

LPOB 42 : Sources de rayonnement, application(s)

Armel JOUAN, Géraud DUPUY

June 12, 2021

Bibliographie

- [1] B. Diu, Thermodynamique, chapitre 9
- [2] B. Diu, Physique statistique
- [3] Thermodynamique, S. Olivier, H. Gié : pour les définitions et se remettre les idées en place
- [4] H-Prépa de thermodynamique, chap 3 p.77
- [5] Texier, Physique statistique, chap 9 p.195
- [6] Thermodynamique, Gié, chapitre MI "Rayonnement thermique"

Prérequis - Niveau : L3

- Modes de transferts thermiques : rayonnement. Equilibre thermique radiatif
- Notion d'onde électromagnétique
- Notion de flux
- Physique statistique : densité d'états, gaz de photons, nombre d'occupation, statistique de Bose-Einstein
- Nombres quantiques principale, atome d'hydrogène
- Notion de semi-conducteurs

Introduction [Extrait youtube Dr Stone avec la lampe d'Eddison]

En l'espace d'à peu près 150 ans, on est passé d'un éclairage à la bougie à des lampes à incandescence, puis à des lampes à économie d'énergie par fluorescence, puis à des LED, essayons de comprendre cette évolution en caractérisant ces différentes sources de rayonnement.

1 Rayonnement du corps noir

1.1 Hypothèses du modèle

- Equilibre radiatif thermique (égalité des flux)
- Boîte cubique de longueur L à la température T
- Gaz de photons indépendants qui interagissent avec la boîte (chocs, absorption et émission), d'énergie quantifiée $\varepsilon = h\nu$.
- On s'intéresse à la densité spectrale volumique d'énergie $u_\nu(\nu, T)$: $du = u_\nu(\nu, T)d\nu$ est ainsi la densité volumique d'énergie entre ν et $\nu + d\nu$

1.2 Loi de Planck

- Exprimer la densité spectrale d'énergie en fonction du nombre de photon dN entre ν et $\nu + d\nu$: $du = \frac{\varepsilon}{V}dN$ et donc $u_\nu(\nu, T)d\nu = \frac{h\nu}{V}dN$
- On a $dN = (\rho(\nu)d\nu)N(\nu)$ avec $\rho(\nu)$ la densité d'états $N(\nu)$ nombre moyen d'occupation entre ν et $\nu + d\nu$, donné par la statistique de Bose-Einstein avec $\mu = 0$
- On calcule le nombre d'états dans d^3k pour obtenir l'expression de la densité en $\rho(\nu)$
- Rassembler tous les termes, puis reformuler du en fonction de $d\varepsilon$, puis en fréquence, et trouver la loi de Planck
- **Sur diapo** : montrer le graphe avec l'allure de la loi de Planck
- **Manip** : Acquisition du spectre de la lampe blanche, décrire l'allure (hautes fréquences et basse fréquences, λ_{max})

1.3 Applications: Etoiles et lampes à incandescences [5]

- Loi de Stefan $\Phi = \sigma T^4$, loi de déplacement de Wien $\lambda_{max}T = 2,89.10^{-3} m.K$
- Dédire qu'il est possible de déterminer la température d'un corps à partir de son spectre d'émission
- Appliquer ça à des étoiles. En profiter pour discuter de la puissance. Comparer à une centrale nuke
- Idem pour une lampe à incandescence. Parler de la couleur en température. Parler de la consommation (coût énergétique, il faut chauffer !) pour une lampe à incandescence domestique. Introduire la notion de Lumen.
- Potentiellement parler de thermographie d'une maison (cf LP19)

2 Rayonnement et niveaux d'énergie

2.1 Emission d'une source atomique

- Structure en niveau d'énergie
- Transitions électroniques entre différentes orbitales
- Cas de l'hydrogène :
 - Niveaux donnés par $E_n = \frac{-13.6 \text{ eV}}{n^2}$, calcul de l'énergie d'une transition entre deux niveaux n_1 et n_2
 - **Sur diapo** : valeurs numériques pour la série de Balmer (de $n_1 > 2$ vers $n_2 = 2$, 4 transitions dans le visible)
 - **Manip** : spectre de la lampe à hydrogène pour retrouver la série de Balmer.
- Problème de ces sources, elle sont très économes, mais pas très pratique dans la vie de tous les jours d'avoir une unique fréquence
- On utilise tout de même des lampes à vapeurs de sodium pour les éclairages publics

2.2 Fluorescence et phosphorescence

- Transitions non radiatives entre différents états : on a abaissement de l'énergie, et donc longueur d'onde plus haute \Rightarrow changement de couleur
- **Sur diapo** : quinine dans le Schweppes
- **Manip** : fluo sur une feuille de papier en éclairant à la lampe UV
- (Si possible, parler de phosphorescence. Transition et réarrangement des spins qui créent des transitions beaucoup plus longues)
- Parler des tubes à néon, des ampoules basse consommation, et des sorties d'urgences (tritium)

3 Diodes électroluminescentes

3.1 Structure de bandes

- Jonction PN
- Modéliser simplement le semi conducteur comme un élargissement des niveaux en bandes

- parler rapidement de bandes de conduction, de valence, et énergie de gap
- **Manip** : Montrer le spectre élargi comparé à la lampe à vapeur d'hydrogène. Selon le matériau, énergie de gap différente : couleur différente, le montrer sur la plaquette.

3.2 Intérêt technologique

- Taille beaucoup plus réduite, calcul du nombre de LED d'une tablette d'un dm^2 4K
- Très économe : 100 lumen/W : 10 fois plus économes que les lampes à fluorescence, 100 fois plus que les lampes à incandescence
- Permet des éclairages très optimisés : panneaux LED (éclairage au cinéma, écran OLED)
- Permet d'encoder de l'information très facilement avec une combinaison RGB

Conclusion

Ouvrir sur les domaines de fréquences non abordés dans la leçon. Ondes radio et rayonnement dipolaire, rayons X et synchrotron.

Manipulations, ressources

- Animation loi de déplacement de Wien pour différents corps : https://phet.colorado.edu/sims/html/blackbody-spectrum/latest/blackbody-spectrum_en.html
- Manips de spectro : spectro, doublet, filtre AC, lampe QI, lampe à hydrogène, LED avec plaquette associée

Questions, Remarques :

Questions :

- Couleur du Soleil ? Influence de l'atmosphère (diffusion Rayleigh), lumière directe et indirecte. Variation de la puissance rayonnée par diffusion ? En $\frac{1}{\lambda^4}$. On élimine le bleu, reste rouge + vert = jaune pour la vision.
- Fluorescence : transitions non radiatives ? Processus collisionnels : effet Auger.
- Fluorescence VS phosphorescence ? Couplage spin-orbite et passage par un état métastable, de durée de vie beaucoup plus longue : le phénomène dure après avoir éclairé le système.
- Unité du SI qui caractérise l'intensité du rayonnement ? La candela cd. Lien avec le lumen par un angle solide.
- Deux "cas limites" pour la loi de Planck ? Loi de Wien à grande fréquence, loi de Rayleigh-Jeans à basse fréquence (catastrophe UV).
- Définition corps noir ? Toute la lumière reçue est absorbée. La notion d'équilibre thermique est une autre hypothèse.
- Rayonnement thermique dépend de la nature du matériau ? Oui, c'est le rayonnement **d'équilibre** thermique qui ne dépend que de la température. Cf [6].
- Potentiel chimique des phonons ? $\mu = 0$ (voir [5]).
- Rayonnement thermique naturel dans l'univers ? Fond diffus cosmologique, cf [2], complément VI.G p.919.
- Le rayonnement seul peut-il être à l'équilibre ? Non : modes du champ EM indépendants (équations de Maxwell linéaires, pas de couplages entre modes). Pour le GP : collision sur les parois qui permettent l'équilibre, possibilité de faire une analogie pour introduire
- Terre = CN ? Non, atmosphère, albédo, voir [4]. Principe de l'effet de serre ?
- Conditions de l'approximation dipolaire ?
- Dans un premier temps, rayonnement synchrotron pénalisant car pertes d'énergie (en pratique, on minimise l'accélération centripète en prenant des grands rayons, de plusieurs km). D'autres synchrotrons sont maintenant de vraies machines à rayonnement (exemple de SOLEIL). Applications multiples !
- Caractéristiques du rayonnement d'une antenne ? Rayonnement non isotrope, condition sur la taille pour les antennes $\frac{\lambda}{2}$.
- Lien absorption-émission ? Loi de Kirchhoff.

Remarques :

- Attention à bien décorrélérer corps noir et
- Autres parties possibles : rayonnement dipolaire, cas du laser. Le plan développé ici est tout à fait recevable, mais bien préciser en intro à quels phénomènes on va s'intéresser, et mentionner en conclusion ceux qu'on aborde pas (se préparer à des questions dessus !). Ici, pour garder un fil rouge autour de "comment s'éclairer", on se restreint au spectre du corps noir et aux spectres de raies/bandes.
- Penser à une démo plus simple pour la loi de Planck ?
- Par définition, 1 lumen correspond au flux lumineux émis dans un angle solide de 1 stéradian par une source lumineuse isotrope (ponctuelle uniforme) située au sommet de l'angle solide et dont l'intensité lumineuse vaut 1 candela.
- Le flux lumineux est la grandeur photométrique qui caractérise la puissance lumineuse d'une source, telle qu'elle est perçue par l'œil humain. Le flux lumineux est le flux énergétique, c'est-à-dire la puissance électromagnétique rayonnée, pondéré par la sensibilité de l'œil humain, normalisée par la fonction d'efficacité lumineuse spectrale, aux différentes longueurs d'onde.
- Bonne leçon, les manips sont ici bienvenues ! (sans trop en faire non plus)