

Année : 2020-2021

Passage : Rémi Guillot

Correcteurs : Antoine Essig et Léo Mangeolle

Commentaire général

Le plan de Rémi était habituel et cohérent, mais on peut regretter une partie centrale sur le photon trop courte, et à l'inverse une partie d'application trop longue. Il faut bien centrer cette leçon sur le concept de photon et rappeler, aussi souvent que possible, en quoi le fait qu'on soit en train de parler de quanta d'énergie (et pas juste d'une onde classique) est important dans la discussion. Dans la suite, on reprend le plan en 3 parties et on discute de quelques questions qu'il faut se poser en préparant la leçon.

Commentaires spécifiques

I) Mise en évidence du photon

La seule expérience qui permette vraiment de mettre en évidence de façon indiscutable les photons, c'est l'expérience avec une source de photons uniques ; pour autant, un "faisceau d'indices concordants" c'est aussi très bien - il faut juste savoir les limites de ce qu'on présente. Par exemple, comme mentionné dans un précédent corrigé, l'effet photoélectrique ne permet pas totalement d'exclure que la lumière soit classique, pourvu qu'elle puisse résonner avec une matière traitée quantiquement. Mais bon, en faisant l'hypothèse que la lumière est constituée de photons, on explique quand même une expérience d'une grande richesse et on peut même (cf Aslangul) aller assez loin dans la caractérisation du photon. Il faut faire des choix mais c'est vrai que l'effet photoélectrique est quand même un bel exemple introductif qui a le mérite d'être facilement illustrable par une expérience en direct (si le virus le permet).

Si l'on choisit de parler de la catastrophe ultraviolette, il faut faire vraiment attention quand on présente la loi de Planck. Je ne saurais trop vous recommander la lecture de ce chef-d'oeuvre mésestimé qu'est la correction de la LP17 2019-2020 ; mais j'insiste ici aussi sur l'importance de bien séparer le corps noir du rayonnement d'équilibre thermique. Ici ce qui nous intéresse c'est le rayonnement lui-même et sa densité volumique d'énergie $u(\nu, T)$: ceux-ci sont définis partout,

tout le temps, même dans le vide intersidéral, et ne dépendent absolument pas de l'existence ou non d'éventuels corps noir, gris, ou roses à quelque endroit dans l'Univers. Il est donc très imprudent de passer du temps à définir le corps noir et à s'embourber dans une description de la paroi du corps noir à l'aide d'oscillateurs harmoniques, alors que ce n'est absolument pas le sujet (et d'ailleurs ce n'est pas là qu'on a besoin d'OH). La seule chose dont on a besoin, c'est du fait que la densité d'énergie électromagnétique dans l'espace est donnée par $H = \epsilon_0 E^2/2 + B^2/2\mu_0$ qui montre que le CEM n'est autre qu'un oscillateur harmonique à deux dimensions (on pourrait croire qu'il y en a trois mais il faut faire attention à la fixation de jauge) en tout point de l'espace. Au fait, si on veut discuter Rayleigh-Jeans il faut faire attention au décompte des ddl pour l'équipartition. Dans tous les cas, ce dont on a besoin, c'est d'un CEM à l'équilibre thermique - et c'est tout : le mécanisme par lequel il thermalise en interagissant avec les parois d'un corps noir etc c'est à réserver à la LP17, si on y tient vraiment.

En revanche, il nous semble très important de mettre très clairement en avant la chose la plus importante : le passage d'une intégrale à une somme discrète pour résoudre le problème de divergence. C'est LA chose qui justifie de passer du temps sur le rayonnement d'équilibre thermique (et non pas sur le corps noir, j'insiste!) dans une LP sur le photon. On peut faire le calcul de la fonction de partition éventuellement, et du coup conclure que si photons il y a, ce sont des bosons de potentiel chimique nul. D'ailleurs il ne peut pas y avoir de condensation de Bose-Einstein des photons pour cette raison (il faut, schématiquement, que l'énergie des bosons condensés soit inférieure au potentiel chimique, ce qui est impossible ici).

Il peut être intéressant de ponctuer cette partie (ou l'intro) avec des jalons historiques, par exemple Newton, Fresnel, Planck - et quelques dates qui vont avec. Ce n'est pas une leçon d'histoire des sciences, donc il ne faut pas y consacrer plus de quelques secondes, mais quelques détails par-ci par-là pour contextualiser ça ne peut qu'égayer la leçon.

II) Caractéristiques propres du photon

Cette partie est classique et un peu austère mais on n'a pas trop le choix, et il vaut mieux éviter de tenter des remarques comme "le photon est le boson d'interaction de l'électromagnétisme" qui risquent de débrider l'imagination fertile d'un jury espigle en manque de sensations fortes.¹

Concernant le moment cinétique, plutôt que de faire le calcul très fastidieux du Garing, on peut envisager de présenter rapidement l'expérience de Beth (cf Cagnac) et juste donner le résultat. Note : le photon a un spin 1 mais sa projection sur l'axe de quantification ne peut valoir que ± 1 , la valeur zéro est interdite par le fait que le photon a une masse nulle (pour de sombres raisons d'invariance de jauge brisée par le terme de masse qu'il serait saugrenu de mentionner). D'ailleurs, fait amusant, si on mesure la constante de Stefan on peut du coup montrer qu'il n'y a que 2 ddl et pas 3 dans le champ électromagnétique, et donc, sachant que le photon est de spin 1 (ou même simplement en sachant que c'est un boson) montrer qu'il est de masse nulle. Si on sait qu'il n'y a que deux polarisations, droite et gauche, ça marche aussi.

Il faudrait peut-être mentionner que ces caractéristiques sont des caractéristiques intrinsèques d'un photon, d'extension spatiale et temporelle infinie et n'interagissant avec rien. Sinon, si le photon a un temps de vie fini et vit dans une région confinée de l'espace, son énergie n'est pas exactement fixée, non plus que son impulsion (cf Heisenberg) - il y a un certain étalement. De même, la vitesse d'un photon n'est égale à c que dans le vide absolu - sinon, il y a un indice optique n à prendre en compte.

Tiens d'ailleurs, en général $n(\omega)$: donc un photon un peu étalé en fréquence voit une palette d'indices optiques différents, donc toutes ses composantes ne voyagent pas à la même vitesse, et donc le photon finit écartelé (je n'ai pas la réponse à cette question) ? Au passage, dans un milieu, un photon n'a même pas toujours une masse nulle ! Rappel : quand $\hbar = c = 1$, une masse c'est l'inverse d'une longueur. Un photon massif décrit une interaction de Coulomb écrantée ; c'est le cas dans un supraconducteur (effet Meissner) ou dans un

électrolyte ou un plasma (écrantage de Debye). D'ailleurs (cf la LP sur les OEM dans les conducteurs) l'onde électromagnétique dans un plasma est décrite par l'équation de Klein-Gordon, qui est comme d'Alembert mais avec un terme de masse, justement (et qui est en fait la version relativiste de Schrödinger pour les bosons massifs - le monde est petit). Tout ça est évidemment formellement contre-indiqué à une utilisation à l'oral devant le jury, mais toujours bon à savoir pour éviter de dire des bêtises quand on pourrait ne rien dire, justement !

III) Application au refroidissement d'atomes

Il ne faut pas perdre de vue que c'est une leçon sur le photon, pas sur la pression de radiation (laquelle se comprend très bien classiquement). Donc aussi souvent que possible, rappelez pourquoi ce que vous écrivez découle directement d'une description corpusculaire (et, si jamais l'occasion se présente, pourquoi avec des ondes classiques ça ne marcherait pas... ?). Et aussi, quand on utilise l'équipartition, etc, rappeler qui est classique, qui est quantique, qui est à l'équilibre thermique, etc.

Un autre plan possible, éventuellement (et selon les goûts) serait de faire une partie I sur les "vieilles preuves historiques" (avec l'effet photo-électrique et/ou le corps noir) et une partie III sur les applications récentes, où on mettrait les expériences à photon unique et/ou le refroidissement d'atomes. Tout cela doit tenir en 40 minutes donc bien sûr il va vous falloir faire des choix et traiter les choses de manière à la fois claire et (très) concise, mais n'oubliez pas qu'avec ce format de 40 minutes le jury tolère qu'on fasse moins de choses "en vrai" et plus de choses pendant l'entretien. Après c'est toujours une prise de risque.

Concernant justement la nécessité de ne pas tout dire et de garder des choses sous le coude pour l'entretien : il semble préférable de résister à la tentation de faire de gros appels du pied au jury du genre "là je n'insiste pas mais on pourra y revenir *wink* *wink*". Le problème, c'est que si le jury répond à votre appel et que vous répondez bien, le jury se dira juste "bah oui normal vu l'appel du pied monumental", et si vous n'assurez pas ce sera la catastrophe. Alors que si vous ne dites rien pendant la leçon, le jury pourra se

1. On pourrait par exemple évoquer le lien entre l'écrantage de Debye dans un électrolyte et le boson de Higgs. Le jury (surtout en fin de matinée lorsque son estomac sera tenaillé par la faim) ne se privera pas de se jeter sauvagement sur la moindre affirmation un peu légère que vous laisserez traîner derrière vous !

dire "tiens ce serait intéressant de creuser", il y reviendra pendant l'entretien, et là si vous n'assurez pas le jury se dira "bon, c'est parce que je l'ai pris(e) au dépourvu", et si vous assurez ce sera tout bénéf. Dans le pire des cas le jury n'y reviendra pas et vous aurez préparé un transparent pour rien, mais bon, vous savez déjà que 98% des LP que vous préparez ne vous resserviront pas le

jour de l'oral donc c'est peut-être pas bien grave. ;)

Questions posées

- Pourquoi les phénomènes quantiques s'observent généralement à basse température? *C'est lorsque la longueur d'onde thermique de de Broglie, $\lambda_{dB} \sim \frac{h}{\sqrt{mk_B T}}$, devient grande.*

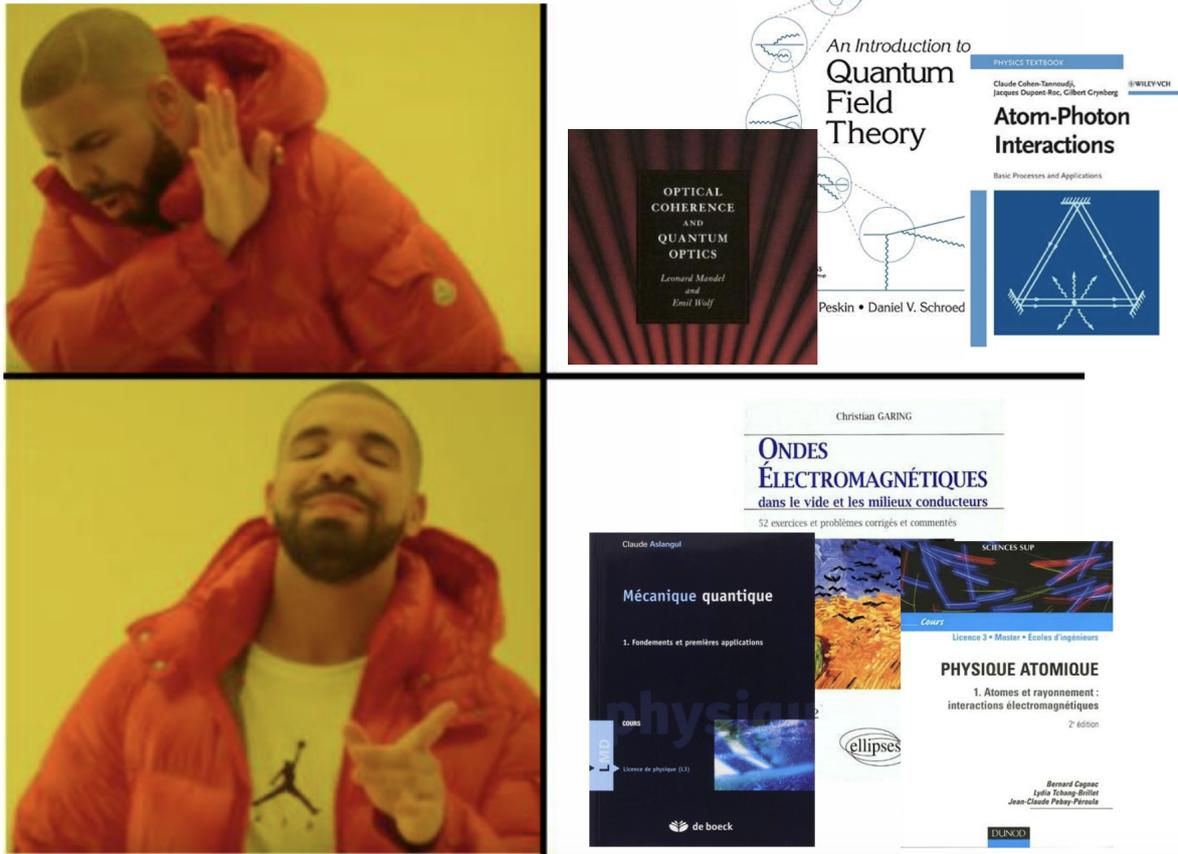


FIGURE 1 – Ceci n'est pas l'équation de Drake. (mais ça reste un bon conseil)