

# INTRODUCTION À L'ASTROPHYSIQUE



Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule & Cosmologie

Université Denis Diderot Paris 7, CNRS, Observatoire de Paris & CEA

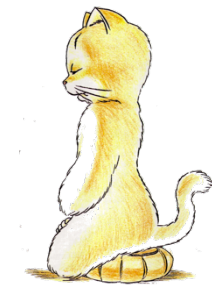




# Programme provisoire

---

- Physique
  - Lumière
  - Espace et temps
  - Gravitation
  - Physique atomique et nucléaire
  - Distances dans l'univers
- Système solaire
  - Planètes
  - Petits corps
  - Le Soleil
  - Exoplanètes
- Étoiles
  - Classement
  - Structure
  - Formation
  - Évolution
  - Fin des étoiles
- Galaxies
  - Galaxies spirales
  - Galaxies elliptiques
  - Galaxies actives et quasars
  - Amas de galaxies
  - Matière noire
- Cosmologie
  - Inventaire
  - Théorie du big bang
  - Thermodynamique, nucléosynthèse
  - Le fond micro-ondes (CMB)
  - Formation des galaxies
  - Énergie noire



# De l'importance de la lumière

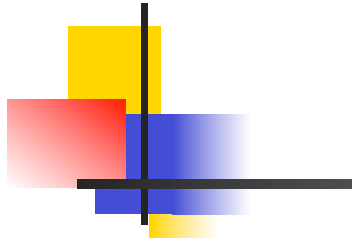
- La lumière est pratiquement le seul moyen de connaître l'univers car
  1. L'univers est **TRÈS** grand
  2. L'univers est transparent
  3. La lumière va très vite

➔ Information biaisée ?

Matière noire



Énergie noire

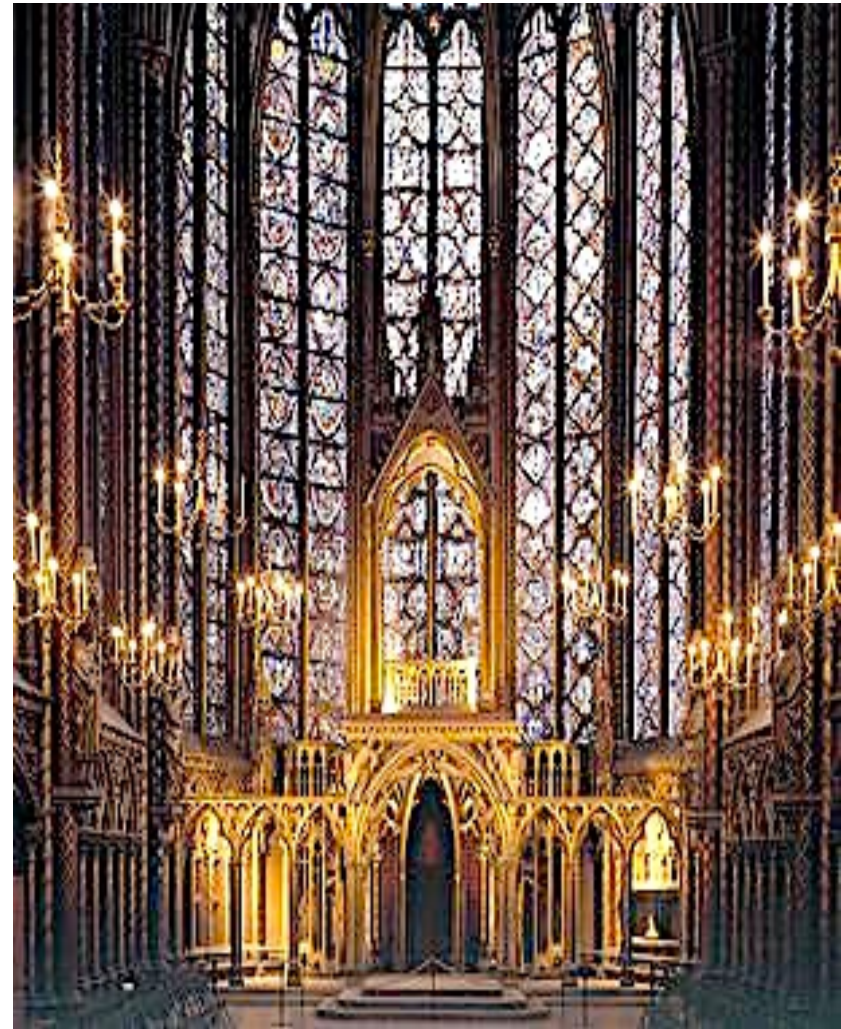


# LA LUMIÈRE

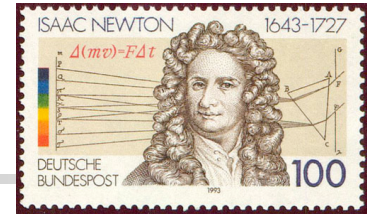


# Qu'est-ce que la lumière ?

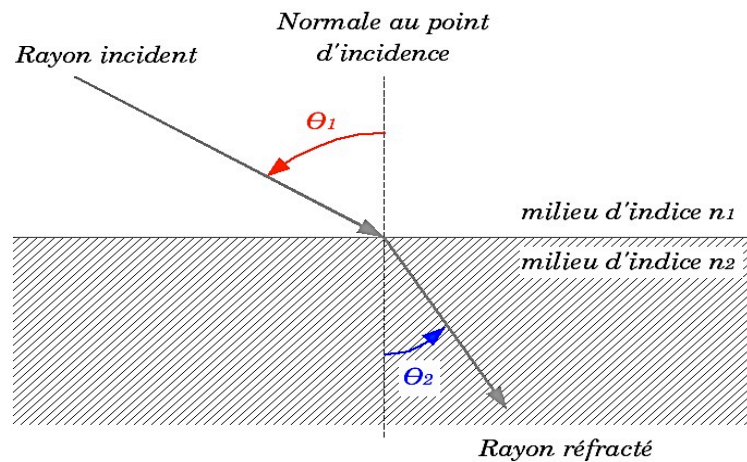
- Une **propriété** des corps matériels ?
- Une **émanation** des corps matériels ?
- Un **corps** à part entière ?
  - Immatériel ?
  - Matériel ?
    - Une particule ?
    - Une onde ?



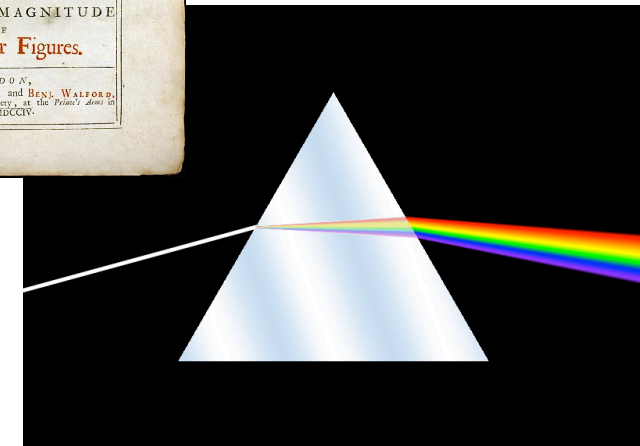
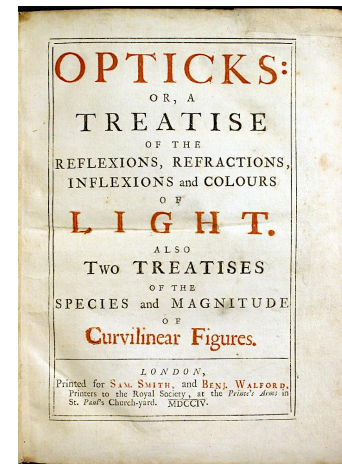
# Une particule ?



- Lois empiriques de la réflexion et de la réfraction
  - Ibn Sahl (vers 980)
  - Ibn al Haytham (960-1040) *Traité d'optique*
  - Les médiévaux
    - Robert Grosseteste, Roger Bacon, Witelo, Dietrich de Freiberg...
  - W. Snell (vers 1625 ?)
  - R. Descartes (1637)

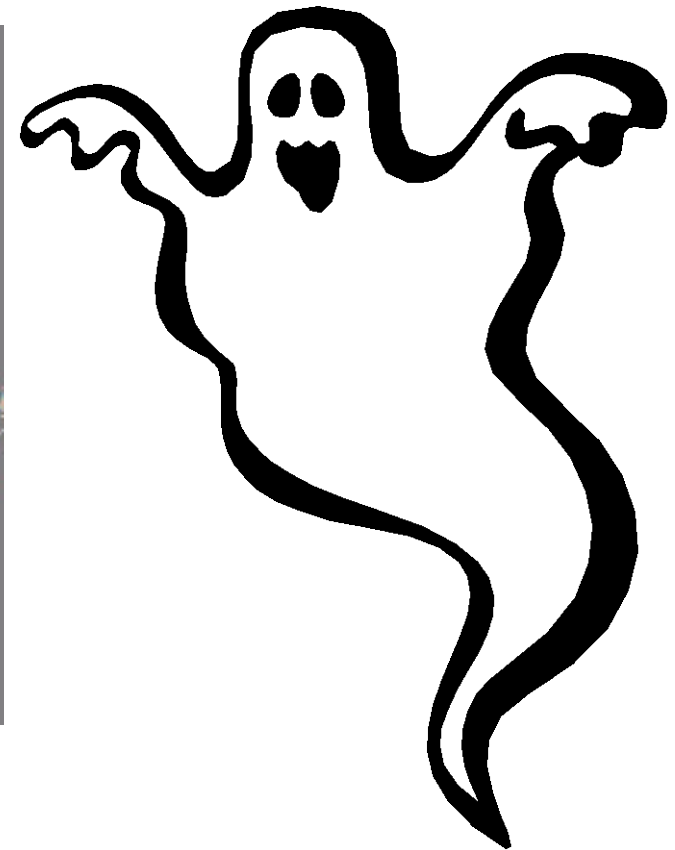
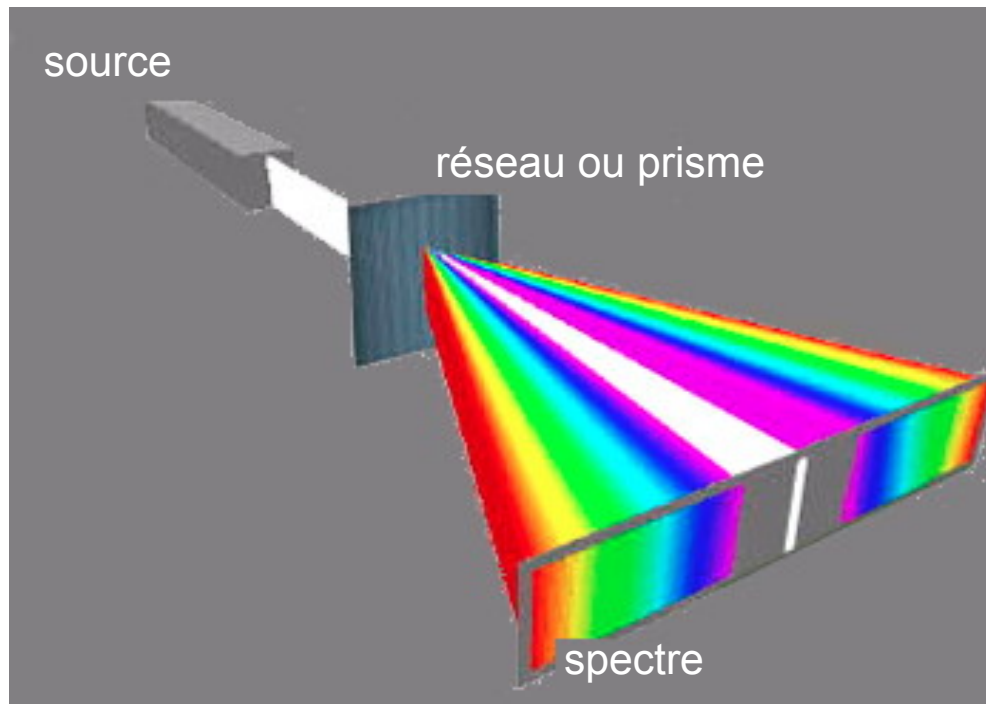


- Rømer (1676)
  - Vitesse finie
- Théorie corpusculaire
  - Newton (1704)



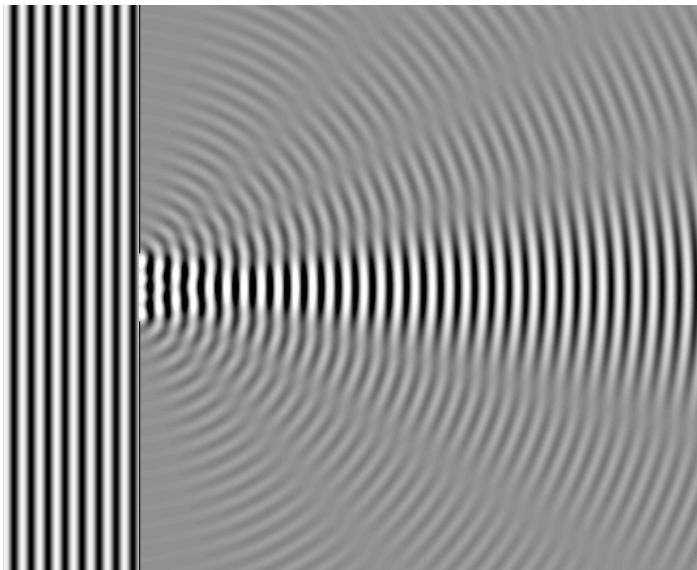
# Séparer les couleurs $\Rightarrow$ spectrométrie

- Un spectrographe envoie chaque couleur à un endroit différent



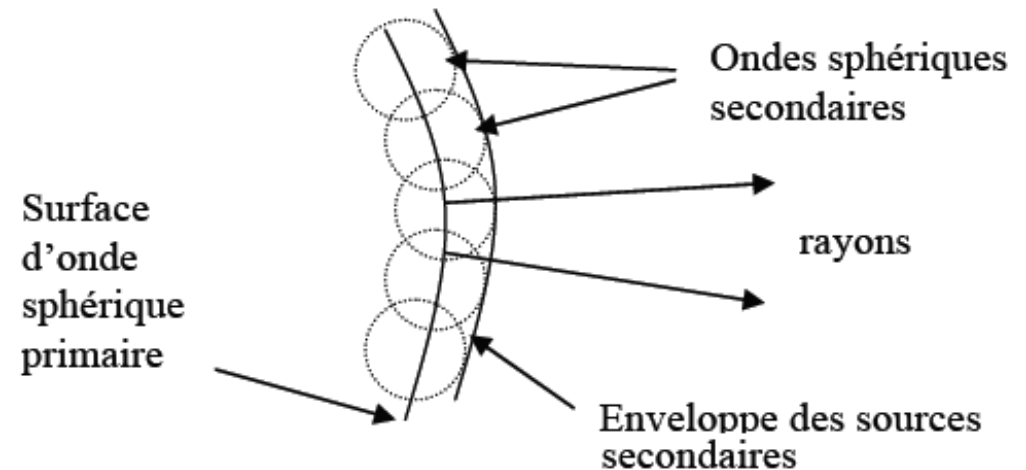
# Une onde ?

- Diffraction (F.M. Grimaldi 1618-1663)
  - La lumière qui passe par une petite ouverture ne projette pas une image nette (zone de *pénombre*)



- Plus des effets colorés inexplicés

- Fronts d'onde (Christiaan Huyghens 1629-1695)



- Mais le prestige de Newton est immense
- ⇒ la théorie ondulatoire est décriée



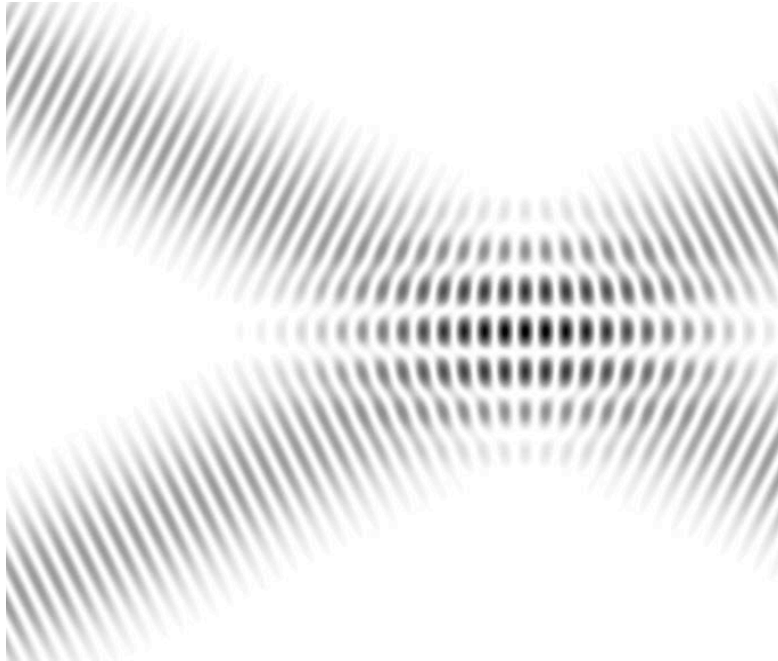
# Diffraction - et interférence - de vagues sur l'océan



Motuopao Island, Cape Reinga, Northland, New Zealand

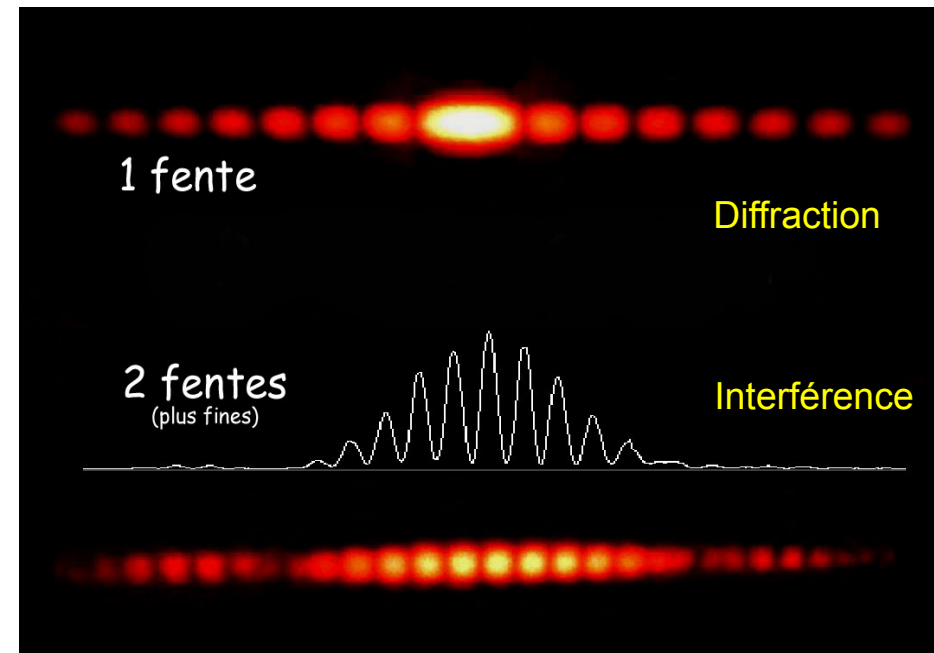
# Une onde !

- Thomas Young (1773-1829)
  - Interférences  $\Rightarrow$  ondes



- **Lumière + lumière = obscurité !**

- Augustin Fresnel (1788-1827) : théorie ondulatoire de la lumière
  - $\Rightarrow$  réflexion et réfraction
  - $\Rightarrow$  interférences
  - $\Rightarrow$  diffraction
  - $\Rightarrow$  couleurs ( $\Leftrightarrow$  longueur d'onde  $\lambda$  ou fréquence  $\nu = V/\lambda$ )





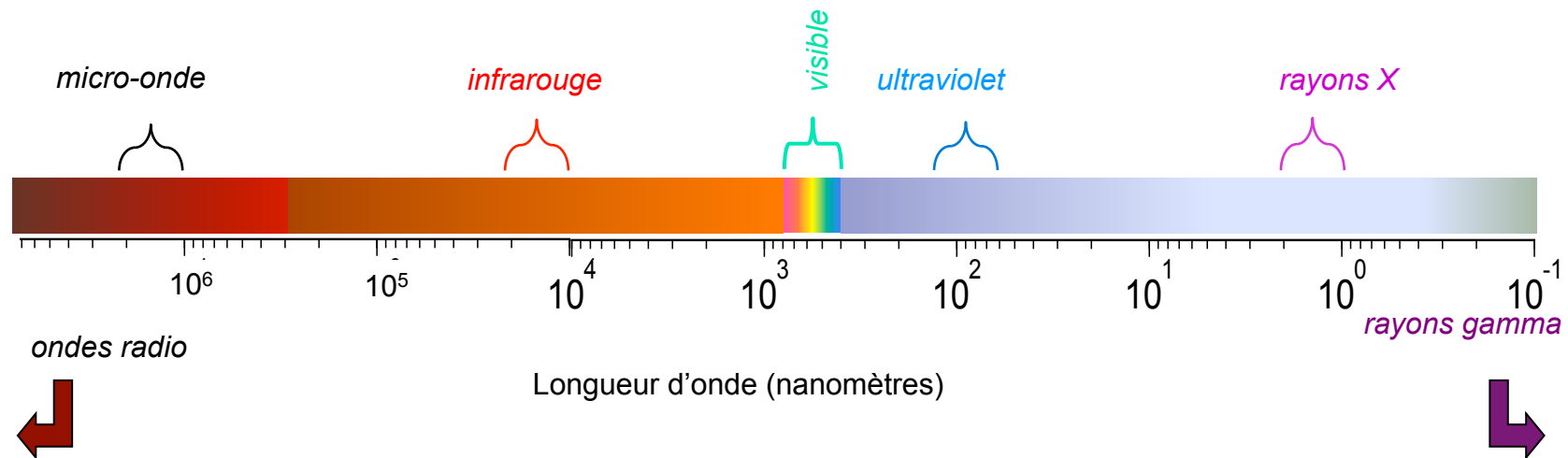
# Une onde *électromagnétique*

- James Clerk Maxwell (1831-1879)
  - équations permettant de décrire tous les phénomènes électriques et magnétiques alors connus (1861)
  - prévoient des *ondes* électromagnétiques (détectées par Hertz en 1888)
  - font apparaître la vitesse de la lumière comme vitesse de ces ondes
- ⇒ la lumière est bien une onde, une onde électromagnétique
- ⇒ elle doit être fabriquée par des charges ou des courants électriques
- ⇒ les atomes ?

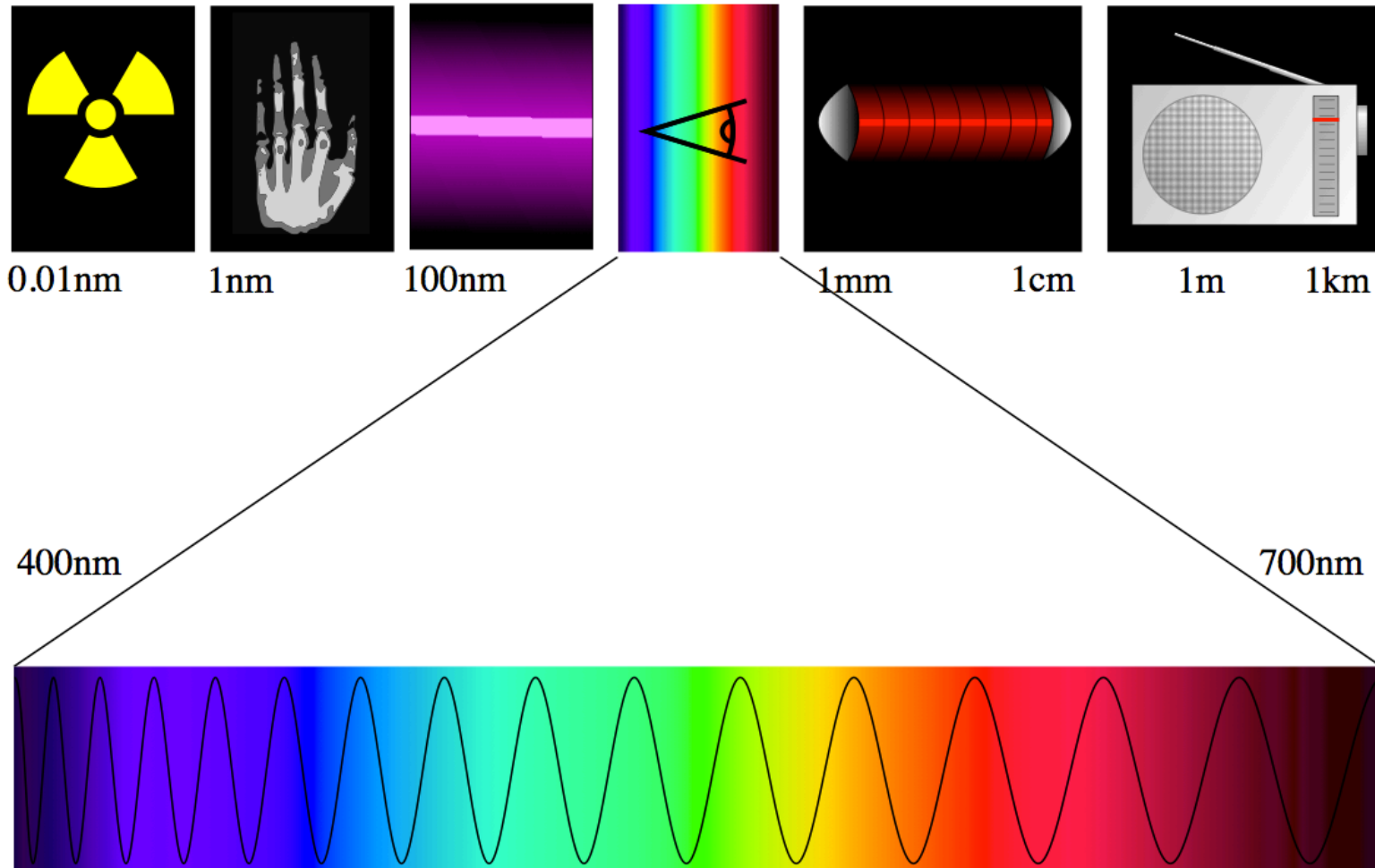


# Onde $\Rightarrow$ fréquence $\nu$ et longueur d'onde $\lambda$

- Relation  $\nu = c/\lambda$  (où  $c$  est la vitesse de l'onde)
- Large gamme de longueurs d'ondes (« spectre »)

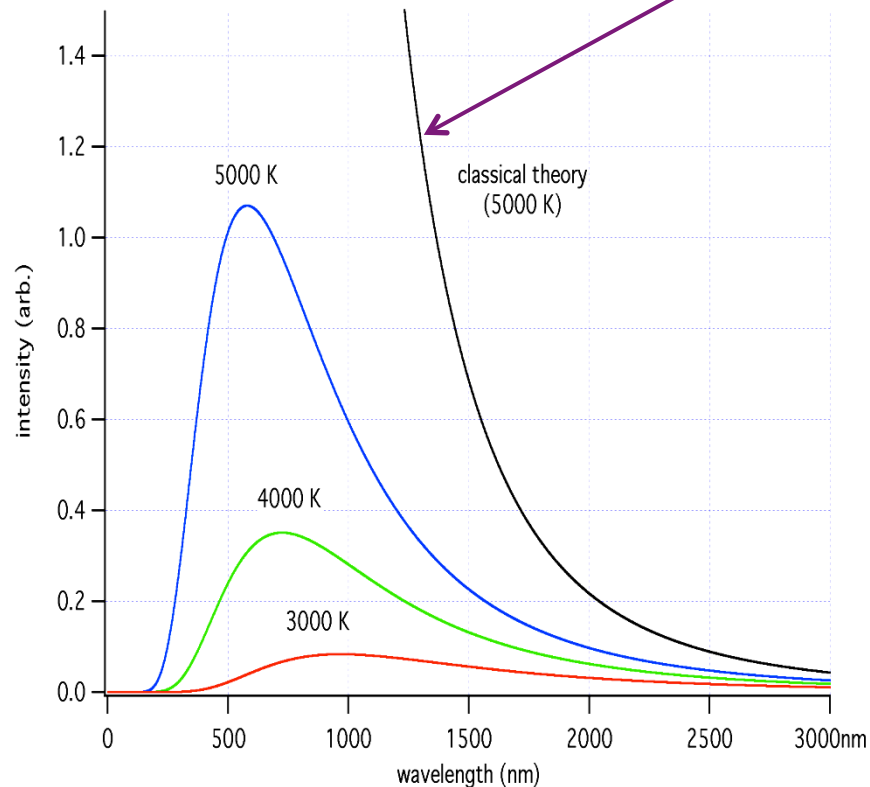


# Onde $\Rightarrow$ fréquence $\nu$ et longueur d'onde $\lambda$



# Non, finalement la lumière est une particule !

## ■ Rayonnement d'un corps chaud



## ■ Catastrophe ultraviolette

## ■ Quantification de Planck (1900)

- Artifice de calcul: l'énergie ne peut être échangée entre rayonnement et corps noir que par quantités finies (non-nulles)
- Quantité proportionnelle à la fréquence  $\nu$

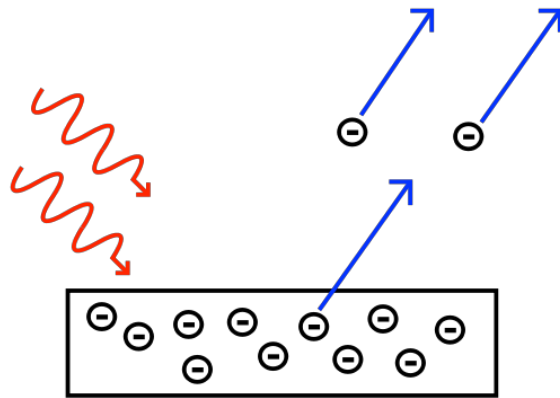
$$\delta E = h \nu$$

- Constante de Planck  $h$
- Redonne parfaitement la courbe expérimentale
- Mais pourquoi cela marche-t-il?

# La lumière est une particule : le photon

## ■ Effet photoélectrique

- La lumière peut arracher des électrons à certains matériaux

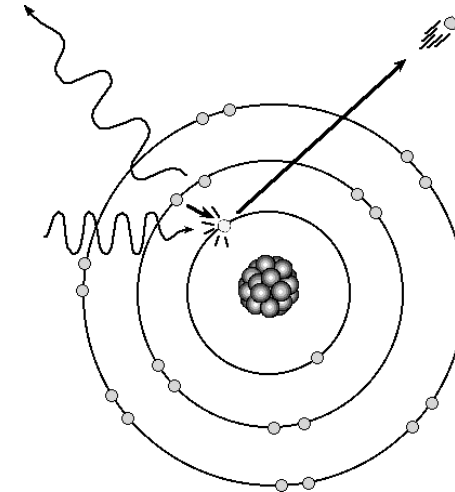


## ■ Mais l'effet n'apparaît qu'au delà d'une fréquence minimale

- domaine optique pour les métaux alcalins comme le césium
- UV pour les autres métaux
- UV lointain pour les autres matériaux

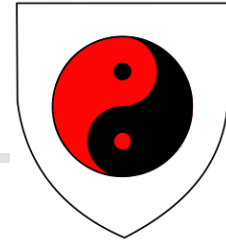
## ■ Einstein 1905

- Les photons existent réellement
- Seul un photon ayant une énergie minimale peut arracher un électron
- $E = h \nu \Leftrightarrow$  Seuil en fréquence

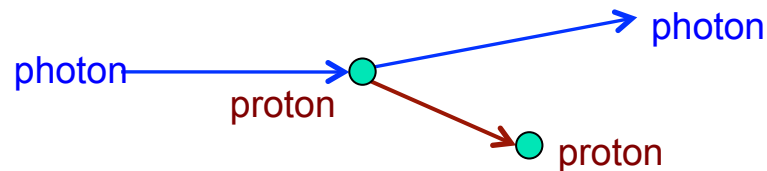


- Augmenter l'intensité du rayonnement augmente le *nombre* d'électrons, pas leur *énergie*

# Dualité onde-corpuscule

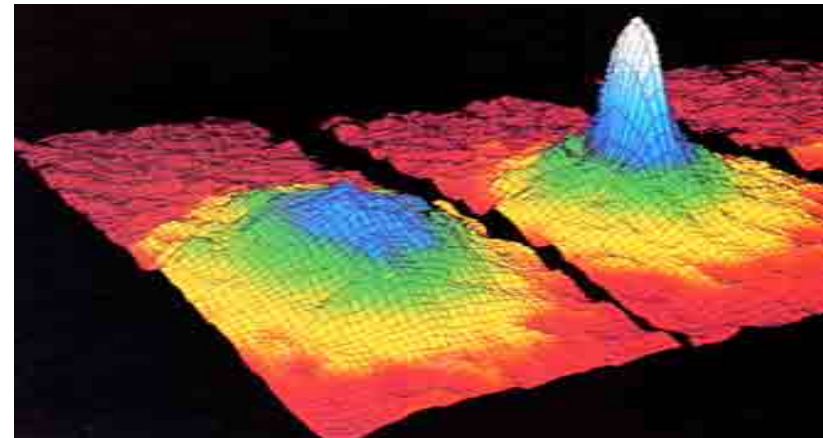


- La lumière est une onde
  - ➡ diffraction
  - ➡ interférences
- La lumière est faite de particules
  - ➡ effet photo-électrique
  - ➡ diffusion Compton



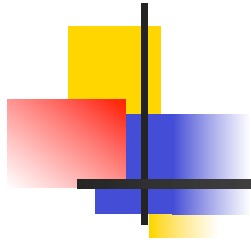
- ➡ elle est les deux à la fois
  - Il en est de même de toutes les particules: *Contraria sunt complementa*

- Théorie quantique des champs
  - Les photons comme les électrons sont décrits par un champ qui recouvre tout l'espace
    - champ électromagnétique
    - champ électronique
  - Les excitations localisées (les quanta) de ce champ sont identifiées comme un photon ou un électron



- ⇔ tous les photons comme tous les électrons sont rigoureusement identiques





# FABRIQUER DE LA LUMIÈRE

# Deux grandes façons de fabriquer de la lumière

## ■ 1 - en excitant de la matière



- → distribution des longueurs d'onde (spectre)
  - indépendante de la température
  - dépendante de la matière

## ■ 2 - en chauffant de la matière

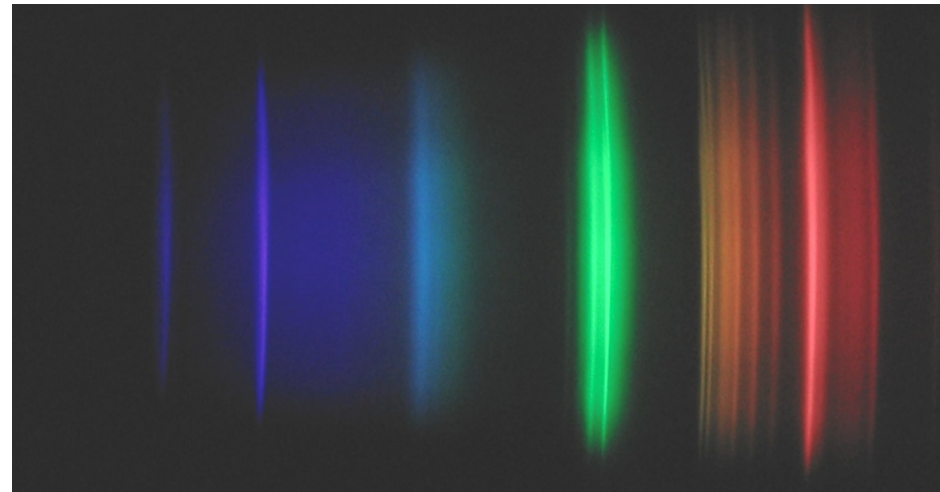
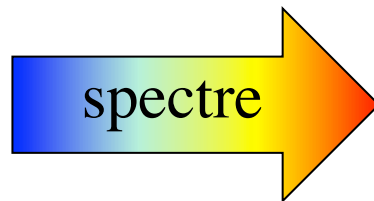


- → distribution des longueurs d'onde (spectre)
  - dépendante de la température
  - indépendante de la matière

# Fabriquer de la lumière en excitant la matière

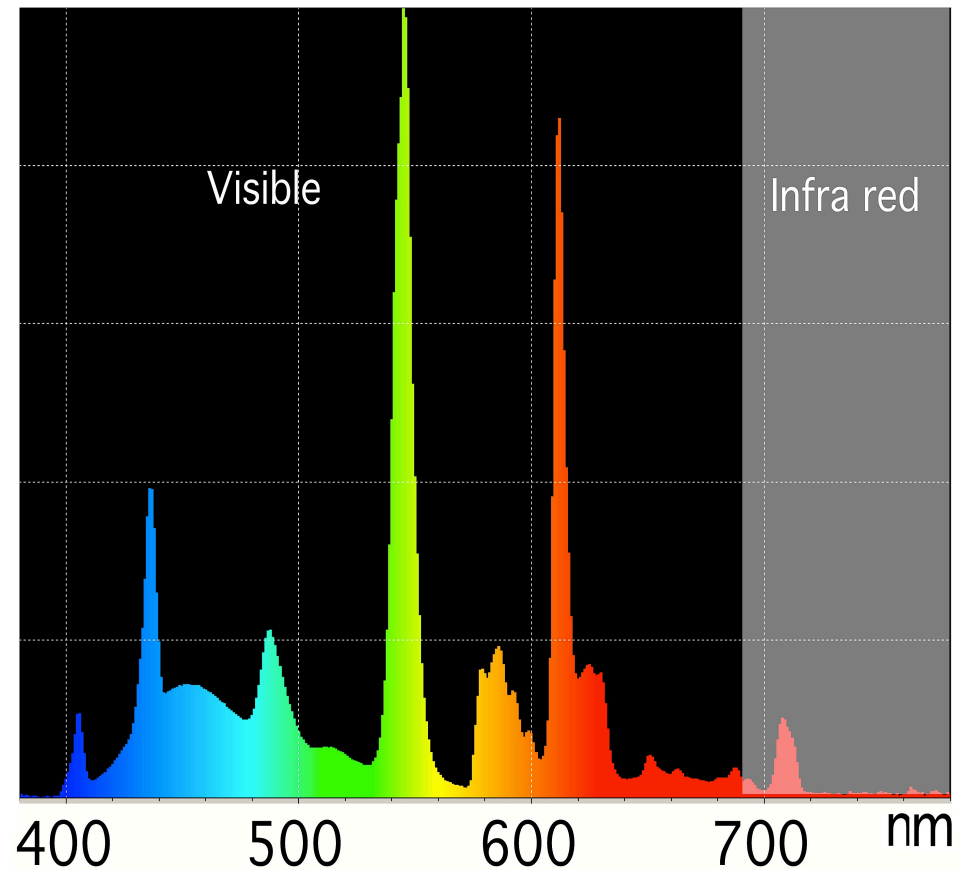
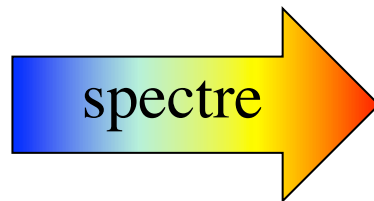


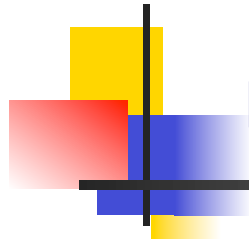
- Lampe fluocompacte
- Gaz (vapeur de mercure) soumis à une très haute tension  
→ rayons bleus et ultraviolets
- Revêtement de phosphore → conversion en lumière verte+jaune+rouge
- ⇒ lumière « blanche »





- Il est plus précis de représenter le spectre par la courbe de l'intensité de la lumière en fonction de la longueur d'onde



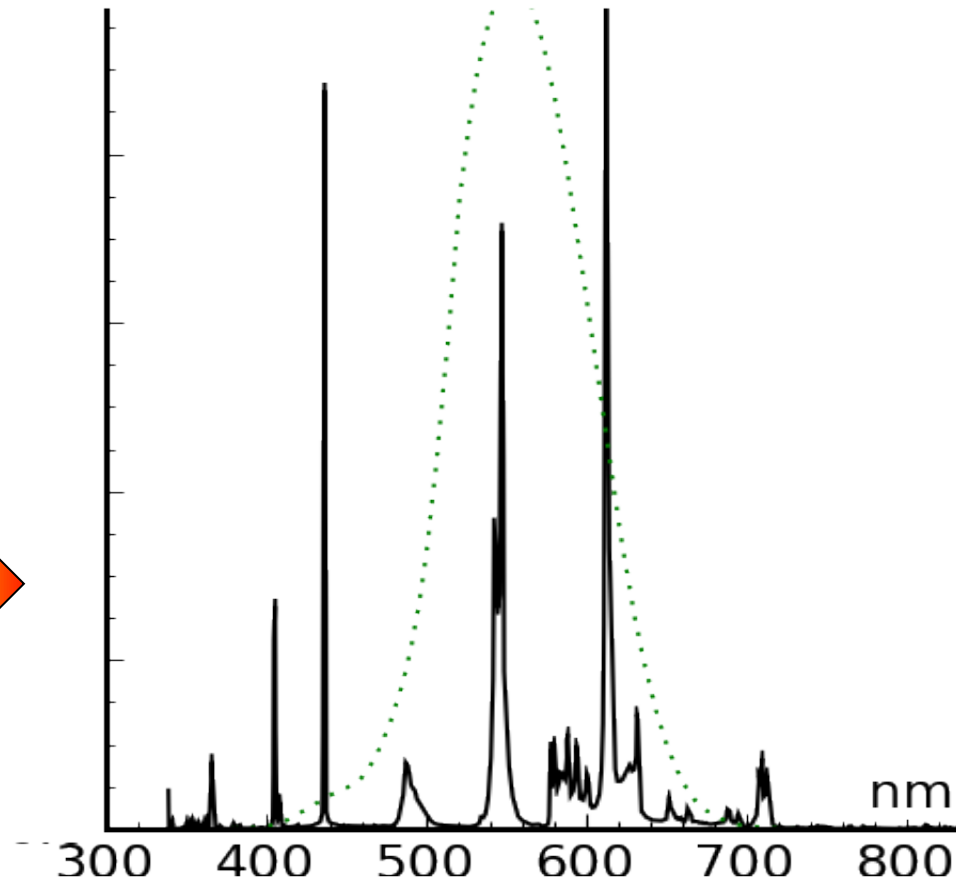
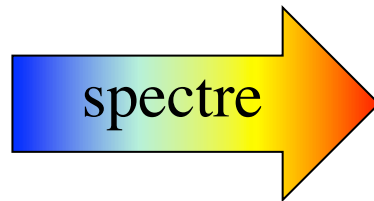


# D'une lumière à son

# spectre

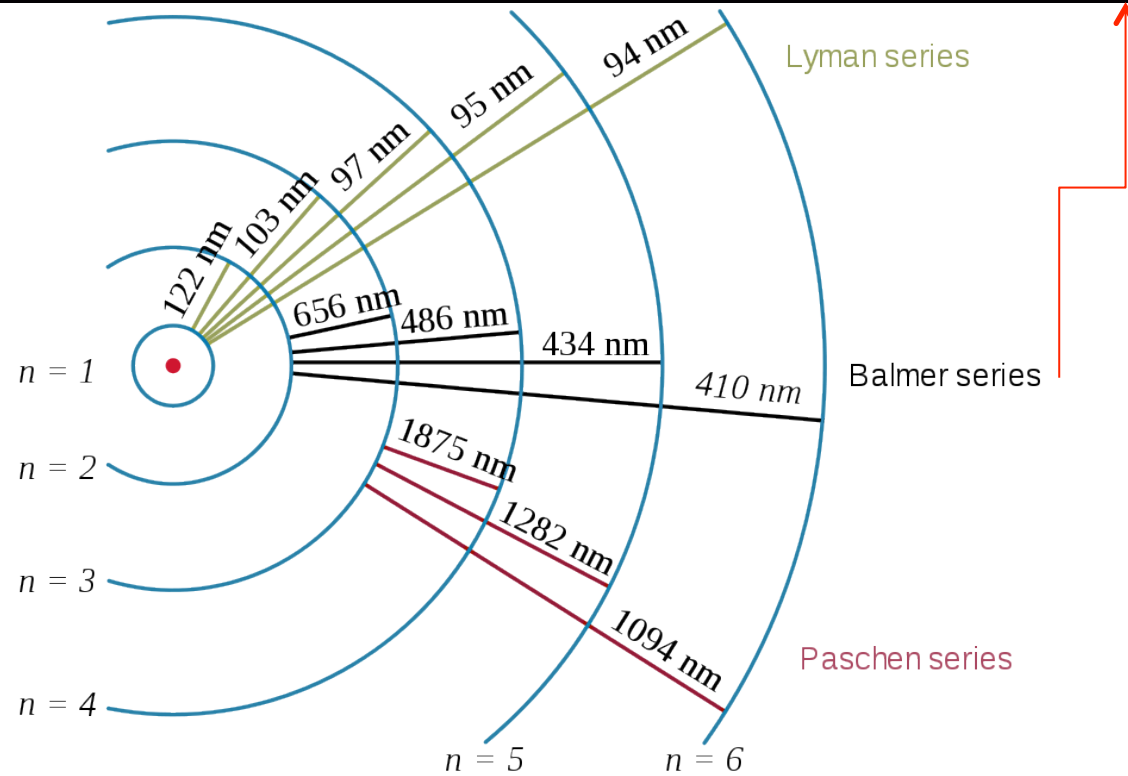
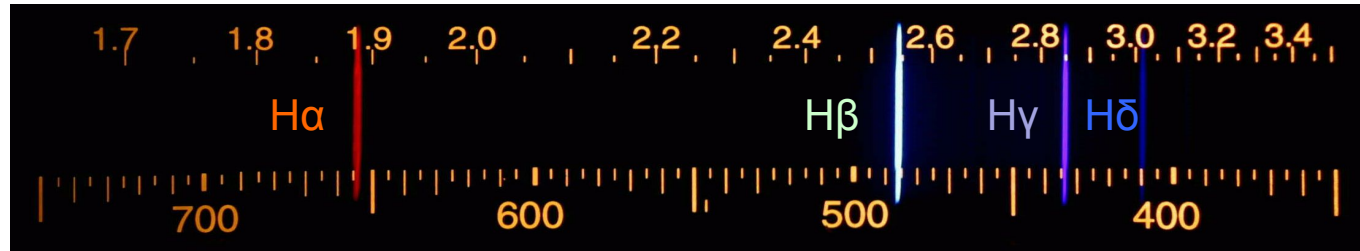


- Ou plus sobrement



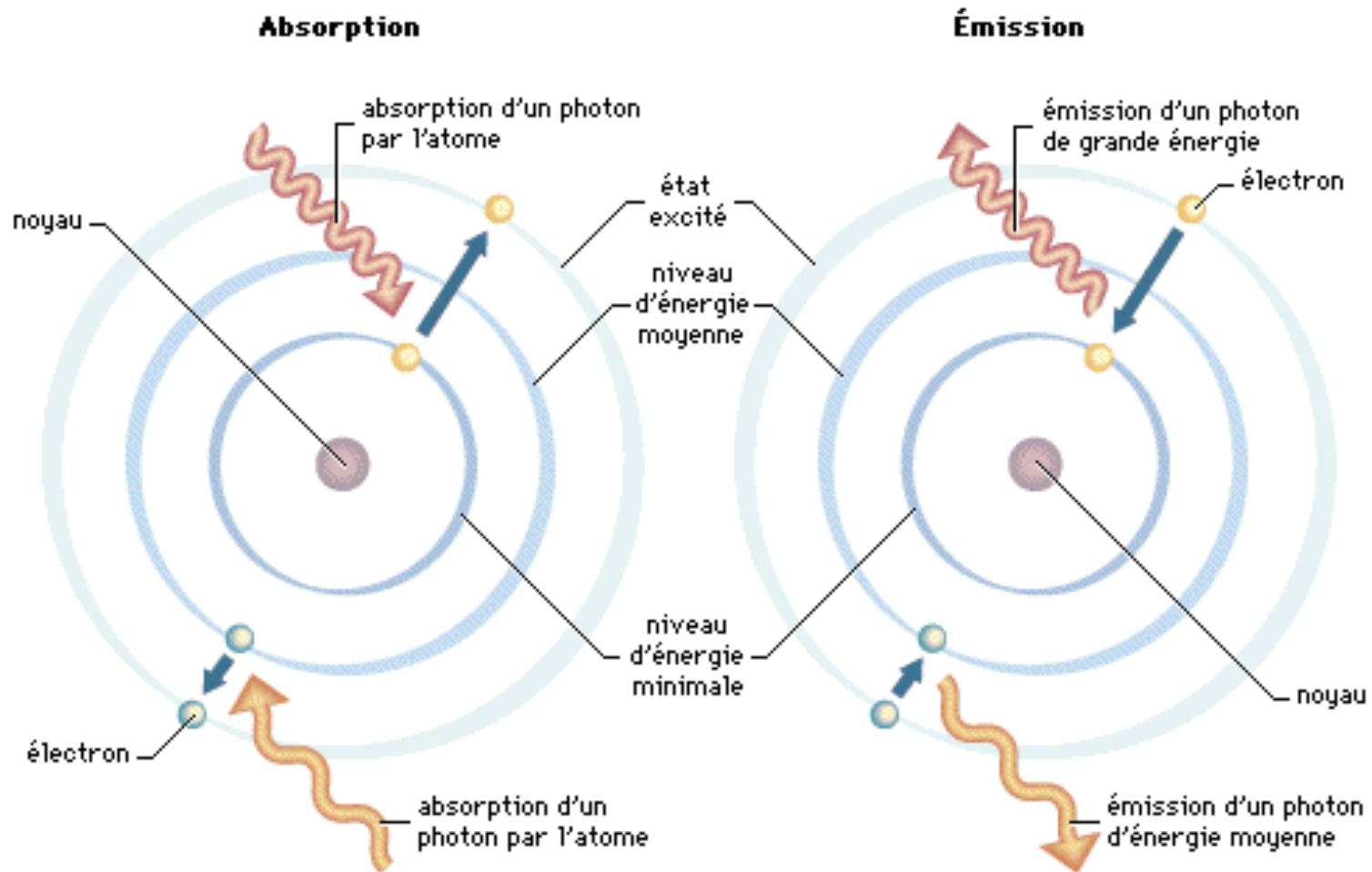
# Atome et raies spectrales

- Hydrogène



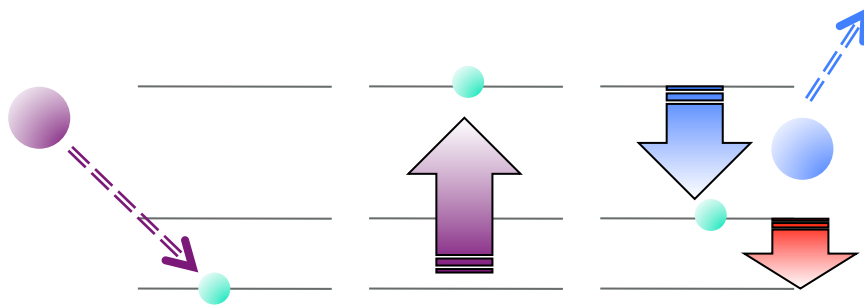


# Électrons atomiques $\Rightarrow$ raies caractéristiques



## Un peu plus compliqué : fluorescence et phosphorescence

- La lumière réémise par un atome n'est pas nécessairement à la même longueur d'onde que la lumière incidente
- Un photon de haute énergie (UV par ex.) porte un atome dans un état très excité

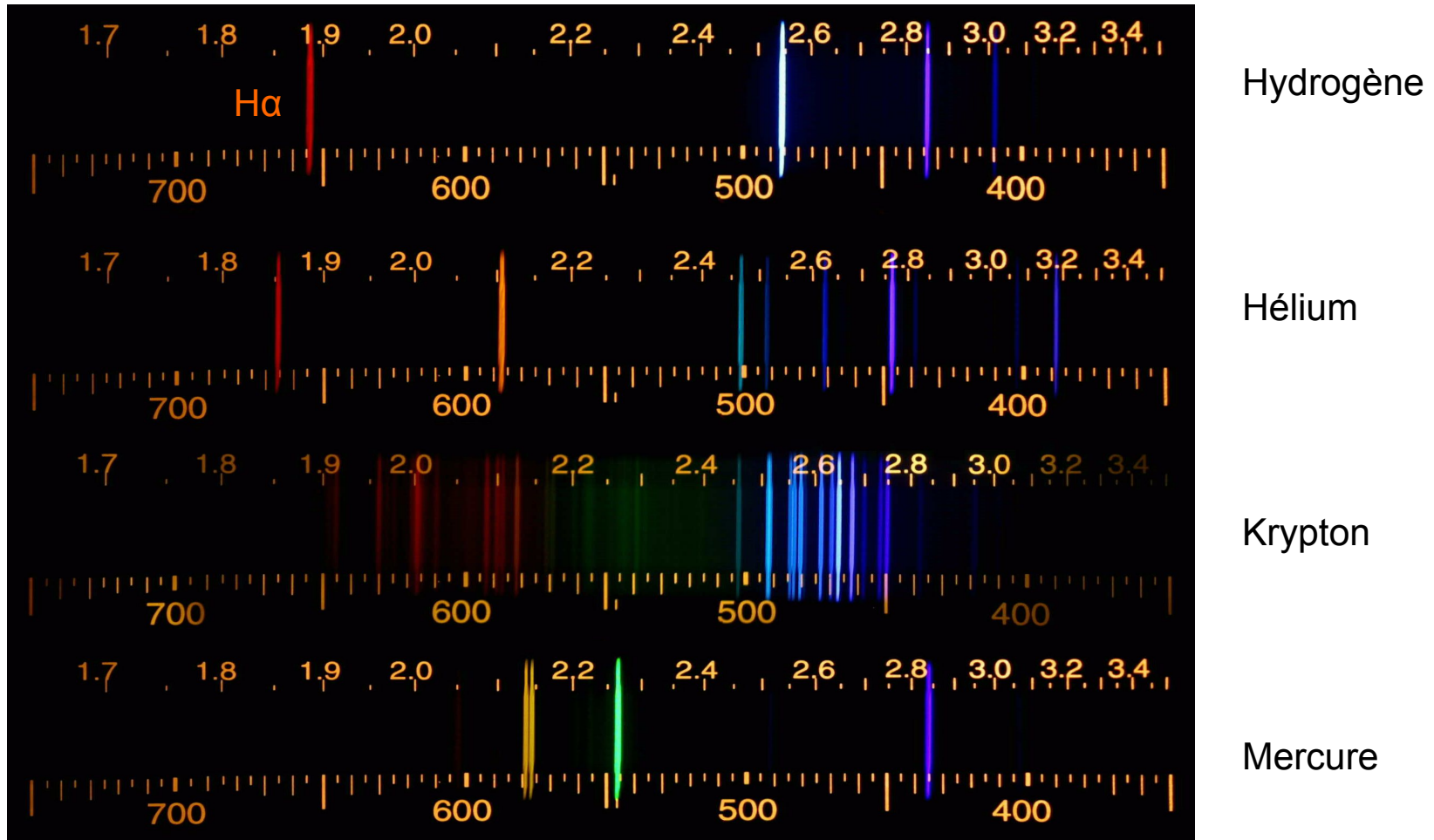


- Le retour à l'état de plus basse énergie peut se faire par émission de 2 (ou plus) photons d'énergie plus faible

- Nébuleuse planétaire NGC6751
  - L'étoile chaude centrale irradie l'enveloppe de gaz en UV
  - Celle-ci réémet de la lumière visible

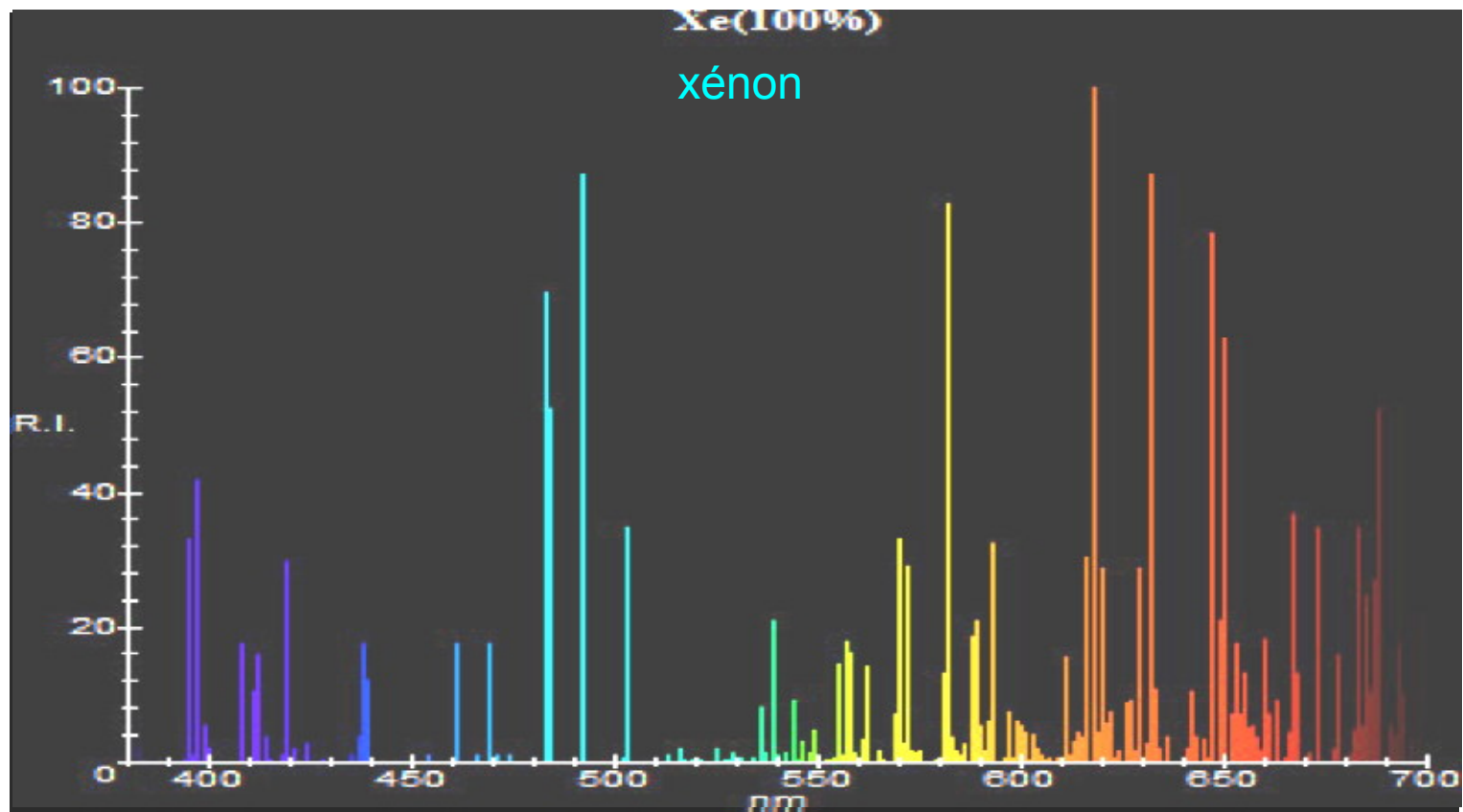


# Revenons aux spectres de raies



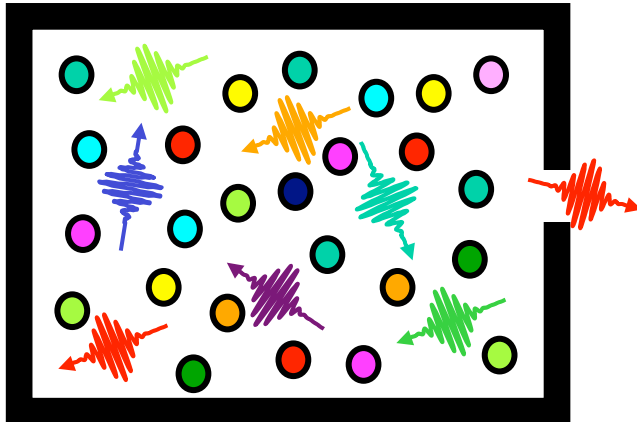
## Chaque type d'atome a **SES** raies personnelles

- Les énergies des électrons dépendent du noyau
- ⇒ les raies dépendent de la nature chimique des atomes **émetteurs** ou **absorbeurs**



# Fabriquer de la lumière en chauffant : le « corps noir »

- Absorbe tous les rayonnements sans en réfléchir aucun (il est donc « noir »)
- Émet tous les rayonnements (il est donc brillant!)
- Spectre totalement indépendant de la nature physique ou chimique du corps
- Ne dépend que de la température



- Exemples
  - Un four de potier
  - Une ampoule à incandescence
  - Une étoile
  - Le fond micro-ondes (CMB)





# Émission thermique


---

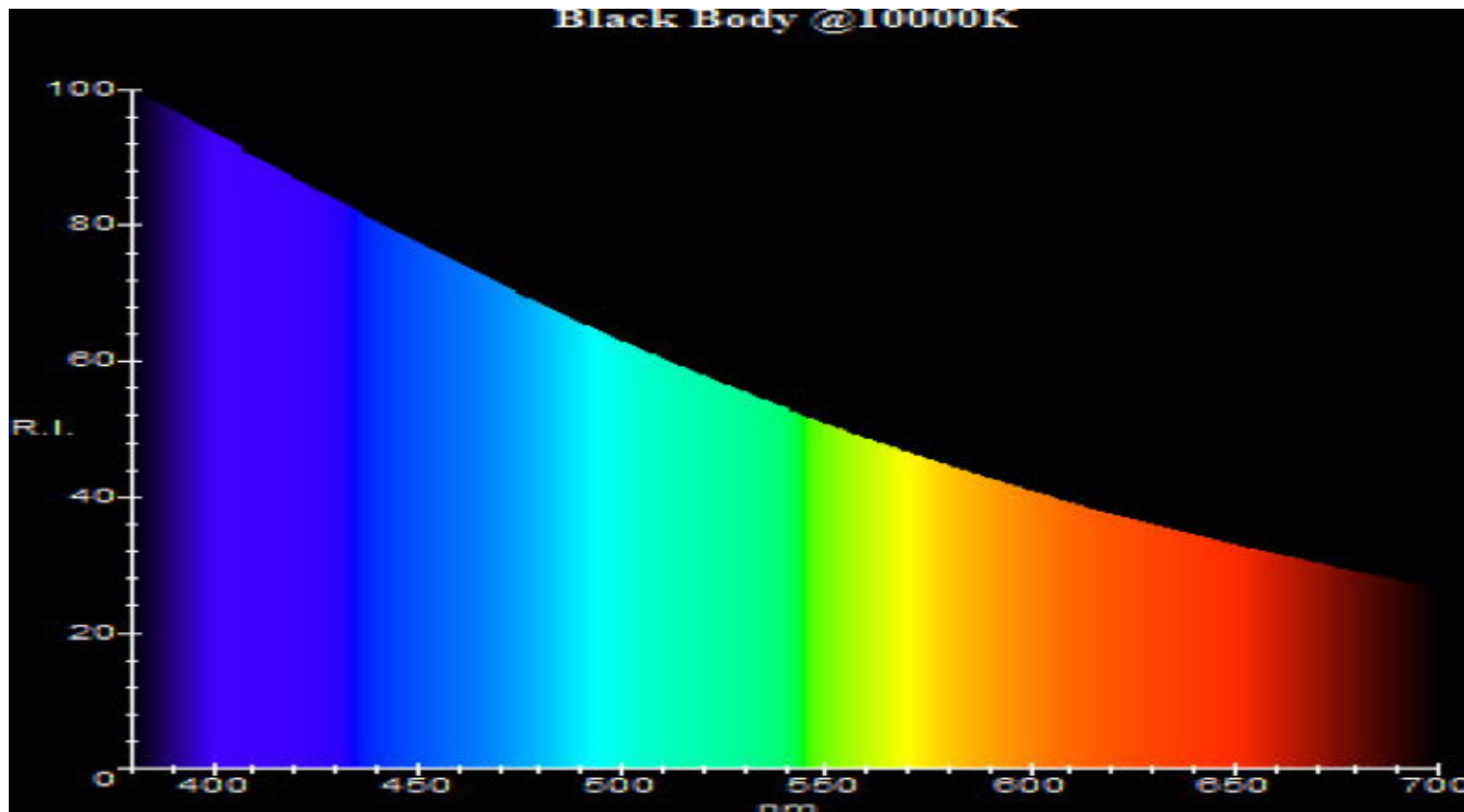
- Corps chaud
  - Atomes agités
  - Vitesses très variées
  - Température  $\Leftrightarrow$  vitesse moyenne
- Collisions entre atomes
  - Perte d'énergie  $\Leftrightarrow$  émission de photon
  - Gain d'énergie  $\Leftrightarrow$  absorption de photon
- À l'équilibre
  - Photons de toutes les longueurs d'onde  $\Leftrightarrow$  **spectre continu**
  - Avec un maximum corrélé à la vitesse moyenne des particules de matière
  - $\Rightarrow$  loi de Wien  $\lambda_{\max} \propto 1/T$
  - $\Rightarrow$  loi de Stefan-Boltzmann  $E \propto T^4$





## Température élevée $\leftrightarrow$ courtes longueurs d'onde

- Plus la **température** est élevée plus la lumière a d'**énergie**
- De 1000 K (=727°C) à 10000 K (=9727°C) 



# Les lois du « corps noir »

## ■ Loi de Wien

- La longueur d'onde du maximum d'émission varie en raison inverse de la température

$$\lambda_{\max} = 2900 \mu\text{m} / T(\text{K})$$

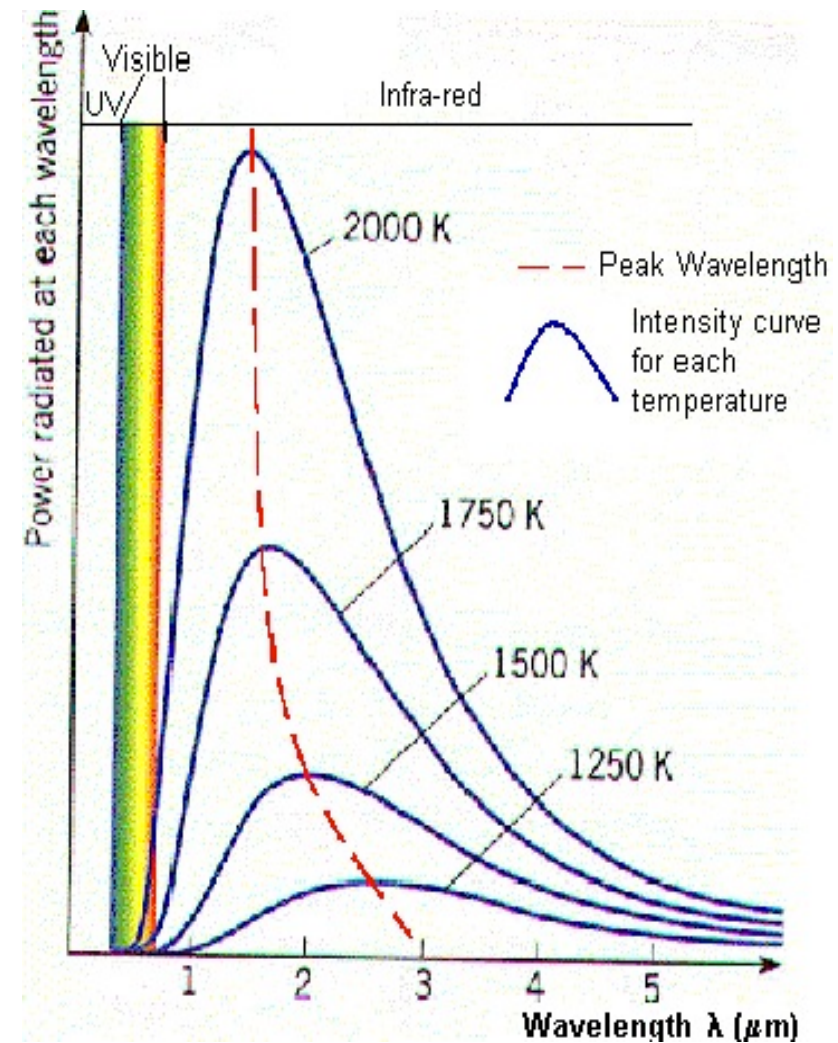
- $\Leftrightarrow$  lien entre température et couleur

## ■ Loi de Stefan-Boltzmann

- L'énergie émise varie comme la puissance quatrième de la température

$$E = \sigma T^4$$

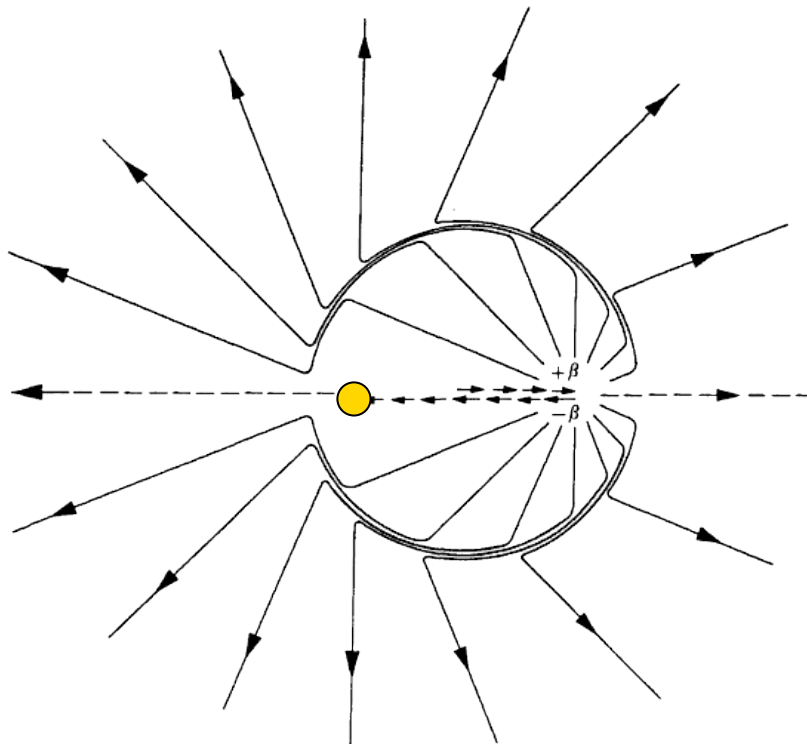
- $\Leftrightarrow$  une étoile chaude est beaucoup plus brillante qu'une étoile froide



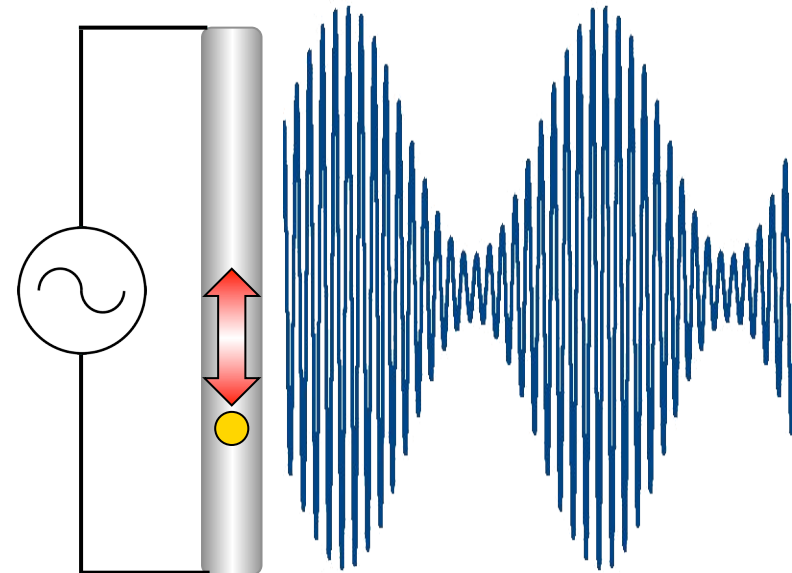
# Une 3<sup>e</sup> façon de faire de la lumière



- Une charge électrique *accélérée* rayonne une onde électromagnétique ↔ lumière

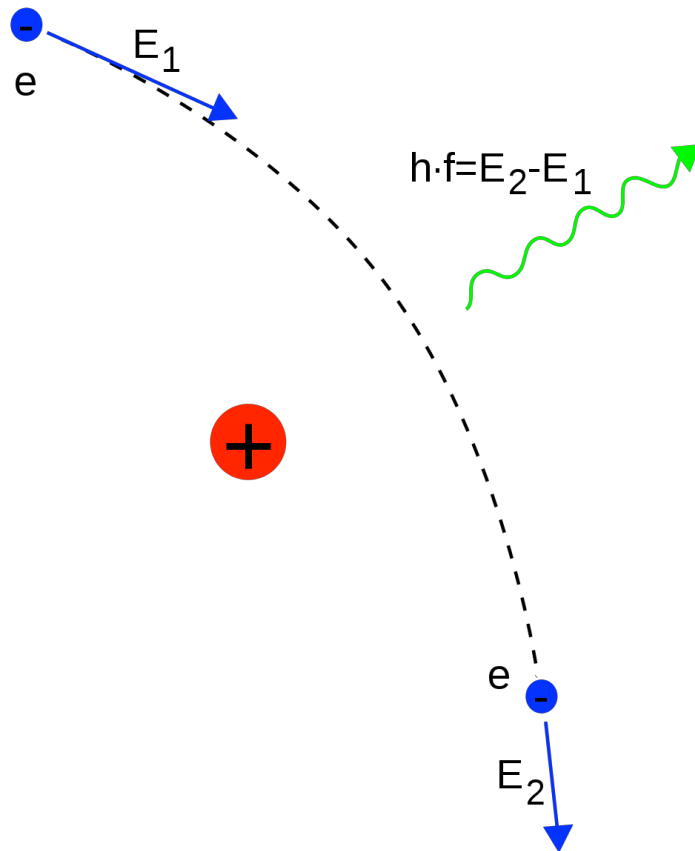


- Dans une antenne, les électrons oscillent d'un bout à l'autre ↔ onde radio

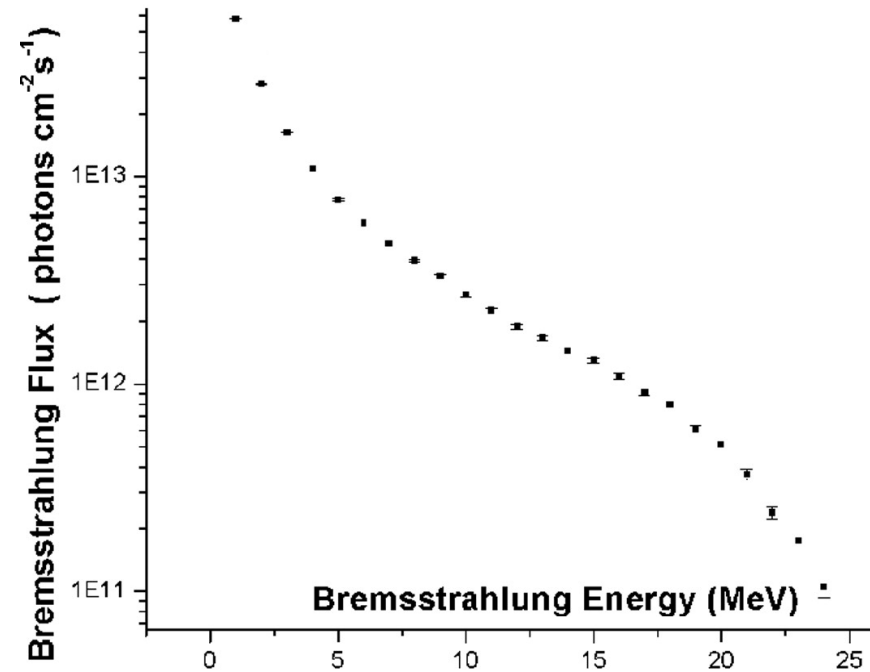


# Bremsstrahlung, rayonnement synchrotron, *free-free*

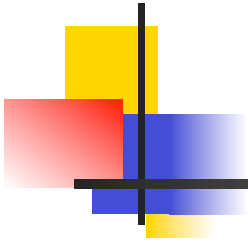
## ■ Rayonnement de freinage



## ■ Spectre continu



- L'immense majorité des photons a une faible énergie
- Il existe une énergie maximale: celle que l'électron possède initialement



Merci de votre attention !

