

LP : Interactions lumière-matière

Element imposé : Refroidissement laser

Niveau : TS

Prérequis :

- Spectre d'émission et d'absorption (2nd)
- Relation entre célérité, longueur d'onde et fréquence (2nd)
- Atomes, électrons (2nd)
- Spectre électromagnétique (2nd)
- Spectroscopie UV-Vis, Loi de Beer-Lambert (2nd)
- Notion d'interférence (TS)
- Source chaude, source froide, loi de Wien (1S)

Objectifs :

- Connaître les 3 types d'interaction lumière-matière : absorption, émission spontanée, émission stimulée
- Comprendre le fonctionnement d'un laser

Plan proposé :

I. Transfert quantique d'énergie

- A. Dualité onde-particule
- B. Niveau d'énergie d'un atome
- C. Absorption et émission spontanée
- D. Spectroscopie UV-Vis

II. Laser

- A. Propriétés
- B. Fonctionnement
- C. Refroidissement laser

Intro pédagogique

Leçon placée au niveau T S, s'inscrit dans le grand thème "Observer" pour étudier tout ce qui est absorption et émission. La seconde partie de cette leçon utilisera la notion d'émission stimulée. On peut voir cela comme une progression spiralaire : on réinvestit les notions de Seconde puis on se servira de ce cours comme base en Terminale S quand sera abordé le caractère ondulatoire de la lumière.

Difficultés : Le cas de l'émission stimulée dans le LASER peut être difficile à appréhender, on s'appuiera sur des animations.

Comprendre la dualité onde-corpuscule de la lumière, on s'appuie sur approche historique, et expérience historique.

Activités : niveaux d'énergie, conversion d'énergie, lampe spectrale, analyse documentaire sur les lasers (TD).

Faire un schéma des niveaux énergétiques que l'on construit tout au long de la leçon en rajoutant les niveaux, les transition et les phénomènes associés (absorption, émission spontanée, stimulée...)

Introduction

La nature de la lumière a longtemps été à l'origine de débats dans la communauté scientifique.

Matière = ce qui est composé de particules massives

Lumière = phénomène conduisant à une sensation visible. Soit une onde électromagnétique dans le domaine visible. (def du Taillet)

I. Transfert quantique d'énergie (cf LP12)

A. Dualité onde-particule (peut être plutôt en pré-requis)

Historique :

- XVIIe siècle : Newton : lumière = jet de particules qui diffèrent suivant la couleur de la lumière
Huygens : lumière = onde, couleur dépend de la fréquence de vibration de l'onde
=> Newton plus reconnu donc théorie retenue.
- XIXe siècle : Fresnel et Young: expérience d'interférence témoignent de la nature ondulatoire de la lumière. Modèle ondulatoire prédomine alors.
- 1900 : Planck établit une loi de quantification de l'énergie : un quantum = paquet d'énergie.
- 1905 : Einstein postule qu'un rayonnement est constitué de particules transportant des quantas d'énergie. 'photons'. *Photons* = particule non chargée de masse nulle et se déplaçant à la vitesse de la lumière. Photon ni onde, ni particule = objet quantique.

Energie du photon : $E = h\nu$ ($h = 6.62 \cdot 10^{-34}$ J.s)

B. Niveaux d'énergie d'un atome

- 1913 : Bohr postule la quantification des niveaux d'énergie des atomes.

Diagramme d'énergie (diapo) : niveaux d'énergie discret, il y en a un nombre fini et les énergies entre ces niveaux sont des valeurs inaccessibles.

Unité utilisé : l'électron Volt : $1\text{eV} = 1,60 \cdot 10^{-19}$ J, unité d'énergie adaptée pour décrire un système microscopique.

Diagramme comporte plusieurs niveaux. *Niveau fondamental* = le niveau de plus basse énergie. Un atome dans son état fondamental est stable.

Transition : Comment un atome passe-t-il d'un niveau à un autre ? Comment la matière interagit au contact de la lumière ?

C. Absorption et émission spontanée

La lumière interagit avec la matière par paquet d'énergie. Pour faire passer un atome d'un niveau à un autre il faut lui apporter une quantité d'énergie exactement égale à l'écart entre les deux niveaux entre lesquels on souhaite faire la transition qu'on va noter $\Delta E = \epsilon_2 - \epsilon_1$

--> On a une interaction lumière matière ssi $E = h\nu = \Delta E$.

Il y a alors absorption du photon (Schéma)

Ordre de grandeur entre l'état fondamental et les états électroniques excités = 1,5 à 10 eV → UV-vis.

Une fois excité l'atome va chercher à se désexciter pour rejoindre le niveau fondamental → il va émettre un photon d'énergie ΔE → Emission spontanée (Schéma)

On peut comprendre l'allure des spectres d'absorption et d'émission de l'hydrogène (Slide). On se rappelle que la couleur d'une radiation lumineuse est liée à sa fréquence. Les photons de la bonne fréquence seront absorbés par l'hydrogène puis réémis.

Transition : Est-ce qu'on peut apprendre infos sur la matière en analysant avec lumière ?

D. Spectre UV-vis

Spectroscopie : Etude de la matière par son interaction avec la lumière.

Vous connaissez déjà la spectro UV-Vis. Basé sur transition électronique.

Quelle infos la spectro UV-vis nous donne ? Couleur donc énergie des transitions électronique.

Ex calcul KMnO_4 : $\lambda_{\text{max}}=525\text{nm}$, Couleur → rouge/violet

Contextualisation : on utilise cette interaction lumière-matière, qui est spécifique à chaque espèce chimique, en industrie, par ex, pour déterminer la concentration en une espèce dans une solution.

En effet, on a dit que espèces chimiques peuvent absorber que certaines longueurs d'onde, on va donc travailler à la longueur d'onde correspondant à celle pour laquelle l'espèce d'intérêt absorbe le plus (et les autres espèces n'absorbent pas) et vous avez déjà vu, on peut relier l'absorbance de l'espèce à sa concentration avec la loi de Beer-Lambert.

Expérience : Loi de Beer-Lambert avec des solutions de KMnO_4

https://phet.colorado.edu/sims/html/beers-law-lab/latest/beers-law-lab_fr.html (Trop bien!!!!!!) + montrer image vrai spectrophotomètre.

Transition : Il existe une troisième interaction qui n'est pas spontanée et qui est à l'origine d'une source laser.

II. Laser

LASER = Amplification de lumière par émission stimulée de rayonnement

A. Propriétés

On va essayer de décrire les propriétés du laser en réalisant des observations expérimentales :

Source lumineuse monochromatique

Source chaude ou froide ? Si source chaude : Loi de Wien : $T=4473^\circ\text{C}$ le laser n'est pas à cette température donc source froide.

Faisceau directionnel : craie, on voit faisceau fin.

Transition : Comment fonctionne le laser ?

B. Fonctionnement

Emission stimulée postulée par Einstein en 1917. (diapo)

Un photon incident d'énergie $E=h\nu$ peut forcer un atome, initialement dans l'état excité à passer à un état de plus basse énergie, ce passage s'accompagne de l'émission d'un second photon de même énergie, de mêmes direction et sens de propagation et de même phase que le photon incident. (Schéma + Animation)

Il faut que de nombreux atomes soient dans un état excités pour qu'il y ait émission de nombreux photons de même longueur d'onde -> On veut avoir plus d'atomes à l'état excité qu'à l'état fondamental = on veut une inversion de population. Pour faire cela on réalise une opération appelée pompage optique(Schéma)

Il faut aussi une amplification : Les photons émis peuvent à leur tour stimuler d'autres émissions. Schéma Hachette. Milieu placé entre deux miroirs. aller retour aux photons. Augment nombre d'interaction. Ensemble = oscillateur laser. ->Amplification par effet laser.

C. Application : refroidissement laser

Peut aussi jouer le simple rôle de refroidisseur d'atomes.

L'immense énergie développée par le laser va empêcher les atomes de vibrer à leur rythme propre. Un second face au premier vient figer définitivement les atomes. Pris entre deux bras de lumière comme s'ils étaient bloqués entre deux murs. Puis dans les trois directions spatiales -> Bloqué à l'intérieur de 6 faisceaux. Atomes ne peuvent plus s'échapper ni vibrer, deviennent lents, c'est à dire froid.

En réalité, incessant échange d'énergie entre laser et atome. Atome absorbe photon du laser, ce qui le freine. Après un laps de temps, il émet à son tour un autre photon, ce qui le fait reculer = effet recul.

1988, l'équipe de COHEN-TANNOUDJI fait passer au zéro absolu.

Application : définition de la seconde

Conclusion :

Slide récap en revenant sur schéma complété tout au long de la leçon

Lasers nombreuses autres applications : médicales, industrielles... On peut les étudier en approche doc.

Questions :

- Est ce que la couleur de tous les objets s'interprète comme vous l'avez dit ? Non ça peut être diffusion multiple et cohérente (ex : lait, peinture blanche)
- Couleur du ciel ? Diffusion Rayleigh (taille diffuseurs très petite devant longueur d'onde)
- Qu'est ce que c'est l'ultra noir ? Nouveau matériau
- C'est quoi la fréquence du photon ? Difficulté en classe d'associer fréquence à particule ?
Attention ne pas mettre prop ondulatoires sur particule
- Est-ce que le photon ne transporte que de l'énergie ? Non aussi quantité de mouvement et moment cinétique (lumière chauffe et pousse)
- Ça veut dire quoi faire ralentir un objet ?
- Où est l'endroit le plus froid dans l'univers ? Sur Terre dans les labo (univers = à 3K)
- Hypothèses formule propagation des erreurs ? Erreurs indépendantes et faibles Quelle est son origine ?

- Comment contextualiser l'expérience ? Détermination concentration solution inconnue (industrie)
- Lien entre température et sensation de chaud ? Transfert thermique (effusivité)
- Y a-t-il un lien entre transition électronique et source chaude ?
- Y-a-t-il d'autres sources d'interaction lumière matière ? Oui car l'interaction d'un état lié à un état lié, autres exemples : synchrotron

Remarques :

- Bien mettre en évidence l'interaction même (qu'est ce que l'on transfère, comment?)
- Mettre des ordres de grandeur
- Rayonnement du corps noir
- Construire un tableau au fur et à mesure de la leçon (construction diagramme : niveaux d'énergie, absorption, émission spontanée/stimulée)

Idées d'élément imposé :

- Autre application du laser
- Détailler une technique de spectroscopie
- Spectre d'un élément particulier
- Lampe au mercure/sodium