

LP17 : Rayonnement d'équilibre thermique. Corps noir

Prérequis :**Niveau : L3**

- Modes de transferts thermiques : rayonnement
- Notion d'onde électromagnétique
- Notion de flux
- Physique statistique : densité d'états, gaz de photons, nombre d'occupation, statistique de Bose-Einstein

Bibliographie :

- 📖 *H-Prépa de thermodynamique*, p77 [1]
- 📖 *Thermodynamique*, S. Olivier, H. Gié, p459 [2]
- 📖 *Physique Statistique*, B. Diu, C. Guthmann, D. Lederer, B. Roulet, p818 [3]
- 📖 Vidéos E-learning Physique sur Youtube : Effet de serre-bilan radiatif de la Terre [4]

Rapports de jury :

2017 : *Les bilans radiatifs doivent être traités de manière rigoureuse.*

2015 : *Cette leçon ne doit pas se réduire à énoncer des lois historiques sans aucun élément de démonstration.*

2014 : *Le/la candidat(e) doit être capable de faire le lien entre la définition du corps noir énoncée pendant la leçon et les exemples choisis pour l'illustrer. S'il/elle choisit de ne pas en faire la démonstration, le/la candidat(e) doit être capable de donner l'origine des différents termes de la loi de Planck et savoir l'énoncer correctement en fonction de la fréquence et de la longueur d'onde.*

2010 : *L'intérêt de la notion de corps noir, et son lien avec celle de rayonnement d'équilibre, doivent apparaître clairement. Des bilans radiatifs dans des situations concrètes permettent alors de mettre en œuvre cette notion. Les lois de base du rayonnement thermique sont établies en situation d'équilibre ; il convient de s'interroger sur la validité de leur application à des situations hors-équilibre.*

Introduction générale de la leçon :

Vous avez tous déjà sûrement remarqué que lorsque vous bronzez le Soleil chauffe votre peau. Le mode de transfert thermique à l'origine de cette sensation est le rayonnement. Observons ce qui se passe quand on bronze pour comprendre les propriétés du transfert thermique par rayonnement.

Il n'y a pas de contact entre nous et le Soleil, cela se fait donc à distance. De plus, il n'y a pas nécessité d'y avoir un milieu matériel pour la propagation (contrairement aux autres modes de transfert thermique que vous connaissez, la conduction et la convection.).

Ces propriétés sont donc en accord avec le fait que le rayonnement repose sur le transport d'énergie par les ondes électromagnétiques, et cette énergie est ensuite transférée à la matière. Une autre manifestation du rayonnement peut être lorsqu'on chauffe un métal, à partir d'une certaine température, on observe que celui-ci émet un rayonnement qui peut être rouge jusqu'à blanc. [diapo : métal chauffé](#)

Dans cette leçon, on va plus particulièrement s'intéresser à cet aspect du rayonnement, en étudiant le rayonnement d'un corps chauffé. On étudiera notamment le rayonnement du corps noir et on verra aussi quelles peut être l'utilité de l'étude du rayonnement et comment on peut appliquer cela.

Proposition de plan :

I) Le rayonnement du corps noir

On va donc avoir pour but d'étudier en particulier le rayonnement du corps noir (que l'on définira plus tard). Mais dans cette leçon, on ne va pas s'intéresser au rayonnement en général, on va se limiter à l'étude d'un type de rayonnement, qu'on appelle le rayonnement d'équilibre thermique, ce qui va nous permettre de trouver des lois qui régissent ce rayonnement.

1) Rayonnement d'équilibre thermique

On va donc commencer par donner des définitions pour tenter de comprendre ce qu'est le rayonnement d'équilibre thermique qu'on cherche à étudier.

Dans rayonnement d'équilibre thermique, il y a tout d'abord la notion de rayonnement thermique.

Rayonnement thermique : Rayonnement dû à l'agitation thermique des particules du corps.

La plupart des rayonnements sont thermiques, mais ATTENTION il existe quand même des exemples courant de rayonnements qui ne sont pas thermiques : c'est le cas des lampes spectrales, dont la lumière émise est due à des transitions énergétiques des atomes.

On a également la notion d'équilibre, qui va donc nous donner que :

Rayonnement d'équilibre thermique : Rayonnement émis par un corps à l'équilibre thermodynamique (=échanges d'énergie avec l'extérieur sont nuls) à la température T et radiatif. (noté ERT, pour équilibre radiatif et thermodynamique)

Remarque : avoir un rayonnement thermique est nécessaire pour pouvoir définir une température et donc avoir un équilibre thermodynamique. Donc le rayonnement d'équilibre comme on le définit est forcément thermique. C'est pourquoi dans beaucoup de livres on ne parle que de rayonnement d'équilibre pour parler de rayonnement d'équilibre thermique. De plus, dans la définition du rayonnement d'équilibre thermique, on notera que la condition d'équilibre thermodynamique implique celle d'équilibre radiatif, mais la réciproque est fausse. [2]

Transition : Pour mieux expliquer cette définition, on va faire ce qu'on appelle des bilans énergétiques et donc étudier l'interaction entre un rayonnement et la matière.

2) Interaction rayonnement/matière [1]

Pour ces bilans, on va beaucoup manipuler la notion de flux, qui peut être surfacique donc en $W.m^{-2}$ ou non donc en W, et qui est une puissance transmise au corps considéré.

[diapo : description flux, flux radiatif, cadre de l'étude](#)

Dans notre leçon, on va se concentrer sur les corps opaques.

A l'équilibre radiatif, on a :

$$\phi_R = 0$$

Ce qui implique que :

$$\begin{cases} \phi_i = \phi_p \\ \phi_a = \phi_e \end{cases} \quad (1)$$

A l'ERT, on est notamment équilibre radiatif donc ces égalités seront vérifiées.

Transition : A l'ERT, le rayonnement possède des propriétés et notamment un spectre particuliers que l'on va chercher à décrire. C'est ce que va nous donner la loi de Planck.

3) Loi de Planck

Dans la deuxième partie du XIX siècle, on était capable d'observer des spectres de corps. A cette époque, on connaissait deux lois expérimentales : la loi de Rayleigh-Jeans (en 1900) (qui ne permettait pas d'expliquer le rayonnement dans les grandes fréquences : catastrophe ultraviolette !) et la loi de Wien (qui n'expliquait pas le rayonnement dans les basses fréquences)

[diapo : problème avec les deux lois](#)

En 1900 Planck présente sa théorie. Elle repose sur l'hypothèse que l'énergie serait quantifiée (ce qui sera ensuite vu comme les photons par Einstein. Cela sera à la base du développement de la mécanique quantique au début du XXème siècle.)

On va donc étudier le système suivant pour établir la loi de Planck.

Système étudié :

-corps à l'ERT

-boite cubique de côté L (volume $V = L^3$) à la température T

-dans laquelle il y a des photons qui interagissent avec la boite (chocs, absorption, émission) mais pas entre eux

Le rayonnement qui se trouve à l'intérieur va donc être caractérisé par sa densité spectrale d'énergie : u_ν (ou u_λ)

[diapo : Rappel de ce qu'est la densité spectrale d'énergie \[1\]](#)

On cherche donc du (la densité volumique d'énergie entre ν et $\nu + d\nu$. Or on a vu que : [3]

$$du = u_\nu d\nu$$

$$du = u_\nu(\nu, T) d\nu$$

↑
densité spectrale
d'énergie en fréquence

Or :

Energie individuelle d'un
photon (à de près)

Nombre de photons
entre ν et $\nu+d\nu$

$$du = \frac{\epsilon}{V} dN$$

↑
Volume de la boîte

Nombre moyen
d'occupation de l'état de
l'énergie $\epsilon=h\nu$

Densité d'états

$$dN = N(\nu, T) \underbrace{\rho(\nu) d\nu}_{\text{Nombre d'états entre } \nu \text{ et } \nu+d\nu}$$

• Calcul de $N(\epsilon, T)$: On utilise la statistique de Bose-Einstein, et le fait que pour les photons $\mu = 0$

Remarque : Le potentiel chimique n'est en réalité pas défini pour les photons car leur nombre n'est pas fixé. On le prend donc égal à zéro car les résultats sont les mêmes.

$$N(\epsilon, T) = \frac{1}{e^{\frac{\epsilon-\mu}{k_B T}} - 1} = \frac{1}{e^{\frac{\epsilon}{k_B T}} - 1} \quad (2)$$

• Calcul de $\rho(\epsilon)d\epsilon$: Cela correspond au nombre d'états dans $d^3\vec{k}$

$$\rho(\epsilon)d\epsilon = 2 \cdot \frac{d^3 \vec{k}}{\left(\frac{2\pi}{L}\right)^3}$$

Puis on utilise le fait que cela ne dépend que de la norme de \vec{k} , d'où : $d^3 \vec{k} = 4\pi k^2 dk$. On obtient finalement :

$$\rho(\epsilon)d\epsilon = \frac{V \cdot \epsilon^2}{\pi^2 \cdot (c\hbar)^3} \cdot d\epsilon \quad (3)$$

• Calcul de du :

$$du = \frac{\epsilon^3}{\pi^2 \cdot (c\hbar)^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{\epsilon}{k_B T}} - 1} \cdot d\epsilon$$

Puis on utilise le fait que $\epsilon = h\nu$ et $d\epsilon = h d\nu$, puis on identifie $u_\nu(\nu, T)$. On obtient finalement la **loi de Planck**.

Loi de Planck

$$u_\nu(\nu, T) = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{\nu^3}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1} \quad (4)$$

Remarque :

- On peut également exprimer la densité spectrale d'énergie en longueur d'onde en utilisant le fait que $c = \lambda\nu$ et $du = u_\nu d\nu = u_\lambda d\lambda$.
- De plus on constate que le résultat ne dépend pas de la nature du corps considéré, mais seulement de sa température.

[python](#) : On trace la loi de Planck pour une certaine température.

On interprète ensuite chacun des termes de la loi de Planck : **[1]**

Aux basses fréquences : **Loi de Rayleigh-Jeans**

$$h\nu \ll k_B T \Rightarrow u_\nu = \frac{8\pi\nu^2 k_B T}{c^3}$$

Aux hautes fréquences : **Loi de Wien**

$$h\nu \gg k_B T \Rightarrow u_\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \cdot e^{-\frac{h\nu}{k_B T}}$$

Remarque : On utilisera plutôt des flux que des densités d'énergie. Pour ce faire, on va utiliser le fait qu'à l'ERT et pour tout λ :

$$d\varphi_i^\lambda = d\varphi_p^\lambda$$

du fait de l'équilibre radiatif. De plus, on utilisera la relation suivante :

$$d\varphi = \frac{c \cdot u_\lambda}{4} \cdot d\lambda$$

On en déduit donc que de manière générale, la loi de Planck décrit le flux incident et le flux partant d'un corps.

Transition : Pour un corps quelconque, le flux absorbé et le flux émis ne sont, eux, pas décrits par la loi de Planck et dépendent de la nature du corps. Pour faciliter l'étude et s'affranchir de la dépendance en la nature du corps, on va considérer le corps noir.

4) Le corps noir

Corps noir : corps qui absorbe tout le rayonnement qu'il reçoit, quelque soit la longueur d'onde ou la direction du rayonnement incident.

Dans ce cas, par définition on a : $\Phi_i = \Phi_a$

On étudie le corps noir à l'équilibre. Dans ce cas, on a les relations suivantes :

$$\begin{cases} \Phi_i = \Phi_p \\ \Phi_a = \Phi_e \\ \Phi_i = \Phi_a \end{cases}$$

D'où, on obtient : $\Phi_i = \Phi_a = \Phi_e = \Phi_p$.

Donc en particulier, le flux émis par un corps noir à l'équilibre peut être décrit par la loi de Planck.

Un corps bien connu que l'on peut assimiler à un corps noir est le Soleil.

[diapo : spectre du Soleil.](#)

On constate que le spectre de la lumière émise par le Soleil semble suivre la loi de Planck pour un corps à 5800K. Donc la surface du Soleil est assimilée à un corps noir, et la température de surface du Soleil est 5800K.

Cette méthode est utilisée pour déterminer la température de surface des étoiles car on peut assimiler pour beaucoup leur spectre comme celui d'un corps noir.

Transition : On va utiliser les observations précédentes pour en déduire des conséquences importantes pour des applications plus concrètes.

II) Conséquences et application

On va donc maintenant voir comment on peut utiliser les propriétés sur le rayonnement d'équilibre thermique que l'on vient d'établir.

Tout d'abord, on va repartir directement de la loi de Planck pour en déduire des lois qui en sont la conséquence directe.

1) Loi de déplacement de Wien

ATTENTION : La loi de déplacement de Wien, n'est pas la même chose que la loi de Wien énoncée précédemment.

diapo : tracé de la loi de Planck pour différente température.

Observation : La longueur d'onde maximale sur la loi de Planck augmente quand la température diminue.

En calculant : $\frac{du_\lambda}{d\lambda}(\lambda_{max}) = 0$, on obtient

Loi de déplacement de Wien

$$\lambda_{max}T = 2.89810^3 m.K$$

Cela est cohérent avec les observations sur le spectre qu'on peut faire.

On en conclut que l'on peut obtenir directement la température de surface d'un corps uniquement avec son spectre. C'est donc une méthode très utile pour obtenir la température de surface des étoiles.

On remarque également que qualitativement un corps rouge est moins chaud qu'un corps bleu (car quand λ augmente la température diminue.)

Transition : On peut faire une deuxième observation sur les spectres précédents qui va nous permettre d'en déduire la loi de Stefan-Boltzmann.

2) Loi de Stefan-Boltzmann

diapo : tracé de la loi de Planck pour différente température.

Observation : L'aire sous la courbe augmente avec la température.

Pour calculer l'aire sous la courbe, on va calculer l'intégrale de la densité d'énergie u_λ :

$$U_S = \int_0^\infty u_\lambda d\lambda \quad (5)$$

avec U_S une énergie surfacique. Or la grandeur plus utile pour la suite est le flux surfacique noté ϕ .

On peut relier ces deux grandeurs par la relation suivante :

$$\phi = \frac{c}{4} U_S \quad (6)$$

On obtient le flux surfacique total :

$$\phi(T) = \sigma T^4 \quad \text{avec} \quad \sigma = \frac{2\pi^5 k_B^4}{15c^2 h^3} = 5,67.10^{-8} W.m^2.K^{-4} \quad (7)$$

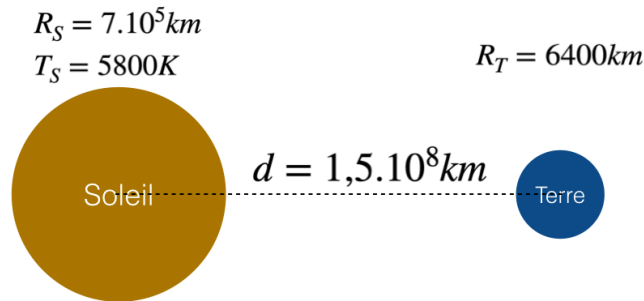
Avec cette loi on va pouvoir décrire de manière macroscopique les flux émis par un corps assimilé à un corps noir en ne connaissant que sa température.

Transition : On a vu précédemment que le Soleil pouvait être vu comme un corps noir. On va se servir des résultats précédents pour établir un modèle permettant de calculer la température de surface de la Terre.

3) Application : température à la surface de la Terre[4]

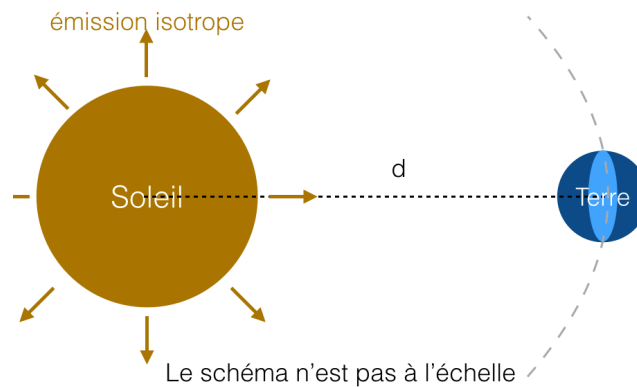
Remarque : Dans toute la suite, on différenciera les flux surfacique et total par la notation. Les flux surfaciques sont notés φ et les flux totaux sont notés Φ

Position du problème [diapo :schéma Terre/Soleil et données](#)



Le schéma n'est pas à l'échelle

Emission par le Soleil Le Soleil émet de la lumière de manière isotrope. De plus, on le considère comme un corps noir. Dans ce cas : $\varphi_S = \sigma T_S^4$. Donc la puissance totale émise par le Soleil est : $\Phi = 4\pi R_S^2 \sigma T_S^4$.



Le schéma n'est pas à l'échelle

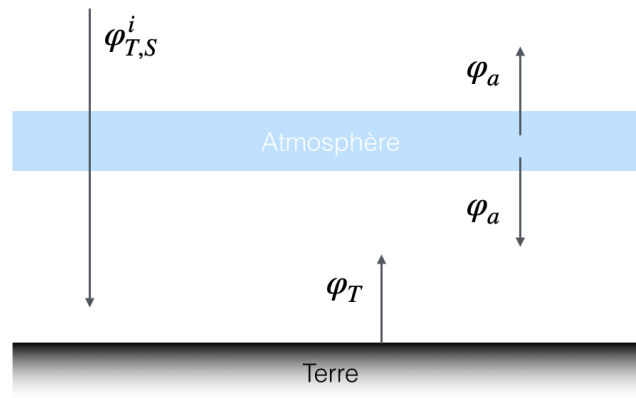
Le flux reçu au niveau de la Terre se répartit sur une sphère de rayon d . D'où le flux surfacique qui arrive au niveau de la Terre vaut : $\varphi_T^i = \frac{\Phi}{4\pi d^2}$. Enfin le flux total reçu au niveau de la Terre est obtenu en considérant la projection sur la surface efficace de la Terre, donc : $\Phi_T^i = \frac{\Phi}{4\pi d^2} \cdot \pi R_T^2$.

Au niveau de la Terre Si on considère que la Terre est un corps noir, on peut écrire : $\Phi_T^i = \Phi_T^a = \Phi_T^e$ d'où $\varphi_T^i = \varphi_T^a = \varphi_T^e = \varphi_T$. De plus, d'après la loi de Stefan-Boltzmann : $\varphi_T = \sigma T_T^4$. D'où : $\varphi_T^i = \frac{\Phi_T^i}{4\pi R_T^2} = \varphi_T = \sigma T_T^4$.

Finalement :

$$T_T = \left(\frac{R_S^2 T_S^4}{4d^2} \right)^{\frac{1}{4}} \Rightarrow T_T = 280 K = 7^\circ C \quad (8)$$

Avec atmosphère diapo : absorption des différentes longueurs d'ondes par l'atmosphère



On constate que les longueurs d'onde émises par le Soleil ne sont pas absorbées par l'atmosphère, mais la Terre ayant une température de surface autour de $T_T \approx 300K$, elle émet dans les infrarouges qui sont absorbés par l'atmosphère.

On a vu précédemment que le flux émis par le Soleil qui arrive au niveau de la Terre vaut :

$$\varphi_{T,S}^i = \frac{\Phi \cdot \pi \cdot R_T^2}{(4\pi d^2) \cdot (4\pi R_T^2)}.$$

Si on considère que l'atmosphère est un corps, donc qu'elle absorbe et qu'elle réémet tout ce qu'elle reçoit, on peut écrire : $\varphi_T = 2 \cdot \varphi_a$.

De plus, si on considère que la Terre est un corps noir également, on peut écrire : $\varphi_a + \varphi_{T,S}^i = \varphi_T$.

On obtient : $\varphi_T = 2 \cdot \varphi_{T,S}^i$.

Enfin, en utilisant la loi de Stefan-Boltzmann : $\varphi_T = \sigma T_T^4$.

D'où :

$$T_T^4 = 2^{\frac{1}{4}} \left(\frac{R_S^2 T_S^4}{4d^2} \right)^{\frac{1}{4}} \Rightarrow T_T = 333K = 60^\circ C \quad (9)$$

Le résultat obtenu est un peu élevé, il faudrait encore affiner le modèle pour obtenir une valeur correcte de la température de surface de la Terre. Mais ces modèles ont permis de montrer que l'atmosphère augmente la température moyenne de la Terre.

Conclusion :

Finalement, dans cette leçon on a établi ce qu'était le rayonnement d'équilibre thermique et comment on peut le caractériser avec la loi de Planck. On a également établi le lien avec la notion de corps noir. On a ensuite déterminé des conséquences utiles de la loi de Planck qui nous ont notamment permis de retrouver la température moyenne de la surface de la Terre.

Toutefois, on aurait pu améliorer le modèle en ne considérant pas la Terre et l'atmosphère comme des corps noir. En effet, en réalité rien n'est réellement un corps noir, le modèle est idéal mais permet tout de même de retrouver des ordres de grandeur.

Enfin ce sont aussi les écarts au modèle du corps noir qui peuvent être utiles par exemple pour connaître les compositions des étoiles.

Remarques et questions

Remarques :

- Evoquer en introduction les modes de transfert thermique : conduction, convection, rayonnement et préciser qu'il se distingue par sa non nécessité d'un support
- Très bien de distinguer le rayonnement d'équilibre du corps noir et de faire comprendre le lien étroit entre les deux (loi de Planck n'étant pas exclusivement caractéristique du corps noir)
- Insister davantage sur le fait que le rayonnement thermique ne dépend que de la température et du corps considéré
- L'approche historique est intéressante mais c'est bien de ne pas avoir centré la leçon dessus
- La manière dont a été traité l'application au calcul de la température de surface de la Terre est bien car toutes les hypothèses n'ont pas été prises mais c'est mieux d'être simple et de développer deux modèles qui encadrent le résultat et de préciser ensuite que des restrictions sont possibles.
- On peut mettre $\phi_i = \phi_a + \phi_r$ où ϕ_r contient la diffusion et la réflexion
- Connaître les différences grandeurs caractérisant le rayonnement lumineux : lumen, lux, emittance, éclairement, flux surfacique...

Questions

- Y a-t-il un nom pour le rayonnement émis par une lampe spectrale comme une lampe à vapeur de sodium ? On ne connaît pas de nom mais c'est un rayonnement émis grâce à des décharges électriques
- Pourquoi parle-t-on de catastrophe ultraviolette ? L'énergie n'est pas une grandeur infinie or, avec la loi de Rayleigh Janes, il y a une divergence de la densité spectrale de puissance dans l'UV
- Détailler le modèle de la boîte avec des photons : interaction lumière matière, les parois absorbent les photons et les réémettent pour permettre la thermalisation de la boîte
- $\mu_{photons} = 0$: le nombre de photons n'est pas fixé et il n'y a pas d'interactions entre les particules
- Pourquoi est ce que l'on ne regarde que la température de surface du Soleil ? Les photons sont émis de cette dernière
- Couleur du Soleil, pourquoi il n'est pas vert alors que $\lambda_{max} = 500nm$? Il s'agit en fait de la superposition de toutes les couleurs du spectre donc il émet de la lumière blanche par superposition de ces dernières. Il apparaît en fait jaune car l'atmosphère diffuse le bleu et on ne voit qu'une superposition de vert et de rouge soit du jaune.
- Quand on bronze, la peau chauffe, notamment à cause des infrarouges mais ce ne sont pas eux qui nous font bronzer ? Ce sont les UV
- D'où vient le $\frac{1}{(2\pi)^3}$? Des conditions aux limites périodiques et du comptage des états dans l'espace des k
- Comment s'appelle la relation $\nu = \frac{ck}{2\pi}$? Relation de dispersion
- Pourquoi a-t-on ici $d^3k = 4\pi k^2 dk$? On intègre sur une sphère, on a donc une invariance selon θ et ϕ , dépendance seule de la norme
- Tu as parlé de chocs pour des photons, comment se manifestent les interactions avec la matière ? Effet Compton, effet photoélectrique

- Comment retrouver la loi de Wien et de Rayleigh Janes ? Etude en basse fréquence et en haute fréquence à faire sur la loi de Planck – Ou alors, utiliser la statistique de Boltzman au lieu de celle de Bose Einstein (pas de quantification)
- Le soleil ne suit pas exactement la loi de Planck sur le spectre présenté : absorption de l'atmosphère depuis la Terre quand on mesure ce spectre et les parties manquantes (écart à l'idéalité du spectre) nous renseigne sur la composition d'une étoile (au niveau de la photosphère), on arrive à voir les particularités d'une étoile. On ne sait pas à quoi est due la descente du début du spectre
- Comment affiner le modèle de détermination de la température de surface de la Terre ? Si la Terre n'est plus vu comme un corps noir, on peut introduire l'albédo et tenir compte de l'absorption de l'atmosphère (qui est aussi vu comme un corps noir) qui réémet dans toutes les directions
- Est ce que la température est uniforme dans l'atmosphère ? Non, mais le modèle marche quand même : diminue de 7 K par km puis réaugmente. Donc on pouvait rectifier ça dans le modèle aussi
- Pour le phénomène d'effet de serre, l'atmosphère absorbe avec quels gaz ? vapeur d'eau principalement, puis CO₂. Les particules émises par l'Homme sont le chlorofluorocarbène (CfC et le Fréon (qui était le gaz réfrigérant dans les frigos, il absorbe beaucoup dans l'infrarouge Réchauffement climatique : on émet plus de CO₂ donc on augmente T puisque l'absorption augmente. Deuxième effet pervers : contient du chlore, du brome, des halogènes qui interviennent dans la destruction de l'ozone (catalyse de l'ozone (O₃) par les radicaux libres et les halogènes) : cycle de Chapman Le trou dans la couche d'ozone laisse alors passer les UV, mais il est en train d'être résolu, le trou se referme en partie.
- On a considéré le rayonnement émis par toute la Terre or est ce pareil partout ? Non il s'agit d'une moyenne car l'albédo dépend de la position, notamment il est modifié dans les zones glacières.
- Démonstration de la loi de Stefan. On peut le faire en intégrant la densité spectrale de puissance ou avec la pression de radiation du gaz de photons (plus simple)
- Planck a introduit la quantification parce que ça l'arrangeait, il ne croyait pas en la théorie de Boltzman. Il a trouvé h constante de Planck qui signifie aide hilfe en allemand (à la base il voulait prouver que le rayonnement induisait l'irréversibilité).
- Quelle loi lie l'émission et l'absorption, en particulier pour les corps gris ? La loi de Kirchhoff $e=a$. Le corps noir est alors vu comme l'émetteur maximal.
- Est ce que le rayonnement peut être vu comme à l'équilibre tout seul ? Non, ce sont les chocs avec les parois qui permettent la thermalisation
- Comment modélise t on l'émission d'un corps noir ? Une boîte noire avec une toute petite ouverture
- Quelle est la loi qui explique l'expansion de l'Univers ? Loi de Hubble (on risque avec cette leçon d'avoir des questions de cosmologie et de gravitation)
- Exemple de corps noir à basse température. Le fond diffus cosmologique (Diu physique statistique pour plus de détails, il explique notamment l'origine du rayonnement fossile).
- Quelles étaient les expériences possibles ? On aurait pu chauffer un métal qui rayonne, mettre une lampe sur un thermomètre et montrer que la température augmente. La mesure de température se fait avec un pyromètre à filament.
- Donner la loi de Laplace. $PV^\gamma = cte$
- Est ce que le vide existe en mécanique quantique ? Est ce que l'état de repos existe exactement ? Il existe des fluctuations du vide, elles sont mises en évidence par la force de Casimir, deux miroirs opposés se rapprochent

- Peut-on résoudre analytiquement la loi de déplacement de Wien ? La résolution fait appel à une fonction appelée la fonction de Lambert (même personnage que Beer Lambert)
- Pourquoi voit-on un point vert lumineux au centre du Soleil ? Il est lié à la réfraction des rayons dans l'atmosphère
- Comparaison de la température d'une étoile qui sera bleue avec celle du soleil : λ plus faible donc T est plus élevé
- Comment appelle-t-on la distance Terre-Soleil ? Il s'agit d'une unité astronomique
- Formule de Balmer, raies d'une étoile : il a découvert l'hélium (en particulier les hydrogénoides)