

Leçon n°38 : Aspects corpusculaires du rayonnement. Notion de photon

Niveau	Licence
Prérequis	Corps noir, OEM, bases méca Q, bases relativité, diffractions/interférences, polarisation
Biblio	
Plan	<p>I. <u>Nature corpusculaire de la lumière</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Corps noir 2. Effet photoélectrique 3. Modèle de Bohr <p>II. <u>Caractéristiques du photon</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Quantité de mouvement 2. Masse 3. Moment cinétique <p>III. <u>Application : interférence à un photon</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Fentes d'Young 2. Expérience de Grangier et Aspect

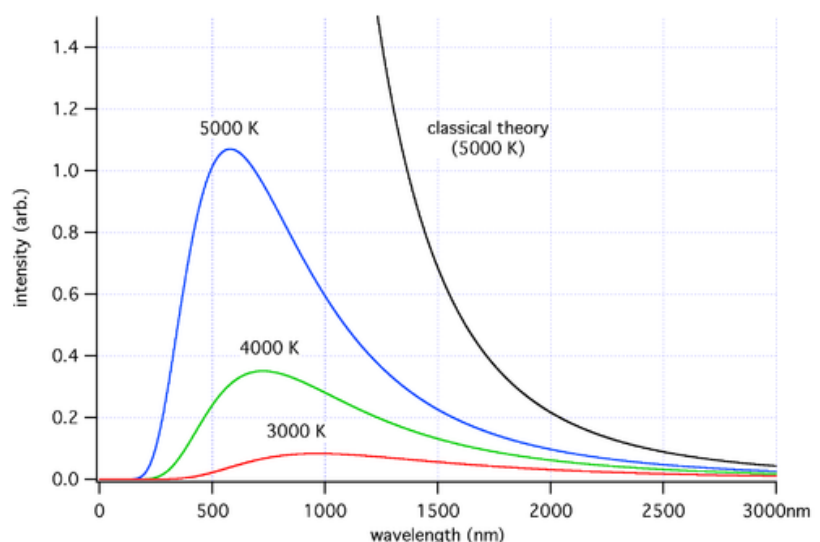
Huygens : ondulatoire

Newton ; corpusculaire

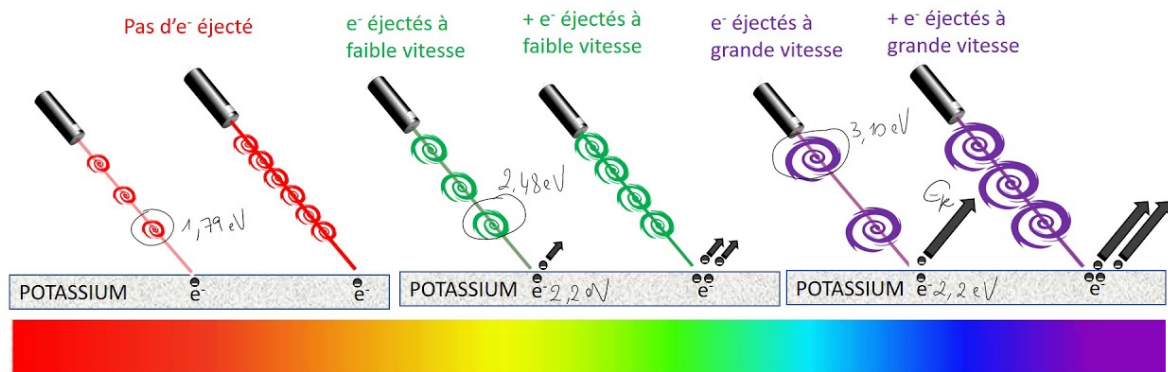
Young : interférence des fentes d'Young avec la lumière —> plutôt aspect ondulatoire que corpusculaire.

Comment a été introduite la notion de corpuscule grâce à la mécanique quantique.

Catastrophe UV =
divergence vers les UV du
spectre de rayonnement
(d'émission).

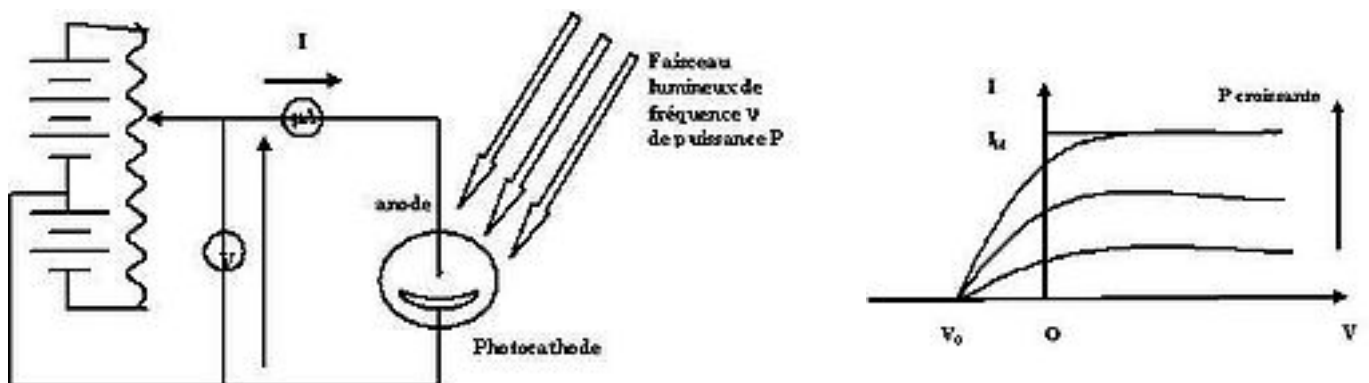


Effet photoélectrique :



Lumière verte = lumière seuil = càd 1^{ère} lumière du spectre à partir de laquelle l'EPE est possible.

$$W_K = 2,2 \text{ [eV]} = 3,5 \cdot 10^{-19} \text{ [J]}$$



Remarques :

-Photoélectrique = donner des applications (panneaux photoélectriques)

Donner la part de l'énergie dû au photoélectrique en France (essayer de se différencier des autres candidats) **6,3% de solaire en 2017.**

On travaille avec des semi conducteurs

Questions :

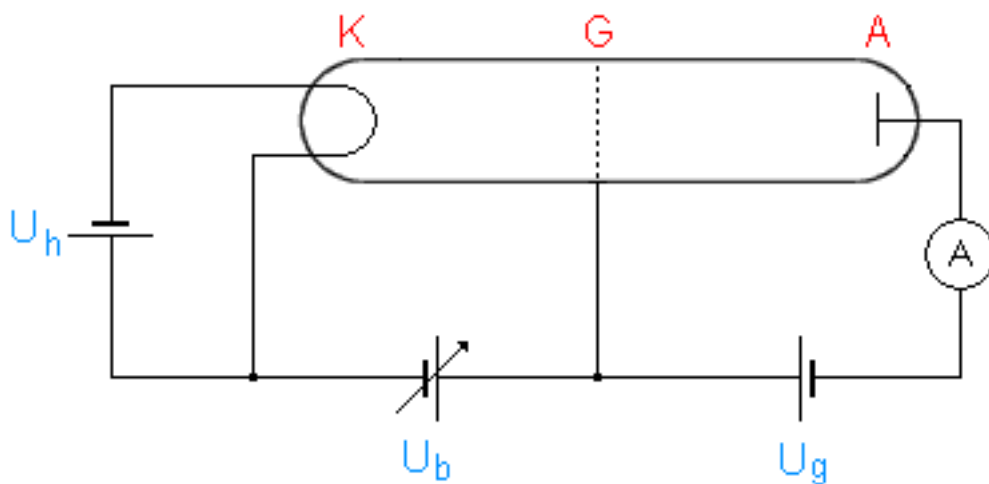
- Expérience de Franck et Hertz ?

Dans l'expérience, Franck et Hertz ont fait circuler un faisceau d'électrons dans un tube à vide contenant du mercure gazeux. Pour y arriver, ils ont utilisé une **triode**, c'est-à-dire un dispositif composé d'une cathode, d'une grille polarisée et d'une anode.

Les électrons, émis de la **cathode**, peuvent alors entrer en collision avec des atomes de mercure durant leur course entre la cathode et l'**anode**. Il y a deux types de chocs :

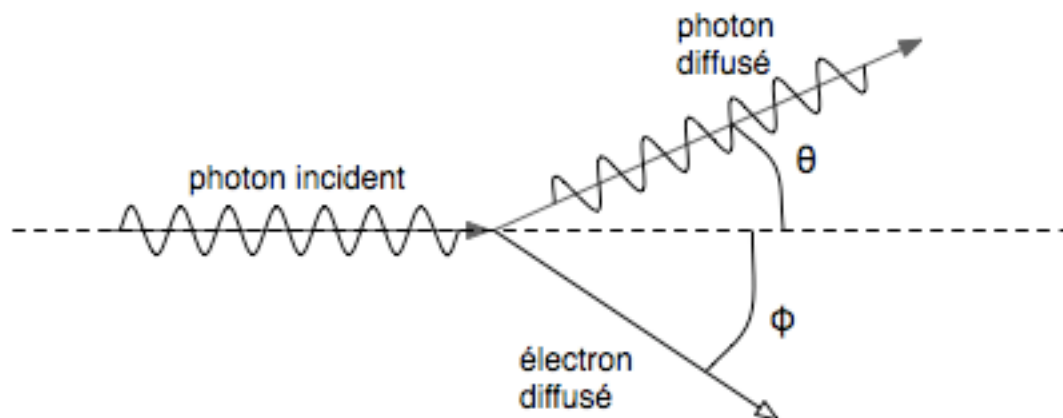
- des **chocs élastiques** où il n'y a pas de transfert d'énergie des électrons du faisceau avec les atomes de mercure percutés, et les électrons gardent donc leur énergie,
- des **chocs inélastiques**, et dans ce cas, les électrons émis par la cathode vont percuter les électrons de plus basse énergie des atomes de mercure, et ceux-ci vont passer sur une orbite d'énergie supérieure, suivant l'interprétation de Bohr.

La variation de courant reçu par l'anode est mesurée en fonction de l'énergie cinétique des électrons, et il est ainsi possible d'en déduire les pertes d'énergie des



électrons lors des collisions.

- Qu'est ce que l'effet Compton?



Diffusion Compton: Collision d'un photon avec un électron au repos

Schéma montrant la collision d'un photon sur un électron au repos. L'angle de diffusion du photon est theta et celui de l'électron est phi

En **physique**, la **diffusion Compton** (aussi appelée **effet Compton**) est une diffusion élastique (reposant sur la **conservation de l'énergie cinétique** globale du système étudié) lorsque l'on considère un électron libre mais inélastique pour un électron lié. Ce phénomène est observé lorsqu'un photon incident entre en collision avec un **électron libre** (ou, de manière plus correcte, à un électron faiblement lié) d'un **atome**. Au cours de ce processus, l'électron est éjecté de l'atome, qui est donc **ionisé** tandis qu'un photon est diffusé. **Arthur Compton** a, en **1923**, observé l'allongement de la **longueur d'onde** du photon dans cette diffusion, effet auquel on a attribué son nom : l'**effet Compton**.

L'expérience de Compton devint l'ultime observation qui convainquit la plupart des **physiciens** que la lumière peut se comporter comme un faisceau de particules dont l'énergie est proportionnelle à la **fréquence** (ou inversement à la **longueur d'onde**). Cet effet est important en physique car il a démontré que la lumière ne peut pas être uniquement décrite comme une **onde**.

- Application électroaimant ?

- Prix Nobel ferromagnétisme ?

Spintronique, stockage d'information

Appareil électronique charge qui transporte l'info

Dans la spintroniques c'est le spin qui transporte l'info

Changement d'état des électrons quand ils passent dans un matériau

Le spin de l'électron est une sorte de minuscule aimant, il interagit avec des matériaux possédant aussi une [aimantation](#), tels les matériaux ferromagnétiques ou les [aimants moléculaires](#).

Un courant électrique traversant un matériau ferromagnétique va voir sa proportion d'électrons *spin down* et *spin up* se modifier. On dit que ces électrons sont polarisés en spin. Par ce fait, on arrive à inscrire une information dans le spin des électrons.

Un second matériau ferromagnétique traversé par ce courant polarisé en spin exercera une résistance différente selon la polarisation du courant et l'orientation de l'aimantation du matériau. Une mesure de la résistance électrique nous permet de lire l'information que le spin des électrons possède. Cet effet est exploité dans des composants appelés vannes de spin ([Spin valve](#)), et se présentant sous la forme d'une couche de métal piégée dans deux couches de ferromagnétiques, à l'aimantation opposée ou parallèle. Cet effet est aussi utilisé pour la fabrication de capteurs de champ magnétique.

Le principe de base d'une application en spintronique est donc jeté.

L'effet magnétorésistif géant ([GMR](#)) utilisé dans les têtes de lecture des disques durs actuellement est la première application de la spintronique.

L'utilisation conjointe de matériaux aimantés et de l'électronique constitue la base des applications spintroniques de demain. Le phénomène clé à maîtriser reste le contrôle précis de l'orientation de l'aimantation des matériaux ferromagnétiques. Or celui-ci était impossible à contrôler autrement que par l'application d'un champ magnétique, technologiquement difficile à intégrer dans la fabrication des circuits électroniques.

Or il a été découvert expérimentalement en 1999 (sur la base de prédictions théoriques publiées en 1996) qu'un courant polarisé en spin était capable d'agir sur l'orientation de l'aimantation d'un ferromagnétique simplement par le transfert de moment cinétique entre les électrons constituant le courant et les électrons responsables de l'aimantation dans le matériau ferromagnétique ([CIMS](#), *current-induced magnetization switching*). L'inconvénient majeur de cette découverte est que ce phénomène se produit lorsque des densités de courant de l'ordre de 10^7 A/cm² sont atteintes. Pour éviter que le circuit se comporte comme un fusible à de telles densités, des structures nanométriques sont donc indispensables.

Une technologie utilisant les [skyrmions](#) (et éventuellement les [antiskyrmions](#)) pourraient peut-être bientôt contribuer à stabiliser les systèmes spintroniques, et à augmenter la miniaturisation et le pouvoir de traitement des ordinateurs au-delà des limites de la [loi de Moore](#)^{2,3}.

Qubits[[modifier](#) | [modifier le code](#)]

L'utilisation conventionnelle de l'état d'un électron dans un [semi-conducteur](#) est un système purement binaire, puisque l'état représente seulement 0 ou 1 (suivant la charge de l'électron) équivalant à un bit, et 8 bits suffisent à représenter tous les nombres entiers entre 0 et 255, un nombre à la fois. Les bits en spintronique, nommés [qubits](#), exploitent les états *spin up* et *spin down* comme une superposition

de 0 ou 1, et 8 qubits possèdent la propriété de représenter tous les nombres entiers entre 0 et 255 de façon simultanée.

- Effet magnétoresistive géant

La **magnétoresistance géante** (en anglais, *Giant Magnetoresistance Effect* ou **GMR**) est un effet **quantique** observé dans les structures de **films minces** composées d'une alternance de couches **ferromagnétiques** et de couches non magnétiques communément appelées multicouches. Elle se manifeste sous forme d'une baisse significative de la **résistance** observée sous l'application d'un **champ magnétique** externe. Dans la découverte initiale, les deux couches ferromagnétiques adjacentes ont en l'absence de champ magnétique appliqué une **aimantation** antiparallèle qui résulte d'un couplage antiferromagnétique¹. Un champ magnétique externe induit un **renversement d'aimantation** : les aimantations respectives des deux couches s'alignent et la résistance de la **multicouche** décroît brutalement.

L'effet se produit parce que le **spin** des **électrons** du **métal** non magnétique se répartit équitablement de façon parallèle et antiparallèle, et subit ainsi une **diffusion magnétique** moins importante lorsque les couches ferromagnétiques sont aimantées de façon parallèle.

- Ferromagnétique —> il ne faut pas que les couches soient complètes en électrons (il faut qu'il y ait un petit moment magnétique)

CP 38 : Aspects corpusculaire du rayonnement. 2

Notion de Photon

Niveau: L1

PR: - corps noir, OET, bases mica &, bases relative, diffractions/interférences
Polarisation

Intro: XVII^e Huygens et Newton

I. Nature corpusculaire de la lumière

a) Corps noir

Diagramme de rayonnement du corps noir
↳ catastrophe Ultra-violet

$$U = \int_0^{\infty} \rho_{\nu} d\nu$$

En 1900 → Planck → Quantification: Echange d'énergie $\propto \nu$ (fréquence)

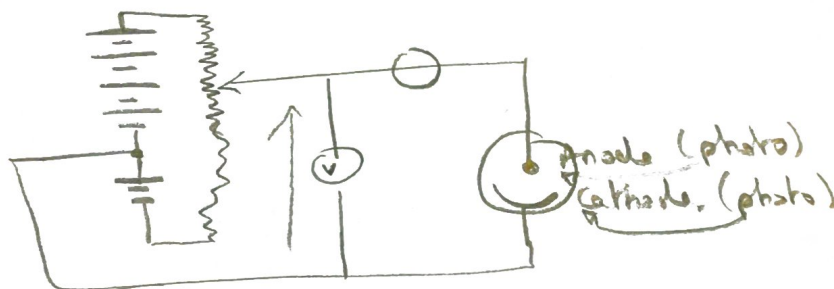
$$\rho_{\nu} = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}$$

Relation de Planck

b) Effet photoélectrique

1882 Hertz et 1905 Einstein

→ Montage



→ Courbe de $I = f(\nu)$ observe une saturation qd $P \uparrow$ et observe V_0
Courbe de la contre-tension maximale

↓
Contre-tension maximale
 $|V_0|$

→ Animat° de l'effet photoélectrique

- ν_s fréquence seuil dpt du matériau

- $P \propto I_{\text{max}}$

- $|V_0|$ linéairement en fct° de ν

$E = h\nu$ $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$

Eq. de l'NRS du Système : $h\nu + (-W_s) = \frac{1}{2}mv^2$

$$h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + W_s$$

① $h\nu \gg W_s = h\nu_s$

$$\frac{1}{2}mv^2 = h(\nu - \nu_s) \quad \nu \gg \nu_s$$

② $eV_0 = \frac{1}{2}mv^2$

$$|V_0| = \frac{h\nu}{e}(\nu - \nu_s)$$

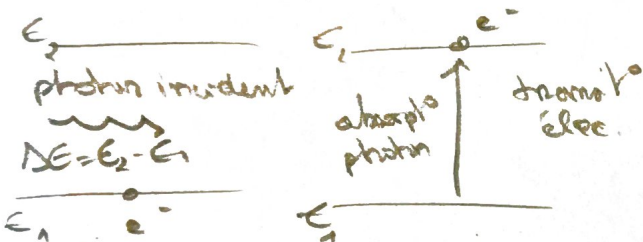
c) **Modèle de Bohr** → mettre en conclusion → en appel de quoi est important

1913 → $L_n = n\hbar$ quantifié (nombre)

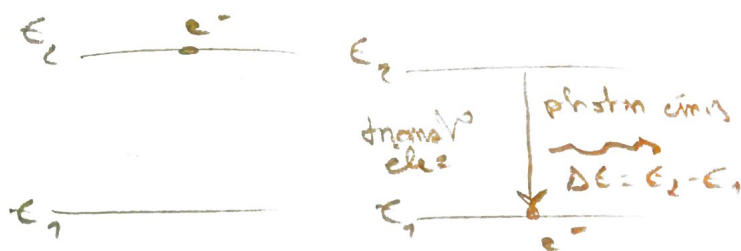
1^{er} postulat

$$\rightarrow V_{n,n'} = \frac{1}{n}(E_n - E_{n'}) \quad E_n = -\frac{me^2}{2\hbar^2} \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{1}{n^2}$$

2nd postulat



Absorption



Emission spontanée

II. Caractéristiques du photon

a) **Quantité de mouvement**

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$\vec{E} = E_0 \cos(\omega t - k_z) \vec{u}_z$$

$$\vec{B} = B_0 \cos(\omega t - k_z) \vec{u}_z$$

$$\langle \vec{F} \rangle = q \langle \vec{E} \rangle + q \langle (\vec{v} \times \vec{B}) \rangle$$

$$\langle \vec{F}_z \rangle = q \langle \frac{v}{2} E \rangle \vec{u}_z$$

$$\frac{d\langle W \rangle}{dt} = q \langle \vec{v} \cdot \vec{E} \rangle + q \langle \vec{v} \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) \rangle$$

$$= q \langle \vec{v} \cdot \vec{E} \rangle = c \langle \vec{F}_z \rangle$$

PPD : $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$

$$\frac{dW}{dt} = c \frac{d\vec{p}}{dt} \Rightarrow \frac{W}{p} = c \Rightarrow p = \frac{W}{c}$$

donc $p = \frac{h\nu}{c}$ quantité de mouvement du photon.

démontrer également grâce à l'effet Compton.

b) Planck

$$\vec{p} = \left(\frac{E}{c}, \vec{p} \right) \quad \text{donc} \quad \vec{p}^2 = \frac{E^2}{c^2} - \vec{p}^2 = m^2 c^2$$

$$E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2$$

$$\Rightarrow \boxed{E = \sqrt{m^2 c^4 + p^2 c^2}}$$

et $p = \frac{h\nu}{c}$ ~~et~~ OR $E = h\nu$ donc $h\nu = \sqrt{m^2 c^4 + p^2 c^2}$
 $\downarrow = 0$
 → contradiction donc $m = 0$ pour le photon.

c) Moment cinétique

Expérience de Beth, 1936.

Couple de moment : $\Gamma_z = \frac{\mathcal{L}P}{\omega}$ facteur 2 addit° des 2 transform° cir. gauche

Théorème du moment cinétique : $\frac{d\vec{\mathcal{L}}}{dt} = \vec{\Gamma}$ et droite $\Rightarrow \boxed{\frac{d\mathcal{L}}{dt} = \frac{P}{\omega}}$

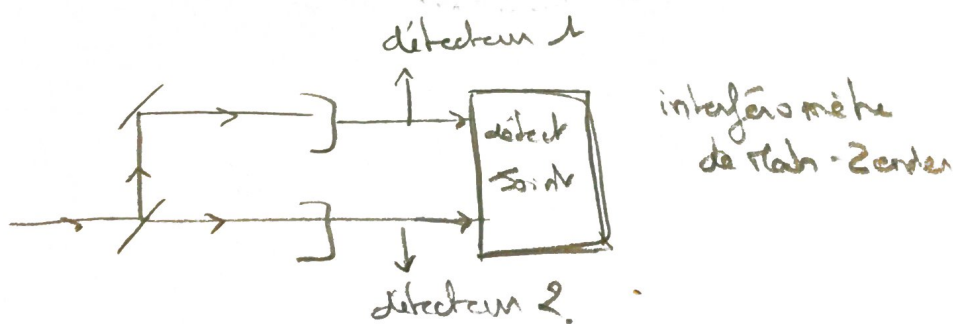
$$d\vec{\mathcal{L}}_z = \frac{1}{\omega} \frac{d\omega}{dt} \quad \omega = h\nu = \frac{h\omega}{2\pi} = h\nu$$

$$\mathcal{L}_z = \frac{\omega}{\omega} \quad \mathcal{L} = h$$

III. Application interférence à 1 photon

a) fentes d'Young → expérience

b) Expériences de Granger et Aspect



Questions + Appli. Faire expé photoélectrique.

Quand $f \nearrow$, $\mathcal{L} \nearrow$ et qd $I \nearrow$, $E_c \nearrow$
↑ ampère-mètre ↑ voltmètre

mais nul pour photon d'une spin = 1 ou -1.

Lumière, 1h qui retourne un peu → E_c donne
 à la fois E_c