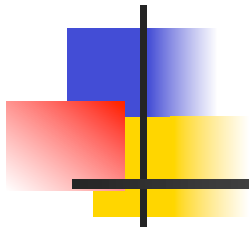


# CHAMPS & PARTICULES

## LE PHOTON

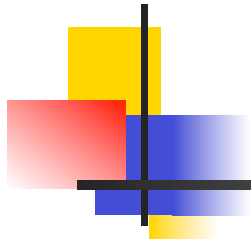


Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule & Cosmologie

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

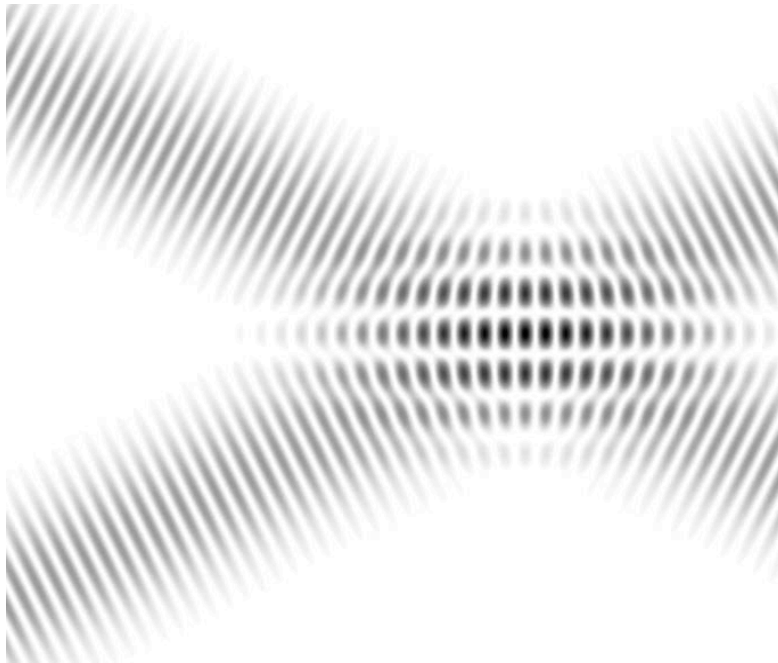




# LUMIÈRE

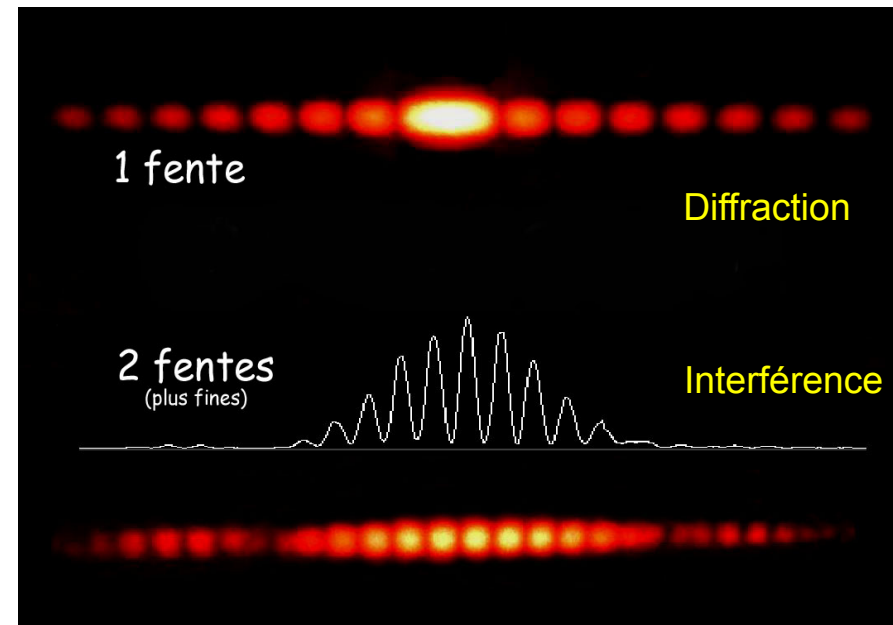
# La lumière est une onde

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



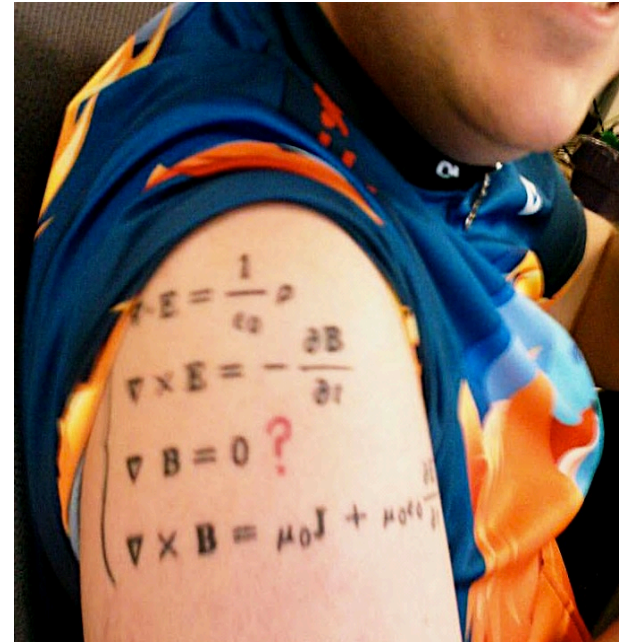
- Lumière + lumière = obscurité !

- 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  $\nu = c/\lambda$



# Une onde électromagnétique

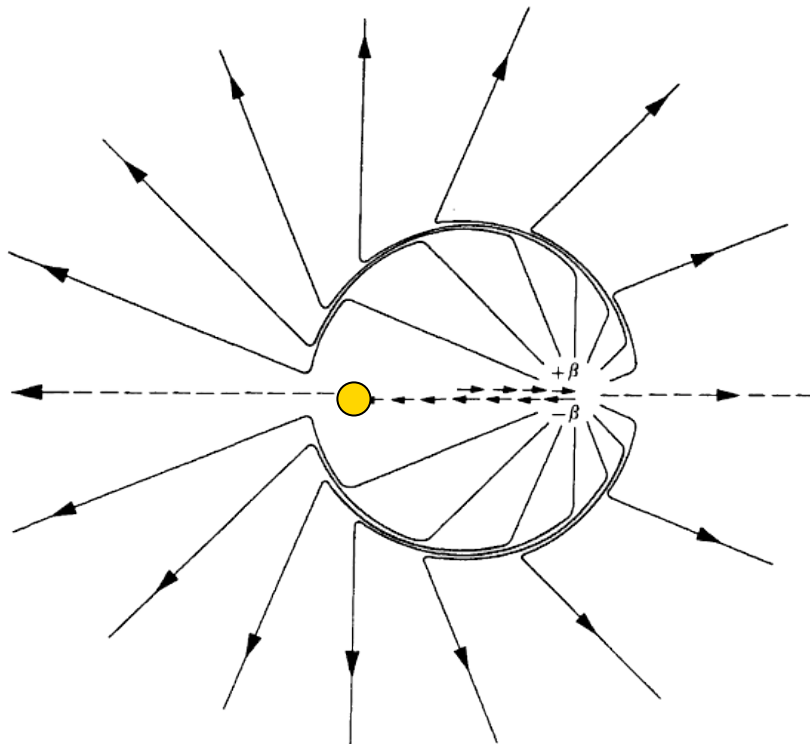
- James Clerk Maxwell (1831-1879)
  - équations permettant de décrire tous les phénomènes électriques et magnétiques alors connus (1861)
  - prévoient des **ondes** électromagnétiques (détectées par Hertz en 1888)
  - font apparaître la vitesse **c** de la lumière comme vitesse de ces ondes
- ⇒ la lumière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



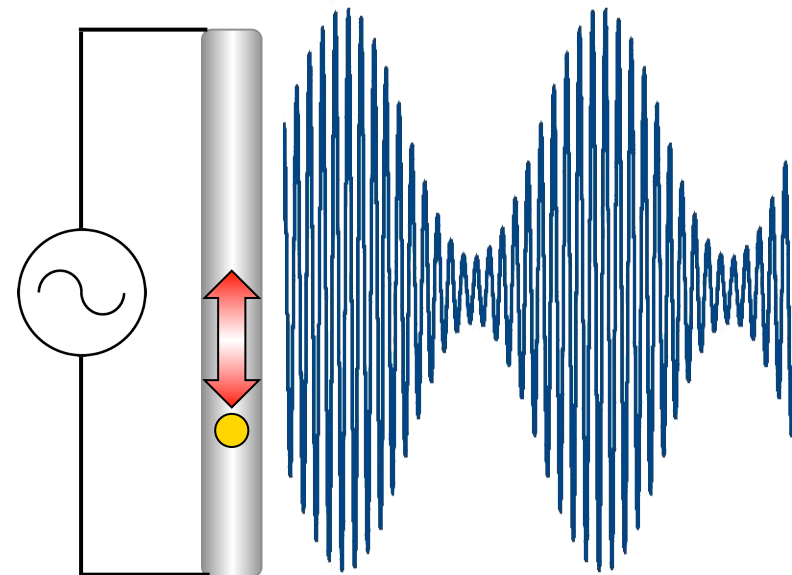
# De l'électricité à la lumière



- Une charge électrique *accélérée* rayonne une onde électromagnétique  $\Leftrightarrow$  lumière



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



# Deux grandes façons de fabriquer de la lumière

- 1 - en chauffant de la matière



- → distribution des fréquences (spectre)
  - dépendante de la température
  - indépendante de la matière

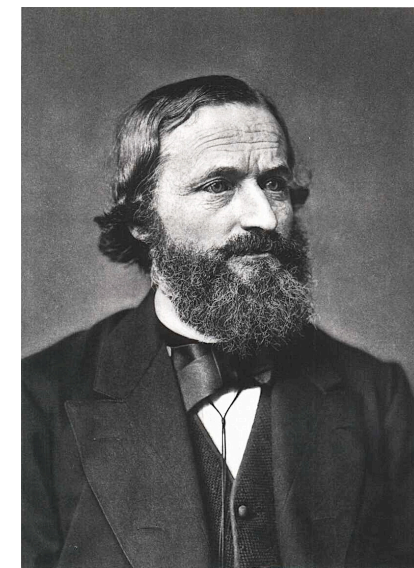
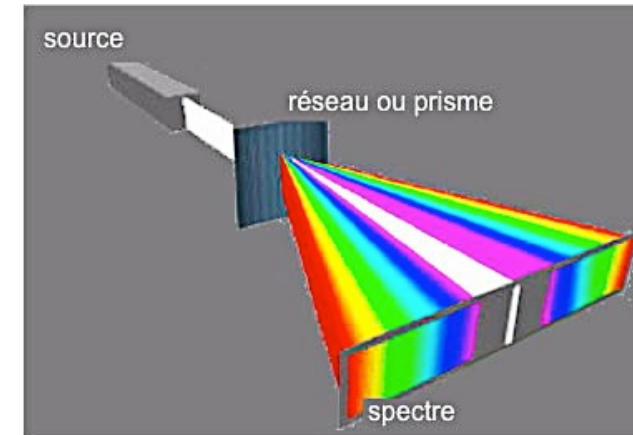
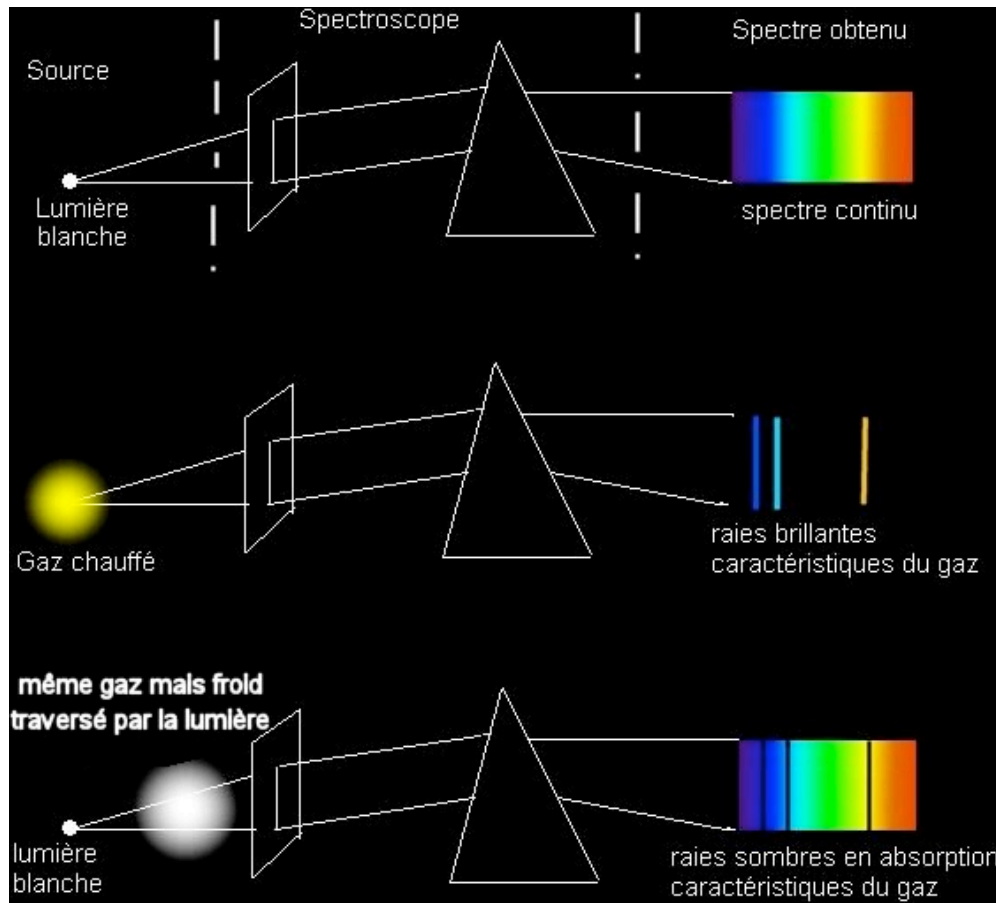
- 2 - en excitant de la matière

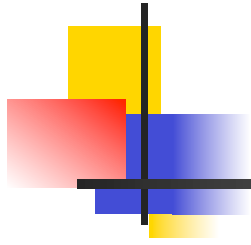


- → distribution des fréquences (spectre)
  - indépendante de la température
  - dépendante de la matière

# Gustav Kirchhoff

- Dispersion de la lumière → spectres
- 3 lois de la spectroscopie



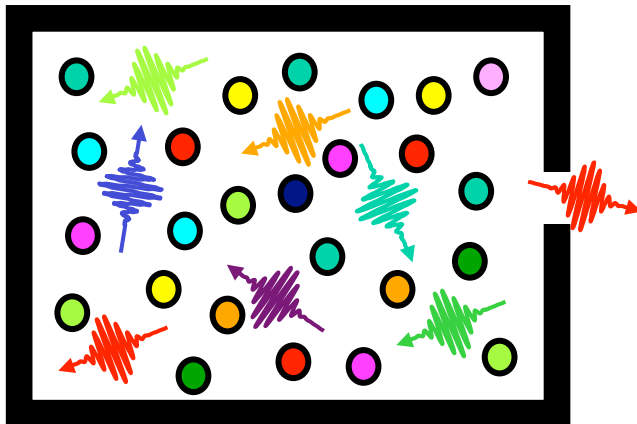


# LE CORPS NOIR



# 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)

# Stefan et Boltzmann : $U = \sigma T^4$

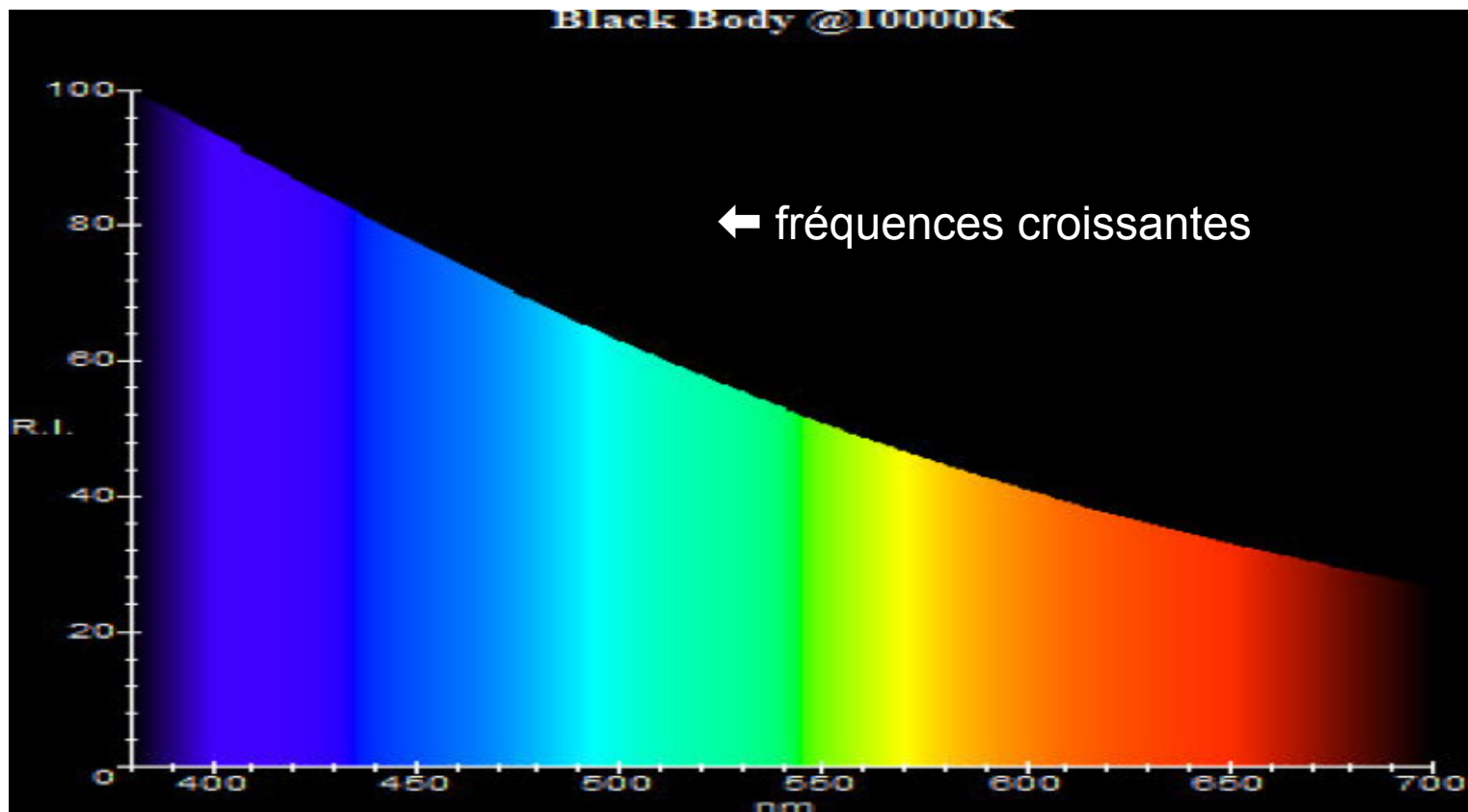
- Jožef Stefan (1835-1893)
  - Mesures expérimentales (Dulong & Petit, Tyndall...)
  - ☞ 1879 : l'énergie rayonnée varie comme  $T^4$
- Ludwig Boltzmann (1844-1906)
  - Si on traite la lumière comme un gaz de corpuscules
    1. Maxwell : densité d'énergie  $U = E/V$  et pression  $P = U/3$
    2. Thermodynamique statistique (Maxwell-Boltzmann)
      - ☞  $dE = TdS - PdV$     ☞  $dS = 4PdV/T + 3VdP/T$
      - ☞  $dP/dT = 4P/T$     ☞  $P \propto T^4$     ☞  $U = \sigma T^4$
      - $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$
      - Spectre de Planck ☞  $\sigma = 2\pi^5 k^4 / 15h^3 c^2$

( $k$  = constante de Boltzmann,  $h$  = constante de Planck)



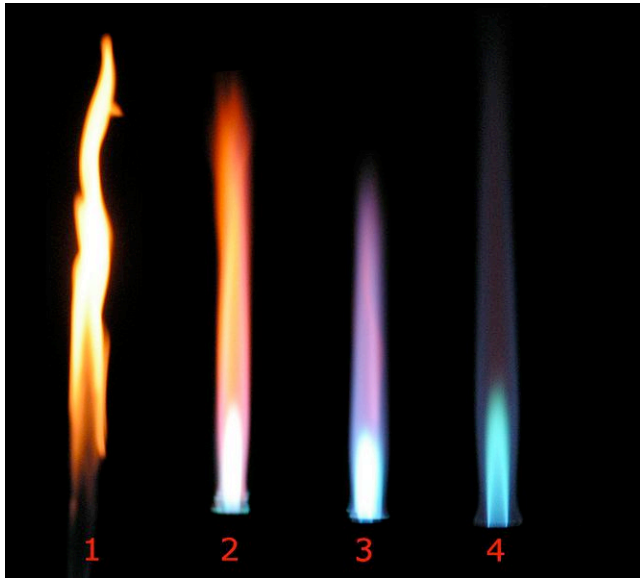
## Température élevée $\Leftrightarrow$ hautes fréquences

- De 1000 K (= 727°C) à 10000 K (=9727°C)



# Spectre de Wien

- Plus un corps est chaud, plus les fréquences sont élevées



- Corrélation température  $T$  – fréquence  $\nu$
- $\Rightarrow \nu$  (*typique*)  $\propto T$  ?
- $\nu$  (*maximum*) = [58.8 GHz/K]  $T$

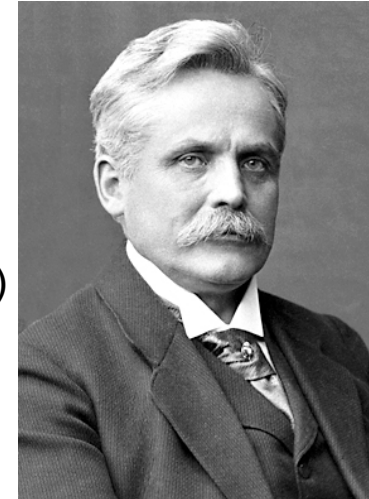
- Wilhelm Wien (1864-1928)

- $\rho(\nu, T) = f(\nu / T)$  ?

- $\int \rho(\nu, T) d\nu = \sigma T^4$

- $\Rightarrow \rho(\nu, T) = \nu^3 g(\nu / T)$

- 1896:  $g$  exponentielle?



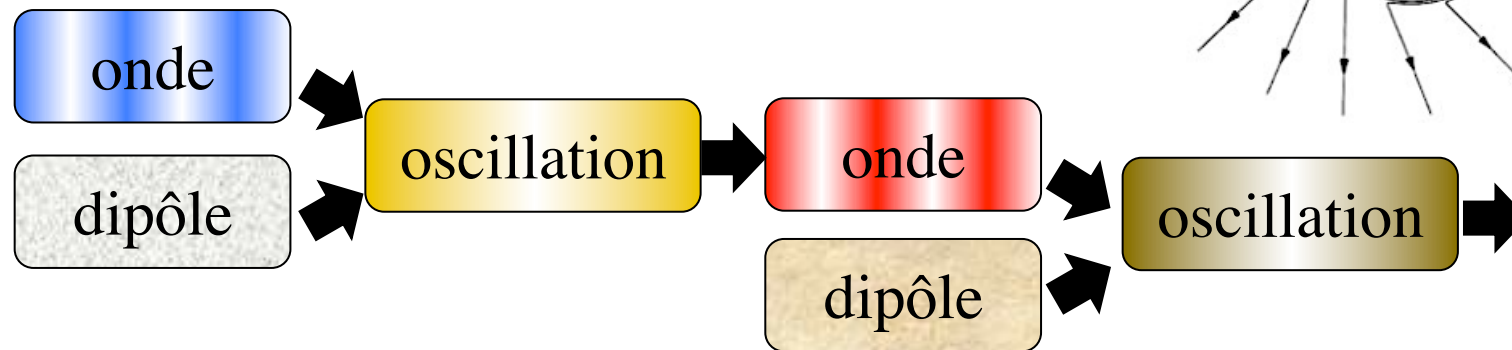
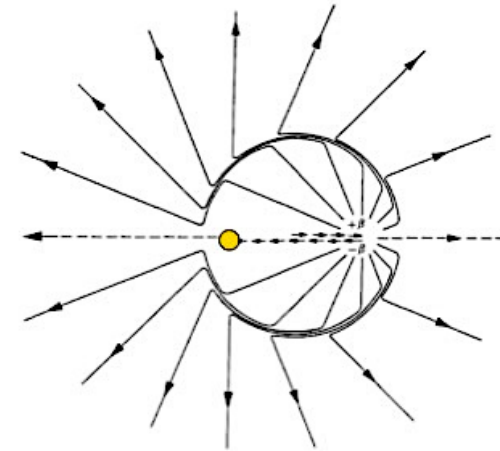
- $\rho(\nu, T) = \alpha \nu^3 \exp\{-\beta \nu / T\}$

Excellent accord avec les observations

- $\Rightarrow \beta = 3 \text{ K}/58.8 \text{ GHz}$

# Calcul du spectre du corps noir

- Champ électromagnétique  $\Leftrightarrow$  collection d'ondes
- Matière  $\Leftrightarrow$  charges électriques (dipôles)
- oscillant à cause du champ électromagnétique



- $\Rightarrow$  relation entre distribution d'énergie  $E(\nu, T)$  des oscillateurs et du rayonnement  $\rho(\nu, T)$

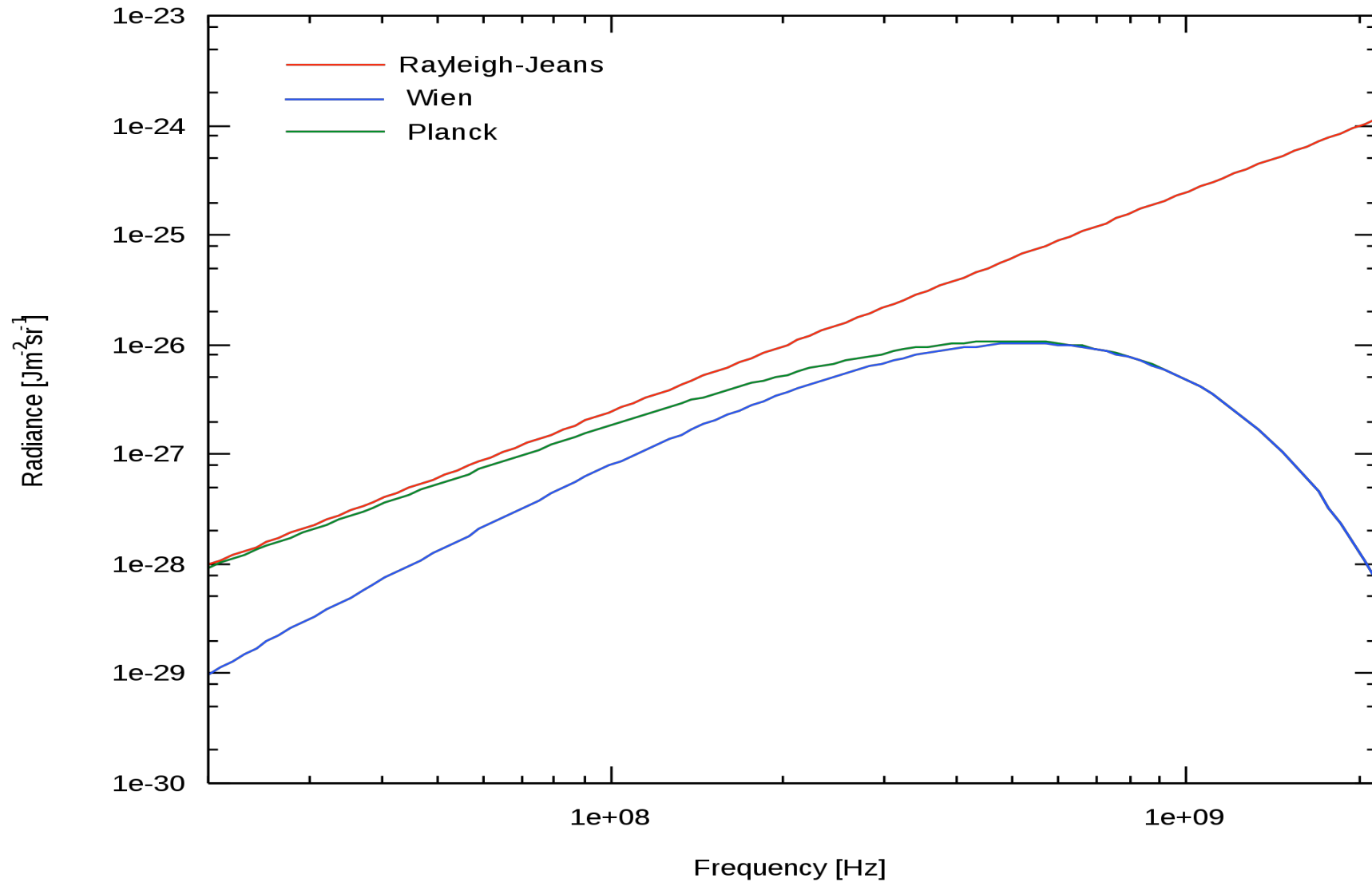
$$\rho(\nu, T) = 8\pi/c^3 \nu^2 E(\nu, T)$$

- Équilibre thermique  $\Rightarrow$  équipartition de l'énergie  $\Rightarrow E = kT \Rightarrow \rho(\nu, T) \propto \nu^2 T$

- $\Rightarrow$  Loi de Rayleigh-Jeans (1900)

rien à voir avec le spectre de Wien ?

# Wien, Rayleigh et Planck



# Max Planck (1858-1947)

**ENTROPIE**

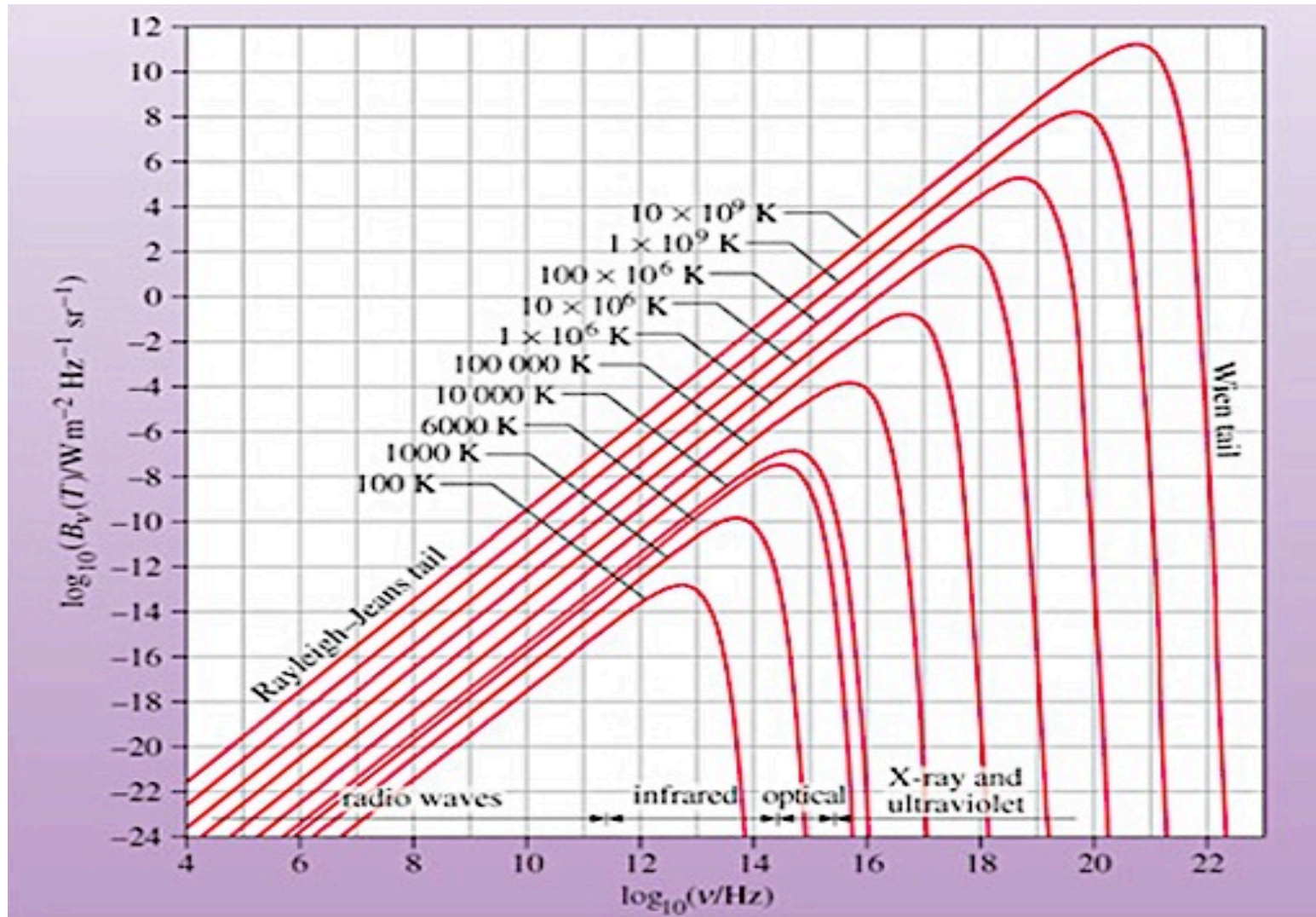
- Intérêt constant pour (le second principe de) la thermodynamique
- Réticences vis à vis des idées d'atomes
- 1899: «démonstration» de la formule de Wien (via une définition *ad hoc* de l'entropie des *oscillateurs*, qui n'avaient a priori rien à voir avec des *atomes*)
- 1900: **observations** à Berlin d'un écart à basse fréquence à la formule de Wien
- ➔ Planck essaie d'interpoler entre hautes et basses fréquences
- ➔ formule **empirique** en octobre 1900

$$\rho(\nu, T) = 8\pi h/c^3 \nu^3 / [\exp\{\beta \nu / T\} - 1]$$

- ➔ efforts pour la dériver en modifiant son calcul antérieur
- ➔ nouvelle définition *ad hoc* de l'entropie des oscillateurs
- ➔ dérivation publiée en décembre 1900



# Le spectre de Planck





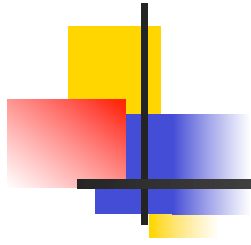


# Enfin Einstein vint, et la lumière fut !

Mais pas tout de suite !

- Planck n'attribuait pas une grande valeur à sa dérivation et à la relation  $\varepsilon = h \nu$
- Einstein (1905)
  - Particules  $\rightarrow$  Maxwell-Boltzmann  $\rightarrow \exp\{-E/kT\}$
  - Rayonnement  $\rightarrow$  Wien  $\rightarrow \exp\{-h \nu/kT\}$
- $\rightarrow$  tout se passe **comme si** la lumière était formé de particules (*Lichtquanten*) ayant chacune une énergie  $E = h \nu$
- Planck : les **échanges d'énergie** entre matière et rayonnement se font par *quantités finies* [ $\propto$  fréquence  $\nu$  ]
- Einstein : l'**énergie** même du rayonnement est répartie en *quantités finies* [ $\propto$  fréquence  $\nu$  ]  
**reste vrai en dehors des échanges avec la matière**
- $\rightarrow$  effet photoélectrique





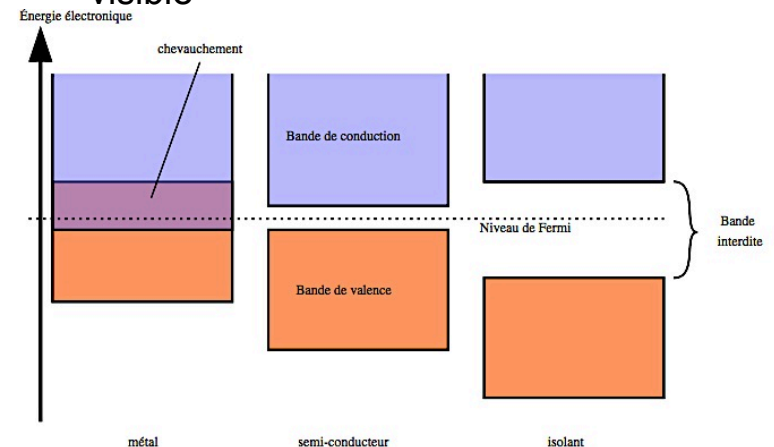
# L'EFFET PHOTOÉLECTRIQUE

# L'effet photovoltaïque

- **Edmond Becquerel (1839)**
  - électrolyse activée par un éclaircissement (↗ en lumière bleue)
  - ➔ relation lumière – électricité
- **Sélénium**
  - ➔ cadmium-tellure
  - ➔ cadmium-indium-sélénium
  - ➔ silicium « dopé »
  
  - ➔ posemètres (1914)
  - ➔ générateurs d'électricité (1954)
- **Rendements ↗**
  - 1% (sélénium)
  - 6% (silicium 1954)
  - 45% aujourd'hui

- **Explication (> 1930)**

- cristal ➔ bandes d'énergie permises ou interdites pour les électrons ➔ bandes de **valence** et de **conduction**
- métal: chevauchement des bandes ➔ très peu d'énergie pour faire circuler les électrons ➔ conducteur
- isolant: bandes très séparées ➔ très haute tension requise pour faire passer le courant (=claquage)
- semi-conducteur: faible tension de quelques volts, apportée par la lumière visible



# L'effet photoélectrique

## ■ Différence

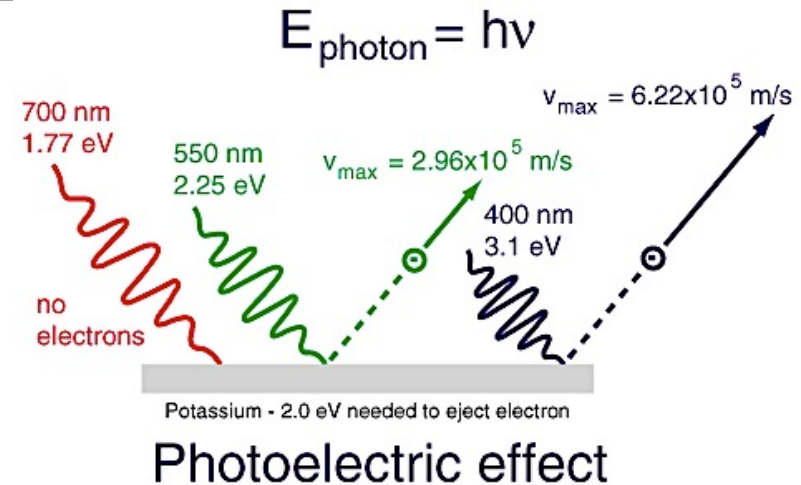
- effet photovoltaïque → la lumière *déplace* des électrons vers la bande de conduction
- effet photoélectrique → la lumière *arrache* des électrons au métal

## ■ Découvert par Hertz en 1887

- Hallwachs 1888: arrachage de fragments de charge négative
- Stoletov 1888: intensité du courant  $\propto$  intensité de l'éclairement
- Thomson 1899: ce sont des *électrons* qui sont arrachés

## ■ Lénard 1902

- L'énergie des électrons ne dépend pas de l'**intensité** de l'éclairement
- Elle dépend de la **fréquence**
- Avec un seuil  $\nu > \nu_{\text{métal}}$  dépendant du métal



## ■ Explication par Einstein (1905)

- Dans *certaines conditions* la lumière se comporte *comme si* elle était formée de corpuscules d'énergie  $E = h\nu$
- Il faut une énergie  $E_{\text{métal}}$  pour arracher un électron à un métal donné

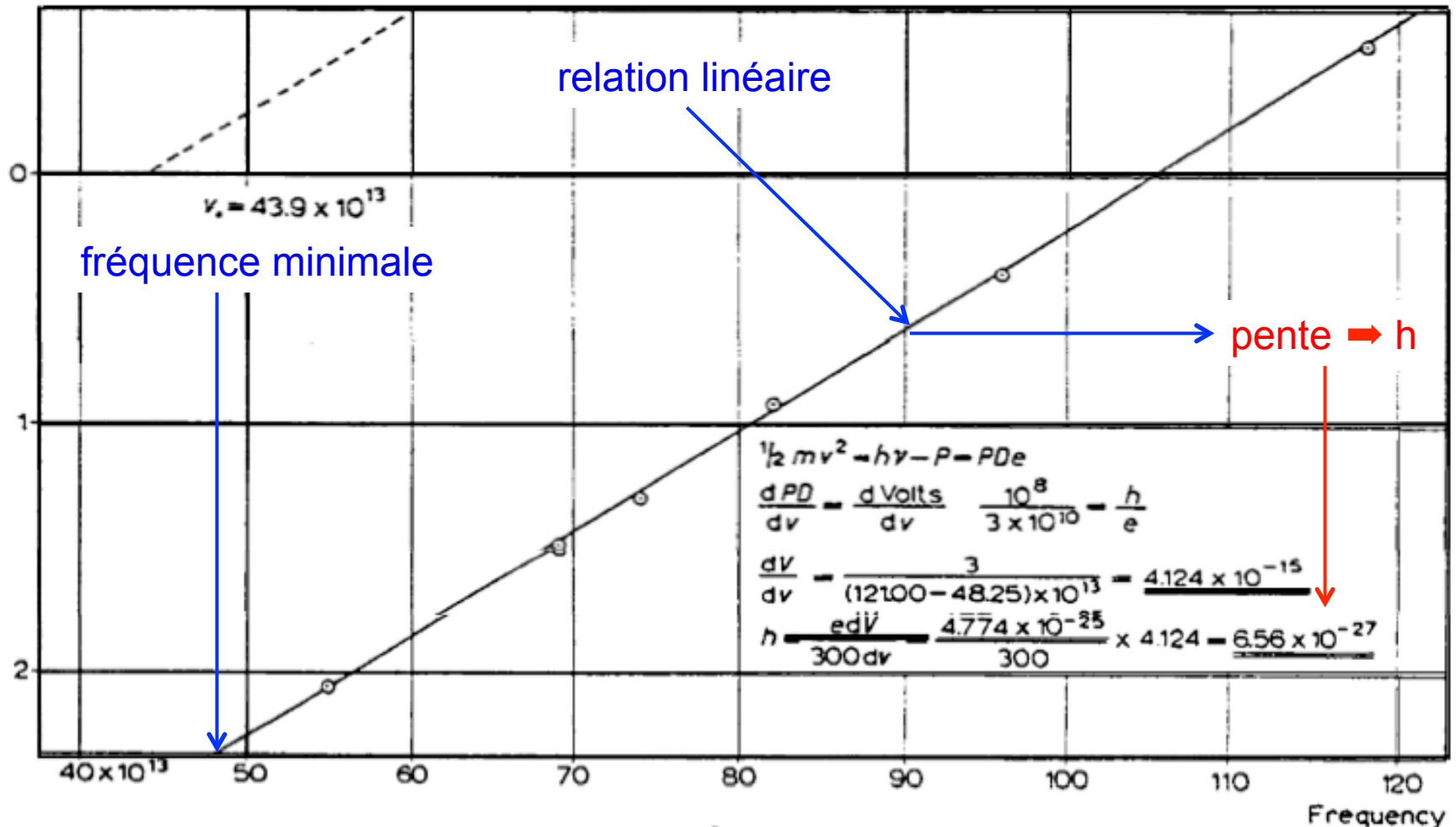
## ■ → prédiction d'une relation **linéaire**

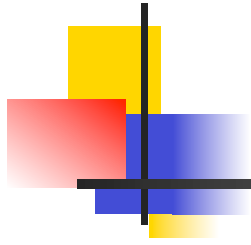
$$E_{\text{électron}} = h [\nu - \nu_{\text{métal}}]$$

## ■ → *et* mesure directe de $h$

# La prédiction d'Einstein

- et le résultat des expériences (ici Millikan)

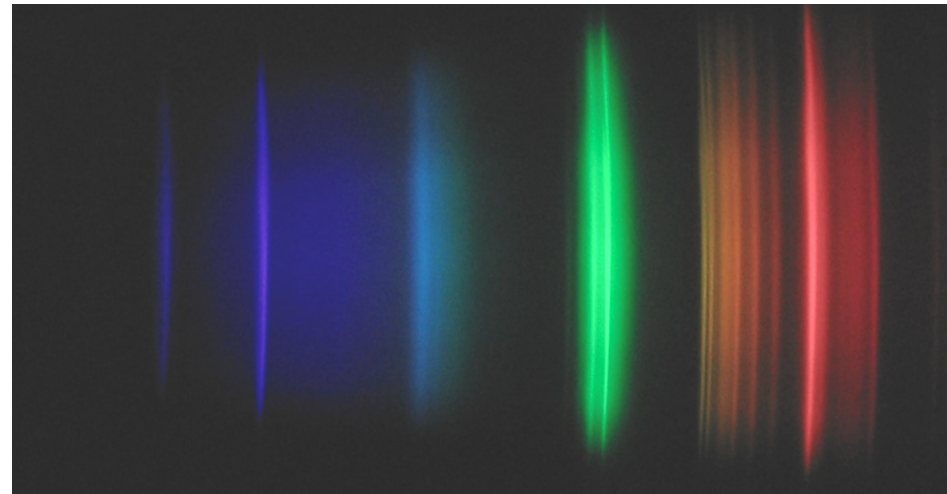
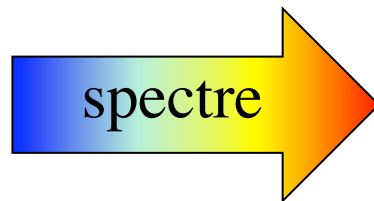




# ABSORPTION ET ÉMISSION

# 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 »

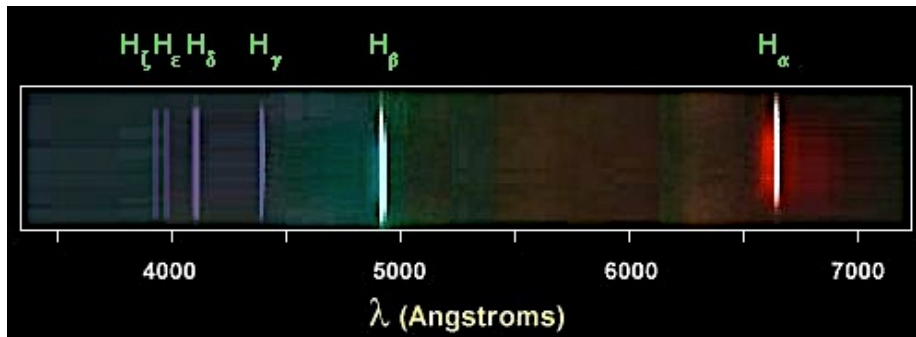




# Spectroscopie : les raies

- Kirchhoff encore (1860)
  - raies émission  $\Leftrightarrow$  raies absorption
  - caractéristiques des atomes et des molécules
  - (et du degré d'ionisation)

- Ångström (1853): spectre de l'hydrogène



- Balmer (1885):  $\nu_m = \nu_0 (m^2 - 4) / 4m^2$
- Rydberg (1888):  $\nu_m = \nu_\infty - \nu_0 / (m + m_0)^2$
- $\Leftrightarrow \nu_{nm} = \nu_0 [1/n^2 - 1/m^2]$  pour l'hydrogène

- *Handbuch der Spektroskopie* (Kayser 1900-1912)
  - position de dizaines de milliers de raies
  - pour des centaines d'atomes et de molécules

- Rydberg (1900): les fréquences des raies sont souvent des sommes de fréquences de raies du *même* élément (généralisé par Ritz en 1908)

- 1906: série de Lyman de l'hydrogène (n=1)

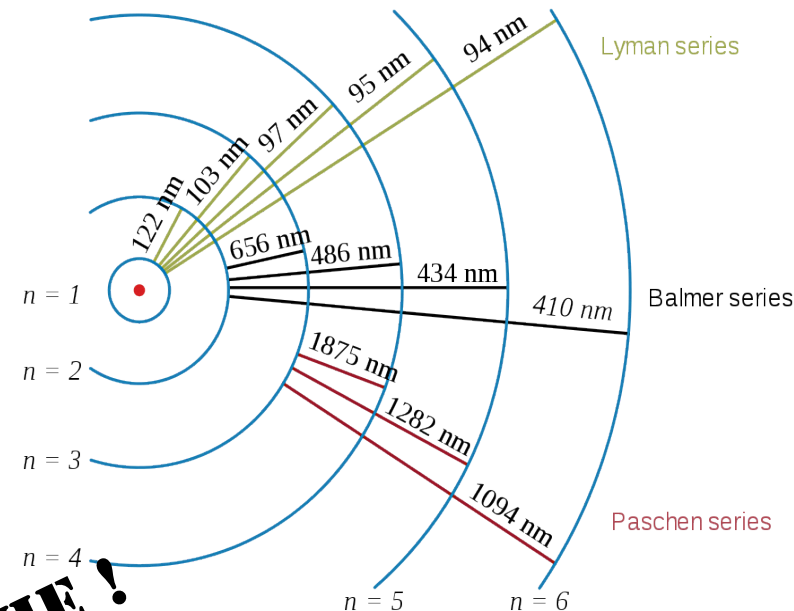
- 1908: série de Paschen de l'hydrogène (n=3)

- $\rightarrow$  série de Balmer pour n = 2

# Le modèle atomique de Bohr pour l'hydrogène



- Noyau compact de charge positive  $+e$  et électron unique de charge négative  $-e$
- Raies = émission ou absorption d'un seul *quantum de lumière* de fréquence  $\nu$
- Rydberg:  $\nu_{nm} = \nu_0 [1/n^2 - 1/m^2]$
- $\Rightarrow$  automatique si l'électron possède une énergie  $E_n = E_0/n^2$  (et  $E_0 = h \nu_0$ )
- Orbite circulaire + équilibre électrostatique  
 $\Rightarrow E = e^2/2R \Rightarrow R_n = R_0 n^2$
- $\Rightarrow$  pourquoi seuls certains rayons  $R_n$  sont-ils permis?
- Moment angulaire  $L = M V \times R = n \hbar$
- $\Rightarrow R_n = (\hbar^2/Me^2) n^2$
- $\Rightarrow E_0 = Me^4/2\hbar^2 = 13.6 \text{ eV}$



**ÇA MARCHE !**

## Quelques défauts...

- Le modèle de Bohr a quelques défauts

- Il n'explique pas



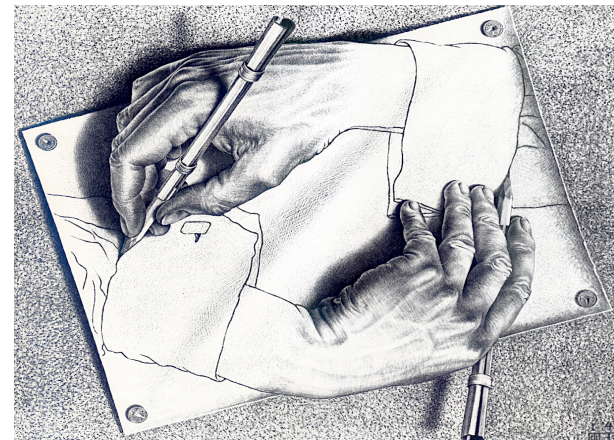
- pourquoi l'électron suit une orbite circulaire (→ orbites elliptiques de Sommerfeld)
- pourquoi l'électron ne rayonne pas sur ces orbites
- pourquoi il rayonne en *changeant* d'orbite
- pourquoi il n'émet qu'*un seul* photon en passant d'une orbite à l'autre
- pourquoi les seules orbites possibles sont celles où le moment angulaire  $L = n \hbar$

- Il reproduit

- très bien le spectre de l'hydrogène (sauf la structure fine, Zeeman...)
- à peu près les atomes hydrogénoïdes
- pas du tout l'hélium

- Pour Einstein, il y a plus grave:

- L'*instant* d'émission du photon n'est pas déterminé
- Ni sa *direction* d'émission
- L'électron « sait » en quittant une orbite vers laquelle il va, et il émet alors un photon de la « bonne » énergie
- Rien, dans le modèle, ne précise quelles transitions sont fréquentes
- → rien ne permet de calculer l'*intensité* des raies



# Émission spontanée et stimulée

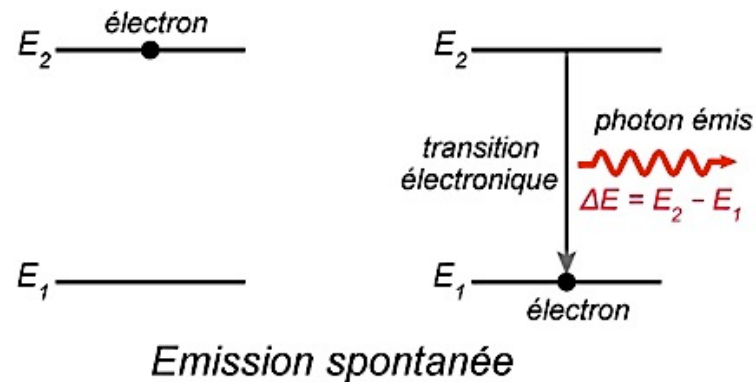
- Einstein (1916)

- Objectif: redémontrer « correctement » la forme de Planck du spectre du corps noir
- Gaz d'atomes en équilibre thermique  $\rightarrow N(E,T) = n(E) \exp\{-E/kT\}$
- Interaction avec le rayonnement  $\rightarrow$  transitions atomiques  $E_2 \rightarrow E_1$

- Deux types de transitions

- **spontanée**:  $E_2 \rightarrow E_1 < E_2$

*indépendamment d'un bain de rayonnement  $\rho(\nu,T)$*



- **stimulée**:  $E_2 \rightarrow E_1 \leq E_2$

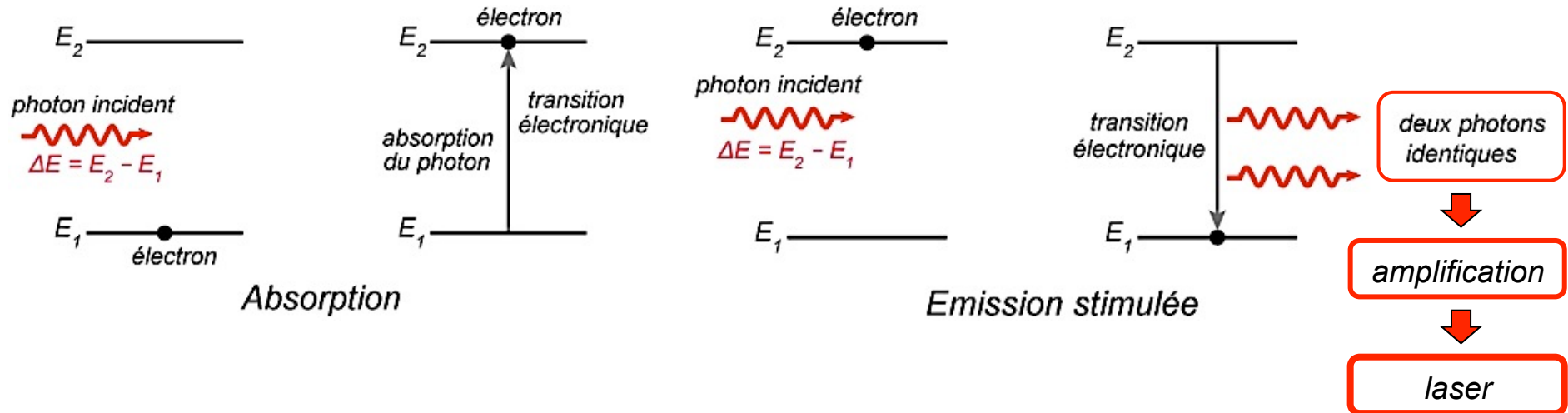
*en présence d'un bain de rayonnement  $\rho(\nu,T)$*

# Les coefficients A et B d'Einstein

- Deux types de transitions

- **spontanée**:  $E_2 \rightarrow E_1 < E_2$
- **stimulée**:  $E_2 \rightarrow E_1 \leq E_2$

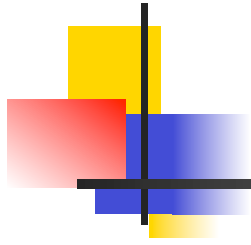
*indépendamment* d'un bain de rayonnement  $\rho(\nu, T)$   
*en présence* d'un bain de rayonnement  $\rho(\nu, T)$



- $\rightarrow$  nombre de transitions

$$W(E_2 \rightarrow E_1) = N(E_2) [A(E_2 \rightarrow E_1) + B(E_2 \rightarrow E_1) \rho(\nu, T)] \quad \text{et} \quad W(E_1 \rightarrow E_2) = N(E_1) [B(E_1 \rightarrow E_2) \rho(\nu, T)]$$

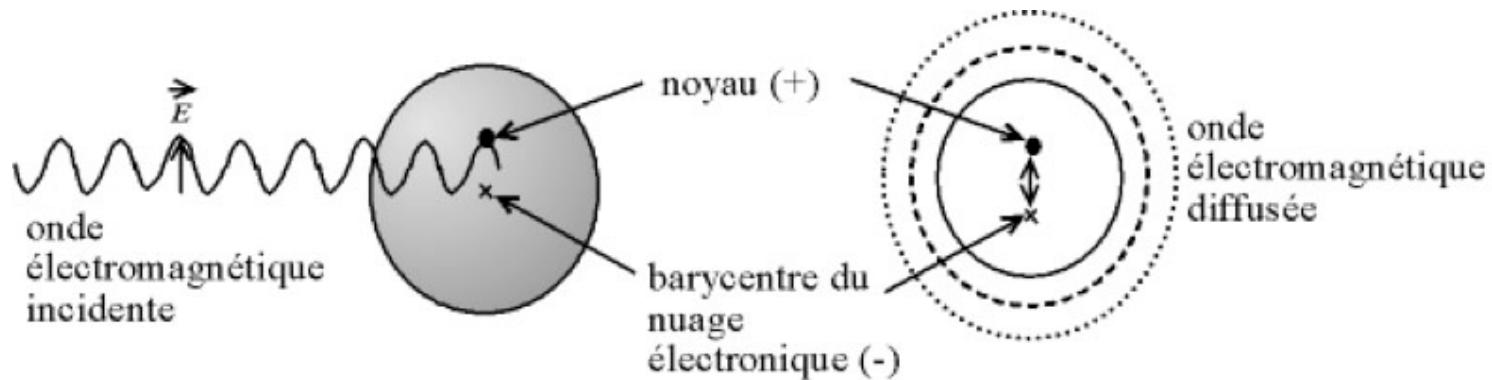
- Équilibre  $\rightarrow W(E_2 \rightarrow E_1) = W(E_1 \rightarrow E_2) \rightarrow \dots \rightarrow \rho(\nu, T) = A/B / [\exp\{(E_2 - E_1)/kT\} - 1]$



# L'EFFET COMPTON

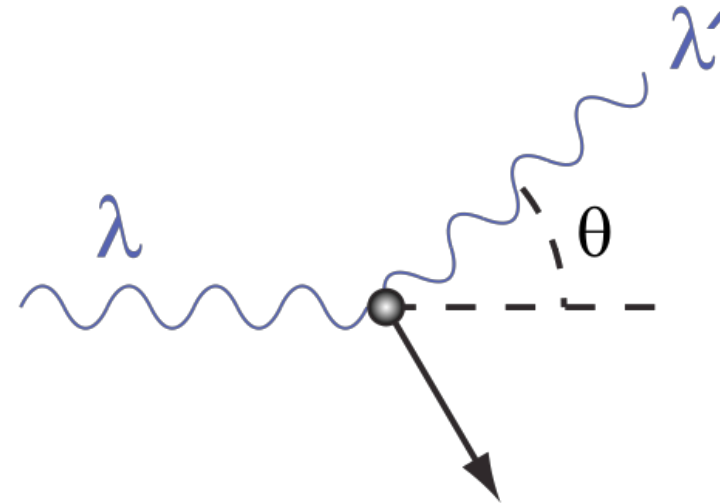
# Diffusion Rayleigh

- Comment la lumière est-elle diffusée par la matière ?
- Rayleigh
  - Le champ électrique et magnétique déplace différemment électrons et noyaux
  - Ceux-ci reviennent à leur position initiale en oscillant autour d'elle
  - Ils émettent donc à leur tour un rayonnement électromagnétique
    - de la même fréquence
    - *presque* dans la même direction
    - ➔ tout se passe comme si le rayonnement incident était:
      - ralenti (➔ indice  $n > 1$ )
      - diffusé (➔ déviation  $\propto \nu^4$  ➔ bleu du ciel)



# Diffusion Compton

- Diffusion Thomson
  - rayonnement + électrons ( $\sim$  libres)
  - [ $\sim$  diffusion Rayleigh]
  - réémission à la même fréquence
- Problèmes avec la diffusion de rayons X
  - Gray
  - Compton fluorescence X ?



- Compton 1923
  - Diminution de fréquence des rayons X
  - Interprétable si les rayons X sont formés de particules portant
    - une énergie  $h\nu$
    - une impulsion  $h\nu/c$
  - $\Leftrightarrow$  particule de masse zéro et de vitesse  $c$
- $\rightarrow$  le photon est une vraie particule



# Diffusion Compton

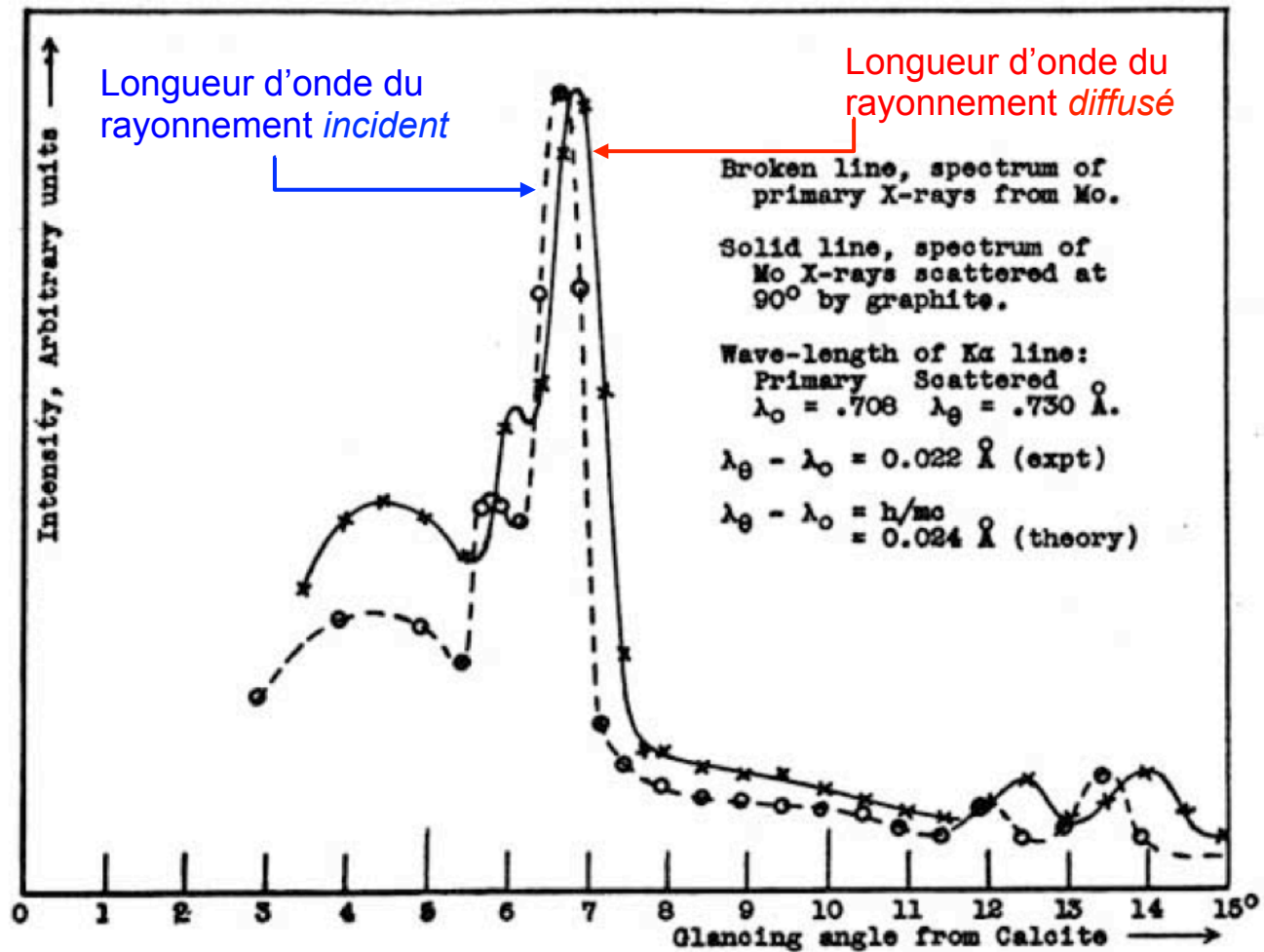
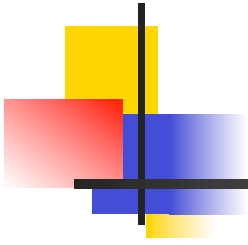


Fig. 4. Spectrum of molybdenum X-rays scattered by graphite, compared with the spectrum of the primary X-rays, showing an increase in wave-length on scattering.



Merci de votre attention !

