

LP 38 : Aspects corpusculaires du rayonnement, notion de photon

Armel JOUAN, Géraud DUPUY

Ebauche de plan - Niveau : L3

Prérequis

- Quantification des échanges d'énergie pour le corps noir
- Energie d'une particule relativiste
- Notions de mécanique quantique
- Polarisation d'une onde lumineuse

Introduction : Max Planck a réussi à résoudre "la catastrophe ultraviolette" avec la quantification de l'énergie. On peut aller plus loin en introduisant la notion de photon.

1 L'effet photoélectrique

1.1 Mise en évidence expérimentale de l'effet

- Définition de l'effet
- Prendre un électroscope. Placer une petite tige au centre, dans une position où elle n'est pas stable horizontalement
- Remplacer le dessus par une plaque de Zn
- On charge positivement une baguette en verre avec une peau de chat. On la met en contact la plaque de zinc.
- Placer le doigt pour tout rendre neutre
- Enlever la baguette pour rendre le dispositif négatif (les charges positives partent avec)

- Mettre une lampe de mercure (de préférence les vieilles rondes, supposées plus puissantes) et une plaque de verre à sa sortie
- Retirer la plaque de verre et observer le retour à la neutralité de la plaque
- Montrer pour une analyse plus quantitative un montage avec anode, photocathode, source de tension et ampèremètre. La photocathode est éclairé par un flux de puissance P et de fréquence ν
- Commenter la courbe $I(V)$. La linéarité de l'intensité de saturation (pour une fréquence incidente fixée) pour les V positif en fonction de la puissance. La tension seuil en dessous de laquelle il n'y a pas de courant V_0 (négative)
- Commenter la courbe de la contre tension $|V_o|(\nu)$. Montrer qu'il existe une fréquence seuil ν_s . Cette courbe ne dépend que de ν et pas de P , et est linéaire

1.2 Interprétation d'Einstein

- Il faut fournir un travail W_s pour arracher un électron
- On suppose que l'énergie du rayonnement est communiquée par des corpuscules nommés photons d'énergie $h\nu$
- On ne peut arracher un électron qu'à condition que $h\nu \geq W_s$. On retrouve l'effet de seuil
- Si la fréquence est plus grande, le reste sera transféré en énergie cinétique: $h\nu = W_s + \frac{1}{2}mv^2$
- C'est cette énergie cinétique qui permet aux électrons d'atteindre l'anode même si elle est chargé négativement et les repousse. $e |V_o| = \frac{1}{2}mv^2 = h\nu - W_s = h(\nu - \nu_s)$
- On retrouve le comportement linéaire, avec une pente qui ne dépend pas du matériau (seul le seuil en dépend), et on retrouve la constante qui avait servi à Planck pour son raisonnement
- On peut introduire un longueur d'onde seuil. Donner des ordres de grandeurs. Pour le zinc (365 nm), c'est dans les UV, donc normal qu'on ne voie rien avec la vitre
- La notion de photon permet d'expliquer simplement le phénomène

Transition : maintenant qu'on voit la pertinence de cette particule, cherchons à en caractériser les propriétés

2 Photon: Caractéristiques et applications

2.1 Masse et impulsion

- Les photons se déplacent à c , ils sont donc nécessairement relativistes
- Son énergie relativiste est donc donnée par $E = \sqrt{p^2c^2 + m^2c^4} = h\nu$
- Toujours vrai quand ν tends vers 0, donc on a à la fois $m^2c^4 (\nu = 0) = 0$ $p^2c^2 (\nu = 0) = 0$. Vu que le premier terme ne dépend pas de ν , on en déduit que $m = 0$.
- Le photon a donc une énergie qui vaut $E = pc$, et donc $p = \frac{h\nu}{c}$ et $\lambda = \frac{h}{p}$. C'est la relation de De Broglie
- Expliquer l'application au refroidissement par effet Doppler
- On envoie un photon dans le sens inverse du mouvement
- L'absorption va faire que par conservation de l'impulsion on ralentit l'atome
- L'émission spontanée devrait recréer de l'impulsion, mais cette dernière sera nulle en moyenne, car l'émission spontanée est isotrope
- On sait également que la fréquence du rayonnement vu par l'atome dépend de sa vitesse par l'effet Doppler
- On peut donc ajuster les lasers en fréquence pour que la résonance d'absorption ne se fasse que si l'atome se déplace contre le faisceau laser
- Dès lors, si on met 6 lasers contrapropageant, on peut ralentir jusqu'au mK environ (au delà, il faut utiliser l'effet sisyphé)

2.2 Moment cinétique

- Le photon a un spin comme l'électron, sauf qu'il vaut ici 1
- La QFT impose que le spin 0 soit inaccessible (car masse nulle)
- Les projections du spin en ± 1 donne les différentes polarisation. ($+1 \Rightarrow$ polar circulaire droite σ^+ ; $-1 \Rightarrow$ polar circulaire gauche σ^-)
- On obtient la polarisation rectiligne comme une CL de ces polarisations circulaires
- Détailler l'application au pompage optique
- On pose l'hamiltonien d'interaction $H_{em} = \vec{D} \cdot \vec{E}$

- Si on part d'un état $|a\rangle$ vers un état $|b\rangle$. Selon une théorie des perturbations au premier ordre, la transition n'est possible que si $\langle b | H_{em} | a \rangle \neq 0$
- On exprime les états $|a\rangle$ et $|b\rangle$ dans la base $|n, l, m\rangle$
- On obtient comme condition par la conservation du moment cinétique que $l_b - l_a = \pm 1$, pour σ^+ $m_b - m_a = +1$, pour σ^- $m_b - m_a = -1$, pour π : $m_b = m_a$
- Si on part d'un état fondamental triplet $J_a = 1$ et qu'on va vers un état excité singulet $J_b = 0$, en le bombardant avec des polarisations π
- Initialement on a équipartition des états triplets
- Après on a plus du tout d'état $m = 0$ fondamental
- On peut donc préparer certains états quantique

3 Photons uniques

3.1 Réalisation d'une source de photons uniques

- Expérience réalisée par Philippe Grangier, Alain Aspect et Gerard Roger en 1986
- L'expérience consistait à isoler l'émission de fluorescence d'un atome de calcium, qui se désexcitent successivement avec deux radiations de longueurs d'onde $\lambda_1 = 551nm$, $\lambda_2 = 423nm$.
- Les deux photons sont émis à 5ns d'intervalle en moyenne (durée de vie de l'état intermédiaire)
- On va chercher à isoler ce deuxième photon
- (Rq: Plein d'autres sources de photons uniques: centre NV, Boite quantique semi conductrice)

3.2 Caractérisation par autocorrélation

- On utilise un interféromètre de Hanbury, Brown et Twins avec une lame semi-réfléchissantes qui envoie sur deux détecteurs D_1 et D_2
- On note $P_1(t)$ la proba de détecter sur D_1 au temps t , On note $P_2(t+\tau)$ au temps $t + \tau$, et $P_{1,2}(t, t + \tau)$ la probabilité de détecter en D_1 à t , et en D_2 à $t+\tau$
- On définit la fonction de corrélation $g^{(2)}(\tau) = \frac{P_{1,2}(t, t+\tau)}{P_2(t+\tau)P_1(t)}$
- On définit l'anticorrélation $1 = g^{(2)}(0) = \frac{P_{1,2}(t, t)}{P_2(t)P_1(t)}$

- Un photon ne peut passer que d'un côté, donc on ne peut le détecter à sur D_2 et D_1 en même temps
- Donc $P_{1,2}(t, t) = 0$, donc $A=0$
- Si on est dans sur une source classique, on a $A = g^{(2)}(0) = \frac{\langle I_1(t)I_2(t) \rangle}{\langle I_1(t) \rangle \langle I_2(t) \rangle}$. Par une inégalité de Cauchy-Schwartz on a donc $A \geq 1$
- Les expériences d'Aspect ont trouvé $A = 0.18 < 1$, ce qui est considéré comme une preuve suffisante du caractère corpusculaire de la lumière

Conclusion

Ouvrir sur la crypto quantique où on réutilise tout particulièrement les sources de photons uniques, et certaines ppté de la lumière comme son moment cinétique

Bibliographie

- [1] Physique Atomique, tome 2, Cagnac (pour l'effet photoélectrique)
- [2] Optique quantique 1 : Lasers, Aspect, Fabre, Grynberg (pompage optique, complément 2.A)
- [3] Source de photons uniques et interférences à un seul photon, thèse de Vincent Jacques (pour la 3ème partie, p.27)
- [4] Les lasers, cours et exercices corrigés, Dangoisse, Ed. Dunod (Pour refroidissement d'atomes)

Animations, ressources

- (1) Effet photoélectrique :
 - électroscope
 - lame de Zinc
 - baguette en PVC et peau de chat
 - Vielle lame de Mercure (les cylindriques)
 - plaque de verre