

LP 3<sup>e</sup>: Aspect corpusculaire du rayonnement. Notion de photon

Introduction.

Voir la lumière comme un flux de particules est loin d'être une vision moderne. En effet, la vision granulaire de la lumière remonte aux atomistes de l'antiquité : Démocrite et Epicure. Pour eux, des particules de lumière s'échappaient des corps pour atteindre l'œil où elles stimulaient des sensations au cerveau.

Cette idée fut reprise par Isaac Newton puis abandonnée devant le succès de la théorie ondulatoire due par Young et Fresnel (1801-1819), qui pouvait à interpréter les phénomènes de diffraction et d'interférence.

En 1873, Maxwell planta le dernier clou dans le cercueil avec la théorie EM de l'optique : La théorie ondulatoire permettait d'expliquer quasiment tout les phénomènes observés, excepté le rayement du corps noir et l'effet photoélectrique.

Nous verrons donc cette leçon comment l'étude de ces 2 phénomènes a permis d'aboutir à l'introduction d'un quota de lumière, le photon. Qui nous étudierons. Ses propriétés auront de nos attentes sur des applications possibles due à cette nouvelle théorie.

→ Niveaux : L3.

→ Pré-requis : Théorie EM de la lumière  
• Physique statistique

# I - De la quantification de l'énergie à la notion de photon

## 1. Rayonnement de corps noir

Le rayonnement universel d'un corps porté à haute température est un phénomène courant de notre vie quotidienne (éclairage...) mais qui résistait à une application classique.  $\rightarrow$  l'idée de quantification et de l'étude de ce phénomène par Planck, en 1900.

$\rightarrow$  Rayleigh-Jeans proposa une théorie selon laquelle les parois du corps noir sont constituées d'oscillateurs harmoniques d'énergie moyenne  $k_B T$  suivant une statistique de Boltzmann :

$$P_V = \frac{8\pi V^2}{c^3} \times k_B T \quad (\text{cf thermo stat, c'est pas le sujet de la leçon}).$$

Problème: si aux basses fréquences on colle aux résultats exp., il y a un problème en haute freq.:  $\int_{V_0}^{+\infty} dV \rightarrow +\infty \Rightarrow$  énergie divergente ! [catastrophe ultraviolette]

$\rightarrow$  Monter spectre (Aberration 1).

$\rightarrow$  1900: Planck supposa que le phénomène = énergie des oscillateurs  $\propto k_B T = \alpha \nu \delta \rho(\nu)$ . Il supposa alors que l'énergie des oscillateurs (cad énergie absorbée ou émise et rayonnante) sont discontinues:  $E_i = n_i h \nu$

(NB: ici  $h$  = artifice de calcul puriste mathématique)

Ainsi on peut écrire la fonction de partition différente du spectre énergétique:

$$Z = \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\beta E_n} = \frac{1}{1 - e^{-\beta h \nu}}.$$

et d'après les calculs va en q-stat:

$$\langle E_{osc} \rangle = \frac{1}{Z} \sum E_n e^{-\beta E_n} = -\frac{\partial}{\partial \beta} \ln(Z) = \frac{h \nu}{e^{\beta h \nu} - 1}.$$

implique  
 $k_B T \downarrow$

$$\langle E_{osc} \rangle \rightarrow P_V = \frac{8\pi V^2}{c^3} \times \frac{h \nu}{e^{\beta h \nu} - 1} \rightarrow \text{raport aux données exp!}$$

○ Planck ici ne prétendait pas un grand avantage à sa constante  $h$ , mais c'est Einstein qui valorisa ce  $h$  en proposant en 1905 une interprétation de l'effet photoélectrique, comme  $= m_e v_0 = \text{constante} + 1$

(3)

## 2. L'effet photoélectrique inoxydable

Planp possible → si on a de l'or, on éclaire une plaque de zinc avec la lueur  
de mercure.  
non applicable planp

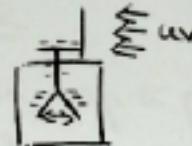
### ↳ Observations expérimentale :

- L'effet photoélectrique est l'extraction des électrons d'un matériau par un rayonnement.

- Observé pour la première fois par Hertz 1887

- on charge un électroscoppe
- on éclaire ensuite une plaque de zinc

→ l'électroscoppe se décharge



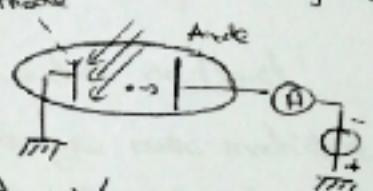
NB : si électroscoppe  $\oplus$  → il ne se passe rien

• le phénomène ne se produit qu'à partir d'une certaine fréquence (caract. du matériau)  
par aller + Retirer : exp de Millikan

→ on fait le vide dans le tube

→ on impose une différence de potentiel  $V$  entre C et A

→ on éclaire la cathode par un faisceau ( $V, \phi$ )



⇒ sous l'effet de l'agrement la cathode émet des électrons avec une certaine énergie cinétique, si elle est suffisante ces  $e^-$  peuvent atteindre l'anode → info sur  $E_C$  (mener au bec rouge)

### ↳ Théorie classique

Du pdr de la physique classique, l'extraction des électrons d'un matériau est conservée, car l'onde électromagnétique peut être à l'origine d'une force faisant l'énergie nécessaire à l'échappement d'un électron

Il suffit pour cela que l'énergie  $W$  apportée par l'onde lumineuse soit  $>$  au travail de sortie du métal (ou énergie liaison  $Ses$  et au métal).

$$\rightarrow \text{Ainsi } E_C = W - W_S = \frac{1}{2} m v^2 \text{ par } 1 e^-$$

Si c'est correct on obtient  $W \propto \phi \propto E^2$ .

et donc si  $W < W_s \rightarrow$  pas d'extra<sup>e</sup> possible

Or on continue à donner un courant fin par des  $\phi$  très faible!

Det  $\rightarrow W \propto \phi$ . alors  $ec?$  avec  $\phi \rightarrow$  la contre tension maximale (c'est à dire la dépense opposée à l'é pour l'opérateur de rejoindre l'anode) Det dep de  $\phi$ !  $\rightarrow$  ce n'est pas le cas.

Enfin: l'existence de ce seuil de fréquence (indép de  $\phi$ ) pose aussi problème!

### 3. Interprétation quantique

$\rightarrow$  Dès son article de 1905, Einstein, inspiré par la quantification de l'énergie de Planck donne une interprétation nouvelle de l'effet photoélectrique. Einstein fait l'hypothèse que la lumière a une nature corpusculaire et de sa nature ondulatoire.

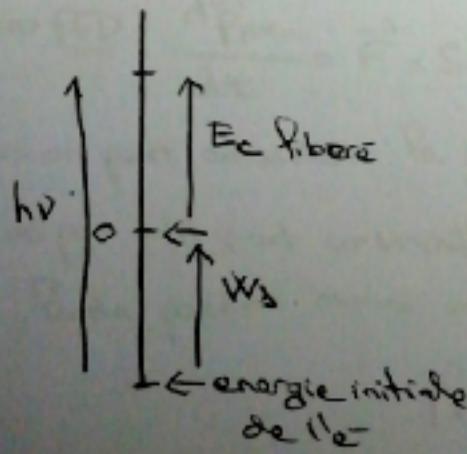
Ainsi faire son monocromatique de fréq  $v$  = flux de corpuscules émis de m énergie  $W = hv$

↳ retrouve la constante de Planck!

$\rightarrow$  Det: la lumière échange de l'énergie avec matière que par absorption/émission d'un photon entier  $\Rightarrow$  notion de quantum d'énergie indivisible  $hv$

$\rightarrow$  ce quantum ne dépend que de  $v$  (et pas de  $\phi$ ) cela explique pourquoi on continue de voir l'effet photo à très faible intensité!

$\rightarrow$  Avec cette interprétation l'interaction lumi/maière peut être vu comme le résultat d'une吸收 d'un photon entier, on comprend alors aisément l'existence d'un tension seuil: il faut  $hv \geq W_s$   $\boxed{V_s = \frac{W_s}{h}}$



$$\Rightarrow \boxed{hv = W_s + \frac{1}{2}mv^2} \quad (\text{conservation d'énergie})$$

$$\text{d'où } Ec = h\nu - W_s \quad \text{d'où } \boxed{eV_0 = h\nu - W_s}$$

= tension à opposer pour arrêter  $ec$ .

$\rightarrow$  prop. à  $v$ .

$\rightarrow$  indép. de  $\phi$ .

(5)

NB  $\rightarrow$  on traçait ainsi  $|V_{ol}| = f(V)$   $\rightarrow$  on a une mesure de  $h$   
 $\rightarrow$  on peut déterminer la  $V_h$  d'un métal

ex:  $\begin{cases} Zn \rightarrow 3,4 \text{ eV} \\ Fe \rightarrow 4,8 \text{ eV} \\ Pb \rightarrow 2,2 \text{ eV} \end{cases}$

Enfin: ↑ de  $\phi$  augmente le nbr de photon incident / m<sup>2</sup> / s.  
et de ( $\omega$  freq suffisante)  $\rightarrow$  le nbr d'évacué d'au TI.

Q Si l'on peut donc voir la lumière comme des particules "photon" interactives  
avec aux caracté de ces particules; est ce qu'on peut défi une masse? un élement?

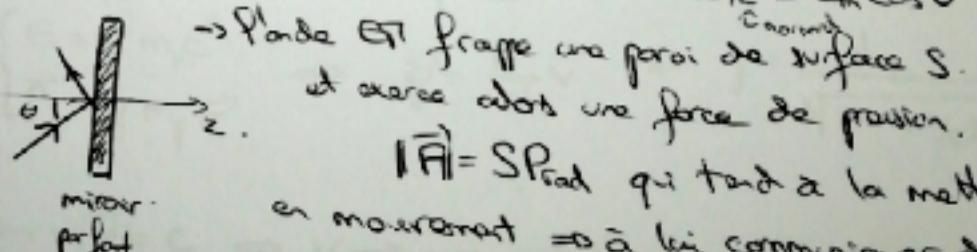
## II - Caractéristiques du photon

### 1 - Quantité de mouvement du photon

$\rightarrow$  On a vu que le rayement transporte de l'énergie, mais il a d'autres propriétés comprises par le modèle corpusculaire & transport de quantité de mouvement.

exp observable: force exercée par un faisceau de lumière sur un écran.

$\rightarrow$  phénomène déjà rencontré et que l'on peut traiter de façon analogue mais de manière analogue au vision corpusculaire:  $\rightarrow$  on rappelle  $P_{rad} = \frac{\partial E}{\partial t} = \frac{\partial E}{\partial \Omega} \cos^2 \theta$



$|\vec{F}| = SP_{rad}$  qui tend à la mettre en mouvement  $\Rightarrow$  à lui communiquer de la quantité de mouvement.

$\Rightarrow \underline{PFD}$ :  $\frac{d\vec{p}_{paroi}}{dt} = \vec{F} = S\vec{P}_{rad}$ .

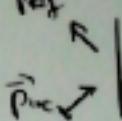
$\rightarrow$  on peut considérer le système {onde + paroi} isolé (si on ignore son échappement)  
 $\Rightarrow$  par qu'il y ait conservation de quantité de mvt, il faut donc supposer que l'onde possède aussi un vect. quant. de mvt tel que

$$\vec{p}_{paroi} + \vec{p}_{onde} = \text{cte}.$$

(6)

- En rallement sur des corps normaux, pdt une durée  $t$  on a

$$\delta p_z(\text{paroi}) = F_z t = S_{\text{radi},z} t = S \cos^2 \theta t = - \delta p_z(\text{ordre}) = p_{z,\text{inc}} - p_{z,\text{ref}}.$$



$$\Rightarrow S \cos^2 \theta t = p_{z,\text{inc}} - p_{z,\text{ref}}$$

- énergie transportée par l'onde sur paroi :  $E = \rho_m \times c t \times S \cos^2 \theta \times \frac{1}{2}$  on compte 2x inc et refl norm.

Ainsi :  $\delta p_{z,\text{paroi}} = - \delta p_{\text{onde}} = S \cos^2 \theta t = 2 \times E \frac{\cos(\theta)}{c}$

$\rightarrow$  on peut ainsi attribuer un vecteur quantité de mouvement  $|\vec{p}| = \frac{E}{c}$   
et on sait que le photon transporte une énergie  $E = h\nu$ . direct de la phys. du rayon

d'où  $\begin{cases} p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} = \hbar k \\ \quad , \quad \end{cases} \Rightarrow |\vec{p} = \hbar \vec{k}| \quad (\text{ou } \hbar = \frac{h}{2\pi})$ .

## 2. Plan de photon

$\rightarrow$  on a donné une quantité de mouvement mais sans faire intervenir la masse qui intervient normalement naturellement.

$\rightarrow$  Mais on peut fixer les 2 ds le cadre des particules relativistes : on va faire intervenir la loi de conservation s'applique si on définit

son énergie  $\begin{cases} E = \gamma m_p c^2 \\ \vec{p} = \gamma m_p \vec{v} \end{cases} \Rightarrow \vec{p} = \frac{E}{c^2} \vec{v} \quad \text{et} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$

Ds le cas du photon :  $v=c \Rightarrow \gamma \rightarrow +\infty$  et l'énergie devient donc  $\infty$ .  
sauf si l'on suppose  $m_p=0$ .  $\rightarrow$  pseudo particule

NB : On retrouve une formule  $\vec{p} = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} = \hbar k$  tellement probable.

### 3. Moment cinétique du photon

→ Un photon peut-il échanger du moment cinétique?

→ Pour quantité de mouvement étudiée l'interaction en vibration longitudinale.

On considère une OEN polarisée CG : ~~sinusoidal (vecteur)~~

$$\vec{E} = E_0 \cos(\omega t - kx) \hat{e}_x + i \sin(\omega t - kx) \hat{e}_y$$

$$\vec{E} = E_0 e^{i(\omega t - kx)} (\hat{e}_x - i \hat{e}_y) \rightarrow \text{onde se propage selon } +\hat{Oz}$$

→ On regarde l'interaction de cette onde avec un atome (rayon immobile). Modèle de l'atome élastiquement fixé:  $\Sigma = \{e^-, m_e\}$ , R = centre de masse atome (gradi).

$$\Rightarrow m_e \ddot{\vec{r}} = -m_e \omega_0^2 \vec{r} - \frac{ne}{c} \vec{r} - e \vec{E}$$

↑                      ↑                      ↑  
rappel              choc              force due au champ.

$$\text{en posant } \vec{r} = r_0 e^{i\omega t}$$

$$\rightarrow \boxed{\vec{r} = \alpha \vec{E}} \text{ ou } \alpha = \frac{e}{m(\omega^2 - \omega_0^2 + i\frac{\omega}{c})}$$

→ La puissance moyenne reçue par l'atome (et dissipée par  $\vec{E}$ ):

$$\langle P_{\text{elec}} \rangle = \langle -e \vec{E} \cdot \dot{\vec{r}} \rangle = -\frac{e}{2} \text{Re}(\vec{E}^2 \cdot \vec{r})$$

et le travail de cette force:  $P = \vec{F} \cdot \vec{R} = \vec{F} \cdot \vec{r}_{\text{fin}} - \vec{r}_{\text{ini}}$   
d'où  $\langle P \rangle = \frac{1}{2} \text{Re}(e^2 \vec{E} \cdot \vec{r}) = \frac{e^2}{2} \alpha^2$

$$\langle P_{\text{elec}} \rangle = -\frac{e}{2} \text{Re}(\vec{E}^2 \cdot i\omega \alpha \vec{E}) = \frac{e\omega}{2} E_0^2 \text{Im}(\alpha) = -\text{Re}(\alpha)$$

$$\text{de } \vec{n} : \vec{n} = \vec{r} \wedge (-e \vec{E}) =$$

$$\Rightarrow \langle \vec{n} \rangle = -\frac{e}{2} \text{Re}(\vec{r} \wedge \vec{E}^*) = -\frac{e}{2} \text{Re}(\alpha \vec{E} \wedge \vec{E}^*)$$

$$\langle \vec{n} \rangle = -\frac{e}{2} \text{Re} \left( \alpha (\hat{e}_x - i \hat{e}_y) \wedge (\hat{e}_x + i \hat{e}_y) \right) E_0^2$$

$$= -\frac{e E_0^2}{2} \text{Re}(\alpha * (i \hat{e}_x + i \hat{e}_y)) = -\frac{e E_0^2}{2} \text{Re}(i \alpha) = e E_0^2 \text{Im}(\alpha) \hat{e}_x$$

$$\text{On a donc: } \boxed{\langle \vec{n} \rangle = \frac{\langle P \rangle}{\omega} \vec{u}_z} \quad (8)$$

Ainsi l'onde cède du moment // à la directe de propagation.

→ on réadopte une vision corpusculaire et on considère que le transfert est dû à une absorption du photon par l'atome

$$\text{Ainsi } \langle P \rangle = \frac{h\nu}{\tau} = \frac{\hbar\omega}{\tau} \quad \Rightarrow \quad \langle \vec{n} \rangle = \frac{\hbar}{\tau} \vec{u}_z$$

durée d'absorp<sup>t</sup>e (transfert).

En appliquant le TMC (idem que pour PFD, pression radiation)

$$\frac{d\vec{\sigma}_{\text{atome}}}{dt} = \langle \vec{n} \rangle = \frac{\hbar}{\tau} \vec{u}_z = \frac{\vec{\sigma}_{\text{at}}}{\tau} \quad \text{d'où} \quad \boxed{\vec{\sigma}_{\text{at}} = \hbar \vec{u}_z}$$

Or le système (atome-photon) est isolé  $\Rightarrow \boxed{\vec{\sigma}_{\text{at}} + \vec{\sigma}_{\text{phot}} = \vec{0}}$

Or avant collision  $\vec{\sigma}_{\text{at}} = 0$  → après collision  $\begin{cases} \vec{\sigma}_{\text{at}} = \hbar \vec{u}_z \\ \vec{\sigma}_{\text{phot}} = 0 \end{cases}$

$\Rightarrow$  initialement :  $\boxed{\vec{\sigma}_{\text{phot}} = \hbar \vec{u}_z}$

NB → si on change la polarité  $G \rightarrow D$  on trouve  $\boxed{\sigma = -\hbar \vec{u}_z}$   
 $\rightarrow$  polarité rect = polarité  $G +$  polarité  $D \Rightarrow \sigma = 0$ .

Le photon est une particule de spin  $\frac{1}{2}$

NB : Preuve exp → exp. de Beth (1936)

une lame  $\frac{1}{2}$  onde suspendue par un fil de torsion éclairée par un champ intense PCG → PCD

$\Rightarrow$  le moment du photon passe de  $+\vec{\hbar}$  →  $-\vec{\hbar} \Rightarrow \Delta\sigma = -2\hbar$

$\Rightarrow$  par  $N$  photons:  $\vec{\Gamma} = -N\Delta\sigma = \underline{2N\hbar}$  mesuré par le fil de torsion

N.B.: Si on double la puissance, on ne double que  $N$  (car  $\vec{\Gamma}$  indépendant de la puissance).

### III - Application : manipulation d'atome : refroidissement.

#### 1 - Par échange d'énergie

La thermodynamique nous enseigne que température et désordre sont liés par  $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}k_B T$

Ainsi refroidir = diminuer son désordre.

→ Utilisant le pompage optique Kastler et Bruehl ont fait un premier pas dans cette direction:

expliquer le schéma présenté:

↳ Un atome possède 2 niveaux d'énergie bas  $E_1$  et  $E_2$  stable.

désordre: on ne connaît pas l'état occupé

↳ On a un photon tel que  $h\nu = E_3 - E_2$ , avec  $E_3$  instable  
⇒ retourne vers état 1 ou 2. ⇒ au final on tombe avec l'état 1

#### 2. Par échange de quantité de mouvement

→ Le photon transporte en étant  $h\nu$  ms aussi une impulsion  $\hbar k$ . q'il transfère à l'atome par absorption.

Considérons un atome se déplaçant à la vitesse  $\vec{v} = v_0 \hat{e}_x$ .

$m v_0 \rightarrow$  un photon  $\hbar \vec{k} = -\hbar k \hat{e}_z$  ⇒ il y a absorption du photon.

⇒ -absorp<sup>o</sup> d'énergie (transit<sup>o</sup>  $E_2 \rightarrow E_3$ )

-absorp<sup>o</sup> d'impulsion:  $m \vec{v}_{ac} = (m v_0 - \hbar k) \hat{e}_z$  ⇒ ralentissement

Puis désexcitation spontanée ⇒ émission d'un photon directement

d'où  $m \vec{v}_{des} + \hbar \vec{k}_d = m \vec{v}_{ac}$ .

⇒  $\vec{v}_{des} = (v_0 - \hbar k) \hat{e}_z - \hbar k \hat{e}_z$

alors ⇒ moyenne nulle sur plusieurs cycles

d'où après moyenne:  $\vec{v}_f = (v_0 - n \hbar k) \hat{e}_z - \sum_{i=1}^n \frac{\hbar k \hat{e}_z}{m}$

(10)

Qd4: à 300 K pour le sodium  $V_0 \approx 600 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$

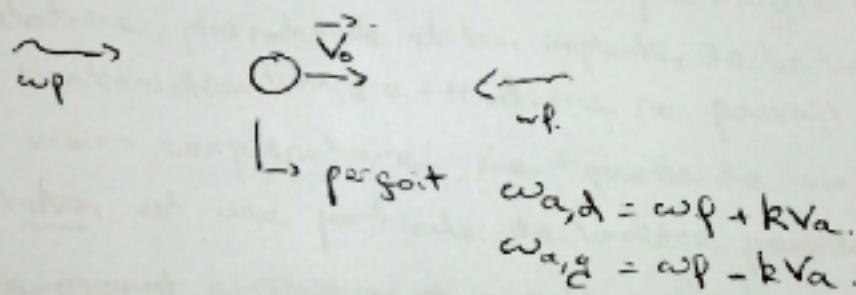
$$\frac{\tau_{\text{R}}}{n} \approx 3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$$

⇒ il faut 20 000 cycles ( $T_{\text{désorb}} = 10^{-8} \text{ s} \Rightarrow$  il faut 0,6 ms).

Par conséquent une particule mettrait donc 20 cm à rebondir.

Problème: L'atome ayant une vitesse, la pulsation perçue par ce dernier n'est pas celle que l'on voit en  $\omega_p - k \cdot V$ . (effet Doppler) ⇒ on parle de la transition.

on peut remédier à cela en utilisant 2 lasers contre propagant de fréq impulsion  $\omega_p < \omega_{\text{transit}}$ .



⇒  $\omega_{\text{ad},d}$  est plus proche de la fréq → freine + l'atome

= refroidissement Doppler, on parle alors de mélange optique

et  $T_{\text{lim}} = \text{équilibre entre refroidissement et chauffage des atomes par absorption et choc}$

$$\rightarrow T \approx 300 \mu\text{K}!$$

NB → expérimentalement on atteint des temp encore + basses!

c'est due au refroidissement Sisyphie

pepe: même si on explique si tps ok

- las l'effet du champ lumineux les nux d'énergie de l'atome peuvent se rapprocher.

- onde stationnaire du piège ⇒ modulat des nux de l'espace

- excitation vers  $E_3$  qd  $E_3 - E_2 \text{ min} \approx E_2 \text{ max} \rightarrow$  se déplace vers  $E_1$  qui lui

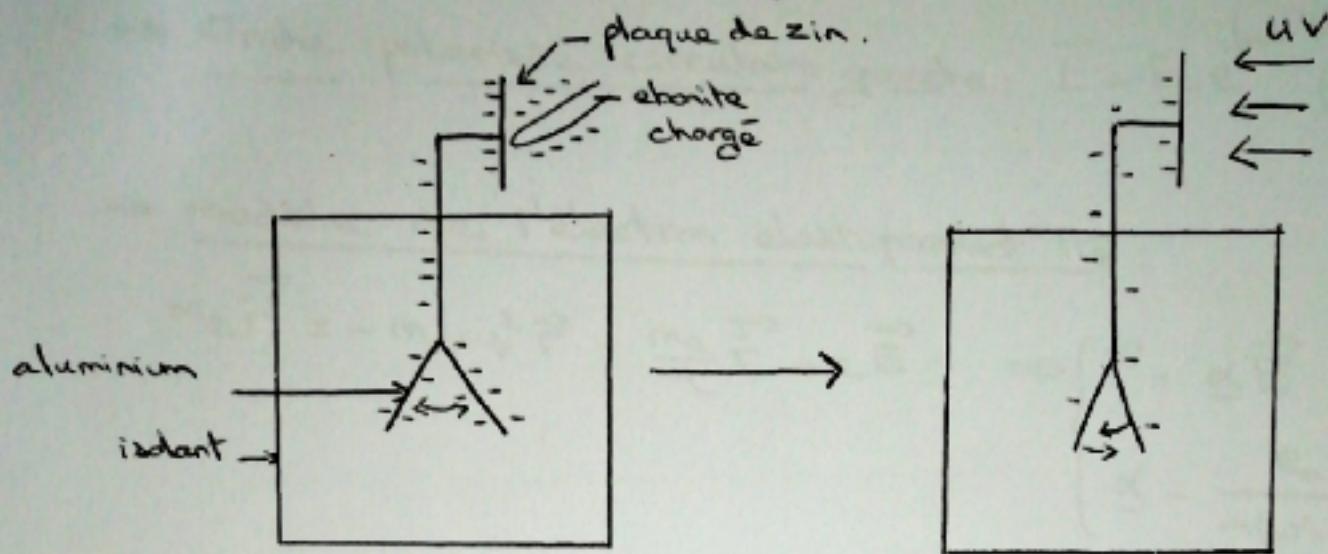
- (11)
- Applications :
- condensat de Bose-Einstein par dup.
  - l'interférométrie d'onde de matière
  - Optical tweezers (on peut manipuler des atomes  
à l'aide de la force de pression de radiation).
  - ( → caractère  $\sigma$  du photon → ouvre sur théorie quantique  
(info quantique) .

### Conclusion

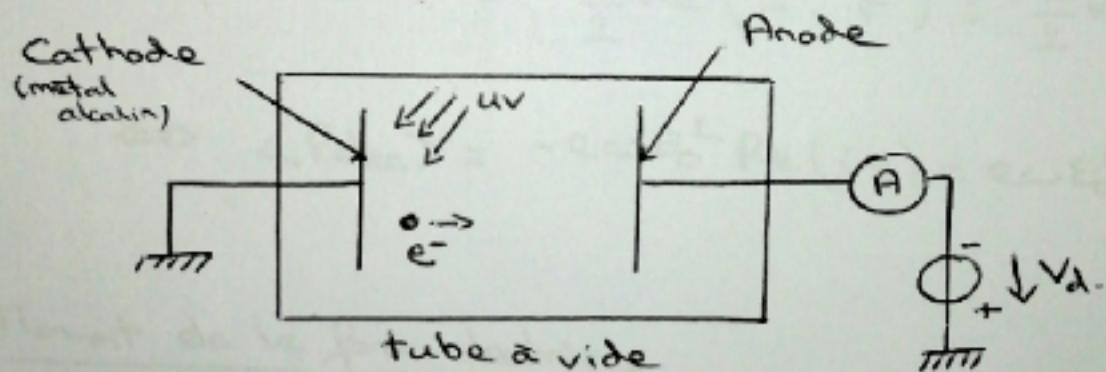
Au cours de cette leçon nous avons vu que malgré une théorie ondulatoire, plus naturelle et bien implantée, de la lumière, certains aspects de l'interaction lumière - matière ne pouvait s'interpréter qu'avec une vision corpusculaire. Le "quanta de lumière" plus tard appelle photon est une particule de lumière possédant une impulsion et moment cinétique et capable d'échanger énergie et impulsion et moment cinétique avec la matière de manière quantifiée.

Cependant il est important de comprendre que cette vision corpusculaire ne remplace pas la théorie ondulatoire, c'est la dualité onde-corpuscule nous conduisant à dire que l'écho la lumière n'est ni une onde ni une particule, bien au contraire!

## Mise en évidence de l'effet photoélectrique



## Expérience de Millikan



## II. 3. Moment cinétique du photon

→ Onde polarisée circulaire gauche:  $\vec{E} = E_0 e^{i(\omega t - kx)} (\hat{e}_x - i\hat{e}_y)$ .

→ modèle de l'électron élastiquement lié:

$$m_e \ddot{\vec{r}} = -m_e \omega_0^2 \vec{r} - \frac{m_e}{c} \vec{r} - e \vec{E} \Rightarrow \begin{cases} \vec{r} = \underline{x} \vec{E} \\ \underline{x} = \frac{e}{m(\omega^2 - \omega_0^2 + i\frac{\omega}{c})}. \end{cases}$$

→ Puissance moyenne électrique:

$$\langle P_{\text{elec}} \rangle = \langle -e \vec{E}_0 \cdot \dot{\vec{r}} \rangle = -\frac{e}{2} \text{Re}(\vec{E}^k \cdot \vec{r}) = -\frac{e}{2} \text{Re}\left(i\omega \vec{E}_0^k \cdot \vec{E}\right).$$

$$\Leftrightarrow \langle P_{\text{elec}} \rangle = -e\omega E_0^2 \text{Re}(i\underline{x}) = e\omega E_0^2 \text{Im}(\underline{x}).$$

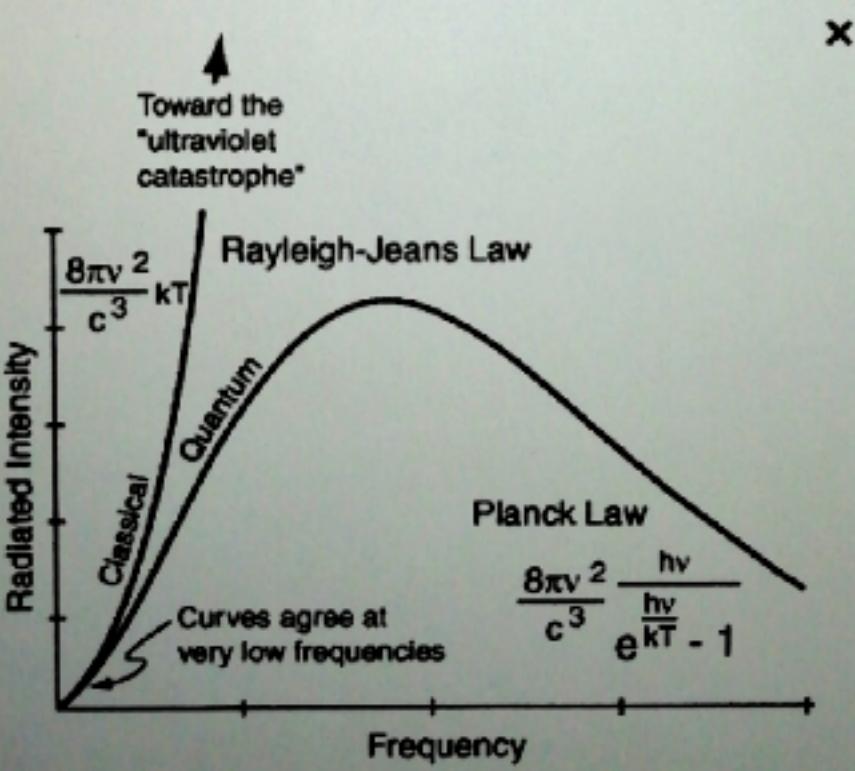
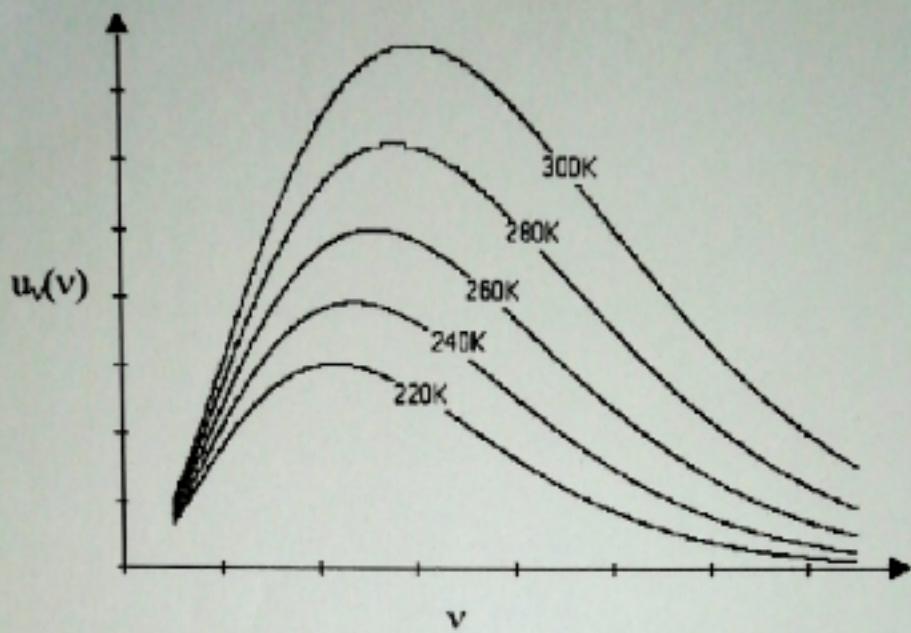
→ Moment de la force électrique

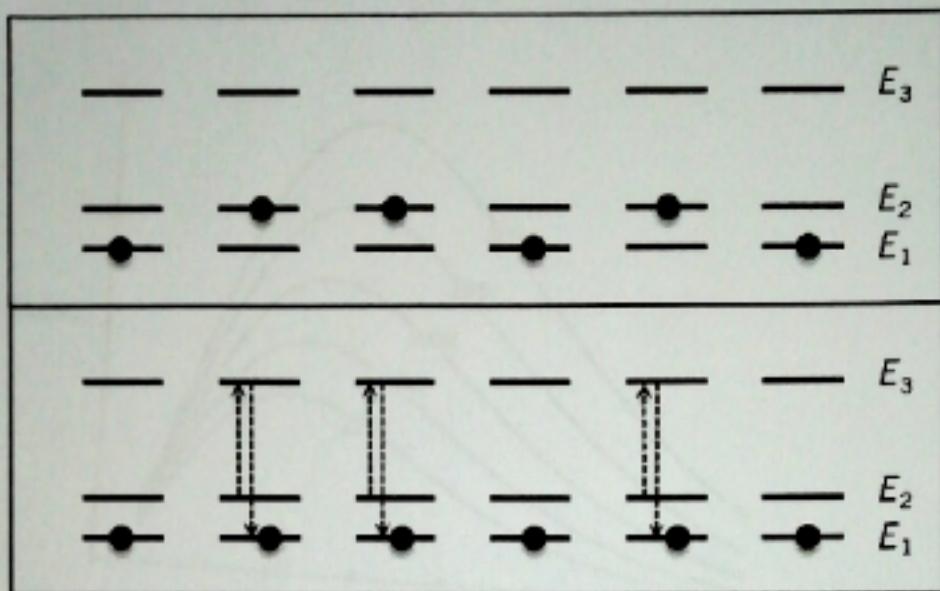
$$\langle \vec{\Pi} \rangle = \langle \vec{r} \wedge -e \vec{E} \rangle = -\frac{e}{2} \text{Re}(\vec{r} \wedge \vec{E}^k) = -\frac{e}{2} \text{Re}(\underline{x} \vec{E} \wedge \vec{E}^k).$$

$$\Leftrightarrow \langle \vec{\Pi} \rangle = -\frac{e}{2} \text{Re}\left(\underline{x} (\hat{e}_x - i\hat{e}_y) \wedge (\hat{e}_x + i\hat{e}_y)\right) E_0^2.$$

$$\Leftrightarrow \langle \vec{\Pi} \rangle = -e E_0^2 \text{Re}(i\underline{x}) \hat{e}_z e E_0^2 \text{Im}(\underline{x}) \hat{e}_z$$

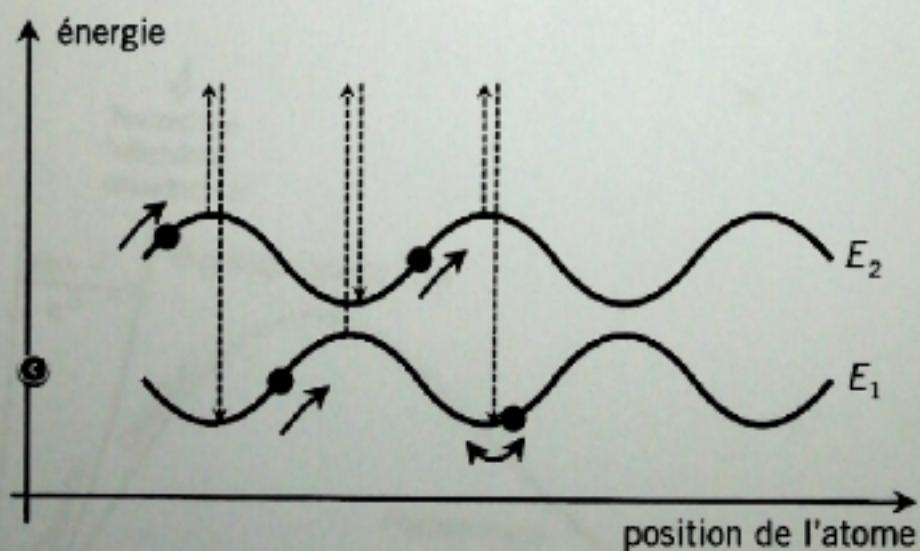
D'où 
$$\langle \vec{\Pi} \rangle = \frac{\langle P \rangle}{\omega} \hat{e}_z$$





Original (png, 20k) 8  
Figure 2

Principe du pompage optique. En haut, une assemblée de six atomes est répartie aléatoirement sur les états d'énergie  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ . En bas, après avoir éclairé les atomes avec des photons d'énergie  $E_3 - E_1$ , on a accumulé tous les atomes dans l'état d'énergie  $E_1$  : le désordre initial a été supprimé.



Original (png, 44k) 8  
Figure 3

Principe du refroidissement Suysteem. Dans une onde lumineuse stationnaire, les niveaux d'énergie sont modulés dans l'espace. Il existe des configurations telles que l'atome monte sans cesse des collines de potentiel, le pompage optique le place au fond d'une vallée dès qu'il atteint un sommet. Quand son énergie devient trop faible, l'atome est piégé au fond d'un puits de potentiel.