LP00 – Titre

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.

✍ *https://toutestquantique.fr/laser/*

⟶ animation

Prérequis

- Optique ondulatoire
- Notion de photon
- Distribution de Maxwell-Boltzmann
- Corps noir

Expériences

- Biréfringence du quartz

Table des matières

1 Phénomènes d'absorption et d'émission **3**
1.1 Cadre et hypothèses . . . 3
1.2 Émission spontanée . . . 3
1.3 Largeur de raie . . . 4
1.4 Absorption . . . 4
1.5 Émission stimulée . . . 5

2 Liens entre les processus **6**
2.1 Equilibre thermodynamique et relations entre les coefficients d'Einstein . . . 6
2.2 Importance relative entre processus . . . 6

3 Application au laser **6**
3.1 Principe . . . 6
3.2 Laser à trois niveaux . . . 7
3.3 Profil spectral . . . 8
3.4 Application : refroidissement Doppler, mélasses optiques . . . 8

Jury

Le laser n'est pas la seule application de cette leçon. Le Laser He-Ne n'est pas l'illustration la plus simple. Il est maladroit d'introduire les coefficients d'Einstein dans une situation de rayonnement parfaitement monochromatique. À propos du nouveau titre : Il s'agit de mettre en évidence les caractéristiques des émissions et absorptions et de présenter en détail une ou plusieurs applications.

Préparation

Ressources : https://www.refletsdelaphysique.fr/articles/refdp/pdf/2010/04/refdp201021p12.pdf Super concis pour les idées.

Biblio : Dangoisse, Refroidissement d'atome [Fox, Cagnac]

Manip : résonance optique du sodium ? pour l'absorption.

Questions : incidence de Brewster (le champ réfléchi est entièrement polarisé), pourquoi le photon émis par émission stimulée a même direction, même fréquence et même état de polarisation ?

Introduction

Au cours de vos séances de TP, vous avez utilisé différentes sources lumineuses que l'on peut séparer en deux catégories :

- Les sources à incandescence pour lesquelles la lumière est émise par un corps chaud à température élevée, comme par exemple les lampes quartz-iode. Ces sources lumineuses peuvent être décrites par le modèle du corps noir que nous avons vu dans le chapitre sur le rayonnement d'équilibre thermique. Elles ont un spectre d'émission continu.
- Les sources dites à luminescence, ce sont les lampes spectrales et les LASERS par exemple. La lumière est émise par des atomes et le spectre d'émission de ces sources est composé de raies discrètes. Dans cette leçon, nous allons nous intéresser à ce deuxième type de sources lumineuses, celles pour lesquelles la lumière émise dépend de la nature des atomes mis en jeu et non pas de la température d'un filament.

Effet d'un réseau sur une lampe spectrale spectroscopie
https://www.youtube.com/watch?v=oae5fa-f0S0 Le réseau utilisé est une feuille de plastique imagée avec des lignes et joue le rôle de réseau. On voit des raies discrètes.

Problématique Comment comprendre la nature discrète des spectres d'émission des sources à luminescence ? Quels processus sont mis en jeu ? Comment sont-ils mis à profit pour construire des sources lumineuses ? On étudiera plus particulièrement le cas du LASER

1 Phénomènes d'absorption et d'émission

1.1 Cadre et hypothèses

Système On considère une collection de N atomes. Les atomes étudiés seront réduits à deux niveaux d'énergie, non dégénérés, notés 1 et 2 On fait un schéma. La matière est donc un ensemble de N atomes avec N1 atomes dans l'état 1 et N2 atomes dans l'état 2, tels que $N = N_1 + N_2$.

Pertinence d'un système à deux niveau L'hypothèse des deux niveaux est peu restrictive parce que l'interaction électromagnétique concernant les processus de transition est résonante autour d'une fréquence centrale, ν_0. Elle ne met donc en jeux que deux niveaux résonants tels que $E_2 - E_1 = h\nu_0$.

Description classique du champ L'onde lumineuse qui interagit avec l'atome est supposée d'intensité suffisamment élevée (elle comporte suffisamment de photons) pour que l'on puisse donner un sens au champ électromagnétique. On va donc traiter le champ de façon classique et sa densité spectrale est notée $u(\nu)$.

Dans un article publié en 1917, Einstein proposa de manière phénoménologique l'existence de trois processus élémentaires d'interaction entre la matière et le rayonnement. On va les présenter.

1.2 Émission spontanée

Bonus : processus multi-photon En plus des processus élémentaires, on peut avoir des processus multi-photon.

Description Un atome excité dans le niveau 2 peut se désexciter dans le niveau d'énergie, en émettant un photon d'énergie voisin de $h\nu_0 = E_2 - E_1$. On fait un schéma L'émission du photon conserve l'énergie.

Bonus : origine de l'émission spontanée L'émission stimulée ne peut être comprise par l'équation de Schrodinger puisqu'un état excité est un état propre du Hamiltonien donc stationnaire. Il faut le formalisme de la théorie quantique des champs/électrodynamique quantique. C'est le couplage avec les fluctuations du vide qui explique le temps de vie fini des niveaux excités. In quantum electrodynamics (or QED), the electromagnetic field has a ground state, the QED vacuum, which can mix with the excited stationary states of the atom. As a result of this interaction, the "stationary state" of the atom is no longer a true eigenstate of the combined system of the atom plus electromagnetic field. In particular, the electron transition from the excited state to the electronic ground state mixes with the transition of the electromagnetic field from the ground state to an excited state, a field state with one photon in it.

Spontaneous emission in free space depends upon vacuum fluctuations to get started. Le processus est apparemment irréversible car le photon émis a peu de chance d'être réabosrbé, sauf dans une cavité où on peut observer les "collapse and revival" des états excités.

Phénomène aléatoire C'est un phénomène intrinsèquement aléatoire : une phase, une direction et une polarisation aléatoires. L'émission spontanée est non cohérente et isotrope de ce phénomène.

Description mathématique La désexcitation se fait en un temps caractéristique $\tau \sim 10^{-8}$s, pour la raie D du sodium et suit une loi cinétique d'ordre 1, caractéristique des phénomènes sans mémoire On donne l'expression.. Le coefficient d'Einstein A_{21} s'interprète à l'inverse d'un temps caractéristique ou comme un taux de désexcitation dû à l'émission spontanée. S'il n'y a que ce processus à l'oeuvre, il y a une relaxation exponentielle de N_2 vers 0, en un temps caractéritique $1/A_{21}$. Il peut y a voir d'autre processus de relaxation, éventuellement non-radiatifs. *C'est une loi de Poisson, comme la radioactivité.*

Raies d'émission de gaz rare C'est le processus qu'on voit dans l'expérience introductive : les atomes du gaz sont excités par collision avec des électrons accélérés par une différence de potentiel. Les atomes se désexctient en émettant un photon.

Bonus : observation de raies L'isotropie de l'émission est responsable de l'observation des raies spectrales. En effet, un gaz éclairé dans une direction à une fréquence résonante excite les atomes du gaz. Une partie du spectre du rayonnement est absorbé par la matière. Cependant, la matière le réemet aussi. L'émission spontanée étant isotrope, le faisceau initial est quand même atténué aux fréquences de résonances et on peut observer les raies.

Bonus : ordres de grandeur de A_{21} La variété d'ordres de grandeurs de A 21 s'explique par les règles de sélection de la physique atomique. La relaxation d'un atome par émission d'un photon n'obéit pas qu'à une conservation de l'énergie, mais aussi à une conservation de la parité et des moments cinétiques orbital et de spin. Les transitions vérifiant ces lois de conservation sont dites permises et se font très rapidement, alors que celles qui ne les vérifient pas sont dites interdites et se font à des taux beaucoup plus faibles.

↓ *En réalité, le photon émis a aussi une fréquence aléatoire, voisine de $\Delta E/h$, on va l'expliquer.*

1.3 Largeur de raie

On distingue plusieurs causes d'élargissement spectral :

- élargissement naturel. L'inégalité de Heinsenberg, version temps-énergie donne qu'une largeur spectrale $\delta_n u \sim 1/\tau$ accompagne l'émission stimulée.**ODG:** $\Delta\lambda_{nat} \sim 10^{-5}$ nm.
- élargissement collisionnel. Une collision élastique détruit la phase donc réduit le temps de cohérence τ donc élargit les raies. La largeur proportionnelle à la section efficace des collisions, la densité (donc la pression), la vitesse relative moyenne. Exemple : dans la lampe Hg, collisions entre Hg, Hg^+, e^-, Ar. Profil lorentzien. En pratique, visible que dans les lampes à haute pression. **ODG:** $\Delta\lambda_{coll} \sim 10^{-3}$ à 10^{-2} nm.
- élargissement Doppler thermique. Dépend de la température du gaz. Profil gaussien.**ODG:** $\Delta\lambda_{Doppler} \sim 10^{-3}$ à 10^{-2} nm.

1.4 Absorption

Description Un atome dans l'état 1 peut passer dans l'état 2 en absorbant un photon d'énergie égale à l'écart énergétique entre les deux niveaux. Ce processus nécessite un rayonnement incident.

Spectroscopie absorption
Vidéo : `https://youtu.be/7u3rRy97m9Y?t=19` On éclaire en lumière blanche. On met un réseau pour disperser la lumière. Quand on met du bicarbonate de sodium dans la flame du bec bunse, cela produit une raie d'absorption dans le spectre continu. De telles raies apparaissent dans le spectre du Soleil, ce sont les raies de Fraunhofer. *Sodium 'D' line absorption shows up as a black line in the yellow of a continuous spectrum. Good as a simulation of the sodium portion of the Fraunhoffer absorption spectrum caused by atoms in the solar atmosphere ; it does not however,*

resolve the 589.0/589.6Å doublet.

Description mathématique La variation de la population est donnée par : on donne l'expression. et est proportionnelle au champ incident et au coefficient d'Einstein B_{12}, dont on donne l'unité.

Le dernier processus peut sembler moins intuitif mais il est en fait introduit par Einstein comme étant le symétrique de l'absorption, par renversement du temps.

1.5 Émission stimulée

Description L'émission stimulée est le processus de désexcitation d'un atome provoquée par un photon incident à la fréquence ν_0. Un photon est alors émis avec la même fréquence, direction, polarisation, phase. Il y a donc cohérence.

Bonus : approche alternative Une alternative consiste à n'introduire d'abord que l'absorption et l'émission spontanée, puis à montrer qu'il y a une incompatibilité avec la formule de Planck pour en tirer la nécessité de rajouter l'émission stimulée.

Résonance optique du sodium
On montre la photo L'expérience de résonance du sodium. Une ampoule de verre contenant du sodium à l'état solide est chauffée au chalumeau. Elle se remplit de vapeur de sodium. Lorsqu'elle est éclairée par une lampe à sodium, les atomes de la vapeur absorbent et réémettent cette lumière résonnante.

Description mathématique On donne l'expression. Le taux de transition est proportionnel à la densité de volumique d'énergie életromagnétique et au coefficient d"Einstein B_{21}.

Possibilité d'ampification Ce mécanisme est apte à augmenter l'intensité d'une onde lumineuse puisque tous les photons sont "jumeaux". On pressent des propriétés de cohérence.

Bonus : pourquoi un photon qui a la même direction ? La vraie réponse : il faut faire une étude quantique. Sinon, arugment d'isotropie et de renversement du temps. From Curie's version of the Neumann Principle, we have the direction of the simulated emission being limited to three possibliites :

- In the direction of the impinging photon
- Opposite to the direction of the impinging photon
- Randomly directed

In the second case, if the emitted photon is opposite to the direction of the impinging photon, then under time reversal the process appears to be one in which two equal but oppositely directed photons hit an atom and one photon continues. It seems that there is an asymmetry in the matter of which photon continues. Same for randomly directed photon : there is also the asymetry (which photon to choose). In the time reversal picture there does not seems to be any reason for one of the incident photons continuing on its way and the other being absorbed. Thus this case would violate the Curie version of Neumann's Principle under time reversal. Consider the case where the stimulated photon propagates in the same direction as the incident photon. Under time inversion this becomes completely normal and isotropic absorption (as expected).

En superposant les taux de transition, on obtient l'équation globale d'évolution des populations On donne l'expression.. On va voir le lien entre les 3 mécanismes et leur importance relative.

2 Liens entre les processus

2.1 Equilibre thermodynamique et relations entre les coefficients d'Einstein

✍ wikipedia, Diu physique statistique p907

Démarche Les coefficients d'Einstein ne dépendent pas de l'état de la collection d'atome *i.e.* de leurs population, ni de la teempérature. *En effet, ils s'obtiennent en électrodynamique quantique par la règle d'or de Fermi, qui a pour conséquence directe que les coefficients d'Einstein ne dépendent que des états initial et final mis en jeu.* En considérant l'équilibre thermodynamique, on va les relier.

Démarche du calcul Les calculs sont sur fiche A l'équilibre thermodynamique, on est en particulier en (i) état stationnaire (ii) les populations suivent la répartition de Boltzmann (iii) la densité spectrale d'énergie suit la loi de Planck.

Egalité de B_{21} et B_{12} : renversement du temps On a égalité de B_{21} et B_{12} par renversement du temps : l'absorption et l'émission stimulée sont symétriques par renversement du temps l'un de l'autre. Au premier ordre de la théorie de perturbation, la règle d'or de Fermi donne $|\Gamma_{12}|^2 \propto |\langle 1|H|2\rangle|^2 = |\langle 2|H|1\rangle|^2 \propto |\Gamma_{21}|^2$ avec le même facteur de proportionnalité.

2.2 Importance relative entre processus

Emission stimulée vs absorption On examine le cas d'une source thermique. C'est sur la note écrite.

Difficulté de l'émission stimulée en situation d'équilibre thermodynamique On voit que l'obtention de faisceaux générés par émission induite est incroyablement difficile dans le domaine optique. La seule façon d'en avoir est donc d'être hors équilibre thermodynamique.

Facilité d'utiliser des grandes longueurs d'onde Il serait aussi bienvenu de comparer l'importance relative de l'émission stimulée et de l'émission spontanée :

$$\frac{\mathrm{d}N_{2\to1}^{\text{stimulée}}}{\mathrm{d}N_{2\to1}^{\text{spontanée}}} = \frac{B_{21}N_2 u(\omega_{12})}{A_{21}N_2} = \frac{\pi^2 c^3 u(\omega_{12})}{\hbar\omega_{12}^3} = u(\omega_{12})\frac{\lambda_{12}^3}{8\pi\hbar}$$

Dans un laser on veut justement que ce soit l'émission stimulée qui domine. On comprend alors pourquoi il est plus simple de réaliser un maser à ammoniac de longueur d'onde ~ 1cm plutôt qu'un laser avec $\lambda \sim 0.5\mu$m

Bonus : cas limites de la loi de Planck sion spontanée domine largement). On peut d'ailleurs discuter la limite haute fréquence $\beta\hbar\omega \gg 1$ de la loi de Planck (qui correspond à la loi de Wien), où l'émission stimulée est négligeable. C'est d'ailleurs la loi de Wien qu'on obtient si on oublie l'émission stimulée dès le début. Dans la limite basse fréquence $\beta\hbar\omega \ll 1$ (qui correspond à la loi de Rayleigh-Jeans), c'est l'émission stimulée est prédominante (mais pas négligeable !).

Le phénomène d'émission qui nous intéresse en optique est l'émission induite. En effet, comme déjà présenté, elle nous permettrait d'obtenir un faisceau de lumière intense et très cohérent, important en optique.

3 Application au laser

3.1 Principe

Bonus : historique 1898 : cavité Fabry Pérot, 1916 : Einstein postule l'émission stimulée ; 1949 : idée du pompage optique par Kastler et Brossel, 1960 : premier laser par Maiman

Rôle des composants Le milieu amplificateur amplifie de manière cohérente la lumière, le système de bouclage *i.e.* la cavité optique, type Fabry-Pérot est constituée de deux miroirs en vis à vis, légèrement courbés pour assurer la stabilité des photons faisant des allers-retours. Elle assure deux rôles : (i) bouclage : les photons font plusieurs allers retours dans le milieu amplificateur. (ii) Comme l'interféromètre de Fabry-Pérot, la cavité sélectionne des fréquences particulières avec une finesse donnée par le coefficient de réflexion des miroirs. **ODG:** Si $R = 0.95$, la finesse

vaut $F \sim 60$. Un des miroirs est le miroir de couplage qui cause une faible transmission vers l'extérieur de la radiation de la cavité. En régime stationnaire, il faut un apport d'énergie ou pompage pour compenser cette perte d'énergie.

Exemple : laser He-Ne Dans l'exemple du He-Ne, la source d'énergie du laser (ou « source de pompage ») est une décharge électrique de **ODG:** 1kV appliquée à l'anode et à la cathode, de part et d'autre du tube de verre, ce qui accélère des électrons et excite les atomes du milieu par collision. Dans le cas d'une émission continue on utilise le plus souvent un courant de 5 à 100 mA. Le miroir de "output coupler" a un coefficient de réflexion de **ODG:** 99%. Les lasers hélium-néon sont généralement de petite taille avec une cavité optique mesurant de **ODG:** 15 à 50 cm de long et une puissance de sortie de **ODG:** 1 à 100 mW. Pour des longueurs de cavité de 15 à 50 cm, cela permet à 2 à 8 modes longitudinaux oscillent simultanément.

Caractéristiques communes aux laser Tous les laser (Light Amplification by Stimulated Emission Radiation) ont quatre composants principaux :

- un mécanisme de pompage qui injecte de l'énergie
- un milieu amplificateur, pompé dans un état où il peut émettre de la lumièrepar émission stimulée et ceci dans une gamme de fréquences caractéristiquedu milieu
- une cavité optique qui permet le bouclage du dispositif : elle renvoie l'onde lumineuse dans le milieu amplificateur, et lui impose des propriétés spatiales et temporelles (fréquence).Une partie de l'énergie lumineuse présente dans la cavité s'en échappe : c'est l'émission du faisceau laser
- un couplage avec l'extérieur assuré par le miroir de sortie

Charactéristiques de la lumière laser En contraste avec une lampe spectrale : le laser est plus monochromatique, directif, cohérent. **ODG:** Puissance 1mW en TP, 1 kW en découpe industriel, 10^{12} W les plus puissants. Longueur de cohérence 30 cm en TP, plusieurs km si stabilisé. angle d'ouverture d'un faisceau laser : 0.5 mrad (bonne directivité) pour He-Ne

Bonus : modes transversaux Si la longueur de la cavité permet de sélectionner un nombre de mode longitudinaux, du fait de la nature gaussienne du faisceau, plusieurs modes transverses peuvent exister, que la cavité ne sélectionne pas a priori.

Bilan de puissance C'est sur la fiche. Les pertes viennent de l'output coupler (miroir de sortie), de la diffusion de la diffraction sur les miroirs.

Condition d'amplification, gain positif, inversion de population

Pour que le gain soit positif, il faut réaliser l'inversion de population. Pour cela, on utilise le pompage.

Pompage Le pompage optique consiste à exciter des niveaux supérieurs qui se désexcitent rapidement vers le niveau excité de a transition laser. Dans le pompage collisionnel, l'excitation est fournie par collision avec des atomes du milieu ayant une énergie adéquate. On peut aussi procéder par décharges électriques ou bien en utilisant des semiconducteurs : la recombinaison de paires électrons-trous peut apporter suffisamment d'énergie sous forme de photons pour réaliser le pompage.

Démarrage des oscillations L'effet laser démarre sur l'émission spontanée, qui joue le rôle équivalent du bruit en électronique.

3.2 Laser à trois niveaux

✍ Dangoisse, Florian Kuzler

Laser à ruby Le premier laser était un laser à ruby, construit en 1960 et peut être modélisé par un système à 3 niveaux.

Hypothèses L'approximation $A_{32} \gg W_\mathrm{p}, A_{31}$ doit être expliquée avec les mains.

Condition d'amplification On fait le calcul sur fiche On trouve qu'on obtient l'inversion de population lorsque $W_p > A_{21}$.

Saturation du gain Qu'est-ce qui limite le gain ? Quand l'intensité augmente, des effets de saturation interviennent qui font diminuer le gain. Un schéma clair est sur diapo : pourquoi les pertes sont-elles plates en fréquence ?

si on considère qu'elles sont uniquement dues aux miroirs et qu'ils ne dépendent pas de la fréquence... En réalité, le gain du milieu dépend de l'intensité $g(\omega, I)$ et à trop grande intensité, le gain du milieu diminue, ce qui borne l'intensité même à pompage arbitraire. A haute intensité, l'inversion de population dépend de I en dimunuant. Cela est aussi dû au temps de vie fini des états excités,

$$I_{sat} = \frac{\hbar\omega}{\sigma\tau_{eff}}$$

où τ_{eff} est le temps de vie de l'état excité. Le gain a une valeur maximale et tend vers 0 lorsque $u \to \infty$. Cela peut être compris à l'aide des mécanismes élémentaires : si le taux d'émission stimulée et le taux d'absorption, qui sont égaux, dominent tous les autre processus du système, alors $N_1 = N_2$ et donc le gain s'annule.

Laser à deux niveaux Ceci permet aussi de comprendre pourquoi le pompage est indispensable, et donc de comprendre la nécessité d'un troisième niveau. En effet, si on prend $W_p = 0$ dans l'expression de D, on obtient $D < 0$, il n'y a pas d'amplification.

Bonus : laser à 4 niveaux L'intérêt du laser à 4 niveaux est qu'il n'y a pas besoin de dépasser un seuil de pompage pour provoquer l'inversion de population.

3.3 Profil spectral

Elargissement Doppler Pour un laser He-Ne, l'élargissement Doppler conduit, à température ambiante, à une largeur de raie $\Delta\lambda_{Dop} \sim 3 \times 10^{-4}$nm.

Sélection par la cavité, nombre de modes Le Fabry-Pérot va sélectionner une raie beaucoup plus fine. Pour qu'il n'y ait qu'un seul mode de la cavité Fabry-Pérot (espacés de $\Delta\lambda = \lambda^2/2d$) qui soit amplifié, il faut choisir $\Delta\lambda \sim \Delta\lambda_{Dop}$ (ou choisir plus grand mais être plus précis sur d). Le fabry-pérot est peut-être too much pour prérequis au niveau L2, il faudrait peut-être raisonner par analogie avec la corde de Melde.

Laser multimode vs monomode Si plusieurs modes de la cavité peuvent être amplifiés, le temps de cohérence $\tau_c \sim 1/\Delta\nu$ sera plus court car il faudra prendre $\Delta\nu$ comme l'espacement entre deux pics. Si un seul mode est amplifié *i.e.* le laser est **monomode**, le temps de cohérence est donné par $\delta\lambda = \Delta\lambda/\mathcal{F}$où $\mathcal{F} \sim \pi/T \gg 1$ est la de la cavité. Donc, *le fonctionnement monomode améliore la cohérence temporelle du rayonnement émis.*

Utilisation du laser monomode Selon la longueur de la cavité, on peut avoir un laser multimode ou monomode. Un laser multimode présente plus de puissance (découpage). Un laser monomode a un plus long temps de cohérence (interférométrie). Un laser en verrouillage de mode comporte de nombreux modes actifs, en phase (sinon c'est *a mess*), possède un spectre large et donc peut être utilisé pour produire des impulsion courtes (femto voire attoseconde).

Limitation fondamentale (inégalité de Heisenberg) et limitation pratique La pureté spectrale du faisceau peut être plus faible que celle donnée par la finesse de la cavité. Mais la limitation fondamentale est les fluctuations de phase induites par l'émission spontanée (inégalité de Heisenberg).

En pratique, ce sont les vibrations mécaniques du dispositif, les fluctuations thermiques qui font varier la longueur de la cavité $L(T)$ et l'indice optique $n(T)$ du dispositif.

Largeur spectrale, laser He-Ne La longueur d'onde de fonctionnement précise varie d'environ 0,002 nm en raison de la dilatation thermique de la cavité. Il existe des versions stabilisées dont la précision est de l'ordre de 10^{-12} nm.

3.4 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 teldispositif, 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.

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}k_BT$$

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 fluoresence 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 avions 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 quel'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 déplçant 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 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 :

$$\mathbf{v}_{exc} = \mathbf{v}_0 + \frac{\hbar}{m}\mathbf{k} = \mathbf{v}_0 + \mathbf{v}_r$$
$$v_{exc} = v_0 - \frac{\hbar}{m}k$$

$\mathbf{v}_r = \hbar\mathbf{k}/m$ 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 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 v_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 v_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 retrouven 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 μK. 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*

Sub-Doppler cooling, Sisyphus cooling Mécanisme de Sisyphe. 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 $1 \to 2 \to 3 \to 4 \to 5 \to$ 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 to the valley again, just like Sisyphus.

Nécessité d'une force de rappel Pourtant le piégeage dans les mélasses 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.

Pièce magnéto-optque 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 oppposés. 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 :

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

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

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

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 : 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 e t l a descente, typiquement **ODG:** 1s pour des atomes à 4 μK 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.

Bonus : Considérations pratiques

La taille des miroirs a ne doit pas être trop petite pour ne pas diffracter le faisceau, ni trop grande pour ne pas sortir de l'approximation paraxiale du faisceau gaussien.

Avec $N_F = a^2/\lambda L$, ceci se traduit par :

- $N_F \gg 1$ pour négliger la diffraction sur les bords de miroirs.
- $N_F \ll (L/a)^2$ pour négliger le terme d'ordre 4 dans le principe de Huyghens Fresnel.

Bonus : Types de laser

Maser à ammoniac

L'inversion de population est basée sur la séparation physique des molécules excités de celles dans l'état fondamental (moment dipolaire différent). Utilisé comme sources de rayonnement micro-ondes, en astrophysique.

Lasers à solide : rubis à YAG

Le premier laser (1960) était un laser à rubis. L'inversion de population était réalisée avec une lampe flash.

Aujourd'hui on trouve les YAG (Yttrium Aluminium Garnet), dopé avec des lanthanides (Nd :YAG, Er :YAG). Un arrangement courant est un barreau YAG et une lampe flash aux foyers d'un réflecteur elliptique.

Lasers à gaz : He-Ne

Le laser He-Ne exploite un transition du néon, excité par collision avec des atomes d'hélium eux-mêmes dans un état excité (2s, 3s).

$$\boxed{He^\star + Ne \rightarrow He + Ne^\star + \Delta E} \tag{1}$$

Ce processus est très efficace grâce à la coïncidence des niveaux électroniques des deux espèces. On exploite la raie à 632.8 nm (3s vers 2p) dans les laser rouges et la raie à 543 nm dans les laser verts.

On utilise les laser à CO_2 qui fonctionnent dans l'infrarouge et peuvent atteindre des puissances de l'ordre du Gigawatt. Application à la découpe industrielle et la chirurgie.

Lasers à semi-conducteurs/diodes lasers

L'émission lumineuse est basée sur le phénomène de l'émission d'un photon par recombinaison d'une paire électron-trou et le peuplement de la bande de conduction par injection d'un courant. La longueur d'onde d'émission est donnée par l'application la largeur de la bande interdite du matériau. La conservation de l'impulsion lors d'une recombinaison ou d'une absorption ; cela entraîne la nécessité d'utiliser des matériaux dits « à gap direct » : le minimum de la bande de conduction est à la verticale du maximum de la bande de valence dans l'espace des moments Exemple : GaAs (gap direct)

Construction Une diode laser est une jonction de semi-conducteurs et possède trois zones caractéristiques : une couche de confinement de type n, une zone active et une couche de confinement de type p. La zone active est formée d'un guide d'onde encadrant le lieu de l'émission laser : matériau massif ou quantique (puits, boîtes ou fil). Lorsque cette diode est polarisée en direct, elle laisse passer un fort courant qui peuple la bande de conduction et peut réaliser l'inversion de population. En réalité, une couche intermédiaire d'indice optique supérieur joue le rôle de guide optique, comme dans une fibre.

Caractéristique électrique La caractéristique d'une diode laser ressemble à celle d'une diode. En dessous d'une valeur d'intensité seuil, la diode est absorbante, au-delà, l'émission stimulée est proportionnelle à l'intensité du courant électrique. La caractéristique électrique d'une diode laser dépend de la température de la diode. En effet, la population de l'état haut de la diode dépend de la température suivant une fonction de Fermi.

Caractéristiques optiques La plus faible longueur de la cavité, quelques centaines de micromètres au lieu de quelques dizaines de centimètres, entraîne une plus grande divergence/ouverture numérique du faisceau et des raies d'émission plus éloignées les unes des autres, ce qui facilite la création de lasers monomodes (une seule raie d'émission) par filtrage. Les états énergétiques se répartissent dans la structure de bandes du semi-conducteur à la place d'états énergétiques bien définis dans un gaz, par exemple, impliquant l'émission de raies moins fines. Effet de seuil (fonctionnement en LED, fonctionnement en laser).

Avantages Les avantages sont sa petite taille, sa facilité de modulation/accordabilité à des fréquences élevées en faisant varier le courant qui passe à travers la diode, ses faibles tensions de service et puissance consommée grâce à des rendements de l'ordre de 30 % au lieu de 3 % pour les autres types de laser.

Lasers chimiques

La réaction $H_2 + F \rightarrow H + HF^\star$ produit des molécules excitées. En les plaçant dans une cavité optique avant désexcitation spontanée, on peut atteindre des puissances élevées, jusqu'à détruire des missiles en plein vol.

Lasers naturels en astrophysique

On observe l'effet laser dans la lumière émise par certaines étoiles. L'inversion de population est réalisée dans l'atmosphère stellaire par pompage optique car le milieu baigne dans une intense irradiation externe.

Lasers sans inversion de population

On peut fortement réduire l'absorption dans le milieu actif, ce qui entraîne qu'on n'a plus besoin d'inversion de population pour avoir l'effet laser. On s'arrange pour que l'absorption puisse se faire par deux voies : directement ou en passant par un niveau intermédiaire. Si les amplitudes de probabilité interfèrent destructivement, le processus d'absorption est inefficace : on parle de transparence induite.

Conclusion

Application : numerical read-out (CDs, bar codes), pinces optiques en biophysique, manipulation d'atomes, molécules and microscopic objects : trapping and cooling, métrologie... Pinces optiques en biophysique.

Ouverture : Refroidissement d'atomes [fox] : refroidissement Doppler, sideband cooling

Compléments/Questions

Passage

Plan

Intro. Spectre de la lumière du soleil on voit des bandes. C'est ce qu'on va expliquer.

Cadre : description classique, flux d'énergie.

I) Processus d'interaction rayonnement-matière.

1) Emission spontannée. Comme pour les lois radioactives et les réactions chimiques d'ordre 1. Coefficient d'Einstein : probabilité par unité de temps.

2) Absorption 3) Emission stimulée 4) Relation entre les coefficients d'Einstein. en supposant l'équilibre thermodynamique.

II) Laser. Historique : 40 ans après les travaux d'Einstein. Ruby, Maser puis Laser moderne.

Schéma du laser à rubis. Milieu actif : rubis, gaz (HeNe, CO2), liquide, fibre optique, semiconducteurs (diode laser répandue), Pompage, nécessité du pompage : on doit injecter de l'énergie dans le système.

2) Condition d'amplification. Inversion de population (g1=g2 donne $B_12 = B_21 = B$)

3) Laser à 2 niveaux. Deux types de pompage : optique et électrique.

4) Laser à 3 niveaux. (mettre le diagramme d'énergie sur diapo)

5) Laser à 4 niveaux. Pas de condition de seuil sur le pompage. N'importe quel pompage produit une amplification.

6) Cavité. Miroirs. Fzvoriser l'amplitude. Le confinement crée des modes discrets. COhérence temporelle. Cohérence spatiale : faisceau directionnel.

Largeur spectrale (+ impuretés dans les cristaux). ODG.

Questions

- **Quel est le rôle des miroirs sous incidence Brewster dans les lasers He-Ne ?** Lorsque l'onde est polarisée selon le plan d'incidence, il existe un angle particulier où r s'annule : l'angle de Brewster θ_B, définit par $r = 0$ *i.e.* $\boxed{\tan\theta_B = n_2/n_1}$. La direction du rayon qui se serait réfléchi est orthogonal à celui qui s'est transmis. On a toujours $\theta_B < \theta_{lim}$ donc ce phénomène n'est jamais empêché par la réflexion totale. Application : on peut polariser l'onde réfléchie perpendiculairement au plan d'incidence.

- Quelle sont les conséquences d'avoir un miroir partiellement réfléchissant ? A quoi correspondent les dégénérescences dans les niveaux d'énergie ? Comment les lever ?

- Comment expliquer à un élève le lien entre le temps de vie de l'état excité et la durée des trains d'onde ? Comment fait-on pour comprendre simplement avec les outils modernes (postérieurs à Einstein) que B 12 = B 21 ? Quels sont les profils de raies usuels ? Peut-on le vérifier sur le spectre de la Balmer ? Avez-vous entendu parler de profil de Voyt ? Quels sont les utilisations des lasers ? Exemples de lasers ? Fonctionnent-ils toujours dans le domaine de l'optique ? Pour a-t-on voulu fabriquer des blue ray ? L'inversion de population se fait-elle toujours par pompage optique ? Dans les lecteurs CD par exemple ? Quel est l'interêt du stockage numérique ? Pourquoi veut-on fabriquer des lasers de plus grande énergie ? Utilité des lasers de forte puissance ? Les lasers émettent-il

plusieurs modes ? Comment étudier les modes d'un laser ? (Avec un Fabry-Pérot) Pourquoi les pertes sont-elles plates en fréquence ? En régime de fonctionnement, gain > pertes ou gain = pertes ? Est-ce que le laser peut démarrer si gain = pertes ? La pureté spectrale du laser vient-elle uniquement des propriétés des photons émis ou aussi de la cavité Fabry-Pérot ?

- Comment décrire classiquement aux élèves de CPGE les 3 phénomènes d'interaction rayonnementmatière ? Comment le modéliser de manière quantique ? De quoi dépend la finesse de la cavité laser ? Pourquoi le photon émis par émission stimulée a même direction, même fréquence et même état de polarisation ? Lien entre largeur énergétique du niveau et temps de relaxation ? Au niveau spectral la largeur est-elle due seulement à la largeur énergétique non nulle du niveau ? Comment mesure-t-on des longueurs d'onde avec un appareil de lycée ? Vous avez parlé de refroidissement d'atomes et n'avez pas eu le temps de le traiter, vous pouvez détailler ? De même le rôle de la cavité pour un laser ? Vous avez conclu sur les condensats de Bose-Einstein, vous pouvez définir ce que c'est ? pourquoi avoir fait le spectre de la lampe au Hg ? Quelles conditions pour appliquer la statistique de Maxwell- Boltzmann ? Détailler les caractéristiques identiques du photon incident et du photon induit. Détailler les différentes probabilités du laser à 3 niveaux. À quoi est due la largeur de la raie d'émission induite ? Peut-on faire léviter un trombone avec des faisceaux laser ? Un trombone je sais pas mais des petites billes oui (voir taille) avec une pince optique. Quels sont les ingrédiants nécessaire à la dérivation de la loi de Planck sur le rayonnement du corps noir ? La dérivation repose sur l'hypothèse d'échanges discret d'énergie entre le corps noir et le rayonnement (constante pour hypothèse, Planck est sceptique à l'époque). La densité d'énergie doit être vue comme le produit d'une densité de mode et d'une énergie moyenne par mode. Quelles sont les conditions d'application de la loi de Maxwell-Boltzman ? Système à l'équilibre thermique avec un thermostat. Comment change l'expression des lois de transition si les raies ne sont pas infiniment fines ? Il faut prendre en compre le profil de raie dans les probabilités de transition (voir par exemple l'annexe du Houard traitant des coefficients d'Einstein). Quelles peuvent être les sources d'élargissement des raies ? Quels sont les profils associés ? Largeur intrinsèque (lorentzien), élargissement collisionnel (lorentzien), élargissement Dopler (gaussien). Voir le livre "Optique quantique" de Fox pour plus de détails. Dans une lampe spectrale, quelle est la source majoritaire d'élargissement ? Ça dépend de la pression. Basse pression : Dopler, haute pression : collisionnel. Ordres de grandeur des largeurs obtenues ? Voir l'annexe du Fruchart, Lidon, Thibierge, Champion, Le Diffon sur les largeurs de raies (après l'expérience sur la mesure de la constante de Rydberg). D'où viennent les dégenerescences du spectre des atomes ? Comment les lever ? Structure quantique du spectre de l'énergie, notamment la dépendance en la projection du spin selon la direction de quantification (souvent notée m). Ces dégénerescences peuvent être levées par couplage spin-orbite ou par couplage à un champ magnétique extérieur (effet Zeeman). Pourquoi a-t-il était plus simple de réaliser un maser avant un laser ? Il est plus simple de réaliser l'inversion de population dans les micro-ondes que dans le visible (dépendance du rapport émissions spontannée/stimilée en , voir la partie du DGLR de Physique statistique sur les coefficients d'Einstein). Quel est le mécanisme de pompage dans le laser hélium/néon ? Autres mécanismes possibles ? He/Ne : décharge électrique entrainant l'excitation des niveaux laser par collisions (voir le Fruchart, Lidon, Thibierge, Champion, Le Diffon ou le Fox pour des détails). Flash lumineux pour le laser à rubis. Intérêts de la cavité Fabry-Pérot ? Ordres de grandeur ? Rétroaction, filtrage, directivité. Pour les ordres de grandeur, voir Houard par exemple. Les différents modes d'une cavité optique (modes transverses et longitudinaux) sont repérés par 3 indices TEMqmn (1 longitudianal, 2 transverses). 2 modes longitudinaux sont séparés en fréquence par un intervale spectral libre... 8 PCR LP37 : Absorption et émission de la lumière Applications des lasers ? Médecine, gravure, découpe, soudure, lecture de code barre, de musique, mesure de position ... Le pompage est-il toujours symétrique ? A priori non. Il l'est dans des cas particuliers, par exemple dans le cas d'un pompage optique par un autre laser. S'il ne l'est pas, on ne peut plus démontrer que le laser à deux niveaux n'existe pas. Angle d'ouverture d'un laser ? L'angle d'ouverture d'un faisceau laser est de l'ordre du milliradian. Il est fixé par la longueur de la cavité (plus elle est longue, plus cet angle est faible), et par la forme des miroirs. Ceux-ci fixent aussi le type de mode transverse autorisé. Description émission spontanée L'émission spontanée, dont l'existence expérimentale ne fait pas de doute car un atome se désexcite sans champ extérieur, ne se décrit correctement que dans le cadre de l'électrodynamique quantique avec quantification du champ électromagnétique. Selon Aslangul, tome II page 941, son existence technique provient de la non commutation des opérateurs de champ. Et plus physiquement, il s'agit en quelque sorte d'une émission stimulée déclenchée par les fluctuations quantique de l'état fondamental de l'atome (le champ dans lequel baigne l'atome est le champ au niveau fondamental, qui n'est pas strictement d'énergie nulle). Pour les curieux qui auront du temps après l'agrégation, elle est décrite en détail dans son paragraphe 25.2. Description émission stimulée L'émission stimulée se décrit conjointement avec l'absorption dans le cadre de la mécanique quantique sans champ quantifié (du moins pour certains de ses aspects). Un traitement possible est dans le cadre de la théorie des perturbations dépendantes du temps (voir par exemple le Basdevant de Mécanique Quantique, chapitre 17), la perturbation étant en exp(iωt) (l'onde incidente). Il n'y a absorption, ou rayonnement induit, que si cette perturbation est résonante avec l'atome : donc si ω' ω0 où ω0 est la différence d'énergie entre les deux niveaux atomiques. C'est une façon de "comprendre" pourquoi le photon induit est de même fréquence que le photon incident. Cela n'explique toutefois pas pourquoi il est aussi de même polarisation et en phase...

- Comment articuler la présentation avec la leçon sur le corps noir ? Pourquoi le spectre de corps noir est-il continu ? (Rayonnement de charges accélérées) Quelles sont les caractéristiques d'un niveau ato- mique ? (énergie, dégénerescence, temps de vie, mais aussi les différents moments cinétiques) Qu'entend-on par dégénérescence ? Lien entre les coefficients d'Einstein et le temps de vie ? (s'il n'y a pas de processus de désexcitation autre, le temps de vie est l'inverse du coefficient de désexcita- tion spontanée) A-t-on considéré des milieux denses ou dilués ? Qu'est-ce que cela change ? Quelle est la contribution d'Einstein à ce qui a été présenté ? (introduction de l'émission stimulée, nécessaire pour retrouver la loi de Planck : il est possible de le mon- trer au cours de la leçon si on le souhaite, mais cela prend un peu de temps) Comment pourrait-on calculer les coefficients d'Einstein ? (rigoureusement, théorie quantique des champs, mais en champ faible, on peut faire des calculs en théorie des perturbations dépendant du temps en mécanique quantique) Les coefficients d'Einstein varient sur une large gamme d'ordres de grandeur : pourquoi ? (il y a des transitions interdites par la mécanique quantique, pour des raisons de symétrie : ces transitions parviennent à se faire à cause de couplages complexes entre moments cinétiques, mais elles se font très lentement) Dans quel autre domaine retrouve-t-on des lois du type $dN = -\alpha N$? (désintégrations radioactives par exemple, on a ce genre d'équation dès que l'on a une pro- babilité d'événement constante par élément et par unité de temps) Quelle loi statistique suit le nombre d'événe- ments dans ce type de loi ? (une loi de Poisson) Que signifie l'acronyme laser ? (Light Amplification by Stimulated Emission Radiation) Quelle est la particularité de la transition entre le ni- veau excité et le niveau intermédiaire dans le laser à 3 niveaux ? (c'est une désexcitation non radiative) Pourquoi n'y a-t-il pas de seuil sur le laser à quatre niveaux ? (L'effet laser se fait entre les niveaux intermé- diaires, et le niveau bas se vide rapidement vers le fon- damental) Expliquer rapidement l'origine des fréquences sélec- tionnées par la cavité ? Les cavités laser sont-elles plan- plan ? Pourquoi ? (Non, elles sont entre miroirs sphé- riques. Entre miroirs plans, la moindre erreur d'aligne- ment rend la cavité instable, ie les rayons en sortent après quelques aller-retour) Quelle est la structure du faisceau ? Qu'est ce que cela change ? (faisceau gaussien, les fré- quences des modes longitudinaux sont corrigées, et on a en plus des modes transversaux) Comment choisir un mode transversal particulier ? (avec des diaphragmes, on fait du filtrage optique) Quelles sont les causes d'élargissement des raies ? (multiples, de façon fondamentale, il y a l'incertitude de Heisenberg, mais on a de l'effet Doppler, prépondé- rant dans le cas de lampes basse pression par exemple, qui donne un profil gaussien ; des collisions entre atomes, prépondérantes pour des lampes haute pression, donnant un profil lorentzien ; des inhomogénéïtés de champ, ...) Qu'est-ce qu'un singulet ? (c'est lié aux moments ci- nétiques des niveaux considérés, pour être plus précis, voir un cours de physique atomique. Il n'est absolument pas nécessaire d'en parler, mais si on lâche le mot, il faut s'attendre à des questions !)

Definition sur la densité spectrale de puissance, comment on l'explique facilement ? Problème dans la leçon, soit densité spectrale d'énergie ou de flux ?

Le pic avec le spectro, est ce que c'est la largeur de raie du laser ? Si on change le temps d'intégration, la largeur change. Avec un faible temps d'intégration, le spectro sature, on observe le pied du pic. On augmente le temps d'intégration, on observe tout le pic (et il est donc fin). Pour lire la vraie largeur à mi-hauteur, il faut voir le max.

Pourquoi l'émission stimulée est proportionnelle à la densité spectrale d'énergie ? C'est phénoménologique ça colle bien.

Pour les sources ont des longueurs d'ondes (ou coefficients d'émission stimulée) si différentes alors que fonctionnent sur le même principe ? Petit calcul d'odg pour dire que dans la vie quotidienne domine.

Pour la condition d'amplification il faut prendre en compte.

Quand l'intensité diminue, le gain augmente. Pas un milieu magique. Parler de gain.

Prérequis : corps noir, distribution de Maxwell Boltzmann

Commentaires