

LP N°38 : Modèles de diffusion de la lumière.

Niveau : L3

1) Objectifs pédagogiques de la leçon :

→ Connaître les grandes idées derrière la création d'un modèle de diffusion de la lumière classique.

→ Connaître le modèle de l'électron élastiquement lié et savoir l'utiliser pour retrouver la diffusion d'un rayonnement incident par un électron atomique.

→ Connaître la diffusion Compton, l'approximation de Thomson qui lui est associée et savoir montrer qu'il s'agit d'une diffusion inélastique dans le cas général.

2) Messages forts de la LP :

→ La loi de Beer-Lambert-Bouguer est la manière la plus générale d'écrire la diffusion de la lumière classique. Même la diffusion « de surface » s'explique par cette loi.

→ Un modèle de diffusion = un $\sigma_{\text{diffusion}}$ (que l'on réinjecte dans la loi de Beer-Lambert-Bouguer).

→ Bien comprendre l'origine des forces (frappel et fvisqueuse) intervenant dans le « toy model » qu'est l'électron élastiquement lié.

→ Dans le cadre de la diffusion par un électron atomique : Excitation incidente = lumière incidente et on a création d'un dipôle qui (re)rayonne de manière dipolaire (=> lumière diffusée).

→ Dans le cadre de la diffusion par un électron atomique : il existe différents domaines de diffusion. Les 2 plus importantes sont la résonnante et Rayleigh.

→ Dans le cadre de la diffusion par un électron atomique : il existe une

polarisation par diffusion qui s'explique par le fait que le rayonnement diffusé est dipolaire.

→ Dans le cadre de la diffusion Compton : Il s'agit d'un modèle de diffusion inélastique de la lumière sur un gaz d'électrons. Sa section efficace est donnée par la formule de Klein-Nishina (complexe à calculer). Dans l'approximation de Thomson, les électrons ne sont pas déviés.

→ Le « bon » cadre pour décrire la diffusion est celui de la mécanique quantique (transitions entre niveaux).

→ La diffusion n'est en réalité qu'un cas particulier de l'interaction lumière-matière.

4) Difficultés, solutions, astuces et erreurs classiques :

Difficultés du chapitre et solutions proposées :

→ Difficulté : La diffusion étant en réalité un sous-domaine de l'interaction lumière-matière, il est impossible de faire la différence entre les mécanismes expliquant la diffusion, l'absorption, la fluorescence, etc... à l'échelle microscopique (classement purement macroscopique) ce qui peut rendre floue la diffusion de la lumière et ses limites pour un élève.

⇒ Solution : Pour répondre à ce problème, on ne parle dans ce cours que de modèles classiques de la diffusion et on s'appuie sur la loi de Beer-Lambert-Bouguer pour introduire la notion de section efficace d'extinction puis de diffusion. On définit alors la notion de section efficace de diffusion et on explique qu'un modèle classique de diffusion donné = une section efficace de diffusion donnée (que l'on calcule). (Note : l'idée est la même qu'en théorie des champs où une théorie donnée = une densité volumique de lagrangien donnée).

→ Difficulté : Comprendre d'où viennent les forces f_{rappel} et $f_{\text{visqueuse}}$ dans le modèle de l'électron élastiquement lié.

⇒ Solution : On peut imaginer un modèle classique simple d'un noyau en interaction avec un nuage électronique décrit par son barycentre (à la distance r du noyau) et en déduire une force de type force de rappel élastique. La force visqueuse est quand à elle associée au nuage électronique oscillant excité qui rayonne (⇒ perte d'énergie au cours du temps).

→ Difficulté : Bien comprendre les étapes du raisonnement qui permettent d'aboutir à la section efficace de diffusion dans le cadre de la diffusion par un électron atomique.

⇒ Solution : Il faut prendre le temps de les détailler quitte à passer un peu moins de temps sur les calculs. Notamment, on mettra le calcul de l'obtention de l'expression de la puissance diffusée dans le cadre du rayonnement dipolaire en prérequis (Ne surtout pas redémontrer un calcul associé au rayonnement dipolaire, on n'a pas le temps!!).

Les erreurs « classiques » à souligner pour les élèves:

→ La diffusion de la lumière n'a rien à voir avec la diffusion thermique, la diffusion de particules, etc... C'est le même mot mais c'est deux phénomènes complètement différents.

→ Ne pas confondre diffusion élastique/inélastique et choc élastique/inélastique. Une diffusion est qualifiée d'élastique lorsque la longueur d'onde d'une OPPM incidente et de l'onde diffusée associée sont les mêmes (et d'inélastique dans le cas contraire) tandis qu'un choc est dit élastique entre 2 corps lorsque leur état interne ne change pas à la suite du choc (en particulier leur masse ainsi que leur énergie cinétique sont conservées) ⇒ bien souligner la différence entre les deux.

→ Dans le calcul de $\langle p^2 \rangle$ pour calculer la puissance diffusée dans le cadre de la diffusion par un électron atomique, il faut bien utiliser p réel (et pas complexe). L'erreur est très « tentante » pour un élève !

Astuces utiles à donner pour un élève:

→ Calculer $\langle p^2 \rangle$ en repassant en réel puis en prenant le carré et la moyenne est long ⇒ Il est plus facile d'utiliser la formule : $\langle p^2 \rangle = \frac{1}{2} \text{Re}(p_{\text{bar}} \cdot P_{\text{bar}}^*)$

→ Le domaine de Thomson dans le cadre de la diffusion par un électron atomique et l'approximation de Thomson dans le cadre de la diffusion Compton aboutissent au même modèle (ce qui est logique).

4) Prérequis :

→ Relativité Restreinte, principes fondamentaux, cinématique relativiste.

→ Electromagnétisme classique du vide et des milieux continus, rayonnement dipolaire.

→ Notion de section efficace.

→ Mécanique quantique, principes fondamentaux.

5) Plan :

I) Description du phénomène de diffusion

- 1) Extinction et loi de Beer-Lambert-Bouguer
- 2) Quelques exemples de modèles de diffusion

II) Diffusion par un électron atomique

- 1) Modélisation et résolution
- 2) Différents domaines de diffusion
- 3) Polarisation par diffusion

III) Diffusion sur des particules élémentaires libres chargées

- 1) Diffusion Compton
- 2) Approximation de Thomson

6) Développements :

Introduction :

Ce cours s'intéresse à différents modèles simples pour tenter d'expliquer le phénomène de diffusion de la lumière. Lorsqu'elle interagit avec la matière, la lumière est la plupart du temps déviée dans diverses directions de manière plus ou moins isotrope, c'est ce phénomène que l'on appelle communément « diffusion de la lumière » (/!\ Ca n'a donc rien à voir avec la diffusion au sens de la diffusion thermique, diffusion de particule, etc... qui traduit l'obéissance à une équation de diffusion /!\). Lorsque la diffusion est associée à une variation de la fréquence d'une OPPM incidente, on parle de diffusion élastique (et inélastique dans le cas contraire) et la diffusion peut aussi être associée à une variation de la polarisation du rayonnement incident sur la matière comme nous le verrons.

I) Description du phénomène de diffusion

a) Extinction et loi de Beer-Lambert-Bouguer

→ Démonstration détaillée de la loi de Beer-Lambert-Bouguer (cf slides) et mise en évidence de la notion de section efficace d'extinction et de diffusion.

→ Définition de la section efficace de diffusion (cf slides).

b) Quelques exemples de modèles de diffusion

→ Présentation des modèles que l'on va étudier dans ce cours : Diffusion par un électron élastiquement lié et diffusion Compton.

→ Présentation d'autres exemples de modèles de diffusion (qq ex ci-dessous) :

→ Modèle de Mie = modèle optique où l'élément diffusant est décrit comme une boule d'indice optique n donné (gouttelette d'eau => permet d'expliquer la diffusion dans les nuages)

→ Modèle de Tyndall = idem que Mie mais l'élément diffusant n'a pas une forme sphérique.

→ Diffusion Raman : Diffusion inélastique d'OEM sur des atomes, des molécules ou des solides. La différence d'énergie entre un photon absorbé et un photon réémis est égale à la différence d'énergie entre 2 états de rotation ou de vibration de l'objet (=> Prise en compte de la quantique). Application : Spectroscopie Raman pour l'analyse des modes de rotation et de vibration de la molécule d'eau.

→ Diffusion Brillouin : Diffusion inélastique d'OEM sur un solide, interaction avec les phonons acoustiques de la matière (=> permet d'expliquer la diffusion de surface en prenant en compte les effets collectifs dans la matière condensée par exemple).

II) Diffusion par un électron atomique

a) Modélisation et résolution

Modèle classique pour décrire l'interaction atome-champ

Hypothèses : → OPPM électrique polarisée selon ux

→ Modèle de l'électron élastiquement lié : frappe et fvisqueuse

Etape 1 : Application du PFD à l'électron

Etape 2 : Ecriture en complexe du dipôle oscillant associé => Rayonnement dipolaire électrique (RDE)

Etape 3 : Ecrire $\langle P \rangle$ émise RDE (puissance émise par un dipôle oscillant) à partir du cours sur le RDE.

Etape 4 : Calculer $\langle p'^2 \rangle$ qui intervient dans $\langle P \rangle$

Etape 5 : Réinjecter dans $\langle P \rangle$ et écrire : $\langle P \rangle = \sigma(\omega) \langle |\Pi| \rangle$ avec $\langle |\Pi| \rangle = \frac{1}{2} c \text{ esp}_0 E_0^2$ (moyenne du vecteur de Poyting incident = irradiance de l'onde incidente).

=> On obtient $\sigma(\omega)$ du modèle.

b) Différents domaines de diffusion

→ $\omega = \omega_0$: Diffusion résonante => $\sigma(\omega)$ approchée par un DL autour de ω_0

→ $\omega \ll \omega_0$: Diffusion Rayleigh => $\sigma(\omega)$ en $(1/\lambda)^4$

→ $\omega \gg \omega_0$: Diffusion Thomson => $\sigma(\omega) = \sigma_{\text{thomson}} = \text{cste.}$

Graphique de $\sigma(\omega)$: cf slides

Exemple de diffusion résonnante : Faisceau d'une lampe à vapeur de sodium sur une vapeur de sodium => forte diffusion car $\omega = \omega_0$. (Ce qui n'est pas le cas si le faisceau est issu d'une lampe à vapeur de mercure).

Exemple de diffusion Rayleigh : La diffusion Rayleigh permet d'expliquer la couleur du ciel. Si on regarde le ciel, on perçoit des rayonnements dont la trajectoire à partir du soleil est indirecte (=> rayons diffusés). Ces rayons résultent de la diffusion Rayleigh qui est plus prononcée pour de courtes longueurs d'onde (donc plus pour le bleu que pour le rouge et ce en $(1/\lambda)^4$). En fait, comme les molécules d'air ont une taille de l'ordre de 0.1 nm contre 500 nm (en ODG) pour le spectre visible, ce dernier est bien dans le domaine de Rayleigh de la diffusion. Si à présent le soleil est couchant, ses rayons traversent une couche d'atmosphère plus importante et sont davantage diffusés => le bleu et le vert sont « déjà » diffusés lorsqu'ils arrivent au niveau de l'observateur qui ne perçoit plus que le rouge.

c) Polarisation par diffusion

Le rayonnement que réémet l'atome (diffusion) peut être polarisé. On peut illustrer cela en utilisant un polariseur dirigé vers le ciel.

Soit une OPPM non polarisée se propageant selon Oz et arrivant sur l'atome. On peut décomposer sa polarisation quelconque comme une polarisation rectiligne selon Ox et une selon Oy. Si on s'intéresse à la partie selon Ox de cette polarisation incidente, elle excite le dipôle associé à l'électron élastiquement lié de l'atome selon Ox. Or, d'après le cours sur le RDE, dans la zone de rayonnement (ie loin de l'atome diffusant), la partie du rayonnement diffusé associée est donc polarisée rectilignement selon Ox et son intensité est maximale dans Oyz et nulle selon Oz. Dans Oyz, le dipôle émet donc isotropiquement des ondes polarisées selon Ox. Le raisonnement est le même mais en inversé en s'intéressant à la partie selon Oy de la polarisation de l'onde incidente. Au bilan, on observe une onde polarisée verticalement dans le plan horizontal et horizontalement dans le plan vertical (cf schéma sur slides).

III) Diffusion sur un électron libre

Le modèle de la partie précédente permet d'expliquer la diffusion des OEM sur un ensemble d'atomes ou de molécules comme un gaz. On s'intéresse dans cette partie à la diffusion d'une OEM sur un gaz d'électrons libres appelée diffusion Compton.

a) Diffusion Compton

Calculs à faire au tableau : A l'aide du schéma sur les slides, on exprime la conservation de l'impulsion et de l'énergie entre avant (= électron au repos et photon incident) et après (= électron et photon déviés). On peut alors écrire une relation liant θ et $\lambda_1 - \lambda_2$ (variation de la longueur d'onde du photon). On montre que pour θ non nul, λ_1 n'est pas égale à $\lambda_2 \Rightarrow$ diffusion inélastique! (La diffusion de la partie II était élastique).

A expliquer : La distribution angulaire de la diffusion Compton ainsi que l'expression de sa section efficace ne sont pas triviales et sont données par la formule de Klein-Nishina. Elle n'est pas isotrope. Les calculs donnent aussi une relation en ϕ (de l'électron) et θ (du photon).

b) Approximation de Thomson

En réalité, la diffusion Compton associée à une déviation significative de l'électron n'est quasiment jamais observée.

Thomson propose alors l'approximation suivante : Energie du photon incident \ll Energie de masse de l'électron. Cela implique donc que $p_e = 0$ (l'électron n'est pas dévié et se comporte comme un « mur » pour le photon).

Légitimité : Cette approximation est fautive si : $E_{\text{photon incident}} \sim m_e c^2$ soit si $hc/\lambda_1 \sim m_e c^2$ soit pour $\lambda_1 \sim h/(m_e c)$ soit $\lambda_1 \sim 10^{-12}$ m. Par comparaison l'ordre de grandeur de la longueur d'onde des rayons gammas est 10^{-9} m ce qui est 1000 fois plus petit !!

En fait, les deux seuls cas dans l'univers où cette approximation n'est pas vérifiée sont : \rightarrow juste après le Big Bang
 \rightarrow Pour quelques très rares rayons cosmiques ultra énergétiques (une poignée!)

Exemple d'application de l'effet Compton dans l'approximation de Thomson : En astrophysique, une étoile d'une masse donnée possède une luminosité maximale appelée Limite d'Eddington. Au-delà de cette limite, la pression de radiation de la lumière de l'étoile sur son plasma devient plus grande que sa force de gravité \Rightarrow l'étoile se disloque. Eddington a montré cela en se basant sur la diffusion Thomson des photons sur les électrons du plasma.

Couplée à la relation masse-luminosité des étoiles (cf annexes), la limite d'Eddington permet de trouver une masse maximale absolue pour les étoiles de l'univers.

Conclusion :

En réalité, à l'échelle microscopique, il n'y pas vraiment de différences entre absorption, diffusion et même fluorescence, phosphorescence, etc... ! Ce classement est uniquement macroscopique !! Tous ces mécanismes sont décrits par des transitions entre niveaux énergétiques (électroniques, vibrationnelles, rotationnelles, etc...) qui dépendent du matériau dans le cadre de la mécanique quantique!

La diffusion n'est donc qu'un cas particulier d'interaction lumière-matière.

7) Bibliographie :

→ Je me suis surtout inspiré de mes cours de L3 d'électromagnétisme et d'astrophysique de L3 et de M1 pour faire ce cours. Cependant, les calculs non détaillés ici sont trouvables dans n'importe quels bouquins classiques d'électromagnétisme de L3.

→ On trouvera aussi quelques explications intéressantes dans le Sextant et le Taillet notamment concernant la polarisation par diffusion dans le cadre de la diffusion Rayleigh (respectivement page 205 et page 273).

8) Questions et commentaires:

→ ***Qu'est-ce que la diffusion Compton inverse?*** « La [diffusion Compton inverse](#) (diffusion d'électrons énergétiques par un gaz de photons peu énergétiques) est un cas de diffusion multiple et couplé où la distribution spectrale des photons est drastiquement modifiée par l'interaction. L'interaction individuelle est identique à la diffusion Compton. » (Wikipédia)

→ ***Qu'est ce qu'un choix de jauge en électromagnétisme ?*** Lorsque l'on résout les équations de Maxwell, on travaille sur le potentiel vecteur A et scalaire V au lieu du champ E et du champ B . On montre alors que A et V vérifient un ensemble d'équations qui ne permet pas de les déterminer complètement => il manque une relation à imposer qui n'a aucun impact sur les champs E et B (au bout des calculs), c'est le choix de jauge.

Exemples de jauges : → Coulomb : $\text{div } A = 0$ (utile pour la quantification du rayonnement EM)

→ Lorenz (utile pour l'expression des potentiels retardés et donc le rayonnement EM classique)

Cf Wikipédia « Electromagnétisme » section « Invariance de Jauge Classique » ou n'importe quel bouquin d'électromag de L3 pour les menus détails.

→ ***Comment expliquer la diffusion « de surface » ?*** En fait, la diffusion de surface est aussi expliquée par Beer-Lambert-Bouguer ! Dans ce cas, on a juste $I(L) = 0$ car une épaisseur optique τ très grande (toute la lumière est diffusée « en surface »).

→ ***Qu'est ce que la fluorescence ? Qu'est ce que la phosphorescence ?*** La fluorescence est un cas particulier de luminescence et un phénomène d'absorption-réémission inélastique de la lumière qui s'explique par la

mécanique quantique. Une lumière de courte longueur d'onde (ex : UV) est absorbée par la molécule fluorescente ce qui la fait transiter vers un état quantique excité. Cette lumière est ensuite en partie réémise très rapidement à une longueur d'onde plus grande (ex : visible) en raison de transitions non radiatives de la molécule excitée (qui « dégradent » donc l'énergie d'excitation initiale fournie par le rayonnement incident) avant cette réémission. La phosphorescence suit le même mécanisme mais les transitions mises en jeu sont beaucoup plus lentes.

→ ***Expliquez le phénomène du rayon vert.*** L'atmosphère, ou plutôt sa limite supérieure peut être assimilée au bord d'un prisme qui décompose la lumière blanche du soleil en bleu, vert et rouge (longueurs d'onde intéressantes dans notre cas) . Lorsque le soleil est juste sur le point de se coucher, le bleu est toujours très diffusé (=> on ne le voit toujours pas). En revanche, le vert peut se voir juste au-dessus du rouge puisque ce dernier a presque disparu (et donc il gêne moins la vision d'un faible rayon vert par l'observateur !). (cf slides)

→ ***Parlez-nous un peu des antennes.*** Il faut savoir évoquer quelques types d'antennes réelles « classiques » comme l'antenne quart d'onde ou demi onde. On peut aussi évoquer l'antenne Yagi qui a l'avantage de rayonner la plus grande partie de sa puissance vers l'avant.