

LP00 – Titre

29 juin 2020

Laura Guislain & Pascal Wang

Niveau :

Commentaires du jury

Bibliographie

✍ *Le nom du livre, l'auteur*¹

→ Expliciter si besoin l'intérêt du livre dans la leçon et pour quelles parties il est utile.

Prérequis

➤ prérequis

Expériences

☞ Biréfringence du quartz

Table des matières

1	Rayonnement et bilan radiatif	3
1.1	Emission, absorption, réflexion	3
1.2	Flux radiatif	5
1.3	Rayonnement d'équilibre	5
2	Lois du rayonnement d'équilibre thermique	7
2.1	Loi de Planck	7
2.2	Loi de Wien	8
2.3	Loi de Stefan	8
3	Le corps noir	9
3.1	Définition	9
3.2	Corps noir à l'équilibre thermique	11
3.3	Température de la Terre et effet de serre	12
3.3.1	Applications	12

Applications. Diu CMB. Effet serre (bup) http://bupdoc.udppc.asso.fr/consultation/article-bup.php?ID_fiche=21046

Préparation

Biblio : Ma fiche thermo 7+thermo 5, Brébec thermo spé, livres de prépa, Gié pour le I/. Fiche et Diu pour le II/Sanz pour III/.

Plan : il faut réfléchir à la réorganisation : par ex direct parler de corps noir en I/, expliquer l'équilibre thermolocal, pourquoi le soleil émet un rayonnement d'équilibre et donc faire un plan en deux parties : I/ description II/ lois du RET. En l'état, la partie III fait bizarre.

Passage : Aller vite et efficacement sur les définitions, en faisant des schéma clairs. Faire la démonstration de la loi de Planck clairement. Si on a du retard, passer vite sur stefan et wien, on peut toujours ajuster avec l'effet de Serre.

Questions : démo des lois utilisés (nombre de modes...), lire wiki Soleil, grandeurs photométriques : densité spectrale, luminance, émittivité, pouvoir émissif, conversion densité spectrale de puissance en λ et en ν .

Introduction

Modes de transfert thermique Vous connaissez déjà les différents modes de transfert thermiques : vous avez déjà étudié la diffusion thermique, et entendu parler de la convection. Ces deux modes de transfert ont comme point commun qu'ils nécessitent la présence d'un milieu matériel pour être effectifs (ex : barre de cuivre, eau qui bout...). Dans ce cas, comment expliquer la sensation de chaleur que l'on ressent en plein soleil, alors que nous sommes séparés de lui par 150 millions de km de vide ? Cela s'explique par l'existence d'un troisième mode de transfert thermique, dont vous avez également entendu parler au lycée : le rayonnement.

QI sur thermomètre

Matériel : 2 thermomètres, 1 QI. Faire focaliser la QI sur un des thermomètres, la température augmente ! Le passage du courant dans le filament de la lampe QI provoque l'échauffement de ce dernier. L'agitation thermique provoque alors l'émission d'un rayonnement dans le visible. Ce rayonnement est ensuite focalisé sur le premier thermocouple qui absorbe une partie du rayonnement causant alors son échauffement. Ce n'est pas la présence du filament chauffé dans le voisinage qui cause l'échauffement (l'effet est beaucoup plus faible, et l'expérience marcherait dans le vide).

Rayonnement thermique Le rayonnement thermique est associé à un transfert d'énergie qui est caractérisé par :

- un échange d'énergie à distance
- la non nécessité d'un milieu matériel : la Terre reçoit de le rayonnement émis par le Soleil. C'est différent de la convection et de la conduction.

Spectre du soleil On montre le spectre du Soleil. On peut analyser la lumière du Soleil qui nous parvient en mesurant son spectre d'énergie, qui montre en ordonnée, une quantité proportionnelle à l'énergie contenu dans une longueur d'onde. On observe des raies d'absorption dues à l'atmosphère, *les raies de Fraunhofer*. Lorsqu'on s'en affranchit en faisant des mesures dans l'espace, on constate un spectre continu. Pourtant, the spectroscopy of monoatomic gases, such as He, Ne, shows that they emit only certain discrete frequencies, determined by the electronic structure of the atoms.

Dans cette leçon, on va voir étudier le rayonnement d'équilibre thermique, qui possède un spectre continu riche, issue de la thermalization.

Universalité https://www.youtube.com/watch?v=Psvo_XEc784 A small ball of iron and a chunk of brick are placed inside a muffle furnace that has been preheated to about 1000 C. The interior walls and heating elements of the hot furnace have a bright, yellowish glow to them. The samples of iron and brick, on the other hand, are at room temperature (about 25 C) when they are first inserted, and so their brightness and color make them stand out against the hot background. The samples are heated for about 30 minutes, which is enough time for both of them to reach the same temperature as the interior of the furnace. When the door is opened, we see that the samples glow with nearly equal intensity and color as their surroundings !

Dans certaines conditions, des corps différentes portés à la même température émettent un rayonnement similaire.

Objectif On a d'abord introduire les outils, étudier le spectre et voir des applications.

1 Rayonnement et bilan radiatif

1.1 Emission, absorption, réflexion

➤ suivre Gié.

Puissance et de flux surfacique d'énergie Pour décrire les échanges d'énergie entre le rayonnement et la matière, on introduit la notion de puissance transmise et de flux surfacique d'énergie. Nous appelons puissance transmise P (en W) à travers une surface S l'énergie traversant une surface S par unité de temps. On fait un schéma. Ainsi, si une surface élémentaire dS reçoit par rayonnement une puissance totale dP , le flux surfacique est défini tel que $dP = \phi dS$, et s'exprime en W/m^2 . **ODG**: la Terre reçoit du Soleil 1.3 kW/m².

Processus d'interaction matière rayonnement Nous allons dans un premier temps définir les différents phénomènes intervenant lors de l'interaction de la matière avec un rayonnement électromagnétique : On prépare un schéma avec flèches et couleurs. On introduit les notations au fur et à mesure.

- **Emission.** Il s'agit du rayonnement électromagnétique émis par un corps porté à une certaine température. Cette émission a pour cause de nombreux processus, comme le rayonnement des électrons mis en mouvement par l'excitation thermique, sous forme d'ondes électromagnétiques. L'énergie interne est ainsi convertie en énergie radiative. Nous notons φ_e le flux surfacique correspondant à l'émission.
- **Absorption.** Il s'agit de la conversion inverse. Le rayonnement absorbé par la matière est converti en énergie interne. Nous noterons φ_a le flux surfacique absorbé. *L'absorption qui apporte ainsi de l'énergie au milieu absorbant favorise l'émission sur la frontière et on comprend que l'émission sera d'autant plus importante que l'absorption sera plus grande, c'est important pour le corps noir.*
- **Réflexion et diffusion.** Le rayonnement incident sur une paroi peut être renvoyé par la paroi dans une autre direction dans le milieu d'incidence par interaction avec la paroi mais sans absorption. Les phénomènes concernés peuvent être la simple réflexion (obéissant aux lois de Descartes) ou la diffusion qui consiste à un renvoi étalé dans toutes les directions même pour une direction incidente unique. Le verre dépoli, le papier, les tissus... sont des substances diffusantes. *Réflexion et diffusion s'effectuent sans changement de fréquence des ondes. La proportion de réflexion spéculaire ou diffuse dépend de la nature du matériau et de l'interface. Les lois géométriques de la réflexion ne s'appliquent qu'à la réflexion spéculaire ; il faut faire appel à des modélisations plus complexes pour traiter la réflexion diffuse.* Notons φ_r le flux surfacique de retour dans le milieu d'incidence.

Convention Pour la commodité des bilans tous les flux seront comptés positivement. Cela revient à prendre le vecteur unitaire dS normal à l'élément de surface toujours dans le sens du flux considéré : vers l'extérieur pour les flux sortants, vers l'intérieur pour des flux entrants.

Flux incident, partant La conservation de l'énergie exige dans ces conditions que :

$$\varphi_i = \varphi_r + \varphi_a$$

On définira également un flux surfacique partant φ_p . Ce flux cumule le flux φ_r mais aussi le flux émis φ_e par le corps au voisinage de la frontière. La conservation de l'énergie implique que :

$$\varphi_p = \varphi_r + \varphi_e$$

Milieux idéaux Un milieu est dit totalement transparent s'il transmet intégralement le rayonnement qu'il reçoit. Il n'y a donc ni absorption, ni réflexion, ni diffusion. A l'inverse un milieu est dit totalement opaque s'il ne transmet aucune fraction de rayonnement qu'il reçoit. Le rayonnement incident est donc soit absorbé, soit réfléchi ou diffusé, ces phénomènes pouvant intervenir de façon concomitante.

Milieux réels Un milieu réel n'absorbe pas ou n'est pas transparent pour tout le spectre. On utilise plutôt la notion de fenêtre (intervalle de fréquences ou de longueur d'onde) d'absorption/de transparence. **ODG:** verre : transparent dans le visible mais opaque entre $4\ \mu\text{m}$ et $30\ \mu\text{m}$. Si le corps humain est opaque dans le visible, il est en revanche transparent aux rayons X, propriété largement utilisée dans le domaine médical. De même le verre est transparent dans le visible et opaque dans l'UV, ce qui explique qu'on ne bronze pas derrière une vitre ensoleillée. Cette dernière remarque est encore nuancer : si une vitre est tout à fait transparente de face dans le visible, elle ne l'est plus sur la tranche ! Il faut prendre en compte la longueur de pénétration.

Alternative : cas limites Le bilan énergétique se simplifie lorsque certains termes sont nuls.

- $\phi_r = \phi_a = 0, \phi_i = \phi_t$: le corps est dit parfaitement transparent. C'est, avec une bonne approximation le cas de la plupart des gaz aux températures ordinaires.
- $\phi_a = \phi_t = 0, \phi_i = \phi_r$: le corps est dit parfaitement réfléchissant. Un métal en est une bonne approche.
- $\phi_r = \phi_t = 0, \phi_i = \phi_a$: un tel corps qui absorbe tout le rayonnement incident, indépendamment de sa direction et de sa composition spectrale est appelé corps noir.

On pourrait introduire le corps noir du III/ dès maintenant.

Cadre d'étude Nous considérons les échanges d'énergie rayonnante entre corps opaques placés dans un milieu transparent. Nous raisonnons en un point de la surface d'un corps opaque.

1.2 Flux radiatif

⚡ Gié.

Flux surfacique radiatif Le flux surfacique radiatif φ^R est défini par :

$$\varphi^R = \varphi_p - \varphi_i = \varphi_e - \varphi_a$$

qui exprime le bilan entre flux partant et flux incident. φ^R mesure effectivement le flux surfacique du rayonnement global au point considéré de la frontière du milieu opaque. C'est donc cette quantité qui intervient dans les bilans énergétiques globaux. On notera que le signe de φ^R dépend de celui de $\varphi_e - \varphi_a$, c'est-à-dire de la prédominance de l'émission ou de l'absorption. φ^R est ici compté positivement pour un flux émis vers l'extérieur de la paroi absorbante du corps opaque.

Équilibre radiatif (detailed balance) On dit qu'un corps opaque est en équilibre radiatif avec le champ de rayonnement qui l'entoure si la condition :

$$\varphi^R = 0$$

est satisfaite. Cette condition d'équilibre ne suppose pas a priori un équilibre thermique. Nous reviendrons sur ce point tout au long du chapitre.

L'équilibre radiatif implique (i) l'égalité $\varphi_p = \varphi_i$ entre les flux partant et incident (ii) l'égalité $\varphi_e = \varphi_a$ entre les flux émis et absorbés. On a seulement des égalités sur les rapports. Different materials have different thermal emission and absorption properties.

1.3 Rayonnement d'équilibre

⚡ Gié.

Système et milieu Le système est constitué d'un corps opaque placé dans un milieu transparent isotrope non dispersif d'indice ~ 1 : la vitesse des ondes électromagnétiques y est donc égale à c quelle que soit la fréquence.

Équilibre thermodynamique, conséquences On suppose l'équilibre thermodynamique, qui implique l'équilibre thermique à une température T et l'équilibre radiatif des corps opaques avec le rayonnement dans lequel ils baignent (mais la réciproque est fautive). *Bien faire la différence entre équilibre thermique, thermodynamique, et radiatif. Équilibre thermodynamique $\Rightarrow$ équilibre thermique $\Rightarrow$ équilibre radiatif! Attention réciproque fautive! (Équilibre thermodynamique : équilibre thermique + mécanique + chimique). Équilibre radiatif thermique = rayonnement d'équilibre thermique = équilibre thermique + équilibre radiatif.*

Rayonnement d'équilibre thermique Un corps opaque plongé dans un milieu transparent, avec lequel il est en équilibre thermodynamique, à la température T , émet un rayonnement électromagnétique, qualifié de rayonnement d'équilibre thermique.

Origine microscopique du rayonnement d'équilibre The black body radiation arises from all conceivable interactions between the electromagnetic field and the "black body" - from bremsstrahlung, the electric dipole radiation, magnetic dipole radiation, and so on, and so on. *In practice is that it's generally a combination of line-emission and Bremsstrahlung, with Bremsstrahlung dominating at high temperatures ($T > 10^6 - 10^7 K$). Lines are produced at myriads of frequencies depending on the substance of interest, and the thermodynamic properties (e.g. temperature). For everyday objects, I think the emission is primarily from molecular-vibrational lines. Individual lines are spread out by numerous thermodynamic broadening effects to cover larger portions of the spectrum. In practice, you'll still see emission/absorption lines imprinted, and additional sources of radiation. Bremsstrahlung (German for 'braking radiation') is radiation produced by the acceleration of charged particles - most often electrons. This can happen between any combination of bound (in atoms) or unbound (free or in plasma) charges.*

Propriétés du RET Dans ces conditions le champ de rayonnement que nous baptisons RET pour rappeler que l'équilibre est à la fois radiatif et thermodynamique possède des propriétés particulières que nous allons préciser.

- Ce rayonnement correspond à un spectre continu. Dans l'intervalle de longueurs d'onde $\lambda, \lambda + d\lambda$, le champ de rayonnement RET est caractérisé par une densité volumique d'énergie électromagnétique du (en $J \cdot m^{-3}$) telle que :

$$du = u_\lambda d\lambda \quad (u_\lambda \text{ en } J \cdot m^{-4})$$

On fait le lien avec le spectre du Soleil montré en introduction. Le spectre solaire est continu comme un rayonnement d'équilibre thermique.

- La fonction u_λ dépend seulement de λ et de la température d'équilibre. Elle définit toutes les propriétés du rayonnement d'équilibre thermique. [On fait le lien avec l'introduction : deux corps différent dans un four on la même couleur.](#)

Conséquences de l'équilibre radiatif On relie le flux incident à la densité d'énergie électromagnétique. Or à l'équilibre, le flux incident est le flux émis. On fait le calcul sur une fenêtre $[\nu, \nu + d\nu]$ [On fait un schéma clair.](#) D'autre part l'équilibre radiatif est satisfait pour tout intervalle spectral $\lambda, \lambda + d\lambda$. Cela est exigé par la condition d'équilibre thermodynamique. La condition d'équilibre radiatif dans l'intervalle $\lambda, \lambda + d\lambda$ s'écrit

$$d\varphi_{i\lambda} = d\varphi_{p\lambda} = d\varphi_\lambda^0$$

où $d\varphi_{i\lambda}$ et $d\varphi_{p\lambda}$ désignent les flux surfaciques hémisphériques de rayonnement incident et partant pour cet intervalle de longueurs d'onde, avec φ_λ^0 leur valeur commune.

Lien entre F et u [On fait un schéma et on dit juste qu'avec l'isotropie du rayonnement, avec des considérations géométriques, en intégrant sur une demi-sphère, on obtient un lien entre \$F\$ et \$u\$:](#)

$$d\varphi_{i\lambda} = \frac{cu_\lambda}{4} d\lambda$$

ou encore :

$$d\varphi_{i\lambda} = d\varphi_{p\lambda} = d\varphi_\lambda^o = F_\lambda d\lambda$$

avec

$$F_\lambda(\lambda, T) = \frac{cu_\lambda(\lambda, T)}{4}$$

Les fonctions F_λ aussi bien que u_λ définissent les propriétés du rayonnement d'équilibre RET. On mesure en pratique F_λ mais on étudie u_λ avec la théorie.

Changement fréquence-longueur d'onde

$$\begin{aligned} -u_\nu d\nu &= u_\lambda(\lambda, T) d\lambda \\ , F_\nu(\nu, T) &= \frac{c}{4} u_\nu(\nu, T) \end{aligned} \quad (1)$$

Pourquoi cela ne dépend que de ω et T ? Some insight into this question is provided by the following consideration, due to Einstein. The interaction between matter and radiation boils down to transitions between energy levels : given two levels a and b , with respective energies $E_a < E_b$, emission corresponds to an upgoing transition $a \rightarrow b$, while absorption correspond to a downgoing transition $b \rightarrow a$. The rate of these transitions, $\Gamma_{a \rightarrow b}$ and $\Gamma_{b \rightarrow a}$, is what controls at the microscopic level the absorptivity and emissivity of the body. Now, the condition of thermal equilibrium fixes the probabilities of each levels, through the Gibbs distribution $p_{a,b} \propto e^{-\frac{E_{a,b}}{k_B T}}$. But, and this is the key point, it has no bearing on the transition rates $\Gamma_{a \rightarrow b}$ and $\Gamma_{b \rightarrow a}$ themselves, but only on their ratio. Indeed, in this microscopic perspective, thermal equilibrium translates into the condition of detailed balance, according to which the probability flux between microstates cancel exactly :

$$p_a \Gamma_{a \rightarrow b} = p_b \Gamma_{b \rightarrow a}$$

This leads to

$$\frac{\Gamma_{a \rightarrow b}}{\Gamma_{b \rightarrow a}} \propto e^{-\frac{\hbar \omega_{ab}}{k_B T}}$$

in which the RHS is a function of the transition frequency ω_{ab} and temperature only. Kirchhoff's law (universalité de l'ERT) is a consequence of this constraint on the transition rates imposed by detailed balance. *In fact, Einstein derived the Bose-Einstein distribution from detailed balance, understanding that both spontaneous and stimulated emission are required for the coexistence of thermal radiation and thermal matter.*

Pourquoi un rayonnement continu ? Les atomes isolés émettent de la radiation qui prend des longueurs d'onde discrètes. Pourquoi le rayonnement d'équilibre thermique serait continu ? Cela est dû au processus de thermalisation, qui enrichit le spectre. Par exemple, dans un gaz, les collisions entre atomes et photons peuvent donner un spectre continu d'énergie. Dans un solide, modes de vibration du cristal sont continues (car il y a 10^{23} atomes). Plus généralement, les charges accélérées par agitation thermique peuvent rayonner continûment et les vibrations internes des molécules ont des spectres larges (se rappeler des spectres IR de bandes). *Le spectre continu peut venir d'électrons libres, qui ont une énergie cinétique continue et qui sont décélérés (Bremsstrahlung). A circulating electron in a magnetic field emits cyclotron radiation due to the acceleration involved. The frequency here is centered around the inverse of the loop time, but there appear also broadening, ie other neighboring frequencies as discussed here. Si on réalise un four, les raies des atomes du four ne vont pas apparaître de manière privilégiée dans le spectre car il y a absorption*

et émission aux parois en conservant l'énergie. (Diu). De plus, dans un four, les modes sont quantifiés mais si le four est grand, le spectre apparaît continu.

Apport de la thermodynamique Lorsque ces nombreux échanges entre matière et rayonnement se font (la thermalisation), toute la collection de processus qui interviennent de manière compliqués. The virtue of thermodynamics and/or statistical physics is that even though this situation may look messy, the statistical/thermal properties of the resulting radiation may be exactly predicted as long as we know the temperature T of equilibrium. Statistical physics or thermodynamics don't have to study any particular collection of many such interactions one-by-one because, as one may show using the thermodynamic or statistical methods, the resulting thermal properties and statistical distributions for the photons are completely universal.

2 Lois du rayonnement d'équilibre thermique

2.1 Loi de Planck

Historique Le flux surfacique spectral du rayonnement d'équilibre thermique d'équilibre a été étudié expérimentalement pendant la deuxième moitié du XIXème siècle. Rayleigh s'appuya sur la thermodynamique pour obtenir un modèle théorique de la répartition spectrale de son énergie. Ce modèle était uniquement compatible avec l'expérience pour les grandes longueurs d'onde. En revanche, cette théorie ne correspondait pas aux mesures réalisées pour des petites longueurs d'onde. Par exemple, elle prévoyait qu'un corps à température ambiante devait émettre un rayonnement très intense dans l'ultraviolet. Cette divergence aux petites longueurs d'onde fut appelée la catastrophe ultraviolette. [On montre un graphe](#). En 1900, Planck présente sa loi pour laquelle il a supposé que les échanges d'énergie électromagnétique sont quantifiés, avec pour quantum $E = h\nu = hc/\lambda$. Puis en 1905, Einstein introduit la notion de photon pour interpréter l'effet photoélectrique.

Objectif : loi de Planck On va utiliser la physique statistique pour démontrer la loi de Planck.

Thermalisation Un rayonnement dans une cavité suit les équations de Maxwell qui sont linéaires. Donc, deux modes de fréquence distinctes sont indépendants et si par exemple un excès d'énergie s'accumule dans l'un de ces modes, il n'y a aucune raison pour qu'il se "déverse dans l'autre". Moralité, c'est le couple corps opaque-rayonnement qui peut prétendre à l'équilibre thermodynamique. La thermalisation se fait avec les parois ou le milieu d'indice 1.

Notes sur la démonstration  ma fiche. [Le facteur 2 dans la loi de Planck vient du spin des photons. Mais il faut se rappeler qu'à l'époque, la notion de photon n'était pas encore établie. Du coup on peut l'expliquer classiquement en disant que la superposition de 2 polarisations \(circulaire droite et gauche\) suffisent pour obtenir toutes les autres. Pour les questions, se rappeler que le nombre de photon n'est pas conservé, on tombe en fait sur la distribution de Bose-Einstein avec potentiel chimique nul.](#)

Succès du modèle On montre les courbes numériques pour plusieurs températures. Le modèle colle très bien aux mesures expérimentales de l'époque, même si Planck doute de la réalité physique de ses calculs. La catastrophe ultraviolette est résolue et on a une amélioration par rapport à la loi empirique de Wien (la même sans le "-1" du dénominateur). A basses longueurs d'onde, on trouve la loi de Wien et à hautes longueurs d'onde la loi de Rayleigh-Jeans.

Les paramètres sont seulement la fréquences et la température

Vérification expérimentale La vérification expérimentale de cette loi nécessite, par exemple, le dispositif envisagé en partie 3 : la cavité avec un petit trou. [On peut en parler dès maintenant](#).

Comparaison avec le soleil Le soleil a un spectre qui correspond au RET d'un corps à 5600 K. Quel est le lien avec la boîte ? En fait, dans la démonstration précédente, la boîte n'a pas d'importance. Elle peut être rendue aussi grande que possible.

Application : pyromètre à deux couleurs On compte 2 inconnues : l'amplitude du rayonnement (atténuation géométrique par exemple) et la température. Il suffit de mesurer la densité spectrale en deux longueurs d'onde différentes pour remonter à la température. C'est le pyromètre à deux couleurs.

Observation du spectre On montre : <https://www.youtube.com/watch?v=bQ3p5s4spzk> le spectre gagne en intensité et se déplace vers le bleu à haute température, comme prédit.

↓ Le maximum dépend de la température comme on le voit sur les courbes

2.2 Loi de Wien

Intervalle significatif ➤ Gié. 98% de la puissance émise est contenue dans l'intervalle $0.5 < \lambda/\lambda_{max} < 8$.

Enoncé La loi dite du "déplacement" de Wien indique que pour une température T les fonctions $F_\lambda(\lambda, T)$ et $u_\lambda(\lambda, T)$ sont maximales pour une longueur d'onde λ_m telle que :

$$\lambda_m T = C \simeq 3000 \mu\text{m.K}$$

Cette relation découle directement de la formule de Planck. Elle peut être établie en supposant F_λ proportionnelle à $\lambda^{-5}g(\lambda T)$ où g est une fonction de la seule variable λT . C'est ce qui fut fait par Wien sans connaître la forme explicite de la fonction g établie ultérieurement par Planck. Mais la valeur numérique de la cte dépend évidemment de l'expression explicite de g . La loi de Wien indique que ce spectre se "déplace" vers les courtes longueurs d'onde (ou vers les fréquences élevées) lorsque la température croît. La valeur λ_m donne l'ordre de grandeur de la partie du spectre qui prédomine.

Ordres de grandeur Application of Wien's law to human-body emission results in a peak wavelength of

$$\lambda_{\text{peak}} = \frac{2.898 \times 10^{-3} \text{K} \cdot \text{m}}{305 \text{K}} = 9.50 \mu\text{m}$$

For this reason, thermal imaging devices for human subjects are most sensitive in the 7 – 14 micrometer range : c'est l'IR (caméra infrarouge). Pour le Soleil, dans le visible. Pour le rayonnement cosmologique diffus à 3K ?

Application Le pyromètre à disparition de filament. ➤ HPrepa Brebec. https://www.youtube.com/watch?v=Psv0_XEc784. C'est l'idée de faire se correspondre couleur et température. On compare l'émittance monochromatique de l'image de la source, fournie par l'objectif, à celle d'un filament alimenté par une intensité réglée pour faire correspondre les couleurs et qui a été étalonné au préalable. Cette technique est toujours utilisée, notamment pour la mesure de température dans les fours servant à la fusion des métaux réfractaires (four solaire d'Odeillo, près de Font-Romeu dans les Pyrénées-Orientales).

Bonus : couleur du Soleil La couleur du Soleil vient de la combinaison de 3 facteurs : son spectre d'émission (qui définit sa couleur d'origine), la réponse spectrale du milieu traversé (ici, l'atmosphère terrestre) et la sensibilité spectrale de notre détecteur (soit notre œil). En réalité, le Soleil émet une lumière globalement blanche. Mais les petites molécules gazeuses de notre atmosphère (O₂, N₂, CO₂, vapeur d'eau) dévient dans toutes les directions les courtes longueurs d'onde de cette lumière solaire, du violet au bleu (diffusion Rayleigh). Ainsi, le ciel prend-il sa couleur azur et le Soleil, amputé du bleu, tire-t-il vers le jaune ! Les cellules photoréceptrices de l'œil apportent ensuite des nuances, centrées sur les jaunes, propres à chaque sensibilité.

2.3 Loi de Stefan

Historique Cette loi a été établie expérimentalement par Stefan en 1879, donc avant la loi de Planck, puis justifiée théoriquement par Boltzmann en 1884 avec une démarche de thermodynamique classique.

Enoncé Calculons la valeur de $\varphi_i = \varphi_p = \varphi^0$ sur la totalité du spectre RET, de manière à exprimer les flux surfaciques hémisphères totaux pour le rayonnement RET. On a :

$$\varphi^0 = \int_0^\infty \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \left(\exp\left(\frac{hc}{k_B \lambda T}\right) - 1 \right)^{-1} d\lambda$$

Soit en posant : $x = \frac{hc}{k_B \lambda T}$

$$\varphi^0 = \frac{2\pi k_B^4}{h^3 c^2} \int_0^\infty \frac{x^3 dx}{\exp(x) - 1} T^4$$

L'intégrale $\int_0^\infty \frac{x^3 dx}{\exp(x) - 1}$ est purement numérique et vaut $\frac{\pi^4}{15}$ d'où :

$$\varphi^0 = \frac{2\pi^5}{15} \frac{k_B^4}{h^3 c^2} T^4 = \sigma T^4$$

La constante universelle σ , dite constante de Stefan a pour valeur, avec

$$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s. et } k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1} :$$

$$\sigma = \frac{2\pi^5}{15} \frac{k_B^4}{h^3 c^2} = 5,670 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

La loi de Stefan s'avère d'une importance capitale dans toutes les questions relatives au rayonnement thermique. Elle marque l'importance de la température qui intervient avec l'exposant 4 Cette loi fut découverte expérimentalement dès 1879 par Stefan à propos du rayonnement du corps noir.

Application : Human-body emission The human body radiates energy as infrared light. The net power radiated is the difference between the power emitted and the power absorbed : $P_{\text{net}} = P_{\text{emit}} - P_{\text{absorb}}$ Applying the Stefan-Boltzmann law,

$$P_{\text{net}} = A\sigma\varepsilon (T^4 - T_0^4)$$

where A and T are the body surface area and temperature, ε is the emissivity, and T_0 is the ambient temperature. The total surface area of an adult is about 2m^2 , and the mid-and far-infrared emissivity of skin and most clothing is near unity, as it is for most nonmetallic surfaces. Skin temperature is about 33°C ,^[37] but clothing reduces the surface temperature to about 28°C when the ambient temperature is 20°C . Hence, the net radiative heat loss is about

$$P_{\text{net}} = 100\text{W}$$

The total energy radiated in one day is about 8MJ, or 2000kcal (food calories). Basal metabolic rate for a 40-year-old male is about $35\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ which is equivalent to 1700 kcal per day, assuming the same 2m^2 area. However, the mean metabolic rate of sedentary adults is about 50% to 70% greater than their basal rate :

There are other important thermal loss mechanisms, including convection and evaporation. Conduction is negligible - the Nusselt number is much greater than unity. Evaporation by perspiration is only required if radiation and convection are insufficient to maintain a steady-state temperature (but evaporation from the lungs occurs regardless). Free-convection rates are comparable, albeit somewhat lower, than radiative rates. Thus, radiation accounts for about two-thirds of thermal energy loss in cool, still air. Given the approximate nature of many of the assumptions, this can only be taken as a crude estimate. Ambient air motion, causing forced convection, or evaporation reduces the relative importance of radiation as a thermal-loss mechanism.

↓ La nature spécifique des corps intervient, par contre, dans les expressions des flux émis φ_e et absorbé φ_a qui dépendent en général, non seulement de la température, mais aussi de la nature du corps. Nous allons considérer à cet égard un cas important : celui du corps noir.

3 Le corps noir

3.1 Définition

⚡ Gié.

Définition ⚡ Gié. Le corps noir est défini comme un absorbeur intégral sur la totalité du spectre : tout rayonnement thermique incident est absorbé quel que soit sa longueur d'onde et quelle que soit sa direction incidente. Ainsi, par définition :

$$\varphi_{i(CN)} = \varphi_{a(CN)}$$

et

$$d\varphi_{i(CN)} = d\varphi_{a(CN)} \quad (d\varphi_r = 0)$$

pour tout intervalle spectral $\lambda, \lambda + d\lambda$ Le concept d'absorbeur intégral est. un concept idéal. Nous indiquerons plus loin comment s'approcher le plus près possible de cette définition très contraignante. L'absorption totale ou quasi totale pour une substance donnée n'est observée que dans certains domaines spectraux ou "fenêtres spectrales".

Conséquence La relation $d\varphi_r = 0$ implique également que :

$$d\varphi_p = d\varphi_e$$

sur tout le spectre et :

$$\varphi_p = \varphi_e$$

Le flux partant d'un corps noir est totalement d'origine émissive : il n'y a pas de contribution due au rayonnement réfléchi ou diffusé.

Corps noir en équilibre radiatif Supposons un corps noir en équilibre radiatif avec le rayonnement et d'autres corps opaques présents. L'équilibre radiatif implique que : $\varphi^{(R)} = 0$ d'où il découle que :

$$\varphi_{a(CN)} = \varphi_{eCN}$$

et également pour l'intervalle $\lambda, \lambda + d\lambda$:

$$d\varphi_{a(CN)} = d\varphi_{e(CN)}$$

Le corps noir en équilibre radiatif émet tout le rayonnement qu'il absorbe On déduit également de (21) et de (22) les égalités :

$$d\varphi_{a(CN)} = d\varphi_{e(CN)} = d\varphi_{i(CN)} = d\varphi_{p(CN)}$$

et

$$\varphi_{a(CN)} = \varphi_{e(CN)} = \varphi_{i(CN)} = \varphi_{p(CN)}$$

sur l'ensemble du spectre ¹⁰ Il n'y a finalement qu'un seul flux surfacique à considérer. Si on suppose, en outre, l'équilibre thermodynamique (RET) à la température T , les flux obéissent à la loi de Planck soit :

$$d\varphi_{a(CN)} = d\varphi_{e(CN)} = d\varphi^0 = F_\lambda(\lambda, T)d\lambda$$

et aux lois qui en découlent (lois de Wien et de Stefan). En particulier, sur toute l'étendue du spectre, on aura :

$$\varphi_{a(CN)} = \varphi_{e(CN)} = \sigma T^4$$

selon la loi de Stefan.

Différence entre corps noir et corps de couleur noire Un corps noir est un objet idéal qui absorbe parfaitement tout rayonnement incident quelque soit sa longueur d'onde et un corps de couleur de noire est un objet réel qui absorbe presque parfaitement les longueurs d'onde du visible. A l'équilibre thermodynamique, un corps noir est coloré, puisqu'il émet un spectre continu de longueurs d'ondes. In its standard definition, a blackbody is one that “absorbs all incident light” - a black body. This fact alone should disturb the mindful student : how can a body be black, and yet emit a colourful spectrum of thermal light ? In any case, what should the absorptive power of a body have anything to do with the characteristics of its thermal emission ?

Un corps noir est un absorbeur idéal, mais on parle souvent de son spectre d'émission idéal : le lien est fait par l'équilibre radiatif $\varphi_a = \varphi_e$. Un absorbeur idéal à l'équilibre radiatif est un émetteur idéal.

In a dark room, a black body at room temperature appears black because most of the energy it radiates is in the infrared spectrum and cannot be perceived by the human eye.

Différence avec la partie précédente Dans la partie précédente, on a montré des lois sur les flux incident et partant mais on ne pouvait rien dire sur les flux absorbés/émis. Pour le corps noir, on peut identifier les deux !

Réalisation pratique On construit une enceinte rigide maintenue à une température constante et percée d'une très petite ouverture. Tout rayonnement incident rentrant dans l'enceinte ne pourra jamais en ressortir, quelle que soit sa fréquence ; le rayonnement se propage, se réfléchit sur les parois, sillonne le four en tout sens et finit par trouver son équilibre. [On fait un schéma.](#) Il est essentiel de noter que dans cette réalisation c'est la petite ouverture qui fonctionne comme un corps noir. C'est en fait une pastille de corps noir que nous venons de fabriquer. Enfin que se passe-t-il lorsque le corps noir que l'on considère n'est pas en cavité (le soleil par exemple) ? Et bien nous admettons que ce qu'il émet est identique à ce qu'il émettrait en cavité, mais que ce qu'il absorbe peut-être très différent. [On fait un schéma..](#)

Nous pouvons aussi réaliser de façon très approximative un corps noir en recouvrant une surface d'une couche de noir de fumée (particules de carbones obtenues lors de la combustion incomplète d'un hydrocarbure par exemple), d'où le nom de « corps noir ». L'exemple du thermomètre recouvert de noir de fumée : l'efficacité de l'absorption du rayonnement est mise en évidence par sa température plus élevée que celle du thermomètre témoin.

Corps réel Le corps noir est un modèle/cas idéalisé. pour pouvoir l'appliquer à des objets réels, comme pour les milieux transparents/opaque, il faut définir des fenêtres d'absorption. Il convient d'abord de situer la (ou les) fenêtre d'absorption par rapport au spectre du rayonnement d'équilibre RET pour la température T du corps absorbant. En gros, on peut dire que le corps est un excellent absorbeur pour ce rayonnement si 1 a fenêtre d'absorption assez large est centrée sur la longueur d'onde λ_m qui correspond au maximum de la fonction de Planck $F_\lambda(\lambda, T')$ à la température T . Ainsi le verre peut être considéré comme totalement absorbant pour le rayonnement thermique d'origine terrestre pour lequel $T \simeq 300K$, $\lambda_m \simeq 10\mu m$ Cette propriété est utilisée dans les serres.

Nature de l'approximation du corps noir, however, one apparently innocuous step undermines the understanding of its applicability : the radiation field is assumed to be enclosed in a box. This prompts students to think that the Planck spectrum is the one radiated by a black box. This is true, of course, but also very misleading. If the blackbody radiation is really the blackbox radiation, why should stars, which are not enclosed in boxes, have a Planckian spectrum? Why should hot metal bars, bulb filaments, incandescent lava or the background of the universe have a Planckian spectrum?

Epaisseur optique Solving with the initial condition $u(l=0, \omega) = 0$, we find

$$u(l, \omega) = \left(1 - e^{-\alpha(\omega)l}\right) J_T(\omega)$$

In particular, we see that if $\alpha(\omega)l \gg 1$, the so-called 'optically thick' limit, the observed energy density is given by $J_T(\omega)$, which is nothing but the Planck spectrum. In other words, the coefficient $\alpha(\omega)$ measures the rate of convergence of the emitted light to its equilibrium value $J_T(\omega)$ – the blackbody approximation is just the condition that $\alpha(\omega)l \gg 1$. This is achieved not only for good absorbers ($\alpha(\omega)$ large), but also for objects involving long optical paths (l large).

This is precisely what a closed cavity does : it provides the conditions for this convergence process to take place, whatever the intrinsic properties ε and α of the material within the cavity. The box, in other words, is a useful expedient for the actual production of thermal radiation in the laboratory when the hot body is not black : it permits to reach the optically thick limit even if the absorptivity is low, because it generates very long paths l within the material.²⁵ But the presence of a box is of course not a necessary condition for the thermalization of light : stars too are optically thick - and this is why their spectrum looks Planckian.

L'important, c'est d'absorber beaucoup et de thermaliser : produit $\alpha\ell$. On peut soit avoir un absorbeur idéal α grand ou de grandes longueurs de parcours ℓ comme dans une cavité.

3.2 Corps noir à l'équilibre thermique

Equilibre thermodynamique Le corps noir en équilibre thermodynamique émet tout le rayonnement qu'il absorbe. On dispose alors des lois de Planck, Wien, Stefan pour les flux absorbés et émis (sauf si le corps noir n'est pas convexe, alors une partie du rayonnement émis est réabsorbé $\phi < S\sigma T^4$, la surface qui compte c'est l'enveloppe convexe (surface convexe minimale qui entoure le corps)).

Equilibre thermodynamique local L'équilibre thermodynamique est une condition très restrictive, mais il est possible d'étendre ces notions à un corps noir à l'équilibre thermodynamique local. Pour cela, on suppose que les couches superficielles du corps noir sont localement isothermes. Cela n'implique pas l'équilibre thermodynamique avec les autres parties du système, en particulier avec les couches internes. Par conséquent, on ne connaît pas les propriétés du rayonnement à l'intérieur du système. On ne peut alors rien dire sur le flux surfacique incident et par ricochet sur le flux surfacique absorbé. S'il y a ETL pour les couches superficielles dont la température est T , la loi de Planck est toujours valable, donc les lois de Wien et de Stefan-Boltzmann aussi. Cette situation est souvent rencontrée pour des objets réels, c'est pour cette raison que le modèle du corps noir est fondamental dans l'étude du rayonnement thermique.

La notion qui doit ressortir ici, c'est surtout que le corps noir garde un spectre d'émission de Planck même lors qu'il n'est pas en équilibre radiatif, mais à la seule condition qu'il soit en équilibre thermique.

L'extension de la loi de Planck (et des lois dérivées) pour le corps noir hors équilibre thermodynamique a des conséquences importantes car recouvre des situations très fréquentes dans la pratique.

Remarque Quand on applique la loi de Stefan, il faut toujours préciser dans quel cas on est :

- Equilibre thermodynamique : $\phi_i = \phi_p = \sigma T^4$
- Corps noir à l'équilibre thermodynamique : $\phi_i = \phi_p = \phi_{a(CN)} = \phi_{e(CN)} = \sigma T^4$
- Corps noir à l'équilibre thermodynamique LOCAL (pas nécessairement global) : $\phi_{e(CN)} = \sigma T^4$

Cas du Soleil Si on considère, par exemple, le soleil, l'étude du rayonnement qu'il émet montre qu'il est voisin de celui d'un corps noir de température de l'ordre de 6000° C. La couche superficielle responsable de l'émission est appelée photosphère¹¹. Sa température d'équilibre local est voisine de cette valeur. Quant aux rayonnements émis par les couches profondes du soleil (dont la température est beaucoup plus élevée, de l'ordre de : 10⁷K) ils sont totalement absorbés par la photosphère.

Ce modèle marche bien pour le Soleil. On peut considérer la couche externe du Soleil comme un corps noir dans le visible puisqu'elle absorbe l'intégralité du rayonnement venant de l'intérieur du Soleil (sans quoi on le verrait par

transparence) et nous ré-émet donc un spectre de Planck. [graphe] On considère également que la Terre est un corps noir en première approximation car son albédo moyen est de l'ordre de 0.3 (l'albédo de l'eau, des forêts etc...est de l'ordre de 0.05, et les neiges et les nuages augmentent le total) **On fait un schéma.** Courbe rayonnement Soleil vs corps noir à 6000 degrés. La température donnée précédemment pour le Soleil correspond en fait à la température à sa surface. Les couches plus profondes du soleil sont de température beaucoup plus élevée **ODG:** 15 millions de K. mais leur rayonnement est absorbé par la photosphère. *Les étoiles sont de bons corps noir car leur coeur est très absorbant pour toutes les longueurs d'onde (garder en tête qu'un photon émis au coeur du soleil met en gros 10^6 ans à sortir).* Cependant, il n'y a pas d'incohérence avec le fait d'observer des raies dans le spectre d'une étoile, car le rayonnement émis par le coeur est réabsorbé par les couches superficielles. Le Soleil est jaune : pourquoi on dit que c'est un corps noir ? Il est en équilibre thermodynamique local (chaque couche se comporte comme un corps noir), jusqu'à la dernière couche qui donne ce qu'on voit (la photosphère)

3.3 Température de la Terre et effet de serre

🔗 Fiche et Sanz PC

La fonte de la banquise et des glaciers diminue d'ailleurs l'albedo de la Terre et accélère de ce fait le réchauffement climatique

Conclusion

Ouverture : Importance du transfert radiatif dans les modèles atmosphériques, aussi utilisés pour modéliser des exoplanètes, dont les Jupiter chaud, fortement irradiées, qui présentent des rayons enflés par rapport aux modèles classiques 1D : c'est l'énigme des rayons enflés. Graphe. Récemment, des simulations numériques ont montré qu'un mécanisme possible et dû au dépôt de l'énergie radiative profondément dans l'atmosphère, dû à la circulation 3D.!!!!!!!

Nous avons pu voir dans cette leçon que le rayonnement d'équilibre thermique présentait un spectre d'énergie continu, défini par la loi de Planck, qui n'est elle-même fonction que de la température du corps et de la fréquence, et pas de la nature du corps considéré. Les lois qui découlent de la celle de Planck permettent de comprendre de nombreuses applications de la vie quotidienne, comme les caméras infrarouges ou l'effet de serre, un phénomène naturel qui permet d'obtenir une température terrestre confortable (à condition, bien sûr, qu'il ne s'emballe pas), lorsqu'on utilise le modèle du corps noir. L'étude du rayonnement du corps noir a marqué un tournant décisif dans la physique moderne en conduisant à la quantification de l'énergie, donc à la MQ. ET c'est grâce à la loi de Wien qu'on définit la température des corps au-dessus de 900degC (valeur à vérifier). Ouverture alternative : porte ouverte pour la MQ

Conclusion

Planck's law for blackbody radiation is celebrated as a landmark in the history of physics, being the first physical law conflicting patently with classical mechanics. Derived in 1900, it is usually regarded as the igniter of the century of quantum mechanics. But its relevance goes beyond quantum mechanics. Blackbody radiation is a striking example of universality in statistical mechanics - the light radiated by a blackbody does not depend on its constitution, only on its temperature -, a topic which came to the foreground with the later studies of critical phenomena. More recently, Planck's distribution has appeared to fit with an astounding accuracy the cosmic microwave background (deviations are at most 50 per million), thus opening the era of precision cosmology

Ouverture :

Compléments/Questions

Compléments

3.3.1 Applications

Le pyromètre à disparition de filament. 🔗 HPrepa Brebec. C'est l'idée de faire se correspondre couleur et température. On compare l'émittance monochromatique de l'image de la source, fournie par l'objectif, à celle d'un filament alimenté par une intensité réglée pour faire correspondre les couleurs et qui a été étalonné au préalable. Cette technique est toujours utilisée, notamment pour la mesure de température dans les fours servant à la fusion des métaux réfractaires (four solaire d'Odeillo, près de Font-Romeu dans les Pyrénées-Orientales).

Pyromètre à deux couleurs On fait le rapport à deux longueurs d'ondes différentes, c'est uniquement fonction de la température !

Caméra infrarouge Une caméra thermique enregistre les différents rayonnements infrarouge (ondes de chaleur) émis par les corps et qui varient en fonction de leur température. Il existe des version refroidies (à quelques K) pour que les capteurs ne soient pas aveuglés par leur propre radiation thermique.

Cryostat à hélium

Rayonnement cosmique à 3K Il paraît que l'Univers est rempli d'un rayonnement distribué selon une loi de Planck du corps noir, sa température est voisine de 3K. Il paraît réparti dans les diverses direction de façon isotrope. 0.6 millions d'années après le Big Bang, lorsque la température atteinte 3000 K, le rayonnement qui était en équilibre thermique avec les particules matérielles, cesse pratiquement d'interagir avec elles car température est assez basse pour former des noyaux et des atomes : à cause de la disparition des électrons libres, la section efficace d'interaction photon-matière chute, c'est le découplage rayonnement-matière. A cause de l'expansion de l'univers, les longueurs d'onde s'allongent et donc la température équivalente du corps noir diminue : il est de 3K aujourd'hui.

Rayonnement de Hawking L'évaporation des trous noirs, dite rayonnement de Hawking, est le phénomène selon lequel un observateur regardant un trou noir peut détecter un infime rayonnement de corps noir, appelé rayonnement de Hawking (ou parfois rayonnement de Bekenstein-Hawking), émanant de la zone proche de son horizon des événements. Il a été prédit par Stephen Hawking en 1975, et est considéré comme l'une de ses plus importantes réalisations.

Grandeurs photométriques L'émittance est le flux lumineux par unité de surface d'une source étendue L'émittance spectrale est la densité spectrale multipliée par $c/4$. L'émissivité correspond au flux radiatif du rayonnement thermique émis par un élément de surface à température donnée, rapporté à la valeur de référence qu'est le flux émis par un corps noir à cette même température. Cette dernière valeur étant la valeur maximale possible, l'émissivité est un nombre inférieur ou égal à l'unité.

Vase Dewar Le vase Dewar (calorimètre) est constitué d'une double paroi entre lesquelles le vide a été fait, ceci pour éviter les pertes par conduction. De plus, les parois du vase ont été argentées afin de minimiser les pertes par rayonnement.

Questions

- Que peut-dire la thermodynamique sur le rayonnement du corps noir ? En faisant un calcul de pression de radiation, on peut avoir l'équation d'état : $PV = U/3$ et ensuite trouver la loi de Stefan $U \propto T^4$.
- D'où vient le facteur $c/4$ ou la normalisation en 4π dans la loi de Stefan ?
- Que peut-on dire des autres corps, pas noirs ? Corps gris, coefficient de d'absorption. Emissions de raies discrètes pour les atomes.
- Lampe quartz iode, qu'est-ce qu'il y a dedans ? La lampe à incandescence halogène produit de la lumière en portant à incandescence un filament de tungstène, mais des gaz halogénés (iode et brome) à basse pression ont été introduits dans une ampoule en verre de quartz supportant les hautes températures et permettant la régénération du filament, au moins partiellement, ce qui augmente la durée de vie de l'ampoule. La lampe à incandescence halogène fonctionne par sublimation de ses atomes de tungstène, le filament vaporise de la matière ; Du fait de la température de l'ampoule, les vapeurs de tungstène ne se déposent pas sur le verre de quartz mais s'associent avec le gaz halogène ; Par convection naturelle, le gaz se rapproche du point chaud et les atomes de tungstène se déposent à nouveau sur le filament sous l'effet de la chaleur, mais de façon aléatoire.
- Caméra infrarouge.
- Effet de serre.
- Comment savoir que les photons sont des bosons ? Avec la vérification de la loi de Planck, plusieurs photons peuvent occuper le même état.
- Comment savoir que les photons ont un spin de 1 ? Expérience de Beth, transfert de moment cinétique à une balance de torsion.
- Corps noir à gauche, corps noir à droite, piston entre les deux, que se passe-t-il ? La pression de radiation pousse le piston. Cela change si le piston est opaque ou réfléchissant ? Cela divise la pression de radiation par 2 mais l'équilibre reste le même.

- Equilibre radiatif sans équilibre thermique ? La convection dans le Soleil.
- Effet Casimir ? L'effet Casimir est une force attractive entre deux plaques parallèles conductrices et non chargées, dû aux fluctuations quantiques du vide.
- Preuve de l'existence des quanta de lumière ? Effet photoélectrique, mais plutôt l'anticorrélation avec une lame séparatrice (kimble).
- Quand on fait de la conduction/convection, transfert conducto-conductif, on oublie le rayonnement thermique ? C'est pris en compte dans le coefficient de transfert conducto-conductif.
- Dans la loi de Planck, on interprète maintenant la distribution de Bose-Einstein (terme numéroté 2 dans la leçon) comme dénombrant le nombre de photons. Mais si la notion de photon n'était pas encore établie à cette époque, qu'est ce qu'a dénombré Planck ? Quanta d'énergie échangés
- Loi de Wien : comment est-elle utilisée en pratique, par exemple pour évaluer les fuites thermiques d'un bâtiment ?
- Y a-t-il incompatibilité entre le fait qu'un corps noir émette un spectre continu et le fait qu'une étoile contienne des raies d'émission dans son spectre ? Non car absorption ensuite par les couches superficielles.
- Le Soleil est jaune ; pourquoi on dit que c'est un corps noir ? équilibre thermodynamique local (chaque couche se comporte comme un corps noir), jusqu'à la dernière couche qui donne ce qu'on voit (photosphère)
- Différence entre coefficient d'émissivité et émittance ?
- Répartition de la température au sein du Soleil ?
- Quelle hypothèse rajouter au modèle avec atmosphère pour pouvoir l'améliorer ?
- Comment passer de la distribution d'énergie en fonction de la longueur d'onde à celle en fonction de la fréquence ?
- Pourquoi un objet peut absorber toutes les fréquences alors que la matière est décrite par la MQ ? Pas un seul atome, mais BOCO d'atomes et donc densité d'états ENORME et alors continuum d'énergie
- A priori pour que deux photons interagissent, il faut de la matière, est-ce toujours vrai ? A haute énergie, processus non linéaires qui permettent que des événements à proba très très faible de se produire
- Un rayonnement qui n'interagit plus avec la matière ? Le fond diffus cosmologique (il n'a pas interagit depuis sa création)
- Raisonnement de Planck : qu'est-ce qu'il dénombre (référence à la distribution de Bose-Einstein qui apparaît dans la loi de Planck, puisque la notion de photon n'est pas encore établie à cette époque ? Pourquoi un facteur 2 dans le dénombrement ? Comment l'expliquer simplement à des élèves ? Facteur 2 : projection de la polarisation du photon sur l'axe du spin, à l'époque on pouvait l'expliquer par le fait que toute polarisation est un CL de circulaire gauche et droite.
- Définition mathématique d'une surface convexe ?
- flux, quelles conventions ? dimension ? tous les flux sont positifs sauf le flux radiatif qui est algébrique (bilan)
W/m²
- démonstration de la loi de Planck en quelques lignes ? rayonnement = photons ; on dénombre les modes énergétiques et on multiplie par $h\nu$ et la distribution de Bose
- aspect particulier du gaz de photon ? le nombre de particules n'est pas fixé (fluctuations du champ) ; on peut se ramener à potentiel chimique nul
- Origine microscopique du rayonnement thermique ? Pourquoi obtient-on un spectre continu et non discret ? L'excitation thermique (par chauffage ou par interaction avec un rayonnement) provoque une mise en mouvement des électrons qui émet un rayonnement thermique (car toute charge accélérée émet un rayonnement). Il n'y a pas de discrétisation de l'énergie, pas de desexcitation... donc c'est un spectre continu et non discret.
- Définir un coefficient d'absorption. OG papier blanc, neige, océan...

- Equilibre radiatif : équilibre statique ou dynamique ? Equilibre dynamique : équilibre ne veut pas forcément dire qu'il n'y a plus d'échange. Ils se font juste à la même vitesse et avec la même intensité. (Cf vitesse de réaction en chimie)
- Validité de la loi de Planck ? Rayonnement est à l'équilibre thermique avec un thermostat de température T .
- Limites de la loi de Planck ? A basse longueur d'onde et à hautes longueurs d'ondes ?
- Qu'est-ce que la catastrophe ultraviolette ? Invalidité de la loi de Rayleigh-Jeans dans les hautes fréquences.
- Pourquoi un feu de cheminée éclaire ? Combustion incomplète, particules de carbones présentes dans la flamme sont chauffées et rayonnent.
- Notion d'albédo ? Définition ? Pouvoir réfléchissant d'une surface.
- Domaine d'émission des plantes vertes dans une serre ? IR.
- Tu dis que Wien/Rayleigh/Planck ont comparé les modèles aux manips. Comment ces manips étaient-elles réalisées à l'époque ? Avec quelle précision ? Quelle précision as-tu avec l'expérience de disparition du filament ?
- Peux-tu dire quelques mots sur le rayonnement fossile à 3K ?
- Tu as dit que le Soleil fournit 330 W/m² à la Terre. Quelle surface de panneaux solaires est alors nécessaire pour produire autant qu'une centrale nucléaire ? (on prendra un rendement de 10%) Comparer à la surface de la France. À quelle surface par habitant cela correspond-il ?
- Qu'est-ce que l'émissivité ?

Commentaires

- I/ Thermodynamique II/ Corps noir quantique III/
- Parler de puissance échangée plutôt que transmise.
- Donner plus d'ODG.
- Astlangul.
- Les élèves doivent savoir manipuler une caméra infrarouge.