

LP30 : Rayonnement dipolaire électrique

Armel JOUAN, Géraud DUPUY

Leçons annexes

- Sources de rayonnement (éventuellement)

Niveau : L2

Prérequis

- Ondes électromagnétiques dans le vide
- Potentiel retardé
- Jauge de Lorentz
- Modèle de l'électron élastiquement lié

Introduction: Les eq de Maxwell donnent comme sources aux champs des distributions de charges et de courants. Voyons comment dans la pratique cela se fait pour le rayonnement des ondes de tout les jours.

1 Champ électromagnétique rayonné [2] et [3]

1.1 Cadre du problème

- Se donner une distribution de charge. On la supposera discrète pour simplifier le calcul
- On observe le champ rayonné au point M
- On applique la formule du potentiel vecteur retardé. Discuter du retard

1.2 Calcul du potentiel

- Poser les hypothèses
- Approximation dipolaire: $r \gg a$, on en déduit que le dénominateur de notre potentiel vaut r
- ARQS : $\frac{a}{c} \ll T$, ou bien $a \ll \lambda$, qui va permettre de dire que le temps de propag est très long devant le temps typique d'évolution de la distribution. Toutes les charges émettent donc en phases
- Le potentiel retardé s'écrit donc avec le temps $t' \sim t - \frac{r}{c}$
- En déduire $\vec{A}(M, t) = \frac{\mu_0}{4\pi r} \frac{d\vec{p}(t')}{dt'}$

1.3 Champ électromagnétique

- On suppose que le moment dipolaire est selon une direction fixe $\vec{p}(t') = p(t')\vec{e}_z$
- A partir de là on donne directement les expressions de \vec{E} et \vec{B} , mais on précise tout de même ici les principales étapes de calculs
- On peut déduire directement le champ magnétique \vec{B} en calculant le rotationnel de \vec{A}
- On utilise la jauge de Lorentz pour calculer le potentiel scalaire V , et on en déduit \vec{E}
- Expliquer que ce sont les termes de retard, quand ils seront dérivé par rapport au temps, qui donneront les différentes dérivées de p
- Dans la zone de rayonnement (ie $r \gg cT = \lambda$), on ne garde que le terme en \ddot{p}
- Donner l'expression simplifiée du champ

Transition : On a l'expression du champ, voyons maintenant quelques une de ses propriétés.

2 Propriétés du rayonnement dipolaire

2.1 Structure de l'onde rayonnée [2] et [3]

- La propagation se fait par l'intermédiaire du retard $t' = t - \frac{r}{c}$. C'est donc une propagation radiale

- On a une structure locale d'onde plane, avec $(\vec{e}_r, \vec{E}, \vec{B})$ qui forment un trièdre direct
- Polarisation localement linéaire
- Anisotropie du rayonnement en $\sin(\theta)$. Notons que le champ est nul dans l'axe du dipôle

2.2 Diagramme de rayonnement [3]

- La direction et l'intensité du rayonnement sont donnés par le vecteur de Poynting
- Le calculer / donner sa forme
- Pour caractériser la directivité du rayonnement, on utilise un diagramme de rayonnement
- C'est par définition le tracé de la fonction: $\mathcal{F}(r, \theta) = \frac{|\vec{\Pi}(r, \theta, \phi, t)|}{|\vec{\Pi}(r, t)_{max}|}$
- Dans notre cas $\mathcal{F}(r, \theta) = \sin^2(\theta)$
- Pour tracer le diagramme, on se place dans le plan contenant l'axe du dipôle, on trace une droite faisant un angle θ avec l'axe du dipôle, et on reporte sur cette droite la valeur de \mathcal{F}
- On fait ça pour tous les angles de 0 à π , et on obtient le diagramme
- On retrouve un champ fortement rayonné orthogonalement et nul sur l'axe. On a une forme de bouée

2.3 Puissance rayonnée [2]

- Calculer le flux du vecteur de Poynting sur une sphère de rayon r
- Selon le temps restant et le besoin en calcul, on peut calculer l'intégrale $\int_0^\pi \sin^3(\theta) = \frac{4}{3}$ (on peut s'aider de $\sin^3(x) = -\frac{1}{4}\sin(3x) + \frac{3}{4}\sin(x)$)
- Aboutir à $P_{ray} = \frac{\mu_0 \ddot{p}^2}{6\pi c}$
- Le rayonnement dipolaire est dû à l'accélération des charges
- On a la propriété remarquable que ça ne dépende pas du rayon de la sphère
- D'ailleurs, à noter que l'on peut justifier *a posteriori* l'approximation dipolaire, car les termes qui ont été négligés auraient une puissance qui décroît en $\frac{1}{r}$ voire $\frac{1}{r^3}$ et auraient vite cessé de rayonner

Transition : Essayons de vérifier une partie des propriétés physiques du rayonnement avec une petite expérience de diffusion

3 Application à la diffusion du rayonnement

3.1 Modèle de l'électron élastiquement lié [3] p.167-168, [4]

(Sur slide)

- Rappeler brièvement les hypothèses et le modèle
- Poser le PFD sur l'électron
- En déduire l'expression du moment dipolaire en fonction de ω
- Comme on l'a vu précédemment, ce dipôle rayonne à son tour une OEM qui est bien un rayonnement dipolaire électrique. On parle alors de diffusion du rayonnement.

Transition : vérifions expérimentalement que l'on retrouve les propriétés du rayonnement dipolaire établies plus tôt.

3.2 Expérience illustrative (1)

Mettre en évidence :

- l'anisotropie du rayonnement : polariser verticalement puis horizontalement la lumière incidente, constater la diminution significative du rayonnement quand on regarde la cuve de côté. On vérifie ainsi qu'il n'y a pas de puissance rayonnée dans l'axe du dipôle.
- la polarisation du rayonnement : placer un analyseur entre la cuve et l'expérimentateur, montrer qu'on a extinction lorsque l'axe passant est horizontal.

Transition : faire remarquer de plus qu'on transmet de la lumière rouge et qu'on diffuse de la lumière bleue.

3.3 Diffusion Rayleigh

- Donner les OdG de ω $10^{15}rad.s^{-1}$ et ω_0 $10^{16}rad.s^{-1}$: régime de la diffusion Rayleigh
- Simplifier en conséquence l'expression du moment dipolaire

- En déduire l'expression de la puissance rayonnée à partir de son expression établie plus tôt
- AN pour le bleu et le rouge, montrer que la puissance diffusée est 16 fois plus intense dans le bleu que dans le rouge
- Expliquer ainsi les observations expérimentales
- Faire le lien avec la couleur du ciel et les couchers de soleil.

Conclusion

Ouverture vers d'autres sources de rayonnement, ou bien vers les antennes.

Bibliographie

- [1] Murras, EM : chap VI
- [2] BFR EM III : chap 12
- [3] H Prépa Ondes : chap 6
- [4] P. Roux, EM : chap 11.3, modèle de l'électron élastiquement lié
- [5] Sextant, Optique Expérimentale : p.273-277 pour l'expérience de diffusion Rayleigh.

Manipulations, ressources

- (1) Mise en évidence des propriétés du rayonnement dipolaire et de la diffusion Rayleigh (quelques gouttes de lait dans une cuve), cf [5] et [3]