

OVER DE AGGREGAATS-TOESTANDEN DER STOF,  
OPGEHELDERD DOOR HET KOOLZUUR IN  
DEN GASVORMIGEN, VLOEIBAREN EN VASTEN TOESTAND. <sup>1</sup>

DOOR

Dr. L. BLEEKRODE.

---

Reeds bij een oppervlakkige beschouwing der voorwerpen, die men in de natuur aantreft, wordt men getroffen door het groot verschil dat zij voor het oog vertoonen. Nu eens is het de diamant, welke door zijn schitterenden glans, reeds in den ruwen toestand, de opmerkzaamheid tot zich trekt, dan weder zijn het de metalen, die als ertsen, diep uit de aarde opgedolven, dikwijls een langdurigen ingespannen arbeid vereischen, eer zij tot den bruikbaren toestand gebracht zijn. En welk een verschil tusschen de metalen onderling! Welk een tegenstelling tusschen het goud, dat zóó groote rekbaarheid bezit, dat wel beweerd is, dat een gouden dukaat, uitgeslagen zijnde, toereikend was om ruiter en paard in een gouden mantel te hullen, en tusschen het ijzer, dat als staal hardheid en broosheid in de hoogste mate in zich vereenigt, en tusschen het lood, dat zacht genoeg is om de fijnste afdruksels van planten over te nemen. Welk een verschil in kracht van Zusammenhang tusschen den zooveen genoemden diamant, "*de ontembare,*" gelijk zijn naam uitdrukt, die slechts door zijn eigen poeder te slijpen is, en het marmer, evenzeer een delfstof, dat, onder de vaardige hand van den kunstenaar, gemakkelijk de schoonste vormen aanneemt. En

---

<sup>1</sup> Voordracht gehouden voor het natuurkundig genootschap *Diligentia* te 's Gravenhage.

wanneer de tourist, op zijn zwerftochten door de bergachtige streken van ons werelddeel, op zijn weg nu en dan reusachtige steenklompen verspreid vindt, dan bemerkt hij, peinzende over de kracht, die deze vormeloze gevaarten daarheen voerde, dikwijls daarin de schoonste voorbeelden van moleculaire structuur, onder de gedaante der gekrystalliseerde delfstoffen.

Zoodanig verschil in voorkomen en eigenschappen kan niet verklaard worden door een lichaam als een ondeelbare massa te beschouwen, en vandaar dat men, reeds in de eerste perioden van de natuurwetenschap, er door werd gedrongen naar meer innerlijke oorzaken te zoeken, en dat het denkbeeld al spoedig ingang vond, dat lichamen eigenlijk een verzameling, een "*aggregaat*," vormen van zeer kleine te samenhangende deelen, die moleculen genoemd worden, en waarvan de *atomen* de kleinst denkbare bestanddeelen zijn. Vooral het begrip van atomen is reeds verscheidene eeuwen vóór Christus ontstaan; LEUCIPPUS (502 v. C.) en in 't bijzonder EPICURUS (345 v. C.), van wien eigenlijk het woord *atoom* afkomstig is, trachtten daaruit de eigenschappen af te leiden, die de lichamen onderling doen verschillen. En al zijn er eeuwen sedert het ontstaan dezer beschouwing verlopen, al heeft geen menschelijk oog die atomen ooit gezien, ja, al is het hoogst onwaarschijnlijk, dat zij ooit binnen het bereik van het gezichtsorgaan te brengen zullen zijn <sup>1</sup>, toch is die opvatting bij de tegenwoordige beschouwingen over de samenstelling der lichamen in stand gebleven, en worden, op het tegenwoordig standpunt der natuurkunde, de oorzaken der verschillende verschijnselen gezocht in de atomen en de krachten die tusschen hen werkzaam zijn. Deze krachten, die de *moleculaire krachten*

<sup>1</sup> Over het gewicht van atomen, ten minste om er eenig denkbeeld van te geven, vindt men in de *Berichte der chemischen Gesellschaft* 1876, p. 1151, een proef aangegeven met fuchsine, die in wijngeest als roode kleurstof oplost. Een korreltje van een middellijn van  $\frac{1}{2}$  mm. weegt 0,0007 gram en, in 1000 cub. centim. opgelost, geeft het nog een duidelijk roode kleur. De oplossing bevat dus een zeventien-millioenste gram daarvan per cub. centim. voor het oog zichtbaar, en uit de chemische samenstelling van fuchsine komt men tot het gewicht van een atoom waterstof, dat minstens zou bedragen 59 biljoenste gram.

WILLIAM THOMSON, die vele beschouwingen omtrent de afmetingen der atomen geleverd heeft, geeft het volgende voorbeeld. om er zich eenigermate een voorstelling van te kunnen vormen. Een glazen kogel, ter grootte van een erwit zij ondersteld den omvang te verkrijgen van onzen aardbol, zoodat tevens zijn atomen op evenredige wijze aangroei, dan zou die kogel gevuld zijn met kleine bollen grooter dan loodhagel, maar kleiner dan china'sappelen.

genoemd worden, zijn van verschillenden aard; de weerstand, dien een vloeistof biedt aan zamendrukking, waardoor haar volume verminderd zou worden, wijst op het bestaan van een weerstandbiedende kracht; daarentegen geeft de plotselinge overgang van den gasvormigen tot den vloeibaren toestand, wanneer het gas bij zekere temperatuur zijn maximum van spankracht heeft bereikt, het bestaan van een aantrekende kracht te kennen, die in werking treedt en den weerstand tegen het verminderen van het volume overwint. Daarbij komt nog dat de moleculen van een lichaam, volgens de tegenwoordig aangenomen theorie omtrent het wezen der warmte, in aanhoudende snelle beweging verkeerden, welke gewijzigd wordt door het lichaam meer of minder te verwarmen. Met die wijziging gaat gepaard een verandering in de onderlinge verhouding der moleculaire krachten, en wij zien daarvan de uitwerkselen in de verschillende toestanden, waarin *hetzelfde* lichaam zich aan ons voordoet, en die het gasvormig, vloeibaar of vast doen zijn, hetgeen m. a. w. de *aggregaats-toestand* der stof wordt genoemd. En zoo ik daareven wees op het groot verschil, dat tusschen de lichamen terstond wordt waargenomen, even sterk, en misschien wel zoo merkwaardig doet zich dit voor bij één zelfde lichaam, naar gelang het in een dezer drie toestanden beschouwd wordt. Het ijs moge door zijn eigenschappen in de schatting van velen lager staan dan de diamant, de natuuronderzoeker ziet daarin analoge voorbeelden van de kristallyne structuur; voor hem zijn zij even kunstig gebouwd, en wijken niet zoozeer van elkander af, als het ijs van het water als vloeistof, of als deze vloeistof van het water als damp. Inderdaad, wanneer men niet dagelijks getuige was van den overgang dezer stoffen in elkander, zou men geneigd kunnen zijn hen voor lichamen te houden, die in geen verband tot elkaar staan.

Ik wensch nu hier te wijzen op de omstandigheden, die met deze verandering van toestand gepaard gaan, maar ik zal daartoe, liever dan het water, het koolzuur als voorbeeld kiezen, vooral ook omdat de verschijnselen hieraan verbonden minder algemeen bekend zijn en sterker op den voorgrond treden. De opmerking mag hier niet achterwege blijven, dat alle lichamen aan ons beurtelings in de drie genoemde toestanden zouden bekend zijn, indien wij niet beperkt waren in het voortbrengen der hoogst mogelijke temperatuur, vereischt voor het gasvormig worden, of de sterkste afkoeling, noodzakelijk voor het vloeibaar maken, of om het lichaam tot den vasten toestand te brengen, — daargelaten nog, dat er lichamen zijn, die uithoofde hunner zwakke chemische zamenstel-

ling, bij temperatuursverhooging ontleed worden; bijv. papier, hout, enz.

In de natuur komt het koolzuur overvloedig verspreid voor. Samengesteld uit moleculen, waarin twee atomen zuurstof gebonden zijn aan één atoom koolstof, treft men het aan als bestanddeel van een menigte mineralen, bijv. marmer, kalkspaat, krijt, die er geheel uit bestaan; evenzeer de eierschalen van vogels en de schelpen der weekdieren; zij bevatten allen hoofdzakelijk koolzure kalk. Vrij, in den gasvormigen toestand, treedt het koolzuur, op sommige plaatsen, uit den aardbodem door spleten te voorschijn, zooals in de bekende hondsgrot bij Napels, waar het ter hoogte nagenoeg van een meter boven den grond zich opzamelt, en in de doodenvallei op Midden-Java. Als gas, zooals het zich bij de gewone temperatuur en druk voordoet, is het een kleurloos en reukeloos lichaam, met prikkelenden smaak, blijkbaar uit het spuitwater, dat er een zeer sterke oplossing van is. Het is ongeveer anderhalf maal zwaarder dan lucht, zoodat het in open glazen vaten, op dezelfde wijze als water, een korten tijd kan blijven staan; dompelt men er dan een aangestoken kaars in, zoo wordt deze onmiddellijk uitgedoofd, hetgeen een gemakkelijk herkenningmiddel voor dit gas oplevert. De grootere zwaarte dan lucht stelt zelfs in staat met dit lichaam proeven te nemen, van denzelfden aard als met een vloeistof kan geschieden; zoo zal, door het glas om te keeren, het koolzuur er uit vallen, en op een vlam nederkomende, evenals water, die uitdooven. Stelt men een glas met koolzuur iets hooger naast een tweede glas met lucht gevuld, en verbindt men beide vaten door een omgebogen buis, als hevel werkende, dan is weldra het tweede glas gedeeltelijk met koolzuur gevuld, dat dus overgeheveld is, en waarvan het uitdooven eener vlam daarin weder de aanwezigheid doet kennen. Ziedaar dus eenige der opmerkelijke eigenschappen van het koolzuur in den gasvormigen staat.

Tot op den aanvang dezer eeuw kende men het slechts als zoodanig, ja vrij algemeen was het denkbeeld verspreid, dat een gas nooit in anderen toestand kan voorkomen. LAVOISIER schijnt het eerst vermoed te hebben dat dit wel mogelijk zou kunnen zijn. In zijn geschriften zegt hij ergens, bij eenige beschouwingen aangaande den toestand der aarde, dat als deze zich zoo dicht bij de zon bevond als Mercurius, het water en alle andere lichamen geheel in dampen zouden zijn overgegaan, terwijl omgekeerd, als de aarde verplaatst zou zijn naar zeer koude streken, het water onzer rivieren en andere vloeistoffen, die wij ken-

nen, zich dan als zeer vaste rotsen zouden voordoen. Ook voegt hij er bij, dat de lucht, of eenige van haar veerkrachtige bestanddeelen, uit gebrek aan warmte niet meer zouden bestaan, maar dat er zich nieuwe vloeistoffen zouden vormen, waarvan wij nu niet de minste voorstelling hebben. Verschillende proefnemers, onder anderen ook onze beroemde landgenoot VAN MARUM, hadden in het begin dezer eeuw gemeend enkele gassen vloeibaar gemaakt te hebben. De hulpmiddelen waren toen echter nog zeer onvolkomen, en men kan uit hun proeven meestal slechts besluiten, dat zij zeer verdichte oplossingen in water verkregen hadden. Een karakteristieke opgave omtrent een proefneming in die dagen deel ik hier mede, vooral omdat zij ons al zeer zonderling moet voorkomen; PERKINS namelijk gaf in 1823 aan de Royal Institution te Londen bericht, dat hij met een toestel, waarin de druk tot 2000 atmosferen kon worden opgevoerd, de lucht in den vloeibaren staat had gebracht. Zooals hij aangeeft, begon zij bij 500 atmosferen "gedeeltelijk" zich te verdichten, en bij 1200 atmosferen was er een schoone, doorzichtige vloeistof uit voortgekomen, waarvan de hoeveelheid ongeveer  $\frac{1}{2000}$  der verbruikte lucht bedroeg. Er ontbreekt veel aan de bewijskracht dezer proefneming, te meer daar de verkregen vloeistof in het toestel zelve niet gezien kon worden, en het kan ons niet verwonderen, dat dit resultaat toen reeds "raadselachtig" genoemd werd. <sup>1</sup> Verschillende mededeelingen uit die dagen wijzen op de verdichting van ammoniakgas, zwaveligzuur en het chloorgas, welke trouwens, zooals nu bekend is, ook het gemakkelijkst vloeibaar te maken zijn.

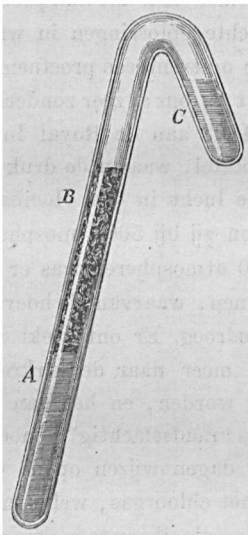
Het gelukte in 1823 het eerst aan FARADAY door toepassing van geschikte methoden een gas in zuiveren staat tot een vloeistof te brengen, en met het chloorgas gaf hij daarvan het voorbeeld, dat spoedig op bijna al de andere gassen toegepast werd. FARADAY vervulde toenmaals de bescheiden betrekking van assistent van HUMPHREY DAVY, en hij stond nog aan het begin van zijn roemvolle loopbaan, die dus aanvang met

<sup>1</sup> BABBAGE beproefde in 1813 kalkrotsen te doen barsten, door er een gat in te laten boren en er zoutzuur in te gieten; daarop werd de opening gesloten met een stevig ingedreven stop; er had evenwel geen splinging plaats, omdat, zooals hij geloofde, het koolzuur, dat ontwikkeld werd, vloeibaar was geworden.

Onwillekeurig herinnert dit ons aan het verhaal der oude geschiedschrijvers, dat HANNIBAL bij zijn tocht over de Alpen azijn gebruikt zou hebben om zich een weg door de rots-massa's te banen. (LIVIVS, 21 c. 37, evenzeer APPIANUS). Aldaar wordt gezegd "ardentiaque saxa infuso aceto putrefaciunt."

een ontdekking, de eerste van een groote reeks; die zijn naam tot de verste nageslachten zal doen doordringen, zoolang de natuurkunde zal beoefend worden. Het was toenmaals een glansrijke tijd voor die wetenschap, toen aldus herhaaldelijk en met korte tusschenpoozen, hoogst belangrijke feiten aan het licht gebracht werden!

De methode, die FARADAY volgde, bij het condenseeren, was betrekkelijk eenvoudig. Van een glazen buis (Fig. 1)



met stevige wanden wordt het benedeneinde dichtgeblazen en daarop het gedeelte A en B ongeveer gevuld met de zelfstandigheden waaruit het te verdichten gas zich moet ontwikkelen.<sup>1</sup> In het geval van koolzuur bijv. plaatst men in A verdund zwavelzuur en door een klein propje daarvan gescheiden een koolzuur zout. Daarna wordt het boveneinde C omgebogen en dichtgeblazen, en nu door schudden en stooten de inwerking van het zuur op het zout tot stand gebracht. Het gas ontwikkelt zich in ruime mate, en oefent ten laatste op zichzelf zoodanige drukking uit, dat het bij de temperatuur der buis zijn maximum van spankracht bereikt; de gasdeeltjes bevinden zich nu zoodanig zamengedrongen, dat de moleculaire

aantrekking in 't spel treedt, en er vertoont zich in het gesloten einde een zeer heldere, bewegelijke vloeistof. Het spreekt van zelve, dat de proef met veel voorzorgen moet genomen worden, omdat de spankracht tot een aanzienlijk bedrag klimt; bij het koolzuur stijgt dit zelfs bij een temperatuur van 15° tot 52 atmosferen. Daarom beschermt de proefnemer zijn gelaat door een masker van ijzergaas, terwijl tevens de oogen door dikke glazen platen tegen de gevolgen eener mogelijke uitbarsting beveiligd zijn; evenzeer is het raadzaam de handen met handschoenen te voorzien. Het gelukte aan FARADAY op die wijze de meeste gassen in den vloeibaren toestand te brengen, hoewel hij later ook

<sup>1</sup> Ik heb bij een reeks van onderzoekingen met gecondenseerde gassen gebruik gemaakt van buizen die 2 à 3 mm. glasdikte hadden, en op de breukvlakte een sterke groene kleur toonden; de lengte der buis bedroeg hoogstens 30 cm., de middellijn 4 millim. inwendig; een kolom van 2 à 3 centim. vloeibaar koolzuur werd verkregen.

nog langs een anderen weg, namelijk door sterke afkoeling, dit doel bereikte en verscheidene gassen aldus, bij de gewone dampkringsdrukking reeds, vloeibaar maakte.

Het koolzuur, in den vloeibaren staat, vertoont zich, gelijk reeds werd opgemerkt, als een zeer fijne, heldere bewegelijke vloeistof, waarbij het water in vergelijking stroopachtig schijnt, en veel langzamer zijn niveau herneemt.

Merkwaardig is de groote uitzettingscoëfficiënt, die het lichaam nu bezit, die vier malen zelfs die der lucht overtreft, welke men tot dusver als de meest uitzetbare stof kende. Een zeer belangrijk verschijnsel werd nog in 1867 door ANDREWS hierbij opgemerkt, dat namelijk door het vloeibaar koolzuur te verwarmen bij een temperatuur van ongeveer 31° C. het grensvlak tusschen de vloeistof en het gas verdwijnt, en er dus, bij dien warmtegraad, *continuïteit* bestaat tusschen den gasvormigen en vloeibaren toestand; hij noemde dien de *kritische temperatuur*; <sup>1</sup> de druk bedraagt dan 70 atmosferen ongeveer. Reeds vroeger in 1822 was door CAGNIARD DE LATOUR iets dergelijks waargenomen bij ether, alcohol en water; bij deze laatste vloeistof is de kritische temperatuur zeer hoog, namelijk 412°. ANDREWS bracht het feit tot zijn ware beteekenis, die van hoog gewicht is voor de moleculaire physica. <sup>2</sup> Er volgt namelijk uit, dat hetgeen wij bij de gewone temperatuur als vloeibaar koolzuur en als gasvormig koolzuur onderscheiden, slechts twee termen zijn, ver van elkander verwijderd, van één zelfden toestand, die in elkander kunnen overgaan door een reeks van tusschentoestanden, welke zóó geregeld elkáár kunnen opvolgen, dat men nergens een gemis aan continuïteit opmerkt. Onder zekere omstandigheden van temperatuur en drukking bevindt zich het koolzuur in een zekeren "*instabielen*" toestand, in zooverre het namelijk plotseling en met ontwikkeling van warmte, zonder verdere verhooging van druk tot een

<sup>1</sup> Op de voordracht zelve werd een glazen buis, waarin het vloeibaar koolzuur bereid was, door middel der projectielamp, op een scherm vergroot, voor al de toehoorders zichtbaar gemaakt. Werd nu de buis omgeven door een glazen cilinder met warm water en ook het omgebogen gedeelte in een glaasje met warm water van 40° C. gedompeld, dan zag men zeer duidelijk de vloeistof sterk uitzetten en het grensvlak vervolgens geheel verdwijnen; door afkoeling met ether vertoonde zich daarna eerst een nevel op de plaats van het grensvlak en dan weder het grensvlak zelf.

<sup>2</sup> Onze landgenoot DR. V. D. WAALS, leverde in zijn Acad. Proefschrift "over de continuïteit van den gas- en vloeistofoestand" hierover hoogst belangrijke mathematische beschouwingen.

vloeistof overgaat, en dan ziet men verschil tusschen het koolzuur, dat in den zoogenaamden vloeibaren toestand verkeert, en het zich daarboven bevindende gas; m. a. w. men bemerkt het grensvlak tusschen beiden, maar bij  $31^{\circ}$  en een drukking van 70 atmosferen is dit voor koolzuur het geval niet meer; men zal dan te vergeefs beproeven aan te wijzen, welk gedeelte vloeibaar en welk gedeelte gasvormig is. Men kan dan ook in dat geval de drukking zoo groot maken als men verkiest, zonder dat daardoor de stof weder vloeibaar zal worden; daartoe kan nu alleen afkoeling baten. Hieruit vloeit een opmerking voort, welke van groote beteekenis is voor de gassen, die tot dusver weerstand boden aan de pogingen om hen tot vloeistof te maken. Deze zijn: zuurstof, stikstof (dus ook lucht), waterstof, stikstofoxyde, kooloxyde en moerasgas; het is nu zeer wel mogelijk, dat hun kritische temperatuur zeer laag gelegen is, en dus kan dan alleen van middelen, die in staat zullen stellen een zeer sterke koude voort te brengen, in dit opzicht eenig gunstig gevolg verwacht worden.

Door de beschreven methode verkrijgt men slechts kleine hoeveelheden van het gas in den vloeibaren toestand, die niet afzonderlijk te behandelen zijn; de verbrijzeling der buis heeft een soort van ontploffing ten gevolge, wel geschikt om een denkbeeld te geven van de groote spankracht die in de kleine ruimte heerscht; de vloeistof herneemt dan den gasvorm.

Ter verkrijging van zeer groote hoeveelheden is daarom een andere wijze te volgen, namelijk met behulp van een zuig- en perspomp voor gassen.

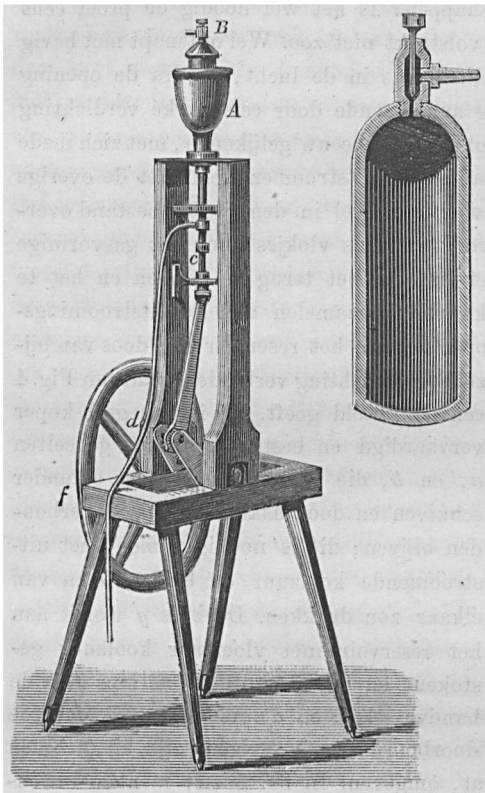
NATTERER te Weenen heeft daartoe in 1840 een zeer doelmatige en veilige inrichting vervaardigd, waarvan de afbeelding in fig. 2 is gegeven. De zuig- en perspomp is in C voorgesteld, die door een buis *d* in gemeenschap wordt gesteld met een gashouder, waarin het te voren goed gedroogde koolzuur is opgezameld. A is een wijd vat, waarin ijs wordt gelegd; te midden hiervan bevindt zich de ontvanger B, die met vloeibaar koolzuur moet gevuld worden. Het vlieg wiel *f*, met kruk en verbindingstang, geeft een gemakkelijke beweging voor den zuiger, terwijl de hooge plaatsing van het reservoir het gevaar bij barsting voor den proefnemer voorkomt. Hier zal nu bij voortgezette bewerking een aanzienlijk volume gas in een kleine ruimte worden opgehoopt, totdat ook weder, evenals bij de vorige methode, het maximum van spankracht bereikt is, en de verdere toevoer van gas het vloeibaar worden ten gevolge heeft. De ontvanger wordt dan verwijderd en is door een schroefklep gesloten, zoodanig dat men hem veilig weken ach-



tereen kan bewaren. Fig. 3 geeft een doorsnede van een ijzeren ont-

Fig. 2.

Fig. 3.



vanger, <sup>1</sup> zooals hij gebruikt wordt ter verzending.

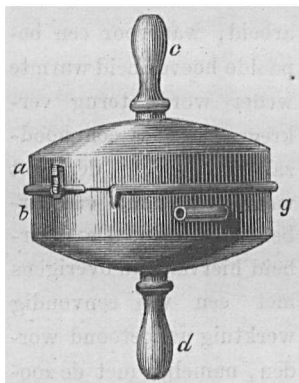
Het plaatsen van het reservoir te midden eener ijsmassa geschiedt om de warmte, vrijkomende bij het zamenpersen van het gas, op te slorpen. De tegenstand, die hierbij overwonnen moet worden, eischt een verbruik van arbeid, waarvoor een bepaalde hoeveelheid warmte weder wordt terug verkregen; dit is een noodzakelijk gevolg der wet van het behoud van arbeidsvermogen. De waarheid hiervan kan overigens met een vrij eenvoudig werktuig aangetoond worden, namelijk met de zogenoemde "vuurpomp." Deze bestaat uit een glazen

of koperen cylinder met goed sluitenden zuiger; in het benedeneinde daarvan steekt men een stukje phosphorus of zwam, drijft daarop den zuiger plotseling naar binnen, zoodat de lucht hevig wordt zamengeperst, men ziet dan bij het weder uithalen den phosphorus of het zwam aangestoken. Het koolzuur bevindt zich nu in den bovengenoemden ontvanger onder een druk van 46 à 50 atmosferen bij de gewone temperatuur ( $10^{\circ}$  à  $15^{\circ}$  C); d. i. een druk ruim 4-malen overtreffende dien welke in de sterkste stoomketels heerscht, bijv. in dien van de locomotief, die slechts een enkelen wagon tegen de helling der Rigibaan in Zwitserland opstuwet.

<sup>1</sup> De firma LADD en Co. te Londen verzendt dergelijke gevulde ontvangers buiten's lands; op de voordracht werden twee daarvan gebruikt; zij bevatten ongeveer 1 ℔ vloeibaar gas, een hoeveelheid meer dan toereikende voor de behandelde eigenschappen.

Zou men dus niet verwachten, dat bij het openen der schroefklep het vloeibare koolzuur onmiddellijk den gasvorm herneemt en met groot geweld in de lucht zal ontsnappen? Is het wel noodig de proef eens te nemen? Toch gebeurt dit volstrekt niet zoo. Wel ontsnapt met hevig gedruisch een zekere hoeveelheid gas in de lucht, zoodra de opening vrijgemaakt wordt; zijn weg aanwijzende door een sterke verdichting van waterdamp tot kleine vlokjes, op sneeuw gelijkende, met zich mede voerende, maar juist door dat snelle uitstroomen koelt het de overige massa zoodanig af, dat dit voor een deel in den *vasten* toestand overgaat; dit vaste koolzuur wordt nu als vlokjes door het gasvormige zuur medegeslept. Men moet dus om het terug te houden en het te

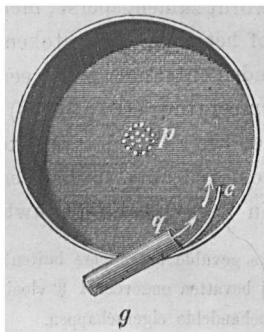
Fig. 4.



kunnen verzamelen aan de uitstroomingsopening van het reservoir een doos van bijzondere inrichting verbinden; waarvan Fig. 4 een denkbeeld geeft. Zij is van geel koper vervaardigd en bestaat uit twee gedeelten *a*, en *b*, die met den rand over elkander schuiven en door haken aan elkaar verbonden blijven; dit is noodig, omdat het uitstroomende koolzuur de beide deelen van elkaar zou drukken. De buis *g* wordt aan het reservoir met vloeibaar koolzuur gestoken, en het overtollige gas kan door de handvatsels *c* en *d* ontsnappen, die daartoe doorboord zijn. Overigens zijn zij met een

slechten warmtegeleider, hout, omgeven. In fig. 5 ziet men de inwendige inrichting van de doos; in *p* een menigte gaatjes, die in het hand-

Fig. 5.



vat uitkomen, en bij *q* de instroomingsbuis met een dun plaatje *c* voorzien, dat rakelings gebogen is, en aldus de voortgesleepte deeltjes vast koolzuur terug kan houden. — Wordt dus deze doos aan den ontvanger geplaatst, de schroefklep van dezen langzaam geopend, dan zal men na een paar minuten, deze weder kunnen sluiten, de doos er van afnemen, en bij het uit elkander nemen daarvan een aanzienlijke hoeveelheid vast koolzuur in de nabijheid van *c* opgezameld vinden, als een witte

zachte massa, die de grootste overeenkomst met versche sneeuw vertoont. <sup>1</sup> Ziedaar dan het koolzuur nu in den derden aggregaats-toestand verkregen; en men zou weinig vermoeden, dat het lichaam, dat daar zoo rustig ligt, en zonder eenig gevaar voor ontploffing kan behandeld worden, kort te voren als vloeistof even geducht was als water tot 200 of 300° verhit. Het vast worden van het koolzuur op die wijze is een gevolg van de opslorping van warmte, die plaats vindt wanneer het vloeibaar koolzuur gedeeltelijk gasvormig wordt, door het verminderen der drukking. Het overwinnen der cohaesie der vloeistofdeeltjes eischt het verrichten van een zekere hoeveelheid "*inwendigen*" arbeid, die door warmte geleverd wordt, welke aan de achterblijvende massa ontnomen is. En zoo groot is deze absorptie, dat de vaste massa daardoor een verbazend lage temperatuur verkrijgt, namelijk van ongeveer *minus* 70° C. Het blijkt dan ook onmiddellijk, dat deze enorme afkoeling is voortgebracht uit het verdichten van den waterdamp uit de lucht, in aanraking met het uitstroomend koolzuur (gelijk reeds is opgemerkt); legt men een natten doek los om de doos, die zoo even het vaste koolzuur ontvangen heeft, dan vriest deze er onmiddellijk aan vast, zoodat men haar er mede kan oplichten. Men dient ook te zorgen, dat de doos uitwendig goed droog blijft, omdat anders beide deelen aan elkander vriezen, en men haar dus niet zou kunnen openen.

Het vast worden eener vloeistof, doordien een gedeelte daarvan verdamt of den gasvorm aanneemt, is een merkwaardig verschijnsel, dat intusschen volstrekt niet voor het eerst bij het vloeibaar koolzuur is waargenomen; het is zelfs vrij gemakkelijk aan te toonen met het water, door het in een breed uitdampschaaltje onder de klok eener luchtpomp te plaatsen, waardoor in de verdunde lucht het verdampen zoo snel geschiedt, dat men weldra lange ijsnaalden ziet aanschieten. <sup>2</sup>

Het vaste koolzuur, vrij in de lucht liggende, heeft dus een zeer lage temperatuur, die tusschen zeventig en tachtig graden beneden het vriespunt van water (volgens CELSIUS) is gelegen, en het gaat, omdat het de noodige warmte slechts in geringe mate verkrijgen kan, zeer lang-

<sup>1</sup> Het koolzuur werd het eerst in den vasten toestand verkregen door THILORIER omstreeks 1840, die daartoe de methode van FARADAY bezigde, om vloeibaar koolzuur te verkrijgen, maar deze in groote metalen cilinders ten uitvoer bracht.

<sup>2</sup> Deze proef is door LESLIE het eerst gedaan in 1818; later, in onze dagen (1871), heeft E. CARBÉ te Parijs haar tot grondslag genomen van toestellen, waarmede fabriekmatig ijs bereid wordt; in drie à vier minuten wordt een karaf water bevroren.

zaam weder tot gas over. <sup>1</sup> Het is dan ook steeds met een laag gasvormig koolzuur omgeven; maar in die bijzonder lage temperatuur bestaat een nieuw gevaar voor den onvoorzichtigen proefnemer, dat hij namelijk bij het aanraken, of juist bij het drukken der vaste massa, zich pijnlijke wonden aan de hand kan toebrengen. Hoe zonderling het ook klinken moge, deze hevige koude doet dezelfde uitwerking op de huid en de gevoelszenuwen als een gloeiend ijzer, en er ontstaat evenzeer een blaasvormig gezwel; een ijzerdraad gestoken in de massa brengt hetzelfde sissend geluid teweeg als een gloeiend ijzer in water; men heeft in beide gevallen aanmerkelijke temperatuur-verschillen. Mengt men het vaste koolzuur met ether, die om te verdampen ook een groote hoeveelheid warmte vereischt, dan krijgt men een soort van brei, die een temperatuur van  $-90^{\circ}$  bezit; en in 't luchtledig daalt deze nog tot  $-120^{\circ}$ . <sup>2</sup>

Er zijn cijfers, die, uit gemis aan gelegenheid tot vergelijking, niet den indruk teweeg brengen van hetgeen zij inderdaad voorstellen, en men moet de verslagen der Noordpool-expeditiën lezen, om zich een denkbeeld te kunnen vormen van hetgeen dergelijke lage temperaturen beteekenen, die wij dus eenigermate in staat gesteld zijn met de hand waar te nemen door het vaste koolzuur te betasten. Ik acht het daarom niet onbelangrijk eenige bijzonderheden hier mede te deelen, die door den aanvoerder der Oostenrijksche pool-expeditie, PAYER, zijn opgeteekend omtrent de koude der poolstreken, door hem in 1874 doorgestaan. Op een sledevaart in de maand Maart van dat jaar gedaan, ter ontdekking van Frans Jozef's land, had hij de strengste koude van de geheele expeditie te verduren, en de wijngeestthermometer daalde tot  $-40,5$  Réaumur ( $-50,6^{\circ}$  C.). Reeds met zonsopgang was PAYER naar buiten gegaan, en levendig schildert hij de kleurenpracht, waarmede die opgang vergezeld gaat, vermeerderd door het daar veelvuldig voorkomende verschijnsel der bijzonnen. Hij liet, op de knieën liggende, zich en zijn medgezel den rum in de keel gieten om niet de lippen aan het metalen vat te brengen, dat even gevaarlijk zou zijn alsof het gloeiend was.

<sup>1</sup> De massa, die men telkens uit de doos verkrijgt, blijft minstens vijf à tien minuten in vasten toestand; op de voordracht konden twee schalen met de vaste stof aan het geheele auditorium in handen worden gegeven ter bezichtiging.

<sup>2</sup> Dit is de laagste temperatuur, die men tot dusver kan voortbrengen. FARADAY hervatte in 1845 zijn onderzoekingen omtrent het vloeibaar maken van gassen, en, met behulp van dit mengsel, slaagde hij er in ook allen te condenseren, behalve de zes vroeger genoemde gassen.

Maar de rum had alle kracht verloren, was strooperig en dik als traan, en bezat een flauwen smaak. Het was onmogelijk tabak of cigaren in korte pijpen te rooken: spoedig had men een ijskegel in den mond. Het metaal gaf bij aanraking denzelfden indruk als gloeiend ijzer, evenzeer de medaillons, die enkele tochtgenooten, zeer onvoorzichtig, op de bloote borst droegen. PAYER verzekert, dat de koude op de wilskracht verlammend werkt, en men toont, door de onzekerheid zijner bewegingen, de moeijelijkheid in spreken en denken, veel overeenkomst met een dronken persoon. Een eigenaardig gevolg der inwerking dezer lage temperatuur (die bij enkele poolreizen zelfs  $-47^{\circ}$  R. heeft bedragen) bestaat daarin, dat het lichaam zijn vochtigheid verliest door verdamping, en nu ontstaat een kwellend gevoel van dorst. Maar sneeuw daartegen te bezigen is een zeer schadelijk middel, want daardoor ontstaat ontsteking van keel, verhemelte en tong. Bovendien is de hulp daarvan ijdel, daar men volstrekt niet de massa sneeuw kan verbruiken, die tot het lesschen van den dorst zou noodig zijn, terwijl men als het ware de gewaarwording ondervindt van de aanraking van een gesmolten metaal. Men beschouwt bij dergelijke expeditiën dan ook hen, die sneeuw eten, met dezelfde minachting, als in het Oosten de opiumschuivers. De verdamping om het lichaam, in weerwil van den pels, was zoo sterk, dat de reizigers door een voortdurenden mist waren omgeven, die weldra in kleine ijskristallen overging, welke met hoorbaar gedruisch op de aarde vielen. Door dien mist was men steeds in duisternis gehuld, en was de atmosfeer niet doorzichtig. In weerwil daarvan had men een ondragelijk gevoel van droogte. Het geluid plantte zich op buitengewoon groote afstanden voort, en een gewoon gedruisch kon honderde schreden ver gehoord worden. Het vleesch kon gespleten worden, kwikzilver werd als kogel uit het geweer geschoten. Smaak en reuk worden zwakker en de spierkracht verlamd, zoodanig, dat de oogleden zich onwillekeurig sluiten en dicht vriezen; bij het stilstaan ontstaat dikwijls gevoelloosheid in de voetzolen. Merkwaardig is het, dat de baard niet met rijp zich bedekt, omdat de uitgeademde waterdamp te spoedig als sneeuw op den grond neervalt.

Ziedaar de verschijnselen, die zulk een buitengewone koude op het menschelijk lichaam teweeg brengt; laten wij nu eens zien; welke eigenschappen het vast koolzuur heeft ten gevolge van zijn lage temperatuur.

Er is reeds opgemerkt, dat het zeer langzaam tot gas weder overgaat, en daarom kan men het op de hand leggen zonder een pijnlijk ge-

voel gewaar te worden; ja het glijdt zelfs op de gaslaag gemakkelijk over de tafel of op glas voort; in een bekeerglas geplaatst, is dit spoedig met gasvormig koolzuur gevuld; men kan daarom ook een kleine hoeveelheid vaste massa op de tong brengen en dan, door zacht te ademen tegen een kaarsvlam, die uitdooven. Werpt men het in water, zoo blijft het drijven, of, op den bodem gehouden, ziet men het groote gasbellen ontwikkelen, en toch befrist het water niet in aanraking daarmede. Maar wordt in een schaalje een genoegzame hoeveelheid vast koolzuur geplaatst en met een weinig ether bevochtigd, dan daalt de temperatuur tot *minus* 90°, en kwik, daarop gegoten, gaat nu, daar het in de breiachtige massa genoegzame punten van aanraking vindt, binnen eenige minuten tot een geheel vaste stof over. Werpt men deze op een glasruit, zoo wordt die verbrijzeld, ten bewijze dat het niet meer week is gebleven. De vaste kwik, in aanraking met water komende, wordt terstond vloeibaar, maar vormt kleine ijscylanders om zich heen, waardoor de kwikdruppels heen rollen; hier is natuurlijk geen beschermend gasomhulsel.

Brengt men een druppel water op een gloeiend platin- of zilver-schaaltje, dan zal, integenoverstelling van hetgeen men misschien zou verwachten, die druppel niet verdampen; maar door de aanraking met die hooge temperatuur vormt zich tusschen den waterdruppel en het metaal onmiddellijk een dampklaag, die als slechte warmtegeleider eene verdere mededeeling van warmte aan het water zeer vertraagt; men heeft dan den zoogenaamden spheroidaaltoestand van het water; het is als het ware op een dampkussen gelegen. <sup>1</sup> Dit verschijnsel gaf FARADAY aanleiding tot een inderdaad schitterende proef, die het ook nu niet moeielijk valt te herhalen. Wordt namelijk een platinakroesje op de gasvlam geplaatst, dan is het weldra roodgloeiend en heeft dus een temperatuur van 400° C. Hierin plaatst men nu een zekere hoeveelheid vast koolzuur, dat, met ether bevochtigd, zeer weinig of geen effect dezer gloeihitte ondervindt; het behoudt zijn enorm lage temperatuur, en een reageerbuisje met water bevat in twee à drie minuten een wit gevroren ijsmassa. Zoo treedt dus een stuk ijs uit een gloeienden kroes te voorschijn, zonder dat hier iets in strijd is met bekende na-

<sup>1</sup> De projectielamp bewijst bij deze en de volgende proef goede diensten. Projecteert men den druppel water, liggende op een convex oppervlak, dan ziet men op het scherm een lichtlijn tusschen beiden in, ontstaan door den doorzichtigen waterdamp. Evenzoo werd bij de volgende proef het reageerbuisje geprojecteerd en was het gevormde ijs voor allen zeer zichtbaar.

tuurwetten, zonder dat eenige omstandigheid er bij onverklaard blijft. Vat men al de medegedeelde bijzonderheden omtrent het koolzuur, in den vloeibaren en vasten vormtoestand, zamen, dan blijkt, dunkt mij, genoegzaam, dat het in die minder algemeen bekende aggregaats-toestanden eigenschappen vertoont, die het van hoog gewicht was te leeren kennen, en die het doordringendst vernuft niet had durven voorspellen.

Toen in den zomer van het voorgaande jaar te Londen, door de samenwerking en ondersteuning van een aanzienlijk getal geleerden in en buiten Engeland, een tentoonstelling in het South-Kensington-museum was geopend, uitsluitend gewijd aan natuurwetenschappen, had men in 't bijzonder er zorg voor gedragen, zooveel mogelijk de instrumenten van vroegeren en lateren tijd bijeen te brengen, met behulp waarvan belangrijke ontdekkingen of onderzoekingen gedaan zijn. <sup>1</sup> De deelneming der voornaamste staten van Europa was dan ook voldoende geweest om een verzameling tot stand te doen komen, die den beoefenaren der natuurwetenschappen een eenig schouwspel aanbood. Zoo zag men bijv. in een der zalen de oorspronkelijke luchtpomp van OTTO V. GUERICKE, en eenige schreden vandaar verwijderd, een der nieuwste inrichtingen van dit werktuig door CARRÉ zamengesteld, om door middel van het luchtledig, ijs te fabricceeren; elders de modellen door JAMES WATT vervaardigd, strekkende tot grondslag zijner balansmachine, en de eerste locomotief van STEPHENSON in de nabijheid der voortreffelijke stoommachines der Engelsche marine van den tegenwoordigen tijd. En zoo kon men ook in een vitrine, die de toestellen bevatte, nagelaten door DALTON, DAVY, CAVENDISH, enz., opmerken de glazen buizen door FARADAY gebezigd om het eerst de toenmaals bekende gassen tot den vloeistofoestand te brengen. Van groen glas en slechts een paar decimeters groot, sommige veel kleiner, bevatten enkele daarvan nog de zeer kleine hoeveelheden vloeibaar gas, die hem bij zijn meer uitgebreide onderzoekingen over dit onderwerp tot leiddraad strekten, en men bewondert daarbij den scherpen blik van den onderzoeker, die met zulke eenvoudige hulpmiddelen een geheel nieuw veld van nasporingen ontdekte. Het blijkt nu, uit het voorgaande, welk een belangrijke schrede

<sup>1</sup> Er waren ongeveer 4000 nummers geëxposeerd, door inzenders uit elf rijken; hun aantal bedroeg 936, dat aldus verdeeld was: Engeland 502, Duitschland 355, Frankrijk 153, Rusland 86, Italië 51, Oostenrijk 45, Nederland 36, Zwitserland 27, Spanje 18, België 17, Noorwegen 6 inzenders.

voorwaarts ook hier thans is gedaan, nu wij willekeurige hoeveelheden vloeibaar gas van verre ter beschikking kunnen verkrijgen en zonder groot gevaar kunnen behandelen.

Men meene niet, dat deze vloeibaar gemaakte gassen een beperkt nut hebben.

Reeds vele jaren geleden heeft de vloeibare ammoniak aanleiding gegeven tot een fabriekmatige methode van ijsbereiding, die proefhoudend is gebleken, — het vloeibaar zwaveligzuur wordt thans evenzeer daartoe gebezigd, — vloeibaar stikstofoxydule wordt in Londen veel vervaardigd en alom aan geneeskundigen verzonden, die de bedwelmende eigenschappen wenschen toe te passen bij operatiën, door het even inademen van het gas.

Maar voor het natuurkundig onderzoek heeft men daarvan ook partij kunnen trekken, tot het voortbrengen der laagste tot dusver bekende temperaturen, een zaak van niet gering belang, wanneer men bedenkt hoe beperkt onze hulpmiddelen in dit opzicht zijn.

Wanneer de vlam van lichtgas met zuivere zuurstof wordt gevoed, verkrijgt men, met een zeer eenvoudig toestel, terstond de hoogste temperatuur, thans voor ons mogelijk, namelijk minstens  $2000^{\circ}$  C., waarbij platina onmiddellijk smelt. Konden wij nu evenveel beneden het nulpunt de temperatuur verlagen, welke nieuwe verschijnselen zouden dan zich voor ons ontsluiëren! Theoretische beschouwingen aangaande de uitzetting der lichamen leeren, dat bij  $-273^{\circ}$  de lichamen geen warmte meer bezitten (men noemt dit daarom het absolute nulpunt), en FARADAY heeft ons het middel gegeven tot  $-120^{\circ}$  te komen; — er blijft alzoo nog een geheele weg in die richting af te leggen. Wij kennen warmte zonder stof in den eigenlijken zin, — namelijk als warmtestraal; — stof zonder warmte hebben wij nog nimmer aanschouwd; niemand kan voorspellen, wat een lichaam zal zijn, als het beroofd is van alle warmte en die moleculaire beweging tot rust is overgegaan.

Maar indien wij bedenken, dat het natuurkundig onderzoek onmiskenbaar toenemende vorderingen aanwijst, dat elke ontdekking nieuwe vraagpunten opwerpt, dan is er zeker geen reden om hier een “*cirkelgang*” der menschheid aan te nemen, maar wij kunnen ook op natuurkundig gebied niet anders, dan de korthed van het menschelijk leven betreuren, waardoor het den natuurvorscher nimmer gegeven is zelf zijn nasporingen geheel ten einde gebracht te zien.