est-elle colorée ?
- La couleur de la flamme dépend-elle de sa température ? Quelle est la température d'une flamme ?
- L'ensemble du rayonnement électromagnétique passe-t-il à travers une vitre ?
- Qu'est-ce qu'un corps gris ? S'agit-il du « complémentaire d'un corps noir ? Tout ce qui n'est pas un corps noir est un corps gris ?
- Peut-on s'attendre à ce que le rayonnement d'un corps soit un spectre continu ?
- Aurait-on pu se passer de l'albedo dans le calcul ?

Commentaires donnés par l'enseignant

- Chose gênante : la première partie du titre n'est pas traitée. Il faut parler des gaz de photons et de leurs propriétés.
- Il faut prendre le temps d'introduire les notions d'émission de diffusion de rayonnement.
- Il faut également mentionner les applications (déterminer les éléments présents dans les étoiles, parler du fond diffus cosmologique).
- Il n'y a pas d'expérience. Analyser le spectre rayonné par une ampoule aurait été intéressant.
- Dire que σT^4 correspond à l'aire sous la courbe de la loi de Planck.
- Une autre idée d'expérience aurait été d'utiliser le four percé de la collection pour redémontrer σT^4 .
- Eviter de donner des définitions à rebrousse-poil (comme pour le pouvoir absorbant par exemple).
- Améliorer la gestion du tableau.
- Une idée de référence pour cette leçon : dernière partie de la composition 2012 sujet A agrégation externe.
- Dire « flux » et pas « flux surfacique » qui est redondant.
- Marquer plus distinctement les transitions entre parties.
- On peut montrer la loi de Stefan sans utiliser la physique statistique à l'aide de la pression de radiation.
- Il faut mentionner $E=h\nu$ la loi de Planck à un moment de la leçon.
- Trop de temps a été consacré au calcul de $cu/4$.
- Conseil de bibliographie supplémentaire : Thermodynamique Olivier et Gié

Avis général sur la leçon (plan, contenu, etc.)

La partie sur le rayonnement du corps noir est plutôt bien traitée. Cependant, celle sur le rayonnement thermique d'équilibre (d'un gaz de photons) passe trop vite à la trappe. C'est pourtant grâce à celui-ci qu'on peut parler du corps noir ! Il faut d'avantage s'attarder sur une définition propre des quantités de bases : flux, orientations, ... (quitte à le faire sur une diapo). L'exemple de la température de la Terre est bon, mais il faut voir à en montrer certains autres (avec moins de calcul). Une manip est quasiment indispensable pour cette leçon !

Notions fondamentales à aborder, secondaires, délicates

Définition des différents flux (émission, absorption, transmission, réflexion, diffusion)

Algébrisation

Rayonnement d'équilibre thermique : loi de Wien

Corps noir : loi de Stefan

Applications : le spectre des étoiles, le fond diffus cosmologique, le pyromètre à disparition de filament...

Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur)

Ampoule alimentée par un alternostat, mesure du flux lumineux avec le spectro USB

Four thermique avec pyromètre optique

Bibliographie conseillée

Thermodynamique, Olivier & Gié (essentiellement)

Physique statistique, DGLR (pour compléter sa culture éventuellement)