

This appears to be a reprise and summary of Leiden Communications 157-168 published in French from the April 1924 Solvay conference in Brussels and later to the 4th International Conference on Refrigeration in London, June 1924. This publication appears to summarize the situation as to which elemental metals superconduct (at least down to the lambda point of LHe) and those that do not..

COMMUNICATIONS
FROM THE
PHYSICAL LABORATORY
OF THE
UNIVERSITY OF LEIDEN

BY
H. KAMERLINGH ONNES,
Director of the Laboratory.

Supplement N^o. 50a
to Nos. 157-168.

H KAMERLINGH ONNES. — Rapport sur de nouvelles expériences avec les supraconducteurs.

(Reprint of the report presented to the fourth Conseil de Physique Solvay, hold at Bruxelles, April 1924 and to the Fourth International Congress of Refrigeration, London, June 1924, by the president of the First International Commission of the International Institute of Refrigeration, H. KAMERLINGH ONNES).

EDUARD IJDO — PRINTER — LEIDEN.

H. KAMERLINGH ONNES. — *Rapport sur de nouvelles expériences avec les supraconducteurs.*

§ 1. **Dégré d'invariabilité des courants dans les supraconducteurs.** — a) Depuis le dernier Conseil Solvay quelques expériences ont été faites au laboratoire de Leiden dont les résultats peuvent contribuer à préciser et à augmenter nos connaissances de la supraconductivité. Il a été démontré en premier lieu que la limite supérieure pour la résistivité micro-résiduelle, quoique elle fût déjà extrêmement petite, peut être reculée à une valeur plus petite encore. J'avais donné dans mon rapport au dernier Conseil Solvay pour cette limite pour le plomb 0,5. 10^{-10} de la valeur de la résistivité à 0° C. Cette valeur limite avait été obtenue par des mesures de différence de potentiel aux bornes d'un fil parcouru par un courant très fort. Il y avait déjà deux indications que cette limite était encore trop haute.

D'abord le coefficient d'extinction d'un courant persistant dans une bobine de plomb avait été calculé comme si la résistance microrésiduelle était une résistance ordinaire correspondant à la limite donnée. Il avait été trouvé une valeur environ deux fois plus grande que celle qui résultait de l'observation.

Une indication plus marquante encore avait été déduite par M. LANGEVIN de l'expérience, surprenante à première vue, où une bobine à circuit ouvert montrait un courant persistant. Je l'avais expliqué en remarquant que le courant prend son chemin le long de tous les tours de la bobine sur la partie de la surface du fil tournée vers l'extérieur de la bobine pour revenir par la partie de la surface tournée vers l'intérieur.

¹⁾ Voir la fin du § 1, Suppl. N° 44a II.

M. LANGEVIN calculait le temps qu'il faut au courant pour pénétrer à une certaine profondeur dans le conducteur comme s'il s'agissait d'un cas de résistance ordinaire. Il arrivait à la conclusion que cette pénétration aurait du être plus grande que le diamètre du fil. La résistivité microrésiduelle doit donc rester notablement au dessous de la limite dont nous avons parlé plus haut.

b) Il était donc bien désirable de faire des déterminations plus précises du degré d'invariabilité des courants persistants que celle que nous avons faites autrefois. Mais pour pouvoir attaquer ce problème il a fallu d'abord développer la classe de méthodes expérimentales indiquée dans le § 4 du précédent rapport.

Cela à son tour demandait, comme nous le verrons, un progrès ultérieur dans l'emploi de l'outillage pour faire des expériences avec l'hélium liquide, qui avait été reconstruit et perfectionné en vue de tels progrès en 1919. Il en avait été de même pour les recherches qui ont fait connaître la supraconductibilité et qui n'étaient pas possibles avant que nous ayons réussi à faire passer l'hélium liquide du liquéfacteur dans un cryostat dans lequel on pouvait plonger des appareils de mesure.

Quant aux méthodes de mesure que nous avons en vue elles font usage des courants persistants qu'on peut établir dans les supraconducteurs à l'aide de changements appropriés d'un champ magnétique et consistent dans la détermination des forces pondéromotrices causées par l'action électrodynamique de ces courants entre eux ou bien par l'action d'un champ sur ces courants. Pour les problèmes qui nous occupent dans le § présent et le § suivant la mesure des forces électrodynamiques semblait le plus indiquée. En effet si l'on fait usage d'un courant persistant dans un conducteur fixe on dispose d'un champ, qui, toutes les autres circonstances restant les mêmes, ne varie que dans les limites de la précision avec laquelle on pourra mettre à l'épreuve l'invariabilité du courant persistant.

Dans les expériences suivantes un anneau circulaire de plomb rendu supraconducteur est suspendu (voir fig. 1 et 2) au moyen d'une tige, de sorte qu'il peut tourner autour d'un axe vertical, dans un autre anneau circulaire, concentrique et coplanaire fixe, également en plomb rendu supraconducteur.

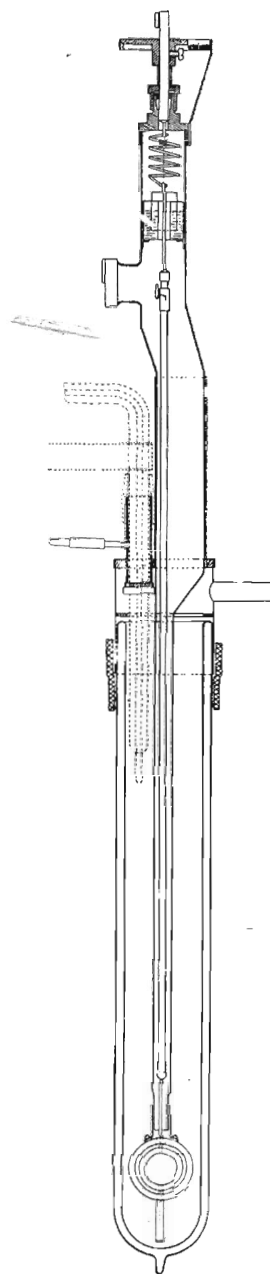


Fig. 1.

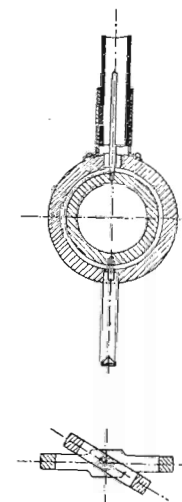


Fig. 2.

La tige est portée par un ressort de torsion et est en haut munie d'un amortisseur à palettes dans l'huile. On établit des courants persistants dans les deux circuits qui, le procédé fini, se trouvent en équilibre dans la position coplanaire. Ensuite on tourne la tête de torsion de sorte que le plan de l'anneau suspendu fait un angle, disons de 30° , avec l'anneau fixe (fig. 2).

On mesure l'action électrodynamique des deux circuits par l'angle de torsion du ressort et on constate une variation éventuelle par une lecture au miroir. C'est avec cet appareil plongé dans un cryostat, de sorte qu'on pouvait rendre les anneaux supraconducteurs en les refroidissant par l'hélium liquide, que M. TUYN et l'auteur ont constaté l'invariabilité de ces forces dans les limites de précision que permettent la précision des mesures des variations des angles d'un côté et le temps pendant lequel on pouvait poursuivre l'expérience d'un autre.

Il n'avait, comme il a été dit plus haut, pas été possible d'arriver dans nos mesures à une précision supérieure à celle de mes premières expériences sans le progrès fait depuis dans l'emploi de l'hélium liquide, auxiliaire indispensable pour étudier l'état supraconducteur. En effet la précision obtenue ne peut être atteinte que dans un local où l'appareil peut être placé sur un support à l'abri de trépidations. Aussi il est désirable que les changements de température dans cette salle ne soient que petites, e. a. pour n'avoir que des corrections très petites pour le changement de l'élasticité du ressort avec la température. Jusqu'à ces expériences-ci nous n'avions fait usage de l'hélium liquide que dans un cryostat uni à l'appareil de liquéfaction lui-même. Et le lieu où celui-ci se trouve ne répond pas aux exigences que nous venons de formuler. Il était donc nécessaire de réaliser la possibilité de faire des expériences avec l'hélium liquide dans d'autres locaux du laboratoire que celui où il est produit, réalisation posée en programme à la fin de mon discours Nobel de 1913. Pour les expériences présentes le problème a été résolu en enfermant l'appareil expérimental dans un cryostat transportable, qu'on peut remplir d'hélium liquide en siphonnant le gaz liquéfié du cryostat uni au liquéfacteur dans le cryostat transportable à l'aide d'un

siphon, faisant partie du cryostat fixe et dont la moitié extérieure peut par une sorte d'écluse entrer dans le cryostat transportable et en être retiré après. Lorsque le cryostat contenant l'appareil pour les recherches dont nous nous occupons à présent, après avoir été rempli avec l'hélium liquide, était détaché et transporté dans la cave où les observations seraient faites, je voyais, grâce à l'appui intelligent et dévoué du chef de service technique au laboratoire M. G. J. FLIM, commencer la réalisation de mon rêve de Stockholm.

Le cryostat transporté, l'étude des supraconducteurs d'après la méthode nouvelle pouvait commencer. Tout étant préparé dans la cave pour les observations du courant persistant dont il s'agit et l'hélium qui s'évapore étant recueilli d'une manière appropriée, on procédait à établir ce courant. Comme le métal refroidi dans l'hélium se trouve dans l'état supraconducteur il faut tirer parti d'un artifice que l'existence du champ-seuil permet d'appliquer. On commence l'expérience avec un champ plus intense que le champ-seuil et le diminue graduellement. Du moment où il atteint la valeur du champ-seuil la distribution des lignes de force à l'intérieur des anneaux ne varie plus, les surfaces des anneaux se couvrent chacune de la distribution de courant nécessaire à cet effet, qui continue à croître jusqu'à ce que le champ est totalement éteint et l'électro enlevé. On tourne alors le ressort de torsion de l'angle voulu, ce qui induit de nouveau un courant. Au commencement le courant varie encore un peu, ce qui du reste avait été aussi le cas après que le champ était éteint. Nous n'entrons pas dans les détails de cette première période de l'expérience. Elle est régie par la loi qui détermine le retour de la résistance en fonction du champ à une température donnée (voir § 3 et en particulier les figures 4). Après quelque vingt minutes l'état stationnaire est atteint et la période d'observation dont nous nous occupons commence. Elle est continuée aussi longtemps que les anneaux restent suffisamment immergés dans l'hélium liquide. Dans notre expérience c'était le cas pendant six heures. On n'a pu pendant tout ce temps constater que de très petites variations dans les positions des miroirs, lesquelles tout au plus laisseraient conclure à une augmentation du couple et il

semble qu'il faut en déduire que les courants restaient invariables dans la limite de la précision des expériences. Du reste, comme l'expérience était un premier essai et n'a pas encore été répétée avec de nouvelles précautions, ce qui fait que la précision expérimentale est bien au dessous de la précision d'observation, ce résultat ne peut être donné qu'avec toute réserve sur la limite de la précision atteinte. L'étude de cette limite n'est pas encore terminée mais provisoirement celle-ci peut-être posée à un 1750e, de sorte que, le couple étant proportionnel au produit des intensités des courants, on peut conclure à une variation de leur intensité *moindre qu'un 20000e par heure*.

c) La discussion de l'expérience n'est pas encore assez avancée pour donner un résultat numérique pour la limite de la *résistance microrésiduelle*, mais on peut arriver à une estimation provisoire en acceptant que le temps d'extinction est moindre que serait celui de l'anneau extérieur seul, s'il avait une self de valeur double de celle qu'il a en réalité. On trouve alors que la résistance du plomb ne peut, dans l'état supraconducteur, être posé au dessus du 10^{-12} de sa valeur à 0° C., c'est à dire que la limite de la résistivité microrésiduelle est reculée à une valeur *plus que dix fois plus petite* que celle que j'avais indiquée autrefois.

§ 2. **Invariabilité de la distribution des courants dans les supraconducteurs soumis à des forces pondéromotrices.** — a) Un second point qui est mis bien en évidence par une nouvelle expérience est que les électrons dans les supraconducteurs, libres de se mouvoir dans leurs trajectoires sans aucune résistance, sont guidés dans ces trajectoires comme s'ils glissaient dans leurs *filaments tubulaires fixes dans les supraconducteurs*. Cette expérience dans laquelle M. TUNN a voulu encore bien collaborer avec l'auteur est tout à fait analogue à celle du § 1.

Au lieu de l'anneau central on avait suspendu (voir fig. 3) une *boule creuse de plomb* (on aurait pu prendre aussi bien une couche mince étendue sur un boule de verre), on a produit comme dans l'expérience précédente à l'aide d'un champ perpendiculaire au plan de l'anneau fixe, une distribution de courants persistants sur la surface de la sphère sy-

métrique autour d'une axe dans le sphère perpendiculaire dans l'état d'équilibre au plan de l'anneau. En tournant la sphère autour de la verticale à l'aide du ressort à torsion on aboutit à une distribution autour d'un axe qui fait un angle avec la normale au plan de l'anneau. On examine au miroir son invariabilité. On n'a pu constater aucun changement dans le couple tout le temps que l'expérience a duré dans les limites de précision de l'expérience. Elle est plus grande que celle de l'expérience précédente. La tige du ressort passant par un presse-étoupe et pouvant donc tourner par relaxation de cette étoupe, un miroir était fixé en haut du ressort pour permettre une correction. On n'a pas encore atteint la précision qu'on pourrait attendre par le fait que les variations des angles étaient mesurées comme au § 1 sur une échelle à 350 cm. du miroir. Le couple qui maintenait la boule creuse dans cette position était $\frac{1}{2}$ seulement de celui dans le cas précédent. La durée de l'expérience n'a été qu'un peu plus longue.

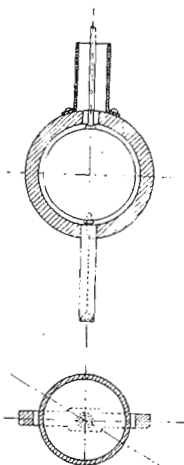


Fig. 3.

Avec toutes les réserves nécessaires parce que l'expérience n'a été faite qu'une seule fois, on peut conclure avec plus de sûreté que dans le § 1 à une invariabilité des courants au 20000me par heure près (nous ne donnons pas une valeur plus haute pour la précision parce que des effets de relaxation n'ont pas encore été assez étudiés). De la même manière qu'au § 1 il s'en suit que la limite supérieure de la résistivité microrésiduelle serait reculée peut-être à une valeur dix ou cent fois moindre que celle que j'avais indiquée au Conseil précédent. La couche de courants ne glisse pas au moindre degré sur la surface de la sphère.

C'est bien conforme à l'image des filaments fixes dans le supraconducteur, donné dans le rapport au Conseil précédent et le couple manifesté dans l'expérience présente fait bien sauter aux yeux que les électrons sont guidés dans leurs trajectoires par une action des atomes. Comme les courants persistants sont l'image des courants d'Ampère la nouvelle expérience

traitée dans ce § figure le changement adiabatique d'un état stationnaire de BOHR.

M. LORENTZ, que j'ai consulté sur quelques difficultés théoriques dans l'explication de l'expérience, m'a bien voulu communiquer qu'elle rentre sous un cas plus général qu'il a discuté¹⁾. Il en a déduit que c'est par d'autres forces que par celles exercées par des charges ordinaires qu'il faut expliquer les forces qui guident les électrons dans leurs filaments.

b) Il avait été déjà trouvé que lorsque une lame circulaire de plomb refroidi dans l'hélium liquide parcouru par un courant et muni d'électrodes secondaires et qui avait été pourvu de résistance ordinaire à l'aide d'un champ au-dessus de la valeur-seuil, redevenait supraconducteur par une diminution appropriée du champ, la différence de potentiel aux électrodes pour mesurer l'effet HALL, qui s'était montré auparavant, disparaissait. Les électrons sont guidés au delà de ces électrodes par les filaments, qui se cristallisent aussitôt que l'état supraconducteur s'établit. L'explication de M. LORENTZ des forces exercées par les filaments s'applique aussi à ce cas.

c) On se demande naturellement si le phénomène HALL n'est pas intimement lié aux phénomènes qui accompagnent le transport d'un électron d'un atome à un autre lorsque ce transport ne se fait plus comme dans les filaments supraconducteurs mais a lieu comme il se fait à une *rupture* dans le filament. Une même condition devait donc être remplie pour l'existence du phénomène HALL et de ses congénères, e. a. l'augmentation de la résistance ordinaire dans le champ d'un côté et du champ-seuil donnant la résistance ordinaire ainsi que du phénomène de la résistance ordinaire elle-même d'autre côté.

§ 3. Equivalence du champ-seuil et de la température. --

a) C'est à la connaissance des lois de l'apparition de la résistance ordinaire à un certain champ-seuil, fonction de la température, que se rapporte le troisième des progrès que nous pouvons signaler. L'idée vague d'une certaine équivalence de la température et du champ que j'avais avancée dans la question

¹⁾ Voir: Suppl. N^o. 50b.

8 du § 6 du rapport au précédent Conseil Solvay était devenue une hypothèse de travail dans la forme

$$H_T = H_0 - c_{HT} T.$$

Si cette formule est vraie le point de discontinuité d'un corps serait déterminé par le champ qui détruit la supraconductivité au zéro absolu et c_{HT} serait le même pour tous les corps. Elle peut être contrôlée par des données plus précises pour le plomb, l'indium et l'étain obtenu par des mesures de M. TUYN. Remarquons d'abord que la résistance ne passe pas d'une manière tout à fait brusque de la valeur zéro à

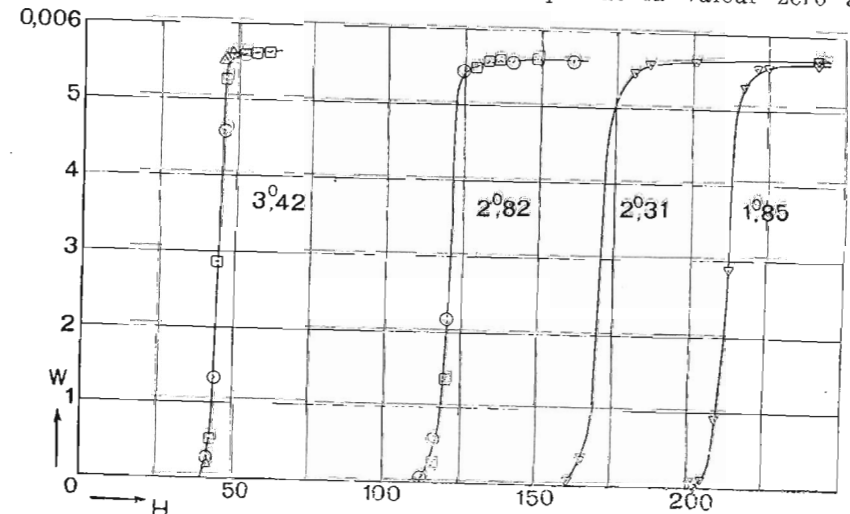


Fig. 4.

celle qu'elle montre aux champs élevés, mais qu'à chaque champ entre deux limites correspond une certaine résistance. Celle-ci passe de la valeur zéro au champ-seuil inférieur à la valeur de la résistance qu'on obtient en extrapolant la courbe des résistances dans le champ dans le domaine des résistances ordinaires jusqu'à ce qu'elle rencontre la courbe des résistances dans la région de transition (voir fig. 4, pour l'étain). Il est à observer de nouveau que parler de résistance n'est qu'une expression abrégée pour différence de potentiel etc.

Nous définirons plus précisément comme champ-seuil pour une certaine température le champ dans lequel la résistance

monte à la moitié de ce qu'elle devient au champ-seuil supérieur. Les mesures montrent qu'en effet le champ-seuil est en première approximation une fonction linéaire¹⁾ de la température dont

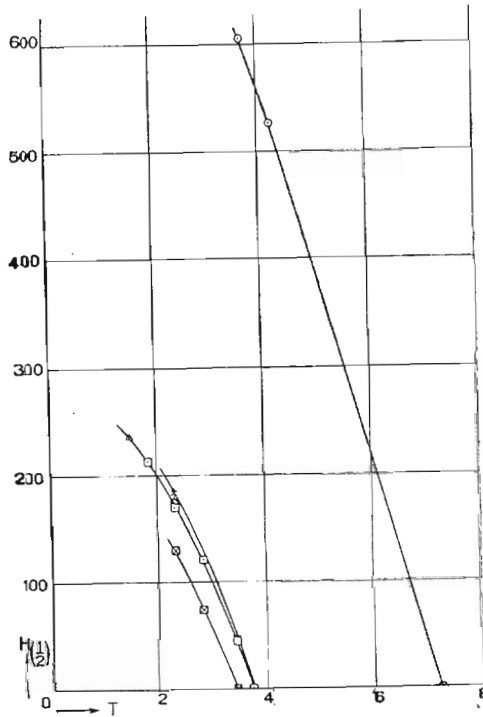


Fig. 5.

- ⊠ In — 1922 — A Champ transversal.
- Sn — 1922 — A (bande) „ „
- △ Sn — 1922 — I (fil.) „ „
- + Sn — 1922 — V (fil.) „ longitudinal.
- × Sn — 1923 — I (fil.) „ „
- Pb — 1923 — I „ transversal.

$H_{c(1)}$ champ pour lequel la résistance a monté jusqu' à la moitié.

¹⁾ Voir cependant une communication prochaine de M. TUYN et l'auteur où il est trouvé qu'une formule du second degré donne une meilleure représentation. Nous avons maintenu ici le texte original. [Note ajoutée pendant la réimpression].

la constante ne diffère que peu pour les diverses substances. En formulant le résultat ainsi nous faisons abstraction d'une petite courbure et des différences entre l'effet du champ transversal et du champ longitudinal.

La figure 5 résume les données plus précises.

A moins qu'en descendant à des températures plus basses encore que celles qui ont été atteintes il n'y ait de nouvelles surprises, et lorsqu'on fait abstraction de ce qui est observé quant à l'influence du champ dans le cas d'un échantillon de cadmium (voir § 5), il semble qu'on est autorisé à considérer c_{HT} comme une constante plus générale dont la théorie des quanta donnera l'explication et la valeur H_0 comme une constante particulière à chaque corps, liée intimement à la structure des corps en particulier. L'explication par la théorie des quanta du champ-seuil au zéro absolu semble très simplifiée parce que dans ce cas d'absence du mouvement calorifique il ne s'agit que de l'équilibre entre des groupes de trajectoires déterminées eux mêmes tout à fait par la théorie des quanta.

§ 4. Lorsque le plomb devient supraconducteur le réseau cristallin ne change pas. — M. LANGEVIN a avancé au premier Conseil Sôlvay l'idée qu'au point de discontinuité il y aurait passage du corps supraconducteur à une autre phase. On n'a pas encore fait des observations qui la confirment. M. BRIDGMAN y est revenu. Pour mettre à l'épreuve s'il y a un effet calorifique M. DANA de Harvard et l'auteur ont projeté une expérience avec un réservoir de thermomètre en étain contenant de l'hélium dont la pression indique la température. Nous voulions refroidir le réservoir à une température plus basse que le point de discontinuité et le laisser se réchauffer, de sorte qu'on pouvait voir si à la température de discontinuité quelque particularité se présentait dans la courbe d'échauffement. Des essais préliminaires ont déjà été fait, mais un arrangement satisfaisant n'a pas encore été obtenu.

Au lieu d'une transition de phase j'ai parlé toujours d'une *cristallisation électromagnétique*. Il s'agirait dans ceci d'un réarrangement des trajectoires électroniques et l'idée était qu'elle se fait sans que les noyaux des atomes se déplacent.

Les électrons trouveraient par ce réarrangement l'occasion d'ouvrir à quelques uns d'entre eux les trajectoires stationnaires macroscopiques qui caractérisent la supraconductivité. Ils nous présenteraient la solution d'un problème de la théorie des quanta. Les noyaux resteraient simplement en place.

Il y aurait moins de raison pour cette hypothèse s'il s'agissait au point de discontinuité principalement d'une transition ordinaire de phase, c. à. d. d'une telle que les noyaux prennent une autre constellation.

M. KEESOM et l'auteur ont pensé que l'analyse du plomb par des rayons Röntgen à l'aide de la méthode DEBYE—SCHERRER, rendue possible maintenant que nous disposons de l'hélium liquide transportable, pourrait décider de cette question.

Au dernier moment avant le Conseil présent M. KEESOM a réussi à obtenir un Röntgenogramme qui montre que (pour la plus grande partie au moins) le plomb, à la température de l'hélium liquide, conserve l'état cristallin qu'il a à la température de l'hydrogène liquide, lequel en outre est le même que celui à la température ordinaire.

§ 5. Effet d'une élévation élastique. Questions diverses. —

a) L'influence de la déformation élastique a été étudiée avec un fil d'étain par M. SIZOO et l'auteur; ils ont trouvé le résultat surprenant que la température de discontinuité est élevée par la traction (voir § 7d).

La figure 6 montre comment dans le domaine de conductivité ordinaire la résistance augmente avec la traction. Le fil dans l'expérience figurée avait un diamètre de 0,3 mm et fut chargé de 2,5 kgr par mm². Les abscisses de la figure donnent la température en mm. de pression de vapeur de l'hélium. 10 mm. correspondent à une différence de température de 0,015 degrés KELVIN. On a déterminé la résistance du fil sans charge et avec charge à des températures près du point de discontinuité. On voit les courbes se croiser¹⁾.

¹⁾ Cependant il est très bien possible que l'augmentation de la résistance dans le domaine de conductivité ordinaire, qui en outre n'est qu'un petit peu plus grande que la précision des mesures, doit être attribuée à des

b) Nous avons démontré avec la méthode du fil que la soudure étain-plomb n'a qu'une résistance insignifiante. Elle restait au dessous de la limite de ce qui pouvait être déterminé alors, prenant en considération la précision de nos mesures. M. EINSTEIN (voir Gedenkboek¹⁾, p. 435) s'en est laissé un

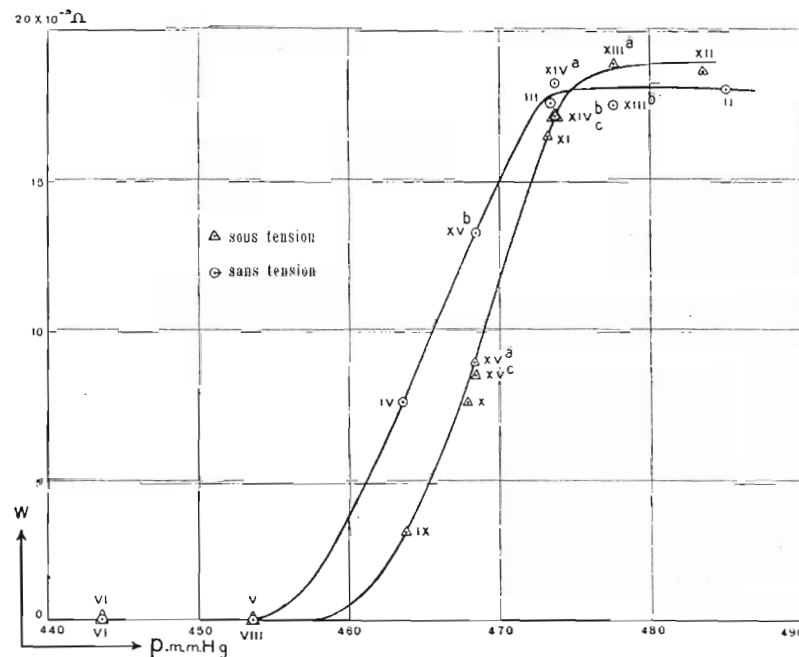


Fig. 6.

peu ébranler dans son idée que des circuits supraconducteurs ne peuvent pas être constitués par des atomes différents.

petites fractures qui se forment dans le fil sous l'influence de la traction.

Des mesures, concernant l'influence d'une pression uniforme sur la supraconductivité, faites après l'apparition de ce rapport et qui seront publiées dans une communication prochaine, ont montré que la température de discontinuité est diminuée par la pression, mais nous n'avons pas trouvé ici un changement de la résistance dans le domaine de conductivité ordinaire.

¹⁾ Het Natuurk. Laboratorium der R. U. te Leiden i. d. j. 1904—22. Gedenkboek aangeb. aan H. KAMERLINGH ONNES, enz. Leiden, E. IJdo, 1922.

Maintenant que nous avons à notre disposition une méthode pour mesurer ces petites résistances avec une précision bien plus grande, il était du plus haut intérêt de reprendre l'expérience. M. TUYN et l'auteur l'ont fait avec un anneau (voir fig. 7) composé de 24 secteurs d'étain et de plomb alternatifs. Chaque secteur était formé par un mince bande du métal couvrant la surface cylindrique de l'anneau.

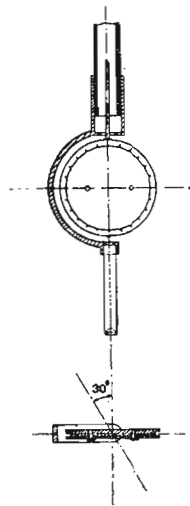


Fig. 7.

Les secteurs avaient été soudés ensemble en prenant soin que le milieu de chacun d'eux était tenu bien froid afin d'éviter toute diffusion du plomb dans l'étain. L'ensemble était porté par un anneau d'ivoire. La forme de bandes était choisie pour réduire autant que possible le nombre de lignes de force interceptées par l'anneau lui-même. Le courant était établi avec un champ perpendiculaire au plan de l'anneau, puis celui-ci était tourné d'un angle de 30°. Nous avions pensé que nous trouverions un courant qui prendrait un certain temps à s'éteindre. Mais l'expérience a montré que des courants continuaient à circuler dans l'anneau et lorsque l'expérience fut répétée avec l'anneau coupé celui-ci a montré le même moment magnétique.

L'expérience est encore tout à fait dans l'état d'ébauche. Autrement on serait déjà porté à la conclusion que les 24 points de contact entre les secteurs ont une résistance trop grande pour être mesurée par cette méthode, parce que le courant qui est induit dans le circuit complet de l'anneau à côté des courants persistants qui sont induits dans les secteurs individuels, s'éteint trop vite. L'idée d'EINSTEIN serait alors prouvée, mais ce ne peut être qu'à titre d'expérience en cours d'étude et pour neutraliser l'impression qu'aurait pu laisser le résultat de l'expérience mentionnée par lui, que nous en avons donné la description.

c) L'idée que l'état supraconducteur s'établirait d'une manière pour aussi dire instantanée a été le point de départ de recherches faites en collaboration avec MM. BREIT et TUYN, dans lesquelles on mesura la résistance d'un fil d'étain placé dans un champ

alternatif arrangé de telle manière que le fil était pendant une partie de l'oscillation au dessous et dans l'autre partie au dessus de la température de discontinuité pour un champ continu choisi, de sorte qu'à la température du conducteur il était dans ce champ à sa température de discontinuité.

La discussion de ces expériences n'est pas encore terminée; elle rendra probablement nécessaire de nouvelles déterminations. En attendant M. BREIT a élaboré les questions en rapport avec la pénétration des couches supraconductrices dans le conducteur¹⁾.

§ 6. Les corps supraconducteurs forment-ils une classe spéciale de corps? — a) Il semble de plus en plus que les corps supraconducteurs forment une classe spéciale de corps caractérisée par la possibilité d'un alignement spécial d'avoir lieu dans leurs atomes sous certaines conditions, comme le sont les ferromagnétiques de leur côté. La question s'il y a d'autres substances que celles qui étaient connues lors du Conseil précédent n'a en effet été répondu tout à fait par l'affirmative que pour l'indium, qui tient entre les corps une place tout proche de l'étain. Le point de discontinuité a été trouvé par M. TUYN et l'auteur à 3,°41 K. Il est donc situé plus bas que celui de l'étain de la même manière que celui de l'élément correspondant *Tl* est au-dessous de *Pb* sur l'autre ligne des corps supraconducteurs, *Hg*, *Tl*, *Pb*. (Voir pour le fait qu'en ce qui concerne le point de discontinuité le *Tl* est au-dessous de *Hg* et de *Pb*, § 7). Dans la fig. 8 nous reproduisons une figure antérieure, dans laquelle on a introduit l'*In*. La figure montre bien la valeur énorme de la discontinuité dans le cas des échantillons avec lesquels nous avons opéré (comp. § 2, b, β du rapport au Conseil précédent et Comm. N^o. 167a sur l'indium.)

b) Quant aux autres métaux, avec M. WOLTER j'ai constaté que le *Na* et le *K* fondus dans un capillaire de verre, avec M. TUYN que l'*Al* étiré en fil ne deviennent pas supraconducteurs lorsqu'on les refroidit jusqu'à 1°,5 K. Si l'on ajoute ces résultats à ceux obtenus précédemment il faut déjà qu'il y ait

¹⁾ Amsterdam Proc. 26 (1923), p. 529.

une raison spéciale qui fait penser qu'un métal peut devenir supraconducteur pour en entreprendre l'examen. De telles raisons peuvent être la sûreté d'avoir un métal de haute pureté, l'état cristallin e.a. Nous nous sommes (voir § 7) servis du tableau de MENDELEJEFF. En remontant dans les colonnes du *Hg*, du *Tl*

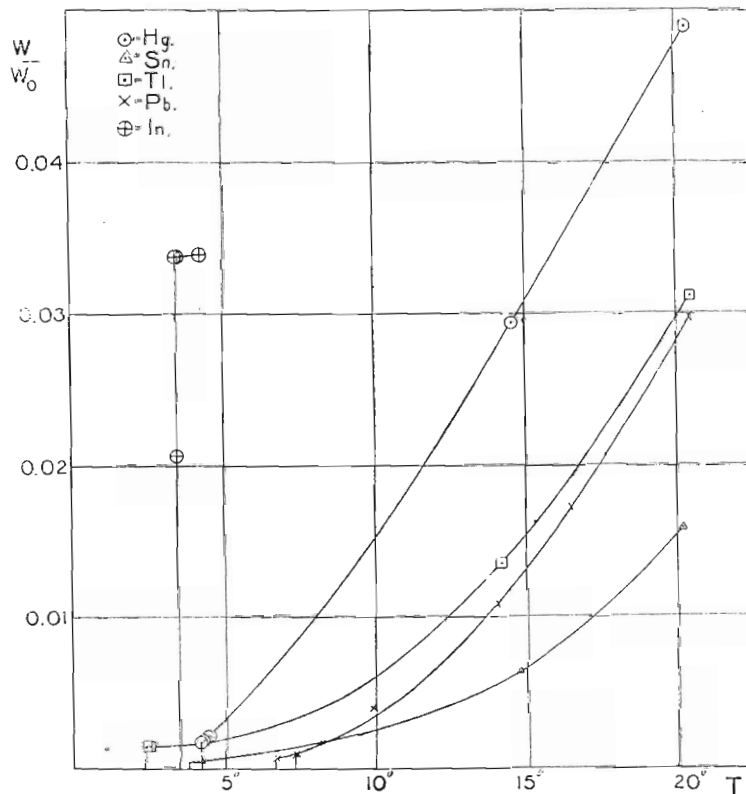


Fig. 8.

et du *Pb* on arrive au *Cd* et, en passant par l'*In* et le *Sn* au *Ga* et au *Ge*. C'est à ces corps que M. TUYN et moi nous sommes adressés d'abord. Quant au gallium nous étions encore sous l'impression de la remarque d'EINSTEIN que les métaux à point de fusion très bas ne contiennent les impuretés que dans des complexes séparés du métal lui-même.

c) Nous devons le *Ga* à la bienveillance de M. F. M. JAEGER de Groningue, le *Ge* à celle de M. D. COSTER de Haarlem, qui l'avait obtenu de M. DENNIS de Massachusets. Pour l'investigation de ces métaux rares et précieux nous avons pu faire usage de la méthode des courants persistants. Un anneau de *gallium* très mince fut obtenu en coulant le métal dans un moule de bois. Il était suspendu dans l'hélium liquide à un ressort bien plus faible que celui dont nous avons fait usage dans les expériences du § 1. L'anneau extérieur de plomb avait été enlevé parce qu'on avait à craindre qu'il donnerait par son courant persistant un champ au dessus du champ seuil éventuel du *gallium*. Comme il ne s'agissait pas d'une expérience comme celle du § 1 où l'anneau extérieur avait l'effet précieux de fournir un champ pratiquement invariable on pouvait se borner à établir le courant persistant par l'approche d'un aimant approprié, qui donnait un champ sous 45° avec le plan de l'anneau. On mesurait alors le couple exercé sur l'anneau lorsqu'on laissait diminuer le champ. Il ne fut pas trouvé de déviation persistante. Mais nous avons eu l'impression que la résistance était devenue très petite, ce qui sera examiné par de nouvelles expériences.

d) Quant au *germanium* il fut examiné par une autre méthode d'appliquer les courants persistants, spécialement adaptée pour l'examen des cristaux. Les cristaux étaient enfermés dans un petit tube de verre suspendu horizontalement à un ressort de torsion, de sorte qu'il pouvait tourner autour d'un axe vertical. Si la supraconductivité donnait lieu dans le champ à du pseudo-diamagnétisme on aurait pu mesurer la somme des couples des différents cristaux par la torsion. On n'a trouvé qu'une faible aimantation paramagnétique et nous n'avons pas obtenu la supraconductivité.

e) Reste le *cadmium*. Les mesures furent faites suivant la méthode des différences de potentiel aux bornes d'un fil parcouru par un courant. Avec le métal pur de KAHLBAUM obtenu en 1919 nous n'avons pas pu trouver la supraconductivité. Avec le métal pur qui nous avait été fourni aussi par KAHLBAUM à une occasion antérieure nous avons trouvé que la résistivité diminuait d'une façon continue au dessous de 4° K.

pour disparaître totalement à 3° K. Comme on trouve ce phénomène avec des fils lorsqu'on emploie des courants de mesure trop forts, les expériences ont été poursuivies avec des courants différents et dans des champs différents. L'allure avait grande ressemblance avec ce qu'on obtiendrait si un fil extrêmement mince de plomb parcourait le fil de cadmium et si la sensibilité de la résistance pour le champ était anormalement grande. Il a été constaté alors que ce fil avait été tiré par une ouverture par laquelle était passé auparavant un fil de plomb; on a pensé à une infection de la surface par le plomb. Mais un nouvel échantillon du même matériel, tiré par une ouverture fraîche, se comporta à de la même manière que celui qui avait montré les phénomènes curieux que nous venons d'énumérer. Il en a été de même lorsqu'on a fait une lame du même matériel en le passant au laminoir. On n'a pas encore pu trouver par voie chimique trace d'impureté. D'autres moyens de recherche sont envisagés. Il resterait l'explication qu'à côté de la modification ordinaire il y avait une modification à cristaux supraconducteurs répartis entre les cristaux ordinaires, hypothèse qui obtient une certaine valeur par l'observation de M. BRIDGMAN que par pression on obtient le cadmium dans une autre phase. L'influence de la température sur la pression d'équilibre qu'il a trouvée pourrait faire admettre que près du zéro absolu elle pourrait exister à pression atmosphérique. Pour le moment nous n'avons pas encore de certitude sur le caractère du cadmium.

Nous notons que si l'*Au*, le *Cd*, (à l'exception toujours de ce *Cd* très spécial que nous avons eu en mains et qui devient supraconducteur d'une manière spéciale), et le *Ga* ne deviennent pas supraconducteurs, ils s'approchent beaucoup de cet état. Pour l'or il est prouvé que sa résistance est extrêmement sensible pour des impuretés; on peut le rapprocher du fait que la formation de cristaux mixtes pourra jouer un rôle dans ceci. Elle contribuera à augmenter le nombre des centres de distorsion dans le réseau, qui pourraient être produits par une même quantité d'impuretés.

f) L'influence du traitement des métaux si intimement liée

à la question des modifications avec un réseau cristallin différent met en avant cette autre question, quelles sont les propriétés de ces cristaux dans les différentes directions. Les *monocristaux* qu'on a réussi à préparer dans ces temps derniers s'offrent naturellement pour l'expérience et la méthode des courants persistants semble tout à fait appropriée pour cette investigation. On peut alors même travailler avec un ensemble de morceaux unicristallins qu'on a orientés dans une même direction.

g) Tout ceci est dans l'état de préparation comme aussi l'examen des *couches minces* pour lesquels M. Sizoo a bien voulu coopérer avec l'auteur. On pourrait peut être obtenir des métaux de grande pureté dans cet état. Sous ce rapport nous rappelons ce que nous avons dit au § 1 quant à une boule de verre couverte d'une couche mince de métal. Pour le moment les couches superconductrices n'ont été le sujet que de recherches faites avec la méthode ordinaire. En harmonie avec ce qui est bien connu il a été trouvé que la résistance des couches très minces change avec le temps par coalescence et conglomération, de sorte que l'épaisseur des couches avec lesquelles nous avons travaillé a été choisie à 0,5 micron. Pour celles-ci le *point de discontinuité* est de 0,2 degrés centigrades *plus bas* que pour les fils. Le champ-seuil est environ le même que celui pour les fils et le courant-seuil ne diffère pas fortement de celui qu'on trouverait pour un même courant dans un fil de même section circulaire.

h) Une autre question à laquelle on est conduit aussitôt qu'on se demande la cause de l'influence des impuretés de laquelle nous avons parlé plus haut, est celle des *cristaux mixtes*.

Il semble même qu'elle peut conduire à connaître l'influence d'atomes étrangers introduits dans le réseau cristallin. Disposant du plomb et de l'étain comme supraconducteurs, du reste, se pose naturellement la question quelle serait la température de discontinuité pour les alliages de ces deux corps. Nous n'avons pas tardé d'attaquer cette question. La grande difficulté est d'obtenir des objets d'une homogénéité suffisante jusque dans les parties très petites. Jusqu'ici nous n'avons

pas encore réussi à obtenir des conducteurs construits d'alliages de plomb et d'étain qui ne devenaient pas supraconducteurs aussitôt qu'on descendait au-dessous de la température de discontinuité du plomb.

§ 7. **La structure des supraconducteurs.** — a) L'idée que les supraconducteurs forment une classe spéciale entre les corps comme le font les ferromagnétiques est appuyée par des conclusions qu'on peut tirer de l'inspection des tableaux bien connus représentant les propriétés physiques en fonction du nombre atomique. Prenons d'abord le tableau des poids atomiques lui même (tableau I), où nous avons marqué les supraconducteurs en caractères gras, les métaux qu'on trouve sur le point de le devenir en italiques. On voit bien comment les supraconducteurs s'arrangent en des groupes dont les limites se rétrécissent pour les nombres atomiques inférieurs; la fin se trouve près du gallium.

La figure des volumes atomiques (fig. 9)¹⁾ nous fait voir qu'il y a à la place que les supraconducteurs y occupent une petite fluctuation dans la courbe, un petit renflement en avant de la montagne qui le suit, bien prononcé et bien spécial, et remarquable parce qu'il se répète pour se perdre près du Ga dans une colline séparée. On retrouve cette fluctuation dans les tableaux des inverses des points de fusion (T), des coefficients de dilatation thermique (α) et des compressibilités (κ , voir fig. 10). J'ai pensé qu'une analogue particularité devrait se montrer d'une manière bien plus lumineuse dans les données sur la structure de l'atome. La consultation du tableau dans le travail de MM. BOHR et COSTER²⁾ qui exprime le résultat de la théorie de BOHR quant à cette structure a confirmé cette idée. Dans notre tableau analogue (tableau II, p. 24) quelques données supplémentaires sont incorporées.

En caractères soulignés on y trouve les groupements qui

¹⁾ Reproduite, ainsi que la fig. 10, du livre de SOMMERFELD: „Atombau und Spektrallinien“.

²⁾ Zs. f. Phys. 12 (1922), p. 342.

TABLEAU I

	30 Zn 65.37	31 Ga 69.9	32 Ge 72.5	
	48 Cd 112.40	49 In 114.8	50 Sn 118.7	51 Sb 102.2
	56 Ba 137.37			73 Ta 181.5
79 Au 179.2	80 Hg 200.6	81 Tl 204.0	82 Pb 207.20	83 Bi 209.02
	88 Ra 226.0	89 Ac (226)	90 Th 232.15	

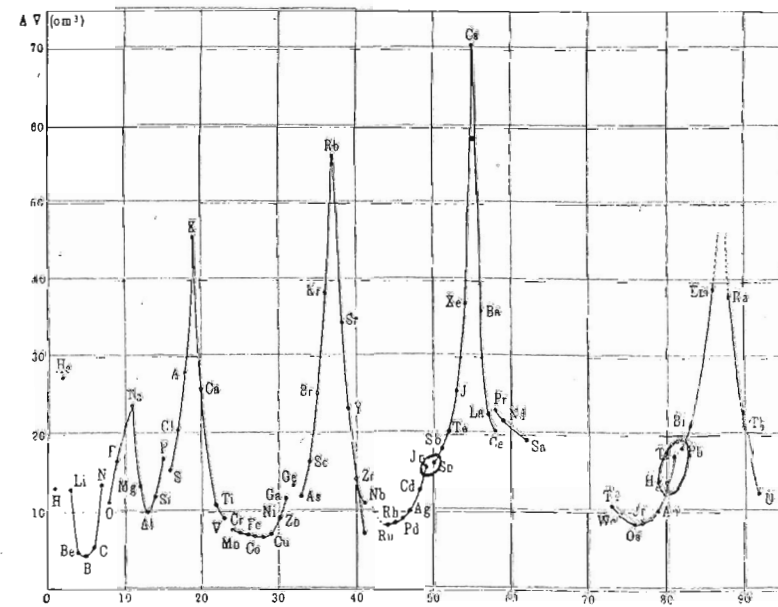


Fig. 9.

T A B L E A U I I.

$\begin{matrix} n \\ N \end{matrix}$	1	2, 2 ₂	3, 3 ₂ 3 ₃	4, 4 ₂ 4 ₃ 4 ₄	5, 5 ₂ 5 ₃ 5 ₄ 5 ₅	6, 6 ₂
10 Ne	2	4 4				
11 Na	2	4 4	1			
12 Mg	2	4 4	2			
13 Al	2	4 4	2 1			
18 A	2	4 4	4 4			
19 K	2	4 4	4 4	1		
20 Ca	2	4 4	4 4	2		
21 Sc	2	4 4	4 4 1	(2)		
29 Cu	2	4 4	6 6 6	1		
30 Zn	2	4 4	6 6 6	2		
31 Ga	2	4 4	6 6 6	2 1		
32 Ge	2	4 4	<u>6 6 6</u>	<u>2 (2)</u>		
36 Kr	2	4 4	6 6 6	4 4		
37 Rb	2	4 4	6 6 6	4 4 1		
38 Sr	2	4 4	6 6 6	4 4 2		
47 Ag	2	4 4	6 6 6	6 6 6	1	
48 Cd	2	4 4	6 6 6	<u>6 6 6</u>	2	
49 In	2	4 4	6 6 6	<u>6 6 6</u>	2 1	
50 Sn	2	4 4	6 6 6	6 6 6	2 2	
51 Sb	2	4 4	6 6 6	6 6 6	2 (3)	
54 X	2	4 4	6 6 6	6 6 6	4 4	
55 Cs	2	4 4	6 6 6	6 6 6	4 4	1
56 Ba	2	4 4	6 6 6	6 6 6	4 4	2
79 Au	2	4 4	6 6 6	8 8 8 8	6 6 6	1
80 Hg	2	4 4	6 6 6	8 8 8 8	6 6 6	2
81 Tl	2	4 4	6 6 6	8 8 8 8	6 6 6	2 1
82 Pb	2	4 4	6 6 6	8 8 8 8	6 6 6	2 2
83 Bi	2	4 4	6 6 6	8 8 8 8	6 6 6	2 (3)

feraient espérer de trouver de nouveaux cas de supraconductivité d'après ce qu'on sait des groupements qui donnent la supraconductivité. Pour les cas où la supraconductivité a été trouvée les caractères sont en noir. Les données incertaines sont marquées entre parenthèses.

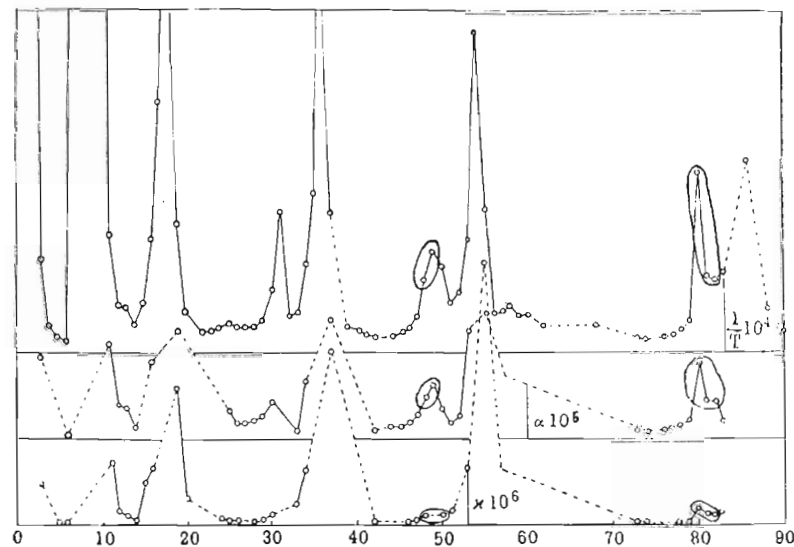


Fig. 10.

On y lit l'influence du développement de la symétrie sphérique des couches d'électrons constitutifs avec le nombre atomique croissant; il semble qu'il faut les 18, mieux encore les 18 supportés par les 32, pour arriver à la supraconductivité. Le nombre des électrons de valence ne doit être que restreint, de sorte qu'ils ne se gênent pas mutuellement: le *Bi* ne devient pas supraconducteur. On doit se trouver avec l'atome, quant à sa formation, dans le commencement du développement d'une nouvelle couche, il faut qu'il y ait au moins une paire d'électrons de valence; un seul électron ne suffit pas pour donner l'harmonie nécessaire; l'or ne devient pas supraconducteur, il ne reste que les groupements (2), (2,1), (2,2). Avec le (2,3) c'est fini. Le (2,1) donnant moins de chances que le (2,2) comme il suit de l'*In* comparé au *Sn* et du *Tl* comparé avec le *Hg*, on donnerait

plus de chances au *Ge* qu'au *Ga*; ce peut être le grand nombre des électrons de valence dont l'influence n'est pas assez contrebalancée par l'avantage que fournit le nombre pair, qui empêche la transition à l'état supraconducteur.

b) J'ai désiré avoir pour mieux juger de tout ceci des dessins sur échelle donnant les orbites des électrons de valence comme ils seraient dans l'état gazeux et dessinés dans le réseau cristallin. D'un autre côté, et non moins, je désirais d'en disposer en même temps que des données (s'il y en avait) sur le mouvement des électrons de valence dans le cristal pour m'aider à me figurer d'une manière plus détaillée le transport des électrons des courants dans leurs trajectoires, guidés par les filaments supraconducteurs dont j'ai parlé dans le rapport au Conseil précédent. J'avais accepté l'idée d'EINSTEIN que les électrons qui sont en jeu dans la conductivité d'un métal solide ont des vitesses de même ordre que celles des électrons de valence dans les atomes libres, ce qu'on peut appuyer par la considération suivante:

Lorsqu'on passe de l'état de vapeur du métal à l'état liquide la conductivité métallique sera engendrée d'une manière continue, processus qu'il serait hautement intéressant de suivre expérimentalement. Le passage discontinu par le point de fusion au métal cristallisé n'apporte pas de changement fondamental dans la conductibilité.

Dans la collision d'un atome positif avec un atome neutre de la vapeur on aura déjà l'image de ce qui arrive avec le passage des électrons parmi les atomes dans l'état solide. Les ruptures de trajectoires stationnaires, comme nous supposons qu'elles peuvent avoir lieu lorsque la supraconductibilité est détruite et qu'il y a transport d'énergie sur un degré de liberté calorifique, auront lieu d'une manière analogue dans ce cas plus simple.

Retournant aux mouvements des électrons conducteurs dans leurs trajectoires guidées, je m'étais figuré qu'ils marchent dans leurs filaments en entrant et en sortant des atomes y faisant peut être des mouvements en rosettes dans des plans qui eux-mêmes montrent une précession. La cristallisation des trajectoires électroniques au point de discontinuité unirait les

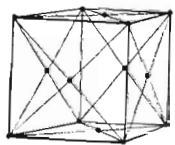
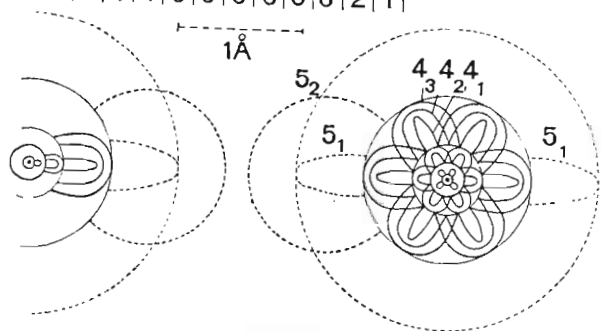
atomes d'un filament dans un ensemble où les conditions seraient réalisées qui permettent qu'un électron sortant d'un des atomes peut passer à un atome voisin sans quitter une trajectoire de BOHR, parce qu'il y arrive juste à temps et dans les conditions nécessaires pour y poursuivre son chemin dans une telle trajectoire. On comprend alors que le champ, en faisant tourner les trajectoires avec une vitesse autre que la vitesse normale, détruit l'harmonie des mouvements; il y aura une rupture du filament et le processus qui fait alors passer l'électron de l'atome qui le contient au suivant donne la résistance. L'agitation calorifique, lorsqu'elle pénètre dans le filament, y produira une rupture d'une manière analogue.

c) Des dessins comme ceux dont j'ai parlé plus haut me semblaient très désirables aussi de ce point de vue. Je me suis adressé à M. KRAMERS de Copenhague, qui a bien voulu venir discuter ces idées avec moi et c'est à sa bienveillance que je dois les dessins suivants (figg. 11—16). Les trois premiers qui se rapportent à l'indium, le baryum et l'or donnent une idée approximative de la position relative de deux atomes qui se trouvent à la distance la plus courte dans le réseau. En outre on a donné en bas de chaque dessin une esquisse du réseau du métal. Quant à la structure électronique de l'atome on a désigné d'une manière schématique la forme des orbites électroniques qui selon BOHR constituent les diverses couches dans l'intérieur de l'atome. La théorie des quanta ne nous raconte rien concernant les électrons qui se meuvent principalement à l'intérieur de la couche complétée de 18 où de 8 électrons et qui prennent part au mécanisme de la conduction du courant électrique, mais elle nous fournit des données regardant les orbites de ces électrons dans l'atome libre. De chacune de ces orbites, qu'on peut décrire comme un mouvement en rosettes (voir plus haut), un seul pétale a été dessiné en ligne pointillée et caractérisé de la manière en usage dans la théorie des quanta.

Les figures 14, 15 et 16 donnent d'une manière analogue une revue complète de la position relative des atomes voisins et de la grandeur approximative des couches électroniques pour tous les métaux où un petit nombre d'électrons de valence se meuvent

Indium 49

1	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5
₁	₁	₂	₁	₂	₃	₁	₂	₃	₁	₂
2	4	4	6	6	6	6	6	6	2	1

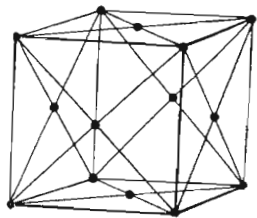
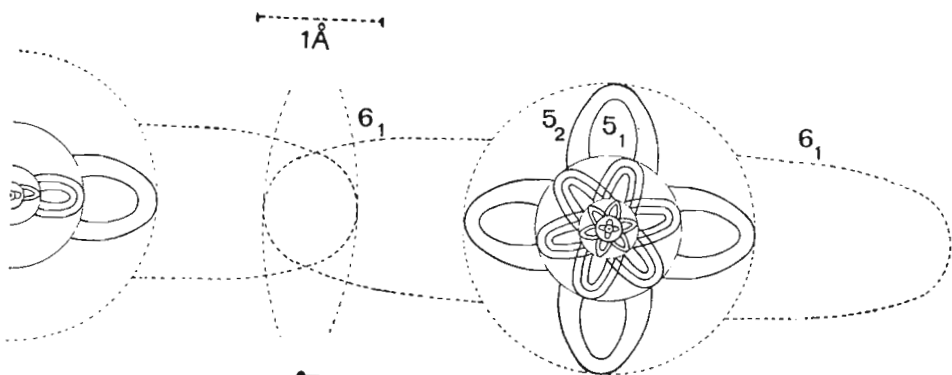


1 Å

Fig. 11.

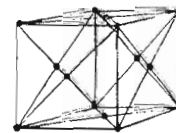
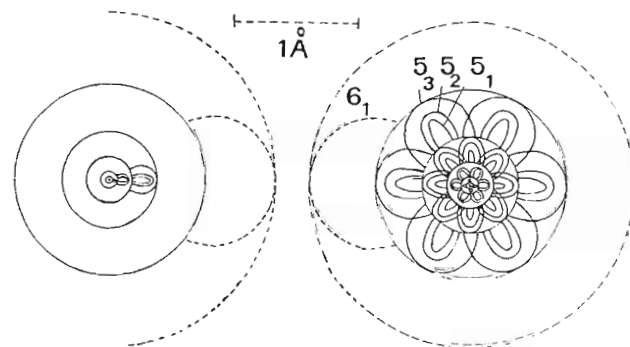
Ba 56

1	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	6
₁	₁	₂	₁	₂	₃	₁	₂	₃	₁	₂	₁
2	4	4	6	6	6	6	6	6	4	4	2



Au 79

1	2	2	3	3	3	4	4	4	4	5	5	5	6
₁	₁	₂	₁	₂	₃	₁	₂	₃	₄	₁	₂	₃	₁
2	4	4	6	6	6	8	8	8	8	6	6	6	1



1 Å

Fig. 13.

$\frac{6_1 6_2}{1 -}$			Au 79
$\frac{6_1 6_2}{2 -}$			Hg 80
$\frac{6_1 6_2}{2 1}$			Tl 81
$\frac{6_1 6_2}{2 (2)}$			Pb 82
$\frac{6_1 6_2}{2 (3)}$			Bi 83

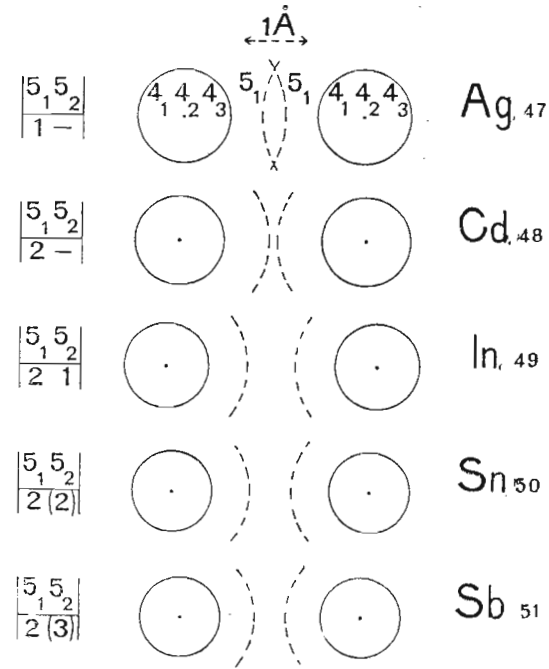
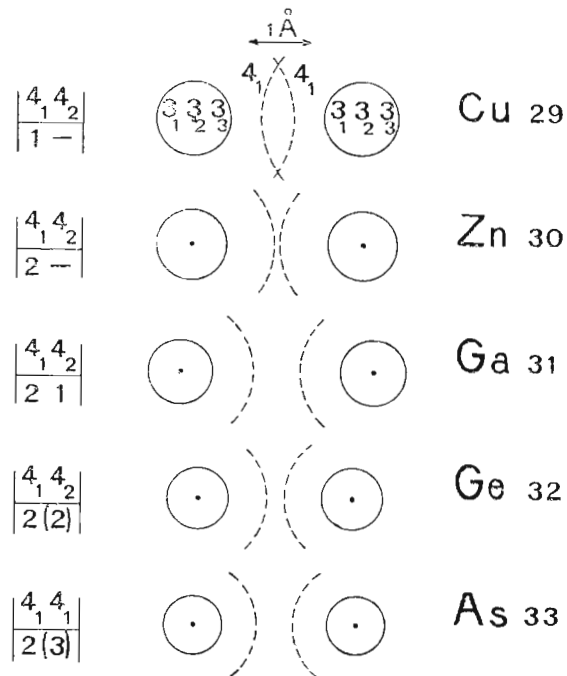


Fig. 15.



autour d'une couche complète de 18 électrons. Entre eux se trouvent tous les métaux supraconducteurs. Pour les corps où le réseau du cristal n'est pas encore déterminé (Tl, Ga, As), on a estimé la distance entre les atomes à moyen d'une comparaison avec le réseau d'un corps homologue.

Le cercle en ligne pleine représente partout la sphère qui contient toutes les orbites du groupe complet de 18 électrons. Les arcs circulaires en lignes pointillées représentent la limite de la région à l'intérieur de laquelle se meut, dans l'atome libre, l'électron ou les électrons pour lesquels le nombre quantique azimutal (le nombre k dans le symbole n qui dans la théorie désigne les orbites) est égal à 1. A gauche on a ajouté le nombre d'électrons de valence qui se meuvent dans les orbites du type désigné. (Un nombre entre parenthèses désigne une incertitude de la théorie).

d) Ce que ces figures mettent particulièrement en lumière c'est la distance relativement grande, qui, dans le cas des supraconducteurs, s'ouvre entre les atomes. Très remarquable est la diminution considérable de cette distance lorsqu'on passe du Pb au Bi. L'espace libre est moindre dans la ligne Ag-Sb que dans la ligne Au-Bi. On comprend de cette manière qu'avec le Cd les circonstances sont beaucoup moins favorables pour la supraconductivité.

De nouveau pour les éléments Cu-As le place libre est encore plus petite que pour les éléments de la ligne Ag-Sb. Sur la ligne Cu-Ge on ne donnerait une chance qu'au Ga. Le dessin exclut pour ainsi dire le Ge. Dans cet ordre d'idées on ne donnerait aucune chance au Ba¹⁾.

On voit que ces considérations obtiennent du relief lorsqu'on les rapproche au résultat (voir § 5 a) que l'élongation d'un fil conducteur est favorable à développer la supraconductivité.

L'espace libre étant augmenté, la probabilité que les électrons peuvent trouver un chemin plus long de mouvement stationnaire sans ruptures est augmenté aussi, l'amplitude des oscillations

¹⁾ En consultant les dessins il faut tenir aussi compte des forces dans le réseau, comme M. KRAMERS l'a fait en élaborant ces dessins. Je lui dois la note suivante:

calorifiques peut devenir plus grande sans donner lieu à une rupture, autrement qu'à des distances macroscopiques. Si

Tableau des forces qui tiennent les atomes en équilibre dans le réseau cristallin.

$\text{Cu} \frac{315}{63,6}$	$\text{Zn} \frac{235}{65,4}$				
$\boxed{2510}$	$\boxed{1900}$				
$\text{Ag} \frac{212}{108}$	$\text{Cd} \frac{168}{112,4}$		$\text{Sn} \frac{(185)}{118,7}$		
$\boxed{2200}$	$\boxed{1780}$		$\boxed{(2010)}$		
$\text{Au} \frac{166}{197}$	$\text{Hg} \frac{97}{200,6}$	$\text{Tl} \frac{96}{204}$	$\text{Pb} \frac{83}{207,2}$	$\text{Bi} \frac{111}{209}$	
$\boxed{2330}$	$\boxed{1370}$	$\boxed{1370}$	$\boxed{1265}$	$\boxed{1600}$	

Explication du symbole Élément $\frac{A}{B}$
 \boxed{C}

A représente la température critique Θ de DEBYE, qui est liée à la fréquence infra-rouge ν des atomes dans le réseau par la relation

$$\Theta = \frac{h\nu}{k} \quad [h = \text{const. de PLANCK} \\ k = \text{const. de BOLZMANN}],$$

B représente le poids atomique,

C est égal à $A\sqrt{B}$, et donc proportionnel à la racine carrée de la force qui agit sur un atome qui a subi un déplacement donné.

Remarquez les petites valeurs de C pour des supraconducteurs dans les éléments de la troisième ligne.

Les valeurs de A sont pris d'un article de SCHRÖDINGER (Physik. 20 (1919) p. 420 et ss.) sur l'énergie calorifique des solides. La valeur pour l'étain (Sn) est incertaine; elle est seulement déduite des constantes d'élasticité pour l'étain blanc.

Les données sur les réseaux cristallins sont prises du livre de EWALD. Pour les métaux suivants il y avait des incertitudes.

Hg. Nous avons préféré les données américaines, qui diffèrent de celles d'AMINOFF. [M. KOLKMAYER, qui s'occupe d'une recherche du réseau de Hg solide, a bien voulu nous communiquer qu'aux très basses températures ses résultats sont d'accord avec ceux des savants américains. (Note ajoutée pendant la réimpression)].

Sn. Nous avons pris les données pour l'étain blanc, quoique l'étain gris soit plus stable à des températures basses.

l'espace libre n'admet pas cette solution l'aspect des choses change complètement. Dans ce cas une distance plus grande entre les atomes peut avoir un effet contraire, elle peut devenir nuisible à ce que plusieurs orbites se réunissent et de cette manière elle peut nuire à la conductibilité. Les ruptures seront en général plus nombreuses ou plus intenses si le degré de distorsion du champ entre les atomes augmente, soit par le mouvement calorifique, soit par l'influence d'un champ magnétique ou bien par l'intrusion d'autres atomes comme impuretés dans le réseau.

e) Dans les études qui se présentent et qui comportent du reste tout un programme de travail expérimental aux très basses températures on pourra se servir de dessins analogues à ceux que nous venons de donner. On y figurera des données sur la distorsion du réseau, les oscillations calorifiques, la pulsation des forces, les régions d'équilibre indifférent. Il y a toute raison pour espérer que de cette manière on arrivera à des points de vue nouveaux tant qu'on se borne à des questions un peu générales.

Tl. Le réseau n'a pas encore été déterminé. Nous avons supposé qu'il est conforme au réseau de l'indium. [Tétragonal, presque cubique: à faces centrées].

Ba. Le réseau n'est pas encore déterminé. Nous l'avons supposé conforme à celui de Ca [cubique: à faces centrées].

Quant à la grandeur et la forme des orbites électroniques, nous avons pris la théorie de BOHR pour base. [voir la troisième des „Trois Conférences" de BOHR („Three essays Cambridge", „Drei Aufsätze", Vieweg), ainsi que l'article dans les „Annalen der Physik" 1923, Heinrich Kayser Festschrift]. Dans certains cas il a même été possible de calculer les orbites des électrons de valence avec une approximation assez grande. Pour les couches complètes la théorie permet une détermination plus ou moins exacte. Où il y a quelque incertitude, des analogies dans la théorie des spectres, et des données chimico-physiques sur la grandeur des ions ont pu servir de guide (Comparez par exemple un résumé de K. HERZFELD sur la grandeur des atomes dans le „Jahrbuch für Radioaktivität und Elektronik" de 1922, et un article de H. GRIMM dans le „Zeitschrift für physikalische Chemie" 98 (1921) p. 353. Voyez surtout le tableau à la p. 390 de cet article).

Pour le moment, vu l'état de la théorie des quanta, il semble que ce serait tout à fait prématuré de vouloir se former des images plus détaillées, comme j'avais eu en vue, du mouvement des électrons conducteurs.

Mais on voit poindre la lumière que l'application de cette théorie apportera.

COMMUNICATIONS

FROM THE

PHYSICAL LABORATORY

OF THE

UNIVERSITY OF LEIDEN

BY

H. KAMERLINGH ONNES,

Director of the Laboratory.

Supplement N^o. 50b

to Nos. 157-168.

H. A. LORENTZ. — On the motion of electricity in a spherical shell placed in a magnetic field.

(Reprinted from the Reports and Communications presented by the president of the First International Commission of the International Institute of Refrigeration, H. KAMERLINGH ONNES, to the Fourth International Congress of Refrigeration, London, June 1924).