

Physique Quantique (2)

L1 – Phys137

Université Paris-Sud

Raphaël-David Lasserri
Institut de Physique Nucléaire
lasseri@ipno.in2p3.fr

Cadre mathématique (1)

Description en termes de "fonction d'onde" :

$$\psi(x, t) \in \mathbb{C}$$

C'est un intermédiaire de calcul

Probabilité observable

$$P = |\psi(x, t)|^2$$

$$P \in \mathbb{R} , 0 \leq P \leq 1$$

Probabilité de réalisation de l'événement : « Trouver une particule en x à t »

Exercice – Taille atomique

On veut déterminer la taille a d'un atome d'hydrogène

On suppose que l'électron est délocalisé sur une zone correspondant à a : $\Delta x = a$ (m)

1) Déterminez l'écart type de l'impulsion de l'électron

2) Déterminez l'énergie totale de l'électron

Rappel : L'énergie potentielle électrostatique s'exprime $U = -\frac{K}{x} = -\frac{2.31 \cdot 10^{-28}}{x}$ (J)

3) Minimiser l'énergie totale par rapport à a

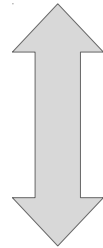
Rappel : Le minimum d'une fonction $f(x)$ s'obtient en résolvant $\frac{df}{dx} = 0$

4) En déduire la taille a de l'atome

Evolution temporelle (Classique)

Pour être prédictive une théorie doit par essence prédire l'évolution temporelle du système considéré

$$m\vec{a} = m\frac{d^2\vec{x}}{dt^2} = \sum \vec{F}_{ext} \quad (\text{PFD})$$



$$\Delta E_c = \sum \int \vec{F}_{ext} \cdot d\vec{l} \quad (\text{Th. Energie Cinétique})$$

Evolution temporelle (Quantique)

La théorie quantique est probabiliste mais reste bien prédictive

$$E = \frac{1}{2}mv^2 + V \quad \psi(x, t) = A_0 e^{i(kx - \omega t)}$$

$$E\psi(x, t) = \frac{p^2}{2m}\psi(x, t) + V\psi(x, t)$$

$$p^2 = -\hbar^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2}$$

$$E\psi(x, t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \psi(x, t) + V\psi(x, t)$$

Evolution temporelle (Quantique)

La théorie quantique est probabiliste mais reste bien prédictive

$$\psi(x, t) = A_0 e^{i(kx - \omega t)}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \psi(x, t) = -i\omega \psi(x, t)$$

$$-i\omega \psi(x, t) = -i2\pi f \psi(x, t) = -i \frac{2\pi E}{h} = -i \frac{E}{\hbar}$$

$$E\psi(x, t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \psi(x, t) + V\psi(x, t)$$

Équation de Schrödinger

Evolution temporelle d'une fonction d'onde

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \psi(x, t) + V \psi(x, t)$$

- Ressemble à une équation ondulatoire usuelle mais **complexe**
- Symétrique par renversement temporel $t \rightarrow -t$

La lumière

« La lumière est un phénomène physique, c'est un transport d'énergie sans transport de matière »

Propriétés :

- Fréquence
- Longueur d'onde
- Vitesse de propagation

La lumière

« La lumière est un phénomène physique, c'est un transport d'énergie sans transport de matière »

- 1) La lumière comme objet d'étude
- 2) La lumière comme sonde physique

Les sources de lumière

Comment produit-on de la lumière ?

Exemples ?

Les sources de lumière

Comment produit-on de la lumière ?

- Incandescence
- Luminescence

} Même mécanisme

Exemples ?

- Fluorescence



Les sources de lumière

Comment produit-on de la lumière ?

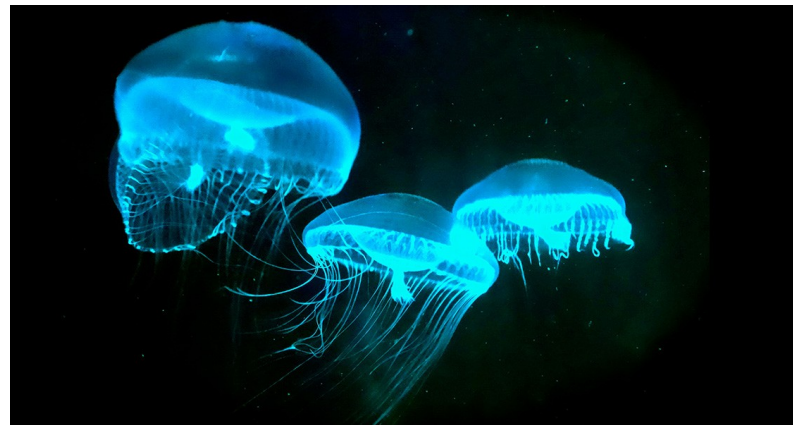
- Incandescence
- Luminescence



Même mécanisme

Exemples ?

- Bioluminescence



Les sources de lumière

Comment produit-on de la lumière ?

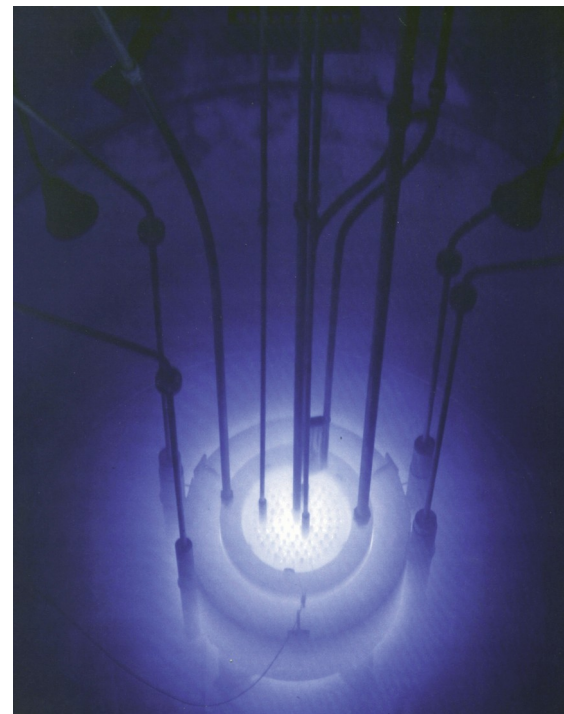
- Incandescence
- Luminescence



Même mécanisme

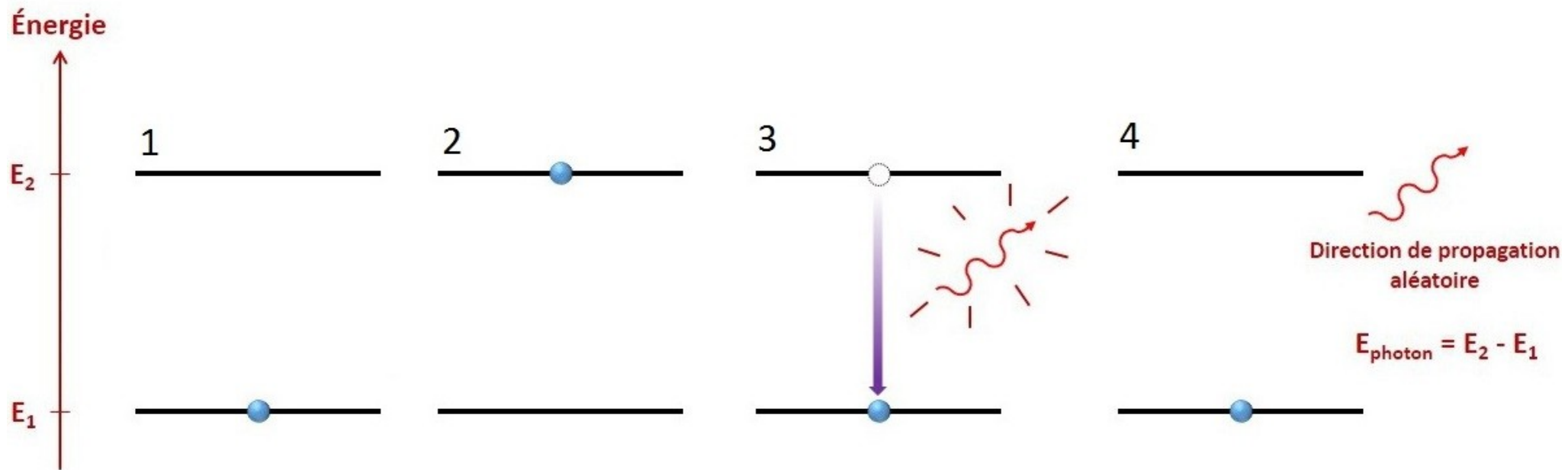
Exemples ?

- Effet Cerenkov



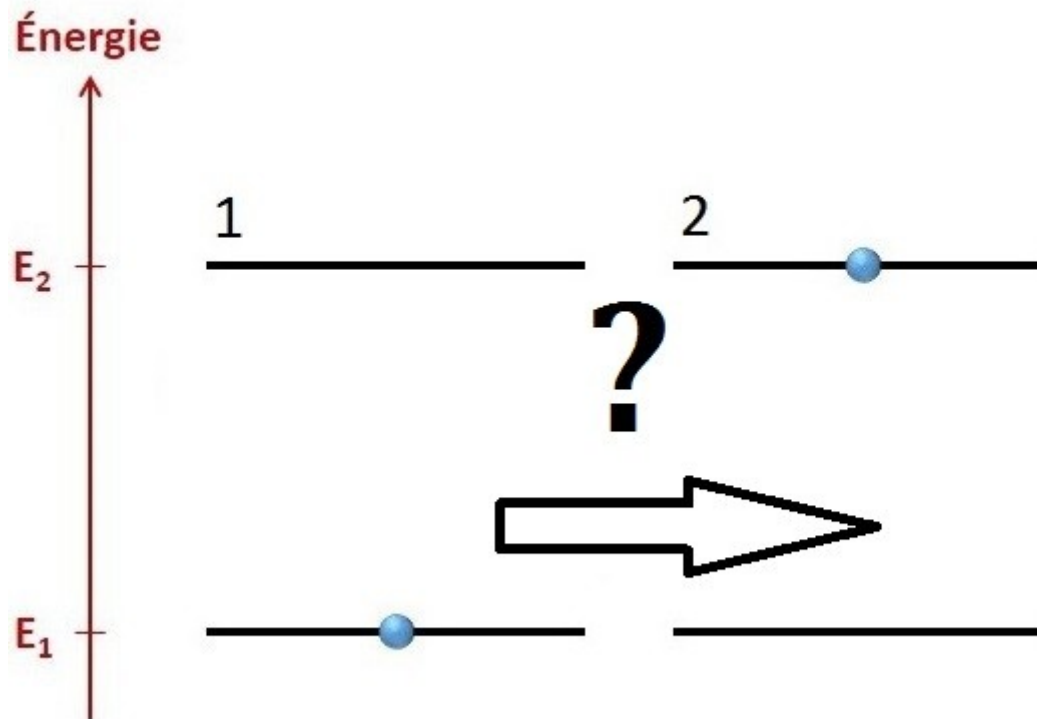
Couplage lumière matière

Un même principe



Les sources de lumière

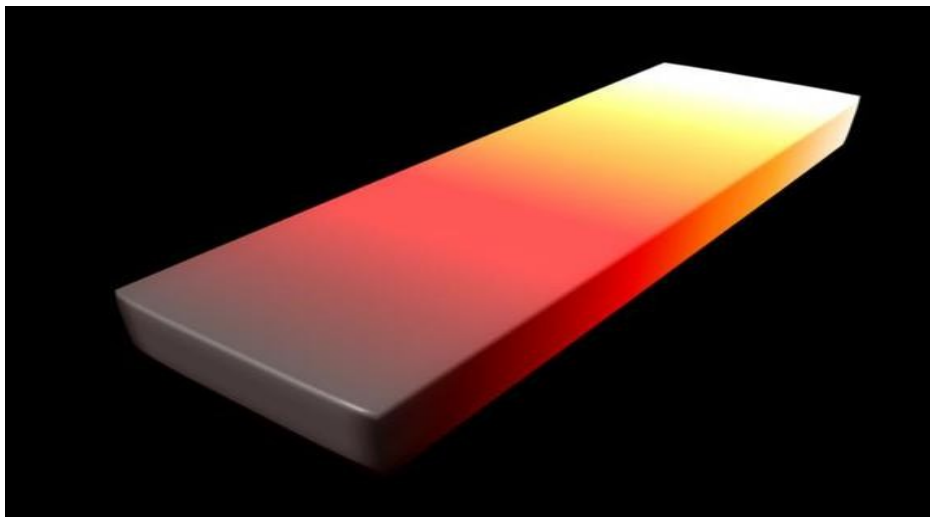
Mécanisme(s) d'excitation



Le corps noir (1)

Un corps noir est un objet **théorique** dont la radiation électromagnétique ne dépend que de la température

Exemple :



On parle de corps gris



Le corps noir (1)

Ici, l'excitation est due uniquement à l'agitation thermique

Loi de Rayleigh-Jeans (loi classique):

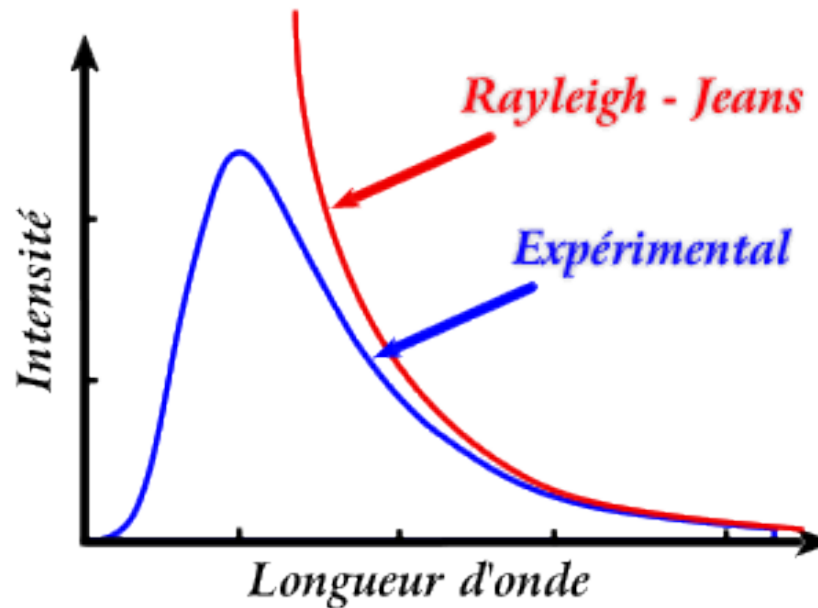
L'idée : L'énergie fournie sous forme thermique est transformée en rayonnement

$$L_{\lambda} = \frac{2kc}{\lambda^4} T$$

- Vitesse de la lumière c
- Constante de Boltzmann $k_B \simeq 1,38 \cdot 10^{-23} J \cdot K^{-1}$
- T la température
- La luminance spectrale en $\frac{W}{m^3 \cdot sr}$ Puissance rayonnée par unité de volume et d'angle

Le corps noir (1)

(petit) Gros problème → **La catastrophe ultraviolette**

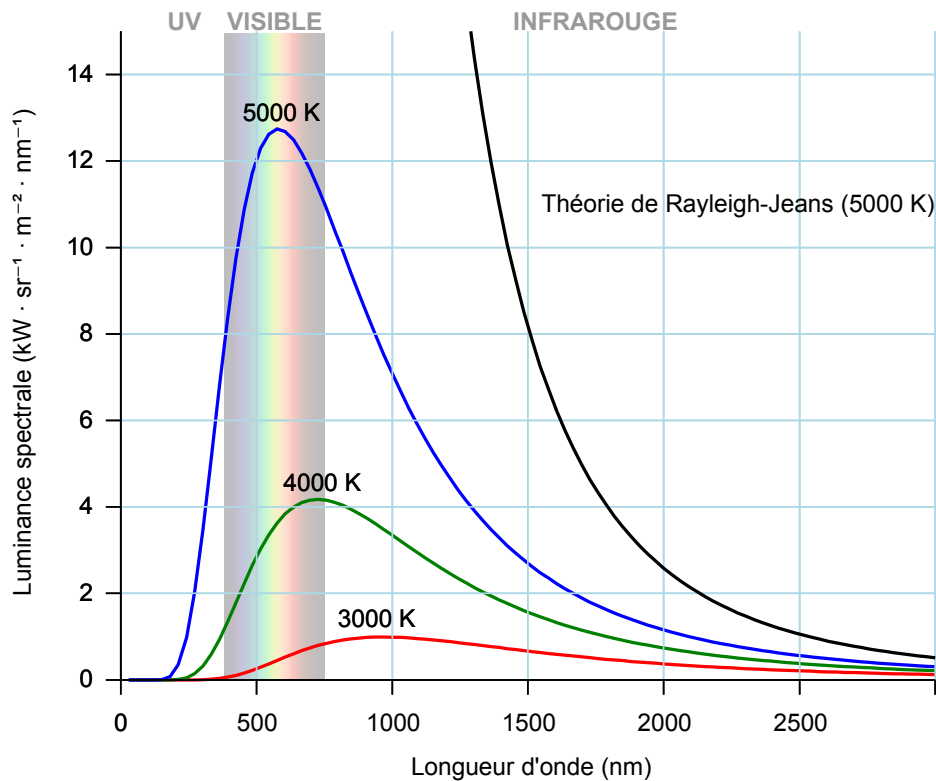


Divergence de l'intensité aux faibles longueurs d'ondes...

Le corps noir (2)

Introduction d'un quanta d'énergie (Planck)
On discrétise le continuum

$$E = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$$

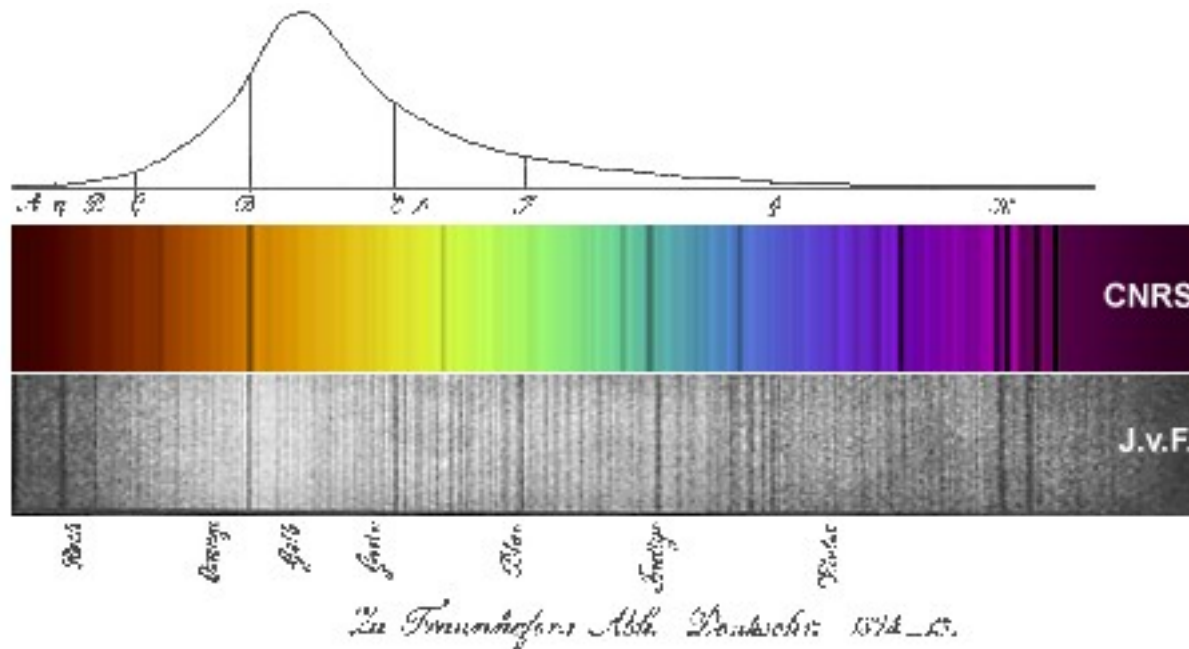


$$L(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

Exercice

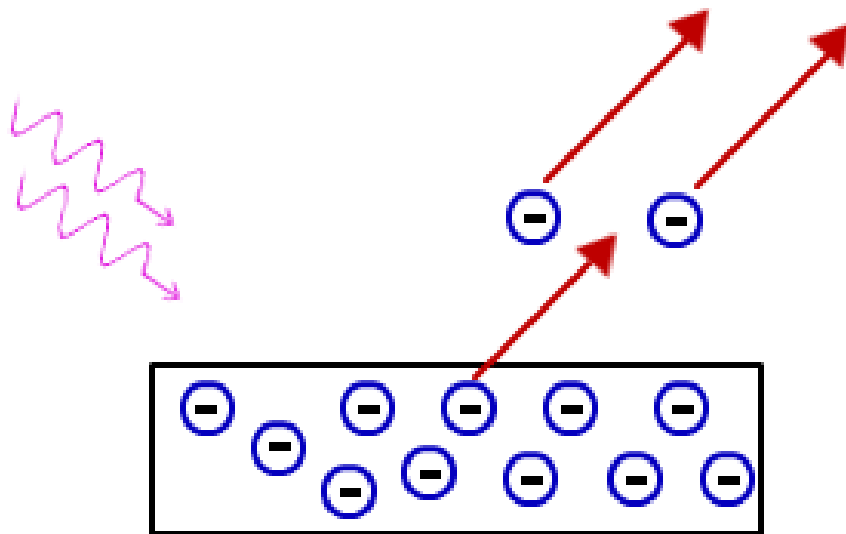
En considérant le soleil comme un corps noir parfait :

- 1) Déterminer la longueur d'onde correspondant à l'émission la plus intense
- 2) A partir de la loi de Planck déterminer quelle est la longueur d'onde correspondant au maximum d'intensité
- 3) En utilisant cette relation déterminer la température du soleil



L'effet photoélectrique

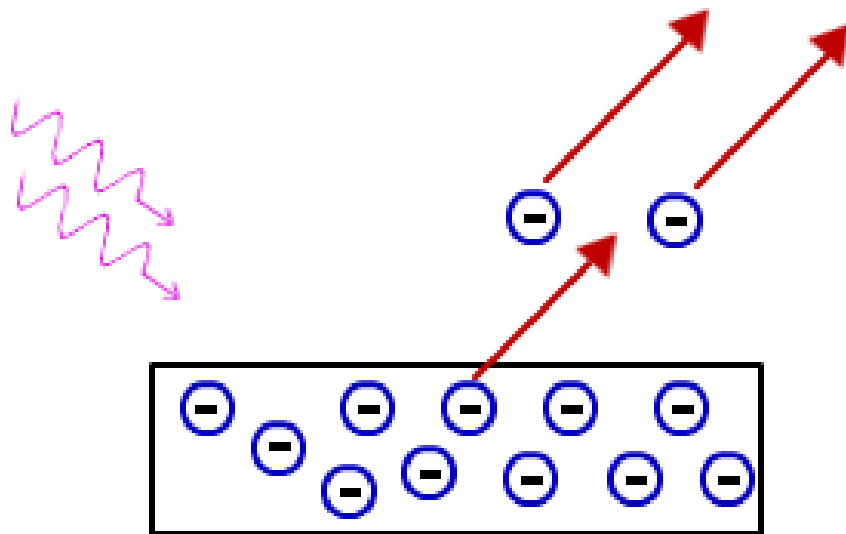
Planck a-t-il tout résolu ?



- Les électrons ne sont émis qu'à partir d'une certaine fréquence
- Cette fréquence dépend du matériau
- Le courant électrique est proportionnel à l'intensité lumineuse
- Phénomène quasi-instantané

L'effet photoélectrique

L'explication d'Einstein :



- Non seulement la « matière est quantifiée » mais la lumière l'est aussi !
- Apparition de la notion de **photon**, le quantum de lumière
- Réinterprétation de la loi
$$\Delta E = h\nu$$

Exercice

On considère une cathode recouverte de sodium dont la fréquence d'extraction est $f_{ex} = 5.1 \cdot 10^{14} Hz$:

1) Calculer l'énergie d'extraction d'un électron du métal

La plaque est frappée par une radiation de longueur d'onde $\lambda = 0.4 \cdot 10^{-6} m$

2) Calculer l'énergie cinétique maximale d'un électron arraché de la plaque

3) En déduire la vitesse maximale de l'électron.

4) Donner un ordre de grandeur de l'incertitude minimale sur la position de cet électron

La lumière

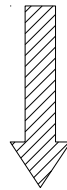
Dualité onde-corpuscule

- Propriétés ondulatoires "évidentes" (Interférences)
- Mais également comportement corpusculaire (Photons)

La spectroscopie

Complémentarité des mécanismes d'émission et de réception

Longueur d'onde présente dans un spectre



Photon émis par les transitions d'un éléments chimique présent dans l'échantillon

Spectre d'émission :

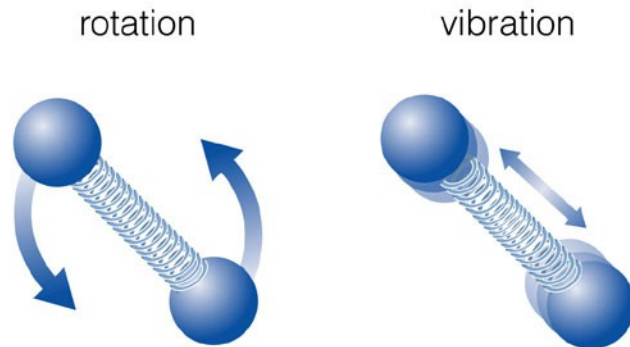


Spectre d'absorption :



La spectroscopie

L'étude détaillé du spectre obtenu permet de remonter à la constitution chimique de l'échantillon



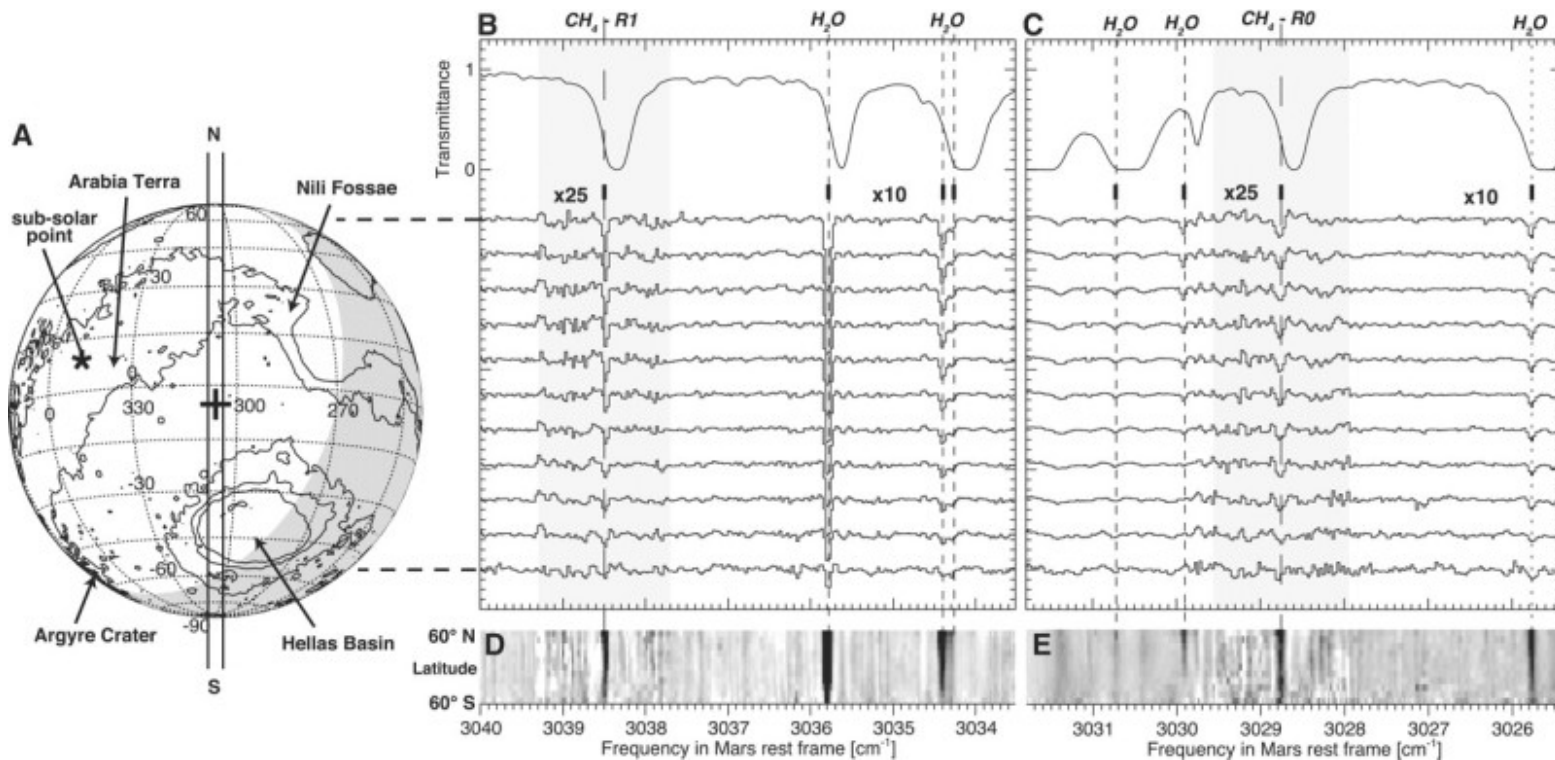
Copyright © 2004 Pearson Education, publishing as Addison Wesley.

Applications :

- Astrophysique
- Chimie
- Biologie...

Exercice

Étude de la composition de l'atmosphère martienne



Expliquer qualitativement l'observation et l'origine microscopique des raies

LASER

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation



LE LASER

LASER – Interaction lumière espace

Principe :

- Émission d'un photon identique au photon incident
- Réflexion quasi-totale dans la cavité
- Effet "d'avalanche" → Augmentation macroscopique du nombre de photons dans la cavité

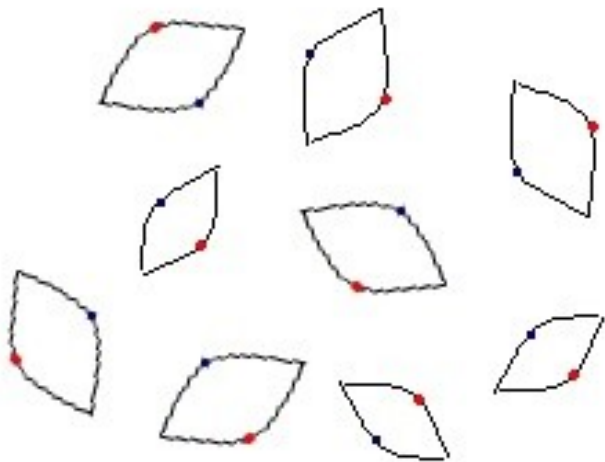
Subtilité :

D'où vient le "premier" photon ?

LASER – Interaction lumière espace

La "**structure**" du vide quantique

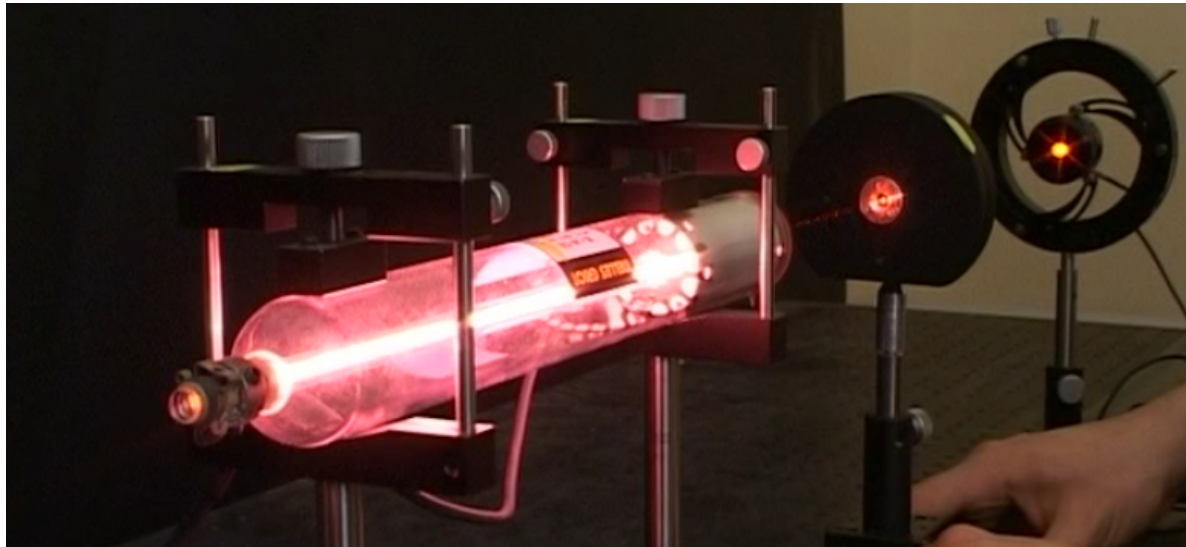
- Le vide quantique n'est pas vide
- Fluctuations d'énergie permanente → Apparition du "premier photon"
- On parle de création de paires particule-antiparticules



$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

LASER – Interaction lumière espace

Applications:



- Mesure de distance
- Excitation atomique/nucléaire
- Transmission d'information
- Sabres

LASER – Interaction lumière espace

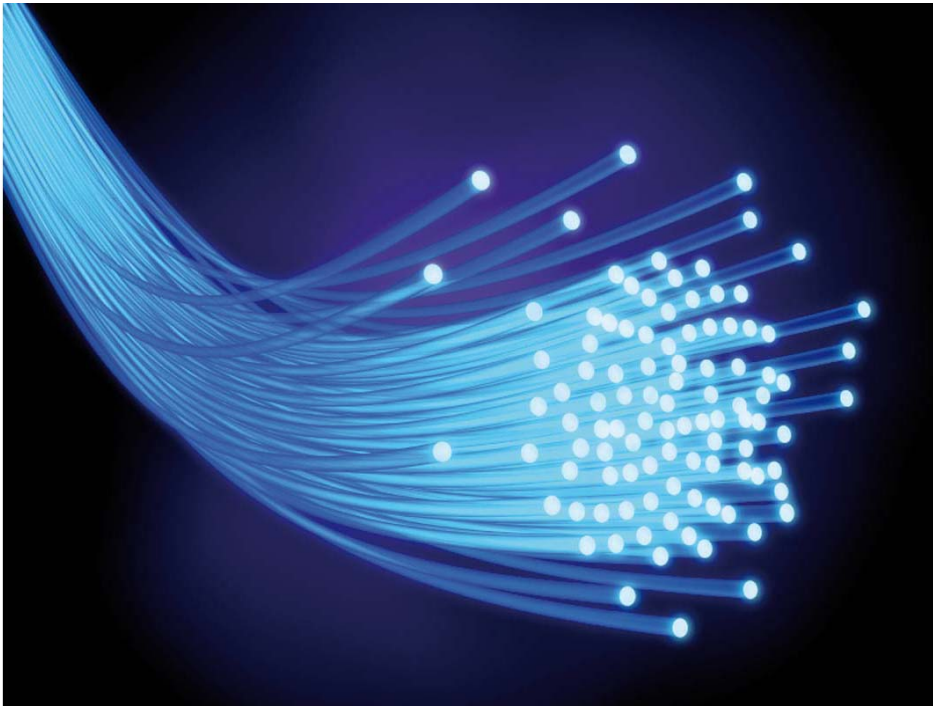
Applications:



- Mesure de distance
- Excitation atomique/nucléaire
- Transmission d'information
- Sabres

LASER – Interaction lumière espace

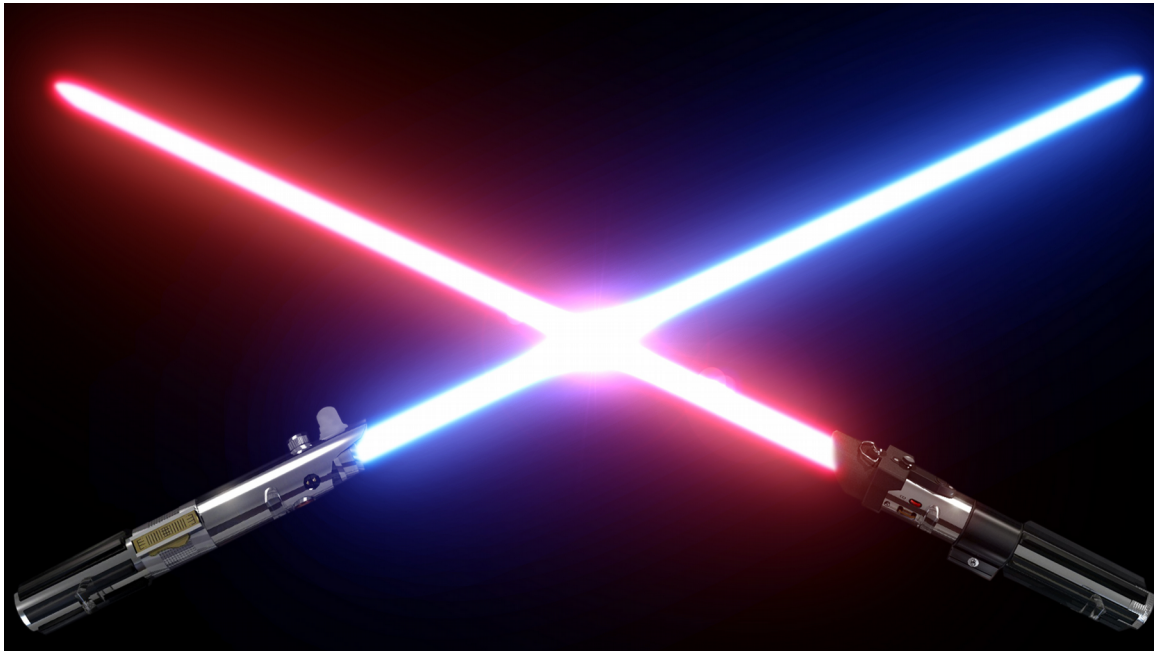
Applications:



- Mesure de distance
- Excitation atomique/nucléaire
- Transmission d'information
- Sabres

LASER – Interaction lumière espace

Applications:



- Mesure de distance
- Excitation atomique/nucléaire
- Transmission d'information
- Sabres

Exercice

Soit un LASER "pulsé" rouge délivrant une énergie
 $E = 100 \text{ mJ}$

- 1) Le LASER émet un rayonnement pendant 10 fs déterminer la puissance fournie pendant une impulsion
- 2) Déterminer le nombre de photons émis pendant chaque impulsion
- 3) Discuter des applications d'un tel LASER

Zeste(s) de Relativité générale

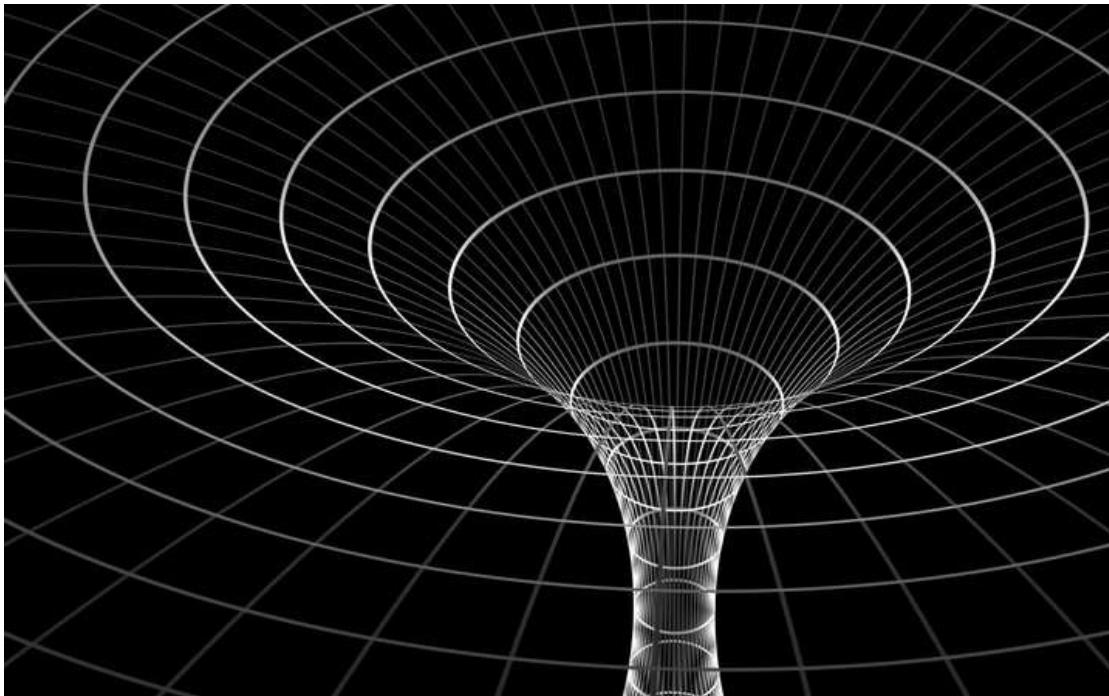
$$\underbrace{R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R}_{\text{Espace-Temps}} = \underbrace{\kappa T_{\mu\nu}}_{\text{Énergie}}$$

- L'espace-temps n'est plus absolu et "plat" mais courbe et dynamique
- Les photons empruntent le chemin « le plus court » entre deux points
Ces trajectoires sont les **géodésiques**

Trous noirs – Singularités

Définition (simplifiée) :

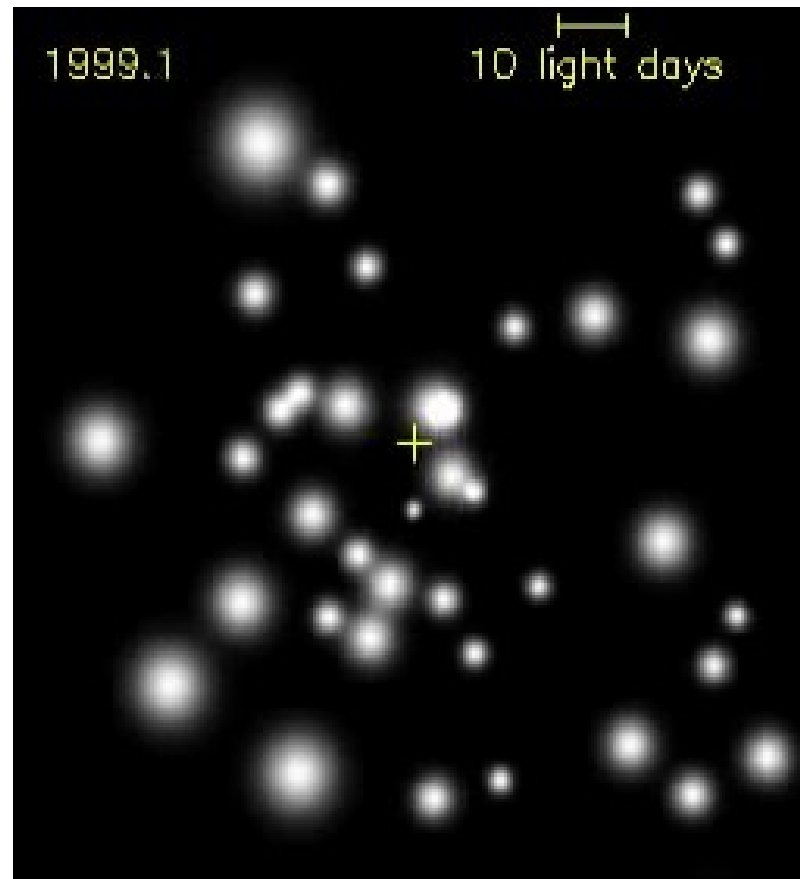
Objet massif dont la vitesse de libération est supérieure à celle de la lumière



- Objet extrêmement massif et dense
- Produit de l'effondrement de certaines étoiles en fin de vie
- Notion d'horizon du trou noir
- **Aucune information** ne peut s'échapper d'un trou noir

Trous noirs – Observations ?

Comment observer un objet qui n'émet pas de lumière ?



En observant son environnement !
Ou (Ondes gravitationnelles)

Exercice

Soit une étoile de masse M

- 1) Calculer la vitesse nécessaire pour arracher un objet du champ gravitationnel de l'étoile
- 2) En déduire le rayon (dit de Schwarzschild) R_s d'un trou noir de même masse M
- 3) Calculer le rayon de Schwarzschild dans le cas du Soleil

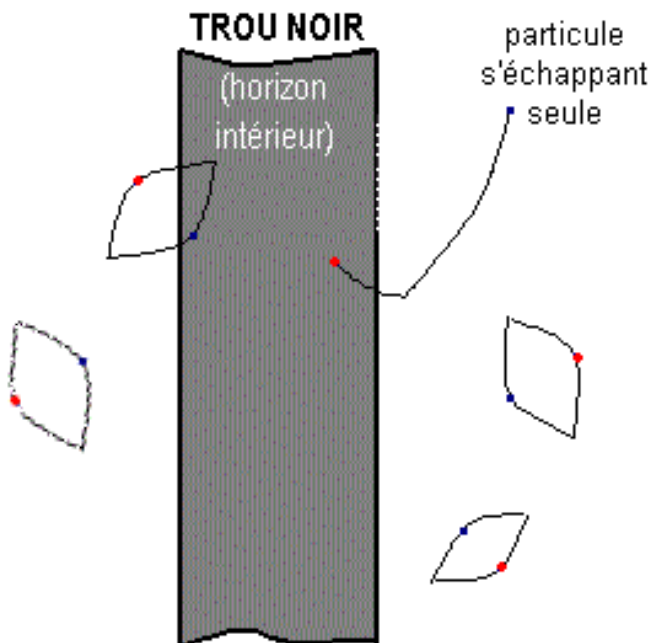
Rappel :

$$M_{\text{soleil}} \simeq 2 \cdot 10^{30} \text{kg}$$

Trous noirs – Effets quantiques

- **Aucune information** ne peut s'échapper d'un trou noir

Mais...



A ces échelles de taille la mécanique quantique joue un rôle primordial

- Des particules peuvent émerger de l'horizon
- Effet purement quantique
- C'est le **rayonnement Hawking**

Points à retenir

- La lumière est un objet purement quantique
- Elle est un objet d'étude autant qu'une sonde physique
- La structure quantique d'un élément peut être reconstruite grâce à son spectre
- Le vide quantique n'est pas vide au sens classique
- Aux très grandes échelles la mécanique quantique joue un rôle fondamental
- Ce cours n'est qu'une introduction à des concepts bien plus avancés.
- Nourrissez votre curiosité et votre rigueur scientifique