

Contexte

Ce document, généré automatiquement à partir des questions individuelles, regroupe l'ensemble des questions en optique préparées par Daniel C. Côté.

Pour corriger les questions, veuillez vous référer [aux versions en ligne des documents](#), disponible sur GitHub.

Pour bien visualiser le document original en Markdown, utilisez Typora.io et le stylesheet questions, [disponible](#) dans le répertoire site. Copiez le repertoire au complet dans le Theme Folder de Typora.

Ondes

- Rayon et front d'onde
- Origine de l'indice de réfraction
- Solution équation de Maxwell indépendante du temps
- Solution à l'équation d'onde
- Somme d'ondes sphériques
- Faisceau focalisant
- Focus de caméra
- Conversion photon et puissance
- Puissance et photons
- Indice de réfraction
- Longueur d'onde
- Exemples d'indice
- Paramètres d'illumination

Optique Géométrique

- Points cardinaux
- Distance focale
- Plans nodaux
- Plan principaux
- Plans nodaux et principaux
- Couches diélectriques
- Salle d'interrogation
- Lentille à distance focale donnée
- Lunette dans l'eau
- Laser dans l'eau
- Inversion
- Image-objet
- Tracé de rayons
- Loupe
- Doublet
- Objet dans l'eau
- Lentilles cornéennes
- Déterminant matrices ABCD
- Grossissement

Matrice de lentille
Goutte d'eau
Interface diélectrique et distances focales
Rayon généralisé
L'oeil et les lunettes
Objectif
Lentilles composées
Diaphragme
Mirages
Examen 2016 partie 1
Examen 2016, partie 2
Lentille dans milieux différents

Instrumentation

Objectif et résolution
Balayage en x et \theta
Champ de vue microscope à balayage

Diffraction

Point focal
Plans de Fourier
Point focal
Conception et construction d'un spectromètre Czerny-Turner
Diffraction par des billes
Tache focale, lentille complètement illuminée
Tache focale, petit faisceau
Résolution de l'oeil
Résolution télescope Keck
Tache focale
Réseau blazé

Impulsions brèves

1. Ondes

Les questions de cette section se rapportent aux phénomènes ondulatoires électromagnétiques de base. Les objectifs importants découlent directement de l'utilisation et de la compréhension des équations de Maxwell.

Objectifs

1. Expliquer la signification des termes dans les équations de Maxwell
2. Savoir dériver et utiliser l'équation d'onde de Helmholtz
3. Expliquer et utiliser les bases complètes (sphériques, planes et autres) représentant les ondes dans les matériaux et dans le vide
4. Expliquer le concept, savoir utiliser et identifier un front d'onde et un rayon

5. Interpréter, savoir calculer et utiliser le vecteur de Poynting
6. Expliquer l'origine de l'indice de réfraction et son impact sur les ondes
7. Définir et savoir utiliser la loi de la réflexion
8. Définir et savoir utiliser la loi de Snell pour la réfraction
9. Définir, identifier et utiliser les polarisations \hat{s} et \hat{p} .
10. Savoir utiliser les coefficients de Fresnel pour les deux polarisations
11. Expliquer l'origine et calculer l'angle de Brewster

Références

1. Notes de cours "Optique" de Daniel C. Côté, Chapitre 1 ([iBook](#) ou [iPDF](#)).
2. Hecht: Début de Section 5.2
3. Saleh & Teich: Section 1.1, Sections 2.1 et 2.2

1.1. Rayon et front d'onde

Durée: 1m

Question

[Vrai ou Faux] Pour toute onde, un seul rayon pointant dans une direction donnée est suffisant pour décrire le front d'onde en tout point.

Réponse

Faux. Pour une onde plane (i.e. un front d'onde plan), tous les rayons sont perpendiculaires au front d'onde et parallèles entre eux. Au contraire, une onde sphérique (i.e. un front d'onde courbe) a plusieurs rayons différents qui ne sont pas parallèles entre eux, donc plusieurs rayons représentent les front d'onde courbes.

1.2. Origine de l'indice de réfraction

Durée: 1m

Questioné

Quel(s) terme(s) des équations de Maxwell est ou sont impliqué(s) dans la définition de l'indice de réfraction?

Réponse

La constante diélectrique $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ est relié à l'indice de réfraction par $n \equiv \sqrt{\epsilon_r}$. Cette constante diélectrique dépend de la fréquence de l'onde.

1.3. Solution équation de Maxwell indépendante du temps

Durée: 30m

Question

Trouvez une solution de l'équation d'onde vectorielle tridimensionnelle dépendante du temps:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu_0 \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

par séparation de variables.

Réponse

On doit faire plusieurs suppositions pour arriver à une solution particulière.

1. D'abord, on suppose que ϵ est une constante (i.e. plutôt qu'un tenseur) donc nous ne solutionnons que pour des milieux à indice homogène (pas de biréfringence) bien que la généralisation à des milieux biréfringents est directe.
2. De plus, on suppose que le champ est polarisé linéairement selon un axe (disons \hat{x}), bien que la solution selon les autres axes, *dans un milieu homogène*, est aussi directe car les solutions sont indépendantes (i.e. une polarisation dans un axe n'affecte pas la polarisation dans un autre axe).

Séparation de variables

En utilisant la méthode de séparation de variables, on pose une solution de la forme:

$$\mathbf{E} = \mathbf{A}(x)T(t) = [A(x)\hat{x}] T(t) \quad (2)$$

On séparant les composantes dépendantes du temps et de la position de chaque côté, on obtient:

$$\nabla^2 [A\hat{x}] T - \mu_0 \epsilon \frac{\partial^2 A\hat{x}T}{\partial t^2} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{1}{\mu_0 \epsilon} \frac{d^2 A}{dx^2} = \frac{1}{T} \frac{d^2 T}{dt^2}. \quad (4)$$

La différentielle en temps est maintenant une différentielle totale car T ne dépend que de t .

Si les deux fonctions sont égales et ne dépendent pas des mêmes variables (\mathbf{r} et t), elles doivent être égales à une même constante:

$$\frac{1}{\mu_0 \varepsilon} \frac{d^2 A}{dx^2} = \frac{1}{T} \frac{d^2 T}{dt^2} = K^2 \quad (5)$$

Donc en prenant la partie spatiale de l'équation, on obtient :

$$\frac{d^2 A}{dx^2} + K^2 \mu_0 \varepsilon A = 0 \quad (6)$$

et en prenant la partie temporelle de l'équation, on obtient :

$$\frac{d^2 T}{dt^2} + K^2 T = 0 \quad (7)$$

Solution en $T(t)$

On suppose une solution exponentielle. Les solutions en T sont clairement du type:

$$T(t) = T_+ e^{iKt} + T_- e^{-iKt} \quad (8)$$

donc K représente la fréquence d'oscillation dans le temps, que l'on peut renommer ω :

$$T(t) = T_+ e^{i\omega t} + T_- e^{-i\omega t} \quad (9)$$

Solution en $A(x)$

On suppose une solution exponentielle. Il y a plusieurs types, cependant, on peut vérifier que la solution suivante est valide:

$$A(x) = A_+ e^{-i\frac{\omega}{c}x} + A_- e^{i\frac{\omega}{c}x} \quad (10)$$

où on a remplacé $c^2 \equiv \frac{1}{\mu\varepsilon}$. De plus, on sait (ou saura) que le vecteur d'onde $k \equiv \frac{\omega}{c}$.

Solution complète

La solution complète est donc le produit des deux $A(x)$ et $T(t)$. On obtiendra 4 termes croisés:

$$\begin{aligned} E(x, t) &= A(x)T(t) = \left(A_+ e^{-i\frac{\omega}{c}x} + A_- e^{i\frac{\omega}{c}x} \right) \left(T_+ e^{i\omega t} + T_- e^{-i\omega t} \right) \\ &= E_1 e^{-i(kx - \omega t)} + E_2 e^{i(kx - \omega t)} + E_3 e^{-i(kx + \omega t)} + E_4 e^{i(kx + \omega t)} \end{aligned} \quad (11)$$

qui correspondent à des ondes planes allant vers la gauche ou vers la droite. Les conditions initiales détermineront la valeurs de coefficients.## Vecteur de Poynting

Durée: 1m

Question

[Vrai ou Faux] Le vecteur de Poynting correspond à la direction dans laquelle la puissance se propage.

Réponse

Vrai. Il s'agit de la définition exacte du vecteur de Poynting, qui est donné par $\vec{S} \equiv \vec{E} \times \vec{H}$.

1.4. Solution à l'équation d'onde

Durée: 10m

Question

Montrez qu'une onde plane $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_0 e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)}$ est une solution de l'équation d'onde.

Réponse

1.5. Somme d'ondes sphériques

Durée: 1m

Question

[Vrai ou Faux] On ne peut pas décrire une onde plane par une somme d'ondes sphériques, car son front d'onde est droit.

Réponse

Faux. L'ensemble des ondes planes est une base complète qui peut représenter toute onde, c'est-à-dire:

$$\vec{E}(r, t) = \sum_{\vec{k}} \vec{E}(\vec{k}) e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)}. \quad (12)$$

C'est la même chose pour les ondes sphériques:

$$\vec{E}(r, t) = \sum_{\vec{r}_i} \vec{E}(\vec{r}_i) e^{i(k|\vec{r} - \vec{r}_i| - \omega t)}. \quad (13)$$

La différence est simplement que pour représenter une onde plane par une somme d'ondes sphériques, nous aurons besoin de beaucoup de termes dans la somme puisque la géométrie sphérique n'est évidemment pas plane.

1.6. Faisceau focalisant

Durée: 1m

Question

Quelle est la forme du front d'onde d'un faisceau focalisant?

Réponse

Le front d'onde est sphérique.

1.7. Focus de caméra

Durée: 2m

Question

Une caméra peut ajuster le *focus* sans changer le grossissement. Comment est-ce que ça fonctionne ?

Réponse

1.8. Conversion photon et puissance

Durée: 5m

Question

1 photon par seconde donne combien de Watts à $\lambda = 1 \mu m$?

Réponse

Un photon à $1 \mu\text{m}$ a une énergie de 1 eV, donc 1 photon ($1 \text{ eV}/\text{photon}$) = $1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ ou 0.2 zeptoJoule.
En une seconde, on obtient simplement 0.2 zeptoWatt.

1.9. Puissance et photons

Durée: 1m

Question

1 pW donne combien de photon par seconde à $\lambda = 500 \text{ nm}$?

Réponse

Un photon à 500 nm a une énergie de 2 eV (ou $1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$), donc $1 \text{ pW} / (2 \text{ eV/photon}) = 3 \times 10^{16} \text{ photon/s}$ ou 3 photons par $1 \mu\text{s}$.

1.10. Indice de réfraction

Durée: 2m

Question

Quel est l'origine de l'indice de réfraction dans le contexte des équations de Maxwell?

Réponse

L'indice de réfraction vient de la réponse de la densité de polarisation (i.e. les dipôles par volume) dans le matériel. On suppose une réponse des dipôles proportionnelle $P = \chi \epsilon_0 E$, mais χ est dépendant de la fréquence, et est un nombre complexe (donc une amplitude et une phase). On obtient ensuite que $n^2 = (1 + \chi)^2 = \epsilon_r$.

1.11. Longueur d'onde

Durée: 1m

Question

Un laser rouge de longeur d'onde 632.8 nm illumine une piscine. Sachant que la vitesse dans un milieu est c/n et que la longueur d'onde dans un milieu est $\lambda' = \lambda/n$, est-ce que si vous regardez dans la piscine vous verrez que le laser est bleu dans l'eau?

Réponse

Le laser est toujours rouge car la couleur est donnée par la fréquence d'oscillation de l'onde (qui est une propriété de l'onde indépendante de la propagation et qui détermine son énergie) alors que la longueur d'onde est une propriété découlant de la propagation.

1.12. Examples d'indice

Durée: 2m

Question

Donnez des valeurs d'indice de réfraction pour l'eau, le verre, l'huile, les semiconducteurs. Est-ce que cette valeur dépend de la longueur d'onde ? Pourquoi ?

Réponse

L'eau $n = 1.33$, le verre $n \approx 1.50$ et les semi-conducteurs varient mais sont plutôt élevés $n_{\text{Si}} = 3.4$ et $n_{\text{GaAs}} = 3.5$. Vous pouvez trouver une base de données très complète sur le site refractiveindex.info.

Cette valeur dépend évidemment de la longueur d'onde. Cependant, pour des milieux transparents (comme l'eau, le verre), l'indice varie peu sauf près de l'absorption, à longueurs d'ondes courtes. Ainsi, on utilise souvent un seul indice mais on doit confirmer lorsque les longueurs d'ondes approchent l'UV dans l'eau et le verre par exemple.

1.13. Paramètres d'illumination

Durée: 5m

Question

Calculer pour un faisceau à 800 nm de 0.1 nm de largeur spectrale ayant une surface de 10 mm² et une puissance moyenne de 1 mW

1. Fréquence du faisceau
2. Flux d'énergie pendant 1 seconde
3. Irradiance
4. Irradiance spectrale

Réponse

1. La fréquence est défini $f = \frac{c}{\lambda}$ où λ est la longueur d'onde et c la vitesse de la lumière. On a donc:

$$f = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{800 \times 10^{-9} \text{ m}} = 375 \times 10^{12} \text{ Hz} = 375 \text{ THz}$$

2. $1\text{W} = 1\text{J/s}$ donc $1\text{mW} = 1\text{mJ/s}$

$$3. I = \frac{P}{A} = \frac{10\text{mW}}{\text{cm}^2}$$

$$4. I_{\text{spectrale}} = \frac{I}{\Delta f} = 100 \frac{\text{mW}}{\text{cm}^2 \cdot \text{nm}}$$

```
# Available at
c = 3e8 # SI units
wavelength = 800e-9
surface = 10*(1e-3)*(1e-3) # in m^2
power = 1e-3 # in Watts
duration = 1 # in seconds
spectralWidth = 0.1e-9
spectralWidthInNm = spectralWidth*1e9

frequency = c/wavelength #in Hertz
flux = power * duration
irradiance = power/surface #in W/m^2
irradianceInMwPerCm2 = irradiance * 1000/(1e2)/(1e2)
irradianceInMwPerCm2PerNanoMeter = irradianceInMwPerCm2/(spectralWidthInNm)

print("1. Frequency: {0} THz".format(frequency/1e12))
print("2. Energy flux in 1 second: {0} mJ".format(flux*1000))
print("3. Irradiance: {0} mW/cm^2".format(irradianceInMwPerCm2))
print("4. Irradiance spectrale: {0} mW/cm^2/nm".format(irradianceInMwPerCm2PerNanoMeter))

# Output:
#1. Frequency: 375.0 THz
#2. Energy flux in 1 second: 1.0 mJ
#3. Irradiance: 10.0 mW/cm^2
#4. Irradiance spectrale: 100.0 mW/cm^2/nm
```

2. Optique Géométrique

Les questions de cette section se rapportent à l'optique géométrique, où la longueur d'onde est négligeable. On parle de lentilles, formation d'image et de systèmes optiques simples.

Objectifs

1. Faire le tracé de rayons pour les rayons importants et pour obtenir une image
2. Définir et identifier la distance focale d'une lentille simple ou complexe, ses plans principaux et ses plans nodaux.
3. Comprendre et expliquer l'origine de la formation de l'image dans des systèmes simples et complexes et savoir calculer la position de l'image
4. Expliquer la différence entre une image réelle et une image virtuelle
5. Comprendre, expliquer et savoir faire des calculs impliquant les phénomènes qui régissent l'optique géométrique
6. Savoir utiliser la loi de l'imagerie, la loi de Lensmaker et bien utiliser les conventions de signes
7. Expliquer, connaître les propriétés, savoir reconnaître, concevoir et faire des calculs impliquant un système 4f
8. Définir et savoir utiliser les matrices représentant les différentes composantes simples pour transformer les rayons
9. Décrire et savoir utiliser le formalisme des matrices ABCD
10. Comprendre et savoir comment obtenir la condition d'imagerie, les plans principaux et les points nodaux d'un système complexe
11. Identifier la distance focale équivalente d'un système complexe
12. Calculer la position d'une image avec le formalisme matriciel
13. Résoudre des problèmes en utilisant le formalisme matriciel

Références

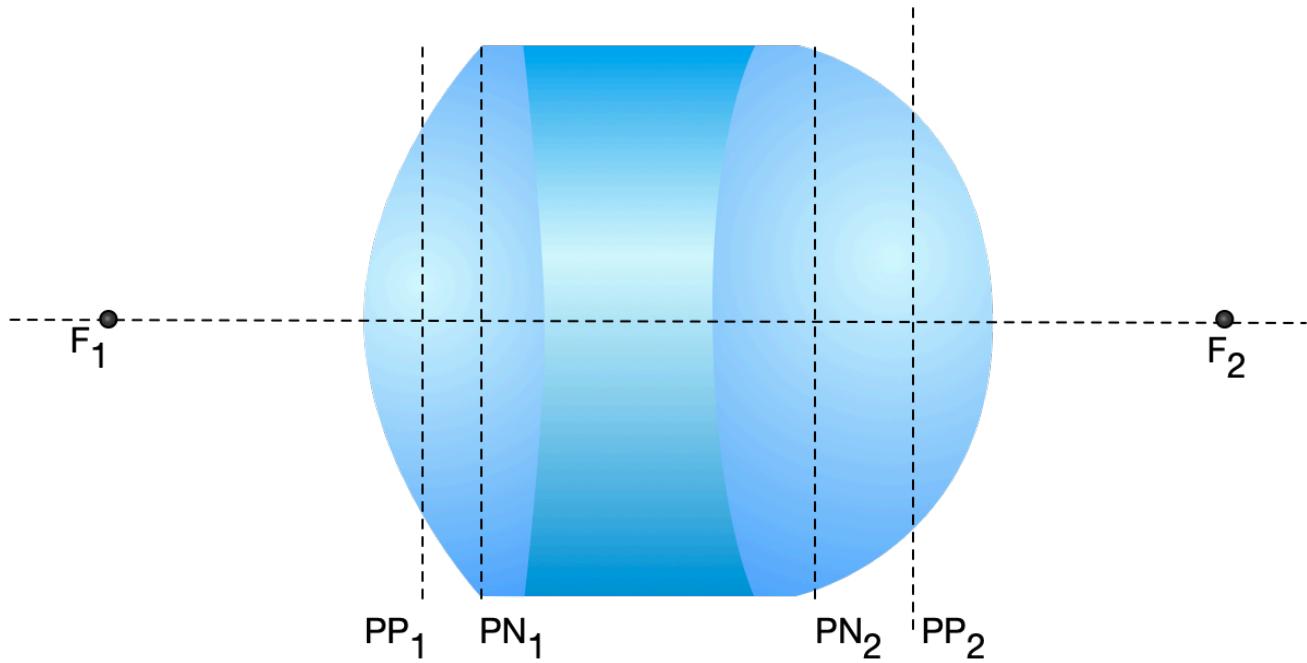
1. Notes de cours "Optique" de Daniel C. Côté, Chapitre 2, sections 1 et 2 ([iBook](#) ou [iPDF](#)).
2. Hecht, Section 5.2 et 6.1
3. Saleh & Teich: Sections 1.C

2.1. Points cardinaux

Durée: 2m

Question

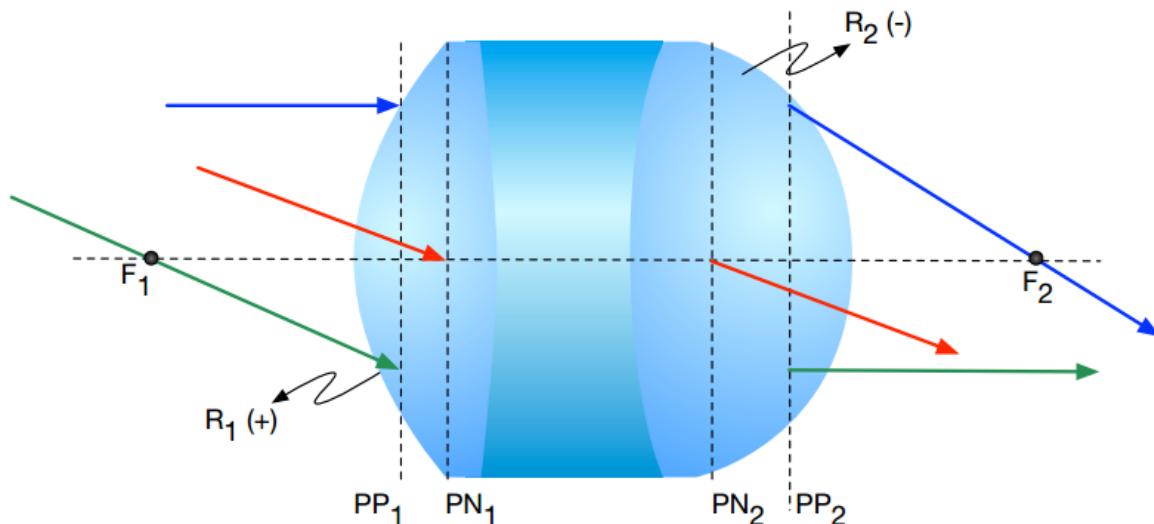
Sur la figure suivante:



tracez les rayons cardinaux passant par les points focaux $[F_1]$ et $[F_2]$, nodal $[PN_1]$ et $[PN_2]$ et par les plans principaux $[PP_1]$ et $[PP_2]$.

Réponse

1. Le rayon au plan principal PP_1 apparaît au plan principal PP_2 à la même hauteur en subissant toute l'action de la lentille.
2. Un cône au plan nodal ressort avec un cône de même grandeur. Si un rayon croise la plan nodal sur l'axe optique, il continue tout droit (rayon rouge).
3. Un rayon passant par le point focal F_1 ressort parallèle (rayon vert)
4. Un rayon parallèle se dirige vers le point focal F_2 (rayon bleu)



2.2. Distance focale

Durée: 1m

Question

[V ou F] La distance focale est définie comme la distance entre la surface (physique) d'une lentille et son point focal.

Réponse

Faux. C'est la distance entre le plan principal et le point focal.

2.3. Plans nodaux

Durée: 1m

Question

[V ou F] Les plans nodaux sont des plans de grossissement angulaire unitaire.

Réponse

Vrai.

2.4. Plan principaux

Durée: 1m

Question

[V ou F] Les plans principaux sont des plans de grossissement transverse unitaire.

Réponse

Vrai.

2.5. Plans nodaux et principaux

Durée: 1m

Question

Où sont les plans nodaux et les plans principaux pour une lentille mince ?

Réponse

Au centre.

2.6. Couches diélectriques

Question

Imaginez une série arbitraire de plaques diélectriques parallèles, d'indices de réfraction tout aussi arbitraires mais sans absorption, le tout, dans l'air (comme une fenêtre multi-couche épaisse). Démontrez de façon générale la relation entre les coefficients de réflexion (ou de transmission) dans un sens et l'autre, c'est-à-dire qu'arrive-t-il à l'intensité de la lumière provenant de la gauche et celle provenant de la droite en termes de coefficients de Fresnel ? Vous devez obtenir que le coefficient de transmission (ou de réflexion) de l'intensité par la gauche et par la droite est identique s'il n'y a pas d'absorption.

Réponse

2.7. Salle d'interrogation

Question

Vous savez que les coefficients de transmission par la gauche ou par la droite sont identiques (même chose pour les coefficients de réflexion). Dans les émissions de télé de Gangsters et Police, il y a souvent des fenêtres "miroirs" où le suspect ne peut pas voir à l'intérieur, mais les victimes peuvent le voir et essayer de l'identifier. À la lumière de la question précédente, expliquez ce qui se passe de façon formelle. Vous devriez utiliser une petite égalité très simple pour supporter votre explication.



Illustration du problème: la fenêtre à l'arrière apparaît comme un miroir, pourtant, les victimes ou les autres détectives peuvent voir le suspect lorsqu'ils sont de l'autre côté.

Réponse

2.8. Lentille à distance focale donnée

Durée: 20 m

Question

Pour une lentille biconvexe diélectrique épaisse d'indice n et de rayons de courbure avant et arrière identiques R , obtenez une expression pour l'épaisseur qui donne une distance focale infinie.

Réponse

2.9. Lunette dans l'eau

Question

Lorsqu'on regarde dans l'eau sans lunettes de plongée, on ne voit pas très bien. Au contraire, avec des lunettes de plongée, on voit clairement les objets. Comment expliquer cela considérant que l'oeil est identique dans les deux cas et que les lunettes de plongée sont plates?

Réponse

La distance focale du dispositif optique qu'est l'oeil dépend du milieu incident du rayon (habituellement l'air). Lorsque nous sommes dans l'eau, l'image ne se forme plus directement sur la rétine mais plutôt un peu derrière, comme si nous étions myope. Si nous mettons des lunettes de plongée, le milieu du rayon incident est de nouveau de l'air et cela corrige notre vue.

2.10. Laser dans l'eau

Question

Vous avez un pointeur laser inoffensif rouge et vous voulez viser un poisson rouge qui se trouve devant vous dans un lac sans vague alors que vous êtes sur un quai. Vous regardez le poisson. Où devez-vous viser pour atteindre le poisson sous l'eau: un peu en avant, un peu en arrière ou exactement où vous le voyez?

Réponse

2.11. Inversion

Question

Un miroir inverse la gauche et la droite. Pourquoi n'inverse-t-il pas le haut et le bas?

Réponse

Un miroir n'inverse pas vraiment la gauche et la droite: il inverse le devant et le derrière (i.e. il inverse \hat{z} en $-\hat{z}$). Ce faisant, le système de coordonnées est maintenant "main gauche" au lieu de "main droite" et en effet, la gauche et la droite sont inversés. Mais en fait, le haut et le bas, si on se tourne la tête de 90° vers la gauche sont aussi inversés, en ce sens que le haut est à ma droite mais à la gauche pour mon image.

2.12. Image-objet

Question

Quelle est la position de l'image si un objet est placé à $f/2$ devant une lentille de distance focale f ? L'image est-elle virtuelle ou réelle ?

Réponse

2.13. Tracé de rayons

Question

[VRAI ou FAUX] Pour trouver la position d'une image dans un système optique, on doit tracer au moins 3 rayons provenant de l'objet.

Réponse

Faux. Deux sont suffisants.

2.14. Loupe

Durée: 1m

Question

Comment faire la meilleure loupe ?

Réponse

Pour utiliser une loupe, la meilleure position de l'objet est au plan focal. Une image à l'infini est obtenue, mais notre oeil, avec sa lentille, formera un image sur la rétine.

2.15. Doublet

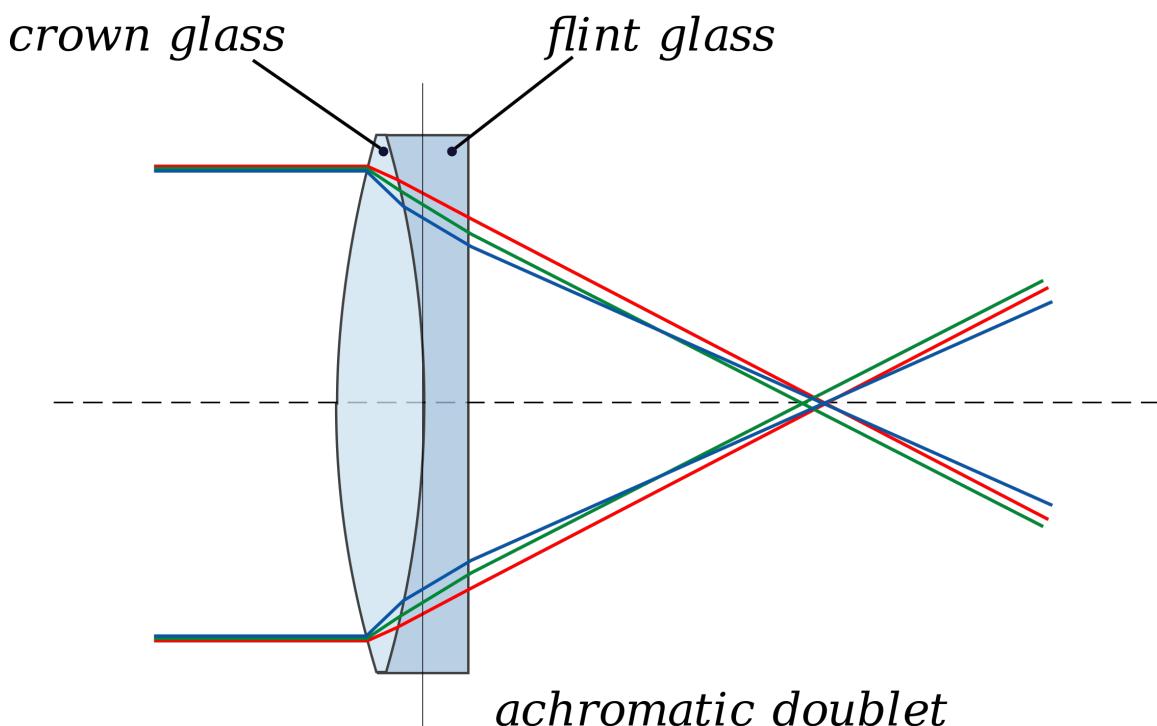
Durée: 1m

Question

Y'a-t-il une bonne raison de faire une lentille de type doublet achromatique avec le même matériel ?

Réponse

Non. Les deux matériaux sont de types Crown et de type Flint. Les verres de types Crown sont peu dispersifs, alors que les verres de type Flint sont très dispersif. Deux matériaux identiques ne permettraient pas de corriger les aberrations chromatiques.



2.16. Objet dans l'eau

Durée: 1m

Question

Un objet dans l'eau a l'air plus profond ou moins profond?

Réponse

Moins profond.

2.17. Lentilles cornéennes

Durée: 1m

Question

Pourquoi les lentilles cornéennes avec correction pour l'astigmatisme sont-elle plus chères ?

Réponse

Parce qu'elles doivent s'orienter dans l'oeil car la correction qu'elles produisent est associée à l'axe des x et y , elle n'est pas symétrique. Elle ont donc un poids dans le bas qui les fait s'orienter correctement.

2.18. Déterminant matrices ABCD

Durée: 10 m

Question

Montrez que le déterminant des matrices ABCD est en général n_i/n_f , avec n_i l'indice du milieu incident et n_f l'indice du milieu sortant.

Réponse

La matrice la plus générale est l'interface diélectrique courbe qui représente n'importe quels deux milieux d'indices n_1 et n_2 séparés par une quelconque interface de rayon R :

$$M_{1 \rightarrow 2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n_2 - n_1}{n_2 R_1} & \frac{n_1}{n_2} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Cette matrice a un déterminant de n_1/n_2 . De plus, n'importe quelle série d'interfaces arbitraires entre deux milieux peut s'exprimer sous la forme d'un produit de matrices d'interfaces diélectriques de courbure arbitraires:

$$M_{1 \rightarrow f} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n_f - n_{f-1}}{n_f R_{f-1}} & \frac{n_{f-1}}{n_f} \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n_3 - n_2}{n_3 R_2} & \frac{n_2}{n_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n_2 - n_1}{n_2 R_1} & \frac{n_1}{n_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n_1 - n_i}{n_1 R_i} & \frac{n_i}{n_1} \end{bmatrix} \quad (15)$$

Sachant que le déterminant d'un produit est le produit de leur déterminant, on obtient:

$$\det M_{i \rightarrow f} = \det M_{f-1 \rightarrow f} \cdots \det M_{2 \rightarrow 3} \det M_{1 \rightarrow 2} \det M_{i \rightarrow 1} \quad (16)$$

$$\det M_{1 \rightarrow f} = \frac{n_{f-1}}{n_f} \cdots \frac{n_2}{n_3} \frac{n_1}{n_2} \frac{n_i}{n_1} = \frac{n_i}{n_f} \quad (17)$$

ce qu'il fallait démontrer.

2.19. Grossissement

Durée: 1m

Question

VRAI ou FAUX: L'élément A d'une matrice de transfert ABCD représente toujours le grossissement.

Réponse

Faux. Seulement lorsque le système est imageant. On ne parle pas de grossissement quand il n'y a pas d'image.

2.20. Matrice de lentille

Durée: 1m

Question

Pour un système optique quelconque ayant une distance focale équivalente f , écrivez la matrice de transfert qui transforme un rayon d'un plan principal à l'autre plan principal.

Réponse

Par définition, l'effet totale d'une lentille est appliquée entre ses plans principaux:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix}$$

2.21. Goutte d'eau

Durée: 15m

Question

Une goutte de pluie de forme sphérique tombe en direction d'une feuille d'arbre dans une forêt à l'équateur. Trouvez les conditions dans lesquelles la lumière du soleil qui passe à travers la gouttelette est focalisée directement sur la feuille.

Réponse

On obtient la matrice de transfert d'une surface diélectrique de rayon de courbure R et d'indice (à droite), n une propagation de $2R$ suivi d'une autre surface diélectrique de rayon de courbure et $-R$ d'indice (à gauche) n .

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1-n}{R} & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 2R \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1-n}{nR} & \frac{1}{n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2(1-n)}{n} + 1 & \frac{2R}{n} \\ (n-1) \left[\frac{2}{R} + \frac{2(n-1)}{nR} \right] & 1 + \frac{2(1-n)}{n} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n-1}{R_2} & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1-n}{nR_1} & \frac{1}{n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{d(1-n)}{nR_1} + 1 & \frac{d}{n} \\ -(n-1) \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{d(n-1)}{nR_1 R_2} \right] & 1 + \frac{d(n-1)}{nR_2} \end{bmatrix} \quad (19)$$

2.22. Interface diélectrique et distances focales

Durée: 20m

Question

Supposez une interface diélectrique courbe de rayon R et d'indice n_1 et n_2 . Montrez que les points focaux de chaque côté de l'interface sont à des distances différentes de chaque côté de l'interface.

Réponse

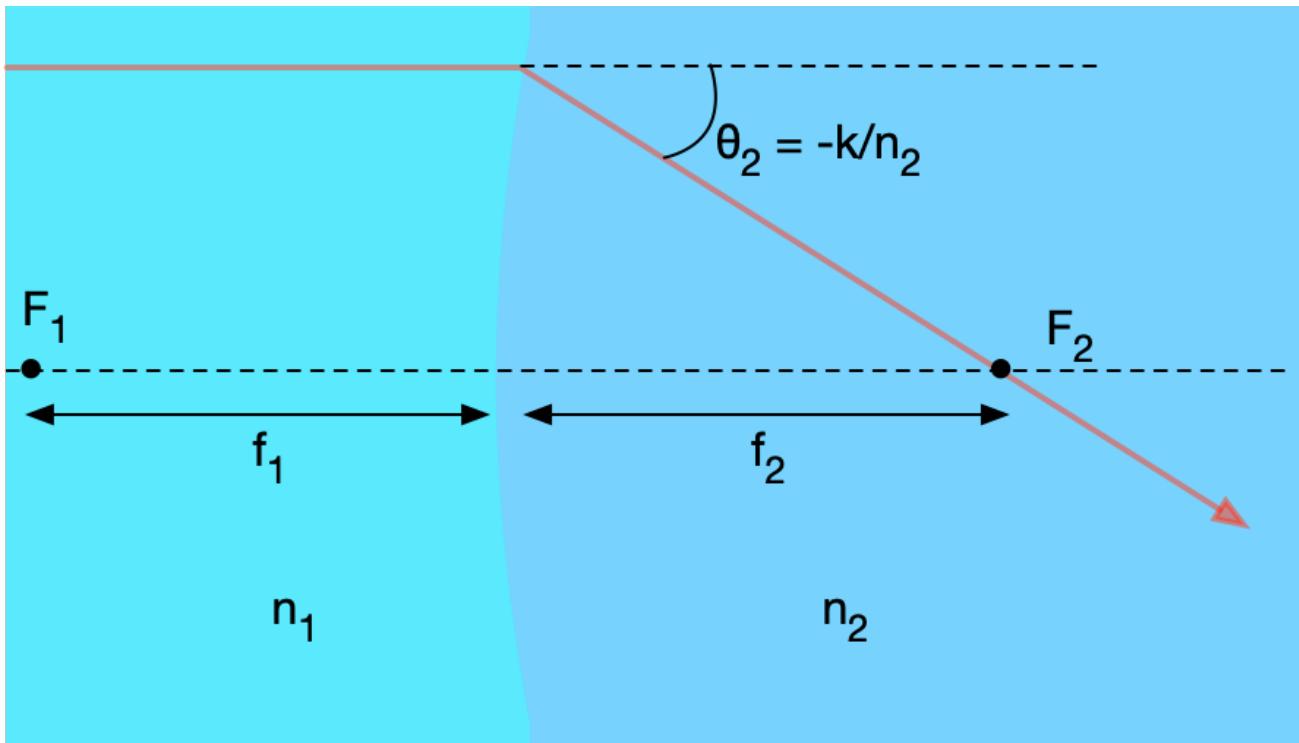
Nous avons obtenu la distance focale en prenant un rayon parallèle à l'axe dans un système en sachant que ce dernier, par définition croisera l'axe optique au point focal. Ainsi, en supposant une interface diélectrique:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n_2-n_1}{n_2 R} & \frac{n_1}{n_2} \end{bmatrix}, \quad (20)$$

on prend un rayon à une hauteur unitaire ($r=1$) et parallèle à l'axe ($\theta = 0$) qui émergera à un angle de $\theta_2 = -\frac{n_2-n_1}{n_2} R$, et croisera donc l'axe à une distance f_2 telle que $\tan \theta_2 \approx \theta_2 = \frac{1}{f_2}$ donc $f_2 = n_2 R / (n_2 - n_1)$. Pour la partie avant, en prenant un rayon émergeant du point focal F_1 et en propageant d'une distance f_1 avant de traverser l'interface, on obtient:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n_2-n_1}{n_2 R} & \frac{n_1}{n_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & f_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & f_1 \\ -\frac{n_2-n_1}{n_2 R} & -\frac{n_2-n_1}{n_2 R} f_1 + \frac{n_1}{n_2} \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Pour que le rayon ressorte parallèle, on veut que $-\frac{n_2-n_1}{n_2 R_2} f_1 + \frac{n_1}{n_2} = 0$, ce qui donne $f_1 = n_1 R / (n_2 - n_1)$.



2.23. Rayon généralisé

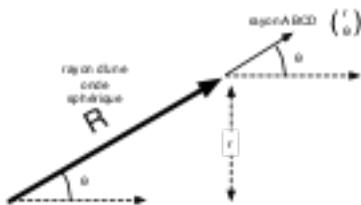
Durée: 30m

Question

1. À partir des rayons tels que définis par le formalisme ABCD et de leur transformation, obtenez une expression en fonction de r et θ pour le rayon de courbure \hat{R} du front d'onde d'un faisceau.
2. Obtenez la règle de transformation du rayon de courbure d'un faisceau en fonction des matrices ABCD. La propagation des ondes à fronts d'ondes courbes est donc incluse dans le formalisme ABCD. Nous verrons plus tard l'importance de cette règle.

Réponse

1. On voit que le rayon de courbure peut facilement être obtenu en traçant le rayon qui part de l'axe optique ainsi que les paramètres utilisés dans le formalisme ABCD pour décrire un rayon. Il y a correspondance directe avec $\tan \theta \approx \theta = r/\hat{R}$, donc $\hat{R} = r/\theta$.



2. Puisqu'on sait les règles de transformation de r et θ :

$$\begin{bmatrix} r' \\ \theta' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ar + B \\ C\theta + D \end{bmatrix} \quad (22)$$

on obtient simplement:

$$\hat{R}' = \frac{r'}{\theta'} = \frac{A\hat{R} + B}{C\theta + D} \quad (23)$$

Nous verrons qu'avec un rayon généralisé, nous pourrons propager les faisceaux lasers gaussiens avec cette équation.

2.24. L'oeil et les lunettes

Durée: 120m

Question

Référez-vous à la figure de Hecht suivante pour les questions.

1. Voici une citation de Hecht (p. 203):

“The refracting components of the eye, the cornea and crystalline lens, can be treated as forming an effective double-element lens with an object focus of about 15.6 mm in front of the anterior surface of the cornea and an image focus of about 24.3 mm behind it on the retina.” Pourquoi Hecht parle-t-il de deux distances focales? N'avons-nous pas dit que les points focaux sont équidistants de chaque côté d'une lentille? Expliquez.

2. Calculez la distance focale (ou puissance) de la cornée en supposant que l'indice de réfraction de l'humeur aqueuse est de 1.33 et le rayon de courbure de l'œil est d'environ $R = 23 \text{ mm}/2 = 11.5 \text{ mm}$.
3. On utilise des lunettes pour “corriger” la vue. Les lunettes sont disposées sur le nez, environ au plan focal avant de l'œil (soit 15.6 mm en moyenne). Calculez la matrice ABCD de l'œil avec lunettes, et de l'œil sans lunettes à partir du même plan de référence dans les deux cas. Pour simplifier la discussion, supposez que l'on peut remplacer les composantes optiques de l'œil par une seule lentille de distance focale $f = 15.6 \text{ mm}$ dans l'air, et intéressez-vous aux objets très lointains.
4. Quelles sont les distances focales du système complet dans les deux cas (avec et sans lunettes)?
5. Quel est le grossissement relatif du système avec lunettes par rapport au système sans lunettes?
6. Sachant cela, comment pouvez-vous expliquer qu'une paire de lunettes corrige la vue ? Expliquez-le de façon formelle avec les matrices ABCD.

Réponse

1. Les deux côtés de l'œil ne baignent pas dans le même indice de réfraction. Les deux distances focales (avant et arrière) d'une interface diélectrique ne sont les mêmes que lorsque l'indice est le même des deux côtés (par exemple, dans l'air).
2. On utilise la loi des diélectriques courbes ou la matrice ABCD diélectrique courbe qui donne simplement $f = -1/C$, donc $f = \frac{1.33R}{1.33-1.00} = 4R = 46\text{mm}$, par

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{(n_2-n_1)}{n_2 R} & \frac{n_1}{n_2} \end{bmatrix} \quad (24)$$

3. Les matrices ABCD pour le cas sans lunettes et avec lunettes, telles que calculées à partir de f devant la lentille de l'œil

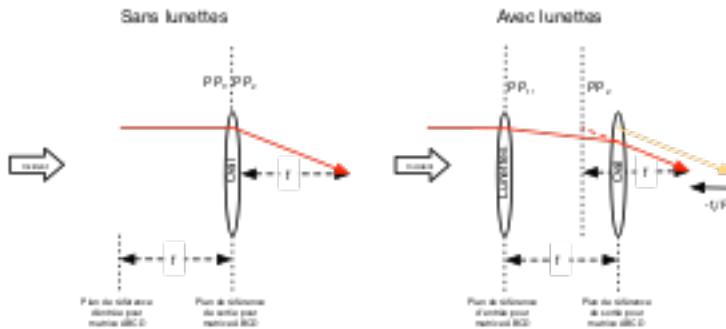
Cas sans lunettes:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & f \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & f \\ -\frac{1}{f} & 0 \end{pmatrix} \quad (25)$$

Cas avec lunettes:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & f \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{F} & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{f}{F} & f \\ -\frac{1}{f} & 0 \end{pmatrix} \quad (26)$$

4. La distance focale C^{-1} du système complet n'a pas changée et est toujours celle de l'œil, f .
5. Le grossissement dépend de l'objet et de l'image. Les deux systèmes ont la même distance focale, donc le grossissement est identique.
6. Prenons le cas sans lunettes, avec l'équation (c.1) et la figure suivante:



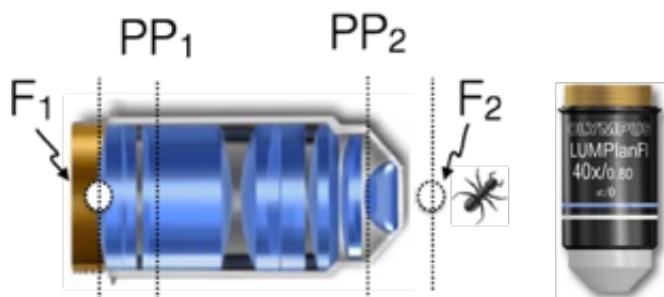
Le plan principal avant est à $d_{PP_1} = \frac{1-D}{C} = -f$ devant le système, donc f vers la droite, i.e. sur la lentille mince. Le plan principal de arrière est à $d_{PP_2} = \frac{1-A}{C} = 0$ donc lui aussi sur la lentille mince. Aucune surprise. Cependant, le plan principal arrière du système avec lunette a changé: on le voit tout de suite, l'élément A a changé. Un calcul de la position du plan donne PP_2 qu'il est maintenant à $d_{PP_2} = \frac{1-A}{C} = -\frac{f^2}{F}$. Ainsi, le plan focal a été déplacé de $-\frac{f^2}{F}$, la distance focale reste la même mais le point focal est avancé, d'où la correction par les lunettes.

2.25. Objectif

Durée: 60 m

Question

Vous avez l'objectif Olympus suivant, identifié « Olympus UPlanFl 40x ». Vous savez que cet objectif s'utilise normalement dans un système 4f avec une seconde lentille de distance focale $f=18$ cm pour compléter ledit système 4f. Cependant, vous voulez l'utiliser seul, sans aucune autre lentille, pour tirer profit de ses excellentes propriétés optiques. Vous savez aussi que le point focal F_1 est collé sur la première surface de l'objectif et que le point focal F_2 est à 2 mm du bout de l'objectif, comme sur la Figure.



- Quelle est la distance focale de cet objectif Olympus 40X ?
- Écrivez la matrice ABCD qui permet de transformer un rayon entrant de la première surface de l'objectif au plan focal F_2 .
- Quelles sont les positions des plans principaux ? Donnez les distances en fonction des points focaux F_1 et F_2 .
- Vous voulez maintenant utiliser l'objectif (sans aucune autre lentille) pour faire l'image d'un objet qui est à 2.5 mm du bout de l'objectif, donc 0.5 mm après le point focal . Où placeriez-vous votre

camera par rapport à la première surface de l'objectif pour obtenir une image claire de cet objet?

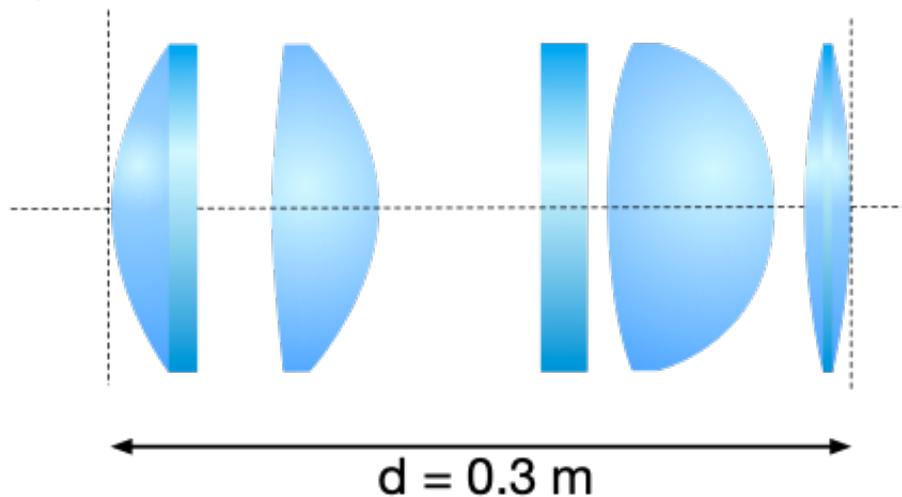
Réponse

2.26. Lentilles composées

Durée: 15m

Question

Vous avez un système de lentilles comme suit:



pour lequel la matrice de transfert ABCD (en unités métriques) du plan d'entrée au plan de sortie est :

$$M = \begin{bmatrix} -0.1 & 0.11 \\ -10 & 1 \end{bmatrix} \quad (27)$$

Si vous placez un objet 0.2 m devant le groupe de lentilles, où sera l'image et quel sera le grossissement?

Réponse

2.27. Diaphragme

Durée: 30m

Question

Vous avez une lentille de diamètre $D = 5$ cm et de focale $f = 50$ cm qui fait l'image du soleil, un disque d'illumination constante pour nos besoins. Le soleil sous-tend un angle de $\theta = 0.5^\circ$ à la surface de la terre, où son irradiance est de 1000 W/m^2 . Quelle est l'irradiance de l'image du soleil qui apparaît sur la caméra?

Réponse

2.28. Mirages

Durée: 90m

Question

Qu'est-ce qui explique la formation des mirages dans le désert? À partir de quelle température apparaîtront-ils?

Réponse

2.29. Examen 2016 partie 1

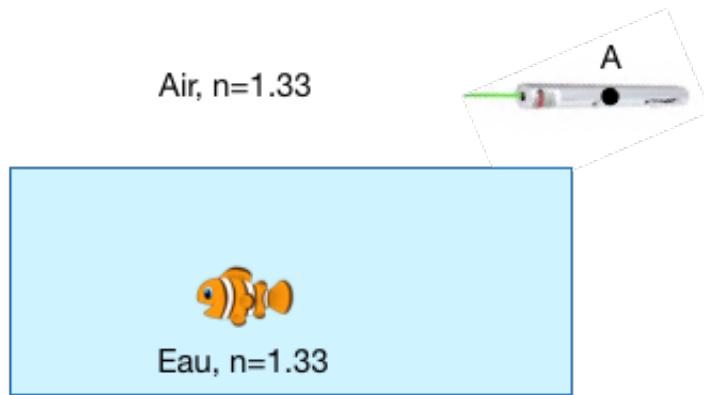
Durée: 25m

Question

Un exemple, en vrac, de question pour la partie 1 de l'examen.

1. [Vrai/Faux] Pour toute onde, un seul rayon pointant dans une direction donnée est suffisant pour décrire le front d'onde en tout point
2. [Vrai/Faux] On ne peut pas décrire une onde plane par une somme d'ondes sphériques, car son front d'onde est droit.
3. [Vrai/Faux] On peut avoir une onde qui a un front d'onde plan mais qui n'est pas une onde plane
4. [Vrai/Faux] Une onde plane qui se propage dans l'atmosphère sera perturbée par les variations d'indices de réfraction et ne restera plus une onde plane.
5. [Vrai/Faux] Le vecteur de Poynting correspond à la direction vers laquelle la puissance se propage
6. [Vrai/Faux] Le vecteur de Poynting a les unités de puissance par surface.
7. [Vrai/Faux] La distance focale est définie comme la distance entre la surface (physique) d'une lentille et son point focal.
8. Où sont les plans nodaux et les plans principaux pour une lentille mince ?

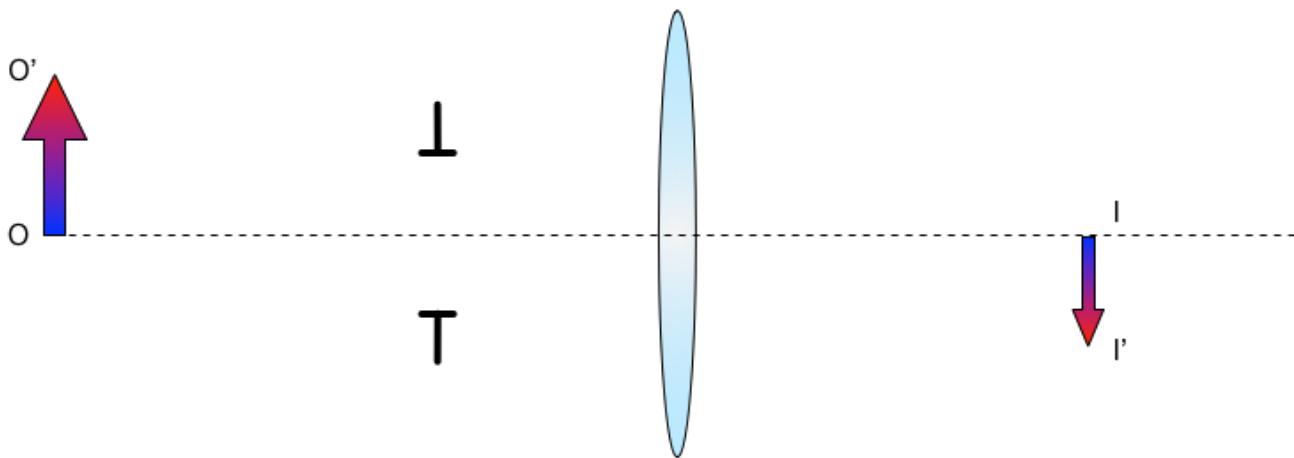
9. [Vrai/Faux] Les plans principaux sont des plans conjugués
10. Vous avez un pointeur laser inoffensif et vous voulez viser avec ce faisceau laser un poisson qui se trouve dans un aquarium. À partir du point A, où devez-vous viser pour atteindre le poisson sous l'eau? Tracez la lumière à partir du point A et expliquez.



11. [Vrai/Faux] Un miroir sphérique peut avoir des aberrations chromatiques
12. [Vrai/Faux] Pour trouver la position d'une image dans un système optique, on doit tracer au moins 3 rayons provenant de l'objet.
13. **GRIN** Pour quelles longueurs non nulles L une lentille GRIN, décrite par la matrice suivante donnera-t-elle une image à un bout de la lentille pour un objet collé à l'autre bout?

$$\begin{bmatrix} \cos\alpha L & \alpha^{-1}\sin\alpha L \\ -\alpha\sin\alpha L & \cos\alpha L \end{bmatrix}$$

14. Avec l'iris devant la lentille qui bloque la lumière, tracez le rayon marginal du point O et le rayon principal du point O', sachant que ces points ont des images correspondantes aux points I et I'.



15. [Vrai/Faux] Le diamètre du diaphragme d'entrée (*aperture stop*) est la valeur qui définit le f# du système.
16. [Vrai/Faux] La pupille d'entrée définit la quantité de lumière qui entre dans un système
17. [Vrai/Faux] L'élément A d'une matrice représente toujours le grossissement.
16. [Vrai/Faux] La matrice suivante représente un ou plusieurs éléments optiques.

$$\begin{pmatrix} 3 & 2 \text{ cm} \\ -2 \text{ cm}^{-1} & 1 \end{pmatrix}$$

1. La focale équivalente est de 0.50 cm
 2. Il n'y a pas de focale équivalente, car l'élément B n'est pas zéro comme dans une lentille mince
 3. Si je mets un objet devant ce groupe d'éléments optiques, une image virtuelle ou réelle existera
17. [Vrai/Faux] Une goutte d'eau sphérique agit comme une lentille épaisse.
 18. [Vrai/Faux] Les lunettes corrigent la vue en diminuant ou augmentant la distance focale du système complet de l'œil et des lunettes ensemble
 19. [Vrai/Faux] L'étoile Vega, qui sous-tend un angle de 1 milliradians, formera un point sur une camera puisqu'elle est infiniment loin.

Réponse

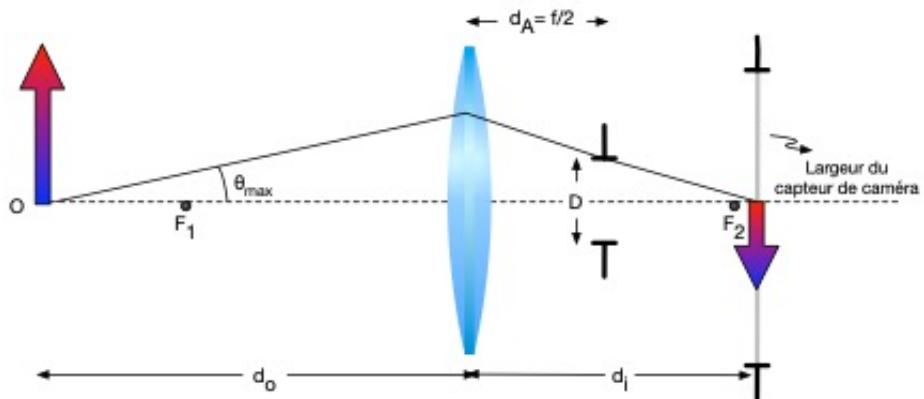
2.30. Examen 2016, partie 2

Durée: 45m

Question

Un exemple, en vrac, de question pour la partie 2 de l'examen.

1. Pour un système optique quelconque ayant une distance focale équivalente f , écrivez la matrice de transfert qui transforme un rayon d'un plan principal à l'autre plan principal.
2. Quelle est la position de l'image si un objet est placé à $2f$ devant une lentille de distance focale f ?
 1. L'image est-elle virtuelle ou réelle ?
3. Vous avez le système imageant suivant (pas à l'échelle) qui consiste en un objet à une distance $4f$ d'une lentille de distance focale $f=5$ cm. Le diaphragme d'entrée limitant la quantité de lumière se trouve à une position $d_A=f/2$ après la lentille et a un diamètre de $D=1$ cm.

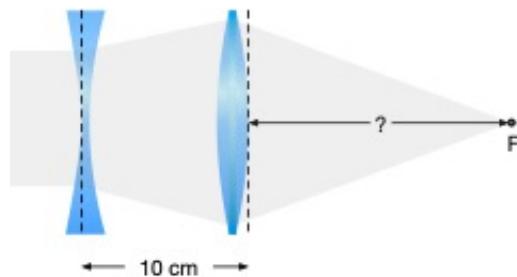


1. Pour un rayon sur l'axe et sur l'objet, quel est l'angle maximal θ_{\max} pour lequel un

rayon se rendra jusqu'à l'image

2. Comment s'appelle ce rayon ?

4. Vous avez construit ce splendide objectif téléphoto inverse avec une lentille divergente de $f_a = -2$ cm et une lentille convergente de $f_b = 6$ cm, les deux étant séparées par une distance de 10 cm :



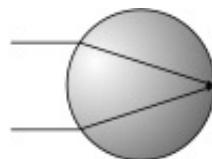
La matrice de transfert ABCD, de la première surface de la première lentille divergente à la dernière surface de la deuxième lentille convergente, qui provient de la multiplication des matrices représentant chaque lentille et l'espace entre les deux, est la suivante :

$$\begin{bmatrix} 6 & 10 \text{ cm} \\ -\frac{1}{2} \text{ cm}^{-1} & -\frac{2}{3} \end{bmatrix}$$

où est le point focal par rapport à la surface de la deuxième lentille ?

BONI FACULTATIF

5. En optique infrarouge, on utilise parfois des lentilles de type « sphérique » (ou *ball lens*) comme sur la figure. Il suffit de déposer la sphère sur un échantillon pour focaliser à sa surface. À partir de quel valeur de l'indice de réfraction le point focal sera-t-il directement sur la sphère?



2.31. Lentille dans milieux différents

Durée: 60m

Question

Supposez une lentille de rayons R_1 , R_2 , et d'indice n immergée dans un milieu n_1 à l'entrée et n_2 à la sortie. Montrez que les points focaux de chaque côté de l'interface sont à des distances différentes de la lentille..

Réponse

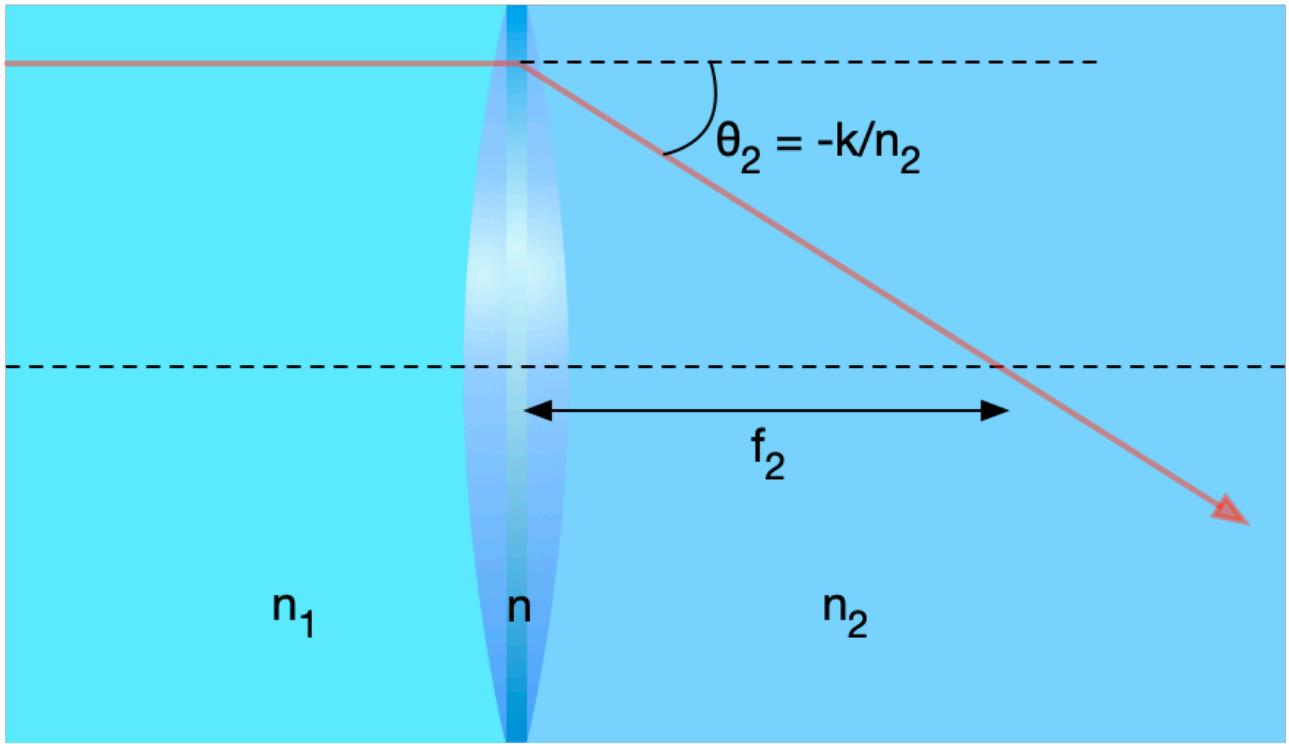
Nous avons obtenu la distance focale en prenant un rayon parallèle à l'axe dans un système en sachant que ce dernier, par définition croisera l'axe optique au point focal. La matrice de la lentille mince a été développée en supposant qu'elle était dans l'air. Ainsi, on ne peut partir de :

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \quad (28)$$

et espérer redériver quelque chose de plus général dans des milieux différents. On doit plutôt essentiellement réécrire la lentille mince en la décomposant en deux interfaces courbes séparées par une distance négligeable. Ainsi, en supposant un indice n_1 à l'entrée, un indice n dans la lentille et un indice n_2 à la sortie, on obtient une lentille mince immergée dans deux milieux différents:

$$\mathbf{L}' = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n_2-n}{n_2 R_2} & \frac{n}{n_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n-n_1}{n R_1} & \frac{n_1}{n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{k}{n_2} & \frac{n_1}{n_2} \end{bmatrix}, \quad (29)$$

avec $k \equiv \left(\frac{n-n_1}{R_1} - \frac{n-n_2}{R_2} \right)$. On note qu'avec une lentille dans l'air ($n_1 = n_2 = 1$), on retrouve l'équation du LensMaker $\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$. Un rayon à une hauteur unitaire ($r=1$) et parallèle à l'axe ($\theta=0$) émergera à un angle de $\theta_2 = -\frac{k}{n_2}$, et croisera donc l'axe à une distance f_2 telle que $\tan \theta_2 \approx \theta_2 = \frac{1}{f_2}$ donc $f_2 = n_2/k$. En inversant n_1 et n_2 et R_1 et R_2 , on obtiendrait $f_1 = n_1/k$.



3. Instrumentation

1. Définir et savoir identifier les diaphragmes d'entrée et de champ, les pupilles d'entrée et de sortie, les fenêtres d'entrée et de sortie
2. Expliquer l'importance des diaphragmes dans un instrument
3. Définir et savoir tracer le rayon principal et la rayon marginal d'une source ponctuelle
4. Définir le $f_{\#}$ d'un système.
5. Savoir calculer la quantité de lumière captée par un système

Lecture préparatoire

1. Notes de cours "Optique" de Daniel C. Côté, Chapitre 2, section 3 ([iBook](#) ou [iPDF](#)).
2. Pedrotti, Chapitre 6
3. Hecht, Section 5.3

3.1. Objectif et résolution

Durée: 1m

Question

Est-ce qu'un objectif 40x a une résolution optique spatiale meilleure ou pire qu'un objectif 100x ? Pourquoi?

Réponse

Impossible à dire. La résolution optique est donnée par l'ouverture numérique ou par le $f_{\#}$, et cette information n'est pas donnée. Le 40x ou 100x ne nous donne que la distance focale de l'objectif: elle est 40x ou 100x plus petite que celle du *tube lens*.

3.2. Balayage en x et θ

Durée: 5m

Question

Prouver à l'aide des matrices ABCD qu'un balayage en angle au point focal donne un balayage en X/Y à l'autre point focal ?

Réponse

Deux méthodes: par matrice ABCD ou par raisonnement de secondaire 5.

Un faisceau provenant du point focal ressort parallèle à l'axe. Par géométrie on obtient $y = f\theta$.

Par matrices ABCD, on obtient simplement:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & f \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & f \\ -\frac{1}{f_1} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f\theta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (30)$$

Le rayon sort à une hauteur de $y = f\theta$ et parallèle à l'axe car $\theta = 0$.

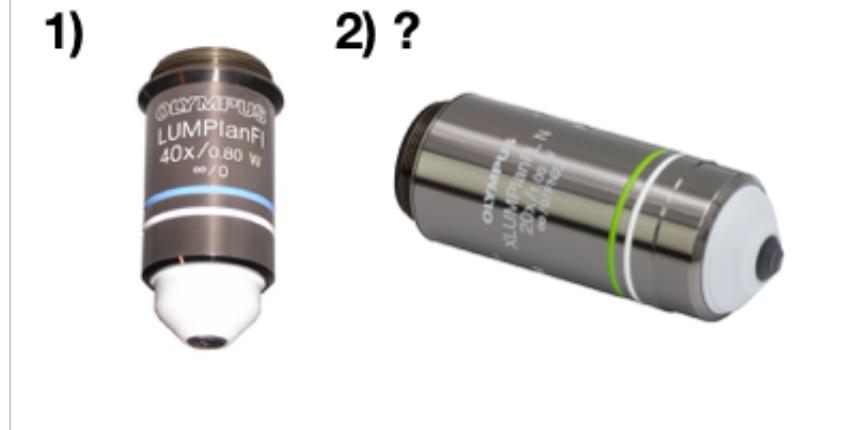
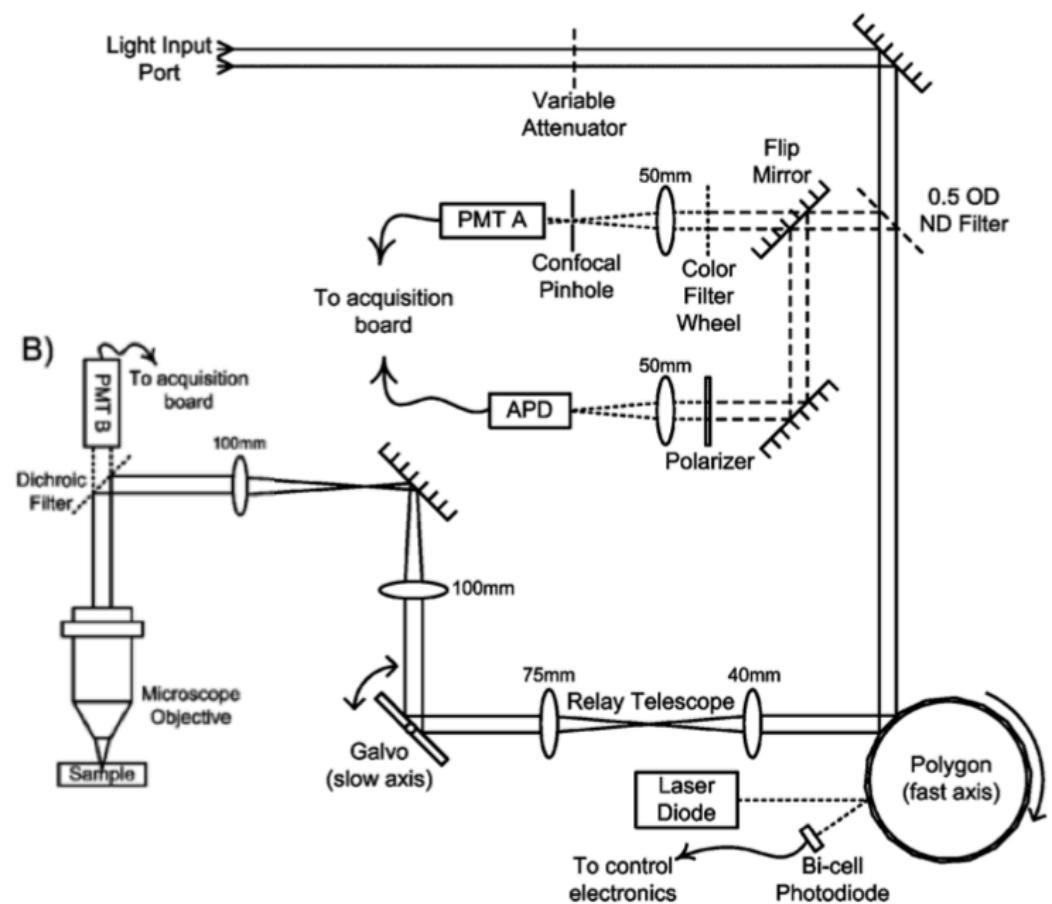
3.3. Champ de vue microscope à balayage

Durée: 120m

Question

Le microscope suivant, qui fonctionne avec un laser Ti:sapphire et un objectif Olympus 40x 0.8 NA (Objectif #1 ci-dessous), permet de balayer à 30 images par secondes avec un polygone à 36 faces. Tout l'optique a 1 pouce de diamètre.

1. Quel est le champ de vue du microscope?
2. Quel est la résolution optique du microscope?
3. Si vous numérisez de façon idéale, quelle sera la taille de l'image (micron et pixels) à 30 images par secondes?
4. J'aimerais utiliser le 20X (Objectif #2 ci-dessous). Est-ce possible? Est-ce que j'ai des modifications à faire? Qu'arrivera-t-il au champ de vue?
5. Après avoir complété vos calculs, que devriez-vous vérifier pour confirmer le tout? Où sont les incertitudes dans votre système?



Réponse

4. Diffraction

Objectifs

1. Expliquer la diffraction et son origine physique, comprendre les conditions selon lesquelles une onde diffracte ou non
2. Expliquer le principe de Huygens-Fresnel
3. Savoir faire des calculs de diffraction pour des profils d'illuminations simples ou complexes
4. Comprendre, savoir expliquer et reconnaître que la diffraction de Fraunhofer correspond à la transformée de Fourier du champ électrique incident
5. Savoir faire la correspondance d'échelle pour les calculs de diffraction faisant appel aux transformées de Fourier, dans le cas de l'utilisation d'une lentille ou non
6. Savoir faire des calculs à l'aide de méthodes numériques pour obtenir le patron de diffraction d'un profil arbitraire
7. Connaître le critère de sélection pour les régimes de Fraunhofer et Fresnel, comprendre appliquer ces critères pour résoudre des problèmes
8. Connaître et savoir identifier des paires de transformées de Fourier importantes
9. Expliquer et savoir calculer les propriétés des réseaux de diffraction
10. Nommer, identifier et connaître les propriétés spécifiques des trois types de réseaux d'amplitude, de phase et blasé
11. Définir et expliquer l'intervalle spectral libre, la dispersion angulaire, la résolution et le pouvoir de résolution et savoir les utiliser dans des calculs

Références

1. Notes de cours "Optique" de Daniel C. Côté, Chapitre 3, sections 1 et 2 ([iBook](#) ou [iPDF](#)).

4.1. Point focal

Durée: 5m

Question

Vous voulez le plus petit point focal possible. Quelle lentille prenez vous et quelle laser prenez vous ?

Réponse

Une lentille avec le plus petit $f_{\#}$ possible: le plus petit ratio de distance focale sur diamètre. Je prends un laser avec la plus petite longueur d'onde possible, et je remplis la lentille avec ce laser car la grosseur du point focal est donnée par $w = 1.22f_{\#}\lambda$.

4.2. Plans de Fourier

Durée: 1m

Question

Est-ce que des plans de Fourier sont des plans conjugués de l'objet ou de l'image?

Réponse

Non. Les plans conjugués sont des plans objet-image. Deux plans de Fourier sont en effet conjugués entre eux, mais on ne sont pas des plans conjugués de l'objet ou de l'image.

4.3. Point focal

Durée: 5m

Question

Vous envoyez un faisceau collimé (i.e. provenant de l'infini) de diamètre $d_o = 1 \text{ mm}$ dans une lentille mince de 25.4 mm de diamètre et d'ouverture numérique 0.5. Quelle sera la grosseur du point focal ?

Réponse

Le point focal sera de $w = 1.22 f_{\text{eff}} / \lambda = 1.22 \frac{f}{d_o} \lambda$ car la lentille n'est pas remplie (i.e. la diffraction provient de la grosseur finie du faisceau, pas du diamètre de la lentille). La distance focale est obtenue de la définition du $\text{NA} = \frac{D}{2f}$, donc $f = 25.4 \text{ mm}$. Ainsi, $w = 1.22 \times 25.4 \text{ mm} / 1 \text{ mm} \approx 30 \times \lambda$.

4.4. Conception et construction d'un spectromètre

Czerny-Turner

Durée: 180m

Question

Vous voulez construire un spectromètre de Czerny-Turner dans le visible (permettant des mesures de 400 nm à 700 nm inclusivement). Vous avez seulement des fentes de 50 microns pour travailler et vous voulez une résolution spectrale de 50 pm. Quels miroirs courbes, quel réseau de diffraction de type blasé utilisez-vous et à quelles positions les placez-vous ? Expliquez vos choix.

Réponse

4.5. Diffraction par des billes

Durée: 180m

Question

Vous voulez caractériser un jet assez dense de particules opaques de diamètres d . Le jet lui-même a un diamètre d'environ 1 cm. Vous avez un laser à 632.8 nm émettant un faisceau gaussien collimé (1 mm de diamètre), une boîte de lentilles convergentes de distances focales variées et une caméra avec un capteur CCD ayant 1024 x 768 pixels de 16 μm et produisant 30 images par secondes. Vous ne savez pas la grosseur des particules, mais vous savez qu'elles sont toutes identiques, et qu'elles ont un diamètre d'au moins 1 μm et probablement de moins de 10 μm . Vous faites un montage pour que le laser (que vous pourrez collimer autrement ou non) diffracte sur les particules et vous voulez mesurer le patron de diffraction sur la caméra.

1. Dessinez votre montage de façon conceptuel.
2. Obtenez (équation à l'appui) le patron que vous verrez sur la caméra. Vous devrez utiliser le principe de Babinet. **Attention:** bien sûr, le flux de particules est tel que plusieurs particules se retrouvent dans le faisceau, à des distances variables l'une de l'autre. Restera-t-il un patron de diffraction non nul? Obtenez une expression mathématique décrivant cette situation.
3. Avec les lentilles que vous utiliserez et votre caméra, quelles sont les limites des diamètres que vous pourrez détecter (plus petit et plus grand diamètres de particules)?
4. Lorsque vous avez dérivé 2), vous avez fait des hypothèses (implicites ou non) sur la densité de particules. Donnez un critère sur la grosseur du jet et la densité maximale de particules (particules par surface par seconde) que le jet devrait avoir pour que vos mesures soient possibles. **Des indices:** est-ce qu'un photon diffracté pourrait diffracter à nouveau sur une deuxième particule? Quelle est la probabilité qu'un photon diffracte dans un jet de particule de diamètre d ?

Réponse

4.6. Tache focale, lentille complètement illuminée

Question

Une onde plane est incidente sur une lentille de distance focale f et de diamètre D . Quelle est la grosseur de la tache focale?

Réponse

Ceci est un problème de diffraction par une fente circulaire, car la lentille bloque l'onde plane incidente. On a donc une illumination uniforme sur l'ensemble de la fente.

À partir de la solution de la diffraction d'une fente circulaire de l'exemple 3.1.2 présenté dans les notes

$$I_\sigma(r) \approx \frac{|E_0|^2 \pi a^2}{f^2} \left[\frac{2J_1\left(\frac{2\pi ar}{\lambda f}\right)}{\frac{2\pi ar}{\lambda f}} \right]^2 \quad (31)$$

on obtient que la largeur, que l'on peut définir de plusieurs façons (distance entre le maximum et le point où la fonction $J_1(x)/x$ est nulle, ou entre les deux zéros). Donc avec $J_1\left(\frac{2\pi ar_0}{\lambda f}\right) = 3.82$, on obtient pour la distance entre les deux zeros $2r_0 = 2 \times 1.22 \lambda \frac{f}{2a} = 2.44 \lambda f \#$. La tache focale, dans le cas où la lentille est remplie par l'illumination, est environ le double de la longueur d'onde multipliée par le *f-number* de la lentille.

4.7. Tache focale, petit faisceau

Question

Un petit faisceau en forme de disque de diamètre d est incident sur une lentille de distance focale f et de diamètre D . Quelle est la grosseur de la tache focale?

Réponse

Nous avons un problème dangereusement similaire au problème précédent. Cependant, l'intensité de l'illumination ne s'étend pas sur l'ensemble de la lentille car le faisceau est plus petit que celle-ci. Ainsi, en posant le problème de diffraction, l'intégrale sera nulle au-delà du faisceau, ce qui réduira le diamètre de l'intégrale à d au lieu de D . On refait donc le problème de la même façon.

À partir de la solution de la diffraction d'une fente circulaire de l'Exemple 3.1.2 des notes, on obtient

$$E_\sigma(r) \approx \frac{E_0 e^{ikf} 2\pi}{f} \int_0^{d/2} J_0\left(\frac{kr'r}{f}\right) r' dr' \quad (32)$$

$$I_\sigma(r) \approx \frac{|E_0|^2 \pi^2 (d/2)^4}{f^2} \left[\frac{2J_1\left(\frac{\pi dr}{\lambda f}\right)}{\frac{\pi dr}{\lambda f}} \right]^2 \quad (33)$$

on obtient essentiellement la même solution que le problème précédent, sauf que le diamètre effectif de “blocage” est d au lieu de D . On obtient donc $2r_o = 2 \times 1.22\lambda \frac{f}{d}$. Dans ce cas, on dit que le faisceau “n’utilise pas” toute la lentille est que le $f_{\#}$ effectif est augmenté de $f_{\#}^{\text{eff}} = \frac{D}{d} \times f_{\#}$ ce qui augmente proportionnellement la grosseur de la tache focale.

4.8. Résolution de l’oeil

Durée: 120m

Question

Les deux phares d’une voitures sont séparés par une distance de $h = 1.5$ m. Quelle est la distance maximale d à partir de laquelle vous pourrez résoudre les deux phares comme étant distincts si votre pupille a un diamètre de $D = 5$ mm et que la longueur d’onde principale est de 550 nm ?

Réponse

Stratégie

L’onde de chaque phare frappe l’ouverture circulaire de l’oeil et diffracte en un disque d’Airy (le champ en fonction de l’angle). Ceci correspond à un ensemble de rayons qui frappent la lentille de l’oeil. On solutionne d’abord en ignorant l’oeil. Ensuite, on montre que finalement, la réfraction à l’interface de l’oeil ne change rien à la résolution.

Les phares E_+ et E_- émettent des ondes sphériques, et chacune diffracte dans l’ouverture de la pupille. On obtient les champs diffractés selon θ tout de suite après la pupille centré sur $\pm\phi$:

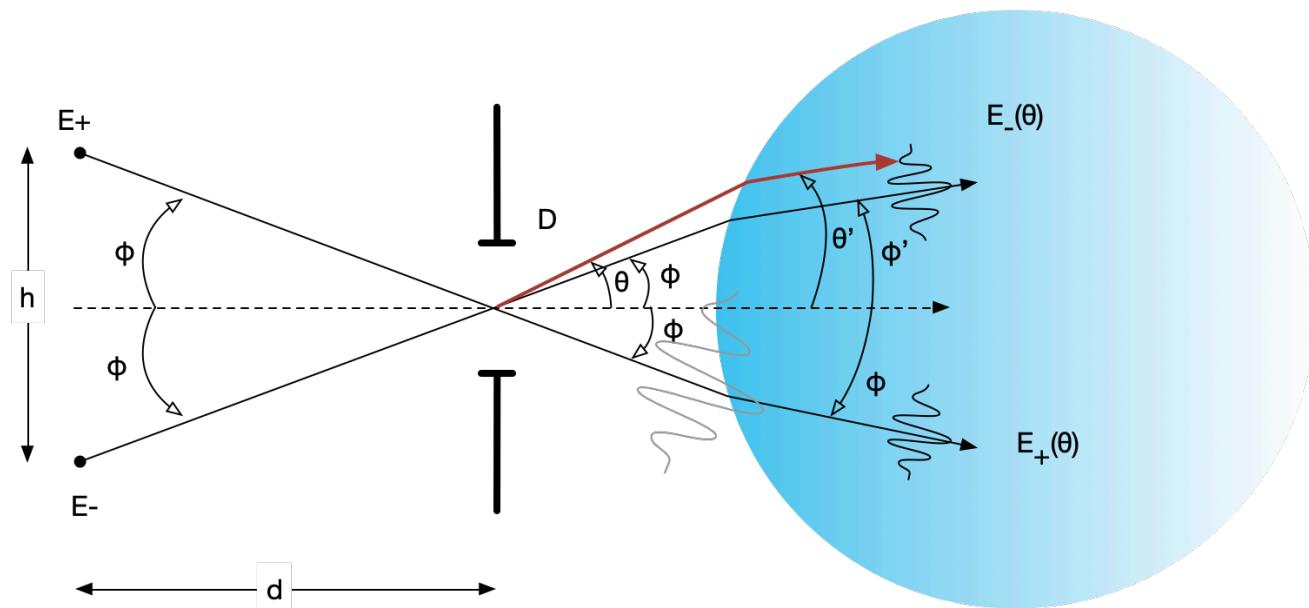


Figure: Les phares E_+ et E_- émettent des ondes sphériques, mais la pupille lointaine reçoit une onde plane dans la direction $\pm\theta$. Indépendamment, chaque faisceau diffractera à travers la pupille de rayon D . Chaque source produira un patron de diffraction $E_{\pm}(\theta)$.

$$E_{\pm}(\theta) \propto E_0 \frac{2J_1\left(\frac{\pi D \sin(\theta \pm \phi)}{\lambda}\right)}{\left(\frac{\pi D \sin(\theta \pm \phi)}{\lambda}\right)} \quad (34)$$

On utilise le critère de Rayleigh, c'est-à-dire le premier minimum (zéro) du patron de diffraction $E_+(\theta)$ doit être superposé au maximum du patron de diffraction de l'autre faisceau $E_-(\theta)$ à ϕ . On veut donc:

$$E_+(\theta = \phi) = \text{Premier zéro de la fonction } J_1 \quad (35)$$

Lorsque l'argument de $J_1(x)$ est $\frac{\pi D \sin(2\phi)}{\lambda} = 3.82$, nous obtenons $\phi = 1.22 \frac{\lambda}{2D}$. Par considération géométrique, on obtient simplement que $\tan \phi \approx \phi = \frac{h}{2d}$ donc $d = \frac{hD}{1.22\lambda} = \frac{1.5 \text{ m} \times 5 \times 10^{-3} \text{ m}}{1.22 \times 550 \times 10^{-9} \text{ m}} = 11 \text{ km}$.

Est-ce que l'indice de l'oeil ou sa courbure sont importants?

Le rayon au centre de la pupille est réfracté lors de la traverse de l'interface diélectrique. La relation entre l'angle avant l'interface θ et après l'interface θ' est par la loi de Snell:

$$\theta' = \frac{\theta}{n} \quad (36)$$

ce qui est équivalent à la transformation par une interface courbe avec les matrices ABCD pour un rayon au centre de la pupille. On remplace pour obtenir une expression en fonction des angles θ' et ϕ' à l'intérieur de l'oeil :

$$E'_{\pm}(\theta') \propto E_0 \frac{2J_1\left(\frac{\pi D \sin(n\theta' \pm n\phi')}{\lambda}\right)}{\left(\frac{\pi D \sin(n\theta' \pm n\phi')}{\lambda}\right)} \quad (37)$$

On refait le même cheminement: en fonction des angles intérieurs le premier minimum (zéro) du patron de diffraction $E'_+(\theta')$ doit être superposé au maximum du patron de diffraction de l'autre faisceau à ϕ' .

$$E'_+(\theta' = \phi') = \text{Premier zéro de la fonction } J_1. \quad (38)$$

On obtient donc: $\phi' = 1.22 \frac{\lambda}{2nD}$. Donc l'angle minimal pouvant être résolu est en effet plus petit à l'intérieur de l'oeil, cependant, un rapide calcul montre bien que l'angle correspondant à l'extérieur, entre les deux phares, est toujours le même car on a:

$$\phi = n\phi' = 1.22 \frac{\lambda}{2D}. \quad (39)$$

Donc l'oeil et son indice de réfraction n'ont pas d'impact sur la résolution.

4.9. Résolution télescope Keck

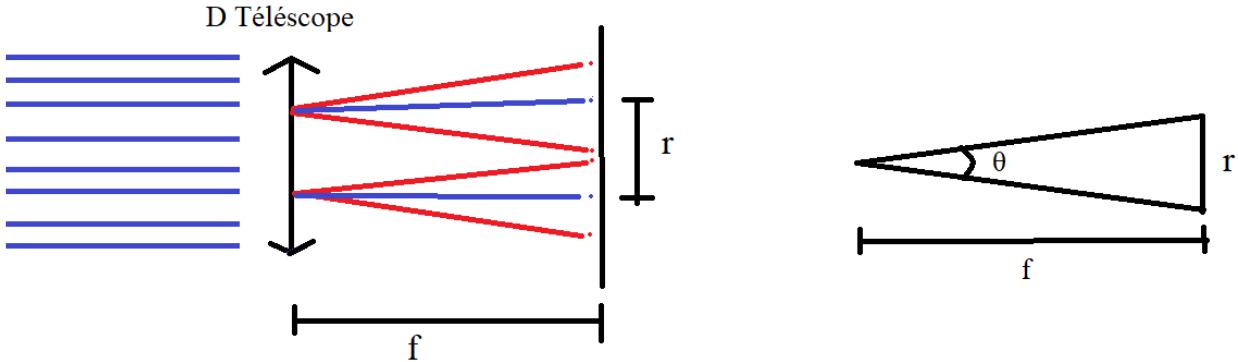
Durée: 20m

Question

Trouvez l'angle minimale (critère de Rayleigh) entre deux structures qui peuvent être résolues par le télescope de Keck à Hawaii qui a un diamètre de 10 m et une distance focale de 17.5 m. Expliquez votre choix de longueur d'onde.

Réponse

Le critère de Rayleigh correspond à la distance qui sépare le pic principal et le premier zéro et est donné par $r = \frac{1.22f\lambda}{D}$. Le télescope fonctionne dans le visible et l'infrarouge. On s'intéresse à la raie de Balmer de l'hydrogène à 656.2 nm mais toute autre ligne spectrale pourrait être utilisée pour les calculs.



Avec un peu de géométrie et le critère de Rayleigh, on arrive aux équations suivantes :

$$\tan\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right) = \frac{r}{2f} \quad (40)$$

et

$$\frac{r}{2f} = \frac{1.22f\lambda}{2fD}. \quad (41)$$

Donc

$$\frac{\Delta\theta}{2} = \frac{1.22\lambda}{2D}. \quad (42)$$

La résolution spatiale à la camera est donc : $\Delta\theta = 1.22\frac{\lambda}{D} = 0.04$ millirad dans le visible.## Résolution microscope

Durée: 20m

Question

Trouvez la distance minimale détectable (critère de Rayleigh) entre deux petites molécules qui sont excitées par de la lumière bleue à 488 nm dans un objectif de microscope ayant une ouverture numérique de $NA = 1.2$ et un grossissement de $60X$. Supposez que seule la diffraction limite la résolution. Notez: l'ouverture numérique est donnée par le demi-angle maximal d'acceptance d'une lentille (voir p.39 des notes d'étude)

Réponse

L'entrée arrière d'un objectif est circulaire, on utilise la diffraction d'un obstacle circulaire. Nous savons le NA, pas besoin de savoir la distance focale car $f_{\#} = \frac{1}{2NA}$. Selon le critère de Rayleigh, nous aurons:

$$\Delta x = 1.22 \frac{f\lambda}{D} = 1.22 \frac{\lambda}{2NA} = 0.61 \frac{0.488}{1.2} \mu\text{m} = 0.248 \mu\text{m}. \quad (43)$$

4.10. ## Tache focale

Durée: 20m

Question

Une lentille de distance focal $f = 1$ cm possède un diamètre utile de $D = 1$ cm. Vous l'utilisez pour illuminer des objets qui se trouvent au plan focal de la lentille avec un laser de $\lambda = 633$ nm.

1. Quelle est la dimension de la tache au point focal si une onde plane est incidente sur la lentille et que l'on définit la largeur comme:
 1. la largeur à mi-hauteur en irradiance
 2. la largeur à mi-hauteur en champ électrique
 3. la distance entre les positions des deux premiers zéros d'irradiance au plan focal.
2. Si votre faisceau incident n'est pas une onde plane, mais plutôt un disque de 5 mm de diamètre sur la lentille. Quelle sera la dimension de la tache au point focal ? Sera-t-elle plus grande ou plus petite que la tache originale?

Réponse

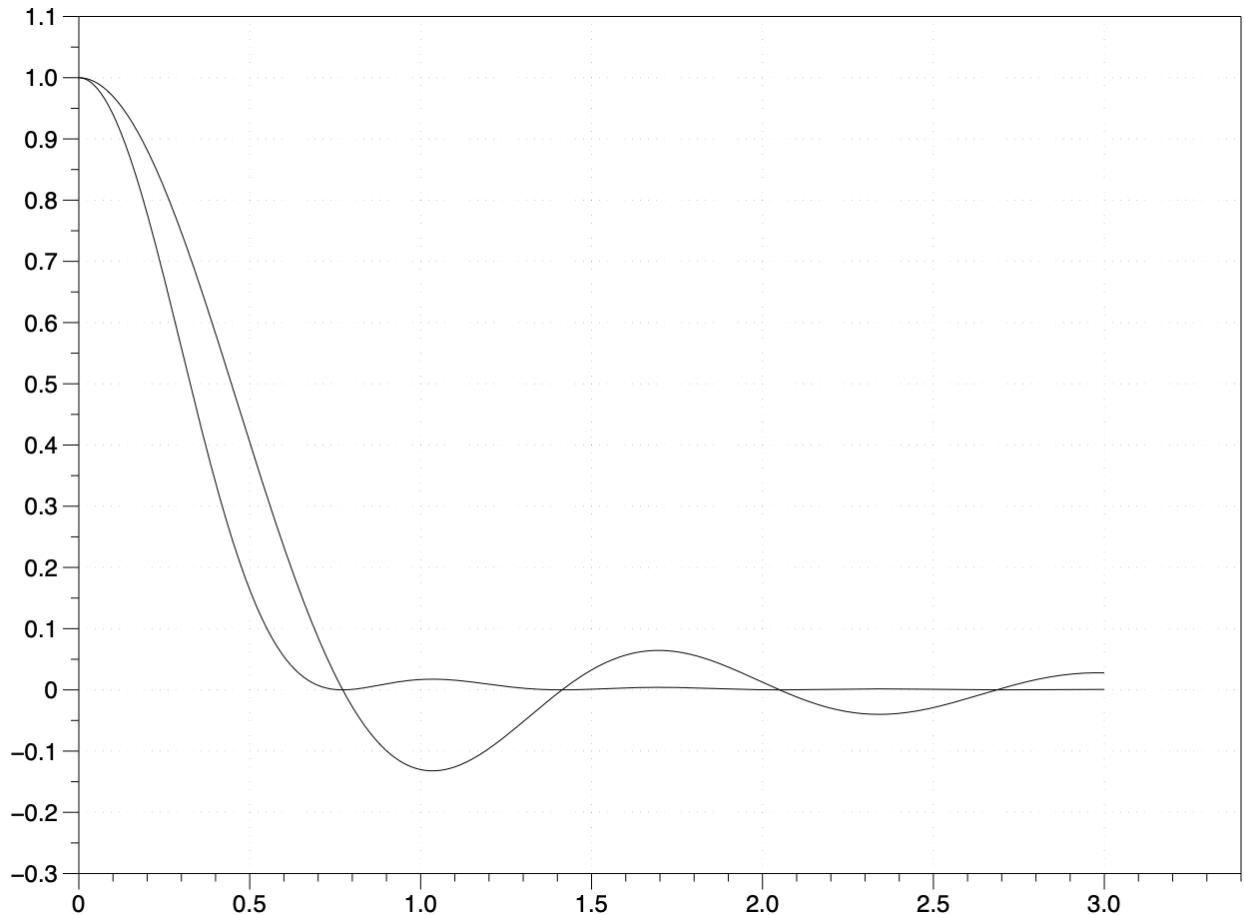
Diffraction par une fente circulaire, donc comme dans les notes:

$$E_\sigma(r) \approx \frac{2E_0 e^{ikR} \pi a^2}{R} \frac{J_1\left(\frac{2\pi ar}{\lambda R}\right)}{\frac{2\pi ar}{\lambda R}} \approx 2 \frac{J_1\left(\frac{\pi Dr}{\lambda f}\right)}{\frac{\pi Dr}{\lambda f}} \quad (44)$$

Sachant que $D = f$, on a:

$$E_\sigma(r) \approx 2 \frac{J_1\left(\frac{\pi r}{\lambda}\right)}{\frac{\pi r}{\lambda}} \quad (45)$$

$$I_\sigma(r) \approx 4 \left(\frac{J_1\left(\frac{\pi r}{\lambda}\right)}{\frac{\pi r}{\lambda}} \right)^2$$



1.1) $\left(\frac{J_1\left(\frac{\pi r}{\lambda}\right)}{\frac{\pi r}{\lambda}} \right)^2 = 0.5$ à $r = 0.327 \mu\text{m}$, donc $0.654 \mu\text{m}$

1.2) $2 \frac{J_1\left(\frac{\pi r}{\lambda}\right)}{\frac{\pi r}{\lambda}} = 0.5$ à $r = 0.446 \mu\text{m}$, donc $0.892 \mu\text{m}$

1.3) $\left(\frac{J_1\left(\frac{\pi r}{\lambda}\right)}{\frac{\pi r}{\lambda}} \right)^2 = 0$ à $\pi r / \lambda = 3.82$ donc $1.54 \mu\text{m}$

2) Le diamètre d'entrée est deux fois plus petit, donc la tache focale sera deux fois plus grosse pour chaque définition.

4.11. Réseau blazé

Durée: 1m

Question

Un réseau de diffraction blazé de 5.08 cm de largeur (dimension perpendiculaire à la direction des sillons) est utilisé au premier ordre afin de résoudre avec une résolution de 0.1 nm le contenu spectral d'une source émettant autour de 1.5 μm . Calculer l'angle de blaze dans les 2 situations suivantes :

1. en configuration Littrow;
2. à incidence normale

Réponse

Dans les deux cas, on utilise l'équation générale des réseaux:

$$d \sin \alpha + d \sin \beta = m\lambda \quad (46)$$

1. Configuration Littrow

La configuration de Littrow correspond à la situation où: $\alpha = \beta = \theta_B$,

$$\text{donc en utilisant l'équation générale du réseau, on obtient :} \quad (47)$$

$$2d \sin \theta_B = m\lambda.$$

$$\text{Il nemanque que } d \text{ à trouver avec la définition du pouvoir direct :} \quad (48)$$

$$\text{\textbackslash text\{PR\}}=\text{\frac\{\lambda\}\{\Delta\lambda\}}=\text{\frac\{W_m\}\{d\}} \Rightarrow d=\text{\frac\{W_m\}\{\Delta\lambda\}}$$
$$\approx 3.34 \sim \mu \text{m}$$

$$\text{Donc,} \quad (49)$$

$$\theta_B = \arcsin \left(\frac{\lambda}{2d} \right) \approx 12.80^\circ.$$

$$2. \text{ Incidence normale} \text{ En général, on a :} \quad (50)$$

$$\theta_B = \frac{\alpha + \beta}{2},$$

$$\text{et comme la configuration à incidence normale correspond à :} \quad (51)$$

$$\alpha = 0,$$

$$\text{alors nous avons :} \quad (52)$$

$$\beta = 2\theta_B.$$

$$\text{En utilisant l'équation générale du réseau :} \quad (53)$$

$$d\sin\beta = \lambda \quad d\sin(2\theta_B) = \lambda \quad \theta_B = \frac{1}{2}\arcsin\left(\frac{\lambda}{R}\right) \approx 13.25^\circ$$

You can't use 'macro parameter character #' in math mode

$$E\sigma(\sin\theta_y) \approx \frac{\int E\sigma(y) e^{-iky} \sin\theta dy}{\int R dy}$$

$$\text{Puisque } E_\Sigma(y) = E_0 \frac{1}{2} (\cos\left(\frac{2\pi y}{\Lambda}\right) + 1) = E_0 \frac{1}{2} (\cos k_0 y + 1), \text{ on a :} \quad (54)$$

$$E\sigma(\sin\theta) \approx \frac{1}{2} \frac{\int R \left[\cos(k_0 y) + 1 \right] e^{-iky} \sin\theta dy}{\int R dy}$$

$$\text{avec } k_0 \equiv \frac{2\pi}{\Lambda}. \text{ On peut obtenir la solution en remplaçant } \cos k_0 y \text{ par } (e^{ik_0 y} + e^{-ik_0 y})/2, \text{ ce qui résulte en :} \quad (55)$$

$$E\sigma(\sin\theta) \approx \frac{1}{2} \frac{\int R \left[\delta(k \sin\theta - k_0) + \delta(k \sin\theta + k_0) \right] e^{-iky} \sin\theta dy}{\int R dy}$$

You can't use 'macro parameter character #' in math mode

$$k \left[n \frac{d(y/b)}{dy} + (d - d(y/b)) \right] = k \left[(n-1)y/b + d \right]$$

You can't use 'macro parameter character #' in math mode

$$E\sigma(\sin\theta_y) \approx \frac{\int_0^b E\sigma(y) e^{-iky} \sin\theta dy}{\int_0^b R dy}$$

$$\text{Puisque } E_\Sigma(y) = E_0 e^{ik((n-1)y/b + d)}, \text{ on a :} \quad (56)$$

$$E\sigma(\sin\theta) \approx \frac{\int_0^b E\sigma(y) e^{-ik((n-1)y/b + d)} \sin\theta dy}{\int_0^b R dy}$$

$$2. On connaît la solution $S_\sigma(\sin\theta)$ pour une fenêtre sans phase : \quad (57)$$

$$E\sigma(\sin\theta) = \frac{\int_0^b E\circ \{e^{i[kR]}\} \circ \{R\} \int_0^y \{e^{-iky} \sin\theta\} dy}{\int_0^b \{e^{i[kR]}\} \circ \{R\} \{y\} dy} = \frac{\int_0^b E\circ \{e^{-iky} \sin\theta\} dy}{\int_0^b \{e^{i[kR]}\} \circ \{R\} \{y\} dy}$$

$$\text{On peut récrire l'équation sous la forme suivante :} \quad (58)$$

$$E\sigma(\sin\theta) \approx \frac{\int_0^b E\circ \{e^{i[kR]}\} \circ \{R\} \int_0^y \{e^{-iky} \sin\theta\} dy}{\int_0^b \{e^{i[kR]}\} \circ \{R\} \{y\} dy}$$

$$\text{avec } \phi_0 \equiv (n-1)d/b. \text{ On peut facilement écrire :} \quad (59)$$

$$E\sigma(\sin\theta) \approx e^{i\beta d} \times \left[\frac{\int_0^b E\circ \{e^{i[kR]}\} \circ \{R\} \int_0^y \{e^{-iky} \sin\theta\} dy}{\int_0^b \{e^{i[kR]}\} \circ \{R\} \{y\} dy} \right]$$

$$\text{Il s'agit donc de la même forme que sans phase, avec } \sin\theta \rightarrow \sin\theta - \phi_0, \text{ donc :} \quad (60)$$

$$P\sigma(\sin\theta) = \frac{\int_0^b E\circ \{e^{i[kR]}\} \circ \{R\} \{y\} dy}{\int_0^b \{e^{i[kR]}\} \circ \{R\} \{y\} dy} = S\sigma(\sin\theta - \phi_0)$$

You can't use 'macro parameter character #' in math mode

$\frac{100000 \text{ photoelectrons}}{\text{QE photoelectrons/photon} \times 2^{12} \text{ bit}} = 27 \text{ photons par bit}$

You can't use 'macro parameter character #' in math mode

$\text{P}_{\text{Emis}} = I_{\text{exc}} \text{ N} \sigma = I_{\text{exc}} \text{ VC} \sigma$,

avec N le nombre de fluorophores excités par l'irradiance I_{exc} et σ la section efficace du fluorophore. On remarque que les unités sont : (61)

$\frac{\text{Photons}}{\text{s}} = \frac{\text{Photons}}{\text{s}} \cdot \text{Molecule}^2 \cdot \text{Molecules} \cdot \text{Molecule}^3 = \frac{\text{Photons}}{\text{s}} \cdot \text{Molecule}^2 \cdot \text{Molecule}^3 \cdot \text{Molecule}^3$

You can't use 'macro parameter character #' in math mode

$$F = \frac{2\pi}{4\pi} (1 - \cos \theta_{\text{NA}}) = 0.1$$

On peut mesurer pour les petits angles : (62)

$F = \frac{1 - \cos \theta_{\text{Max}}}{2} = \frac{1 - (1 - \frac{\theta_{\text{Max}}^2}{2} + \dots)}{2} \approx \frac{\theta_{\text{Max}}^2}{4}$

Ainsi, on a $\alpha = \eta T F$: (63)

$\text{P}_{\text{Emis}} = \frac{P_{\text{Dét}} \eta T F}{\text{Photons}/\mu \text{s}} = 71.4 \times \text{P}_{\text{Dét}} = 214 \text{ A}$

You can't use 'macro parameter character #' in math mode

$d_o = \frac{180 \text{ mm}}{40 \cdot 100 \text{ mm}} \cdot \frac{100 \text{ mm}}{75 \text{ mm}} \cdot \frac{75 \text{ mm}}{40 \text{ mm}} \cdot 50 \text{ mm} = 0.048 \text{ m}$

You can't use 'macro parameter character #' in math mode

$$V = \pi (d_o/2)^2 h = 0.18 \mu \text{m}^3$$

You can't use 'macro parameter character #' in math mode

$$I_o = \frac{P}{A} = \frac{10 \text{ mW}}{1.81 \mu \text{m}^2} = 5.5 \text{ mW}/\mu \text{m}^2$$

You can't use 'macro parameter character #' in math mode

$C = \frac{P_{\text{Emis}}}{I_o V} = \frac{214 \times 10^6 \text{ Photons/s}}{5.5 \text{ mW} \cdot 0.18 \mu \text{m}^3 \cdot 3.2 \times 10^{-19} \text{ molécules}/\mu \text{m}^2} = 2.3 \text{ molécules}/\mu \text{m}^3$

You can't use 'macro parameter character #' in math mode

$$\begin{aligned} \text{\Biggl[} & \text{\begin{matrix}} r^{\prime} \theta^{\prime} \\ \text{\end{matrix}} \text{\Biggl]} = \text{\Biggl[} & \text{\begin{matrix}} M & 0 \\ 0 & 1/M \end{matrix} \text{\Biggl]} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{\Biggl[} & \text{\begin{matrix}} r \theta \\ \text{\end{matrix}} \text{\Biggl]} \end{aligned}$$

Pour obtenir la matrice à une distance Δ du plan focal, on ajoute une propagation dans l'air de Δ : (64)

$$\begin{aligned} \text{\Biggl[} & \text{\begin{matrix}} r^{\prime} \theta^{\prime} \\ \text{\end{matrix}} \text{\Biggl]} = \text{\Biggl[} & \text{\begin{matrix}} M & 0 \\ 0 & 1/M \end{matrix} \text{\Biggl]} \text{\Biggl[} & \text{\begin{matrix}} 1 & \Delta \\ 0 & 1 \end{matrix} \text{\Biggl]} \text{\Biggl[} & \text{\begin{matrix}} r \theta \\ \text{\end{matrix}} \text{\Biggl]} \\ \text{\Biggl[} & \text{\begin{matrix}} M & \Delta M \\ 0 & 1/M \end{matrix} \text{\Biggl]} \text{\Biggl[} & \text{\begin{matrix}} r \theta \\ \text{\end{matrix}} \text{\Biggl]} \end{aligned}$$

Le système est plus imageant ($B \neq 0$), donc une distance Δ devant le plan focal pour une hauteur de rayon r , certains rayons seront projetés au-delà du point r si Δ donne un éparpillement : (65)

$$M r + \Delta M \theta < r' \quad \text{label{eq:rayon}}$$

Un rayon (r, θ) originant à une distance Δ du plan focal sera détecté si l'angle dans lequel il entre dans le champ de vision du détecteur est dans le intervalle $[r_o, \infty)$: (66)

$$M r + \Delta M \theta < r_o \quad \text{label{eq:rayonDetecte}},$$

$$\text{et ne sera pas détecté si il arrive à l'extérieur du champ de vision :} \quad (67)$$

$$M r + \Delta M \theta > r_o \quad \text{label{eq:rayonBloque}}$$

Donc pour un (r, θ) donné, l'angle maximal possible détecté est : (68)

$$\theta_{\max} = \frac{r_o - M r}{\Delta M} \quad \text{label{eq:angleMax}}$$

Il doit être inclus entre $[-\theta_{NA}, \theta_{NA}]$ sachant que l'ouverture numérique permet la détection de $\pm \theta_{NA}$. Si on regarde au plan focal, ($\Delta = 0$), on voit que : (69)

$$r' = M r$$

commençant par l'origine, un rayon, une hauteur r est grossi. Si $M r$, donc les rayons jusqu'à 0,24, mais continuent jusqu'à 10, $m/2 = 21x0,48, m/2$, pour tous les angles de rayons jusqu'à θ_{NA} . Pour les rayons au plan focal, $\Delta > 0$, on voit que les rayons seront projétés selon ????. En regardant sur l'axe $r=0$, on obtient que : (70)

$$r' = \Delta M \theta$$

On veut savoir à partir de quelle position les rayons sont intérieurs à l'ouverture numérique pour commencer à projeter au-delà du point r_o , donc : (71)

$$\theta_{\max} < \frac{r_o}{\Delta M}$$

à partir de $\Delta > \frac{r_o}{M \theta}$, les rayons commencent à rebloquer. L'angle maximal qui passe dans le champ de vision est θ_{NA} . Pour $\Delta < \frac{nr_o}{M N A}$, l'angle maximal est θ_{NA} . On obtient l'efficacité de collecte relative au plan focal avec $\frac{1}{2}(1 - \cos \theta) \approx \frac{\theta^2}{4}$ et donc : (72)

$$\text{frac}{1}{\theta^2} \text{NA}^2 \Delta^2 / \text{frac}{1}{\theta^2} \text{NA}^2 = \frac{1}{4}$$

You can't use 'macro parameter character #' in math mode

$$q' = \frac{Aq + B}{Cq + D}$$

La matrice de transformation de la lentille \$f\$ est simplement

(73)

```
\Biggr[ \begin{matrix} 1 & f \\ 0 & 1 \end{matrix} \Biggl]
```

```
\Biggl[ \begin{matrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{matrix} \Biggr] = \Biggl[ \begin{matrix} 0 & f \\ -1/f & 1 \end{matrix} \Biggr]
```

Onadonc :

(74)

$$q' = \frac{f}{-q/f + 1}$$

Puisque le faisceau gaussien incident a un rayon complexe $q = jz_o = j\frac{\pi w_o^2}{\lambda}$, on a en utilisant $\frac{1}{q'} \equiv \frac{1}{R'} - j\frac{\lambda}{\pi w'^2}$: (75)

$$\frac{1}{q^{\prime }}=\frac{f-q}{f^2}=\frac{1}{f}-\frac{q}{f^2}\cdot \frac{\lambda (\pi w^{\prime })^2}{w_o^2\lambda f^2}\cdot w^{\prime }=\frac{\lambda f}{w_o\lambda }\cdot \frac{500\times 10^{-6}}{mm}\cdot 100\cdot \frac{mm}{\pi }\cdot 5\cdot mm=6.36\lambda =3.18\mu m$$

You can't use 'macro parameter character #' in math mode

$$M = \text{\Biggr}[\begin{matrix} 1 & f_2 \\ 0 & 1 \end{matrix} \text{\Biggl}] \text{\Biggr}[\begin{matrix} 1 & 0 & -1/f_2 \\ 0 & 1 & f_2 \end{matrix} \text{\Biggl}] \text{\Biggr}[\begin{matrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{matrix} \text{\Biggl}]$$

$$\Biggr[\begin{matrix} 1 & f_1 \\ 0 & 1 \end{matrix} \Biggr] \Biggr[\begin{matrix} 1 & 0 \\ -1/f_1 & 1 \end{matrix} \Biggr] =$$

```
\Biggr[ \begin{matrix} -f_2/f_1 & 0 \\ 0 & -f_1/f_2 \end{matrix} \Biggl]
```

$$2.\$q' = \frac{Aq + B}{Cq + D} = 9q = 9j\pi w_o^2/\lambda\$3. Pour obtenir la dimension physique et le rayon de courbure, on doit utiliser la définition \$\frac{1}{q'} \equiv \frac{1}{R'} - j\frac{\lambda}{\pi w_o^2}\$, on obtient donc : (76)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{q^{\prime}} &= -\frac{\lambda(9j\pi w_o^2)}{\frac{1}{R^{\prime}} - j\frac{\lambda(\pi w^{\prime} 2)}{\pi w_o^2}} \\ &= -\frac{\lambda(9j\pi w_o^2)}{\lambda(\pi w^{\prime} 2)} = \frac{\lambda(9\pi w_o^2)}{w^{\prime}} = 3w_o \end{aligned}$$

You can't use 'macro parameter character #' in math mode

$$q = \frac{Aq + B}{Cq + D},$$

ou encore

(77)

$$Cq^2 + (D-A)a - B = 0$$

donclassolutionsera :

(78)

$$\text{\label{eq:sol}} q = \frac{A - D \pm \sqrt{(D-A)^2 + 4BC}}{2C}$$

You can't use 'macro parameter character #' in math mode

M_p =

```
\Biggr[ \begin{matrix} 1 & d_o \\ 0 & 1 \end{matrix} \Biggl]
```

```

\Biggr[ \begin{matrix} 1 & 0 \\ 0 & n \end{matrix} \Biggl]
\Biggr[ \begin{matrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{matrix} \Biggl]
\Biggr[ \begin{matrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{n} \end{matrix} \Biggl]
\Biggr[ \begin{matrix} 1 & d_o \\ 0 & 1 \end{matrix} \Biggl] \cdot M_p =
\Biggr[ \begin{matrix} 1 & 2 d_o + L/n \\ 0 & 1 \end{matrix} \Biggl]
\equiv \Biggr[ \begin{matrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{matrix} \Biggl]

```

qu'on simplifie en posant \$d \equiv 2d_o + L/n = 37.5\$ cm. Ainsi, la matrice c'est un aller-retour reste simple : (79)

```

M_\text{ar} =
\Biggr[ \begin{matrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{matrix} \Biggl]
\Biggr[ \begin{matrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R} & 1 \end{matrix} \Biggl]
\Biggr[ \begin{matrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{matrix} \Biggl] \cdot M_\text{ar} =
\Biggr[ \begin{matrix} 1 & -\frac{2d}{R} \\ 2d - \frac{2d^2}{R} & 1 - \frac{2d}{R} \end{matrix} \Biggl]

```

You can't use 'macro parameter character #' in math mode

$$q = \pm \sqrt{\frac{4BC}{2C}} \quad q = \pm \sqrt{\frac{4(2d - \frac{2d^2}{R})(-2/R)}{2(-2/R)}} \quad q = \pm \sqrt{\frac{-16d(R(1-\frac{d}{R})}{4R}} \quad q = \pm \sqrt{\frac{-16d(R(1-\frac{d}{R}))}{4R}} \quad q = \pm j \sqrt{Rd(1-\frac{d}{R})} \quad q = \pm j \sqrt{40 \cdot 37.5 (1-\frac{37.5}{40})} \text{ cm} = j 9.68 \text{ cm}$$

You can't use 'macro parameter character #' in math mode

$$F_{\text{em}} = \frac{\eta \Delta P}{\frac{hc}{\lambda} / \text{photon}} = 8 \times 10^9 \text{ photon} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$

5. Impulsions brèves

Les problèmes de cette section concernent les impulsions brèves, la dispersion, la puissance au pic, les taux de répétition, les largeurs de spectre.

Question

Vous avez un laser Ti:Saphire qui émet un faisceau sur 2 mm^2 des impulsions de 150 femtosecondes (*transform-limited*) à toutes les 12 nanosecondes. La lumière émise est centrée à 800 nm et il y a 10 mW de puissance moyenne c'est à dire que si on fait la moyenne de la puissance en 150 femtosecondes de lumière et 12 nanosecondes de "vide", on obtient 10 mW.

1. Calculez la puissance au pic des impulsions (en kW).
2. Quelle est la largeur spectrale du faisceau ? (en nanomètres). Utilisez les notes de cours.
3. Quel est l'irradiance au pic de l'impulsion en MW/cm² ?
4. Quel est l'irradiance spectrale en MW/nm/cm² ?
5. Qu'arrivera-t-il à la durée des impulsions si elles voyagent dans 3 cm de verre BK7 ? Trouvez le coefficient de dispersion dans le verre BK7 sur le web. Utilisez le tableau en annexe pour convertir les coefficients, ou pour les calculer.
6. Calculez le produit $\Delta t \Delta f$ avant le bloc de verre et après le bloc de verre
7. Vous utilisez un puissance-mètre pour mesurer la puissance avant et après le verre. Que mesurez-vous? Discutez (brièvement, bien sûr).

Résumé

	Définition	(ω)	(λ)
vitesse de phase	$\frac{\omega}{k} = \frac{c}{n}$	$\frac{\omega}{k} = \frac{c}{n}$	
vitesse de groupe	$\frac{dk}{d\omega} = \left(\frac{1}{v_g} \right)$	$\frac{dk}{d\omega} = \left(\frac{1}{v_g} \right)$	$v_g = \frac{c}{n - \lambda_c \frac{dn}{d\lambda_c}}$
dispersion de vitesse de groupe (GVD)	$\frac{d^2k}{d\omega^2} = \frac{d}{d\omega} \left(\frac{1}{v_g} \right)$	$D_\omega = \frac{\lambda_o^3}{2\pi c^2} \frac{d^2n}{d\lambda_o^2}$ [s ² /m]	$D_\lambda = -\frac{\lambda_o}{c} \frac{d^2n}{d\lambda_o^2}$ [s/m ²]
delai de dispersion de groupe (GDD)		$\Delta t = D_\omega \Delta \omega \Delta z$	$\Delta t = D_\lambda \Delta \lambda \Delta z$

Réponse

Question

Vous avez un laser Ti:Sapphire qui émet un faisceau sur 2 mm² des impulsions de 30 femtosecondes (*transform-limited*) à toutes les 12 nanosecondes. La lumière émise est centrée à 800 nm et il y a 10 mW de puissance moyenne c'est à dire que si on fait la moyenne de la puissance en 150 femtosecondes de lumière et 12 nanosecondes de "vide", on obtient 10 mW.

1. Calculez la puissance au pic des impulsions (en kW).
2. Quelle est la largeur spectrale du faisceau ? (en nanomètres). Utilisez les notes de cours.
3. Quel est l'irradiance au pic de l'impulsion en MW/cm² ?
4. Quel est l'irradiance spectrale en MW/nm/cm² ?
5. Qu'arrivera-t-il à la durée des impulsions si elles voyagent dans 3 cm de verre BK7 ? Trouvez le coefficient de dispersion dans le verre BK7 sur le web. Utilisez le tableau en annexe pour convertir

les coefficients, ou pour les calculer.

6. Calculez le produit $\Delta t \Delta f$ avant le bloc de verre et après le bloc de verre
7. Vous utilisez un puissance-mètre pour mesurer la puissance avant et après le verre. Que mesurez-vous? Discutez (brièvement, bien sûr).

Résumé

	Définition	(ω)	(λ)
vitesse de phase	$\frac{\omega}{k} = \frac{c}{n}$	$\frac{\omega}{k} = \frac{c}{n}$	
vitesse de groupe	$\frac{dk}{d\omega} \equiv \left(\frac{1}{v_g} \right)$	$\frac{dk}{d\omega} \equiv \left(\frac{1}{v_g} \right)$	$v_g = \frac{c}{n - \lambda_o \frac{dn}{d\lambda_o}}$
dispersion de vitesse de groupe (GVD)	$\frac{d^2 k}{d\omega^2} = \frac{d}{d\omega} \left(\frac{1}{v_g} \right)$	$D_{\omega} = \frac{\lambda_o^3}{2\pi c^2} \frac{d^2 n}{d\lambda_o^2} [\text{s}^2/\text{m}]$	$D_{\lambda} = -\frac{\lambda_o}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda_o^2} [\text{s}/\text{m}^2]$
delai de dispersion de groupe (GDD)		$\Delta t = D_{\omega} \Delta \omega \Delta z$	$\Delta t = D_{\lambda} \Delta \lambda \Delta z$

Réponse

Question

En supposant que seule la dispersion du verre de silice compte dans une fibre optique, calculez la dispersion d'impulsions de 150 femtosecondes à 800 nm dans 10 cm de fibre optique et dans 2 mètres de fibre optique.

Réponse

Question

En supposant que seule la dispersion du verre de silice compte dans une fibre optique:

1. Calculez la dispersion d'impulsions de 150 femtoseconde à 800 nm dans 10 cm de fibre optique et dans 2 mètres de fibre optique.
2. Discutez l'importance pour l'endoscopie multiphoton.

Réponse

