

LC-55-Aspect corpusculaire du rayonnement, notion de photon

Maud

12 juin 2022

Pré-requis

-

Références

- [1] Claude Aslangul. *Applications de mécanique quantique*. 2015.
- [2] Fox. *Optique quantique, une introduction*. Edition De Boeck Université, Paris, 2011.
- [3] Christian Garing. *Ondes électromagnétiques dans le vide et les milieux conducteurs*. Ondes 2. Ellipses, Paris, 1998.
- [4] José-Philippe Pérez. *Mécanique : fondements et applications avec 320 exercices et problèmes résolus*. Dunod, Paris, 7e édition. édition, 2014.
- [5] José-Philippe Pérez, Robert Carles, and Olivier Pujol. *Quantique : fondements et applications avec 250 exercices et problèmes résolus*. De Boeck, Bruxelles, 2013.
- [6] François Vandembrouck, Bernard Salamito, and Dominique Chardon. *Physique : PC-PC* tout-en-un. J'intègre tout-en-un*. Dunod, Malakoff, 5e édition. édition, 2019.

Table des matières

1	Introduction	1
2	Emergence de la notion de photons	2
2.1	Effet photoélectrique	2
2.2	Insécabilité	3
2.3	Interférence à un photon	3
3	Caractéristiques du photon	3
3.1	Impulsion et effet Compton	3
3.2	Comparaison avec les résultats de l'électromagnétique	4
3.3	Moment cinétique du photon	4
4	Application : Refroidissement par laser	4
4.1	Conditions de résonance photon-atome	4
4.2	Mécanisme de refroidissement et température minimale	5
4.3	Piègeage optique	5
5	Conclusion	5

1 Introduction

Introduction pédagogique

Objectifs pour les profs

-

Objectifs pour les élèves

-

Activités pour les élèves

-

Introduction générale

Histoire :

- Newton : corpusculaire (pendant 100 ans au moins)
- young, huygens : onde (diffraction, interférences)
- Einstein : corpusculaire+onde
- Jean-Marc Lévy-Leblond et Françoise Balibar : quanton

Remarque

J'aime bien la progression de la leçon de Mathieu.

✎ Dualité onde corpuscule, Wikipédia, il y a une bonne image d'ailleurs. La métaphore du cylindre est l'exemple d'un objet ayant des propriétés apparemment inconciliables. Il serait à première vue déroutant d'affirmer qu'un objet ait à la fois les propriétés d'un disque et d'un rectangle : sur un plan, un objet est soit un disque, soit un rectangle.

Mais si l'on considère un cylindre : une projection suivant l'axe du cylindre donne un disque, et une projection perpendiculairement à cet axe donne un rectangle.

De la même manière, « onde » et « corpuscule » sont des manières de voir les choses et non les choses en elles-mêmes. Le terme de dualité est alors assez "contradictoire", signifiant qu'il existe deux choses différentes alors qu'il s'agit bien de l'unification de deux domaines de la physique : les ondes et l'aspect corpusculaire.

Notons par ailleurs que dans la description mathématique de la physique quantique, le résultat de la mesure est similaire à une projection géométrique (notion d'observable : l'état de l'objet est décrit par des nombres que l'on peut voir comme des coordonnées dans une base vectorielle, et en géométrie euclidienne, les coordonnées sont la projection de l'objet sur les axes de référence).

C'est l'absence d'équivalent macroscopique sur quoi nous pourrions nous référer qui nous force à penser les objets quantiques comme possédant des attributs contradictoires. Il serait inexact de dire que la lumière (comme tout autre système quantique d'ailleurs) est à la fois une onde et un corpuscule, elle n'est ni l'un, ni l'autre. Le manque d'un vocabulaire adéquat et l'impossibilité de se faire une représentation mentale intuitive des phénomènes à petite échelle nous font voir ces objets comme ayant une nature, par elle-même, antinomique.

Pour lever cet apparent paradoxe et insister sur l'imperfection de nos concepts classiques d'onde et de corpuscule, les physiciens Jean-Marc Lévy-Leblond et Françoise Balibar ont proposé d'utiliser le terme de "quanton" pour parler d'un objet quantique. Un quanton n'est ni une onde, ni un corpuscule, mais peut présenter les deux aspects selon le principe de complémentarité de Bohr.

2 Emergence de la notion de photons

2.1 Effet photoélectrique

[1] p.119 [Expérience de l'effet photoélectrique](#) **Constatations expérimentales** (wikipédia)

- Les électrons ne sont émis que si la fréquence de la lumière est suffisamment élevée et dépasse une fréquence limite appelée fréquence de seuil.
- Cette fréquence seuil dépend du matériau et est directement liée à l'énergie de liaison des électrons qui peuvent être émis.
- Le nombre d'électrons émis par unité de temps lors de l'exposition à la lumière, qui détermine l'intensité du courant électrique, est proportionnel à l'intensité de la source lumineuse.
- La vitesse des électrons émis ne dépend pas de l'intensité de la source lumineuse.
- L'énergie cinétique des électrons émis dépend linéairement de la fréquence de la lumière incidente.

- Le phénomène d'émission photoélectrique se produit dans un délai extrêmement petit inférieur à 10^{-9} s après l'éclairage, ce qui rend le phénomène quasi instantané.

[5] p.47 on a le culcul et les ordres de grandeurs.

Pourquoi l'aspect ondulatoire de la lumière est mise à défaut ? Cet effet ne peut pas être expliqué de manière satisfaisante lorsque l'on considère que la lumière est une onde. La théorie acceptée en 1905 (avant le modèle d'Einstein), l'électromagnétisme classique de James Clerk Maxwell, permettait bien d'expliquer la plupart des phénomènes optiques ; mais si l'on considère la lumière comme une onde, en augmentant son intensité et en attendant suffisamment longtemps, on devrait pouvoir fournir suffisamment d'énergie au matériau pour en libérer les électrons, i.e. le travail d'extraction W_s . Or l'expérience montre que l'intensité lumineuse n'est pas un paramètre, et que le transfert d'énergie provoquant la libération des électrons ne peut se faire qu'à partir d'une certaine fréquence. L'interprétation d'Einstein, l'absorption d'un photon, permettait d'expliquer parfaitement toutes les caractéristiques de ce phénomène. Les photons de la source lumineuse possèdent une énergie caractéristique déterminée par la fréquence de la lumière. Lorsqu'un électron du matériau absorbe un photon et que l'énergie de celui-ci est suffisante, l'électron est éjecté ; sinon l'électron ne peut s'échapper du matériau. Comme augmenter l'intensité de la source lumineuse ne change pas l'énergie des photons mais seulement leur nombre, on comprend aisément que l'énergie des électrons émis par le matériau ne dépend pas de l'intensité de la source lumineuse.

Expérience de Millikan Pour vérifier [5]p.49

Transition

Wiki : Lorsque l'EPE se manifeste, toute l'énergie du photon incident se transmet à l'électron des couches profondes. Une quantité d'énergie minimale est nécessaire pour extraire l'électron de l'atome, l'énergie excédentaire est transmise à l'électron sous forme d'énergie cinétique. Une absorption partielle est caractérisée par la diffusion Compton.

2.2 Insécabilité

Source de photon unique [2]p.131 Temps de réponse des détecteurs = 0.42 ns alors que le temps de vie radioactif est de 2.2 ns donc on a une erreur non négligeable. Attention, le faisceau d'atome (ex :Na) peut émettre plusieurs longueurs d'onde donc on met un filtre (interférentielle ?) avant le dispositif. Pour les ordres de grandeur [5]p.648

2.3 Interférence à un photon

Vidéo on voit les franges se dessiner. [5] p.650

Transition

youpi, les interférence c'est pas un effet collectif mais bien intrinsèque au photon

3 Caractéristiques du photon

3.1 Impulsion et effet Compton

[1]p.129 On obtient la formule de l'énergie avec la conservation du quadrivecteur impulsion, en égalisant quand la particule est au repos.

$$P^\nu = mU^\nu$$

$$U^\nu = \gamma(c; \vec{v})$$

On prend au repos donc la vitesse est nulle.

$$\left(\frac{E}{c}\right)^2 - \vec{p}^2 = (mc)^2$$

Le terme de gauche vient du quadrivecteur impulsion à vitesse nulle, sachant que dans ce cas là $\gamma = 1$. Le reste de la démo est dans le [1] p.130. On conclue de ce raisonnement obligatoirement la masse est nulle. On obtient la formule de l'énergie aussi.

On a confirmation de ces équations à l'aide de l'effet Compton. **Effet Compton** : Le calcul est ok. Ça peut être le calcul de la LP.

[1]p.135 pour les hypothèses et l'approche

Pour le calcul aller voir [5]p.50 On donne la longueur d'onde de Compton de l'électron et du proton pour montrer la différence.

- on peut avoir classiquement l'origine du premier pic par diffusion des rayons X sur les électrons de cœur
- par contre l'effet Compton est intrinsèquement quantique, c'est normal ça fait intervenir la constante de Planck
- Compton ou effet photoélectrique = manifestation d'échanges d'énergie et de quantité de mouvement quantifiés entre le rayonnement et les électrons
- différence entre les deux : Compton est la conséquence d'un processus de diffusion inélastique du rayonnement car il y a changement de fréquence
- la fréquence d'émission du photon émis par la matière est différente de la diffusion de Rayleigh pour laquelle on a la même fréquence entre le photon incident et le photon émis
- pour des objets massifs comme le proton l'effet est faible cf. Odg Perez p.53
- hypothèse de l'électron libre ? ok parce que l'énergie de liaison de l'électrons est très faible devant l'énergie du rayonnement incident, pareil Odg dans le Perez p.53

Important

L'effet Compton révèle clairement et directement que la lumière peut être décrite par un ensemble de corpuscules de masse nulle.

3.2 Comparaison avec les résultats de l'électromagnétisme

voir le sujet A 2013 page 9

3.3 Moment cinétique du photon

[3] P.256 Aller voir la leçon de Pascal Rapido et sinon il y a le calcul dans le [6] p.967 Mais en gros, son spin c'est 1 donc normalement on a trois projections mais comme il a pas de masse on a pas 0 comme valeur. On a deux hélicités qui donnent les deux polarisations circulaires et là on peut faire l'analogie avec ce qu'on fait en EM si on veut une polarisation linéaire

Expérience de Beth : Epreuve agrégation externe 2018

4 Application : Refroidissement par laser

[2]p.241 On peut utiliser les interactions lumière-matière pour générer des températures de l'ordre du microkelvin en laboratoire. Le grand triomphe de ces travaux, une fois ces techniques combinées avec le piégeage d'atome et le refroidissement par évaporation, a été l'observation en 1995 de la condensation de Bose-Einstein dans un gaz d'atomes. **Introduction à la notion** : À l'aide du principe classique de l'équipartition de l'énergie, on trouve l'expression de la vitesse quadratique en fonction de la température. Il s'agit de la base du principe du refroidissement par laser qui exploite la force mécanique exercée par un faisceau laser sur les atomes en mouvement d'un gaz pour les ralentir, et de ce fait, produire des températures très basses. En obtenant des températures de l'ordre du microkelvin, cela correspond à des vitesses 4 ordres de grandeurs plus petites que celle pour des températures ambiantes. La densité joue aussi un rôle important dans le refroidissement par laser des atomes. Des techniques pour obtenir des très basses températures sont utilisées par des physiciens depuis des décennies en matière condensée. La nouveauté ici est de refroidir des gaz et non des liquides ou des solides : on a peu d'interaction à ces très basses températures ce qui permet d'être très proche des conditions d'idéalité. Le refroidissement par laser seul n'est pas suffisant pour observer expérimentalement la condensation de Bose-Einstein (il faut des températures de l'ordre du nanokelvin grâce à un refroidissement par évaporation).

4.1 Conditions de résonance photon-atome

Effet Doppler non relativiste aller voir le [4] p.551 On conclut que la différence de fréquence entre la fréquence du laser et la fréquence de résonance de l'atome.

4.2 Mécanisme de refroidissement et température minimale

Aller voir le sujet de centrale [2] p.244 et 245 Remarque pour avoir la distance minimale parcourue avant le ralentissement maximal on intègre 2 fois l'équation du mouvement des atomes.

On est donc limité par l'accord de fréquence entre le laser et la fréquence de résonance de l'atome en mouvement. Pour palier ce soucis, on pallie ce soucis en variant progressivement la fréquence du laser. On parle de refroidissement par balayage de fréquence.

On a l'exemple pour un jet de sodium dans le fox p.246. Pour pallier pour les très faible vitesse le désaccord de fréquence, on utilise deux faisceau laser. En effet, les atomes qui se déplacent dans le sens des x négatifs sont accélérés et donc augmente la température des atomes par collision.

Remarque

L'expérience fonctionne mieux que la théorie ci dessus. En effet, il y a aussi le refroidissement de Sisyphe qui intervient ce qui permet de descendre à des température pour le césium de l'ordre de 2 microkelvin.

4.3 Piègeage optique

Fox à la suite

5 Conclusion

On parle du cylindre et de la nouvelle définition par un quanton cf. intro.

BO