
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 disposition par mail si vous avez des remarques ou des questions plus générales à propos des corrections.