

Instruments, Missions, Capteurs | Du milieu aux photons

Emmanuel Marcq

LATMOS, Université de Versailles St-Quentin-en-Yvelines

M2 NewSpace / 2024 – 2025

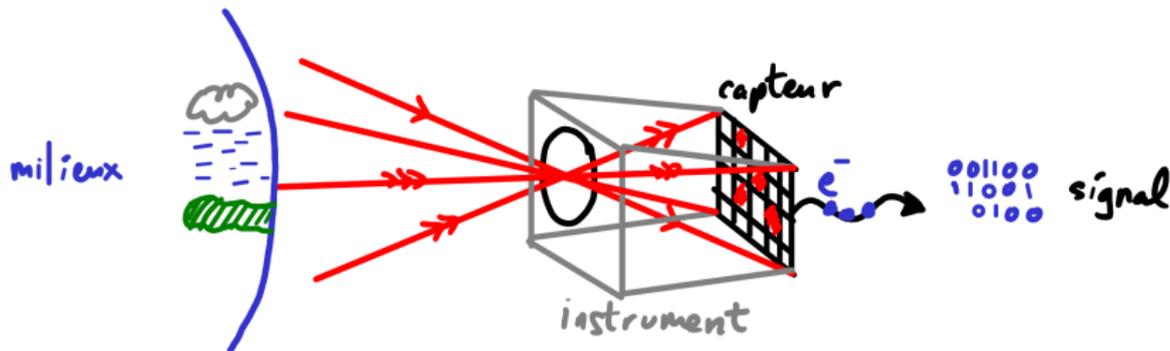
Objectifs

Convertir le **rayonnement** électromagnétique reçu depuis un milieu observé en un **signal** numérique exploitable.

Chapitre 1 Du milieu aux photons : milieu

Chapitre 2 Trier les photons : instrument

Chapitre 3 Du photon au signal : détecteur



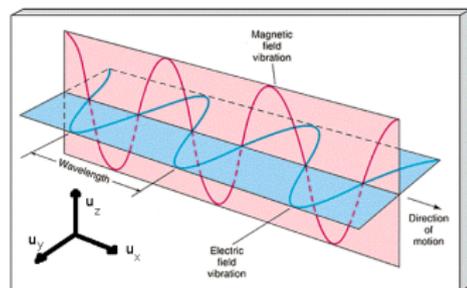
Propagation dans le vide

Une **onde électromagnétique** est une perturbation locale couplée des champs électrique \vec{E} et magnétique \vec{B} se propageant à grande distance selon les équations de Maxwell.

- Dans le vide, on montre que les champs \vec{E} et \vec{B} obéissent chacun à une **équation d'onde** avec comme vitesse de propagation $c = 299\,792\,458$ m/s.
- Une solution particulière de cette équation d'onde est l'**onde plane monochromatique** de pulsation ω .

Propagation dans le vide : onde plane monochromatique

- De longueur d'onde $\lambda = c/\nu$, nombre d'onde $\sigma = 1/\lambda$, fréquence $\nu = \omega/2\pi$ et période $T = 1/\nu$.
- La direction du champ \vec{E} est appelée plan de polarisation.
 - $\vec{E} = E_0 \vec{u}_y \exp [i\omega (x/c - t)]$ en notation complexe.
 - Alors $\vec{B} = B_0 \vec{u}_z \exp [i\omega (x/c - t)]$ avec $B_0 = E_0/c$.



Vecteur de Poynting $\vec{\Pi}$

$$\vec{\Pi} = \frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0}$$

- $\vec{\Pi}$ est orienté dans le sens de propagation de l'onde (ici, \vec{u}_x) et représente le flux d'énergie (en W/m^2) véhiculé par l'onde électromagnétique.

Photons

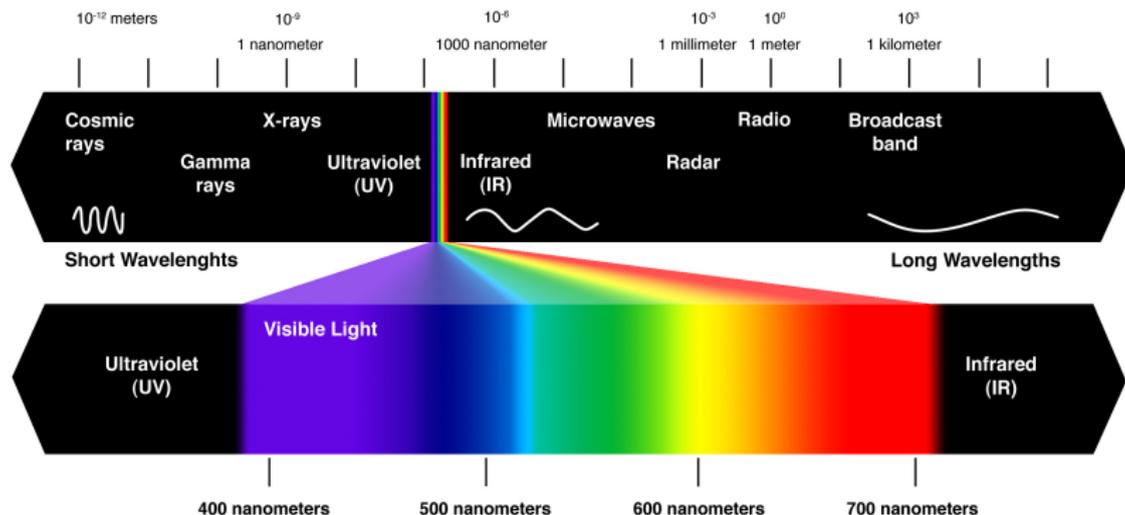
- La mécanique quantique montre que l'énergie du rayonnement électromagnétique est **quantifiée** : $E = n \times h\nu$ avec la fréquence du rayonnement ν , la constante de Planck $h \approx 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, l'énergie véhiculée E et $n \in \mathbb{N}$ le nombre de quanta d'énergie électromagnétique, appelés **photons**.
- Plus spécifiquement, les interactions du rayonnement et de la matière se font de façon quantifiée, par destruction/création d'un nombre entier de photons.
- La mécanique quantique unifie la description des quanta de rayonnement et des particules de matière.

Fermions Particules obéissant au principe d'exclusion de Pauli (ex : électrons).

Bosons Particules non soumises à ce principe d'exclusion (ex : photons).

En particulier, il est possible d'appliquer des raisonnements de **physique statistique** aux photons.

Spectre électromagnétique



Angle solide Ω

Définition

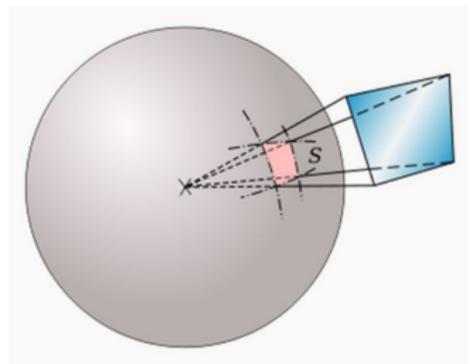
$$\Omega = \frac{S}{r^2}$$

S : surface interceptée depuis l'observateur

r : rayon de la sphère centrée sur l'observateur

Propriétés

- Analogue de la définition d'un angle sur le cercle trigonométrique mais en trois dimensions.
- Unité : **stéradian** (sr), sans dimension. Analogue tridimensionnel du radian.
- $\Omega_{\text{sphère}} = 4\pi \text{ sr}$, $\Omega_{\text{hémisphère}} = 2\pi \text{ sr}$
- En coordonnées sphériques,
 $d\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi = d(\cos \theta) d\varphi$



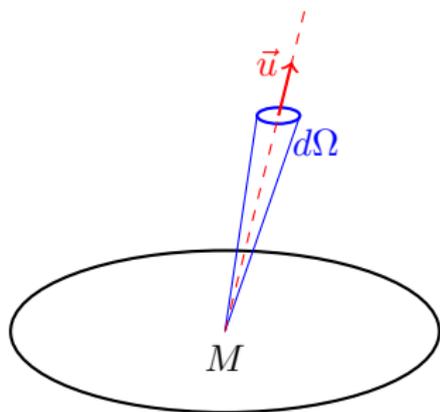
Luminance spectrale L_ν

Définition

Avec d^3P la puissance émise dans un intervalle $d\nu$ autour d'une fréquence ν , par unité de surface **émettrice** dA centrée sur un point M donné, et dans un angle solide $d\Omega$ autour d'une direction

donnée \vec{u} :
$$L_\nu(M, \vec{u}) = \frac{d^3P}{dAd\nu d\Omega}$$

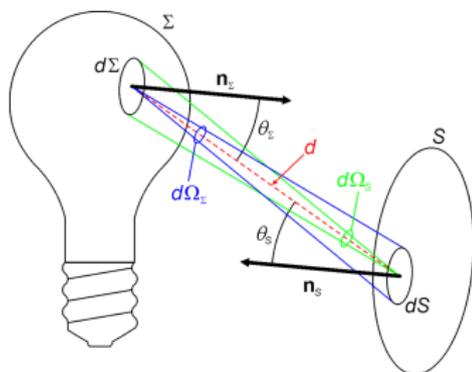
- L_ν formalise la notion de pinceau de lumière (monochromatique).
- Dans le vide, L_ν se **conserve** : la puissance reçue par unité de surface réceptrice décroît à mesure que $d\Omega$ sous-tend une surface croissante.
- Si L_ν ne dépend pas de \vec{u} , on parle de rayonnement **isotrope**.



- **Note** On peut aussi considérer L_λ par intervalle de longueur d'onde $\lambda = c/\nu$ à $d\lambda/\lambda = d\nu/\nu$ près. On a alors $L_\lambda d\lambda = L_\nu d\nu$.

Étendue géométrique G

- Produit de l'angle solide par la surface : $d^2G = \cos\theta dA d\Omega$
- L'étendue d'un faisceau le long d'un trajet optique se conserve :
 $\cos\theta_\Sigma d\Sigma d\Omega_\Sigma = \cos\theta_S dS d\Omega_S$.
- On peut donc comprendre L_ν comme la puissance reçue par unité de surface **réceptrice** selon la direction \vec{u} et par unité d'angle solide **source**.

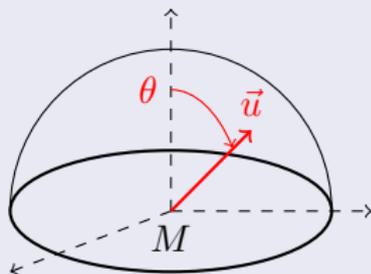


Éclairement/exitance spectrale F_ν

Définition

Moment d'ordre 1 de L_ν .

$$F_\nu = \iint_{4\pi \text{ sr}} L_\nu \cos \theta d\Omega$$



- Quantité **mesurée** en pratique.
- Si L_ν isotrope (ou symétrique en θ), $F_\nu = 0$: pas de transport net d'énergie.
- Contient l'information directionnelle.
- Parfois intégrée par demi-espace sur 2π sr

Tableau récapitulatif

Grandeur		Unité (SI)	Unité (photons)
Luminance spectrale	L_ν	W/m ² /sr/Hz	ph/s/m ² /sr/Hz
Luminance	L	W/m ² /sr	ph/s/m ² /sr
Exitance spectrale	F_ν	W/m ² /Hz	ph/s/m ² /Hz
Exitance	F	W/m ²	ph/s/m ²
Intensité spectrale	I_ν	W/sr/Hz	ph/s/sr/Hz
Intensité	I	W/sr	ph/s/sr

Notes

- « Exitance » s'utilise uniquement en émission, « Éclairement » uniquement en réception.
- La dimension spectrale peut aussi s'exprimer en longueur d'onde ou en nombre d'onde à la place de la fréquence.
- Il existe aussi un système d'unité photométrique adapté à la vision humaine : candela, lux, lumen etc.

Absorption Un photon est absorbé par de la matière. L'énergie véhiculée est alors transférée à la matière.

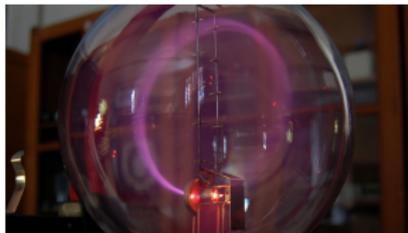
Diffusion La matière perturbe les champs \vec{E} et \vec{B} à grande distance et conduit à une déviation du photon.

Émission Un photon est créé par de la matière qui perd de l'énergie. Émission **spontanée** ou **induite** par un autre photon.

Processus d'émission

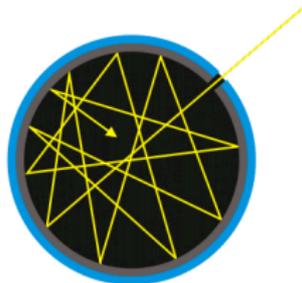
Non thermiques

- Désexcitations atomiques ou moléculaires vers un niveau d'énergie plus bas : fluorescence.
- Accélération de particules chargées : *Bremsstrahlung*, radiations cyclotron et synchrotron.



Thermique

- En milieu matériel assez dense, le « gaz de photons » se met en équilibre thermodynamique avec la matière à la même température T par de multiples absorptions/réémissions.
- Modèle du **corps noir** : absorptions et réémissions totales.

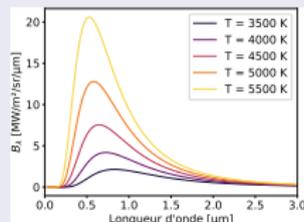


Conceptual Black Body

en unités SI

$$L_\nu(T) = B_\nu(T) = \left(\frac{2h\nu^3}{c^2} \right) \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}$$

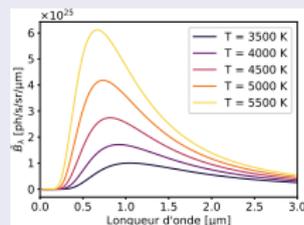
$$L_\lambda(T) = B_\lambda(T) = \left(\frac{2hc^2}{\lambda^5} \right) \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1}$$



en photons

$$\tilde{L}_\nu(T) = \tilde{B}_\nu(T) = \left(\frac{2\nu^2}{c^2} \right) \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}$$

$$\tilde{L}_\lambda(T) = \tilde{B}_\lambda(T) = \left(\frac{2c}{\lambda^4} \right) \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1}$$



Loi de Wien B_λ maximal est atteint en $\lambda_{\max} \approx \frac{hc}{4,965 kT} \approx \frac{2898 \mu\text{m}\cdot\text{K}}{T}$

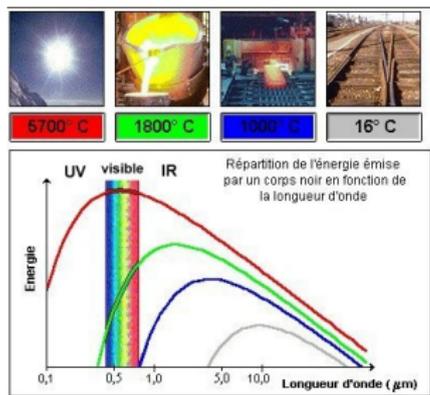
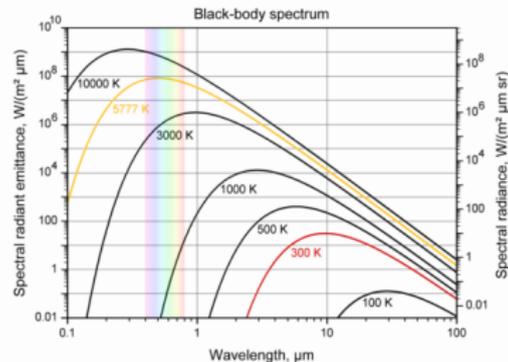
Emboîtement $\forall \lambda, \{T_1 > T_2\} \Rightarrow \{B_\lambda(T_1) > B_\lambda(T_2)\}$

Loi de Stefan $F = \sigma T^4$ avec $\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} \approx 5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$

- $B = \int_\nu B_\nu d\nu = \sigma T^4 / (\pi \text{ sr})$

- $F = \iint_{2\pi \text{ sr}} B \cos \theta d\Omega$

$$\tilde{F} = \tilde{\sigma} T^3 \text{ avec } \tilde{\sigma} \approx 1,520 \cdot 10^{15} \text{ ph/s/m}^2/\text{K}^3$$



Absorbance A_ν

- Fraction du rayonnement absorbé par un objet à une fréquence ν .
- $0 \leq A_\nu \leq 1$. Corps noir : $A_\nu = 1$

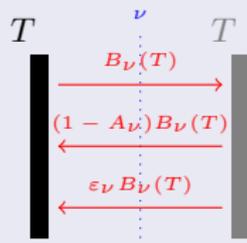
Émissivité ε_ν

- Les objets réels émettent thermiquement selon un spectre différent du corps noir.
- $L_\nu = \varepsilon_\nu B_\nu$

Loi de Kirchhoff

$$A_\nu = \varepsilon_\nu$$

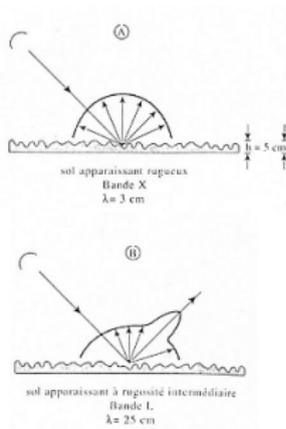
- Nécessité d'être à l'équilibre thermodynamique.
- $\varepsilon_\nu \leq 1$: les objets réels ne peuvent émettre davantage de rayonnement thermique qu'un corps noir de même température.
- Application : couvertures de survie ($A_\nu = \varepsilon_\nu \simeq 0$).



- Selon son échelle de rugosité h

$h \ll \lambda$ Réflexion en miroir, dite **spéculaire**

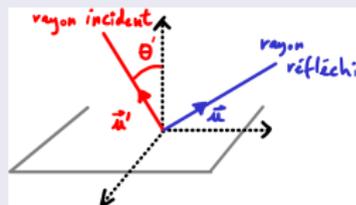
$h \gtrsim \lambda$ Réflexion diffuse, dite **lambertienne**



Définition

$$L_\nu(\vec{u}) = \iint_{2\pi \text{ sr}} L_\nu(\vec{u}') f_\nu(\vec{u}', \vec{u}) \cos \theta' d\Omega'$$

Unité de f_ν : sr^{-1}



Propriétés

- $f_\nu > 0$
- Loi du retour inverse : $f_\nu(\vec{v}, \vec{u}) = f_\nu(\vec{u}, \vec{v})$
- Pour une surface lambertienne, f_ν est constante
 - $f_\nu = \Lambda_\nu / (\pi \text{ sr})$ où $0 < \Lambda_\nu < 1$ est l'**albédo** de la surface.
 - Notamment, si la surface est éclairée sous un flux incident F_ν , alors la luminance reçue depuis une surface lambertienne vaut $\Lambda_\nu F_\nu / \pi$ quelle que soit la géométrie d'observation (surface mate).