

LP38 ASPECTS CORPUSCULAIRES DU RAYONNEMENT. NOTION DE PHOTON

12 juin 2020

MONNET Benjamin &

Niveau : L3

Commentaires du jury

- **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.
- **2014** : Au cours des questions, le jury a été surpris de constater que la notion de spin associée à un photon n'est pas toujours maîtrisée.
- **2009,2010** : Les expériences réalisées à l'aide d'une cellule photoélectrique sont souvent mal comprises ou interprétées abusivement. Les candidats cernent souvent mal pourquoi la notion de photon s'est dégagée de l'effet photoélectrique et du corps noir.
- **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 . . .
- **2004** : 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.

Bibliographie

- ✦ *Quantique, fondement et applications*, Pérez, Carles et Pujol¹ → Parfait pour cette leçon
- ✦ *Ondes EM*, Garing → des exemples intéressants
- ✦ *Epreuve agregation externe 2018* → une bonne et simple description de l'expérience de Beth !

Prérequis

- Calcul de densité de modes
- Electrostatique
- Ondes électromagnétiques et polarisation
- Base de relativité restreinte
- Principe fondamental de la dynamique
- Régime sinusoïdal forcé

Expériences



Table des matières

1 La quantification de l'énergie : un artifice de calcul ?	3
1.1 La catastrophe ultraviolette et le rayonnement du corps noir	3
1.2 Démonstration de la quantification : l'effet photoélectrique	3

2	Les caractéristiques du photon et applications directes	4
2.1	Quantité de mouvement du photon	4
2.2	La quantité de mouvement des photons et l'effet Compton	4
2.3	Pression de radiation	5
3	Le moment cinétique du photon	6
3.1	Résultat théorique	6
3.2	Expérience de Beth	7

Introduction

1 La quantification de l'énergie : un artifice de calcul ?

1.1 La catastrophe ultraviolette et le rayonnement du corps noir

Le but ici est de comprendre les courbes expérimentales du rayonnement thermique d'un corps condensé. On considère pour cela une boîte de volume $V = L^3$ (cube de longueur L) et on va essayer de déterminer l'énergie de rayonnement de ce cube.

Si on considère une onde électromagnétique piégée dans ce cube, on obtient par la physique ondulatoire que le vecteur d'onde \vec{k} est quantifié et vaut :

$$|\vec{k}|^2 = \frac{\pi}{8L^3}(n^2 + m^2 + l^2) \text{ avec } n, m \text{ et } l \text{ des entiers}$$

On peut alors montrer que la densité volumique de mode à une fréquence ν donnée vaut :

$$g(\nu) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3}$$

Si on utilise ensuite le théorème de l'équipartition de l'énergie on trouve en notant $u(\nu)$ l'énergie de la fréquence ν :

$$\frac{u(\nu)}{g(\nu)} = k_B T$$

D'où finalement :

$$u(\nu) = 8\pi \frac{\nu^2}{c^3} k_B T$$

On remarque alors tout de suite un problème : en intégrant sur les fréquences, on trouve que l'énergie diverge. C'est ce que l'on appelle la catastrophe ultraviolette. Bien évidemment, cette courbe ne colle pas aux données expérimentales.

En 1900, Planck proposa une idée révolutionnaire : les énergies disponibles sont quantifiées et valent $E = h\nu$ où h fut appelée constante de Planck. Ainsi, l'énergie moyenne de la fréquence ν vaut :

$$\langle E \rangle = \frac{\sigma h\nu e^{-\beta h\nu}}{\sigma e^{-\beta h\nu}} = \frac{h\nu}{e^{\beta h\nu} - 1}$$

Ainsi, l'énergie du mode ν vaut donc :

$$u(\nu) = 8\pi \frac{\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{\beta h\nu} - 1}$$

Cette fois l'expression proposée est intégrable et colle avec les données expérimentales. De plus, on retrouve l'expression de Rayleigh-Jeans pour les basses fréquences.

1.2 Démonstration de la quantification : l'effet photoélectrique

Alors que l'idée de Planck ne plaisait pas à grand monde, Einstein proposa en 1905 un moyen de mettre en avant la quantification de l'énergie par Planck en interprétant l'effet photoélectrique (observé par Phillip Lenard), ce qui lui valu le prox Nobel de physique de 1922.

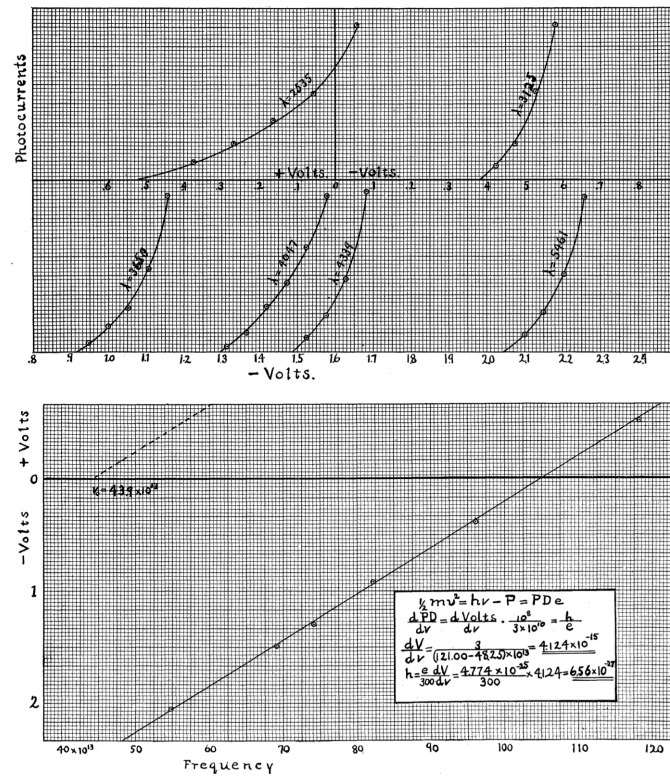
Le cadre est le suivant : on forme un circuit électrique dans lequel on met un métal qui est éclairé. Afin qu'il y ait du courant qui passe, il faut arracher des électrons au métal. Pour ce faire, il faut que l'énergie du rayonnement soit telle que l'électron puisse l'absorber : il faut donc qu'il puisse vaincre le gap du métal. Mathématiquement, on peut écrire :

$$h\nu = W_S + \frac{1}{2}mv^2 \Leftrightarrow h(\nu - \nu_0) = \frac{1}{2}mv^2$$

Le courant i peut directement être relié à la vitesse des électrons. Grâce à cela, Milikan réalisa en 1916 l'expérience décrite par Einstein et obtint une première valeur pour la constante de Planck.

On peut lire dans son papier qu'il trouve alors une valeur de $4,124 \cdot 10^{-15} \text{ JsC}^{-1}$ pour le rapport $\frac{h}{e}$, ce qui correspond à une valeur de h de $h = 6,598 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$. Il démontra ainsi que l'interprétation de l'effet photoélectrique par Einstein était juste et que donc la quantification de l'énergie était une réalité.

Milikan a aussi pu déterminer les valeurs des gaps d'énergie W_S pour certains métaux.



2 Les caractéristiques du photon et applications directes

2.1 Quantité de mouvement du photon

Le photon était responsable du transport de l'énergie électromagnétique, il va donc à la vitesse de la lumière, donc à la vitesse la plus grande permise par la relativité d'Einstein. On va partir de ce constat pour essayer de comprendre les caractéristiques d'un photon.

On rappelle qu'en relativité restreinte, l'énergie d'une particule de masse m s'écrit :

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Ainsi, on voit que pour qu'une particule aille à $v = c$, il faut une énergie infinie... à moins que celle-ci ait une masse nulle! On considèrera alors que la masse du photon est nulle.

Remarque : il existe des expériences qui ont pour but de démontrer que les photon à une masse nulle (ou tout du moins non mesurable)

Toujours en utilisant la relativité, on peut exprimer l'énergie du photon sous la forme :

$$E^2 = \vec{p}^2 c^2 + m^2 c^4 = \vec{p}^2 c^2$$

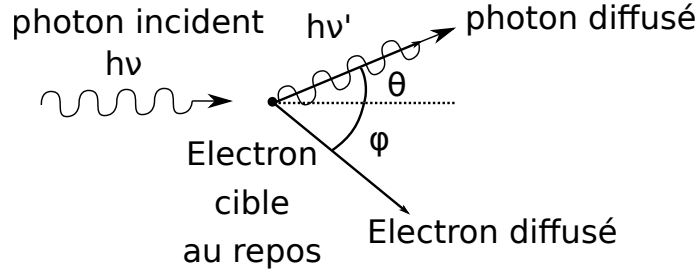
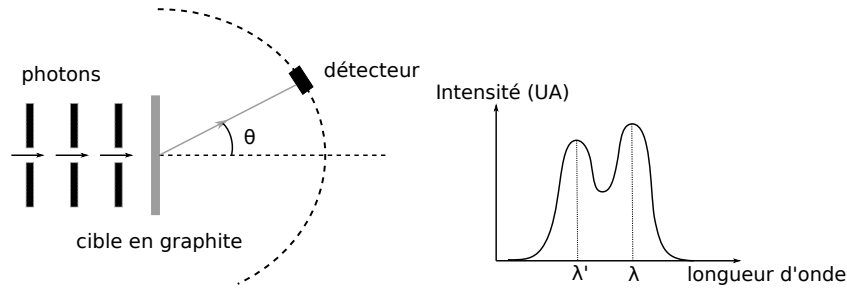
En utilisant ensuite la formule de Planck, on a : $p = \frac{h}{\lambda}$. Donc si on utilise des notations d'électromagnétisme : $\vec{p} = \hbar \vec{k}$.

2.2 La quantité de mouvement des photons et l'effet Compton

➤ PCP p51-52

En 1923, Arthur Compton réalise l'expérience suivante : il envoie des photons sur une cible de graphite. Avec un détecteur placé derrière la cible en graphite avec un angle donné, il regardait le spectre qu'il obtenait. Il remarqua alors étonnement qu'il y avait deux pics principaux.

Afin d'interpréter le résultat, il faut écrire la conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement du système électron + photon qui est considéré isolé :



$$e_\gamma + E_e = e'_\gamma + E'_e \text{ et } \vec{p}_\gamma = \vec{p}'_\gamma + \vec{p}'_e$$

On remplace ces expressions dans $E'_e = p'^2_e c^2 + m_e^2 c^4$ ce qui donne :

$$(e_\gamma - e'_\gamma)^2 + 2m_e c^2 (e_\gamma - e'_\gamma) - p_\gamma^2 c^2 - p'^2_\gamma + 2p_\gamma p'_\gamma \cos \theta = 0$$

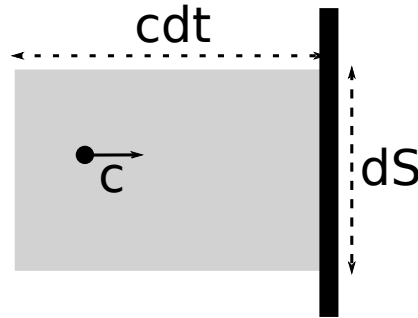
Autrement dit, avec $e_\gamma = p_\gamma c$:

$$2m_e c^2 (e_\gamma - e'_\gamma) = 2e_\gamma e'_\gamma (1 - \cos \theta) \Leftrightarrow \lambda' - \lambda = \lambda_C (1 - \cos \theta) \text{ avec } \lambda_C = \frac{h}{m_e c}$$

Cela explique donc l'observation des deux pics pour une angle θ donné.

2.3 Pression de radiation

➤ PCP



Imaginons maintenant ce qu'il se passerait si un photon cognait contre une paroi. On aurait alors une transmission d'impulsion. On s'attend donc à ce que la paroi soit poussée par les photons. Quantitativement la variation de quantité de mouvement d'un photon arrivant perpendiculairement à la paroi de surface dS vaut :

$$\Delta \vec{p} = 2p_\gamma = -2 \frac{h\nu}{c} \vec{e}_x$$

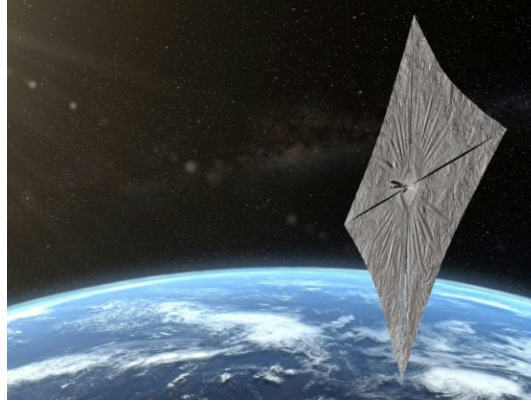
En introduisant \bar{n}_ν la densité de photon à la fréquence ν , on obtient que la variation de quantité de mouvement du mur vaut :

$$dp_m^\vec{p} = 2 \frac{h\nu}{c} \bar{n}_\nu c dt \times dS \vec{e}_x \Leftrightarrow P_r = 2\bar{n}_\nu h\nu$$

où P_r est la pression de radiation. Essayons maintenant d'en donner un ordre de grandeur. Considérons par exemple un laser de puissance $\Phi = 1mW$ (puissance maximale pour la classe 2) de longueur d'onde $\lambda = 632.8nm$ (laser He-Ne) sur une surface de $1mm^2$. On trouve alors un ordre de grandeur de \bar{n}_ν :

$$\bar{n}_\nu = \frac{\Phi}{h\nu Sc} \quad \text{car} \quad \Phi = \frac{\bar{n}_\nu h\nu Sc dt}{dt}$$

On trouve $\bar{n}_\nu \approx 1.10^9 m^{-3}$ et donc une pression de radiation qui vaut $P_r = 6,7.10^{-6} Pa$ donc une force de $F_r = 6,7.10^{-12} N$. Il s'agit ici de forces très faible alors que l'on considère un faisceau particulièrement focalisé! Cela explique pourquoi on ne l'observe pas spécialement dans la vie de tous les jours. Néanmoins, cette pression de radiation est utilisé dans l'espace pour faire bouger les satellites à l'aide de voiles solaires.



Remarque : pour des raisons de temps cette partie s'arrête là. Néanmoins, il faut garder en tête qu'une grande application de ce que l'on vient de voir est le refroidissement des atomes.

3 Le moment cinétique du photon

3.1 Résultat théorique

✦ Garing p256

On considère une onde polarisée circulaire gauche de la forme :

$$\vec{E} = E_0 e^{i(kz - \omega t)} (\vec{u}_x + i\vec{u}_y)$$

On considère par la suite un électron élastiquement lié à un noyau et subissant une force de frottement fluide plongé dans le champ électrique que l'on vient de poser. Le principe fondamental de la dynamique donne :

$$m\ddot{\vec{r}} = -m\omega_0^2 \vec{r} - m\frac{\dot{\vec{r}}}{\tau} - e\vec{E}$$

Soit, en régime sinusoïdale forcé :

$$\vec{r} = \frac{\frac{e}{m}}{\omega^2 - \omega_0^2 + i\frac{\omega}{\tau}} \vec{E} = \alpha \vec{E}$$

La puissance moyenne reçue vaut :

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

Le moment moyen exercé par la force électromagnétique vaut :

$$\langle \vec{M} \rangle = -\frac{e}{2} \text{Re}(\vec{r} \wedge \vec{E}^*) = -\frac{e}{2} \text{Re}(\alpha E_0^2 (-2i\vec{u}_z)) = -eE_0^2 \text{Im}(\alpha) \vec{u}_z$$

On remarque alors que l'on a :

$$\frac{\langle \vec{M} \rangle}{\langle P \rangle} = \frac{\vec{u}_z}{\omega}$$

Finalement, pour obtenir le résultat qui nous intéresse, on utilise le fait que un photo d'énergie $\hbar\omega$ et de moment cinétique $\vec{\sigma}$ est absorbé sur un temps caractéristique que l'on notera τ et donc $\langle \vec{M} \rangle = \frac{\vec{\sigma}}{\tau}$ et $\langle P \rangle = \frac{\hbar\omega}{\tau}$. Avec ce résultat et le précédent, on trouve :

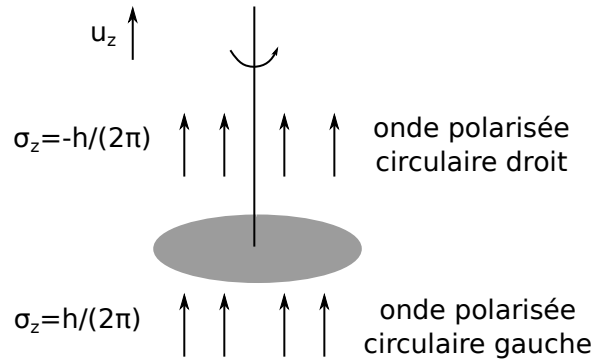
$$\vec{\sigma} = \hbar\vec{u}_z$$

On trouve, dans le cas d'une polarisation circulaire droite $\vec{\sigma} = -\hbar\vec{u}_z$ et dans le cas d'une polarisation rectiligne $\vec{\sigma} = 0$. On en déduit ainsi que le photon est une particule de spin 1.

3.2 Expérience de Beth

☞ Epreuve agregation externe 2018

Nous nous sommes intéressés plus tôt au transfert de quantité de mouvement du photon. Nous allons donc ici nous intéresser au transfert de quantité moment cinétique. Une expérience pour mesurer le moment cinétique du spin a été proposé par Beth et son équipe en 1930. L'expérience est la suivante : une lame demi-onde est accrochée à un fil de torsion et on envoie par dessous une onde polarisée circulaire gauche. Elle ressort donc polarisée circulaire droite. Ainsi, les photons ont subi une variation de moment cinétique égale à $\Delta\vec{\sigma} = -2\hbar\vec{u}_Z$ en traversant la lame semi-réfléchissante. Cette dernière subit donc une variation de moment cinétique de $2\hbar\vec{u}_Z$ par photon. Beth a ainsi réussi à mesurer une faible déviation d'angle, ce qui a permis de confirmer le spin du photon.



Questions

- Les particules qui absorbent la lumière la réémettent vite, alors pourquoi on voit pas quand même tout le spectre ? *C'est réémis de manière isotrope donc on perd beaucoup en intensité lumineuse*
- C'est quoi la loi de déplacement de Stokes ? *Maximum pour l'émission et l'absorption n'est pas la même !*
- Les désexcitations spontanées viennent d'un couplage avec les fluctuations du vide

Pouvez-vous réexpliquer pourquoi le courant de saturation de dépend que de l'intensité lumineuse ? A quoi correspond le travail d'extraction ?

Comment créer une source à photon unique ? Quelle expérience pour savoir si une source est une source à photon unique ?

Pourquoi est ce important que le moment cinétique du photon ne peut prendre que deux valeurs ?

Vous avez dit que c'était les polarisations circulaires droite et gauche, est ce que ça peut être des elliptiques ?

Application de l'effet photoélectrique ?

Expérience faisant intervenir l'aspect corpusculaire du photon ?

Expérience ne pouvant pas être expliquée par la dualité onde-corpuscule ?

Comment expliquer la formule de la pression de radiation avec l'aspect ondulatoire ?

Quelle seraient les conséquences si le photon était massif ?

Quel est le rôle de la force de frottement dans l'existence d'un moment dans le modèle de l'électron élastiquement lié ? Quelle est son origine ?

Qu'est-ce que tu voulais montrer avec ta sous-partie sur le moment cinétique ? Le caractère quantique du photon. On aurait pu présenter une expérience d'interférences avec des beam splitter (interféromètre de Mach-Zender).

Quels sont les éléments que tu veux que les élèves retiennent ? Les éléments que les élèves risquent de mal comprendre ?

Discussion sur le refroidissement des atomes. Comment sont confinés les atomes ? Quel est le rôle du champ magnétique ?

Que dire de la statistique de particules avec un spin ? Bosons, statistique de Bose-Einstein. Il faut prendre en compte que les photons ont un spin quand tu fais le calcul de la densité spectrale d'énergie.

Qu'est-ce qu'un corpuscule ? Est-ce qu'on ne peut pas refaire tout ce que tu as présenté avec une onde ? La quantification d'énergie ne prouve pas l'existence de corpuscule, il faudrait montrer une expérience qui montre l'impact de corpuscule.

Définition d'un corps noir ? Corps dont l'absorbance est parfaite, pas besoin d'une enceinte.

Lien entre corps noir et rayonnement d'équilibre ?

Diffusion Compton : comment justifier la collision entre un photon et un électron (il pourrait y avoir collision avec un noyau) ? Est-ce qu'elle peut être réalisée à n'importe quelle fréquence ? (les électrons ne sont pas libres, il faut les arracher)

Est-ce qu'un photon peut être absorbé par un électron ?

Comment montrer le lien entre la polarisation du champ em et moment cinétique du photon ? Particule chargée dans un champ em et on regarde la différence quand il est polarisé circulairement droite et gauche.

Est-ce qu'on parle vraiment de spin du photon ? on parle plutôt d'hélicité pour une particule sans masse.

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"

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/canthe-photoelectric-effect-be-explained-without-photons>

On entend parfois que le corps noir et l'effet photoélectriques constituent des preuves expérimentales de l'existence du photon, ce qui est en fait faux. Ces deux effets pourraient s'expliquer à l'aide d'un modèle considérant le champ EM classique et la matière avec niveaux d'énergie quantifiés. Une vraie preuve expérimentale a été apportée par Philippe Grangier, Gérard Roger et Alain Aspect en 1986. L'idée de l'expérience est très simple : il s'agit d'envoyer de la lumière sur une lame semi-réfléchissante, et de mesurer les corrélations entre lumière réfléchie et lumière transmise.

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.

Sur quel principe marche un photomultiplicateur ? Effet photoélectrique (cf Duffait et Sextant)

Effet photoélectrique et effet Compton : même type de collisions ? Non, effet Compton : collision élastique (conservation du quadrivecteur énergie-impulsion)

Effet photoélectrique : collision inélastique (le photon incident est détruit et son énergie n'est pas entièrement convertie en énergie cinétique de l'électron, puisqu'une partie constitue le travail d'extraction).

Le photon peut-il avoir un spin/hélicité 0 ? Le photon est un boson de spin 1 (en unités de \hbar), dont le spin pourrait alors a priori prendre les valeurs -1, 0 ou 1, mais la valeur 0 est interdite. Il n'y a pas d'explication simple à donner, la raison profonde est une incompatibilité entre spin 0 et masse nulle en électrodynamique quantique.

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 ?

Remarques

-