

LP n°38 **Titre :** Aspect corpusculaire du rayonnement. Notion de photon.

Présentée par : Lionel DJADAOJEE

Rapport écrit par : Jules F. & Gloria B.

Correcteur : Jean HARE

Date : 06/02/2019

Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Éditeur	Année
Mécanique Quantique	Aslangul		2007
BUP 877-879 : Quanta de Planck, d'Einstein à aujourd'hui			
BUP 679 : introduction de h par Planck			
Cours "Atoms and Photons" (sur internet)	Jean-Michel Raimond		

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon : Licence 3

Prérequis :

- Électromagnétisme classique
- Physique statistique
- Relativité restreinte

Intro : Notion rencontrée au lycée pour les transitions d'un atome.

nécessité de cette notion. Question fondamentale : qu'est-ce que la lumière ? deux visions : une vision corpusculaire (Newton) ou ondulatoire (Huygens) confirmée d'abord par Fresnel, Young, Maxwell etc...

1min30

I. Limites de la description ondulatoire

1. Le problème du corps noir

Rayonnement thermique d'un corps noir à l'équilibre thermique à température T, et interaction du rayonnement avec la matière.

Si la matière de la cavité perturbe peu le champ on peut prendre pour le champ E la forme d'une onde stationnaire 3D ayant pour vecteur d'onde $\mathbf{K} = \pi/L^*(n_x, n_y, n_z)$ (3 entiers naturels)

Estimation de la densité spectrale de mode : nombre de modes de fréquence ν donnée / volume de la cavité. On trouve $8 \pi \nu^2 / c^3 \times d\nu$

Slide : $\frac{1}{8}$ de sphère contenant les modes

On passe ensuite à la densité spectrale d'énergie. Il y a là deux approches :

- Rayleigh : approche ondulatoire (énergie d'un mode $E = kT$ fois la densité de mode). Problème avec cette description : l'énergie, proportionnelle ν^3 tend vers l'infini.
- Planck (1900) : approche corpusculaire, quantification de l'énergie. L'énergie d'un mode est $E = h\nu \times n$ où n = nombre moyen de photons dans le mode. La somme des énergies est discrétisée¹ et on trouve la loi de Planck pour le rayonnement.

¹ **NON ce n'est pas cela, il y a toujours une intégrale continue à faire à toutes les fréquences. C'est le nombre $n(\nu)$ qui prend une forme spécifique. Au lieu de prendre un simple résultat limite de Boltzman $n(\nu) = k_B T / h\nu$ on doit écrire**

$$\langle n(\nu) \rangle = \frac{\sum_n n e^{-n\beta h\nu}}{\sum_n e^{-n\beta h\nu}} = \frac{1}{e^{\beta h\nu} - 1}$$

- Il a fallu introduire $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

Interprétation : les échanges d'énergie entre matière et rayonnement se font par paquet d'énergie $\Delta E = h\nu$

11 min

2. L'interprétation d'Einstein (1905)

Analyse de la densité spectrale à haute fréquence (ou la vision classique ne fonctionne plus). la relation entre la densité spectrale d'énergie et la température permet de calculer $1/T = dS/dU$, donc de remonter à l'entropie associée au rayonnement. On peut alors démontrer que la variation d'entropie associée à une variation de volume varie en $\ln(V/V_0)$... Comme pour le gaz parfait ! En comparant les préfacteurs on peut conclure :

Le rayonnement est semblable à un gaz de N particules sans interaction où N est tel que $U = N \cdot h\nu$, et $h\nu$ apparaît ainsi comme l'énergie d'une particule unique.

15 min

3. L'effet photoélectrique

Première expérience : Hertz (1887)

Description de l'expérience : Irradiation d'une électrode par un flux de photon, mesure du flux d'électrons produit. La différence d'énergie potentielle est égale à qU . Dans la vision ondulatoire la tension doit dépendre de la puissance du rayonnement mais pas de sa fréquence.

19min

expérience : photocathode/anode relié à un voltmètre : mesure de la différence de potentiel pour différentes couleurs (bleu et rouge) et différentes intensités.

La vision ondulatoire n'est pas vérifiée par l'expérience de Hertz. (!! Hertz a vérifié l'existence des ondes EM prédites par Maxwell en 1864 : c'est ce qu'on appelle l'expérience de Hertz !! Par ailleurs, en 1887, il a proposé une explication de l'effet photoélectrique observé par Antoine et Alexandre Becquerel 50 ans plus tôt.)

21min30

Au contraire, dans l'interprétation corpusculaire l'énergie du photon est $h\nu$ et se répartir en une partie cinétique, et une partie d'arrachement constante pour un métal d'électrode donné. De plus, l'énergie cédée au photon est celle d'une électrode seulement et le potentiel d'arrêt ne doit pas dépendre de la puissance du flux lumineux. Cette vision permet bien d'expliquer l'effet photoélectrique.

24min

II. Description corpusculaire : le photon

1. Energie, masse, impulsion du photon.

Energie $E = h\nu$

Vitesse c (vitesse de la lumière dans le vide) : particule par essence relativiste.

$E = \gamma mc^2$ or γ tend vers l'infini (v tend vers c) donc l'énergie du corpuscule ne sera finie que si sa masse est nulle et ainsi $E = p^2c^2 + m^2c^4 = (pc)^2$ et ainsi son impulsion est $p = E/c = \hbar k$

Propriété mécanique de ces corpuscules dépendent paramètre ondulatoire

27min

2. Réinterprétation de la pression de radiation.

Schéma de la pression de radiation (particule arrive sur un miroir avec un angle). Calcul usuel de la pression de radiation en faisant apparaître le flux d'énergie incident du rayonnement).

AN : pour un laser usuel (1J/ns sur une surface de 0,1mm de rayon en incidence normale) on obtient une pression de radiation de 10^8 Pa

pour le laser mega joule ($E = 10^6$ J, $P_{\text{rad}} = 10^{14}$ Pa)

Ralentissement d'atomes : Jet d'atomes de masse m , vitesse v . On peut les ralentir en les bombardant de photon d'impulsion $\hbar k$. L'atome va voir sa quantité de mouvement diminuer (il absorbe une quantité de mouvement contraire).

ODG : Atome de Sodium $T = 300$ à 400 K donc $v = 10^3$ m/s et $v_{\text{rec}} = 3$ mm/s... négligeable, mais il va réémettre le photon absorbé etc de sorte qu'au total on a une décélération de 10^6 m/s².

35min

3. Moment cinétique

Une onde électromagnétique peut être associée un rayonnement EM. Couple exercé par l'onde permet de modifier le sens de rotation d'une particule.

Le moment cinétique dépend de polarisation de l'onde ($S = \pm \hbar$). Si on utilise un cristal biréfringent pour changer la polarisation de l'onde, celui-ci doit exercer sur le photon un couple pour en changer le sens de rotation (Experience de Beth, 1936)

Slide : grain de calcite biréfringent, expérience de Moothoo et al

(Beth's experiment using optical tweezers, D. N. Moothoo, et al, Am Journal of Physics **69**, 271-276 (2001))

38min

Conclusion : la vision ondulatoire ne suffit pas à décrire toutes les expériences. L'existence du photon n'a été définitivement prouvée qu'en 1977.

Slide de l'expérience de Kimble, Dagenais et Mandel. Les détections de photon sur deux détecteurs sont parfaitement incohérentes : le rayonnement est constitué d'unités insécables, le photon. Ouverture sur l'interprétation corpusculaire des manifestations ondulatoires de la lumière (diffraction, interférences...)

Questions posées par l'enseignant

- Dans le corps noir, où intervient l'interaction avec la matière ? Où intervient l'hypothèse de corps noir ?

La matière permet au corps de se placer à l'équilibre thermique. Le corps présenté n'est pas un corps noir en soit, mais après interaction avec la matière son rayonnement est celui d'un corps noir. Pour avoir établissement de l'équilibre entre les radiations de différentes fréquences on doit ajouter une hypothèse sur la matière : elle doit permettre la conversion d'une longueur d'onde vers une autre (ça fait partie de la définition du corps noir...)

- Structure du champ stationnaire : ok pour les conditions limites spatiales mais quelle est la direction de E_0 portant le champ dans une enceinte 3D avec 6 parois... ?

Elle peut difficilement être perpendiculaire à toutes les parois comme dans le cas simple d'une enceinte 1D... En fait la condition avec des sinus seulement ne peut être vraie : E doit ne pas s'annuler aux parois, au moins dans une direction d'espace. Le mieux est en fait d'utiliser des CL périodiques.

- Dans le calcul de Planck, pourquoi le passage de l'intégrale à la somme fait disparaître la divergence ?

Le pas de quantification est d'autant plus grand que la fréquence est importante : on a beaucoup moins de modes à peupler à haute fréquence !

- Rayleigh puis Planck puis Einstein... Est-ce que cette petite histoire est vraie ? Est-ce que c'est Planck qui a déterminé la valeur de la constante de Planck ?

Rayleigh : entropie seule, Planck repart du raisonnement est fait le lien avec Wien pour définir une entropie de rayonnement - ... c'est très extrapolé ! En vrai il y a trois étapes dans le raisonnement de Planck : 1) propose une loi pour extrapoler le rayonnement du corps noir 2) utilise la méthode de Ludwig Boltzmann pour faire un calcul statistique dans lequel on discrétise l'espace des phases et faire tendre la taille des cellules vers 0 sans faire tendre la taille vers 0 ! 3) Interprétation en terme de quanta. Einstein reprend tout un tas d'expérience et de raisonnement qui viennent la vraisemblance thèse du corpuscule... Prédiction confirmées l'année suivante par Millikan, permettant de mesurer la constante h !

Pour calculer l'entropie avec l'intégrale il rester un dv à la fin... Quelle est l'importance de la valeur de dv ?

On s'est intéressé à l'entropie du rayonnement à dv autour de v . C'est l'entropie pour une bande spectrale donnée. Comme on fait une différence d'entropie à la fin cela n'a guère d'importance...

- Dans ce calcul N apparaît. Ok pour son interprétation mais comment on le fait apparaître ?

Comparaison avec la formule pour le gaz parfait : $U_{kb}/h.v$ équivalent à Nk donc $U = Nh.v$

- Existe-t-il une différence entre le gaz parfait et le gaz parfait de photon ? Une propriété thermodynamique fondamentale ?

Le gaz parfait d'atome se thermalise de lui-même par chocs, le gaz de photon a besoin d'interagir avec la matière. Fondamentalement, il n'y pas conservation du nombre de photon : le potentiel chimique du gaz de photon est nul !

- Einstein avait prédit le résultat de l'effet photoélectrique, l'expérience réalisée par Millikan l'année d'après. Dans cette expérience si on augmente beaucoup la puissance pour une couleur donnée cela change-t-il qqch à l'observation ?

Si on augmente vraiment la puissance on va augmenter la probabilité d'absorber plusieurs photons.

- Quelle est l'origine physique de W_s : énergie à fournir pour arracher un électron. Pourquoi cette énergie existe ? énergie potentielle de l'électron est abaissée dans un métal en comparaison de l'état libre, il faut donc fournir cette différence d'énergie)
- Comment serait modifiée la conservation de l'énergie pour des processus à 2 photons ?

On aurait $2h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + W_s \dots \nu$ peut alors valoir la moitié de ce qu'il aurait valu dans le processus à un photon !

- Démonstration que la masse du photon est nulle. Est-ce qu'on ne peut pas imaginer une démonstration un peu plus quantique ?

Portée du rayonnement infini : la particule est forcément de masse nulle. Equation de Klein-Gordon (en gros Schrödinger relativiste)...

- Sur les atomes : on doit effectivement satisfaire la conservation de l'impulsion, mais aussi la conservation de l'énergie : qu'est-ce qu'elle apporte ?

Il faut que le photon soit résonnant avec les transitions de l'atome, dans le référentiel de l'atome (attention à Doppler) il faut fournir l'énergie de recul en plus à l'atome.

- Pourquoi les atomes de sodium vont à 300 m/s ? lien avec la vitesse du son ? Y a-t-il une raison pour que les particules dans un jet se déplacent à la vitesse du son ?
- Comment passe-t-on de l'impulsion par photon à une force ? Quelle est la cadence à laquelle on absorbe et on réémet ? Quel est le temps pris pour l'AN ? Durée de vie de l'émission spontanée .
- Effet de l'émission spontanée ?
- Quel est le spin du photon : spin 1, mais sa projection $m=0$ (état d'hélicité nulle) est interdit par la mécanique quantique relativiste. Comment on peut-on montrer la correspondance entre spin et polarisation (géométriquement, simplement...) ?
- Expérience de Kimble : hypothèse sur le champ?
-

Commentaires donnés par l'enseignant

C'est plutôt une bonne leçon, mais on peut cependant déplorer qu'autant de temps ait été consacré au début du plan, laissant une partie minoritaire à l'exposé des propriétés du photon, et presque rien aux applications.

Je ne pense pas pertinent de passer autant de temps due la théorie du corps noir dans cette leçon, c'est plutôt un sujet de physique statistique. Notamment le calcul d'Einstein relatif à l'entropie du gaz de photons est assez technique et difficile à faire passer.

L'essentiel des autres commentaires sont insérés dans le compte rendu et présenté comme des éléments de réponse dans les questions posées.

Partie réservée au correcteur

Avis sur le plan présenté

Le plan est globalement acceptable, ses défauts sont surtout une question d'équilibre entre les différentes parties du sujet, et notamment entre les aspects historiques et modernes.

Concepts clés de la leçon

Les relations de proportionnalité entre les densités d'énergie, d'impulsion et de moment cinétique d'une onde électromagnétique rendent plausible une structure corpusculaire avec les caractéristiques unitaires $E = \hbar\omega$, $P = \hbar k$, $J = \pm \hbar$. Ce point de vue peut être appuyé sur des expériences historiques (notamment effet photoélectrique, effet Compton, expérience de Beth), qui toutes corroborent l'hypothèse d'Einstein 1905, mais ne prouvent pas l'existence des photons car elles possèdent aussi une interprétation semi-classique (matière quantifiée et rayonnement classique).

Les preuves ont été fournies plus tard par des expériences portant sur la statistique des photons (unique ou par paires).

Concepts secondaires mais intéressants

Une application au choix à présenter, dont :

Énergie : émission et absorption dans un semi-conducteur (dont cellules photovoltaïques)

Impulsion : refroidissement et piégeage des atomes neutres par laser, voiles solaires

Moment cinétique intrinsèque (polarisation) : pompage optique, polarisation nucléaire de ^3He pour l'IRM.

Complémentarité et intrication : sources de photon uniques, dualité onde corpuscule, cryptographie quantique

Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur)

Effet photoélectrique ou gap d'un semi-conducteur.

Les expériences décisives sont hors de portée, mais on peut avec profit montrer la vidéo sur les franges d'interférences à 1 photon (fondées sur les centres NV) qui montre bien la dualité onde corpuscule.

(LP pas au programme de l'agreg docteur)

Points délicats dans la leçon

Exploiter au maximum l'essentiel des concepts électromagnétiques sous-jacents, sans transformer la leçon de MQ en une leçon d'EM.

Éviter de présenter comme des preuves ce qui ne sont que des indices.

Maîtriser suffisamment une des applications modernes pour en faire une présentation acceptable

Bibliographie conseillée

La bibliographie proposée par le doctorant est convenable, mais j'y ajouterais volontiers le livre de Cagnac et al.

Par contre, les cours d'optique quantique, dont celui de JM Raimond

(<http://www.lkb.upmc.fr/cqed/teaching/teachingjmr/>) sont généralement de niveau M2 et hormis quelques aspects expérimentaux et historiques, sont l'exemple typique de ce qu'il ne faut pas faire dans cette leçon.