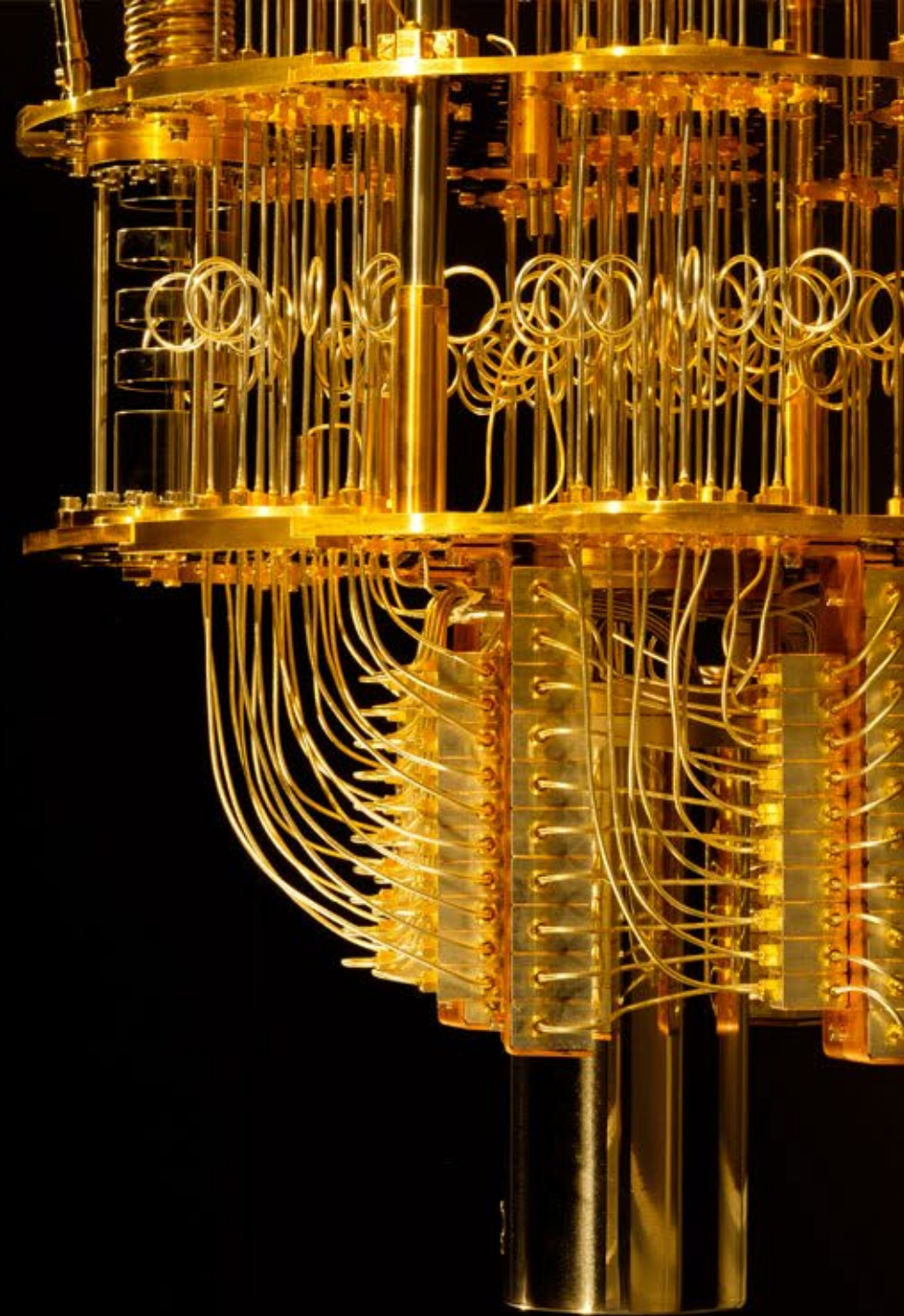


Physique générale : quantique

PHYS-207(a)

Enseignant: Vincenzo Savona



Informations pratiques

Horaire – Cours: mardis de 10h15 à 12h00. Exercices: mardis de 13h15 à 15h00

Moodle – Un moodle est disponible pour le cours. On y trouve tout le matériel du cours

Vidéos – Une chaine vidéo sur SWITCHTube contient toutes les vidéos des cours de l'année passée. Cette année, pas d'enregistrement de cours.

Matériel – Le cours est principalement basé sur le livre Physics for Scientists and Engineers, R. Serway & J. Jewett, en particulier les chapitres 40-44. Je mettrai à disposition les slides des cours.

Séances d'exercices – Les séances d'exercices se déroulent en CM 0 9, CM 0 11, CM 0 12, CM 0 13. Chaque salle sera supervisée par un assistant et un ou deux tuteurs. Vous avez reçu un email avec la répartition dans les salles.

Assistants – 4 Assistants et 6 Tuteurs sont disponibles pour le cours.

Q&A – Vous allez pouvoir poser des questions durant le cours. J'organiserai un forum de questions chaque semaine sur moodle, où j'essaierai de répondre aux questions sur le cours. Les assistants organiseront un forum pour les questions concernant les exercices.

Contenu du cours

Le cours est une introduction à la physique quantique et à ses implications dans la structure des atomes, des molécules, et de la matière en général.

- La crise de la physique classique: corps noir, effet photoélectrique, spectres des atomes, effet Compton
- La dualité onde-particule, le principe de complémentarité, le principe d'incertitude de Heisenberg
- La mécanique ondulatoire, mesure et probabilités, l'équation de Schrödinger, simples problèmes en 1-D
- L'oscillateur harmonique
- Les modèles des atomes, les états de l'atome de Hydrogène
- Le spin et l'expérience de Stern-Gerlach
- Éléments de physique atomique. Les atomes à plusieurs électrons
- Les liaisons moléculaires et les spectres de vibration et rotation des molécules bi-atomiques
- Éléments de physique des solides
- Introduction à l'information quantique et à l'ordinateur quantique

Cours 01

Introduction

La crise de la physique classique

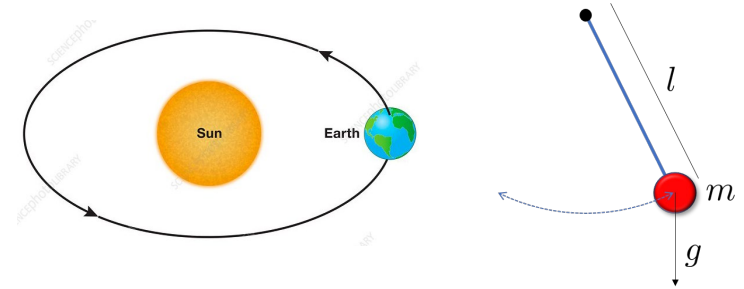
La théorie de Planck pour le spectre du corps noir

La crise de la physique classique (1900)

Jusqu'en 1900, les lois fondamentales de la physique étaient résumées en deux théories: la mécanique de Newton et l'électromagnétisme de Maxwell

Lois de la mécanique (Newton):
mouvement des objets soumis à des forces

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a}$$

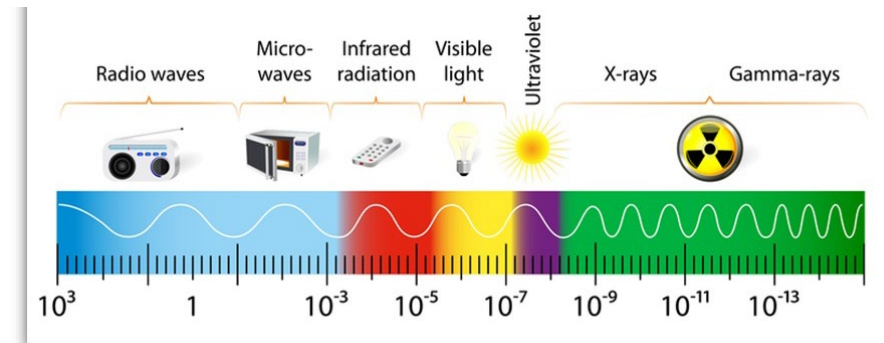


$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

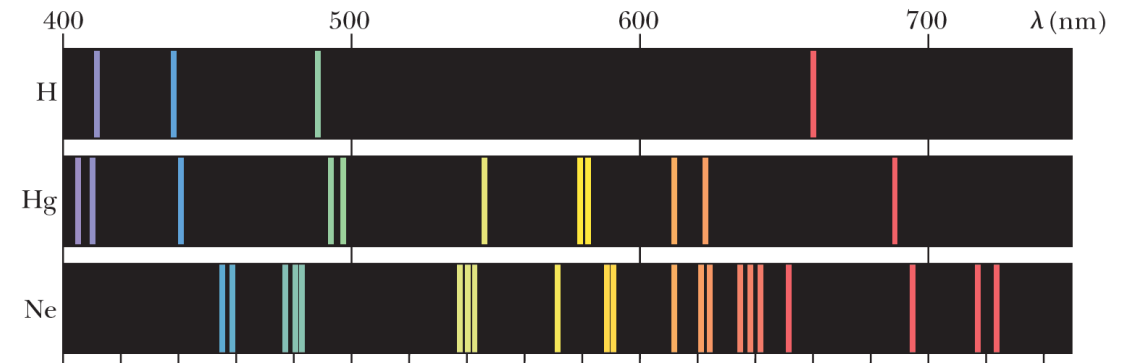
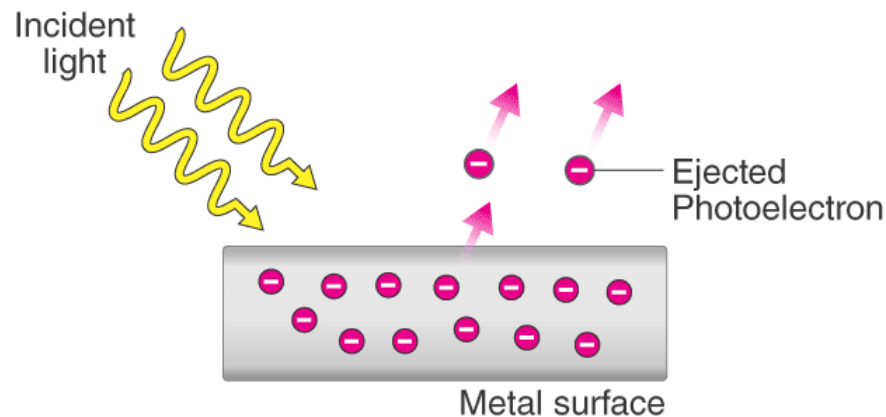
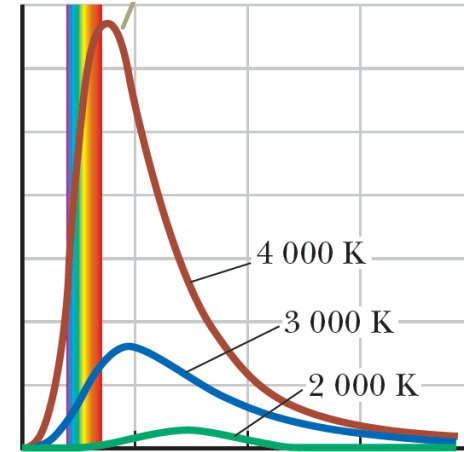
$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \left(\mathbf{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right)$$



Lois de l'électromagnétisme (Maxwell):
comportement des ondes électromagnétiques, des forces électrostatiques et magnétiques

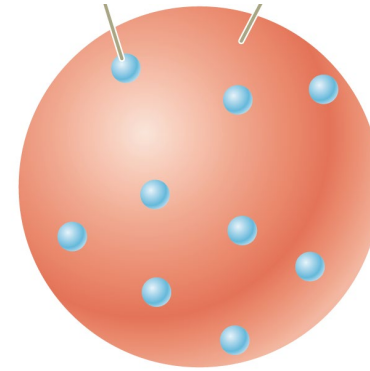
La crise de la physique classique (1900)

- Vers la fin du 19^{ème} siècle, on constate que plusieurs phénomènes ne sont pas décrits correctement par la physique classique.
- La stabilité de la matière
- Le spectre électromagnétique du corps noir
- L'effet photoélectrique
- Les spectres des atomes
- ...

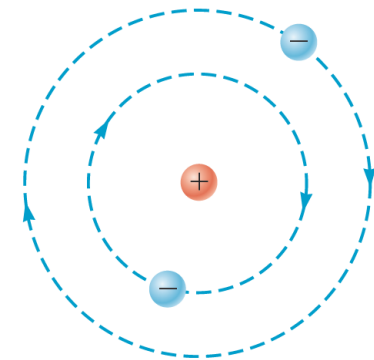
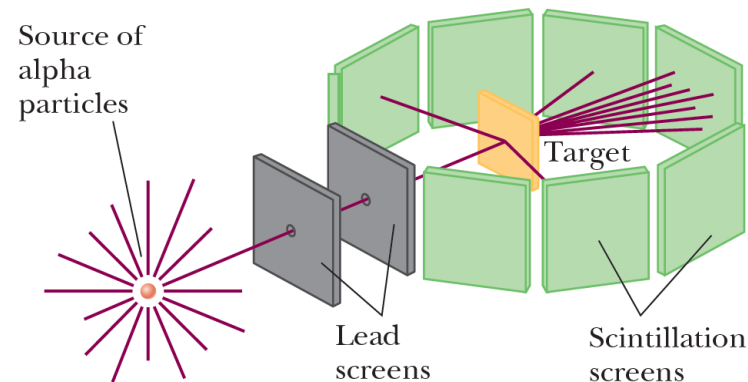


Problème de la stabilité de la matière

En 1897 J. J. Thomson découvrit l'électron. Il proposa un modèle d'atome où les électrons sont piégés dans une matrice de charge positive: le «plum pudding model».



En 1909 E. Rutherford montra que la charge positive est concentrée au centre de l'atome, et proposa un modèle «planétaire» de l'atome, où les électrons orbitent autour d'un noyau de charge positive.



Problème de la stabilité de la matière

Selon les lois de l'électromagnétisme classique, une charge soumise à une accélération émet des ondes électromagnétiques, et donc perd de l'énergie sous forme de rayonnement. Pour une particule non relativiste, la puissance rayonnée est donnée par la formule de Larmor

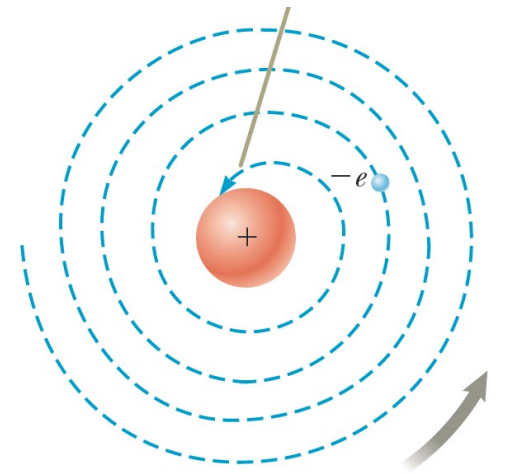
$$P = \frac{q^2 a^2}{6\pi\epsilon_0 c^3}$$

Dans le modèle de Rutherford, l'électron qui fait une trajectoire circulaire est évidemment soumis à une accélération, donc il rayonne et perd ainsi de l'énergie. On peut estimer le temps de vie de l'atome comme le rapport entre l'énergie cinétique de l'électron et la puissance rayonnée. Pour l'atome de Hydrogène:

$$T = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}$$

$$T/P \simeq 4 \times 10^{-11} \text{ s}$$

On obtient que l'atome de Hydrogène aurait une durée de vie très courte!!! **La stabilité de la matière qu'on observe est la preuve la plus flagrante des effets de la physique quantique!**

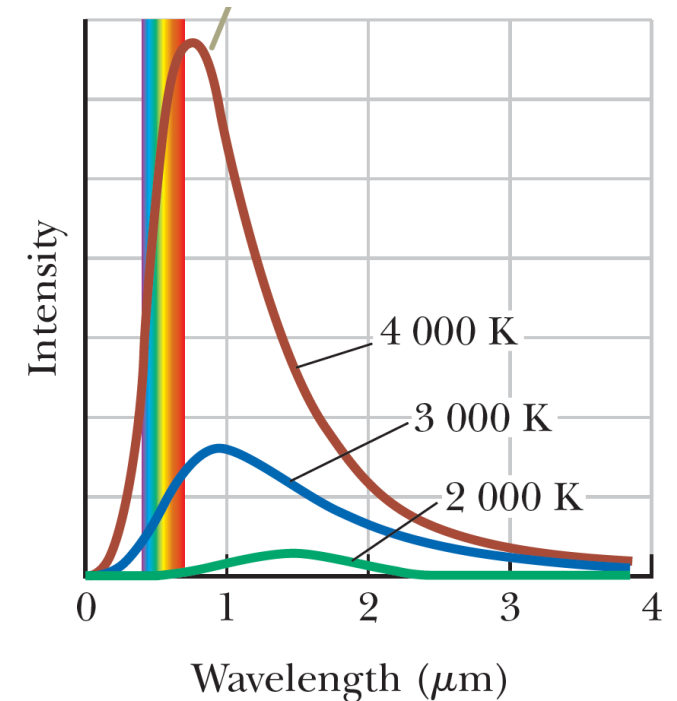
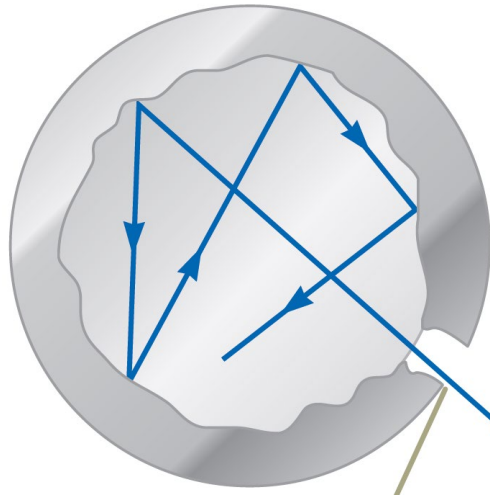


Le corps noir

Un objet, chauffé à une température T , émet du rayonnement électromagnétique

Un **corps noir** est une cavité fermée où les parois internes émettent et réabsorbent plusieurs fois le rayonnement, de façon à atteindre un équilibre

Dans les expériences qui s'approchent à cette idéalisation, on observe que la densité de puissance émise par unité de surface et de longueur d'onde $I(\lambda, T)$ (le «spectre» du corps noir) prend une **forme universelle**



Le corps noir: lois empiriques

Avant 1900, deux lois empiriques caractérisant le corps noir étaient connues

Loi de Stefan-Boltzmann (1884): dépendance en température de la Puissance émise par un objet de surface A :

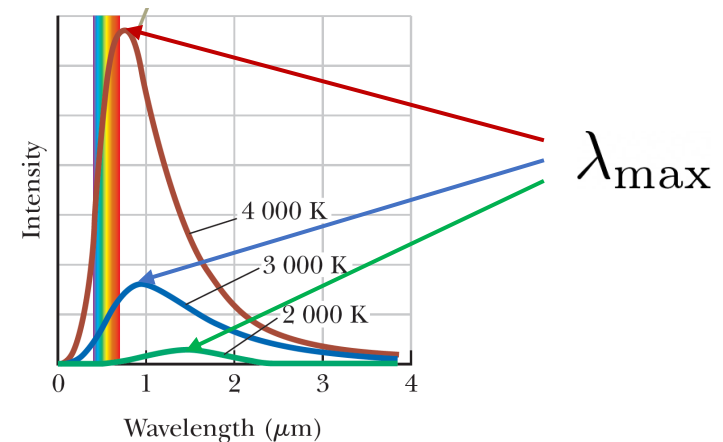
$$\mathcal{P} = \sigma e A T^4 \qquad \sigma = 5.670 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$$

Ici e est l'émissivité, qui caractérise la surface du matériel. Pour un corps noir $e = 1$

Loi du déplacement de Wien (1894): longueur d'onde du maximum de l'émission, en fonction de la température

$$\lambda_{\text{max}} T = 2.898 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

Les lois de Stefan-Boltzmann et de Wien avaient été démontrées par des expériences, et peuvent être déduites par des arguments théoriques faisant intervenir la thermodynamique



Le corps noir: loi de Rayleigh-Jeans

Lord Rayleigh (juin 1900) et J. H. Jeans (1905) proposèrent la première théorie du spectre de corps noir. Si on définit $I(\lambda, T)d\lambda$ comme étant l'intensité (puissance par unité de surface) émise dans l'intervalle de longueurs d'onde $[\lambda, \lambda + d\lambda]$, on a

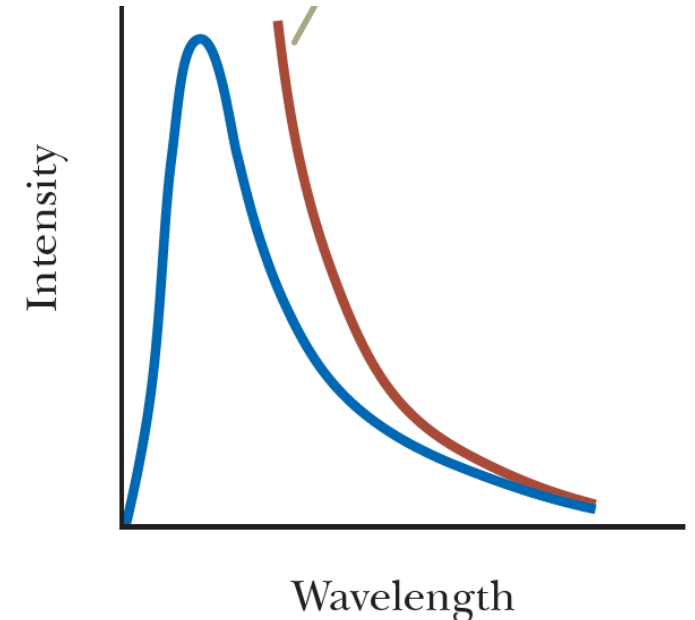
$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi ck_B T}{\lambda^4}$$

La théorie avait été déduite de l'hypothèse du principe d'équipartition de l'énergie, en supposant que l'énergie moyenne associée à chaque longueur d'onde est $\langle E \rangle = k_B T$

Ce fait vient de l'hypothèse que chaque longueur d'onde est émise par un oscillateur harmonique (qui représente une molécule du corps noir) de fréquence $\nu = c/\lambda$, et que l'énergie de ces oscillateurs obéit à une distribution statistique de probabilité caractéristique de l'ensemble canonique: la distribution de Boltzmann

$$P(E) \propto \exp\left(-\frac{E}{k_B T}\right)$$

La divergence de la loi de Rayleigh-Jeans, pour la longueur d'onde approchant zéro, prévoit une densité infinie d'énergie totale, connue sous le nom de «catastrophe ultraviolette»



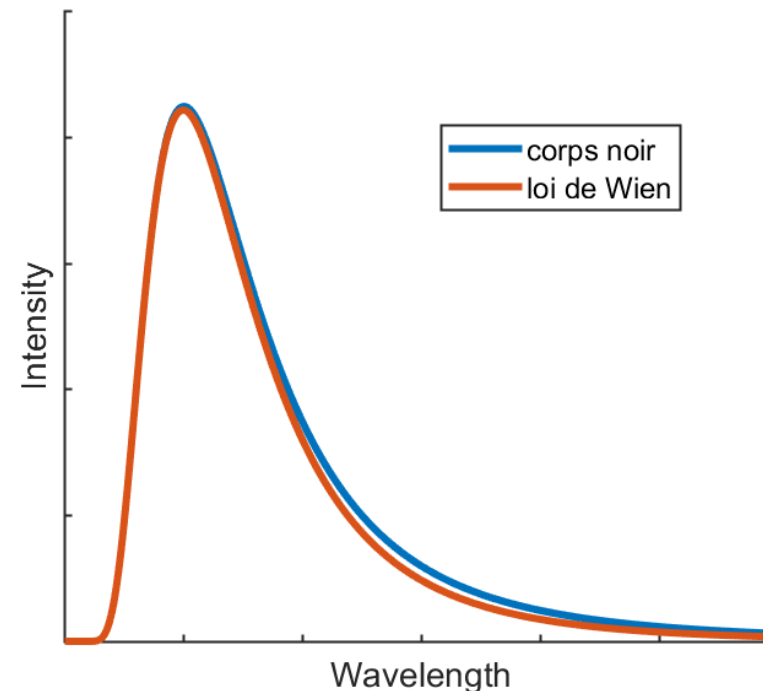
Le corps noir : la loi de Wien

Wilhelm Wien (1896) proposa une loi pour **expliquer le spectre du corps noir à des grandes fréquences (donc à des petites longueurs d'onde)**.

La loi était déduite de l'hypothèse (non justifiable) que la longueur d'onde émise par les molécules est une fonction de leur vitesse.

En combinant cette hypothèse avec la loi du déplacement de Wien, et avec la distribution de Maxwell-Boltzmann des vitesses, on obtient (la constante h est définie dans le slide qui suit)

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} e^{-\frac{hc}{\lambda k_B T}}$$



Le corps noir : la loi de Planck

Max Planck – un maître de la thermodynamique – en octobre 1900 utilisa un argument basé sur l'entropie des oscillateurs qui émettent le rayonnement, pour comprendre que **les lois de Rayleigh-Jeans et de Wien sont deux limites opposées d'une loi plus générale**, qu'il énonça empiriquement

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1}$$

Cette forme du spectre du corps noir explique avec grand succès les mesures qui étaient faites. On y trouve une constante, connue aujourd'hui comme **la constante de Planck**

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

Max Planck passa les mois suivants à penser quel mécanisme, au niveau de l'émission du rayonnement par les molécules, puisse expliquer cette loi.

La loi de Planck et le «quantum» d'énergie

En décembre 1900, Max Planck formula l'hypothèse suivante

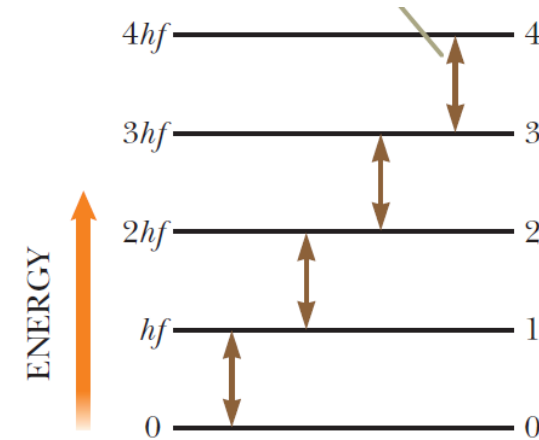
L'énergie des oscillateurs (molécules) composant la surface interne du corps noir ne peut prendre que certaines valeurs discrètes

$$E_n = nhf \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

où f est la fréquence de l'oscillateur.

On dit que **l'énergie est «quantifiée»**, et que chaque valeur discrète de l'énergie correspond à un «**état quantique**».

Les oscillateurs émettent ou absorbent du rayonnement en faisant des «transitions» d'un état à l'autre. L'énergie ne peut donc être émise ou absorbée que par quantités discrètes, appelées «**quanta**».



La loi de Planck et le «quantum» d'énergie

En combinant l'hypothèse des quanta, avec le fait que les énergies des oscillateurs sont distribuées selon la distribution de Boltzmann (vue avant), on retrouve la loi de Planck pour le spectre du corps noir.

$$E_n = nhf \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

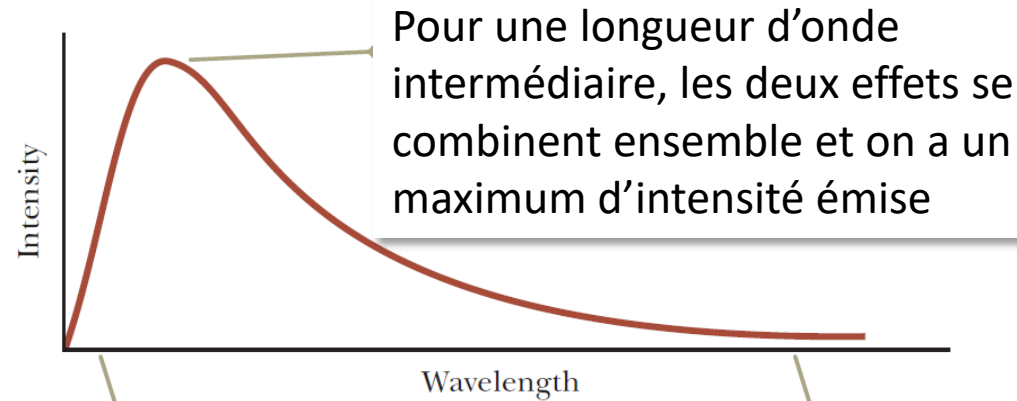
$$P(E_n) \propto \exp\left(-\frac{E_n}{k_B T}\right)$$



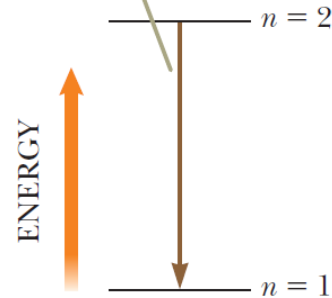
$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1}$$

Max Planck présenta sa loi à la Société Allemande de Physique le 14 décembre 1900. C'était la naissance officielle de la Physique Quantique.

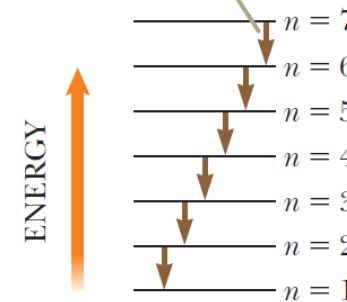
Intuition de la loi de Planck



Aux courtes longueurs d'onde, la séparation en énergie entre les états est grande. Selon la loi de Boltzmann, la probabilité que les oscillateurs se trouvent dans des états à haute énergie est donc faible. On a donc peu de transitions et une basse intensité de rayonnement émis



A des longues longueurs d'onde, la séparation en énergie est petite, et on aura beaucoup d'oscillateurs dans des états excités. Il y aura donc beaucoup de transitions, mais avec une petite énergie, ce qui explique la basse intensité du rayonnement



Exemples d'application

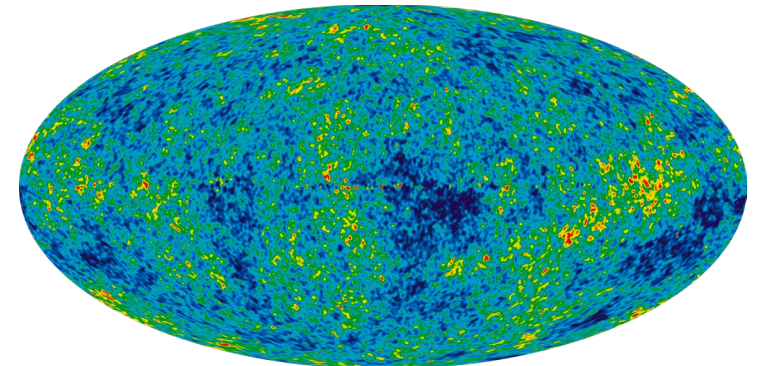
Grâce à la loi de Stefan-Boltzmann, on peut estimer avec précision la température d'un objet en mesurant le rayonnement qu'il émet.

$$\mathcal{P} = \sigma e A T^4$$

Puisque la puissance émise dépend de la quatrième puissance de la température, une petite variation de température se traduit en une variation importante de puissance émise.

C'est le principe de fonctionnement du thermomètre auriculaire et des caméras à infrarouge.

Un autre exemple très important en physique est le Fond Diffus Cosmologique (Cosmic Microwave Background). C'est le rayonnement présent dans l'univers suite au découplage entre rayonnement et matière. Il a un spectre correspondant à une température de 2.7 K et ses fluctuations sont un reflet des fluctuations quantiques dans les premiers instants de vie de l'univers.



Questions ouvertes

En 1900, l'idée que les oscillateurs émettent le rayonnement par quanta d'énergie était assez arbitraire

Quel est le mécanisme qui ferait qu'un oscillateur ne peut pas émettre certaines longueurs d'onde?

Est-il possible pour le rayonnement d'avoir des énergies autres que celles prévues par le mécanisme des oscillateurs «quantifiés»? En d'autres mots, la quantification de l'énergie est-elle une propriété fondamentale du rayonnement, ou-bien juste une conséquence du mécanisme d'émission par les molécules composant le corps noir?

Ces questions ont fait l'objet d'intenses recherches au début du 20^{ème} siècle.

Albert Einstein en 1905 donnera une réponse à la question sur la nature du rayonnement électromagnétique, en étudiant l'effet photoélectrique. Pour cette étude, il a obtenu le Prix Nobel en 1921.