spacings within this plane.

L.F. MAYER: I would like to ask Dr. Lenz whether the experiment with the coil can be considered as an experimental proof of Aharonov and Bohm's theory?

F. LENZ: The experiment of Bayh to obtain widely separated coherent beams were made in connection with Aharonov and Bohm's paper on the significance of potentials in electron interference experiments. In a letter from Prof. Möllenstedt which I received a week ago, he informed me that they have succeeded in winding a solenoid coil of 12μ diameter in Tübingen and that, with increasing electric current through this coil, a continuous movement of the interference fringes can be observed.

JOURNAL OF THE PHYSICAL SOCIETY OF JAPAN Vol. 17, SUPPLEMENT B-II, 1962 PROCEEDINGS OF INTERNATIONAL CONFERENCE ON MAGNETISM AND CRYSTALLOGRAPHY, 1961, Vol. II

Effets de Diffraction et d'Interférence dans les Images Electroniques; Formation de l'Image en Optique Electronique

CH. FERT, J. FAGET, M. FAGOT AND J. FERRE Laboratoire d'Optique Electronique Toulouse, France

La théorie de la formation de l'image développée par les opticiens (optique de Fourier) est largement applicable en optique électronique. Les différences techniques entre l'optique classique et l'optique électronique sont secondaires à ce point de vue. Les effets de diffraction et d'interférence se traduisent de la même manière dans les deux cas, comme on le voit par l'influence d'un défaut de mise au point, ou l'influence de l'ouverture du condenseur. Ces résultats montrent qu'il est possible d'étendre à l'optique électronique les techniques de l'optique: microscopie interférentielle et contraste de phase, pour obtenir sur les objets des informations que ne contient pas l'image normale. La principale difficulté est la nécessité de respecter les conditions optiques de ces techniques, à l'échelle imposée par l'optique électronique.

The theory of image formation, which was developed for optics (Fourier optics) is to a large extent applicable to electron optics. From this point of view, the technical differences between classical optics and electron optics are negligible. Diffraction and interference effects can be interpreted in the same way in both cases, as can be seen by the influence of imperfect focussing or by that of the condenser opening.

These results show that optical techniques (interferential and phase contrast microscopy) can be applied to electron optics, in order to obtain, on the object, information that is not revealed by the normal image. The main difficulty arises from the fact that the optical conditions of these techniques must be obeyed on the scale of electron optics.

Le problème de la formation de l'image en délicat en optique électronique, en particulier microscopie électronique comprend deux pour une lame cristalline, parce que la parties distinctes: longueur d'onde associée aux électrons est

1) l'action de la traversée de l'objet sur l'onde électronique incidente.

2) l'action du système de lentilles sur l'onde transmise par l'objet.

La première partie ne pose guère de problème en optique. Elle pose un problème délicat en optique électronique, en particulier pour une lame cristalline, parce que la longueur d'onde associée aux électrons est du même ordre que les dimensions atomiques. Nous parlerons très peu de cette partie, qui fait l'objet de recherches importantes. Nous dirons seulement que, si l'objet est assez mince pour donner de bonnes images, la fraction la plus importante de l'onde transmise est la fraction *diffractée* ou *cohérente*. Toutes les expériences citées ci-dessous montrent l'importance de cette fraction pour expliquer le contraste.

La deuxième partie a été largement développée en optique classique; la théorie de la formation de l'image par un système optique, le calcul de la répartition de l'éclairement dans l'image, ont fait l'objet de nombreux travaux. La transformation mathématique de Fourier joue un grand rôle dans cette théorie et certains auteurs ont pu parler d'une "optique de Fourier".

Il n'est pas nécessaire, en optique électronique, d'établir une théorie nouvelle. La théorie développée en optique est valable dans de larges limites en optique électronique pour calculer la structure de l'image, si on connaît l'onde transmise par l'objet.

Dans les conditions habituelles, la fraction



Fig. 1. M. E. interférentielle: coupe biologique de myéline.



Fig. 2. M. E. interférentielle: lame de graphite clivé.

coherente de l'onde transmise joue le rôle essentiel; la formation de l'image dans le microscope électronique rappelle celle de l'image dans le microscope optique, pour des objets non lumineux par eux-mêmes. A ce stade, les différences techniques entre le microscope électronique et le microscope optique jouent un rôle mineur; les effets de diffraction et d'interférence se traduisent de la même manière dans les images optiques et électroniques, compte tenu des ordres de grandeur.

Nous nous proposons de montrer cette analogie en présentant le résultat de quelques expériences. Elles mettent en évidence les effets de diffraction et d'interférence dans les images électroniques et contribuent à préciser leur interprétation.

Ces résultats montrent qu'il est possible d'étendre à l'optique électronique certaines techniques de l'optique: microscopie électronique interférentielle, contraste de phase. De telles recherches sont aussi une première étape du développement d'une *optique physique de l'electron*, dont certains auteurs ont depuis longtemps montré l'intérêt¹⁴⁾.

1. Influence de l'ouverture du condenseur en microscopie électronique

L'influence de l'ouverture 2 α_c du faisceau éclairant un point de l'objet, et du rapport $2\alpha_c/2\alpha_0$ (2 α_0 , ouverture de l'objectif), est bien connue en optique. L'éclairage est dit cohérent ou *incoherent* suivant que ce rapport est petit devant l'unité, ou voisin de l'unité.

La théorie prévoit que la limite de résolution est sensiblement la même dans les deux cas, tandis que le contraste est meilleur en éclairage cohérent.

Ces résultats s'appliquent en optique électronique. La Fig. 3 en montre un exemple: une même région d'un objet (coupe de myéline) est photographiée pour deux cas extrêmes (respectivement: $2 \alpha_c = 0,7 \cdot 10^{-3}$ et $2 \alpha_c = 6 \cdot 10^{-3}$, pour $2 \alpha_0 = 10^{-2}$). On note la différence d'aspect, conforme aux prévisions de la théorie optique¹³⁾.

Rappelons que dans les premiers microscopes électroniques, 2 $\alpha_c/2 \alpha_0$ était habituellement voisin de l'unité (éclairage incohérent) et ce n'est que plus récemment que la tendance s'est établie d'utiliser un petit diaphragme de condenseur (éclairage cohérent).



Fig. 3. Influence de la cohérence du faisceau éclairant l'object: exemple d'une coupe biologique de myéline. A gauche, $2\alpha_{e}=0,6\cdot10^{-2}$; à droite, $2\alpha_{e}=0,07\cdot10^{-2}$ ($2\alpha_{0}=10^{-2}$ dans les deux cas).

| Salar Contraction of the second second second | | And a second s |
|--|--|--|
| | | |
| | | and a substant of a state of the substant |
| | | and a state and a state and a state of the state of the |
| | | an and an anna ger antiger and an |
| Second States and States | | |
| service of the servic | | and the second |
| | | |
| | | |
| A CANADA TANANA ANA ANA ANA ANA ANA ANA ANA ANA | | and the second and the second second |
| and the second | A STATE OF THE STA | and a second |

Fig. 4. Défaut de mise au point en éclairage cohérent: exemple d'une coupe biologique de myéline.



Fig. 5. Contraste de phase en microscopie électronique: film de collodion carbone: à gauche, sans contraste de phase; à droite, avec contraste de phase.

2. Défaut de mise au point en éclairage cohérent

En éclairage cohérent, un défaut de mise au point ne se traduit pas par un manque de netteté de l'image, mais par des effets de diffraction; la figure observée est un diagramme de diffraction de Fresnel, que le principe de Huyghens permet de calculer.

Au cours de ces dernières années, de nombreux auteurs ont étudié ces phénomènes^{1),3),} ^(6),7),8),9),10),12). Le cas d'objets périodiques est particulièrement intéressant à étudier: l'interpretation des phénomènes est purement optique.

a) Le calcul montre que, pour un objet périodique de période *a*, la figure de défocalisation reste inchangée si le défaut de mise au point varie de $2 a^2/\lambda$. Pour un réseau plan à maille triangle, la défocalisation caractéristique est $1.5a^2/\lambda$.

L'expérience vérifie quantitativement ces conclusions de la théorie, en optique électronique comme en optique⁶.

Nous avons fait cette vérification sur des *objets biologiques* (coupes de vitellines-coupes de myéline). La vérification tentée sur des objets cristallins s'avère plus difficile. Pour expliquer ce résultat, on peut faire l'hypothèse que, pour des lames cristallines, de faibles changements d'orientation modifient la structure de l'onde transmise; ces changements, intervenant pendant la durée, assez longue, de la prise de vue d'une série défocalisée, gênent la vérification. Cette difficulté n'existe pas pour un objet périodique non cristallin, ce qui explique le succès du contrôle sur les objets biologiques.

b) L'observation d'aspects intermédiaires et, en particulier, la valeur de la défocalisation qui fait apparaître une fréquence double, peut fournir des informations supplémentaires sur l'onde électronique transmise par l'objet⁸⁾.

3. Microscopie électronique interférentielle

L'expérience d'interférence du biprisme de Fresnel, transposée en optique électronique, est maintenant bien connue^{4).15)}. On sait également qu'elle se prête à la réalisation d'un microscope électronique interférentiel, dans lequel l'image donne des informations sur l'intensité et *sur la phase* de l'onde transmise par l'objet. Sans nous attarder, nous nous proposons d'attirer l'attention sur quelques résultats récents concernant cette technique $^{5)}$.

a) L'expérience montre que, pour les objets d'épaisseur courante (400 à 600 Å), les franges d'interférences sont visibles et contrastées. Ce résultat démontre l'importance de la fraction cohérente dans l'onde transmise par l'objet, comme nous l'avons admis.

b) Rappelons que cette technique permet une mesure du potentiel interne moyen d'une substance, si on a préparé celle-ci sous la forme d'une lame mince *d'epaisseur connue*. La détermination de cette épaisseur est la seule partie délicate de cette mesure^{2),5)}.

c) Nous voulons insister sur le fait que la microscopie électronique interférentielle est maintenant une *technique simple*, d'un *emploi commode*. Malgré la nécessité d'utiliser comme source une fente très fine, il est possible d'observer une image dont le grandissement est 30.000 à 40.000, de l'enregistrer avec une durée de pose de 5 à 10 secondes, d'obtenir une résolution comparable à celle des appareils normaux (Fig. 1 et 2).

L'appareil que nous utilisons est un microscope électronique à lentilles magnétiques travaillant à 100 kV. Le canon est réglé pour une luminance supérieure à 100.000 A/cm²/st. L'orientation de la fente-source, la recherche des franges sont rendues relativement simples par quelques artifices de montage*. Grâce à la microscopie électronique interférentielle. il devient possible, comme en optique, d'obtenir des informations sur la phase de l'onde transmise par l'objet. Cela est particulièrement intéressant pour des objets périodiques (moirés, franges de lames cristallines etc...). On choisira l'excitation du biprisme pour que les deux images superposées soient décalées d'une demi-période. Pour un objet d'amplitude, les franges restent rectilignes. Pour un objet d'amplitude et de phase, le tracé des franges d'interférence donne la différence de phase de l'onde transmise en deux points distants d'une demi-période. C'est une information importante, qui peut aider à la compréhension de l'action de la lame sur l'onde incidente.

4. Contraste de phase en microscopie électronique

Le résultat concernant la microscopie in-

^{*} Nous ne pouvons entrer ici dans leur description. Nous renvoyons à une publication détaillée qui paraîtra prochainement.

terférentielle, ou l'influence d'un défaut de mise au point, montrent que la technique du contraste de phase est certainement valable en microscopie électronique.

Divers essais ont été tentés¹¹⁾. Mais la technique du contraste de phase exige qu'on respecte les conditions optiques imposées par la théorie. Ces conditions ne concernent pas seulement *l'epaisseur* de la lame de phase, mais aussi *la largeur de la source, la largeur de la lame de phase, la coincidence de l'image de la source avec la lame de phase.* L'expérience montre que ces dernières conditions sont beaucoup plus critiques que celles concernant l'épaisseur de la lame.

Nous renvoyons à (7) pour une description du montage utilisé, et nous présentons seulement, à titre d'exemple, les images de la Fig. 5 d'un même objet sans contraste de phase et en contraste de phase. Les essais se poursuivent à ce sujet.

References

- B. von Borries and F. Lenz: Proc. Stockholm Conf. (1956) 60-64.
- 2 R. Bülh: Z. Phys. 155 (1959) 395-442.
- 3 J. M. Cowley and A. F. Moodie: Proc. Phys.

Soc. **B70** (1957) 486–513.

- 4 J. Faget and Ch. Fert: Cahiers de physique 83 (1957) 285-296.
- 5 Ch. Fert and J. Faget: 4ème Conf. E. M. Berlin (1958) 234-239 (Ed: Springer).
- 6 M. Fagot and Ch. Fert: C. R. Acad. Sci. Fr. 250 (1960) 94-96.
- 7 J. Faget, M. Fagot and Ch. Fert: Conf. E.M. Delft (1960) 18-24 (Ed: Drukkerij Trio-The Hague).
- 8 M. Fagot, J. Ferré and Ch. Fert: C. R. Acad. Sci. Fr. 252 (1961) 3766–3768.
- 9 H. Gansler and Th. Nemetschek: Z. Naturforsch. 13 (1958) 190-192.
- 10 Y. Kamiya, M. Nonoyama and R. Uyeda: J. Phys. Soc. Japan 14 (1959) 1334–1346.
- 11 K. Kanaya and H. Kawakatsu: 4ème Conf. E. M. Berlin (1958) 308-316 (Ed: Springer).
- 12 L. W. Labaw: J. Ultrast. Research U.S.A. 4 (1960) 92–107.
- 13 A. Maréchal and M. Françon: Diffraction, structure des images, Paris (1960) (Ed: Revue d'Optique).
- 14 L. Marton: Science 118 (1953) 470-474.
- 15 G. Möllenstedt et H. Düker: Z. Phys. 145 (1956) 377–397.
- 16 R. Uyeda: J. Phys. Soc. Japan 10 (1955) 256– 264.
- 17 P. Selme: C.R. Acad. Sci. Fr. 252 (1961) 1293.