

LP38 - Aspect corpusculaire du rayonnement, notion de photon

Cléments (DE LA SALLE + COLLÉAUX)

15 juin 2020

Niveau : L3

Bibliographie

- ↻ Article de La Recherche Janvier 1994, → Refroidissement d'atome
Alain Aspect + Jean Dalibard
- ↻ *Optique quantique*, **Fox** → Refroidissement d'atome p.218 NICKEL TBO FOX <3
- ↻ *MQ 1*, **Aslangul** → chap 5 pour les applications
- ↻ *Thermo*, **Perez** → p.338 pression de radiation
- ↻ *Thermostat*, **DGLRB** → Rayonnement corps noir
- ↻ **Le Bellac** → Quelques trucs sur corps noir aussi (p.911) ou l'effet photo-
électrique très vite fait p.19

- ↻ *Panorama de la physique* →
- ↻ article historique de Milikan →
- ↻ article historique de Davisson et Ger- →
mer, au moins c'est là

Prérequis

- EM
- Relativité restreinte
- Pression de radiation
- Modèle du corps noir

Expériences



Table des matières

Table des matières	1
1 Émergence de la notion de photon	2
1.1 Quantification du rayonnement	2
1.2 Preuves expérimentales	3
1.3 Caractéristiques du photon	6
2 Interaction lumière-matière	6
2.1 Pression de radiation	6
2.2 Effet Compton	7
2.3 Refroidissement d'atomes	8
2.4 Interférences à photon unique	9

Introduction

Jusqu'au XXe siècle les petites querelles entre "gnagnagna la lumière c'est une onde" et les "pff c'est carrément des corpuscules!" étaient résolues : la communauté scientifique s'accordait sur l'aspect ondulatoire de la lumière, grâce notamment au Dieu des Dieux, le seul, l'unique, celui qui a tout unifié (et unifier deux théories c'est clairement ce qu'il y a de plus stylé en physique coucou la quantique-relatG) j'ai nommé MAXOU!

Mais malheureusement, la physique ne se limite pas à un grand ciel bleu avec deux trois petits nuages au loin (n'en déplaise à THOMPSON) et vers la fin du XIXe siècle, commence une descente aux enfer : le grand retour de l'aspect corpusculaire de la lumière!

1 Émergence de la notion de photon

1.1 Quantification du rayonnement

- ♣ *Le Bellac p.15*
- ♣ *DGLRB p.820*
- ♣ *Aslangul 1 p.98*

Le premier grand pas théorique vers la quantification de la lumière a été franchi par PLANCK pour résoudre la catastrophe ultraviolette.

L'enjeu est de calculer l'énergie spectrale du rayonnement d'un corps noir. RAYLEIGH propose en 1900 un calcul, basé sur la théorie de BOLTZMANN. Ne pas refaire tous les calculs! En gros on montre facilement que la densité de modes est

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

Et comme chaque mode est associé à une énergie $k_B T$ ♣ *Le Bellac + Aslangul p.106*, on obtient une densité énergétique

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

Et donc l'intégrale sur tous les modes possible diverge! C'est ça la catastrophe ultraviolette. Une réponse apportée par PLANCK, c'est de dire que les modes ne suivent plus un continuum mais qu'ils sont quantifiés.

$$\epsilon_n = n\nu$$

Avec h la célébrissime constante de PLANCK notée ainsi pour "Hilfe Grösse" qui NE VEUT PAS DIRE "grosse aide" mais plutôt "grandeur auxiliaire", ce qui traduit beaucoup moins bien le désespoir de notre ami PLANCK.

Avec ce postulat, on déroule les calculs et on trouve un truc beaucoup vachement mieux!

$$u(\nu) = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{\nu^3}{e^{h\nu/k_B T} - 1}$$

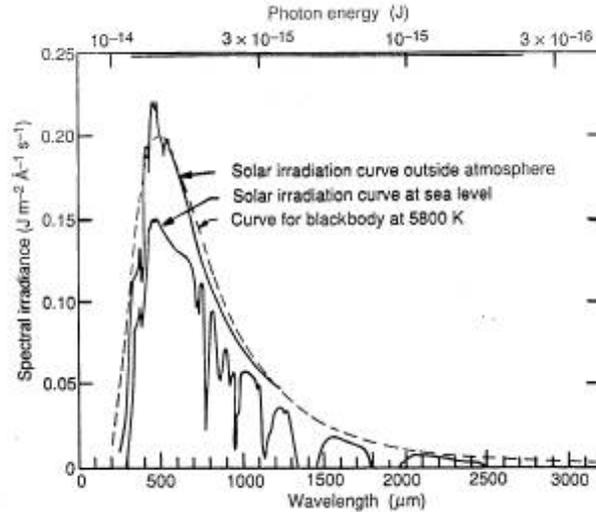


FIGURE 1.1 – Ça fit plutôt pas mal... Les raies d'absorption sont sans doute dues à l'atmosphère.

Bon du coup, est-ce qu'on fait comme PLANCK et on dit que, mystérieusement, écrire cette quantification ça suffit pour que ça marche ? Ça veut quand même dire quelque chose de fort si c'est vraiment la physique du phénomène quand même :

L'échange d'énergie entre le corps noir et le rayonnement ne se fait qu'à travers des quantas d'énergie. De plus, l'énergie de ces quantas est directement liée à leur fréquence, ce qui est totalement inédit puisqu'on a toujours décrit l'énergie d'une onde EM avec son intensité !

1.2 Preuves expérimentales

↪ *Aslangul p.118*

↪ *Cagnac p.6*

Est-ce que cette notion de quanta est un pur artefact mathématique comme l'a longtemps pensé PLANCK, ou bien est-il le premier jalon d'une nouvelle théorie, une nouvelle façon de faire de la physique encore totalement inédite et sur laquelle encore des centaines, que dis-je, des centaines de MILLIERS de physicien et physiciennes de tous les pays du monde vont se pencher pendant des siècles pour aller toujours plus loin dans la compréhension d'un monde dont ne nous connaissons encore qu'une fraction INFIME des règles du jeu ?... La réponse était bien évidemment un artefact mathématique, aller salut, fin de la leçon.

Bien après le 29 octobre 1900, Planck écrit :

“J’essayai donc immédiatement de relier d’une manière ou d’une autre le quantum élémentaire d’action au cadre de la théorie classique. Mais dans chacun de mes essais la constante se révélait embarrassante et récalcitrante.

L’échec de toutes mes tentatives pour franchir l’obstacle me rendit bientôt évident le rôle fondamental joué par le quantum élémentaire d’action dans la physique atomique, et me persuada que son apparition ouvrait une ère nouvelle dans les sciences de la nature, car elle annonçait l’avènement d’une théorie inattendue, destinée à bouleverser les bases mêmes de la pensée physique qui, depuis la découverte du calcul infinitésimal, s’appuyaient sur l’idée première que toutes les relations causales sont continues.

Mes vaines tentatives pour insérer le quantum élémentaire d’action d’une manière quelconque au cadre de la physique classique se poursuivirent pendant un certain nombre d’années et elles me coûtèrent beaucoup d’efforts.

Nombreux furent mes collègues qui trouvèrent mon acharnement à la limite de la tragédie. Mais je suis à cet égard d’une opinion différente, car la compréhension profonde que je ressentais alors me procura un enrichissement sans égal. J’avais finalement acquis la certitude absolue que le quantum élémentaire d’action jouait dans la physique un rôle beaucoup plus fondamental que je n’étais enclin à le pressentir au début, et cette conviction définitive me fit clairement sentir la nécessité d’introduire des méthodes radicalement nouvelles de calcul et de raisonnement dans l’analyse des problèmes atomiques.”

FIGURE 1.2 – Magnifique <3

En fait non, c’était pour rire. Haha.

C’est EINSTEIN qui reprend sérieusement cet hypothèse de quanta en resortant des placards une vieille expérience du siècle dernier : l’effet photoélectrique. La première mise en évidence date de 1839 mais sa première explication a été donnée par HERTZ en 1887. Cependant, HERZ n’a pas pu tout expliquer. En particulier le temps d’éjection des électrons ne correspondait pas du tout à la théorie.

Dans cette vidéo on illustre le phénomène, on peut s’en servir pour comprendre comment présenter les choses. Retrouver l’animation [ici](#), mais y a de fortes chances que ça fonctionne pas le jour J. Il faut retenir que

- Sous l’effet du rayonnement, les électrons sont arrachés à la plaque métallique, ce qui crée un courant dans le circuit
- On observe l’existence d’une fréquence seuil, à partir de laquelle seulement l’arrachement se fait
- L’intensité modifie le courant de saturation, mais pas la fréquence seuil

Bonne explication avec niveaux d’énergie de FERMI [Aslangul p.121](#) . Pour aller dans le vide, il faut communiquer aux électrons un **travail de sortie** W_s . L’existence de la fréquence seuil amène EINSTEIN à récupéré l’hypothèse farfelue de PLANCK en supposant également que l’échange d’énergie est quantifié entre la lumière et la matière avec un quanta

$$\epsilon = h\nu$$

L’existence de la fréquence seuil s’explique facilement :

$$h\nu = W_s + \frac{1}{2}m_e v^2 \implies h(\nu - \frac{W_s}{h}) = \frac{1}{2}m_e v^2 \geq 0$$

Avec cette vision en "grains de lumière", l’intensité correspond au nombre de grains. Il est donc logique qu’en augmentant celle-ci, le courant de saturation augmente. Par contre rien ne sert d’augmenter le nombre

de photons si aucun d'entre eux n'a assez d'énergie pour franchir W_s , ce qui explique que ν_s soit indépendante de l'intensité!

Milikan

Après l'article de Einstein de 1905, Milikan n'était pas d'accord (il était partisan de la théorie ondulatoire) donc il a fait des expériences et il a sorti un article en 1916 qui montre que Einstein avait raison et il a mesuré h (cf article)

Expérience : Électroscope

↗ Aslangul p.118 + Panorama

⊖ 2 min

Matos Électroscope P67.33 + Plaque de verre P67.?? + Peau de Chat (littéralement) + Lampe Hg

Protocole On charge négativement la plaque de zinc en frottant un bâton d'ébonite frotté sur la peau. L'aiguille de l'électroscope indique que la plaque est chargée. On approche la lampe (dans l'UV) et on observe une décharge au niveau de l'aiguille : on extrait les électrons du métal. On peut ensuite refaire l'expérience avec une lame de verre entre la lampe et l'électroscope (absorbe dans l'UV) et la décroissance n'a plus lieu. Ce qui montre bien que les fréquences élevées sont plus énergétiques, on peut même parler du seuil d'arrachement !

Manip' : Une autre idée

Un truc que j'avais vu au palais de la découverte, c'est tout simplement faire le spectre d'une lumière blanche avec un prisme et baisser l'alimentation. Les premières couleurs à disparaître sont le violet et le bleu. Ceci illustre plutôt la loi de WIEN mais c'est évidemment lié.

Autres expériences

Vous entendrez sans doute les rageux dire que "oui l'effet photoélectrique c'est pas une preuve gnagnagna"... C'est vrai qu'historiquement, ce n'est pas l'expérience qui a convaincu le plus de scientifiques (plutôt l'effet COMPTON (1921 puis prix Nobel en 1927) ou plus tard les expériences d'ASPECT et al. en optique quantique).

Effectivement, pour la quantification on peut toujours se reposer sur la description quantique de la matière (avec laquelle interagit la lumière). On ne peut pas se persuader encore que les photons existent en tant que particules insécables, indépendamment de toute interaction avec la matière!

Pour s'en assurer, il existe d'autres expériences comme celle menée par Aspect, Roger et Grangier en 1986 qui vise, à l'aide d'une lame séparatrice, à montrer que "a single photon can only be detected once!". Un photon est envoyé sur une séparatrice, deux capteurs se situent au lieux d'arriver. À chaque émission de photon, un seul point apparaît sur un seul des capteurs. Ce qui veut bien dire que le photon est insécable puisque qu'il n'est pas détecté deux fois simultanément sur chaque capteur.

Les phénomènes / expériences décrit-es en deuxième partie constituent autant de nouvelles preuves.

1.3 Caractéristiques du photon

On a donc déjà établi que l'énergie d'un photon est

$$E = h\nu = \hbar\omega$$

Puisqu'on a montré que le concept de photon avait bien un sens et qu'il s'agissait bien d'une particule insécable, la première chose que l'on peut lui associer en temps que telle c'est une **impulsion**. Ceci est possible grâce au formalisme introduit par DE BROGLIE :

$$p = \frac{h}{\lambda} = \hbar k \implies \mathbf{p} = \hbar \mathbf{k}$$

En effet, la trajectoire du photon suit celle du vecteur d'énergie (POYNTING) $\mathbf{\Pi} \parallel \mathbf{k}$.

De plus avec la relativité restreinte, on peut lui associer une masse :

$$E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2 \implies m = 0 \quad \text{WOAW}$$

Enfin, on peut lui associer un moment cinétique (dit **hélicité**) $\pm h$ et une charge $q = 0$.

2 Interaction lumière-matière

2.1 Pression de radiation

↪ *Aslangul, p.129*

↪ *Perez, p.338*

Maintenant que la lumière est constituée de particules, on peut calculer sa pression de radiation de la même manière qu'avec un GP. Et c'est d'ailleurs ce qu'on va faire MAINTENANT parce que la pression de radiation ça reste une interaction lumière matière !

On se remet le schéma de la situation étudiée :

On étudie ici un photon qui entre en contact avec une paroi, en faisant un angle θ avec sa normale. Le photon est caractérisé par son impulsion de norme p et la collision est élastique donc chaque photon qui entre en contact avec une surface dS de la paroi lui transfère une impulsion de $2p \cos \theta$ (↪ *Perez, p.26* qui montre en plus que l'impulsion donnée est normale).

Mais on se doute bien qu'il n'y a pas qu'un photon qui percute la surface dS ! Au vu du schéma, le nombre de photons qui heurtent cet élément en un intervalle de temps dt correspond au nombre de photons dans le cylindre de base dS et de hauteur $cdt \cos \theta$. En notant n_v le nombre de photon par unité de volume, on a donc $n_v c dt \cos \theta$.

Ainsi, l'impulsion normale donnée par le rayonnement à l'élément de surface dS en un intervalle de temps dt est

$$\Delta p = 2 p c n_v \cos^2 \theta dt dS$$

Lien avec EM

Ici on peut remarquer une première forme de la pression de radiation (avant d'intégrer sur les angles) :

$$P = 2 \frac{\phi}{c} \cos^2 \theta \quad \text{avec} \quad \phi = n_v p c^2$$

Ce qui est en accord avec la forme donnée par l'EM lorsqu'une onde plane est réfléchi à la surface du conducteur, θ étant l'angle d'incidence de l'onde.

Nous avons supposé que les photons avaient tous la même orientation définie par l'angle θ . Un modèle plus réaliste est de considérer qu'ils se répartissent de manière uniforme dans un angle solide élémentaire $d\Omega$ autour de leur orientation moyenne θ . On multiplie alors le résultat précédent par $\frac{d\Omega}{4\pi} = \frac{2\pi \sin \theta d\theta}{4\pi} = \frac{\sin \theta d\theta}{2}$.

Par le PFD ([Perez, p.26](#)), la division par dt fait spawn la force et la division par dS fait spawn la pression, qui correspond ici à la pression de radiation dP_{rad} (il reste encore un d car il reste encore à intégrer sur l'ensemble des θ).

$$dP_{\text{rad}} = 2 pc n_v \cos^2 \theta \sin \theta d\theta$$

Ce qui donne, après intégration,

$$P_{\text{rad}} = \frac{pc n_v}{3} = \frac{u}{3}$$

Oh on reconnaît l'énergie volumique d'un photon! :o Et aussi au passage le même résultat qu'en EM! Discussion intéressante à lire (et flemme de recopier de [Aslangul, p.130](#)). Bon en fait il dit juste que pour un grand nombre de photons, la granulosité disparaît donc on retrouve des équations classiques, à cause du fait que le nombre de photons est grand.

2.2 Effet Compton

[Aslangul, p. 131](#) (extrait sur le site)

[Page WIKIPÉDIA](#)

Pour la pression de radiation c'était des collisions élastiques, là on va traiter des collisions inélastiques avec l'effet Compton! Cet effet ne peut d'ailleurs se comprendre qu'avec le photon!

Sur l'effet en lui-même, tout est dans le [Aslangul](#) et dans l'épreuve A blanche du ski version 2020.

La conservation de l'énergie (avec les notations du Aslangul) s'écrit :

$$h\nu_0 + mc^2 = h\nu + \gamma mc^2$$

Avec ν_0 la fréquence du photon avant collision, ν celle après et m la masse de l'électron. Et la conservation de l'impulsion implique

$$\begin{cases} \frac{h\nu_0}{c} + 0 = \frac{h\nu}{c} \cos \theta + \gamma m v \cos \phi \\ 0 + 0 = \frac{h\nu}{c} \sin \theta - \gamma m v \sin \phi \end{cases}$$

Avec θ l'angle avec lequel part le photon et ϕ celui de l'électron.

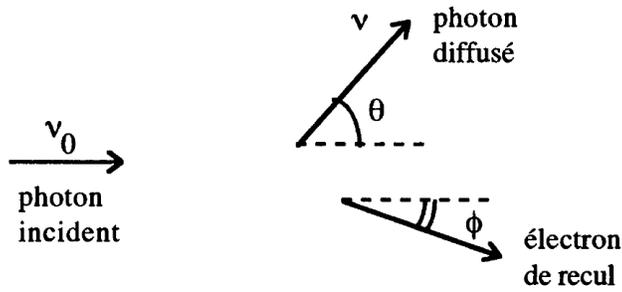


FIGURE 2.1 – Notations utilisées

On pose alors

$$= \frac{h\nu_0}{mc^2} \quad x = \frac{\nu}{\nu_0}$$

De sorte que les deux dernières équations se combinent en

$$\gamma^2 - 1 = \epsilon^2 (1 - 2x \cos \theta + x^2)$$

Et la conservation de l'énergie s'écrit

$$\gamma = \epsilon(1 - x) + 1$$

On élimine γ afin d'exprimer x et obtenir :

$$x = \frac{1}{1 + 2\epsilon \sin^2 \frac{\theta}{2}} < 1$$

On retrouve que la fréquence (donc l'énergie) diminue. La déviation est d'autant plus grande que ϵ n'est pas trop petit, or comme $mc^2 \sim 511 \text{ keV}$, il faut bien utiliser des rayons X assez durs. En terme de longueur d'onde, on trouve

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = 2 \frac{h}{mc} \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

Effet COMPTON inverse

En astro, cet effet est en fait plus important que l'effet COMPTON. On doit considérer que l'électron a, cette fois-ci, une très grande vitesse. C'est donc juste un changement de référentiel, plus approprié lorsque l'électron est éjecté à une vitesse relativiste.

2.3 Refroidissement d'atomes

➤ *Fox p.218* (extrait sur le site)

PN

1997 : Chu, Cohen-Tannoudji et Phillips reçurent le PN pour leurs travaux sur le développement de *méthodes derefroidissement et de piégeage d'atomes par de la lumière laser*

Lire [↪ Fox p.218](#) tout est fait (et bien fait) dedans ! Bien foutre des ordres de grandeur (surtout de température!) [↪ Fox p.220](#) . L'idée c'est de faire absorption dans la direction du faisceau de photons (transfert d'impulsion) et suivi d'émission spontanée isotrope donc en moyenne on ralentit dans une direction donnée.

Intérêt : Observer comportement quantique (gel des degrés de libertés classiques). Sert pour les horloges atomiques paraît-il...

À la fin de la modélisation 1D, parler du piégeage magnéto-optique [↪ Fox p.229](#) . C'est ULTRAAA STYLÉÉÉ DU CUL sérieux ! On combine l'effet DOPPLER et l'ZEEMAN pour créer un truc qui marche si bien <3

2.4 Interférences à photon unique

<https://youtu.be/MbLzh1Y9POQ>

Questions

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 qu'elle 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](https://physics.stackexchange.com/questions/68147/can-the-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 quadri-vecteur 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 ?

Soleil = émission corps noir avec bandes dues à l'absorption dans l'atmosphère, mais elle réémettent ces particules, l'énergie va où ?

Parce que la ré-émission est isotrope

Les lois de Wien, de Stefan on besoin du photon ?

Non

Expérience des fentes d'Young, sur un fente on place un atome qui peut réagir avec le rayonnement

Apparition d'un facteur de visibilité

Besoin de faire une mesure sur l'atome sur l'une des fentes fait disparaître les fentes ou juste la présence de l'atome suffit ?

Comment se fait la localisation du photon sur l'écran ?

Phénomène de décohérence, perte de cohérence du photon dans le capteur, il se localise avec les nombreuses

interactions avec l'écran

Pourquoi on parle pas de polarisation linéaire mais juste de circulaire

C'est des CL

Absorption stimulée ?

Plus y a de photons plus c'est probable d'en absorber

Quel phénomène derrière l'émission de lumière ?

Émission spontanée, fluctuations du vide pour initier l'émission du vide (ç arègle le temps avant l'émission spontanée)

Comment on découple une particule des modes du champ électromag ?

Particule dans un Fabry-Pérot, ça enlève l'émission spontanée

Tu peux revenir sur l'expérience d'Aspect Dalibard et Roger ?

Et l'effet Compton ?

Relation entre l'énergie du photon et l'angle d'émission

Déplacement de Stokes ?

Coefficient d'absorption et d'émission pas symétrique entre les dépendances en fréquence (max pas pour les mêmes fréquences) pour certaines molécules fluorescentes ou phosphorescentes je sais plus

Le photon se corrèle avec le détecteur et nouvelle intrication entre photon, détecteur + environnement. Le détecteur va spontanément choisir un des états observables