

LE CORPS NOIR

(basé sur *Astrophysique sur Mesure* / Observatoire de Paris :
<http://media4.obspm.fr/public/FSU/temperature/rayonnement/>)

Le corps noir est ... noir

D'où vient le terme *corps noir*? Notons tout d'abord que l'examen du spectre visible, qui ne comporte aucune partie noire et brillante, rappelle que le noir est, plutôt qu'une couleur, une *absence de couleur*. Un corps absorbant apparaît noir.

Exemples

La photo d'une façade montre des murs violemment éclairés, et des fenêtres très sombres dès lors que les vitres sont ouvertes. Il apparaît que les photons solaires sont bien réfléchis dans un cas, mais dans l'autre ont singulièrement disparu. Diffusés dans la pièce derrière la vitre, bien peu de ces photons sont ressortis, et ceci explique le contraste de luminosité entre la façade et les fenêtres ouvertes. Les différents détecteurs, qui ont pour fonction de capter la lumière visible, apparaissent noirs : ils ne réfléchissent guère la lumière !

Un corps noir peut être coloré

Une étoile, le Soleil par exemple, est présenté comme un corps noir. A basse résolution spectrale, le spectre du soleil se superpose à celui d'un corps noir de température 5777 K. Et pourtant rien n'est moins noir que le soleil. Il apparaît donc nécessaire de donner une définition précise de ce qu'est un *corps noir*... qui peut être coloré.

Le corps noir

- Un corps noir est un corps idéal totalement absorbant à toute radiation électromagnétique.
- Un exemple de corps noir consiste en une enceinte isotherme munie d'une toute petite ouverture

Ces définitions n'aident pas directement à comprendre pourquoi un corps tel une étoile est un corps noir. Le lien peut déjà apparaître, si l'on compare le rapport de 2 durées : celle prise par un photon pour traverser directement un rayon stellaire, et celle mesurant qu'effectivement l'énergie produite au sein du soleil est évacuée en surface.

Un exemple : le soleil

La traversée directe du rayon solaire à la vitesse de la lumière prend à peine plus de 2 secondes, alors qu'il faut près d'un million d'années pour que l'énergie soit extraite du soleil. Cette durée est incomparablement plus longue, car le trajet de l'énergie est une marche au hasard entrecoupée d'incessantes absorptions et réémissions de photons.

En ce sens on comprend que le soleil est très absorbant pour ses propres photons. Son spectre a l'allure de celui d'un corps noir. Il est vrai que s'y superposent des raies d'absorption:

- L'allure de corps noir rend compte de l'*équilibre thermique global*
- Les raies du spectre rendent compte de la nature de la matière solaire dans les couches superficielles d'où s'échappent les photons.

Il en résulte qu'un corps noir est défini par l'équilibre intime entre sa matière et son rayonnement. Sa température d'équilibre explicite à elle seule la distribution spectrale de son rayonnement

Qu'est-ce qu'un corps "pas noir" ?

Plusieurs phénomènes sont irréductibles aux corps noirs :

- Un miroir est par définition très réfléchissant, et ne peut donc pas être absorbant. Il n'y a aucun équilibre entre un miroir et le flux lumineux qu'il réfléchit.
- Le rayonnement émis par une lampe à vapeur spectrale obéit à des règles de quantification énergétique fixées par la nature du gaz qui émet le rayonnement. La position des raies d'émission dépend de la nature de l'élément, et pas de la température.

Spectres de corps noirs

L'observation des spectres stellaires (à basse résolution spectrale) montre que l'allure de ces spectres suit effectivement celle d'un corps noir.

Spectres stellaires

Cela n'est vrai que pour l'allure du spectre : à plus haute résolution, il apparaît clairement que se superposent à l'enveloppe du corps noir des raies en absorption. Si le spectre de corps noir ne dépend que de la température d'équilibre du corps, les raies signalent la présence des éléments constitutifs de l'atmosphère stellaire. Le spectre des étoiles chaudes s'écarte significativement de la courbe du corps noir, en raison de l'ionisation de l'hydrogène par des photons de longueur d'onde inférieure à 360 nm.

La loi de Planck

La loi de Planck décrit l'émission d'un corps noir de température T :

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2\lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1}$$

$h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$ est la constante de Planck,

$k_B = 1.381 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ la constante de Boltzmann

c est la vitesse de la lumière dans le vide.

Ceci indique que la loi de Planck est à l'intersection, respectivement, de la physique quantique, statistique et relativiste.

Dans le système d'unités internationales, B s'exprime en $\text{W m}^{-3}\text{sr}^{-1}$, ou en unité dérivée $\text{W m}^{-2}\mu\text{m}^{-1}\text{sr}^{-1}$; B est une luminance spectrale, c.à.d. une puissance rayonnée par unités d'angle solide, de surface et spectrale.

Le dénominateur de la loi de Planck est caractéristique d'une loi statistique de Bose-Einstein, à laquelle obéit un gaz de photons. Comme tout vecteur d'interaction fondamentale (l'interaction électromagnétique), le photon est un boson, une particule de spin entier. La fonction $B_{\lambda}(T)$ dépend de la température comme de la longueur d'onde. Elle est notée ainsi, et non $B(\lambda, T)$, pour mettre en évidence la variable spectrale, ici la longueur d'onde. Cette dépendance spectrale peut également s'exprimer en fonction non de la longueur d'onde, mais de la fréquence.

La formule qui relie la dépendance spectrale exprimée en longueur d'onde ou en fréquence est

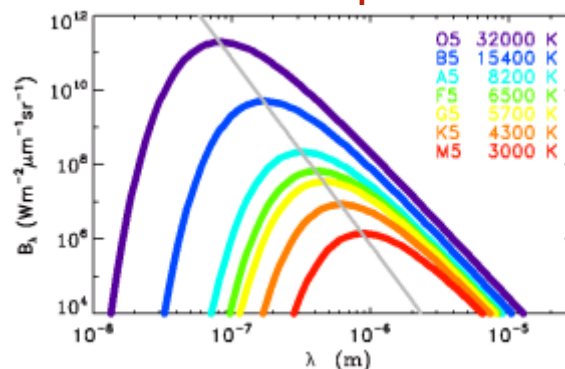
$$\mathcal{B}_\nu(T) d\nu = \mathcal{B}_\lambda(T) d\lambda$$

d'où

$$\mathcal{B}_\nu(T) = \mathcal{B}_\lambda(T) \frac{d\lambda}{d\nu} = \mathcal{B}_\lambda(T) \frac{\lambda^2}{c} = \frac{2hc\lambda^{-3}}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1} = \frac{2hc^{-2}\nu^3}{\exp\left(\frac{h\nu}{k_B T}\right) - 1}$$

L'unité de $\mathcal{B}_\nu(T)$ est alors : $\text{W m}^{-2} \text{Hz}^{-1} \text{sr}^{-1}$.

Courbes de lumière de corps noirs stellaires



La couleur de chacun des luminances spectrales représentées rappelle la température de couleur de l'objet. Les maxima s'alignent sur une droite.

Crédit : Astrophysique sur Mesure

La loi de déplacement de Wien

La représentation de la superposition de plusieurs spectres de corps noir permet de faire le lien entre la température du corps noir et la longueur d'onde où a lieu l'émission maximale. On peut vérifier que les maxima sont simplement alignés, dans un diagramme en échelle logarithmique.

Si λ_{\max} est la longueur d'onde du maximum de luminance spectrale, il apparaît donc : $\lambda_{\max} T = \text{cste}$. C'est la loi de Wien

Le calcul de cette constante donne :

$$\lambda_{\max} T = 2.89 \cdot 10^{-3} \text{ K m}$$

Cette relation fait le lien entre une température et une longueur d'onde, et crée un lien entre une température et une couleur, ce qui permet de définir la température liée à la couleur de l'objet.

Température et couleur

objet (\equiv corps noir)	température (K)	λ_M	domaine spectral
étoile type O	50 000	60 nm	UV
soleil	6 000	0.5 μm	visible
Terre	300	10 μm	IR
nuage moléculaire H ₂	20	0.15 mm	submm
fond cosmologique	3	1 mm	mm

Température et couleur

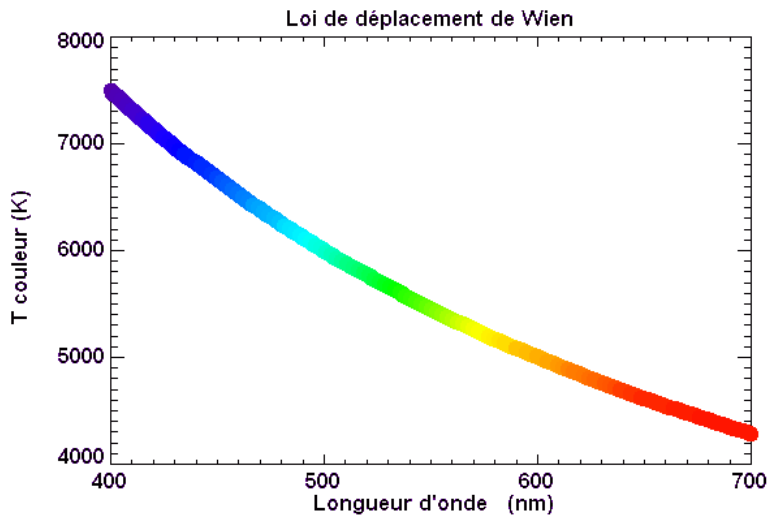
La relation entre température et longueur d'onde du maximum d'émission, permet de définir une relation entre température et couleur, via la correspondance entre longueur d'onde et couleur.

On dispose ainsi d'un *thermomètre* : une **étoile bleue est plus chaude qu'une étoile rouge.**

Couleur des étoiles

La couleur apparente d'une étoile ne va pas exactement correspondre à la température de son maximum d'émission. En effet, la couleur perçue par le détecteur va intégrer une bonne part de l'énergie rayonnée, et pas seulement celle au maximum d'émission. Il ne faut pas oublier que la perception des couleurs dépend intimement de la détection : derrière un filtre rose, on voit la vie en rose ! Les couleurs restituées par une image en couleur, obtenue par composition de 3 images dans 3 filtres différents, vont le plus souvent être très vives (pour des raisons esthétiques) que celles vues à l'œil nu. On peut néanmoins dégager quelques impressions générales :

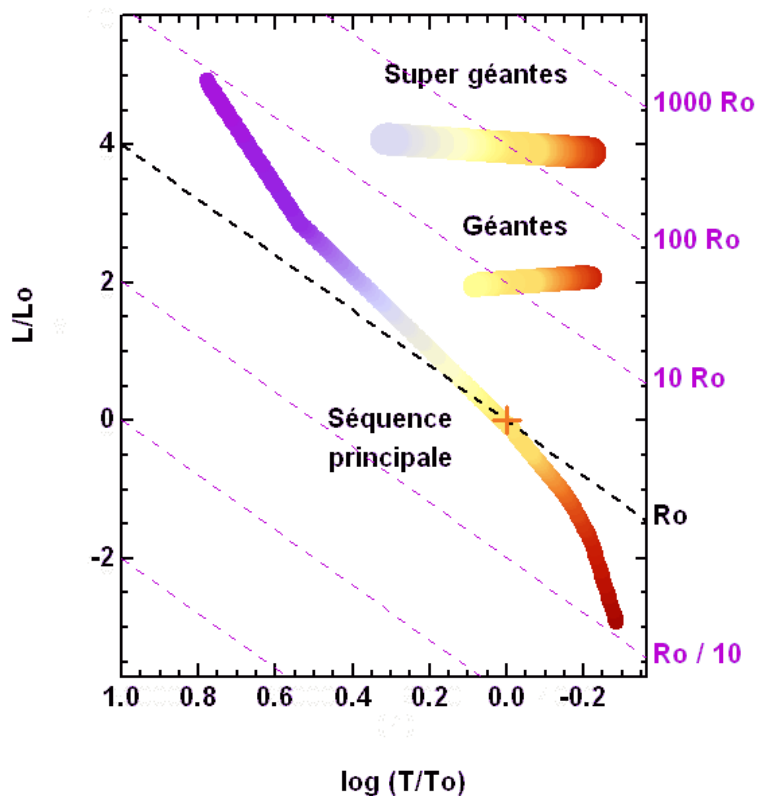
- Une étoile de température effective 10000 K, qui rayonne essentiellement dans le proche UV, apparaîtra blanche, à l'œil nu, cette impression résultant de la superposition de toutes les couleurs du spectre.
- Il faut vraiment qu'une étoile soit très froide pour apparaître rougeâtre. Une étoile froide apparaît plutôt orange.
- Il faut de même qu'une étoile soit très chaude pour apparaître bleutée.
- Une étoile apparaît rarement de couleur tirant sur le vert, ou alors uniquement par contraste avec un objet voisin très rouge (ou bien lorsque le rayonnement n'est pas de type corps noir, mais monochromatique dans une raie d'émission telle celle de l'oxygène, suite à un processus d'excitation qui n'a rien à voir avec le corps noir)



La loi de Wien associe, via la relation précédente, une couleur à une température, par la relation entre la longueur d'onde λ_{max} et une couleur.

objet (\equiv corps noir)	température (K)	λ_M	couleur de température
étoile type O	50 000	60 nm	UV
soleil	6 000	0.5 μm	visible
Terre	300	10 μm	IR thermique

Attention, ceci n'a de sens que pour un corps dont le rayonnement est de type corps noir. La mer, même bleue, n'est pas à 8000 K !



Les étoiles ne se répartissent pas au hasard sur un diagramme Luminosité-Température ! C'est le diagramme HR (Hertzsprung- Russell).

Puissance totale rayonnée

Quelle puissance rayonne une étoile de température d'équilibre T , assimilable à un corps noir de température T , supposée sphérique de rayon R ? La réponse nécessite d'intégrer la luminance spectrale du corps noir sur toute sa surface, dans toutes les directions, à toute longueur d'onde.

Le calcul aboutit à la puissance :

$$\mathcal{P} = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

$\sigma = 5.669 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ est la **constante de Stefan**

La loi en T^4 entraîne une grande diversité dans la vie des étoiles. Deux étoiles de rayons analogues mais avec des températures variant du simple au quintuple (4000 - 20000 K p.ex.) vont avoir des luminosités dans un rapport de 625, donc déjà des couleurs et luminosités très différents. Mais il s'ensuit également des conséquences très fortes sur leur évolution.

Thermalisation

L'exemple du soleil permet de définir la température effective d'un corps noir, ou température d'équilibre, ou température de brillance.

Le parcours de l'énergie au sein du soleil est, jusqu'à aux couches supérieures, une succession ininterrompue d'absorption et de réémission des photons initialement produits par les réactions nucléaires au centre de l'étoile, dans le domaine γ , jusqu'aux photons finalement émis, majoritairement dans les domaines UV, visible et IR.

Arrivés dans la photosphère, les photons peuvent quitter le soleil, avec une distribution énergétique qui est celle du corps noir, de température donnée, que l'on appelle **température effective**.

Equilibre

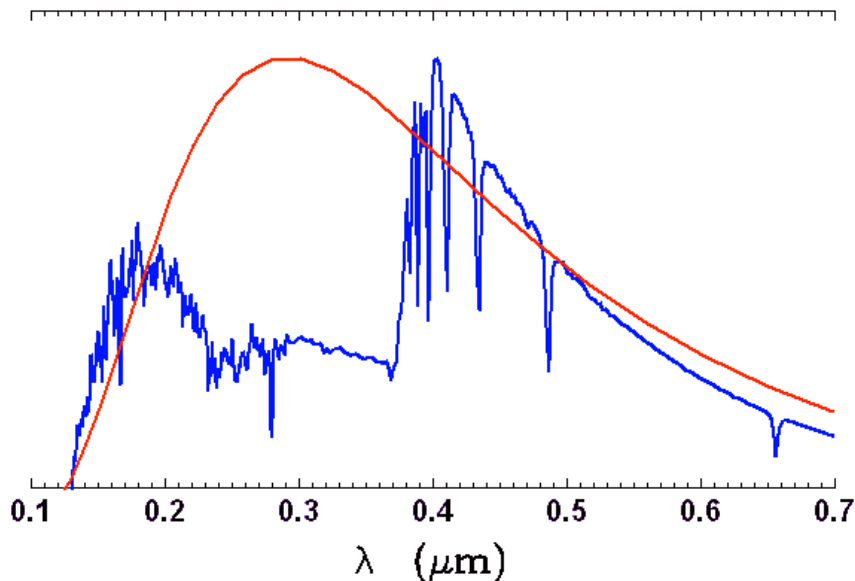
En raison de l'équilibre entre le rayonnement de corps noir et la matière du corps noir, il y a concordance entre cette température et celle du milieu émetteur. D'après le second principe de la thermodynamique, les couches atmosphériques plus profondes qui ont fourni l'énergie ne peuvent être qu'à une température plus élevée. Il s'ensuit un certain nombre de conséquences :

- La température effective correspond à la température minimale rencontrée dans la partie supérieure de l'atmosphère stellaire
- Le niveau de l'atmosphère que l'on voit, par définition celui dont sont issus les photons, est de température très voisine à la température effective.
- Les niveaux inférieurs sont opaques, vu que le processus de thermalisation entre matière et rayonnement y est à l'œuvre.

Raies et continuum

La plupart des spectres des objets astrophysiques résultent de la somme des contributions spectrales superposées au corps noir. Sur la mosaïque d'images infrarouges de Jupiter ci-jointe, contributions spectrales et de corps noir s'entremêlent.

À 1.60 micromètres, le rayonnement de corps noir (le spectre solaire réfléchi) domine. À 3.41 micromètres, minimum entre les corps noirs jovien et solaire réfléchi, la contribution prépondérante provient de l'émission stratosphérique de l'ion H_3^+ . À plus haute longueur d'onde, le spectre de corps noir de Jupiter prend de l'importance, et révèle les inhomogénéités de la troposphère jovienne.



Spectre stellaire

Un spectre stellaire présente, superposé à un spectre continu de type corps noir, des raies en absorption. Leur présence conduit à répartir l'énergie différemment du spectre du corps noir, dont on retrouve néanmoins la trace dans l'allure générale du spectre à basse résolution.

La température d'équilibre correspond à la température de la photosphère, d'où s'échappent les photons, qui correspond à un minimum local de température.

Spectre planétaire

Un spectre planétaire présente, superposé à un spectre continu de type corps noir, des raies en absorption ou en émission. Contrairement à un spectre stellaire, le spectre planétaire voit 2 sources chaudes : son étoile et sa structure interne.

Le minimum de température correspond à la **tropopause** : c'est la limite supérieure de la troposphère et la limite inférieure de la stratosphère. Elle constitue aussi la limite de la biosphère et est la partie la plus froide de la basse atmosphère. Son altitude varie selon les saisons et les latitudes, allant de 8 aux pôles et 18 km à l'équateur avec une altitude moyenne de 11 km. La tropopause est plus élevée pendant l'été que l'hiver. La température de

l'atmosphère diminue avec l'altitude à partir du sol jusqu'à la tropopause, puis augmente par la suite à cause de l'absorption des rayons ultraviolet par l'ozone présent dans la stratosphère.

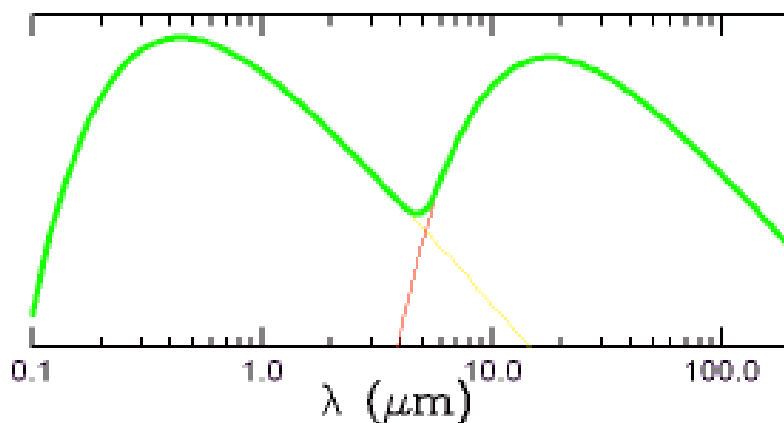
Les raies en absorption signalent un *déficit* énergétique par rapport au corps noir, et signalent la présence d'un absorbant dans la troposphère : région où la température décroît avec l'altitude. Cet élément a ponctionné une partie de l'énergie dans la raie considérée. Dans cette région plus profonde que la tropopause, l'énergie est redistribuée à toute longueur d'onde, suite aux multiples interactions matière-rayonnement.

Les raies en émission signalent un *surcroît* énergétique par rapport au corps noir, et signalent la présence d'un absorbant dans la stratosphère : région où la température croît avec l'altitude. Cet élément a ponctionné une partie de l'énergie solaire incidente dans la raie considérée, et la réémet.

L'allure d'un spectre planétaire montre une courbe "à 2 bosses". Les 2 maxima locaux piquent à 0.5 et 10 μm , soit à des températures effectives de 6000 et 300 K approximativement.

Les 2 contributions du spectre ont clairement 2 origines distinctes :

- La composante visible correspond à la réflexion du spectre stellaire réfléchi par la planète
- La composante infrarouge rend compte du spectre de corps noir planétaire. La planète est à l'équilibre thermique entre 2 sources : l'apport énergétique de l'étoile (source chaude), et le rayonnement vers le ciel (source froide).



Stricto sensu, le rayonnement n'est plus un rayonnement de corps noir. En fait, les 2 composantes sont proches de 2 corps noirs, l'un à la température du rayonnement stellaire, l'autre à la température d'équilibre planétaire.

Température d'antenne

Nous avons vu que la luminance spectrale du corps noir s'exprime, en fonction de la fréquence par :

$$B_\nu(T) = \frac{2hc^{-2}\nu^3}{\exp \frac{h\nu}{k_B T} - 1}$$

Les radioastronomes expriment une luminosité radio comme une température, et l'expriment donc Kelvin.

Si la surface S représente la surface collectrice, et Ω l'angle solide sous lequel est vue la source élémentaire, les conditions d'observation de l'image, définies par la diffraction, énoncent que le faisceau élémentaire observable a une étendue $S\Omega$ égale à λ^2 , et que la mesure ne peut donner accès qu'à une seule direction de polarisation. L'intégration sur S et sur Ω permet de passer de la luminance spectrale à la puissance spectrale.

On considère comme objet un nuage moléculaire à 10 K, et un rayonnement aux longueurs d'onde supérieures à 1 cm.

Avec $h = 6 \cdot 10^{-34}$ SI, et $k_B = 1.3 \cdot 10^{-23}$ JK⁻¹, l'énergie thermique est : $k_B T \simeq 1.3 \cdot 10^{-22}$ J

L'énergie d'un photon vaut. $h\nu = hc/\lambda = 6 \cdot 10^{-34} \times 3 \cdot 10^{10} \simeq 1.8 \cdot 10^{-23}$ J

On voit donc que dans le domaine des radiofréquences (ν étant typiquement de l'ordre du GHz), $h\nu \ll kT$ et l'on peut considérer que : $\exp(h\nu/k_B T) - 1 \simeq h\nu/k_B T$

Dans ces conditions, on peut écrire :

$$B_\nu(T) = (2h c^{-2} \nu^3)/(h\nu/k_B T) = 2 c^{-2} \nu^2 k_B T$$

C'est la loi de **Rayleigh-Jeans** (valide dans le domaine radio uniquement)

La densité spectrale de luminance peut aussi s'exprimer sous la forme:

$$2c^{-2}\nu^2 k_B T = 2 \frac{k_B T}{\lambda^2}$$

Intégrée sur la variable de surface S et celle d'angle solide Ω , on trouve, avec $S \Omega = \lambda^2$, une puissance monochromatique :

$$\frac{dL}{d\nu} = 2 \frac{k_B T}{\lambda^2} S\Omega = 2 k_B T$$

L'antenne n'est sensible qu'à une seule direction du champ électrique : la moitié de l'énergie est donc perdue. En supposant la densité spectrale de puissance uniforme sur l'intervalle de fréquence, on trouve une puissance :

$$L = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\nu} \Delta\nu = k_B T \Delta\nu$$

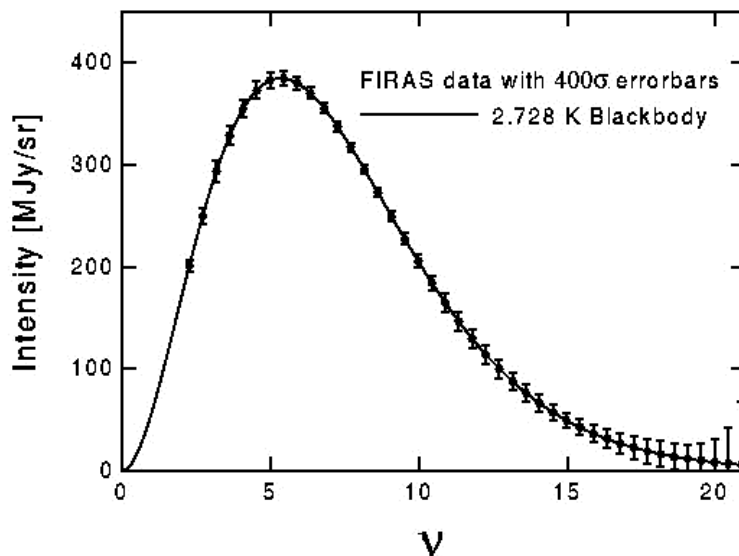
Cette valeur apparaît directement proportionnelle à la largeur de l'intervalle spectral, fixée par la détection, et à la température de la source.

C'est pourquoi les radioastronomes définissent la puissance reçue par une température. Cette température correspond directement à celle du corps s'il rayonne comme un corps noir. Mais, toute énergie devenant ainsi une température (température de bruit du détecteur, ou de température d'antenne) par une simple règle de proportionnalité, cette température ne peut pas être considérée, dans la plupart des cas, comme une température thermodynamique.

Fond cosmologique

L'observation spectroscopique du rayonnement du fond cosmologique met en évidence un rayonnement de corps noir, le corps noir cosmologique. Sa température d'équilibre est de l'ordre de 3 K (2.728 K pour être très précis).

La loi de déplacement de Wien associe cette température à un maximum d'émission dans les longueurs d'onde millimétrique.



Dans le cadre de la théorie du big-bang, l'Univers est en expansion et se refroidit. Il est passé dans le passé par des phases plus chaudes, et a connu diverses étapes, correspondant à des ruptures d'équilibre.

Pour des températures de plus 3000 K, la matière et le rayonnement était à l'équilibre, suite à l'interaction entre les électrons, libres, et les photons. Aux températures plus faibles, la recombinaison des électrons avec les protons pour former l'hydrogène atomique a occasionné le découplage de la matière et du rayonnement.

Ce dernier garde une distribution énergétique de corps noir, mais s'est refroidi suite à l'expansion de l'univers. Il présente aujourd'hui une température, très homogène, de 2.728 K.

CONCLUSIONS :

L'application des lois concernant le corps (loi du rayonnement, loi de Wien, loi de Planck) est très souvent féconde... mais il faut tout d'abord retenir de ces pages les conditions physiques dans lesquelles peut s'appliquer le modèle du corps noir : le rayonnement doit traduire l'équilibre thermique de l'objet considéré. Sans cette hypothèse, l'application des lois précédentes reste vaine, et peut conduire à de gros contresens (que l'on retrouve souvent dans la littérature, lorsque la notion de température de couleur est utilisée tellement loin de son domaine de validité qu'elle en perd tout son sens).

En première approximation, les étoiles rayonnent comme des corps noirs... mais les nombreuses raies d'absorption peuvent conduire à un profil de rayonnement bien déformé. Le rayonnement du fond cosmologique est quant à lui un excellent corps noir.



Corps noir volatile certes, mais corps noir physique ?

Crédit : Astrophysique sur Mesure /Observatoire de Paris

Document préparé par Patrice Bouchet pour l'atelier « Fil Rouge » du lundi 10 août 2009 consacré aux observations dans l'infrarouge. XIXème Festival de Fleurance

Questionnaire à choix multiples

I. Les taches solaires apparaissent noires par rapport à l'atmosphère environnante :

- Car elles sont plus chaudes
- Car elles sont plus froides
- Ça n'a rien à voir avec leur température

II. Un corps noir est sombre par définition

- Vrai
- Faux

III. Loi de Wien

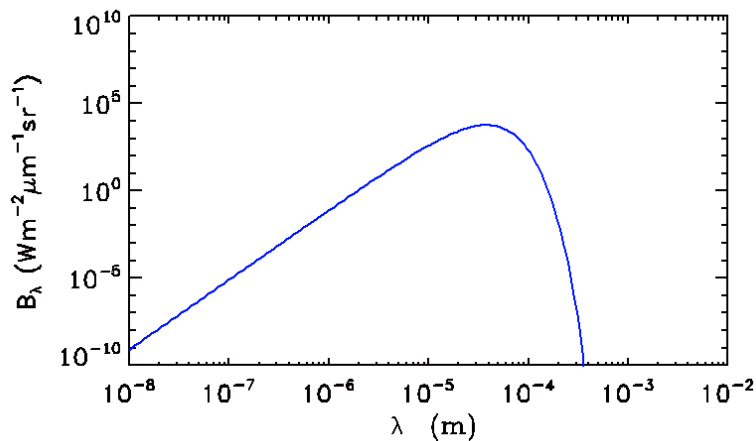
Si la courbe de luminance spectrale d'un objet rayonnant comme un corps noir présente un maximum à $30\mu\text{m}$, cet objet a une température de :

- 30 K ?
- 100 K ?
- 300 K ?

Un objet rayonnant comme un corps noir de température 10000 K présente un maximum de luminance spectrale à :

- 3 nm ?
- 30 nm ?
- 300 nm ?

Le spectre ci-dessous correspond à une température de :



- 100 K ?

- 1000 K ?
- Indécidable ?

IV. Étoiles et Couleurs

Une étoile rouge est plus chaude qu'une étoile bleue :

- Vrai ?
- Faux ?
- Ca dépend ?

Une étoile rouge rayonne plus qu'une étoile bleue :

- Vrai ?
- Faux ?
- Ca dépend ?

Une étoile rouge ne rayonne pas dans le bleu :

- Vrai ?
- Faux ?
- Ca dépend ?

Le pull de votre voisin est jaune, quelle est sa température ?

La question précédente est-elle bien posée ?

V. Puissance totale rayonnée

En plomberie, le robinet marqué de bleu délivre de l'eau froide ; le poète considère que le bleu est une couleur froide, et il n'y a que le physicien pour dire que le bleu est plus chaud que le rouge. Peut-on être à la fois poète et physicien ?

- Oui
- Non

Une petite étoile rouge est moins lumineuse qu'une grosse de couleur bleue :

- Vrai
- Faux
- Ca dépend

Une naine ne peut pas être plus brillante qu'une géante :

- Si, si elle est bleue
- Si, si elle est rouge
- Jamais

A puissance émise égale, une étoile dont le rayon augmente voit sa couleur :

- Bleuir
- Rougir
- Inchangée

Exercices et Problèmes

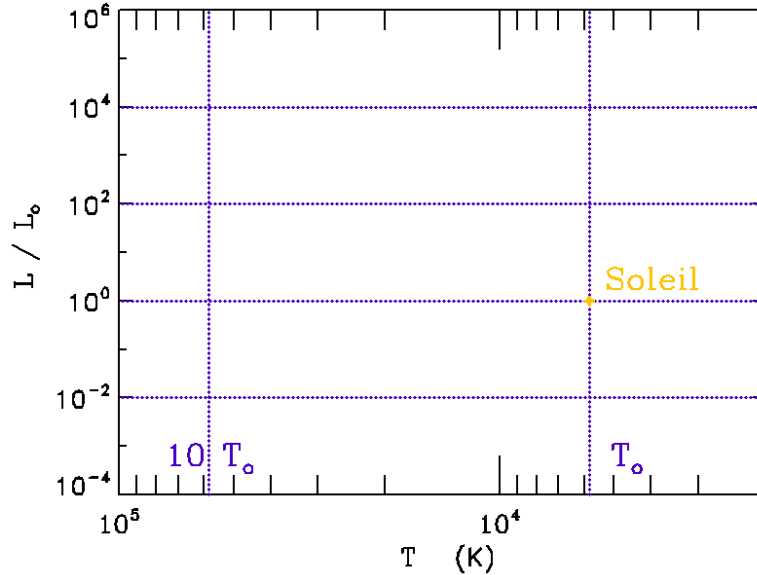
I. Rayon stellaire

La puissance rayonnée par une étoile, assimilée à un corps noir de rayon R et température T , varie comme :

$$\frac{L}{L_{\odot}} = \left(\frac{R}{R_{\odot}}\right)^{\alpha} \left(\frac{T}{T_{\odot}}\right)^{\beta}$$

avec, R_{\odot} , T_{\odot} , et L_{\odot} respectivement les rayon, température effective et luminosité du soleil.

- Rappeler les valeurs de α et β
- Une naine blanche présente la même luminosité que le soleil, pour une température T_{NB} . Estimer son rayon R_{NB} , en fonction des données solaires et de T_{NB} .
- Calculer R_{NB} pour $T = 30000$ K, $R_{\odot} = 7 \cdot 10^5$ km et $T_{\odot} = 5800$ K.
- Représenter sur le diagramme ci-dessous les lignes iso-rayon, pour les étoiles de respectivement 0.1, 1 et $10 R_{\odot}$.

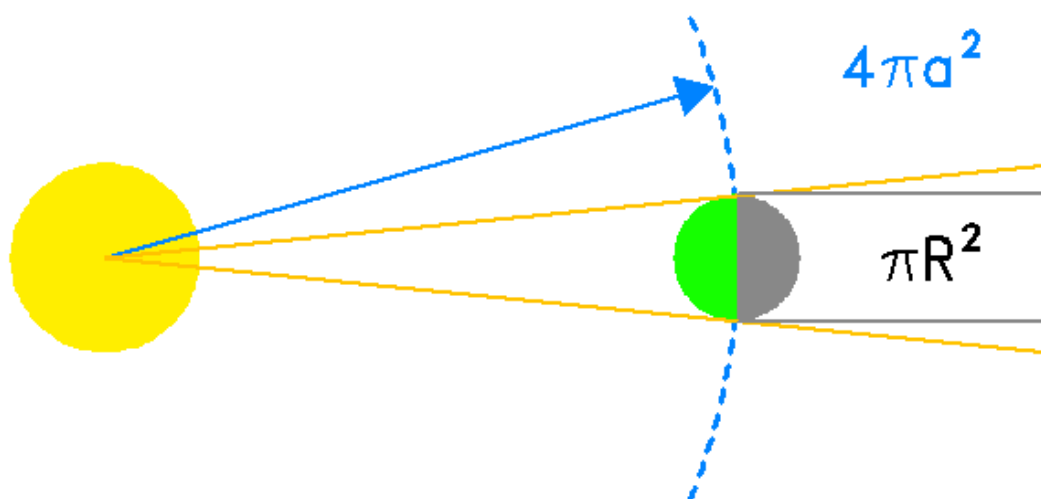


- Situer sur ce diagramme une supergéante rouge de rayon $10^2 R_{\odot}$ et une naine blanche de rayon $10^{-2} R_{\odot}$ de température respective 4000 et 30 000 K.

II. Equilibre thermique d'une planète'

Une planète est en orbite circulaire de rayon a autour de son étoile. On suppose l'espace interplanétaire vide, ce qui entraîne la conservation du flux stellaire intégrée sur toute surface entourant l'étoile. La rotation propre de la planète est suffisamment rapide pour que l'on puisse considérer sa température T_p comme uniforme sur toute la surface. On néglige toute autre source d'énergie que stellaire. La planète réfléchit une fraction A du rayonnement solaire, et en absorbe une fraction $(1 - A)$, où A est l'albédo. On peut, en première approximation (à basse résolution spectrale), considérer ce spectre comme la superposition du spectre de 2 corps noirs, dont on cherche à déterminer les températures.

On note ℓ_r la composante énergétique directement réfléchie, et ℓ_a la composante absorbée puis re-rayonnée.



- Montrer que la puissance interceptée par la planète vaut

:

$$\ell_P = L \frac{R^2}{4 a^2} \quad \text{où } R \text{ représente le rayon planétaire.}$$

- Calculer le rapport ℓ_P/L dans le cas de Jupiter et de la Terre.

Objet	$a(\text{UA})$	$R(\text{km})$
Jupiter	5.2	71000
Terre	1	6400

Pour mémoire $\odot = 4 \cdot 10^{26} \text{ W}$.

- La planète étant à l'équilibre thermodynamique, exprimer ℓ_r et ℓ_a en fonction de la luminosité totale ℓ_P et de l'albédo A .

- Quelle est la température T_r associée au rayonnement réfléchi ℓ_r , assimilé à un rayonnement de corps noir ?
- Montrer que la température associée à la composante ℓ_a , voisine de la température d'équilibre de la planète, est alors:

$$T_p = (1 - A)^{1/4} \left(\frac{R_*}{2a} \right)^{1/2} T_*$$

- Faire l'application numérique pour une exoplanète avec une albédo $A \simeq 0.5$ et un demi-grand axe $a = 0.05$ UA. Pour l'étoile, on prendra : $T_* = 5500\text{K}$ et $R_* = 7 \cdot 10^5$ km.
- En déduire la longueur d'onde λ_p correspondant au maximum de l'émission planétaire. A quel domaine spectral cette température correspond-elle?

III. Fond Diffus Cosmologique

L'observation spectroscopique du rayonnement du fond cosmologique met en évidence un rayonnement de corps noir, le corps noir cosmologique qui est aujourd'hui à une température d'équilibre remarquablement homogène de l'ordre de 3 K (2.728 K pour être très précis). Sachant qu'il correspond à une température originelle de 3000K, et que l'expansion de l'Univers, adiabatique se fait à un rythme donné par $R_1/R_2 = (t_1/t_2)^{2/3}$ (R_i étant le rayon de l'Univers à l'instant t_i), calculez à quelle époque de l'Univers ce rayonnement a été émis.