LP00 – Titre

29 juin 2020

Laura Guislain & Pascal Wang

Niveau :

Commentaires du jury

Bibliographie

✎ *Le nom du livre, l'auteur*¹

→ Expliciter si besoin l'intérêt du livre dans la leçon et pour quelles parties il est utile.

Prérequis

➤ prérequis

Expériences

☞ Biréfringence du quartz

Table des matières

1	De Huygens-Fresnel à Fraunhofer	3
1.1	Principe de Huygens-Fresnel	3
1.2	Diffraction de Fraunhofer	4
1.3	Réalisation pratique de la diffraction de Fraunhofer	5
2	Etude de la figure de diffraction	5
2.1	Cas d'une fente	5
2.2	Propriétés de la figure de diffraction de Fraunhofer	5
2.3	Résolution optique et critère de Rayleigh	6
3	Optique de Fourier - Application à l'observation d'un objet de phase	7
3.1	Principe de l'optique de Fourier	7
3.2	Strioscopie (optionnel)	8
3.3	L'imagerie par contraste de phase	8

Jury

Les conditions de Fraunhofer et leurs conséquences doivent être présentées, ainsi que le lien entre les dimensions caractéristiques d'un objet diffractant et celles de sa figure de diffraction. Il faut expliquer pourquoi la diffraction de Fraunhofer est pertinente dans la formation des images.

Préparation

Préparation : Dessiner le schéma de l'expérience introductive au tableau. Demander une flexcam.

Passage : faire sortir la physique des considérations de TF

Manips : la diffraction par une fente et l'expérience d'Abbe.

Questions : diffraction structure périodique, montage 4f (cf. slide bonus), interprétation diffraction avec Heisenberg, diffraction de Fresnel (cf. ma fiche), se souvenir que les préfacteurs se retrouvent avec la th. de Kirchoff (équ. de Maxwell, puis Helmholtz, puis fct Green)

Introduction

L'objet central de l'optique géométrique est le rayon lumineux. Pour en créer, il semble logique de faire passer un faisceau lumineux dans un trou, et de réduire progressivement sa taille jusqu'à n'avoir plus qu'un point source.

Diffraction par une fente

Matériel : fente réglable, laser, écran.

Présentation Si on est chaud, on peut le faire avec le pointeur laser et un trou dans le papier. Un faisceau laser crée une tache brillante sur un écran. Si on réduit la taille du diaphragme pour tenter d'isoler un rayon lumineux, on voit apparaître la diffraction : <https://www.youtube.com/watch?v=Ty5A4QVdWtE>. Quand le diaphragme est grand ouvert, le rayon laser se propage bien droit, comme le prévoit l'optique géométrique. Il faut garder en tête que le laser a une structure gaussienne et en particulier une extension non nulle. La propagation diffère complètement de ce que prévoit l'optique géométrique. On ne voit plus une ligne droite mais une figure de diffraction avec des minima et maxima d'intensité. Cette figure ne peut être expliquée par l'optique géométrique. En effet, dans l'expérience, on se place hors du cadre de l'optique géométrique :

L'optique géométrique est mise en défaut lorsque la longueur d'onde n'est pas négligeable devant la taille caractéristique de l'obstacle ou plus généralement, de variation du milieu.

En astronomie, pourquoi dit-on que la diffraction pose un problème pour l'observation depuis la Terre ? Les turbulences atmosphériques induisent des variations d'indice optique brutales qui causent de la diffraction.

Approche pour la diffraction Quelle théorie utiliser pour décrire de tels phénomènes ? On pourrait penser à revenir à l'électromagnétisme, dont l'optique géométrique découle. Pour calculer la façon dont l'onde interagit avec l'objet diffractant, il faudrait résoudre les équations de Maxwell avec les conditions limites liées à l'obstacle. Pour le cas d'un objet métallique, il faut calculer les courants de surfaces, résultat du couplage onde-matière. C'est généralement compliqué.

A la place, on prend une approche intermédiaire utilisant le modèle scalaire de la lumière et le principe de Huygens-Fresnel.

Objectif L'objectif de cette leçon est donc de présenter le principe de Huyghens-Fresnel, l'appliquer pour comprendre les phénomènes de diffraction, qui se manifestent lorsque $\lambda \sim a$ et voir des applications pour le filtrage spatial.

1 De Huygens-Fresnel à Fraunhofer

1.1 Principe de Huygens-Fresnel

Cadre : modèle scalaire et onde monochromatique Le but est d'énoncer le principe de Huygens-Fresnel. On considère une onde arrivant sur un diaphragme. [Montrer un schéma](#). On considère un modèle scalaire de la lumière, sans effet de polarisation et une onde monochromatique $\omega = ck$

Principe de Huygens-Fresnel : Chaque point M d'une surface atteinte par la lumière se comporte comme une source secondaire émettant une onde sphérique d'amplitude proportionnelle à celle de l'onde incidente en M. Les ondes des issues des différentes sources sont cohérentes et interfèrent entre elles. [Illustrer sur un schéma](#) ou [projeter le principe au tableau](#) et [l'illustrer sur un schéma en live](#), encore mieux : [montrer cette vidéo](#) : <https://youtu.be/mA78qiedmqM?t=666>

Principe de Huyghens-Fresnel animé, retour sur la fente introductive

Présentation Montrer cette vidéo : <https://youtu.be/mA78qiedmqM?t=666> où on retrouve la propagation d'une onde plane et on interprète le rôle de la taille de l'ouverture a comparée à la longueur d'onde λ : si $a \gg \lambda$ le front d'onde est peu perturbé : l'onde reste assez plane. Si $a \ll \lambda$, le front d'onde se rapproche de l'onde sphérique. Entre les deux, c'est un cas intermédiaire avec possibilité de zones sombres.

Interprétation

Le phénomène de diffraction peut donc être interprété comme un phénomène d'interférences avec un nombre continu de sources.

En réalité, il n'y a pas de source secondaire, c'est un résultat mathématique qui dit que c'est comme s'il y avait des sources secondaires.

Contribution de Huyghens et Fresnel Le principe tient son nom de Huygens qui a introduit en 1690 la notion de sources secondaires qui émettent des ondes sphériques. Cependant, ce n'était pas assez pour effectuer des prédictions quantitatives, comme calculer la figure de diffraction. Fresnel a ensuite rajouté la notion d'amplitude, phase et surtout d'interférences, qui a permis d'arriver à la formulation mathématique suivante.

Formulation mathématique On se place en approximation scalaire de la lumière, valable tant qu'on ignore les phénomènes de polarisation. Un point source S émet une onde monochromatique et éclaire un objet diffractant de transparence t , qui est définie par [donner l'expression](#). C'est une fonction de transfert. 🚫 **On passe sous silence le facteur $1/i\lambda$ et on rentre les cosinus du facteur d'inclinaison dans une fonction inconnue.**

- si $t(x, y) = 0$, le diaphragme est opaque en x, y
- si $t(x, y) = 1$, le diaphragme est transparent en x, y
- si $|t(x, y)| < 1$ le diaphragme est partiellement transparent en
- x, y si $t(x, y)$ est complexe, le diaphragme déphase l'onde incidente (fine plaque de verre..)

L'amplitude en M est alors, dans le modèle scalaire de la lumière : [donner l'expression et le schéma](#).

Interprétation Grâce à cette intégrale, connaître l'état de l'onde sur toute la surface S permet de connaître son état en n'importe quel point intérieur à la surface. On identifie l'onde sphérique qui est en réalité (prohibant la diffraction vers l'arrière), ainsi qu'un préfacteur qui donne un déphasage de $-\pi/2$. Si on connaît le champ dans un plan, on peut le déterminer dans un autre plan situé à la distance $D \ll \lambda$. Le champ en M est la somme d'une infinité de champs élémentaires émis par les points P du plan de départ. Ces champs élémentaires sont des ondelettes sphériques d'amplitudes complexes initiales proportionnelles à celles du champ en P .

Correction du principe de Huyghens-Fresnel Il faudrait préciser dans le principe *Tout se passe comme si chaque point de la surface se comporte comme une source émettant une distribution angulaire donnée par le facteur d'inclinaison, dont l'amplitude est proportionnelle à celle de l'onde incidente et de phase décalée de $\pi/2$ par rapport à l'onde originale.*

Bonus : théorie de Kirchhoff La formule intégrale, faisant intervenir le facteur d'inclinaison et le déphasage de $\pi/2$ se démontre de façon rigoureuse, à l'aide de la théorie de Kirchhoff. La théorie de Kirchhoff s'applique à toute onde scalaire vérifiant une équation de Helmholtz, par exemple du onde monochromatique qui vérifie l'équation de d'Alembert, qui découle des équations de Maxwell, mais aussi d'autres types d'onde.

1.2 Diffraction de Fraunhofer

Premières approximations : source et écran lointains Lorsque les angles mis en jeu sont petits, on peut simplifier l'expression de l'intensité, ce qui est nécessaire pour rendre les calculs plus faciles. [Donner le cadre : source et écran lointains](#).

Conséquences de l'approximation C'est sur [fiche](#), on arrive à la TF, sinon le poly de C. Cabart donne des [estimations numériques de chaque terme](#).

Analyse de l'expression On voit donc que la figure de diffraction de Fraunhofer est la transformée de Fourier de la transparence.

Rappel des hypothèses On rappelle les hypothèses :

- petits angles/grandes distances
- rayonnement monochromatique
- modèle scalaire de la lumière
- terme quadratique négligeable. [On va préciser dans quel cas dans la prochaine sous-partie](#)

1.3 Réalisation pratique de la diffraction de Fraunhofer

On distingue trois cas d'observation de la figure de diffraction de Fraunhofer :

- Diffraction d'une onde plane ($1/D = 0$) et observation à l'infini ($1/d = 0$) ou dans le foyer image d'une lentille. On montre un schéma [manip?] On a une relation de transformée de Fourier entre la transparence t et le profil d'intensité diffracté dans le cadre de la diffraction de Fraunhofer. On appelle plan de Fourier le plan où l'on observe cette figure de diffraction.

Dans le montage de Fraunhofer rigoureux, le rôle de la dernière lentille est justement de faire correspondre à tout point du plan de Fourier une direction du vecteur d'onde, c'est-à-dire à une « fréquence spatiale »

- Diffraction d'une onde plane à grande distance. ($1/d = 0, 1/D \approx 0$). Pour quantifier, il faut comparer le terme quadratique à la longueur d'onde. Il est négligeable lorsque le nombre de Fresnel $N_F = a^2/\lambda d$ est petit. Cette condition est en pratique peu restrictive **ODG**: Pour un objet de taille $a = 50 \mu\text{m}$, éclairé par une lumière de longueur d'onde $\lambda = 500 \text{ nm}$, il suffit de placer l'écran à $d \gg 2.5 \text{ mm}$ pour que la condition soit vérifiée. C'est ce qui était fait en introduction. Pour un éclairage laser, dans le nombre de Fresnel, ce sont plutôt les distances aux centres de courbure du faisceau qui interviennent.
- Diffraction au voisinage de l'image géométrique de la source $1/d + 1/D = 0$, ce qui veut dire que $d = -D$ i.e. que la source est située sur l'écran. Au lieu d'avoir une onde sphérique qui diverge à partir de S , on a une onde sphérique qui converge en S . On montre un schéma. C'est ce qui se passe lorsqu'on fait l'image géométrique d'un objet ponctuel avec une lentille. C'est le fait que la diffraction de Fraunhofer corresponde à cette situation qui la rend si importante en pratique! (cf. Sextant p139).

La diffraction de Fresnel correspond à la situation où les termes quadratiques (en r^2) ne sont plus négligeables, tout en omettant les ordres suivants du développement.

2 Etude de la figure de diffraction

2.1 Cas d'une fente

Figure de diffraction d'une fente

On éclaire une fente avec une onde plane tel approximativement un laser pour adopter le modèle en "cylindre", avec surface d'ondes planes, il faut se trouver à moins de $z_R = \pi\omega_0^2/\lambda$ la longueur de Rayleigh, sinon le faisceau ressemble à un "cône", et les surfaces d'ondes sont courbées. Pour un He-Ne, $z_R \sim 1.8\text{m}$ <https://youtu.be/mA78qiedmqM?t=406> Quand la fente rétrécit, la tache centrale s'agrandit. On illustre aussi la dépendance en longueur d'onde.

Calcul de la figure de diffraction On calcule la figure de diffraction associée. Le calcul est sur fiche. Sinon, comme on a fait un calcul avant, on peut reconnaître l'intégrale qui intervient lorsqu'on s'intéresse à la cohérence spatiale pour les fentes de Young : on attend donc un sinus cardinal! On montre un plot python à comparer avec la manip.

Lien avec la formule du lycée On retrouve la relation $\theta = \lambda/a$ donnée au lycée.

Réciprocité des échelles On met en évidence la réciprocité des échelles : une fente étroite dans une dimension donne une figure de diffraction élargie et inversement. On va en dire plus.

↓ Cette propriété de réciprocité est caractéristique de la transformée de Fourier. On va donc généraliser cette observation et exploiter les autres propriétés de la transformée de Fourier.

2.2 Propriétés de la figure de diffraction de Fraunhofer

La figure de diffraction de Fraunhofer d'un objet diffractant éclairé par une onde plane est la transformée de Fourier de la transparence.

On peut donc utiliser les propriétés connues sur les transformées de Fourier pour en déduire des propriétés sur la figure de diffraction. On projette ces propriétés sur diaporama

Translation-modulation La translation de l'objet introduit donc un terme de phase dans la transformée de Fourier, donc celui-ci disparaîtra quand on regardera l'intensité. Une caractéristique importante de la figure de diffraction de Fraunhofer est qu'elle n'est pas modifiée par translation de l'objet. En pratique, on peut utiliser ce critère en TP pour savoir si on est bien dans le régime de Fraunhofer. *A l'inverse, si on éclaire en incidence non normale ? C'est comme si la transparence était modulée par un cosinus : la figure de diffraction est translatée.*

Changement d'échelle/similitude Augmenter la taille de l'objet va donc diminuer les fréquences spatiales. On comprend également pourquoi, lorsque l'objet est trop grand, on n'observe plus de diffraction, puisque les fréquences se rapprochent trop de la tache centrale. **On revient sur la diffraction par une fente**

Théorème de Babinet La figure de diffraction d'un objet est la même que celle de son objet complémentaire (transparence 1-t) au terme de fréquences spatiales nulles (au centre) près. Illustration : <https://youtu.be/mA78qiedmqM?t=497>. On peut remonter à la taille d'un cheveux.

Produit de convolution Avec cette propriété on peut facilement prévoir la figure de diffraction de motifs répétés (LP. diffraction par structures périodiques). **On peut interpréter les bifentes de Young par la convolution de la fente par deux diracs symétriques, dont la TF est un cosinus. On peut raisonner par analogie sur les spectres en électronique. Le DL des fentes de Young revenait à se placer dans le régime de Fraunhofer : <https://youtu.be/9D8cPrEAGyc?t=108>**

2.3 Résolution optique et critère de Rayleigh

Limite de diffraction Dans tout appareil optique (microscope, lunette astronomique, télescope, ...), il y a une ouverture de taille finie, que l'on va modéliser par une diaphragme d'ouverture, qui peut par exemple être la monture d'une lentille de microscope.

Tache d'Airy Une lentille d'ouverture circulaire forme à partir d'un objet ponctuel une tâche d'Airy. **On montre la forme** La tâche d'Airy étant représentée mathématiquement par une fonction de Bessel, la taille angulaire de la tâche d'Airy correspond au premier zéro de la fonction de Bessel. **On donne l'expression.** C'est comme la fente diffractante, sauf qu'il y a un préfacteur 1.22 dû à la géométrie circulaire.

Illustration du critère de Rayleigh

Belle vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=mA78qiedmqM>, sinon, le script de Johany est top.

Critère de Rayleigh On peut alors définir un critère de résolution généralisable sous le nom de critère de Rayleigh : deux pics sont séparables sur l'écran si la distance entre leur maxima est plus grande que le rayon de la tâche d'Airy.

Obsolète : séparation d'une fente double

: Matériel : Fente double, fente réglable, lampe QI, laser (vert de préférence), lentille de projection Faire l'image des fentes doubles sur l'écran. Placer la fente réglable avant la lentille de projection. La fermer petit à petit jusqu'à ce que l'on ne puisse plus distinguer les deux fentes. Mesurer la largeur de la fente réglable à l'aide de la figure de diffraction obtenue lorsque l'on fait passer le laser à travers celle-ci. Comparer au critère de Rayleigh. Version plus quantitative : avec une barette CCD

Conséquence : course aux grands diamètres Ce phénomène est notamment à l'oeuvre en astronomie, et fait qu'on ne peut pas toujours séparer les étoiles binaires. C'est aussi pour ça qu'on a construit des télescopes avec des GROS miroirs (par exemple le radiotélescope d'Arecibo et ses 305 m de diamètre, ou ALMA qui peut atteindre un diamètre équivalent de 16 km).

Application : microscopie La limite de résolution en microscopie optique est de $0.5 \mu\text{m}$, les grossissements sont limités à 2000. En microscopie électronique, la longueur d'onde est de 0.1nm pour des électrons d'énergie 150 keV, ce qui permet d'atteindre des grossissements de 5 million ! **Montre des photos.**

Application : DVD vs Blu-ray Le blue ray utilise un laser bleu, de longueur d'onde 430 à 450 nm donc deux fois plus courte que pour un DVD (625 à 740 nm). On peut donc stocker 4 fois plus de données sur un blu-ray : 25 Go contre 4.7 Go.

On a vu comme un objet influe sa figure de diffraction. Inversement, en agissant sur le plan de Fourier, on peut agir sur l'image finale, c'est le principe de l'optique de Fourier

3 Optique de Fourier - Application à l'observation d'un objet de phase

3.1 Principe de l'optique de Fourier

Expérience d'Abbe On présente le schéma Soit un objet éclairé par une onde plane en incidence normale. On fait l'image de cet objet dans un plan noté P_i avec une lentille. Dans le plan focal de cette lentille, *i.e.* le plan de Fourier PF on observe la figure de diffraction de Fraunhofer de l'objet, *i.e.* la transformée de Fourier de sa fonction de transparence.

Expérience d'Abbe

Super vidéo : <https://youtu.be/gPCVm3ALiJM?t=17>. L'objet est une grille, le filtre est une fente. On peut filtrer les hautes fréquences horizontalement ou verticalement.

Interprétation avec la TF De plus, la figure observée dans le plan P_i elle-même la transformée de Fourier de la figure de diffraction observée dans le plan de Fourier, au degré d'approximation correspondant au cas de la diffraction au voisinage de l'image géométrique de la source. Ici, la "source" est étendue : c'est l'objet et ce qui joue le rôle d'objet diffractant est le plan de Fourier. [Commenter sur le schéma](#). Alternativement, la lentille crée une source fictive dans le plan image.

Filtrage spatial Si l'on introduit dans le plan de Fourier un nouvel objet de transmittance bien choisie, on manipule la transformée de Fourier de l'image observée dans le plan P_i et on manipule donc l'image elle-même. On peut ainsi, par exemple, filtrer certaines fréquences spatiales de l'objet pour n'en conserver que d'autres.

Si un objet a des fréquences spatiales faibles (variations de $t(X, Y)$ lentes), sa tache de diffraction est petite, au centre de l'écran. Inversement, la tache de diffraction présente des composantes éloignées du centre de la figure si l'objet présente des variations spatiales rapides. On peut donc "filtrer" les variations lentes de $t(X, Y)$ dans l'écran d'observation en bloquant une zone centrale du plan de Fourier avec un écran opaque.

Expérience d'Abbe

Matériel : grille, points, trous, fentes réglables, diapositive tramée, empreinte digitale, plume, etc ..., lampe QI, lentilles ($f=1m$, puis de 50 à 300mm selon PB ou PH). Faire du filtrage optique comme on peut, tenter le coup de l'offrande à Quetzalcoatl avant pour augmenter ses chances de réussite ...

Bonus : épurateur de faisceau Un élargissement de faisceau (beam expander) est un système afocal constitué de deux lentilles convergentes (on le dit alors képlerien ; on peut prendre un élargisseur de faisceau galiléen qui utilise une lentille divergente en entrée, ce qui permet un appareil plus compact et évite de focaliser le faisceau en un point, d'y chauffer l'air et donc d'y risquer une déformation du front d'onde due à la variation d'indice) de focales f_1 et f_2 , qui agrandit le faisceau d'un rapport f_2/f_1 . Il est réalisé en confondant le foyer objet de la lentille de sortie avec le foyer image de la lentille d'entrée.

Un épurateur de faisceau est un élargisseur de faisceau auquel on a ajouté un filtre spatial dans le plan commun au foyer objet de la lentille de sortie et au foyer image de la lentille d'entrée : ce filtre est un trou micrométrique qui ne laisse passer que les basses fréquences spatiales (dans le cas d'un laser, on fait en sorte de ne laisser passer que le mode 0).

Les élargisseurs et épurateurs de faisceau sont principalement utilisés avec des faisceaux laser, par exemple pour en réduire la tavelure (speckle). En pratique, les faisceaux laser sont légèrement divergents : le rôle des élargisseurs est aussi de réduire autant que possible cette divergence. Quand les lentilles sont disposées idéalement, la divergence du faisceau diminue quand sa taille augmente (avec le rapport inverse). Il est aussi possible de modifier légèrement la position de la lentille de sortie pour diminuer encore la divergence du faisceau.

Le fonctionnement d'un épurateur de faisceau nécessite un très bon alignement du trou micrométrique avec le faisceau. Ce trou peut donc être translaté précisément par vis de réglage. Cet alignement constitue la principale difficulté

de réglage d'un épurateur car il faut regarder vers la sortie du trou pour voir quand on approche le laser, tout en restant dans les conditions optimales de sécurité.

Pour réaliser un épurateur de faisceau, on a besoin de : - un objectif de microscope - Une lentille CV - Un trou micrométrique translatable • Un compromis entre la taille du dispositif et son grandissement doit être trouvé. L'élément limitant est la focale de l'objectif du microscope (qui doit être aussi petite que possible). Par exemple, avec un objectif de microscope de focale 18,2 mm et une lentille de sortie de focale 20 cm, on obtient un grandissement du faisceau de l'ordre de 10, et sa divergence est divisée par le même facteur.

Objets de phase Les objets caractérisés par des variations d'indice ou d'épaisseur sont appelés «objets de phase». Ces objets, parfaitement transparents, ne présentent pas de contraste avec le champ qui les entoure, c'est-à-dire qu'ils sont invisibles par les méthodes d'imagerie ordinaires, car ils sont caractérisés seulement par des variations du chemin optique et non par des variations d'amplitude ($|t(X, Y)| = 1$). Sans rien faire, l'éclairement est donc uniforme sur l'écran d'observation.

3.2 Strioscopie (optionnel)

Strioscopie/imagerie Schlieren

On montre cette vidéo : <https://youtu.be/pIf5MQBLZS0?t=72> pour le montage. Dans la vidéo : A point source of light is reflected from a concave mirror and focused onto the edge of a razor blade, which is mounted in front of the camera. Une lame de rasoir est placée devant l'objectif, pile à l'endroit à l'endroit de l'image conjuguée de la source. Les basses fréquences sont filtrées.

On se place dans le cadre de la diffraction de Fraunhofer. Sans écran dans le plan de Fourier, la vibration lumineuse sur l'écran d'observation est

$$s = s_0 e^{i\phi} \quad (1)$$

où ϕ est la phase introduite par l'objet de phase au point considéré. On peut toujours décomposer la vibration lumineuse selon

$$s = s_0(e^{i\phi} - 1) + s_0 \quad (2)$$

où le deuxième terme est l'onde directe est le premier l'onde diffractée. S'il n'y a pas d'objet de phase, l'éclairement est uniforme, sans déphasage, soit une vibration lumineuse $s = s_0$. Si on bloque les très basses fréquences spatiales dans le plan de Fourier, alors on retire s_0 de la vibration lumineuse sur l'écran d'observation (les ondes non diffractées), et on obtient finalement une vibration

$$s = s_0(e^{i\phi} - 1) \quad (3)$$

Si on suppose que la phase ϕ est faible devant 2π , alors $e^{i\phi} - 1 \approx i\phi$, d'où l'expression de l'intensité lumineuse sur l'écran d'observation

$$I = I_0 \phi^2 \quad (4)$$

On observe donc les variations de phase sur un fond noir ($I = 0$ si $\phi = 0$) : le contraste est maximal et toujours égal à 1. L'inconvénient de cette méthode est la faible intensité des images obtenues : si ϕ est petit, ϕ^2 l'est plus encore ! De plus, on n'a accès qu'à la norme de ϕ , et son signe reste inconnu.

3.3 L'imagerie par contraste de phase

(Zernike, PN 1953) est une autre technique permettant de remonter au signe de la phase. Au lieu d'avoir un petit écran opaque au foyer de la lentille, on place une petite lame à retard $\lambda/4$ introduisant un déphasage de $\pi/2$. Si l'on introduit la lame $\lambda/4$, alors les ondes non diffractées accumulent une phase $\pi/2$ supplémentaire et alors

$$s = s_0(e^{i\phi} - 1) - is_0 \approx s_0 i(\phi - 1) \quad (5)$$

en supposant une nouvelle fois que la phase ϕ petite.

Bonus : Anneaux 🍷 En pratique, on utilise des anneaux Pour cela, on crée un faisceau d'illumination en forme de cône avec un diaphragme en anneau derrière le condenseur. 🍷 La lame de retard est alors en forme d'anneau, disposé pour coïncider avec un section transverse du cône. La lumière diffusée, donc déviée hors du cône ne traverse

pas l'anneau à retard donc n'est pas affecté par un déphasage. Pour un schéma clair, voir wikipedia et la vidéo.

Il faut donc travailler avec une onde monochromatique. d'où une intensité

$$I = I_0(1 - 2\phi) \quad (6)$$

car ϕ^2 est négligeable. On peut donc mesurer directement ϕ avec cette méthode. On a ici une image avec un contraste égal à 2ϕ (d'où le nom de la technique). Contrairement à la strioscopie, le contraste donc faible. On peut toutefois augmenter la sensibilité en rendant la lame de phase absorbante. Supposons qu'elle réduise l'intensité de la lumière directe par un facteur β , on a alors

$$I = I_0(1/\sqrt{\beta} - \phi)^2 \approx I_0/\beta(1 - 2\phi\sqrt{\beta}) \quad (7)$$

et donc un contraste $C = 2\phi\sqrt{\beta}$. Le contraste est multiplié par $\sqrt{\beta}$. L'imagerie par contraste de phase est employée en microscopie. Les microscopes à contraste de phase sont utilisés dans les laboratoires de biologie car ils permettent d'étudier les objets vivants sans les colorer et donc sans les tuer.

Intuitivement, on décompose la partie diffusée et la partie éclairage de fond s_0 . La lame à retard déphase la partie diffusée pour que la contribution due à l'éclairage de fond (dans la partie diffusée) interfère destructivement avec l'éclairage de fond s_0 .

Halo autour des détails Les images observées par contraste de phase possèdent un certain halo autour des détails. Ce halo est dû à la diffraction : le second pic de la tache d'Airy est déphasé de π par rapport au pic principal, et au lieu d'interférer destructivement il interférera constructivement, pour former une zone plus claire.

Conclusion

Le message est que la diffraction est bien décrite par le principe de Huygens-Fresnel. Dans les conditions de Fraunhofer, la figure de diffraction est la transformée de Fourier de la transparence. **Ouverture** : Application à l'imagerie à contraste de phase (PN Zernike), à l'étude des cristaux. Sinon, ouvrir sur diffraction structures périodiques (cristallo) ou microscopies (dépasser du critère de rayleigh).

Compléments/Questions

Passage

Plan

Questions

- que se passe-t-il si l'ouverture diffractante est plus petite que la longueur d'onde? connaissez-vous un exemple de la vie de tous les jours où c'est le cas? Microonde. Est-ce que c'est une bonne idée d'introduire la diffraction par l'impossibilité de réaliser un faisceau de lumière infiniment fin, n'y aurait-il pas d'autres possibilités?
- Lien entre polissage des miroirs et diffraction? on voit des taches d'airy.
- Conséquence d'une translation de la fente? Faites une figure.
- Que se passe-t-il en incidence non normale? C'est comme si la transparence était modulée par un cosinus : la figure de diffraction est translatée.
- Comment retrouver la forme de la figure de diffraction par un rectangle sans calcul (et bien sûr sans dire que c'est une TF)?
- Pouvez vous énoncer le principe d'Huygens Fresnel? - Comment savoir si on est en diffraction de Fraunhofer? - Qu'est ce que le nombre de Fresnel? Qu'est ce que la diffraction de Fresnel? Comment l'observer expérimentalement? - Vous avez parlé de microscopie et de diffraction? Comment fait on pour s'affranchir de la diffraction? ODG de la résolution?- Qu'est ce que la microscopie à contraste de phase? Qu'est ce qui joue un rôle parmi les grandeurs présentées? - Pourquoi avoir choisi un laser pour les expériences? - D'où vient la transformée de Fourier?
- Comment expliqueriez vous la cohérence temporelle à un élève? Quels sont les différents montages expérimentaux pour observer la diffraction de Fraunhofer?

- À quoi sert de faire un développement limité au second ordre ? Quelle est la condition sur le nombre de Fresnel pour être en complètement en Fraunhofer ? Peut on démontrer le principe de Huygens-Fresnel ou est ce une formule empirique ? Que se cache-t-il derrière la constante que vous avez noté C ? Quelle est l'unité de la vibration lumineuse ? Expliquez concrètement comment est réalisé le filtrage spatial dans votre expérience ? Comment l'expérience (Duffait p. 109) illustre-t-elle le critère de Rayleigh ? Connaissez vous d'autres domaines où l'on réalise de la diffraction ? Quelles conditions faut-il respecter pour avoir diffraction entre la longueur de l'onde et la taille de l'obstacle ? Dans un cristal, quelle est la taille de l'obstacle ? Quelles sont les ondes utilisées ? Quelles particules fait-on diffracter ? Donnez une condition sur la longueur d'onde de De Bröglie en vous aidant de l'incertitude d'Heisenberg pour avoir diffraction.
- Qu'est ce que le nombre de Fresnel ? Qu'est ce que la diffraction de Fresnel ? Comment l'observer expérimentalement ? - Vous avez parlé de microscopie et de diffraction ? Comment fait on pour s'affranchir de la diffraction ? ODG de la résolution ? - Qu'est ce que la microscopie à contraste de phase ? Qu'est ce qui joue un rôle parmi les grandeurs présentées ? - Pourquoi avoir choisi un laser pour les expériences ? - D'où vient la transformée de Fourier ?
- L^AT_EX corentin pacary
- Savoir justifier l'emploi du modèle scalaire de la lumière avec l'onde dite de Fresnel.
- Citer une application de la contribution/construction de Huygens en optique géométrique ? On retrouve les lois de Snell-Descartes. De la réflexion et réfraction.
- Comment expliquer le changement de direction des ondes diffractées par rapport à celle du faisceau incident ? Revenir à l'électromagnétisme, à l'équation de propagation de Kirchhoff.
- Vous utilisez un faisceau laser comme onde plane, est-ce bien légitime ? Revoir la notion de faisceau gaussien borné spatialement, validité du modèle d'onde cylindrique (plane localement) ou sphérique (avec la divergence du faisceau...) !
- Comment est défini le nombre de Fresnel ? quel est son intérêt ?
- Que se passe-t-il si on observe la figure de diffraction d'un objet comportant un très grand nombre de pupilles/ouvertures identiques réparties régulièrement ou aléatoirement (poudre de lycopode, buée,...) ? Intérêts, applications ?
- Savoir citer quelques applications du filtrage de Fourier (photographie bien sûr, quoique de plus en plus supplanté par le filtrage numérique), épurateur de faisceau laser, visualisation d'écoulements par strioscopie (non linéaire), microscopie/imagerie à contraste de phase (linéaire)...
- Savoir expliquer en détail une application de l'imagerie en contraste de phase !
-

Nombre de Fresnel, avec la source ? $N_F = a^2/\lambda D + a^2/\lambda S$ où S est la distance objet diffractant-source. Donc pour avoir la diffraction de Fraunhofer, il faut $S = -D$ ou $S = D = \infty$.

Diffraction dans d'autres domaines ? Acoustique, ondes de surface, diffraction d'électrons.

Condition pour passer à l'approximation scalaire ?

Epurateur de faisceau : filtre passe bas coupe les défauts, enlève les speckle.

Intérêt de l'approche de Kirchhoff de la diffraction ? Démonstration du principe de Huygens Fresnel basé sur les équations de Maxwell.

Que se passe-t-il si on dilate l'objet diffractant ? La figure d'interférence se rétrécit. Si on la dilate trop, on sort des conditions de Fraunhofer.

Conclusion : ouvrir sur la cristallographie par diffraction par rayon X (forme de l'ADN produit une figure de diffraction particulière), sur la diffraction des électrons.

Pour tester si on est en Fraunhofer, le test est de déplacer l'objet et vérifier que la figure ne se déplace pas.

Limite de résolution des télescopes : pour les gros télescopes, ce n'est pas la diffraction mais la turbulence de l'atmosphère (optique adaptative).

Commentaires