Utrecht University Library
Partner in Science
Universiteit Utrecht

Het warmtespectrum en de trillingsperioden der moleculen van eenige gassen

https://hdl.handle.net/1874/240334

4° 192

Phys.
16 Feb 1888

W. H. JULIUS.

HET WARMTESPECTRUM EN DE TRILLINGSPERIODEN DER MOLECULEN VAN EENIGE GASSEN

HET WARMTESPECTRUM

EN DE

TRILLINGSPERIODEN DER MOLECULEN

VAN EENIGE GASSEN.

Stoomdruk van J. VAN BOEKHOVEN, Utrecht.

RIJKSUNIVERSITEIT UTRECHT
1408 4291

HET WARMTESPECTRUM

EN DE

TRILLINGSPERIODEN DER MOLECULEN

VAN EENIGE GASSEN.

PROEFSCHRIFT

TER VERKRIJGING VAN DEN GRAAD VAN

Doctor in de Wis- en Natuurkunde

AAN DE RIJKS-UNIVERSITEIT TE UTRECHT

NA BEKOMEN MACHTIGING VAN DEN RECTOR MAGNIFICUS

D^R. G. H. LAMERS

Hoogleeraar in de Faculteit van Godgeleerdheid

EN

MET TOESTEMMING VAN DEN ACADEMISCHEN SENAAT

TEGEN DE BEDENKINGEN DER WIS- EN NATUURKUNDIGE FACULTEIT

TE VERDEDIGEN OP

Vrijdag den 10^den Februari 1888, des namiddags ten 3 ure

DOOR

WILLEM HENRI JULIUS,

geboren te ZUTPHEN.

UNIVERSITEITS BIBLIOTHEEK UTRECHT

UTRECHT. — J. VAN BOEKHOVEN.

1888.

Aan mijne Ouders.

VOORWOORD.

Aan het einde mijner academische studiën gekomen, is het mij een aangename plicht, U, Hoogleeraren der philosophische faculteit, mijnen dank te betuigen voor het van U genoten onderwijs en voor zoo menig blijk van welwillendheid.

In het bijzonder hebt Gij, Hooggeleerde Buys Ballot, *Hooggeachte Promotor, aanspraak op mijne duurzame erkentelijkheid voor de medewerking en de voorlichting, bij het samenstellen van dit proefschrift mij gegeven, — voor den goeden invloed, dien vooral de dagelijksche aanraking met U op mijne vorming heeft uitgeoefend gedurende den tijd, dat ik het voorrecht had, Uw assistent te zijn.*

INLEIDING.

Het geheel der menschelijke kennis — zoo luidt de voorstelling die Prof. Buys Ballot hiervan geeft — kunnen wij ons besloten denken binnen een kring, wiens omvang voortdurend toeneemt. Den ganschen inhoud te leeren kennen, de grenzen te aanschouwen in alle richtingen, is thans voor niemand meer mogelijk; een ieder stelle zich dus tevreden met een meer of minder kleinen cirkel rondom het middelpunt en kieze zich dan een sector, waarin hij den omtrek zal kunnen bereiken. Hoe verder in dien sector de eindpalen onzer kennis worden verzet, des te langer wordt ook de grenslijn die het bekende scheidt van het omringend duister, en des te talrijker zijn derhalve de plaatsen waar men, nieuw licht ontstekende, die grens kan overschrijden.

Voorzeker een bemoedigend denkbeeld, ook voor wie zich bezighoudt met de studie der natuur; want zeer verbreid is de meening, dat door de groote vorderingen, welke in den laatsten tijd de exacte wetenschappen hebben gemaakt, de kans om nieuwe waarheden te ontdekken voortdurend afneemt.

Maar gemakkelijker wordt het bespieden der natuur niet. Herhaaldelijk blijken onze werktuigen onvoldoende om de vragen op te lossen, die de uitkomsten van vroeger

onderzoek ons deden stellen, en een groote dienst wordt dus aan de wetenschap bewezen door ieder, die haar verrijkt met een nieuwe methode van onderzoek, of wiens vernuft onze zintuigen te hulp komt met een nieuw doeltreffend middel tot waarneming.

Een dergelijke verdienste komt o. a. toe aan Prof. LANGLEY, die vóór eenige jaren door de uitvinding van zijn spectrobolometer den weg baande tot een bijna geheel nieuw veld van onderzoek, een terrein waarop wel reeds deze en gene met zwakker hulpmiddelen een stap waagde, doch dat door een instrument, zoo gevoelig als de bolometer, toch eigenlijk eerst recht toegankelijk is gemaakt voor een eenigszins stelselmatige verkenning. Misschien zullen de eerst onlangs bekend gemaakte radiomicrometers van D'ARSONVAL of van VERNON BOYS [1]) door hunne, volgens de beschrijving aan het ongelooflijke grenzende gevoeligheid nog grooter diensten aan de wetenschap bewijzen; maar dat ook de bolometer een lang niet verwerpelijk hulpmiddel is om onontgonnen gebied te betreden, hoop ik in dit proefschrift door eenige voorbeelden nader te staven.

Het is in de wereld van het voor ons oog oneindig kleine, in het rijk der moleculen met hare individueele eigenschappen en eigenaardige, eeuwigdurende bewegingen, dat de bolometer ons in staat stelt een blik te werpen.

De mechanische warmtetheorie eischt, dat wij ons de kleinste deeltjes der lichamen voorstellen als in een toestand van voortdurende beweging, in een soort van trilling of rotatie verkeerende; doch bijzonderheden omtrent dien bewegingstoestand zijn ons zoo goed als

---

[1]) Nature, April 7 1887, p. 549. Proc. of the Roy. Soc. 1887, XLII, p. 189.

onbekend. Wij weten niet of de moleculen van het ijzer, dan wel die van den zwavel in sneller slingering zijn en duister is ons de verandering, die de deeltjes zelve of hunne banen ondergaan, wanneer een lichaam uit den vasten staat overgaat in dien van vloeistof.

Toch is het niet onmogelijk, iets gewaar te worden aangaande den aard der bewegingen van die moleculen. Elk stofdeeltje immers draagt — volgens de tegenwoordig gangbare voorstellingswijze — een deel van zijn beweging over op den omringenden ether en brengt daardoor in dezen eene, volgens zijnen omloopstijd periodieke, evenwichtsverstoring te weeg, die zich als straling voortplant en die, onder zekere omstandigheden, in staat is elders de beweging van stofdeeltjes te versterken. Alle atomen en moleculen telegrapheeren, om zoo te zeggen, den aard hunner beweging naar alle zijden, andere deeltjes ontvangen en registreeren die berichten. Op den physicus rust de taak, de ontvangkantoren doelmatig in te richten, ten einde in de gelegenheid te zijn, de telegrammen te ontcijferen. Hij moet daartoe 1^0 die periodieke evenwichtsverstoringen naar hare perioden kunnen scheiden en rangschikken, en 2^0 de door elk harer elders opgewekte versterking der bestaande beweging kunnen waarnemen en meten.

Uit een groot aantal onderzoekingen is gebleken, dat de bedoelde straling dezelfde wetten volgt als het licht, want dat het licht slechts een bijzondere rubriek van die stralen vertegenwoordigt; het eerstgenoemde doel kan derhalve bereikt worden door de van het beschouwde lichaam uitgaande stralen, nadat ze door een nauwe spleet zijn gegaan, op een diffractieplaat of op een prisma te laten vallen.

Wat den tweeden eisch betreft, daaraan kan worden

voldaan door in het dusgevormd spectrum een toestel te plaatsen, waarin door de straling een zekere waarneembare verandering wordt teweeggebracht; en daartoe is in de eerste plaats noodzakelijk, dat die toestel uit zijn aard in staat zij de gegeven straling te *absorbeeren*, en verder dat hij een andere temperatuur bezitte dan het stralend lichaam, want onder *gelijkheid* van temperatuur verstaan wij juist dien toestand, waarbij de twee lichamen *niet* in staat zijn door straling veranderingen in elkaar teweeg te brengen.

De aldus in het leven geroepen veranderingen kunnen worden waargenomen als optische [1]), thermische, chemische [2]) of electrische [3]) verschijnselen, al naar den aard van den gebruikten toestel. Van de studie der *warmtewerking* hebben wij de beste resultaten te verwachten; immers temperatuuruitwisseling is overal en te allen tijde het groote gevolg der voortdurend plaats hebbende straling, en de temperatuursveranderingen, die door een stralend lichaam elders worden opgewekt, kunnen wij meten. Optische, chemische en electrische verschijnselen, voortspruitende uit straling, zijn daarentegen veel minder algemeen.

Het onderzoek dus naar de warmte, die op de verschillende plaatsen van het, grootendeels donker, spectrum der chemische lichamen wordt opgewekt, zal leiden tot een nadere bekendheid met de bewegingen hunner moleculen en kan zoo een belangrijk hulpmiddel worden

---

[1]) De spectroscopie is met behulp van fluorescentie uitgebreid over het ultra-violet (SORET e. a.) en met behulp van phosphorescentie over het ultrarood (BECQUEREL).

[2]) ABNEY heeft de photographie van het spectrum in het ultrarood kunnen voortzetten tot $\lambda = 1^{\mu},5$.

[3]) Zie: W. HANKEL, Ueber eine directe Umwandlung der Schwingungen der strahlenden Wärme in Electricität. Wied. Ann. X, p. 618, XI, p. 269.

voor de theoretische chemie. Reeds heeft de optische methode als spectraal analyse groote diensten aan de chemie bewezen door de aanwezigheid van sommige stoffen in verbindingen kenbaar te maken; zelfs zijn op het spectroscopisch onderzoek de grondslagen gebouwd voor eene „Chemie van de zon" en voor de kennis van de samengesteldheid onzer zoogenaamde chemische elementen. [1]) Voorzeker opmerkelijk is het, dat er zoo reeds eerder iets bekend is geworden omtrent den bewegingstoestand der monaden of atomen van hooger orde, welke tezamen een chemisch atoom vormen, dan omtrent de hoofdbewegingen, waardoor een molecuul gekenmerkt wordt. Maar de oorzaak ligt voor de hand. Het werktuig in hetwelk door de eerste soort van bewegingen — mits ze sterk genoeg zijn — waarneembare veranderingen worden te weeg gebracht, het oog, is den mensch van nature gegeven, terwijl er vrij wat voorbereiding en ingewikkelde toestellen noodig zijn, om ook de tweede soort van bewegingen voor onze zintuigen toegankelijk te maken.

Op welke wijze de kennis van ultraroode stralen zich langzamerhand ontwikkeld heeft, zal blijken uit het volgend geschiedkundig overzicht; daarna wordt vermeld, wat door mij zelven aan die kennis is toegevoegd. Slechts weinige gegevens heb ik kunnen verzamelen, en wanneer wij dus langs dezen nog zelden betreden weg het gebied der moleculaire eigenschappen binnentreden, tasten we nog vaak in den blinde rond. Het is niet mogelijk, de volle beteekenis te doorzien van een klein aantal feiten,

---

[1]) J. Norman Lockyer, The Chemistry of the Sun. London 1887. — Crookes, Ann. de Ch. et de Phys. [6] III, p. 145 (1884). — Grünwald, Phil. Mag. XXIV, p. 354 (October 1887). On the remarkable relationships between the spectra of watervapour and the line spectra of Hydrogen and Oxygen, and on the chemical structure of the two latter and their dissociation in the Sun's atmosphere.

die wij nog niet in de gelegenheid zijn geweest, in hunne verhouding tot vele andere te aanschouwen. Er moet nog ontzettend veel meer materiaal worden bijeengebracht; maar dan ook is het wellicht bereikbaar, door middel van de warmtestraling een beter inzicht te verkrijgen in het mechanisme der scheikundige werkingen, en daarmede sommige duisterheden in de eigenschappen der stof tot meerder klaarheid te brengen, waarvan het ophelderen onmogelijk is voor de chemie, voor zoover die zich slechts bezighoudt met het macroscopisch onderzoek van de verhouding der stoffen ten opzichte van elkaar.

EERSTE HOOFDSTUK.

Historisch Overzicht.

a. HET ULTRAROODE ZONNESPECTRUM EN DE EERSTE GOLFLENGTE-BEPALINGEN VAN DONKERE WARMTESTRALEN.

De meest in 't oog loopende warmtewerking door straling is die, welke van de zonnestralen uitgaat, en deze is dan ook het eerst onderzocht. De werking van brandspiegels en lenzen leerde dat òf de lichtstralen warmte konden teweeg brengen, òf dat met de lichtstralen warmtestralen samen gingen, die ongeveer dezelfde wetten volgden wat terugkaatsing en breking betrof; met welke *soort* van lichtstralen de warmtewerking voornamelijk gepaard ging, daaromtrent kon het onderzoek van het spectrum iets leeren, en zoodanige onderzoekingen zijn dan ook reeds in 1776 door ROCHON [1]), in 1777 door LANDRIANI [2]) en omstreeks 1785 door SENEBIER [3]) verricht, met 't resultaat dat de voornaamste warmtewerking in het minder breekbare deel van het zonne-

[1]) ROCHON, Recueil de Mém. sur la Méc. et Phys., 1783.
[2]) LANDRIANI, Ann. der Physik u. Chemie, X, (1802).
[3]) SENEBIER, Mém. Physico-chemiques, II, 74.

spectrum plaats heeft, en dat het maximum ongeveer in het geel of oranje ligt.

Dat er ook warmtestralen van de zon uitgaan, die niet door licht begeleid worden, en die nog minder sterk door het prisma worden gebroken dan de roode stralen, werd aangetoond door W. HERSCHEL. [1]) Deze bracht in een spectrum van zonnestralen een verschuifbaar scherm met een spleet, waarachter een gevoelige thermometer bevestigd was, en vond dat, terwijl in 't rood de temperatuursverhooging een maximum van 3°,8 bereikte, voorbij het rood een verhooging van 3°,6 en zelfs eenige centimeters verder nog eene van 1°,75 werd aangeduid.

Het resultaat, door HERSCHEL verkregen, trok genoeg de aandacht der natuurkundigen, om strenge kritiek uit te lokken; wij zullen hierop echter niet nader ingaan: de beschouwingen van LESLIE [2]), MICKLE [3]), PREVOST [4]), RITTER [5]), ENGLEFIELD [6]) naar aanleiding van HERSCHEL's proeven en hun eigen waarnemingen, vindt men kort uiteengezet in GEHLER's Physik. Wörterbuch Bd. X 1e Abt. p. 158 vlgg. (1841). Daar wordt ook een overzicht gegeven van de onderzoekingen, door WÜNSCH [7]) ingesteld omtrent den invloed, dien de stof, waaruit het prisma bestaat, heeft op de plaats van het maximum der warmtewerking, en tevens van de in 1806—1808 met nog meer zorg verrichte waarnemingen van SEEBECK [8]) over hetzelfde onder-

[1]) W. HERSCHEL, Philos. Trans. 1800. Gilb. Ann. der Phys. VII (1801).
[2]) LESLIE. Nicholson's Journ. IV.
[3]) MICKLE, Phil. Mag. LXV volgens GEHLER; ik heb dit stuk echter niet kunnen vinden.
[4]) PREVOST, Phil. Trans. 1802.
[5]) RITTER, Gehlen's Journ. VI.
[6]) ENGLEFIELD, Journ. Roy. Inst. 1802.
[7]) WÜNSCH, Gehlen's Journ. VI.
[8]) SEEBECK, Abhandl. der Berl. Akad. 1819.

werp. Uit de wijze, waarop het overzicht gegeven wordt, spreekt de wensch, om de proeven zoodanig uit te leggen, dat ze duiden op de onbestaanbaarheid van warmtestralen zonder, zij het dan ook zwakke, lichtstralen; wat in overeenstemming is met den titel van het hoofdstuk: „Erzeugung (der Wärme) durch farbiges Licht."

Over het geheel heerschte er in de eerste helft dezer eeuw groote verwarring in de voorstellingen, die men zich maakte omtrent het verband tusschen licht en warmte. Want terwijl in dien tijd de undulatietheorie van het licht met rassche schreden veld won door de overtuigende werken van YOUNG, FRESNEL en CAUCHY, schenen de ontdekkingen van WILKE, BLACK, CRAWFORD enz. over specifieke en latente warmte meer recht van bestaan te geven aan de meening, dat warmte een zekere onweegbare stof was. Maar niettemin waren er nog steeds aanhangers van de emissie-hypothese van het licht, en ook van eene kinetische theorie der warmte, zooals die reeds door BACO en BOYLE was uitgesproken, en al naar gelang deze voorstellingen bij de physici gecombineerd waren, schiepen zij zich een beeld van de wijze, waarop de zon ons hare warmte toezendt. Eene merkwaardige uiteenzetting van de verschillende opvattingen, die in 1840 nog golden omtrent het wezen van licht en warmte, vindt men in GEHLER's Phys. Wörterb. Bd. X 1e Abt. p. 653—666. Het eindbesluit is daar, dat de lichtstralen, die van de zon komen, in de atmospheer der aarde de warmtestof in beweging brengen en zóó warmtestralen opwekken, die dan wederom in staat zijn, de lichamen, welke zij treffen, in temperatuur te doen rijzen.

Toen echter, vooral door de erkenning der wet van het behoud van arbeidsvermogen, dus na 1842, de beschouwing ingang vond, dat de warmte een bewegingstoestand

van de moleculen zijn zou, was mede de baan geopend voor een duidelijker voorstelling omtrent de warmtestraling.

Reeds de beroemde proeven van MELLONI hadden doen zien, dat de stralen, die van volkomen donkere warmtebronnen uitgaan, zich, wat terugkaatsing en breking betreft, geheel gedragen als lichtstralen; FIZEAU en FOUCAULT [1]) toonden de interferentie, BÉRARD [2]) en KNOBLAUCH [3]) de polarisatie en dubbele breking der warmtestralen aan, en hiermede was voldoende bewezen, dat de warmtestralen met evenveel recht als de lichtstralen beschouwd konden worden als transversale trillingen; de gelijkheid der voortplantingssnelheid van beide stralensoorten deed verder besluiten, dat warmtestralen ook golvingen waren van den *ether;* uit de proefnemingen van MASSON en JAMIN [4]) en van FRANZ [5]) eindelijk volgde, dat de warmtestralen in het lichtende spectrum door absorbeerende media steeds in volkomen dezelfde mate werden verzwakt als de lichtstralen van gelijke breekbaarheid, zoodat ze van deze niet te scheiden waren. Deze waarnemingen leerden derhalve, dat licht en warmtestralen, wat hun wezen betreft, volkomen identisch zijn, doch dat de golflengte binnen zekere grenzen blijven moet, zullen de stralen op ons oog den indruk van licht teweegbrengen.

Maar die warmtestralen zelve kunnen niet „warm" genoemd worden, want de stoffen, die zij ongehinderd doordringen, vertoonen geen temperatuursverhooging. Hoe moeten wij ons dus hunne verwarmende werking voorstellen?

Dit nu is gemakkelijk, zoodra men zich de warmte

---

[1]) FIZEAU en FOUCAULT, Comptes Rendus XXV, 1847.
[2]) BÉRARD, Gilb. Ann. XLVI, 1814.
[3]) KNOBLAUCH, Pogg. Ann. LXXIV, 1848
[4]) MASSON en JAMIN, Comptes Rendus XXXI, 1850.
[5]) FRANZ, Pogg. Ann. CI, 1859.

denkt als een bewegingstoestand van de kleinste deeltjes der lichamen. Straling toch is een periodieke beweging van den ether en representeert als zoodanig een zekere hoeveelheid arbeidsvermogen of energie. Kunnen nu de stoffelijke deeltjes meetrillen in de periode van een straal, die het lichaam treft, dan zal deze golving de beweging van die deeltjes versterken ten koste van haar eigen energie; het lichaam wordt dus verwarmd en de straal geabsorbeerd. Deze beschouwing van de toedracht der warmtestraling kon eerst na de geboorte der mechanische warmtetheorie te voorschijn treden; zij lag reeds ten grondslag aan de stellingen, in 1846 uitgesproken door Prof. Buys Ballot. [1])

Onze kennis van het zonnespectrum werd door Melloni [2]) slechts weinig uitgebreid. Alleen toonde hij, dat de plaats waar men het warmtemaximum vond, in het algemeen afhankelijk was van de lengte van den weg, dien de stralen in het prisma hadden afgelegd. Liet men den stralenbundel dicht bij den brekenden kant door het prisma gaan, dan lag het maximum steeds meer naar de zijde der groote golflengten dan wanneer de bundel nabij de basis door het prisma ging. Slechts bij steenzout en sylvin gaf dit geen verschil en Melloni besloot dus, dat een steenzoutprisma de ware plaats van het maximum zou doen kennen, welke volgens hem gelegen was ongeveer even ver voorbij de grens van het rood als deze van het geel verwijderd is.

John Herschel publiceerde in 1840 [3]) een nieuwe methode om de warmteverdeeling in 't zonnespectrum aanschouwelijk te maken: hij bedekte namelijk een dun

[1]) Buys Ballot, Schets eener Physiologie enz. § 224 en § 225, 1849.
[2]) Melloni, Ann. de Ch. LIII, 1833.
[3]) J. Herschel, Phil. Trans. 1840.

stuk wit papier aan de eene zijde met lampzwart, bracht op den anderen kant een weinig alcohol en ontwierp op dienzelfden kant een zonnespectrum. Waar de warmtewerking het sterkst was, moest de alcohol het snelst verdampen en daardoor op het witte papier droge plekken doen ontstaan, die helder afstaken tegen de omgeving bij beschouwing in opvallend licht. Zoo vond HERSCHEL discontinuiteiten in 't ultrarood. MELLONI echter maakte opmerkzaam op de selectieve absorptie van 't witte papier, waardoor de opgenomen warmte geen maat was voor de in de verschillende deelen van het spectrum aanwezige warmte. Hieraan schreef hij toe, dat HERSCHEL het maximum verder van 't rood vond dan door W. HERSCHEL was aangegeven. De vorm der discontinuiteiten was voorts niet te vertrouwen van wege de geleiding der warmte door het papier; hunne aanwezigheid schreef MELLONI toe aan absorptie door het prisma en hij spreekt zijne (niet door proeven gestaafde) stellige verwachting uit, dat bij gebruik van een steenzoutprisma geen leemten in het spectrum zullen voorkomen.

Warmtemetingen in het zonnespectrum werden verder nog verricht door DRAPER [1]), die met moeite de warmte aantoonde in een buigingsspectrum en daarbij meende het maximum in 't geel gevonden te hebben; door MÜLLER [2]), die de uiterste golflengte bij extrapolatie uit een formule schatte op 1$^{\mu}$,83, en tevens de warmte waarnam in een diffractiespectrum; door FRANZ [3]), die aantoonde, dat de verdeeling der zonnewarmte op verschillende, schijnbaar even heldere dagen niet dezelfde was; door KNOBLAUCH [4])

---

[1]) DRAPER, Phil. Mag. XIII, 1857.
[2]) MÜLLER, Pogg. Ann. CV, 1858.
[3]) FRANZ, Pogg. Ann. CXV, 1862.
[4]) KNOBLAUCH, Pogg. Ann. CXX en CXXXVI, 1863 en 1868.

en door DESAINS [1]) wiens nauwkeurige proeven de plaats van het maximum in boogmaat deden kennen en bewezen, dat het maximum een weinig meer naar de zijde van het rood verschoven was, wanneer de zonnestralen een langer weg in de atmospheer hadden afgelegd. De meeste dezer onderzoekingen, die alle met behulp van de thermozuil verricht werden, en waarbij de gebruikte prisma's en lenzen uit steenzout waren vervaardigd, vindt men eenigszins uitvoeriger vermeld in WÜLLNER's Lehrbuch der Experimentalphysik. Ook komen daar enkele uitkomsten voor van de proeven van LAMANSKY [2]), die het eerst de aanwezigheid van discontinuiteiten in het zonnespectrum boven alle twijfel verhief, door aan te toonen, dat een spectrum van kalklicht, met dezelfde middelen ontworpen, die leemten niet vertoonde.

DRAPER [3]) wees op het feit, dat in het prismatisch spectrum de deelen, die begrepen zijn tusschen plaatsen met een bepaald verschil in golflengte, niet even groot zijn, maar korter worden, naarmate men zich voortbeweegt in de richting van de grootere golflengten. In eenzelfde bestek komen dus meer stralen naarmate men het rood nadert. Hieraan *alleen* schreef hij toe, dat de warmtewerking tot voorbij het rood schijnbaar toenam. Uit een groot aantal proeven was hem namelijk gebleken, dat twee gedeelten van het zichtbaar spectrum, begrepen tusschen $\lambda = 0^{\mu},7604$ en $\lambda = 0^{\mu},5768$ en tusschen $\lambda = 0^{\mu},5768$ en $\lambda = 0^{\mu},3933$ *gelijke* warmtewerking uitoefenden, wanneer men die groepen door een spiegel op de thermozuil concentreerde.

---

[1]) DESAINS, Comptes Rendus LXX, 1870.
[2]) LAMANSKY, Pogg. Ann. CXLVI, 1872.
[3]) DRAPER, Am. Journ. of Sci. 1872.

Uit dit ééne feit trok hij het overijlde besluit, dat steeds voor dergelijke intervallen, die een gelijk getal golflengten omvatten, de warmtewerking dezelfde wezen zou.

Uitgaande van de dispersieformule van CAUCHY werd door LUNDQUIST [1]) de warmteverdeeling in het normale spectrum berekend uit de intensiteiten in het prismatisch spectrum. Voor deze laatste de getallen van LAMANSKY gebruikende, vond hij, in overeenstemming met het eerste resultaat van DRAPER, het maximum der zonnewarmte in het geel, maar van de door DRAPER vermoede symmetrie in de warmte van het normaalspectrum was geen sprake.

Merkwaardig is nog de wijze, waarop MOUTON er in geslaagd is, in het prismatisch warmtespectrum golflengten te bepalen [2]) en daardoor het verband tusschen golflengte en brekingsindex in elk willekeurig prisma ook voor het ultrarood experimenteel vast te stellen. De methode is echter slechts bruikbaar voor stralen, die in voldoende hoeveelheid door kalkspaat en kwarts worden doorgelaten. Tusschen twee evenwijdig gestelde nicols namelijk wordt een dunne kwartsplaat, die evenwijdig aan de as gesneden is, zoodanig loodrecht op de richting der stralen opgesteld, dat de as een hoek van 45° met het polarisatievlak der nicols maakt. In den tijd, waarin de buitengewone straal de dikte d van de kwartsplaat doorloopt, legt de gewone straal daarin den kleineren weg $d\,\frac{v}{v'}$, af, wanneer v de snelheid van den gewonen, v' die van den buitengewonen straal is.

---

[1]) LUNDQUIST, Pogg. Ann. CLV p. 146, 1875.

[2]) MOUTON, Comptes Rendus LXXXVIII p. 1078 en 1139, LXXXIX p. 295 (1879). Dezelfde weg was reeds in 1847 ingeslagen door FIZEAU, Comptes Rendus XV.

Als nu het wegverschil $d\,(1 - \frac{v}{v'})$ een oneven aantal halve golflengten van den gewonen straal in kwarts bedraagt, zullen de beide stralen bij het uittreden een halve golflengte in phase verschillen; zij voegen zich alzoo samen tot een straal, wiens trillingsrichting juist loodrecht staat op de oorspronkelijke trillingsrichting, en die dus door het tweede nicol niet wordt doorgelaten.

Daar de golflengte van den gewonen straal in kwarts $\lambda_g = \frac{\lambda}{n_g}$ is, waarin λ de golflengte in lucht, n_g den brekingsindex van den gewonen straal in kwarts beteekent, zal het genoemde verschijnsel zich voordoen voor alle stralen, wier λ zoodanig is, dat

$$d\,(1 - \frac{v}{v'}) = (2m + 1)\,\frac{1}{2}\,\frac{\lambda}{n_g},$$

waarin m een geheel getal voorstelt. Maar

$$v : v' = n_b : n_g,$$

dus

$$d\,(1 - \frac{n_b}{n_g}) = (2m + 1)\,\frac{1}{2}\,\frac{\lambda}{n_g},$$

$$d\,(n_g - n_b) = (2m + 1)\,\frac{\lambda}{2}.$$

Breidt men den uittredenden samengestelden bundel in een spectrum uit, dan zullen hierin alle stralen ontbreken, wier golflengte aan bovenstaande vergelijking voldoet, en in het spectrum vertoont zich dus een reeks van donkere banden, die natuurlijk in 't onzichtbare spectrum voortgezet is Heeft men nu de formule op twee banden in 't zichtbaar spectrum, wier λ bekend is, toegepast, dan kan men daaruit d en m bepalen, en dan is de golflengte van elken door de thermozuil aangeduiden kouden band, wiens brekingsindex men afleest, te vinden uit de formule:

$$d\,(n_g - n_b) = \left\{ 2\,(m-k) + 1 \right\} \frac{\lambda}{2},$$

waarin k het getal is, dat aanwijst de hoeveelste donkere of koude band na den eerstgemetenen beschouwd wordt.

Het is echter noodig de verschillen $n_g - n_b$ te kennen, en daartoe moet men eens voor al die brekingsindices van den gewonen en van den buitengewonen straal voor de verschillende banden met behulp van een kwartsprisma gemeten hebben.

De grootste golflengte, door Mouton gemeten, is $2^{\mu},14$; voor den brekingsindex van dien straal vond hij bij

kwarts	(gew.)	1,5191
„	(buitengew.)	1,5278
flintglas		1,5841.

Op de door hem verrichte energiebepalingen in het normale spectrum komen wij later terug. In het spectrum der zon trof hij een viertal koude banden aan met de golflengten:

$$\lambda = 0^{\mu},85,\ \lambda = 0^{\mu},985,\ \lambda = 1^{\mu},23,\ \lambda = 1^{\mu},48.$$

In 1882 werden nog eenige golflengtebepalingen gedaan van donkere zonnestralen door Pringsheim [1]), die de warmte van een diffractiespectrum op een torsieradiometer naar Crookes deed vallen en uit de afwijkingen van het wiekje tot het bedrag der warmte besloot.

Daar echter de ultraroode stralen van het eerste spectrum voor een groot deel samenvallen met de lichtende stralen van het tweede, werd een oplossing van jodium in zwavelkoolstof of een ebonietplaat in den weg der stralen gebracht, door welke beide middenstoffen het lichtende deel van 't spectrum werd tegengehouden, het ultraroode daarentegen doorgelaten. Op deze wijze toonde

---

[1]) Pringsheim, Wiedem. Ann. XVIII, p. 32, 1883.

PRINGSHEIM de aanwezigheid van stralen in het zonnespectrum aan, wier golflengte $1^{\mu},52$ bedroeg, doch verder kon hij niet gaan, omdat van hier af de stralen bedekt werden door de donkere golvingen van het tweede spectrum, wier lengte begint met $0^{\mu},76 = \frac{1^{\mu},52}{2}$; en een absorbeerende stof, die de eerste ultraroode stralen terughoudt, de volgende doorlaat, was aan PRINGSHEIM niet bekend. Tusschen $\lambda = 1^{\mu},3834$ en $\lambda = 1^{\mu},3864$ vond hij een kouden band, waarvan hij den oorsprong in het midden laat, daar deze gelegen kon zijn òf in de omstandigheid, dat lampzwart die stralen niet absorbeert, òf in de ondoordringbaarheid van jodiumoplossing en van eboniet voor die stralen, òf werkelijk in den aard van 't zonnespectrum.

Om de geschiedenis der kennis van 't ultraroode zonnespectrum volledig te maken, zullen we nog aanstippen de onderzoekingen van ABNEY en van BECQUEREL op dat gebied, hoewel deze niet direct op de meting der warmtewerking gegrondvest zijn.

ABNEY [1]) gaf een uitvoerige kaart van het diffractiespectrum der zon, verkregen door photographie. Tusschen $0^{\mu},76$ en $0^{\mu},98$ komen daarop eenige breede banden en een zeer groot aantal Fraunhofersche lijnen voor, die, behoudens een paar onduidelijke plaatsen, zeer scherp afgeteekend zijn. In 1886 [2]) gaf hij een verbeterde kaart van $0^{\mu},715$ tot $1^{\mu},000$, vergezeld van tabellen, waarin de juiste golflengten der verschillende lijnen zijn opgenomen.

H. BECQUEREL [3]) heeft de door zijn vader EDM. BECQUEREL

---

[1]) ABNEY, Phil. Trans. 1880, p. 653—667.
[2]) " , Phil. Trans. 1886, p. 457.
[3]) H. BECQUEREL, Ann. de Ch. et de Phys., [5], XXX, 1883.

toegepaste methode, om het ultraroode zonnespectrum door phosphorescentie zichtbaar te maken, belangrijk uitgebreid en scherper gemaakt, waardoor het hem mogelijk werd, het prismatisch zonnespectrum met het oog waar te nemen tot eene plaats, wier golflengte hij op $1^{\mu},5$ schatte. Tot $1^{\mu},042$ kon de golflengte direct gemeten worden in een diffractiespectrum. Van hier tot $1^{\mu},220$ werd ter bepaling van de golflengte de methode van MOUTON gevolgd, en verder in het spectrum werd ze naar gissing vastgesteld, door ook voorbij de waarnemingen de kromme lijn voort te zetten, die het verband gaf tusschen de brekingsindices voor een prisma van zwavelkoolstof en de bijbehoorende golflengten. BECQUEREL vond nu, behalve vele Fraunhofersche strepen, drie banden A^{I}, A^{II} en A^{III} met de golflengten $0^{\mu},94$, $1^{\mu},08$ en $1^{\mu},23$, benevens nog twee andere, waarvan hij de gemiddelde golflengten schatte op $1^{\mu},315$ en $1^{\mu},47$.

LANGLEY stelde voor den laatsten breeden absorptieband $\lambda = 1^{\mu},85$, welke waarde aan BECQUEREL veel te groot voorkwam. Later echter [1]) heeft deze met nog gevoeliger phosphoresceerende stoffen het diffractiespectrum tot bijna $2^{\mu},—$ kunnen waarnemen, en daarbij is het hem gelukt de spectra van verschillende orden van elkaar te scheiden, door de stralen, nadat ze van den diffractiespiegel teruggekeerd waren, te leiden door een prisma van CS_2, waarvan de brekende ribbe horizontaal lag, dus loodrecht op de lijnen van de diffractieplaat. Hierdoor verschenen op het phosphoresceerend scherm de verschillende spectra in schuinsche richting en nevens elkander. De langs dezen weg door BECQUEREL gemeten golflengten der groote absorptiebanden in het zonnespectrum zijn:

---

[1]) BECQUEREL, Comptes Rendus, XCIX, p. 419, 1884.

A^I	A^{II}	
$0.^{\mu}934$—$0.^{\mu}968$	$1.^{\mu}115$—$1.^{\mu}119$	en $1.^{\mu}132$—$1.^{\mu}142$.
A^{III}	A^{IV}	
$1.^{\mu}351$—$1.^{\mu}400$.	$1.^{\mu}800$—$1.^{\mu}880$.	

welke nu zeer goed met de waarden, door LANGLEY gevonden, overeenstemmen.

Op deze hoogte ongeveer staat onze tegenwoordige kennis van het ultraroode zonnespectrum. Een beschrijving van de wijze, waarop door LANGLEY golflengtebepalingen verricht zijn, zullen we eerst later geven, daar zijn methode ook van toepassing is op de stralen, die van aardsche bronnen uitgaan, en de door hem gebruikte hulpmiddelen tevens uitvoeriger besproken moeten worden wegens hun verband met de door mijzelven gebezigde werktuigen.

---

b. DE SPECTRALE VERDEELING DER WARMTE VAN AARDSCHE BRONNEN.

De breking van stralen, die uitgaan van een donkere warmtebron is het eerst aangetoond door MELLONI [1]). Een steenzoutprisma werd zóó voor een thermozuil opgesteld, dat lichtstralen, van een zeker punt P uitgaande, door het prisma heen de soldeerplaatsen konden bereiken, welke echter tegen de directe straling van P beschut waren. Werd nu in P een diaphragma met kleine opening gebracht, waarachter een tot 390° verhitte koperen plaat, dan nam men een duidelijken uitslag van den galvanometer waar. Deze hield terstond op wanneer men het prisma uit zijn behoorlijken stand draaide en was dus niet

---

[1]) MELLONI, Pogg. Ann. XXXV, p. 409, 1835.

toe te schrijven aan verwarming van het prisma. Met een eenigszins doelmatiger inrichting, bestaande in een lineaire thermozuil, die zich kon bewegen over een verdeelden cirkelboog, in wiens centrum het prisma stond, gelukte het MELLONI aan te toonen, dat de warmtestralen van verschillende bronnen — koper op 390°, gloeiend platina, Locatellische lamp — verschillend gebroken werden, en wel sterker in de genoemde volgorde. Deze proeven werden zonder lenzen verricht; eerst door het experimenteel bewijs van de breking der warmtestralen, welke van donkere lichamen uitgaan, was het gebruik van lenzen het aangewezen middel om die stralen op bepaalde plaatsen te concentreeren.

Tot het meten van de brekingsindices der warmtestralen meende FORBES [1]) om verschillende redenen beter te doen, een andere methode te volgen, namelijk die der totale reflexie. Hij plaatste op een der hoekpunten van een beweeglijke houten ruit een gelijkbeenig steenzoutprisma, met een hoek van 100°, zóó dat het op de in dat hoekpunt uitkomende diagonaal van de ruit symmetrisch bevestigd was en de ribbe van den stompen hoek naar het midden van de ruit was gericht. In het tegenovergelegen hoekpunt der ruit was een pin, die zich door een gleuf van de diagonaal bewegen kon bij het verstellen van de ruit. Op de beide andere hoekpunten bevonden zich het stralend lichaam en de thermozuil, elk in het brandpunt van een steenzoutlens, zoodanig, dat de stralen van de warmtebron, door de eene lens evenwijdig gemaakt, na reflexie op de achtervlakte van het prisma door de andere lens op de zuil geconcentreerd werden.

De werking van dezen toestel is duidelijk: wanneer de

---

[1]) FORBES, Pogg. Ann. XLV, p. 442, 1838.

lineaire thermozuil zich bevindt op de plaats, waar een geringe verschuiving de grootste verandering in warmte-aanwijzing ten gevolge heeft, is de grens der totale reflexie bereikt voor die stralen, welke door de warmtebron in hoofdzaak worden uitgezonden. Uit den stand, dien de ruit dan heeft, kan de brekingsindex dier stralen worden berekend. — FORBES komt tot het resultaat, dat de gemiddelde brekingsindices der stralen van verschillende bronnen (Locatellische lamp, gloeiend platina, zwarte oppervlakte van 450° F.) verwonderlijk weinig van elkaar afwijken, doch dat het tusschenbrengen van verschillende diathermane stoffen grooten invloed heeft op de plaats van het maximum der doorgelaten warmte.

Bij het onderzoek naar de spectrale verdeeling der warmte hebben sommigen meer hunne aandacht gewijd aan de vraag, in hoeverre deze afhankelijk is van de temperatuur der bron, anderen zochten vooral naar den invloed, dien de aard van het stralend lichaam daarop heeft.

DRAPER oordeelde, dat de uitstraling slechts van de temperatuur afhing, op grond van zijne proeven aangaande de temperatuur, waarbij verschillende lichamen beginnen te gloeien [1]).

---

[1]) American Journal 1847. Onlangs is door H. F. WEBER (Sitzungsber. der Akad. der Wiss. in Berlin, 9 Juni 1887) het bedoelde onderzoek van DRAPER herhaald, en wel met eenigszins verschillenden uitslag. Terwijl namelijk DRAPER vond, dat alle lichamen licht beginnen uit te zenden bij omstreeks 525° C, zag WEBER de eerste sporen van licht bij veel lager temperatuur, verschillend met den aard van het stralend lichaam, b. v. bij 417° C voor goud, 396° C voor platina, 377° C voor ijzer. Het eerste licht is grijsachtig en komt in breekbaarheid met de gele en geelgroene stralen overeen. Bij stijging van temperatuur neemt het een gelen tint aan, en wanneer de roodgloeihitte begint, verschijnt in het spectrum een smalle roode streep en een groene band. Beide breiden zich vervolgens uit, wanneer de hitte nog verder toeneemt. WEBER trekt hieruit het besluit, dat bij beginnende gloeihitte de energie der lichtgevende stralen van middelbare breekbaarheid het grootst is; doch dit wordt tegengesproken door STENGER (Wied.

KNOBLAUCH meende omstreeks denzelfden tijd te vinden, dat de warmte van alle stoffen op 100° C volkomen op dezelfde wijze door verschillende diathermane platen verzwakt werd.

DE LA PROVOSTAYE en DESAINS [1]) kwamen echter voor stoffen op 173° C tot een tegenovergesteld besluit, en VILLARI [2]) eveneens voor het geval, dat de uitstralende lichamen een temperatuur van 100° C bezaten. Een bevredigende oplossing van deze kwestie kon slechts voortvloeien uit de kennis der spectrale verdeeling.

MAGNUS zocht in 1865 [3]) naar verschil in uitstraling van geplatineerd en van glad platina. Hij vond bij onderzoek der spectra, dat de donkere stralen bij het geplatineerde platina bijna de dubbele intensiteit hadden, terwijl de lichtende stralen nauwelijks sterker waren dan die van het gladde metaal.

Met zeer veel zorg werd door TYNDALL [4]) de warmte gemeten in het spectrum van electrisch licht. De plaatsen in het spectrum werden echter niet in boogmaat opgegeven, maar een graphische voorstelling van de waargenomen intensiteiten vertoonde een kromme lijn, die van het lichtend spectrum uit geleidelijk opsteeg tot een maximum, ver in 't ultrarood, en dan eveneens geleidelijk, doch steiler, daalde. Van de totale hoeveelheid uitgestraalde warmte viel, volgens TYNDALL, slechts een achtste gedeelte in het zichtbaar spectrum.

Ann. XXXII, p. 271) op grond van proeven, volgens welke bij gradueele verzwakking van zonlicht of lamplicht door nicols, het laatst waarneembare licht eveneens de breekbaarheid der groene stralen bezit; terwijl toch in het prismatisch spectrum dier lichtbronnen, gelijk bekend is, het energiemaximum in het ultrarood ligt. Volgens STENGER is het door WEBER en hemzelven waargenomen verschijnsel toe te schrijven aan den aard van het netvlies.

[1]) DE LA PROVOSTAYE en DESAINS, Pogg. Ann. LXXXVI, 1852.

[2]) VILLARI, Nuovo Cimento. 1878.

[3]) MAGNUS, Pogg. Ann. CXXIV.

[4]) TYNDALL, Phil. Trans. 1866.

DESAINS [1]) onderzocht de spectra van kalklicht en van witgloeiend platina, het laatste in den vorm van de lamp naar BOURBOUZE-WIESNEGG [2]). Het prisma en de lenzen waren natuurlijk wederom van zout, de spleetwijdte bedroeg 0,6 tot 0,3 m.M. en bij de aflezing correspondeerde 0,5 m.M. met 3′ boogs.

Bij de platinawarmte werd het maximum op 1° 15′ van het helder rood verwijderd gevonden; de kromme lijn, die de intensiteiten voorstelde, was symmetrisch ten opzichte van 't maximum en bedroeg, op afstanden

9′	33′	75′	ter weerszijde daarvan,
88 %	34 %	4 %	van de maximale straling.

Een waterlaag van 2 m.M. dikte nam van het maximum 95 % weg; 18′ verder echter werd iets minder, namelijk 84 % geabsorbeerd.

Reeds is vermeld (blz. 13), dat LAMANSKY in 1872 het spectrum van kalklicht onderzocht en aantoonde, dat hierin geen discontinuiteiten optraden zooals in het zonnespectrum, hoewel voor beide proeven hetzelfde flintglasprisma gebezigd werd. Bij gebruik van een steenzoutprisma was de warmtewerking zeer veel grooter.

Volgens proeven van DESAINS en AYMONET [3]) kon men in het spectrum van een lamp naar BOURBOUZE-WIESNEGG, dat door een steenzoutprisma gevormd was, vier koude banden te voorschijn roepen, wanneer men de stralen leidde door een waterlaag van een centimeter dikte. De ligging der banden was, uitgaande van het lichtende spectrum,

19′,8	30′,6	42′,0	52′,0

voorbij het uiterste rood. Voor de afstanden van eenige

[1]) DESAINS, Comptes Rendus LXX, p. 985, 1870.
[2]) Zie JAMIN, Cours de Physique, III, 1887, p. 146**.
[3]) DESAINS en AYMONET, Pogg. Ann. CLVI, p. 174, 1875.

banden in 't zonnespectrum tot diezelfde grens vonden zij:

$$19',0 \qquad 30',0 \qquad 44',0 \qquad 51',0$$

alzoo een merkwaardige overeenstemming die hen deed besluiten dat deze banden waren toe te schrijven aan absorptie door het water der atmospheer.

Mouton [1]) is de eerste geweest, die de warmteverdeeling in het normale spectrum van een aardsche bron, de lamp Bourbouze-Wiesnegg, getracht heeft te bepalen.

Stelt men namelijk de in het geheele spectrum ontwikkelde warmte voor door q, dan zal de galvanometeruitslag, wanneer de lineaire thermozuil zich bevindt op een plaats van het prismatisch spectrum, wier deviatie δ is, evenredig zijn aan $\frac{dq}{d\delta}$ en dus wezen:

$$D = c\,\frac{dq}{d\delta}.$$

De intensiteit van dienzelfden straal in het diffractiespectrum is

$$i = \frac{dq}{d\lambda},$$

dus

$$D = c\,\frac{dq}{d\lambda}\,\frac{d\lambda}{d\delta} = c\,i\,\frac{d\lambda}{d\delta},$$

waaruit

$$i = \frac{D}{c}\,\frac{d\delta}{d\lambda}. \qquad \ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

Nu bestaat er altijd een zekere betrekking tusschen de deviatie δ en den brekingsindex n, b. v., wanneer het prisma op het minimum van deviatie gehouden wordt,

$$\frac{\sin \tfrac{1}{2}(\delta + \alpha)}{\sin \tfrac{1}{2}\alpha} = n.$$

Aan deze of eene dergelijke vergelijking kan $\frac{d\delta}{dn}$ worden ontleend.

[1]) Mouton, Comptes Rendus LXXXIX, p. 295, 1879.

Maar (1) kunnen we schrijven:

$$i = \frac{D}{c} \frac{d\delta}{dn} \frac{dn}{d\lambda},$$

en i zal dus volkomen bekend zijn, indien wij slechts $\frac{dn}{d\lambda}$ kunnen bepalen. MOUTON heeft nu experimenteel bewezen (zie bladz. 14) dat voor een zeker flintglasprisma de dispersieformule van C. NEUMANN

$$\frac{1}{n^2} = \frac{K\lambda^2}{n^2} + A + \frac{Bn^2}{\lambda^2} + \frac{Cn^4}{\lambda^4}$$ [1])

het verband tusschen golflengte en brekingsindex vrij nauwkeurig weergaf tot $\lambda = 2^{\mu},14$, wanneer men aan de constanten A, B, C, K de door hem berekende waarden toekende. Uit deze formule kan men dus $\frac{dn}{d\lambda}$ afleiden, en zoo is dan de intensiteit in elk punt van het normale spectrum, tot $\lambda = 2^{\mu},14$, volkomen bekend.

MOUTON vond aldus het maximum der warmte van het zonnespectrum bij $\lambda = 0^{\mu},56$, en van het spectrum, door de lamp BOURBOUZE geleverd, bij $\lambda = 1^{\mu},53$. Jammer, dat het gebruikte prisma niet van steenzout vervaardigd was, want de absorptie der donkere stralen door het flintglas vermindert nu zeer de waarde dezer laatste bepaling.

Vrij uitvoerige onderzoekingen aangaande de spectrale verdeeling der warmte, die door eenzelfde stof op verschillende temperaturen en die door verschillende stoffen op nagenoeg dezelfde temperatuur wordt uitgestraald, zijn verricht door JACQUES. [2])

[1]) Bij MOUTON, en bij de meeste Fransche en vele Engelsche schrijvers, wordt deze formule verkeerdelijk opgegeven als „dispersieformule van BRIOT," hoewel BRIOT zelf haar volstrekt niet vermeldt. Zij is door KETTELER (Pogg. Ann. CXL, p. 180, 1870) afgeleid uit BRIOT's dispersietheorie, maar kwam ook reeds voor in een geschrift van C. NEUMANN: Die magnetische Drehung der Polarisationsebene. Halle 1863. — Men zie: E. KETTELER, Theoretische Optik, begründet auf das Bessel-Sellmeiersche Princip, p. 555. (1885).

[2]) JACQUES, Proceedings of the Am. Acad. 1878—1879.

Als stralend lichaam gebruikte hij een platinareepje, 15 m.M. lang en 1 m.M. breed, dat door een electrischen stroom tot gloeiing gebracht werd. De temperatuur daarvan kon op de volgende wijze bepaald worden. Aan twee punten van het reepje, 8 m.M. van elkaar verwijderd, waren twee zeer dunne platinadraadjes geklonken, die een gedeelte van den hoofdstroom moesten afleiden en daartoe verbonden waren tot eene stroomgeleiding, waarin 1000 ohms weerstand en een gevoelige galvanometer waren aangebracht. Het is duidelijk, dat de stroomsterkte in dien galvanometer niet eenvoudig evenredig zal zijn aan de sterkte van den hoofdstroom, omdat zij tevens afhankelijk is van veranderingen in den weerstand tusschen de beide aanhechtingspunten op het reepje, daar deze weerstand mede het potentiaalverschil in die punten bepaalt. Wanneer nu de sterkte van den hoofdstroom en die van den afgeleiden stroom gemeten worden, kan men daaruit berekenen den weerstand tusschen de aanhechtingspunten, en deze wordt ondersteld in een bekend verband te staan tot de temperatuur van het reepje.

Van den gloeienden draad werd nu met een lens en een prisma van steenzout een spectrum gevormd, waarin een thermozuil, die aan een verdeelde lat bevestigd was, kon worden voortbewogen.

Door een bijzondere inrichting bepaalde JACQUES vóór elke proevenreeks de punten der verdeeling, die met de plaatsen van eenige Fraunhofensche lijnen correspondeerden.

Voor het drooghouden der steenzoutpraeparaten, het vermijden van luchtstroomingen en van ongelijkmatige verwarming der toestellen, enz., waren zooveel mogelijk voorzorgen genomen en aan den galvanometer van

THOMSON, die bij de proeven dienst deed, werden verbeteringen aangebracht, om de gevoeligheid tot een maximum te brengen.

Toch kunnen de uitkomsten der proeven niet als bevredigend worden beschouwd, want de kromme lijnen, die het gemiddeld resultaat van elke proevenreeks graphisch voorstellen, wijzen wel is waar niet op een bepaalde vormverandering of op een geleidelijke verplaatsing van het maximum bij verhooging van temperatuur, doch evenmin kan er uit worden afgeleid, wat JACQUES meende te mogen doen, dat eene dergelijke verandering *niet* aanwezig is, want daartoe loopen de verschillende waarnemingen te veel uit elkaar.

Hoogstens zou men er uit kunnen opmaken, dat het maximum van uitstraling zich bij gloeiend platina niet *sterk* verplaatst.

Om de straling van verschillende oxyden te onderzoeken, werden deze eenvoudig op het platinareepje bevestigd. Het is echter zeer de vraag, of hierbij de bedekkende laagjes dik genoeg waren, om volkomen adiathermaan te zijn voor de warmte, die door het platina zelf werd uitgezonden. De uitstraling van Cu O scheen met de temperatuur niet in aard te veranderen. Voor Fe_3O_4, Cr_2O_3, Pt, CuO, Al_2O_3, Fe_2O_3 vond JACQUES krommen van onderling geheel verschillende gedaanten en met hare maxima op verschillende plaatsen. De wijze echter, waarop hij verband zocht te brengen tusschen den aard der uitgezonden stralen en de moleculairgewichten der onderzochte stoffen, is tamelijk gewrongen, en dwingt in alle geval, op deze proeven alleen gegrondvest, volstrekt geen vertrouwen af.

Thans dient op een belangrijk onderzoek de aandacht gevestigd te worden, dat ik in verhandelingen van anderen

niet heb aangehaald gevonden, en dat ook schijnt aan LANGLEY onbekend te zijn geweest, toen hij in 1886 schreef: „On hitherto unrecognized wavelengths." Ik bedoel de golflengtebepalingen van DESAINS en CURIE.[1]) Deze natuurkundigen werkten met eene diffractieinrichting, bestaande uit een aantal nauwkeurig evenwijdig gespannen metaaldraadjes van niet minder dan $^1/_8$ m.M. dikte, gescheiden door evengroote tusschenruimten.

Een dergelijke toestel geeft natuurlijk slechts zeer geringe dispersie en zou, op de gewone wijze gebruikt, een uiterst nauwe spleet en smalle thermozuil vorderen, wanneer men in de diffractiebeelden de stralen met verschillende golflengten afzonderlijk wenschte te onderzoeken. Doch dit bezwaar vervalt geheel, indien men, zooals zij deden, door de spleet slechts nagenoeg homogene stralen toelaat, en men is dan tevens vrij van de lastige omstandigheid, dat de verschillende spectra elkaar bedekken. Van den ingelaten bundel scheiden zich ter weerszijde de diffractiebundels van verschillende orden af, die natuurlijk geheel buiten elkaar liggen en waarvan de afstanden tot den directen bundel gemakkelijk kunnen worden gemeten. Om nu b. v. te weten, welke de golflengte was van de stralen, die door de eene of andere warmtebron, b. v. een zwart gemaakte koperplaat op 300° C, hoofdzakelijk werden uitgezonden, ontwierpen DESAINS en CURIE door middel van een steenzoutlens en een steenzoutprisma van die door een spleet toegelaten warmte een spectrum. Door dit spectrum werd een scherm met spleet, achter welke een lineaire thermozuil bevestigd was, langzaam voortbewogen en vastgezet in den stand, waarbij de galvanometer de grootste uitwijking vertoonde. De thermozuil

[1]) DESAINS en CURIE, Comptes Rendus XC, p. 1506, 1880.

werd dan weggenomen. Daar echter de door het koper op deze plaats uitgestraalde warmte te gering was, dan dat daarvan nog een diffractiebundel duidelijk zou zijn aan te toonen, werd nu als warmtebron er voor in de plaats gesteld een lamp Bourbouze, die natuurlijk door de spleet van de thermozuil juist dezelfde stralensoort zond, welke zooeven van de bron op 300° was uitgegaan, doch in veel grooter intensiteit.

Thans werd achter die spleet de toestel ter bepaling van de golflengte geplaatst, bestaande uit een steenzoutlens op een halven meter afstand, die, weer een halven meter verder, van de spleet een beeld ontwierp. Onmiddellijk achter de lens bevond zich de beschreven buigingsrooster, zoodat ter weerszijde van het directe beeld diffractiebeelden van de spleet werden gevormd, op afstanden, die maat waren voor de golflengte der toegelaten stralen. Door deze rij van beelden kon een gevoelige thermozuil langs eene, in tienden van millimeters verdeelde schaal verschoven worden en op deze wijze was het dus aan D. en C. mogelijk, van elke stralensoort de golflengte te bepalen. De intensiteit in het eerste diffractiebeeld was ongeveer $^1/_5$ van die in het directe beeld. De spleetwijdte bedroeg van 0,5 tot 1, en soms tot 2 millimeter. Eenige der uitkomsten worden in de volgende tabel medegedeeld.

Afstand in boogmaat tot de stralen van het natriumlicht			Intensiteit der straling van een lamp van BOURBOUZE-WIESNEGG.	met roet bedekt koper op 300° C.	op 150° C.	Golflengten.
0°	0′	0″	171	—	—	0,588
	13	20	256	—	—	—
	30	0	399	—	—	—
	46	40	1026	4	—	0,96
1	3	20	2494	7	—	1,13
1	20	0	4474	18	—	1,43
1	36	40	5785	33	2	1,86
1	53	20	4674	53	5	2,13
2	10	0	2123	60	9	4,00
2	26	40	1026	53	8	4,60
2	43	20	557	45	7,3	5,60
3	0	0	307	36	6,5	6,00
3	16	40	225	26	6	7,00
3	33	20	170	—	—	—
3	50	0	150	23	—	—
4	6	40	144	19	4	—
4	23	20	110	19	—	—
4	40	40	50	19	3	—

Door niemand echter is de kennis van het warmtespectrum zoozeer uitgebreid als door S. P. LANGLEY. En dit hangt voornamelijk samen met het feit, dat door hem een warmtemeter is toegepast, die in vele opzichten evenzeer uitmunt boven de thermozuil als deze boven den gewonen thermometer. Voor bijzonderheden omtrent den vorm, waarin deze toestel, de bolometer, zijn eerste diensten aan de wetenschap bewezen heeft, verwijs ik naar de „Proceedings of the American Academy, 1880—81", p. 342; het beginsel slechts zij hier kortelijk aangeduid. [1])

[1]) De methode is het eerst aangegeven door SVANBERG, Pogg. Ann. LXXXIV, p. 411, 1851.

Wanneer door de combinatie van geleiders, die bekend is onder den naam van Wheatstone'sche brug, een stroom geleid wordt, en de vier weerstanden zoodanig gekozen zijn, dat de galvanometer in rust blijft, zal een geringe verandering van één der weerstanden de naald doen uitwijken. Zulk eene verandering wordt b. v. door een kleine temperatuursverhooging van dien eenen tak teweeggebracht, en naar gelang van de sterkte, die men aan den hoofdstroom verkiest te geven, zal hiervan een willekeurig groote uitslag van den galvanometer het gevolg zijn. Theoretisch kan men dus aan deze methode om temperatuursverhoogingen zichtbaar te maken, een onbepaald groote gevoeligheid verschaffen; maar de praktijk moet leeren, hoe sterk men den hoofdstroom mag nemen, zonder nadeelig in te werken op andere voorwaarden van de proef, en in hoeverre *dan* nog de galvanometeruitslag grooter is, dan wanneer men onder dezelfde omstandigheden een goede thermozuil gebruikt had.

Langley toonde nu aan, dat het mogelijk is een inrichting te kiezen, waarbij deze methode het verre wint van de toepassing der thermozuilen, zoowel in gevoeligheid als in vlugheid van aanwijzing. Hij vervaardigde een schijf van eboniet met een vierkante opening, waarvan de zijde 8 m.M bedroeg, en spande daarover een aantal ijzeren reepjes, 0,5 m.M. breed, 0,004 m.M. dik, welke zoodanig metallisch verbonden waren, dat ze achtereenvolgens door den stroom doorloopen moesten worden. Deze schijf werd bedekt door een andere met correspondeerende opening. Eveneens tusschen de schijven, doch niet zichtbaar door de opening, was een tweede dergelijk stel reepjes bevestigd, waardoor ook een stroom geleid kon worden, en die samen ongeveer denzelfden weerstand hadden als het eerste stel. Deze beide gelei-

dingen vormden twee armen van de Wheatstone'sche combinatie; de eene werd door de vierkante opening aan straling blootgesteld, de andere niet, doch overigens waren ze zooveel mogelijk in dezelfde omstandigheden wat betreft temperatuursveranderingen, zoowel door de omgeving als door den stroom zelven veroorzaakt. Allerlei maatregelen werden genomen, om dezen toestel tegen luchtstroomingen te beschutten en om de toeleidingsdraden zoowel als de weerstanden, die de beide andere armen van de combinatie vormden, voor temperatuursveranderingen te behoeden. Ook het optreden van thermostroomen werd zorgvuldig vermeden. Aldus ingericht, was deze toestel per eenheid van werkend oppervlak tien tot dertig maal gevoeliger dan de beste thermozuil, en LANGLEY mat daarmede in 1880 gemakkelijk de warmte in het normale spectrum der zon, dat gevormd werd door een diffractiespiegel van RUTHERFORD.

Later werden aan den bolometer nog eenige kleine veranderingen aangebracht. De voornaamste was, dat LANGLEY elk der beide reeksen stroomgeleidertjes verving door één enkel vertikaal reepje of draadje van ijzer, platina of kool, waardoor hij een „lineairen bolometer" verkreeg, die, hoewel minder warmtestralen opvangende en dus gevoeliger opstelling vereischende, daardoor nader kwam aan het afzonderen der warmtewerking van homogene stralen.

In 1882 publiceerde hij [1]) een kaart van de warmte in het prismatisch zonnespectrum, waarvoor de gegevens met behulp van den bolometer waren verkregen, en gaf

[1]) Comptes Rendus, 11 Sept. 1882; Am. Journ. of Sci. Maart 1883; Ann. de Ch. et de Phys. [5], XXIX, p. 497.

ook reeds de warmteverdeeling in het normaalspectrum tot $2^{\mu},8$, doch zonder zijne methode van golflengtebepaling te beschrijven. Dit geschiedde eerst in 1884 [1]) en aan deze verhandeling ontleenen wij het volgende.

Bij zijne eerste metingen van golflengten [2]) begon LANGLEY, met de zonnestralen te laten uiteenspreiden door het flintglasprisma van een spectrometer, die hem in staat stelde, van elke stralensoort nauwkeurig den brekingsindex te bepalen. De bundel, wiens golflengte hij wenschte te kennen, werd vervolgens, afgezonderd van de overige, opgevangen op een vlakken diffractiespiegel van RUTHERFORD. Deze gaf het aanzijn aan een reeks diffractiebundels, waarvan de bolometer de plaats deed kennen wanneer hij langs de buigingsbeelden verschoven werd, en met den afwijkingshoek der diffractiebundels was natuurlijk de golflengte van de toegelaten stralensoort bepaald. In principe komt deze methode geheel overeen met die, welke door DESAINS en CURIE was toegepast.

Sedert Mei 1882 echter gebruikte LANGLEY groote holle diffractiespiegels van ROWLAND. De eerste van deze bevatte 18050 lijnen (142 per millimeter), getrokken op een concaven metaalspiegel van 1,63 M. kromtestraal; de verdeelde oppervlakte was 102 m.M. hoog, 146 m.M. breed.

Hiermede nu werkte LANGLEY op eenigszins andere wijze. Hij vormde namelijk eerst een spectrum met behulp van dezen diffractietoestel, en bepaalde daarna van de verschillende stralen — wier golflengten dus door hunne plaatsing als bekend konden worden beschouwd — de brekingsindices door middel van eene gewone spectrometrische

---

[1]) Am. Journ. of Sci., March 1884; Ann. de Ch. et de Phys. [6], II, 1884.

[2]) Zie ook: S. P. LANGLEY, Researches on solar Heat, and its absorption by the earth's atmosphere. A report of the Mount Whitney Expedition. — Washington, 1884.

inrichting, waarvan het oculair door een bolometer was vervangen.

De gang der stralen was hierbij, meer in bijzonderheden, als volgt:

Een bundel zonnestralen, van een siderostaat komende, werd door een gewonen hollen metaalspiegel geconcentreerd op een spleet S_1. Achter deze bevond zich de diffractiespiegel. Denkt men zich door diens middelpunt en de spleet S_1 een horizontalen cirkel gebracht, waarvan de middellijn gelijk is aan den kromtestraal des diffractiespiegels, dan moet deze laatste zóó geplaatst zijn, dat hij raakt aan dien denkbeeldigen cirkel. Het directe beeld van S_1 ligt nu op denzelfden cirkel en ter weerszijde daarvan bevinden zich de spectra van verschillende orden, welke alle scherp zijn juist op dien cirkelomtrek. [1])

Het oneindig kleine gedeelte van het spectrum, dat diametraal tegenover de diffractieplaat gelegen is, is steeds „normaal", tot welke orde of kleur het ook behoort, en de golflengte op die plaats is evenredig met den lineairen afstand van dit punt tot de spleet S_1. In het bedoelde punt is een spleet S_2 geplaatst en door deze treden de stralen in den spectrometer. Wanneer S_2 nu b. v. ergens in het oranje van het derde spectrum gelegen is, waar de golflengte $0^{\mu},6$ bedraagt, dan treden door die spleet bovendien de stralen met golflengte $1^{\mu},2$ van het tweede en die met $\lambda = 1^{\mu},8$ van het eerste spectrum. Deze drie bundels worden door het prisma van den spectrometer van elkaar afgezonderd, en men

---

[1]) Omtrent de theorie der spherische diffractiespiegels zie men o. a.:
W. Baily, Phil. Mag. [5], XV, p. 183, 1883.
R. T. Glazebrook, ibid. p. 414, en XVI, p. 377.
H. A. Rowland, ibid. XVI, p. 197.
M. Mascart, Journal de Phys. Janvier 1883.

leest voor de beide onzichtbare stralensoorten de deviatie af, waar de bolometer hunne aanwezigheid verraadt.

De mechanische inrichting van dezen tamelijk ingewikkelden toestel moet zoodanig zijn, dat de diffractieplaat P onveranderlijk verbonden is aan de spleet S_2 met den daarachter geplaatsten spectrobolometer; terwijl dit geheele systeem bewegelijk moet wezen ten opzichte van de spleet S_1, doch zóó, dat steeds de lijn PS_2 middellijn blijft van een cirkel, die door S_1 gaat.

Langley toonde nu aan, dat geen der gebruikelijke dispersieformules, wier constanten ontleend worden aan het zichtbare spectrum, in staat is voor de uiterste stralen van het zonnespectrum het verband tusschen brekingsindex en golflengte weer te geven. Verder gaf hij een tabel der golflengten van de in het zonnespectrum voorkomende koude banden, en eene uiteenzetting van de methode, om de verdeeling der energie in het spectrum op eenige verschillende wijzen voor te stellen.

In den loop van 1886 [1]) maakte Langley vervolgens een onderzoek openbaar omtrent den aard der warmtestralen, die door aardsche bronnen op verschillende temperaturen worden uitgezonden. Als warmtebronnen gebruikte hij: 1^0 het heetste gedeelte van de positieve koolspits in den electrischen lichtboog; 2^0 reepen platina bij verschillende graden van gloeiing; 3^0 koperen platen beneden gloeihitte; 4^0 kuben van Leslie, gevuld met aniline of met water, voor temperaturen tusschen 178° C en 0° C, en eindelijk 5° den bolometerdraad zelven op — 2° C, stralend tegen eene oppervlakte op —21° C.

Het onderzoek verviel in twee deelen: ten eerste, het

[1]) Am. Journ. of Sci. Jan. and Aug. '86; Phil. Mag. Aug. '86 Ann. de Ch. et de Phys. 6e Sér. IX, p. 433.

vinden van de verdeeling der door deze bronnen uitgezonden straling over het prismatisch spectrum (want de warmte was in de meeste gevallen veel te gering, om te denken aan eene analyse van het diffractiespectrum), en ten tweede, het bepalen van de golflengten dezer stralen, wier brekingsindices meerendeels veel kleiner waren dan die van de uiterste stralen in 't zonnespectrum, waarvan de golflengte door het vroeger onderzoek was vastgesteld.

De meeste, zoo niet alle prisma's van steenzout (en dit materiaal is onmisbaar) vertoonen volgens LANGLEY geen enkele Fraunhofersche lijn met de noodige scherpte, en de oorzaak hiervan schijnt gelegen te zijn in de moeilijkheid van het polijsten. Na veel moeite gelukte het hem echter een voortreffelijk prisma van 64 m.M. hoogte te verkrijgen, benevens eenige lenzen van steenzout, wier diameter 75 m.M. en wier brandpuntsafstand voor één stel 760 m.M., voor een ander 350 m.M. bedroeg. Daar deze steenzoutpraeparaten veel te lijden hebben van de vochtigheid der lucht, moesten ze herhaaldelijk op nieuw gepolijst worden.

Aan den galvanometer was groote zorg besteed. Het model THOMSON werd in zooverre gewijzigd, dat een cocondraad van 330 m.M. werd aangebracht, de magneetjes den vorm van stalen buisjes verkregen, en voor de demping een stel vleugels van *Libellula* werd gebruikt, zoodat het geheele systeem uitmuntte door bewegelijkheid en lichtheid.

Bij een inwendigen weerstand van 20 ohms gaf deze galvanometer een uitslag van 1 m.M. op de schaal, voor een stroom van 0,000 000 000 5 ampère, terwijl de slingertijd dan ongeveer 20 sec. bedroeg.

Het bolometerreepje had bij het onderzoek der bronnen op betrekkelijk lage temperatuur een breedte van 1 à

2 m.M., en bedekte dan in het spectrum een boog van meer dan 10′, doch niettemin was de plaats van een maximum toch op 1′ nauwkeurig vast te stellen. De verdeelde cirkel van den spectrobolometer veroorloofde aflezing tot 10″ nauwkeurig. De sterkte van den hoofdstroom varieerde bij verschillende proeven tusschen 0,045 en 0,036 ampère.

Eenige resultaten van de proefnemingen zijn opgenomen in de volgende tabel. Onder I vindt men de benaderde temperatuur van de warmtebron; onder II het aantal graden, dat deze hooger was dan de temperatuur van de omgeving; onder III de deviatie van de maximum-ordinaat der warmtekromme, herleid op een prisma van 60°.

I	II	III
815° C	803° C	39°10′
525	505	39 5
330	310	39 2
176	179	38 34
100	88	38 24
40	46	38 2
2	18	37 36

Hieruit volgt, dat bij verhooging van temperatuur het maximum der uitgezonden straling zich verplaatst naar den kant van de kleinere golflengten: een resultaat, dat in overeenstemming is met hetgeen reeds in 1880 door de proeven van Desains en Curie was aangeduid. De helling der warmtekromme vindt Langley steeds steiler aan de zijde der kleinere golflengten.

Het tweede gedeelte van het onderzoek, de bepaling van de *golflengte* der stralen, wier deviatie en brekingsindex uit de beschreven proeven volgde, werd ten uitvoer gebracht geheel op dezelfde wijze als dit voor de zonnestralen geschiedde; alleen werd als warmtebron hierbij gebruikt een electrische lichtboog tusschen kool-

spitsen van 25 m.M. diameter, en waarvoor de stroom geleverd werd door eene machine van 12 paardekrachten. In bijzonderheden de inrichting en den gang der proeven te beschrijven, zou ons te ver voeren; wij willen slechts wijzen op het volgende resultaat.

Wanneer de spleet S_2 zich bevindt op de plaats, die in het negende spectrum aan het natriumlicht toekomt, zullen in den doorgelaten stralenbundel voorkomen de golflengten λD, $2 \times \lambda D$, enz. . . . $9 \times \lambda D$, behoorende tot het 9^e, 8^e, enz. . . . . 1^e spectrum.

Deze stralen worden door het prisma gescheiden, en de deviatie van elk hunner kan met den spectrobolometer bepaald worden. Dergelijke metingen verrichtte LANGLEY ook in de andere spectra en de uitkomst van een groot aantal bepalingen vindt men in de volgende tabel:

$n =$	1,5442	λD_2	$= 0^{\mu},5890 \pm 0,000$
	1,5301	$2 \times \lambda D$	$= 1,1780 \pm 0,002$
	1,5272	$3 \times \lambda D$	$= 1,7670 \pm 0,005$
	1,5254	$4 \times \lambda D$	$= 2,3560 \pm 0,009$
	1,5243	$5 \times \lambda D$	$= 2,9451 \pm 0,013$
	1,5227	$6 \times \lambda D$	$= 3,5341 \pm 0,019$
	1,5215	$7 \times \lambda D$	$= 4,1231 \pm 0,029$
	1,5201	$8 \times \lambda D$	$= 4,7121 \pm 0,043$
	1,5186	$9 \times \lambda D$	$= 5,3011 \pm 0,065$ [1])

In de graphische voorstelling nadert de dispersiekromme tot een rechte, die een bepaalden hoek maakt met de as

[1]) Doorgaans is voor een zekere stralensoort de brekingsindex de bekende grootheid, de golflengte de onbekende; daarom geeft LANGLEY de gemiddelde waarschijnlijke fouten op der golflengten, die hij toekent aan stralen met de vooropgestelde brekingsindices. De gang van het onderzoek echter leverde omgekeerd de opgegeven brekingsindices als waarschijnlijkste waarden, behoorende bij de bekende golflengten.

der abscissen. De toename der samendrukking in het ultrarood eindigt dus, en n nadert tot $a\,\lambda$, zoodat voorbij $\lambda = 5^{\mu}$ het prismatisch spectrum niet merkbaar van het normale spectrum verschilt.

Wanneer men in het uiterste punt van de gevonden kromme eene raaklijn aanbrengt, zal deze derhalve voor de golflengten der stralen van nog geringer breekbaarheid vrij goed benaderde waarden aanwijzen. Aldus stelt LANGLEY de golflengte van het maximum der warmte, uitgezonden door een zwartgemaakte oppervlakte van 100° C en door een van 0° C, bij extrapolatie op $7^{\mu},5$ en 10^{μ}. Hoogstwaarschijnlijk doordringen het steenzoutprisma nog stralen, wier golflengte de waarde 30^{μ} overtreft.

Ten slotte dienen we nog te wijzen op de werken van ABNEY en FESTING [1]) omtrent de absorptiebanden, die verschillende reeksen van organische verbindingen in 't ultrarood vertoonen, en van H. BECQUEREL [2]), waar deze de ultraroode emissiespectra van sommige metaaldampen beschrijft. Hiermede toch zijn de eerste stappen gedaan, om de studie van dit belangrijk gedeelte van het spectrum in verband te brengen met de chemie.

---

[1]) ABNEY and FESTING, Chem. News 43, p. 75, 92, 126. (1881); Report, by Prof. ROSCOE: Journal of the Chem. Soc., May 1881.

[2]) H. BECQUEREL, Ann. de Ch. et de Phys. [5], XXX, p. 45. (1883), of: Comptes Rendus, XCIX, p. 375, (1884).

TWEEDE HOOFDSTUK.

Beschrijving der gebruikte toestellen.

Hoewel in bijna alle ons bekende gevallen de energie der donkere golvingen, welke van eenig lichaam uitgaan, zeer vele malen grooter is dan die der lichtgevende stralen, en hoewel derhalve ook de rol, die de eerstgenoemde spelen, bij de meeste natuurverschijnselen oneindig belangrijker moet zijn dan de invloed, dien het licht op deze uitoefent — toch staat, blijkens het voorgaand hoofdstuk, onze kennis van de spectrale verdeeling der warmte op veel lager trap dan onze bekendheid met de verschillende soorten van licht.

Deze wanverhouding is voornamelijk toe te schrijven aan de omstandigheid, dat wij van nature geen orgaan bezitten, hetwelk ons in staat stelt, de ultraroode golvingen naar haren aard te onderscheiden en verder aan de groote moeilijkheden, die verbonden zijn aan het waarnemen en meten van geringe temperatuursveranderingen.

Van de thermozuil in de tot nu toe gebruikelijke gedaante is niet veel uitkomst meer te verwachten. Dit werktuig is reeds door zoo vele bekwame natuurkundigen te baat genomen, om daarmede door te dringen in de geheimen der warmtestraling, dat de betrekkelijke onvol-

ledigheid der verkregen resultaten veeleer te wijten is aan zwakheid van het hulpmiddel, dan aan het ontbreken van een voldoend aantal waarnemingen.

De bolometer belooft voorzeker meer te kunnen leveren, en waarschijnlijk hebben velen ook reeds beproefd, op het voorbeeld van LANGLEY dit werktuig aan hun streven dienstbaar te maken; doch met de grootere gevoeligheid gaat tevens een zoo belangrijke vermeerdering gepaard van de moeilijkheden der behandeling, dat het niet te verwonderen is wanneer menigeen voor dit bezwaar heeft moeten terugdeinzen. [1])

Ware het niet, dat door de groote welwillendheid van Prof. BUYS BALLOT alle hulpmiddelen van het Physisch kabinet der Utrechtsche universiteit mij ten dienste hadden gestaan — ik zou er voorzeker niet aan hebben kunnen denken, mij te begeven in een onderzoek, dat het gebruik vordert van zoovele kostbare instrumenten en waaraan zoo talrijke technische bezwaren verbonden zijn als aan het werken met den bolometer.

Maar de in vele opzichten uitstekende inrichting van het laboratorium alhier maakt het mogelijk, ingewikkelde proeven te verrichten, en daarom was het een aanlokkelijk plan, met behulp van die nog nieuwe methode een stap te wagen in de duisternis der donkere warmtestraling.

---

a. DE BOLOMETER.

Na rijpelijk overwogen te hebben, aan welke voorwaarden een goede bolometer zoo al moest voldoen, gaf ik

---

[1]) Voor zoover mij bekend is zijn, LANGLEY uitgezonderd, C. BAUER en H. SCHNEEBELI de eenigen, die onderzoekingen volgens de methode van SVANBERG omtrent warmtestraling publiceerden (Wied. Ann. XIX, p. 17. 1883 en XXII, p. 430, 1884). Hunne metingen hebben echter geen betrekking op het spectrum.

aan het instrument de gedaante, in fig. 1, Pl. I, op $^1/_3$ der ware grootte voorgesteld [1]). De toestel is, zooals men ziet, geheel symmetrisch gebouwd. Oorspronkelijk geschiedde dit met het oog op een eventueel gebruik voor differentiaalmetingen; in de gegeven omstandigheden echter komt de symmetrie slechts ten goede aan den eisch, dat de beide fijne deelen der stroomgeleiding zooveel mogelijk in volkomen gelijke condities moeten zijn. Deze eisch kan als hoofdvoorwaarde beschouwd worden. Daarom ook bestaat de kern van het instrument, de directe omgeving van die gevoelige deelen, uit een massieven cylinder van rood koper (fig. 2), welk materiaal door zijn groot geleidingsvermogen voor warmte het meest geschikt is, om eene gelijkmatige temperatuursverdeeling te bevorderen. Deze cylinder bevindt zich binnen een geelkoperen mantel *M* (fig. 1), die hem ook van onderen omsluit en met water gevuld is, waardoor de kern zooveel mogelijk beschut wordt tegen plotselinge van buiten komende temperatuursveranderingen, welke door luchtstroomingen of bestraling kunnen worden veroorzaakt. Horizontaal door den cylinder is een rond gat *a* geboord, en daarboven bevindt zich een vierkante opening *b* met zijde van ongeveer 15 m.M., doch die niet, als *a*, doorloopend is, maar ongeveer 5 m.M. vóór het midden een platten bodem heeft. Aan den anderen kant bevindt zich een correspondeerende opening; beide zijn inwendig geheel met kamferzwart bedekt. In het midden van den toestel, dus, om zoo te zeggen, in den wand, die de beide openingen *b* van elkaar scheidt, is een verticaal gat *t*

[1]) Met de vervaardiglng van dit en van andere instrumenten, die voor het onderzoek noodzakelijk waren, hebben zich belast de Heeren H. en W. OLLAND, alhier. Alle door hen geleverde hulpmiddelen waren nauwkeurig bewerkt en hebben volkomen aan het doel beantwoord.

geboord, waarin een thermometer kan worden geplaatst. Voor en achter dit gat bevinden zich drie spleetvormige, verticale kanalen, waarvan n° 1 en n° 3 tot even beneden de ondervlakte van *b* reiken, terwijl n° 2 doorloopt tot beneden den onderkant van *a*. In de kanalen n° 1, het meest nabij *t*, worden de toestelletjes *L* geschoven, de dragers van de gevoelige stroomgeleiders; in n° 2 komen de verstelbare spleetinrichtingen *N*, die van onderen eene ronde opening *o* hebben, welke met *a* correspondeert, en waarover een fijne draad gespannen is, nauwkeurig in het verlengde van het midden der spleet; in n° 3 eindelijk kunnen op en neer bewogen worden twee kleine dubbele schermen *P*, die door een veertje *v* boven gehouden worden, wanneer men ze heeft opgetrokken. De schermen en de spleetinrichtingen zijn aan de naar buiten gekeerde zijde gepolijst, aan den anderen kant zwart gemaakt.

Wanneer nu de cylinder in den mantel geplaatst is, komen de openingen *a* en *b* juist achter twee kokervormige gangen in den mantel, die als het ware de verlengden van *a* en *b* uitmaken en in de figuur niet te zien zijn, omdat de metalen koker *K* voor den mantel geschoven is. Die koker *K* is gesloten met een deksel *D*, waarin zich van onderen een kleine kijker bevindt, die scherp gesteld is op den draad in de opening *o* van de *achterste* spleetinrichting. Het deksel met het kijkertje kan even goed op den koker *K'* geplaatst worden, wanneer men den toestel andersom gebruiken wil. De cylinder zakt eenige millimeters diep onder den bovenrand van den mantel; de overblijvende ruimte is aangevuld door een deksel van eboniet met behoorlijke openingen, zoodat men de toestellen *L*, *N* en *P* door dat deksel heen naar beneden kan laten: de ebonietstukjes *l*, *n*, *p* sluiten dan die openingen af. Het raam *L* bestaat

uit twee koperdraden, die door een viertal ebonietstaafjes aan elkaar verbonden zijn en waartusschen de gevoelige geleider wordt aangebracht. De boveneinden van die koperdraden zijn omgebogen en worden met schroeven vastgeklemd in de op het deksel bevestigde koperen stukken U, V en W, zoodat een stroom, die bij U intreedt, zich verdeelt over L en L' en bij V en W den toestel verlaat.

De mantel is bevestigd op een ebonietplaat E, die geschroefd is op een verticalen cylinder F. Deze is verschuifbaar, zeer nauwkeurig sluitend, door de bus G, welke zuiver loodrecht op de geelkoperen plaat X bevestigd is; aan die plaat is van onderen de beugel Y aangebracht, waarin zich de moer bevindt voor de schroef Z. Die schroef draagt alzoo den geheelen bolometer en kan dien verticaal op en neer doen bewegen. Men is door deze inrichting in staat, op elke bepaalde plaats van het spectrum naar willekeur het insteldraadje van de opening o of het midden der spleet N te brengen.

De plaat X kan voor- en achterwaarts geschoven worden over een paar tot een stevig stel verbonden linialen, die den bewegelijken arm van den later te beschrijven spectrometer vormen.

Gaan we thans na, welke eigenschappen de kleine geleider, die door zijn weerstandsverandering zijn temperatuursverhooging zal verraden, bezitten moet, om zoo goed mogelijk aan zijn bestemming te beantwoorden.

Wij kunnen vooropstellen, dat hij een weerstand hebben moet van omstreeks 3 ohms. (Dit getal is gekozen, omdat uit voorloopige proeven gebleken was, dat een weerstand van die grootte ongeveer, zonder bezwaar in het gegeven bestek gebracht kon worden; en daaraan heb ik mij verder gehouden, om de overige instrumenten — galvanometer en compensatiebak — in overeenstemming

met die waarde te kunnen laten vervaardigen). Om handelbaar te blijven, mag die geleider echter niet al te fijn wezen; metalen met een groot geleidingsvermogen voor electriciteit, zooals zilver, koper, goud, zijn dus reeds dadelijk als materiaal te verwerpen. Het is verder wenschelijk, dat de specifieke warmte klein zij, en wel vooral de specifieke warmte voor constant volume, omdat we bij het vervaardigen van een zoo klein en stevig mogelijk geleidertje meer aan een zeker volume dan aan een zeker gewicht gebonden zijn. Want hoe geringer nu, ceteris paribus, die specifieke warmte voor constant volume is, des te minder warmte zal er noodig zijn, om eene zekere temperatuursverhooging tot stand te brengen. Een groot geleidingsvermogen voor warmte zal aan hetzelfde doel eenigszins ten goede komen. Opdat verder eene zekere temperatuursverhooging een groote weerstandsverandering tengevolge zal hebben, is het wenschelijk, dat in de formule voor het electrisch geleidingsvermogen $K = K_2 (1 - at + bt^2)$ de coëfficient a groot zij. In hoeverre eenige metalen aan de genoemde voorwaarden voldoen kan blijken uit het volgend overzicht, waarvoor de gegevens ontleend zijn aan LANDOLT und BÖRNSTEIN, Physikalisch-chemische Tabellen. Berlin, 1883.

Metalen.	Spec. Gew.	Spec. warmte bij const gew.	Spec. warmte bij const. vol.	Warmte-geleid. Ag = 100	Electr. geleid. Hg = 1	a
						0,00
Aluminium . .	2,6	0,21	0,546	31,3	31,7—20	39
Cadmium . . .	8,7	0,055	0,479	20,1	13,5	37—42
Goud	19,3	0.03	0.579	53,2	44	37
Nikkel.	8,9	0.11	0,979	—	7,4	—
Platina	21,5	0,03	0,645	8,4	8 — 6	32
Thallium . . .	11,8	0,03	0,354	—	5,2	41
Tin	7,3	0,06	0,438	15,2	9	40
IJzer.	7,8	0.11	0,858	11,9	8	45
Zink	7,1	0,09	0,639	28,1	16	42

Er zijn echter nog een paar voorname condities van meer practischen aard en die moeielijk in tabel te brengen zijn: het uit te kiezen materiaal moet namelijk aan de lucht zijn metallisch oppervlak onveranderd bewaren, en het dient gemakkelijk in de gedaante van stevige, uiterst dunne reepjes gebracht te kunnen worden, daar het in dezen vorm bij geringe doorsnede een groot oppervlak aan de straling kan blootstellen. Uit nikkel, platina, tin of ijzer scheen de keus te moeten worden gedaan. Vele voorloopige proeven werden verricht met bladtin, waaruit ik roostertjes moest vervaardigen, die zigzaggewijs den stroom van den eenen koperdraad naar den anderen geleidden. Dit was noodzakelijk, omdat ik langs korteren weg niet tot een weerstand van 3 ohms kon komen, zonder de reepjes ongelooflijk smal en daardoor onhandelbaar te maken; want het bladtin had altijd nog een dikte van ongeveer 0,008 m.M., en de andere metalen konden mechanisch al niet veel dunner verkregen worden, met behoud van voldoenden samenhang. Eindelijk was ik zoo gelukkig, in het bezit te komen van een vernikkelden trekpot, waarvan het laagje nikkel gemakkelijk losliet. De schilfertjes nikkel, die ik hieraan ontleende, waren tamelijk sterk en hadden een dikte van niet meer dan 0,002 m.M. Er werden met een uiterst scherp mes op een stuk spiegelglas reepjes van gesneden, die ongeveer 0,3 m.M. breed en ruim 20 m.M. lang waren, en na menige vergeefsche poging slaagde ik er in, deze reepjes, nadat ze aan de eene zijde gelijkmatig met kamferzwart waren bedekt, vast te soldeeren aan de beide naar binnen uitstekende koperdraden, die men in het raam *L* (fig. 2) aangebracht ziet. De lengte van het reepje tusschen de soldeerplaatsen is nu 14 m.M. en de weerstand zou dus, als de afmetingen en

het geleidingsvermogen volkomen nauwkeurig bepaald waren, moeten zijn

$$R = \frac{l}{b \times d \times k} = \frac{0{,}014}{0{,}3 \times 0{,}002 \times 7{,}4} = 3{,}15 \text{ Siemenseenh.}$$

Ik heb twee stellen vervaardigd en de weerstanden daarvan bedroegen bij onderzoek:

eerste stel	tweede stel
3,04 en 3,03 ohm.	2,90 en 2,89 ohm.

wat dus vrij goed met de schatting overeenstemt. Het tweede stel is bij de proefnemingen in gebruik genomen, en heeft maanden lang onveranderd dienst gedaan.

---

b. DE COMPENSATIEWEERSTANDEN.

Met dezen naam wil ik bestempelen de weerstanden, die in de beide andere armen van de Wheatstone'sche combinatie gebracht moeten worden, en wier verhouding men zoo dient te kunnen regelen, dat er door den gevoeligen galvanometer, die in de brug geplaatst is, geen stroom gaat.

Deze weerstanden moeten natuurlijk even zorgvuldig tegen ongelijkmatige temperatuursveranderingen beschut worden als de twee bolometerreepjes, want eene kleine vermeerdering van een hunner zal zich ook terstond op den galvanometer doen gevoelen. Daarom zijn zij geplaatst in een zinken bak (fig. 3), die met vloeistof gevuld is. Een horizontale doorsnede van dien bak, ongeveer op de hoogte, door de gestippelde lijn *h* aangewezen, is voorgesteld in fig. 4. De verdeelde stroom, die van de stukken *V* en *W* op het deksel van den bolometer komt, treedt hier naar binnen door tusschen-

komst van de roodkoperen klemschroeven p en q, waaraan tevens de galvanometerdraden g bevestigd zijn en die geïsoleerd door den wand van den zinken bak zijn gebracht. Van q uit geleidt een dikke koperen reep den stroom naar het uiteinde d van een lang kwikbakje k, dat door een met de schuif S_1 (fig. 3) verplaatsbaren beugel b van platina verbonden is met een daarnevens gelegen kwikbakje k_2; k_1 en k_2 zijn diepe gleuven in een stuk eboniet. Van e gaat verder de stroom door een vrij dunnen platinadraad, die eenige malen heen en weer loopt langs een vertikaal gestelde ebonietplaat f, en vervolgens uitkomt in i. De andere stroomtak, die in p binnen den bak komt, loopt door een koperen reep terstond naar de ebonietplaat en langs deze door een even langen platinadraad heen en weer, om daarna j te bereiken, van waar een platinadraad strak uitgespannen is tot i. De beide stroomtakken ontmoeten elkaar ergens in dien draad ij en worden van daar uit naar de batterij teruggeleid door tusschenkomst van het verschuifbaar kwikbakje k', de schuif S_2 (fig. 3) en den koperdraad l. Het is duidelijk, dat door deze inrichting de verhouding der beide weestanden binnen vrij wijde grenzen veranderd kan worden, als men slechts het kwikbakje k' verplaatst langs ij; en eene fijne instelling is mogelijk door den beugel b te verschuiven: daardoor toch maakt men één der beide stroomgeleidingen een weinig langer of korter.

Het niveau n (fig. 3) is zoodanig gesteld, dat het inspeelt, wanneer de bodem der lange kwikbakjes horizontaal is.

Weerstandsbepalingen volgens de methode van WHEATSTONE geschieden het nauwkeurigst, wanneer in de zes lijnen van den volledigen vierhoek de weerstanden

ongeveer gelijk zijn [1]). Dit geval heb ik ten naaste bij verwezenlijkt.

In fig. 5 is een schematische voorstelling gegeven van den stroomloop; daarin heeft men

$Up = 2{,}90 + 0{,}095 = 2{,}995$ ohm bij 10° C
$Uq = 2{,}89 + 0{,}095 = 2{,}985$ „ „ „
$pj = 2{,}019$ „ „ „
qi (zonder kwikbakjes) $= 1{,}974$ „ „ „
$ij = 0{,}404$ „ „ „

en het blijkt hieruit, dat pk' en qk' elk ongeveer 2,2 ohm zullen bedragen.

De weerstanden in den bak zijn derhalve iets kleiner uitgevallen dan die in den bolometer, maar het is zeer de vraag, of dit in de gegeven omstandigheden wel eenig nadeel aanbrengt.

De insteldraad ij is lang 365 m.M.; 1 m.M. verschuiving van het kwikbakje k' maakt derhalve den eenen weerstand 0,0011 ohm grooter, den anderen evenveel kleiner.

Wanneer de beugel b 300 m.M. verschoven wordt, geeft dit een weerstandsverandering van ongeveer 0,0125 ohm, dus 1 m.M. correspondeert met 0,00004 ohm. De schuif S_1 (fig. 5), waaraan b door middel van een stukje eboniet verbonden is, kan met een micrometerschroef verplaatst worden ten opzichte van het stuk S'_1, dat daartoe dan vastgeklemd wordt. Men is op deze wijze in staat, den weerstand geleidelijk te veranderen bij millioenste deelen van een ohm. De koperen linialen, waarlangs S_1 en S_2 loopen, zijn door eboniet van den zinken bak geisoleerd.

Om de beide lange platinadraden en vooral de contact-

[1]) Uitvoerig is de combinatie van WHEATSTONE o. a. behandeld door MAXWELL, An elementary Treatise on electricity, p. 186. — CHRYSTOL, Encyclopedia Brittannica, article „Electricity". — GRAY, Phil. Mag. [5], 12, p. 283. (1881). — FRÖLICH, Wied. Ann. XXX, p. 156.

plaatsen van verschillende metalen binnen den bak op gelijke temperatuur te houden, werd deze eerst gevuld met water. Doch nu was het onmogelijk, bij het doorlaten van den stroom, den galvanometer in rust te krijgen. Door na te gaan, hoe de bewegingen van de magneetnaald waren, wanneer de intensiteit en de richting van den stroom werden veranderd of de geleiders op verschillende wijzen werden gecombineerd, vond ik als oorzaak voor deze storingen een veranderlijke electromotorische kracht, die haren zetel had binnen den compensatiebak. Zij bleek een gevolg van polarisatie te zijn, want ook wanneer de hoofdstroom was afgebroken, week de galvanometer belangrijk uit en sterker naarmate de stroom langer toegelaten was geweest. Daarop werd het water vervangen door glycerine, maar de polarisatie vertoonde zich weer, hoewel in veel geringer mate. Petroleum beantwoordde aan het doel, voor zoover de isolatie betrof, doch andere praktische bezwaren beletten het blijvend gebruik van dit vocht. Terpentijnolie echter voldeed volkomen aan alle gestelde eischen, en daarmede is dan ook de bak gevuld gebleven.

---

c. DE GALVANOMETER.

Op het Physisch kabinet was geen galvanometer voorhanden, gevoelig genoeg voor het beoogde onderzoek, en daar er dus toch een moest worden aangeschaft, liet Prof. Buys Ballot mij geheel vrij in de keuze. Het zoo algemeen gebruikte model van Thomson heeft zijn eigenaardige bezwaren, waarvan wel het voornaamste is: de kortheid van den cocondraad.

Evenals Langley dat gedaan heeft, zou ik dus, om de

gevoeligheid zoo groot mogelijk te doen zijn, aan een dergelijk kostbaar instrument reeds terstond veranderingen hebben moeten aanbrengen. Maar er is nog iets anders. De bouw van THOMSON's galvanometer brengt mee, dat de spiegel niet groot kan zijn; gebrek aan licht en aan uitgebreidheid van gezichtsveld zal dus een beletsel wezen voor het waarnemen van eene schaalverdeeling op grooten afstand. Toch wenschte ik van de beschikbare ruimte een zoo goed mogelijk gebruik te maken, door de schaalverdeeling ver van den galvanometer te plaatsen; want dan kan men kleinere uitwijkingen meten en is er bovendien des te meer waarborg voor volkomen evenredigheid tusschen aanwijzing en stroomsterkte. Een en ander deed mij besluiten, een proef te wagen met den nog slechts weinig bekenden microgalvanometer van ROSENTHAL, waarvan men eene beschrijving vinden kan in Wiedem Ann. XXIII p. 677 en die door EDELMANN geleverd wordt. In den oorspronkelijken vorm droeg dit werktuig slechts een enkele magneetnaald en had een weerstand van ongeveer 20 ohms; het kon echter ook vervaardigd worden met een astatisch systeem, en de inrichting ervan was zóó, dat de draadklossen zeer gemakkelijk door andere vervangen konden worden. Ik bestelde derhalve zulk een astatischen galvanometer met 2 stellen draadklossen, waarvan het eene een kleinen weerstand hebben moest, namelijk, in verband met de verdere weerstanden in mijn stroomgeleiding, iets minder dan 3 ohms, terwijl het tweede eenige honderden ohms weerstand zou bevatten, om het instrument zoo algemeen mogelijk bruikbaar te doen zijn. Daar het werktuig, dat mij werd toegezonden, eenigszins van de oorspronkelijke gedaante afwijkt, wil ik een korte beschrijving geven van de kenschetsende deelen.

Aan een cocondraad van 260 m.M. lengte, die aan een torsieknop bevestigd is, hangt het astatisch systeem fig. 6, bestaande uit twee *S*-vormig gebogen magneetnaalden. Tegen de platte kanten van het systeem zijn twee zeer dunne glimmerplaten aangebracht, en bovenaan bevindt zich een dunne vlakke spiegel van omstreeks 20 m.M. middellijn. De zijwaarts uitstekende polen van de magneten kunnen zich nu bewegen binnen de vier draadklosjes, waarvan er twee in fig. 7 (een horizontale doorsnede van den galvanometer) door r en r' zijn aangeduid, en de glimmerplaten bewegen zich dan binnen twee sectorvormige kamers, waardoor een zeer goede demping verkregen wordt. Men kan de vier klosjes achter elkaar in de stroomgeleiding brengen, en dan bedraagt de weerstand 2,747 ohm. Het is gemakkelijk, de verbindingen zoodanig te wijzigen, dat de klosjes òf twee aan twee òf nevens elkaar in den stroom geplaatst zijn; dezelfde variaties kunnen ook gemaakt worden met het tweede stel, en men is derhalve in staat dezen galvanometer te gebruiken met 6 verschillende waarden voor den inwendigen weerstand, al naar gelang van den aard der te nemen proeven.

Uit fig. 7 is verder duidelijk, dat het voor een goede opstelling van den galvanometer noodzakelijk is den klossendrager, dien men draaien kan, zoodanig te plaatsen, dat de polen van de magneetjes zich zoo goed mogelijk midden in de klosjes bevinden, wanneer de galvanometer in rust is. Immers zoodra de evenwichtsstand aan deze voorwaarde niet voldoet, heeft een stroom in den eenen zin grooter uitwijking tengevolge dan een stroom in de andere richting. Het zoeken van die symmetrische opstelling nu gaat met eenige bezwaren gepaard, omdat men den klossendrager niet dan uit de

hand en op de gis kan draaien. Dit kan een fout van het instrument worden genoemd, maar die gemakkelijk te verhelpen zou wezen door het aanbrengen van een tangentieele schroef. Ik heb mij echter vergenoegd met den bestaanden toestand, en door benadering den symmetrischen stand gezocht.

De schaal is van glas, 1 M. lang en in millimeters verdeeld. Ze is opgesteld op 6,5 M. afstand van den galvanometer, zoodat, als het beeld van de schaal, in den galvanometerspiegel gezien, zich één deelstreep verplaatst, de magneetnaalden nog geen 16″ zullen zijn uitgeweken. De verlichting geschiedt door een kleine petroleumlamp en met behulp van een grooten hollen spiegel, ongeveer 0,6 M. in diameter, die onmiddellijk achter de schaal geplaatst is en zóó opgesteld, dat hij van de vlam een beeld vormt op den galvanometerspiegel. Van hier uit gezien is derhalve de geheele concave spiegel schitterend verlicht, dus ook de glazen schaal. Het licht is zoo helder, dat men in den sterk vergrootenden aflezingskijker, die op ongeveer 3 M. afstand van den galvanometer staat, de verdeelingen duidelijk onderkennen en tiende deelen daarvan schatten kan, zelfs wanneer de zon in de kamer schijnt en men beide oogen openhoudt.

Natuurlijk kan van de schaal slechts gebruikt worden het gedeelte, dat zich vóór den grooten spiegel bevindt, en dat van de deelstreep 200 tot de deelstreep 800 reikt.

Nog dient vermeld te worden, dat achter den galvanometer een groote magneetstaaf ligt, om de werking van het aardmagnetisme te verzwakken. Door die staaf naderbij of verderaf te brengen, kan de gevoeligheid worden geregeld; door haar te draaien is men in staat, den evenwichtsstand veranderen.

Wanneer de galvanometer in de brug gebracht wordt, zal de naald een zekeren stand innemen, dien we *nulstand* willen noemen; slechts in het ideale geval, dat er absoluut geen stroom door de brug gaat, valt deze nulstand samen met den evenwichtsstand. Het is te verwachten, dat bij een uiterst gevoeligen galvanometer, die geplaatst is in een systeem van geleiders, waardoor een betrekkelijk sterke stroom gaat, de nulstand lichtelijk langzame veranderingen kan ondergaan en het zou lastig wezen hem telkens weer zoo na mogelijk bij den evenwichtsstand te moeten brengen. Opdat het nu onverschillig zij, van welken nulstand uit men de afwijkingen bepaalt, die door het bestralen van den bolometer veroorzaakt worden, is het noodig en voldoende, dat de uitwijkingen als *volkomen* evenredig aan de stroomsterkten kunnen worden beschouwd, en ik diende mij dus van die evenredigheid te overtuigen.

Daartoe werd de stroom van een element van Daniël geleid door een weerstandsbank en door een lang kwikbakje. In dit laatste werden, met tusschenplaatsing van een commutator, de galvanometerdraden gedompeld op twee plaatsen, tusschen welke de weerstand 0,0005 ohm bedroeg. Ook de richting van den hoofdstroom kon gewisseld worden.

Nu werden in de hoofdgeleiding gebracht weerstanden, die zich verhielden als $1 : \frac{1}{2} : \frac{1}{3} \ldots\ldots : \frac{1}{15}$ waardoor de stroomsterkten zich moesten verhouden als $1 : 2 : 3 \ldots\ldots : 15$. Om eenige voorstelling te geven van de nauwkeurigheid, die met dezen galvanometer te bereiken is, laat ik hier de uitkomsten van het onderzoek volgen.

Weerstand.	Stroomsterkte.	Uitwijking. waargenomen.	Uitwijking. berekend.	Verschil.	Weerstand.	Stroomsterkte.	Uitwijking. waargenomen.	Uitwijking. berekend.	Verschil.
168	15	269 3/8	268 1/8	+ 1 1/4	360	7	125	125 1/8	— 1/8
180	14	250 5/8	250 1/4	+ 3/8	420	6	107	107 1/4	— 1/4
193,8	13	233	232 3/8	+ 5/8	504	5	89 1/8	89 3/8	— 1/4
210	12	214 7/8	214 1/2	+ 3/8	630	4	72	71 1/2	+ 1/2
229,1	11	196 7/8	196 5/8	+ 1/4	840	3	53 1/2	53 5/8	— 1/8
252	10	178 5/8	178 3/4	— 1/8	1260	2	35 3/4	35 3/4	0
280	9	161	160 7/8	+ 1/8	2520	1	17 7/8	17 7/8	
315	8	142 1/4	143	— 1/2					

De tweede kolom geeft de verhoudingsgetallen der stroomsterkten, de derde bevat de gemiddelden van 4 uitwijkingen, 2 links en 2 rechts, welke nooit meer dan 1 1/2 schaaldeeltje van elkaar verschilden. Die verschillen werden veroorzaakt door een langzame verplaatsing van den evenwichtsstand, welke het gevolg was van veranderingen in het aardmagnetisme en in den loop van de 3 uren, aan deze waarnemingsreeks gewijd, nauwelijks 14 deeltjes bedroeg. In de vierde kolom vindt men de veelvouden van 17 7/8, in de vijfde de verschillen met de waarneming. Dat deze in het begin alle positief zijn, heeft zijn grond in de omstandigheid, dat de cel in den aanvang sterker was; want de eerste meting, aan het eind herhaald, gaf 267 1/2 en dus een verschil van — 5/8. — Volkomen evenredigheid tusschen uitwijking en stroomsterkte is alzoo gewaarborgd.

Wat betreft de gevoeligheid in absolute maat, deze kan uit een der waarnemingen worden afgeleid. Kiezen wij bijv. het geval, waarbij de uitwijking 53 1/2 m.M. was. Het potentiaalverschil in de punten, waar de galvanometerdraden waren ingedompeld, bedroeg toen ongeveer $\frac{0{,}0005}{840}$ × de electrom. kracht van een element van Daniël, d. i. omstreeks $\frac{0{,}0005}{840}$ volts. Den weerstand

in de geheele galvanometergeleiding op 3 ohms stellende, vindt men dus de stroomsterkte $\frac{0.0005}{840 \times 3} = 0{,}000\,000\,198$ ampère, en 1 m.M. uitwijking correspondeerde alzoo met 0,000 000 003 7 ampère.

Bij LANGLEY geeft 0,000 000 000 5 ampère 1 schaaldeeltje uitwijking, maar de weerstand in zijn galvanometer bedraagt dan ook 20 ohms, zoodat hij een grooter potentiaalverschil noodig heeft dan ik, om eenzelfden stroom in den galvanometer te verkrijgen. Aan hem was het niet gelukt, onder de in den handel voorkomende gevoelige galvanometers, er een aan te treffen, die in staat was stroomveranderingen van minder dan 0,000 001 ampère duidelijk aan te geven. ROSENTHAL's microgalvanometer maakt dus wel een gunstige uitzondering.

Het is duidelijk, dat bij een zoo gevoelig instrument een inrichting voor nevensluitingen (shuntbox) onontbeerlijk was, en tevens dat alle mogelijke voorzorgen genomen moesten worden om het optreden van thermostroomen te vermijden. Deze voorzorgen bestonden hierin, dat de *geheele* geleiding tusschen U en k' (fig. 5), voor zooverre zij direct met de buitenlucht in aanraking was, uit rood koper werd vervaardigd; contacten van heterogene metalen kwamen (behalve in den bolometer, waar ze voldoende beschut waren) slechts voor binnen den bak met terpentijn en in den galvanometer zelven. Deze laatste werd daarom, beneden den spiegel, gehuld in een met papier beplakten glazen cylinder, waardoor plaatselijke temperatuursveranderingen als gevolg van bestraling of van luchtstroomingen verminderd werden. Ook de doos met nevensluitingen, in fig. 5 door n voorgesteld, en de daaraan verbonden commutator bevatten niet anders dan rood koperen stroomgeleiders. Als neven-

sluiting kunnen door middel van een stop worden ingevoerd weerstanden van 0,003, 0,030 of 0.333 ohm, terwijl twee andere stoppen door hunne plaatsing de richting van den galvanometerstroom bepalen of dezen afbreken.

---

d. DE BATTERIJ EN DE HOOFDSTROOM.

Een constante batterij is absoluut onmisbaar. Met Grove'sche cellen is het mij niet mogen gelukken den galvanometer ook maar eenige minuten in rust te houden: na korten tijd was steeds de geheele schaalverdeeling uit het veld van den kijker verdwenen. De oorzaak ligt voor de hand. Wanneer toch de stroomsterkte verandert, heeft dit invloed op de temperatuur van de stroomgeleiders, vooral van de bolometerreepjes, en daar deze niet volkomen identisch zijn, zal hunne verhouding gewijzigd worden, wat natuurlijk „drift" in den galvanometer ten gevolge heeft. Een batterij van 12 Meidingerelementen, zes aan zes geplaatst, beantwoordde beter aan het doel. De inwendige weerstand van deze batterij bedraagt 3 ohms, de electromotorische kracht 2 volts. Maanden lang heeft zij bijna onafgebroken gewerkt, en de stroomsterkte is nagenoeg volkomen constant gebleven. (Als de waarnemingen geëindigd waren, werd de stroom niet afgebroken, maar verzwakt, ten einde de diffusie van het $Cu\,S\,O_4$ in het $Mg\,S\,O_4$ tegen te gaan.) De sterkte van den hoofdstroom kan naar willekeur geregeld worden met behulp van een daarin geplaatsten rheostaat R, (fig. 5) en beoordeeld uit de afwijking van een tangenten boussole T, die als nevensluiting is aangebracht op twee punten van den hoofdstroom, waarvan de afstand zóó gekozen is, dat geschikte uitwijkingen worden verkregen.

De stroomsterkte, die ik het meest gebruikte bij de waarnemingen, bedroeg ongeveer 0,133 ampère.

---

c. DE SPECTROMETER.

Toen ik het plan opvatte tot het instellen van een onderzoek naar de spectrale verdeeling der warmte van donkere bronnen, was mij omtrent de golflengten van zulke stralen nog niets met zekerheid bekend, en ik besloot dus te trachten, met behulp van een grooten diffractiespiegel van ROWLAND, zooals LANGLEY dien voor het zonnespectrum gebruikt had, het verband tusschen golflengte en breekbaarheid van die stralen vast te stellen. Ik trad derhalve in correspondentie met Mr. J. A. BRASHEAR, toen te PITTSBURGH, door wien „ROWLAND'S concave gratings" geleverd werden. Hij zond mij inlichtingen omtrent de voorhanden exemplaren [1]), doch schreef dat Prof. ROWLAND bezwaar maakte om er een te vervaardigen met minder dan 300 lijnen op de millimeter „because he did not like to make *deep* curves" terwijl ik er hoogstens 150 verlangd had, daar anders stralen met groote golflengte niet tot interferentie zouden kunnen komen. Het was mij toen reeds bekend, dat voor Prof. LANGLEY „gratings" met een zoo gering aantal strepen waren vervaardigd, en ik hoopte dus, alsnog Mr. BRASHEAR tot de levering van zulk eene plaat te kunnen bewegen.

Kort daarop verscheen echter het onderzoek van

---

[1]) Een holle diffractiespiegel van 6 c.M. middellijn en omstreeks 600 strepen op de millimeter, die tot onderzoek van het lichtgevend spectrum voor het Laboratorium werd aangekocht, munt verre uit boven een grooten spectroscoop van BROWNING met dispersie van 12 prisma's, zoowel wat betreft de scherpte van de Fraunhofersche lijnen als de lichtsterkte.

LANGLEY, waarin de dispersiekromme voor steenzout tot $5^{\mu},3$ was vastgesteld; ik kon mij derhalve van dit gedeelte der taak, dat voorzeker het zwaarste geweest zou zijn, ontslagen rekenen, en mij bepalen tot het prismatisch spectrum.

In verband met de afmetingen der grootste steenzoutpraeparaten, die uit de werkplaatsen van Dr. STEEG und REUTER te Homburg te verkrijgen waren, liet ik derhalve een spectrometer vervaardigen, die in staat moest zijn den geheelen bolometer, waarvan het gewicht bijna 2 KG. bedroeg, op den bewegelijken arm te dragen, zonder belangrijk door te buigen. Als grondslag voor dit werktuig werd gebezigd een oud, stevig universaalinstrument van TROUGHTON & SIMMS, dat aan het observatorium alhier toebehoorde, doch reeds sedert jaren ongebruikt op het physisch kabinet stond. Met goedvinden van Prof. OUDEMANS, den directeur van het Observatorium, werd het instrument tijdelijk ontdaan van zijn kijker en verticalen cirkel, en boorde men eenige schroefgaten in de zuilen A en A' (zie fig. 8), om in de gelegenheid te zijn daaraan de noodige metalen staven te bevestigen, die tezamen den drager van den bolometer moesten vormen. De horizontale cirkel, wiens middellijn ongeveer 380 m.M. bedroeg, was verdeeld in afstanden van $5'$, en twee microscopen, van dradenmicrometers voorzien en aan de zuilen bevestigd, veroorloofden aflezing tot op $1''$.

Op eenige centimeters afstand buiten den rand des cirkels, maar door een metaalstuk onbewegelijk daaraan verbonden, is een stevige verticale zuil aangebracht In de figuur is deze zuil niet zichtbaar; zij bevindt zich links buiten het veld der teekening en draagt op de ijzeren staaf B, waarvan de doorsnede $\top$ vormig is, alles

wat tot den collimator van den spectrometer behoort.

In de eerste plaats is dit de spleetinrichting.

De beide spleetwanden, welke op de gewone wijze met behulp van een schroef en een veer ten opzichte van elkaar kunnen worden verplaatst, bestaan uit koperen bakjes, ieder van twee buisjes voorzien, zoodat men er water door kan laten vloeien. Deze voorzorg was noodig om zeker te zijn, dat de omgeving der spleet niet blijvend verwarmd werd door de dicht daarachter geplaatste warmtebronnen. Langs de koperen plaat, die aan de naar de collimatorlens toegekeerde zijde de spleetbakjes draagt, kan zich aan den anderen kant een koperen scherm heen en weer bewegen, waardoor eveneens water stroomt, en dat, door een spiraalveer naar eenen kant getrokken, de spleet afsluit. Dit scherm bezit echter een langwerpige opening, en deze komt voor de spleet zoodra men, tegen de werking der veer in, het scherm ter zijde trekt. De geheele inrichting kan langs de staaf *B* voor- en achterwaarts geschoven worden om haar in het focus der collimatorlens te brengen.

Bijzondere zorg is besteed aan het voortdurend beschutten van de steenzoutpraeparaten tegen de vochtigheid der lucht. Daar prisma en lenzen maanden lang tot gebruik gereed moesten staan, was dit bepaald noodzakelijk; en ik ben er dan ook in geslaagd, zoodanige maatregelen te treffen, dat de praeparaten in 6 of 7 maanden tijds slechts ééns op nieuw gepolijst behoefden te worden. Het prisma en de beide lenzen zijn namelijk geplaatst binnen een koperen cylinder (fig. 9), een soort van trommel, die goed sluitend kan worden vastgeschroefd op een cirkelvormigen bodem *C* (fig. 8), welke zuiver in het midden van het instrument, tusschen de

zuilen, aan den bolometerdrager bevestigd is. Op dien bodem staat, aan den kant van den bolometer, de drager d van de objectieflens, terwijl in het midden een draaibaar tafeltje e is, waarop het prisma kan worden vastgezet. Dit tafeltje is door een eenvoudige stanginrichting $l\ m\ n$ zóó aan een punt p van den bolometerdrager en aan een punt q van den collimatordrager bevestigd, dat het steeds een hoek draait, half zoo groot als die, waarover de bolometer bewogen wordt. Daardoor zal het prisma, eens op deviatio minima gesteld voor een bepaalde stralensoort, dien stand behouden voor alle mogelijke andere stralen.

Verder bevat de bodem nog een lange, gebogen opening $o\ o'$, die van onderen wordt bedekt door een aan den collimatordrager verbonden plaat P, en dus afgesloten blijft, welken stand de bewegelijke arm ook moge hebben. Op die plaat, en door de opening heen gebracht, bevindt zich nu de drager d' van de collimatorlens. Deze is dus ook binnen den cylinder geplaatst, doch neemt aan diens beweging geen deel. De cylinder (fig. 9) bezit aan den kant van den bolometer een plat vierkant aanzetstuk, waarin een cirkelvormige opening is, die correspondeert met de objectieflens en door het inschuiven van een stuk spiegelglas goed gesloten kan worden. Aan de zijde van den collimator is ook een opening in den cylinderwand gemaakt, doch deze is horizontaal langwerpig, zoodat een deel er van steeds naar den collimator gekeerd is, welke deviatie tusschen 0° en 45° ook wordt aangegeven. Die geheele opening blijft echter voortdurend afgesloten door een volgens den cylinderwand gebogen plaat (fig. 10), welke door de veeren v en v' daar tegenaan gedrukt wordt, en door middel van deze tevens bevestigd is aan den collimator-

drager. Even als de cylinder zelve, bevat ook deze plaat een vierkant aanzetstuk en cirkelvormige opening met spiegelplaat, welke hier nu natuurlijk met de collimatorlens correspondeert. Een nauwkeurig passend deksel sluit den cylinder van boven, en door dit af te nemen zijn de steenzoutpraeparaten gemakkelijk te bereiken. Een op den bodem geplaatst bakje bevat stukjes kalihydraat, die, nu en dan ververscht, den trommel van binnen droog houden.

De twee lenzen en het prisma bevinden zich derhalve in een ruimte, die voortdurend van de buitenlucht afgesloten blijft, maar niettemin beweegt zich de eene lens met den bolometerarm, terwijl de andere op hare plaats blijft, en wordt het prisma automatisch in den stand van kleinste afwijking gehouden.

Op het lichtende deel van het spectrum kan worden ingesteld zonder de spiegelglasplaten te verwijderen; doch deze moeten omhoog geschoven zijn tijdens de waarnemingen in het donker spectrum. In het laatste geval zijn de zoutpraeparaten meer aan luchtstroomen blootgesteld. Maar zelfs dan nog kan er weinig circulatie van vochtige lucht uit het vertrek in den cylinder plaats hebben, omdat tusschen dezen, den bolometer en de spleetinrichting koperen kokers zijn aangebracht, die den weg der stralen omsluiten. De binnenwanden der kokers zoowel als van den cylinder zijn zwart gemaakt.

---

f. DE STEENZOUTPRAEPARATEN.

Deze zijn, zooals reeds met een enkel woord vermeld werd, afkomstig uit de fabriek van Dr. STEEG und REUTER, te Homburg v/d Höhe. De hoogte van het prisma bedraagt 52 m.M. de zijde 40 m.M. terwijl de lenzen een

diameter bezitten van 60 m.M. en kromtestralen van 300 m.M. Geplaatst op een spectroscoop van STEINHEIL, die tijdelijk door het aanbrengen van een goed verdeelden cirkel met drie noniën tot spectrometer was ingericht, vertoonde het prisma de voornaamste Fraunhofersche lijnen zeer duidelijk, hoewel niet zóó scherp als een glazen prisma. Bij het bepalen van den brekenden hoek echter deed zich een groot bezwaar voor: het bleek, dat het prisma geen bepaalden brekenden hoek bezat, want de zijvlakken waren eenigszins bolvormig. Nadat dit gebrek verholpen was en de oppervlakken zorgvuldig waren gepolijst [1]), voldeed het prisma aan alle billijke eischen. De brekende hoek bedroeg nu $59^{\circ}\ 53'\ 20''$, en als gemiddelden uit twee bepalingen vond ik voor de brekingsindices van eenige Fraunhofersche lijnen bij 10° C de in de tweede kolom der volgende tabel gegeven waarden. De eerste kolom bevat de gevonden afwijkingshoeken. Om de goede eigenschappen van het prisma in het licht te doen treden, zijn in de derde en vierde kolom opgenomen de waarden, welke volgens STEFAN aan die indices bij twee verschillende temperaturen toekomen.

---

[1]) Voor het plat slijpen van de convexe brekende vlakken gebruikte ik zeer fijn amarilpapier, gespannen op een stuk spiegelglas. Het polijsten geschiedde vervolgens op spiegelglas, overtrokken met wit katoen (keper), waarover een weinig tinasch was uitgespreid en dat matig bevochtigd werd met absolute alcohol. Onder steeds verminderende drukking bewoog ik het prisma in alle richtingen over deze oppervlakte totdat de alcohol bijna geheel verdampt was. Het best slaagde de bewerking, wanneer zij werd uitgevoerd in het directe zonlicht en wanneer de vingers, die met het praeparaat in aanraking kwamen, bedekt waren door kautschuk.

De vordering van den arbeid werd beoordeeld, door telkens het prisma op den spectroscoop te plaatsen en het gereflecteerde beeld van de spleet te beschouwen. Zoolang men, om dit scherp te zien, den op evenwijdige stralen ingestelden kijker nog moest uittrekken, was de bolvormigheid nog niet geweken.

De lenzen werden op gelijke wijze gepolijst; als mal diende een stuk hout met een hol oppervlak van dezelfde kromming als de bolle vlakken der lenzen; de holte was beplakt met katoen.

Afwijkingshoeken bij 10° C.	Brekingsindices bij 10° C.	Brekingsindices volgens STEFAN bij 17° C.	bij 22° C.
C 40° 39′ 13″	1,54074	1,54050	1,54032
D 40° 58′ 53″	1,54440	1,54418	1,54400
E 41° 24′ 40″	1,54918	1,54901	1,54882
b 41° 29′ 48″	1,55012		
F 41° 47′ 36″	1,55341	1,55324	1,55304
G 42° 32′ 15″	1,56159	1,56129	1,56108

Zooals men ziet zijn de getallen in de tweede kolom ongeveer zooveel grooter dan die van STEFAN, als overeenkomt met het temperatuursverschil.

Voor den kromtestraal der lenzen is opgegeven 300 m.M. Daaruit zou volgen als brandspuntsafstand voor natriumlicht de waarde van f in de formule:

$$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_1}\right) = 0{,}5444 \times \frac{2}{300},$$

dus $$f = 275{,}53.$$

Experimenteel was reeds gevonden $f_D = 276$ m.M.

De spectrobolometer is niet zoodanig geplaatst, dat er gemakkelijk zonlicht in geworpen kan worden; ik heb er mij derhalve moeilijk van kunnen overtuigen of de steenzoutlenzen in verband met het prisma de Fraunhofersche lijnen konden te voorschijn roepen; maar van een spleet, wier breedte minder bedroeg dan $^1/_{20}$ m.M. en die verlicht werd door een natriumvlam, ontwierp het stelsel een zuiver, scherp begrensd beeld, niettegenstaande de groote afmetingen der lenzen. Het is mij echter niet mogen gelukken de beide *D* lijnen te scheiden, misschien omdat de vergrooting van het kijkertje te zwak was.

g. OVERZICHT VAN DE OPSTELLING DER INSTRUMENTEN.

Fig. 11 geeft een overzicht van de opstelling der verschillende werktuigen.

Door de letters *A*, *B*, *C*, *D* en *E* zijn aangeduid vijf steenen zuilen, onafhankelijk van den vloer in het fundament gemetseld. *A* draagt den galvanometer, *E* de schaalverdeeling *S* met den grooten hollen spiegel daarachter; in *v* is de vlam, waarvan de spiegel een beeld vormt op den galvanometer. De aflezingskijker bevindt zich op de zuil *B* en is door *k* aangeduid, terwijl de nevensluitingen van den galvanometer bij *n* zijn geplaatst. Op *C* staat de spectrobolometer.

De waarnemer, tusschen *B* en *C* voor de tafel *T* gezeten, moet van zijn plaats af den spectrometer kunnen bewegen en voortdurend den stand daarvan in het oog kunnen houden. Tot het eerstgenoemde doel is aan de instelschroef van den spectrometer een lange schroefsleutel *r* bevestigd, zoo als die aan astronomische kijkers voorkomt; om aan den tweeden eisch te voldoen staat boven op den trommel der steenzoutpraeparaten een totaal reflecteerend prisma (zie fig. 9), waarvan ééne zijde bolvormig is en dat op de schaalverdeeling *S'* een beeld vormt van een draad *d*, bevestigd boven de zuil *D*. De omgeving van dezen draad is sterk verlicht door een daarachter geplaatste lamp met een lens, die de stralen nagenoeg evenwijdig maakt. Wanneer de spectrometer 1′ gedraaid wordt, verplaatst het beeld van den draad zich juist 2 m.M. over de schaal *S'*, die daartoe 3,44 M. van het middelpunt des spectrometers verwijderd is. Deze verplaatsingen kunnen worden waargenomen met behulp van den kijker *k'* op de tafel

T. Aflezing van de microscopen op den spectrometer geschiedt alleen om de aanwijzing van het lichtbeeld op de schaal nu en dan te controleeren.

Door de gestippelde lijnen is de loop der stroomgeleidingen aangegeven, die meerendeels onder den vloer zijn aangebracht. Van de batterij gaat de stroom naar een commutator *c*, van daar door een rheostaat *R* en een uitgespannen draad *e f* naar den bolometer. Op *e f* is als nevensluiting aangelegd de tangentenboussole T_1, die de sterkte van den hoofdstroom moet aangeven; aflezing van deze geschiedt met behulp van een kijker *k''* en schaal *S''*. Uit den bolometer tredend loopt de stroom door twee draden (om gelijkmatige temperatuur te verzekeren, in een looden buis besloten) naar de klemschroeven *p* en *q* van den compensatiebak, waar ook de galvanometerdraden aanliggen, en van daar door den commutator *c* naar de batterij terug.

Nevens de zuil *C* staat aan den kant van den collimator een stevig, verstelbaar voetstuk *V*, waarop de verschillende warmtebronnen en bijbehoorende toestellen kunnen worden geplaatst.

Zoo is derhalve het bestuur van de verschillende instrumenten bijna geheel binnen het bereik van den waarnemer, terwijl deze rustig voor zijne kijkers gezeten is. En deze voorzorg was noodzakelijk, daar beweging van personen door het vertrek, vooral in de omgeving van den bolometer, zeer storende afwijkingen van den galvanometer ten gevolge had.

Nog zij hier vermeld, dat volgens een terloops genomen proef de gevoeligheid van den bolometer per eenheid van oppervlak ongeveer 36 maal grooter was, dan die van de beste thermozuil, op het kabinet aanwezig. Die gevoeligheid kan nog belangrijk vermeerderd

worden door den hoofdstroom te versterken, doch dan neemt ook de storende invloed van veranderingen in de batterij of in de temperatuur der stroomgeleiders toe, en zou men scherper voorzorgen moeten nemen. Voor de meeste proeven was zelfs een geringere gevoeligheid voldoende en werd dan bij voorkeur gekozen om meer waarborg te hebben voor een rustigen nulstand.

DERDE HOOFDSTUK.

Waarnemingen.

a. ALGEMEENE OPMERKINGEN OVER DE WAARNEMINGEN.

De brekingsindex van steenzout is vrij sterk veranderlijk met de temperatuur — een toeneming van 5° C correspondeert namelijk met bijna 1′ vermindering in deviatie — en daar gedurende het onderzoek de kamertemperatuur varieerde tusschen 8° C en 25° C, konden hierdoor voor den afwijkingshoek eener bepaalde stralensoort verschillen ontstaan van meer dan 3′. Om nu de waarnemingen, bij verschillende temperaturen verricht, zonder eenige reductie met elkaar volkomen vergelijkbaar te maken, en tevens onafhankelijk te zijn van mogelijke wijzigingen in den nulstand des spectrometers, gaat men op de volgende wijze te werk.

Aan het begin van elke proevenreeks schroeft men den bolometer naar boven totdat het kijkertje ter hoogte van de optische as komt; vervolgens zoekt men het beeld van de door een natriumvlam verlichte spleet en laat dit samenvallen met den draad, waarop het kijkertje is ingesteld. (Het steenzoutprisma is, eens voor al, op het mininum van deviatie geplaatst.) Men noteert de aanwijzing der microscopen en stelt nu het groote,

op den spectrometer geplaatste glazen prisma steeds zóó, dat het beeld van den draad *d* (fig. 8) op de schaal *S'* zoo na mogelijk staat bij 40° 58′ 53″, d. i. op den deviatiehoek voor de natriumstreep bij 10° C (zie p. 64). De microscopen geven dan natuurlijk in 't algemeen een anderen stand aan; maar men mag verwachten, dat gedurende een enkele reeks van waarnemingen dit verschil in aanwijzing voor alle afwijkingshoeken hetzelfde blijft en kan zich hiervan overtuigen, zoo dikwijls men de microscopen wenscht te gebruiken om de aflezingen op de schaal te controleeren. Daar de veranderingen der *dispersie* met de temperatuur verwaarloosd mogen worden, zijn op deze wijze alle waarnemingen terstond gereduceerd op 10° C.

In de volgende tabel vindt men de brekingsindices en de golflengten, welke voor het gegeven prisma correspondeeren met de daarnevens geplaatste kleinste afwijkingshoeken bij 10° C.

	Kleinste afwijkingshoek bij 10° C.	Brekingsindex.	Golflengte.	Kleinste afwijkingshoek bij 10° C.	Brekingsindex.	Golflengte.
G	42° 32′ 15″	1,56159	0$^{\mu}$,4307	38° 50′	1,5202	4$^{\mu}$,69
F	41 47 36	1,55341	0 ,4860	38 45	1,5193	5 ,14
b	41 29 48	1,55012	0 ,5183	38 40	1,5183	5 ,59
E	41 24 40	1,54918	0 ,5269	38 35	1,5174	6 ,04
D	40 58 53	1,54440	0 ,5889	38 30	1,5164	6 ,49
C	40 39 13	1,54074	0 ,6562	38 25	1,5155	6 ,95
A	40 18 37	1,53692	0 ,7604	38 20	1,5145	7 ,41
	40 10	1,5353	0 ,82	38 15	1,5136	7 ,87
	40 5	1,5344	0 ,86	38 10	1,5126	8 ,33
	40	1,5334	0 ,91	38 5	1,5117	8 ,79
	39 55	1,5325	0 ,97	38	1,5107	9 ,26
	39 50	1,5315	1 ,04	37 55	1,5098	9 ,73
	39 45	1,5306	1 ,12	37 50	1,5088	10 ,20
	39 40	1,5297	1 ,22	37 45	1,5078	10 ,67
	39 35	1,5287	1 ,38	37 40	1,5069	11 ,14
	39 30	1,5278	1 ,59	37 35	1,5059	11 ,61
	39 25	1,5268	1 ,86	37 30	1,5049	12 ,08
	39 20	1,5259	2 ,19	37 25	1,5040	12 ,55
	39 15	1,5249	2 ,56	37 20	1,5030	13 ,02
	39 10	1,5240	2 ,96	37 15	1,5020	13 ,49
	39 5	1,5230	3 ,38	37 10	1 5010	13 ,96
	39	1,5221	3 ,81	37 5	1,5001	14 ,43
	38 55	1,5212	4 ,25	37	1,4991	14 ,90

De waarden van λ zijn geïnterpoleerd tusschen de getallen, die LANGLEY experimenteel heeft vastgesteld tot $5^{\mu},3$ en zijn voorbij dat punt voortgezet in de onderstelling, dat de dispersiekromme nadert tot een rechte lijn. Maar bij de interpolatie is tevens aangenomen, dat die kromme een gelijkmatigen loop heeft tusschen LANGLEY's waarnemingen door, en daarvan is het gevolg, dat b. v. de straal wiens golflengte gelijk is aan $5 \times \lambda D$, met den gevonden index 1,5243, er verder buiten ligt dan de daarbij opgegeven waarschijnlijke fout bedraagt. Zoolang echter niet een grooter aantal punten der kromme met zekerheid bekend zijn, kwam het mij wenschelijk voor, haar de eenvoudigst mogelijke gedaante te geven, al komt deze hoogstwaarschijnlijk niet met de waarheid overeen. Die gedaante is voorgesteld in fig. 1 op plaat II. Als abscissen zijn gekozen de afwijkingshoeken; de golflengte bedraagt op elke plaats van het prismatisch spectrum zooveel microns, als aangegeven wordt door de ordinaten der kromme, uitgedrukt in centimeters.

De spleetwijdte bedroeg bij alle in de volgende bladzijden te vermelden proeven omstreeks 0,3 m.M., dus evenveel als de breedte van het bolometerreepje. Zoowel de spleetinrichting als de bolometer werden geplaatst op 286 m.M. afstand van de bijbehoorende lens, omdat dit de brandpuntsafstand is voor stralen, die, volgens voorloopige proeven, gelegen zijn ongeveer in het midden van het gebied der waargenomen spectra. Een half uur voor het begin der waarnemingen moest de stroom op de behoorlijke sterkte worden gebracht, opdat de noodige temperatuuruitwisselingen konden plaats hebben, alvorens men den galvanometer in de stroomgeleiding opnam.

Bij het inbrengen wordt steeds een nevensluiting aan den galvanometer toegevoegd, eerst die met $^1/_{1000}$, ver-

volgens die met $^1/_{100}$, dat die met $^1/_{10}$ van zijn inwendigen weerstand, en telkens brengt men door verschuiving van het kwikbakje k' de aanwijzing zoo na mogelijk bij den evenwichtsstand. Is de juiste verhouding der compensatieweerstanden eenmaal gevonden, dan kan men doorgaans bij den aanvang van een volgende proevenreeks volstaan met het aanleggen van de nevensluiting $^1/_{10}$, daar de afwisseling in temperatuur zelden zoo groot is, dat $^1/_{10}$ van den brugstroom de schaal buiten het gezichtsveld brengt.

Eindelijk wordt de laatste „shunt" weggenomen, en gezien of de naald in rust blijft, wanneer men de laatste correctie met behulp van de schuif S_1 heeft aangebracht. Is dit het geval, dan kan met de waarnemingen een aanvang worden gemaakt; maar zeer dikwijls is men teleurgesteld en duurt het nog geruimen tijd eer alle temperaturen in evenwicht en alle storende luchtstroomingen tot rust gekomen zijn. Ook het passeeren van rijtuigen en van schepen geeft vaak tot belangrijk oponthoud aanleiding, terwijl sterke veranderlijkheid van het aardmagnetisme soms het werk onmogelijk maakt. Door al deze omstandigheden kost het verkrijgen van vertrouwbare resultaten veel tijd; en daar elke proevenreeks uit zich zelve, afgezien van de storende invloeden, reeds vrij langdurig is, ben ik nog niet in staat geweest een groot aantal waarnemingen te verzamelen. Den graad van nauwkeurigheid, die met de gebruikte methode te verkrijgen zou zijn wanneer men door veelvuldige proefneming toevallige fouten elimineerde, heb ik dus nog niet bereikt; maar waar eenzelfde proevenreeks eenige malen herhaald werd, weken de uitkomsten toch zoo weinig van elkaar af, dat het karakter der resultaten aan geen twijfel onderhevig is.

Blijft de galvanometer voldoende rustig, dan kan men

de straling van de warmtebron toelaten, door het waterscherm ter zijde te trekken. Het is duidelijk, dat de temperatuur, die het bolometerreepje dan bezit, niets ter zake doet; de uitwijking zal alleen afhangen van de toestandsverandering, die men in het leven roept, en deze bestaat slechts daarin, dat de spleetruimte, vroeger bedekt door het aan die zijde zwartgemaakt waterscherm, dat op kamertemperatuur is en zijn straling aan den bolometer toezond, thans toegang verleent aan de stralen, die van de daarachter geplaatste warmtebron uitgaan. Deze eenvoudige opmerking is niet overbodig, daar ze in staat stelt, het gebied van onderzoek uit te breiden, en daar LANGLEY omtrent deze zaak blijkbaar een niet geheel juiste voorstelling heeft. Immers LANGLEY noemt zijn 5e klasse van stralende lichamen (zie p. 35) een „bijzonder geval" [1]), omdat daarbij de bolometerband zelve op —2° uitstraalt tegen een scherm van —20°; doch hij vergeet, dat die uitstraling van den bolometer zelven ook in alle andere gevallen voorkomt, en dat de eigenaardigheden van het reepje, wat betreft zijn emissie- en absorptievermogen steeds invloed uitoefenen op den vorm der verkregen warmtekromme, wat ook de temperatuur of de aard zij van het voor de spleet geplaatste lichaam.

LANGLEY meent verder, dat het, indien men niet het bolometerreepje als stralend lichaam kiezen wil, noodzakelijk is den bolometer te brengen op een temperatuur, lager dan die van de warmtebron. Maar die noodzakelijkheid bestaat in geenen deele. De werking, welke men waarneemt, is alleen het gevolg van de ongelijkheid in de straling, die in twee verschillende gevallen door de spleetruimte treedt, namelijk wanneer òf het scherm òf

[1]) Ann, de Ch. et de Phys. [6], IX, p. 446 en 447.

de warmtebron voor de spleet geplaatst is. Van dit warmteverschil zal op iedere bepaalde plaats van het spectrum een zeker procent door het bolometerreepje worden geabsorbeerd, en deze absorptiecoëfficienten karakteriseeren het gebruikte bolometerreepje. Zij treden steeds met hun zelfde waarde op, wat ook de aard zij van de warmtebron, want ze zijn aan een bepaald reepje eenvoudig eigen voor iedere bepaalde stralensoort of plaats van het spectrum. Wanneer men deze coëfficienten niet kent, is daarvan het gevolg, dat de absolute vorm der uitstralingskrommen en zelfs eenigermate de plaats der maxima onzeker blijft; maar de verschillende krommen, die men met eenzelfden bolometer vindt, zijn niettemin onderling volkomen vergelijkbaar.

Stelde men nu bijv., bij het doorloopen van het spectrum, voor de spleet telkens eerst een zwart gemaakt scherm van —100° C, terwijl men den stand, dien de galvanometer dan aannam, als nulstand beschouwde, en verving men vervolgens dit scherm door eenig lichaam op —10° C, dan zouden de hierbij gevonden uitwijkingen met evenveel recht een voorstelling geven van het warmtespectrum dier bron op —10° C, als andere waarnemingen gezegd worden het spectrum te leveren van een warmtebron op 1000° C, wanneer men het scherm op —100° C telkenmale vervangt door die bron op 1000° C. De temperatuur van den bolometer zelven en van de geheele omgeving heeft met het resultaat niet veel te maken. Alleen zou men kunnen zeggen, dat de verschillende waarnemingen *dan* het best vergelijkbaar zijn, wanneer de bolometer bij alle dezelfde temperatuur gehad heeft, want met de temperatuur verandert het selectief absorptievermogen van het bolometerreepje. Men ziet, dat door de gezegde opmerking het

onderzoek naar de spectra van lichamen op temperaturen, welke weinig afwijken van die der omgeving, eenigszins gemakkelijker bereikbaar is gemaakt; ik ben echter niet in de gelegenheid geweest, de methode in toepassing te brengen, wegens gebrek aan de hulpmiddelen tot het bereiken van zeer lage temperaturen.

---

b. ONDERZOEK DER WARMTESPECTRA VAN EENIGE VLAMMEN.

1. *De Bunsensche vlam en de vlammen van waterstof en van kooloxyde.*

In gasvorm vertoont de stof vele harer eigenschappen in de eenvoudigste gedaante; zoo kan men ook verwachten, dat in dien toestand de moleculen het minst gestoord zullen worden in het uitvoeren van de haar kenmerkende bewegingen.

Deze overweging deed mij besluiten, de emissie-spectra van gassen te onderzoeken, en het lag voor de hand, als eerste voorbeeld de vlam van een Bunsenschen brander te kiezen.

Het spectrum van deze vertoonde zeer duidelijk twee maxima; een bij 39° 13′ en een ander, omtrent driemaal zoo hoog, bij 38° 51′ 15″.

Daar er ook twee verbrandingsproducten zijn, koolzuur en water, rees de vraag, of soms elk van deze zijn afzonderlijk maximum gaf; en een middel om zich hiervan te overtuigen bestond natuurlijk in het onderzoek van een kooloxydvlam, die slechts kooldioxyde, en van een waterstofvlam, die slechts water leverde.

In de volgende tabel zijn eenige der uitwijkingen, in de drie spectra gevonden, nevens elkander gesteld.

Kleinste afwijking der stralen.	Galvanometeruitwijking bij			Kleinste afwijking der stralen.	Galvanometeruitwijking bij		
	Bunsensche vlam.	Kooloxyd-vlam.	Waterstof-vlam.		Bunsensche vlam.	Kooloxyd-vlam.	Waterstof-vlam.
39° 40′	2		1	38° 57′ 30″	41	25	
39° 30′	6½		4	38° 55′	87	57	4
39° 25′	11		12	38° 52′ 30″	130	81	
39° 20′	23		23	38° 51′ 15″	144	82	
39° 15′	47	3	45	38° 50′	129	76	2
39° 12′ 30″	51	5	48	38° 45′	52	10	5
39° 10′	42	4	43	38° 35′	15	2	8
39° 5′	22	2	20	38° 20′	4		3½
39°	15	9	8	37° 40′	4		3

De gegeven getallen zijn meest afgeleid uit twee of drie waarnemingen.

De galvanometer is zoo goed als aperiodisch, maar heeft tusschen 30 en 40 sec. noodig om zijn nieuwen stand bij bestraling in te nemen, en nagenoeg evenveel om weer in den nulstand terug te keeren. Steeds wordt de uitwijking gerekend van het midden tusschen den nulstand vóór en dien na de bestraling, en alleen wanneer het blijkt, dat er een regelmatige gang is in den nulstand, komt de waarneming in aanmerking. Elke waarneming kost dus, als er geen storingen voorkomen, 1 ½ minuut; en daar het geheele spectrum doorgaans bij stappen van 5′ boogs onderzocht werd, terwijl in de omgeving der maxima tusschengelegen waarnemingen moesten worden verricht, nam elke proevenreeks niet alleen veel tijd, maar vooral veel gas, zoodat het bij waterstof en kooloxyd groote bezwaren opleverde, meer dan twee of drie waarnemingen op eenzelfde plaats van het spectrum te doen.

In fig. 1 Pl. II vindt men een graphische voorstelling van hetgeen in bovenstaande tabel voorkomt, met dien verstande, dat in de teekening ook tusschengelegen

metingen zijn opgenomen, die men in de tabel niet vindt. De kromme lijnen zijn niet tusschen de waarnemingen door getrokken om een geleidelijken loop te verkrijgen, maar al de gegeven getallen liggen *op* de krommen.

Blijkbaar is de uitkomst zeer goed in overeenstemming met de verwachting. Terwijl het spectrum der Bunsensche vlam twee sterke verheffingen vertoont, bezitten de spectra der kooloxydvlam en der waterstofvlam ieder slechts één belangrijk maximum. Dat der kooloxydvlam valt samen met het *tweede*, dat der waterstofvlam met het *eerste* maximum van de Bunsensche vlam, en het blijkt derhalve, dat bij de vorming van water voornamelijk stralen worden uitgezonden, wier kleinste afwijkingshoek in het gebruikte prisma omstreeks $39^\circ\ 13'$ bedraagt, terwijl bij het ontstaan van koolzuur in hoofdzaak golvingen worden opgewekt, waarvan de afwijkingshoek nagenoeg $= 38^\circ\ 51'\ 20''$ is. Het verdient opmerking, dat in één der beide gevallen het koolzuur ontstond door de verbranding van koolwaterstoffen, in het andere geval door de verbranding van kooloxyde; op de uitgezonden warmtestraling schijnt dit geen merkbaren invloed te hebben.

Waar de krommen zeer steil zijn, kan natuurlijk een fout van enkele seconden in de instelling een tamelijk groot verschil in warmtewerking meebrengen. Hieruit, en uit de omstandigheid, dat nog niet alle mogelijke voorzorgen genomen waren om de vlammen constant te houden, laten zich sommige afwijkingen, bijv. het door elkaar slingeren der waterkrommen, wel verklaren. Verder moet opgemerkt worden, dat bij deze proeven, in tegenstelling met alle volgende, bolometer en spleet nog niet gesteld waren op den brandpuntsafstand voor middelbare donkere stralen, zoodat op het bolometerreepje geen

scherpe beelden van de spleet, maar verstrooiingsvlakjes werden opgevangen. Het gevolg hiervan moest wezen, dat de gevonden kromme lijnen te weinig steil werden, doch wegens haar nagenoeg symmetrische gedaante kon dit niet veel invloed hebben op de plaats van het maximum. Later zal men gelegenheid hebben, zich hiervan nader te overtuigen.

De warmte, die men in het spectrum van de Bunsensche vlam voorbij het koolzuur-maximum waarneemt, en die zich met kleine verheffingen en dalingen doet gevoelen tot op plaatsen, waar de deviatie minder dan 37°, dus de index van refractie minder dan 1,5 bedraagt, schijnt een gevolg te zijn van de verbranding der waterstof; want de waterstofvlam vertoont hetzelfde verschijnsel, terwijl ik, ook bij latere proeven, in het spectrum der kooloxydvlam geen warmtestralen heb kunnen aantoonen, wier brekingsindex aanmerkelijk kleiner was dan 1,514.

2. *De gewone lichtgevende gasvlam.*

Een kleine, spitse, lichtgevende gasvlam vertoont het volgende spectrum.

Kleinste afwijking der stralen.	Galvanometer-uitwijking.	Kleinste afwijking der stralen.	Galvanometer-uitwijking.	Kleinste afwijking der stralen.	Galvanometer-uitwijking.
41°	1	39° 20′	209	38° 50′	170
40° 40′	2 1/2	39° 15′	180	38° 45′	53
40° 20′	9	39° 10′	141	38° 40′	26
40°	28	39° 5′	77	38° 30′	15
39° 50′	58	39°	49	38° 20′	8
39° 40′	109	38° 57′ 30″	62	38° 10′	9
39° 30′	197	38° 55′	110	38°	7
39° 25′	214	38° 52′ 30″	175	37° 50′	7
39° 22′ 30″	222	38° 51′ 15″	185	37° 30′	4 1/2

Nemen we in aanmerking, dat bij omstreeks 40° 18′ de uiterste zichtbare stralen gelegen zijn, dan blijkt uit deze getallen reeds terstond, welk een geringe beteekenis de bekendheid met het lichtende spectrum heeft, vergeleken bij die met de ultraroode straling, wanneer het geldt iets te weten omtrent den aard der bewegingen, welke in hoofdzaak het karakter eener vlam bepalen.

Men ziet, dat bij 38° 51′ 20″ wederom duidelijk een verheffing te voorschijn treedt, die wij naar aanleiding van de voorgaande proeven in verband mogen brengen met het ontstaan van koolzuur; doch niet zoo in het oog loopend is het maximum van het tevens gevormde water. Toch kan men dit laatste zeer goed herkennen bij de beschouwing van de graphische voorstelling op plaat II, fig. 1 *d*. Tusschen 39° 5′ en 39° 20′ toch vertoont de kromme een vrij sterke uitbuiging, en dit is juist de plaats, waar het uitstralingsmaximum van water zich bevinden moet.

De voornaamste warmtestraling echter gaat uit van de gloeiende kooldeeltjes. Nemen we aan, dat de gelijkmatig voortloopende gestippelde lijn *c c′* een voorstelling geeft van de warmte, welke door die kooldeeltjes wordt uitgezonden (en uit andere proeven is gebleken, dat de uitstralingskromme van vaste lichamen een dergelijke gedaante heeft), dan ziet men duidelijk boven die kromme de beide maxima, aan het water en aan het kooldioxyde toekomende, uitsteken. Zelfs vertoont de gevonden kromme bij 39° 25′ wederom toenemende aangroeiing, juist op het punt, waar de uitstralingskromme der gloeiende koolstofdeeltjes hoogstwaarschijnlijk haar maximum heeft, en dus evenwijdig aan de as der abscissen loopt. Op die plaats bezitten de ordinaten der waterkromme ook werkelijk toenemende aangroeiing.

Het schijnt derhalve, dat men in het warmtespectrum van een vlam zoowel de verbrandingsproducten als de in de vlam gloeiende deeltjes herkennen kan aan den vorm der uitstralingskromme.

3. *De vlammen van zwavelkoolstof, van zwaveldamp en van zwavelwaterstof.*

Thans werd voor de spleet geplaatst een kleine zwavelkoolstoflamp, ingericht ongeveer op de wijze der gewone alcohollampjes, doch waarbij de pit door een langere buis ging om het vlam vatten van de zoo gemakkelijk verdampende zwavelkoolstof in het reservoir tegen te gaan. Ik verwachtte hier te zullen vinden twee maxima: een bij 38° 51′ 20″, toekomende aan het koolzuur, en een ander, dat den aard der straling moest doen kennen, uitgezonden bij de vorming van zwaveldioxyde. De uitkomst beantwoordde niet geheel aan de verwachting: ik vond namelijk *vier* maxima. Om de beteekenis dier verheffingen nader te onderzoeken, heb ik de proef een paar maal herhaald onder verschillende omstandigheden. De volgende tabel geeft enkele der gevonden getallen.

Kleinste afwijking der stralen.	Zwavelkoolstofvlam			Kleinste afwijking der stralen.	Zwavelkoolstofvlam		
	I.	II.	III.		I.	II.	III.
39° 20′	3	2		38° 30′	3½	2	
39° 15′	10	7		38° 20′	3	2	
39° 10′	9	6		38° 10′	40	15	
39° 5′	6	4		38° 7′ 30″	43	16½	5
39°	17	13		38° 5′	32	12	
38° 55′	84	77		38°	21	13	
38° 52′ 30″	128			37° 55′	30	19	
38° 51′ 15″	136	100	58	37° 50′	31	21	18
38° 50′	120	88		37° 45′	25	17½	
38° 45′	41	33		37° 40′	16	12	
38° 40′	19	12		37° 20′	2	2	

De uitwijkingen in kolom I zijn verkregen bij gebruik van een gewone katoenen pit. Aan het verbranden van het hydrogenium dezer pit meende ik het eerste maximum te moeten toeschrijven, daar dit viel tusschen 39° 15′ en 39° 10′ dus ongeveer op de plaats, waar het watermaximum ligt. Daarom werd voor een tweede proevenreeks een pit van asbest in het lampje gebracht; de vlam was toen kleiner; alle ordinaten van de warmtekromme werden korter, zooals men in kolom II kan zien, maar het maximum tusschen 39° 15′ en 39° 10′ bleef. Hoogstwaarschijnlijk ligt op deze plaats dus nog een ander uitstralingsmaximum, dat met de vorming van water niets te maken heeft, en waarvan de beteekenis voorloopig nog duister blijft. Aan het zwaveldioxyde komt het niet toe, zooals straks zal blijken.

Het maximum van kooldioxyde treedt zeer duidelijk op, en volkomen op de plaats, waar het volgens de vroegere proeven te verwachten was.

Van de beide overige maxima is in kolom I dat, hetwelk bij omstreeks 38° 8′ 20″ gelegen is, grooter dan het laatste bij 37° 52′, terwijl in kolom II juist dit laatste maximum het grootere is.

In fig. 2 *a* en *b* Pl. II kan men zich er van overtuigen, dat de plaats der twee maxima in de beide kromme lijnen volkomen overeenstemt. Kolom III vertoont de waarden der maxima bij de verbranding van zwavelkoolstof, waarin zwavel was opgelost. De vlam was toen zeer klein, waarschijnlijk omdat boven aan de pit zich zwaveldeeltjes tusschen de draden hadden afgezet, doch nu was het laatste maximum ten opzichte van het voorlaatste sterk toegenomen. Het schijnt derhalve dat het laatste maximum eigen is aan het zwaveldioxyde, terwijl omtrent de verheffing bij 38° 8′ 20″ de

onderstelling voor de hand lag, dat ze misschien zou zijn toe te schrijven aan in de kern der vlam verwarmde zwavelkoolstof; want bij de eerste proef was de vlam groot, en het middelste gedeelte er van bevond zich voor de spleet, zoodat de in het midden opstijgende zwavelkoolstof hare warmtestralen, gelijktijdig met die van de verbrandingsproducten in den zoom, door de spleet kon zenden. Bij de tweede proef echter bevond een hooger gedeelte van de vlam zich voor de opening, en kon men dus de aanwezigheid van minder onverbrande zwavelkoolstof verwachten; terwijl in het derde geval de verdamping veel minder snel plaats had, en dus de verbranding reeds kort bij de pit volkomen kon zijn. Maar deze opvatting moest natuurlijk aan andere waarnemingen worden getoetst.

Wat betreft de straling, uitgezonden bij de vorming van zwaveldioxyde, deze kan men afzonderlijk verwachten bij verbranding van zwavel, terwijl zij in het spectrum der vlam van zwavelwaterstof waarschijnlijk zal optreden, gecombineerd met de uitstralingskromme van water.

Wanneer men echter een stuk zwavel aansteekt, brandt het wel is waar met een vlam, doch deze is zoo laag en onbestendig, dat er moeilijk een warmtespectrum van gevormd kan worden. Na vele vergeefsche pogingen om door middel van bepaalde vormen van branders of door aan te blazen met lucht of met zuurstof een vlam te verkrijgen van een paar centimeters hoogte, besloot ik eindelijk de zwavel te koken en den damp aan te steken. Daartoe werd een vrij wijde reageerbuis tot over de helft gevuld met kleine stukjes zwavel, en vervolgens uitgetrokken in een punt zoodat de opening een middellijn van minder dan 1 m.M. bezat. Wanneer men nu de zwavel aan het koken bracht, ontweek de damp

met geweld door de nauwe opening, en ontbrandde in de meeste gevallen terstond van zelf tot een flinke vlam. Daar op deze wijze de inhoud van een reageerbuisje spoedig opgebruikt is, en het bezwaren zou meebrengen, aanmerkelijk grootere hoeveelheden zwavel in het vertrek te verbranden, werd door een helper bij iedere waarneming de zwavel even aan de kook gebracht met behulp van een Bunsensche vlam, die echter terstond verwijderd werd, wanneer het scherm de spleet weer afsloot. Op nauwkeurigheid kan deze wijze van proefneming geen aanspraak maken, want het was onmogelijk het verdampen telkens in dezelfde mate te doen plaats hebben, en de vlam was dus zeer veranderlijk van grootte. De plaats van het maximum kan evenwel slechts zeer weinig daardoor veranderd schijnen. Als meest waarschijnlijke waarden leidde ik uit een drietal waarnemingen op elke der aangegeven plaatsen van het spectrum de volgende uitwijkingen af, terwijl op geen andere plaats, het geheele spectrum langs, een spoor van warmte werd aangetoond:

38° 10′	0	37° 50′	16
38° 5′	1	37° 45′	10
38°	3	37° 40′	4
37° 55′	16	37° 35′	0

De kromme lijn, die de hieruit blijkende warmteverdeeling graphisch voorstelt (fig. 3), wijkt meer dan een der vroeger gevondene af van de symmetrische gedaante, en dit zal wel het gevolg wezen van de ongelijkmatigheid der vlam. Maar niettemin kan men uit deze waarnemingen veilig het besluit trekken, dat het zwaveldioxyde aanleiding gegeven heeft tot het laatste maximum van de zwavelkoolstofvlam.

Ten overvloede werd nog onderzocht een vlam van

zwavelwaterstof: deze gaf zeer duidelijk het maximum van water en een verheffing tusschen 38° en 37° 40′.

Moeilijker evenwel is het, zekerheid te verkrijgen aangaande den oorsprong van de verheffing bij 38° 8′ 20″. De betrekkelijke sterkte, waarmede deze optreedt in verschillende gedeelten van de vlam, doet zooals gezegd is vermoeden dat ze toekomt aan een stof, die zich in de kern bevindt, waar door gebrek aan zuurstof de verbranding niet volledig kan zijn. Er is echter wel eenig bezwaar tegen de meening, dat deze in sommige gevallen zeer belangrijke warmtewerking zou uitgaan van *verwarmden* zwavelkoolstofdamp; want dan kon men b. v. met evenveel recht verwachten, in het spectrum van iedere vlam, welke in dampkringslucht brandt, eene zeer duidelijke uitstralingskromme van stikstof te zullen vinden, daar deze toch overal in ruime mate aanwezig is, of men zou bij een vlam van lichtgas gemakkelijk de koolwaterstoffen moeten herkennen, die eveneens in het binnenste deel der vlam onverbrand opstijgen.

Met Dr. J. D. VAN DER PLAATS alhier over deze proeven sprekende, werd ik door hem herinnerd aan de verbinding COS, koolstofoxysulphide. Om meer dan eene reden kwam het mij waarschijnlijk voor, dat in de vorming van dit lichaam de oorzaak gelegen zou zijn voor het optreden van het voorlaatste maximum in het spectrum der zwavelkoolstofvlam. Immers COS kan zeer goed een verbrandingsproduct van CS_2 zijn bij onvoldoende toetreding van zuurstof, en zoo zou dus geen inbreuk worden gemaakt op den tot nu toe geldig bevonden regel, dat gassen slechts *bij hun ontstaan* een belangrijke hoeveelheid warmtestralen uitzenden. Maar bij de reeds bekende uitstralingsmaxima valt nog een andere regelmatigheid op te merken, namelijk dat de golflengte

der in hoofdzaak uitgezonden stralen toeneemt naarmate het moleculairgewicht van het stralend lichaam grooter is. Hoewel een dergelijke samenhang nog door veel te weinig voorbeelden wordt gestaafd om als regel te kunnen gelden, zoo is het bestaan daarvan toch zeer aannemelijk voor onze voorstelling. Het moleculair gewicht nu van COS is kleiner dan dat van SO_2, terwijl daarentegen het moleculairgewicht van CS_2 grooter is; en men kan daarom eerder verwachten dat stralen, wier golflengte kleiner is dan die van de door SO_2 uitgezondene, te danken zijn aan de trillende beweging van COS, dan dat ze zouden uitgaan van de zwaardere zwavelkoolstofdeeltjes.

Nu moest echter worden uitgemaakt, of werkelijk in de zwavelkoolstofvlam koolstofoxysulphide als tusschenproduct wordt gevormd.

Wanneer men beproeft, de gassen uit de kern van zulk een vlam op te zuigen in een aspirator, dan blijkt reeds terstond, dat een belangrijke hoeveelheid vrije zwavel wordt medegevoerd, die zich deels in de buisgeleiding afzet, deels als een dichte wolk in den aspirator verbreidt. Om derhalve de gasvormige producten afzonderlijk te verkrijgen, bracht ik tusschen het metalen buisje, dat in het midden der vlam eindigde, en den aspirator een wijde, met watten opgevulde, glazen buis, in welke nu de zwavel volkomen werd tegengehouden. Als aspirator diende een flesch van een paar liter inhoud, waaruit men van onderen het water langzaam kon laten wegvloeien, terwijl door de stop, behalve de zuigbuis, nog een tot den bodem reikende buis was gebracht, door welke wederom water in de flesch kon worden toegelaten wanneer men het opgevangen gas wenschte uit te drijven.

Het gasmengsel, dat aldus uit de zwavelkoolstofvlam wordt opgezogen, moet als hoofdbestanddeel stikstof bevatten; waarschijnlijk bestaat niet veel meer dan een vijfde gedeelte uit verbrandingsproducten, en deze zijn dan nog hoofdzakelijk koolzuur en zwaveldioxyde, zoodat het koolstofoxysulphide, indien het aanwezig is, toch slechts in geringe hoeveelheid kan voorkomen. Verder kunnen nog aanwezig zijn onverbrande zwavelkoolstof en misschien kooloxyd benevens sporen van zwavelwaterstof.

Koolstofoxysulphide is in zijne eigenschappen moeilijk te onderscheiden van de combinatie der bovengenoemde bijmengselen: er bestaat geen enkele duidelijk sprekende reactie op het gas, wier uitkomst niet even goed zou kunnen worden toegeschreven aan een der verontreinigingen. Daarom was het noodzakelijk deze laatste te verwijderen, en hierbij volgde ik op raad en met de welwillend verleende hulp van Prof. H. C. Dibbits de methode, door P. Klason aangegeven. [1])

Het gas werd eerst geleid door sterke potaschloog (1 deel kalihydraat en 2 deelen water), waardoor CO_2, SO_2 en H_2S worden geabsorbeerd; vervolgens door een U vormig buisje met triäethylphosphine, welk lichaam de eigenschap bezit om CS_2 terug te houden; eindelijk door zuiver sterk zwavelzuur, dat den hoogst onaangenaam riekenden en vergiftigen damp van het triäethylphosphine in zich opneemt. Aldus gezuiverd, kan het gasmengsel nog slechts bestaan uit stikstof, koolstofoxysulphide en kooloxyd.

Hierop werden nu de beide door Klason aanbevolen kenmerkende reacties op COS toegepast. De eerste

---

[1]) Journal für prakt. Chemie, neue Folge 36, p. 64—74.

bestaat daarin, dat men het gas langzaam door een heldere oplossing van loodacetaat voert. Na eenige minuten werd in de uitmonding van het buisje een donker bruin aanslag zichtbaar, spoedig daarop nam men een duidelijke troebeling in de vloeistof waar, en na verloop van een half uur had zich een bruinachtig zwart neerslag gevormd, alles volkomen in overeenstemming met hetgeen door KLASON beschreven wordt als de kenmerkende reactie voor koolstofoxysulphide. H_2S, waarvan zelfs in het oorspronkelijk gasmengsel de aanwezigheid twijfelachtig was, kan na de zuivering door potaschloog geen aanleiding tot het zwarte neerslag hebben gegeven. Om te onderzoeken, of misschien sporen van zwavelkoolstof daartoe in staat waren, liet ik met zwavelkoolstofdamp verzadigde lucht geruimen tijd door een gelijke oplossing van loodacetaat strijken, doch nam daarbij niet de minste troebeling waar.

Het gevoeligste reagens op koolstofoxysulphide is volgens KLASON joodstijfsel. Een licht blauw gekleurde, zeer verdunde joodstijfseloplossing wordt door zuiver COS na verloop van eenige minuten langzaam ontkleurd. Volkomen hetzelfde verschijnsel nu bracht ons gasmengsel te weeg; en hoewel eene dergelijke verkleuring ook plaats heeft wanneer men SO_2 door de oplossing voert, zoo is de mogelijkheid, dat aan dit lichaam de werking voornamelijk zou zijn toe te schrijven, hier toch buiten gesloten wanneer wij in aanmerking nemen, dat de gebruikte hoeveelheid potaschloog, waardoor het gas in kleine bellen opsteeg, voldoende was om ruim 3 liter SO_2 te binden.

Beide reacties hebben derhalve bewezen, dat in de zwavelkoolstofvlam koolstofoxysulphide als tusschenproduct gevormd wordt: een feit, dat door het onderzoek

van het warmtespectrum der vlam aan het licht is gebracht.

4. *Waterstof, brandend in tegenwoordigheid van chloor en van broomdamp.*

Wanneer men door de buitenste buis van een glazen knalgasbrander waterstof laat uitstroomen, deze aansteekt, en vervolgens door het binnenste buisje chloor in plaats van zuurstof laat toetreden, verandert de vlam duidelijk van aanzien. In de plaats van de breede, bijna kleurlooze waterstofvlam komt nu een smallere, spitse, blauwachtig witte vlam, waarin zoutzuur gevormd wordt. Ik verwachtte natuurlijk in het warmtespectrum van deze wederom te zullen vinden twee maxima: het bekende van water, en tevens dat van zoutzuur. Maar hoe ook, door den stand der kraantjes en de drukkingen te veranderen, de hoeveelheden der in de vlam tredende gassen geregeld werden, het mocht mij niet gelukken iets anders te ontdekken aan het spectrum der gewone waterstofvlam, Het was echter moeilijk denkbaar, dat de warmteuitstraling volkomen dezelfde blijven zou, niettegenstaande er een geheel ander lichaam gevormd werd en de vlam zichtbaar eene wijziging onderging. Misschien verbond zich steeds het grootste gedeelte der waterstof met de aan alle kanten toetredende zuurstof, terwijl het chloor meerendeels onveranderd ontweek. Een vrij sterke chloorlucht in het vertrek staafde dit vermoeden. Er was nog een andere ongunstige omstandigheid. De beschikbare hoeveelheden waterstof en chloor waren niet zoo groot, dat uren achtereen een chloorwaterstofvlam onderhouden kon worden; er moest dus voortdurend iemand nabij den spectrometer staan,

die de kraantjes regelde en, telkens als er een waarneming gedaan zou worden, de vlam ontstak. Maar beweging van personen in de omgeving des spectrometers heeft steeds nadeeligen invloed, en daaraan kon het zeer goed toe te schrijven zijn, dat wellicht een kleine verheffing van de uitstralingskromme, niet ver van het watermaximum, mij ontgaan was. Ik nam dus bij een herhaling van de proef de volgende voorzorgen.

Vooreerst werd het chloor door het buitenste, de waterstof door het binnenste buisje geleid, zoodat deze laatste bij het uittreden aan alle zijden door chloorhoudende lucht omringd was. De voorraad waterstof, meer dan 40 liter, bevond zich in een slechts ten halve gevulden, grooten gaszak, waarin de drukking door een daarop geplaatst gewicht vrij constant gehouden kon worden. Het chloor was verzameld in een glazen flesch van ongeveer 25 liter inhoud; door de stop gingen, goed sluitend, twee buizen, waarvan de eene tamelijk wijd was en tot op den bodem reikte, terwijl de andere haar uitmonding geheel boven in de flesch had. Deze laatste buis was voor den afvoer van het gas bestemd, en dus verbonden met den brander. Om een gelijkmatige uitstrooming te verkrijgen, liet ik met een constante, doch willekeurig te regelen snelheid een verzadigde oplossing van keukenzout door de wijde buis, waarop een trechter was aangebracht, in de flesch vloeien. Keukenzoutoplossing werd gebruikt, omdat daarin veel minder chloor wordt opgenomen dan in zuiver water; bovendien was de oplossing reeds nagenoeg verzadigd met chloor, omdat ze gediend had bij het opvangen van dat gas na de bereiding. Het reservoir van dit zoute water hield minstens 30 liter in, en was ingericht

als flesch van MARIOTTE, om constante drukking te verzekeren. Bovendien bevatte de uitstroomingsbuis twee achter elkaar geplaatste kranen, zoodat men, als één van beide geheel openstond, met de andere de stroomsnelheid kon regelen. Men liet dan die tweede kraan in den gewenschten stand en kon nu door middel van de eerste de uitvloeiing telkens doen ophouden, of met die bepaalde snelheid doen plaats hebben.

Een dergelijke inrichting met twee kranen was geplaatst tusschen den waterstofzak en den brander, en de vier kranen konden door mij zelven gemakkelijk bereikt worden, terwijl ik voor de kijkers gezeten was. Boven den brander waren een paar platina electroden, waar tusschen ik met behulp van een kleinen inductietoestel een vonkje kon laten overspringen om telkens de vlam aan te steken. De tegenwoordigheid van een helper was thans geheel overbodig, ik behoefde slechts armen en hoofd te bewegen om alle noodige veranderingen tot stand te brengen en hare uitwerking gade te slaan. De regelingskranen werden nu eerst zoodanig gesteld, dat een zoutzuurvlam van behoorlijke grootte, ongeveer 3 c.M. lang, voor de spleet gevormd werd en daarop bepaalde ik stap voor stap de uitstraling, na elke waarneming den gastoevoer afsluitende om niet noodeloos gas te verliezen. Op deze wijze konden de metingen een paar maal herhaald worden, en tevens ter vergelijking het spectrum bepaald van de vlam, geleverd door volkomen denzelfden waterstofstroom, doch zonder toevoer van chloor. De in de beide spectra gevonden uitwijkingen vindt men hier nevens elkander gesteld.

Kleinste afwijking der stralen.	Waterstofvlam		Kleinste afwijking der stralen.	Waterstofvlam	
	met toevoer van chloor.	zonder toevoer van chloor.		met toevoer van chloor.	zonder toevoer van chloor.
39° 30′	4	4½	39° 7′ 30″	25	20
39° 25′	7	8½	39° 5′	18	13
39° 20′	17	19	39° 2′ 30″	13	8½
39° 15′	31	38	39°	11	5½
39° 12′ 30″	33½	48	38° 55′	7	4
39° 10′	29	32½	38° 50′	5	3

Het maximum der uitgestraalde warmte ligt voor de beide vlammen bijna op dezelfde plaats; bij de vlam, waarin zoutzuur gevormd wordt, hoogstens een halve minuut verder van het zichtbare spectrum verwijderd, dan bij de gewone waterstofvlam; doch terwijl van 39° 30′ tot voorbij 39° 10′ de straling dezer laatste de grootere is, vertoont in het verdere gedeelte van het spectrum de zoutzuurvlam belangrijker warmtewerking. Een blik op fig. 4 doet terstond zien, dat bij de laatstgenoemde toch nog een groot gedeelte van de waterstof tot water verbrand is, doch het overige heeft zich vereenigd met chloor onder uitzending van warmtestralen, wier maximum ergens in de omgeving van 39° schijnt te liggen. Een juiste bepaling van dat maximum is op deze wijze kwalijk bereikbaar; maar wanneer men door de gestippelde lijn voorgesteld denkt de warmte, die door het nu gevormde water wordt uitgestraald, dan kan men toch uit de overblijvende oppervlakte eenigszins nagaan, hoe de verdeeling der warmte in het zuiver zoutzuurspectrum ongeveer zijn zal.

Terloops zij nog opgemerkt, dat in deze reeks de hellingen der waterkromme steiler zijn dan bij de vroeger (blz. 75) gemelde proefneming; de oorzaak hiervan ligt

in de omstandigheid, dat nu de spleet en de bolometer geplaatst zijn op den brandpuntsafstand voor middelbare donkere stralen, wat bij de eerste proeven niet het geval was. [1])

Het gevonden resultaat omtrent den vermoedelijken afwijkingshoek der sterkst werkende stralen van zoutzuurgas eischte nadere bevestiging. Ik wenschte daarom waterstof te doen branden in een atmospheer van niets dan chloor.

Aan een peervormig lampeglas werd op het dikke gedeelte een plat vlak geslepen, zoodat daar een ovale opening ontstond, omstreeks 2 $^1/_2$ c.M. hoog, 1 $^1/_2$ c.M. breed, die door een gepolijst steenzoutplaatje gesloten kon worden. Van onderen was in het lampeglas een goed sluitende en met paraffine doortrokken kurk gebracht, waardoor nevens elkaar de beide aanvoerbuizen der gassen staken, benevens twee platinadraden, tusschen welke een inductievonkje moest overspringen boven de opening van de waterstofbuis. Deze laatste was zoodanig gesteld, dat de vlam ongeveer in het midden van het glas en ter hoogte van de steenzoutplaat kwam. De andere buis was wijder, om steeds chloor in overmaat te kunnen aanvoeren, en had hare uitmonding slechts weinig boven den bodem. Ook van boven was het lampeglas met een kurk gesloten; in deze paste een tamelijk wijde buis, welke door een opening in de muur met de buitenlucht communiceerde. Men kon derhalve het glas voortdurend met chloor gevuld houden,

---

[1]) Wanneer men echter fig. 1 c en fig. 4 a op Pl. II met elkander vergelijkt, dan is dit verschil in helling sterker dan met de werkelijkheid overeenkomt; maar die beide lijnen zijn ook niet direct onderling vergelijkbaar, daar in de figuren 1, 2, 7 en 8 de ordinaten slechts half zooveel millimeters bedragen als de correspondeerende galvanometeruitwijkingen, terwijl in de figuren 3, 4, 5 en 6 de galvanometeruitwijkingen in hare ware grootte zijn voorgesteld.

zonder daarvan hinder te hebben in het vertrek; het gevormde zoutzuur en het overtollige chloor ontweken terstond in de buitenlucht. Omdat het chloor niet geheel vrij was van zuurstof en alle dampkringslucht niet spoedig uit het lampeglas verdreven kon worden, was het te verwachten, dat er ook water ontstaan zou; hierin loste het zoutzuur terstond op, en bij de eerste proefnemingen druppelde de oplossing aan alle kanten langs den binnenwand van het glas en ook langs het steenzoutplaatje. Het gevolg hiervan was, dat ik spoedig nauwelijks een spoor van warmtewerking meer kon ontdekken, omdat de door zoutzuur uitgezonden straling juist door die oplossing bij voorkeur scheen te worden geabsorbeerd. Om aan dit bezwaar te gemoet te komen, werd de ruimte in het glas zoowel boven als beneden de vlam aangevuld met stukjes chloorcalcium, en tevens werd de chloorstroom versterkt. Nu konden verscheidene waarnemingen worden gedaan, alvorens zich zoutzuuroplossing tegen de wanden afzette.

De regeling der kraantjes geschiedde evenals bij de vorige proef; hier volgen de verkregen uitkomsten:

Kleinste afwijking der stralen.	Waterstof, brandend in chloor.	Kleinste afwijking der stralen.	Waterstof, brandend in chloor.
39° 20′	1	39°	13
39° 15′	2 1/2	38° 55′	8
39° 10′	7	38° 50′	3
39° 5′	11	38° 45′	1

Het maximum ligt alzoo bij 39° 1′ 30″. Aan den kant der kleinere golflengten is de helling der kromme (fig. 5) iets geringer dan aan de andere zijde; dit kan het gevolg zijn van de vorming van een kleine hoeveelheid water,

want noch de waterstof, noch het chloor waren absoluut vrij van dampkringslucht.

Het zou voorzeker niet onbelangrijk zijn geweest, nu ook de plaatsen in het spectrum te kennen, waar de uitstralingsmaxima, van broomwaterstof en van joodwaterstof gelegen zijn. Evenals dit in chloor geschied is, kan ook in een atmospheer van broomdamp waterstof worden ontstoken; doch de maatregelen, die men moet nemen, om deze vlam gedurende eenigen tijd rustig te doen branden voor den spectrometer, en wel zoodanig, dat hare straling voortdurend toegang heeft tot het instrument, brengen groote moeilijkheden mee. Ik heb getracht voor het beoogde doel dezelfde inrichting te gebruiken, waarmee de zoutzuurvlam verkregen was, en verbond daartoe het wijdste der beide buisjes, die door den bodem van het lampeglas gebracht waren, met een klein reservoir, waarin bromium verwarmd werd. Spoedig was het geheele lampeglas gevuld met den donkerbruinen broomdamp, en kon door het inductievonkje de door het tweede buisje toegelaten waterstof ontstoken worden. Doch daar de broomdamp bij gewone temperatuur nog lang niet de spanning der dampkringslucht bezit, werd deze laatste niet uit het glas verdrongen, en een groot deel van de waterstof verbrandde dus tot water, waarin het broomwaterstofzuur oploste. In korten tijd waren de wanden en ook het steenzoutplaatje beslagen, zoodat een groot deel der uitgestraalde warmte spoedig geabsorbeerd werd. Letten we hierbij nog op de omstandigheid, dat de verbindingswarmte van waterstof met broom zeer veel geringer is dan die van waterstof met chloor en dat de straling, welke door de vlam wordt uitgezonden, dus

reeds om deze reden alleen moeilijk waarneembaar zal zijn, dan is het zeer onwaarschijnlijk dat op de genoemde wijze eenig resultaat te verkrijgen is. Het is mij dan ook niet mogen gelukken, bij deze proef iets anders te vinden dan het maximum van water. Men zou het spectrum van broomwaterstof zuiver verkrijgen, wanneer de broomdamp op de spanning der atmospheer gebracht werd; maar daartoe moest de geheele omgeving der vlam op een temperatuur van ongeveer 60° C worden gehouden, en de vrij ingewikkelde inrichting, welke hiertoe noodzakelijk zou zijn, heb ik niet verwezenlijkt.

5. *De cyaanvlam en de vlam van kooloxyde in zuurstof.*

Tot nu toe hebben we slechts uitstralingsmaxima ontmoet van samengestelde lichamen; de vraag doet zich voor, of het ook mogelijk is op dergelijke wijze golvingen te vinden, die worden opgewekt bij het ontstaan van eenig elementair gas. Daartoe zouden we kunnen geraken, indien we zulk een element in zekeren zin als verbrandingsproduct konden verkrijgen, dat wil zeggen het moest zich vormen in een vlam onder vrijwording van warmte. Cyaangas nu denkt men zich, in verband met zijne eigenschappen, zóó geconstitueerd, dat de beide groepen CN door middel van de koolstofatomen aan elkaar verbonden zijn; tusschen de stikstofatomen zou derhalve in deze verbinding een losser band bestaan dan in het molecuul stikstof, en bij de verbranding van het gas wordt nevens koolzuur ook stikstof gevormd. Wanneer het ontstaan van dit laatste product onder warmteontwikkeling geschiedt (of dit het geval is, heb ik in eenige boeken over thermochemie, die ik hieromtrent raadpleegde, niet gevonden), dan kan men in het spectrum

der cyaanvlam twee maxima verwachten: het maximum van koolzuur en dat van stikstof.

Uit kwikcyanide werd op de gewone wijze het gas ontwikkeld en opgevangen in een groote runderblaas, die bijna 8 liter inhoud had, doch niet geheel gevuld werd. Onder een vrij constante drukking, door gewichten op de blaas uitgeoefend, stroomde het cyaangas vervolgens door een buis met chloorcalcium naar den brander, en werd daar telkens met behulp van een lichtgasvlammetje aangestoken.

Als gemiddelden uit een viertal waarnemingen vond ik de getallen, voorkomende in de tweede kolom der volgende tabel.

Kleinste afwijking der stralen.	Warmtestraling der		Kleinste afwijking der stralen.	Warmtestraling der	
	Cyaanvlam.	Bunsensche vlam.		Cyaanvlam.	Bunsensche vlam.
39° 20′	1 ½	22	39° 5′	2 ½	15 ½
39° 17′ 30″	2		39°	4 ½	14
39° 15′	4 ¾	44	38° 55′	34 ½	81
39° 12′ 30″	8	52	38° 51′ 15″	101	155
39° 10′	8 ¼	40	38° 45′	28 ½	41
39° 7′ 30″	3 ¾		38° 40′	7	16

Hier vertoont zich alzoo, behalve het bekende koolzuurmaximum, een verheffing wier toppunt bij ruim 39° 11′ gelegen is, dus zeer nabij het watermaximum. Dat het hiermede echter niet samenvalt, daarvan heb ik mij overtuigd door terstond na afloop dezer proevenreeks nogmaals het spectrum eener Bunsensche vlam te bepalen, die koolzuur en *water* levert; de hierbij gevonden galvanometeruitwijkingen staan ter vergelijking in de derde kolom. Wel vertoont het koolzuur-maximum in kolom II (waarschijnlijk door een instellingsfout) een geringe verschuiving naar den kant der grootere golf-

lengten [1]), doch deze verschuiving is niet groot genoeg om het verschil in plaats tusschen de beide andere maxima te verklaren.

Is nu echter deze uitstralingskromme, wier toppunt ongeveer bij 39° 11′ ligt, werkelijk toe te schrijven aan in de vlam gevormde stikstof? Een terugblik op hetgeen gevonden is bij de vlammen van kooloxyd en van zwavelkoolstof, doet hieromtrent eenigen twijfel ontstaan. In de spectra dezer beide vlammen toch kwam terzelfder plaatse eveneens een klein maximum voor, waarvan de grootste ordinaat bijna dezelfde verhouding had tot de bijbehoorende maximum-ordinaat van het koolzuur, als dit in het spectrum der cyaanvlam het geval is. Ten einde na te gaan, of misschien die vroeger gevonden kleine maxima (wier plaats niet met nauwkeurigheid was vastgesteld) aan den storenden invloed van gloeienden waterdamp hun ontstaan te danken hadden, werd nogmaals een vlam van goed gedroogd kooloxyd aan het onderzoek onderworpen, en wel met het resultaat, dat bij 39° 11′ 30″ toch wederom duidelijk een verheffing optrad, zooals blijkt uit de volgende getallen.

Kleinste afwijking der stralen.	Warmte der kooloxydvlam.	Kleinste afwijking der stralen.	Warmte der kooloxydvlam.
39° 15′	9	38° 55′	83
39° 12′ 30″	16	38° 52′ 30″	200
39° 10′	15	38° 51′ 15″	226
39° 7′ 30″	8	38° 50′	217 ½
39° 5′	5	38° 45′	59
39°	—	38° 40′	11

[1]) In fig. 6 is deze verplaatsing nauwelijks zichtbaar, maar ze blijkt, wanneer men de getallen ter weerszijde van het maximum in de beide spectra met elkander vergelijkt. Het is echter uiterst moeilijk, in een geval als dit den vorm der uitstralingskrommen nauwkeurig te bepalen; want de hellingen zijn hier zóó steil, dat een instellingsfout van ½′ aanleiding geeft tot een verschil in galvanometeruitwijking van 5 tot 10 schaaldeelen.

Onmiddellijk daarna werd weer het spectrum der Bunsensche vlam ter vergelijking bepaald; het eerste maximum van deze bleek ruim 1° 30′ meer naar den kant der kleinere golflengten gelegen te zijn.

Tusschen het warmtespectrum der cyaanvlam en dat der kooloxydvlam bestaat alzoo geen noemenswaardig verschil en wij verliezen het recht om het eerste maximum in het cyaanspectrum toe te schrijven aan de stikstof *als verbrandingsproduct.* Toch zou het niet geheel onmogelijk zijn, dat de stikstof hierbij een rol speelde. Dit gas is namelijk steeds in ruime mate aanwezig bij elk verbrandingsproces in de lucht, en wellicht wordt het daarbij zoo zeer verwarmd, dat het in staat is, zelf eene merkbare straling uit te zenden. De cyaanvlam bevat meer stikstof dan de vlammen van kooloxyd en van zwavelkoolstof: daaraan zou men dan genegen zijn toe te schrijven, dat in het spectrum der eerstgenoemde vlam het bedoelde maximum een weinig grooter is met betrekking tot dat van het koolzuur, dan in de beide andere vlammen.

Bij verbranding van ammonia moet óók naar verhouding veel stikstof in de vlam aanwezig zijn, en het onderzoek van het spectrum dezer vlam zou kunnen dienen om de gestelde hypothese te toetsen, ware het niet, dat de vermoedelijke uitstralingskromme van stikstof nagenoeg samenvalt met de waterkromme, die natuurlijk gelijktijdig zal optreden, en waarvan zij niet te scheiden zal zijn.

Indien echter die verheffing bij 39° 11′ 30″ alleen aan gloeiende stikstof haar ontstaan te danken heeft, zal ze niet kunnen optreden wanneer bijv. kooloxyd brandt in een atmospheer van enkel zuurstof.

Om dit geval te verwezenlijken, richtte ik weer een

peervormig lampeglas in met een zijdelingsche opening welke door een zoutplaatje gesloten kon worden, juist zooals bij het onderzoek naar het zoutzuurmaximum. Thans was echter door de kurk, die het glas van boven afsloot, een glazen buisje van slechts 1 d.M. lengte gebracht, dat dienen moest om het invallen van de dampkringslucht eenigszins tegen te gaan; het afvoeren van de overtollige gassen naar buiten, zooals dit geschieden moest bij het gebruik eener overmaat van chloor, was nu natuurlijk onnoodig. Een uitgetrokken glazen buisje, door den kurken bodem gebracht zou als brander dienen voor het kooloxyd, terwijl een ander buisje, kort boven den bodem uitmondend, de zuurstof moest aanvoeren. — Doch er doet zich een moeielijkheid voor: kooloxyd ontbrandt niet door een inductievonk, en toch moet binnen die afgesloten ruimte bij elke waarneming de vlam worden aangestoken. Om hierin te voorzien bracht ik door den bodem nog een derde, zeer nauwe buis, die schuin naar den brander gericht was en ongeveer terzelfder hoogte eindigde. Door deze kon lichtgas worden aangevoerd, een inductievonkje deed dit ontbranden en de zoo gevormde kleine gasvlam was in staat, de verbranding van het inmiddels toegelaten kooloxyd in te leiden. Doch nadat dit een paar malen geschied was, bleek het lichtgasbuisje door de enorme hitte der in zuurstof brandende vlam toegesmolten te zijn. Een buisje van een andere glassoort onderging spoedig hetzelfde lot, en ik zou dus hebben moeten overgaan tot het doen vervaardigen van een brander uit platina, indien ik niet door een toeval bemerkt had, dat in de zuurstofatmospheer de inductievonk *wel* in staat scheen te zijn het kooloxyd aan te steken, terwijl de hitte dier vlam niet zoo groot was, dat het buisje dichtsmolt.

Nadat op deze wijze eenige warmtebepalingen in het spectrum waren verricht, ging echter het aansteken der vlam minder zeker, hoewel de inductievonk en de gastoevoer even sterk waren gebleven, en eindelijk bleek het onmogelijk, het kooloxyd te doen ontbranden. Ik kwam op de gedachte, of het aanvankelijk succes wellicht een gevolg kon zijn geweest van de aanwezigheid eener zeer geringe hoeveelheid lichtgas of waterstof, waarvan enkele moleculen telkens de verbranding hadden ingeleid, doch die nu opgebruikt was. Daar door het dichtsmelten van het buisje de lichtgastoevoer was afgesloten, meende ik beter te doen met op een andere wijze een uiterst kleine hoeveelheid waterstof boven den brander te brengen, namelijk door de chloorcalciumbuis, die zich in de kooloxydgeleiding bevond, voor een oogenblik weg te nemen. De medegevoerde waterdamp zou dan door het inductievonkje worden ontleed, en de vrijgekomen waterstof misschien in staat zijn, onder den invloed der vonk het kooloxyd te doen ontbranden.

De uitkomst beantwoordde maar al te zeer aan de verwachting: het mengsel van kooloxyd en zuurstof, dat zich allengs in het lampeglas gevormd had, ontplofte, en maakte op deze wijze een zeer ongewenscht einde aan de proefneming.

De weinige metingen, die reeds waren gedaan, laat ik hier volgen.

Kleinste afwijking der stralen.	Kooloxyd, brandend in zuurstof.	Kleinste afwijking der stralen.	Kooloxyd, brandend in zuurstof.
39° 20′	3	39° 5′	4
39° 15′	8	39°	1
39° 12′ 30″	20	38° 57′ 30″	6 1/2
39° 10′	14	38° 55′	28

Men ziet, dat voor het optreden van een maximum bij 39° 11′ 30″ de tegenwoordigheid van stikstof niet noodzakelijk is. Of echter bij afwezigheid van stikstof de betrekkelijke intensiteit van het maximum grooter dan wel kleiner is, wordt door de gevonden getallen niet beslist, daar de plaats van het koolzuurmaximum nog niet bereikt was, en het is dus evenmin een uitgemaakte zaak, dat de stikstof er *geen* invloed op heeft. [1]) De vraag, wat de oorsprong is van de bedoelde verheffing, blijft alzoo onopgelost. Kooloxyd of zuurstof, welke beide in de vlam aanwezig zijn, kunnen er aanleiding toe gegeven hebben, maar misschien ook behoort dit maximum wel tot de uitstralingskromme van koolzuur, zoodat het zou wijzen op een secundaire, steeds in het koolzuurmolecuul voorkomende periode.

Tot mijn spijt ben ik niet in de gelegenheid geweest, door herhaalde proefneming in deze kwestie dieper door te dringen; voor het oogenblik schijnt het mij het meest aannemelijk toe dat wij hier te doen hebben met de uitstraling van kooloxyd, daar dit gas toch hoogstwaarschijnlijk in de vlam, zelfs in de kooloxydvlam, voortdurend als tusschenproduct wordt gevormd.

Met een enkel woord wil ik aan de beschrijving dezer proevenreeks nog toevoegen, op welke wijze het steenzoutplaatje, dat de opening in het lampeglas afsloot, beschermd werd tegen de inwerking van de vochtigheid

---

[1]) MAGNUS, TYNDALL en RÖNTGEN komen bij hunne proeven omtrent de absorptie van warmtestraling door gassen eenstemmig tot het besluit, dat atmospherische lucht, en dus ook stikstof, voor de straling van de door hen gebruikte warmtebronnen zoo goed als volkomen diathermaan is. Dit feit pleit voor de opvatting, dat de stikstof bij onze stralingsverschijnselen *geen* merkbare rol speelt. Op denzelfden grond moeten wij ook den directen invloed der zuurstofmoleculen voor onwaarschijnlijk houden.

der omgeving. De naar binnen gekeerde zijde werd droog gehouden door een in het lampeglas hangend korfje met chloorcalcium, terwijl langs den buitenkant een langzame stroom van droge en eenigszins verwarmde lucht opsteeg. Deze luchtstroom werd verkregen door een schuingestelde koperen buis van omstreeks 80 c.M. lengte, waarvan de bovenste opening juist onder het zoutplaatje kwam, beneden het midden met een gasvlam te verhitten. De lucht binnen de buis steeg dan op en werd aangevuld door nieuwe lucht, die echter genoodzaakt was, alvorens in de buis te komen, over chloorcalcium te strijken. Aan deze eenvoudige inrichting was het te danken, dat het steenzout volkomen droog en helder bleef, hoewel de atmospheer in die dagen zeer vochtig was.

6. *De vlam van phosphorwaterstof.*

De vlam van brandenden phosphorus zendt een sterk, wit licht uit, hetwelk zich bij oppervlakkige beschouwing niet onderscheidt van dat eener gewone gasvlam. Bij deze laatste wordt het lichtgevend vermogen, gelijk bekend is, toegeschreven aan in de vlam gloeiende vaste kooldeeltjes; doch waaraan dankt nu de phosphorvlam haar helder licht, terwijl toch het verbrandingsproduct $P_2 O_5$ bij de daar heerschende temperatuur waarschijnlijk gasvormig is? Reeds deze vraag maakt het onderzoek naar het spectrum der phosphorvlam belangrijk, want wij kunnen met recht verwachten, dat de aard der straling zeer zal afwijken van die der gewone gasvlam, hoewel de beide spectra in het lichtend gedeelte slechts weinig van elkaar verschillen; maar bovendien opent dat onder-

zoek de kans op het vinden van het uitstralingsmaximum der verbinding $P_2 O_5$.

Phosphorus met een constante vlam voor de spleet des spectrometer te doen branden, is echter uiterst moeielijk; daarom besloot ik tot de bereiding van phosphorwaterstofgas, dat, behalve water, toch ook phosphorpentoxyde als verbrandingsproduct levert en wel onder dezelfde lichtverschijnselen.

Het experimenteeren met een belangrijke hoeveelheid phosphorwaterstof eischt groote behoedzaamheid, daar het gas vergiftig is en zeer gemakkelijk ontbrandt. In de eerste plaats werd zorg gedragen, dat bij de bereiding de vloeibare verbinding $P_2 H_4$ niet ontstond, en het gas dus niet zelf-ontbrandbaar was. Daartoe werd het ontwikkeld uit phosphorus en alcoholische potaschoplossing onder verhitting op een zandbad. Een stevige flesch van omstreeks 12 liter inhoud diende om het gas boven water op te vangen, waarbij nauwlettend werd toegezien, dat zoo weinig mogelijk lucht zich er mede vermengde, opdat niet later, bij het aansteken, de verbranding naar binnen zou kunnen slaan. De flesch was zoo ingericht, dat ze tevens geschikt was, om het gas onder willekeurige drukking weer te laten uitstroomen. Daartoe ging door de stop een wijde buis tot op den bodem en een nauwere tot in den hals; in de wijde buis kon ik met willekeurige snelheid water laten toevloeien, evenals dit op bldz. 88 beschreven is voor den chloorgashouder.

Wanneer een vlam van phosphorwaterstof slechts enkele seconden brandt, vormt zich reeds een zoo dichte nevel van $P_2 O_5$, dat het absoluut noodzakelijk is, een afdoend middel te bezitten om dit verbrandingsproduct te verwijderen, wanneer men de vlam gedurende eenige

uren gebruiken wil. Daarom werd boven het voetstuk V (fig. 11) een schoorsteen aangebracht, bestaande uit een kachelpijp van omstreeks 3 M. lengte, die door een opening in het raam naar buiten ging, en waarin met behulp van een gasvlam kunstmatige trekking onderhouden werd.

Als brander diende wederom een uitgetrokken glazen buisje; doch na een of twee waarnemingen werd de vlam kleiner en spoedig was de opening van het buisje verstopt door een vaste korst, waarschijnlijk van $P_2 O_5$. Een oogenblik vreesde ik, dat op dit bezwaar de geheele zaak zou afstuiten; maar gelukkig werd het weggeruimd door aan den brander een anderen vorm te geven. Het uitgetrokken gedeelte namelijk werd daarvan afgebroken, en over de buis daarna een koperen busje geschoven, dat van boven gesloten was door een vlak platinaplaatje, waarin zich een kleine opening bevond. Zoodra nu die opening verstopt raakte, kon ze gemakkelijk met een speld worden doorgestoken; maar ze bleef van zelf reeds open, want door zijn beter geleidingsvermogen voor warmte werd deze metalen brander veel minder heet dan die van glas, en het zich daarop afzettende phosphorpentoxyde had dus gelegenheid, water op te nemen, zoodat dan ook telkens van het platina dekseltje een droppel vocht moest worden verwijderd.

De warmtestraling eener phosphorwaterstofvlam is over het spectrum, voor zoo ver ik dat onderzocht heb (zie blz. 105), op de volgende wijze verdeeld.

Kleinste afwijking der stralen.	Phosphor-waterstof-vlam.	Kleinste afwijking der stralen.	Phosphor-waterstof-vlam.	Kleinste afwijking der stralen.	Phosphor-waterstof-vlam.
41°	1	39° 40′	3	38° 40′	3
40° 50′	1 3/4	39° 30′	4 1/2	38° 30′	2
40° 40′	3	39° 20′	11 1/2	38° 20′	1
40° 35′	4	39° 15′	26	38° 10′	2
40° 30′	3	39° 12′ 30″	34	38°	6
40° 20′	2	39° 10′	21	37° 55′	8
40° 10′	2	39° 5′	6	37° 50′	4
40°	3	39°	3	37° 40′	2
39° 50′	2	38° 50′	4	37° 30′	0

Wat reeds terstond in het oog valt, is het uiterst geringe bedrag der uitgezonden warmte, hoewel toch een vrij groote vlam van omstreeks 3 c.M. lengte gebruikt werd, die in staat was, de geheele spleet te verlichten. Wanneer men de verheffing, wier toppunt bij 39° 13′ ligt en die weer aan het verbranden der waterstof is toe te schrijven, buiten beschouwing laat, blijft er voor warmte, uitgestraald door het gevormde phosphorpentoxyde, niet veel over. Tot op de plaats in het spectrum waar de deviatie 37° bedraagt, is van een enkel kenmerkend maximum in alle geval geen sprake.

Daar ik om zekere redenen, die bij een nadere bespreking van de uitkomsten zullen blijken, meende te mogen verwachten, dat de voornaamste straling, van $P_2 O_5$ uitgaande, een nog veel grootere golflengte zou bezitten dan overeenkwam met de plaats, waar de deviatie 37° bedroeg, heb ik het spectrum bij stappen van 10′ onderzocht tot op een afwijkingshoek van 25°; doch behoudens een paar twijfelachtige aanduidingen bij 36° 15′ en 34° 50′ vond ik geen spoor van warmtewerking.

De mogelijkheid bestaat, dat stralen van zoo groote

golflengte wel door de vlam worden uitgezonden, doch dat zij òf door de steenzoutpraeparaten worden geabsorbeerd, òf niet in staat zijn het met kamferzwart bekleede bolometerreepje te verwarmen. Ten einde omtrent deze zaak een enkel gegeven meer te bezitten, heb ik met behulp van een gewone thermozuil de totale hoeveelheid warmte, uitgestraald door een lichtgevende gasvlam, vergeleken met die eener phosphorwaterstofvlam, wanneer de straling van beide begrensd werd door eenzelfde diaphragma met kleine opening. Het bleek, dat de gasvlam ongeveer zeven maal zooveel warmte aan de thermozuil mededeelde als de vlam van phosphorwaterstof. Door een steenzoutplaat werd de werking van de beide bronnen nagenoeg even weinig verzwakt; misschien die der phosphorwaterstofvlam 1 % of 1 $^1/_2$ % meer.

De geheele inhoud der laatst bepaalde warmtekromme is echter veel minder dan het zevende deel van den inhoud der figuur, die de warmteverdeeling in het spectrum der lichtgevende gasvlam voorstelt. Wat hiervan de oorzaak is, kan ik niet met zekerheid zeggen; misschien ligt zij in een verschil tusschen het absorptievermogen van het bolometerreepje en van de thermozuil; wellicht ook bestaat er nog een stralingsmaximum, welks deviatie minder dan 25° bedraagt, en waarvan de warmte dus niet door den bolometer maar wel door de thermozuil is opgevangen.

Wegens het groote aantal verschillende plaatsen in het spectrum, waar vergeefs naar warmte gezocht is, heeft de gasvoorraad niet toegelaten, het sterker gebroken gedeelte van het warmtespectrum meer dan tweemaal te doorloopen. Groote nauwkeurigheid komt alzoo aan de gegeven getallen niet toe, vooral omdat de meeste zeer klein zijn. Bovendien was de batterij, na

gedurende bijna zeven maanden voortdurend werkzaam te zijn geweest, minder constant geworden, zoodat de galvanometer niet zoo goed in rust bleef als bij de vroegere waarnemingen.

Wat betreft het lichtgevend vermogen der phosphorwaterstofvlam, men ziet, dat dit te danken is aan een kleine verheffing, wier maximum ongeveer bij $40^{\circ}\ 35'$, alzoo tusschen B en C gelegen is. Deze en de verdere kleine verheffingen in het spectrum wijzen misschien op intramoleculaire perioden van $P_2\ O_5$ of anders op trillingen van tusschenproducten, die in de vlam worden gevormd.

---

c. IETS OVER DEN AARD DER WARMTE, DOOR VASTE LICHAMEN UITGESTRAALD, EN OVER HET SELECTIEF ABSORPTIEVERMOGEN VAN WATER.

De wijze, waarop de warmteuitstraling van vaste lichamen afhankelijk is van de temperatuur, is nog steeds niet voldoende bekend. De empirische wet van STEFAN omtrent het totaal bedrag der straling bij verschillende temperaturen moge in vele gevallen tot op zekere hoogte in staat zijn, de waarnemingen weer te geven, maar ze houdt volstrekt geen rekening met de verscheidenheid der stralen, die door eenzelfde lichaam worden uitgezonden; en men kan niet a priori verwachten, dat die verschillende stralen zich, wat hunne intensiteitsverandering betreft, bij verhooging van temperatuur op volkomen gelijke wijze zullen gedragen.

Het oorspronkelijk voorstel van Prof. BUYS BALLOT was daarom: proeven te nemen aangaande de spectrale verdeeling van de door vaste lichamen bij verschillende temperaturen uitgezonden warmte; doch daar mijn tijd al te zeer in beslag genomen is door het onderzoek naar

de emissiespectra van gassen, ben ik tot mijn spijt niet in staat geweest, vele nieuwe gegevens omtrent de straling van vaste lichamen te verzamelen. De weinige waarnemingen, die ik deed, kunnen echter dienen ter bevestiging van hetgeen reeds vroeger door anderen was gevonden.

Het zijn voornamelijk JACQUES (blz. 25), DESAINS en CURIE (blz. 28) en LANGLEY (blz, 37), wier onderzoekingen aangaande het bedoelde onderwerp in aanmerking komen. JACQUES meende uit zijne proeven te mogen afleiden, dat het uitstralingsmaximum zich niet merkbaar verplaatst met verandering van temperatuur; DESAINS en CURIE en LANGLEY vonden daarentegen een zeer duidelijke verschuiving daarvan, naar den kant der kleinere golflengten wanneer de hitte toenam. De laatstgenoemde waarnemers onderzochten met lampzwart bedekt koper; JACQUES echter had de uitstraling bepaald van platina en van eenige metaaloxyden.

Ten einde sommige dier proeven met mijn instrument te herhalen, bracht ik voor de spleet een reepje platina, verwarmd door een galvanischen stroom; later een met koperoxyd bedekt koperen plaatje, dat verhit werd door een Bunsensche vlam, tegen wier eigen straling de spleet beschut was, en vervolgens hetzelfde plaatje, bedekt met een laag lampzwart. De uitkomsten, met de beide laatstgenoemde warmtebronnen verkregen, wil ik hier laten volgen, omdat deze het best onderling vergelijkbaar zijn. Een kleine gasregulator hield de vlam gedurende elke waarnemingsreeks zooveel mogelijk constant en stelde tevens in staat, de hoogte der vlam naar willekeur te regelen. Een inrichting om de juiste temperatuur van het plaatje te bepalen was niet aangebracht; naar schatting lagen de temperaturen, waarbij werd waargenomen, tusschen 200° C en 400° C.

Kleinste afwijking der stralen.	Koperoxyde.				Koolstof.			
	I.	II.	III.	IV.	I.	II.	III.	IV.
39° 30′	1	4	7	11				
39° 20′	3½	11	23	35½	1	8	34	55
39° 15′		17	30½	53	4	22	52	90
39° 10′	11	27	38	63	8	37	79	123
39° 5′	14½	31	46	70	12	47½	99	144
39°	14	31	46	68	14	50	104	146
38° 55′		29	42	61	15	51	103	131
38° 50′	14	27	38	49	16	51	95	117
38° 45′			32		16½	49	87	108
38° 40′	11	23	28	40	17	45	73	95
38° 35′					16	40		
38° 30′	8	17	21	27	14	35	53	70
38° 25′					13	27		
38° 20′	5½		15	19	12	24	41	53
38° 10′	3½		10	14				

Men ziet — en uit de graphische voorstelling op Pl. II fig. 7 en fig. 8 blijkt dit nog duidelijker — dat de warmteverdeeling hier een geheel andere is dan bij gloeiende gassen. De helling der uitstralingskrommen is veel steiler naar den kant der kleinere golflengten dan aan de andere zijde, en wanneer men de krommen op het normale spectrum reduceert, zal, zooals gemakkelijk is in te zien, dit verschil in helling nog een weinig toenemen.

Verder kan men opmerken, dat bij het koperoxyd tusschen de genoemde temperatuurgrenzen het uitstralingsmaximum wel iets, maar toch zeer weinig van plaats verandert, terwijl daarentegen het maximum van koolstof vrij sterk verschuift overeenkomstig de waarnemingen van Langley en van Desains en Curie. Ook bij platina werd geen belangrijke verplaatsing gevonden.

Zeer wenschelijk is het, dat op dit gebied nog meer feiten worden vastgesteld, en het is te hopen dat LANGLEY, die op dit oogenblik waarschijnlijk beter dan eenig ander voor een dergelijk onderzoek is ingericht, niet slechts de absolute waarden der verschillende stralen van een lichaam bij alle temperaturen tusschen o° C en 2000° C zal bekend maken — zooals hij ons in een zijner laatste publicaties heeft toegezegd — maar dat hij dit tevens doen zal voor vele verschillende lichamen. Mocht het blijken, dat werkelijk bij koolstof meer dan bij de andere elementen het toppunt der uitstralingskromme zich verplaatst, dan staat die eigenschap wellicht in betrekking tot de groote veranderlijkheid der specifieke warmte dezer stof tusschen de binnen ons bereik liggende temperaturen, en men dient na te gaan, of soms borium en silicium, wat de veranderlijkheid hunner uitstraling betreft, overeenkomst vertoonen met de koolstof. Het bestaan van eenig verband tusschen de verplaatsing van het uitstralingsmaximum en de aangroeiing der soortelijke warmte bij klimmende temperatuur, is niet onwaarschijnlijk. *Beide* verschijnselen toch doen vermoeden, dat het molecuul koolstof bij lagere temperaturen uit meer atomen is opgebouwd; het laatstgenoemde verschijnsel op grond van den regel van DULONG en PETIT, het eerstgenoemde wegens eene betrekking, die tusschen moleculairgewicht en trillingsperiode schijnt te bestaan (zie blz. 122). Maar om het verband duidelijk in te zien, zal het noodig zijn, bij beschouwingen omtrent specifieke warmte en temperatuuruitwisseling te letten op de verscheidenheid der trillingsperioden, bij de lichamen voorkomende, en op de verschillende geschiktheid, welke zij dientengevolge bezitten, om door bepaalde golvingen verwarmd te worden. Daarvoor nu zijn nog te weinig gegevens voorhanden.

Ten slotte wil ik nog een op zich zelf staande proef bespreken, die eigenlijk bestemd was om het eerste lid te vormen eener reeks van onderzoekingen over selectieve absorptie en die daarom te dezer plaatse onvermeld had kunnen blijven, ware het niet, dat de uitkomst eenigszins had medegewerkt tot de ontwikkeling der in het volgende hoofdstuk voorkomende denkbeelden.

Toen gebleken was, dat bij het ontstaan van waterdamp onder warmteontwikkeling, steeds een bepaalde groep van stralen werd uitgezonden, wenschte ik mij er van te overtuigen, of de met deze groep overeenkomende trillingsperioden soms ook in vloeibaar water duidelijk te herkennen waren. Ik stelde mij dus voor, het absorptiespectrum van water te onderzoeken.

Om deze proef zoo zuiver mogelijk te verwezenlijken, liet ik de stralen door een kleinen waterval gaan en vermeed zoodoende den storenden invloed van glazen wanden, die natuurlijk wel te elimineeren zou zijn geweest, doch die in alle geval het gebruik noodzakelijk had gemaakt van een zeer veel sterkere warmtebron, daar glas het grootste deel der donkere warmtestralen tegenhoudt. Bovendien was het bij de gekozen inrichting onmogelijk, dat het absorbeerend lichaam, zelf verwarmd wordende, door zijn eigen straling op het resultaat invloed kon uitoefenen.

Een stuk dun koperblik, waarin een rechthoekige opening gesneden was van 22 m.M. lengte en 7 m.M. breedte, werd vertikaal voor de spleet geplaatst. Kort boven de opening eindigde een glazen buis, die onder een kleinen hoek naar het blik gericht was, en waaruit onder constante drukking water stroomde. Het water verspreidde zich over het blik als een dun vlies, dat door de opening niet werd afgebroken: de opening

was als het ware gesloten door een continu waterlaagje, waarin men eenige stroomlijnen kon onderscheiden, die echter volkomen standvastig van vorm bleven zoolang de drukhoogte niet veranderde. Wanneer men den watertoevoer afsloot en daarna op nieuw opende, verschenen dezelfde stroomlijnen.

Als warmtebron diende een platinakroes, die met de opening naar de spleet was gekeerd en waarvan de bodem verwarmd werd (tot roodgloeihitte) door een Bunsensche vlam. Op elke plaats van het spectrum bepaalde ik nu eerst de directe straling, d. i. terwijl de watertoevoer afgesloten was, en terstond daarop de hoeveelheid warmte, die door het waterscherm werd doorgelaten, zoodat dadelijk voor iedere stralensoort de absorptie in procenten kon worden uitgedrukt. Twee waarnemingsreeksen heb ik op deze wijze verricht; de uitkomsten stemmen voor die beide gevallen op de meeste plaatsen van het spectrum nagenoeg volkomen overeen en verschillen slechts éénmaal meer dan 2 %.

De tweede reeks laat ik hier volgen.

Kleinste afwijking der stralen.	Directe straling.	Straling door de waterlaag.	dus geabsorbeerd.	Kleinste afwijking der stralen.	Directe straling.	Straling door de waterlaag.	dus geabsorbeerd.
40°	3	2	33 %	39° 5′	215	18	91½ %
39° 50′	9	6	33	39° 2′ 30″	204	21	85
39° 40′	33	24	30	39	177	24	86
39° 35′	67	49	27	38° 57′ 30″	164	16	90
39° 30′	135	88	35	38° 55′	141	11	92
39° 25′	241	133	45	38° 50′	214[2])	7	96
39° 20′	334	148	56	38° 45′	163	5	97
39° 15′	197[1])	33	83	38° 40′	132	4	97
39° 12′ 30″	225	20	91	38° 30′	80	2½	97
39° 10′	214	15	93	38° 20′	52	1½	97
39° 7′ 30″	210	13	94	38° 10′	39	2	95

[1]) De warmtebron werd verzwakt.

[2]) De warmtebron werd versterkt.

De eerste drie waarnemingen komen in de andere reeks niet voor, omdat toen de warmtebron over het geheel zwakker was en de uitslagen daardoor te klein waren; de overeenkomstige drie getallen in kolom IV verdienen alzoo minder vertrouwen dan de overige. Een gemeenschappelijke onnauwkeurigheid bezitten echter alle aangegeven absorptieprocenten, want de terugkaatsing tegen de beide oppervlakten van het water is buiten rekening gebleven, en de getallen zijn dus alle te groot. Maar daar we geen reden hebben om een sterk sprekende selectieve terugkaatsing aan te nemen, bestaat er groote waarschijnlijkheid, dat onze waarnemingen toch ten naaste bij den loop der absorptie doen kennen.

Een oppervlakkige beschouwing der getallen in kolom IV doet het ons toeschijnen, alsof zich een absorptiemaximum bevindt bij 39° 8′ en een tweede tusschen 38° 45′ en 38° 20′. Het eerste maximum komt alzoo niet overeen met de sterkste uitstraling van waterdamp, daar deze bij 39° 13′ gelegen is. Wanneer wij echter de uitkomst graphisch voorstellen (Pl. II, fig. 1 e) dan blijkt het, dat de absorptiekromme kan worden beschouwd als een superpositie van twee kromme lijnen. Het is, alsof er geleidelijke toeneming van absorptie plaats heeft van 39° 30′ tot 38° 45′, terwijl op de zoo gevormde helling een tweede verheffing gestapeld is, die ongeveer den vorm der waarschijnlijkheidskromme zou bezitten, wanneer de grondslag horizontaal ware. Het toppunt van die verheffing ligt nu niet bij 39° 8′, doch meer naar den kant der kleinere golflengten: waarschijnlijk zal het bij herhaald nauwkeurig onderzoek blijken, volkomen in plaatsing overeen te stemmen met het uitstralingsmaximum van waterdamp.

De trillingsperioden, die bij het ontstaan van water-

damp worden opgewekt, zijn dus ook in water duidelijk te herkennen, maar gaan daar vergezeld van andere perioden, die aanleiding geven tot de tweede verheffing der absorptiekromme, waarvan het toppunt nog niet met zekerheid bekend is.

Zeer merkwaardig zou het zijn, wanneer men nu ook de absorptiekrommen van vloeibaar koolstofdioxyde, van vloeibaar zwaveldioxyde en van vloeibaar zoutzuur kon bepalen, daar we de uitstralingsmaxima dezer lichamen in gasvormigen toestand hebben leeren kennen; doch de bezwaren, aan een dergelijk onderzoek verbonden, zijn niet gering.

Mocht het blijken een algemeene wet te zijn, dat men in de absorptiespectra van vloeistoffen de voornaamste trillingsperioden van den bijbehoorenden damp kan herkennen, dan zou dit aanleiding geven tot belangrijke gevolgtrekkingen omtrent de constitutie der vloeistoffen. Een uitvoerig onderzoek naar het selectief absorptievermogen van verschillende vloeistoffen en van hare dampen voor warmtestralen, kan dus niet genoeg worden aanbevolen. Wanneer de absorptie voor iedere plaats van het spectrum in procenten van de aldaar voorhanden stralingsenergie wordt uitgedrukt, hebben de zoo gevonden kromme lijnen nog dit voor boven de emissiekrommen, dat zij onafhankelijk zijn van het selectief absorptievermogen des warmtemeters en der steenzoutpraeparaten, en derhalve, zuiverder dan de emissiekrommen, een beeld geven van de betrekkelijke intensiteiten der verschillende perioden, die bij eenzelfde lichaam voorkomen.

VIERDE HOOFDSTUK.

Gevolgtrekkingen en theoretische beschouwingen.

Het moge voorbarig schijnen, uit een zoo gering aantal gegevens als het beschreven onderzoek heeft opgeleverd, reeds algemeene conclusiën te willen afleiden en daaraan theoretische beschouwingen te willen verbinden — toch is dit slechts een noodzakelijke uiting van het streven, dat iederen beoefenaar der wetenschap kenmerkt, een uiting, die hij niet mag tegenhouden.

Onderzoek en gevolgtrekking zijn onafscheidelijk aan elkaar verbonden. De beschouwingen komen niet louter *na*, maar evengoed *voor* en *tijdens* de proefnemingen. Elke proef rust op een onderstelling en is de basis voor een conclusie, waarop zich weldra een nieuwe hypothese vestigt.

Men kan sommige verdiepingen van dit gebouw voor het oog des toeschouwers verborgen houden, maar vermag haar bestaan niet te ontkennen. Waartoe dan die sluier? Immers juist aan den band, die ze tezamen houdt, ontleenen waarnemingen hare meerdere of mindere beteekenis voor de wetenschap — maar ook den graad harer betrouwbaarheid. Want hoewel het de plicht is van den natuuronderzoeker, zonder vooroordeel te werk

te gaan bij de waarnemingen, toch drukken op deze onwillekeurig zijne verwachtingen soms haar stempel. Waarnemingen, zegt BUYS BALLOT, zijn „theoretisch uitgelegde gewaarwordingen" [1]); daarom *mag* men bij het vermelden daarvan zijne voorstellingen niet terughouden. Wie van een onderzoek slechts de experimenteele uitkomsten mededeelt, stelt deze niet in het ware licht.

Natuurlijk zij men met het toevoegen van nieuwe hypothesen niet te ras. „Slechts één stap moet de theorie te gelijk doen uit de bestaande algemeene uitspraak der waarnemingen, maar dan moet het aanwezig materiaal in het bijzonder er in passen of zij moet nieuwe waarnemingen te voorschijn roepen, die haar aan de werkelijkheid doen aansluiten." [2])

---

a. DE DIRECTE UITKOMSTEN VAN HET ONDERZOEK.

In het warmtespectrum eener vlam zijn over het algemeen de verschillende verbrandingsproducten duidelijk te onderkennen, want de warmte der vlam gaat hoofdzakelijk uit van de verbrandingsproducten, en aan de straling van elk hunner komt een bepaalde plaats toe in het spectrum.

Ieder gasvormig [3]) verbrandingsproduct zendt echter

---

[1]) BUYS BALLOT, Schets eener Physiologie van het onbewerktuigde rijk der natuur, p. XV.

[2]) Ibid. p. XIII.

[3]) Tot nu toe zijn slechts spectra van vlammen met gasvormige verbrandingsproducten geanalyseerd. Ik heb een poging gedaan, om ook de vlam van siliciumwaterstof aan het onderzoek te onderwerpen, daar in deze SiO_2 gevormd wordt, een stof, die eerst in de knalgasvlam smelt en dus hoogstwaarschijnlijk bij haar ontstaan in een waterstofvlam terstond vast wordt.

Het is mij echter niet moge gelukken, met de voorhanden hulpmiddelen een voldoende hoeveelheid SiH_4 te bereiden.

niet een enkele stralensoort uit, doch een groep van golvingen, wier intensiteiten ter weerszijde van een maximum geleidelijk en symmetrisch afnemen, op een zoodanige wijze, dat de uitstralingskromme veel overeenkomst vertoont met de waarschijnlijkheidskromme. Dit geldt voor het prismatisch spectrum; doch omdat in het geheele gebied, waar de gevonden maxima liggen, de golflengte nagenoeg een lineaire functie is van den afwijkingshoek, zal de gedaante der verschillende uitstralingskrommen, op het normale spectrum herleid, zeer nabij hetzelfde type behouden.

De absolute waarden der intensiteiten, aangegeven door de absolute lengten van de ordinaten der emissiekrommen, hangen af van de temperatuur en de grootte der vlam, van de uitstroomingssnelheid der brandbare gassen, enz.; zelfs hebben deze omstandigheden invloed op de betrekkelijke intensiteiten der verschillende golvingen van eenzelfde verbrandingsproduct, in zooverre zij de steilte van de hellingen der kromme lijnen kunnen wijzigen; doch *de plaats van het maximum is voor ieder verbrandingsproduct een constante grootheid*, niet merkbaar afhankelijk van de temperatuur, en onverschillig hoe de samenstelling is van het verbrandend lichaam.

Het vinden van de nagenoeg symmetrische gedaante der krommen en van de onveranderlijkheid in de plaats harer maxima kan niet worden beschouwd als een gevolg van groote onnauwkeurigheid in de methode van onderzoek, waardoor vrij belangrijke afwijkingen aan de waarneming ontsnapt zouden zijn. Immers met dezelfde instrumenten en onder gelijke omstandigheden werd de asymmetrische vorm der lijnen, die de verdeeling der warmte over het spectrum van vaste lichamen voorstellen, ook gevonden, en ik constateerde, even als LANGLEY, een

belangrijke verplaatsing van het maximum — bij stijging van temperatuur naar den kant der kleinere golflengten — wanneer het stralend lichaam bestond uit met lampzwart bedekt koperblik.

---

b. DE KENMERKENDE TRILLINGSPERIODEN DER MOLECULEN VAN EENIGE GASSEN.

Zooals gezegd is, blijkt de aard der golvingen, welke in hoofdzaak worden uitgezonden bij het ontstaan van eenig verbrandingsproduct, niet merkbaar afhankelijk te zijn van de wijze, waarop de samenstellende atomen vóór hun vereeniging waren gegroepeerd. Kooldioxyde bijvoorbeeld moge gevormd zijn bij de verbranding van koolwaterstoffen, van koolstofmonoxyde of van zwavelkoolstof, steeds vertoont zich het uitstralingsmaximum op volkomen dezelfde plaats van het spectrum. Dit feit wekt het vermoeden, dat wij hier te doen hebben niet zoo zeer met periodieke bewegingen, welke afhankelijk zijn van den aard der „Erschütterung" bij de reactie, als wel met bepaalde soorten van trillingen, die eigen zijn aan de nieuw gevormde verbinding.

De omstandigheid verder, dat bij het tot stand komen van elke der bedoelde verbindingen slechts één groep van stralen met groote intensiteit optreedt, leidt tot de gevolgtrekking, dat de uitgezonden golvingen ons wellicht de *hoofdperioden* doen kennen, *waarin de moleculen dier lichamen zich bewegen.*

Wij worden in deze opvatting versterkt door de uitkomst van het onderzoek naar het selectief absorptieververmogen van water (zie blz. 111). Hierbij toch bleek, dat dezelfde stralen, die in hoofdzaak worden uitgezonden bij

het ontstaan van *waterdamp*, ook in sterker mate dan de ter weerszijde liggende golvingen door *water* worden geabsorbeerd, en dat dus in het water zeer vele deeltjes aanwezig zijn, wier eigenaardige trillingen juist in periode overeenstemmen met de bewegingen, welke geboren worden in een waterstofvlam. Zuiverder zou, wel is waar, de contrôle zijn geweest, indien de absorptiekromme ware bepaald van water in dampvorm en wanneer deze de tweede verheffing *niet* had vertoond; doch mijns inziens is de bekende hypothese niet onaannemelijk, dat in vloeibaar water polymeeren voorkomen; deze zouden dan in staat zijn, stralen van grootere golflengte te absorbeeren en derhalve aanleiding kunnen hebben gegeven tot het optreden van die tweede verheffing. Dit is nog slechts een hypothese, en daarom kan de gedaante der gevonden absorptiekromme geenszins het *bewijs* leveren voor de stelling, dat wij de hoofdtrillingsperiode der H_2O-moleculen hebben leeren kennen; maar niettemin vermeerdert de uitkomst van dit onderzoek toch de waarschijnlijkheid der uitgesproken bewering.

Het is overigens een bekend feit, dat geen warmtestralen zoo sterk door waterdamp worden geabsorbeerd als die, welke uitgaan van een waterstofvlam, en dat kooldioxyde nagenoeg ondoordringbaar is voor de straling eener vlam van kooloxyde. TYNDALL [1]) liet een waterstofvlam op zijn thermozuil stralen door een inwendig gepolijste buis van 4 voet lengte, die eerst luchtledig was, daarna gevuld met droge dampkringslucht, vervolgens met ongedroogde lucht uit het vertrek. De gedroogde lucht absorbeerde van de straling der waterstofvlam 0 %, de ongedroogde 17,2 % en op een meer

[1]) TYNDALL, Heat a mode of motion, 6th ed. p. 412.

vochtigen dag zelfs 20,3 %; van de warmte daarentegen die een door electriciteit gloeiende platinaspiraal uitzond, hield vochtige dampkringslucht slechts 5,8 % terug. „We may infer" zegt TYNDALL, „from the foregoing powerful action of atmospheric vapour on the radiation from the hydrogen flame, that synchronism reigns between the molecular vibrations of the flame at a temperature (according to Bunsen) of 5898° Fahr. and those of aqueous vapour at a temperature of 60° Fahr. The enormous temperature of the hydrogen flame increases the atomic amplitude or width of swing, but does not change the period of oscillation."

Van de straling eener kooloxydvlam worden volgens TYNDALL door kooldioxyde bij verschillende spanningen de volgende hoeveelheden, in procenten uitgedrukt, geabsorbeerd:

Spanning.	Absorptie.
25,4 m.M.	48,0 %
50,8	55,5
76,2	60,3
101,6	65,1
127,0	68,6
254,0	74,3

zoodat kooldioxyde, in voldoende dichtheid aanwezig, kan worden beschouwd als adiathermaan voor de warmte der vlam van kooloxyde.

Ook uit een theoretisch oogpunt is het zeer waarschijnlijk, dat de warmte, welke in een vlam wordt opgewekt, bestaat in een sterke beweging van de verbrandingsproducten met de hen kenmerkende perioden.

Immers aannemende, dat elk molecuul en elk atoom een door zijn aard bepaalden trillingsduur bezit, kunnen wij ook verwachten, dat bij een zekere temperatuur aan elk

zich vrij bewegend deeltje een *bepaalde* gemiddelde amplitude toekomt. Alleen wanneer het deze amplitude bezit, is het met de omgeving in evenwicht; want terwijl het door uitstraling energie zou verliezen en dus in amplitude verminderen, ontvangt het van de omgeving — die alle mogelijke soorten van golvingen uitzendt en daaronder ook de soort, welke in periode met het deeltje overeenstemt — voortdurend nieuwen aanvoer van energie, en het is duidelijk, dat hieruit een evenwichtstoestand geboren moet worden, waarbij de beweging van het deeltje eenzelfde gemiddelde slingerwijdte behoudt. Deze amplitude hangt af van de sterkte, waarmede de bedoelde stralensoort door de omgeving wordt uitgezonden, dus in het algemeen [1]) slechts van de temperatuur.

Twee gassen, waterstof en chloor bijvoorbeeld, zijn nu elk op zich zelf bij 10° C met een gewone omgeving in evenwicht, en de beide soorten van moleculen bezitten ieder haar eigenaardige periode en hunne door de temperatuur bepaalde amplitude. Zoodra zij zich echter met elkaar vereenigen — door affiniteit, of hoe men die oorzaak ook noemen moge — ontstaat een nieuw lichaam, zoutzuur, waarvan de moleculen wederom hun eigenaardigen trillingsduur bezitten; maar men heeft geen enkele reden om te verwachten, dat de amplitude dezer trillingen, op het oogenblik van haar ontstaan, terstond zoo-

[1]) Namelijk wanneer de omgeving niet in aard verandert. Bij dezelfde temperatuur kan echter een andere omgeving de bedoelde stralensoort zeer goed met andere intensiteit uitzenden, en wanneer wij dus het beschouwde deeltje van de eene omgeving in de andere overbrachten, zou dit wel eens hetzelfde gevolg kunnen hebben met betrekking tot de amplitude van het deeltje als een temperatuursverandering. Hierin ligt misschien de verklaring voor sommige scheikundige verschijnselen, bijvoorbeeld voor het feit, dat alleen reeds de tegenwoordigheid eener stof de ontleding kan veroorzaken van een ander lichaam, dat in een gewone omgeving eerst bij hoogere temperatuur uiteenvalt. Men denke aan de ontleding van kaliumchloraat in tegenwoordigheid van bruinsteen, enz.

danig zijn zal, dat het zoutzuur met de omgeving in evenwicht is. Het zou inderdaad al zeer toevallig wezen, indien de geheel nieuwe periodieke beweging, wier bedrag slechts afhangt van de energie, welke de componenten beschikbaar hadden, onmiddellijk een zoodanige intensiteit bezat, dat ze van de synchrone, uit de omgeving komende golvingen per tijdseenheid juist evenveel versterking kreeg, als de door haar eigen straling veroorzaakte verzwakking bedroeg. En mocht dit zeldzame verschijnsel zich voor een bepaalde omgeving voordoen, dan zou het toch onbestaanbaar zijn in een andere omgeving, waarin de verdeeling der energie over de verschillende golvingen niet dezelfde was, waarin namelijk, kortweg uitgedrukt, de straling met „zoutzuurperiode" in een andere verhouding stond, wat intensiteit betreft, tot de straling met chloor- en die met waterstofperiode, dan dit in de eerst bedoelde omgeving het geval was.

Wij kunnen dus voorspellen, dat een nieuwgevormde verbinding in het algemeen *niet* met de omgeving in evenwicht zal zijn; dat de periode, welke de verbinding kenmerkt, aanvankelijk met grooter of met kleiner amplitude zal optreden dan kan blijven bestaan bij de temperatuur der omringende voorwerpen, en dat het lichaam dus terstond na zijn wording warmtestralen zal uitzenden of opnemen, die door haar golflengte de eigenaardige perioden der deeltjes doen kennen. Bij verbranding o. a. doet zich het eerste, bij het ontstaan van koudmakende mengsels het tweede geval voor.

Alles wijst er derhalve op, dat wij in de studie der uitstralings- en der absorptiemaxima voor ons zien een middel om te geraken tot de kennis van eene reeks nieuwe, belangrijke physische constanten: van *de kenmerkende trillingsperioden der moleculen.*

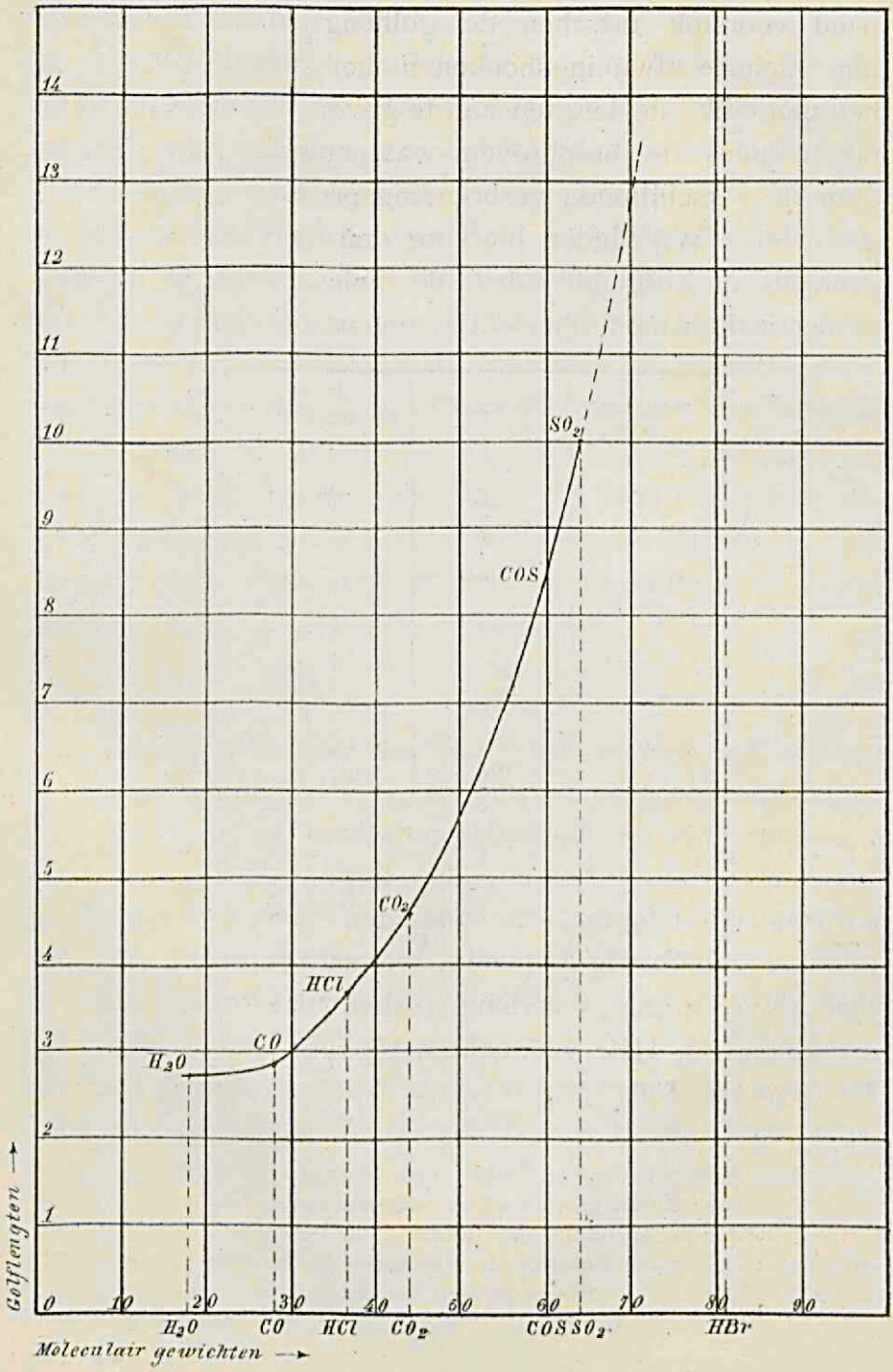
Voor zoover de tabel op blz. 69 en de daarnaar geteekende kromme lijn op Pl. II met juistheid het verband voorstelt tusschen de golflengten der stralen en hun kleinste afwijkingshoeken in het steenzoutprisma, is het mogelijk, de lengten aan te geven van de golvingen, die volgens de beschreven waarnemingen in maximo door de verschillende verbrandingsproducten worden uitgezonden. Wij vinden hiervoor dan de waarden, uitgedrukt in de volgende tabel; de moleculairgewichten der stralende lichamen zijn daarbij tevens opgegeven. [1])

Stralende lichamen.	Moleculair-gewichten.	Golflengten der kenmerkende stralen.
H_2O	18	$2^{\mu},73$
CO (?)	28	2 ,85
HCl	$36\,^1/_2$	3 ,68
CO_2	44	4 ,57
COS	60	8 ,48
SO_2	64	10 ,01
HBr	81	> 15 ,-- (?)
P_2O_5	142	> 80 ,-- (?)

Neemt men de moleculairgewichten als abscissen, de golflengten als ordinaten, dan liggen, zooals blijkt uit nevenstaande figuur, de uiteinden van deze op een tamelijk gelijkmatig loopende, zeer snel stijgende kromme lijn. Naar gissing verlengd, doet deze kromme het maximum van HBr verwachten bij ruim 18^{μ} en dat van P_2O_5 voorbij 60^{μ}.

---

[1]) De hier voorkomende getallen wijken eenigszins af van die, welke door Prof. BUYS BALLOT aan de Koninklijke Academie van Wetenschappen in de zitting van 24 Sept. 1887 zijn medegedeeld. Een nadere beschouwing van de waarnemingen, alsmede het in rekening brengen van een paar later verrichte proeven, leidde tot deze veranderingen.


14
13
12
11
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
SO_2
COS
CO_2
HCl
CO
H_2O
Golflengten
H_2O
CO
HCl
CO_2
COS
SO_2
HBr
Moleculair gewichten



De proefneming, vermeld op blz. 93, omtrent de straling eener vlam, waarin broomwaterstof wordt gevormd, was wegens de vele moeilijkheden wel is waar niet afdoende, maar toch meen ik er uit te mogen afleiden, dat de stralen, welke door HBr voornamelijk worden uitgezonden, niet gelegen zijn in het gedeelte van het spectrum, waar de golflengte kleiner is dan 15μ. En wat betreft de hoofdperiode van P_2O_5 — uit hetgeen blz. 105 gezegd is blijkt, dat de waarschijnlijkste verklaring voor de waargenomen feiten gelegen is in het aannemen van een stralingsmaximum, waarvan de deviatie, veroorzaakt door een steenzoutprisma van 60°, minder dan 25° bedraagt. Wanneer de dispersiekromme van LANGLEY zoo ver mag worden verlengd, is op deze plaats de golflengte reeds meer dan 80μ, en de golflengte der straling van P_2O_5 schijnt die waarde dus nog te overtreffen.

---

c. EENIGE WAARNEMINGEN VAN RÖNTGEN EN VAN LANGLEY, BESCHOUWD IN VERBAND MET DE DOOR MIJ VERKREGEN RESULTATEN.

De meest betrouwbare gegevens aangaande de absorptie van warmtestralen door gassen zijn wel die, welke wij aan RÖNTGEN te danken hebben [1]). Op de door hem gevolgde wijze van proefneming en op zijn vele doeltreffend gekozen en nauwkeurig toegepaste voorzorgen om storende invloeden te vermijden, wil ik hier niet nader ingaan; slechts enkele der verkregen uitkomsten zullen

---

[1]) RÖNTGEN, Berichte der Oberhessischen Gesellschaft für Natur- und Heilkunde, XX, 1881.
RÖNTGEN, Wied. Ann. XXIII, p. 1 en p. 259.

we beschouwen in het licht der nieuw ontdekte feiten.

Dat de warmtestraling eener Bunsensche vlam vrij sterk geabsorbeerd wordt zoowel door vochtige, koolzuurvrije lucht als door droge lucht, vermengd met koolzuur, kan ons niet verwonderen, daar waterdamp één der beide stralingsmaxima van de vlam kan terughouden, koolstofdioxyde het andere maximum.

Verder deelt RÖNTGEN mede, dat kooldioxyde van de warmte, uitgestraald door roodgloeiend platina, ongeveer evenveel absorbeert als van de golvingen eener Bunsensche vlam; kooloxyde en waterdamp daarentegen houden van de stralen der eerstgenoemde bron zeer veel meer terug, dan van die der tweede. Dit feit nu is aanstonds duidelijk, wanneer wij in aanmerking nemen, dat de gevonden deviatie van het maximum der warmte van roodgloeiend platina gelegen is tusschen 39° 10′ en 39° 15′ (men zie de tabel op blz. 111) en dat alzoo de stralen, die van deze warmtebron hoofdzakelijk uitgaan, in periode veel meer overeenkomst vertoonen met de kenmerkende trillingen van waterdamp en van kooloxyde dan met die van kooldioxyde. Door waterdamp of door kooloxyde worden dus van gloeiend platina de *voornaamste* stralen verzwakt, terwijl kooldioxyde daarvan slechts stralen van geringere intensiteit tegenhoudt. Van de warmte der Bunsensche vlam daarentegen absorbeert kooldioxyde golvingen, die een minstens even belangrijk deel der totale straling uitmaken, als de golvingen welke door waterdamp of door kooloxyde worden opgenomen.

Wanneer het nu blijkt, dat koolzuur de straling der beide warmtebronnen ongeveer evenveel verzwakt, dan is het niet te verwonderen, dat de twee andere gassen de warmte van het platina in sterkere mate opnemen dan die van de Bunsensche vlam.

De waarneming van RÖNTGEN steunt tevens het vermoeden, dat het uitstralingsmaximum bij 39° 11′ 30″ toekomt aan kooloxyde.

Volgens een andere proef wordt de straling van een Leslieschen cubus door vochtige lucht niet, door kooldioxyde duidelijk merkbaar geabsorbeerd. Dit feit laat zich verklaren uit de omstandigheid, dat het uitstralingsmaximum van lampzwart op 100° C veel dichter bij de kenmerkende stralen van het koolzuur dan bij die van den waterdamp ligt. Hiermede schijnbaar in strijd is een latere waarneming van RÖNTGEN, volgens welke de warmte van een glazen (niet zwart gemaakte) kolf, gevuld met aniline op 182° C of met water op 100° C, door vochtige koolzuurvrije lucht sterker werd teruggehouden dan door droge koolzuurhoudende dampkringslucht. Maar in het spectrum dezer beide warmtebronnen is de energie zeer zeker anders verdeeld dan in dat van met lampzwart bedekt koper, zoodat de resultaten reeds om die reden niet onderling vergelijkbaar zijn, en bovendien is het koolzuurgehalte der dampkringslucht veel geringer dan het gehalte aan waterdamp bij 0° C.

RÖNTGEN vond, dat zonnewarmte noch door vochtige noch door koolzuurhoudende lucht merkbaar werd geabsorbeerd. Stralen, die in staat zijn waterdamp of koolzuur te verwarmen, komen dus in het zonlicht niet voor, althans niet meer in het zonlicht, zooals wij dat aan de oppervlakte der aarde ontvangen. Bezit het zonnespectrum oorspronkelijk wèl golvingen, die in periode overeenkomen met de trillingen van waterdamp en van koolzuur, dan zouden die stralen toch in de hoogere lagen van den dampkring reeds geabsorbeerd zijn.

De voornaamste invloed van deze absorptie op het zonnespectrum openbaart zich echter niet in het optreden

van de door LANGLEY, BECQUEREL en anderen gevonden koude banden; de door ons verkregen resultaten maken het veeleer waarschijnlijk, dat door de aanwezigheid van waterdamp en van koolzuur in de atmospheer het *einde* van het zonnespectrum bepaald wordt. In een verhandeling van LANGLEY [1]) lezen we:

„Ensuite, en me servant du réseau, j'ai déterminé par l'observation directe les longueurs d'onde de la région de chaleur solaire la plus récemment découverte, et j'ai montré qu'il existait une longueur qu'on n'avait pas soupçonnée, de $2^{\mu},7$, c'est-à-dire 27000 de l'échelle d'Angström. Ici la chaleur solaire cesse sensiblement et d'une façon relativement brusque, comme si elle était remplacée par une bande froide d'une étendue indéfinie. Je ne prétends pas affirmer qu'il n'existe absolument pas de chaleur au delà (à vrai dire, il y a quelques indications douteuses de chaleur au delà de ce point, comme je l'ai dit), mais que, s'il y en a, elle est à peu près infinitésimale."

Bij $2^{\mu},73$ nu ligt, zooals wij gezien hebben, het uitstralingsmaximum van waterdamp en wij hebben alle reden om te beweren, dat stralen met deze golflengte dus ook zeer sterk door den dampkring zullen worden geabsorbeerd. Golvingen van grootere lengte kunnen daarentegen weder de oppervlakte der aarde bereiken, en schijnen volgens LANGLEY ook werkelijk in het zonnespectrum voor te komen; doch met grond mogen wij verwachten, dat het nimmer gelukken zal — tenzij op zeer groote hoogten — daarin stralen aan te toonen, wier golflengte ongeveer $4^{\mu},57$ bedraagt, daar deze, indien zij al in de zonnewarmte aanwezig waren, door

[1]) Ann. de Ch. et de Phys. [6] IX. p. 441, déc. 1886.

het koolzuur van den dampkring zeer zeker zouden zijn teruggehouden.

---

d. DE GEDAANTE DER UITSTRALINGSKROMMEN.

Thans blijft nog een belangrijk punt ter bespreking over, een vraagstuk, dat ons nauw met de directe eigenschappen der moleculen en van den ether in aanraking moet brengen, maar waarvan de oplossing nog verre ligt.

Wanneer elke soort van deeltjes een bepaalde kenmerkende bewegingsperiode bezit, hoe is het dan mogelijk, dat een uit gelijksoortige moleculen opgebouwde stof een onafgebroken reeks van golvingen uitzendt, wier intensiteiten ter weerszijde van een maximum geleidelijk afnemen?

Wij kunnen ons van dit verschijnsel op twee principieel verschillende wijzen een voorstelling maken.

De eerste is, dat wij ons de trillingsperiode eener zelfde soort van deeltjes als absoluut constant denken, maar dat hunne voortgaande bewegingen de oorzaak zijn voor het optreden van stralen met grootere en met kleinere golflengte dan toekomt aan de stralen, die door een stilstaand deeltje worden uitgezonden.

Volgens de tweede voorstellingswijze is de kenmerkende trillingsperiode slechts een *gemiddelde* eigenschap der moleculen.

Beginnen wij met de opvatting te bespreken, volgens welke de afwijkingen van den eigenlijken trillingsduur slechts schijnbaar zijn.

Dit zouden wij ten eerste kunnen verklaren uit het principe van DOPPLER; maar de snelheid der rechtlijnig voortgaande beweging van gasdeeltjes is veel te klein,

om in aanmerking te komen ten opzichte van de voortplantingssnelheid der lichtstralen. Zelfs is het niet mogelijk aan te nemen, dat bij de ontmoetingen van twee deeltjes tijdelijk snelheden in het leven zouden worden geroepen, die de toepassing van DOPPLER's principe eenigszins vruchtbaar konden maken voor de verklaring van zoo groote verschillen met de gemiddelde golflengten als door ons zijn waargenomen.

Men kan zich echter ook denken, dat de trillende bewegingen eigenlijk rotaties zijn (waarbij men zich natuurlijk niet het molecuul kan voorstellen als een bol, draaiende om een as door zijn middelpunt, want zulk een beweging zou geen aanleiding kunnen geven tot een evenwichtsverstoring, die zich als transversale trilling in den ether voortplant; het molecuul kon echter een asymmetrisch stelsel zijn, zich bewegende om zijn zwaartepunt); dat de middenstof in de draaiende beweging wordt meegesleept, en dat zich zoo om ieder molecuul heen een soort van draaikolk vormt in den ether. Het gevolg hiervan zal dan wezen, dat een deeltje, hetwelk zijn eigenaardige periode bezit ten opzichte van het direct omringend medium, telkens komende binnen het vortexgebied van een ander deeltje, daarin met een zekere hoeksnelheid zal worden medegevoerd. Deze hoeksnelheid moet voor een stilstaand waarnemer de rotatiesnelheid van het eerste molecuul vermeerderen of verminderen, al naar gelang die beide draaiingen in denzelfden of in tegengestelden zin plaats hebben; en een dergelijke schijnbare verandering zal ook worden waargenomen bij de rotatiesnelheid van het tweede deeltje, daar dit eveneens in het vortexgebied van het eerste gekomen is. Bij elke ontmoeting van twee deeltjes heeft op deze wijze een schijnbare verlenging of verkorting van periode plaats, die

des te aanzienlijker zijn zal, naarmate de moleculen korter bij elkander komen. Maar ook dit mechanisme brengt bij nadere beschouwing groote bezwaren mee voor onze voorstelling. Het optreden bijvoorbeeld van golflengten, die half zoo groot of dubbel zoo groot zijn als de gemiddelde, kan er onmogelijk door verklaard worden.

Gaan wij over tot de tweede opvatting, volgens welke de kenmerkende trillingsperiode een *gemiddelde* eigenschap is van de moleculen.

Hierbij zullen we in de eerste plaats bespreken het denkbeeld, dat die gemiddelde periode een grootheid zijn zou, hoofdzakelijk bepaald door de snelheid en door het aantal der deeltjes van eenzelfde soort, die binnen een zekere ruimte bij elkander zijn; gelijk dit volgens de kinetische gastheorie het geval is met de gemiddelde weglengte der moleculen. Men zou zich nl. kunnen denken, dat de warmtetrillingen van een gas niet anders waren, dan de heen en weer gaande bewegingen, waarin de deeltjes geraken, doordien zij herhaaldelijk tegen elkander botsen en dan teruggeworpen worden. Maar enkele getallen zullen ons overtuigen van de onhoudbaarheid dezer voorstelling.

Stellen wij de voortplantingssnelheid der transversale ethertrillingen op 300 400 000 M. per sec. en de golflengte van de door koolstofdioxyde in hoofdzaak uitgezonden stralen op $4^{\mu},57$, dan volbrengen de moleculen van dat gas

$$\frac{300\,400\,000}{0{,}000\,004\,57} = 65\,700\,000\,000\,000$$

trillingen per secunde.

Volgens de kinetische gastheorie echter bedraagt het gemiddelde aantal stooten der koolzuurmoleculen per sec. slechts 5510 000 000 [1]), waaruit wij zien, dat het

[1]) O. E. MEYER, Die kinetische Theorie der Gase, p. 142 (1877).

tijdsverloop tusschen twee botsingen duizenden malen grooter is dan de trillingsduur. De gemiddelde periode der zigzagbewegingen is derhalve een grootheid van een geheel andere orde dan de duur der warmtetrillingen. In den tijd, waarin een koolzuurmolecuul de gemiddelde weglengte aflegt, volbrengt het 11923 trillingen. De kenmerkende vibratieperiode moet daarom wel onmiddellijk eigen zijn aan het molecuul; zij kan niet in sterke mate afhankelijk wezen van het aantal botsingen per tijdseenheid. Ook de waarnemingen omtrent emissie en absorptie leiden tot deze gevolgtrekking. Immers onder welke omstandigheden van dichtheid en temperatuur wij de lichamen ook onderzoeken, zoolang de deeltjes gelijksoortig blijven, vertoonen zij steeds eenzelfde bepaalde trillingsperiode met de grootste intensiteit.

Verder zou de kenmerkende periode een gemiddelde eigenschap kunnen zijn in *dien* zin, dat de trillingsduur wel onveranderlijk eigen was aan elk individueel molecuul, doch dat de moleculen eener zelfde stof niet aan elkander gelijk waren. Wat wij de hoofdperiode genoemd hebben, zou dan slechts wezen de trillingstijd van die moleculen, welke het talrijkst vertegenwoordigd zijn. Maar tegen de hypothese dat de moleculen eener zelfde stof zóó belangrijk in eigenschappen zouden verschillen als het geval moet wezen met deeltjes, die in kenmerkende trillingsperiode zeer sterk van elkaar afwijken, bestaan ernstige bezwaren zoowel op physisch als op chemisch gebied. En indien wij analogie mogen onderstellen tusschen de verschijnselen, welke zich voordoen in het lichtgevend deel van het spectrum en die, welke thuisbehooren in het onzichtbaar warmtespectrum, dan levert ook de spectraalanalyse argumenten tegen de genoemde voorstelling. Immers wanneer men een gas, dat bij een

geringe spanning en zeer sterke verhitting een lijnspectrum geeft (zooals bijv. waterstof in een Geisslersche buis), onder groote drukking doet gloeien, vertoonen de lijnen zich breed en naar weerszijde uitvloeiend, zóó zelfs, dat zij te zamen een continu spectrum kunnen leveren. Nemen we nu aan, dat hetgeen geldt voor stralen, die we ons kunnen denken als uitgaande van de monaden, waaruit het waterstofatoom is opgebouwd, ook van toepassing is op de langere golvingen, door trillende moleculen uitgezonden, dan is het waarschijnlijk, dat de uitstralingskrommen in het donker spectrum, gelijk wij die hebben waargenomen, steiler zullen worden en meer tot „monochronisme" zullen naderen, wanneer de vlammen branden in een omgeving, waar de spanning geringer is. Het experiment zal in deze moeten beslissen; beantwoordt de uitkomst aan de verwachting, is werkelijk bij geringer drukking de verdeeling der intensiteiten van de verschillende stralen zoodanig gewijzigd, dat de golvingen met middelbare periode daarbij naar verhouding veel sterker vertegenwoordigd zijn, dan pleit dit zeer tegen de meening, dat de verscheidenheid der stralen, uitgaande van eenzelfde gas, haar oorzaak zou hebben in eene blijvende verscheidenheid zijner moleculen. Want ware dit laatste het geval, zoo moest de verhouding der intensiteiten onafhankelijk zijn van de dichtheid.

Eindelijk bestaat nog de mogelijkheid, dat de kenmerkende periode die is, welke elk molecuul eener stof zou bezitten, indien het niet door uitwendige oorzaken — bijv. door de ontmoetingen met andere moleculen — telkens in zijn bewegingen gestoord werd. Deze storingen zullen van zoodanigen aard moeten zijn, dat de periode van een molecuul, zoo vaak het in de nabijheid van een ander komt, al naar omstandigheden blijvend wordt ver-

lengd of verkort, en dat die beide gevallen zich met gelijke waarschijnlijkheid voordoen (want de uitstralingskrommen zijn nagenoeg symmetrisch). Voor zoo ver onze tegenwoordige kennis van het warmtespectrum reikt, bestaat tegen deze opvatting geen bezwaar. Ze verklaart de tot nu toe waargenomen verschijnselen op bevredigende wijze, maar dient natuurlijk nog aan doelmatig gekozen proeven te worden getoetst.

Het is niet van belang ontbloot, op te merken, *dat aan de eischen, die wij aldus volgens onze waarnemingen genoodzaakt zijn te stellen aan de bewegingen van de kleinste deeltjes der lichamen, juist schijnt te worden voldaan door de bewegingen, welke moeten voorkomen bij vortexringen.* Wanneer deze overeenkomst nader bevestigd wordt, is zij zeer zeker merkwaardig, want de hypothese, dat de moleculen vortexringen zijn, maakt het onnoodig onderstellingen te opperen aangaande den aard der krachten, die we aan de deeltjes hadden moeten toekennen, om verklaring te geven van de noodzakelijke, maar verre van eenvoudige stootverschijnselen, waarbij de moleculen telkens van trillingsperiode veranderen. De invloed toch, dien *vortexringen* op elkander uitoefenen, is volgens zuiver cinematische ontwikkeling af te leiden uit eenige grondstellingen der hydrodynamica. Bij deze heeft men wel is waar dynamische beschouwingen noodig om aan te toonen, dat een vortexring, ondanks zijn verplaatsing, steeds uit dezelfde ethermassa blijft bestaan, maar verder treden geen krachten in de redeneering meer op.

Een uitvoerige behandeling van het vraagstuk der vortexbeweging moet wegens den zeer grooten omvang der daartoe vereischte rekeningen hier achterwege blijven. Ik kan volstaan met dienaangaande te verwijzen naar

J. J. THOMSON, Motion of Vortex Rings, London 1883, en wil slechts in een paar korte trekken sommige uitkomsten dier theorie aangeven, welke in verband kunnen worden gebracht met de verschijnselen, waargenomen in het warmtespectrum van gassen.

Wanneer een cirkelvormige vortexring aan zich zelf is overgelaten, behoudt hij zijn oorspronkelijke grootte en beweegt hij zich voort in een richting, loodrecht op zijn vlak, met de constante snelheid

$$\frac{m}{2\,\pi\,a}\,(log\,\frac{8a}{e} - 1),$$

waarin m de „sterkte" van den vortex beduidt, a den gemiddelden radius van den ring, e den straal der doorsnede van den ring.

Men onderstelt, dat e zeer klein is ten opzichte van a.

Door de eene of andere uitwendige oorzaak kan van zulk een vortexring de cirkelvormige gedaante worden gestoord; hij maakt dan slingeringen om den evenwichtsvorm, wier periode wordt uitgedrukt door

$$\frac{2\pi}{\sqrt{\{\,n^2\,(n^2-1)\,\}}} \cdot \frac{4\pi\,a^2}{m\left(log\,\frac{64\,a^2}{e^2} - 4\,f\,(n) - 1\right)},$$

waarin

$$f\,(n) = 1 + {}^1/_3 + {}^1/_5 + \ldots\ldots \frac{1}{2n-1},$$

terwijl n een getal is, dat in verband staat met den aard der vormverandering en aanwijst, hoeveel gelijktijdige uitstulpingen de cirkel verkrijgt. Ingeval bijv. de vervorming elliptisch is, heeft men $n = 2$. Men ziet, dat de periode aangroeit met den straal van den ring.

Komen twee vortexringen in elkaars nabijheid, dan is daarvan het gevolg 1^0 dat de oorspronkelijke richting der voortgaande beweging van beide gewijzigd wordt;

2^0 dat de straal van den eenen ring een vermeerdering, die van den anderen een vermindering ondergaat; 3^0 dat de gedaante van beide wordt gestoord, zoodanig, dat zij in een om den cirkelvorm slingerende beweging geraken.

De grootte en de zin der verandering van bewegingsrichting, zoowel als de grootte en de zin der verandering van den straal, hangen op vrij ingewikkelde wijze samen met allerlei betrekkingen tusschen de oorspronkelijke bewegingsrichtingen, de snelheden, de sterkten der vortexringen en ook met de vraag, welke van beide het eerst 't punt passeert, waar de banen het korst bij elkander komen.

Wanneer de straal van den eenen ring toeneemt, zal steeds die van den anderen afnemen; als bijzonder geval kan het ook voorkomen, dat beide hun oorspronkelijke grootte behouden.

Wat de trillingen betreft, die het gevolg zijn van de ontmoeting, hiervan wordt voor het geval dat de banen elkaar snijden bewezen, dat hare perioden, zoodra de vortexringen weder buiten elkanders invloed zijn gekomen, juist overeenstemmen met de perioden der elliptische vervormingen, aan die vortexringen eigen wanneer zij zich vrij bewegen.

Denken wij ons nu een zeer groot aantal volkomen aan elkander gelijke vortexringen over een zekere ruimte gelijkmatig verdeeld, dan zullen de ontmoetingen ten gevolge hebben, dat weldra de ringen niet meer aan elkaar gelijk zijn; sommige worden grooter, andere kleiner, totdat er een bewegelijk evenwicht geboren wordt, en alle zullen trillende bewegingen uitvoeren, waarvan de periode samenhangt met hunne respectieve grootte. Het is tevens te verwachten, dat wanneer de ringen met een andere dichtheid over de ruimte waren

verbreid, de verdeeling der verschillende grootten — en dus der trillingsperioden — ook eene andere zou zijn.

Zooals men ziet, schijnen wij hier al de voorwaarden te hebben voor het optreden van emissiespectra, gelijk wij ze hebben waargenomen.

Alvorens men echter in de gedaante der uitstralingskrommen een bewijsgrond kan zien voor de deugdelijkheid der vortexatoomtheorie, zou vooral nog moeten worden onderzocht, of de verdeeling der absolute intensiteiten over het emissiespectrum van een gas op dezelfde wijze samenhangt met de dichtheid van het gas, als de energieverdeeling over de verschillende trillingen der vortexringen afhankelijk is van de dichtheid hunner verspreiding. Hiertoe ware het noodzakelijk, op de theorie der vortexringen met behulp van de waarschijnlijkheidsrekening een gastheorie te bouwen. In het aangehaalde werk van J. J. THOMSON is daarmede nog slechts een begin gemaakt. Zulk een theorie zou o. a. verklaring moeten geven van het feit, dat de kenmerkende trillingsperiode van een molecuul dezelfde blijft tusschen *zeer* wijde grenzen van temperatuur en dat de moleculen bij vermindering van het aantal ontmoetingen alle zullen naderen tot eene gemiddelde grootte, waarbij de hoofdtrillingsperiode die is, welke wij de kenmerkende genoemd hebben. [1])

---

[1]) De gevonden trillingsperioden stellen ons in staat, bij benadering de absolute grootte te vinden, die aan vortexringen zou moeten toekomen, wanneer deze de moleculen uitmaakten van een gas. Wij kunnen dan die waarde vergelijken met den straal der werkingsspheer, welke volgens de kinetische gastheorie wordt berekend uit de afwijkingen van de wet van BOYLE.

Volgens de formule op blz. 133 wordt de trillingsduur τ voor een elliptische slingering van een vortexring gegeven door

$$\tau = \frac{2\pi}{2\sqrt{3}} \cdot \frac{4\pi a^2}{m\left(\log \frac{64\,a^2}{e^2} - 4f(2) - 1\right)} = \frac{\pi}{\sqrt{3}} \cdot \frac{2\pi a^2}{m\left(\log \frac{8a}{e} - 3^1/_6\right)}$$

Vooral sedert JACQUES en LANGLEY de spectrale verdeeling deden kennen van de warmte, welke door sommige vaste lichamen wordt uitgezonden, heeft men er naar gestreefd, een verklaring te vinden voor de gedaante dier uitstralingskrommen. LECHER [1]), v. KÖVESLIGETHY [2]) en WLADIMIR MICHELSON [3]) hielden zich bezig met dit vraagstuk.

Eerstgenoemde kwam tot het besluit, dat ieder lichaam bij voldoende dikte volkomen dezelfde straling zou uit-

---

De snelheid der voortgaande beweging is

$$V = \frac{m}{2\pi\, a}\left(log\,\frac{8a}{e} - 1\right).$$

Onderstellen wij nu, dat e zeer klein is ten opzichte van a, dan kunnen we zonder groote fout schrijven

$$\tau = \frac{\pi}{\sqrt{3}} \cdot \frac{a}{V} = \frac{0{,}907 \times 2a}{V},$$

$$V\tau = 0{,}907 \times 2a,$$

d. i.: in den trillingstijd τ legt de vortexring af een weg $= 0{,}907 \times$ zijn diameter. Daar, volgens blz. 129, voor kooldioxyde het aantal trillingen per secunde

65 700 000 000 000

bedraagt, zou een vortexring met de periode van kooldioxyde in een secunde een weg afleggen, gelijk aan

59 600 000 000 000 × den diameter.

De gemiddelde snelheid der koolzuurmoleculen is onder gewone omstandigheden 375 M. of 375000 m.M. per secunde, zoodat we voor de absolute grootte van den diameter vinden

$$\frac{375\,000}{59\,600\,000\,000\,000} = 0{,}000\,000\,006 \text{ m.M.}$$

VAN DER WAALS berekende uit de waarde der constante b zijner formule den straal van de werkingsspheer der koolzuurmoleculen, en vond daarvoor

0,000 000 18 m.M.

Indien dus de moleculen van het kooldioxyde vortexringen zijn, dan naderen deze elkander gemiddeld slechts tot op een afstand, welke 30 maal grooter is dan hun middellijn.

[1]) LECHER, Wied. Ann. XVII, p. 477, 1882.

[2]) V. KÖVESLIGETHY, Mathematische spektralanalyse, Abh. d. Ungar. Akad. d. Wiss. 12 N° 11, of, verkort, Astr. Nachr. N°. 2805. De oorspronkelijke verhandeling kon ik niet in handen krijgen; het uittreksel in de Astr. Nachr. is zoo weinig bevredigend, dat ik de beteekenis dier theorie zelfs niet kan gissen.

[3]) WLADIMIR MICHELSON, Journal de Phys [2] VI, p. 467, 1887.

zenden als een zwart lichaam, indien er geen inwendige terugkaatsing plaats had aan het grensvlak; verschillen in het stralingsvermogen der lichamen schreef hij toe aan de verscheidenheid van hun reflexievermogen. Wanneer het emissievermogen eener stof verandert met de temperatuur, kan volgens hem de oorzaak hiervan slechts gelegen zijn in de veranderlijkheid van het reflexievermogen met de temperatuur.

Michelson onderstelt, dat elk atoom zich als het ware vrij beweegt binnen een bolvormige elastische omhulling, door welke het telkens wordt teruggekaatst; dat het zóó eenige malen wordt heen en weer geworpen, en vervolgens van snelheid verandert door een niet symmetrische werking van de omringende atomen. Volgens hem zijn derhalve de trillingen, aan welke de warmtestralen hun ontstaan te danken hebben, niet anders dan de heen en weer gaande bewegingen, die een atoom uitvoert, doordien het telkens door de andere atomen afgestooten wordt. Steunende op de begrippen der waarschijnlijkheidsrekening, komt hij nu tot een formule, waardoor de intensiteit eener enkelvoudige straling van de golflengte λ wordt uitgedrukt in die golflengte en in de absolute temperatuur van de bron. De kromme lijn, die voor een zekere waarde van de temperatuur ϑ de intensiteiten doet kennen in functie van λ, komt in vorm vrij goed overeen met die, welke door Langley is gevonden als uitstralingskromme voor lampzwart. De plaats der maximumordinaat vindt Michelson afhankelijk van de temperatuur, en wel zóó, dat voor elk lichaam de golflengte van de maximumordinaat omgekeerd evenredig is aan den vierkantswortel uit de absolute temperatuur der bron.

Bij geen der genoemde theorieën is acht geslagen op

het feit, dat aan elk molecuul een eigenaardige trillingsperiode toekomt; zij kunnen dus onmogelijk algemeen waar zijn. Het schijnt mij toe, dat men geen bevredigende verklaring zal kunnen vinden voor den vorm der uitstralingskrommen van vaste lichamen, zoolang niet onze kennis van de zonder twijfel eenvoudiger moleculairbeweging der gassen op hechte grondslagen rust.

---

e. DE VERMOEDELIJKE BETEEKENIS VAN HET WARMTESPECTRUM VOOR DE THEORETISCHE CHEMIE.

Ongetwijfeld staan de trillingstijden van de moleculen der verschillende stoffen in nauw verband met hare verdere physische en chemische eigenschappen; maar ik ben er niet in geslaagd, een dergelijken samenhang met zekerheid aan te wijzen [1]).

---

[1]) Een enkele poging, waaraan ik trouwens zelf niet veel waarde hecht, moge hier vermeld worden, omdat de uitkomst van het eerst later verschenen onderzoek van WEBER (zie blz. 21) in overeenstemming was met hetgeen ik volgens die beschouwing verwachtte.

Toen ik, overeenkomstig het oorspronkelijk voorstel van Prof. BUYS BALLOT, van plan was, de uitstraling van verschillende vaste lichamen bij verschillende temperaturen na te gaan, scheen het mij wenschelijk toe, vooraf eens te overwegen welke elementen waarschijnlijk veel van elkaar zouden afwijken in den aard der golvingen, die zij uitzenden. Deze vraag leidde tot de volgende redeneering, waarvan sommige grondslagen wel is waar hypothetisch zijn, doch die ook slechts bestemd was om als richtsnoer te dienen bij de proefneming.

De energie eener eenvoudige slingerbeweging wordt bepaald door de massa m van het bewegend deeltje, de amplitude r en den trillingstijd τ, volgens de formule

$$E = c \frac{r^2 m}{\tau^2}.$$

Strekken we dit uit over een zeer groot aantal gelijksoortige deeltjes, die zich in gesloten banen bewegen, dan zal dezelfde vergelijking geldig blijven voor de *gemiddelde* energie van een deeltje, wanneer namelijk r de gemiddelde amplitude, τ den gemiddelden trillingsduur beteekent. c is een constante, afhangende van den gemiddelden baanvorm.

De gegevens zijn trouwens nog te gering in aantal en te onnauwkeurig. Wanneer echter ook voor eenige *elementen*, en wel liefst voor hunne atomen, de trillingstijden zullen zijn opgespoord, en wanneer deze mochten

---

Daar nu, als gevolg der wet van DULONG en PETIT, de atomen van *verschillende* elementen bij eenzelfde temperatuur *gelijke* energie bezitten, hebben we voor twee heterogene deeltjes

$$c_1 \cdot \frac{r_1^2 \, m_1}{\tau_1^2} = c_2 \cdot \frac{r_2^2 \, m_2}{\tau_2^2},$$

of, aannemende dat de gemiddelde baanvorm voor beide dezelfde is,

$$\tau_1^2 : \tau_2^2 = r_1^2 \, m_1 : r_2^2 \, m_2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Zoowel de warmtecapaciteit C_p als de uitzettingscoëfficient groeien aan bij toeneming van temperatuur; maar de uitzettingscoëfficient sterker. Onderstellen wij, als eerste benadering, dat met gelijke toeneming van energie gelijke uitzetting gepaard gaat, dan zou daaruit volgen, dat de totale energie bij de absolute temperatuur T ten naaste bij evenredig was aan de geheele volumevermeerdering, die het lichaam ondergaat als het van het absolute nulpunt op de temperatuur T komt. Daar volgens proeven van RÜHLMANN en EDLUND voor vaste lichamen, C_p en C_v slechts weinig van elkaar verschillen, zullen wij de kinetische energie evenredig stellen aan de geheele toegevoerde energie. Ook de kinetische energie is derhalve evenredig aan de totale volumevermeerdering.

Het atoomvolume bij 0^0 C is $\frac{m}{D}$, wanneer D dichtheid voorstelt bij 0^0. Op de temperatuur t zal dit volume bedragen

$$\frac{m}{D}(1 + 3\alpha t) = \frac{m}{D}(1 - 273 \times 3\alpha + 3\alpha T),$$

als men door T de absolute temperatuur, door α den lineairen uitzettingscoëfficient aanduidt. De totale door warmte veroorzaakte aangroeiing van het volume is dus

$$\frac{m}{D} \cdot 3\alpha T$$

en deze is evenredig aan de kinetische energie. Wij stellen haar eenvoudig evenredig aan r^2, omdat voor eenzelfde lichaam bij stijging van temperatuur slechts de *amplitude* verandert wanneer wij aannemen, dat de *periode* een constante grootheid is, die de deeltjes kenmerkt. Derhalve

$$\frac{m}{D} \cdot 3\alpha T = f r^2.$$

(Waarschijnlijk zou r hier moeten voorkomen tot een macht, gelegen tusschen 2 en 3, omdat het volume eigenlijk sterker toeneemt dan de energie).

Voeren wij nu de hypothese in, dat bij benadering de uitzetting slechts bepaald wordt door de ruimte, die de deeltjes voor hunne warmtebeweging noodig hebben,

blijken op eenvoudige wijze samen te hangen met de atoomgewichten, dan zou hiermede weer een groote aanwinst gedaan zijn voor het materiaal, nedergelegd in

---

en dat zij dus *alleen* van de amplitude afhangt, dan is f voor alle stoffen een gemeenschappelijke constante grootheid, en wij mogen voor twee stoffen bij eenzelfde temperatuur stellen:

$$r_1^2 : r_2^2 = \frac{m_1}{D_1} \cdot 3\alpha_1 : \frac{m_2}{D_2} \cdot 3\alpha_2.$$

Deze betrekking in (1) substitueerende, vinden we

$$\tau_1^2 : \tau_2^2 = \frac{m_1^2 \cdot 3\alpha_1}{D_1} : \frac{m_2^2 \cdot 3\alpha_2}{D_2}$$

$$\tau_1 : \tau_2 = m_1 \sqrt{\frac{3\alpha_1}{D_1}} : m_2 \sqrt{\frac{3\alpha_2}{D_2}}.$$

De gemiddelde trillingsduur der atomen van verschillende elementen — en daarmede de golflengte van de door die elementen in hoofdzaak uitgezonden stralen — zou derhalve evenredig zijn aan de waarde der uitdrukking:

$$m \sqrt{\frac{3\alpha}{D}}.$$

Elementen.	$m\sqrt{\frac{3\alpha}{D}}$	Elementen.	$m\sqrt{\frac{3\alpha}{D}}$	Elementen.	$m\sqrt{\frac{3\alpha}{D}}$
Silicum	0,0868	Palladium . .	0,1806	Cadmium . .	0,3686
Rhodium . . .	0,1155	Osmium . . .	0,1833	Zwavel	0,3929
Kobalt	0,1185	Iridium. . . .	0,1867	Bismuth . . .	0,4191
IJzer.	0,1213	Platina. . . .	0,2176	Indium. . . .	0,4888
Nikkel.	0,1225	Zink	0,2303	Selenium . .	0,5228
Arsenicum . .	0,1318	Zilver. , . . .	0,2551	Tellurium . .	0,5249
Aluminium . .	0,1407	Antimoon . .	0,2619	Lood.	0,5696
Koper.	0,1510	Goud.	0,2963	Tallium . . .	0,5723
Ruthenium . .	0,1615	Natrium . . .	0,3388	Kalium . : .	0,6850
Magnesium . .	0,1642	Tin	0,3603		

Ik ben er niet toe gekomen, deze verwachtingen aan eigen waarnemingen te toetsen; maar hetgeen WEBER gevonden heeft is er mede in overeenstemming. Volgens bedoeld onderzoek toch zendt ijzer het eerste licht uit bij 377° C., platina bij 396° C., goud bij 417° C. Wanneer nu het maximum der warmtestraling voor die drie metalen in de genoemde volgorde meer naar den kant der grootere golflengten ligt — zooals blijkens de tabel het geval moet zijn — dan is het ook duidelijk, dat in dezelfde volgorde de temperatuur hooger zal wezen, op het oogenblik dat de lichtgevende stralen voldoende sterkte verkrijgen om zichtbaar te worden.

het periodisch systeem der chemische elementen, zooals dat door NEWLANDS, MENDELEEFF, LOTHAR MEYER en anderen is ontwikkeld. Wellicht staat de periodiciteit der eigenschappen in nauw verband met betrekkingen tusschen de trillingstijden der atomen, en krijgt op die wijze de door NEWLANDS gebezigde uitdrukking: «law of octaves» een meer tastbare beteekenis.

Maar dit zijn speculaties, die voorloopig als ontijdig kunnen worden terzijde gesteld. Zeer waarschijnlijk is het echter, dat men de trillingsperioden niet zal kunnen missen bij het opstellen van een kinetische affiniteitstheorie.

En de behoefte aan zulk een theorie doet zich, ook op zuiver scheikundig gebied, meer en meer gevoelen.

De omkeerbaarheid van vele chemische processen bij verandering van den algemeenen bewegingstoestand in een mengsel van verschillende stoffen — gelijk die veroorzaakt kan worden door toevoer van warmte, licht, electriciteit, of ook door wijziging van de betrekkelijke hoeveelheden, waarin de op elkaar inwerkende bestanddeelen aanwezig zijn — zal waarschijnlijk slechts duidelijk kunnen worden uit het oogpunt eener kinetische affiniteitstheorie. De belangrijke waarnemingen van THOMSEN omtrent de bindingswarmte van zuren en bases, en die van OSTWALD aangaande de verandering welke het volume en het lichtbrekend vermogen ondergaan bij het samenbrengen van zuren en bases in verdunde oplossingen, leiden tot de gevolgtrekking, dat de verschijnselen, gepaard gaande met de vorming van zouten, opgebouwd zijn uit twee summanden: het eene *slechts* van het zuur, het andere *slechts* van de basis afhankelijk. Deze verschijnselen kunnen dus niet worden beschouwd als gevolgen eener *affiniteit*, die, gelijk het woord uitdrukt, zou moeten bestaan in een *weerkeerige* betrekking tusschen

de zich verbindende radicalen. Wij zijn integendeel genoodzaakt, aan de affiniteit te ontnemen het begrip van eene potentieele energie, welke beheerscht zou worden door eigenaardige aantrekkingen tusschen de verschillende atomen en die bij scheikundige vereeniging gedeeltelijk in actueele zou overgaan. Elk atoom en elk complex van atomen schijnt een zekere hoeveelheid *eigen* energie te bezitten, welke alleen van zijn aard en van de temperatuur afhankelijk is; bij chemische inwerking gaat een deel van die energie als warmte over op de omgeving of wordt als arbeid verbruikt voor volumeverandering, enz.; maar de affiniteit werkt hierbij slechts als een omstandigheid, die het plaats hebben van de scheikundige werking mogelijk maakt.

Het ligt voor de hand, een dergelijke omstandigheid te zoeken in betrekkingen tusschen de afmetingen der deeltjes, tusschen de hoeveelheden eigen energie die zij bezitten, of tusschen de perioden hunner kenmerkende bewegingen.

STELLINGEN.

STELLINGEN.

I.

De studie van het warmtespectrum zal belangrijke diensten bewijzen aan de theoretische chemie.

II.

Het onderzoek naar de absorptie, door de stoffen in verschillende aggregatie-toestanden op het warmtespectrum uitgeoefend, belooft een goed hulpmiddel te zijn om te geraken tot de kennis van den moleculairen toestand der vloeistoffen en der vaste lichamen.

III.

De theorie, volgens welke de warmtegeleiding geheel wordt teruggebracht tot straling, is onhoudbaar.

IV.

Bij de microscopie der toekomst zal men voornamelijk gebruik maken van ultra-violette stralen. De beelden

zullen worden zichtbaar gemaakt door photographie of door fluorescentie.

V.

De gevoeligheid van photometers en van polarimeters kan aanmerkelijk worden verhoogd door gebruik te maken van de photographie.

VI.

De beste polariscoop is die van PICKERING.

VII.

In vele opzichten beter dan de gebruikelijke methoden om extrastroomen aan te toonen en te meten is die, waarbij de inductieklos in een der vertakkingen van de Wheatstonesche combinatie is geplaatst.

VIII.

De chemie heeft behoefte aan een kinetische affiniteitstheorie.

IX.

Er bestaan geen verzadigde verbindingen.

X.

Bij verbranding van zwavelkoolstof wordt koolstofoxysulphide als tusschenproduct gevormd.

XI.

De hypothese van LOTHAR MEIJER (Die Mod. Theor. d. Ch. p. 113), dat bij lage temperaturen de koolstof zou bestaan uit afzonderlijke atomen C = 11,97, bij hoogere daarentegen uit atomen, wier gewicht $^1/_2$, $^1/_3$ enz. van deze waarde bedraagt, is hoogst onwaarschijnlijk.

XII.

De zoogenaamde „Pyramidal-Geschiebe" hebben hunne gedaante te danken aan de werking van gletschers.

XIII.

Het eindigen van het zonnespectrum bij $2^{\mu},7$ is toe te schrijven aan de absorbeerende werking van den waterdamp der atmospheer.

XIV.

De dampkrings-electriciteit heeft haren oorsprong in de beweging van de aardoppervlakte ten opzichte van den wereldether.

XV.

Het is onwaarschijnlijk, dat aan de beweging van den wereldether een snelheidspotentiaal toekomt.

XVI.

De aberratie van het licht is nog niet volledig verklaard.

XVII.

MICHELSON en MORLEY hebben geen recht, in de uitkomst hunner proeven (Phil. Mag. [5] 24 p. 449) omtrent de medevoering van den ether door de aarde bij hare beweging om de zon, een argument te zien tegen de theorie van LORENTZ.

XVIII.

De bepaling van de parallaxis der zon, afgeleid uit de door MICHELSON aangegeven waarde voor de snelheid van het licht en de door NYRÉN gevonden aberratie-constante, is meer te vertrouwen dan die, welke voortvloeit uit de waarneming der Venus-overgangen.

XIX.

De photographie belooft meer voor de bepaling van de parallaxes der vaste sterren, dan de micrometer- of heliometermetingen tot nog toe hebben kunnen opleveren.

XX.

De bezwaren, door VELTMANN geopperd tegen de verhandeling van HELMHOLTZ: „Ueber Integrale der hydrodynamischen Gleichungen, welche den Wirbelbewegungen entsprechen," zijn meerendeels ongegrond.

XXI.

Van de verschillende hypothesen, die men gevormd heeft ter verklaring van de eigenschappen der atomen, verdient de vortexatoomtheorie het meest de aandacht.

XXII.

De beoefening van de leer der quaternions, hoewel belangrijk uit een mathematisch oogpunt, zal in het algemeen weinig voordeel brengen aan hen, voor wie de wiskunde hulpwetenschap is.

XXIII.

Het is van groot belang, bij de studie der functiën uit te gaan van hare historische ontwikkeling.

XXIV.

„Die *Einbildungskraft* wird zum mächtigsten Hülfsmittel des Physikers, wenn er durch geduldig gesammelte Kenntnisse ihr Nahrung zuführt und sie durch die mitarbeitende Vernunft beschränkt und leitet."

(Fyndall, Fragmente aus den Naturwissenschaften.)

INHOUD.

Bladz.

INLEIDING 1

EERSTE HOOFDSTUK. Historisch overzicht 7

a. Het ultraroode zonnespectrum en de eerste golflengtebepalingen van donkere warmtestralen . . . 7

b. De spectrale verdeeling der warmte van aardsche bronnen 19

TWEEDE HOOFDSTUK. Beschrijving der gebruikte toestellen 40

a. De bolometer 41

b. De compensatie-weerstanden 47

c. De galvanometer 50

d. De batterij en de hoofdstroom 57

e. De spectrometer 58

f. De steenzoutpraeparaten. 62

g. Overzicht van de opstelling der instrumenten . . 65

DERDE HOOFDSTUK. Waarnemingen 68

a. Algemeene opmerkingen over de waarnemingen. . 68

b. Onderzoek der warmtespectra van eenige vlammen. 74

1. De Bunsensche vlam en de vlammen van waterstof en van kooloxyde 74
2. De gewone lichtgevende gasvlam 77
3. De vlammen van zwavelkoolstof, van zwavel en van zwavelwaterstof 79
4. Waterstof, brandend in tegenwoordigheid van chloor en van broomdamp 87

Bladz.

5. De cyaanvlam en de vlam van kooloxyd in zuurstof. 94
6. De vlam van phosphorwaterstof 101

c. Iets over den aard der warmte, door vaste lichamen uitgestraald, en over het selectief absorptievermogen van water. 106

VIERDE HOOFDSTUK. Gevolgtrekkingen en theoretische beschouwingen 114

a. De directe uitkomsten van het onderzoek. . . . 115

b. De kenmerkende trillingsperioden der moleculen van eenige gassen 117

c. Eenige waarnemingen van RÖNTGEN en van LANGLEY, beschouwd in verband met de door mij verkregen resultaten 123

d. De gedaante der uitstralingskrommen 127

e. De vermoedelijke beteekenis van het warmtespectrum voor de theoretische chemie 138

STELLINGEN 145

Fig. 1.

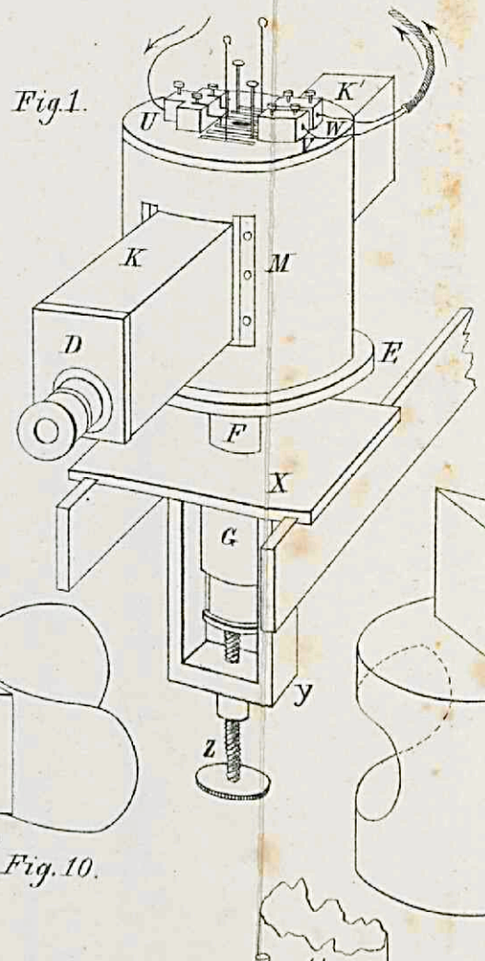


Fig. 10.

Fig. 9.

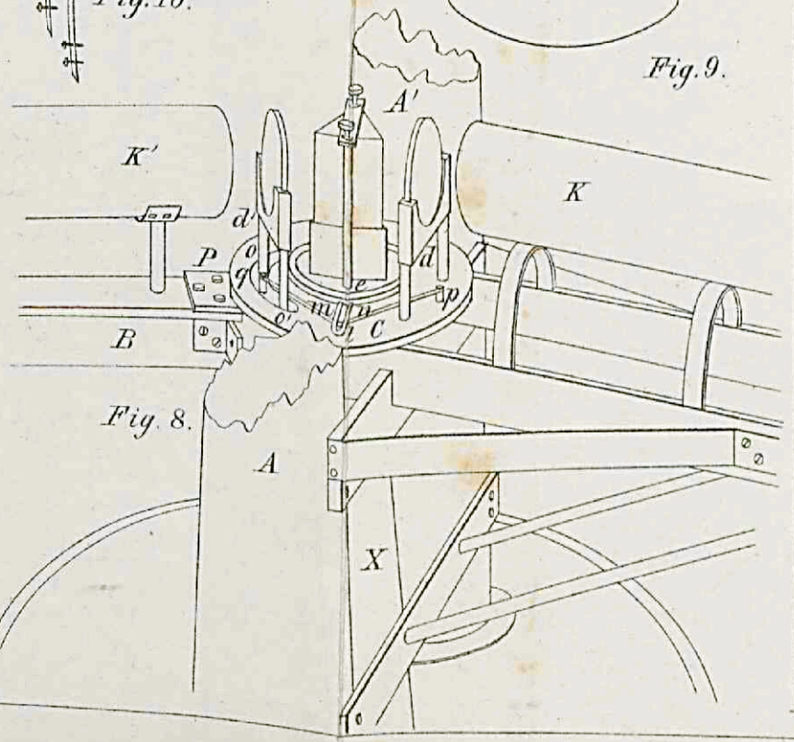


Fig. 8.

Fig. 2.

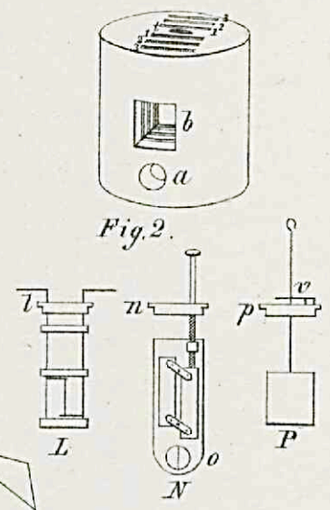


Fig. 3.

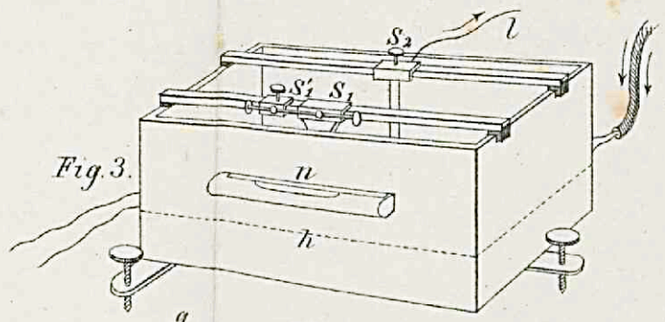


Fig. 4.

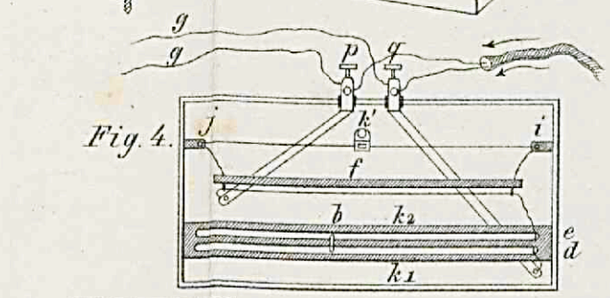


Fig. 5.

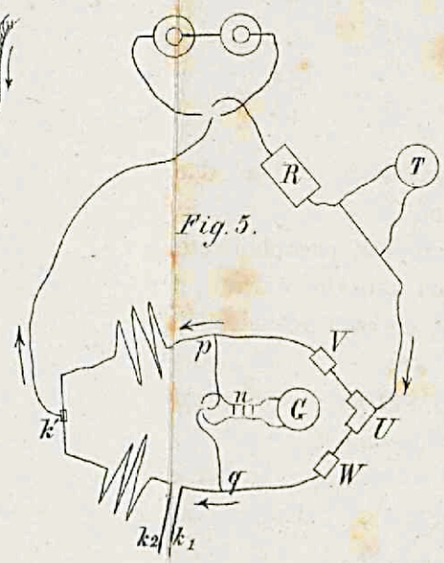


Fig. 6.

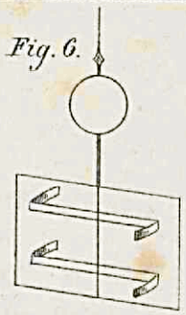


Fig 7.

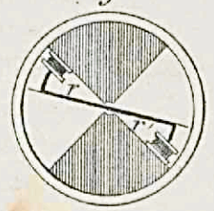
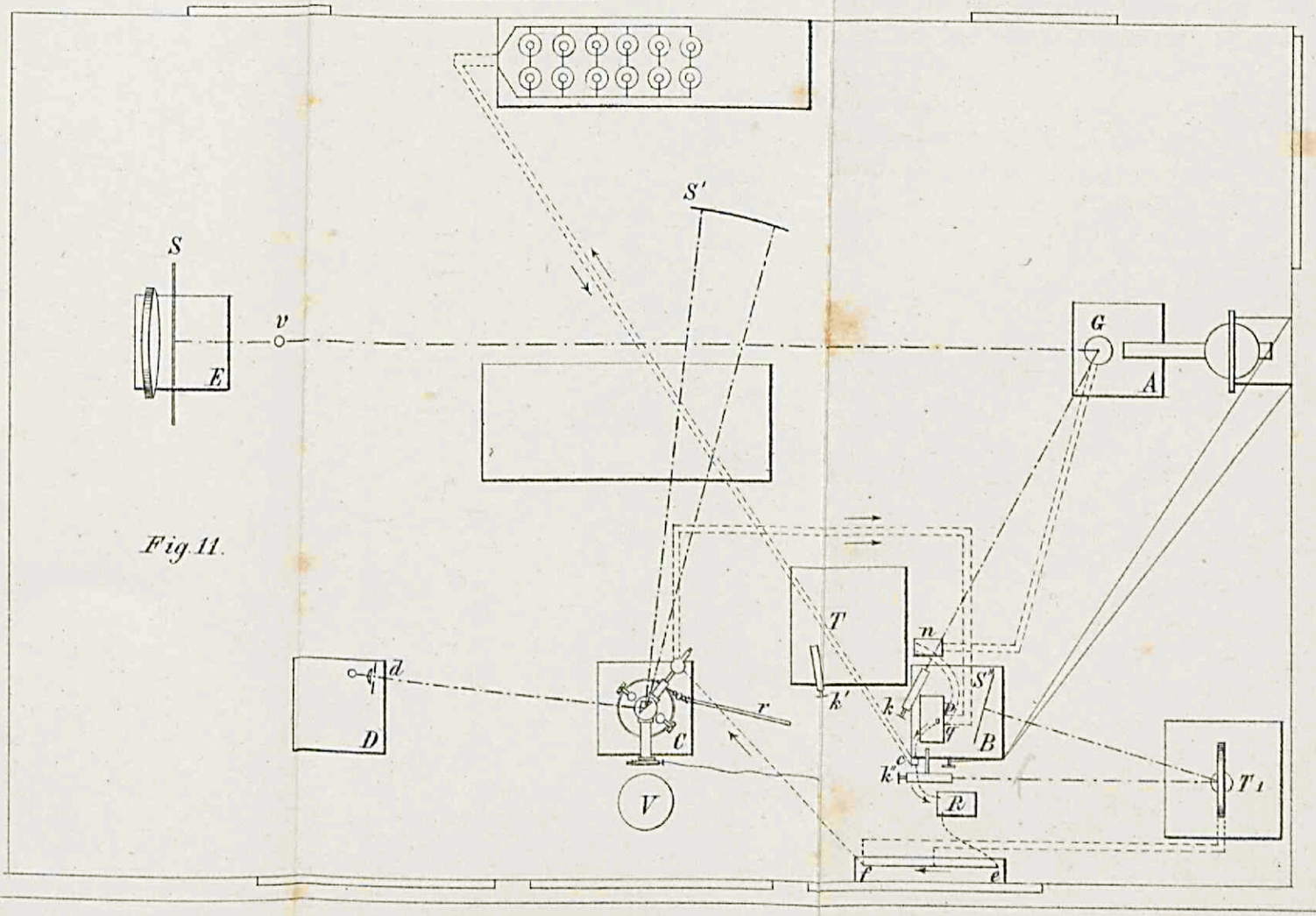


Fig. 11.



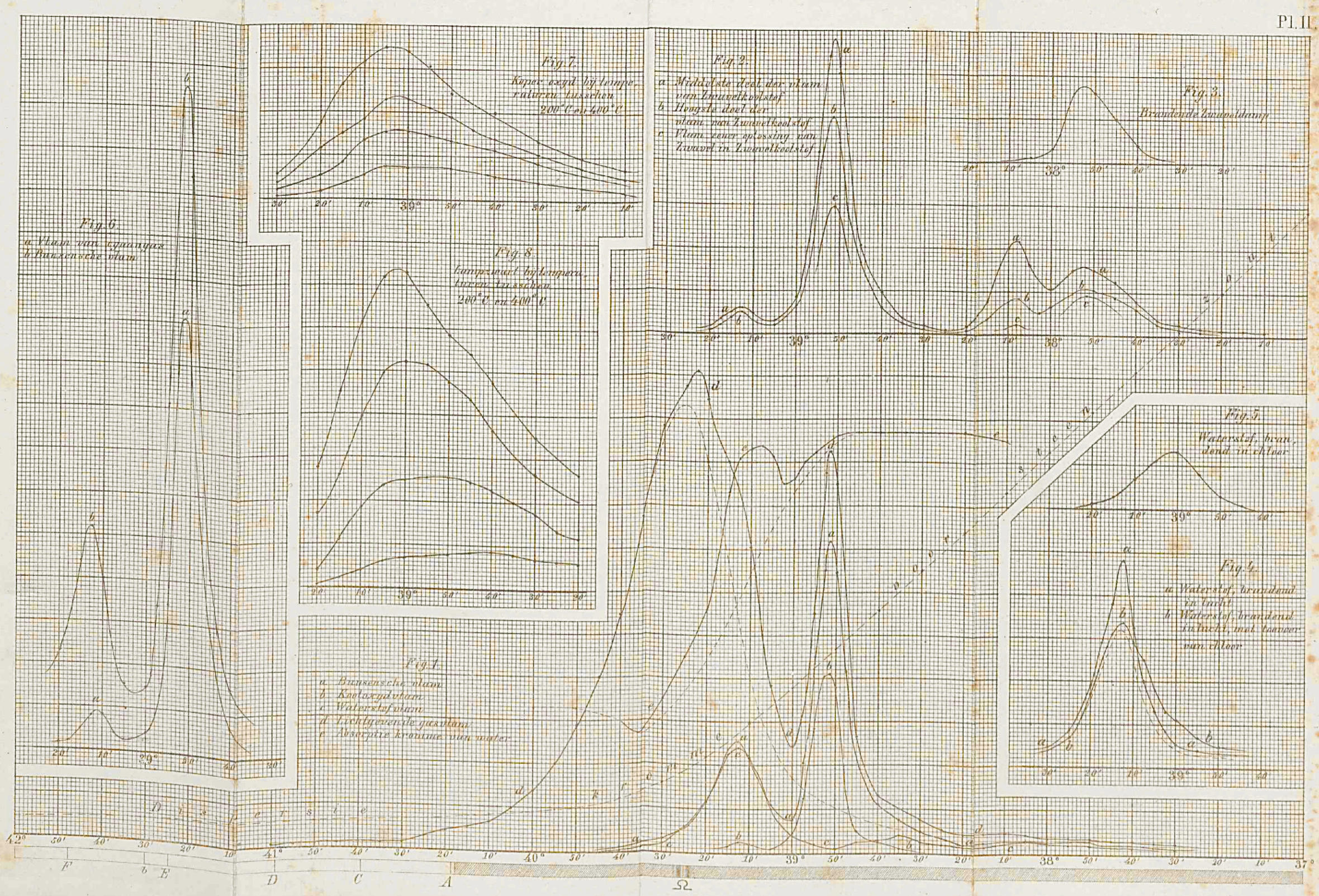


Fig. 1.
a Bunsensche vlam
b Koolzydvlam
c Waterstofvlam
d Lichtgevende gasvlam
e Absorptie kromme van water
Fig. 2.
a Middelste deel der vlam van Zwavelkoolstof
b Hoogste deel der vlam van Zwavelkoolstof
c Vlam eener oplossing van Zwavel in Zwavelkoolstof
Fig. 3.
Brandende Zwaveldamp
Fig. 4.
a Waterstof, brandend in lucht
b Waterstof, brandend in lucht, met toevoer van chloor
Fig. 5.
Waterstof, brandend in chloor
Fig. 6.
a Vlam van cyaangas
b Bunsensche vlam
Fig. 7.
Koper oxyd bij temperaturen tusschen 200° C en 400° C
Fig. 8.
Kampzwart bij temperaturen tusschen 200° C en 400° C
Dispersie
Kromme
Voor steen
F
b
E
D
C
A
Ω

