

LP38 – Aspect corpusculaire du rayonnement, notion de photon.

29 juin 2020

Laura Guislain & Pascal Wang

Niveau :

Commentaires du jury

Bibliographie

✦ *Le nom du livre, l'auteur*¹

→ Expliciter si besoin l'intérêt du livre dans la leçon et pour quelles parties il est utile.

Prérequis

➤ prérequis

Expériences

✦ Biréfringence du quartz

Table des matières

1	L'émergence de la notion de photon	3
1.1	Rayonnement du corps noir	3
1.2	Effet photoélectrique	3
1.3	Insécabilité du photon	4
1.4	Bonus : ni particule ni onde	5
2	Caractéristiques du photon	6
2.1	Energie	6
2.2	Quantité de mouvement	7
2.3	Vitesse	8
2.4	Masse	8
2.5	Spin du photon, hélicité	8
3	Applications	10
3.1	Application : refroidissement Doppler, mélasses optiques	10
3.2	Piège magnéto-optique	12
3.3	Bonus : cryptographie quantique, interférences à photon unique, effet Compton.	13
3.4	Compléments	14

Jury

Il ne faut pas oublier que le photon possède un moment cinétique. Les applications ne se limitent pas à l'effet Compton

Préparation

Todo :

- intrication, comment faire ? cryptographie quantique
- optique non-linéaire
- l'inégalité de Bell,
- ex : exp de Hong, Ou et Mandel, <http://paristech.institutoptique.fr/site.php?id=1038&fileid=14447>
- téléportation quantique
- paradoxe EPR
- condensat de Bose-Einstein ; recette et applications.
- horloge atomique
- Effet photoélectrique chez Cagnac et Aslangul : tracé des caractéristiques

Plan : Les étudiants ont déjà vu le photon et la quantification en lycée, pas besoin d'insister sur les aspects historiques

Questions : source à photon unique, expérience ne pouvant pas être expliquée par la dualité onde-corpuscule (cf. infra), effet Compton (odg...)

Commentaires : *La collision Compton est une collision élastique, où l'on peut écrire la conservation du quadri-vecteur énergie-impulsion. Au contraire, la collision photoélectrique est inélastique : le photon incident est détruit et son énergie n'est pas entièrement convertie en énergie cinétique de l'électron, puisqu'une partie constitue le travail d'extraction.*

Introduction

Nature de la lumière La description de la lumière a souvent été un sujet de discorde au cours de l'histoire : est-elle une onde ? est-elle composée de corpuscules ? Au XIXe siècle, la théorie dominante était en faveur de la nature ondulatoire de la lumière notamment grâce aux interférences réalisées avec les fentes d'Young et aux équations de Maxwell. Cependant, à la fin du XIXe siècle-début du XXe, il apparaît que décrire la lumière comme une onde n'est pas suffisant pour décrire certains phénomènes et notamment, il a été vu dans une leçon précédente, pour expliquer le rayonnement d'équilibre thermique du corps noir.

Problématique Pourquoi a-t-il été nécessaire d'introduire la notion de photon ? Est-elle pertinente ? Quelles sont les caractéristiques de ce corpuscules et comment peuvent-elles être mises à profit pour des applications actuelles ?

1 L'émergence de la notion de photon

La notion de photon a émergé comme une nécessité historique.

1.1 Rayonnement du corps noir

Aller rapidement car c'est en prérequis, ou passer en introduction.

Comme on l'a vu dans le chapitre consacré au rayonnement d'équilibre thermique, la description du corps noir et notamment ce qu'on appelle la catastrophe UV a amené Planck en 1900 à introduire une quantification des échanges d'énergie entre le rayonnement EM et la matière sont quantifiés avec pour quantum, à fréquence fixée, $E = h\nu$. Son modèle a ainsi pu décrire la répartition spectrale d'énergie observée expérimentalement. Historiquement, c'était la première fois que l'idée de quantification a été introduite.

Cependant, la notion de quantum d'énergie n'a été introduite que comme un intermédiaire de calcul. Planck n'attachait pas de réalité physique à son hypothèse. En revanche, en 1905, Einstein interprète physiquement la quantification utilisée par Planck en introduisant le concept de photon afin d'expliquer l'effet photoélectrique, observé par Becquerel (1839), Hertz (1887) (PN Einstein 1925).

1.2 Effet photoélectrique

Manip : effet photoélectrique, électroscope

Présentation Vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=z-3XaXCvjZw#t=1m11s> L'électroscope est constitué d'une plaque de zinc que l'on va pouvoir charger négativement par frottement. Elle est reliée à un barreau métallique à l'intérieur de l'enceinte sur lequel se trouve une tige métallique pouvant tourner. [On commente les schéma](#) On charge une tige par frottement pour charger l'électroscope. Les tiges se repoussent par interaction Coulombienne. En illuminant l'électroscope à l'aide d'une lampe spectrale émettant dans l'UV, on observe un déplacement des tiges, qu'on interprète comme le métal qui se décharge. Les UV arrachent des électrons au métal. *Il faut à tout prix porter des lunettes et utiliser un verre protecteur pour l'assemblée.*

Démonstration que ce sont les UV qui jouent Vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=z-3XaXCvjZw#t=2m31s> Pourquoi les UV ? Parce que si l'on met une plaque de verre, opaque dans l'UV, entre électroscope et lampe, on n'observe pas le phénomène. Cette expérience simple montre que la lumière peut arracher des électrons à la matière et que cette capacité dépend de la fréquence. Ici, on ne peut pas aller beaucoup plus loin que cette constatation qualitative. On ne prouve pas l'existence d'un seuil par ce biais, ni l'indépendance à l'intensité lumineuse.

Description : effet photoélectrique L'effet photoélectrique désigne l'émission d'électrons par un métal illuminé par un rayonnement électromagnétique, avec un effet de seuil qui dépend de la fréquence, et non de l'intensité soumis à l'action de la lumière. [Un petit dessin !](#)

Expérience de Millikan En faisant des expériences plus poussées, comme celle de Millikan. [Schéma, inspiration le Bellac](#), qui utilise une photocathode. Le principe d'une photocathode : dans une ampoule sous vide, une plaque métallique, la photocathode, est soumise à un rayonnement lumineux qui arrache des électrons au métal. Ces électrons

sont collectés dans une anode mise à un potentiel V_0 . En mesurant le potentiel V_0 pour lequel le courant s'annule, on mesure l'énergie cinétique du photon émis $E_c = |qV_0|$. On fait alors les observations suivantes :

- Il existe une fréquence seuil que l'on note ν_s en-dessous de laquelle il n'y a pas d'effet.
- L'énergie cinétique des électrons arrachés est une fonction affine de ν uniquement. On pourrait s'attendre à ce que ce soit proportionnel à l'intensité avec une théorie ondulatoire. [On montre un graphe schématique.](#)

Interprétation Le phénomène de seuil en fréquence n'est pas avec une théorie classique. Pour arracher un électron, il faut fournir un certain travail d'extraction W_s , qui dépend du matériau. Or un rayonnement classique apporte continuellement de l'énergie, où l'énergie électromagnétique volumique est proportionnelle au carré du champ E, indépendant de la fréquence. Donc si on attend suffisamment longtemps, on observerait l'effet photoélectrique. Ce n'est pas le cas.

Interprétation : quantification et photon Pour comprendre ce phénomène, Einstein a repris l'idée de la quantification de Planck. Son hypothèse est que la lumière est composée de "quanta" d'énergie $h\nu$. On aurait alors l'effet photoélectrique comme conséquence d'une collision inélastique entre un de ces quanta et un électron de la plaque. Donc par conservation de l'énergie, il faut que le photon incident ait une énergie $h\nu \geq W_s$, d'où l'effet de seuil. De plus, l'énergie cinétique est la différence, $h\nu = W_s + E_c$ avec W_s , d'où le profil affine. De plus, la valeur de h coïncide avec celle du rayonnement du corps noir.

Ordre de grandeur Pour le zinc, $W_s = 4.33\text{eV}$ donc $\lambda_s = 290\text{nm}$, ce qui correspond bien à des rayonnements UV. Le photon optique a une énergie de l'ordre de 1 eV.

Interprétation alternative Toutefois l'argument n'est pas entièrement convaincant, car l'effet photoélectrique peut s'expliquer dans le cadre d'une théorie où le champ électromagnétique est classique mais c'est le matériau/détecteur qui est quantifié. Les "clics" du détecteur seraient simplement des excitations collectives des électrons, dont les niveaux d'énergie sont quantifiés, en réponse au champ EM continu. Mais la nature quantique des atomes n'a été mise en évidence que plus tard en 1914 par l'expérience de Franck et Hertz.

Bonus : intensité et saturation Pour l'expérience de l'effet photoélectrique, l'existence d'une intensité de saturation n'a pas vraiment été établie contrairement à ce qui était annoncé : au début, on arrache de plus en plus d'électron, ce qui augmente l'intensité du courant puis lorsque tous les électrons sont concernés, l'intensité ne peut plus croître et on observe un phénomène de saturation. Dans l'exposé, le point traité à propos du pallier concernait l'influence de la puissance lumineuse sur la valeur du courant de saturation..

↓ *Pour que l'existence des photons (dénomination donnée par Lewis en 1926) soit incontestables, il a fallu attendre les années 1980 avec les sources à photons uniques.*

1.3 Insécabilité du photon

↗ [Wiki antibunching](#)

Historique La première expérience inexplicable sans photon date de 1977 (Kimble et al., <https://authors.library.caltech.edu/6051/1/KIMpr177.pdf>), rendue possible par l'utilisation de tubes photo multiplicateurs, détecteurs très sensibles exploitant l'effet photoélectrique.

Principe Le principe de ces expériences peut être résumé de la manière suivante. Dans le cas de l'expérience de Kimble, une source lumineuse au sodium de base intensité voit sa lumière émise divisée en deux faisceaux par une lame semi-réfléchissante. On place en sortie deux photomultiplicateurs, dont le fonctionnement repose sur l'effet photoélectrique. *Le fait qu'ils enregistrent des coups isolés peut être attribué au caractère quantique du détecteur et non à l'arrivée de photons isolés.* **ODG:** dans l'expérience de Kimble, le laser a une puissance de $0.7\text{mW}/\text{mm}^2$.

Résultats Un photon insécable ne pourra atteindre qu'un seul des deux photomultiplicateurs placé dans chacune des voies à la fois. cf. [magnifique schéma de Benjamin et Vincent](#). Si la sensibilité des capteurs est suffisante à basse intensité, on s'attend à voir une anticorrélation entre les courants en sortie des deux photomultiplicateurs : si l'un des photodétecteurs détecte du courant, pas l'autre. confirmant le caractère corpusculaire de la lumière.

Fonction de corrélation In order to analyse these results in a quantifiable way, it is helpful to introduce the second-order correlation function of the light defined by :

$$g^{(2)}(\tau) = \frac{\langle \mathcal{E}^*(t)\mathcal{E}^*(t+\tau)\mathcal{E}(t+\tau)\mathcal{E}(t) \rangle}{\langle \mathcal{E}^*(t)\mathcal{E}(t) \rangle \langle \mathcal{E}^*(t+\tau)\mathcal{E}(t+\tau) \rangle} = \frac{\langle I(t)I(t+\tau) \rangle}{\langle I(t) \rangle \langle I(t+\tau) \rangle}$$

where $\mathcal{E}(t)$ and $I(t)$ are the electric field and intensity of the light beam at time t . The $\langle \dots \rangle$ symbols again indicate the time average computed by integrating over a long time period.

Let us consider a source with constant average intensity such that $\langle I(t) \rangle = \langle I(t + \tau) \rangle$. We shall also assume from now on that we are testing the spatially coherent light from a small area of the source. In these circumstances the second-order correlation function investigates the temporal coherence of the source. The correlation function $g^{(2)}(\tau)$ can be defined classically in terms of intensity correlations. since the number of counts registered on a photoncounting detector is proportional to the intensity, we can rewrite the classical definition of $g^{(2)}(\tau)$:

$$g^{(2)}(\tau) = \frac{\langle n_1(t)n_2(t + \tau) \rangle}{\langle n_1(t) \rangle \langle n_2(t + \tau) \rangle}$$

where $n_i(t)$ is the number of counts registered on detector i at time t . This shows that $g^{(2)}(\tau)$ is dependent on the simultaneous probability of counting photons at time t on D1 and at time $t + \tau$ on D2. In other words, $g^{(2)}(\tau)$ is proportional to the conditional probability of detecting a second photon at time $t = \tau$, given that we detected one at $t = 0$. This is exactly what the histogram from the HBT experiment with photoncounting detectors records. Hence the results of the HBT experiment also give a direct measure of the second-order correlation function $g^{(2)}(\tau)$ in the photon interpretation of light.

Fonction de corrélation Pour formaliser cela, on définit la fonction de corrélation cf. fiche. Dans le cas classique, elle est supérieure à 1 si $\tau = 0$. L'expérience mesure $g^2(\tau = 0) = 0.4$, soit une anticorrélation, ce qui confirme l'insécabilité du photon. *Théoriquement, on aurait $g^2(\tau = 0) = 0$ strictement s'il y avait qu'un seul atome de sodium isolé.* **ODG:** temps de vie de l'état excité du sodium 16 ns. *The reason why the experimental value was larger was related to the experimental difficulty in arranging that only one atom should be in the field of view of the collecting lens at any one time. In practice, there were sometimes two or more, and this increased the value of $g^{(2)}(0)$ because of the possibility that two photons originating from different atoms should impinge on the beam splitter at the same time, and subsequently produce an event at $\tau = 0$ if the two photons go to different detectors*

Bonus : sur/subpoissonien Une source cohérente est poissonnienne ($g^2(\tau = 0) = 1$), comme un laser monomode, où les photons arrivent avec une statistique de Poisson. Les sources d'intensité fluctuante, par exemple les sources thermiques sont sur-poissonien ($g^2(\tau = 0) > 1$), les photons sont "bunched". Si $g^2(\tau = 0) < 1$, on parle de statistique sub-poissonnienne, les photons sont "antibunched".

Bonus : source de photons uniques The basic idea of a single-photon source is that the source should emit exactly one photon in response to a trigger pulse, which can be either electrical or optical. On envoie des impulsions plus courtes que le temps typique de désexcitation pour n'avoir qu'un seul photon envoyé. Exemples : semiconductor quantum dots, colour centres in diamonds, fluorescent dye molecules doped in a glass or crystal. Exemple concret : the device consisted of a GaAs light emitting diode (LED) with a layer of InAs quantum dots inserted within the active region. The quantum dots were excited by a programmed sequence of current pulses produced by a pulsed voltage source. The current pulse injected electrons and holes into the device, and the quantum dots then emitted a light pulse in response to each trigger pulse. An aperture in the top contact ensured that the light from only a few of the InAs quantum dots was collected. The emission wavelength of a quantum dot depends on its size, which varies from dot to dot due to statistical fluctuations related to the crystal growth. Hence the wavelength varied slightly from dot to dot, which allowed the light emitted from a particular emission line of an individual quantum dot to be selected by using a spectrometer as a spectral filter.

Conclusion de la partie : En conclusion de cette partie, on postule qu'une onde électromagnétique se décrit comme un paquet de particules appelées photons, chaque photon transportant une énergie $E = h\nu$

Bonus : interférences en détectant les photons uniques

http://ressources.agreg.phys.ens.fr/static/Videos/Roch/Interferences_1photon_Roch.mp4
http://ressources.agreg.phys.ens.fr/static/Videos/Roch/Reprint_EPJD_d05194.pdf

1.4 Bonus : ni particule ni onde

➤ Article

Setup On prend un beam-splitter et deux faisceaux. Si la lumière se comporte comme une onde, on place des détecteurs M, N de manière à avoir des interférences constructives sur l'un et destructives sur l'autre. Si la lumière se comporte comme des particules, on s'attend à une détection 50/50 sur M et N. On obtient ni l'un ni l'autre.

Bonus : paper summary In summary, we revisited the wave-particle duality. Specifically, we have shown in theory and experiment that, already for relatively simple instances of quantum-optical setups, a particle and wave

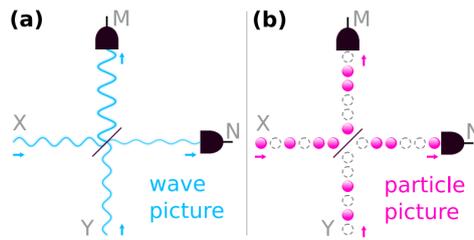


FIG. 1. (a) Two waves interfere constructively (top) and destructively (right) on a 50:50 beam splitter, and these signals are then measured. (b) Incident particles to our device are distributed uniformly to one of the outputs and counted.

interpretation of quantum light simultaneously fails to explain the measured data. This proves that neither the wave nor the particle description is sufficient to explain the properties of light which, consequently, leads to questioning the usefulness of such classical notions in the context of quantum systems. For showing this, we derived criteria which have to be satisfied if either picture provides a valid description of our interference device. This setup was purposefully designed in such a way that it combines components which are naturally connected to only one interpretation of quantum light, i.e., using beam splitters for waves and photon counters for particles. Feeding our device with squeezed states, our analysis showed with high statistical significance that the observed correlations are inconsistent with both the particle and wave model at the same time.

Bonus : onde et particule

On prend une lame séparatrice et dans un bras on fait un Michelson et dans l'autre une expérience HBT (antibunching).

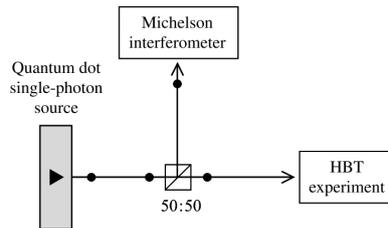


Fig. 6.14 Demonstration of the wave–particle duality of light using a quantum dot single-photon source. A 50:50 beam splitter sends half the photons to a Michelson interferometer and the other half to a HBT experiment. Interference fringes were observed at the same time as antibunching. Details of the experiment may be found in Zwiller *et al.*, *Phys. Rev. B* **69**, 165307 (2004).

↓ Maintenant qu'on a vu que l'existence du photon est nécessaire, on va décrire ses propriétés en tant que particule.

2 Caractéristiques du photon

Raisonnement La description du rayonnement en termes de photon ne doit pas être contradictoire avec ce que l'on sait de l'électromagnétisme et de la relativité. On réinterprète donc des résultats d'EM classique en termes de photons, et on en déduit des conditions pour que l'ensemble ne soit pas incohérent.

2.1 Energie

Dans l'effet photoélectrique, on a déjà vu l'énergie $E = h\nu$. **ODG:** Le photon optique a une énergie de l'ordre de 1 eV. sur Terre, le rayonnement solaire est de 1 mW/mm². Une pupille de surface 1 mm² reçoit, si on assimile le rayonnement à une source monochromatique autour de 500 nm, $dN/dt = 10^{-3}/h\nu = 10^{15}$ photons/s. C'est un nombre macroscopique, ce qui explique pourquoi on ne voit pas la quantification du champ EM à notre échelle.

2.2 Quantité de mouvement

Bonus : alternative 1 : hypothèse de De Broglie D'après l'hypothèse de De Broglie, on a $\vec{p} = \hbar\vec{k} = E/c\vec{u}$.

Calcul électromagnétique Sanz PC dernière édition, p1010. Avec le transfert d'impulsion. ✳ Pour un calcul moins bancal, on peut faire le calcul de pression de radiation sur un conducteur, dans la fiche conducteur. Le calcul est sur fiche. Le champ électrique est transverse donc :

$$\vec{E}(z, t) = E_{0x} \cos(\omega t - kz)\vec{u}_x + E_{0y} \cos(\omega t - kz + \varphi)\vec{u}_y$$

Le champ magnétique se calcule grâce à la relation de structure de l'onde plane dans le vide :

$$\vec{B} = \frac{1}{c}\vec{u}_z \wedge \vec{E} = -\frac{E_{0y}}{c} \cos(\omega t - kz + \varphi)\vec{u}_x + \frac{E_{0x}}{c} \cos(\omega t - kz)\vec{u}_y$$

L'intégrale $\int_{t_0}^{t_0+T} \vec{E}(z, t)dt$ est nulle. $\vec{F} = q(\vec{E}(0, t) + \vec{v} \wedge \vec{B}(0, t))$ puisque la particule reste dans le plan $z = 0$. Donc :

$$\begin{aligned} \int_{t_0}^{t_0+T} \vec{F} dt &= \int_{t_0}^{t_0+T} q\vec{v}(t) \wedge \vec{B}(0, t) dt \\ &= \frac{1}{c} \int_{t_0}^{t_0+T} q\vec{v}(t) \wedge (\vec{u}_z \wedge \vec{E}(0, t)) dt \\ &= \frac{1}{c} \int_{t_0}^{t_0+T} (q\vec{E}(0, t) \cdot \vec{v})\vec{u}_z dt - \frac{1}{c} \int_{t_0}^{t_0+T} (q\vec{v} \cdot \vec{u}_z) \vec{E}(0, t) dt \\ &= \frac{1}{c} \left(\int_{t_0}^{t_0+T} (q\vec{E}(0, t) \cdot \vec{v}) dt \right) \vec{u}_z \end{aligned}$$

car \vec{v} est contenu dans un plan orthogonal à \vec{u}_z b. Le loi de la quantité de mouvement appliquée à la particule dans le référentiel \mathcal{R} s'écrit : $\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}$ donc l'intégrale $\int_{t_0}^{t_0+T} \vec{F} dt$ représente la quantité de mouvement cédée par le champ à la particule en une période. Or la puissance fournie par le champ à la particule est égale $\mathcal{P}(t) = q\vec{v}(t) \cdot \vec{E}(0, t)$ puisque la force magnétique ne travaille pas. La relation établie à la question précédente est donc équivalente à : $\vec{p}_{cd} = \frac{1}{c}\mathcal{E}_{cd}\vec{u}_z$ c. $\mathcal{E}_{cd} = Nh\nu$ où N est le nombre de photons absorbés pendant une période et $\vec{p}_{cd} = N\vec{p}_{photon}$

$$\text{Finalement : } \vec{p}_{photon} = \frac{h\nu}{c}\vec{u}_z$$

Ordre de grandeur Un photon optique a une impulsion de l'ordre de $1\text{eV}/c$.

Limites du modèle ➤ Article (i) A difficulty is that the assumption of plane waves with constant amplitude is an assumption of constant energy and momentum. If the light wave has constant momentum, how can any be transferred to the electron? There are many instances in physics where we ignore the backreaction of a recoiling particle on the system. For instance, according to conservation of momentum, a ball should not bounce off a wall, until it is realized that the ball's change in momentum is absorbed by Earth. Holding the amplitude constant in the current calculation might seem a reasonable approximation, but to be totally consistent we should take into consideration the fact that the electron is accelerating and consequently emits radiation, and with that radiation momentum. A possible classical "out" to this situation is to assert that the energy radiated by the electron must be that lost by the incoming beam. Although this argument is valid in terms of conservation laws, it gives no mechanism for transferring the energy from the incident wave to the electron (ii) To recover the Compton result eventually requires including the radiation-reaction force on the electron, which we now consider, but because this derivation involves the classical radius of the electron, it has already gone beyond the realm of classical electromagnetism. The most straightforward way to deal with the failure of the classical approaches is via the Abraham-Lorentz model, which accounts for the energy radiated by the electron, if in a somewhat ad hoc manner.

Application : voiles solaires le rayonnement électromagnétique exerce une pression de radiation sur la matière. On peut l'utiliser pour propulser des engins spatiaux avec des voiles solaires On montre une photo **ODG:** Au niveau de la Terre, $P_{surf} = 1 \text{ mW/mm}^2$ donc la pression exercée est de $P_{surf}/c \sim 10^{-5} \text{ Pa}$. **ODG:** NanoSail-D2 est une petite voile solaire de 10 m^2 réalisée pour la NASA et qui a été lancée en 2011. Elle subit une poussée de 0.1 mN . **ODG:** Une voile en aluminium de $640\,000 \text{ m}^2$ et 2.5 mm d'épaisseur serait susceptible de transporter 2300 kg de charge utile sur Mars en 400 jours ou 1500 kg de charge utile sur Jupiter en 900 jours ➤ Voiliers de l'espace, Louis Friedmann.

Application : poussière des comètes Dans le cas d'une poussière interstellaire, elle peut devenir plus importante que celle-ci et la résultante des forces sur la poussière est dirigée à l'opposé du Soleil ; la poussière « fuit » le Soleil. C'est ce qui permet par exemple d'interpréter l'orientation de la queue des comètes vers l'extérieur de leur trajectoire autour du Soleil

2.3 Vitesse

Pour tout référentiel galiléen, une onde électromagnétique se déplace à la vitesse c , donc le photon aussi.

2.4 Masse

D'après la relativité restreinte, $E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$ or d'après les relations précédentes, $E = pc$ donc $m = 0$. Les expériences sont compatibles avec une masse inférieure à 10^{-54} kg.

Bonus : si le photon était massif ? Cela entraînerait une limitation de la portée de l'interaction et $O(\hbar/cm)$.

Bonus : relation masse-portée La relation masse-portée est une expression majeure de la compréhension que les physiciens associent aux champs de forces. Elle est obtenue par l'intermédiaire de formules simples associant la mécanique quantique, via les relations d'incertitudes, et la relativité restreinte du fait de l'existence de la limitation des vitesses à c , vitesse de la lumière et de la relation d'équivalence masse-énergie.

Dans l'interprétation moderne de la physique, il n'y a pas d'interaction instantanée et les champs de forces les plus simples, tel le champ électrostatique par exemple, sont interprétés comme le résultat d'échanges, par les particules en interaction, de bosons d'interaction, ou bosons de jauge.

Ces bosons ont des masses directement liées avec la portée de l'interaction. La démonstration de la relation entre m et d repose sur le fait que le boson échangé est dans un état virtuel, et que son existence, nécessitant une énergie $\Delta E = mc^2$ n'est permise que pendant une durée Δt lui permettant de parcourir au mieux la distance $d = c\Delta t$. La relation d'incertitude temps-énergie, $\Delta E \cdot \Delta t \simeq \hbar$ mène alors à $m = \hbar/cd$ soit :

$$d \sim O\left(\frac{\hbar}{m_{boson}}\right)$$

Le photon, boson d'interaction électromagnétique, a une masse nulle caractéristique de la portée infinie. Les bosons d'interaction faible ont des masses compatibles avec la portée très courte (10^{-18}).

En ce qui concerne l'interaction forte on distingue deux niveaux de description : à l'extérieur, et à l'intérieur des baryons, dont les constituants sont les quarks (i) entre les baryons (nucléons, par exemple), la portée de l'interaction (10^{-15}) est compatible avec l'échange de mésons (qui sont des bosons), en particulier les pions ; à l'intérieur des baryons, l'interaction forte concerne les quarks, liés par les gluons, bosons de masse nulle. La relation masse-portée ne s'applique pas directement ici, compte tenu du comportement des gluons dans le cadre de la chromodynamique quantique.

↓ *Un autre aspect fondamental du champ EM est qu'il possède une polarisation. Cette caractéristique peut-elle se retrouver chez le photon ?*

2.5 Spin du photon, hélicité

Le photon possède également un moment cinétique intrinsèque ou spin qui est indépendant de sa fréquence, et qui est égal à 1, ce qui autorise a priori trois valeurs pour sa projection : -1, 0 et 1. La valeur 0 est cependant interdite par la théorie quantique des champs, du fait de la masse nulle du photon. L'amplitude du spin est $\sqrt{2}\hbar$ et la composante mesurée dans la direction de propagation, appelée hélicité, doit être $\pm\hbar$. *On aurait pu le retrouver en faisant un raisonnement classique analogue à celui de l'impulsion.* Les deux hélicités possibles correspondent aux deux états possibles de polarisation circulaire du photon (horaire et anti-horaire). Comme en électromagnétisme classique, une polarisation linéaire correspond à une superposition de deux états d'hélicité opposée.

Moment cinétique d'un photon The angular momentum of a circularly polarised wave is given by the algebraic expression

$$\sigma_z = \pm\hbar = \pm E/\omega$$

avec "+" pour une polarisation circulaire gauche.

Bonus : calcul électromagnétique Calculons tout d'abord $(\vec{O}\vec{P} \wedge \vec{F}) \cdot \vec{u}_z$

$$\begin{aligned} (\vec{O}\vec{P} \wedge \vec{F}) \cdot \vec{u}_z &= (\vec{O}\vec{P} \wedge \vec{E}) \cdot \vec{u}_z + (\vec{O}\vec{P} \cdot \vec{B})\vec{v} \cdot \vec{u}_z - (\vec{O}\vec{P} \cdot \vec{v})\vec{B} \cdot \vec{u}_z \\ &= (\vec{O}\vec{P} \wedge \vec{E}) \cdot \vec{u}_z \end{aligned}$$

puisque \vec{v} et \vec{B} sont perpendiculaires à Oz . En utilisant la relation donnée dans l'énoncé, on

$$\text{obtient : } L_{Oz,cd} = \int_{t_0}^{t_0+T} (\overrightarrow{OP} \wedge \vec{F}) \cdot \vec{u}_z dt = -q \int_{t_0}^{t_0+T} \overrightarrow{OP} \cdot (\vec{u}_z \wedge \vec{E}(0,t)) dt$$

b. Le champ électrique d'une onde polarisée circulairement gauche s'écrit :

$$\vec{E}(z,t) = E_0 \cos(\omega t - kz) \vec{u}_x + E_0 \sin(\omega t - kz + \varphi) \vec{u}_y$$

d'où :

$$\frac{d\vec{E}(0,t)}{dt} = -\omega E_0 \cos(\omega t - kz) \vec{u}_x + \omega E_0 \cos(\omega t - kz + \varphi) \vec{u}_y$$

ou encore : $\frac{d\vec{E}(0,t)}{dt} = \omega \vec{u}_z \wedge \vec{E}(0,t)$

Cette relation traduit simplement le fait que \vec{E} tourne dans le sens direct autour de \vec{u}_z à la vitesse angulaire ωc . On en déduit :

$$\begin{aligned} L_{Oz,cd} &= -\frac{q}{\omega} \int_{t_0}^{t_0+T} \overrightarrow{OP} \cdot \frac{d\vec{E}(0,t)}{dt} dt \\ &= -\frac{q}{\omega} [\overrightarrow{OP} \cdot \vec{E}(0,t)]_{t_0}^{t_0+T} + \frac{q}{\omega} \int_{t_0}^{t_0+T} \vec{E}(0,t) \cdot \vec{v}(t) dt \end{aligned}$$

Le premier terme est nul, le second égal à $\frac{\delta \mathcal{E}_{cd}}{\omega}$, d'où : $L_{Oz,cd} = \frac{\mathcal{E}_{cd}}{\omega}$. Pendant une période, la particule absorbe N photons donc $\mathcal{E}_{cd} = Nh\nu = Nh\omega$ d'où :

$$L_{Oz, \text{photon}, CG} = \hbar$$

4. Si l'onde est polarisée circulairement droite, la relation entre $\vec{u}_z \wedge \vec{E}(0,t)$ et $\frac{d\vec{E}(0,t)}{dt}$ devient : $\frac{d\vec{E}(0,t)}{dt} = -\omega \vec{u}_z \wedge \vec{E}(0,t)$. Il y a donc un simple changement de signe dans la formule finale et :

$$L_{Oz, \text{photon}, CD} = -\hbar$$

Expérience de Beth. ✎ Cagnac L'expérience de Beth réalisée en 1936, permet de mesurer le couple exercé par une onde polarisée circulairement sur une lame demi-onde à l'aide d'un fil de torsion. Parce que la lumière change de sens de polarisation, par conservation du moment cinétique, un moment cinétique est communiqué à la lame. Comme la lumière passe d'une polarisation gauche à une polarisation droite, le couple exercé est de $2P/\omega$ avec P la puissance du faisceau en W. Un miroir et une lame demi-onde permet de doubler l'effet, le couple total exercé est de

$$\Gamma_z = 4P/\omega$$

ODG: Le couple exercé $\Gamma = 4P/\omega$ est très faible : $10^{-15} Nm$, avec $P = 0.1W$ et $\omega = 10^{15} s^{-1}$ Il faut prendre beaucoup de précautions expérimentales : pas de lumière parasite, montage sous vide. Le fil de torsion choisit par Beth est un fil de quartz, de constante de torsion $10^{-12} N.m/rad$. L'angle observé est de l'ordre de 10^{-3} rad, ce qui est observable. *If the quarter-wave plate that polarises the light from the lamp is turned through 90° , so as to invert the sense of the circular polarisation, the effect changes sign. If this sign is changed periodically with time intervals of half the natural period of the torsional pendulum thus created, a sustained oscillation of larger amplitude is produced (see the Einstein-de Haas experiment, section 9.3).*

Bonus : expérience de Beth Disregarding the source of the electromagnetic wave, we may consider the wave and the crystalline foil as forming an isolated system, and apply the general law of conservation of angular momentum to this system. To ensure conservation of angular momentum, it must be accepted that the electromagnetic wave also has an angular momentum σ_{wave} and that its variation is opposed to that of the angular momentum of the crystal, such that $\sigma_{\text{crystal}} + \sigma_{\text{wave}} = \text{constant}$ In a short time interval t , the wave transports an energy $W = Pt$ across the crystalline foil, and undergoes a change of angular momentum.

$$\delta \sigma_{\text{wave}} = -\delta \sigma_{\text{crystal}} = -\bar{\Gamma}_z t$$

that may be defined for each of the special cases previously studied (again this involves the components of wave propagation in the Oz direction). This is shown in the right-hand column of Table 11.1

If a linearly polarised wave, carrying energy W , is changed into a circularly polarised wave, the angular momentum of this wave changes by W/ω . If a circularly polarised wave of energy W is changed into a circularly polarised wave of the opposite sense, its angular momentum changes by twice this amount $2W/\omega$

↓
Rappeler toutes les propriétés dans un tableau récapitulatif.

3 Applications

3.1 Application : refroidissement Doppler, mélasses optiques

⚡ Dangoisse, Fox, Cagnac. Le Bellas horloge atomique.

Intérêts du refroidissement L'intérêt de refroidir des atomes est d'observer des effets quantiques à basse température dans un cadre quasi-idéal où les interactions sont faibles : condensats de Bose-Einstein (1924). L'intérêt technologique se trouve aussi dans les horloges atomiques. Le refroidissement d'atomes a notamment permis de fabriquer des horloges atomiques. Dans un tel dispositif, la précision est limitée par le temps disponible pour la mesure. Ce temps étant directement proportionnel à la vitesse avec laquelle les atomes traversent le dispositif, un gain d'un facteur 100 sur la vitesse des atomes permet de gagner un facteur 100 sur la précision des horloges. Ce gain se répercute directement sur les systèmes utilisant les horloges atomiques, comme les systèmes de positionnement au sol par satellite (GPS). **ODG:** précision : 1 seconde en 100 millions d'années. Ces dernières utilisent des jets atomiques de Césium et un système d'asservissement qui ajuste la fréquence du laser. La transition de l'atome de Césium définit la seconde.

Méthodes de refroidissement Pour refroidir, on peut utiliser des machines thermiques type frigo ou des détentes de gaz. Techniques for achieving very low temperatures (dilution refrigerators, adiabatic demagnetization) have been used for decades by condensed-matter physicists, but the novelty of laser cooling is that it produces of an ultracold gas, in contrast to the condensed-matter techniques which all work on liquids or solids. The atoms in the ultracold gas interact only weakly with each other, which makes it possible to observe low-temperature quantum effects in a nearly ideal system.

Ralentissement et refroidissement Par le théorème d'équipartition, la dispersion des vitesses collectives des atomes c'est aussi leur température.

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}k_B T$$

Bonus : mesure de vitesse Le principe de la mesure de la vitesse consiste à envoyer un faisceau laser sur ces atomes et à enregistrer l'intensité de la lumière de fluorescence lorsqu'on balaye la fréquence de ce laser. En effet, lorsque le laser est résonant, les photons du laser sont diffusés (cycles absorption de photon laser, émission spontanée de photon de fluorescence) et on peut donc récupérer, dans toutes les directions, une lumière de fluorescence. Si les atomes sont immobiles, on produit alors un maximum dans l'intensité de la lumière de fluorescence lorsqu'on vérifie la relation fondamentale $h\nu_{laser} = \Delta E$. En revanche, si les atomes ont une vitesse non nulle en projection selon la direction du faisceau laser, alors un effet Doppler décale la fréquence perçue par les atomes, et la résonance (donc le pic de fluorescence) sera obtenue pour une fréquence différente. On comprend ainsi que l'on accède à la distribution des vitesses en portant l'intensité de la lumière de fluorescence en fonction de la fréquence du laser, si l'on connaît par ailleurs la valeur de la fréquence de résonance pour des atomes immobiles. On aurait pu a priori penser à réaliser une mesure d'absorption, comme celle que nous avons décrite pour présenter le principe de la spectroscopie laser. Cependant, mesurer l'intensité de la lumière de fluorescence permet une mesure sur fond noir, alors que la mesure de l'absorption du laser nécessiterait de détecter une (toute) petite variation sur un signal important. C'est essentiellement pour cette raison qu'on préfère mesurer l'intensité de la lumière de fluorescence

The final temperature can be measured by the time of flight technique. In this method, the molasses beams were turned off and the gas allowed to expand. At a predetermined time later, a probe pulse derived from the same laser was turned on and the fluorescence from the gas was imaged onto a camera. By varying the time between turning off the molasses beams and turning on the probe pulse, the expansion of the gas could be followed and the velocity distribution of the atoms determined. The temperature was then deduced from the velocity distribution.

Principe du refroidissement laser : transfert d'impulsion The idea of using a laser to cool a gas of atoms is, at first sight, rather surprising : we would normally expect a powerful laser to produce a heating rather than a cooling effect. In fact, the technique only works in a very restricted range of conditions with the laser frequency close to resonance with an atomic transition. Le principe repose sur l'échange d'impulsion entre les photons et les atomes. Considérons le cas d'un atome se déplaçant à vitesse v_0 dans une onde laser de fréquence ν résonante avec une de ses transitions et se propageant en sens inverse. L'impulsion de l'atome est alors $m\mathbf{v}_0$ et celle d'un photon $\hbar\mathbf{k}$, où m est la

masse de l'atome et \mathbf{k} le vecteur d'onde du champ laser. Lors de l'absorption d'un photon par l'atome, la conservation de l'impulsion implique que la vitesse de l'atome excité après absorption soit :

$$\begin{aligned}\mathbf{v}_{exc} &= \mathbf{v}_0 + \frac{\hbar}{m}\mathbf{k} = \mathbf{v}_0 + \mathbf{v}_r \\ v_{exc} &= v_0 + \frac{\hbar}{m}k\end{aligned}$$

$\mathbf{v}_r = \hbar\mathbf{k}/m$ est appelée vitesse de recul. Après absorption, l'atome est dans un état excité et sa vitesse a diminué. **Penser à un gardien de foot qui bloque un tir.**

Emission spontanée isotrope Au bout d'un temps dépendant de la durée de vie de ce niveau excité, l'atome se désexcite par émission spontanée ou stimulée. Dans le cas de l'émission stimulée, on retrouve l'état initial. Dans le cas de l'émission spontanée, le photon est émis dans une direction aléatoire et la vitesse finale \mathbf{v}_a de l'atome est :

$$\mathbf{v}_a = \mathbf{v}_0 + \frac{\hbar}{m}\mathbf{k} - \frac{\hbar}{m}\mathbf{k}_s$$

où \mathbf{k}_s est le vecteur d'onde du photon émis spontanément. \mathbf{k}_s a une direction aléatoire mais a toujours le même module : $|\mathbf{k}_s| = |\mathbf{k}|$. Si le processus est répété n fois, la vitesse finale de l'atome est :

$$\mathbf{v}_a = \mathbf{v}_0 + n\frac{\hbar}{m}\mathbf{k} - \frac{\hbar}{m}\sum_i \mathbf{k}_{si} = \mathbf{v}_0 + n\frac{\hbar}{m}\mathbf{k}$$

puisque \mathbf{k}_s a une direction aléatoire et est donc nul en moyenne. Le module de la vitesse finale est donc :

$$v_a = v_0 + n\frac{\hbar}{m}k$$

Ordre de grandeur : atome de césium Ce processus peut-il être efficace pour ralentir des atomes ? Pour répondre à cette question, prenons l'exemple de l'atome de césium. La vitesse des atomes de césium dans une vapeur diluée à température ambiante est typiquement de 300m/s. Pour la raie du césium située à 852nm, la vitesse de recul est $v_r = 3,510^{-3}$ m/s, ce qui semble ridiculement faible pour ralentir un atome se déplaçant à 300m/s. Cependant, la durée de vie du niveau excité du césium est de 310^{-7} s, ce qui fait que le processus peut se répéter jusqu'à 3 millions de fois par seconde ! L'atome peut donc être complètement arrêté en quelques dixièmes de seconde. On peut d'ailleurs calculer que la force qu'exerce la lumière sur l'atome est équivalente à 1800g, où g est l'accélération de la pesanteur. Réduire la vitesse des atomes par cette méthode est donc parfaitement réalisable.

Effet Doppler, utilisation de plusieurs faisceaux L'équation n'aboutit pas à un ralentissement de l'atome : une fois le sens de la vitesse inversé ($n\hbar k/m > v_0$), l'atome est accéléré. Pour éviter cela, on plonge l'atome dans deux ondes contra-propageantes de fréquence inférieure à la fréquence de résonance atomique ν_a . **Pour retrouver le signe, on se souvient si on est sur la plage et que des des petites vagues arrivent, alors il est très intuitif que si l'on nage vers le large, on rencontre alors des vagues plus souvent que si l'on revient vers le bord en nageant avec la même vitesse par rapport au fond. Un déplacement par rapport aux ondes que constituent les vagues engendre donc une modification de la fréquence apparente de cette onde.** Par effet Doppler, l'atome voit toujours l'onde se propageant dans le sens opposé au sien avec une fréquence plus proche de ν_a que l'onde se propageant dans le même sens que lui. L'onde de sens opposé (plus résonante) le freine donc toujours davantage que l'onde de même sens (moins résonante) ne l'accélère. Si l'on fait appel à trois paires de faisceaux lumineux contra-propageants décalés vers le rouge en longueur d'onde, les atomes subissent une force de frottement dès qu'ils se déplacent ; ils sont ainsi repoussés vers le point de convergence des faisceaux à cause de l'effet Doppler, et ils conservent leur très faible vitesse. Ils se retrouvent tcomme englués dans le réseau des faisceaux lumineux comme dans un pot de miel : on parle de mélasse optique. ou refroidissement Doppler.

Bonus : prix Nobel 1997 : Chu, Cohen-Tannoudji et Phillips reçurent le PN pour leurs travaux sur le développement de "méthodes de refroidissement et de piégeage d'atomes par de la lumière laser"

Limite du refroidissement Doppler Dans la pratique, de nombreux processus interdisent de réduire indéfiniment la vitesse des atomes. Par exemple, en utilisant la méthode décrite ci-dessus, on peut ralentir des atomes alcalins jusqu'à des vitesses de l'ordre de 10cm/s, ce qui correspond à une température de quelques centaines de μ K. The Doppler cooling process stops working when the detuning required for cooling becomes comparable to the natural width $\Delta\nu$ of the transition line. In these conditions, the thermal energy of the atom will be roughly equal to $h\Delta\nu$, and therefore the minimum temperature will be given by $k_B T_{min} \sim h\Delta\nu$. On recalling the relationship between the natural line width of the transition and its radiative lifetime, we then find $T_{min} \sim k_B T/\tau$. This shows that the minimum temperature that can be achieved by the Doppler cooling mechanism is limited by the lifetime of the transition. Le résultat rigoureux [Fox] présente simplement un facteur 2. *Alternatively, the frequency of a tunable laser can be*

scanned in a programmed way to compensate for the deceleration of the atoms. This latter technique is called chirp cooling in analogy to the chirping sound made when an audio frequency is rapidly increased, for example, in bird song

Bonus : refroidissement par évaporation Pour atteindre 100 nK, on utilise le refroidissement par évaporation : les particules les plus énergétiques quittent le milieu.

Sub-Doppler cooling, Sisyphus cooling Mécanisme de Sisyphus. On peut aller jusqu'au nK. The interference pattern of the lasers leads to a small periodic modulation of the energies of the ground state levels through the AC Stark effect. The light-induced shifts of the $M_J = \pm 1/2$ magnetic sublevels differ in phase by 180° . As long as the atom stays in the same magnetic sublevel, it moves up and down potential hills, continually converting kinetic to potential energy and back again, but without change of the total energy. However, by careful tuning of the laser, we can arrange that some of the atoms follow the route $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow$ in fig. 11.5. In this case, the atoms are constantly losing energy, because they have to climb to the top of the potential hill, and then drop to the valley again, just like Sisyphus.

Bonus : horloge atomique par fontaine d'atomes froids Un nuage d'atomes de césium est maintenu au centre en lévitation dans le vide à l'intérieur d'un piège magnéto-optique dont les six faisceaux lasers sont représentés. Les atomes sont envoyés vers le haut par une impulsion laser et retombent ensuite sous l'effet de l'accélération de la pesanteur. La détection optique s'effectue sur l'absorption d'un faisceau qui sonde les atomes après leur retombée. Dans ce dispositif, le jet d'atomes effectue une trajectoire comme le jet d'eau dans une fontaine. Il traverse ainsi deux fois, une fois en montant, une fois en descendant, la zone d'interrogation radiofréquence. Le temps de la mesure est celui qui sépare la montée et la descente, typiquement **ODG**: 1s pour des atomes à $4 \mu\text{K}$ dans le piège. Le gain de précision par rapport aux horloges à température ordinaire est de l'ordre de 100. L'exactitude relative des horloges à fontaine est aujourd'hui de quelques 10^{-16} , soit 1s par 100 millions d'années. De nouvelles horloges sont en développement à base de nouveaux atomes froids comme le strontium ou l'ytterbium, qui ont des transitions laser dans le domaine optique et non plus microonde. On en attend une précision encore nettement accrue ; la définition de la seconde pourrait donc bien changer un jour prochain pour passer du césium à un autre atome.

↓ *On a montré comment ralentir les atomes : on a montré un piège en vitesse. Comment piéger en position ?*

3.2 Piège magnéto-optique

Nécessité d'une force de rappel Pourtant le piégeage dans les mélasse optiques ne suffit pas pour les expériences : en effet la force de friction subie par un atome dans une mélasse optique n'est qu'une force moyenne ; à cause de ses fluctuations dues aux absorptions et émissions successives de photons, chaque atome effectue un mouvement erratique et finit par s'échapper de la mélasse optique au bout de quelques secondes. Pour allonger le temps de confinement des atomes, il a donc fallu inventer d'autres méthodes de piégeage faisant appel à une force de rappel.

Piège magnéto-optique On souhaite que les atomes placés au centre de la cellule subissent une force nulle et que, s'ils s'éloignent du centre du piège, ils subissent alors une force qui les rappelle vers le centre. Le moyen pour cela va être l'application d'un champ magnétique, dont la valeur dépend du point considéré dans la cellule. Par effet Zeeman, l'application d'un champ magnétique statique sur les atomes permet de décaler les niveaux d'énergie interne de ces atomes. En décalant ces niveaux, on peut donc décaler la fréquence de résonance, toujours imposée par la relation $E_e - E_f = h\nu$. Si le champ magnétique dépend du point considéré dans la cellule qui contient les atomes, alors la fréquence de résonance dépend elle-même de la position. En pratique, on peut obtenir une distribution de champ magnétique satisfaisante avec des bobines en configuration anti-Helmholtz : deux bobines parallèles, placées symétriquement par rapport au centre du piège, et parcourues par des courants opposés. Avec ces courants opposés, le champ magnétique est nul et minimum au centre du piège. The magnetic field at position (x, y, z) is given by :

$$\mathbf{B} = B'(x\hat{\mathbf{i}} + y\hat{\mathbf{j}} - 2z\hat{\mathbf{k}})$$

where B' is the field gradient. The magnitude of the field is accordingly given by :

$$B = B'(x^2 + y^2 + 4z^2)^{1/2}$$

This has a minimum at the centre of the quadrupole, where the fields from the two coils cancel. The energy of a magnetic sub-level in a magnetic field B is given by the Zeeman energy :

$$E = g_J \mu_B B M_J$$

where g_J is the Landé g -factor. States with $M_J > 0$ have their lowest energy when B is smallest, and they are therefore called 'low-field seeking' states. States with $M_J < 0$, by contrast, are high-field seeking. The quadrupole field creates an attractive potential for atomic states with $M_J > 0$ but repulsive for states with $M_J < 0$. The depth of the potential trap is of magnitude $\sim \mu_B B$, which corresponds to a temperature of only 0.67K for a trap with a maximum field of 1T. The trap therefore only works for very cold atoms, which is why it must be combined with laser cooling techniques to work effectively.

De façon analogue à ce qu'il se passe avec la mélasse, si l'atome est décalé vers la gauche du centre du piège, on veut faut que le laser de gauche exerce une force plus importante que le laser de droite. La situation doit être renversée pour un atome décalée à droite du centre du piège. On réalise cette situation en jouant sur les polarisations respectives des deux faisceaux contra-propageants. La dissymétrie entre les forces exercées par les deux lasers contra-propageants (pour une direction donnée) vient du fait que l'on choisit des polarisation circulaires de sens opposé.

Avec de tels pièges magnéto-optiques, on arrive à confiner des milliards d'atomes pendant plusieurs minutes.

Piège par déplacement lumineux Une autre méthode de piégeage consiste à utiliser les déplacements lumineux, c'est-à-dire la modification des niveaux d'énergie atomiques par un champ lumineux. Un faisceau laser relativement intense est focalisé au centre de l'enceinte à vide, la fréquence lumineuse étant choisie notablement inférieure à la fréquence de résonance atomique. Les déplacements lumineux produits par le laser forment alors un puits de potentiel pour les atomes refroidis, qui viennent s'accumuler au voisinage du foyer lumineux. Ces pièges purement optiques sont de plus en plus utilisés, ils offrent sur les pièges magnéto-optiques l'avantage de ne pas requérir de champ magnétique et aussi d'utiliser des lasers courants dans le commerce et dont la longueur d'onde peut être très décalée par rapport à la résonance atomique.

Bonus : recette pour condensat de Bose-Einstein

Voilà une "recette" pour faire des condensats :

- On ralentit d'abord un jet d'atomes avec un laser à résonance allant en sens opposé au jet. Pour compenser l'effet Doppler et le changement de fréquence apparente au cours du ralentissement, on utilise un ralentisseur à effet Zeeman qui crée un gradient de champ magnétique tout le long du ralentissement.
- Une fois qu'ils sont à une vitesse faible (20 cm/s), on les piège en allumant six faisceaux contra-propageants dans les trois directions de l'espace. On obtient une mélasse optique. La force qui retient les atomes est une force de frottement visqueux (pression de radiation). C'est le principe du refroidissement Doppler Avec une mélasse optique, on ne piège pas les atomes durablement. Il faut un piège magnéto-optique : on rajoute un gradient de champ magnétique qui correspond à l'analogie d'une force de rappel pour les atomes vers le centre du piège. Dans un piège magnéto-optique la température est de 100 μ K.
- Pour arriver au condensat, il faut réaliser un refroidissement par évaporation consistant à diminuer la profondeur d'un piège (optique ou magnétique) : on perd des atomes mais on garde les plus froids donc dans l'ensemble, on refroidit. Et là on peut arriver aux températures de condensation, environ 100 nK.

3.3 Bonus : cryptographie quantique, interférences à photon unique, effet Compton.

Conclusion

Ouverture : La mise en application de l'interaction lumière-matière i.e. photons-atomes avec les lasers dans les années 1960 a permis en parallèle le développement de l'optique non-linéaire et en particulier la mise en place de sources de photons intriqués. De Depuis de nombreuses expériences avec des photons intriqués ont été réalisées : test d'idées fondamentales comme la confirmation expérimentale de la violation l'inégalité de Bell, autres expériences non explicables par la théorie classique (ex : exp de Hong, Ou et Mandel, <http://paristech.institutoptique.fr/site.php?id=1038&fileid=14447>, téléportation quantique. Avoir de la culture sur l'inégalité de Bell, l'article EPR, interprétation de Copenhague, les différents types d'intrication, les sources de photons intriqués... Voir Fox, chp14.

Ouverture alternative Refroidissement qui permet d'atteindre un état de la matière particulier, le condensat de Bose-Einstein. Un exemple de à quoi peut "servir" un condensat de Bose-Einstein : ralentir, voire même arrêter (!!!!!), la lumière, <https://www.pourlascience.fr/sd/physique/la-lumiere-ralentie-4464.php> <https://www.nature.com/articles/17561.pdf> 2001 : Cornell, Ketterle, Wieman reçurent le PN pour "la réalisation de la CBE dans des gaz dilués d'atomes alcalins et pour les premières études fondamentales des propriétés des condensats".

Compléments/Questions

3.4 Compléments

Prix Nobel en lien avec la notion de photon

Prix Nobel attribués en lien avec la notion de photon :

- 1918 : Max Planck « en reconnaissance des services rendus pour l'avancement de la physique dans la découverte des quantas d'énergie »
- 1921 : Albert Einstein « pour les services rendus à la physique théorique, spécialement pour la découverte de la loi de l'effet photoélectrique »
- 1923 : Robert Andrews Millikan « pour son travail sur les charges électriques élémentaires et sur l'effet photoélectrique »⁴²
- 1927 : Arthur Compton « pour la découverte de l'effet portant son nom » (partagé avec Charles Thomson Rees Wilson)
- 1965 : Sin-Itiro Tomonaga, Julian Schwinger et Richard Feynman « pour leur travail fondamental sur l'électrodynamique quantique, avec de profondes conséquences sur la physique des particules élémentaires »
- 2005 : Roy J. Glauber « pour sa contribution à la théorie quantique de la cohérence optique » (partagé avec John Lewis Hall et Theodor W. Hänsch)
- 2012 : Serge Haroche « pour des méthodes permettant la mesure et la manipulation de systèmes quantiques individuels » (partagé avec David Wineland)

Sources de photons uniques : A l'aide d'une impulsion d'excitation laser de durée δt , un émetteur unique isolé spatialement est porté de son niveau fondamental vers un niveau excité, de durée de vie τ_0 . Dans la limite où la durée δt de l'impulsion de pompe est très petite devant τ_0 , l'émetteur individuel ne peut réaliser qu'un unique cycle de fluorescence pour chaque impulsion d'excitation. (ps : plusieurs transitions à partir de l'état excité, on met un filtre pour récupérer un unique photon). Le processus d'absorption-émission de l'émetteur individuel conduit ainsi à l'émission d'un train de photons uniques, synchrone des «tops» d'excitation. Grâce aux développements récents des techniques de détection et de manipulation d'objets quantiques à l'échelle individuelle, de telles sources synchrones de photons uniques ont été réalisés à l'aide d'une très grande variété d'émetteurs tels, des molécules, des ions piégés, des atomes piégés, des boîtes quantiques semi-conductrices en micro-cavités ou en cristal photonique et encore des nanocristaux colloïdaux.

Condensat de Bose Einstein :

- On ralentit d'abord un jet d'atomes avec un laser à résonance allant en sens opposé au jet. Pour compenser l'effet Doppler et le changement de fréquence apparente au cours du ralentissement, on utilise un ralentisseur à effet Zeeman qui crée un gradient de champ magnétique tout le long du ralentissement.
- Une fois qu'ils sont à une vitesse faible (20 cm/s), on les piège en allumant six faisceaux contra-propageants dans les trois directions de l'espace. On obtient une mélasse optique. La force qui retient les atomes est une force de frottement visqueux (pression de radiation). C'est le principe du refroidissement Doppler dans une direction de l'espace. Avec une mélasse optique, on ne piège pas les atomes durablement. Il faut un piège magnéto-optique : on rajoute un gradient de champ magnétique qui correspond à l'analogue d'une force de rappel pour les atomes vers le centre du piège. Dans un piège magnéto-optique la température est de $100\mu\text{K}$
- Pour arriver au condensat, il faut réaliser un refroidissement par évaporation consistant à diminuer la profondeur d'un piège (optique ou magnétique) : on perd des atomes mais on garde les plus froids donc dans l'ensemble, on refroidit. [figure du Fox très claires]
- Et là on peut arriver aux températures de condensation, environ 100 nK.

Utilisation du condensat : ralentir la lumière

- Ingrédients : un laser de commande, un condensat de Bose Einstein et une impulsion lumineuse (laser)
- Principe : (i) un laser de commande rend le gaz transparent à une fréquence bien précise (transparence induite, optique cohérente non linéaire). L'impulsion lumineuse le traverse alors **sans être absorbée** mais l'indice est très élevé (odg diamant ne ralentit la lumière que d'un facteur 2.4) et donc la lumière est ralentie. (ii) Pourquoi des atomes froids? Pour minimiser la dispersion. Car sinon l'effet Doppler intervient, et le milieu n'est pas transparent pour tout le faisceau (la transparence induite se fait sur une petite largeur spectrale).

- "Nous avons créé les conditions nécessaires à l'obtention de la transparence électromagnétique induite dans un nuage d'atomes de sodium en forme de cigare – d'environ 0,2 millimètre de longueur et 0,05 millimètre de diamètre – piégé dans un champ magnétique et refroidi à moins de un millionième de degré au-dessus du zéro absolu."
- "Puisque le front avant de l'impulsion se déplace très lentement dans le nuage, alors que la partie arrière de l'onde arrive à toute allure, l'impulsion se tasse, telle un accordéon, dans le nuage de sodium. Sa longueur, comprimée d'un facteur 20 millions, n'est plus que de un vingtième de millimètre. L'impulsion ainsi concentrée ne devrait-elle pas devenir extraordinairement intense? Il n'en est rien : l'intensité lumineuse reste constante. Plus précisément, dans le vide, l'impulsion contient 50 000 photons; dans le nuage, elle ne contient plus sous forme d'énergie lumineuse, que l'équivalent de un quatre centième de photon (encore le facteur 20 millions). Qu'est-il arrivé à l'énergie des autres photons? Une part de cette énergie a été dissipée dans le nuage et cédée aux atomes de sodium, mais l'essentiel a été transféré au faisceau de couplage. Nous avons surveillé l'intensité du laser de couplage et nous avons observé ce transfert d'énergie."
- On peut cependant obtenir le ralentissement ultime, l'arrêt total de la lumière, sans perdre l'impulsion par absorption : on éteint le faisceau de couplage pendant que l'impulsion, ralentie et comprimée, se trouve toute entière dans le condensat, au cœur du nuage. L'impulsion lumineuse s'arrête et ne contient plus d'énergie lumineuse. Le polariton laisse sur les orientations des atomes du gaz froid une empreinte stationnaire qui constitue une sorte d'enregistrement de l'impulsion. Le polariton n'est pas déformé au cours de l'opération car, contrairement à l'impulsion lorsqu'elle pénètre dans le gaz, il ralentit d'un seul bloc. L'empreinte laissée sur les atomes contient toute l'information nécessaire pour reconstituer l'impulsion lumineuse originelle. Ainsi, par exemple, l'intensité de l'impulsion en chaque point est donnée par les proportions des états 1 et 2. En somme, c'est un hologramme de l'impulsion qui se trouve imprimé dans le condensat.
- Lorsqu'on l'éclaire à nouveau le condensat avec le laser de couplage, l'impulsion lumineuse réapparaît et se propage à nouveau comme si rien ne l'avait interrompue. Toutefois, on ne peut stocker la lumière que durant une milliseconde tout au plus (si elle n'avait pas été piégée, elle aurait parcouru pendant ce temps 300 kilomètres dans l'air). Plus l'impulsion reste stockée longtemps, plus elle se dégrade : les atomes du gaz restent, même dans le condensat, animés de mouvements erratiques, qui finissent par brouiller la configuration de polarisation.

Photons intriqués : [todo]

Cryptographie quantique : [todo]

Questions

- Est-ce que l'effet photoélectrique montre la nature corpusculaire de la lumière? Quelle expérience montre cet aspect? L'effet Compton est-il important? Expliquez nous les figures d'interférences à photons uniques
- Effet photoélectrique : pouvez-vous réexpliquer pourquoi le courant de saturation ne dépend que de l'intensité lumineuse? A quoi correspond le travail d'extraction? Comment créer une source à photon unique? Quelle expérience pour savoir si une source est une source à photon unique? Pourquoi est ce important que le moment cinétique du photon ne peut prendre que deux valeurs? Vous avez dit que c'était les polarisations circulaires droite et gauche, est ce que ça peut être des elliptiques? Application de l'effet photoélectrique? Expérience faisant intervenir l'aspect corpusculaire du photon? Expérience ne pouvant pas être expliquée par la dualité onde-corpuscule? Comment expliquer la formule de la pression de radiation avec l'aspect ondulatoire?
- La force de Lorentz est orthogonale à la direction de propagation alors que l'interprétation en terme de photons donne une force selon la propagation.
- Quelle seraient les conséquences si le photon était massif? (limitation de la portée de l'interaction).
- Quel est le rôle de la force de frottement dans l'existence d'un moment dipolaire dans le modèle de l'électron élastiquement lié? Quelle est son origine? (j'ai répondu que c'était dû à la perte d'énergie d'une particule chargée accéléré et que cela induisait un déphasage entre le champ E polarisé circulairement et l'électron d'où un moment).
- L'effet Compton et sur l'aspect déterministe du calcul alors qu'a priori on a des ondes et des probabilités (en fait dans le calcul on suppose l'angle de déviation theta).
- Oscillations de l'aiguille de l'électroscope? Quand on fluctue la distance de la palette chargée, l'effet de charge par influence fluctue.
- Vous dites que la lumière a toujours un moment cinétique. On observe de la lumière polarisée linéairement? C'est une superposition de polarisations circulaires.

- Cadre (thermodynamique) et raisonnement de la formule de Rayleigh-Jeans? On se place en ensemble canonique, à température fixée (équilibre thermique) pour utiliser la distribution de Maxwell-Boltzmann et dire que l'énergie moyenne par mode est kT . Mais pour la formule de Planck, c'est en grand canonique avec $\partial F/\partial N = \mu = 0$ pour le système paroi-photon. On peut le voir en remarquant que le système précédent, hors d'équilibre, est tel que le nombre de photons peut varier à énergie constante sans apport d'énergie externe, simplement par échange rayonnement-paroi. Le nombre de photons n'est pas fixé, ils peuvent s'absorber sur les parois.
- Pourquoi $g(\nu) = 8\pi/c^3\nu^2$ et pas $g(\nu) = 4\pi/c^3\nu^2$? C'est la polarisation de la lumière, déjà connue à l'époque.
- Comment passer de $g(\nu)$ à $g(\lambda)$? Il suffit de faire $\nu = c/\lambda$? Il faut faire $g(\nu)d\nu = g(\lambda)d\lambda$.
- En mécanique quantique, on a l'énergie du point zéro. Est-ce que ça change quelque chose? Ca se simplifie dans les probabilités $e^{-\beta E}/Z$.
- Est-ce que l'expérience de l'électroscope prouve que ce sont les UV qui produisent l'effet photoélectrique? On peut mettre un cache à UV.
- Qu'est-ce qui fixe le seuil dans l'effet photoélectrique? C'est la différence d'énergie dans la transition entre l'état occupé de plus haute énergie et l'état excité. On parle de travail de sortie/extraction.
- Expérience de Millikan? Première détermination de h .
- Dans le refroidissement d'atomes, à quelle fréquence est le rayonnement? A une différence d'énergie de niveaux qui correspond à une transition.
- Peut-on refroidir jusqu'à 0K les atomes? Comment contourner le problème de l'effet Doppler? On utilise des lasers de fréquence légèrement inférieure à la transition.
- Le soleil est jaune mais l'application numérique prend $\lambda = 800\text{nm}$? Perception de l'oeil.
- Est-ce que ce qu'on a dit sur le photon : impulsion... est décrit par l'électromagnétisme? Oui.
- A-t-on besoin de la relativité pour montrer que $E = pc$? Cagnac, pression de radiation?
- Pourquoi le verre absorbe-t-il les UV? Transitions électroniques et dissipation dans le réseau.
- Comment a-t-on mesuré le experimental data de la densité spectrale du corps noir? Spectromètre.
- Pouvez-vous réexpliquer pourquoi le courant de saturation de dépend que de l'intensité lumineuse? A quoi correspond le travail d'extraction?
- **Comment créer une source à photon unique? Quelle expérience pour savoir si une source est une source à photon unique?**
- **Pourquoi est ce important que le moment cinétique du photon ne peut prendre que deux valeurs?**
- **Vous avez dit que c'était les polarisations circulaires droite et gauche, est ce que ça peut être des elliptiques?**
- **Application de l'effet photoélectrique?**
- **Expérience faisant intervenir l'aspect corpusculaire du photon?**
- **Expérience ne pouvant pas être expliquée par la dualité onde-corpuscule?**
- **Comment expliquer la formule de la pression de radiation avec l'aspect ondulatoire?**
- **Quelle seraient les conséquences si le photon était massif?**
- **Quel est le rôle de la force de frottement dans l'existence d'un moment dans le modèle de l'électron élastiquement lié? Quelle est son origine?**
- **Qu'est-ce que tu voulais montrer avec ta sous-partie sur le moment cinétique?** Le caractère quantique du photon. On aurait pu présenter une expérience d'interférences avec des beam splitter (interféromètre de Mach-Zender).
- **Quels sont les éléments que tu veux que les élèves retiennent? Les éléments que les élèves risquent de mal comprendre?**

- **Discussion sur le refroidissement des atomes. Comment sont confinés les atomes ? Quel est le rôle du champ magnétique ?**
- **Que dire de la statistique de particules avec un spin ?** Bosons, statistique de Bose-Einstein. Il faut prendre en compte que les photons ont un spin quand tu fais le calcul de la densité spectrale d'énergie.
- **Qu'est-ce qu'un corpuscule ? Est-ce qu'on ne peut pas refaire tout ce que tu as présenté avec une onde ?** La quantification d'énergie ne prouve pas l'existence de corpuscule, il faudrait montrer une expérience qui montre l'impact de corpuscule.
- **Définition d'un corps noir ?** Corps dont l'absorbance est parfaite, pas besoin d'une enceinte.
- **Lien entre corps noir et rayonnement d'équilibre ?**
- **Diffusion Compton : comment justifier la collision entre un photon et un électron (il pourrait y avoir collision avec un noyau) ? Est-ce qu'elle peut être réalisée à n'importe quelle fréquence ? (les électrons ne sont pas libres, il faut les arracher)**
- **Est-ce qu'un photon peut être absorbé par un électron ?**
- **Comment montrer le lien entre la polarisation du champ em et moment cinétique du photon ?** Particule chargée dans un champ em et on regarde la différence quand il est polarisé circulairement droite et gauche.
- **Est-ce qu'on parle vraiment de spin du photon ?** on parle plutôt d'hélicité pour une particule sans masse.
- **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 vitesses, 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"
- **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/photoelectric-effect-be-explained-without-photons>

On entend parfois que le corps noir et l'effet photoélectriques constituent des preuves expérimentales de l'existence du photon, ce qui est en fait faux. Ces deux effets pourraient s'expliquer à l'aide d'un modèle considérant le champ EM classique et la matière avec niveaux d'énergie quantifiés. Une vraie preuve expérimentale a été apportée par Philippe Grangier, Gérard Roger et Alain Aspect en 1986. L'idée de l'expérience est très simple : il s'agit d'envoyer de la lumière sur une lame semi-réfléchissante, et de mesurer les corrélations entre lumière réfléchie et lumière transmise.

- **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.
- **Sur quel principe marche un photomultiplicateur ?** Effet photoélectrique (cf Duffait et Sextant)
- **Effet photoélectrique et effet Compton : même type de collisions ?** Non, effet Compton : collision élastique (conservation du quadrivecteur énergie-impulsion)
Effet photoélectrique : collision inélastique (le photon incident est détruit et son énergie n'est pas entièrement convertie en énergie cinétique de l'électron, puisqu'une partie constitue le travail d'extraction).
- **Le photon peut-il avoir un spin/hélicité 0 ?** Le photon est un boson de spin 1 (en unités de \hbar), dont le spin pourrait alors a priori prendre les valeurs -1, 0 ou 1, mais la valeur 0 est interdite. Il n'y a pas d'explication simple à donner, la raison profonde est une incompatibilité entre spin 0 et masse nulle en électrodynamique quantique.

- Jusqu'à quelle température peut-on refroidir un atome à l'aide du dispositif à 6 LASER décrit ? Comment aller au delà ? Cette technique permet-elle de piéger les atomes ?
- Comment faire un condensat de Bose-Einstein (recette) ? Voir fox.

Passage

Plan

Prérequis : mécanique du point, notions de relativité de physique statistique, rayonnement thermique, optique ondulatoire, électromagnétisme.

Introduction. Vision corpusculaire de Newton de la lumière (1704). Young-Fresnel, 1820, aspect ondulatoire qui rend compte des observations de diffraction et interférences. Maxwell, 1865. Electromagnétisme. Lord Kelvin (1894) : la physique est un ciel bleu où il ne reste que quelques nuages, dont le corps noir et l'éther.

I) Une quantification nécessaire. 1) Le rayonnement du corps noir. "Four idéal". Définition. Formule Rayleigh-Jeans. Graphe expérience Rayleigh Jeans vs expérience. A l'époque, Planck était financé pour travailler sur le rayonnement du corps noir pour des applications pratiques : pour faire des lampes qui éclairent plus en consommant moins. Mais il finit par poser les fondements de la MQ.

Calcul de la densité spectrale d'énergie du corps noir.

Très bon accord expérimental. **ODG**: Le soleil est vers 6000 K. h a la dimension d'un moment cinétique.

↓ *Mais la discrétisation a-t-elle une réalité physique ?*

2) Effet photoélectrique (Einstein 1905) Electroscopie : on charge deux tiges qui se repoussent par répulsion électrostatique. Quand on éclaire avec les rayonnements UV d'une lampe, on observe que les tiges se déchargent puis se rechargent. Protéger ses yeux et l'audience avec un filtre UV. Observations : phénomène de seuil. Conclusion : alors que Planck doutait initialement de la réalité physique des quantas qu'il avait introduit, Einstein confirme leur réalité physique.

3) Expériences modernes. On est capables d'émettre des photons uniques : vidéo Youtube d'interférences, on observe des franges de Young malgré le fait qu'on détecte des impacts discrets.

II) Propriétés des photons.

1) Energie et débit. Nombre de photons émis par seconde : $N(\nu) = P(\nu)/h\nu$. Application au soleil : $P = 4 \cdot 10^{26}$, approximation : on se place au maximum d'émission. $N(\nu) = 10^{45}$ photons/s. $N(\nu)_{rétine} = 10^{15}$ photons/s. A la surface de la Terre, $P_{soleil} = 1000W/m^2$.

3) Impulsion. Avec la relativité restreinte, $K^2 = mc^2(1/\sqrt{1-(v/c)^2} - 1)$, si $v = c$, pour éviter la divergence, $m = 0$. $E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$.

4) Moment cinétique. $\vec{L} = \pm h\vec{u}_z$ L'expérience de Beth. Balance de torsion : transfert de moment cinétique des photons vers la plaque qui tourne. On mesure l'angle. **ODG**: 10^{-3} radians.

III) Applications. 1) Refroidissement d'atomes. (Voir laser) On diminue $\langle v^2 \rangle$ donc on diminue T car $3/2kT = 1/2m \langle v^2 \rangle$. 2) Retour sur l'effet photoélectrique. A partir d'un flux lumineux, on peut générer un courant avec des paires électron-trou. Panneau solaire, photoélectrique. **ODG**: Un panneau solaire $S = 1m^2$, $P = 300W$. A comparer avec $P_{soleil} = 1000W$ pour S . Rendement de 1/3.

Questions

- Oscillations de l'aiguille de l'électroscope ? Quand on fluctue la distance de la palette chargée, l'effet de charge par influence fluctue.
- Vous dites que la lumière a toujours un moment cinétique. On observe de la lumière polarisée linéairement ? C'est une superposition de polarisations circulaires.
- Cadre (thermodynamique) et raisonnement de la formule de Rayleigh-Jeans ? On se place en ensemble canonique, à température fixée (équilibre thermique) pour utiliser la distribution de Maxwell-Boltzmann et dire que l'énergie moyenne par mode est kT . Mais pour la formule de Planck, c'est en grand canonique avec $\partial F/\partial N = \mu = 0$ pour le système paroi-photon. On peut le voir en remarquant que le système précédent, hors d'équilibre, est tel que le nombre de photons peut varier à énergie constante sans apport d'énergie externe, simplement par échange rayonnement-paroi. Le nombre de photons n'est pas fixé, ils peuvent s'absorber sur les parois.
- Pourquoi $g(\nu) = 8\pi/c^3\nu^2$ et pas $g(\nu) = 4\pi/c^3\nu^2$? C'est la polarisation de la lumière, déjà connue à l'époque.
- Comment passer de $g(\nu)$ à $g(\lambda)$? Il suffit de faire $\nu = c/\lambda$? Il faut faire $g(\nu)d\nu = g(\lambda)d\lambda$.

- En mécanique quantique, on a l'énergie du point zéro. Est-ce que ça change quelque chose? Ça se simplifie dans les probabilités $e^{-\beta E}/Z$.
- Est-ce que l'expérience de l'électroscope prouve que ce sont les UV qui produisent l'effet photoélectrique? On peut mettre un cache à UV.
- Qu'est-ce qui fixe le seuil dans l'effet photoélectrique? C'est la différence d'énergie dans la transition entre l'état occupé de plus haute énergie et l'état excité. On parle de travail de sortie/extraction.
- Expérience de Millikan? Première détermination de h .
- Dans le refroidissement d'atomes, à quelle fréquence est le rayonnement? A une différence d'énergie de niveaux qui correspond à une transition.
- Peut-on refroidir jusqu'à 0K les atomes? Comment contourner le problème de l'effet Doppler? On utilise des lasers de fréquence légèrement inférieure à la transition.
- Le soleil est jaune mais l'application numérique prend $\lambda = 800\text{nm}$? Perception de l'oeil.
- Est-ce que ce qu'on a dit sur le photon : impulsion... est décrit par l'électromagnétisme? Oui.
- A-t-on besoin de la relativité pour montrer que $E = pc$? Cagnac, pression de radiation?
- Pourquoi le verre absorbe-t-il les UV? Transitions électroniques et dissipation dans le réseau.
- Comment a-t-on mesuré le experimental data de la densité spectrale du corps noir? Spectromètre.

Commentaires

- Faire attention à ce que les plots contiennent les mêmes axes que les quantités présentées (par exemple pour le corps noir, si on définit uniquement $g(\nu)$, alors il faut montrer un spectre en fréquence).
- Faire le lien entre le moment angulaire du photon et la polarisation circulaire gauche ou droite.
- Bien définir le cadre des systèmes présenté (exemple avec le corps noir).
- Pour l'effet photoélectrique, il faut mettre en avant pourquoi l'électromagnétisme ne marche pas (car prédit une densité qui ne dépend pas de la fréquence), si on allume une lampe à fond on ne voit pas l'effet photoélectrique. Cf papier de Volk sur l'expérience de Millikan.
- Pour l'électroscope : il faut mettre en contact la plaque chargée avec les deux tiges. La plaque pour faire le contact est un zinc, elle s'oxyde, il faut la gratter avant de faire l'expérience. L'expérience (et d'autres exp d'électrostatique) ne marchent pas en temps humide. Il faut savoir le justifier!