

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 85 (1959)
Heft: 25

Artikel: Problèmes et importance de la physique des basses températures
Autor: Rinderer, L.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-64150>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 04.05.2025

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

BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

paraissant tous les 15 jours

ORGANE OFFICIEL

de la Société suisse des ingénieurs et des architectes
de la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes (S.V.I.A.)
de la Section genevoise de la S.I.A.
de l'Association des anciens élèves de l'EPUL (Ecole polytechnique
de l'Université de Lausanne)
et des Groupes romands des anciens élèves de l'E.P.F. (Ecole
polytechnique fédérale de Zurich)

COMITÉ DE PATRONAGE

Président: J. Calame, ing. à Genève
Vice-président: E. d'Okolski, arch. à Lausanne
Secrétaire: S. Rieben, ing. à Genève

Membres:

Fribourg: H. Gicot, ing. ; M. Waeber, arch.
Genève: G. Bovet, ing. ; Cl. Groscurin, arch. ; E. Martin, arch.
Neuchâtel: J. Béguin, arch. ; R. Guye, ing.
Valais: G. de Kalbermatten, ing. ; D. Burgener, arch.
Vaud: A. Chevalley, ing. ; A. Gardel, ing.
M. Renaud, ing. ; Ch. Thévenaz, arch.

CONSEIL D'ADMINISTRATION

de la Société anonyme du « Bulletin technique »

Président: A. Stucky, ing.
Membres: M. Bridel ; R. Neeser, ing. ; P. Waltenspühl, arch.
Adresse: Ch. de Rosneck 6, Lausanne

RÉDACTION

D. Bonnard, ing.
Rédaction et Editions de la S. A. du « Bulletin technique »
Tirés à part, renseignements
Adresse: Case Chauderon 475, Lausanne

ABONNEMENTS

1 an	Suisse Fr. 26.—	Etranger. . . Fr. 30.—
Sociétaires	» » 22.—	» . . » 27.—
Prix du numéro	» » 1.60	

Chèques postaux: « Bulletin technique de la Suisse romande »,
N° II 57 75, Lausanne.
Adresser toutes communications concernant abonnement, changements
d'adresse, expédition, etc., à: Imprimerie La Concorde, Terreaux 29,
Lausanne

ANNONCES

Tarif des annonces:

1/1 page	Fr. 275.—
1/2 »	» 140.—
1/4 »	» 70.—
1/8 »	» 35.—

Adresse: Annonces Suisses S. A.
Place Bel-Air 2. Tél. (021) 22 33 26. Lausanne et succursales



Problèmes et importance de la physique des basses températures, par Dr. L. Rinderer, Laboratoire de physique de l'Université de Lausanne.

Actualité industrielle (8).— Actualité aéronautique (XVIII).

Société suisse des ingénieurs et des architectes.

Divers. — Bibliographie. — Documentation générale. — Documentation du bâtiment.

PROBLÈMES ET IMPORTANCE DE LA PHYSIQUE DES BASSES TEMPÉRATURES

Dr. L. RINDERER, Laboratoire de physique de l'Université de Lausanne, 3, Place du Château, Lausanne.

Introduction

A la fin du XVIII^e siècle, Monge et Clouet réussirent pour la première fois à liquéfier un gaz (CO₂). Dès lors les physiciens cherchèrent à liquéfier et ensuite à solidifier tous les gaz connus. Au début on voulait simplement montrer que toute substance pouvait exister sous forme solide, liquide ou gazeuse ; ensuite, la liquéfaction ou la solidification des gaz ne fut pas le seul but visé ; on y vit un moyen d'atteindre de très basses températures, pour étudier l'influence que celles-ci exercent sur les propriétés de la matière. L'idée de l'existence d'un zéro absolu remonte à la fin du XVII^e siècle, et est due à Amontons ; mais ce n'est qu'en 1820 que Gay-Lussac, par une étude systématique de l'influence de la température sur le comportement d'un gaz, put fixer d'une façon relativement précise la valeur du zéro absolu. Il trouva en effet que le rapport

$$\frac{p \cdot v}{1 + \alpha \cdot t}$$

est une constante aux températures ordinaires. p désigne la pression, v le volume et t la température centigrade d'un gaz, α est une constante, la même pour tous les

gaz parfaits. De la valeur de cette constante $\alpha = \frac{1}{273}$, on put facilement conclure que si l'on refroidissait le gaz jusqu'à une température égale à -273° on pourrait annuler soit sa pression, soit son volume.

Actuellement la température du zéro absolu est connue avec grande précision et vaut :

$$t = -273,16^{\circ}\text{C.}$$

En 1848, Lord Kelvin proposa l'échelle absolue des températures dont le zéro est précisément le zéro

absolu. La température absolue T est reliée à la température centigrade t par la relation

$$T = t + 273,16$$

T est mesurée en degrés Kelvin.

Au début de la seconde moitié du XIX^e siècle, le développement de la théorie cinétique des gaz montra la signification réellement physique de cette nouvelle échelle, par opposition aux autres échelles à caractère arbitraire telles que l'échelle centigrade ou Celsius ou encore l'échelle Fahrenheit.

La théorie cinétique des gaz montre en effet que ce qui importe dans les phénomènes physiques, ce n'est pas une différence de température, mais bien le rapport des températures absolues. La température absolue peut être envisagée comme une mesure directe de l'énergie moléculaire. Par exemple, l'énergie cinétique d'une molécule de gaz monoatomique vaut $3/2 kT$; elle est donc directement proportionnelle à cette température. k est la constante universelle de Boltzmann.

Refroidir un gaz revient ainsi à diminuer l'énergie cinétique de ses molécules.

Liquéfaction des gaz : aperçu historique

Faraday est le pionnier de la technique de liquéfaction : il réussit en 1823 à liquéfier du gaz carbonique par compression à la température ordinaire. En 1845, il atteint une température de -110°C par vaporisation forcée d'un mélange réfrigérant d'éther et de gaz carbonique. Il n'arrive pourtant pas à liquéfier une série de gaz tels que l'oxygène, l'azote et l'hydrogène, malgré une suite d'essais très systématiques ; pour cette raison, il les nomme gaz permanents.

Cailletet, en 1877, liquéfie l'oxygène, gaz dont le point d'ébullition aux conditions normales se situe à -185°C . En laissant se détendre du gaz très fortement comprimé, il observe incidemment la formation d'un nuage de vapeur d'oxygène. A peu près à la même époque, Pictet élabore la méthode des cascades : il fait passer de l'oxygène comprimé à 50 atmosphères dans un tuyau traversant un bain réfrigérant d'éther et de CO_2 à une température de -130°C : l'oxygène se liquéfie.

Olszewski en 1895 liquéfie de petites quantités d'hydrogène (la température d'ébullition de l'hydrogène est de -253°C). Olszewski observe un nuage de vapeur d'hydrogène en détendant celui-ci dans un bain d'azote liquide.

En 1898 Dewar réussit la liquéfaction de l'hydrogène en plus grande quantité ; son nom reste attaché aux fameux vases Dewar qui permettent de conserver les gaz liquéfiés.

A cet époque seul l'hélium paraît encore être un gaz permanent.

Après plusieurs essais infructueux, Kamerlingh-Onnes arrive enfin à le liquéfier en 1908 à Leyde. L'hélium bout à $-268,9^{\circ}\text{C} = 4,2^{\circ}\text{K}$. La non-existence des gaz permanents est ainsi définitivement démontrée ; une étape importante de physique expérimentale est close.

Deux ans plus tard on obtient suffisamment d'hélium liquide pour en remplir un cryostat.

An abaissant la pression de la vapeur saturante d'hélium, on abaisse sa température d'ébullition

jusqu'à environ 1°K et en 1926 Keesom à Leyde atteint $0,71^{\circ}\text{K}$ à l'aide de pompes puissantes qui permettent d'abaisser la pression à $0,0036\text{ mm}$ de Hg.

Le procédé utilisé par Kamerlingh-Onnes pour la liquéfaction de l'hélium comporte deux phases : a) refroidissement préalable dans de l'hydrogène liquide jusqu'en dessous de la température d'inversion ; b) détente Joule-Kelvin qui l'amène à l'état liquide.

En 1934, Kapitza perfectionne le procédé en refroidissant le gaz par une détente adiabatique, mais il a encore besoin d'utiliser de l'azote liquide pour un refroidissement préalable.

Enfin en 1947, Collins construit son liquéfacteur qui refroidit l'hélium jusqu'en dessous de sa température d'inversion à l'aide de deux machines à détente adiabatique (fig. 1) ; le refroidissement par un autre gaz liquide est ainsi complètement supprimé.

Une année plus tard, on liquéfie à Los Alamos quelques cm^3 de l'isotope léger He^3 ; sa température d'ébullition aux conditions normales est de $3,2^{\circ}\text{K}$. En abaissant la pression, on atteint $0,3^{\circ}\text{K}$.

Ce n'est qu'en 1958 qu'on arrive à construire le premier cryostat à He^3 pour pouvoir expérimenter à une température inférieure à 1°K . L'isotope léger d'hélium est difficile à obtenir et d'un prix beaucoup trop élevé ; il n'est donc pas possible de songer pour l'instant à l'employer couramment pour la réfrigération.

Températures au-dessous de 1°K par démagnétisation adiabatique

Déjà dans l'année 1926, Debye et Giauque, proposèrent de recourir à l'utilisation de la méthode de démagnétisation adiabatique, pour obtenir des températures inférieures à 1°K . Mais ce n'est qu'en 1933 que de Haas réussit, à Leyde, par une heureuse expérience à atteindre la température de $0,27^{\circ}\text{K}$. En 1935, on arriva par cette méthode à $0,004^{\circ}\text{K}$, et en 1952, même à $0,0014^{\circ}\text{K}$.

En quoi consiste ce procédé ? Les atomes d'un sel paramagnétique (par exemple le ferro-sulfate d'ammonium) possèdent des moments magnétiques, c'est-à-dire, chaque atome de cette substance agit comme un aimant minuscule.

Dans beaucoup de sels, ces éléments magnétiques peuvent tourner librement. Lorsqu'on expose ces substances à l'influence d'un champ magnétique, les dits minuscules aimants atomiques ont tendance à s'orienter parallèlement à la direction du champ, en vertu du principe d'énergie minimum. Cette orientation est toutefois diminuée par l'effet de l'agitation thermique, de sorte que le champ magnétique nécessaire à établir le parallélisme de direction augmente avec la température. L'entropie nous permet d'évaluer l'effet de l'agitation thermique. En considérant la courbe de variation de l'entropie en fonction du champ magnétique (fig. 2), on peut se rendre compte comment on arrive à refroidir un sel paramagnétique.

On commence par refroidir le sel en contact avec un bain d'hélium à 1°K . Ensuite on augmente isothermiquement le champ magnétique extérieur. L'entropie du sel se met à baisser, puisque les particules élémentaires s'orientent dans la même direction.

On isole ensuite thermiquement le sel et l'on supprime

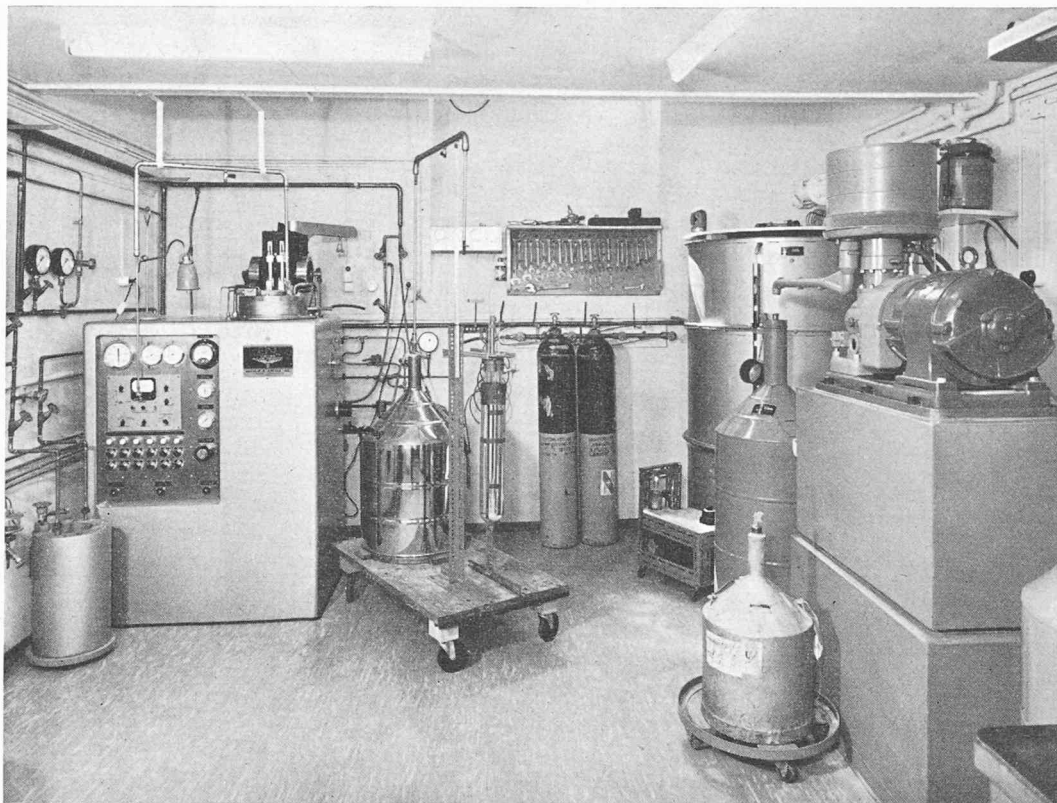


Fig. 1. — Installation des basses températures au laboratoire de physique de l'Université de Lausanne.
A gauche, le liquéfacteur d'hélium Collins (A. D. Little) permettant une production de 5 litres de liquide à l'heure.
A droite, machine frigorifique de Köhler (Philips) pour la liquéfaction de l'air. (Débit : 5,5 l/h.)

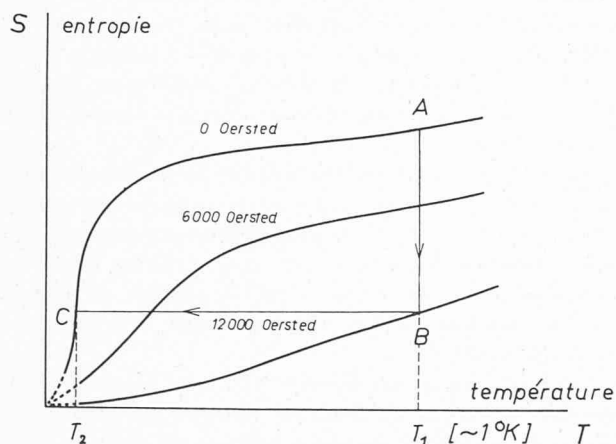


Fig. 2. — Diagramme entropie-température d'un sel paramagnétique pour différents champs magnétiques extérieurs. Le chemin suivi lors de la désaimantation adiabatique est marqué par les points ABC.

le champ magnétique ; l'entropie reste constante (phénomène adiabatique). L'énergie nécessaire à rétablir le désordre thermique des atomes est retirée à l'énergie calorifique du sel, et celui-ci se refroidit.

Les noyaux possèdent aussi bien que l'enveloppe électronique leur moment magnétique, qui est environ 1000 fois plus petit. En 1934, Gorter prédisait la possibilité de la démagnétisation adiabatique du noyau. Cette expérience fut tentée en 1956 par Kurti et Simon à Oxford : avec la démagnétisation nucléaire d'une petite pastille de cuivre, de quelques grammes, ils réalisèrent une température de $1,6 \times 10^{-5}$ °K.

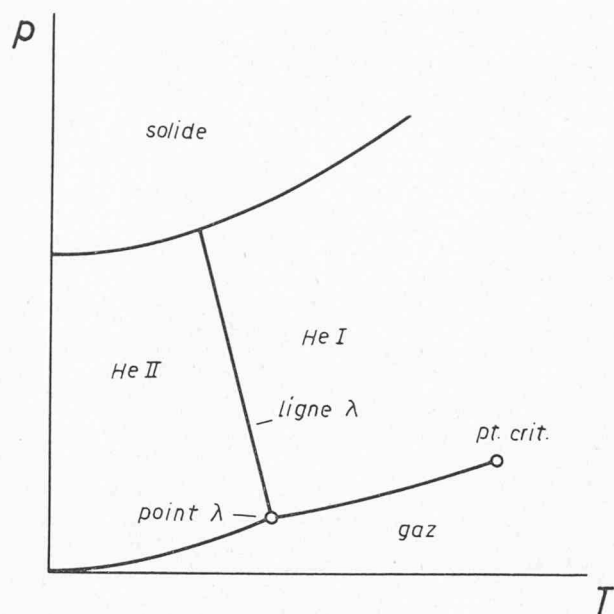
Problèmes actuels des recherches à basses températures

L'hélium

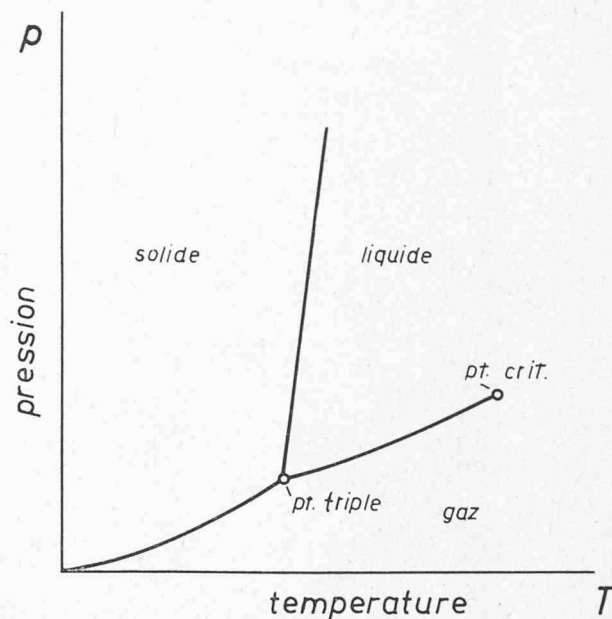
Au début, il représentait seulement un élément permettant de produire des basses températures. Mais bientôt on s'aperçut que l'hélium lui-même était un liquide extrêmement intéressant tant du point de vue théorique qu'expérimental. Tous les essais de Kamerlingh-Onnes de solidifier l'hélium simplement par l'abaissement de la température échouèrent. On se rendit à l'évidence que l'hélium est le seul gaz ne possédant pas de point triple (fig. 3).

Ce n'est qu'en 1926, qu'on arriva à solidifier l'hélium sous une pression de 30 atmosphères. L'hélium possède une autre propriété extrêmement intéressante, à savoir qu'il se transforme en superfluide au-dessous d'une température appelée point λ , égale à 2,19°K. Cela veut dire que la conductibilité thermique devient considérable tandis que la viscosité n'est plus que négligeable. Cela se démontre d'une façon évidente par le fait que l'hélium liquide, au-dessus du point λ bout comme un liquide normal mais qu'il ne produit pas de bulles de vapeur au-dessous de la dite température. La chaleur absorbée ne provoque donc pas une évaporation du liquide sous la forme de bulles montant vers sa surface libre, mais elle est évacuée uniquement par conduction thermique jusqu'à la surface, où se fait l'évaporation.

Il existe encore une série d'autres propriétés intéressantes tel le « second son », (ondes de température), qualité que seul l'hélium superfluide possède. L'hélium liquide présente des problèmes très intéressants aux



Helium



- gaz normal -

Fig. 3. — Comparaison des diagrammes d'état de l'hélium et d'un gaz normal (représentation schématique).

physiciens théoriques. London, Landau et Feynman réussirent, du moins partiellement, en se servant de la statistique Bose-Einstein (qui décrit une condensation des particules dans l'espace des moments) à expliquer le comportement de l'hélium superfluide. L' He^3 isotope léger de l'hélium, comme des essais de ces dernières années l'ont prouvé, n'a pas de point λ et ne se transforme pas en superfluide. Cela peut se comprendre, puisque l' He^3 n'est composé que de trois noyaux de base et doit plutôt suivre la statistique Fermi-Dirac.

Conductibilité électrique

Kamerlingh-Onnes déjà s'était rendu compte de l'importance de l'hélium liquide comme moyen susceptible de provoquer des basses températures. Il examina le premier la conductibilité de métaux à basses températures. La théorie de la résistance électrique était alors encore à ses débuts et on ignorait vers quelle valeur elle tend lorsqu'on s'approche du zéro absolu. On envisageait soit un accroissement infini de la résistance au cas où les électrons de conduction se « condensent », soit une limite finie au cas où la résistance est due aux imperfections tant physiques que chimiques du réseau, soit encore une limite nulle au cas où la résistance est due aux vibrations thermiques du réseau cristallin.

Lors des essais avec du platine on a pu constater une résistance résiduelle dépendant de la pureté du métal. On utilise couramment aujourd'hui la méthode dite des résistances résiduelles pour mettre en évidence les imperfections du réseau cristallin. Le mercure fut longtemps le métal le plus pur qu'on ait réussi à produire par distillation. Il apparut le métal idéal pour étudier et mesurer les résistances résiduelles. Kamer-

lingh-Onnes s'aperçut que la résistance du mercure à une température critique de $T_c = 4,15^\circ\text{K}$ se réduisait brusquement à une valeur non mesurable. Un état nouveau, la supraconductibilité, était découvert.

Depuis on a reconnu que plus de 22 métaux et de nombreux composés et alliages deviennent supraconducteurs à des températures critiques situées entre $0,4$ et $18,7^\circ\text{K}$.

En 1933, on a découvert « l'effet Meissner », c'est-à-dire le fait qu'un supraconducteur (jusqu'à une couche allant de 10^{-5} à 10^{-6} cm) ne peut jamais être pénétré par un champ magnétique tant que le champ extérieur ne dépasse, en aucun point de la surface du supraconducteur, une certaine valeur critique dépendant de la température.

Des mesures de la chaleur spécifique montrent une discontinuité à la température critique que des considérations thermodynamiques mettent en rapport avec la courbe du champ critique en fonction de la température.

Pour apporter la preuve que la résistance électrique tend vers zéro, on utilise un anneau en métal supraconducteur dans lequel on induit un courant permanent ; dans les limites de la précision de mesure, on a constaté qu'après plusieurs mois, la valeur du courant ne diminue pas. C'est le seul phénomène macroscopiquement observable dans la nature qui a lieu sans frottement. On peut tout au plus le comparer avec la rotation, libre de frictions, des électrons autour du noyau atomique.

Les théories phénoménologiques de la supraconductibilité remontent à Becker-Heller-Sauter (1933) et H. et F. London (1934). Pour établir la loi d'Ohm, on part de la supposition, que sur l'électron libre agit une force de freinage proportionnelle à la vitesse :

$$\vec{E} \cdot e = k \vec{v}.$$

La théorie phénoménologique de la supraconductibilité est basée sur la supposition que l'électron n'est soumis qu'aux forces d'inertie :

$$e \cdot \vec{E} = m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt}.$$

Selon le modèle des deux fluides de Gorter, une partie seulement des électrons est dans l'état superconducteur au-dessous de la température critique (sauf au zéro absolu).

Ceux-ci n'ont pas d'entropie et ne participent pas au transport d'énergie, fait qui s'exprime clairement dans les courbes de la conductivité thermique (fig. 4).

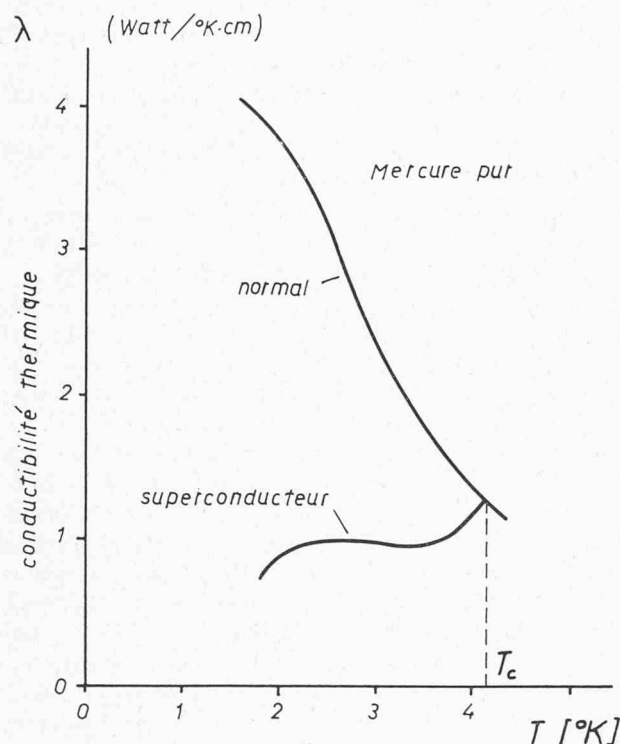


Fig. 4. — Conductivité thermique du mercure dans l'état normal et superconducteur en fonction de la température.

A la température de 1°K, le rapport des conductivités thermiques $\frac{\lambda_s}{\lambda_n}$ dans l'état superconducteur et l'état normal du plomb, est de 1 : 1000. On emploie cette propriété pour construire des interrupteurs de chaleur.

Bien des propriétés des supraconducteurs sont encore, pour une bonne part, mal expliquées : le théoricien, lors de l'étude de la théorie fondamentale de la supraconductibilité, se trouve encore en face de nombreux problèmes à résoudre. La théorie de Heisenberg-Koppe porte uniquement sur l'action réciproque entre électrons.

L'effet isotopique a démontré clairement que l'interaction des électrons et du réseau cristallin joue un rôle essentiel dans la supraconductibilité. Les théories de Fröhlich-Schafroth, Bardeen-Cooper-Schrieffer et Bogoliubov ont conduit à des résultats déjà plus intéressants.

La supraconductibilité est exploitée par la technique : on fabrique des éléments superconducteurs de circuits électroniques ; les cryotrons, utilisés à la place des tubes électroniques dans des machines à calculer et dans des appareils de commande pour fusées téléguidées, où l'espace joue un rôle important. Les circuits oscillants superconducteurs doivent avoir une plus grande stabilité que les quartz ou les horloges atomiques. Des bolomètres superconducteurs possèdent une sensibilité 100 fois plus grande qu'un radar ordinaire.

La chaleur spécifique aux basses températures

La loi bien connue de Debye est que la chaleur spécifique du réseau aux basses températures est proportionnelle à T^3 . Les mesures ont largement confirmé l'exactitude des conclusions de Debye. Dans le cas d'un métal, s'ajoute la contribution de la chaleur spécifique des électrons de conduction, qui est proportionnelle à T .

Cette contribution des électrons à température ordinaire n'est pas observable, car elle est très petite par rapport à la contribution du réseau. On a pu vérifier son existence par contre aux basses températures.

Autres problèmes

Le coefficient de dilatation thermique aux basses températures est encore peu connu. D'après des déductions théoriques, il devrait être proportionnel à la chaleur spécifique ; seule l'expérience saura apporter des précisions.

Le magnétisme à basses températures, reste aussi, pour l'instant, un terrain en partie inexploré. La loi de Curie, disant que la susceptibilité magnétique est inversement proportionnelle à la température absolue, a pu être vérifiée dans un vaste domaine. On sait peu de choses en ferromagnétisme sur les phénomènes de transport aux basses températures.

La métrologie aux basses températures, a également gagné en importance, étant donné que le bruit de fond aux températures de l'Hélium, est réduit à 1 %/100, fait qui a incité la construction de galvanomètres supraconducteurs, etc.

La physique nucléaire aussi de son côté se sert des basses températures. Ainsi, l'orientation des noyaux n'est possible qu'aux basses températures. La détection de particules nucléaires au moyen de la chambre à bulle à hélium est depuis peu un problème très actuel.

Il est impossible de donner ici un aperçu complet de toutes les recherches qui ont été entreprises aux basses températures. Ajoutons simplement que le chimiste aussi bien que le biologiste se sert de plus en plus des basses températures. Il suffit de mentionner les radicaux libres, la vitesse des réactions chimiques, l'absorption des gaz, l'énergie vitale des cellules aux basses températures.

Cet exposé devrait suffire pour faire ressortir l'importance de la physique des basses températures, à attirer l'attention sur la place qu'elle occupe déjà aujourd'hui dans la science et au développement qu'elle est appelée à prendre et qui est d'une actualité immense aussi bien pour les expérimentateurs que pour les théoriciens.