

Titre : Rayonnement dipol

Présentée par : Izia Pétillon

Rapport écrit par : Guilhem Mariette

Correcteur : Arnaud Raoux

Date : 18/12/2020

Bibliographie

Titre	Auteurs	Éditeur
Physique MP-MP*, Tout-En-Un	C. Deschamps	Dunod
Electromagnétisme Perez	José-Philippe Pérez	Dunod
Tech et doc de stephane Olivier	Stephane Olivier	Tec & Doc

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon : CPGE

Pré-requis :

- Equations de Maxwell
- Ondes électromagnétiques dans le vide
- Dipôle électrostatique

I/ Le dipôle oscillant (~9 min)

1) Modèle du dipôle (~5min)

Dipole sinusoïdal de charge q et de taille caractéristique l : $\vec{p}(t) = ql \cos \omega t \vec{e}_z$
Approximation dipolaire $r \gg l$ et ARQS : charges non relativistes

2) Description du champ EM (~4 min)

Invariance par rotation φ et symétries : formes de \vec{E} et \vec{B}
Expressions complètes sur diapositive

II/ Propriétés du rayonnement (~16 min)

1) Zone de rayonnement (~7min)

- $r \ll \lambda$: Zone statique : dipôle quasi-électro-statique
- $r \gg \lambda$: Zone de rayonnement : expressions approchées de \vec{E} et \vec{B} avec $t' = t - r/c$

Relation de structure : $\vec{B} = \frac{\vec{e}_r \times \vec{E}}{c}$

2) Rayonnement du champ électromagnétique (~9 min)

Vecteur de Poynting : $\vec{\Pi} = \frac{\mu_0 \sin^2 \theta \dot{\vec{p}}^2}{16 \pi^2 c r^2} \vec{e}_r$

Vecteur de Poynting moyenné : $\langle \vec{\Pi} \rangle = \frac{\mu_0 \omega^4 q^2 l^2 \sin^2 \theta}{32 \pi^2 c r^2} \vec{e}_r$

Puissance rayonnée $P_r = \frac{\mu_0 \omega^4 q^2 l^2}{12 \pi c}$ et formule de Larmor $P_r = \mu_0 q^2 \langle \ddot{a}^2 \rangle \frac{1}{6 \pi c}$

Schéma de $\langle \vec{\Pi} \rangle \propto \sin^2(\theta)$ en 2D et le tore en 3D sur diapo

Animation du champ de vecteur de Poynting en fonction du temps dans l'espace

III/ Diffusion de Rayleigh

Expérience du coucher de soleil à travers une cuve contenant une solution aqueuse de lait en poudre

1) Modèle de l'électron élastiquement lié (~11 min)

Démonstration de la polarisation dans le modèle de l'électron élastiquement lié :

$$\vec{p} = -e\vec{r} \simeq -\frac{e^2 \omega^2 \cos \omega t}{\omega_0^2 m} \vec{E}_s$$

Simplification de $\vec{\Pi} \geq \frac{\mu_0 \omega^4 e^2 E_s^2 \sin^2 \theta}{32 \pi^2 c r^2 m^2 \omega_0^4} \hat{e}_r$

$$P_r \propto \omega^4$$

2) Influence de la longueur d'onde (~4 min)

Application numérique pour le bleu et le rouge

Expérience de la polarisation par diffusion Rayleigh

Questions posées par l'enseignant (avec réponses)

Retour sur l'expérience de polarisation : qu'est-ce qu'une lumière non polarisée ? Est-ce qu'on observe une lumière polarisée du point de vue de l'examineur ?

- La lampe quartz-iode émet des trains d'ondes dont la direction de polarisation est aléatoire
- Lorsque la polarisation est verticale, les dipôles sont verticaux et la diffusion est maximale dans le plan horizontal.
- Si la polarisation est horizontale, les dipôles diffusent principalement dans le plan de la verticale et de l'axe optique.
- Même sans lumière polarisée incidente, la lumière diffusée est polarisée en sortie car les champs électromagnétiques sont orthogonaux à l'axe optique. La polarisation majoritaire est donc verticale. La lumière du soleil vue à travers le ciel est polarisée. On utilise cette polarisation avec les lunettes de soleil par exemple

Qu'est-ce qu'il y a dans l'eau, comment ça fonctionne ?

- Le lait en poudre est composé de protéines qui fonctionnent comme des agents tensioactifs, qui vont s'organiser sous forme de micelles, d'une taille de l'ordre du μm .

Est-ce que ça fonctionne encore avec nos approximations ?

- Grâce à cette taille plus grande on vérifie toujours l'approximation dipolaire $r \gg l$ mais on est à la limite de la diffusion Rayleigh $r \sim l$ qu'on appelle la diffusion de Mie, comme dans la lumière des nuages.

Dans la diffusion de Mie comme dans le cas des nuages, est-ce que la lumière ressort de manière polarisée ?

- Non la lumière diffusée par les nuages n'est pas polarisée car il y a plusieurs diffusions à l'intérieur du nuage qui crée la perte de polarisation au sein du nuage.

Couleur du soleil ?

- Avant la traversée de l'atmosphère, le soleil est blanc, comme on peut l'observer sur l'ISS par exemple. Alors grâce à la diffusion Rayleigh, le soleil paraît jaune au zénith car on a une épaisseur d'atmosphère ($\sim 30 \text{ km}$) plus faible que pour le lever ou le coucher du soleil (rouge pour $\sim 100 \text{ km}$).

Quantitativement, peut-on calculer une longueur de diffusion à partir de ces observations ?

Existe-t-il d'autres sources de champs électromagnétiques ?

- Dipôle magnétique oscillant, les transitions électroniques, le rayonnement du corps noir

Quelle est l'origine du rayonnement du corps noir ?

- Rayonnement thermique qui née de l'agitation thermique

Vous proposez que la matière est modélisable par un dipôle électrique, pouvez-vous développer ?

- Par théorème de superposition, on peut partir du dipôle et remonter à une distribution de charge plus complexe. A l'inverse, on peut modéliser toute la matière globalement neutre par des dipôles avec des dipôles permanents ou induits.

Dessiner le champ électrique créé par un dipôle :

- La norme du champ est dépendante de φ mais sa direction dépend de φ , donc il faut faire attention

Comment démontre-t-on les expressions du champ électromagnétique dont la démonstration est hors-programme en CPGE ?

- A partir des potentiels retardés, on remonte aux champs \vec{E} et \vec{B} .

Pourquoi appeler la zone statique de cette manière ?

- Approximation quasi-statique

Pour démontrer la formule de Larmor, vous ne considérez que les champs en $1/r$ pouvez-vous montrer que les autres contributions sont nulles ?

- Les termes croisés $\dot{\vec{p}} \cdot \ddot{\vec{p}}$ etc sont en quadrature et ont une intégrale qui tend vers 0 quand r tend vers $+\infty$

Vous avez parlé de rayonnement par rayons X pour l'imagerie médicale ?

- Rayonnement de rayons X par accélération cyclotron

Comment est-ce qu'on passe en complexe ? Qu'est-ce que cela veut dire pour vous ?

- On se place dans un régime sinusoïdal forcé donc les solutions sont imposées en $\cos \omega t$ puis l'étape suivante est d'ajouter artificiellement une partie imaginaire en quadrature afin de faire apparaître des solutions en $\exp i\omega t$ qui se simplifie et facilite les calculs.

Commentaires lors de la correction de la leçon

Choix de leçons : bien suivis avec le programme de CPGE mais aussi avec beaucoup de calculs (un peu moins aurait été OK). Il y avait peu d'ordres de grandeur et d'applications donc éventuellement passer un peu plus de temps sur cela. Mais ces choix se défendent bien.

Sur le contenu de la leçon, c'est cohérent et pertinent.

Retour sur l'expérience qui présente beaucoup de phénomènes : l'atténuation de certaines longueurs d'ondes dans un milieu diffusant est pertinente mais il faut avoir conscience que la présence de lait à la limite de la diffusion de Rayleigh implique de la diffusion de Mie également.

La partie sur la polarisation du bleu du ciel est aussi très intéressante à expliquer ! En effet la diffusion Rayleigh est une des façons de créer une onde polarisée.

Noms de parties pas très bien choisis pour les transformer en titres plus parlants. Il faut expliquer pourquoi on a besoin de faire ces approximations pour pas qu'elles ne sortent de nulle part.

Il vaut mieux écrire $\vec{E}(M)$ comme un·e physicien·ne plutôt que $\vec{E}(r, \theta, \varphi)$ qui est plutôt une approche mathématique.

Attention à la formule des potentiels retardés.

Il aurait fallu parler un peu plus des antennes pour faire le lien avec les courants qui oscillent.

Dans le modèle de l'électron élastiquement lié, tu fais l'approximation $\omega \Gamma \ll \omega_0^2$ sans le justifier. Tu peux le justifier en reliant Γ à la durée de vie de l'état excité de l'électron, et donc à la largeur spectrale $\Delta \omega$ de la source.

C'était vraiment essentiel de présenter le modèle de l'électron élastiquement lié car la formule de Larmor ne suffit pas à décrire la diffusion Rayleigh.

Envisageable aussi pour cette leçon :

- Parler de cohésion de l'atome
- Parler du développement multipolaire
- Champ proche
- Antennes, demi-ondes, quart d'ondes, la résistance de rayonnement etc.
- L'effet Zeeman

Choix CPGE/L3 : Il est important de caser des calculs et de la physique. Il ne faut pas tomber dans l'écueil de faire trop de formalisme en L3 ou pas assez en CPGE.

Pour la leçon CPGE : ajoutez aussi les livres d'exo de Garing

Pour la leçon en L3, ajoutez à cette bibliographie : le poly de Jean-Michel Raimond (site ressource de la page du wiki de l'agreg) et le Jackson

Partie réservée au correcteur

Avis général sur la leçon (plan, contenu, etc.) :

cf. ci-dessus

Notions fondamentales à aborder, secondaires, délicates :

cf. ci-dessus

Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur) :

L'expérience proposée est à ma connaissance la plus pertinente

Bibliographie conseillée :

cf. ci-dessus :

Garing

le poly de JM Raimond (sur la partie ressources du site de l'agreg)

Jackson (avec beaucoup de parcimonie)