

Centrale Physique MP 2011 — Corrigé

Ce corrigé est proposé par Roman Yurchak (ENS Cachan) ; il a été relu par Julien Tailleur (Chercheur au CNRS) et Vincent Freulon (ENS Ulm).

Le sujet est divisé en deux parties largement indépendantes : l'une présente un procédé de manipulation de la lumière laser, l'autre étudie l'interaction entre un métal et une onde électromagnétique.

- Dans la première partie, on s'intéresse à la technique CPA (*chirped pulse amplification*) qui consiste en un système de quatre réseaux permettant d'étaler temporellement l'impulsion du laser avant l'amplification et de la recomprimer par la suite. En particulier, on étudie les réseaux à échelettes qui permettent de limiter les pertes d'intensité lumineuse. Les sous-parties I.A et I.C constituent une bonne révision des notions de diffraction.
- Dans une deuxième partie, on modélise l'interaction du laser avec une surface métallique. En particulier, on décrit la réflexion de l'onde sur la surface ainsi que le seuil d'intensité lumineuse incidente qui correspond à la dégradation du métal. Cette partie permet de revoir les équations de Maxwell, la théorie de conduction électrique ainsi que la réflexion de ondes électromagnétiques.

Ce sujet, suffisamment guidé, ne présente pas de difficultés particulières, bien que la première partie soit assez longue. Il fait appel à des notions d'optique ondulatoire, d'électromagnétisme et il est par conséquent bien adapté à toutes les filières.

INDICATIONS

Première partie

- I.A.2.a Comparer λ aux dimensions du réseau suivant Ox et Oy .
- I.A.2.b Appliquer le principe de Huygens-Fresnel pour la diffraction à l'infini. Pour cela, calculer la différence de marche entre les rayons incidents en O et un point quelconque de la facette.
- I.A.3.a Remarquer que les ondes émises par chaque facette sont identiques, à un déphasage près qu'on peut calculer grâce à la différence de marche entre les ondes émises en $x = 0$ et en $x = na$.
- I.A.3.c À partir du graphique, identifier les deux échelles du problème : largeur de la tache de diffraction et distance entre les pics.
- I.B.1.a Les calculs sont similaires à ceux de la question I.A.3.a à une rotation près.
- I.B.2.c Utiliser les résultats de la question I.B.1.c.
- I.C.1.b Tracer une droite orthogonale à \vec{u}_x passant par A .
- I.C.2.b Développer le résultat de la question I.C.1.b en utilisant la relation entre i_0 et θ ainsi que les formules de trigonométrie.

Deuxième partie

- II.A.1.b Penser aux rapport des masses entre les ions et les électrons.
- II.A.2.b Il faut combiner les équations de Maxwell-Ampère et Maxwell-Faraday.
 - II.B.2 Les champs sont continus à la traversée d'une interface dans une distribution volumique de charges et de courants.
 - II.B.3 Utiliser l'expression calculée à la question II.A.2.e.
 - II.B.5 La densité de courant fait intervenir la vitesse des électrons.
- II.C.1 Se rappeler du lien entre l'énergie d'ionisation et l'énergie potentielle.
- II.C.3 Tirer profit du résultat de la question II.B.5.

LASER DE FORTE PUISSANCE

I. ÉTIREMENT TEMPOREL D'UNE IMPULSION LASER

I.A Diffraction par un réseau plan

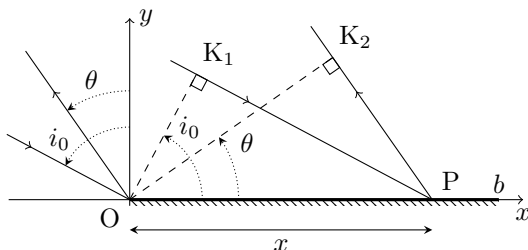
I.A.1 Le principe de Huygens-Fresnel s'énonce de la manière suivante. La lumière se propage de proche en proche. Chaque élément de surface atteint par elle se comporte comme une source secondaire rayonnant une ondelette sphérique dont l'amplitude est proportionnelle à l'aire de l'élément de surface. L'amplitude complexe en un point est égale à la somme des amplitudes complexes incidentes en ce point.

I.A.2.a Puisque la longueur de la facette suivant (Oz) est très grande devant λ , la diffraction dans cette direction est négligeable et le problème peut être étudié uniquement dans le plan (Oxy).

I.A.2.b Notons \underline{s}_i l'amplitude complexe de la vibration lumineuse atteignant le réseau. D'après le principe de Huygens-Fresnel,

$$\underline{s}_0(\theta) = \underline{K} \int_0^b \underline{s}_i \exp\left(j \frac{2\pi\delta}{\lambda}\right) dx$$

avec \underline{K} une constante et δ une différence de marche que l'on calcule à partir de la figure ci-dessous.



$$\delta = (K_1P) + (PK_2) = x (\sin \theta + \sin i_0)$$

Posons $\xi = 2\pi\delta/\lambda x$,

$$\begin{aligned} \underline{s}_0(\theta) &= \underline{K} \underline{s}_i \left[\frac{e^{j\xi x}}{j\xi} \right]_{x=0}^b \\ &= \underline{K} \underline{s}_i \frac{e^{j\xi} - 1}{j\xi} \\ \underline{s}_0(\theta) &= \underline{K} \underline{s}_i e^{j\phi b/2} \frac{e^{j\xi b/2} - e^{-j\xi b/2}}{j\xi} \end{aligned}$$

donc

$$\underline{s}_0(\theta) = \underline{K} b \underline{s}_i \exp\left(j \frac{\pi b}{\lambda} (\sin \theta + \sin i_0)\right) \operatorname{sinc}\left[\frac{\pi b}{\lambda} (\sin \theta + \sin i_0)\right]$$

La réflexion sur la facette introduit une phase supplémentaire de π pour chaque rayon. Néanmoins cette dernière n'intervient pas dans le résultat puisque l'on s'intéresse uniquement à la différence de marche entre deux rayons réfléchis.

I.A.2.c Par définition,

$$I_0(\theta) = |\underline{s}_0(\theta)|^2$$

d'où

$$I_0(\theta) = (|\underline{K}\underline{s}_i|b)^2 \operatorname{sinc}^2 \left[\frac{\pi b}{\lambda} (\sin \theta + \sin i_0) \right]$$

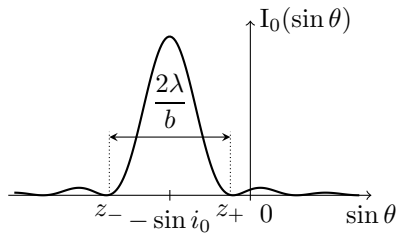
Le maximum d'éclairement est atteint pour $\theta_0 = -i_0$. On retrouve la loi de Snell-Descartes pour la réflexion.

I.A.2.d Cherchons les zéros de $I_0(\sin \theta)$ notés z_+ et z_- , qui permettent de calculer la largeur de la tache de diffraction :

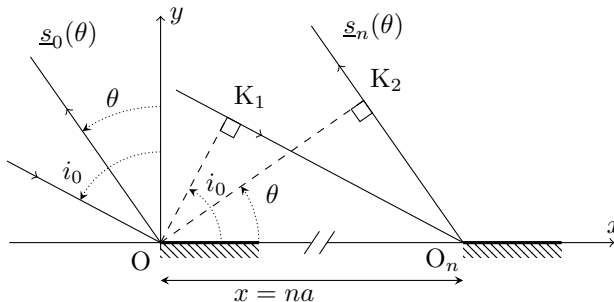
$$\frac{\pi b}{\lambda} (z_{\pm} + \sin i_0) = \pm \pi$$

Soustrayons ces deux relations, $\frac{\pi b}{\lambda} (z_+ - z_-) = 2\pi$

La largeur de la tache de diffraction est $\frac{2\lambda}{b}$.



I.A.3.a Calculons la différence de marche δ_n entre deux rayons homologues diffractés par les facettes O et O_n .



$$\delta_n = (K_1O_n) + (O_nK_2) = na (\sin \theta + \sin i_0)$$

d'où

$$\underline{s}_n(\theta) = \underline{s}_0(\theta) e^{j2\pi\delta_n/\lambda}$$

soit

$$\underline{s}_n(\theta) = \underline{s}_0(\theta) e^{jn\phi} \quad \text{avec} \quad \phi = \frac{2\pi a}{\lambda} (\sin \theta + \sin i_0)$$