

PHYS-H-200 Physique quantique et statistique

Chapitre 2: les origines de la physique quantique

Jean-Marc Sparenberg
Université Libre de Bruxelles

2011-2012

1 Dualité onde-particule pour la lumière

2 Dualité onde-particule pour la matière

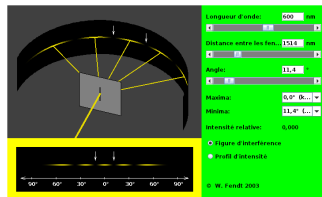
Lumière = onde électromagnétique

- 1704, **Newton** : optique géométrique
Trajectoires rectilignes
⇒ **lumière = particules**
- 1803, **Young** : expérience des 2 fentes
Interférences constructives si

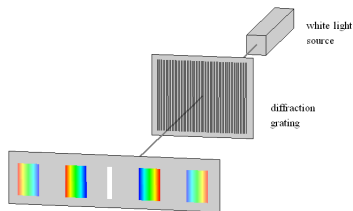
$$d \sin \theta = n\lambda \quad (n \in \mathbb{Z})$$

⇒ **lumière = onde**, longueur d'onde λ

- 1913, **Bragg** : diffraction sur un cristal
Interférences (haute intensité)
⇒ **rayons X = onde**
- Réseau de diffraction (500 traits/mm)
Interférences (haute intensité)
⇒ **lumière = onde**
Analyse de la lumière ⇒ **spectromètre**



[W. Fendt]



[Université de Trent]

Lumière = particules

- 1900, **Planck** : densité d'énergie du **corps noir** bien expliquée par la **quantification de l'énergie**

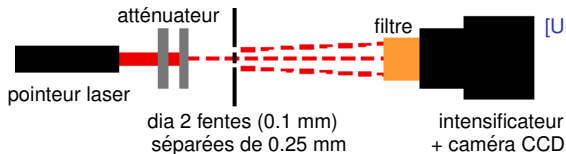
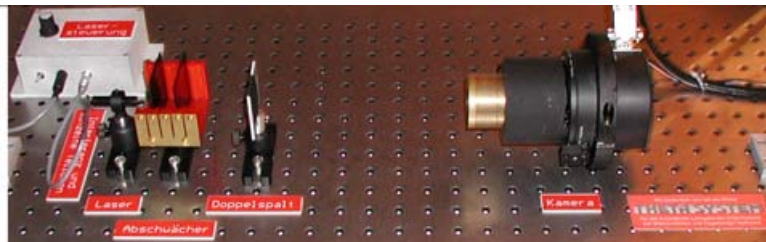
$$E = h\nu = hc/\lambda = \hbar\omega$$

- quantum d'énergie proportionnel à la **fréquence** $\nu = \omega/2\pi$
 - constante réduite de Planck (action) $\hbar = h/2\pi \approx 1.055 \times 10^{-34} \text{ Js}$
- 1905, **Einstein** : quantification = propriété universelle du **rayonnement**
 - nouvelle interprétation du corps noir
 - explication de l'**effet photoélectrique**
- 1909, **Einstein** : relation entre **vecteur d'onde** $\vec{k}$ et **impulsion** $\vec{p}$

$$\vec{p} = \hbar\vec{k} = (h/\lambda)\vec{1}_k$$

- unification périodicité **temps** (ω) et **espace** (k) : **quadrivecteur d'onde** $(\omega/c, \vec{k})$ avec $(E/c, \vec{p}) = \hbar(\omega/c, \vec{k})$
 - relation de dispersion $\nu = c/\lambda \iff \omega = kc \iff E = pc$
 $\Rightarrow$ particule de **masse nulle** (« photon », Lewis 1926)
- 1923, **Compton** : preuve directe par **collisions photon-électron**

Fentes de Young en lumière atténuée

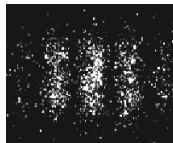


[Université de Bonn]

[Expo Solvay]

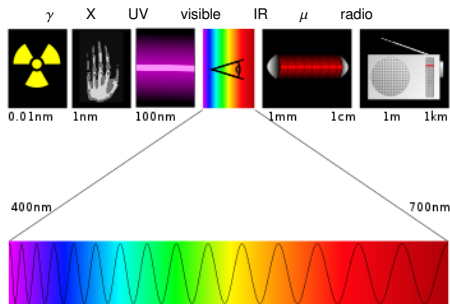
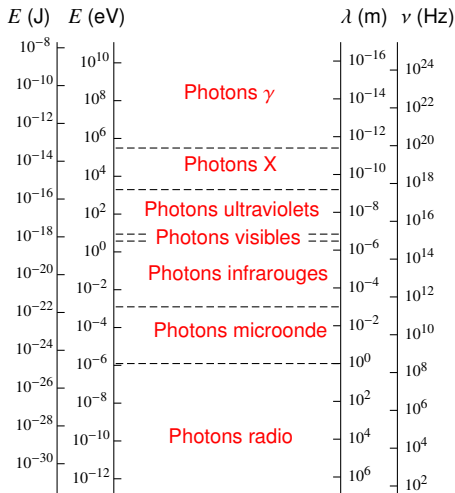
Dualité

- Impact individuel $\Rightarrow$ **particule**
(« photon » = quantum de lumière)
- Interférences $\Rightarrow$ **onde**
(passe par les 2 fentes à la fois)



Mesure pendant 2 secondes

Photons : particules du rayonnement électromagnétique



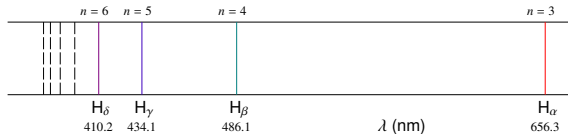
[Wikimedia]

- 1 Dualité onde-particule pour la lumière
- 2 Dualité onde-particule pour la matière

Les spectres atomiques

- 1853, **Ångström** : mesure spectre visible émis par **hydrogène atomique** chauffé
- 1859, **Kirchhoff** : chaque élément a un spectre caractéristique
 λ raies **émission** (gaz chaud) $\equiv$ λ raies **absorption** (gaz plus froid)
- 1885, **Balmer** : formule pour longueurs d'onde raies hydrogène **visibles** $\Rightarrow$ prédiction raies **ultraviolettes**

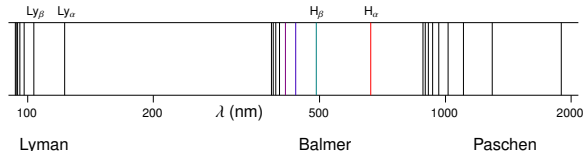
$$\lambda_n = 364.6 \frac{n^2}{n^2 - 4} \text{ nm}$$



- 1889, **Rydberg** : généralisation Balmer ($n' = 2$) $\Rightarrow$ prédiction raies **ultraviolettes** ($n' = 1$, Lyman) et **infrarouges** ($n' = 3$, Paschen)

$$\frac{1}{\lambda_{n'n}} = R \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$R = 0.01097 \text{ nm}^{-1}$$



Ancienne théorie des quanta

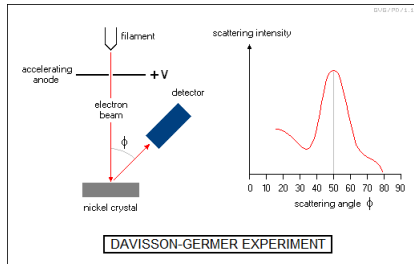
- Atomes quelconques : $\frac{1}{\lambda_{n'n}} = K_{n'} - K_n$
 - ▶ interprétation des raies : **sauts quantiques** entre états d'énergie $E_n = hcK_n$
 - ▶ émission/absorption d'un quantum d'**énergie électromagnétique**

$$E_{\text{photon}} = \frac{hc}{\lambda_{n'n}} = hc(K_{n'} - K_n)$$

- ▶ conservation **énergie totale** $\Rightarrow E_{\text{final}} = E_{\text{initial}} \pm E_{\text{photon}}$
 - Hydrogène : **$K_n = \frac{R}{n^2}$** Origine ?
 - 1913, **Bohr** : modèle de l'atome
 - ▶ électron sur trajectoires **classiques** vérifiant des **conditions de quantification** (moment cinétique) $\Rightarrow$ **constante de Rydberg R** déduite de constantes physiques fondamentales
 - ▶ mauvais résultat pour atomes à **plusieurs** électrons
- $\Rightarrow$ abandon de cette théorie semi-classique au profit de...

Matière = onde

- 1923, de Broglie : onde associée au mouvement de toute particule
Longueur d'onde de de Broglie $\lambda = h/p$ (dépend de la vitesse)
Même relation que pour les photons : $\vec{p} = \hbar \vec{k}$
- 1926, Schrödinger : équation décrivant cette onde
(voir tout le reste du cours !)
- 1927, Davisson et Germer : preuve directe pour des électrons
Observation d'interférences (cf Bragg pour rayons X)



[G. Goebel]

Expérience des deux fentes pour la matière

- Nombreuses expériences mettant en évidence les **ondes de matière** : électrons, neutrons, atomes, (grosses) molécules. . .
- Exemple : interférences entre atomes/molécules passant par **2 fentes**
 - (b) molécules de sodium Na_2
 - (a) atomes Na et molécules Na_2
- Rapport des **longueurs d'onde de de Broglie**

$$\frac{\lambda(\text{Na})}{\lambda(\text{Na}_2)} = \frac{h/p(\text{Na})}{h/p(\text{Na}_2)} = \frac{p(\text{Na}_2)}{p(\text{Na})} = \frac{m(\text{Na}_2)v}{m(\text{Na})v} = \frac{m(\text{Na}_2)}{m(\text{Na})} = 2$$

