

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	Structure de l'onde diffractée	3
1.1	Transformée de Fourier et diffraction	3
1.2	Structure formée de motifs	4
2	Diffraction par un réseau	4
2.1	Réseau	4
2.2	Amplitude diffractée	4
2.3	Application à la spectroscopie	5
2.4	Analogie avec les transducteurs piézoélectriques	6
3	Diffraction en cristallographie	7
3.1	Sources de rayonnement	7
3.2	Réseau et condition de Von Laue	7
3.3	Analyse d'une figure de diffraction	8

Jury

Jury : La notion de facteur de forme peut être introduite sur un exemple simple. L'influence du nombre d'éléments diffractants doit être discutée. Le jury souhaite que la diffraction d'ondes autres que les ondes électromagnétiques soit envisagée.

Ressources

Diffraction acoustique 1

Diffraction acoustique Itza Echo Clap

Explication

Lien géogebra pour voir la condition de Bragg/ formule des réseau <https://www.geogebra.org/m/jGCbThDQ>

"La couleur des solides" (BUP 785)

"Reconstruction du motif d'un réseau de diffraction" (BUP 882)

Rayons X cohérents <https://www.refletsdelaphysique.fr/articles/refdp/pdf/2013/03/refdp201334-35p60.pdf>

Préparation

Préparation : codes python chez vincent.

Manips : diffraction des électrons et programme python de la base de donnée pour tracer l'éclairement après un réseau.

Plan : Rendre le I/ plus concret en raisonnant sur un exemple, ou introduire les facteurs de forme et structure directement sur le réseau.

Passage : marteler facteur de forme et facteur de structure

Alternative : au lieu de présenter les extinctions, traiter à fond la manip des électrons (cf. leçon caractère ondulatoire de la matière) (après avoir fait la condition de von Laue, on balance la loi de Bragg).

Questions : tout sur la cristallo (cf. ma fiche, Simon), réseaux acoustiques, Réalisation précise d'un émetteur ultrasonore utilisé pour l'échographie (pizéoelectrique, magnétostriction, électrostriction, barrette de transducteurs, gel pour adapter l'impédance), Interprétation géométrique de la relation des réseaux (cas 1D et cas 3D sphère Ewald)

Message

Message :Facteur de forme et de structure. Le phénomène est propre aux ondes en général, et pas à la nature de l'onde

Introduction

Diffraction de Fraunhofer La leçon précédente qui portait sur la diffraction de Fraunhofer a introduit l'importance de la transformée de Fourier dans le traitement des phénomènes de diffraction, en effet sous certaines conditions, l'intensité résultante à la sortie d'une ouverture est sa transformée de Fourier.

TF et périodicité On sait de plus que la Transformée de Fourier est un outil particulièrement adaptée aux signaux périodiques.

Objets périodiques au quotidien On trouve des réseaux au quotidien : les sillons des CD, les pixels de l'écran, les ailes de papillons/paon qui donnent tous des bandes colorées lorsqu'elles sont éclairées par une lumière blanche. La structure cristalline des solides.

Figure de diffraction de structures périodiques

Présentation On montre la vidéo : https://youtu.be/jzmqep_tmkt=61 à différents objets de la vie de tous les jours qui présentent un motif répété correspond des figures de diffraction différentes. En mesurant les caractéristiques de la figure, on peut en déduire des propriétés de l'objet. **A la fin de la vidéo, il y a la diffraction par un réseau 2D qui donne un réseau réciproque!**

Diffraction par un réseau

<https://youtu.be/ieoeY5naNQ4?t=68> Lorsqu'on intercale un réseau, on voit plusieurs taches, qu'on va identifier comme des ordres.

Objectif On veut comprendre la diffraction par des structures périodiques, avec les outils de diffraction de Fraunhofer déjà vus.

En spectroscopie, l'étalon de mesure est le réseau et on caractérise le spectre de la source. En cristallographie : on connaît la longueur d'onde, on veut remonter à la caractérisation du réseau

1 Structure de l'onde diffractée

On peut interlacer cette partie avec le réseau : on présente le réseau, puis on le rend abstrait, on fait le calcul et on applique au réseau.

1.1 Transformée de Fourier et diffraction

Cadre : éclairage monochromatique, motif répété On va s'intéresser à la structure de l'onde diffractée d'un objet contenant un motif répété. Une onde plane incidente de vecteur d'onde $\vec{k}_0 = 2\pi/\lambda\vec{u}$ éclaire une ouverture située dans le plan (Ox,Oy) repérée par les points P(x,y) de fonction de transmission complexe $t(P)$, et on observe l'intensité à l'infini (dans le plan focal image d'une lentille convergente) selon le vecteur d'onde \vec{k} . **On montre un schéma et une photo.** Ici, on suppose le rayonnement parfaitement monochromatique donc cohérent : on ignore les problèmes de cohérence temporelle.

Amplitude dans l'approximation de Fraunhofer L'amplitude résultante est donnée par le principe de Huygens-Fresnel dans l'approximation de Fraunhofer **On donne l'expression.** En pratique, on peut observer cette image au foyer d'une lentille.

1.2 Structure formée de motifs

Factorisation : facteur de structure et facteur de forme Dans le cas d'une structure formée de motifs, on peut faire une factorisation de l'amplitude diffractée, sous la forme d'un facteur de forme lié au motif et d'un facteur de structure lié à la répartition des motifs. [On fait le calcul.](#)

La figure de diffraction obtenue est le produit d'un facteur de structure, qui ne dépend que de la répartition des structures sur l'écran diffractant, et d'un facteur de forme, qui ne dépend que de la forme d'une structure unique.

2 Diffraction par un réseau

2.1 Réseau

Présentation Un réseau plan est constitué de N "traits" semblables parallèles d'épaisseur e distants d'un pas a . [On montre un schéma](#) C'est en quelque sorte l'extension des fentes de Young à N objets diffractants.

Fabrication d'un réseau par transmission Un réseau d'amplitude par transmission s'obtient en gravant des traits à l'aide d'un pointe de diamant sur une lame de verre recouverte d'un dépôt métallique opaque (aluminium). On obtient une alternance de traits transparents ($t=1$) et de bandes opaques ($t=0$). [On trace un graphe avec les notations.](#)

Ordre de grandeur Les réseaux usuels comportent 50 à 600 traits par mm sur une largeur de 5 cm. Les plus performants jusqu'à 5000 traits par mm sur une largeur de 10 cm.

Bonus : réseau par réflexion Un réseau de phase par transmission s'obtient en traçant des traits sur une lame de verre avec un diamant. Les réseaux par réflexion sont gravés sur une surface métallique et induisent une variation périodique du coefficient de réflexion. Les avantages des réseaux par réflexion sont : pas de verre donc utilisables dans l'UV et l'IR où le verre est absorbant et pas de défauts du verre qui entraîne des inhomogénéités d'indice, moins de réflexions parasites et de diffusion; pas de dispersion, système plus compact. Ce sont eux qu'on utilise dans les spectromètres à réseau.

Bonus : réseaux holographiques Les réseaux holographiques sont obtenus par impression de franges d'interférences : on obtient un réseau sinusoidal.

Réseaux au quotidien On trouve des réseaux au quotidien : les sillons des CD, les pixels de l'écran, les ailes de papillons/paon qui donnent tous des bandes colorées lorsqu'elles sont éclairées par une lumière blanche.

2.2 Amplitude diffractée

Diffraction par un réseau

<https://youtu.be/ieoeY5naNQ4?t=68> Lorsqu'on intercale un réseau, on voit plusieurs taches, qu'on va identifier comme des ordres. On va l'expliquer. Dans la vidéo, le réseau utilisé a 140 traits/mm, soit $a = 7.1\mu\text{m}$, une épaisseur $e = 2\mu\text{m}$ et une longueur d'onde 633nm . Cela donne $e/\lambda = 3.1$, $a/\lambda = 11.2$ [Ce sont les valeurs par défaut de geogebra.](#)

Cadre : modèle 1D On suppose que les fentes sont très allongées dans la direction verticale : on se place en géométrie unidimensionnelle.

Facteur de forme, facteur de structure On utilise le formalisme précédent. On calcule le facteur de forme et le facteur de structure. [On fait le calcul](#)

Analyse graphique des paramètres

Analyse de la vidéo [On trace la courbe pour les valeurs de la vidéo, tout est en unités de \$\lambda\$.](#) On observe bien 5 pics principaux comme sur la vidéo! On a trouvé nos taches.

Enveloppe : facteur de forme Le facteur de forme est la figure de diffraction d'une fente simple. Ici, c'est

l'enveloppe.

Oscillations : facteur de structure Le facteur de structure donne les pics d'intensité, qu'on va commenter.

Analyse graphique des paramètres On trace la formule pour différentes valeurs de N , e , a . On regarde l'influence.

Commentaires de la figure de diffraction

- *maxima et interférences constructives, formule des réseaux* La figure de diffraction présente des maxima. **On fait le calcul.** On les interprète comme des interférences constructives : la différence de marche est un multiple de la longueur d'onde. Cela se résume avec la formule des réseaux **que l'on donne.** 🚫 **Garder en tête l'interprétation géométrique, on trace un cercle unite, la direction θ_0 , l'intersection avec le cercle donne une horizontale. On trace les horizontales espacées de λ/a et la formule des réseaux donne que les intersections des horizontales avec le cercle donne les directions des vecteurs de résonance \vec{k} .**
- *dispersion pour les petits angles* Pour des petits angles la dispersion est linéaire en la longueur d'onde, contrairement à un prisme. **On fait le lien avec la vidéo : à grande distance et pour des petits angles, les maxima sont régulièrement espacés.**
- *Cas $N=2$* le facteur de structure est alors en $1 + \cos$, ce sont les fentes de Young !
- *Limite $N \rightarrow \infty$* : on aurait des pics infiniment fins et les petits maxima secondaires disparaissent. **Pour un réseau de TP, c'est le cas : dans le vidéo, on ne voyait que les maxima principaux.**

Tableau récapitulatif Toutes les longueurs caractéristiques du réseau apparaissent sur la figure. **On donne un tableau qui récapitule la dualité entre les caractéristiques du réseau et celles de la figure de diffraction.** Les caractéristiques sont trouvées en considérant la propriété de similitude de la TF : ce qui est grand dans l'espace réel est petit dans l'espace réciproque.

Bonus : prisme, historique Au début de l'utilisation massive des prismes comme instrument de spectrométrie, les matériaux utilisés étaient majoritairement des cristaux naturels comme le quartz cristallin, la fluorine et le cristal de sel et notamment les prismes pour l'infrarouge moyen sont jusque dans les années 1940 taillés dans des cristaux malgré les difficultés pour en trouver d'une pureté suffisante : les réseaux de diffraction étaient alors plus chers encore que les prismes.

Cet avantage financier des prismes sur les réseaux s'atténue après la Seconde Guerre mondiale : des cristaux synthétiques permettent de diminuer le coût de production des prismes mais des méthodes de réplique des réseaux sont découvertes de manière concomitante.

Dans le cas de prismes dispersifs, le matériau est essentiellement conditionné par la bande spectrale d'intérêt et la résolution que peut atteindre le prisme³

↓ Les réseaux permettent donc de séparer les différentes longueurs d'onde, on en voit donc une application directe en spectroscopie, on peut aussi l'utiliser en échographie.

2.3 Application à la spectroscopie

Effet d'un réseau sur une lampe spectrale spectroscopie

<https://www.youtube.com/watch?v=oae5fa-f0S0> Le réseau utilisé est une feuille de plastique imagée avec des lignes.

Explication du pouvoir dispersif Chaque longueur d'onde conduit à sa propre figure d'interférence. **On change λ sur geogebra : les maxima se déplacent.** Comme les maxima ne sont pas au même endroit *i.e.* la condition d'interférences constructives est vérifiée pour des angles différents, le réseau est dispersif.

Pouvoir de résolution On considère, par exemple, que deux pics de diffraction, correspondant à deux longueurs d'onde distinctes, sont distinguables quand le maximum de l'un coïncide avec la première annulation de l'autre : critère de Rayleigh. Après **On fait le calcul**, on aboutit au pouvoir de résolution du réseau. **ODG:** On peut séparer le doublet du sodium $\lambda_1 = 589.0\text{nm}$ et $\lambda_2 = 589.6\text{nm}$ au premier ordre avec un réseau 1000 traits éclairés. *La difficulté est d'avoir*

beaucoup de traits/mm et un faisceau cohérent sur un grand diamètre.

Bonus : lien avec le Fabry-Pérot Un réseau à N fentes, à l'ordre m de diffraction, est l'équivalent d'un Fabry-Pérot de finesse $F = N$, utilisé dans l'ordre d'interférence $p = m$, i.e. de facteur de qualité $Q = mN$.

Bonus : limitation en ordre La résolution monte avec l'ordre. Cependant, c'est dur de monter en ordre à cause de la luminosité. De plus, à une ordre infini, on aurait recouvrement des ordres.

Compromis dispersion-luminosité Le pouvoir de résolution d'un réseau est d'autant plus important que l'ordre de diffraction est élevé, ou que le nombre de figures diffractantes éclairées est important. En spectroscopie, il faut donc augmenter le nombre de fentes éclairées. Le facteur limitant est la fente d'entrée. (???)

Réseaux blazés \blacktriangleleft Lien simulations <http://ressources.univ-lemans.fr/AccessLibre/UM/Pedago/physique/02/optiondu/blaze.html>. $\color{red}{\text{Revoir les calculs si on le présente.}}$ On remarque toutefois, d'après l'expression trouvée pour I , que plus l'ordre p est élevé, plus l'intensité du maximum de diffraction est faible, à cause du facteur de forme F . On utilise en pratique des réseaux dits blazés qui permettent de déplacer le maximum d'intensité (maximum du facteur de forme F) sur un ordre de diffraction non nul ($p = 1$ en général). Since this condition can only exactly be achieved for one wavelength, it is specified for which blaze wavelength the grating is optimized (or blazed). The direction in which maximum efficiency is achieved is called the blaze angle and is the third crucial characteristic of a blazed grating directly depending on blaze wavelength and diffraction order. Pour construire un réseau blazé, on module périodiquement la transparence du réseau. [Montrer une photo ou un schéma.](#) Par propriété de modulation-translation de la TF, cela décale spatialement le maximum du facteur de forme, sur un ordre plus élevé. Cela permet donc d'augmenter le pouvoir de résolution.

Bonus : réseau blazé, formalisation Le profil est donné sur la figure. Il s'agit tout simplement d'une lame d'épaisseur variable périodique, l'équivalent d'une rampe en électronique. On va donc décrire le motif par une fonction de transmission

$$t_f(x, y) = e^{i(\phi_0 + 2\pi n_v x \tan(\alpha))}$$

où ϕ_0 est la phase accumulée par le point en $x = 0$, liée à la traversée d'une certaine épaisseur de lame, n_v est l'indice optique de la lame. Cette fonction est définie pour une seule période, donc pour $x \in [0, a]$. Encore une fois, on va supposer une invariance selon y . On cherche, comme précédemment, la transformée de Fourier de cette fonction de transmission $t_f(x, y)$

Cette TF correspond à la TF d'une porte fois une exponentielle complexe. On va donc trouver le même résultat que pour une fente de largeur a , mais avec un centre translaté vers la valeur $n_v \tan(\alpha)$. Dans la limite de petits angles, le centre de la figure va donc se retrouver au niveau de l'angle de réfraction standard de ce système optique, c'est-à-dire en x tel que $\sin(\theta) = n_v \sin(\alpha)$. En changeant l'angle, on peut donc mettre le maximum un peu où on le souhaite. Or, il faut se rappeler que cette partie de l'amplitude (A_f) n'est que l'enveloppe de la figure finale, et qu'on va ensuite sélectionner certains points bien précis à l'aide du peigne piqué venant du côté "réseau". Notre but est d'avoir l'essentiel de l'énergie au niveau d'un ordre supérieur du réseau, par exemple le premier. C'est pas très dur, il suffit d'avoir $\sin(\theta) = n_v \sin(\alpha) = \lambda/a$. Donc on peut avoir l'essentiel de la lumière envoyé dans le premier ordre, ce qui donne une image très lumineuse, et évite d'en perdre beaucoup dans l'ordre 0 qui ne donne pas d'information (cf figure). On va donc faire mieux qu'avec un réseau de fente (du point de vue de l'info qu'on cherche en tout cas).

2.4 Analogie avec les transducteurs piézoélectriques

Antennes Les antennes (en émission, comme en réception) constituées d'une série de transducteurs. L'effet de réseau est exploité pour accroître la directivité (en émission, comme en réception, également). Notons, en comparaison avec la spectroscopie ou la cristallographie, que les sources acoustiques sont cohérentes et que l'évolution temporelle du signal est accessible expérimentalement.

Directivité Au lieu de prendre un grand transducteur (céramique piézoélectrique), on prend N plus petits pour former un réseau. On a donc la même formule que pour le réseau optique (on peut tracer le diagramme polaire). On applique alors électroniquement un déphasage constant entre chacun des transducteurs. Comme le blazage, cela a pour conséquence de déplacer le maximum d'émission, on peut ainsi balayer angulairement en contrôlant le déphasage entre les ondes.

Transducteurs en échographie L'élément de base de l'échographie est généralement une céramique piézoélectrique (PZT), située dans la sonde, qui, soumise à des impulsions électriques, vibre générant des ultrasons. Les échos sont captés par cette même céramique, qui joue alors le rôle de récepteur : on parle alors de transducteur ultrasonore. Un échographe est muni d'une sonde échographique, nommée barrette échographique, pourvue à l'origine de 64, 96

voire 128 transducteurs ultrasonores en ligne. Les sondes des échographes modernes possèdent aujourd'hui jusqu'à 960 éléments. En échographie cardiaque le nombre d'éléments est amené à 3 000 éléments. L'émission se fait de manière successive sur chaque transducteur. **ODG:** 1 and 18 MHz

Les ultrasons sont envoyés dans un périmètre délimité (souvent trapézoïdal), et les échos enregistrés sont des signatures des obstacles qu'ils ont rencontrés. L'échogénicité est la plus ou moins grande aptitude d'un tissu à rétrodiffuser les ultrasons.

La fréquence des ultrasons peut être modulée : augmenter la fréquence permet d'avoir un signal plus précis (et donc une image plus fine) mais l'ultrason est alors rapidement amorti dans l'organisme examiné et ne permet plus d'examiner les structures profondes.

To make an image, the ultrasound scanner must determine two things from each received echo :

How long it took the echo to be received from when the sound was transmitted. How strong the echo was. Once the ultrasonic scanner determines these two things, it can locate which pixel in the image to light up and to what intensity

↓ *Maintenant, on va changer de point de vue. On a supposé connaître le réseau mais pas la lumière, mais on peut faire l'inverse ! L'application la plus "célèbre" de ça, c'est la cristallographie par diffraction.*

3 Diffraction en cristallographie

3.1 Sources de rayonnement

Longueur d'onde Pour avoir une figure de diffraction notable, il faut des longueurs d'onde de l'ordre de grandeur de la distance atome-atome donc de $10^{-10}m$. *Attention, deux critères sont à prendre en compte : la nécessité de voir au moins un ordre non nul impose une longueur d'onde plus petite (ou égale) au pas du réseau (en l'occurrence la distance interatomique), d'où les rayons X. Il faut aussi que les effets de la diffraction se manifestent suffisamment, c'est-à-dire que l'angle de diffraction ne soit pas trop petit, ce qui nécessite une longueur d'onde qui ne soit pas trop petite devant ce même pas. De plus, on veut éviter, en cristallographie, de sonder la structure du noyau (néanmoins, la structure interne de la cellule élémentaire du réseau peut être d'intérêt). La longueur d'onde doit en fin de compte avoir l'ordre de grandeur de la taille des noyaux, de manière à ne pas sonder leur structure interne, mais à sonder tout ce qui est plus grand.*

Rayonnement EM Pour un rayonnement EM, cela correspond aux rayons X. Ils sont produits par synchrotron (Grenoble) en accélérant des électrons sur une cible métallique, ce qui les ralentit et donc provoque un rayonnement (dû à la décélération, c'est le Brehmstrahlung). Le spectre produit est large. Les rayons X interagissent avec les électrons car ils sont plus légers que les noyaux (Hamiltonien d'interaction en $1/m$) **ODG:** 10 keV pour $\lambda = 0.1\text{\AA}$.

Electrons 🍷 **On change de type d'onde : ondes de matière.** Comme source d'ondes, on peut aussi utiliser des ondes de matière, par exemple des électrons. La longueur d'onde est celle de De Broglie **On donne l'expression.** Il faut donc avoir un jet monocinétique pour éviter d'avoir une largeur spectrale importante. Par exemple, on peut accélérer des électrons via une différence de potentiel U . **ODG:** il faut typiquement $U \sim 100V$, ce qui est facile à réaliser. Les électrons sont des particules chargées, elles interagissent fortement avec la matière, et donnent principalement des informations sur la surface. **ODG:** 150 eV pour $\lambda = 1\text{\AA}$.

Neutrons 🍷 Pour des neutrons thermiques, la longueur d'onde est la longueur d'onde thermique de De Broglie, soit quelques angstrom à 300K. L'avantage des neutrons est qu'ils sont neutres et donc pénètrent plus efficacement dans la matière que les électrons et interagissent peu avec les nuages électroniques comme les rayons X. De plus, ils ont un moment magnétique non nul et donnent donc des informations sur les moments magnétiques des noyaux sondés. Ils sont produits : (i) dans un réacteur par fission nucléaire de noyaux atomiques lourds (ii) spallation $p + \text{cible} \rightarrow \text{cible}' + n$ par bombardements d'une cible (ex : plomb liquide) par des protons hautement énergétiques issus d'un accélérateur de particule. **ODG:** 0.1 eV.

3.2 Réseau et condition de Von Laue

Un cristal se décompose en motif élémentaire et en réseau.

Motif Le motif est une maille élémentaire, ce qui va se répéter dans l'espace. C'est la brique élémentaire. On l'illustre sur un réseau triangulaire 2D. Il y a plusieurs choix de maille possible : maille conventionnelle, de Wigner

Seitz [On fait un rappel.](#)

Réseau Le réseau décrit comment se répète le motif *i.e.* la périodicité. Un réseau R est un ensemble de point généré par des combinaisons linéaires de vecteur primitifs. [On donne la définition formelle.](#) On représente des choix de vecteurs primitifs dans le réseau triangulaire 2D.

Facteur de structure : condition de Laue et Bragg Maintenant qu'on a fait une décomposition analogue, à celle de la partie I/, on va chercher à calculer l'amplitude diffractée. [On part de la règle d'or de Fermi ou sinon on admet directement que l'amplitude diffractée est la TF du potentiel?](#) Le but est de faire un calcul le plus concis et simple possible, en raisonnant par analogie avec le réseau précédent. [Dalibard p25 fait un calcul concis dans un milieu non infini] et utilisant à fond les parties I/ et II/, dans le cas particulier d'un réseau de vecteurs de base orthogonaux pour alléger les calculs.

Condition de von Laue

Indices de Miller et condition de Bragg [On peut les considérer en prérequis de cristallographie descriptive \(en chimie\).](#) C'est long à bien expliquer, faire voir les familles de plans parallèles. De, même, on suppose avoir déjà fait la condition de Bragg par approche interférentielle avec les mains.

Facteur de forme : extinctions [Exemple de la maille cfc sur diapo](#)

↓ *On applique ces calculs pour illustrer comment une figure de diffraction donne des informations sur la structure du cristal.*

3.3 Analyse d'une figure de diffraction

Méthode des poudres de Debye Scherrer C'est difficile d'obtenir des gros morceaux de cristaux pour que l'approximation du réseau infini soit valable. De plus, un faisceau diffracté donne des points dans l'espace, difficile à détecter. Une méthode consiste à utiliser des poudres. Les poudres sont orientées de façon aléatoire à l'intérieur de l'échantillon, donc on sonde un grand nombre d'angles d'incidence. Par invariance par rotation, on obtient des cônes au lieu de points. [On montre un schéma sur diaporama.](#) ☞ *On prend des poudres petites aussi car les résultats théoriques supposent le rayonnement cohérent. Or dans la ligne CRISTAL de SOLEIL, la longueur de cohérence vaut $L_{TV} \cong 350\mu\text{m}$ verticalement et $L_{TH} \cong 10\mu\text{m}$ horizontalement.*

Analyse d'une figure de diffraction Pour lire la figure de diffraction du cuivre, on mesure 2θ . On utilise la formule de Bragg (non démontrée) pour calculer les nombres $N = h^2 + k^2 + l^2$ correspondants. S'il y a des extinctions (valeurs de h, k, l non présentes), on peut identifier la structure correspondante, ici cfc. [Tout est sur le tableau.](#)

Largeur des anneaux, intensité et multiplicité des pics La largeur des anneaux est inversement proportionnelle à la taille des grains à l'intérieur de la poudre. L'intensité d'un pic dépend de la multiplicité des pics (indices de Miller négatifs) et des facteurs de couplage atomique. Exemple : (1,1,1) a une multiplicité de $2^3 = 8$. (2,0,0) a une multiplicité de 6. A cause de l'agitation thermique, les motifs vibrent autour de leur position d'équilibre. Cela n'affecte pas la direction des pics mais modifie seulement leur intensité, via le facteur de Debye-Waller.

Conclusion

"En conclusion, on peut évoquer que la diffraction est la manifestation d'un caractère ondulatoire. En particulier, elle concerne également le domaine de l'acoustique. Concernant la diffraction par un motif périodique, on peut citer les antennes (en émission, comme en réception) constituées d'une série de transducteurs. L'effet de réseau est exploité pour accroître la directivité (en émission, comme en réception, également). Notons, en comparaison avec la spectroscopie ou la cristallographie, que les sources acoustiques sont cohérentes et que l'évolution temporelle du signal est accessible expérimentalement."

Ouverture :

Compléments/Questions

- Quasi-cristaux et symétrie d'ordre 5.

V.Raban et K.Helal "Pour la culture générale, la formule de Bragg concerne deux personnes, père et ls, le ls ayant reçu avec son père le Nobel en 1915 alors qu'il avait seulement 25 ans. C'était à l'époque le plus jeune prix Nobel (toutes disciplines confondues, dépassé depuis par Yousafzai, prix Nobel de la paix en 2014 à 17 ans, et peut-être d'autres). Von Laue a aussi reçu le prix Nobel, l'année d'avant (1914) pour la découverte de la diraction des rayons X par les cristaux. Autre anecdote croustillante, il y a eu un débat entre Néel et Landau quant à l'existence de matériaux antiferromagnétiques (vers les années 40 il me semble). Les deux l'avaient intuité, avant que Landau ne se rétracte, avançant l'argument (résumé ici grossièrement) que l'état j^{th} n'est pas un état propre de l'hamiltonien d'Heisenberg. Shull a cloturé le débat en faveur de Néel en réalisant les premières expériences de diraction de neutrons sur MnO, les pics de diraction montrant un état antiferromagnétique. Néel reçut le prix Nobel en 1970 et Shull en 1994 (Landau l'a aussi eu en 1962 mais pour une tout autre raison). Enn, on peut aussi noter que le Nobel de Röntgen pour la découverte des rayons X est le premier prix Nobel de physique de l'histoire (en 1901). Par ailleurs, il est intéressant de connaître quelques infrastructures. À Grenoble, il y a un synchrotron (l'ESRF) pour avoir des rayons X par accélération d'électrons (nommé bremsstrahlung) et une centrale nucléaire (l'ILL) pour les neutrons. En France il y a un autre gros synchrotron : Soleil à Saclay, et à Oxford, il y a côte à côte ISIS (neutrons) et DIAMOND (X). Mentionnons qu'il y a une autre manière d'obtenir des neutrons, dite par spallation qui consiste à envoyer des protons sur des gros noyaux (mercure par exemple) pour en arracher des neutrons. Dernier commentaire, qui n'a pas été abordé en classe, sur l'inuence de la température sur la diraction de rayons X : à cause de l'agitation thermique, les motifs vibrent autour de leur position d'équilibre. Cela n'affecte pas la direction des pics mais modie seulement leur intensité, via le facteur de Debye-Waller"

Passage

Plan

Questions

- Réseaux naturels en réflexion/Transmission ? Aile de papillon, plume de paon.
- Pourquoi mettre les hauts-parleur d'un concert en colonne ? Avec des déphasages appropriés, on peut faire une interférence constructive dirigée vers les bas, vers le public.
- Un escalier ça peut diffracté des ondes acoustiques.
- Plusieurs questions pour repreciser des hypothèses de calcul exposées trop rapidement (par exemple pourquoi on fait un calcul unidimensionnel pour le réseau, à quelle approximation cela revient dans la direction verticale?). Retour sur la figure de diffraction du réseau : pouvoir de résolution ? Comment déterminer le nombre de traits éclairés, le rapport a/e , etc. Matière condensée :
- Qu'est-ce qu'on sonde avec des neutrons ? Quelle est la forme de la figure de diffraction ? Lors d'une expérience de diffusion, les neutrons interagissent directement avec le noyau des atomes. Étant de charge électrique neutre, ils n'interagissent pas avec les nuages électroniques des atomes du cristal, alors que c'est le cas des rayons X. La diffraction de neutrons permet donc de déterminer les positions des noyaux des atomes dans un matériau cristallin. Les neutrons portent un spin et peuvent interagir avec des moments magnétiques, comme ceux provenant du nuage électronique entourant un atome. Il est donc possible de déterminer la structure magnétique d'un matériau en utilisant la diffraction de neutrons.
- Étude des biomacromolécules : c'est facile de faire des cristaux ? Comment expliquer la couleur bleue du papillon « machin » ?
- Pourquoi historiquement on a continué à utiliser des prismes alors que les réseaux existaient encore ? Comment fabrique-t-on un réseau blazé ? Réalisation précise d'un émetteur ultrasonore utilisé pour l'échographie ? Dans quelle démarche épistémologique s'inscrit l'expérience de Davisson et Germer (diffraction d'électrons en 1925) ?
- Revenir sur les réseaux de phase et d'amplitude, comment peut-on décrire cela mathématiquement ? Comment faire sentir à un élève ayant déjà eu un cours sur la diffraction la séparation en un facteur de forme et un facteur de structure ? Comment fonctionne un réseau blazé ? Revenir sur le critère de Rayleigh pour repreciser les notations (conflit de notation avec le début de la leçon). Question sur la courbe de l'éclairement tracée avec python, comment justifier rapidement les propriétés énoncées ? Peut-on faire un lien avec une fonction que les élèves connaissent déjà ? ($1 + \cos x$, éclairement des fentes d'young si $N = 2$). Diffraction des électrons : dans quel sens est le graphite, pourquoi on observe un cercle ? S'agit-il d'un réseau en transmission ou en réflexion ?
- Pouvez-vous préciser la notion de diffraction cohérente/incohérente ? Pouvez-vous expliquer à un élève pourquoi le montage de diffraction avec une lentille est équivalent à celui avec deux lentilles ? Pouvez-vous expliquer

qualitativement la formule des réseaux ? Comment le réseau blazé joue-t-il sur le pouvoir de résolution ? Comment fait-on un monochromateur ? Pour la 2ème partie : Pouvez-vous expliquer qualitativement la figure de diffraction obtenue avec le canon à électrons ? Comment génère-t-on des rayons X ? Dans quels laboratoires de France en trouve-t-on ? Quel est le lien entre la symétrie de la figure de diffraction et celle du cristal ? Que signifie une symétrie d'ordre 5 de la figure de diffraction ? (Cela correspondrait à des quasi-cristaux) Vous avez parlé de cristaux où tous les atomes étaient bien à leur place, est-ce vraiment le cas ? Qu'est-ce que ça change ? Quelles informations tirer de la figure de diffraction ? N'y a-t-il pas un problème pour remonter à la densité électronique à partir de la figure de diffraction ? Comment fait-on un monochromateur à neutrons ? Comment expliquer à un élève qu'on passe de la diffraction des rayonnements électromagnétiques à celle des électrons pendant la leçon ?

- Pouvoir de résolution : dépendance en N ? C'est quoi N ? Redessiner le réseau avec les différentes longueurs caractéristiques ; redessiner l'éclairement en fonction de z et mettez les échelles correspondantes ; on voit que la dispersion augmente avec l'ordre... supposons qu'on puisse aller à l'ordre infini, n'y aura-t-il pas un autre pb ? (recouvrement des ordres) Comment définir le chemin optique ? N'est ce que $n \cdot AB$? Connaissez vous d'autres système d'interférence à ondes multiples ? Comment est définie sa résolution ? Comment se voit-elle ? Réseau acoustique : pq la longueur a du transducteur ne doit pas être trop grande ?
- Comment peut-on, en pratique, fabriquer un réseau ? [gravure au diamant, très précise ; photo ou empreinte d'un réseau déjà existant ; photo d'une figure d'interférence] - Quels sont les avantages d'un réseau en réflexion ? [moins de réflexions parasites et de diffusion ; pas de dispersion, système plus compact] - Pourquoi est-ce que l'on utilise des rayons X plutôt que des longueurs d'onde visible pour la cristallographie ? [Attention, deux critères sont à prendre en compte : la nécessité de voir au moins un ordre non nul impose une longueur d'onde plus petite (ou égale) au pas du réseau (en l'occurrence la distance interatomique), d'où les rayons X. Il faut aussi que les effets de la diffraction se manifestent suffisamment, c'est-à-dire que l'angle de diffraction ne soit pas trop petit, ce qui nécessite une longueur d'onde qui ne soit pas trop petite devant ce même pas. De plus, on veut éviter, en cristallographie, de sonder la structure du noyau (néanmoins, la structure interne de la cellule élémentaire du réseau peut être d'intérêt). La longueur d'onde doit en fin de compte avoir l'ordre de grandeur de la taille des noyaux, de manière à ne pas sonder leur structure interne, mais à sonder tout ce qui est plus grand.

Commentaires