

scienceinfuse

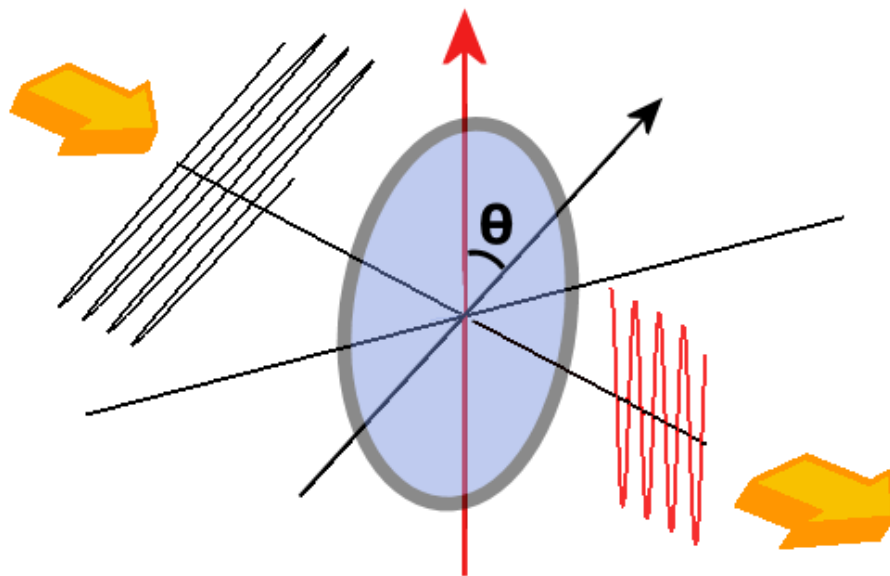
ANTENNE DE FORMATION ET DE PROMOTION DU SECTEUR SCIENCES & TECHNOLOGIES

DOSSIER
ENSEIGNANT



PHYSIQUE

Optique ondulatoire



UCL

Scienceinfuse • Antenne de formation et de promotion du secteur sciences & technologies
rue des Wallons 72 L6.02.01 • 1348 Louvain-la-Neuve

Introduction

Jusqu'au début du XIX^{ème} siècle, deux théories coexistent sur la nature de la lumière.

La première, avancée par Isaac Newton au XVII^{ème} siècle, stipule que la lumière est un ensemble de corpuscules voyageant à très grande vitesse. Newton, qui avait montré que la lumière blanche est composée de toutes les couleurs de l'arc-en-ciel en la décomposant à l'aide d'un prisme, postule que les différentes couleurs sont causées par des particules de lumière de masses différentes.

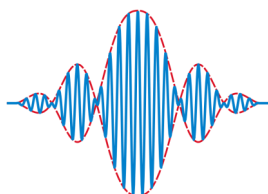
La seconde théorie, avancée par Robert Hooke et Christiaan Huygens à la même époque, suppose que la lumière est une onde, donc une perturbation se propageant dans l'espace.

Jusqu'en 1801, aucune expérience ne permet de trancher entre les deux modèles : toutes les propriétés connues de la lumière peuvent être expliquées aussi bien par le modèle corpusculaire que par le modèle ondulatoire. Cependant, le prestige de Newton est tel—il a écrit les lois de la mécanique classique, étudié la gravitation et l'optique, et produit des avancées significatives en mathématiques—que son modèle corpusculaire est généralement accepté.

Sur un point, néanmoins, les deux modèles sont en désaccord : il s'agit de la comparaison de la vitesse de la lumière dans l'eau à sa vitesse dans l'air. Le modèle corpusculaire prédit que la lumière voyage plus vite dans l'eau que dans l'air, et le modèle ondulatoire, le contraire ! Mais à l'époque, on n'a pas encore pu déterminer ces vitesses. Elles ne le seront qu'au XIX^{ème} siècle.

En 1801, Thomas Young conduit des expériences d'interférences qui prouvent la nature ondulatoire de la lumière. Augustin –Jean Fresnel explique la diffraction également par cette nature ondulatoire. Finalement, vers 1860, James Clerk Maxwell identifie la lumière à une onde électromagnétique.

L'affaire prend un nouveau tournant en 1899 quand Max Planck comprend que les échanges d'énergie entre lumière et matière ne se font que par paquets d'énergie fixée, les quantas. En 1905, Einstein prouve la nature quantique de la lumière en expliquant l'effet photoélectrique : la lumière est un ensemble de particules, les photons, qui ont une énergie liée à leur longueur d'onde. Cette fois, les aspects ondulatoires et corpusculaires de la lumière forment un tout cohérent. On parle de dualité onde-particule (pour la lumière et aussi pour la matière).



Le « paquet d'onde », un bon modèle du photon qui rend compte à la fois de ses natures corpusculaire et ondulatoire.

Dans cet atelier, les élèves découvrent essentiellement le côté ondulatoire de la lumière à travers des expériences de polarisation, interférence et diffraction. En fait, parmi ces expériences, seule la polarisation peut s'expliquer par les deux modèles. Diffraction et interférence sont des phénomènes purement ondulatoires.

Matériel

Les boîtes élèves contiennent chacune le même matériel:

- Un réseau de diffraction de 140 traits/mm
- Un réseau de diffraction de 530 traits/mm
- Deux filtres polarisants
- Une dia avec trois doubles fentes de Young
- Un cache de dia vide
- Une cuve à faces parallèles en plastique
- Un pointeur laser rouge
- Un CD
- Une pince à linge
- Un mètre-ruban

La boîte professeur contient en plus le matériel suivant :

- Du papier collant translucide

Précaution

NE JAMAIS ENVOYER LE FAISCEAU LASER DANS LES YEUX !

La polarisation

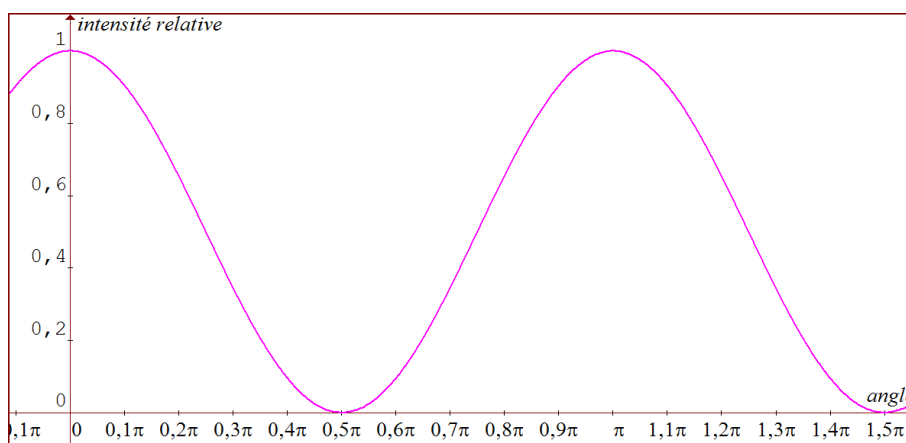
MANIPULATION 1 : SE FAMILIARISER AVEC LE PHENOMENE DE POLARISATION

Les dias comportent une flèche qui est la direction de polarisation, c'est-à-dire la direction d'oscillation du champ électrique après le filtre polarisant. Avant le filtre polarisant, l'oscillation se fait selon toutes les directions perpendiculaires à la direction de propagation de la lumière, pour une lumière naturelle.

Les élèves doivent regarder à travers un filtre polarisant, le faire tourner perpendiculairement à l'axe de visée, puis regarder à travers les deux filtres polarisants en les faisant tourner l'un par rapport à l'autre.

Avec un seul filtre, l'intensité lumineuse est plus faible mais toujours la même quel que soit l'angle de la dia.

Avec deux filtres, l'intensité est maximale quand les deux directions de polarisation sont parallèles ou anti-parallèles, et minimale (presque nulle) quand les deux directions de polarisation sont perpendiculaires entre elles. Entre ces extrêmes, l'intensité varie comme le cosinus au carré de l'angle entre les directions de polarisation. Les élèves devraient réussir à proposer une variation qui y ressemble, donc pas en dents de scie.



Origine de la polarisation : le filtre polarisant est composé de longues chaînes moléculaires orientées dans une seule direction. La lumière excite les électrons le long de ces chaînes, et une nouvelle onde électromagnétique est émise, dont le champ électrique oscille perpendiculairement à l'orientation des longues molécules.

La diffraction

MANIPULATION 1 : LE PHÉNOMÈNE DE DIFFRACTION

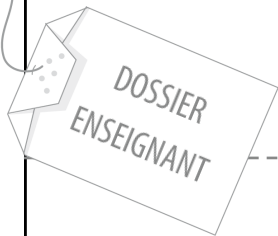
L'un des réseaux a 140 traits/mm, l'autre 530 traits/mm.

A la sortie de chaque réseau, on constate sur un écran (feuille tenue verticalement ou mur de la classe) que le faisceau laser s'est divisé en un ensemble de points lumineux très espacés. Les points sont plus espacés avec le réseau de 530 traits/mm qu'avec celui de 140 traits/mm.

Ces figures de diffraction s'expliquent par l'interférence entre le grand nombre de faisceaux issus des traits : la plupart des interférences sont destructives, très peu sont constructives, ce qui explique l'espacement entre les points lumineux.

La réflexion d'un faisceau laser sur un CD donne aussi une figure de diffraction. L'information sur un CD est effectivement codée sous forme de creux dans une surface plane : le passage de la surface plane à un creux, ou l'inverse, figure le « 1 » binaire; le fait de rester sur la surface plane est considéré comme « 0 ».

Cet ensemble de zones creuses ou non agit comme un réseau de diffraction : les interférences entre la lumière qui se réfléchit dans les creux et celle qui se réfléchit sur la surface plane redonnent des zones d'interférence constructive ou destructive.



MANIPULATION 2 : LE DIAMETRE D'UN CHEVEU

La figure de la diffraction par un cheveu est une large tache centrale encadrée de taches plus étroites.

Voici un exemple de mesure :

Mesure précisément la distance D entre la dia et le mur (au moins 2m) : $D = 2$ m

Sur la figure de diffraction, mesure la largeur d de la tache centrale : $d = 3,7$ cm

La longueur d'onde λ du laser est de 630 nanomètres (630 nm).

Calcule le diamètre a du cheveu grâce à la formule :

$$a = \frac{2\lambda D}{d}$$

Ecris tous les détails de calcul :

$$a = \frac{2.630.10^{-9}.2}{3,7.10^{-2}} = 6,8.10^{-5} \text{ m} = 68 \mu\text{m}$$

Le diamètre d'un cheveu est compris entre 50 et 100 μm .

On peut aussi étudier la forme du cheveu par diffraction, en l'examinant sous des angles différents. La forme du cheveu dépend de la forme du follicule qui le produit : il y a des cheveux ronds, des plats, des lisses, des frisés, des crépus, etc.

MANIPULATION 3 : LA VITESSE DE LA LUMIERE DANS L'AIR ET DANS L'EAU

Lorsque le faisceau laser traverse l'eau, les points sont plus rapprochés que lorsqu'il traverse l'air.

- $2x_{air} = 1,1 \text{ cm}$ et donc $x_{air} = 0,55 \text{ cm}$
- $2x_{eau} = 0,8 \text{ cm}$ et donc $x_{eau} = 0,4 \text{ cm}$

La distance entre le réseau et l'écran translucide (papier collant) vaut $D = 5,9 \text{ cm}$

Le réseau de diffraction comprenant 140 traits/mm, la distance entre deux traits $a = 1/140 \text{ mm}$

Sachant que pour un réseau de diffraction, les raies sont telles que

$$\lambda = \frac{ax}{\sqrt{D^2 + x^2}}$$

- $$\lambda_{air} = \frac{\frac{1}{140} * 10^{-1} * 0,55}{\sqrt{5,9^2 + 0,55^2}}$$
$$= 6,6298 \cdot 10^{-5} \text{ cm}$$
$$= 662,98 \text{ nm}$$

- $$\lambda_{eau} = \frac{\frac{1}{140} * 10^{-1} * 0,4}{\sqrt{5,9^2 + 0,4^2}}$$
$$= 4,8315 \cdot 10^{-5} \text{ cm}$$
$$= 483,15 \text{ nm}$$

- $$\frac{\lambda_{air}}{\lambda_{eau}} = \frac{v_{air}}{v_{eau}} = 1,37$$

Ce résultat est-il en accord avec le modèle corpusculaire ou ondulatoire ? En accord avec le modèle ondulatoire car le rapport des vitesses est > 1 , la lumière va plus vite dans l'air que dans l'eau.

Les interférences

MANIPULATION 1 : LE PHÉNOMÈNE D'INTERFÉRENCE

Plus les fentes sont distantes l'une de l'autre, plus les franges d'interférences (taches lumineuses sur l'écran) sont rapprochées.

MANIPULATION 2 : DETERMINATION DE LA LONGUEUR D'ONDE DU LASER

Fais tenir la dia des fentes de YOUNG avec la pince à linge. Choisis l'une des 3 paires de fentes. Eclaire-la avec le laser. Tu vas déterminer la longueur d'onde de la lumière du laser.

Mesure la distance D entre la dia et le mur (situé à au moins 2m) : $D = 2,90 \text{ m}$

Mesure sur le mur la distance entre deux traits lumineux. (Fais une moyenne pour plus de précision.)

C'est l'interfrange i : $i = 0,61 \text{ cm}$

L'écartement a entre les fentes choisies est indiqué sur la dia. Il est de :

$$a = 0,2 \text{ mm} \text{---} \mathbf{0,3 \text{ mm}} \text{---} 0,5 \text{ mm}$$

La longueur d'onde λ du laser est alors donnée par

$$\lambda = \frac{ia}{D} = \frac{0,61 \cdot 10^{-2} \cdot 0,3 \cdot 10^{-3}}{2,90} = 6,32 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 632 \text{ nm}$$

Le résultat est plausible : la longueur d'onde du rouge se situe entre 620 et 780 nm.