

LASER

EIDD 2A GP

2024-2025

TD 1

Généralités sur les lasers

CORRECTION

Exercice 1 : Caractéristiques de la lumière laser

Pour chacune des propriétés de la lumière laser suivantes, expliquer en quoi elle consiste et citer une (ou plusieurs) application(s) qui utilisent cette propriété

- Cohérence temporelle → TD 5
Faible extension spectrale. Ressemble à monochromaticité.
Exemples : idem que monochromaticité.
- Monochromaticité → TD 5
Profil spectral très piqué, présence d'une seule fréquence.
Exemples : Vélocimétrie Laser Doppler (VLD), horloges atomiques, LIDAR, atomes froids, pinces optiques, microscopie, spectroscopie...
- Cohérence spatiale → TD 3
Phase cohérente des points sur une surface du faisceau.
Exemples : Speckle
- Faible divergence, directivité → TD 3
Concentration de la lumière dans un peigne fin. Celui-ci est de faible section (*waist*) et de faible ouverture angulaire. OdG waist : 1 mm de diamètre. OdG ouverture angulaire : qqs minute d arc ($1' \approx 0.2 \text{ mrad}$)
Exemples : Pointeur laser, lecteur de code barre, lecteur DVD, télémétrie laser Lune.
- Grande puissance surfacique → TD 1
Puissance optique par surface importante. OdG : Laser 1 mW (classe II), $w_0 = 0.5 \text{ mm}$ - i 1200 W/m². Comparaison soleil : Au zenith par beau temps à Paris, péniblement 1000 W/m².
Exemples : lasers de découpe, aveuglage de drones, de capteurs de missiles.
- Focalisabilité (concentration spatiale de puissance) → TD 4
Possibilité de focaliser. Cohérence spatiale → limite de diffraction atteignable.
Exemples : Lecteur DVD/Blu-ray.
- Concentration temporelle d'énergie → TD 6, 7
Forte puissance : Reunion de l'énergie en impulsions, éventuellement courtes.
Exemples : lasers de découpe industriels, épilation/détatouage, Lasik, physique nucléaire (LMJ).

+ **Accordabilité** (possibilité de changer les longueurs d'onde, en ajoutant des composants dans le laser) : spectroscopie + **Modulation** (présence de modes) : télécoms...

Exercice 2 : Composants du laser

Quels sont les trois composants essentiels d'un laser ? Pour chacun, donner son rôle, quelles propriétés du laser il va influencer et un exemple de réalisation physique.

Milieu amplificateur → TD 2

- Rôle : Stocker l'énergie et la restituer sous forme de lumière laser. Formé d'une matrice (Solide, liquide, gaz, 1/2 cond) contenant un centre actif (ion actif).
- Propriétés : Longueur d'onde d'émission du laser, quantité et densité d'énergie, spectre d'absorption (pour pompage optique), temps de fluorescence (durée de vie du niveau métastable), puissance max (tenue de flux : intensité max admissible).
- Exemples : Solide (Nd^{3+} dans matrice YAG étudié en TP), liquide (colorants), gaz (He-Ne, CO_2), 1/2 cond (GaAs)

Source d'énergie → TD 2

- Rôle : Apporter de l'énergie au milieu amplificateur pour réaliser une inversion de population.
- Propriétés : Puissance du laser
- Exemples : Pompage optique (lampe flash ou laser) : solides, liquides ; décharge électrique ionisante : gaz ; courant électrique : semiconducteurs ; Réactions chimiques (liquides) ; autres...

Résonateur → TD 5

- Rôle : Faire repasser la lumière dans le milieu amplificateur, assurer la pureté spectrale de la lumière.
- Propriétés : Monochromaticité, géométrie du faisceau.
- Exemples : Cavité F-P avec 2 miroirs dont un très réfléchissant

Pour la culture : Dans un laser réel il y a souvent d'autres composants. Voici quelques exemples : Lentilles, polariseurs (en fait une lame à l'angle de Brewster), isolateur optique (de Faraday ou de Pockels), cristal non-linéaire, modulateur acousto-optique...

Exercice 3 : Laser et cohérence temporelle

On peut considérer qu'une source réelle émet de la lumière sous forme d'une succession de trains d'ondes de phase aléatoire. Chaque train d'onde est formé d'une portion de sinusoïde à la fréquence de ν , de durée τ .

- 1- Représentez sur votre feuille une succession de trains d'ondes. À votre avis, quel est la forme du profil spectral d'une telle source ?

Piqué de largeur $1/\tau$

- 2- On appelle longueur de cohérence temporelle $L_c = c\tau$. Quelle est l'interprétation physique de cette longueur ?

C'est la longueur spatiale d'un train d'onde. La différence de marche max acceptable pour avoir des franges d'interférence.

- 3- Pour cette question, on place la source à l'entrée d'un interféromètre de Michelson réglé en lame d'air (d'épaisseur e). Que verra-t-on en sortie de l'interféromètre dans les cas suivants :

- $e \sim L_c$?

Les trains d'ondes se recouvrent partiellement. On voit des franges brouillées

- $e \ll L_c$?

Les trains d'ondes se recouvrent. Franges contrastées.

- $e \gg L_c$?

Les trains d'ondes de phase aléatoires se recouvrent, en moyenne on ne voit rien

- 4- Pour les sources suivantes, calculer la longueur de cohérence et la finesse relative de la source $\Delta\nu/\nu$, où $\Delta\nu$ est la largeur du profil spectral. Pourquoi la lumière laser est-elle remarquable ? (plus difficile) À quelle propriété de l'émission stimulée cela est-il dû ?

La lumière laser est très monochromatique. C'est dû à l'accord de phase entre le photon incident et le photon émis.

Source	λ (nm)	Largeur spectrale $\Delta\nu$	L_c	$\Delta\nu/\nu$
Lumière du soleil	570	$3 \cdot 10^{14}$ Hz	1 μm	0.6
Lampe spectrale à vapeur de mercure	546.1	10^{12}	0.3 mm	$2 \cdot 10^{-3}$
Laser He-Ne de TP	632.8	10^9	30 cm	$2 \cdot 10^{-6}$

- 5- Les lasers utilisés pour la chirurgie oculaire (lasik) sont des 'lasers femtosecondes' qui ont une très grande largeur spectrale ($\Delta\nu \sim 10^{14}$ Hz). Quel est, à votre avis, l'intérêt d'un tel dispositif ?

Laser femtoseconde (10^{-15} s) \rightarrow impulsions ultracourtes, donc grande largeur spectrale. Ces impulsions courtes permettent de faire des découpes propres, sans dommages mécanique ou thermique (échauffement des cellules) : au lieu de faire bouillir et exploser les cellules on crée un plasma de faible durée de vie (ps) qui se recombine en gaz (CO₂, N₂, H₂O) sans échauffer ses alentours. On verra cela au TD 7

Exercice 4 : Laser et niveaux d'énergie

Rappeler le modèle d'Einstein de l'interaction lumière-matière. Puis, expliquer qualitativement (sans utiliser d'équations) pourquoi

- Il n'est pas possible de réaliser un laser utilisant comme milieu actif un système à deux niveaux ?

En utilisant le pompage optique, on peut faire transiter des atomes de l'état fondamental vers l'état excité par absorption d'un photon. Or lorsque les deux populations deviennent égales, les taux d'absorption et d'émission stimulée sont égaux. Les populations ne peuvent donc plus changer sous l'effet du pompage optique car il y aura autant de transitions $0 \rightarrow 1$ (abs.) que de transitions $1 \rightarrow 0$ (em. stim.).

- Le problème est résolu en utilisant 3 niveaux ou plus ? Quelles propriétés doivent alors avoir ces niveaux ?

A partir de 3 niveaux ça marche. On a besoin d'une **inversion de populations** : il faut donc que le niveau excité de la transition laser soit métastable (longue durée de vie) et les autres niveaux (autre le fondamental) instables (faibles durées de vie).

Exercice 5 : Angle solide et luminance

L'angle solide Ω est l'analogie tridimensionnelle de l'angle plan θ . On rappelle que l'angle plan (en radians, rad) est défini comme le rapport entre la longueur de l'arc intercepté et le rayon du cercle. De façon analogue, l'angle solide (en stéradians, sr) est défini comme le rapport entre l'aire de la calotte sphérique interceptée et le carré du rayon de la sphère.

- 1- Quel est l'angle solide qui correspond à une sphère? A une hémisphère ?

Sphère : 4π , hémisphère : 2π

- 2- Ecrire l'angle solide élémentaire en coordonnées sphériques (r, θ, ϕ) .

Surface élémentaire sur une sphère de rayon R : $dA = R^2 \sin \theta d\theta d\phi$. Donc : $d\Omega = dA/R^2 = \sin \theta d\theta d\phi$.

- 3- Calculer l'angle solide d'un cône de révolution de demi angle au sommet α . Donner l'expression de cet angle solide dans l'approximation des petits angles $\alpha \ll 1$.

$\Omega = \int_0^\alpha \sin \theta d\theta \int_0^{2\pi} d\phi = 2\pi (1 - \cos \alpha)$. Approximation de petits angles : $\cos \alpha = 1 - \alpha^2/2 + O(\alpha^3)$. Donc : $\Omega \approx \pi\alpha^2$.

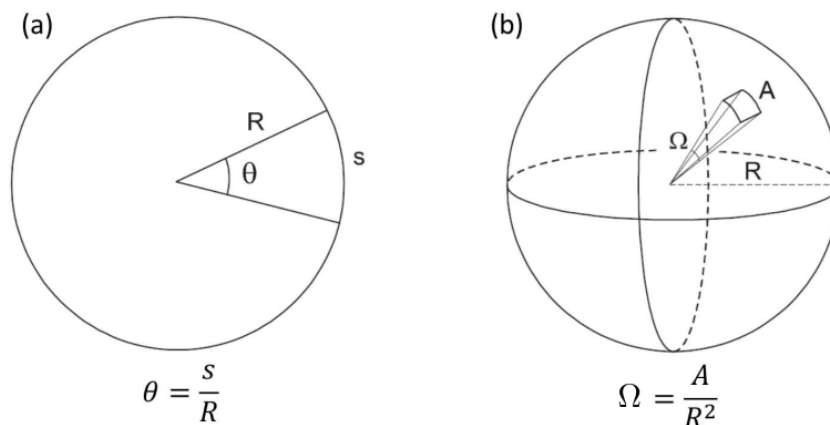
La luminance B (en anglais *brightness* ou *radiance*) d'une source est définie comme la puissance optique émise par la source par unité d'angle solide par unité de surface émettrice apparente. Elle s'exprime en $\text{W}/(\text{m}^2 \text{ sr})$. Une source de lumière de grande luminance émet dans un petit angle solide à partir d'une petite surface.

- 4- Donner l'expression de la luminance d'une source de puissance P , de surface S , qui émet dans la direction θ par rapport à la normale à la surface dans un angle solide Ω .

Surface apparente correspondant à une aire S vue sous un angle θ : $S \cos \theta$. Donc la luminance est : $B = P/(S \cos \theta \Omega)$.

- 5- Calculer la luminance d'un pointeur laser vert de puissance 5mW, de divergence $\alpha = 1 \text{ mrad}$ et avec un diamètre du faisceau de sortie de 1 mm (on supposera que le laser émet selon la normale à la surface de sortie). Pour comparaison, une lampe dans le vert de très grande brillance a $B = 95 \text{ W}/(\text{cm}^2 \text{ sr})$. Commenter.

On applique les deux formules trouvées précédemment. On trouve $B = 5 \times 10^4 \text{ W}/\text{cm}^2/\text{sr}$. C'est beaucoup.



(a) Définition de l'angle plan. (b) Définition de l'angle solide.