

Diffraction par des structures périodiques

Présentée le 28/11/17, correction par K.Helal et V.Raban¹.
Appréciation : A, très bonne leçon.

Ce compte-rendu ne contient que l'avis des correcteurs. Il doit par conséquent être lu avec un regard critique.

COMMENTAIRES DU JURY

Un condensé des retours du jury sur cette leçon :

- ▶ ne pas faire seulement le réseau plan,
- ▶ faire la diffraction par des cristaux,
- ▶ discuter les longueurs caractéristiques en jeu,
- ▶ illustrations expérimentales.

Voir aussi le rapport 2017 (p17 pour la LP).

COMMENTAIRES GÉNÉRAUX

Le plan présenté consistait en l'étude du réseau plan en optique, suivie de la discussion des caractéristiques d'un spectromètre à réseau, pour finir sur la diffraction des rayons X par les cristaux.

Ce plan est tout à fait présentable en l'état devant le jury, il aborde tout ce qui est attendu. Quelques ajustements peuvent cependant être bénéfiques : on peut s'affranchir de la discussion de la dispersion $d\theta/d\lambda$ du spectromètre afin de dégager plus de temps pour la diffraction sur les cristaux, et on peut ne présenter que la formulation de von Laue, en sautant celle de Bragg qui est moins évidente à développer (nécessité d'introduire les plans réticulaires et de justifier la réflexion spéculaire).

Sur la forme, il y a eu plusieurs petites erreurs disséminées tout le long de la leçon, sans aucun doute dues au stress et au rythme soutenu de la présentation. C'est facilement pardonné à l'oral mais plutôt malvenu lorsqu'elles sont écrites au tableau, il faut y faire attention. Quant à la séance de questions, elle a révélé une bonne compréhension des phénomènes en jeu, ainsi qu'une bonne culture générale.

Un point positif de cette leçon a été la qualité des illustrations, notamment celle de l'intensité transmise par un réseau grâce à un code python, et la discussion géométrique de la diffraction par des poudres en superposant des transparents.

¹. karim.helal@free.fr; valentin.raban@ens-lyon.fr

RETOUR SUR LA LEÇON

Introduction Les prérequis et le plan ont été bien annoncés et justifiés, en évoquant le dualisme onde/motif diffractant : connaissant le deuxième on peut analyser le spectre de la lumière, et inversement connaissant l'onde on peut remonter à la structure de l'objet diffractant.

Le niveau de la leçon n'a cependant pas été écrit par oubli. Mentionnons qu'il est toujours judicieux de renseigner un niveau universitaire (L1, L2 ou L3 - ici L3), et non un niveau prépa.

Une petite illustration (ici, montrer la diffraction par un DVD) est toujours bienvenue.

I - Réseaux plan unidimensionnels

I.1 - Généralités Il est très pertinent de démarrer la présentation du réseau par des ordres de grandeurs (attention à donner aussi N , qui est utilisé plus tard pour discuter le pouvoir de résolution).

I.2 - Diffraction L'interprétation géométrique de la formule des réseaux sur transparent était élégante, pour montrer que seuls quelques ordres existent réellement. Le calcul de l'intensité a été bien posé mais mené difficilement car plusieurs étapes ont été sautées. Puisque c'est LE calcul de la leçon, on peut se permettre de le dérouler proprement en entier au tableau. Il peut être intéressant de mettre en regard les longueurs caractéristiques en jeu :

$$\begin{aligned} \text{largeur d'une fente } a &\leftrightarrow \text{ largeur de l'enveloppe } \propto 1/a \\ \text{distance entre fentes } d &\leftrightarrow \text{ distance entre pics } \propto 1/d \\ \text{largeur du réseau } Na &\leftrightarrow \text{ largeur d'un pic } \propto 1/(Na) \end{aligned}$$

D'autre part, il faut anticiper la suite et voir que le facteur de structure ici n'est pas l'équivalent de celui en diffraction de rayon X. Pour garder une unité dans la leçon, j'aurais tendance à ne pas appeler « facteur de structure » le $S(u)$ de la leçon, mais à seulement évoquer ici le facteur de forme (qui lui est l'exact pendant du facteur de forme pour la diffraction de rayon X).

La discussion sur l'animation python est très illustrative. Je conseillerais cependant de réduire la fenêtre à $[-1;1]$ si l'abscisse est $\sin\theta$ (à adapter si c'est $\sin\theta - \sin\theta_0$).

La réalisation expérimentale est obligatoire dans cette leçon. Gardez en tête qu'une manip = un schéma afin qu'on puisse facilement suivre ce que vous présentez. Ici il y a eu un schéma mais qui ne correspondait pas à l'expérience (montage à deux lentilles contre une seule sur la manip). Il aurait fallu uniformiser les deux. Il faut

aussi avoir en tête l'écart du doublet jaune du mercure, qui peut être résolu avec un bon réseau. Notamment, ce serait très démonstratif d'illustrer l'influence de la fente source en montrant qu'on finit par résoudre ce doublet en diminuant sa largeur (prendre pour cela un réseau qui le permet!).

II - Spectromètre à réseau

II.1 - Dispersion Partie intéressante mais peut être retirée pour gagner du temps. Par ailleurs (ça n'a pas été le cas lors de la présentation), on dit souvent qu'« un réseau est linéaire, contrairement à un prisme ». C'est vrai, mais uniquement pour des petits angles, ce qu'il faut garder à l'esprit.

II.2 - Pouvoir de résolution C'est intéressant de démontrer $\Delta\lambda_{\min} = \lambda/(pN)$. Cela permet de discuter l'influence de p et N . Il faut cependant faire attention car ce n'est pas en pratique le vrai facteur limitant (c'est la fente source).

À la fin de cette partie, toutes les grandeurs d'influence ont été commentées (d , N , λ , p). Il peut donc être pertinent de montrer un transparent récapitulant toutes les discussions précédentes.

II.3 - Limitations Ont été évoqués le recouvrement des ordres et l'intérêt du blazage. Pour clore cette partie sur la spectrométrie, on peut montrer l'intérieur du spectromètre de TP Ulice.

III - Diffraction des rayons X par des structures cristallines

Il n'y a pas de raison de se restreindre aux rayons X, on peut aussi évoquer les neutrons et les électrons et comparer leurs différents domaines d'application (neutrons pour les structures magnétiques notamment).

III.1 - Rappels On peut selon moi se contenter de rappeler ce qu'est un réseau direct et en donner un exemple (sans oublier de le mettre dans les prérequis pour justifier qu'on y passe peu de temps). L'introduction des plans réticulaires n'a d'intérêt que si on présente la formulation de Bragg qui est redondante avec celle de von Laue.

III.2 - Formulations de Bragg et von Laue Il peut être judicieux de ne présenter que la formulation de von Laue, qui est l'exact pendant de la formule des réseaux. Ayant obtenu $\vec{R} \cdot \Delta\vec{k} = 2\pi p$ pour tout \vec{R} du réseau direct, on peut alors dire que cela restreint les $\Delta\vec{k}$ à être des vecteurs d'un réseau qu'on appelle « réciproque », puis d'enchaîner sur la construction d'Ewald et la méthode des poudres. Cela permet de gagner du temps pour introduire plus proprement les facteurs de forme et de structure, et éventuellement de donner un exemple de cas d'une extinction de pic.

III.3 - Méthode de Debye-Scherrer L'explication sur transparent était très démonstrative!

L'expérience de la diffraction par le graphite a été rapidement présentée. Rappelons que la distance entre plan de graphène dans le graphite est très grande devant la longueur d'onde des électrons et donc ne donne pas lieu à de la diffraction (l'erreur n'a pas été faite dans la leçon).

RETOUR SUR LES QUESTIONS

Pour la culture générale, la formule de Bragg concerne deux personnes, père et fils, le fils 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 diffraction 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 $|\uparrow\downarrow\uparrow\downarrow\cdots\rangle$ 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 diffraction de neutrons sur MnO, les pics de diffraction 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). Enfin, 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'influence de la température sur la diffraction 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 modifie seulement leur intensité, via le facteur « de Debye-Waller ».

CONCLUSION La leçon présentée était d'un très bon niveau. On peut chercher à gagner du temps pour mieux discuter les facteurs de forme et de structure pour les cristaux en sautant la dispersion II.1 et la formulation de Bragg. Les illustrations expérimentales, l'animation python et les transparents étaient des gros points positifs et doivent être gardés.