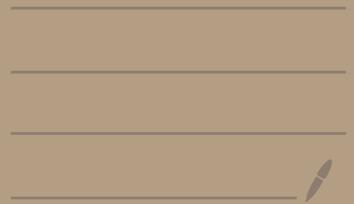


LP 55 - Photons.



* Niveau : L3.

* Plan :

I) Emergence de la notion de photon.

- 1) Une nécessité historique.
- 2) L'inséparabilité du corpuscule.
- 3) Caractéristiques du photon.

Plan proposé par R. Valle dans sa correction de la LP34 de 2016.

Je le trouve plus adapté aux attentes des jurys que le plan "classique".

II) Interaction lumière-matière.

- 1) Refroidissement Doppler.
- 2) Piège Magnéto-Optique.

Pérez p651 : "... un photon n'est ni une onde, ni une particule, mais un objet physique dont l'interaction avec un appareil de mesure est, selon la situation expérimentale, caractéristique, exclusivement (ou non), d'un phénomène ondulatoire ou d'un phénomène corpusculaire."

* Références : [1] PEREZ, "Quantique - fondements et applications." (leçon 13 - Optique quantique).

[2] LE BELLAC, "Physique quantique".

[3] FOX, "Optique quantique, une introduction".

I) Emergence de la notion de photon.

1) Une nécessité historique.

Bla bla bla sur les succès et les limites de la Φ classique l'état des lieux de la fin du XIX^e / début du XX^e siècle.

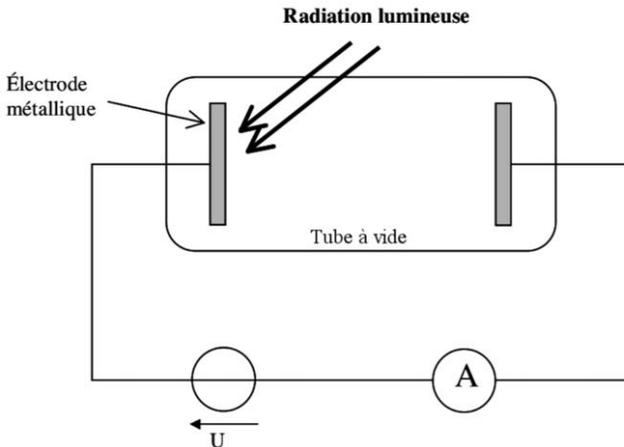
Phénomènes inexpliqués : - rayonnement du corps noir,
- spectres d'absorption / d'émission des atomes,
- effet photoélectrique.

Potentiellement en intro.

⇒ On se focalise uniquement sur l'effet photoélectrique :

" L'effet photoélectrique est l'extraction des électrons d'un matériau par un rayonnement dont la fréquence est supérieure à un certain seuil. "

Effet observé pour la 1^{ère} fois en 1887 par F. Hertz.

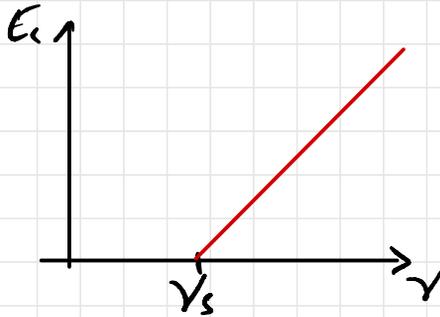


Def: A. Dartim.

Schéma Expérience de Millikan (1916)
La vérification de l'hypothèse d'Einstein.

• Difficultés interprétation classique: (sur slide ?)

- L'énergie cinétique des électrons éjectés dépend de la fréquence γ selon une loi affine.
La physique classique prédit que l' E_c des e^- devrait dépendre de l'amplitude des champ électrique incident.
- Il existe une fréquence seuil en dessous de laquelle l'effet ne se produit pas, peu importe l'intensité du rayon incident, cette fréquence est dans l'UV.



• Interprétation d'Einstein (1905): l'énergie lumineuse est quantifiée: constituée d'un nombre fini de quanta de lumière, indivisibles, d'énergie $h\gamma$ (appelés photons à partir de 1926).

L'interaction entre la lumière et le métal est le résultat d'une collision inélastique:



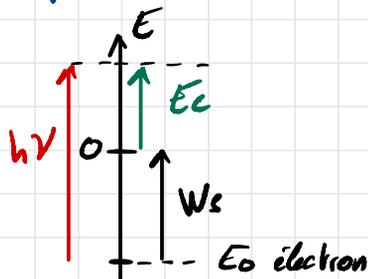
Energie: $h\gamma$ $-W_s$ E_c

$\Rightarrow E_c = h\gamma - W_s$ $W_s \equiv$ travail de sortie.

⇒ On peut expliquer la fréquence seuil : pour que l'e⁻ soit extrait du métal, on doit avoir :

$$h\nu \geq W_s$$

$$\Rightarrow \nu \geq \nu_s = \frac{W_s}{h}$$



Animation de l'expérience de Millikan :

phet.co//phet.colorado.edu/fr/simulation/photoelectric

↳ on voit que l'intensité du courant est proportionnelle à l'intensité de la lumière : il y a plus de photons ⇒ on arrache plus d'électrons.

OdG : Pour le zinc : $W_s = 4,33 \text{ eV} \Rightarrow \lambda_s = 290 \text{ nm}$
OK UV.

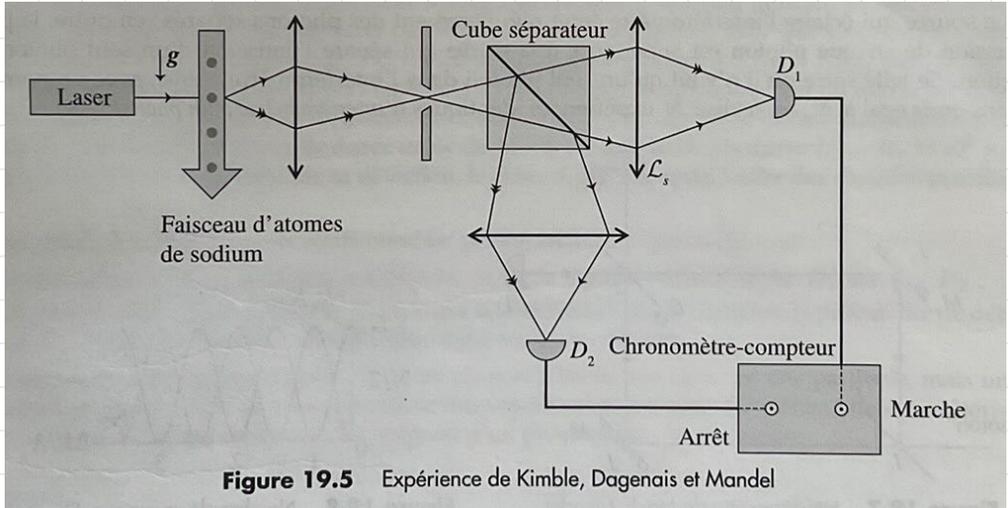
Transition : Pour expliquer certains phénomènes comme l'effet photoélectrique, il a été nécessaire de **quantifier** l'énergie du champ EM.

Il s'agit d'un premier indice quant à l'existence des photons mais certainement pas une preuve.

Pour que leur existence soit incontestable, il a fallu attendre les années 1930 (!!!) avec les sources à photon unique.

2) l'inséparabilité des corpuscules.

Expérience de Kimble, Dagenais et Mandel (1977).



[1] p. 649.

Principe de la source : On vient exciter les atomes de sodium avec une impulsion de longueur temporelle Δt telle que :

$$\Delta t \ll \tau_c$$

τ_c temps typique de
d'excitation de
l'atome.

$\tau_c \approx 1 \text{ ns} \Rightarrow$ contrainte technique qui explique qu'on ait du
attendre les années 70.

Si la théorie est bonne, une telle source ne devrait émettre
qu'un photon à la fois.

Principe de l'expérience et résultats:

L'idée de détection des photons est la suivante : avec une source lumineuse adaptée, on envoie des pulses de lumière très brefs (picoseconde) constitués a priori d'un photon à intervalles réguliers T . Ces pulses arrivent alors sur une lame semi-réfléchissante, qui a pour propriété de faire passer 50% de la lumière et d'en réfléchir le reste. On dispose donc deux détecteurs en sortie de la lame pour observer ce qui arrive. Avec une théorie ondulatoire de la lumière, on devrait observer des signaux lumineux brefs et séparés de T mais simultanés sur les deux détecteurs, comme une onde verrait son amplitude divisée par deux au passage par la lame. Or, ce que l'on observe sur les deux détecteurs est bien bref, mais en aucun cas simultané sur les détecteurs; on a même jamais deux signaux en même temps qui sont enregistrés. Ce qui passe par la lame ne peut être considéré comme une onde, mais doit être considéré comme une particule qui a une probabilité de traverser ou de se faire réfléchir.

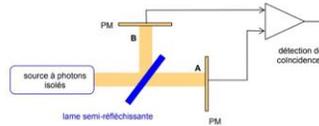


FIGURE 1 – Schéma d'une expérience à photons uniques. PM : photomultiplicateur. Source : Ressources pour la classe de terminale générale physique-chimie série S, dualité onde-particule

Source : LP38 - F. Nicolas (2018).

On a donc mis en évidence l'aspect corpusculaire de la lumière.

⚠ et remarque sous le plan.

3) Caractéristiques du photon.

Slide avec les caractéristiques du photon.

↳ On se propose de vérifier que c'est cohérent avec l'électromag classique dans le cas de la qelm.

En effet, les succès de l'électromag classique sont nombreux, l'émergence de la notion de photon ne doit pas tout remettre en cause.

Def du calcul : SAU2 "PC-PC*", Physique tout en sem."
(p 338 dans la 6^{ème} édition).

27.10 Quantité de mouvement et moment cinétique du photon (**)

On considère l'interaction entre une onde électromagnétique $(\vec{E}(z,t), \vec{B}(z,t))$ plane, progressive, harmonique, de période $T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{\nu}$, se propageant dans le vide selon la direction et le sens de Oz et une particule ponctuelle de charge q et de masse m , animée - sous l'action de la

force de Lorentz et d'autres forces non décrites ici - d'un mouvement périodique de période T dans le plan $z = 0$ par rapport au référentiel galiléen $\mathcal{R} = (O, x, y, z)$. La polarisation de l'onde et le mouvement forcé ne sont pas *a priori* rectilignes. On rappelle que : $\vec{a} \wedge (\vec{b} \wedge \vec{c}) = (\vec{a} \cdot \vec{c})\vec{b} - (\vec{a} \cdot \vec{b})\vec{c}$, pour trois vecteurs \vec{a} , \vec{b} et \vec{c} quelconques.

1. Exprimer, en notation réelle et dans le cas d'une polarisation quelconque, les composantes du champ électrique $\vec{E}(z,t)$. En déduire les composantes du champ magnétique $\vec{B}(z,t)$. Que vaut $\int_{t_0}^{t_0+T} \vec{E}(z,t) dt$ où t_0 est un instant quelconque ?

2. a. Exprimer la force de Lorentz \vec{F} subie par la particule.

Montrer que $\int_{t_0}^{t_0+T} \vec{F} dt = \frac{1}{c} \left(\int_{t_0}^{t_0+T} (q\vec{E}(0,t) \cdot \vec{v}) dt \right) \vec{u}_z$, où t_0 est un instant quelconque.

b. En déduire une relation entre la quantité de mouvement \vec{p}_{cd} et l'énergie \mathcal{E}_{cd} cédées en une période par le champ à la particule.

c. En considérant que la particule absorbe des photons d'énergie $h\nu$, trouver l'expression de la quantité de mouvement des photons.

3. Pour déterminer le moment cinétique selon la direction de propagation des photons on s'intéresse à la projection sur Oz du moment cinétique cédé par l'onde à la particule en une période : $L_{Oz,cd} = \int_{t_0}^{t_0+T} (\vec{OP} \wedge \vec{F}) \cdot \vec{u}_z dt$ où P est toujours la position instantanée de la particule.

a. Montrer que : $L_{Oz,cd} = -q \int_{t_0}^{t_0+T} \vec{OP} \cdot (\vec{u}_z \wedge \vec{E}(0,t)) dt$.

On utilisera la propriété suivante : $(\vec{a} \wedge \vec{b}) \cdot \vec{c} = (\vec{c} \wedge \vec{a}) \cdot \vec{b}$ pour trois vecteurs quelconques \vec{a} , \vec{b} et \vec{c} .

Dans la suite de cette question, on considère le cas où l'onde est polarisée circulairement gauche.

b. Relier dans ce cas $\frac{d\vec{E}(0,t)}{dt}$ à $\vec{u}_z \wedge \vec{E}(0,t)$.

c. Trouver, en intégrant par parties l'intégrale précédente, une relation entre $L_{Oz,cd}$, \mathcal{E}_{cd} et ω .

d. En déduire l'expression du moment cinétique selon Oz des photons associés à cet état de polarisation.

4. Donner, sans nouveau calcul, le moment cinétique selon Oz des photons associés à l'état de polarisation circulaire droit.

Pour moment cinétique.

27.10 Quantité de mouvement et moment cinétique du photon

1. Le champ électrique est transverse donc :

$$\vec{E}(z,t) = E_{0x} \cos(\omega t - kz) \vec{u}_x + E_{0y} \cos(\omega t - kz + \varphi) \vec{u}_y$$

Le champ magnétique se calcule grâce à la relation de structure de l'onde plane dans le vide.

$$\vec{B} = \frac{1}{c} \vec{u}_z \wedge \vec{E} = -\frac{E_{0y}}{c} \cos(\omega t - kz + \varphi) \vec{u}_x + \frac{E_{0x}}{c} \cos(\omega t - kz) \vec{u}_y$$

L'intégrale $\int_{t_0}^{t_0+T} \vec{E}(z,t) dt$ est nulle.

2. a. $\vec{F} = q(\vec{E}(0,t) + \vec{v} \wedge \vec{B}(0,t))$ puisque la particule reste dans le plan $z = 0$. Donc :

$$\begin{aligned} \int_{t_0}^{t_0+T} \vec{F} dt &= \int_{t_0}^{t_0+T} q \vec{v}(t) \wedge \vec{B}(0,t) dt \\ &= \frac{1}{c} \int_{t_0}^{t_0+T} q \vec{v}(t) \wedge (\vec{u}_z \wedge \vec{E}(0,t)) dt \\ &= \frac{1}{c} \int_{t_0}^{t_0+T} (q\vec{E}(0,t) \cdot \vec{v}) \vec{u}_z dt - \frac{1}{c} \int_{t_0}^{t_0+T} (q\vec{v} \cdot \vec{u}_z) \vec{E}(0,t) dt \\ &= \frac{1}{c} \left(\int_{t_0}^{t_0+T} (q\vec{E}(0,t) \cdot \vec{v}) dt \right) \vec{u}_z, \end{aligned}$$

car \vec{v} est contenu dans un plan orthogonal à \vec{u}_z .

b. Le loi de la quantité de mouvement appliquée à la particule dans le référentiel \mathcal{R} s'écrit : $\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}$ donc l'intégrale $\int_{t_0}^{t_0+T} \vec{F} dt$ représente la quantité de mouvement cédée par le

champ à la particule en une période. Or la puissance fournie par le champ à la particule est égale $\mathcal{P}(t) = q \vec{v}(t) \cdot \vec{E}(0,t)$ puisque la force magnétique ne travaille pas. La relation établie à la question précédente est donc équivalente à : $\vec{p}_{cd} = \frac{1}{c} \mathcal{E}_{cd} \vec{u}_z$.

c. $\mathcal{E}_{cd} = Nh\nu$ où N est le nombre de photons absorbés pendant une période et $\vec{p}_{cd} = N\vec{p}_{\text{photon}}$. Également : $\vec{p}_{\text{photon}} = \frac{h\nu}{c} \vec{u}_z$.

d. Calculons tout d'abord $(\vec{OP} \wedge \vec{F}) \cdot \vec{u}_z$:

$$\begin{aligned} (\vec{OP} \wedge \vec{F}) \cdot \vec{u}_z &= (\vec{OP} \wedge \vec{E}) \cdot \vec{u}_z + (\vec{OP} \cdot \vec{B}) \vec{v} \cdot \vec{u}_z - (\vec{OP} \cdot \vec{v}) \vec{B} \cdot \vec{u}_z \\ &= (\vec{OP} \wedge \vec{E}) \cdot \vec{u}_z, \end{aligned}$$

puisque \vec{v} et \vec{B} sont perpendiculaires à Oz . En utilisant la relation donnée dans l'énoncé, on obtient : $L_{Oz,cd} = \int_{t_0}^{t_0+T} (\vec{OP} \wedge \vec{F}) \cdot \vec{u}_z dt = -q \int_{t_0}^{t_0+T} \vec{OP} \cdot (\vec{u}_z \wedge \vec{E}(0,t)) dt$.

b. Le champ électrique d'une onde polarisée circulairement gauche s'écrit :

$$\vec{E}(z,t) = E_0 \cos(\omega t - kz) \vec{u}_x + E_0 \sin(\omega t - kz + \varphi) \vec{u}_y,$$

d'où :

$$\frac{d\vec{E}(0,t)}{dt} = -\omega E_0 \cos(\omega t - kz) \vec{u}_x + \omega E_0 \sin(\omega t - kz + \varphi) \vec{u}_y,$$

ou encore : $\frac{d\vec{E}(0,t)}{dt} = \omega \vec{u}_z \wedge \vec{E}(0,t)$.

Cette relation traduit simplement le fait que \vec{E} tourne dans le sens direct autour de \vec{u}_z à la vitesse angulaire ω .

c. On en déduit :

$$\begin{aligned} L_{Oz,cd} &= -\frac{q}{\omega} \int_{t_0}^{t_0+T} \vec{OP} \cdot \frac{d\vec{E}(0,t)}{dt} dt \\ &= -\frac{q}{\omega} \left[\vec{OP} \cdot \vec{E}(0,t) \right]_{t_0}^{t_0+T} + \frac{q}{\omega} \int_{t_0}^{t_0+T} \vec{E}(0,t) \cdot \vec{v}(t) dt. \end{aligned}$$

Le premier terme est nul, le second égal à $\frac{\mathcal{E}_{cd}}{\omega}$, d'où : $L_{Oz,cd} = \frac{\mathcal{E}_{cd}}{\omega}$.

4. Pendant une période, la particule absorbe N photons donc $\mathcal{E}_{cd} = Nh\nu = Nh\omega$ d'où :

$$L_{Oz,photon,CG} = \hbar.$$

4. Si l'onde est polarisée circulairement droite, la relation entre $\vec{u}_z \wedge \vec{E}(0,t)$ et $\frac{d\vec{E}(0,t)}{dt}$ devient : $\frac{d\vec{E}(0,t)}{dt} = -\omega \vec{u}_z \wedge \vec{E}(0,t)$. Il y a donc un simple changement de signe dans la formule finale et :

$$L_{Oz,photon,CD} = -\hbar.$$

Application : voile solaire.

↳ Transition avec la partie II.

II) Interaction lumière matière.

1) Refroidissement par effet Doppler.

- Intérêts: pouvoir observer des phénomènes quantiques visibles uniquement à basse température (ex: condensats de Bose-Einstein)
- Principe: Pour un gaz d'atomes indépendants à l'équilibre thermique, on a, par thm d'équipartition de l'énergie:

$$\frac{1}{2} m v^2 = \frac{3}{2} k_B T$$

\Rightarrow Ralentir \leftrightarrow Refroidir.

Pour ralentir les atomes, on joue sur l'échange d'impulsion entre photons et atomes.

On considère la situation suivante :



La fréquence ν correspond à un état de transition de l'atome.

On considère le système $\{ \text{Atome} + \text{photon absorbé} \}$;
par conservation de la qdm avant et après l'absorption, on a :

$$m \vec{v}_0 + \hbar \vec{k} = m \vec{v}_{\text{exc}}$$

$$\Rightarrow \text{L'atome excité a la vitesse } \vec{v}_{\text{exc}} = \vec{v}_0 + \frac{\hbar \vec{k}}{m}$$

Puis désexcitation de l'atome :

→ dans le cas d'une émission stimulée, on retrouve l'état initial.

→ dans le cas d'une émission spontanée, le photon émis est de norme $|\hbar k|$ et de direction aléatoire.

La vitesse finale de l'atome est :

$$\vec{v}_f = \vec{v}_0 + \frac{\hbar}{m} \vec{k} - \frac{\hbar}{m} \vec{k}_s$$

Si on répète n fois la même opération :

$$\vec{v}_f = \vec{v}_0 + n \frac{\hbar}{m} \vec{k} - \underbrace{\sum_i \frac{\hbar}{m} \vec{k}_{s,i}}$$

= 0 car la direction de $\vec{k}_{s,i}$ est aléatoire

$$\Rightarrow \vec{v}_f = \vec{v}_0 + n \frac{\hbar}{m} \vec{k}$$

Soit, selon \vec{e}_x :

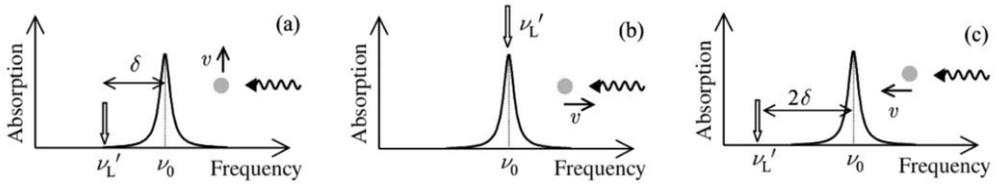
$$v_f = v_0 - n \frac{\hbar k}{m}$$

Problème : si on s'enquète là, on entraîne l'atome dans la direction du laser plutôt que de le freiner.

Solution: → à 1D on utilise 2 lasers en regard (6 lasers en 3D).

Appareils & les 4 autres lasers servant à piéger les atomes et les refroidir.

→ on décale légèrement la fréquence γ des lasers par rapport à la fréquence d'excitation de l'atome. Ainsi, seuls les atomes ayant une certaine vitesse vont interagir avec les photons par effet Doppler.



Limite: on est limité par la largeur de raie d'absorption. (le décalage par effet Doppler ne fonctionne plus).

⇒ $k_B T_{min} \sim h \Delta \nu \sim \frac{h}{\tau}$ Relation $\Delta \nu \sim \frac{v}{c}$

⇒ $T_{min} \sim \frac{h}{k_B \tau}$ ↑ durée de désexcitation

Ordre: pour $\tau \sim 10 \text{ ns}$ on a $T_{min} \sim \frac{10^{-34}}{10^{-23} \times 10^{-8}} \sim 10^{-3} \text{ K}$.

Exemple 11.2 Calculez la plus basse température pouvant être atteinte par refroidissement Doppler lorsqu'on utilise la raie de transition D_2 du sodium qui correspond à une longueur d'onde de 589 nm, et un temps de vie radiatif de 16 ns. Calculez aussi la vitesse moyenne des atomes à cette température.

Solution La température minimale atteinte par refroidissement Doppler est donnée par l'équation 11.37. Avec $\tau = 16 \text{ ns}$, nous obtenons $T_{min} = 240 \mu\text{K}$. À cette température, la vitesse moyenne des atomes est donnée par l'équation 11.38, et le fait que $m = 23m_H$, nous trouvons 0,29 m/s pour la vitesse moyenne correspondante des atomes.

cf [3] p 251.

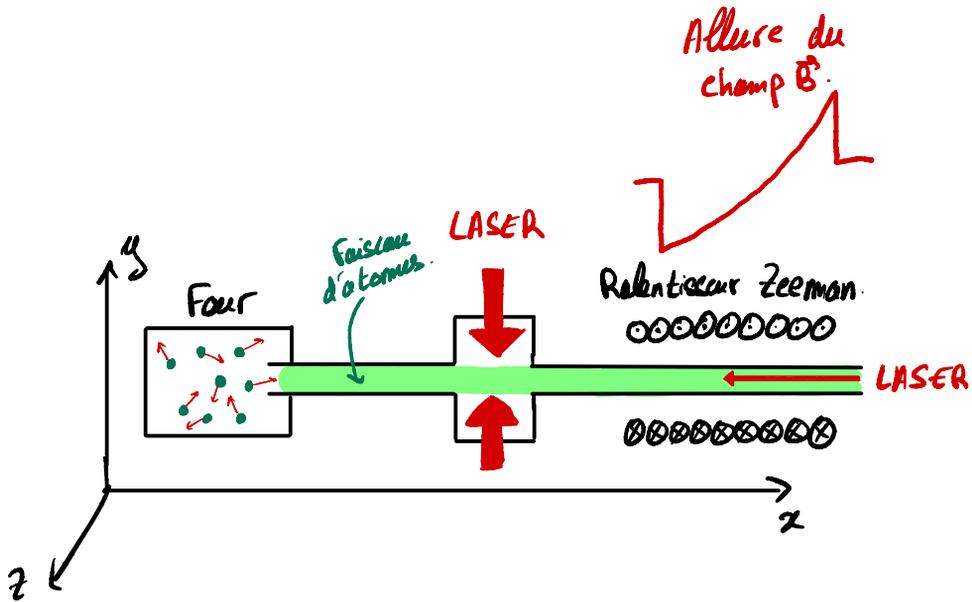
2) Piégeage magnéto-optique.

cf [3] p 252.

△ Le champ magnétique permet, par effet Zeeman, de modifier légèrement l'écart entre niveaux de l'atome et donc de s'accorder avec le laser.

D'où le nom de ralentisseurs Zeeman.

On peut servir sur les horloges atomiques et la définition de la seconde.



CORRECTION : LP38 – ASPECTS CORPUSCULAIRES DU RAYONNEMENT. NOTION DE PHOTON

Correcteurs : Romain Volk & Lucile Sanchez

F. NICOLAS & B. ETCHEVERRY
Note : B

Extraits des commentaires du jury

2016 : Cette leçon ne peut se résumer à une présentation des relations d'Einstein.

2015 : Le jury apprécie des illustrations décrivant des mécanismes récents impliquant des interactions lumière-matière.

2014 : Cette leçon ne devrait pas se limiter à une description d'expériences historiques du début du XXème siècle. Des développements récents, expériences à un photon, décohérence, peuvent être mentionnées. Le transfert de quantité de mouvement est souvent présenté par le biais de l'expérience de Compton, il peut également être illustré à l'aide d'applications modernes de l'interaction atome-rayonnement. Cette leçon peut éventuellement permettre de parler de la notion de superposition d'états. La lumière peut parfois présenter un comportement ni corpusculaire, ni ondulatoire.

Jusqu'en 2007, le titre était : *Le photon : la particule et ses interactions avec la matière.*

2004, 2007 : Cette partie importante de la physique quantique est mal couverte par les manuels usuels. Le photon a une énergie, une quantité de mouvement, mais aussi un moment cinétique. Les illustrations ne se limitent pas à l'effet photo-électrique et à l'effet Compton, et les récents développements de la physique quantique constituent une mine d'illustrations pour cette leçon : ralentissement d'atomes par la lumière, interférences avec des photons uniques, comportement de la lumière sur une lame semi-réfléchissante . . . Des expériences doivent être décrites et modélisées en prenant soin de donner des ordres de grandeur. Les échanges de moment cinétique méritent d'être discutés.

On remarquera que le jury met bien l'accent sur les développements récents de l'Optique Quantique. Il ne faut pas s'arrêter à une succession d'applications "classiques" que l'on réinterprète en terme de photons. De plus, on remarquera que le jury met en avant l'idée d'illustration des propriétés du photon via son interaction avec la matière. En effet, on ne peut pas "démontrer" les caractéristiques du photon dans cette leçon, il s'agit donc de les mettre en avant via des applications.

Remarques générales

Le plan de la leçon proposée était assez classique mais relativement bien exécutée. La leçon a bien été traitée dans le temps imparti et le tableau assez bien tenu (on regrette cependant l'utilisation de couleurs ou d'encadrés pour bien mettre en avant les notions importantes). Les parties écrites sur transparents étaient bien choisies. L'ensemble des questions ont été abordées de manière correcte. Cependant quelques remarques sont à noter :

- **Sur la forme** : 1- On regrette que l'expérience n'ait pas été suffisamment bien expliquée (donner l'utilité de chacun des composants, notamment expliquer le but de la plaque de verre !), il s'agit de la seule expérience faisable dans cette leçon, on attend donc qu'elle soit bien exploitée pour mettre en évidence l'effet photoélectrique. 2- Il serait souhaitable d'utiliser des courbes expérimentales ou théoriques au lieu de faire un schéma à main levée sur un transparent notamment pour l'illustration de la catastrophe ultraviolette. Il est possible de tracer la courbe en utilisant Matplotlib installés sur les ordinateurs des oraux de l'Agrégation. 3- Ne donnez pas les formules d'analyse vectorielle, vous pouvez faire le calcul en le mentionnant mais pas en l'écrivant et en passant du temps dessus...
- **Sur le fond** : Les calculs ne sont pas très clairs dans cette leçon, et surtout où vous souhaitez aller. Attention de ne pas noyer son auditoire avec des gros calculs au tableau, écueil très courant dans les premières leçons d'agreg. Vous devez en effet présenter un calcul pour "montrer" au jury que vous savez le faire, mais ne pas oublier que vous faites une leçon de Physique, mettre bien en avant les notions. Évitez aussi les conclusions du type "On en déduit une quantité de mouvement associée au rayonnement EM, ce qui renforce le caractère corpusculaire de la lumière." surtout après un calcul classique. C'est un peu faire "semblant" de découvrir une propriété que l'on connaît pertinemment. Je pencherais plus sur une présentation opposée : on dit que l'on associe à un corpuscule, le photon, les grandeurs connues, et on les utilise tout en les mettant en avant via les applications, qui peuvent être celles présentées lors de la leçon.

Dans cette leçon, qui met en avant les caractéristiques d'un corpuscule aussi peu "palpable" que le photon, il serait intéressant de présenter des ordres de grandeur pour fixer les idées (valeur de la constante de Planck, l'énergie d'un photon optique,...).

Plan

Le plan présenté est assez classique pour la leçon, avec une grosse partie sur les aspects historiques de la découverte du photon. Il a le mérite de passer en revue chacune des caractéristiques du photon et de présenter une application moderne.

I-Quantification du rayonnement et photon

- A) Rayonnement du corps noir
- B) Effet photoélectrique
- C) Photon séparé

II- Caractéristiques des corpuscules

- A) Quantité de mouvement
- B) Moment cinétique
- C) Masse

III- Application au refroidissement d'atomes

- A) Principe
- B) Refroidissement Doppler

Le plan de cette leçon n'a que très peu bougé depuis des années. Il serait intéressant de plus prendre en compte les remarques du jury et passer plus de temps sur des applications modernes de physique quantique. En effet, les fontaines atomiques permettant de synchroniser les GPS, ou les récents développements de la cryptographie quantique montrent bien l'importance grandissante de cette notion de photon. Cette leçon vous laisse beaucoup de liberté, vous pouvez donc faire preuve d'originalité tout en choisissant des systèmes avec lesquels vous êtes confortables.

Remarques détaillées

Dans l'introduction, vous posez très intelligemment le problème en resituant historiquement la nécessité de la quantification du rayonnement pour comprendre les phénomènes tels que l'effet photoélectrique et la catastrophe UV.

I-Quantification du rayonnement et photon Vous commencez par donner la définition d'un corps noir, ce qui est possible, mais étant donné que dans vos prérequis vous avez le rayonnement thermique, vous pouvez vous permettre d'aller plus vite. Les explications des problèmes de la formule de Rayleigh-Jeans sont bien mis en avant ainsi que l'introduction d'une constante d'aide h , de Planck pour résoudre le problème de la catastrophe UV. Cependant, faites attention aux erreurs d'inattention qui se glissent dans vos calculs, aller vite sur le rayonnement du corps noir ne doit pas se faire au dépend de la clarté ni de la rigueur. De plus, comme mentionné précédemment, il serait judicieux de présenter une courbe effectivement tracée, plutôt qu'un graphe à main levée.

Dans la partie sur l'effet photoélectrique, ne pas oublier d'expliquer à quoi sert le verre ! Pour une expérience telle que celle-ci où il n'y a pas vraiment de montage compliqué, il n'est pas nécessaire de faire un schéma. Cependant, il faut bien marquer au tableau les observations et conclusions de l'expérience. De plus, il serait intéressant de montrer certaines courbes expérimentales historiques. Vous pouvez illustrer l'intérêt de cet effet en expliquant que c'est sur ce principe que fonctionnent les photomultiplicateurs qui servent à détecter les photons uniques (Cagnac, Physique Atomique).

Pour la partie sur le photon séparé, on reste vraiment sur sa faim étant donné que celle-ci n'a duré que 2 min. De plus, cette expérience peut être décrite simplement par l'optique quantique (Faite dans Le Bellac, et dans le Perez).

II- Caractéristiques des corpuscules Cette partie est trop calculatoire, on s'y perd et on ne dégage pas assez les notions importantes. Les applications proposées sont possibles, même si l'ensemble est traité de façon classique. Lorsque vous partez de la vision classique du rayonnement, il ne s'agit que d'une application, vous ne pouvez pas conclure en disant que vous en déduisez des caractéristiques du photon, dites seulement que vous les retrouvez ou que vous les mettez en évidence.

Dans la partie sur le moment cinétique, il n'y a pas beaucoup de contextualisation du problème : une particule dont le mouvement étudié est restreint à l'axe z , qui reçoit une OEM. On parvient après de nombreux calculs qui font perdre le fil de la leçon à tomber sur $\vec{p} = \hbar\nu/c\vec{u}_z$ (exo type prépa fait dans le Sanz PC*). Il est possible de traiter cet exemple, cependant, il faudrait tâcher de trouver un ordre de grandeur pour montrer que la quantité de mouvement est faible, et étoffer le contexte. Pour ma part, je pense qu'il serait plus dans le thème de la leçon de traiter directement la lumière

comme un corpuscule en utilisant ses caractéristiques, par exemple en faisant le calcul de la pression de radiation en modélisant la lumière par une particule qui rebondit comme en cinétique des gaz (fait dans le Sanz quelques pages plus tôt, Cagnac). Vous pouvez aussi faire directement l'application sur la mélasse optique (le Bellac, Dalibard), puisque cette application met en évidence directement le kick du photon que reçoit la particule.

Pour la partie sur le spin du photon, même écueil : trop calculatoire. Dans cette partie, si l'on a fait comme vous précédemment, il n'est pas nécessaire de développer encore une fois des calculs (encore moins classique). Il y a une partie intéressante à lire dans le Cagnac dessus.

Vous faites aussi une partie très petite sur la masse du photon. Je pense qu'il serait bien de récapituler l'ensemble des caractéristiques associées au photon pour être bien clair, avant de passer à la partie "application".

III- Application au refroidissement d'atomes Bonne partie avec des ordres de grandeur (enfin de la Physique!). Dans la première partie dans laquelle vous exposez le principe du transfert de quantité de mouvement, prenez votre temps pour poser le système avec un schéma, dire que vous vous restreignez à une dimension au départ, que vous supposez l'atome "immobile" (ou animé d'une vitesse constante mais que l'ensemble est exprimé dans son référentiel, notamment ω qui n'est pas égal à ω_L du laser. L'application au nombre de cycle est intéressante.

Dans la seconde partie, vous établissez le fonctionnement du refroidissement Doppler, en prenant en compte la vitesse de l'atome, et donnez la géométrie du piège. Il serait intéressant de jouer avec les niveaux Zeeman pour introduire l'importance du spin du photon (et donc la polarisation des faisceaux). Cette discussion est faite notamment dans le Cagnac.

La conclusion s'est faite dans le temps, sur les horloges atomiques. Vous pouvez aussi ouvrir sur la dualité de la lumière avec l'expérience des fentes d'Young faite avec des photons uniques par exemple.

Questions posées

- Sur le piégeage optique : est ce que le refroidissement Doppler présenté permet de piéger les atomes ? (non, cela permet juste de couper une classe de vitesse, pour avoir une dépendance avec la position on ajoute un gradient de champ magnétique.)
- Comment faites-vous en jouant sur la fréquence des lasers MOT pour diminuer la température des atomes ? (Pour "couper" différentes classes de vitesses, il faut modifier la fréquence des lasers partir d'un grand désaccord "red-detuning" pour se rapprocher de la fréquence ω_0 de la transition, ceci s'appelle une "mélasse dynamique")
- Expliquez l'expérience : que se passe-t-il lorsque l'intensité lumineuse augmente ?
- Est-ce-que la fréquence seuil et les formules de l'effet photoélectrique ne s'explique que par le photon ? (Non, on peut ne prendre en compte que la quantification de la matière et écrire cette fréquence seuil comme une "résonance" classique. Cependant, l'ensemble du phénomène en prenant en compte la conservation de l'énergie ne peut être expliqué que en quantifiant le champ. Voir discussion sur : <https://physics.stackexchange.com/questions/68147/can-the-photoelectric-effect-be-explained-without-photons>)
- Expliquez l'effet Compton.
- Un photon unique est-il monochromatique ? (Il y a plusieurs façons de parler de photons : si on parle d'un état cohérent, un paquet d'onde, avec une extension temporelle et donc fréquentielle finie, on a donc une fréquence moyenne, et en fait un nombre de particules moyen, par contre si on parle d'un état de Fock (donc un mode du champ électromagnétique, on a $\hbar\omega$ fixé, mais du fait de l'incertitude de Heisenberg, la mesure d'un ensemble de photons préparés dans le même mode, exhibe une largeur de bande non nulle. Si on voit s'intéresse à la mesure d'un seul photon, on va avoir un seul pic à une fréquence donnée, mais l'incertitude sera cette fois contenue dans le fait que lorsque le photon est préparé, le mode dans lequel il est n'est pas défini et celui-ci "collapse" dans un mode particulier ω du champ électromagnétique.)
- Comment mesure-t-on la densité d'énergie EM ?

Conseils

- Sur le site de l'Agreg, et dans les rapports, le jury déplore la non-utilisation de Python pour illustrer les leçons. Dans cette leçon, vous avez que très peu d'illustrations expérimentales, il serait donc souhaitable d'utiliser l'outil informatique. Vous pouvez donc utiliser Matplotlib pour tracer des courbes dont vous avez la formule littérale ou alors utiliser un code pour faire une petite simulation (par exemple des franges d'interférences dans l'expérience des trous d'Young, pour simuler la dualité onde-corpuscule, avec cette expérience en photons uniques, le code déjà

rédigé est à votre disposition aux oraux : <https://www.ac-paris.fr/portail/upload/docs/application/pdf/2013-11/interferencephotonunique.pdf>)

- Au lieu de "déduire" les caractéristiques du photon par des calculs de classique, on peut aussi, une fois que l'on connaît l'énergie $h\nu$, déduire les autres par simple manipulation des dimensions, et présenter les caractéristiques du photon avant de "jouer" avec lors d'applications.
- Pour ce qui est du plan, il est très classique et n'a pas bougé depuis des années, il serait intéressant de faire quelque chose de nouveau. Je proposerai plus un plan du type :

I - l'émergence de la notion de photon :

- 1) une nécessité historique (catastrophe UV et effet photoélectrique + expérience, aller rapidement au but sans s'attarder sur le corps noir mis en prérequis, on met en évidence la notion de quanta d'énergie de lumière)
- 2) l'insécabilité du corpuscule (ici, faire l'expérience au tableau de la lame séparatrice et faire un calcul quantique comme dans le Bellac ou le Perez, vous pouvez passer un peu de temps dessus, on met en évidence le côté "particulaire")
- 3) les caractéristiques du photon (ici vous pouvez "balancer" les grandeurs associées, ou les "déduire" avec les dimensions, vous pouvez illustrer avec l'expérience de Compton, ou donner des ordres de grandeurs des quantités infimes que transporte un photon)

tr : maintenant qu'on a défini le photon, on peut "jouer" avec.

II - Interaction lumière - matière : (on peut mettre d'autres applications, je trouve que les atomes froids peuvent être un exemple intéressants à filer dans toute cette partie)

- 1) Refroidissement Doppler (ici on utilise le transfert de quantité de mouvement, comme fait dans la leçon)
- 2) Piège Magnéto Optique (ici on met un champ magnétique et on utilise le spin du photon pour pouvoir faire des absorptions sélectives en position, fait dans le Cagnac)

III-l'avènement de l'optique quantique : pas sûr d'avoir le temps ici, donc on peut juste parler des expériences en conclusion. Comme l'interférence à deux photons, dans le Bellac, la cryptographie quantique, le photon comme vecteur de l'information...

Bien entendu, l'ensemble des commentaires et des conseils donnés dans cette correction, ne sont que des idées et des suggestions (les correcteurs peuvent aussi avoir tort). Nous restons à votre dispositions par mail si vous avez des remarques ou des questions plus générales à propos des corrections.

LP38 - ASPECT CORPUSCULAIRE DE LA LUMIÈRE, NOTION DE PHOTON

Année : 2020-2021

Passage : Rémi Guillot

Correcteurs : Antoine Essig et Léo Mangeolle

Commentaire général

Le plan de Rémi était habituel et cohérent, mais on peut regretter une partie centrale sur le photon trop courte, et à l'inverse une partie d'application trop longue. Il faut bien centrer cette leçon sur le concept de photon et rappeler, aussi souvent que possible, en quoi le fait qu'on soit en train de parler de quanta d'énergie (et pas juste d'une onde classique) est important dans la discussion. Dans la suite, on reprend le plan en 3 parties et on discute de quelques questions qu'il faut se poser en préparant la leçon.

Commentaires spécifiques

I) Mise en évidence du photon

La seule expérience qui permette vraiment de mettre en évidence de façon indiscutable les photons, c'est l'expérience avec une source de photons uniques ; pour autant, un "faisceau d'indices concordants" c'est aussi très bien - il faut juste savoir les limites de ce qu'on présente. Par exemple, comme mentionné dans un précédent corrigé, l'effet photoélectrique ne permet pas totalement d'exclure que la lumière soit classique, pourvu qu'elle puisse résonner avec une matière traitée quantiquement. Mais bon, en faisant l'hypothèse que la lumière est constituée de photons, on explique quand même une expérience d'une grande richesse et on peut même (cf Aslangul) aller assez loin dans la caractérisation du photon. Il faut faire des choix mais c'est vrai que l'effet photoélectrique est quand même un bel exemple introductif qui a le mérite d'être facilement illustrable par une expérience en direct (si le virus le permet).

Si l'on choisit de parler de la catastrophe ultraviolette, il faut faire vraiment attention quand on présente la loi de Planck. Je ne saurais trop vous recommander la lecture de ce chef-d'oeuvre mésestimé qu'est la correction de la LP17 2019-2020 ; mais j'insiste ici aussi sur l'importance de bien séparer le corps noir du rayonnement d'équilibre thermique. Ici ce qui nous intéresse c'est le rayonnement lui-même et sa densité volumique d'énergie $u(\nu, T)$: ceux-ci sont définis partout,

tout le temps, même dans le vide intersidéral, et ne dépendent absolument pas de l'existence ou non d'éventuels corps noir, gris, ou roses à quelque endroit dans l'Univers. Il est donc très imprudent de passer du temps à définir le corps noir et à s'embourber dans une description de la paroi du corps noir à l'aide d'oscillateurs harmoniques, alors que ce n'est absolument pas le sujet (et d'ailleurs ce n'est pas là qu'on a besoin d'OH). La seule chose dont on a besoin, c'est du fait que la densité d'énergie électromagnétique dans l'espace est donnée par $H = \epsilon_0 E^2/2 + B^2/2\mu_0$ qui montre que le CEM n'est autre qu'un oscillateur harmonique à deux dimensions (on pourrait croire qu'il y en a trois mais il faut faire attention à la fixation de jauge) en tout point de l'espace. Au fait, si on veut discuter Rayleigh-Jeans il faut faire attention au décompte des ddl pour l'équipartition. Dans tous les cas, ce dont on a besoin, c'est d'un CEM à l'équilibre thermique - et c'est tout : le mécanisme par lequel il thermalise en interagissant avec les parois d'un corps noir etc c'est à réserver à la LP17, si on y tient vraiment.

En revanche, il nous semble très important de mettre très clairement en avant la chose la plus importante : le passage d'une intégrale à une somme discrète pour résoudre le problème de divergence. C'est LA chose qui justifie de passer du temps sur le rayonnement d'équilibre thermique (et non pas sur le corps noir, j'insiste!) dans une LP sur le photon. On peut faire le calcul de la fonction de partition éventuellement, et du coup conclure que si photons il y a, ce sont des bosons de potentiel chimique nul. D'ailleurs il ne peut pas y avoir de condensation de Bose-Einstein des photons pour cette raison (il faut, schématiquement, que l'énergie des bosons condensés soit inférieure au potentiel chimique, ce qui est impossible ici).

Il peut être intéressant de ponctuer cette partie (ou l'intro) avec des jalons historiques, par exemple Newton, Fresnel, Planck - et quelques dates qui vont avec. Ce n'est pas une leçon d'histoire des sciences, donc il ne faut pas y consacrer plus de quelques secondes, mais quelques détails par-ci par-là pour contextualiser ça ne peut qu'égayer la leçon.

II) Caractéristiques propres du photon

Cette partie est classique et un peu austère mais on n'a pas trop le choix, et il vaut mieux éviter de tenter des remarques comme "le photon est le boson d'interaction de l'électromagnétisme" qui risquent de débrider l'imagination fertile d'un jury espigle en manque de sensations fortes.¹

Concernant le moment cinétique, plutôt que de faire le calcul très fastidieux du Garing, on peut envisager de présenter rapidement l'expérience de Beth (cf Cagnac) et juste donner le résultat. Note : le photon a un spin 1 mais sa projection sur l'axe de quantification ne peut valoir que ± 1 , la valeur zéro est interdite par le fait que le photon a une masse nulle (pour de sombres raisons d'invariance de jauge brisée par le terme de masse qu'il serait saugrenu de mentionner). D'ailleurs, fait amusant, si on mesure la constante de Stefan on peut du coup montrer qu'il n'y a que 2 ddl et pas 3 dans le champ électromagnétique, et donc, sachant que le photon est de spin 1 (ou même simplement en sachant que c'est un boson) montrer qu'il est de masse nulle. Si on sait qu'il n'y a que deux polarisations, droite et gauche, ça marche aussi.

Il faudrait peut-être mentionner que ces caractéristiques sont des caractéristiques intrinsèques d'un photon, d'extension spatiale et temporelle infinie et n'interagissant avec rien. Sinon, si le photon a un temps de vie fini et vit dans une région confinée de l'espace, son énergie n'est pas exactement fixée, non plus que son impulsion (cf Heisenberg) - il y a un certain étalement. De même, la vitesse d'un photon n'est égale à c que dans le vide absolu - sinon, il y a un indice optique n à prendre en compte.

Tiens d'ailleurs, en général $n(\omega)$: donc un photon un peu étalé en fréquence voit une palette d'indices optiques différents, donc toutes ses composantes ne voyagent pas à la même vitesse, et donc le photon finit écartelé (je n'ai pas la réponse à cette question) ? Au passage, dans un milieu, un photon n'a même pas toujours une masse nulle ! Rappel : quand $\hbar = c = 1$, une masse c'est l'inverse d'une longueur. Un photon massif décrit une interaction de Coulomb écrantée ; c'est le cas dans un supraconducteur (effet Meissner) ou dans un

électrolyte ou un plasma (écrantage de Debye). D'ailleurs (cf la LP sur les OEM dans les conducteurs) l'onde électromagnétique dans un plasma est décrite par l'équation de Klein-Gordon, qui est comme d'Alembert mais avec un terme de masse, justement (et qui est en fait la version relativiste de Schrödinger pour les bosons massifs - le monde est petit). Tout ça est évidemment formellement contre-indiqué à une utilisation à l'oral devant le jury, mais toujours bon à savoir pour éviter de dire des bêtises quand on pourrait ne rien dire, justement !

III) Application au refroidissement d'atomes

Il ne faut pas perdre de vue que c'est une leçon sur le photon, pas sur la pression de radiation (laquelle se comprend très bien classiquement). Donc aussi souvent que possible, rappelez pourquoi ce que vous écrivez découle directement d'une description corpusculaire (et, si jamais l'occasion se présente, pourquoi avec des ondes classiques ça ne marcherait pas... ?). Et aussi, quand on utilise l'équipartition, etc, rappeler qui est classique, qui est quantique, qui est à l'équilibre thermique, etc.

Un autre plan possible, éventuellement (et selon les goûts) serait de faire une partie I sur les "vieilles preuves historiques" (avec l'effet photo-électrique et/ou le corps noir) et une partie III sur les applications récentes, où on mettrait les expériences à photon unique et/ou le refroidissement d'atomes. Tout cela doit tenir en 40 minutes donc bien sûr il va vous falloir faire des choix et traiter les choses de manière à la fois claire et (très) concise, mais n'oubliez pas qu'avec ce format de 40 minutes le jury tolère qu'on fasse moins de choses "en vrai" et plus de choses pendant l'entretien. Après c'est toujours une prise de risque.

Concernant justement la nécessité de ne pas tout dire et de garder des choses sous le coude pour l'entretien : il semble préférable de résister à la tentation de faire de gros appels du pied au jury du genre "là je n'insiste pas mais on pourra y revenir *wink* *wink*". Le problème, c'est que si le jury répond à votre appel et que vous répondez bien, le jury se dira juste "bah oui normal vu l'appel du pied monumental", et si vous n'assurez pas ce sera la catastrophe. Alors que si vous ne dites rien pendant la leçon, le jury pourra se

1. On pourrait par exemple évoquer le lien entre l'écrantage de Debye dans un électrolyte et le boson de Higgs. Le jury (surtout en fin de matinée lorsque son estomac sera tenaillé par la faim) ne se privera pas de se jeter sauvagement sur la moindre affirmation un peu légère que vous laisserez traîner derrière vous !

dire "tiens ce serait intéressant de creuser", il y reviendra pendant l'entretien, et là si vous n'assurez pas le jury se dira "bon, c'est parce que je l'ai pris(e) au dépourvu", et si vous assurez ce sera tout bénéf. Dans le pire des cas le jury n'y reviendra pas et vous aurez préparé un transparent pour rien, mais bon, vous savez déjà que 98% des LP que vous préparez ne vous resserviront pas le jour de l'oral donc c'est peut-être pas bien grave. ;)

Questions posées

- Pourquoi les phénomènes quantiques s'observent généralement à basse température? *C'est lorsque la longueur d'onde thermique de de Broglie, $\lambda_{dB} \sim \frac{h}{\sqrt{mk_B T}}$, devient grande.*

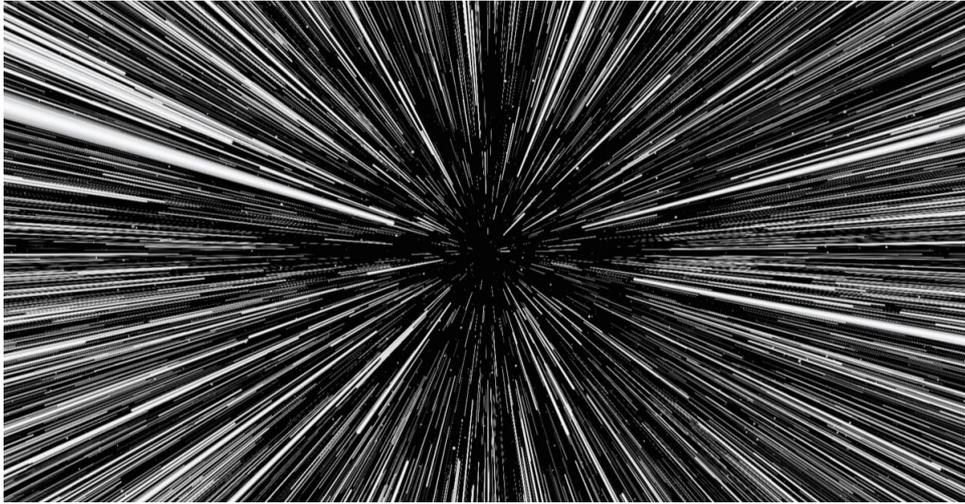


FIGURE 1 – Le Photon Millennium (*in* Scar Wars, l'épopée)

LP38 : Aspects corpusculaires du rayonnement. Notion de photon.

Présentée le 9/12/2016 par Clément Gouiller

Correction : Jacques Marteau
Antonin Louvet

Remarques dans la chronologie de la présentation

I : De la quantification à la notion de photon

La première partie de cette leçon était consacrée à l'introduction du concept de photon d'un point de vue historique en s'appuyant sur les contributions de Planck sur le rayonnement du corps noir et d'Einstein sur l'effet photoélectrique. Dans cette logique, nous pensons que, lors de la description de la contribution de Planck, il faut faire précéder les observations expérimentales aux différentes prédictions théorique et proposer une visualisation graphique de l'accord des différentes prédictions par rapport aux observations. Par ailleurs, l'entretien qui a suivi la présentation a permis de soulever quelques incompréhensions dans cette partie. Nous rappelons par exemple que l'énergie dans une cavité modélisant un corps noir n'est pas associée au comportement des parois mais au volume ainsi délimité (de manière classique, l'énergie est associée au champ électromagnétique dans la cavité). Enfin, une alternative possible permettant d'introduire le concept du photon serait de présenter les résultats d'une expérience d'interférence de type fentes d'Young à photons uniques en « passant le film à l'envers », partant d'une figure d'interférence connue pour voir apparaître le comportement corpusculaire de la lumière.

II : Caractéristiques du photon

2.1 et 2.2

La seconde partie de cette leçon avait pour but de « déterminer » les caractéristiques du photons. La masse et la quantité de mouvement ont été obtenues à l'aide de relations relativistes. Il semble important, si l'on veut faire ce choix, de placer dans les prérequis de cette leçon la relativité restreinte. En effet, le choix retenu qui a consisté à demander d'admettre ces relations relativistes pour déterminer les caractéristiques du photon ne nous paraît pas pertinent. Par ailleurs, il serait peut être préférable de mentionner que cette partie à pour but de déterminer les caractéristiques du photon afin que la description par le photon permette non seulement de rendre compte de l'effet photoélectrique et du rayonnement du corps noir (et autres observations plus récentes), mais aussi de retrouver les prédictions obtenues par l'électromagnétisme dans les situations à grand nombre de photons. On privilégierait alors une obtention de la quantité de mouvement en faisant le lien avec celle d'une onde électromagnétique.

2.3

Enfin, une détermination du moment cinétique du photon a été tenté en lien avec le modèle classique de l'électron élastiquement lié et soumis à une onde électromagnétique. Le

calcul complet est long, ce qui a poussé Clément à aller vite et plusieurs erreurs ont été commises. À l'issue de 15 minutes d'efforts et en « bidouillant » le résultat final, aucun commentaire n'a été proposé sur la valeur permise pour le moment cinétique du photon. Si ce calcul doit être conservé, il devra être repensé. Par exemple en donnant la relation entre le vecteur position complexe, fonction du champ électrique extérieur puisque relevant d'un modèle déjà étudié par ailleurs. Le temps gagné permettrait alors de terminer plus sereinement le calcul et de discuter du résultat obtenu.

III : Application au refroidissement d'atomes

Dans cette partie, une explication du principe du refroidissement d'atome par LASER a été proposée ainsi qu'une justification de l'utilité d'un tel refroidissement. À plusieurs reprises, des calculs d'ordres de grandeurs ont accompagnés le raisonnement, ce qui a été beaucoup apprécié. Il est malgré tout regrettable d'avoir fait le choix de ne pas parler du mécanisme de refroidissement à l'aide de l'effet Doppler. En effet, on ne peut pas alors comprendre l'efficacité du refroidissement lorsqu'on superpose plusieurs faisceaux LASER de sens de propagation opposés.

Pour en savoir plus sur le refroidissement Doppler, d'autres mécanismes de refroidissement et le piégeage magnéto-optique nous vous conseillons la lecture de l'article de La Recherche 261 de janvier 1994.

Quelques questions posées lors de l'entretien

- Qu'est-ce qu'un corps noir ?
- Qu'est-ce que la densité spectrale d'énergie ? Quelle est son unité ?
- Lors de l'expérience illustrant l'effet photoélectrique, est-ce que la fréquence seuil est modifiée si on charge positivement ou négativement la plaque avant de l'éclairer ?
- Connaissez-vous des applications pratiques à l'effet photoélectrique ?

Questions non posées lors de l'entretien

- Jusqu'à quelle température peut-on refroidir un atome à l'aide du dispositif à 6 LASER décrit ? Comment aller au delà ? Cette technique permet-elle de piéger les atomes ?