

Cours 6: Le rayonnement thermique

Imaginons que l'on place un morceau de charbon au soleil. Il est noir, ce qui veut dire qu'il absorbe toute la lumière du soleil qu'il reçoit. Il chauffe, mais il ne fond pas; cela signifie qu'il a un moyen de se débarrasser d'une partie de l'énergie qu'il reçoit du soleil. Ce moyen est le *rayonnement thermique*: un rayonnement émis par les objets du simple fait de leur température.

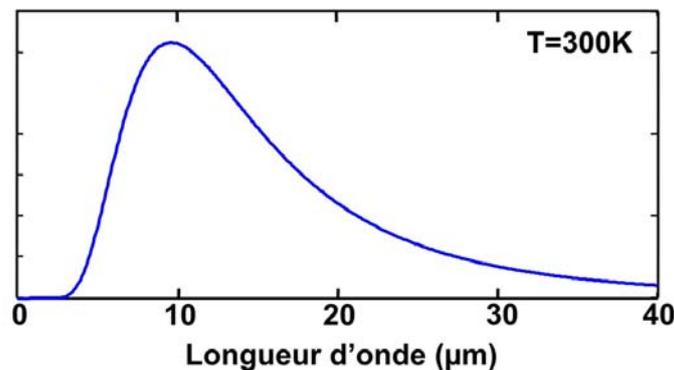
Dans le cas d'objets à température ambiante, ce rayonnement reste invisible à nos yeux car il est constitué de longueurs d'onde plus grande que les longueurs d'onde visibles : il s'agit d'un rayonnement *infrarouge*, qui ne peut-être observé qu'avec des caméras spéciales. La photographie ci dessous montre une image prise avec une telle caméra infrarouge: le petit verre contient une bougie, le grand un cocktail froid. Sur la table, on observe la trace de la présence passée de la main, qui a réchauffé la table à son contact. Les endroits chauds apparaissent plus lumineux, car le rayonnement thermique est d'autant plus intense que les objets ont une température élevée.



Crédits photo : UF CCI-Paris 7, DVD Infra-Blues

Du point de vue microscopique, le rayonnement thermique peut-être compris comme un ensemble d'ondes électromagnétiques émises par les objets, du fait de l'agitation désordonnée des électrons qui les constituent. De façon plus moderne, on dit qu'un électron dans un état excité va pouvoir se débarrasser de son énergie excédentaire en émettant un 'photon', c'est-à-dire un quantum de lumière (voir cours n°3). De manière symétrique, un photon peut être absorbé par un objet : cela implique que le photon disparaît en transférant son énergie à un électron. *Certains objets peuvent très aisément convertir une énergie lumineuse en énergie d'agitation thermique, et vice-versa* : ce sont des bons absorbants, mais également des bons émetteurs de rayonnement thermique

Un corps noir est, par définition, un *absorbant idéal* : il ne réfléchit ni ne transmet aucune lumière, se contentant d'absorber tout du fait de son interaction lumière-matière très forte. Par conséquent, un corps noir est également un *émetteur idéal de rayonnement thermique*. Le spectre d'émission d'un corps noir à une température de 300 K est présenté sur la figure ci-dessous ; on remarque l'absence de rayonnement aux longueurs d'onde visibles, et un pic d'intensité autour de la longueur d'onde de 10 μm .



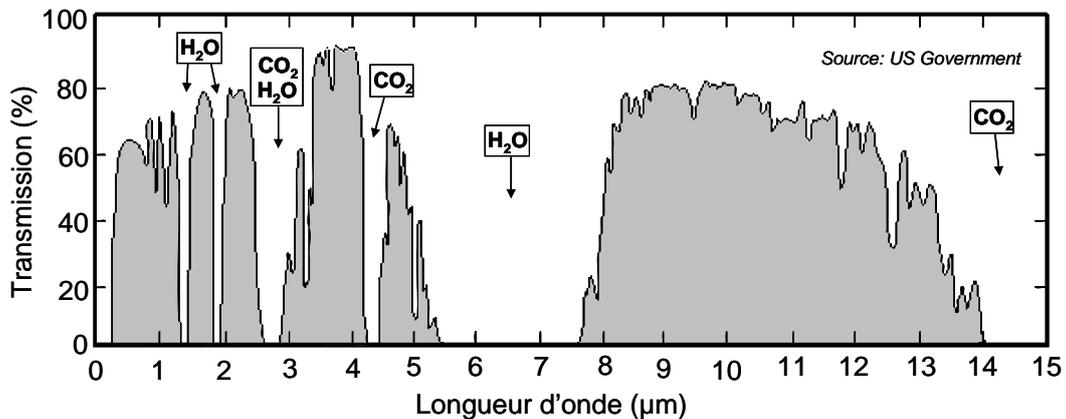
Plus un objet est chaud, plus il émet un rayonnement dans des longueurs d'onde courtes. Le maximum d'émission se situe à la longueur d'onde $\lambda = 2898/T$ (loi de Wien), où T désigne la température en Kelvins et λ la longueur d'onde en microns. C'est ainsi que le soleil ($T=5780$ K) émet une grande partie de son rayonnement dans le visible (autour de 0.5 μm). Les objets usuels ou les êtres vivants ($T\approx 300$ K) émettent dans l'infrarouge moyen, comme indiqué sur la courbe ci-dessus. Un objet chaud émet également beaucoup plus qu'un objet froid, puisque la puissance totale rayonnée par un corps noir est *proportionnelle à la puissance 4^{ème} de sa température* (loi de Stefan). Ceci explique que vous ayez si vite chaud en plaçant votre main à l'intérieur d'un four. Même si vous avez laissé la porte ouverte pendant plusieurs minutes, pour que l'air interne se refroidisse, votre main se trouve néanmoins soumise au rayonnement infrarouge très intense émis par les parois brûlantes du four.

De nombreux objets ne sont pas des corps noirs. Par exemple, les corps transparents ou les corps réfléchissants sont *incapables d'absorber les photons*, ils sont donc également *incapables d'en émettre*. Il existe également de nombreux corps *gris*, qui n'absorbent que partiellement la lumière du fait d'une interaction lumière-matière peu intense; ces corps sont également des émetteurs partiels, c'est-à-dire qu'ils émettent moins que ce qu'émettrait un corps noir. On peut montrer que de façon très générale *le pouvoir d'absorption d'un objet est simplement égal à son pouvoir d'émission* (loi de Kirchhoff).

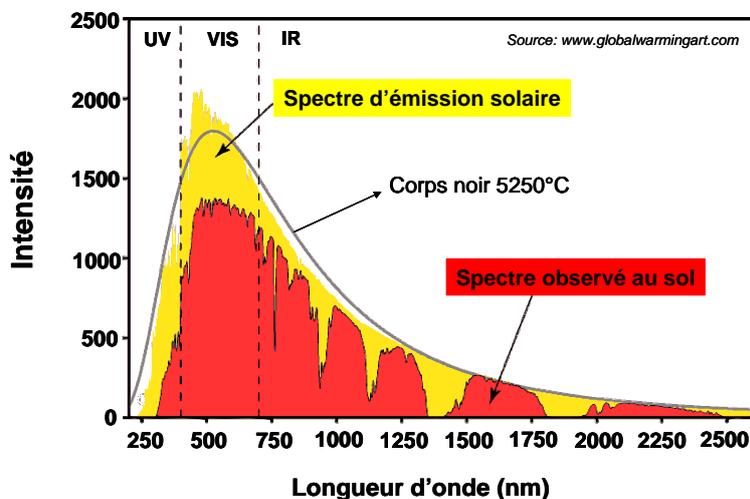
Il faut faire très attention, toutefois, à comparer ce qui est comparable, c'est-à-dire *pour une même longueur d'onde*. Un bon absorbant dans l'infrarouge sera un bon émetteur dans l'infrarouge, un mauvais absorbant dans le visible sera un mauvais émetteur dans le visible, etc... Le verre, ou l'eau, sont des exemples de corps transparents dans le visible mais absorbants dans l'infrarouge. Ainsi, si la neige fond si lentement, c'est qu'elle diffuse/réfléchit les rayons visibles émis par le soleil, mais aussi qu'elle se débarrasse efficacement de son énergie thermique par rayonnement. *La neige est donc un bon corps noir dans l'infrarouge*, indépendamment de son aspect blanc dans le visible.

L'atmosphère, dont le spectre de transmission est présenté ci-dessous, illustre bien la complexité des propriétés optiques des matériaux : elle absorbe certaines longueurs d'onde et d'autres pas, et son absorption dépend de sa concentration en gaz (en vapeur d'eau par

exemple, mais également en CO₂/méthane/ozone/etc...). L'atmosphère étant plus transparente dans le visible que dans l'infrarouge moyen, elle laisse aisément passer la lumière du Soleil. Par contre, elle laisse moins bien passer le rayonnement thermique émis par la Terre, ce rayonnement qui permet à notre planète de se refroidir. La présence de l'atmosphère tend donc à réchauffer la Terre de façon très significative : c'est le phénomène d'*effet de serre*. L'augmentation de 30% de la concentration en CO₂, au cours du dernier siècle, est ainsi la principale cause du réchauffement climatique actuel.

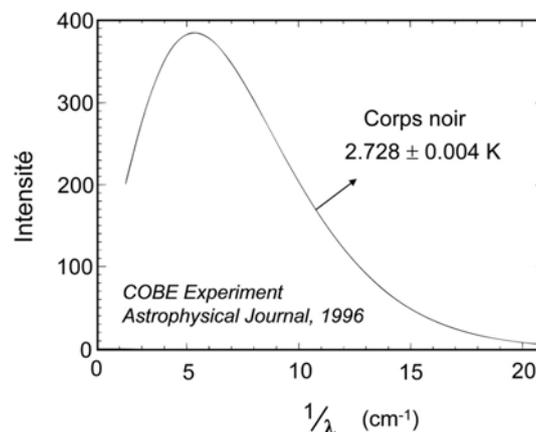


Le rayonnement du Soleil est un exemple caractéristique de rayonnement thermique, dont le spectre est présenté ci-dessous. Il correspond à une température de surface de 5250 degrés Celsius. Bien sûr, il y a encore énormément d'hydrogène et d'hélium au-delà de la « surface » du Soleil, mais simplement sous forme gazeuse et donc *transparente* : le rayonnement thermique peut donc passer. En dessous de la « surface », par contre, les noyaux et les électrons se trouvent sous forme de plasma ionisé, donc *absorbant*, donc *émetteur de rayonnement thermique*. On ne peut pas voir les photons émis par le centre du Soleil (qui sont pourtant extrêmement nombreux, la température au centre du Soleil étant de 15 millions de degrés!) car ils sont tous absorbés dans l'étoile. Les seules photons qui s'échappent sont ceux émis à la « surface du Soleil », c'est-à-dire à la transition entre le plasma ionisé (corps noir) et la zone gazeuse (corps transparent / non-émetteur). La température de cette zone de transition dépend de la composition de l'étoile en hydrogène, hélium, etc : c'est pour cela qu'il y a des étoiles de couleurs plus bleue (surface « chaude ») et d'autres de couleurs plus rouge (surface « froide ») que notre soleil.



Un corps noir que l'on pourrait qualifier d'idéal a existé il y a environ 13,7 milliards d'années : l'Univers primordial. A cette époque en effet, l'Univers n'était qu'un immense *plasma opaque*, composé d'électrons et de protons (ie, noyaux d'hydrogène), et bien sûr d'innombrables photons (qui se retrouvent absorbés à peine sont-ils émis). Ce plasma, soumis à la dilatation de l'espace, s'est progressivement refroidi jusqu'à une température d'environ 3000K. A cet instant (environ 300 000 ans après le Big-Bang) les protons se sont recombinaés avec les électrons pour former un simple gaz d'hydrogène: *l'Univers opaque est subitement devenu transparent*.

Les photons émis par l'Univers primordial, une fois libérés, se sont simplement propagés dans l'espace et peuvent être observés de nos jours. Le spectre de ce rayonnement fossile, appelé fond de rayonnement cosmologique, est présenté ci-dessous; il s'agit d'un résultat expérimental d'une précision extrême qui correspond parfaitement à un rayonnement de corps noir théorique... *à la température de 2.7K, c'est-à-dire avec des longueurs d'onde de l'ordre du millimètre* (domaine du rayonnement micro-onde).



Comment se fait-il que des photons visibles ou très proche infrarouge (longueur d'onde de l'ordre du micron), émis par un Univers à 3000K, soient devenus des photons micro-ondes ? Ils ne se sont pas « refroidis », ils se sont simplement *dilatés* en même temps que le reste de l'Univers, leur longueur d'onde augmentant progressivement jusqu'à être multipliée par un facteur supérieur à 1000. Cette expérience cosmologique illustre bien le fait que les quanta de lumière sont *délocalisés* et caractérisés par un processus ondulatoire : on peut donc parler de « la longueur d'onde du photon », expression qui paraîtrait aberrante dans le cadre de la physique classique.

Notons que ces expériences ont permis de mesurer, pour chaque point du ciel, la température du plasma primordial à l'époque de la libération des photons, et d'en déduire des informations très précises sur la géométrie et la composition de l'Univers. Ces expériences ont fait l'objet du prix Nobel de Physique, reçu par John C. Matter et Georges Smoot en 2006. Georges Smoot travaille depuis 2009 comme professeur à l'Université Paris 7 au sein du laboratoire « Astroparticules et Cosmologie ».