

W. H. Keesom.

## Sur les états d'agrégation de l'hélium.

Conférence faite à Varsovie le 7 mai 1931.

*O stanach skupienia helu.*

Odczyt, wygłoszony w Warszawie dn. 7 maja r. 1931.

### Streszczenie.

Hel w stanie równowagi chemicznej stałej ma cząsteczkę najprostszą, jaką znamy; odznacza się nadzwyczajną małością sił międzyatomowych, a, co za tem idzie, w stanie gazowym najbardziej zbliża się do „gazu idealnego“; jego temperatura krytyczna i temperatura wrzenia są nadzwyczaj niskie, co pozwala nam zbliżyć się przy jego pomocy do zera bezwzględne. A jednak i w helu działają siły międzyatomowe, co pozwala go skraplać i zestalać; wykazuje on ponadto pewne osobliwości nieoczekiwane.

Po skropleniu tlenu, azotu i powietrza przez Wróblewskiego i Olszewskiego w r. 1883, wodoru przez Dewara w r. 1898, Kamerlingh Onnesowi udało się skroplić hel w r. 1908.

Hel zgęszczony ulega oziębieniu naprzód przez parę wodoru, potem przez ciekły wodór, wrzący pod zmniejszonym ciśnieniem tak, że jego temperatura spada do  $-258^{\circ}\text{C}$ . Po przejściu przez węzownicę przy zastosowaniu systemu regeneracyjnego ulega rozprężeniu i oziębia się dalej, aż część jego ulega skropleniu. Dolną część przyrządu ulepszono tak, że hel może być przelany do kryostatu, dostępnego z zewnątrz, co pozwala na dokonywanie doświadczeń z ciekłym helem; przelania dokonywa się obecnie zapomocą dwudzielnego syfonu i napełnia się równocześnie dwa kryostaty, dla celów badań nad ciepłem właściwym i nad budową krystaliczną zapomocą promieni Roentgena. Hel wre przy  $4,2^{\circ}\text{K}$ elvina; przez ssanie pary można temperaturę jeszcze bardziej obniżyć. W ten właśnie sposób Kamerlingh Onnes otrzymał najniższą temperaturę, jaką wogóle do dziś otrzymano, mia-

nowicie  $0,82^{\circ} K$ <sup>1)</sup> Hel był wówczas ciekłym pod ciśnieniem swej pary nasyconej, bardzo niskim w tych temperaturach.

W 1926 r. autor spróbował zestalić hel w tej niezmiernie niskiej temperaturze, poddając go silnemu ciśnieniu<sup>2)</sup>.

Dwie rurki metalowe, połączone trzecią większą, zanurza się w kryostacie z ciekłym helem. W rurkach zgęszcza się hel za pomocą niewielkiej pompy hydraulicznej, napełnionej gliceryną, za pośrednictwem rtęci, wypełniającej częściowo dwa walce stalowe; jeden z nich można połączyć ze zbiornikiem helu gazowego. Hel ulegał skraplaniu mniej więcej do poziomu cieczy w kryostacie.

Ażeby się przekonać, czy hel się zestala, łączono rurki z ramionami manometru różnicowego, utworzonego z rury stalowej, która wchodziła do komory stalowej, częściowo napełnionej rtęcią. Jeżeli w układzie rurek u dołu utworzył się kawałek stałego helu i przez otworzenie korka wypuścił się nieco gazowego helu, to po przerwaniu łączności między obu rurkami (przez zamknięcie odpowiedniego kurka) wytwarza się w nich różnica ciśnień i rtęć podnosi się w rurze stalowej manometru. O tem przekonywano się w sposób następujący. W rurze jej był napięty cienki drut platynowy, stanowiący jedną z gałęzi mostku Wheatstone'a. Wychylenie galwanometru wskazywało, że rtęć się podnosi.

Ponadto stosowano mieszkadło magnetyczne, pomysłu p. K u e n e n a, które również wskazywało, czy nastąpiło zestalenie helu.

Doświadczenia dały wyniki następujące.

Przy temperaturze wrzenia helu pod ciśnieniem atmosferycznym hel zestalał się pod ciśnieniem około 140 atmosfer. Przy temperaturze  $1,3^{\circ} K$  wystarczyło ciśnienie 25 atmosfer.

Krzywa topliwości wykazuje znamiennej osobliwość: przy najniższych temperaturach pochyla się ona ku osi temperatur, stając się do niej coraz bardziej równoległą (na drugiej osi odkładane są ciśnienia). Wydaje się, że nie dąży ona do spotkania z krzywą prężności pary. Wynika stąd, że niepodobna zestalić helu przez samo tylko obniżenie temperatury.

Hel zestalał się, tworząc masę jednorodną, przezroczystą; nie dostrzeżono żadnej powierzchni, odgraniczającej ciecz od ciała stałego. Nie zauważono też żadnej różnicy w współczynniku załamania, ani zmiany objętości.

<sup>1)</sup> W dniu 18 lutego 1932 autor uzyskał temperaturę  $0,71^{\circ} K$ . (*Wzmianka dodana podczas druku*).

<sup>2)</sup> Autor stwierdza, że już w roku 1924 prof. M. W o l f k e proponował prof. K a m e r l i n g h O n n e s c w i w Laboratorium Lejdejskiem zestalenie ciekłego helu tą samą metodą.

Wyniki te zostały potwierdzone przez prof. S i m o n a w Berlinie, który przedłużył krzywą zestalania helu do  $42^{\circ} K$  i ciśnienia około 5500 atmosfer. A więc hel stały może istnieć przy temperaturze 8 razy wyższej, niż najwyższa temperatura, przy której może istnieć jako ciecz.

Inne ciekawe zjawisko odkryte zostało w r. 1927 w pracowni kryogenicznej Lejdejskiej przez prof. M. W o l f k e g o, który prowadził tam badania nad stałą dielektryczną ciekłego helu.

Prof. W o l f k e spostrzegł, że, gdy temperatura spada, stała dielektryczna wykazuje nagły skok, a conajmniej nader szybką zmianę, co ma miejsce właśnie w tym punkcie, w którym K a m e r l i n g h O n n e s znalazł największą gęstość helu.

Nasuwała się tu sama przez się myśl, że przy tej temperaturze ciekły hel przeistacza się w inną postać również ciekłą.

Jeżeli helem ciekłym I nazwiemy ten, który jest w równowadze stałej przy temperaturach wyższych, a helem ciekłym II ten, który jest w równowadze stałej przy temperaturach niższych, to stała dielektryczna helu ciekłego I w punkcie przemiany jest wyższa niż też wielkość dla helu II.

W r. 1928 pomiary, powtórzone przez prelegenta i prof. W o l f k e g o, wykazały, że owa nagła zmiana występuje w temperaturze  $2,29^{\circ} K$ . Późniejsze pomiary, wykonane w Instytucie lejdejskim, wykazały, że ciśnieniu 38,65 mm rtęci, pod którym znajdował się ciekły hel, i z którego wyprowadzono powyższą temperaturę, odpowiada temperatura  $2,19^{\circ} K$ .

Krzywa, która wyobraża zmiany gęstości ciekłego helu, wykazuje uderzające podobieństwo do krzywej zmian stałej dielektrycznej, zwłaszcza w okolicy temperatury rzekomej największości gęstości. Pomiary przemawiają raczej za nagłym skokiem niż za największością. Różnica gęstości wynosi I na 1000, gęstość helu I jest większa niż helu II.

Prelegent pomija pewne osobliwości ciepła właściwego, ciepła parowania, napięcia powierzchni helu ciekłego przy tej właśnie temperaturze. Okazało się, że w helu ciekłym dzieje się wówczas coś osobliwego.

W końcu r. 1927 autor wraz z pp. W e b e r e m i N o r g a a r d e m zanurzyli w ciekłym helu termometr helowy, w którym ciśnienie mierzono manometrem o drucie rozgrzanym. Gdy ogrzewać hel ciekły, poczynając od temperatury nieco niższej od temperatury przemiany, galwanometr w pewnym punkcie zatrzymuje się. To samo się dzieje przy oziębianiu.

W końcu roku zeszłego prelegent prowadził dalej te badania wraz z dr. C l u s i u s e m. Hel ciekły ogrzewano przez doprowadzanie ciepła przez prąd w drucie konstantanowym; dwa druty (z nowego srebra fosforowego i konstantanowy) służyły jako termometry. Cały przyrząd, stanowiący kalorymetr, był zawieszony w próżni możliwie doskonałej.

Przy ciśnieniu pary nasyconej temperatura odpowiadająca zatrzymaniu się, wynosiła dokładnie  $2,19^{\circ} K$ . Przy ciśnieniu wyższym temperatura przemiany się obniża. Krzywa przemiany dąży do określonego punktu krzywej zestalenia. Stanowi ona tedy linię graniczną między obszarami helów I i II.

Doświadczenia, o których była mowa, wskazywałyby, że przemiana jest nagła, atoli doświadczenia, wykonane z dr. C I u s i u s e m, skłaniają do powątpiewania w tej mierze. Robiono pomiary ciepła właściwego. Krzywa tego ciepła wykazuje w okolicy temperatury przemiany ostry wierzchołek, ale zdaje się, że i okoliczne wartości są wyjątkowe; zatem, jeżeli tak jest, przemiana odbywa się w pewnym małym obszarze temperatur. Kwestja jednak jeszcze jest otwarta.

Wytłumaczenia opisanego zjawiska autor podać nie może. Przypuszcza, że może hel II jest w stanie równowagi jakby niestalej: atomy nie są w zupełnym nieładzie, lecz może układają się w małych elementach objętości, w coś nakształt siatki krystalicznej, nie tracąc jednak płynności. Podobną myśl miał już K a m e r l i n g h O n n e s, gdy stwierdził, że poniżej  $1^{\circ} K$  hel jeszcze jest ciekłym.

Temperatura przemiany wynosi około  $\frac{2}{5}$  temperatury krytycznej, t. j. tej, w której możnaby oczekiwać, że hel się skryształizuje. Próby zbadania budowy krystalicznej helu, przedsięwzięte z p. M o o y przy pomocy promieni R o e n t g e n a, nie dały dotychczas pożądaných wyników.

Przed kilku miesiącami pp. W o l f k e i M a z u r znaleźli w Warszawie zjawisko przemiany, podobne do tego, jaką wykazuje hel, w eterze etylowym a następnie w nitrobenzolu i dwusiarczku węgla, co otwiera rozległe perspektywy dla dalszych badań.

W rzeczywistości zachodzi jednak między zjawiskami w helu i w eterze etylowym różnica. W eterze etylowym ulega przemianie cząsteczka, czego niema w helu.

Ze wszystkiego, co powiedziano, wynika, że w temperaturach bliskich zera absolutnego nawet ciało o tak prostej budowie jak hel może wykazać własności bardzo osobliwe.

Rękopis otrzymany dn. 5 listopada 1931.

L'hélium a la molécule la plus simple de toutes les substances que nous connaissons à l'état chimiquement stable. Néanmoins il a des propriétés bien singulières, bien plus compliquées que nous en attendrions.

Sa propriété la plus précieuse au point de vue scientifique c'est l'extrême petitesse de ses forces interatomiques, qui fait que l'hélium est le gaz qui se rapproche le plus du „gaz idéal“.

C'est grâce à cette qualité que l'hélium est le gaz thermométrique par excellence; c'est à cause de cette même qualité que la température critique et la température d'ébullition de ce gaz sont tellement basses qu'elles nous permettent de descendre sur l'échelle des températures jusqu'au voisinage immédiat du zéro absolu.

Mais si petites que soient les forces interatomiques, elles existent néanmoins. C'est par elles que l'hélium peut devenir liquide, c'est par elles aussi qu'on peut rendre l'hélium solide.

Ajoutons toutefois de suite que, pour solidifier l'hélium, il ne suffit pas d'abaisser la température jusqu'à un point où les forces interatomiques l'emportent sur le mouvement thermique à un tel point qu'elles fixent les atomes dans un réseau cristallin. Pour solidifier l'hélium, il faut encore, par l'application d'une pression extérieure, rapprocher les atomes d'une telle manière que les forces interatomiques puissent faire leur jeu.

Si on ne le fait pas, l'hélium, devenu liquide, reste liquide jusqu'à la température la plus basse qu'on ait pu réaliser, et probablement bien plus bas encore.

Mais cela ne veut pas dire qu'il ne se passe rien dans l'hélium liquide. Au contraire, à une certaine température, un phénomène bien singulier et très curieux a lieu: l'hélium semble passer à un autre état d'agrégation, également liquide. L'hélium liquide I se transforme en hélium liquide II.

Je vous parlerai donc dans cette conférence: de la liquéfaction de l'hélium,

de la solidification de l'hélium, et

de la transformation de l'hélium liquide I en hélium liquide II.

Ayant à vous parler de la liquéfaction de l'hélium, la tentation est bien grande de vous décrire l'histoire de la liquéfaction successive des différents gaz, en commençant par la liquéfaction de l'ammoniac vers la fin du dix-huitième siècle, et en finissant par la liquéfaction du dernier gaz alors non encore liquéfié, l'hélium, au début du siècle présent. Cette tentation est d'autant plus grande, qu'elle me fournirait l'occasion de décrire la part si hautement importante, que deux de vos compatriotes

y ont eue. Je fais allusion à la liquéfaction d'une manière statique des gaz: oxygène, azote, air atmosphérique, effectuée pour la première fois par MM. Wróblewski et Olszewski à Cracovie en 1883, à la décantation de ces gaz liquéfiés dans des verres accessibles du dehors, réalisée par Olszewski en 1890, de telle manière que ce savant pouvait faire toutes sortes de recherches scientifiques dans la région de températures entre  $-164^{\circ}C$  et  $-217^{\circ}C$ .

ACTA PHYSICA POLONICA Vol. I (1932) Fasc. 1-2

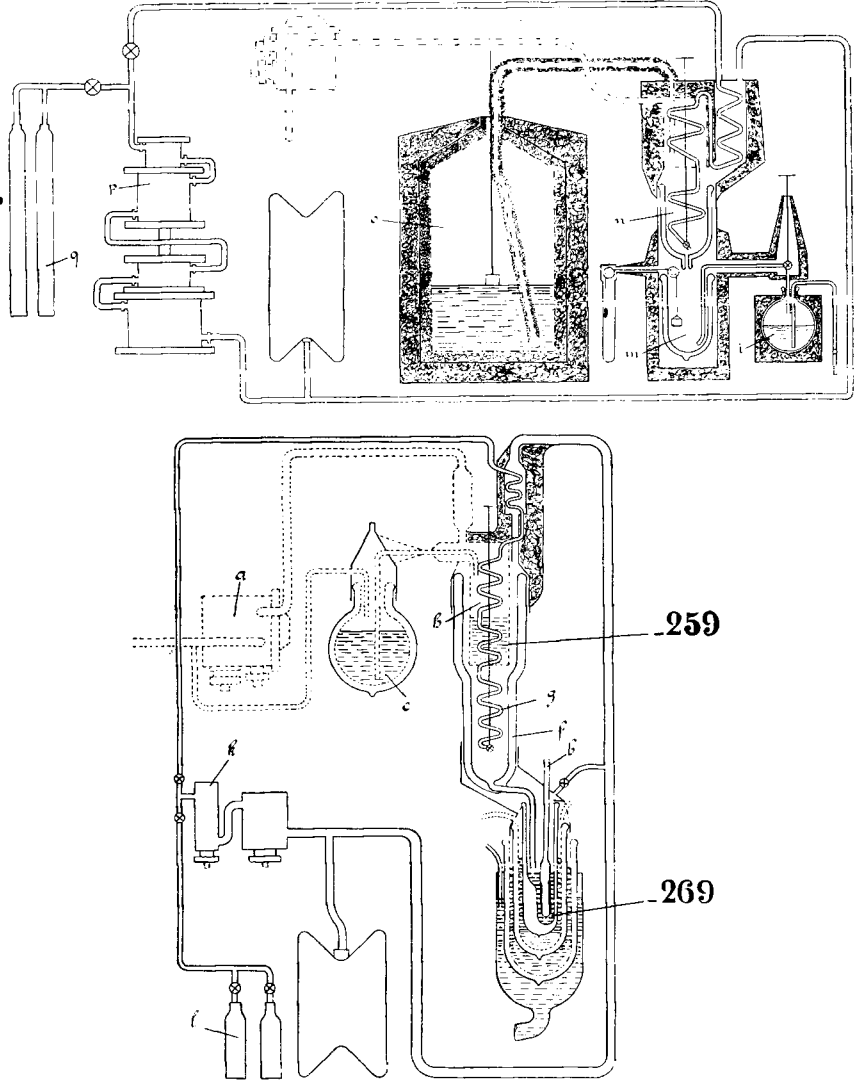


Fig. 1.

J'aurais l'occasion de porter en lumière l'importance extrêmement grande que ces travaux ont eue, non seulement pour les sciences physiques et chimiques en ouvrant pour la recherche scientifique une région toute nouvelle de températures, mais aussi au point de vue de l'économie mondiale, puisque nous voyons partout de grandes industries qui, en rectifiant l'air liquéfié, tirent l'azote de l'atmosphère, pour produire des engrais chimiques qui multiplient plusieurs fois la capacité de la terre de nourrir une population grandissante. Vraiment un exemple très instructif de la valeur de la recherche scientifique pour le bien-être de l'humanité.

Mais le temps dont je puis disposer est trop court. Je supposerai que la manière comment on obtient l'air liquide vous est connue.

La Figure 1 vous montre comment on liquéfie l'hydrogène et l'hélium.

On voit la pompe  $p$  qui sert à comprimer l'hydrogène jusqu'à une pression de 150 atmosphères. L'hydrogène comprimé entre dans le liquéfacteur  $n$ , où il est refroidi, d'abord par de l'air liquide, ensuite par des vapeurs d'hydrogène refroidis. Il entre dans un serpentin régénérateur, qui aboutit à un robinet à expansion. Par cette expansion l'hydrogène

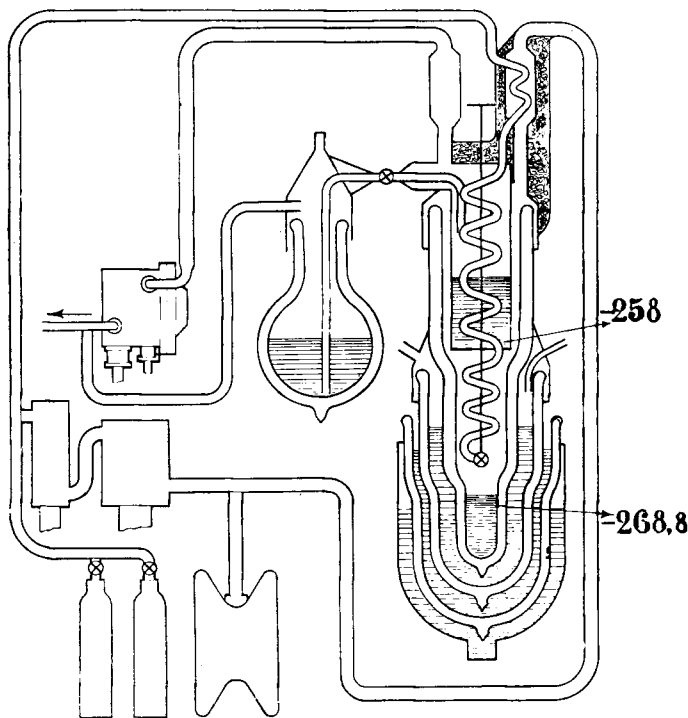


Fig. 2.

se refroidit, par l'action du régénérateur à contre-courant la température s'abaisse de plus en plus jusqu'à ce qu'une partie de l'hydrogène se liquéfie. L'hydrogène liquide se rassemble au fond de l'appareil en *m* et peut être transvasé dans un ballon Dewar *i*.

C'est la manière dont Dewar nous a appris à liquéfier l'hydrogène en 1898, en appliquant le même principe, d'après lequel Linde a liquéfié l'air sur une échelle industrielle.

Le même principe fut employé par Kamerlingh Onnes pour liquéfier l'hélium en 1908.

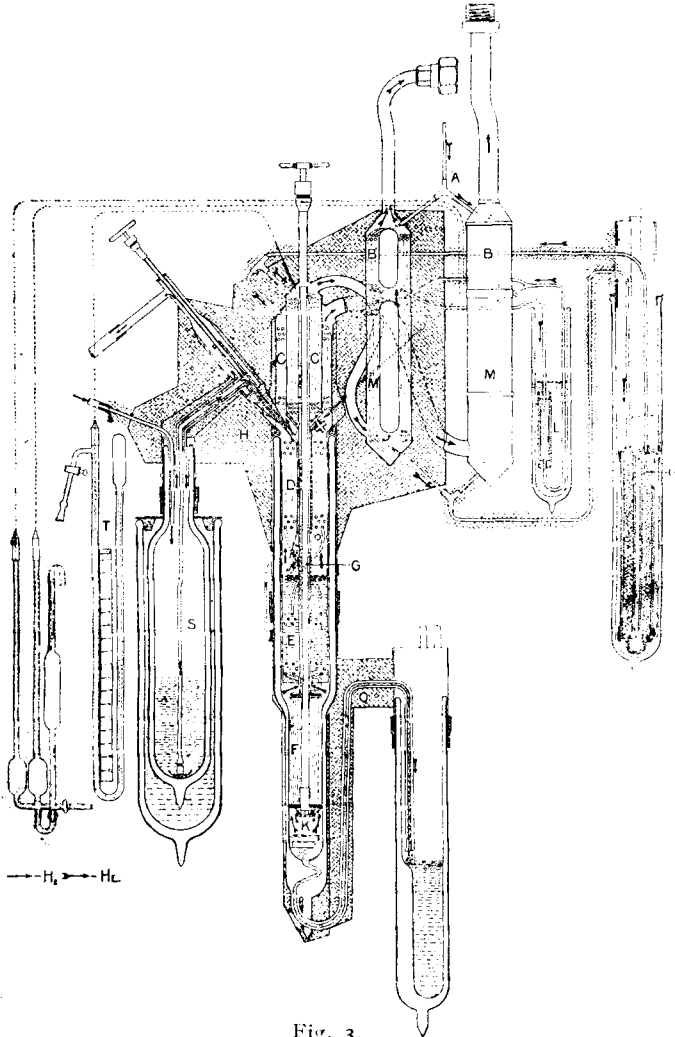


Fig. 3.



La Fig. 2 montre séparément, d'une manière schématique, le dispositif pour la liquéfaction de l'hélium.

On y voit les récipients dans lesquels l'hélium est conservé, et la pompe de compression. L'hélium comprimé entre dans le liquéfacteur; là il est refroidi par des vapeurs d'hydrogène, et ensuite par l'hydrogène liquide lui-même, bouillant sous une pression réduite, de sorte que sa température devient 258 degrés au-dessous de zéro. L'hélium entre alors dans le serpentin régénérateur et passe par le robinet d'expansion. L'hélium se refroidit jusqu'à ce qu'une partie du gaz se liquéfie.

La figure 3 donne un dessin plus détaillé du liquéfacteur de l'hélium. Celui-ci a été modifié dans sa partie inférieure. Il est construit de façon que l'hélium puisse être transvasé dans un autre récipient, un cryostat, accessible du dehors, et dans lequel on peut plonger des appareils de mesure, comme des piézomètres, des fils métalliques, par exemple pour mesurer leur résistance électrique, etc.

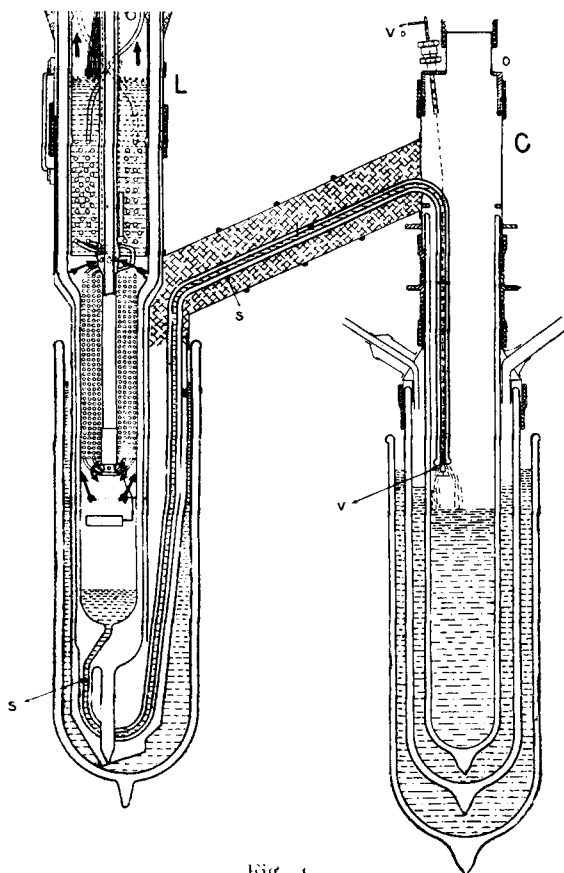


Fig. 4.

La figure 4 montre la partie inférieure du liquéfacteur de l'hélium et le cryostat à hélium, dans un état successif de leur évolution.

La figure 5 montre, toujours schématiquement, la construction du liquéfacteur d'hélium, sous la forme sous laquelle nous l'employons à présent.

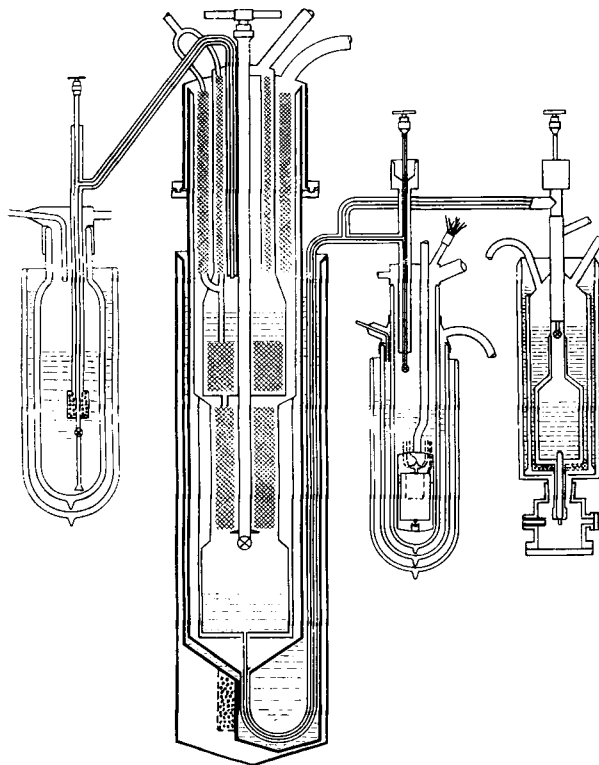


Fig. 5.

Le principe reste toujours le même. La différence consiste en ce que à présent tous les tubes ont un diamètre passablement plus grand, de manière que de petites impuretés de l'hélium ne puissent pas les boucher facilement. En outre l'appareil a été construit en métal. Les proportions de la figure ne sont pas exactes. En réalité les dimensions horizontales ont été agrandies pour rendre la figure assez claire.

L'hélium est tiré de l'appareil par un siphon qui se divise en deux. Ainsi deux cryostats peuvent être remplis à la fois. L'un de ces cryostats porte les dispositifs nécessaires pour mesurer des chaleurs spécifiques, l'autre des dispositifs destinés à l'étude de la structure cristalline d'une

substance à la température de l'hélium liquide au moyen des rayons  $X$ . Les deux cryostats peuvent être détachés du liquéfacteur au moyen d'une sorte d'écluse pour éviter que l'air atmosphérique n'entre dans l'appareil. Après avoir détaché le cryostat, celui-ci peut être transporté dans une autre salle pour faire l'expérience qu'on s'est proposée.

Les figures 6 et 7 donnent des photographies de l'installation.

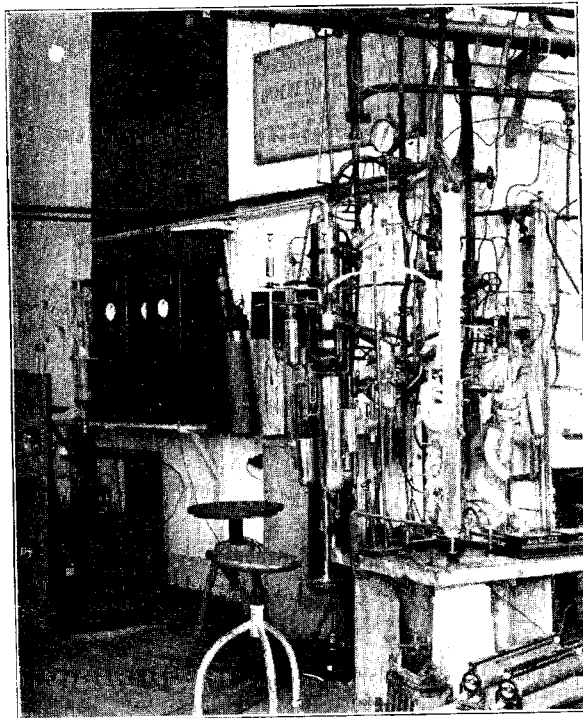


Fig. 6.

Par la liquéfaction de l'hélium le domaine des températures réalisables a été étendu considérablement dans la direction du zéro absolu. La température la plus basse qu'on peut obtenir avec de l'hydrogène est d'environ 264 degrés au-dessous de zéro, ou, si nous comptons la température en partant du zéro absolu, 9 degrés absolus, ou 9 degrés Kelvin.

L'hélium bout à 4,2 degrés Kelvin. En aspirant les vapeurs, la température s'abaisse encore.

C'est ainsi, en aspirant les vapeurs de l'hélium liquide au moyen d'une grande batterie de pompes à vide, que Kamerlingh Onnes

a obtenu la température de 0,82 degrés Kelvin, en 1921, la température la plus basse qu'on ait obtenue jusqu'à présent<sup>1)</sup>.

A cette température l'hélium était encore liquide.

C'est-à-dire l'hélium restait liquide sous sa propre pression de vapeur saturée laquelle, à ces températures extrêmement basses, est très faible.

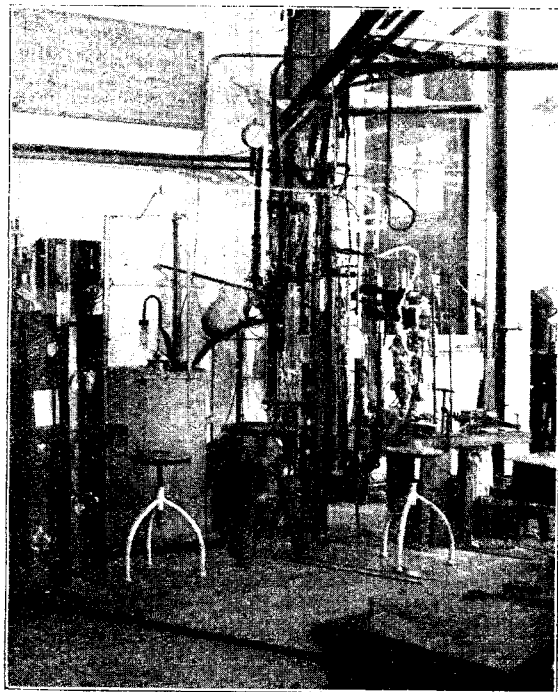


Fig. 7.

Je me suis demandé, en 1926, s'il ne serait pas possible de solidifier l'hélium en le soumettant à cette température extrêmement basse à une forte pression<sup>2)</sup>.

La fig. 8 vous montre le dispositif de cette expérience, dessiné d'une façon très schématique. Deux tubes métalliques  $B_1$  et  $B_3$ , reliés par un tube plus étroit  $B_2$ , étaient plongés dans un cryostat à hélium. Le tube étroit, ainsi

<sup>1)</sup> Le 18 février 1932 le conférencier obtint la température de 0,71 degrés Kelvin. *Note ajoutée dans l'épreuve.*

<sup>2)</sup> Il faut constater que déjà en 1924 M. W o l f k e avait proposé à M. K a m e r l i n g h O n n e s au Laboratoire de Leyde de solidifier l'hélium liquide par la même méthode.

que les extrémités inférieures des deux premiers tubes, furent placés dans un bain d'hélium liquide.

Dans ce système tubulaire l'hélium fut comprimé à l'aide d'une petite pompe hydraulique *P*. Vous voyez deux cylindres en acier *C*, partiellement remplis de mercure *M*. Lorsque le piston de la pompe hydraulique, qui est remplie de glycérine, est tiré en arrière, le mercure monte dans le cylindre de droite et descend dans celui de gauche. Le robinet  $K_1$  étant ouvert, ce cylindre se remplit d'hélium gazeux provenant de l'installation qui sert à liquéfier l'hélium. Alors on ferme le robinet  $K_1$ ,

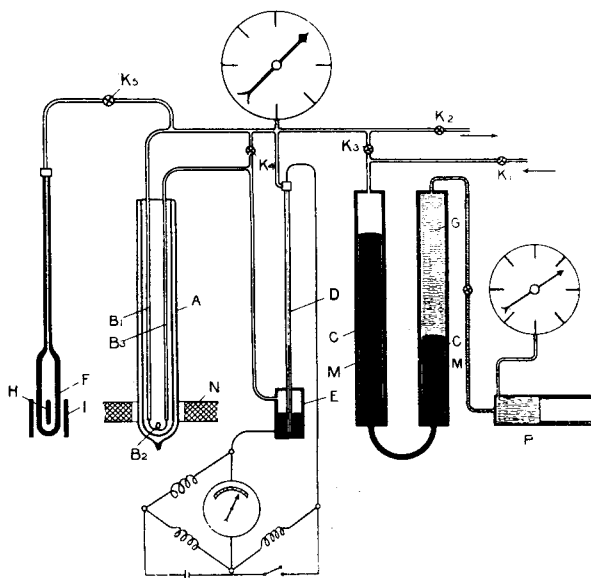


Fig. 8.

on ouvre  $K_3$  et on pousse en avant le piston de la pompe hydraulique. Ainsi l'hélium est comprimé dans le système tubulaire.

Les tubes se remplissaient d'hélium liquide à peu près jusqu'au niveau du liquide extérieur.

Pour pouvoir constater si l'hélium se solidifiait, les deux tubes étaient mis en communication avec les branches d'un manomètre différentiel: Celui-ci se composait d'un tube en acier *D*, qui rentrait dans une chambre en acier *E* remplie partiellement de mercure.

Supposons que dans la partie inférieure du système tubulaire *B*<sub>2</sub> il se soit formé un bloc d'hélium solide. Si maintenant le robinet de sortie est ouvert pour un instant, une certaine quantité d'hélium gazeux s'en va, et, si le robinet  $K_4$  qui établit la communication entre les deux tubes

est fermé, la pression à droite devient plus basse que celle à gauche. Alors le mercure monte dans le tube en acier du manomètre différentiel. Pour pouvoir constater ceci, un mince fil de platine se trouvait en dedans de ce tube, tendu le long de son axe. Ce fil de platine formait l'une des quatre branches d'un pont de *Wheatstone*. Si le mercure monte, l'aiguille du galvanomètre dévie.

Vous voyez encore dans cette figure un tube en verre *F* relié par un tube métallique avec l'autre installation. Pour plus de clarté, le tube a été dessiné en dehors du cryostat à hélium, mais en réalité il était dedans.

Dans le tube en verre se trouve un petit morceau de fer doux *H*, lequel au moyen d'un dispositif magnétique pouvait être soulevé ou abaissé. A l'aide de cette pièce de fer nous pouvions agiter le liquide; elle constitue en effet un agitateur magnétique d'après la méthode imaginée par *M. Kuenen*. Cette pièce de fer pouvait servir aussi pour vérifier si l'hélium ne s'était pas solidifié. En réalité nous n'avons employé ce tube en verre qu'après que nous avons constaté, au moyen de l'installation avec les tubes métalliques, que pour solidifier l'hélium il n'était pas nécessaire d'avoir recours à des pressions excessivement élevées.

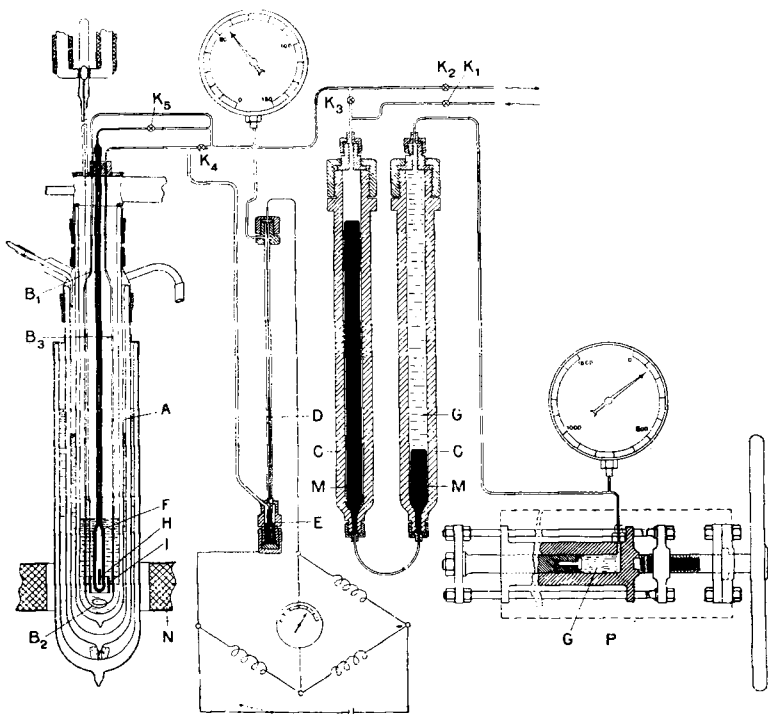


Fig. 9.

La figure 9 est encore un dessin, cette fois un peu plus détaillé, de l'installation. On y voit les différents verres du cryostat à hélium, les deux tubes métalliques, le tube en verre, le manomètre différentiel, les cylindres en acier partiellement remplis de mercure, la pompe hydraulique.

Nous passons aux résultats de ces expériences.

La figure 10 donne la courbe de fusion de l'hélium. L'échelle horizontale des abscisses donne les températures en degrés absolus, l'échelle verticale des ordonnées les pressions en atmosphères.

On en tire qu'à la température de l'hélium bouillant sous la pression atmosphérique, l'hélium se solidifie à une pression d'environ 140 atmosphères. A la température de 1,3 degrés Kelvin une pression de 25 atmosphères suffit.

La courbe de fusion présente une singularité importante: aux températures les plus basses la courbe s'infléchit de façon à devenir de plus en plus parallèle à l'axe des températures. Elle paraît n'avoir aucune tendance à rencontrer la courbe des tensions de vapeur. On en déduit qu'il n'est pas possible de solidifier l'hélium par le seul abaissement de la température.

Tous ces résultats furent obtenus par la méthode des tubes métalliques. Ils furent confirmés par l'expérience avec le tube en verre muni de l'agitateur magnétique.

On observait que l'hélium se solidifie en une masse homogène transparente. La solidification de l'hélium se trahit par l'arrêt de l'agitateur. Tout autre phénomène visible faisait défaut. On n'aperçoit rien de particulier dans le tube, aucune surface de séparation entre le solide et le liquide.

On n'observe non plus aucune différence dans la réfraction de la lumière, ni aucun changement de volume. Evidemment, les densités et les indices de réfraction des différentes phases sous ces pressions sont à peu près les mêmes.

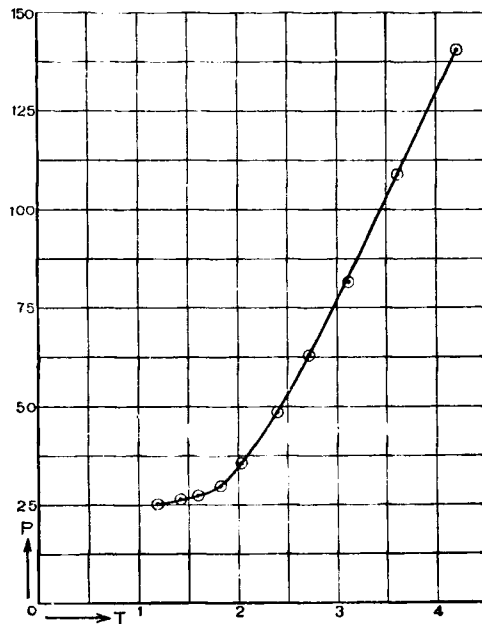


Fig. 10.

Ces résultats ont obtenu depuis une belle confirmation par les expériences ingénieuses exécutées par M. le Prof. F. Simon de Berlin, qui a su prolonger la courbe de solidification de l'hélium jusqu'à une température de 42 degrés Kelvin et une pression d'environ 5500 atmosphères. C'est-à-dire l'hélium solide peut exister à des températures qui surpassent 8 fois la température la plus haute à laquelle l'hélium peut exister comme liquide.

Nous passerons maintenant à un phénomène très curieux, découvert en 1927 par mon cher ami, M. Wolfke, lorsqu'il mesurait dans mon laboratoire les constantes diélectriques de l'hélium liquide.

M. Wolfke observait, qu'en abaissant la température, la constante diélectrique subit, à un point déterminé, un changement brusque, ou du moins très rapide. La température de ce point coïncide sensiblement avec celle à laquelle Kamerlingh Onnes avait constaté que la densité de l'hélium liquide passe par un maximum.

L'idée se suggérait tout naturellement qu'à cette température l'hélium liquide se transforme en une autre phase, également liquide. Si donc nous appelons *hélium liquide I* celui qui est stable aux températures les plus hautes, et *hélium liquide II* celui qui est stable aux températures

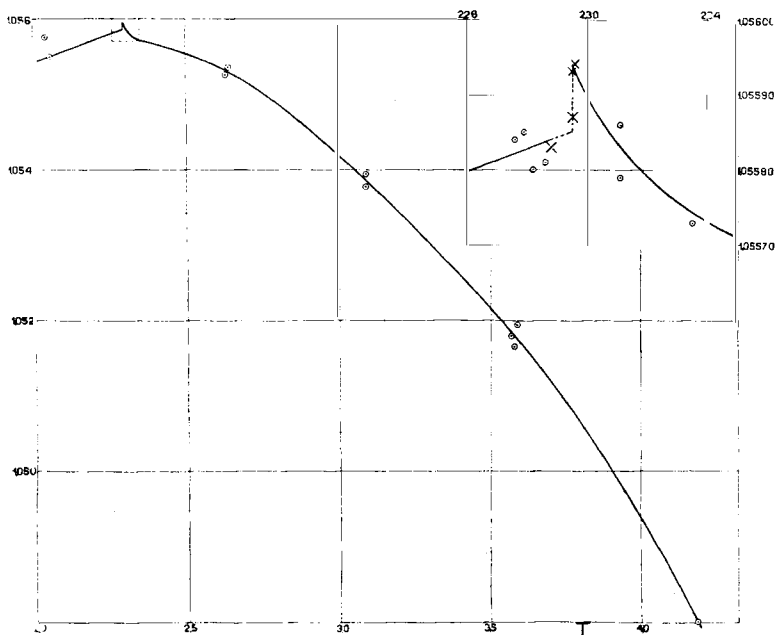


Fig. 11.



les plus basses, la constante diélectrique de l'hélium liquide I à la température de transformation est plus élevée que celle de l'hélium liquide II.

La figure 11 montre les résultats obtenus en 1928 lorsque M. Wolfe et moi nous avons exécuté une répétition des mesures de la constante diélectrique avec des moyens perfectionnés. On voit le changement brusque à une température, marquée dans cette figure comme 2,29 degrés Kelvin. Remarquons que cette température a été déduite de la pres-

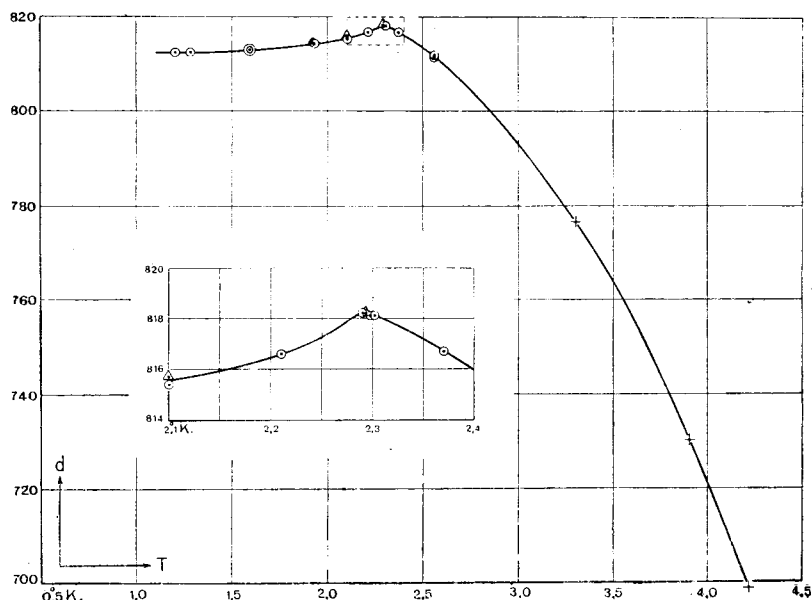


Fig. 12.

sion de l'hélium liquide, qui fut évaluée très exactement à 38,65 millimètres de mercure, et que, d'après des mesures ultérieures, exécutées dans mon laboratoire, à cette pression correspond une température de 2,19 degrés Kelvin.

J'ai déjà dit que cette température coïncide avec la température du maximum de densité de l'hélium liquide. La figure 12 montre les résultats que MM. Kamerlingh Onnes et Boks avaient obtenus en 1924, lorsqu'ils mesuraient la densité de l'hélium liquide à différentes températures. La figure a une ressemblance frappante avec celle de la constante diélectrique. Cette ressemblance nous frappe encore plus, si nous considérons de plus près la région au voisinage le plus rapproché de la température du soi-disant maximum de densité: fig. 13. Comme on voit, les mesures s'accordent aussi bien, sinon mieux,

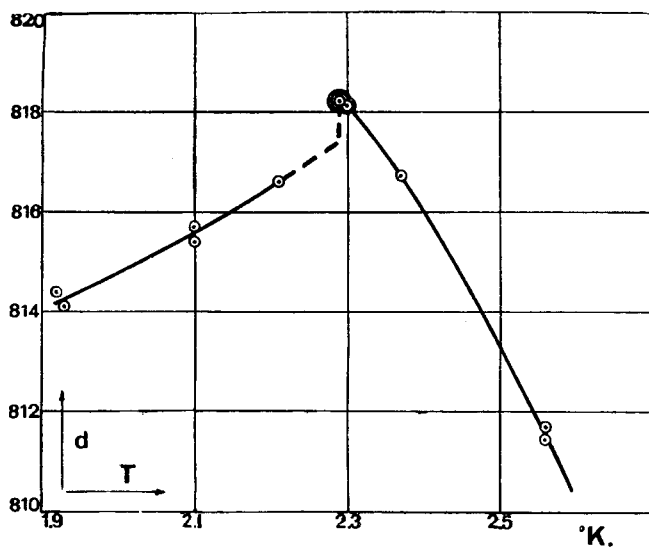


Fig. 13.

avec l'hypothèse d'un changement brusque qu'avec celle d'un maximum continu. La différence des densités serait de 1 sur 1000, celle de l'hélium liquide I, étant supérieure à celle de l'hélium liquide II.

Je passerai sous silence le fait que MM. Dana et Kamerlingh Onnes, en mesurant les chaleurs spécifiques de l'hélium liquide, observèrent des particu-

larités qu'on peut expliquer en acceptant que l'hélium liquide à la température mentionnée subit une transformation qui exige qu'on fournisse une certaine quantité de chaleur.

De même les courbes qui expriment les résultats des mesures de la chaleur latente de vaporisation ou de la tension superficielle de l'hélium liquide présentent des particularités à cette même température.

J'arrive à décrire des expériences qui ont démontré directement qu'à cette température quelque chose se passe dans l'hélium liquide. Vers la fin de 1927 MM. Weber, Norgaard et moi nous avons plongé dans un bain d'hélium liquide un thermomètre à hélium, dont la pression fut observée au moyen d'un manomètre à fil chauffé. La figure 14 fait voir les lectures du galvanomètre lorsque nous avons laissé s'échauffer le bain d'hélium liqui-

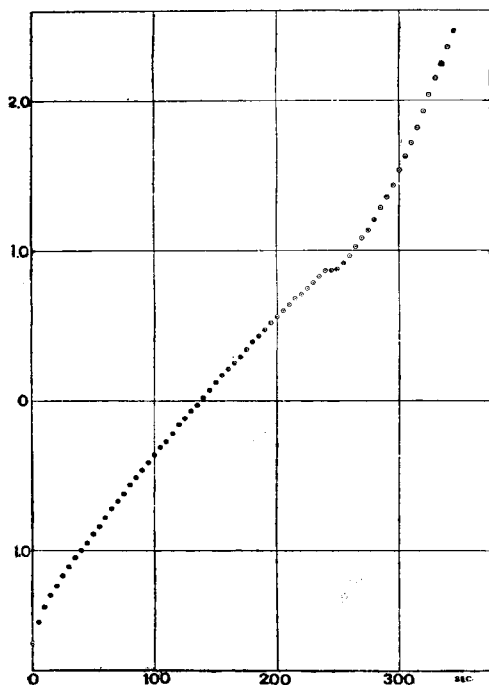


Fig. 14.

de, en partant d'une température un peu au-dessous de la température de transformation. Ces lectures du galvanomètre représentent les lectures du thermomètre plongé dans le bain d'hélium liquide. On voit qu'à un certain point le thermomètre s'arrête, précisément ce qu'on observe en passant par un point de transformation. De telles expériences ont été répétées lorsque la température baissait aussi bien que lorsqu'elle montait. Elles ont présenté toujours le même aspect.

Encore pendant les derniers mois de l'année passée j'ai fait une recherche en collaboration avec le Dr. Clusius de Göttingue. La fig. 15 montre le dispositif que nous avons employé. Vous voyez un réservoir en cuivre, rempli d'hélium liquide. Le réservoir porte une pièce dans laquelle se trouvent: 1. un fil en constantan, par lequel on peut faire passer un courant électrique pour produire une quantité exactement connue de chaleur, et 2. deux fils, l'un en maillechort à phosphore, l'autre en constantan, et qui servent comme thermomètres.

Le tout est suspendu dans un vide aussi complet que possible, et forme un calorimètre.

La fig. 16 montre les lectures de l'un de ces thermomètres à résistance dans une expérience, dans laquelle l'hélium liquide dans le réservoir calorimétrique se trouvait sous la pression de sa vapeur saturée. On voit encore une fois l'arrêt du thermomètre, exactement à la température 2,19 degrés Kelvin.

Le dispositif permettait de faire cette même expérience avec de l'hélium liquide se trouvant sous pression. Le résultat est donnée dans la figure 17. La température de transformation s'abaisse quand la pression s'élève. On obtient une courbe de transformation qui aboutit à un point déterminé de la courbe de solidification. Ainsi cette courbe de transformation forme la ligne de démarcation entre la région de l'hélium liquide I d'un côté et la région de l'hélium liquide II de l'autre côté.

La figure montre donc les régions des différents états d'agrégation de l'hélium. On n'y voit pas la région de l'état gazeux de l'hélium. La raison en est que l'échelle des pressions est trop petite pour mettre cette région en évidence. La fig. 18, qui est schématique, montre tous ces états.

Toutefois la question se pose: la transformation de l'hélium I en hélium II ou inversement, se passe-t-elle réellement brusquement à une température exactement définie, pour une pression donnée?

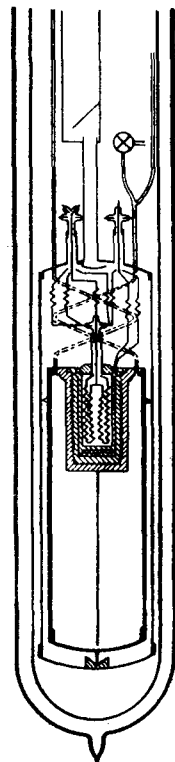


Fig. 15.

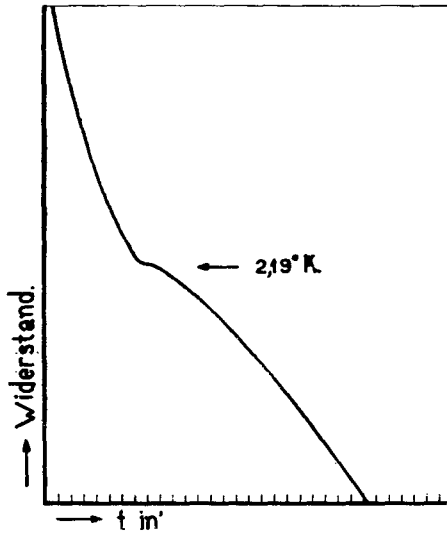


Fig. 16.

Les expériences dont j'ai parlé jusqu'à présent suggèrent l'idée que cette transformation se passe vraiment d'une manière brusque. Mais des recherches, faites également en collaboration avec le Dr. Clusius, y mettent un certain doute. En effet, nous avons exécuté des déterminations de la chaleur spécifique de l'hélium liquide, en fournissant chaque fois à une certaine quantité d'hélium liquide une petite quantité de chaleur. La température que nous avons appelée jusqu'à présent température de transformation, est indiquée dans la courbe des chaleurs spécifiques par un sommet très pointu. Mais il semble qu'à

des températures voisines la chaleur spécifique a également une valeur exceptionnelle. Si c'est réellement le cas, il faudrait conclure que la transformation ne se passe pas à une température exactement définie, mais dans une petite région de température.

Toutefois cette conclusion ne me semble pas encore suffisamment certaine. Les expériences doivent encore être discutées plus en détail,

peut-être de nouvelles expériences doivent encore être faites. Pour le moment je laisserai la question ouverte.

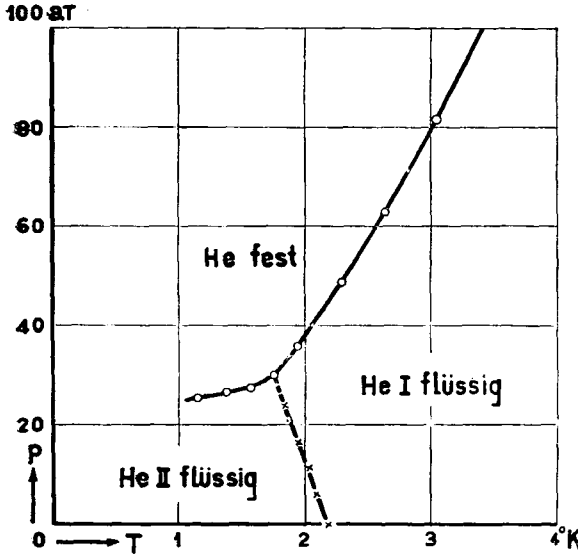


Fig. 17.

Vous me demanderez, et à juste titre, si je puis donner une explication pour cette allure curieuse de la courbe de l'hélium, pour la propriété d'indiquer une transformation, strictement brusque ou non, à l'état liquide. A mon regret je ne puis pas dire grand chose à cet égard. L'idée m'est venue que peut-être l'hélium liquide

Il se trouverait dans un état quasi liquide. C'est-à-dire qu'en réalité les atomes de l'hélium à ces températures si proches du zéro absolu ne se trouvent pas dans un état de désordre complet, mais qu'ils se rangent alors plus ou moins régulièrement dans un certain ordre, ressemblant dans une certaine mesure, dans des petits éléments de volume, à un réseau cristallin, sans que, toutefois, la substance ait perdu sa fluidité. D'ailleurs Kamerlingh Onnes avait déjà une idée pareille quand il a observé qu'aux températures au-dessous de  $1^{\circ}$  K l'hélium reste encore liquide.

Remarquons que la température, à laquelle la transformation a lieu, est environ  $2/5$  de la température critique, c'est-à-dire une température à laquelle on s'attendrait que l'hélium passe à l'état cristallin.

Nous avons, M. Mooy et moi, essayé de résoudre cette question par la méthode de Debye et Scherrer, en étudiant la structure de l'hélium liquide au moyen des rayons X. Jusqu'à présent, hélas, sans succès. La quantité des rayons X, dispersés par l'hélium est si petite, à cause de sa densité

minime, qu'elle est complètement noyée dans la quantité des rayons X, dispersés par la paroi du vase en verre aussi mince que possible, dans lequel nous avons réussi à conserver l'hélium liquide.

Jusqu'à présent il semblait que le phénomène d'une transformation, de nature simplement physique, à l'état liquide était particulier à l'hélium seul, et dépendait de la proximité du zéro absolu. Or, il ne semble pas du tout être ainsi. En effet, il y a quelques mois MM. Wolfke et Mazur, au Laboratoire de physique de l'École Polytechnique de cette ville, ont trouvé des phénomènes analogues dans l'éther éthylique. Récemment MM. Wolfke et Mazur ont constaté que les mêmes phénomènes ont lieu dans la nitrobenzine et le sulfure de carbone. Cette découverte importante ouvre de vastes perspectives, et il est d'un grand intérêt de rechercher, si le même phénomène de transformation physique à l'état liquide se produit dans d'autres substances, peut-être dans toutes.

Je viens de dire que l'éther éthylique, la nitrobenzine et le sulfure de carbone présentent un phénomène analogue. De fait ce phénomène n'est pas identique avec celui que présente l'hélium. D'après ce que MM. Wolfke et Mazur ont déduit de la manière, comment la

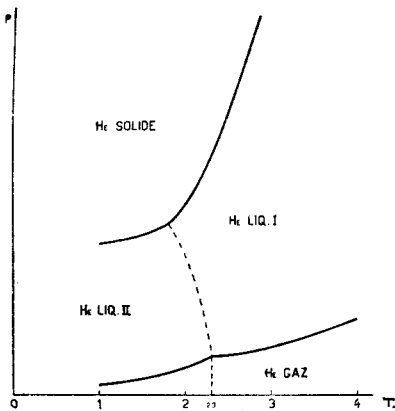


Fig. 18.

polarisation diélectrique se comporte pendant la transformation, la *molécule* de ces substances subit un changement. La transformation dans l'hélium liquide, au contraire, se passe sans que la molécule de cette substance subisse un changement quelconque.

Nous ne pouvons qu'exprimer le désir que l'étude de ces phénomènes soit continuée; sans doute elle ne tardera pas d'en relever enfin la nature.

Si donc je ne puis pas donner une explication définitive, j'espère avoir montré qu'une substance d'une constitution aussi simple que ne l'est l'hélium, peut encore montrer des phénomènes bien particuliers lorsqu'elle est refroidie à des températures aussi proches du zéro absolu que celles dont je viens de parler.

Manuscrit reçu le 5 novembre 1931.

---