**Zeitschrift:** Helvetica Physica Acta
**Band:** 41 (1968)
**Heft:** 6-7

**Artikel:** Etude des solides par canalisation de particules à haute énergie
**Autor:** Jaccard, C.
**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-113953

**Nutzungsbedingungen**
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

**Conditions d'utilisation**
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

**Terms of use**
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

**Download PDF:** 04.07.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch**

[46] K. Yaguchi, J. Phys. Soc. Japan *21*, 1226 (1966).
[47] N. Sclar, J. appl. Phys. *33*, 2999 (1962); *35*, 1534 (1964).
[48] L. M. Corliss, N. Elliott and J. M. Hastings, Phys. Rev. *117*, 929 (1960).
[49] T. S. Verkhoglyadov, S. N. Livov, V. F. Nemchenko and G. V. Samsonov, Phys. Met. Metallogr. *12*, 146 (1962).
[50] K. Andres, G. W. Hull jr. and F. Hulliger, cited by F. Hulliger, Structure and Bonding *4*, 83 (1968).
[51] J. J. Veyssie, D. Brochier, A. Nemoz and J. Blanc, Phys. Lett. *14*, 261 (1965).
[52] L. B. Asprey, J. S. Coleman and M. J. Reisfeld, Adv. Chem. Ser. *71*, 122 (1967).
[53] N. P. Bogoroditskii, V. V. Pasynkov, Rifat Rizk Basili and Yu. M. Volokobinskii, Soviet Phys.-Dokl. *10*, 85 (1965).
[54] G. Busch, P. Junod, F. Levy, A. Menth and O. Vogt, Phys. Lett. *14*, 264 (1965).
[55] F. Hulliger and O. Vogt, Helv. phys. Acta *39*, 199 (1966).

# Etude des solides par canalisation de particules à haute énergie

par **C. Jaccard**
Institut de Physique, Université de Neuchâtel

(24. IV. 68)

*Résumé.* Revue brève de l'application des effets de canalisation et de blocage à l'étude des solides: détermination de l'orientation et de la symétrie du réseau, des potentiels interatomiques, de la concentration des interstitiels et de la structure des couches superficielles.

Lorsque des noyaux atomiques ou des ions de haute énergie se déplacent dans un réseau cristallin, l'interaction avec ce dernier peut être la même que dans la matière amorphe, si l'énergie des particules (keV ou MeV) est de plusieurs ordres de grandeur supérieure aux énergies caractéristiques du solide (au plus quelque 10 eV). Mais ce n'est plus le cas si la direction des particules est voisine d'une direction cristallographique principale: l'interaction est sujette alors à une anisotropie très marquée qui résulte de certains éléments de l'ordre cristallin. Les atomes du réseau, en étant disposés sur des plans et des chaînes parallèles, laissent entre eux des espaces presque libres formant des canaux parallèles. Ces derniers peuvent guider les particules, les «canaliser» par réflexion d'une paroi du canal à l'autre, de sorte qu'elles ne peuvent quitter ce dernier; pour cela, l'angle que fait la trajectoire avec l'axe du canal doit être assez faible, d'autant plus que l'énergie est plus grande. Ce phénomène a été découvert par des calculs numériques de trajectoires selon la méthode de Monte Carlo, puis il a été ensuite vérifié expérimentalement, donnant lieu à de nombreux travaux. L'effet a été décrit en détail dans divers articles de revue [1, 2] et même de vulgarisation [3], le traitement le plus complet étant celui de Datz *et al.* [4], de sorte que nous ne considérons ici que certains aspects particuliers, pouvant conduire à une application dans l'étude des solides.

L'anisotropie prononcée et fortement localisée au voisinage des directions principales suggère en premier lieu d'utiliser l'effet pour déterminer avec précision *l'orientation du réseau*, par exemple, d'une plaque monocristalline mince, bombardée parallèle-

ment à un axe principal par un faisceau de particules assez rapides pour traverser le cristal. Il faut relever ici qu'un effet de transparence, en exigeant un alignement angulaire de l'ordre de $10^{-5}$ et une rectitude parfaite des canaux, serait impossible à déceler expérimentalement. C'est grâce à l'effet de canalisation, pour lequel l'angle d'alignement critique est de l'ordre du degré, qu'une expérience positive est possible. En effet, le faisceau incident est partagé en deux fractions: La première, appelée aléatoire, comprend les particules qui, en entrant dans le cristal, passent assez près des noyaux du réseau pour y subir des chocs donnant lieu à des déviations marquées des trajectoires. Pour cette fraction, qui perd très rapidement la mémoire de la direction originale, la matière agit comme si elle était amorphe, ce qui se traduit par un pouvoir d'arrêt relativement élevé. Par contre, la deuxième fraction passe assez près de l'axe des canaux et ne subit que des déviations angulaires minimes; elle est ainsi maintenue pendant toute la traversée du cristal dans une région de faible densité électronique où le pouvoir d'arrêt aussi est réduit. Les particules canalisées ont ainsi une portée moyenne plus grande que les autres, ou bien, à épaisseur donnée, leur nombre est supérieur à la sortie du cristal. En plaçant derrière celui-ci une émulsion photographique, on peut y observer des taches intenses, causées par les particules confinées dans les canaux linéaires de faible indice, à l'intersection de traînées révélant l'effet des plans d'atomes. Tirant parti de cet effet, DEARLANEY [5] a pu déterminer l'orientation d'une lame de silicium de 0,5 mm d'épaisseur, en canalisant des protons de 11 MeV au voisinage de l'axe (110); la précision de 0,02° est supérieure à celle pouvant être obtenue par diffraction des rayons $X$. Cette méthode peut aussi s'étendre à des cristaux épais, en faisant appel en réflexion à l'effet de blocage. Si des particules ont leur origine à proximité immédiate des noyaux du réseau, que ce soit par radioactivité propre ou par diffusion de Rutherford de particules incidentes, cette émission montre des minima prononcés le long des directions principales. En effet, le flux des particules émises ne comprend alors que la fraction aléatoire définie plus haut, car aucune particule ne peut quitter le voisinage immédiat d'un site réticulaire pour entrer dans un canal, à cause des noyaux voisins; ceux-ci fixent à l'angle d'incidence une limite inférieure plus grande que l'angle critique. L'émission des particules enregistrée sur un film donne ainsi l'image inverse de celle livrée en transmission [2] et les taches ponctuelles et linéaires correspondant aux directions principales peuvent être indexées; on a là une méthode complétant utilement celle de Laue pour déterminer la symétrie du réseau.

L'effet de canalisation observé en transmission peut être aussi utilisé pour obtenir une information sur les *potentiels interatomiques* du réseau [6]. En effet, les particules exécutent à l'intérieur des canaux des oscillations transversales dont l'amplitude dépend de la fréquence, le potentiel étant anharmonique pour des écarts finis. Mais si le faisceau transmis est observé parallèlement au faisceau incident, la fréquence doit être dans une certaine relation (multivalente) avec la vitesse des particules et l'épaisseur du cristal. On a ainsi une sorte de quantification des fréquences et des amplitudes, impliquant une quantification du pouvoir d'arrêt. Ceci se manifeste dans le spectre énergétique des particules transmises par des pics équidistants nettement résolus. Une analyse de ces spectres, mesurés pour des épaisseurs différentes, permet ainsi d'obtenir la distribution du pouvoir d'arrêt dans le canal, et par conséquent la densité électronique et le potentiel interatomique du cristal.

L'effet de canalisation est très sensible à l'obstruction des canaux par des *interstitiels* ou des fautes d'empilement, et on peut l'utiliser pour déterminer la concentration de ces défauts de structure. Par exemple, MATZKE [7] a mesuré l'émission de particules $\alpha$ provenant des ions de $^{222}Rn$ implantés dans des cristaux de KCl, $CaF_2$ et $UO_2$, pour des concentrations de 100 à 1000 ppm. Comme cette émission ne présente aucune anisotropie, on peut en conclure que les ions de radon occupent des sites interstitiels, sinon un effet de blocage serait visible. L'émission provenant du $^{218}Po$ et $^{214}Po$ est la même dans les halogénures d'alcalins ci-dessus, mais par contre elle est réduite dans un domaine angulaire étroit de l'ordre du degré autour de la direction (100) dans l'oxyde d'uranium: le polonium y occupe donc des sites dans les chaînes (100). Le degré d'anisotropie permet ainsi de déterminer la place de certaines impuretés, mais en utilisant la diffusion de Rutherford d'un faisceau de particules, on peut aussi mesurer la concentration des interstitiels intrinsèques. En effet, si celle-ci dépasse une certaine limite, le minimum observé pour la diffusion à grand angle, avec le faisceau incident parallèle à un axe principal, est moins prononcé que dans le réseau parfait. La valeur critique de la concentration relative correspondant à la sensibilité de la méthode est de l'ordre de $10^{-3}$. Avec un faisceau incident de direction arbitraire et un faisceau diffusé dans une direction principale, le résultat est similaire. Toutefois, on peut appliquer les deux méthodes simultanément [8], ce qui doit abaisser la concentration limite de 2 à 3 ordres de grandeurs et permettre des mesures de concentration jusqu'au ppm. La sensibilité est limitée principalement par l'erreur statistique liée aux faibles intensités mesurées. Il en est de même si les interstitiels sont des impuretés chimiques pouvant produire des réactions nucléaires spécifiques telles que $(p, \gamma)$ [9] ou $(p, n)$ [10]. On peut remarquer ici que l'effet des interstitiels peut être distingué de celui de la structure mosaïque: celle-ci provoque non seulement une diminution de la profondeur du minimum d'émission, mais encore une augmentation de sa largeur.

La distance parcourue par une particule dans la matière peut se mesurer à sa perte d'énergie, causée par interaction avec les électrons. Ainsi, une analyse, du faisceau émis en fonction de l'énergie permet de localiser les évènements nucléaires à l'intérieur du cristal et, par conséquent, de livrer une information sur le degré d'ordre des *couches superficielles*.

Par exemple, pour la diffusion de Rutherford de protons, le rendement de la réaction venant de régions intérieures non perturbées permet de calculer le paramètre minimum d'impact; celui-ci peut être ensuite utilisé pour comparer le rendement de la surface avec la valeur correspondant à un réseau idéal, où seule la première couche atomique peut être atteinte par le faisceau incident, les couches suivantes étant protégées par effet d'écran. Ainsi, dans le tungstène [11] le rendement mesuré avec des protons de 400 keV est trop grand d'un facteur 1,8 indiquant dans la première couche du désordre ou bien des mouvements thermiques de grande amplitude. On peut de même envisager l'étude d'une surface protégée par un mince film, spécialement si celui-ci est monocristallin avec des canaux parallèles à ceux du cristal sous-jacent.

Ce qui peut faire l'intérêt de la méthode de canalisation, par rapport à la diffraction de rayons $X$, d'électrons ou de neutrons, c'est qu'elle ne requiert qu'un degré d'ordre relativement faible. Il n'est nullement nécessaire que la structure soit périodique, il suffit qu'elle présente des canaux rectilignes, la forme et la densité d'occupa-

tion des parois pouvant être aléatoires dans une large mesure. Ceci pourrait permettre un jour une application à l'étude de corps organiques non cristallins, formés par juxtaposition de chaînes de polymères.

Toutefois, les méthodes relativement nouvelles de canalisation et de blocage ont été appliquées jusqu'à présent surtout à certains métaux (Au, Cu, W, Fe) et à quelques semi-conducteurs (Ge, Si, GaAs, GaSb) et il semble bien qu'une extension aux autres substances inorganiques intéressant actuellement le physicien du solide promette de livrer des renseigements nouveaux et précieux sur la constitution de la matière.

## Bibliographie

[1] J. C. Pfister, J. Phys. *27*, 253–256 (1966).
[2] A. F. Tulinov, Soviet Physics-Uspekhi *8*, 864–872 (1966).
[3] W. Brandt, Sci. American *218*, 91–98 (March 1968).
[4] S. Datz, C. Erginsoy, G. Leibfried, H. O. Lutz, Ann. Rev. Nucl. Sci. *17*, 129–188 (1967).
[5] G. Dearlaney, M. A. Wilkins, J. Sci. Instr. *44*, 880–881 (1967).
[6] H. O. Lutz, S. Datz, C. D. Moak, T. S. Noggle, Phys. Rev. Lett. *17*, 285–287 (1966).
[7] H. Matzke, J. A. Davies, J. appl. Phys. *38*, 805–808 (1967).
[8] V. S. Kulikauskas, M. M. Malov, A. F. Tulinov, Zh. Eksper. Teor. Fiz. *53*, 487–489 (1967).
[9] J. U. Andersen, J. A. Davies, K. O. Nielsen, S. L. Andersen, Nucl. Instr. Meth. *38*, 210–215 (1965).
[10] M. W. Thompson, Phys. Rev. Lett. *13*, 756–760 (1964).
[11] E. Bøgh, Phys. Rev. Lett. *19*, 61–63 (1967).

# Effective Masses and Curvature of the Fermi Surface or Energy Bands

by **J.-P. Jan**
Division of Pure Physics, National Research Council of Canada, Ottawa, Canada

(26. I. 68)

*Abstract.* The curvature of the energy function on one hand, and of the Fermi surface on the other hand, is examined in relation to the effective mass tensor.

## 1. Introduction

This paper is of a didactic nature. It proposes to examine the components of the effective mass tensor of electrons in a crystal lattice. They involve second derivatives of the energy function and are therefore somehow related to curvatures, but what curvatures are involved is not always clear. We shall examine both the Fermi surface, and the curves representing the energy in function of the magnitude of the wave-vector in a given direction (energy bands), and the relationships we shall establish will show that in both cases the effective mass tensor is involved in a rather complicated way.