

BIBLIOTHEEK
GORLAEUS LABORATORIA

Postbus 9502
2300 RA LEIDEN
Tel.: 071 - 527 43 66 / 67

Universiteit Leiden

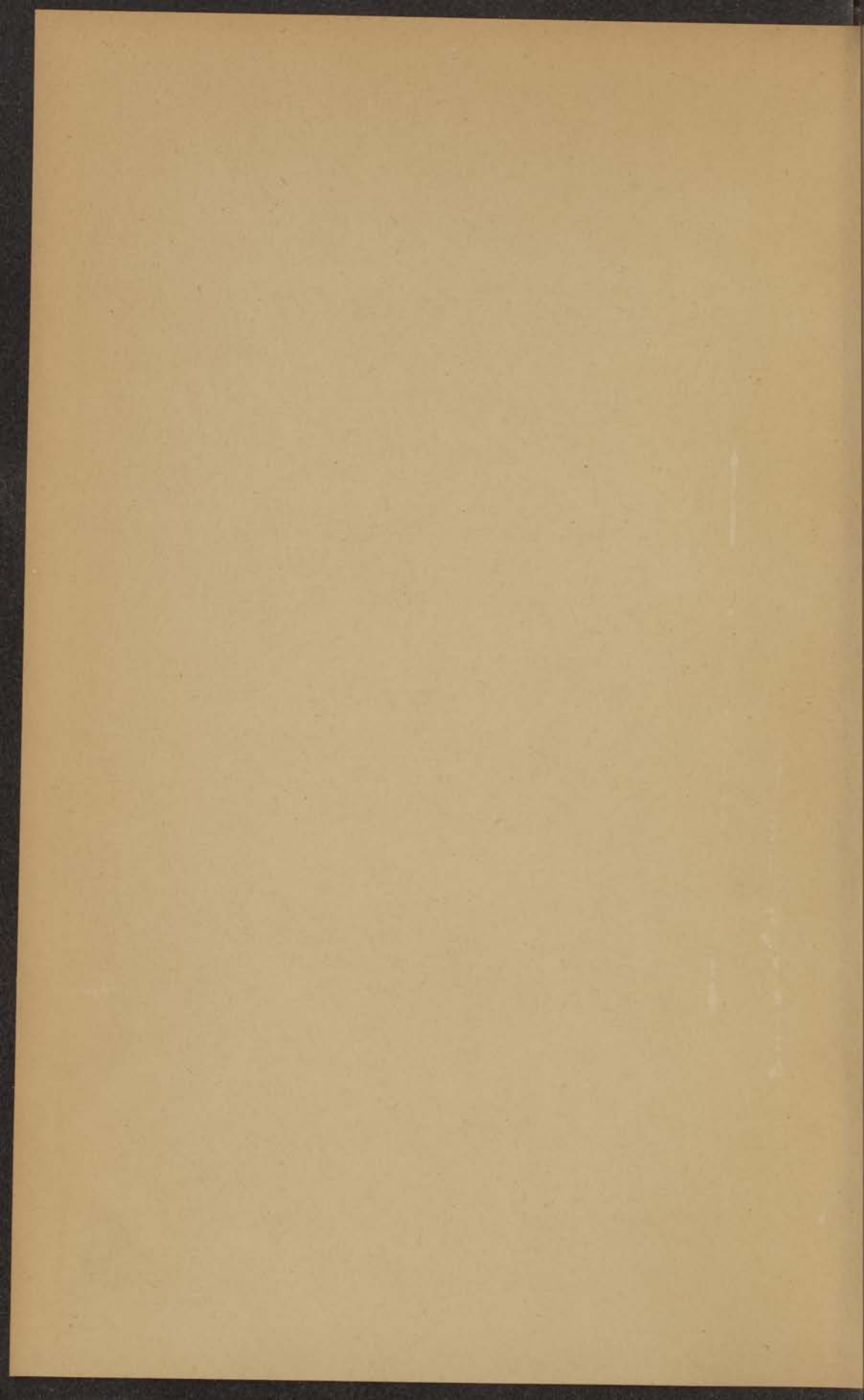


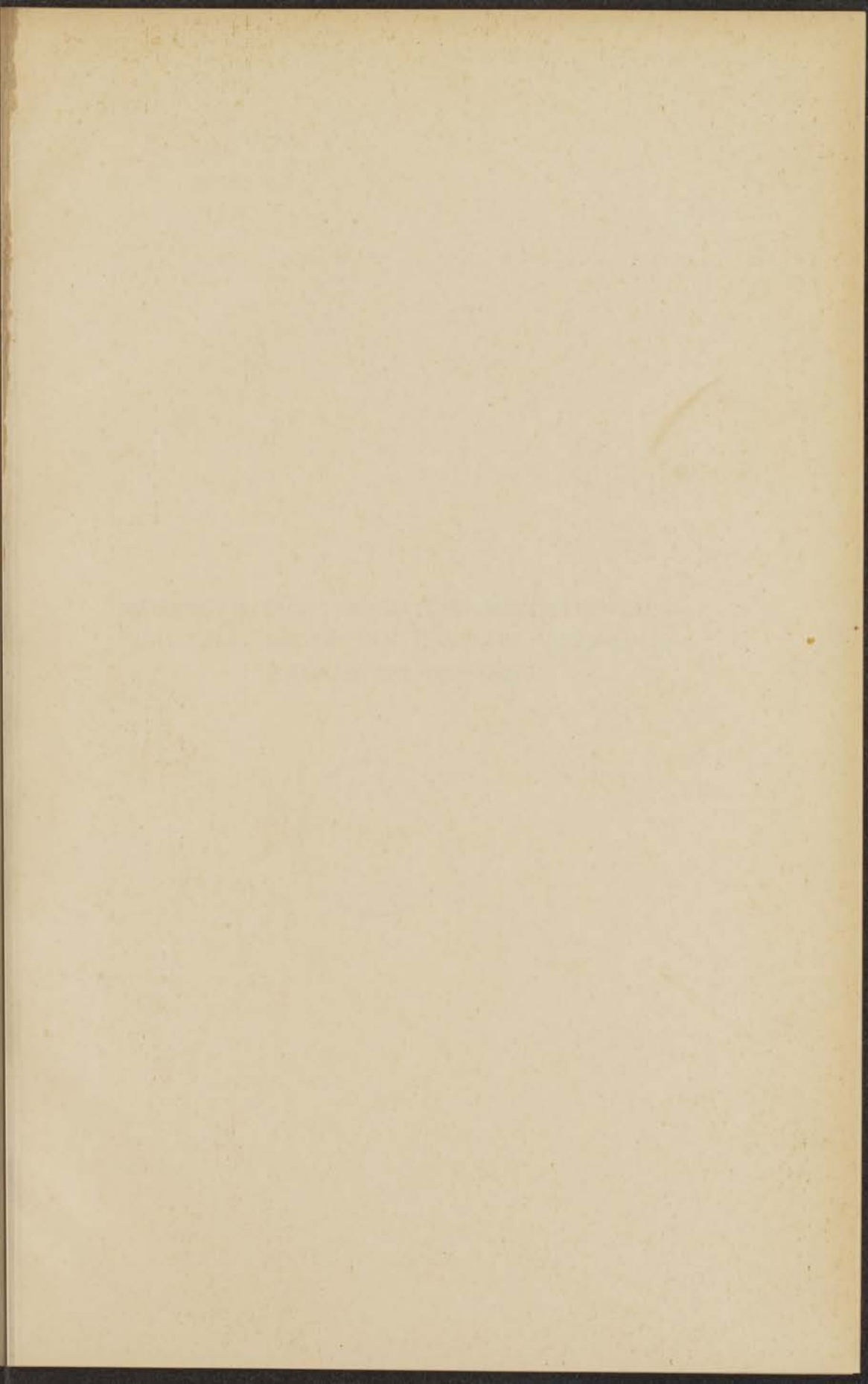
1 393 359 8

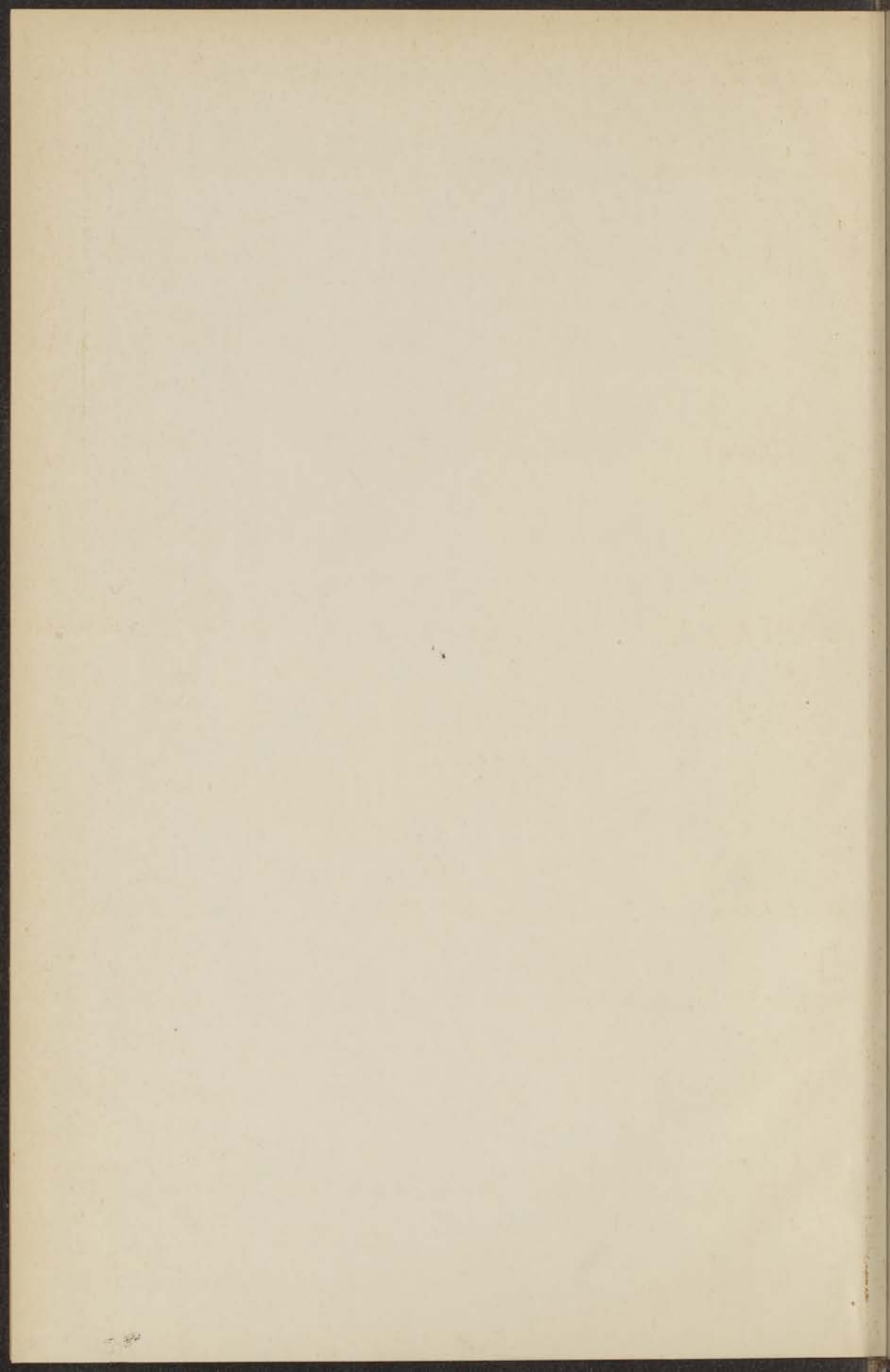




kast dissertaties







METINGEN BIJ LAGE TEMPERATUREN MET
EEN DIFFERENTIAAL-THERMOMETER VAN
CONSTANT VOLUMEN EN
VERANDERLIJKE DICHTHEID.

METINGEN BIJ LAGE TEMPERATUREN MET DEN DIFFEREN-
TIAAL-THERMOMETER VAN CONSTANT VOLUMEN EN
VERANDERLIJKE DICHTHEID.



UNIVERSITY OF MICHIGAN LIBRARY
ANN ARBOR, MICHIGAN 48106-1000
SERIALS ACQUISITION



**METINGEN BIJ LAGE TEMPERATUREN MET
DEN DIFFERENTIAAL THERMOMETER VAN
CONSTANT VOLUMEN EN
VERANDERLIJKE DICHTHEID.**

PROEFSCHRIFT TER VERKRIJGING VAN DEN GRAAD
VAN DOCTOR IN DE WIS- EN NATUURKUNDE AAN
DE RIJKS-UNIVERSITEIT TE LEIDEN, OP GEZAG
VAN DEN RECTOR-MAGNIFICUS MR. A. J. BLOK,
HOOGLEERAAR IN DE FACULTEIT DER RECHTS-
GELEERDHEID, VOOR DE FACULTEIT DER WIS-
EN NATUURKUNDE TE VERDEDIGEN OP **VRIJDAG**
10 JULI 1925, DES NAMIDDAGS TE 1 UUR, DOOR
FRANCISCUS PETRUS GERARDUS ANTONIUS JOHANNES VAN AGT
GEBOREN TE 'S-HERTOGENBOSCH.

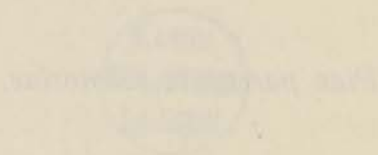
WITZGEN BIJ LAAG TEMPERATUREN MET
DEN DIFFERENTIAAL THERMOMETER VAN
CONSTANT VOLUMEN EN
VERANDERLIJK DICHTHEID.

PROEFSCHEFT VAN DE VERBODEN VAN DE
VAN WITZGEN BIJ LAAG TEMPERATUREN MET
DEN DIFFERENTIAAL THERMOMETER VAN
CONSTANT VOLUMEN EN VERANDERLIJK
DICHTHEID. DEEL I. DE WITZGEN BIJ
LAAG TEMPERATUREN MET DEN
DIFFERENTIAAL THERMOMETER VAN
CONSTANT VOLUMEN EN VERANDERLIJK
DICHTHEID. DEEL II. DE WITZGEN BIJ
LAAG TEMPERATUREN MET DEN
DIFFERENTIAAL THERMOMETER VAN
CONSTANT VOLUMEN EN VERANDERLIJK
DICHTHEID. DEEL III. DE WITZGEN BIJ
LAAG TEMPERATUREN MET DEN
DIFFERENTIAAL THERMOMETER VAN
CONSTANT VOLUMEN EN VERANDERLIJK
DICHTHEID.



AMSTERDAM - DE ERVEN VAN DE WITZGEN - 1902

Piae parentum memoriae.



INHOUD

Bij het aanbieden van dit proefschrift, zeg ik U allen, Hoogleraren der Wis- en Natuurkundige faculteit, die tot mijn wetenschappelijke vorming hebt bijgedragen, hartelijk dank.

In het bijzonder dank ik U, Hooggeleerde KEESOM, hooggeachte promotor; Uw groote hulpvaardigheid en welwillende kritiek heb ik bij de samenstelling van dit proefschrift zeer leeren waardeeren.

Het was voor mij een groot voorrecht, Hooggeleerde KAMERLINGH ONNES, geruimen tijd onder Uw bezielende leiding op Uw laboratorium te mogen werken. U mijn buitengewone erkentelijkheid te betuigen is een plicht, waarvan ik mij gaarne kwijt.

Tenslotte gedenk ik dankbaar de velen, die mij zoo dikwijls door hun technische hulp, hebben bijgestaan.

The first part of the book is devoted to a general introduction to the subject of the history of the United States. The author discusses the various factors that have influenced the development of the country, including geography, climate, and the actions of its people. He also touches upon the role of the government and the impact of the American Revolution.

In the second part of the book, the author provides a detailed account of the early years of the United States, from the time of the first settlers to the end of the Revolutionary War. He describes the challenges faced by the young nation and the efforts made to establish a stable government.

The final part of the book is a conclusion that summarizes the main points discussed throughout the text. The author reflects on the progress made by the United States and offers some thoughts on the future of the country.

INHOUD.

	blz.
Inleiding	1
I. Overzicht der metingen	7
II. De toestellen	11
III. De calibraties	17
IV. De metingen	21
V. De berekeningen	26
VI. De uitkomsten	31
VII. De wet der overeenstemmende toestanden	54
VIII. De thermische uitzetting van Jenaglas 16 ^{III}	61

De uitkomsten, vermeld in dit proefschrift, vormen het
onderwerp van Mededeeling N^o. 176, uit het Natuurkundig
Laboratorium te Leiden.

Verslag der Kon. Akad. van Wet. Amsterdam, Juni 1925.

INLEIDING.

Het doel van het onderzoek, waarover dit proefschrift handelt, was driedelig.

In de eerste plaats werden waterstof- en heliumisothermen bepaald hoofdzakelijk bij temperaturen, bereikbaar met baden van vloeibare waterstof (enkele in vloeibare zuurstof), en wel isothermen van ongeveer 0,7 tot 11 maal de normale dichtheid. In de empirische toestandsvergelijking van Kamerlingh Onnes in den vorm

$$pv = A + Bd + Cd^2 + \dots (1)$$

kunnen bij deze dichtheden de termen vanaf Cd^2 bijna altijd buiten beschouwing blijven, zoodat de waarnemingen zich dan bijzonder goed leenen tot het bepalen van den tweeden viriaal-coëfficiënt B.

Van deze grootheid bestonden voor waterstof reeds bepalingen van Kamerlingh Onnes en de Haas ¹⁾ bij en beneden het kookpunt van vloeibare waterstof. Over de nauwkeurigheid dezer bepalingen was echter twijfel gerezen. Vooreerst was het noodig gebleken, de uitkomsten dezer bepalingen sterk te vereffenen ten behoeve van de correcties, die aan de temperaturen, waargenomen met den waterstofthermometer, dienen aangebracht te worden om haar tot de thermodynamische schaal te herleiden. Vervolgens vonden Cath en Kamerlingh Onnes ²⁾ voor deze waarden een sterke afwijking van de wet der overeenstemmende toestanden. Zij bepaalden langs indirecten weg B-waarden ³⁾ van argon, neon, stikstof en zuurstof. Uit de verschillen in

¹⁾ Comm. Leiden No. 127b.

²⁾ Comm. Leiden No. 156a.

³⁾ Zij bepaalden waarden van $B' = \frac{B_A}{A_A}$ (eenheden van Amagat).

de temperatuuraanwijzing van den internationalen heliumthermometer enerzijds en den argon-, neon-, stikstof- en zuurstofthermometer anderzijds, werden namelijk B-waarden van deze gassen berekend. Na herleiding in gereduceerde grootheden,

werden deze uitkomsten in een $\frac{d(pv)}{dp}, \frac{1}{t}$ diagram uitgezet en aangevuld met de waarnemingen voor waterstof van Kamerlingh Onnes en Braak ¹⁾ en de bovengenoemde van Kamerlingh Onnes en de Haas. Hierbij bleken vooral de laatste sterk af te wijken van al de overige. Nieuwe, meerdere en zoo mogelijk nauwkeuriger bepalingen der B-waarden van waterstof in het besproken temperatuurgebied waren daarom gewenscht.

Ook voor helium was het gewenscht in het genoemde temperatuurgebied B-waarden te bepalen, daar hiervan slechts enkele bepalingen bestonden van Kamerlingh Onnes ²⁾ en van Palacios Martinez en Kamerlingh Onnes ³⁾.

In de tweede plaats kan men de vraag stellen of in de experimenteel bepaalde isothermen bij geringe dichtheden een quanta-invloed op de compressibiliteit der gassen te herkennen is. Volgens de beschouwingen van Tetrode ⁴⁾, Lenz ⁵⁾, Sackur ⁶⁾ en Keesom ⁷⁾ zou de invloed van quanta den vorm der isothermen van ideale eenatomige gassen, van reële gassen dus zeker ook wel, gecompliceerder maken.

In een onderzoek over dit onderwerp namen Palacios Martinez en Kamerlingh Onnes ³⁾ aan, dat voor reële gassen in de empirische toestandsvergelijking van

¹⁾ Comm. Leiden No. 101b.

²⁾ Comm. Leiden No. 102c.

³⁾ Comm. Leiden No. 164.

⁴⁾ H. Tetrode, Physik. Z.S. 14 (1913) p. 212.

⁵⁾ W. Lenz, A. Sommerfeld. Vorträge über die Kin. Theorie der Materie und der Elektrizität. 1914, p. 125.

⁶⁾ C. Sackur. Die Zustandsgleichung der Gase und die Quantentheorie Z.f. Electrochem., 20 (1914) p. 563.

⁷⁾ Comm. Leiden Suppl. No. 30, 1913.

Kamerlingh Onnes de invloed der quanta onafhankelijk van andere invloeden, die de gassen doen afwijken van de wet van Boyle, zich zou doen gevoelen door een afzonderlijke term van den vorm $Q d^{\frac{2}{3}}$, evenals dit voor ideale eenatomige gassen door bovengenoemde schrijvers werd afgeleid.

De toestandsvergelijking zou dus den vorm aannemen

$$pv = A + Q d^{\frac{2}{3}} + B d + C d^2 \dots \quad (2)$$

en een isotherm voorstellen, die bij kleine dichtheden concaaf naar de d-as zou zijn.

De metingen van Schalkwijk ¹⁾ pleitten, wanneer met Keesom voor Q een waarde 0,0002313 werd ingevoerd, noch vóór, noch tegen dezen isothermvorm. Die van Kamerlingh Onnes en de Haas sloten iets beter aan een vergelijking van den vorm (2) zonder den term Cd^2 aan, dan aan een lineaire formule, maar het verschil was te weinig duidelijk om een conclusie ten gunste der quanta te rechtvaardigen. Palacios Martinez en Kamerlingh Onnes vonden ook geen betere overeenstemming tusschen de spanningscoëfficienten van stikstof, waterstof en helium in den Avogadrotoestand, welke toch, evenals de temperatuurcorrecties ter herleiding op de proefondervindelijke Avogadro-schaal der gassen, niet meer met behulp eener vergelijking van den vorm (1) maar volgens (2) zouden moeten afgeleid worden.

Ten einde zoo mogelijk tot een besluit te geraken omtrent den invloed der quanta, werden door hen met behulp van speciaal voor dit doel vervaardigde toestellen enkele isothermen van waterstof en helium bij 25^o,50 K. gemeten, waarbij een grootere nauwkeurigheid werd getracht te bereiken.

Deze metingen voerden hen tot de conclusie, dat het niet waarschijnlijk is, dat quanta-invloeden zich doen gevoelen. Intusschen is in den laatsten tijd deze conclusie weer minder dringend geworden, nu volgens Einstein ²⁾ en Planck ³⁾ de invloed

¹⁾ J. C. Schalkwijk. Diss. Leiden 1902. Comm. No. 70.

²⁾ A. Einstein. S. B. d. Preuss. Ak. 1924, p. 261.

³⁾ M. Planck. Zür Frage der Quantelung einatomiger Gase. S.B.d. Preuss. Ak. 1925, p. 49.

der quanta zich doet gevoelen in den vorm van een term Q_d , dus zich vermengt met de andere invloeden, die een afwijking van de wet van Boyle tengevolge hebben.

De metingen door mij verricht zijn ook als een voortzetting van dit onderzoek van Palacios Martinez en Kamerlingh Onnes te beschouwen. (zie pag. 17).

In de derde plaats gaven de proeven, die geschieden met den differentiaalthermometer van constant volumen, voorzien van pipetten, inrichtingen, waarmee het mogelijk is de gashoeveelheid in de thermometers te vergrooten, de gelegenheid dezen thermometer, gevuld met waterstof en helium, bij verschillende nulpuntsdrukken te bestudeeren ¹⁾, zoowel de aanwijzingen van iederen thermometer afzonderlijk bij verschillende dichtheden, als wel het verschil der aanwijzingen van beide thermometers bij dezelfde dichtheden. Hierdoor werden de onderzoekingen van Kamerlingh Onnes en Holst ²⁾ en van Cath en Kamerlingh Onnes ³⁾ ter vergelijking van den internationalen waterstof- en heliumthermometer tot thermometers met grooter en kleiner dichtheid uitgebreid.

De nieuwe B-waarden stelden in staat de correcties te berekenen, noodig om de gevonden temperaturen op de waterstof- en heliumschaal te herleiden op de Avogadroschalen dier gassen. ⁴⁾

Ten slotte vindt men in hoofdstuk VIII van dit proefschrift een reeks proeven meegedeeld ter bepaling van de thermische expansie van Jenaglas 16^{III}, de glassoort, waarvan de gebruikte gasthermometers vervaardigd zijn.

Deze uitzetting was slechts bekend tot -182° C. uit

¹⁾ Over hetzelfde onderwerp handelt een binnenkort te verwachten mededeeling van Dr. J. A. Beattie uit Cambridge, Mass. (U.S.A.), naar aanleiding van proeven door hem in het Leidsche laboratorium gedaan.

²⁾ Comm. Leiden No. 141a.

³⁾ " " " 156a.

⁴⁾ " " " Suppl. 51a.

metingen van Kamerlingh Onnes en Heuse ¹⁾ en van Kamerlingh Onnes en Clay ²⁾. Daar gegevens over het gedrag van dit Jenaglas beneden deze temperatuur ontbraken, moest men zich bij volumenbepalingen bij lager temperaturen behelpen door de bovengenoemde metingen te extrapoleeren tot de temperatuur van vloeibare waterstof met behulp van de waarnemingen van Lindemann ³⁾ aan een staafje van een onbekende glassoort.

Ofschoon men kon onderstellen, dat deze relatieve metingen wel het karakter der lengteverandering van glas weergaven, bleven toch nauwkeurige bepalingen over de thermische uitzetting van Jenaglas 16^{III} noodzakelijk vooral tot de temperatuur van vloeibare waterstof en zoo mogelijk tot in het heliumgebied.

Ook vormden deze metingen een begin van een uitgebreider onderzoek naar de thermische uitzetting van vaste stoffen bij zeer lage temperaturen, waardoor het mogelijk zou worden de kristaltheorie van Born ⁴⁾ en de wet van Debije ⁵⁾ aan de waarnemingen te toetsen.

¹⁾ Comm. Leiden No. 85.

²⁾ " " " " 95.

³⁾ Ch. L. Lindemann. Über die Temperaturabhängigkeit des thermischen Ausdehnungscoefficienten. Physik. Z. XII. 1911, p. 1197 en XIII. 1912, p. 737.

⁴⁾ Max Born. Zur Thermodynamik der Kristallgitter. Z.f. Physik. VII 1921, p. 217.

— Über die Temperaturabhängigkeit des Pyroelektrizität. Physik. Z. XXIII, 1922, p. 125.

⁵⁾ P. Debije. Vortrag auf dem Wolfskehl-Kongress. Göttingen 1913. (B. G. Teubner, Leipzig 1913.)

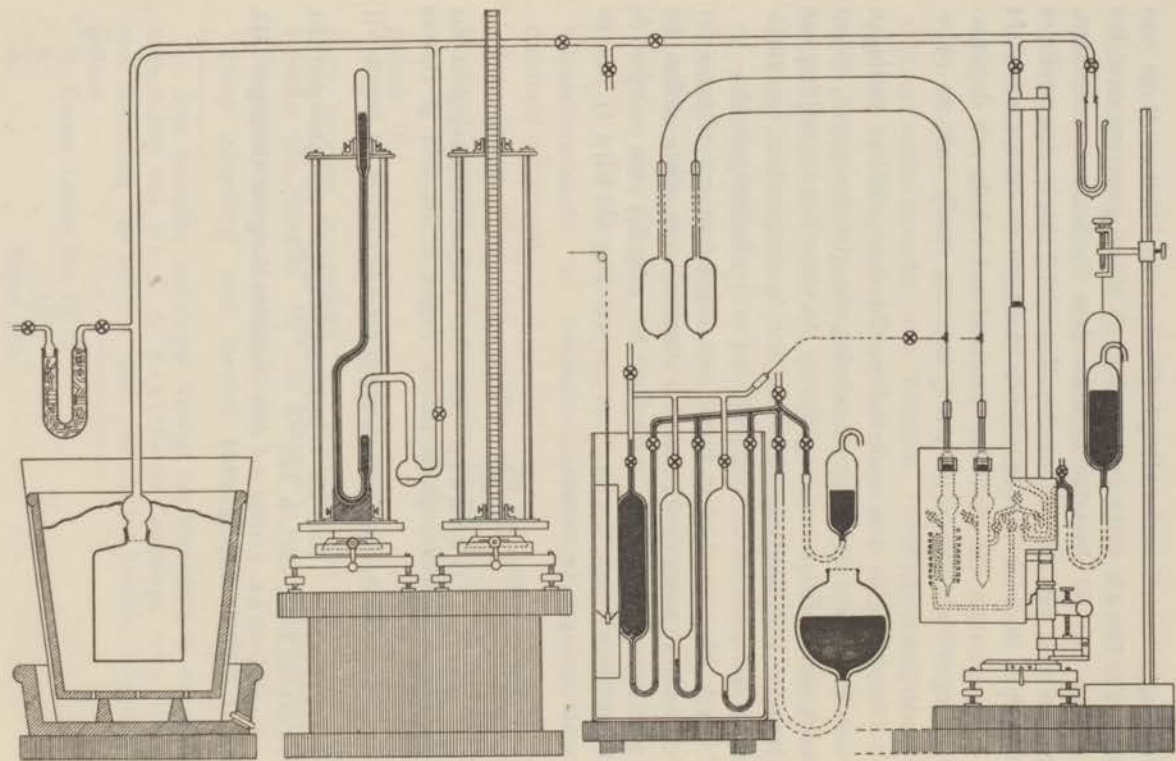


Fig. 1.

I. OVERZICHT DER METINGEN.

Het eerst werden isothermen van waterstof en helium bepaald bij het normale kookpunt van vloeibare waterstof. De metingen droegen in hoofdzaak hetzelfde karakter als de reeds meer genoemde van Palacios Martinez en Kamerlingh Onnes. Nadat de vereischte nauwkeurige calibraties geschied waren, had voor iedere meting bij lage temperatuur een drukmeting bij kamertemperatuur plaats, waardoor de gashoeveelheden in thermometer en pipetten (zie fig. 1) bekend werden. Hierna had een drukmeting plaats in vloeibare waterstof of zuurstof, eerst alleen van het gas in den thermometer, daarna telkens van het gas, dat er zich in bevond, nadat de inhoud van de verschillende pipetten achtereenvolgens in den thermometer gedreven was.

Uit de gebruikte gashoeveelheid en den gemeten druk, kon voor ieder punt de waarde van $p v_A$ (druk in internationale atm., v in eenheden van Amagat) berekend worden, waarbij gebruik gemaakt kon worden van de in het laatste hoofdstuk meegedeelde bepaling van de uitzetting van Jenaglas 16^{III}.

De uitkomsten werden door een vergelijking van den vorm:

$$p v_A = A_A + B d_A$$

voorgesteld, waardoor de gezochte B-waarde bekend werd. Ook kon onderzocht worden de vergelijking van den vorm:

$$p v_A = A_A + Q d_A^2 + B_A d_A$$

De temperatuurmeting geschiedde door middel van twee platina-weerstandsthermometers, die te voren geijkt waren met den heliumthermometer, maar onafhankelijke temperatuurbepalingen werden verkregen door de drukmetingen bij lage tempe-

ratuur te combineeren met nulpuntsdrukken, die berekend konden worden uit de bekende hoeveelheid van het gebruikte gas of die — echter alleen voor de kleinste dichtheid — ook experimenteel in ijs gemeten konden worden.

Uit de gelijktijdige metingen van den waterstof- en heliumthermometer werden de verschillen gevonden van de waterstof- en heliumschaal voor verschillende dichtheden.

Met de reeds gevonden waarden voor den tweeden viriaalcoëfficiënt werden de noodige correcties berekend om van de gasschaal over te gaan tot de experimenteele Avogadroschalen van waterstof en helium en konden deze schalen vergeleken worden, zoowel voor beide gassen als voor ieder afzonderlijk, wanneer deze Avogadroschalen werden afgeleid uit metingen bij verschillende nulpuntsdrukken in de thermometers.

Na de metingen bij het normale kookpunt van vloeibare waterstof werden proeven gedaan bij lager temperaturen, terwijl ook enkele bepalingen in vloeibare zuurstof plaats hadden. Bij deze metingen moest rekening gehouden worden met de omstandigheid, dat met den gebruikten manometer geen drukkingen boven ongeveer twee atmosfeeren bepaald konden worden, terwijl bij het vergrooten der dichtheid in de thermometers vooral gezorgd moest worden, dat geen condensatie van waterstof kon optreden. Hierom moest overgegaan worden tot vermindering van den nulpuntsdruk der vullingen, die tot nu toe 1000 m.M. had bedragen. Het was gewenscht deze zoo klein mogelijk te maken om bij zooveel mogelijk dichtheden te kunnen meten zonder gevaar voor condensatie en om binnen het meetbare gebied van druk te blijven. Daarom werd voor nulpuntsdruk ongeveer 500 m.M. gekozen, waarbij het — in verband met de afmetingen der pipetten en verbindingsbuizen — nog juist mogelijk was, het kwik, waarmee het gas in de thermometers gedreven werd, na afloop der meting weer terug te drijven tot den beginstand, hetgeen voor een volgende meting noodzakelijk was.

Uit onderstaande figuur, waarin voor temperaturen tusschen

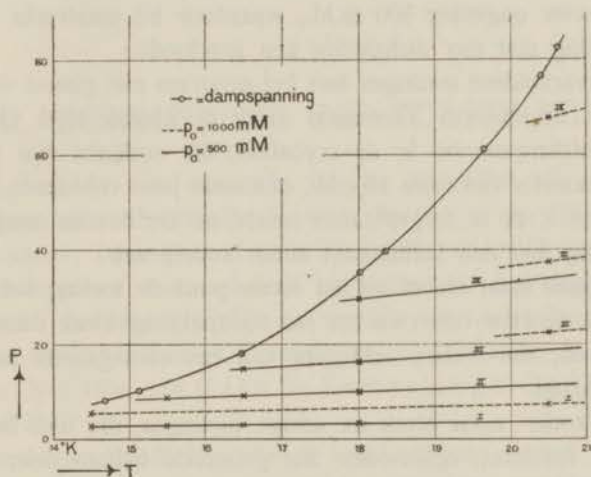


Fig. 2

14,05 en 20,05 K. grafisch de dampspanning van waterstof en de spanning van de waterstof in den thermometer voor en na de achtereenvolgende toevoeging van het gas uit de pipetten is voorgesteld, blijkt, dat zonder gevaar voor condensatie bij ongeveer 18° K. een meting met vier dichtheden mogelijk was, bij ongeveer 16° K. met drie dichtheden, bij ongeveer 15° K. met twee dichtheden. Bovendien kon bij 14,5 K. nog een meting geschieden met het gas uit den thermometer alleen, die gecombineerd zou kunnen worden met een bepaling bij dezelfde temperatuur van den internationalen waterstofthermometer.

In vloeibare zuurstof hadden metingen plaats bij ongeveer 90° K. met drie dichtheden en bij ongeveer 70° K. met vier dichtheden.

Ten slotte werden de vullingen verwisseld. Na zorgvuldig uitpompen der gebruikte gassen, werden thermometers en pipetten, die eerst met waterstof gevuld waren, na herhaaldelijk spoelen met helium, op de gebruikelijke wijze met dit gas gevuld.

Eveneens de andere kant met waterstofgas. De nulpuntsdrukken waren weer ongeveer 500 m.M., waardoor bij omstreeks 18° K. een meting met vier dichtheden kon geschieden.

Bij verscheidene metingen kon het program niet geheel volledig worden uitgevoerd. Tweemaal brak de glazen steel van den waterstofthermometer in de cryostaat, die ondanks zijn inwendigen diameter van ruim 12 c.M., ook maar juist voldoende ruimte bood aan al de er in geplaatste toestellen. De tweede maal werd de meting met den heliumkant alleen voortgezet.

Een paar maal moest na het eerste punt de meting beëindigd worden, doordat onverwachts een loodpakking bleek doorgelekt te hebben, die weken achtereen aan een nauwgezette contrôle had voldaan.

Een ander maal bleek na eenige metingen, die niet het verwachte resultaat opleverden, het gebruikte helium door onnaaspieurbare oorzaak onzuiver te zijn geweest, waardoor deze waarnemingen moesten verworpen worden en slechts de uitkomsten van den waterstofkant overbleven.

Op deze wijze ontstonden de tabellen, waarin slechts uitkomsten of van waterstof of van helium voorkomen.

II. BESCHRIJVING DER TOESTELLEN.

Fig. 1 geeft een overzicht van de toestellen, die voor de metingen gediend hebben. In de eerste plaats is er een differentiaalthermometer, twee zooveel mogelijk gelijke en gelijk opgestelde gasthermometers van constant volumen, die het lange manometerbeen gemeenschappelijk hebben. De uitvoerige beschrijving hiervan met nauwkeurige afbeeldingen, vindt men in de Leidsche Comm. No. 156a van Cath en Kamerlingh Onnes, pag. 13 tot 16.

Aan de staalcapillairen, die de verbindingen vormen tusschen thermometers en manometers, zijn zijtakken gesoldeerd, die voeren naar twee stellen van telkens drie pipetten van respectievelijk ongeveer 200, 200 en 400 c.M³ inhoud en evenals de reservoirs der thermometers vervaardigd van Jenaglas 16^{III}. Fig. 3. geeft een doorsnee, zij- en bovenaanzicht dezer pipetten. De kranen K₄ stellen in staat het geheele pipettensysteem af te sluiten, zoodat men slechts de differentiaalthermometers overhoudt. Koppelstukken, die zich onmiddellijk achter deze kranen bevonden, stelden in staat de verbindingen los te nemen en de twee deelen, waaruit de toestellen bestaan, geheel van elkaar te scheiden. De koppelstukken waren voorzien van loodpakking. Daar deze loodpakking, na verscheidene maanden een zeer goede sluiting gegeven te hebben, soms plotseling bleek door te lekken, zijn de koppelstukken later weggenomen en door gesoldeerde verbindingen vervangen. De mindere mate, waarmee de toestellen nu uiteen te nemen waren, leidde niet tot eenige moeilijkheid.

De slijpstukken B₅ en de kranen K₈ dienen voor de verbinding met de hulptoeu-
stellen voor het evacueeren, controleeren en vullen

De kranen K₁, K₂ en K₃ stellen in staat de pipetten, na opening

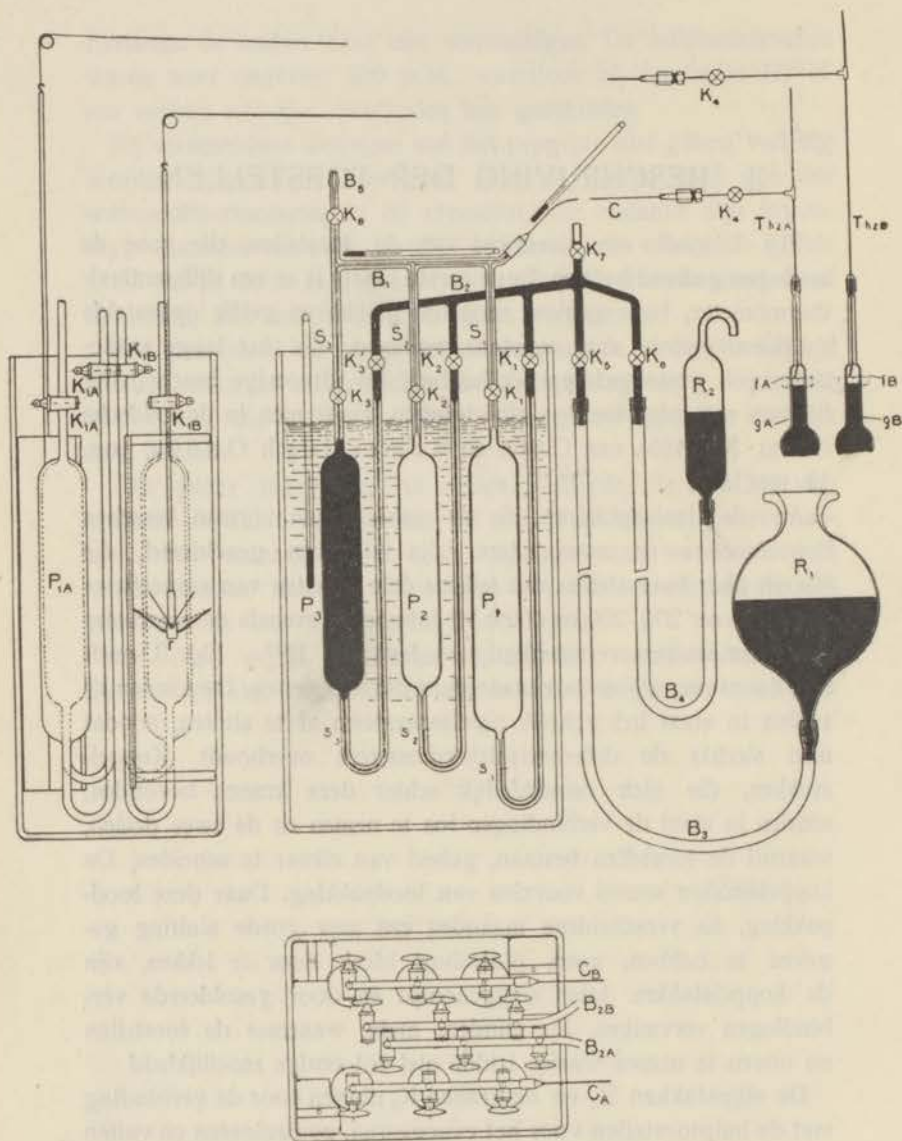


Fig. 3.

van de kranen K_4 , één voor één in verbinding te stellen met de bijbehorende thermometers.

De pipetten eindigen aan de onderzijde in nauwe buizen, die langs de kranen K_1' , K_2' , K_3' en K_5 of K_6 verbinding geven door middel van caoutchoucslangen met een groot of een klein kwik-reservoir, waarmee het kwik in de pipetten kan gedreven worden.

Deze reservoirs kunnen met de hand hooger en lager versteld worden, terwijl de beide kleine reservoirs door middel van schroeven nog geringe verplaatsingen kunnen ondergaan. De kranen K_7 geven o.a. de gelegenheid om lucht, die door de caoutchoucslangen mocht binnen geëkt zijn en die zich in het hoogste punt onder de kranen K_7 verzameld heeft, te verwijderen.

Iedere pipet is boven en onder van merkteekens S en s voorzien. Het volumen tusschen beide merken is vóór het in elkaar zetten der toestellen, nauwkeurig uitgemeten.

Vóór het evacueeren en vullen en telkens vóór het meten der gashoeveelheden, wordt het kwik op de merken s_1 , s_2 en s_3 ingesteld door eerst de kranen K_5 en een der kranen K_1' , K_2' of K_3' te openen en het kwik van R_2 op de geschikte hoogte te brengen. Na sluiting van K_5 en opening van K_6 , stellen de kleine reservoirs, die met schroeven hooger en lager geplaatst kunnen worden, in staat het kwik juist tot aan de merken te brengen. Hierna worden de kranen K_1' , K_2' en K_3' gesloten, K_5 of K_6 echter open gelaten, om te verhinderen, dat door een mogelijke uitzetting van het kwik een breuk zou ontstaan.

Na vulling van thermometers en pipetten met gas, worden de kranen K_8 , K_6 , K_1 , K_2 en K_3 gesloten.

Wanneer het gas uit een der pipetten b.v. P_3 in den bijbehorenden thermometer moet gedreven worden, worden K_4 en K_1 geopend en, na weer R_1 op de geschikte hoogte te hebben gebracht, K_5 en K_1' geopend. Na met behulp van R_2 het kwik weer nauwkeurig bij het merk S_3 gebracht te hebben, worden K_3 gesloten, doch K_3' opengelaten om het kwik gelegenheid te geven tot uitzetting.

Het geheele samenstel van pipetten is bevestigd aan een zwaar ijzeren raam en is zoo stevig gebouwd, dat het gemakkelijk een gewicht van ± 25 K.G. kwik verdragen kan. Dit alles rust op en hangt in een groot glazen reservoir, zoo hoog mogelijk gevuld met water, zoodat slechts de kranen boven den spiegel uitsteken.

Drie roerders, als pompen werkende, zorgen, dat overal dezelfde temperatuur heerscht. Voor herstellingen en reiniging kan het ijzeren raam met alles, wat er aan hangt, gemakkelijk uit het waterbad getakeld worden.

Een thermometer, in vijftigste graden verdeeld en in twintigsten hiervan afleesbaar, bevindt zich in het bad, waarvan de temperatuur op eenige duizendste graden constant gehouden kan worden door het te omgeven met een dikke mantel van zeer poreuze caoutchouc en de temperatuur van het water weinig verschillend van de gemiddelde kamertemperatuur te nemen. (Zie hiervoor fig. 4).

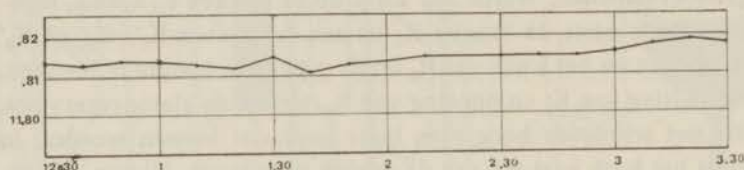


Fig. 4.

De reservoirs van de beide gasthermometers kunnen gemakkelijk naast de pipetten een plaats vinden in het waterbad, zoodat alle groote gasvolumina zich op dezelfde temperatuur bevinden.

Bij de eerste metingen werd in navolging van Palacios Martinez en Kamerlingh Onnes, de temperatuur van het bad automatisch constant gehouden, door gebruik te maken van een thermoreguleur ¹⁾ geconstrueerd door den Heer Flim, bedrijfschef van het laboratorium.

Daar dit vernuftig uitgedachte toestel echter een buitengewone

¹⁾ Beschreven in Comm. No. 164, p. 15.

zorg vereischte, is later bij het verkrijgbaar komen van poreuze caoutchouc, die een zeer goede warmteisolator bleek te zijn, tot de boven reeds vermelde methode overgegaan.

Vóór de metingen bij lage temperatuur worden de reservoirs der beide gasthermometers in een groote cryostaat geplaatst, voorzien van twee roeders ter verkrijging van een gelijkmatige temperatuur door het geheele bad van vloeibaar gemaakt gas, een vlotter ter aanwijzing van de hoogte der vloeistof en een „hulpcapillair”, een lange smalle gasthermometer, waarmee, in navolging van Chappuis, de gemiddelde temperatuur kan worden bepaald langs de capillaire steelen der thermometers, die uit de vloeistof door de kap der cryostaat heen tot in de kamertemperatuur reiken.

Tusschen de beide gasthermometerreservoirs bevonden zich steeds twee platina weerstandsthermometers, aanvankelijk Pt. 23 en Pt. 31, na breking van Pt. 23, Pt. 32 en Pt. 31 en na herstelling van eerstgenoemden Pt. 23' en Pt. 31. Hun weerstanden werden voortdurend gecontroleerd en gemeten met behulp van twee differentiaalgalvanometers volgens de methode der „overgrijpende nevensluiting” van Kohlrausch en naar deze aanwijzingen werd het cryostaatbad voortdurend op constante temperatuur gehouden.

De temperaturen der kleine gasvolumina buiten den cryostaat werden afgelezen op een groot aantal kwikthermometers, regelmatig verdeeld langs dit schadelijk volumen, dat rijkelijk in watten ingepakt was.

Na meting bij lage temperatuur werd de cryostaat weer geheel gedemonteerd om de thermometerreservoirs weer in het waterbad te kunnen plaatsen voor een nieuwe meting der gashoeveelheden en om daarna ook nulpunten te kunnen bepalen, waarbij de reservoirs door smeltend ijs omgeven werden.

Aangezien dit herhaaldelijk in elkaar zetten en uit elkaar nemen van den cryostaat een werk is, niet zonder gevaar voor de gasthermometers, is later een eenvoudiger, minder gevaarlijke

en minder tijdroovende methode gevolgd. Alleen het vacuümglas van den cryostaat wordt losgenomen en de thermometerreservoirs, die in de kap gemonteerd blijven, door een afzonderlijk waterbad omgeven. Een geijkte kwikthermometer, in duizendste graden afleesbaar, dient weer voor de temperatuurbepaling, terwijl de roerders van den cryostaat het water in beweging houden. Dit waterbad wordt aangebracht in een wijd vacuümglas en heeft een temperatuurconstantheid van enkele duizendste graden.

III. DE CALIBRATIES.

1. De thermometerreservoirs.

De differentiaalthermometer is zoodanig geconstrueerd, dat, terwijl een der beide korte manometerbeenen onwrikbaar vast zit aan het gemeenschappelijke lange been, het andere hiermee verbonden is door middel van een spiraalvormig gewonden, veerende glazen buis, waardoor deze beide korte beenen een aanmerkelijke verschuiving naar boven of beneden ten opzichte van elkaar kunnen ondergaan. ¹⁾

Ofschoon het hierdoor mogelijk is eenigszins verschillende drukken in de beide afdelingen gelijktijdig met een en dezelfde kwikkolom af te lezen, gelukte het onverhoopt Palacios Martinez en Kamerlingh Onnes niet de vier dichtheden, door hen bepaald, geheel differentiaal te meten, daar bij de derde en vierde dichtheid het drukverschil der beide gassen te groot werd en men gedwongen was de helium- en waterstofmetingen van dezelfde dichtheid na elkaar in plaats van tegelijk te verrichten. De oorzaak hiervan lag in het feit, dat er eenig volumen-verschil bestond tusschen de beide gasthermometerreservoirs en eveneens tusschen de volumina van gelijktijdig in gebruik komende pipetten van den waterstof- en heliumkant en wel zoo, dat de gashoeveelheden waterstof en helium, die bij dichtheidsvermeerdering in de thermometerreservoirs gedreven werden, niet dezelfde drukvermeerdering gaven.

Zonder al te ingrijpende en tijdroovende veranderingen in de toestellen aan te brengen, is het op de volgende wijze gelukt hierin verbetering te verkrijgen.

Na berekend te hebben, hoe groot het volumen zou moeten zijn van een nieuwen thermometer, die na toevoer van het gas

¹⁾ Comm. Leiden No. 156a.

uit een eerste, tweede en derde pipet telkens eenzelfde drukvermeerdering zou ondergaan als een der aanwezige thermometers bij gelijke behandeling, werd door den Heer O. Kesselring, chefglasblazer van het laboratorium, een thermometerreservoir geblazen, dat na eenige voorloopige calibraties en kleine wijzigingen in 't volumen, de gewenschte grootte had.

De nauwkeurige uitmeting geschiedde, nadat de reservoirs van thermische nawerking bevrijd waren, door uitweging met kwik.

Ook werd de volumenverandering gemeten, die veroorzaakt werd door drukverschil tusschen binnen en buitenkant.

De calibratie werd tweemaal uitgevoerd en leverde op voor het volumen bij 0° en bij gelijken in- en uitwendigen druk

103.195 c.M³.

103.195 „

Reeds vroeger had de calibratie plaats gehad van het andere reservoir. Op dezelfde wijze en na aanbrenging van overeenkomstige correcties was hiervoor gevonden:

110.432 c.M³.

432 „

434 „

426 „

gemiddeld: 110.431 c.M³.

2. Het schadelijk volumen.

Dit bestaat uit de volgende gedeelten:

- 1°. het volumen tusschen den kwikmeniscus in het korte manometerbeen en het horizontale vlak, dat gaat door de stalen instelspits daarboven.

Het wordt bij iedere meting afzonderlijk bepaald uit

stand der spits en van top en rand van den kwikmeniscus.
(Zie verderop bij de berekening der volumina).

- 2°. het volumen tusschen het horizontale vlak gaande door de stalen spits, het einde van den metaalcapillair (ingang glascapillair) en de kraan K_4 in den zijtak, die naar de pipetten voert.

Deze inhoud werd volumenometisch bepaald door den metaalcapillair vóór het aansoldeeren aan den glascapillair aan het einde af te sluiten; daarna te vullen met waterstof of helium en eenige drukmetingen te doen bij verschillende afstanden van den kwikmeniscus tot de spits. Hieruit kon het gezochte volumen gemakkelijk berekend worden. (v)

- 3°. Het volumen tusschen de kraan K_4 en de merkteekens S_1 , S_2 en S_3 (v').

Na opening van de kraan K_4 , werd op dezelfde wijze als onder 2°. is meegedeeld, het volumen onder 2°. en 3°. genoemd, te zamen bepaald. Na vermindering der uitkomst met het onder 2°. bepaalde deel, werd het hier bedoelde volumen gevonden.

- 4°. Het volumen van den glazen thermometersteel, grootendeels capillair, bovenaan echter verwijfd.

Het capillaire deel werd gemeten door uitweging met kwik. De verwijding gedeeltelijk ingenomen door Woodmetaal, waarmee metaal- en glascapillair aaneen gesoldeerd waren, werd geschat.

- 5°. De kleine volumina gelegen tusschen de merkteekens boven aan de pipetten en de kranen K_1 , K_2 , K_3 (a, b, c en a', b', c').

Hiervoor werden de uitkomsten gebruikt van Palacios Martinez en Kamerlingh Onnes.¹⁾

¹⁾ Comm. Leiden No. 164.

3. De pipetten.

Hiervoor zijn eveneens de uitkomsten van bovengenoemde onderzoekers gebruikt.

4. De doorsnee der manometerbuizen.

Voor het korte been ontleend aan bovengenoemden, voor de overige buizen aan Cath en Kamerlingh Onnes.

Een samenvatting der uitkomsten vindt men hier onder:

Uitkomsten der calibraties.

	Bewegelijke kant.	Vaste kant.	
Schadelijk volumen (v)	0.762	0.772	c.M ³ .
" " (v')	2.965	2.685	"
Straal van de spitsbuis	0.737	0.735	c.M.
Thermometer ¹⁾	103.195	110.431	c.M ³ .
Glascapillair tot den ingang van den metaalcapillair	0.066	0.067	"
Pipetten ²⁾			
I.	418.048	447.683	"
II.	211.346	226.422	"
III.	201.784	219.982	"
Volumen tusschen bovenmerk en kraan			
a.	0.180	0.151	"
b.	0.206	0.236	"
c.	0.190	0.259	"

¹⁾ Bij 0°. C. en bij gelijken druk aan beide zijden.

²⁾ Bij 18°. C.

IV. DE METINGEN.

1. De voorbereidingen.

Langs de kranen K_8 en de slijpstukken B_5 werden de beide kanten, omvattende pipetten, thermometers en schadelijke volumina tot aan het kwik in de manometers, tegelijk zoo zorgvuldig mogelijk leeggepompt en het vacuüm der verschillende afdeelingen eenige dagen achtereen met een „Macleod” gecontroleerd. Om alle resten van waterdamp van de wanden der thermometer-reservoirs te verwijderen, werden deze tijdens het pompen in elektrische ovens geplaatst, waarin een temperatuur van ongeveer 200° C. onderhouden werd en waren in de zuigleidingen vochtvangers, omgeven door vloeibare lucht, altijd aanwezig.

Na een bevredigend verloop der vacuumcontrole, werd de eene helft der opstelling verscheidene malen met waterstofgas gespoeld en nadat al dit gas weer geheel verwijderd was, gevuld. De zeer zuivere waterstof hiervoor, werd verkregen door verdamping direct in ons toestel van een kleine hoeveelheid voor dit doel vloeibaar gemaakt waterstofgas. Het eerste deel hiervan diende nog voor spoelen, terwijl het laatste gedeelte niet meer gebruikt werd.

Hierna werd de andere helft der opstelling gespoeld en daarna gevuld met helium, afkomstig uit een voorraadbuisje, waarin dit gas, verdampende uit vloeibaar gemaakt helium was gecompriëerd. Het binnenstroomende gas doorliep hierbij eerst nog een spiraalvormig gewonden glazen buis, in vloeibare lucht geplaatst om alle sporen van waterdamp, die er nog in mochten voorkomen, vast te houden.

Bij het einde dezer vulling werd met de manometers de span-

ning gecontroleerd en zorg gedragen, dat helium en waterstof denzelfden druk hadden, waarna minstens de kranen K_8 en de manometerkranen gesloten werden.

2. Meting der gashoeveelheden.

Hierna had een drukmeting plaats bij een temperatuur van ongeveer 15 tot 18° C. De pipetten werden omgeven met een waterbad. De thermometers vonden in ditzelfde of een afzonderlijk bad een plaats.

Bij de bespreking der toestellen is reeds uiteengezet volgens welke methode het gelukte in dit bad een temperatuurconstantheid van enkele duizendste graden te bereiken.

Nadat zoo noodig het kwik in de pipetten weer juist bij de lage merkteekens was ingesteld en de verschillende afdeelingen aan iederen kant met elkaar in verbinding gebracht waren, werden onder herhaaldelijk aflezen der temperatuur van het bad de drukken der beide gashoeveelheden gelijktijdig gemeten. Hiervoor werd gebruikt een der 1 Meterkathetometers der Société Genevoise en een standaardmeter in $\frac{1}{2}$ m.M. verdeeld, waarmee de druk in $\frac{1}{100}$ m.M. kon worden afgelezen. Bij de vullingen van ongeveer 500 m.M. nulpuntsdruk werd de druk met één kwikzuil gemeten, waarboven een hoog vacuum werd onderhouden met een in vloeibare lucht afgekoelde koolbuis, bij die van omstreeks 1000 m.M. nulpuntsdruk werd boven de kwikzuil van den manometer droge lucht gebracht van ongeveer een atmosfeer, waarvan de spanning constant gehouden werd door het grootste deel er van voortdurend op 0° C. te houden. In dit geval werd de aflezing van een kwikbarometer ter bepaling dier spanning noodzakelijk. Alle kwikzuilen alsook de schadelijke volumina, waren steeds ofwel omgeven door roodkoperen mantels of in watten ingepakt en de vele thermometers hieraan of -tusschen gebracht werden voortdurend afgelezen. Ofschoon de temperatuur in de naaste omgeving hierdoor wel met genoegzamen graad van zekerheid, enkele tiende graden, bekend was, bleef het steeds de vraag of

hiermee ook de temperatuur van het kwik zelf vast stond. Het denkbeeld van Professor Kamerlingh Onnes om in het kwik van manometer en barometer op verschillende hoogten thermometers te bevestigen, zou hierin zeker een groote verbetering gebracht hebben. Helaas kon de uitvoering van dit plan, schoon in principe gereed, niet vlug genoeg geschieden om bij deze metingen nog toegepast te kunnen worden.

Het volgende geeft een overzicht der waarnemingen.

Meting der gashoeveelheden. (Schema).

Tijd: 11^h 20 m. nam.

Nummers.	Thermometers.	voor	na
76	bij den barometer	17.02	17.07
78		16.96	17.02
enz.			enz.
	bij den manometer	17.06	17.08
		17.02	17.08
			enz.
	bij het schad. vol.	17.08	17.13
		16.88	16.93
			enz.
	in het waterbad	16.220, 16.219, 16.220, enz.	
barometer	boven top	1076.98	
	rand	1075.53	
	onder top	309.85	
	rand	307.94	
manometer	boven top	625.57	
	rand	624.20	
	onder		
	linkerkant		rechterkant
spits	326.18		spits 327.75
top	326.09		top 327.72
rand	324.34		rand 326.10

Na een voldoende aantal herhalingen, werden de kranen K₁,

K_2 , K_3 , K_4 , manometer en barometer gesloten en de temperatuur-regeling stopgezet.

3. Meting bij 0° C.

De thermometers werden hierna in ijs geplaatst, teneinde de nulpuntdrukken te meten. Hiervoor werd ijs van duinwater ¹⁾ gebruikt, daar ijs van gedestilleerd water niet meer verkrijgbaar was. Het werd fijn geschaafd, terwijl bij voorkeur het schaafsel van den helderen buitenkant der ijsstaven gebruikt werd en het middengedeelte, de zoogenaamde pit, weggeworpen werd. Het ijs werd voortdurend stevig aangedrukt om de thermometerreservoirs, terwijl het smeltwater gelegenheid had om regelmatig af te loopen. De ijsbak was omgeven door een er flink bovenuit stekende kartonnen mantel.

Combinatie van den nulpuntsdruk met den te voren gemeten druk in het waterbad leverde hiervan nog een onafhankelijke temperatuurbeplating, evenals combinatie met den druk der kleinste dichtheid in vloeibare waterstof of zuurstof hiervan de temperatuur leert kennen. Ook kan uit den hier gemeten druk de gas-hoeveelheid in den thermometer berekend worden, hetgeen door vergelijking met de uitkomsten der meting bij kamertemperatuur een controle leverde voor het dicht zijn van de thermometers, alvorens tot lage temperaturen werd overgegaan.

Het schema der waarnemingen is nagenoeg gelijk aan het zoeven afgedrukte. Slechts dienen er bij vermeld de aflezingen van den hulpcapillair ter bepaling van de gemiddelde temperatuur langs den thermometersteel, alsmede de aflezing hierbij noodig van den aneroïde-barometer.

4. Meting bij lage temperatuur.

Eenige dagen later had de meting in vloeibare zuurstof of waterstof plaats, nadat de beide gasthermometers met hulp-

¹⁾ Uit een analyse van dit duinwater bleek, dat een vriespunt verlaging van bijna 0.02 graad niet onmogelijk zou zijn. Door slechts gebruik te maken van het buitenste, heldere gedeelte der staven ontgaat men deze verlaging, daar de aanwezige zouten bij het bevriezen zich in de pit verzamelen.

capillair en twee weerstandsthermometers in den cryostraat gemonteerd waren. Wanneer naar de aanwijzingen der beide laatsten in het bad een op $\frac{1}{100}$ graad constante temperatuur heerschte, werd een aantal drukaflezingen gedaan, eerst alleen voor het gas in de thermometers. Vooral hier werd een groot aantal bepalingen gedaan om de nauwkeurigheid van den druk te vergrooten, die met een slechts zeer kleine kwikkolom ($\pm 2\frac{1}{2}$ c.M.) gemeten werd.

Na sluiting van den manometer werden de kranen K_4 en K_3 geopend en het gas uit de pipetten P_3 en P_3' tot de thermometers toegelaten. Als het kwik door opening der kranen K_3' opgevoerd was tot aan de bovenmerken S_3 der pipetten en de kranen K_2 weer gesloten waren, geschiedde de tweede reeks drukmetingen.

Dan volgde zoo mogelijk toevoer der gassen uit de overige pipetten enz.

Evenals bij de nulpuntsbepalingen was hier aflezing van den hulpcapillair en aneroïde-barometer noodzakelijk om de gemiddelde temperatuur langs den thermometersteel te kennen.

Overigens geschieden de aflezingen weer als in bovenstaand schema soms met, soms zonder barometer.

Na afloop der laatste metingen werd de manometer gesloten en dreef de toenemende gasdruk, nadat de kranen K_3 , K_2 en K_1 weer geopend en de kwikreservoirs in lagen stand geplaatst waren, bij verhooging der cryostaattemperatuur het gas weer terug in de pipetten. Eerst dan konden na sluiting van K_3' , K_2' en K_1' , de toestellen aan zich zelf overgelaten worden.

5. 2e meting bij kamertemperatuur.

Zij geschiedde volkomen als de eerste, diende als controle en maakte gewoonlijk ook deel uit eener volgende metingsreeks.

V. DE BEREKENINGEN.

1. De drukken.

De in honderdste m.M. afgelezen drukken ondergingen de volgende correcties:

- a. een correctie wegens capillaire neerdrukking.

Deze werd voor ieder geval ontleend aan een grafische voorstelling dezer depressie, zooals ze voor de verschillende buisdiameters af te leiden is uit de tabel door de Haas berekend met behulp der formule van Lohnstein.¹⁾

- b. een temperatuurcorrectie om de gemeten kwikzuil en den gebruikten standaardmeter te herleiden tot 0° C.

Te zamen genomen levert dit een uitzettingscoëfficiënt 0.000163.

- c. een aërostatische correctie.

Bij het gebruik van den kunstmatig-constanten luchtdruk in den manometer, werd de barometeraflezing gecorrigeerd voor het verschil in spanning op het kwik in den manometer en op dat in den barometer.

Eveneens werd in rekening gebracht het drukverschil tusschen het gas in den thermometer, wanneer deze zich in ijs, cryostaat of waterbad bevindt en dat onmiddellijk boven den kwikmeniscus in het korte manometerbeen. Uit den stand der toestellen, de waargenomen temperatuur der schadelijke volumina en den gemeten druk, is deze correctie eenvoudig te berekenen.

¹⁾ W. J. de Haas, diss. Leiden 1912. Comm. No. 127c.

- d. een thermomoleculaire correctie.

In de glascapillairen van de thermometers, die tijdens een meting bij lage temperatuur uit den cryostaat tot in de kamertemperatuur reiken, blijft bestaan een temperatuurverval, dat volgens *Knudsen* een drukverval meebrengt des te grooter, naarmate de capillairen nauwer zijn. Hiervoor werden correcties aangebracht, berekend met de formule hiervoor gegeven door *Kamerlingh Onnes* en *Weber*.¹⁾

- e. tenslotte werden de drukken herleid tot intern. atmosferen door vermenigvuldiging met 1.00067 en deeling door 760.²⁾

2. De volumina.

- a. thermometers en pipetten.

De inhouds der thermometerreservoirs en pipetten werden gecorrigeerd voor temperatuur en voor drukverschil tusschen binnen- en buitenkant. Voor de eerste correctie is gebruik gemaakt van de in dit proefschrift beschreven waarnemingen op *Jenaglas 16^{III}* in vloeibare waterstof, terwijl de invloed van het drukverschil gelijktijdig met de calibratie van den thermometer bepaald werd.

- b. de veranderlijke term in het schadelijk volumen, het gedeelte, gelegen tusschen kwikmeniscus en het horizontale vlak door de instelspits, werd bij iedere waarneming afzonderlijk berekend. Het bestaat uit een kleine cilinder te berekenen uit buisdiameter en afstand van spits tot meniscustop en het zoogenaamde restvolumen, gelegen tusschen den meniscus en het horizontale vlak door zijn

¹⁾ Comm. Leiden No. 147c.

²⁾ Wanneer men hiervoor 1.00062 neemt, (zie Comm. Leiden Snpl. No. 51a) brengt dit kleine veranderingen mee in de uitkomsten, die vallen binnen de grenzen der nauwkeurigheid.

top. Dit laatste werd afgeleid uit een grafische voorstelling, gemaakt met behulp der bepalingen van Palacios.¹⁾

3. Dichtheden.

Daar van de gebruikte gashoeveelheden, zoowel die zich in de thermostaat als daarbuiten bevinden tijdens de meting bij kamertemperatuur, volumen, druk en temperatuur met een voor iedere hoeveelheid voldoende nauwkeurigheid bekend zijn, kunnen zij alle met de toestandsvergelijkingen der gemeten temperaturen berekend worden.

In verband met de geringe dichtheden, waarmee gewerkt werd, kon volstaan worden met vergelijkingen van den vorm

$$pv = A + B d$$

De coëfficiënten hiervan werden voor iedere voorkomende badtemperatuur berekend in eenheden van Amagat door lineaire interpolatie uit onderstaande gegevens:

Waterstof. ²⁾		Helium. ³⁾	
$A_A 0^\circ \text{ C.}$	$= 0.99942$	$A_A 0^\circ \text{ C.}$	$= 0.99970$
$B_A 0^\circ \text{ C.}$	$= 0.000580$	$B_A 0^\circ \text{ C.}$	$= 0.000512$
$A_A 100,020 \text{ C.}$	$= 1.36626$	$A_A 100,035 \text{ C.}$	$= 1.36667$
$B_A 100,020 \text{ C.}$	$= 0.000863$	$B_A 100,035 \text{ C.}$	$= 0.000673$

Op deze wijze werden voor pipetten en thermometers uit de gemeten drukken de dichtheden en met de bekende inhouden de gashoeveelheden afgeleid.

Voor de schadelijke volumina kon ook de tweede term der vergelijking vervallen.

¹⁾ Palacios. Los meniscos de mercurio. Trab. del lab. de investig. fis. Madrid 1919.

²⁾ Kamerlingh Onnes en Braak. Isotherms of hydrogen between 0° C. and 100° C. Comm. Leiden No. 100b.

³⁾ Kamerlingh Onnes. Isotherms of Helium between $+100^\circ \text{ C.}$ and -217° C. Comm. Leiden No. 102b.

Zie ook:

Cath en Kamerlingh Onnes. Leiden No. 156a, pag. 22. ¹⁾

Door de bij iedere meting gebruikte gashoeveelheid, aldus berekend, te verminderen met hetgeen zich tijdens de meting bij lage temperatuur in de schadelijke volumina bevond, werd verkregen de hoeveelheid alleen in een thermometer aanwezig en met het volumen van den thermometer in dien toestand, de dichtheid tijdens de meting.

4. De pv_A 's.

Deeling van den reeds berekenden druk van dit gas door de gevonden waarde voor d_A leverde een uitkomst voor pv_A .

De zoo gevonden waarden voor pv_A werden tenslotte gecorrigeerd voor de onvermijdelijke kleine temperatuursverschillen tusschen de verschillende punten, welke behooren tot de bepaling van denzelfden isotherm met de benaderde betrekking.

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta pv_A}{pv_A}$$

5. De temperatuurregeling.

Uit een groot aantal weerstandsmetingen tijdens de proeven bij lage temperatuur, werd voor iedere dichtheid een gemiddelde genomen. Met behulp der bekende betrekkingen tusschen weerstand en temperatuur dezer platinadraden konden de temperatuursverschillen berekend worden.

Voor ons doel was het van geen belang de weerstanden zelf te berekenen en hieruit de temperaturen, aangezien sedert de laatste ijking der platinadraden met den heliumthermometer te veel tijd verlopen was om betrouwbare uitkomsten te kunnen verwachten. Wel werden later deze weerstanden berekend, om, gecombineerd met de op andere wijze gevonden temperaturen, een nieuwe ijking der platinathermometers te verkrijgen, waarbij een bevestiging gevonden werd der zoo juist uitgesproken ervaring.

6. De bepaling der viriaalcoëfficiënten.

Hierna werden de gevonden waarden voor pv_A voorgesteld door vergelijkingen van den vorm

$$pv_A = A_A + B_A d_A,$$

waarvan de coëfficiënten meestal berekend werden volgens de methode der kleinste kwadraten. De verschillen tusschen waarneming en berekening bleken geen systematisch verloop te hebben. Waar bij de kleinste dichtheid nu en dan groote, doch onregelmatige afwijkingen optraden, werden de coëfficiënten overge-rekend zonder gebruik te maken van dat punt.

7. De temperaturen op de Celsius-schaal van den waterstof- en heliumthermometer.

Voor zoover geen rechtstreeksche meting van den nulpuntsdruk had plaats gehad, werden uit de berekende dichtheden (d_A) van de gassen in de thermometers tijdens de meting bij lage temperatuur, de drukken dier gashoeveelheden afgeleid, wanneer zij bij hetzelfde volumen op 0° C. zouden zijn gebracht; dit geschiedde door gebruik te maken der empirische toestandsvergelijking bij 0° C. met dezelfde coëfficiënten als die, welke aan de berekening der gashoeveelheden ten grondslag lagen.

De aldus gevonden waarden voor p_0 konden zonder meer gebruikt worden om met de rechtstreeks gemeten waarden van den gasdruk in de thermometers bij lage temperatuur (p_t) met behulp der bekende betrekking.

$$t_a = \frac{p_t - p_0}{p_0 \alpha}$$

de temperaturen te berekenen op de Celsius-schaal van den helium- en waterstofthermometer ¹⁾, gebaseerd op spanningscoëfficiënten, die op de volgende wijze werden berekend.

Cath en Kamerlingh Onnes namen voor de spannings-

¹⁾ Vergelijk voor de definities der temperatuurschalen. Comm. Leiden Suppl. No. 51a.

coëfficiënten van den internationalen helium- resp. waterstofthermometer aan:

$$\alpha_{\text{He}} = 0.0036614 \quad \alpha_{\text{H}_2} = 0.0036627.$$

De voorloopige internationale temperatuurschaal wordt uit de schaal van den internationalen heliumthermometer gebaseerd op 0,0036614 afgeleid met behulp van de voorloopige correctietabel gegeven in Comm. No. 156a, tabel V, 2e kolom ¹⁾. Zij vormt een Avogadroschaal voor helium gebaseerd op 0.0036617^s.

Zoals Keesom en Kamerlingh Onnes ²⁾ opmerken, wordt daarentegen de schaal van den internationalen waterstofthermometer met behulp van correcties berekend met de waarden van B volgens Kamerlingh Onnes en Braak, herleid tot een Avogadroschaal gebaseerd op 0,0036617^s. Dit heeft ten gevolge, dat extrapoleerend tot 273° C. de Celsius-Avogadro-schaal voor waterstof 0,00^s graad hooger zou liggen dan die voor helium (de voorloopige internationale temperatuurschaal). Wij hebben er de voorkeur aan gehecht de Celsius-Avogadro-schalen voor helium en waterstof te baseeren op zoodanige waarden voor de spanningscoëfficiënten, dat zij, extrapoleerend tot -273° C. aldaar zouden samenvallen.

Daartoe is telkens bij een bepaalde nulpuntsdruk deze spanningscoëfficiënt berekend uit:

$$\alpha = \frac{A_{A \ 0^\circ \text{C.}} \times 0.36618 + (B_{A \ 100^\circ \text{C.}} - B_{A \ 0^\circ \text{C.}}) d_A}{100 (A_{A \ 0^\circ \text{C.}} + B_{A \ 0^\circ \text{C.}} \times d_A)} \text{ } ^3),$$

hetgeen tot bij de hoogste hier voorkomende dichtheden overeenkomt met:

$$\alpha = 0,0036618 + \left(\frac{B_{100}}{A_0} - 1.36618 \frac{B_0}{A_0} \right) \frac{d}{100} - \left(\frac{B_{100}}{A_0} - 1.36618 \frac{B_0}{A_0} \right) \frac{B_0}{A_0} \frac{d^2}{100} \text{ } ^4),$$

¹⁾ Nog eens afgedrukt in Suppl., No. 51a, tabel Xa.

²⁾ Ibid pag. 31.

³⁾ Comm. Leiden No. 101b.

⁴⁾ De laatste term is slechts van invloed bij de grootste der hier voorkomende dichtheden.

waarin kortheidshalve gezet is $B_{100} = B_A 100^\circ \text{ C.}$

$$B_0 = B_A 0^\circ \text{ C.}$$

$$A_0 = A_A 0^\circ \text{ C.}$$

$$d = d_A.$$

Uitgegaan is dus van een waarde van $\alpha_A = 0.0036618$, terwijl met de reeds meegedeelde waarden voor de viriaalcoëfficiënten de volgende spanningscoëfficiënten van den internationalen helium- en waterstofthermometer verkregen worden:

$$\alpha_{i \text{ He}} = 0.0036614^6$$

$$\alpha_{i \text{ H}_2} = 0.0036627^3.$$

Deze uitkomsten werden nog gecorrigeerd voor de kleine temperatuursverschillen tusschen de verschillende punten eener meting, alsmede bij het eerste punt van enkele metingen voor de vermoedelijke fout in den afgelezen druk bij lage temperatuur (p_t), die de abnormale afwijkingen (O-C) in de $p v_A$'s veroorzaakte, zooals deze fout uit genoemde afwijkingen kon worden berekend.

8. De temperaturen op de Celsius-Avogadroschalen van waterstof en Helium, gebaseerd op $\alpha_A = 0.0036618$ ($t_A \alpha$).

De gevonden B-waarden stelden in staat de correcties op deze schalen te berekenen. Hiervoor werd gebruikt:

$$\Delta_A = t_A \alpha - t_\alpha = \frac{t_A \alpha p_0}{A_A 0^\circ \text{ C. } \alpha_A} \times \left(\frac{B'_{100} (1 + 100 \alpha_A) - B'_0}{100} - \frac{B'_T (1 + \alpha_A t_A \alpha) - B'_0}{t_A \alpha} \right)^{1)}$$

waarin $B' = \frac{B_A}{A_A}$ en waarin voor de α_A en de viriaalcoëfficiënten bij 0 en 100° C. weer de reeds meegedeelde gebruikt werden.

In de hierna volgende tabellen zijn voor waterstof en helium de zoo gevonden temperaturen en de correcties zelf ook opgenomen. Om de uitkomsten overzichtelijker te maken, zijn de

¹⁾ Comm. Leiden Suppl. No. 23, pag. 904. Deze vergelijking komt overeen met Suppl. No. 51a verg. (25).

temperaturen op de Celsius-Avogadroschalen, die alle beneden — 140° C. liggen, herleid op de (Kelvin)-Avogadro-schaal der beide gassen met

$$t_{A\alpha} = T_{A\alpha} - \frac{1}{\alpha_A} \quad 1)$$

en in dien vorm ($T_{A\alpha}$) meegedeeld.

Tenslotte leverde iedere isotherm nog een directe temperatuur-bepaling op de Avogadro-schaal „36618”, wanneer men hem extrapoleert (hier rechtlijnig) tot op een dichtheid $d_A = 0$, voor welken toestand de betrekking

$$\frac{T_{A\alpha}}{T_{A\ 0^\circ\text{C.}}} = \frac{A_A}{A_{A\ 0^\circ\text{C.}}} \quad 2)$$

nog een waarde van $T_{A\alpha}$ levert.

1) Comm. Leiden No. 51a, pag. 9.

2) " " " " " 6.

V. UITKOMSTEN DER METINGEN.

1. De temperatuur van het waterbad.

De aflezingen op den kwikthermometer P.T.R. no. 46371, gecorrigeerd naar de herhaaldelijk verrichtte bepalingen van zijn nulpunt, werden verscheidene malen gecontroleerd met den helium- en waterstofthermometer. De uitkomsten, waarvan hieronder eenige zijn vermeld, waren zeer bevredigend.

TABEL I.

Kwiktherm.	Heliumtherm.	Waterstoftherm.
15.531	15.540	—
15.527	15.532	—
12.753	12.755	12.752
12.758	12.764	—

2. De gashoeveelheden.

TABEL II.

Datum	Meting	H ₂
23. 1. 23	in waterbad.	667.91
29. 1. 23	bij 18°.14 K.	—
29. 1. 23	bij 15°.67 K.	—
31. 1. 23	in waterbad.	667.85
7. 2. 23	bij 90°.23 K.	—
12. 2. 22	in waterbad.	667.89

Hierna ontstond een lek. Na herstel hiervan en hernieuwde vulling bleken de nieuwe gashoeveelheden:

TABEL III.

Datum.	Meting.	H ₂	He.
17. 6. 24	in waterbad.	690.29	741.44
19. 6. 24	bij 69 ^o .85 K.	—	—
21. 6. 24	in waterbad.	690.33	741.43
24. 6. 24	bij 16 ^o .67 K.	—	—
25. 6. 24	in waterbad.	690.29	741.44
26. 6. 24	bij 14 ^o .54 K.	—	—
8. 7. 24	in waterbad.	690.28	741.42

Hierna volgde het verwisselen der vullingen. Voor de nieuwe gashoeveelheden werd gevonden:

TABEL IV.

Datum.	Meting.	H ₂	He
17. 7. 24	in waterbad.	686.30	686.19
18. 7. 24	bij 18 ^o .22 K.	—	—
19. 7. 24	in waterbad.	686.44	686.32

Hier schijnen beide gashoeveelheden toegenomen te zijn, waaruit men tot een klein lek in beide kanten zou moeten besluiten. Dit lek zou echter voor den helium- en waterstofkant juist even groot moeten zijn, waarom het waarschijnlijker lijkt, dat bij een der beide metingen een foutieve temperatuuraflezing van het waterbad is geschied.

3. De waarden van pv_A .

a. De linkerkant (bewegelijke spitsbuis) is gevuld met waterstof, de rechterkant (vaste spitsbuis) met helium.

TABEL V.

Waterstof.				Helium.		
No.	d_A	pv_A	O-C	d_A	pv_A	O-C
Meting bij 90 ^o .23 K. ¹⁾						
1	0.71898	0.33011	+0.00001			
2	2.11256	0.32991	— 3			
3	3.55674	0.32977	+ 1			
Meting bij 69 ^o .86 K.						
1	0.74379	0.25551	+0.00003	0.74310	0.25582	+0.00003
2	2.19020	0.25518	— 2	2.2150	0.25591	— 3
3	3.68698	0.25487	— 4	3.7153	0.25607	— 2
4	6.64996	0.25436	+ 3	6.6706	0.25641	+ 2
Meting bij 20 ^o .55 K.						
1	1.32349	0.074561	+0.000001	1.32680	0.075229	+0.000037
2	6.42783	0.072163	+ 2	6.68009	0.075170	0
3	8.98884	0.070957	0	9.36906	0.075158	— 1
4	11.4336	0.069804	— 4	11.98147	0.075148	0
Meting bij 20 ^o .53 K.						
1	1.33822	0.074449	—0.000075	1.33583	0.075149	—0.000001
2	3.84188	0.073332	— 5	3.99821	0.075127	— 1
2*				4.00075	0.075137	+ 9
3	6.4228	0.072124	+ 10	6.70706	0.075094	— 8
4	11.5316	0.069687	— 5	12.0625	0.075056	+ 2
4*	11.5322	0.069678	— 14			

¹⁾ De waarnemingen met helium werden verworpen wegens later gebleken onzuiverheid der vulling.

Volledigheidshalve mogen in tabel VI ook vermeld worden de opnieuw berekende resultaten van Palacios Martinez en Kamerlingh Onnes, ¹⁾ bij deze temperatuur, wanneer men uitgaat van dezelfde viriaalcoëfficiënten bij 0° C. en 100° C. en gebruik maakt van dezelfde uitzetting van Jenaglas 16^{III} die ten grondslag liggen aan alle hier meegedeelde uitkomsten.

TABEL VI.

Waterstof.				Helium.		
No.	d _A	pv _A	O-C	d _A	pv _A	O-C
Meting bij 20°.51 K.						
1	1.32857	0.074442	+0.000046	1.28965	0.074987	+0.000002
2	3.81226	0.073214	+ 5	3.82072	0.074984	+ 18
2*	3.81205	0.073202	- 7	3.82048	0.074945	- 21
3	6.37529	0.071990	+ 3	6.39307	0.074949	+ 2
4	11.4486	0.069555	- 4	11.48163	0.074906	- 3
Meting bij 20°.49 K. ²⁾						
1	1.36628	0.074323	-0.000005			
2	6.43773	0.071937	+ 3			
3	9.00150	0.070728	+ 4			
4	11.4495	0.069566	- 3			
Meting bij 20°.49 K. ²⁾						
1	1.31556	0.074350	+ 0.00004			
2	6.37416	0.071930	- 8			
3	8.93236	0.070725	+ 5			
4	11.4188	0.069538	+ 1			

¹⁾ Palacios Martinez en Kamerlingh Onnes. Comm. Leiden No. 164.

De uitkomsten, daarmee gedeeld, werden berekend uitgaande van B_A 0° C. = 0,99950 en A_A 0° C. = 0,000499 voor helium, terwijl de temperatuurcorrectie van glas ontleend werd aan een extrapolatie uit de metingen van Lindemann en verschillen dus eenigszins van de hier meegedeelde.

²⁾ Van den heliumkant kon slechts de eerste dichtheid gemeten worden.

Tabel VII geeft weer de resultaten van eigen metingen.

TABEL VII.

Waterstof.				Helium.		
No.	d_A	pv_A	O-C	d_A	pv_A	O-C
Meting bij 20 ^o .51 K. ¹⁾						
1				1.33622	0.075153	+0,000083
2				3.95905	0.075046	+ 0
3				6.62529	0.075024	+ 2
4				11.8983	0.074973	- 1
Meting bij 18 ^o .16 K. ²⁾						
1	0.72114	0.066140	+0.000032			
2	2.13567	0.065380	- 5			
3	3.59389	0.064624	- 32			
4	6.48021	0.063202	+ 4			
Meting bij 16 ^o .65 K. ³⁾						
1	0.74516	0.060743	+0.000197	0.74442	0.060897	-0.000045
2	2.20766	0.059776	0	2.23038	0.060905	0
3	3.71491	0.058982	0	3.73868	0.060868	0
Meting bij 15 ^o .64 K. ⁴⁾						
1	0.72123	0.056851				
2	1.33022	0.056514				
Meting bij 14 ^o .50 K. ⁵⁾						
1	0.74508	0.052630				
2	1.32974	0.052584				
2*	1.32014	0.052297				

¹⁾ De waterstof thermometer bleek bij den aanvang der meting gebroken.

²⁾ Zie de noot bij de meting van 90,23 K.

³⁾ Wanneer men probeert deze 3 punten door een verlijking voor te stellen, vindt men onmogelijke B-waarden en onwaarschijnlijke waarden voor O-C. Julster leek het daarom aan de eerste dichtheid, die bij deze lage temperaturen

b. Verwisselde vullingen.

De linkerkant (bewegelijke spitsbuis) is met helium gevuld, de rechterkant (vaste spitsbuis) met waterstof.

Er geschiedde een meting bij 18°.22 K. met 4 dichtheden.

TABEL VIII.

Meting bij 18°.22 K.						
Helium				Waterstof.		
No.	d_A	pv_A	O-C	d_A	pv_A	O-C
1	0.74063	0.066770	+0.000099	0.74035	0.066294	+0.000005
2	2.1940	0.066635	+ 1	2.21855	0.065536	— 7
3	3.6909	0.066599	+ 1	2.71861	0.064787	+ 2
4	6.6472	0.066523	0	6.68772	0.063282	— 4
4*	6.6581	0.066526	— 3			

gemeten wordt met drukkingen van slechts een paar c.M. kwik een zeer geringe waarde toe te kennen en een rechte te leggen door de punten 2 en 3. Natuurlijk ontbreekt hierdoor vrij wel de controle, die bij meerdere punten aanwezig is.

⁴⁾ Aanvankelijk werd hier gevonden bij 15°.67 K.

	d_A	pv_A
1.	0.721228	0,056829
2.	2,136585	0,055871

De zeer groote waarde voor B_A die hieruit volgt, geeft aanleiding tot het vermoeden, dat in een der beide bepalingen een fout schuilt. Daarom zijn uit een meting van Cath en Kamerlingh Onnes (Comm. Leiden No. 156 tabel 1b) bij iets lager temperatuur met den differentiaalthermometer gevuld met helium en waterstof waarden voor d_A en pv_A berekend. Combinatie dezer pv_A met meting No. 1, beide op eenzelfde temperatuur herleid, geeft een B_A , die geheel aansluit bij alle andere, terwijl combinatie met No. 2 niet die overeenstemming oplevert.

⁵⁾ Een tweede punt is verkregen uit de onder ³⁾ genoemde metingen van Cath en Kamerlingh Onnes. Hier konden twee bepalingen gebruikt worden, eene bij iets lager, eene bij iets hooger temperatuur.

Alvorens de hieruit berekende coëfficiënten mee te delen, waarvan in bovenstaande tabellen reeds de bijbehorende verschillen tusschen waargenomen en berekende p_{v_A} 's zijn opgenomen, kunnen de volgende opmerkingen gemaakt worden:

1. Met Palacios Martinez en Kamerlingh Onnes mag voor de metingen bij 20°,50 K. de nauwkeurigheid in de p_{v_A} 's zeker op $\frac{1}{10000}$ gesteld worden. Hetzelfde geldt voor die bij 70° en 90° K.

Bij de overige metingen, waarbij de nulpuntsdruk steeds 500 m.M. bedroeg, is in de normaalvolumina deze nauwkeurigheid wel bereikt, maar in de p_{v_A} 's zeker niet, daar hier drukkingen van 2 à 3 c.M. moesten gemeten worden. Bovendien traden dan hierbij een enkele keer abnormale fouten op, die blijken uit de kolommen O-C en die ik meen te moeten toeschrijven aan wellicht nog te nauwe kraandoorgangen, waarin zich misschien kranenvet verzamelt, zoodat bij zeer geringe drukverschillen niet voldoende doorstroming plaats vindt.

2. De nauwkeurigheid der B-waarden van waterstof blijkt het beste uit de volkomen overeenstemming der resultaten bij 20°.53 en 20°.55 K. onderling, als met de B's bij 20°.51 en 20°.49 K. van bovengenoemde onderzoekers.

Bij de B-waarden uit slechts twee punten afgeleid, dient men zeer voorzichtig te zijn in de beoordeeling, zooals wel blijkt uit de meting bij 15°.6 K., doch vooral, wanneer de beide punten niet isotherm gemeten werden. De zeer vloeiend verloopende lijn der $B_{A,S}$ (zie hierna) wekt echter vertrouwen. De kleinere B-waarden bij 70° en 90° K. zijn bij de grootere waarden voor p_{v_A} evenredig minder nauwkeurig. Hetzelfde geldt voor die van helium bij 70° K., en in verhoogde mate voor de zeer geringe B-waarden in vloeibare waterstof. Toch vind ik als gemiddelde uit mijn drietal metingen bij ongeveer dezelfde temperatuur:

$$- 0.0000072,$$

terwijl bovengenoemden vonden:

$$- 0.0000075.$$

3. Na verwisseling der vullingen werden geen afwijkende, doch volkomen dezelfde resultaten verkregen, zoodat geen reden aanwezig is eenige asymetrie te onderstellen.
4. De metingen, ook met verwisselde vullingen, bevestigen de conclusie, waartoe Palacios Martinez en Kamer-

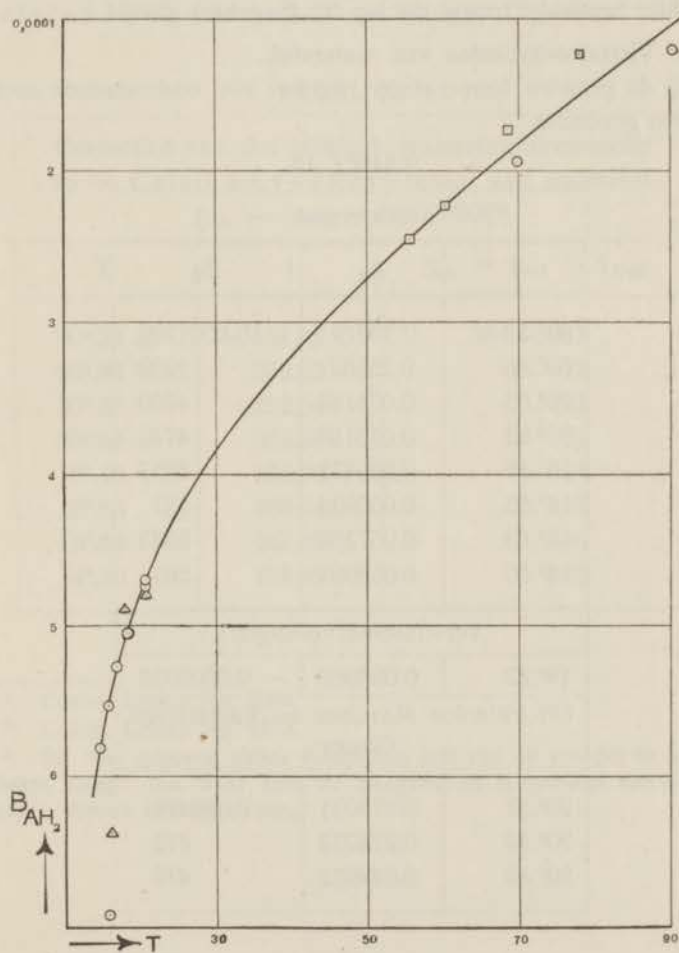


Fig. 5.

lingh Onnes komen, wat betreft de mogelijke aanwezigheid van quanta-invloeden in den vorm van een term $Q d\frac{1}{r}$ in de toestandsvergelijking. Evenals zij, vinden wij, dat de metingen geen aanleiding geven een dergelijken term in de toestandsvergelijking op te nemen.

5. De B-waarden van Kamerlingh Onnes en de Haas bij $20^{\circ}.6$ en $17^{\circ}.8$ K. verschillen ongeveer 2 en 4 % met de hier bepaalde, terwijl die bij 16° K. geheel afwijkt.

4. Viriaalcoëfficiënten van waterstof.

Bij de gemeten temperaturen werden zoo onderstaande coëfficiënten gevonden.

TABEL IX.

Waterstof.		
T	A_A	B_A
$90^{\circ}.23$ K.	0.33019	— 0.0001202
$69^{\circ}.86$	0.25562	1939
$20^{\circ}.55$	0.075182	4700
$20^{\circ} 53$	0.075158	4740
$18^{\circ}.16$	0.066472	5053
$16^{\circ}.65$	0.060938	527
$15^{\circ}.64$	0.057250	5533
$14^{\circ}.50$	0.053063	581
verwisselde vullingen:		
$18^{\circ}.22$	0.066663	— 0.0005055
Uit Palacios Martinez en Kamerlingh Onnes:		
$20^{\circ}.51$	0.075031	— 0.000478
$20^{\circ}.49$	0.074973	472
$20^{\circ}.49$	0.074972	476

Fig. 5 brengt de gevonden B-waarden in beeld, terwijl hierin ook de uitkomsten van Kamerlingh Onnes en Braak ¹⁾ en van Kamerlingh Onnes en de Haas ²⁾ (aangegeven respectievelijk door \square en \triangle) zijn opgenomen.

Uit de B-waarden volgen onderstaande correcties, aan te brengen aan de temperaturen op de Celsius-schaal van den internationalen waterstofthermometer om deze te herleiden op de Celsius-Avogadro-schaal van dit gas. (fig. 6).

TABEL X. ³⁾

Correcties van den internat. waterstofthermometer op de Celsius-Avogadro-schaal van waterstof. ($\alpha_A - \alpha_{H_2} = 0,0000009^3$)		
T	t	$\Delta_A = t_A \alpha - t_{H_2} \alpha$
90 ^o .23 K	- 182.86 C.	+ 0.067
60 ^o .86	203.23	72
20 ^o .55	252.54	121
20 ^o .53	252.56	122
18 ^o .16	254.93	131
16 ^o .65	256.44	137
15 ^o .64	257.45	146
14 ^o .50	258.59	155

fig. 6

¹⁾ Comm. Leiden No. 100a.

²⁾ Comm. Leiden No. 127b.

³⁾ De hier gegeven cijfers verschillen iets van de vroeger in Leiden Comm. Suppl. No. 51a, Tab. XI meegedeelde tengevolge van de iets andere waarde van $\alpha_A - \alpha_{H_2}$.

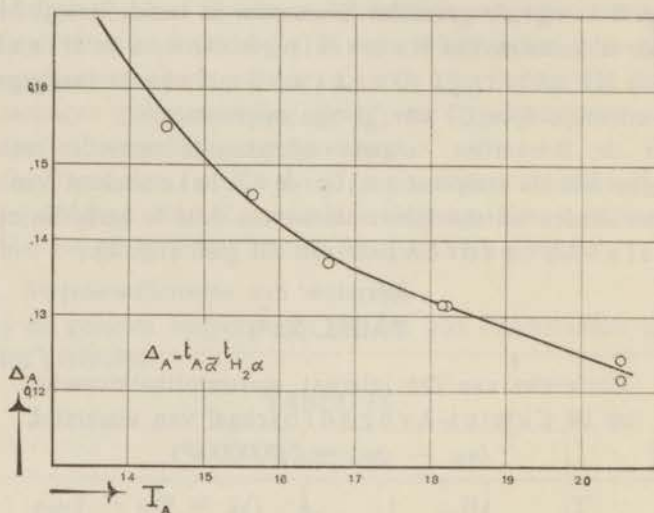


Fig. 6.

5. Viriaalcoëfficiënten van helium.

TABEL XI.

Helium.		
T	A_A	B_A
60°.86 K.	0.25572	+ 0,0001003
20°.55	0.075198	- 0,0000042
20°.53	0.075162	90
20°.51	0.075082	91
18°.22	0.066689	244
16°.65	0.060960	245
Uit Palacios Martinez en Kamerlingh Onnes:		
20°.50	0.074963	- 0,0000074

Grafisch vind ik uit deze B-waarden voor het Boyle-punt van Helium 22°,1 K.

Uit bovenstaande uitkomsten zijn weer de volgende correcties te berekenen voor den intern. heliumthermometer.

TABEL XII.

Correcties voor den intern. Heliumthermometer op de Celsius-Avogadroschaal van dit gas. ($\alpha_A - \alpha_{H_2} = 0.000003^1$)		
T	t	$\Delta_A = t_A \alpha - t_{He} \alpha$
69°.86 K.	- 203.23 C.	+ 0.031
20°.85	252.54	41
20°.53	252.56	42
20°.51	252.58	43
18°.22	254.87	46
16°.65	256.44	46

In fig. 7 zijn ook de uitkomsten van Kamerlingh Onnes²⁾, aangeduid door \square , opgenomen.

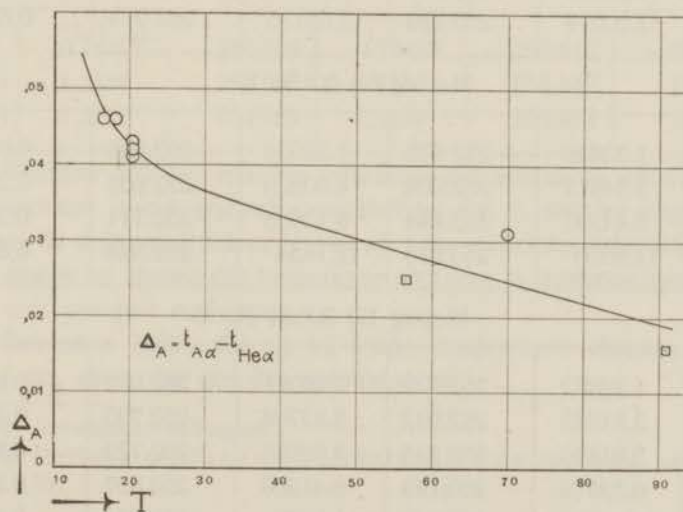


Fig. 7.

¹⁾ Comm. Leiden No. 102b.

6. Verschil in aanwijzing tusschen de Celsius-schalen van den helium- en waterstofthermometer bij verschillende nulpuntsdrukken.

TABEL XIII.

Waterstof.			Helium.		
No.	p_0	t_α	p_0	t_α	$t_{He\alpha} - t_{H_2\alpha}$
Meting bij 69°.86 K.					
1	0.743687	- 203.272	0.743158	- 203.243	+ 0.029
2	2.19171	203.357	2.21682	203.287	0.073
3	3.69274	203.426	4.72128	203.301	0.129
4	6.67180	203.559	6.69134	203.305	0.254
Meting bij 20°.55 K.					
1	1.32374	- 252.668	1.32730	- 252.589	+ 0.079
2	6.44806	253.134	6.70094	252.751	0.383
3	9.03050	253.367	9.41120	252.835	0.532
4	11.50279	253.589	12.05136	252.913	0.676
Meting bij 20°.53 K.					
1	1.33849	- 252.675	1.33634	- 252.598	+ 0.077
2	3.84811	252.908	4.00520	252.685	0.223
3	6.44297	253.144	6.72808	252.771	0.373
4	11.6020	253.615	12.1334	252.943	0.672
Meting bij 20°.51 K. ¹⁾					
1	1.32882	- 252.709	1.29011	- 252.643	+ 0.066
2	3.81848	252.942	3.82704	252.720	0.222
2*	3.81826	252.945	3.82681	252.729	0.216
3	6.39516	253.182	6.41208	252.807	0.380
4	11.51767	253.647	11.5457	252.964	0.683

¹⁾ Uit Palacios Martinez en Kamerlingh Onnes.

TABEL XIV

Waterstof.			Helium.		
No.	p_0	t_α	p_0	t_α	$t_{\text{He}\alpha} - t_{\text{H}_2\alpha}$
Meting bij 18 ^o .22 K. ¹⁾					
1	0.740688	- 254.888	0.740232	- 254.945	+ 0.057
2	2.19580	254.953	2.22011	255.097	0.144
3	3.69676	255.000	3.72452	255.243	0.243
4	6.67883	255.105	6.70978	255.536	0.431
4*	6.67879	255.104			
Meting bij 16 ^o .65 K.					
1	0.74505	- 256.517	0.74448	- 256.474	+ 0.043
2	2.2092	256.663	2.2322	256.500	0.163
3	3.7209	255.816	3.7448	256.562	0.254
Meting bij 14 ^o .50 K.					
1	0.74497	- 258.676	0.74452	- 258.612	+ 0.064
2 ²⁾	1.3156	258.546	1.3181	258.442	0.104
2* ²⁾	1.3167	259.085	1,3189	258.974	0.111

Wanneer de hier verkregen verschillen der helium- en waterstofgasschalen in een grafische voorstelling, fig. 8, worden uitgezet naar de nulpuntsdrukken, blijken zij voor eenzelfde dichtheid toe te nemen bij afname der temperatuur, hetgeen in overeenstemming is met vroegere metingen.

Bovendien blijkt, dat zij bij iedere temperatuur afnemen tot nul toe, evenredig met den nulpuntsdruk.

¹⁾ Verwisselde vullingen.

²⁾ Berekend uit Cath en Kamerlingh Onnes. Comm. Leiden No. 156.

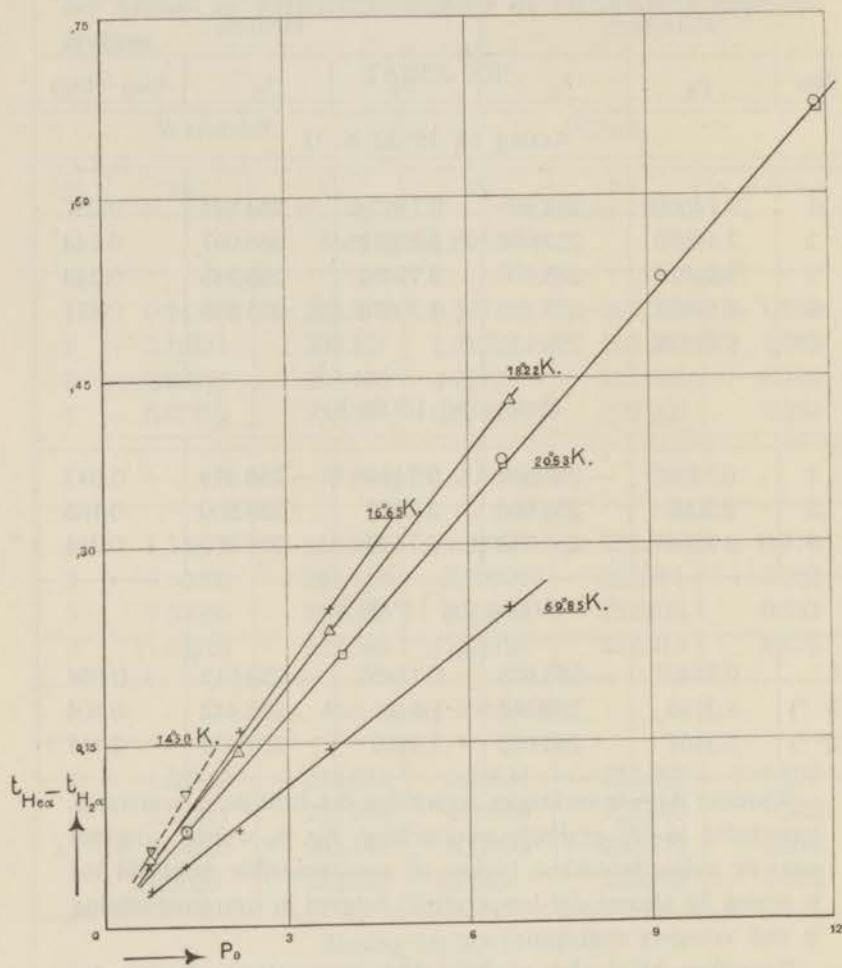


Fig. 8.

7. Temperaturen gemeten op de Avogadroschalen van waterstof en helium gebaseerd op $\alpha_A = 0.0036618$.

TABEL XV.

Waterstof.				Helium.		
No.	p_0	Δ_A ¹⁾	$T_{A\alpha}$	p_0	Δ_A	$T_{A\alpha}$
Meting bij 99 ^o .22 K.						
1	0.71886	+ 0.036	90.232			
2	2.11393	0.106	90.226			
3	3.56201	0.179	90.217			
door extrap. tot $d_A = 0$			90.221			
Meting bij 69 ^o .86 K.						
1	0.74369	+ 0.040	69.859	0.74316	+ 0.018	69.864
2	2.19171	0.117	69.842	2.21682	0.054	69.849
3	3.69274	0.201	69.841	3.72128	0.090	69.855
4	6.67180	0.363	69.858	6.69134	0.159	69.890
door extrap. tot $d_A = 0$			69.848			69.855
Meting bij 20 ^o .55 K.						
1	1.32374	+ 0.122	20.544	1.32730	+ 0.041	20.542
2	6.44806	0.592	20.548	6.70094	0.207	20.546
3	9.03050	0.829	20.552	9.41120	0.290	20.545
4	11.50279	1.056	20.557	12.05136	0.372	20.549
door extrap. tot $d_A = 0$			20.538			20.542

¹⁾ In al deze tabellen beteekent $\Delta_A = t_{A\alpha} - t_{He\alpha}$ voor helium en $t_{A\alpha} - t_{H_2\alpha}$ voor waterstof.

TABEL XVI.

Waterstof.				Helium.		
No.	p_0	Δ_A	$T_{A\alpha}$	p_0	Δ_A	$T_{A\alpha}$
Meting bij 20 ^o .53 K.						
1	1.33849	+ 0.125	20.540	1.33634	+ 0.043	20.535
2	3.84811	0.359	20.541	4.00520	0.125	20.530
3	6.44207	0.600	20.546	6.72808	0.208	20.527
4	11.6020	1.081	20.550	12.1334	0.374	20.521
door extrap. tot $d_A = 0$			20.536	20.532		
Meting bij 20 ^o .51 K.						
1				1.33673	+ 0.043	20.515
2				3.96589	0.127	20.511
3				6.64578	0.213	20.511
4				11.96723	0.382	20.528
				door extrap. tot $d_A = 20.510$		
Meting bij 20 ^o .51 K. ¹⁾						
1	2.32882	+ 0.125	20.506	1.29011	+ 0.041	20.488
2	3.81848	0.358	20.506	3.82704	0.122	20.492
2	3.81826	0.358	20.503	3.82681	0.122	20.483
3	6.39516	0.600	20.508	6.41208	0.204	20.492
4	11.51797	1.081	20.524	11.5457	0.367	20.493
door extrap. tot $d_A = 0$			20.502	20.488		

¹⁾ Uit Palacios Martinez en Kamerlingh Onnes.

TABEL XVII.

Waterstof.				Helium.		
No.	p_0	Δ_A	$T_{A\alpha}$	p_0	Δ_A	$T_{A\alpha}$
Meting bij 20 ^o .49 K. ¹⁾						
1	1.36657	+ 0.125	20.483			
2	6.45804	0.593	20.492			
3	9.04328	0.830	20.495			
4	11.51885	1.057	20.498			
door extrap. tot $d_A = 0$			20.487			
Meting bij 20 ^o .49 K. ¹⁾						
1	1.31581	+ 0.123	20.493			
2	6.39403	0.595	20.487			
3	8.97346	0.836	20.491			
4	11.4878	1.070	20.491			
door extrap. tot $d_A = 0$			20.486			
Meting bij 18 ^o .22 K. ²⁾						
1	0.74069	+ 0.027	18.229	0.74023	+ 0.074	18.219
2	2.19580	0.078	18.215	2.22011	0.222	18.215
3	3.69676	0.130	18.220	3.72452	0.372	18.219
4	6.66783	0.236	18.221	6.70978	0.671	18.225
4*	6.67879	0.236	18.222			
door extrap. tot $d_A = 0$			18.218			18.215

¹⁾ Uit Palacios Martinez en Kamerlingh Onnes.

²⁾ Verwisselde vullingen.

TABEL XVIII.

Waterstof.				Helium.		
No.	p_0	Δ_A	$T_{A\alpha}$	p_0	Δ_A	$T_{A\alpha}$
Meting bij 18 ^o .16 K.						
1	0.72103	+ 0.070	18.164			
2	2.13708	0.213	18.164			
3	3.59932	0.359	18.154			
4	6.50035	0.646	18.166			
door extrap. tot $d_A = 0$			18.163			
Meting bij 16 ^o .65 K.						
1	0.74505	+ 0.078	16.651	0.74448	- 0.024	16.650
2	2.2092	0.231	16.658	2.2322	0.071	16.661
3	3.7209	0.380	16.654	3.7448	0.119	16.648
door extrap. tot $d_A = 0$			16.651			16.643
Meting bij 14 ^o .50 K.						
1	0.74496	+ 0.088	14.502	0.74452	+ 0.026	14.504

De hier gevolgde methode van temperatuurmeting levert dus bij vullingen van zeer uiteenlopenden nulpuntsdruk, zelfs bij dichtheden vele malen de dichtheid van de internationale gas-thermometers, waarbij correcties op de Avogadro-schaal voorkomen hooger dan een graad (voor waterstof) praktisch dezelfde temperatuuruitkomsten op. Dit geldt zoowel voor ieder gas afzonderlijk als voor de beide gassen met elkaar vergeleken.

Beschouwt men alleen de metingen met een nulpuntsdruk van 1000 m.M., of waar deze ontbreken, die met kleinere en die met de onmiddellijk er boven liggende dichtheid, dan blijven tusschen

deze experimenteele Avogadroschalen van waterstof en helium, slechts de volgende verschillen over:

TABEL XIX.

T	p_0	$T_{A\alpha \text{ He}} - T_{A\alpha \text{ H}_2}$
69.86	± 0.74	+ 0.005
	2.19	+ 0.007
20.55	1.32	- 0.002
20.53	1.34	- 0.005
18.22	0.74	- 0.010
	2.21	0.000
16.65	0.74	- 0.001
	2.23	+ 0.003
14.50	0.74	+ 0.002

VII. DE WET DER OVEREENSTEMMENDE TOESTANDEN.

1. Ten einde na te gaan, in hoeverre de waterstof afwijkt van de wet der overeenstemmende toestanden, zijn de gevonden temperaturen en de waarden van B_A omgerekend in gereduceerde grootheden. ¹⁾

Door te nemen:

$$B' = \frac{B_A}{A_A}$$

$$\beta = \frac{p_K}{R \cdot T_K} B'$$

$$t = \frac{T}{T_K}$$

, wordt gevonden:

TABEL XX.

Waterstof.		
T	t	β
90.23 K.	2.7194 C.	0.03835
69.86	2.1055	0.07991
20.55	0.6194	0.6586
20.53	0.6187	0.6644
18.22	0.5491	0.7981
18.16	0.5473	0.8008
16.65	0.5018	0.9111
15.64	0.4714	1.018
14.50	0.4371	1.1535
Uit Palacios en Kamerlingh Onnes:		
20.51	0.6181	0.6712
20.49	0.6175	0.6633
20.49	0.6175	0.6689

¹⁾ Comm. Leiden Suppl. No. 23, pag. 116.

TABEL XXI.

Argon.			Stikstof.		
T	f	10 ³ ㉓	T	f	10 ³ ㉓
249,04	1,653	81,61	241,40	1,916	55,90
200,03	1,527	111,4	208,88	1,658	97,29
207,57	1,378	147,9	189,31	1,502	129,2
191,06	1,268	180,1	170,17	1,350	172,8
170,81	1,134	235,8	157,59	1,251	201,1
161,64	1,073	261,9	145,58	1,155	238,9
150,30	0,998	303,7	132,99	1,055	294,8
139,95	0,929	350,6	120,75	0,958	373,9
125,01	0,830	464,6	109,65	0,870	456,7
109,69	0,728	591,6	90,65	0,719	628,0
90,63	0,602	862,2	84,19	0,668	718,8
87,56	0,581	943,1	76,37	0,606	871,2
84,55	0,561	989,2	71,53	0,567	1009,2
81,32	0,540	1056,3	69,57	0,552	1060,
Neon.			Zuurstof.		
T	f	10 ³ ㉓	T	f	10 ³ ㉓
230,15	5,144	+ 59,0	243,51	1,578	- 126,0
208,86	4,668	+ 54,1	214,46	1,390	159,8
185,16	4,145	+ 42,6	180,76	1,171	239,8
170,96	3,821	+ 36,1	170,36	1,104	284,9
157,77	3,526	+ 31,2	157,87	1,023	316,2
145,58	3,254	+ 23,0	145,83	0,945	371,0
133,19	2,977	+ 14,8	133,10	0,863	437,0
120,73	2,698	+ 1,64	120,20	0,779	531,7
90,69	2,027	- 55,8	90,58	0,587	912,2
82,28	1,839	- 75,5	87,09	0,564	999,1
72,71	1,625	- 116,6	84,15	0,545	1085,9
64,15	1,434	- 162,4			
55,91	1,249	- 224,8			

Deze kunnen vooreerst vergeleken worden met de waarde voor \mathfrak{B} uit de zoogenaamde „gemiddelde gereduceerde toestandsvergelijking VII, 1.”

$$10^3 \mathfrak{B} = 117,796 - \frac{228,038}{t} - \frac{172,891}{t^2} - \frac{72,765}{t^4} - \frac{3,1788}{t^6} \quad 1)$$

verkregen uit waarnemingen:

van A m a g a t over waterstof, zuurstof, stikstof en ether,

van R a m s a y en Y o u n g over ether,

van Y o u n g over isopentaan.

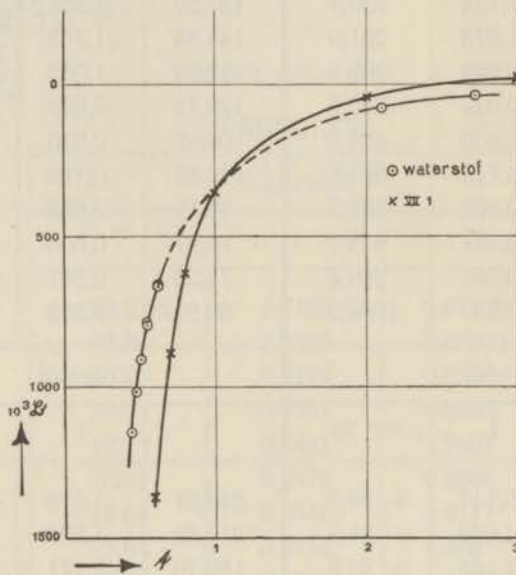


Fig. 9.

Het schijnt voldoende gerechtvaardigd in fig. 9 de lijn der \mathfrak{B} -waarden beneden $20^{\circ},50$ K. en boven $69^{\circ},86$ K. als deelen eenerzelfde kromme te beschouwen.

2. Merkwaardiger wordt het diagram, wanneer naast de \mathfrak{B} -waarden van waterstof, uitgezet worden de \mathfrak{B} 's, die berekend

1) Comm. Leiden Suppl. No. 23, p. 117.

kunnen worden uit de B' -waarden, die door Cath. en Kamerlingh Onnes afgeleid zijn uit door deze waarnemers bepaalde voorloopige correcties op de experimenteete Avogadro-schalen van stikstof, zuurstof, argon en neon. (tabel XXI).

Het blijkt dan uit fig. 10, dat bij temperaturen boven $t = 1$ de β -waarden zich uitspreiden ongeveer volgens de kritische temperaturen. Hier bevestigt zich dus wederom de door Kamerlingh Onnes en Keesom ¹⁾ uitgesproken algemeene regel, dat voor stoffen, waarbij associatie uitgesloten is, de kritische temperatuur een belangrijken invloed op het geheele isothermenet met betrekking tot de wet der overeenstemmende toestanden heeft. Althans voor waterstof, neon, stikstof en argon bestaat genoemde volgorde. Zuurstof daarentegen, die opzettelijk niet is aangebracht om de figuur niet onduidelijker te maken, loopt

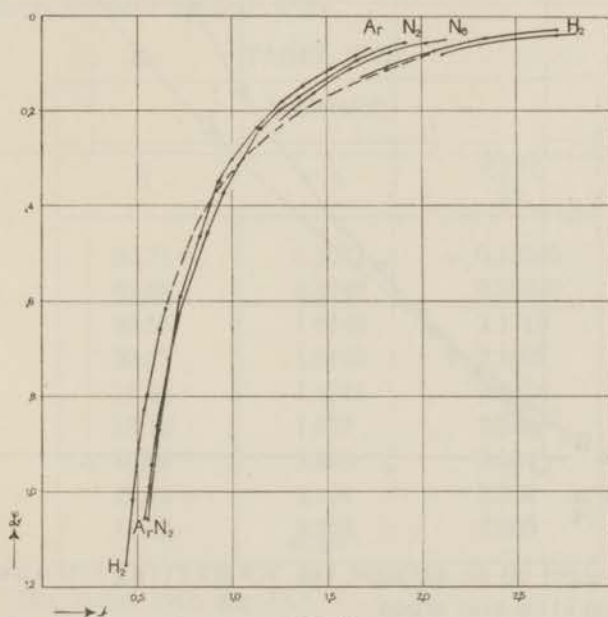


Fig. 10.

¹⁾ Leiden Comm. Suppl. no. 23. Die Zustandsgleichung Math. Enz. V 10, § 34c.

ongeveer met stikstof samen en verstoort dus dien regel. Wij zien alzoo eenzelfde verschijnsel als door Keesom ¹⁾ is opgemerkt naar aanleiding van een diagram door Cath en Kamerlingh Onnes ²⁾ ontworpen uit door hen bepaalde dampspanningen.

In hoeverre de nauwkeurigheid der B-waarden beïnvloed wordt door de methode van bepaling is moeilijk uit te maken.

Door Cath is reeds opgemerkt, dat de door hem bepaalde B-waarden van argon over 't algemeen grooter zijn dan die,

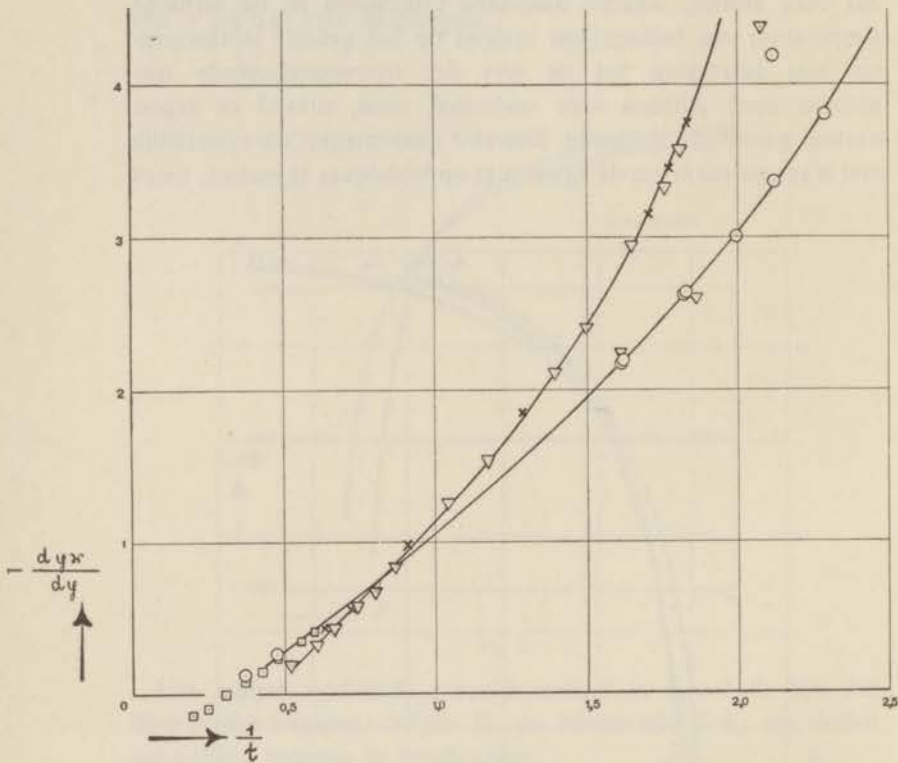


Fig. 11

welke volgen uit de metingen van Kamerlingh Onnes en Crommelin over argon.

Ook enkele B-waarden van waterstof, afgeleid uit de bepalingen

¹⁾ Gedenkboek aangeboden aan H. Kamerlingh Onnes, 1922, pag. 123.

²⁾ Comm. Leiden No. 152b.

van Kamerlingh Onnes en Braak, zijn in de figuur opgenomen en liggen alle iets hoger dan de onze.

Bij het beschouwen dezer fig. 10 rijst het vermoeden, of niet voor al deze stoffen de B-lijnen door eenzelfde snijpunt bij ongeveer $t=1$ gelegen, gaan. Ook in verband hiermee is het jammer, dat de tijd nog ontbroken heeft, B-waarden van neon te bepalen beneden de kritische temperatuur.

3. Ten slotte kunnen wij met onze B-waarden aanvullen de grafiek van Cath en Kamerlingh Onnes, ¹⁾ die de verandering van $\frac{d(pv)}{dp}$ met de temperatuur aangeeft voor dezelfde stoffen. (Zie fig. 11).

Hierbij is gebruik gemaakt van de betrekkingen:

$$\frac{d(pv)}{dp} = \frac{1}{v_K} \frac{d(pv)}{dt} = \frac{B'}{v_K} = K_4 \mathfrak{B} \text{ } ^2)$$

Gevonden werd op deze wijze:

TABEL XXII.

Waterstof.		
T	¹ /t	$\frac{d(pv)}{dp}$
90.23 K.	0.3677	— 0.12645
69.86	0.4749	0.26349
20.55	1.6146	2.1715
20.53	1.6162	2.1907
18.22	1.8211	2.6314
18.16	1.827	2.640
16.65	1.993	3.004
15.64	2.121	3.358
14.50	2.288	3.803

¹⁾ Diss. Leiden 1917, pag. 77.

²⁾ Comm. Leiden No. 156a, pag. 29.

Bij de herleidingen der uitkomsten in gereduceerde grootheden is gebruik gemaakt van onderstaande gegevens:

TABEL XXIII.

	P_K	T_K	V_K
waterstof ¹⁾	12.751	33.18	0.002909
neon ²⁾	26.86	44.74	
stikstof ³⁾	33.490	125.96	0.004027
argon ⁴⁾	47.996	150.65	0.003357
zuurstof ⁵⁾	49.713	154.27	0.003324

1) Comm. Leiden No. 151c.

2) " " " 151b, v_K is niet voldoende bekend.

3) " " " 145c.

4) " " " 131a.

5) " " " 117.

VIII. DE THERMISCHE UITZETTING VAN JENAGLAS 16^{III}.

1. Principe der meting.

De lengteverandering van een glassoort bij lage temperatuur kan gemeten worden, wanneer men er een lang vacuümglas van vervaardigd, den binnenwand hiervan afkoelt door middel van baden van vloeibaar gemaakte gassen en de inkrimping meet, die een bepaald gedeelte van dien binnenwand ondergaat, door de verplaatsing na te gaan van het hoogste en het laagste punt, A en B te noemen, ten opzichte van twee vaste punten, C en D, van den buitenwand, die op constante temperatuur blijft of wordt gehouden.

Om gedurende den tijd der meting in den binnenwand een constante, lage temperatuur te behouden en tevens te voorkomen, dat de buitenwand een temperatuursdaling ondergaat, is het noodig tusschen de beide wanden van het glas een hoog vacuum te onderhouden. Tijdens de metingen bij zeer lage temperatuur wordt dit gelukkig bevorderd, doordat nog achtergebleven gasresten tegen den kouden wand condenseeren.

De mogelijkheid om de verplaatsing der punten A en B ten opzichte van C en D nauwkeurig na te meten, wordt bereikt door daar ter plaatse de verzilvering van het glas te verwijderen en den buitenwand van venstertjes van planparallelglas te voorzien. Met microscopen kunnen dan de verplaatsingen der punten A en B ten opzichte van C, resp. D bij doorvallend licht gemeten worden evenals de lengte van AB.

In het glas werden baden gebracht van vloeibare ethyleen, zuurstof en waterstof en van heet water.

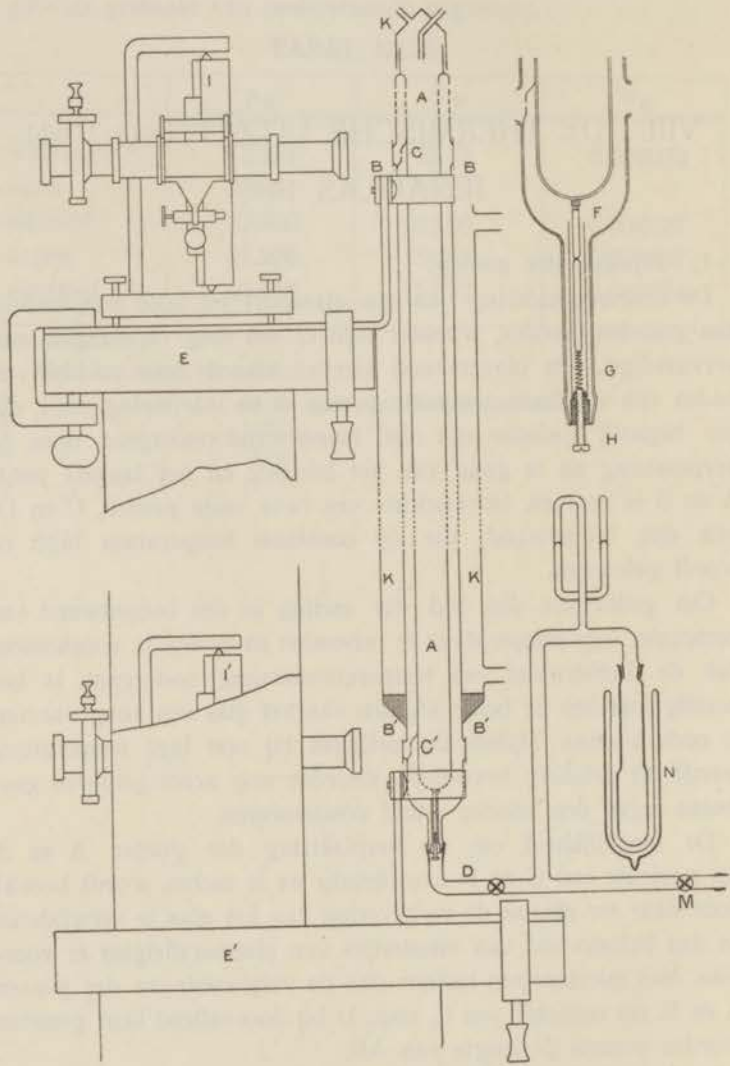


Fig. 12.

Ook is het misschien mogelijk — tijdgebrek verhinderde tot nu toe dit onderzoek — het glas eenigen tijd gevuld te houden met vloeibaar helium. Uit de metingen bleek echter, dat de lengteverandering tusschen de temperaturen, die met vloeibare waterstof en vloeibaar helium verkrijgbaar zijn, wel vermoedelijk uiterst gering zal zijn.

2. De toestellen.

Het toestel waarmee de metingen werden verricht, bestaat uit een lang smal vacuumglas A (fig. 12), gemaakt van Jenaglas 16^{III} van Schott u. Gen. te Jena. De buitenwand is voorzien van twee paar openingen B en B', op een afstand van ongeveer 90 c.M. aan voor- en achterzijde aangebracht en waarop venstertjes van planparallelglas gekit zijn. Op de binnenwand van het vacuumglas is ter plaatse van deze venstertjes de verzilvering weggenomen, zoodat men van de achterzijde licht kan laten vallen door de vacuumbuis heen op twee paar platinaspitsen C en C', boven en onder ingesmolten zoowel in de binnen- als buitenwand van het vacuumglas en zoo aangebracht, dat ze duidelijk door de venstertjes der voorzijde zichtbaar zijn.

Aan de onderzijde is het vacuumglas voorzien van een verbindingsbuis D, voerende naar de inrichting voor evacueeren en controleeren van het vacuum.

Ter vermindering van trillingen in de binnenbuis is de volgende inrichting aangebracht. Een glazen staafje F, van boven van kurk voorzien, drukt zacht tegen de onderzijde van de binnenbuis. Een koperen veertje G, dat dit glazen staafje naar boven drukt, is bevestigd aan de buitenbuis en kan met een schroef H meer of minder sterk gespannen worden. Door deze inrichting is het mogelijk alle trillingen, die in de lange vrij naar beneden hangende binnenbuis licht zouden optreden, geheel te vermijden, zonder een gevaarlijke warmtegeleidende verbinding tusschen binnen- en buitenwand aan te brengen.

Van boven is het vacuumglas gesloten door een nieuw-zilveren kapje K met doorgangen voor het vullen met vloeibaar gemaakte

gassen. Om de buitenbuis bevindt zich tusschen de venstertjes nog een watermantel, van toe- en afvoerbuizen voorzien.

Het toestel werd vervaardigd in de glasblazerij van het laboratorium door den chef-glasblazer den Heer O. Kesselring.

Het geheel is op een zeer stabile wijze bevestigd aan twee hardsteenen platen E en E', opgebouwd op een der pijlers van het laboratorium. Op deze hardsteenen platen rusten twee zwaar-gebouwde, korte kathetometers I en I' door den Heer Wismeijer vervaardigd naar het model van den 1 Meter-kathetometer der Soc. Genevoise. Deze kathetometers dragen de beide microscopen L en L', die van oculairmicrometers voorzien zijn. Op deze wijze is een zeer vaste opstelling verkregen, waarbij op een eenvoudige wijze een verplaatsing in verticale en horizontale richting mogelijk is.

Onmiddellijk naast het lange vacuumglas en op denzelfden afstand tot de microscopen hangt een nauwkeurige meetlat, die niet op de figuur is aangegeven.

3. De metingen.

Nadat de spitsen van binnen- en buitenwand in één verticaal vlak gebracht waren, werden de venstertjes angekit. Voor iedere meting werd daarna met groote zorg het vacuumglas luchtledig gepompt, terwijl de zich aan het toestel bevindende koolbuis zoo heet mogelijk werd gehouden. Daarna werd kraan M gesloten. Nadat gedurende verscheidene dagen de verklikker geen standsverandering vertoonde en de buis goed dicht bleek te zijn, werd tijdens de meting de aan het toestel vast verbonden koolbuis N afgekoeld met vloeibare lucht.

Inmiddels waren de kathetometers zoodanig geplaatst, dat zoowel de platinaspitsen als de meetlat scherp konden worden waargenomen.

De oculairmicrometers werden daarna geijkt door verscheidene malen de lengte van eenige milimeters van de meetlat uit te meten. Hierna werden de microscopen naar de platinaspitsen gedraaid

en de afstand der spitsen nauwkeurig uitgemeten, terwijl met eenige kwikthermometers de temperatuur van binnen- en buitenwand werd bepaald. Deze metingen werden eenige malen vóór en na de meting bij lage temperatuur herhaald. Een waterbad hield hierbij de binnen- en buitenwand op constante temperatuur. Kleine temperatuurverschillen tusschen de verschillende metingen worden herleid op eenzelfde temperatuur, in de eerste berekening met den uitzettingscoëfficiënt van Jenaglas 16^{III} ($7.72 + 0.00350 t$) 10^{-6} van Thiesen, Scheel en Sell,¹⁾ daarna met den uitzettingscoëfficiënt, die uit onze eigen meting bij $\pm 100^\circ$ volgde.

Tusschen de beide metingsreeksen op kamertemperatuur geschieden telkens die bij lage temperatuur en een bij ongeveer 100° C. Beneden 0° C. werd gemeten met baden van vloeibare waterstof, zuurstof en ethyleen onder ongeveer normale druk kokende. Vooral voor het inbrengen der vloeibare waterstof werd het glas met groote zorg koud geblazen met in vloeibare lucht voorgekoelde waterstof. Terwijl de sterke afkoeling tot 20° K. door het glas verdragen werd, sprong bij een eerste meting bij $\pm 100^\circ$ C. de bodem der binnenbuis stuk. Hierna moest een nieuw vacuumglas gemaakt worden, waarin echter de middenstukken der oude buis, gelegen tusschen de spitsen, die feitelijk alleen worden uitgemeten, dezelfde bleven.

De temperatuur van $\pm 100^\circ$ werd verkregen door in een onafgebroken stroom kokend water boven in het vacuumglas in te leiden en het, nadat het dit vacuumglas doorstroomd heeft, er weer uit te hevelen. Om de afkoeling van het heete water zoo gering mogelijk te maken, werd hierbij van vacuumtoevoerbuisen gebruik gemaakt.

De temperatuur van het waterbad op $\pm 10^\circ$ C. werd afgelezen op thermometers in tiende graden verdeeld en werd in honderdsten geschat. De correcties van deze thermometers werden bepaald door vergelijking met den kwikstandaardthermometer van het laboratorium. De temperatuur van het waterstofbad werd aldus

¹⁾ Abh. d. P.T.R. 2. 1895.

bepaald: Door aflezing van den barometer en het drukverschil tusschen buitenlucht en den gashouder, waarin de waterstof verdampte, kon de druk bepaald worden, waaronder de vloeistof kookte. Hieruit werd de temperatuur der bovenste vloeistoflaag bepaald. Die der onderste lagen, die hiermee slechts eenige honderste graden verschilt, kon berekend worden uit de diepte der vloeistofkolom. Van beide werd het gemiddelde genomen.

Ofschoon in zuurstof het temperatuursverschil tusschen boven- en onderlagen der kokende vloeistof aanzienlijker wordt, hebben wij hier volgens dezelfde methode als boven vermeld, de temperatuur bepaald, daar op dat oogenblik geen weerstandsthermometer voorhanden was smal genoeg om in het nauwe vacuumglas geplaatst te worden. De aldus bepaalde temperatuur is voor ons doel ook nog nauwkeurig genoeg.

Bij het ontbreken van voldoende betrouwbare gegevens over het kookpunt van ethyleen en vooral over de zuiverheid van het ethyleenbad, was het hier noodzakelijk de temperatuur met een weerstandsthermometer te bepalen. Hiervoor werd een zeer smallen goudraadthermometer gekozen en voor ons doel in ethyleen geijkt door vergelijking met den Platinaweerstandsthermometer Pt. 23, die meermalen geijkt was met den heliumthermometer. De ijking en de temperatuuraflezingen bij deze en voorafgaande metingen geschieden door Mej. H. v. d. Horst, die wij voor haar nauwgezette hulp graag onzen dank betuigen.

De temperatuur van het heete waterbad werd afgelezen op een in honderdste graden verdeelden kwikthermometer. Het temperatuurverschil onder en boven was hier zeer gering.

4. UITKOMSTEN.

1. De lengteveranderingen.

Voor de lengte der binnenbuis, gemeten tusschen de twee platinaspitsen, werd gevonden bij 13.°1 C. 893.64 m.M. \pm 0.02.

Uit de gemeten afstanden der spitsen kon door een eenvoudige

berekening het lengteverschil tusschen buiten- en binnenwand, ieder gerekend van spits tot spits bepaald worden. Na aanbrenging van kleine correcties voor geringe temperatuursverschillen, vinden wij de volgende uitkomsten:

TABEL XXIV.

Meting in vloeibare waterstof.				
Datum	Temp. binnen	Temp. buiten	$L_{uitw.} - L_{inw.}$	Aantal bepalingen
6.2.23	13.1	9.1	0.068 m.M.	12
6.2.23	— 252.8	9.1	1.226	5
2e vulling	— 252.8	9.1	1.224	5
7.2.23	13.1	9.1	0.073	3

Zoodat de verkorting bedraagt bij een temperatuursverlaging van 13° 1 tot — 252° 8 C. 1.157 m.M.

TABEL XXV.

Meting in vloeibare zuurstof.				
Datum	Temp. binnen	Temp. buiten	$L_{uitw.} - L_{inw.}$	Aantal bepalingen
10.2.23	13.1	9.1	0.071 m.M.	5
10.2.23	— 182.5	9.1	1.132	9
2e vulling	— 182.5	9.1	1.129	9
12.2.23	13.1	9.1	0.089	5
20.2.23	13.1	9.1	0.076	6
20.2.23	— 182.5	9.1	1.126	6
21.2.23	13.1	9.1	0.073	6

Zoodat de verkorting bij een temperatuursdaling van 13°.1 tot — 172°.5 C. bedraagt:

10.2.23	1.051 m.M.
20.2.23	1.051 „

TABEL XXVI.

Meting in vloeibare ethyleen.				
Datum	Temp. binnen	Temp. buiten	L uitw.-L inw.	Aantal bepalingen
27.3.23	14.1	14.1	- 0.081 m.M.	6
28.3.23	— 102.8	14.1	0.613	15
14.4.23	14.1	14.1	- 0.084	6

waaruit een verkorting volgt bij een temperatuursdaling van 14°.1 tot 102°.8 C. van 0.695 m.M.

Van de herstelde buis bleek de lengte, van spits tot spits, te bedragen 892.3 m.M.

TABEL XXVII.

Meting bij het kookpunt van water.				
Datum	Temp. binnen	Temp. buiten	L uitw.-L inw.	Aantal bepalingen
30.11.23	13.1	13.1	0.070 m.M.	10
6.12.23	13.1	13.1	0.053	5
6.12.23	97.8	13.1	- 0.532	10
10.12.23	13.1	13.1	0.076	4

Zoodat een temperatuursverhooging van 13°.1 tot 97°.8 C. een verlenging geeft van 0,599 m.M.

Uit bovenstaande volgen de lengteveranderingen van 1 M. Jenaglas 16^{III}.

TABEL XXVIII.

Temperaturen.	Lengtetoeename.
van 13.1 tot 97.8 C.	0.671 10 ³ M.
tot — 102.8	— 0.770 " "
tot — 182.5	— 1.176 " "
tot — 252.8	— 1.294 " "

2. Opmerkingen.

De nauwkeurigheid der micrometermetingen is op ongeveer 2 à 3 μ te stellen. De uitkomsten hebben echter deze nauwkeurigheid niet, doordat de spitsjes niet geheel hun eersten stand schijnen terug te krijgen. Toch blijven de verschillen over 't algemeen zeer klein, zooals de voorafgaande tabellen lieten zien.

De gevonden waarden voor de inkrimping bij ethyleen- en zuurstoftemperaturen zijn ± 3 en ± 6 % kleiner dan die, welke volgen uit Comm. No. 95b uit metingen aan een staaf van Jena-glas 16^{III}.

Daar het uitgemeten vacuumglas reeds meer dan tien jaren oud was, lag het in onze bedoeling de metingen aan nieuw Jenaglas te herhalen om na te kunnen gaan, in hoeverre de ouderdom van het glas de thermische uitzetting beïnvloedt. Evenals een meting met een bad van vloeibaar helium, wacht dit plan door tijdgebrek nog op uitvoering.

3. Voorstelling der waarnemingen in een formule.

Daar het niet mogelijk bleek de resultaten voor te stellen door een derde graadsvergelijking van den vorm

$$L = L_0 \left(1 + \left\{ a \frac{t}{100} + b \left(\frac{t}{100} \right)^2 + c \left(\frac{t}{100} \right)^3 \right\} 10^{-6} \right)$$

zooals in Comm. No. 95b geschiedde en het ook niet gelukte een andere formule met 3 coëfficiënten te vinden, die beter aansluiting

geeft, berekenen wij de coëfficiënten eener vergelijking van den vorm

$$L = L_0 \left(1 + \left\{ a \frac{t}{100} + b \left(\frac{t}{100} \right)^2 + c \left(\frac{t}{100} \right)^3 + d \left(\frac{t}{100} \right)^4 \right\} 10^{-6} \right)$$

en vonden hiervoor en voor de coëfficiënten in de hiermee overeenkomende formule voor de cubische uitzetting:

$$\begin{aligned} a &= 716.8 & K_1 &= 2150 \\ b &= 48.33 & K_2 &= 136 \\ c &= 9.02 & K_3 &= 27 \\ d &= 10.6 & K_4 &= 33. \end{aligned}$$

4. Grafische voorstelling der thermische uitzetting.

Met bovenstaande formule werd berekend de uitzetting van 1 M. tusschen 13^o.1 en 0^o C. en daarna de lengteverandering van af 0^o C. Fig. 13 geeft de lengteverandering boven en beneden 0^o C. en laat zien, hoe gering in het waterstofgebied de verandering nog is.

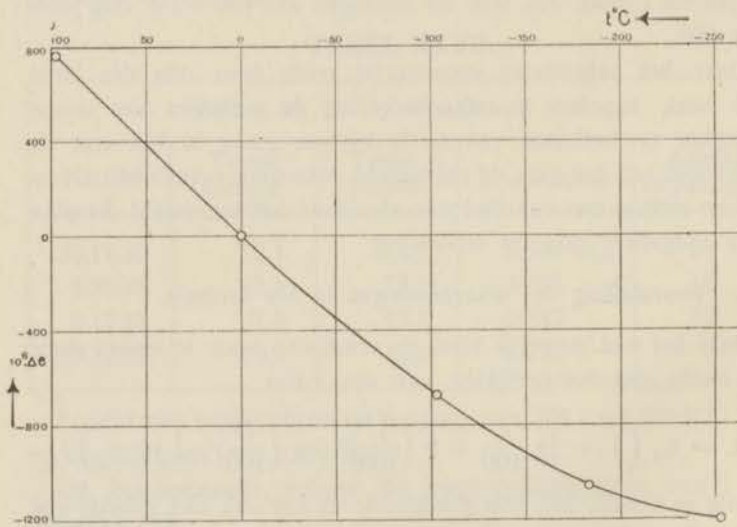


Fig. 13.

5. De uitzettingscoëfficiënt.

Ofschoon het aantal waarnemingen te gering is om er den uitzettingscoëfficiënt nauwkeurig uit af te leiden, kan het algemeen verloop er van toch wel grafisch worden aangegeven. Als wij den uitzettingscoëfficiënt α_t noemen en de lengte, toename van t_1^0 tot t_2^0 ΔL , de lengte bij 0^0 C L_0 dan hebben wij

$$\Delta L = L_0 \int_{t_1}^{t_2} \alpha_t dt.$$

Stellen wij den gemiddelden uitzettingscoëfficiënt tusschen t_1 en t_2^0 voor door $\bar{\alpha}_{t_1 t_2}$ dan is ook:

$$\Delta L = L_0 \bar{\alpha}_{t_1 t_2} (t_2 - t_1) \text{ en dus}$$

$$\int_{t_1}^{t_2} \alpha_t dt = \bar{\alpha}_{t_1 t_2} (t_2 - t_1)$$

De kromme, die α_t voorstelt in een α_t , t -diagram moet dus zoo getrokken worden, dat linker en rechter leden van bovenstaande gelijkheid dezelfde oppervlakken voorstellen. Men vindt dan de kromme in fig. 14 uit onderstaande gemiddelde uitzettingscoëfficiënten.

TABEL XXIX.

$t_2 - t_1$	$10^6 \bar{\alpha}_{t_1 t_2}$
97.8 — 13.1	7.93
13.1 — (-102.8)	6.64
-102.8 — (-182.5)	5.10
-182.5 — (-252.8)	1.65

Duidelijk blijkt wel uit dit figuur, dat de α_t bij lage temperatuur niet lineair met de absolute temperatuur verloopt, doch daar meer het karakter vertoont van de soortelijke warmte.

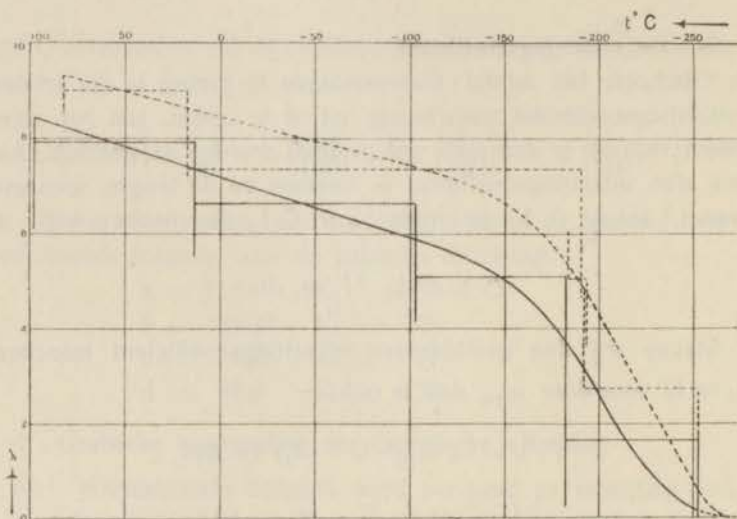


Fig. 14.

In laatstgenoemde figuur is ook de relatieve uitzettingscoëfficiënt van de onbekende glassoort van Lindemann ten opzichte van kwarts, uit zijn waarnemingen afgeleid, uitgezet (de gestippelde lijn).

Door vergelijking met onze uitkomsten blijkt, dat die kromme wel ongeveer het karakter van de glasuitzetting weergeeft. Nemen we aan, dat het overeenkomstige ook geldt voor de andere stoffen, waarvan Lindemann de uitzetting ten opzichte van kwarts gemeten heeft, dan kunnen we uit fig. 15, waarin de uitzettingscoëfficiënten voor verschillende vaste stoffen volgens zijn uitkomsten zoo goed mogelijk grafisch voorgesteld zijn, het besluit trekken, dat voor de meeste stoffen het verloop van den uitzettingscoëfficiënt is als bij glas.

Hoewel een nader onderzoek gewenscht is, zouden onze waarnemingen zoowel als die van Lindemann eerder spreken ten gunste van de wet van Debye¹⁾, volgens welke bij voldoende lage temperatuur de uitzettingscoëfficiënt evenredig is aan T^3 ,

¹⁾ l. c. p.

dan van die van Born¹⁾, volgens welke bij de bedoelde temperatuur evenredigheid met T zou moeten bestaan.

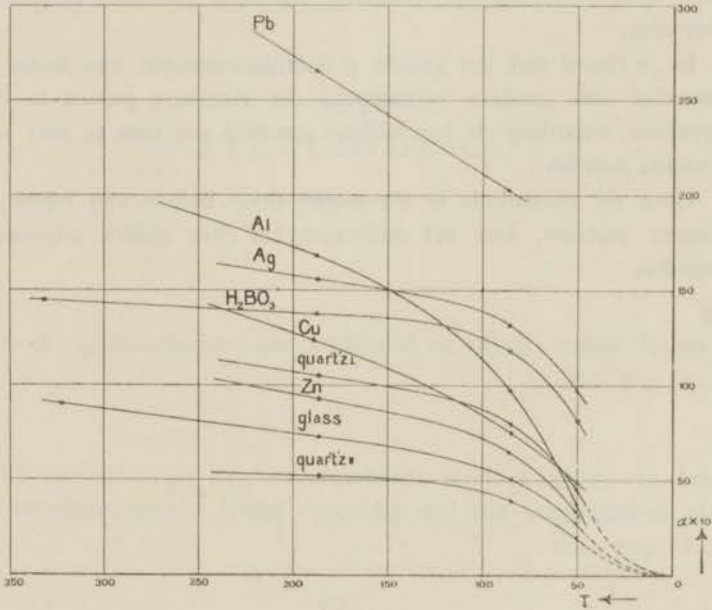


Fig. 15.

Verder schijnt het aanbeveling te verdienen, het verdere onderzoek naar de thermische uitzetting van vaste stoffen bij lage temperaturen te beginnen met koper en zilver, die krommen vertoonen, welke van die der andere stoffen afwijken en waarvoor dus in de eerste plaats een nauwkeurig onderzoek gewenscht schijnt.

Dit onderzoek kan vermoedelijk volgens dezelfde methode geschieden als nu voor Jenaglas heeft plaats gehad. Door den Heer L. O u w e r k e r k, amanuensis 1e klas van het laboratorium is een vacuumbuis geconstrueerd uit electrolytisch roodkoper, op ongeveer gelijke wijze ingericht als de buis van Jenaglas. De

¹⁾ I. c. p.

waarneming der vaste punten zal natuurlijk in opvallend licht moeten gebeuren, terwijl de buis boven de hoogste merkteekens van een verwijding is voorzien om meer vloeistof te kunnen bevatten.

In verband met het groote geleidingsvermogen van koper is namelijk een snellere verdamping der vloeibare gassen te verwachten, waardoor de beschikbare meettijd wel eens te kort zou kunnen worden.

Door de binnenbuis te vervangen door buizen van zilver en andere metalen, kan het onderzoek tot deze stoffen uitgebreid worden.

STELLINGEN.

I.

De Avogadroschalen voor waterstof en helium vallen samen.
diss. pag. 51.

II.

Het verschil in de temperatuurschalen van den helium- en den waterstofthermometer neemt evenredig met den nulpuntsdruk af.
diss. pag. 47.

III.

De thermische uitzettingscoëfficiënt van vaste stoffen is bij zeer lage temperaturen vermoedelijk niet evenredig met de absolute temperatuur.
diss. pag. 72.

IV.

De bezwaren, die Simon aanvoert tegen de berekening der integratieconstante in de thermodynamische dampspanningsvergelijking voor waterstof door Eucken, zijn niet alle gegrond.

Franz Simon. Einige Bemerkungen zu der Arbeit von Eucken „Über die Nullpunktsentropie condensierter Gase“.
Z. f. Phys. 1925.

V.

Henning en Heuse vinden niet de „36604” Avogadro-schaal, wanneer zij bij hun temperatuurbepalingen gebruik maken van de Leidsche correcties voor waterstof.

Henning und Heuse. Eine neue Bestimmung
der norm. Siedepunkte von Sauerstoff, Stickstoff und
Wasserstoff. Z. f. Phys. 1924.

VI.

Het is gewenscht nader te onderzoeken, of de opvallende bijzonderheid in den loop der weerstandslijnen van vele metalen in een bepaald temperatuurgebied beneden 0° C. veroorzaakt wordt door verandering van modificatie.

VII.

Het is wenschelijk de onderzoekingen van de Haas en van Reaps van antimoon en andere metaalkristallen in magneetvelden uit te breiden over het geheele temperatuurgebied beneden 0° C.

VIII.

Stoppen van weerstandsbanken krijgen een constanter en kleiner overgangswaerstand bij invetten met vaseline.

J. J. Manley. Phil. Mag. (6)33. 1917.

IX.

Zoolang gegevens over de diffusie van helium door kwarts bij lage temperatuur ontbreken, moet het gebruik van helium-gasthermometers uit kwarts ontraden worden.

X.

Wanneer het nulpunt van thermometers bepaald wordt in duinwaterijs, is het gewenscht het te controleeren door weerstandsmetingen.

XI.

Het gymnasiale leerplan stelt te hooge eischen aan de leerlingen der afdeeling B.

XII.

Het is gewenscht, dat het middelbaar en voorbereidend hooger onderwijs aan meisjes wettelijk geregeld wordt.

XIII.

Het is gewenscht op scholen voor middelbaar en voorbereidend hooger onderwijs een proeve te nemen met een andere dagindeeling, waarbij de verplichte lessen zooveel mogelijk in de ochtenduren gegeven worden en de middagen grootendeels vrij komen voor zelfwerkzaamheid der leerlingen.

at the

... ..

... ..

... ..

