

LICHTVERSCHIJNSELS IN DEN DAMPKRING.

DOOR

Dr. H. EKAMA.

I

DE REGENBOOG.

De atmosfeer, die de aarde omgeeft, bevat een groote hoeveelheid water, hetzij in den vorm van damp, hetzij in dien van druppels of van ijsnaaldjes. In de beide laatste toestanden oefent het op de richting der lichtstralen, die door de zon of door de maan naar de aarde worden gezonden, een grooten invloed uit. Hierdoor ontstaan nu in de atmosfeer verschijnselen, die reeds in de vroegste tijden de bewondering der menschen tot zich getrokken hebben.

In de eerste plaats behoort tot deze *lichtverschijnsels in den dampkring* de regenboog, waarvan het wel niet noodzakelijk zal zijn een beschrijving te geven, hoewel zeker weinige menschen het verschijnsel in zijn geheele grootheid aanschouwd zullen hebben. Dit zal wel de oorzaak zijn, dat in de meeste boeken daarvan nog altijd de oude, onjuiste verklaring gegeven wordt; de volledige beschrijving en verklaring, voor zoover die zonder wiskunde te gebruiken mogelijk is, hoop ik in de volgende bladzijden mede te deelen.

In de oude tijden werd de regenboog als een goede tijding van de goden aan de aarde beschouwd. De Grieken zagen in hem den doorschijnenden gordel van de godin IRIS, terwijl NOACH in den regenboog het teeken zag van het verbond tusschen JEHOVA en de aarde.

Reeds de oudste verklaringen waren gegrond op de terugkaatsing

van het licht, en zoo schreef ARISTOTELES het verschijnsel aan den hollen vorm van een wolk toe. Zoodra men evenwel had opgemerkt, dat de hoek tusschen de lijn van het oog naar den regenboog en het verlengde van de lijn van den waarnemer naar de zon getrokken, altijd omstreeks 42° bedroeg, was deze verklaring onhoudbaar. MAUROLYCUS nam nu, om een afwijking van 45° te krijgen, aan, dat het zonlicht zevenmaal binnen een waterdruppel teruggekaatst wordt, alvorens het oog van den waarnemer te bereiken.

Ook zijn nog verklaringen opgebouwd door MARCUS ANTONIUS DE DOMINIS en THEODORICH uit Freiburg, van welke twee de eerste waarschijnlijk een deel zijner kennis aan den laatste te danken heeft; echter heeft hij het eerst de regenboogkleuren in bollen, met water gevuld, waargenomen. De voorstelling is voor iemand, wien de wetten van SNELLIUS onbekend zijn, zoo volledig mogelijk en tevens zijn de figuren, welke ter toelichting dienen, zeer nauwkeurig.

Ten slotte gaf MARCUS MARCI in 1648 nog een theorie omtrent den regenboog, doch deze berustte op feiten, die bij de breking van het licht in prismata waren waargenomen en welke hij toepaste op bollen. Hij kwam dan ook voor den genoemden hoek tot een waarde van $83^\circ 8'$; daar deze uitkomst zelfs den hoek, die bij den tweeden boog gevormd wordt, ongeveer 30° overtreft, is het zeer bevreemdend, dat hij deze fout niet opgemerkt heeft.

Aan CARTESIUS, beter bekend onder den naam van DESCARTES, — die de wetten van SNELLIUS voor de breking van de lichtstralen kende, — is het gelukt de volledigste verklaring van het verschijnsel te geven, welke dan ook tot nu toe door velen gevolgd wordt. Aan deze theorie ontbrak slechts nog de verklaring van het ontstaan der kleuren, welke later door NEWTON er aan is toegevoegd.

Somtijds ziet men twee regenbogen boven elkander, die hetzelfde middelpunt hebben; CARTESIUS nam nu aan, dat de binnenste boog ontstaat, doordat de lichtstraal, bij het treden in den waterdruppel gebroken zijnde, gedeeltelijk op de binnenzijde wordt teruggekaatst en vervolgens, na nogmaals bij het uittreden gebroken te zijn, het oog bereikt; terwijl de buitenste boog ontstaan zal, doordat de lichtstraal, voor hij uittreedt, tweemaal binnen den druppel wordt teruggekaatst. Bij elke terugkaatsing treedt ook een deel van het licht uit den druppel, dat evenwel ons oog niet bereiken kan. Hieruit volgt reeds dadelijk, dat de buitenste boog zwakker van licht moet zijn dan de binnenste.

Het is een bekend feit, dat wanneer een straal wit licht gaat door een middenstof, die niet door evenwijdige platte vakken begrensd is, een verdeling van het licht plaats heeft, waardoor het bekende spektrum ontstaat, in hetwelk men de kleuren rood, geel en blauw waarneemt, die ongemerkt in elkander overgaan. De genoemde kleuren treden het meest op den voorgrond; wil men aan het getal van zeven kleuren vasthouden, dan kan men ook de tussschenkleuren opnemen, zoodat men krijgt, rood, oranje, geel, groen, blauw, indigo en violet. Voor den natuurkundige is het volledige spektrum niet slechts uit zeven soorten, maar uit ontzaglijk veel soorten van licht samengesteld. Elke soort komt overeen met een bepaalde breking, door de middenstof veroorzaakt.

Nemen wij aan, dat op den waterdruppel een straal van een enkele lichtsoort valt, dan zal deze een afwijking ondervinden, die afhankelijk is van den hoek, dien de lichtstraal maakt met den straal van den bol, getrokken naar het punt, waar het licht intreedt. De afwijking kan evenwel een bepaald minimum niet overschrijden en zoo nu op den waterdruppel een bundel evenwijdige lichtstralen valt, alle van dezelfde soort, dan treden die, welke ongeveer het minimum van afwijking ondervinden, bijna evenwijdig uit; deze zijn voor het oog zichtbaar; de overige zijn te veel verspreid, om waargenomen te kunnen worden; DESCARTES noemde de eerste de werkzame stralen. Door een eenvoudige berekening vindt men, dat voor lichtstralen van het uiterste rood, welke eenmaal in den waterdruppel teruggekaatst zijn, de kleinste afwijking $137^{\circ}40'$ is, en voor die, welke tweemaal teruggekaatst zijn, bijna 130° . Eveneens vindt men voor de kleinste afwijking der stralen van het uiterste violet bij één keer terugkaatsing $139^{\circ}30'$ en bij twee keer terugkaatsing $126^{\circ}30'$; zoodat meer genoemde hoeken respectievelijk zijn: $42^{\circ}20'$, ruim 50° , $40^{\circ}30'$ en $53^{\circ}30'$. De binnenste regenboog zal dus bijna 2° , de buitenste ruim 3° breed zijn. Verder blijkt uit het bovenstaande, dat bij den eersten boog het rood aan den buitenkant, en bij den tweeden aan den binnenkant van den boog zich zal bevinden.

Somtijds is er nog een derde regenboog te zien, waarbij de lichtstraal driemaal in den waterdruppel is teruggekaatst; uit den aard der zaak zal deze altijd zeer flauw verlicht zijn.

Om den regenboog dus waar te nemen, moet men met zijn rug naar de zon gekeerd staan en het middelpunt van den boog is het punt, waar zich de schaduw van het hoofd van den waarnemer zou

vertoonen, zoo die schaduw zichtbaar was. Elke beschouwer ziet een anderen boog. Staat de zon in den horizon, dan ziet men juist een halven cirkel. Slechts staande op een hoogen berg of in een luchtballon zou men een volledigen cirkel kunnen zien.

Men kan geen regenboog waarnemen, als de zon hooger dan $42^{\circ}30'$ staat. Voor het ontstaan van het verschijnsel is het niet noodzakelijk, dat de zon voor den waarnemer helder schijnt, mits slechts geen wolken zich bevinden tusschen de zon en de waterdruppels, die het licht moeten breken. Dat men soms slechts gedeelten van den boog waarneemt, wordt veroorzaakt door wolken, die tusschen de zon en de terugkaatsende waterdruppels aanwezig zijn.

Ook bij maanlicht kan men, zooals ARISTOTELES reeds vermeldt, regenbogen waarnemen, maar deze zijn veel flauwer en vertoonen zelden kleuren.

Tot zoover kon de theorie van DESCARTES, zoolang men geen nauwkeurige metingen bezat, het verschijnsel zeer goed verklaren; maar hoe de zoogenaamde *overtallige bogen* (*arcs surnumeraires*, *überzählige Bogen*), ontstaan, — die evenwel slechts bij zeer sterke regenbogen worden waargenomen, — dit geeft zij niet aan. Men ziet dan aan de zijde van het violet, — dus bij den kleinsten boog binnen, bij den grootsten buiten den boog, — nog eenige herhalingen van het groen en violet, welke al flauwer en flauwer worden. Het violet is het duidelijkst zichtbaar, doch de herhalingen van een zelfde kleur hebben verschillende tinten. Men vindt deze overtallige bogen meestal slechts aan den top van den regenboog, terwijl de opvolgende boogjes hoe langer hoe korter worden. In 1722 zijn de overtallige bogen het eerst door LANGWITH waargenomen. Verleden jaar heb ik in November op den Amersfoortschen Berg een regenboog gezien, waarbij drie overtallige bogen duidelijk zichtbaar waren.

Om deze bogen te verklaren, nam HELLWAG golven op de waterdruppeltjes aan, terwijl VENTURI trachten aan te toonen, dat zij ontstonden door de afgeplatte gedaante dezer bolletjes. De laatste onderstelling maakte den meesten opgang, hoewel velen er zich niet mee vereenigen konden. Tot hen behoorde o. a. BRANDES, die het ontstaan dezer bogen verklaarde door de medewerking van kransen, zooals men die somtijds om de zon maar dikwijls om de maan waarneemt, aan te nemen. Tegen deze onderstelling bestond het groote bezwaar, dat de kransen zelf al zoo zwak van licht zijn.

Hoewel YOUNG in 1811 reeds een theorie had opgebouwd, die veel

dicter bij de waarheid was, werd deze toch als onjuist verworpen, omdat zij in strijd was met hetgeen NEWTON omtrent het wezen van het licht geleerd heeft. Zoo kon bijvoorbeeld GRUNERT in zijne *Beiträge zur meteorologischen Optik*, uitgegeven in 1848, nog niet besluiten de verklaringen van YOUNG en AIRY, die gegrond zijn op de theorieën van HUYGENS, aan te nemen.

Het is bekend, dat NEWTON aannam, dat het licht een stof was, die, van de lichtbron uitgaande, het oog bereikte, terwijl HUYGENS het licht als een trillende beweging van den ether, — een stof, die overal aanwezig zou zijn, — beschouwde. Langen tijd heeft de theorie van NEWTON stand gehouden, totdat FRESNEL in 1822 door zijn beroemde spiegelproof hare onjuistheid en de gegrondheid van de theorie van HUYGENS aantoonde. Door deze proef bewees hij namelijk, dat licht bij licht gevoegd duisternis kan geven. Was het licht een stof, dan was dit onmogelijk, maar is het een bewegingstoestand van de een of andere middenstof, dan kan het zeer goed plaats vinden. Onderstellen wij toch, dat een punt, ten gevolge van een daaraan meegedeelde beweging, in een bepaalden tijd een zekeren weg zou afleggen, terwijl het tegelijkertijd in tegenovergestelde richting een volkomen gelijke beweging ondervindt, dan zal het ten gevolge van beide bewegingen in rust blijven.

Een deeltje van de middenstof wordt door zijn omgeving in een bepaalden stand gehouden; wordt het nu door een uitwendige oorzaak uit dien evenwichtstoestand gebracht, dan zal het trachten, daarin terug te keeren. Ten gevolge van de verkregen snelheid gaat het thans door dien stand heen, bereikt een even groote afwijking aan de andere zijde, en komt zoo in een heen en weergaande beweging, zooals men ook bij een vast geklemde stalen veer kan waarnemen.

Deze beweging deelt zich aan de omliggende deeltjes mede, waardoor deze ook in een trillende beweging geraken, zoodat de beweging zich op deze wijze kan voortplanten, terwijl de deeltjes toch op hun plaats heen en weer blijven gaan. Den tijd, die gedurende een heen en weergang verloopt, noemt men den trillingstijd en de weg, dien de trillende beweging, — dus niet het deeltje, — in dien tijd aflegt, wordt een golflengte genoemd.

Heeft men nu twee punten, waarvan de trillende bewegingen uitgaan en die steeds geheel in denzelfden toestand verkeerden, dan zal een punt, waarbij het verschil van zijn afstanden tot de beide eerstgenoemde punten een oneven aantal halve golflengten bedraagt, voort-

durend in rust blijven, dewijl het van beide bewegingen steeds gelijke tegengestelde afwijkingen ondervindt. Is het verschil der afstanden gelijk aan een even aantal halve golflengten, dan zullen de punten, die hieraan voldoen, een tweemaal grootere afwijking ondervinden.

Van deze feiten, die bekend zijn onder den naam van *interferentie*, ging YOUNG uit om de overtallige bogen te verklaren, hoewel het toen nog niet door proeven bewezen was, dat dit werkelijk bij het licht kon voorkomen. Vóór hem had PEMBERTON hetzelfde al voorgesteld; maar men wilde het niet aannemen, omdat men bij deze verklaring moet onderstellen, dat alle druppeltjes even groot zijn.

Wij zullen voorloopig aannemen, dat wij licht van een bepaalde soort, d. w. z. licht van een bepaalde golflengte hebben. Het spektrum is toch een opvolging van lichtsoorten, waarvan de golflengten van het rood tot het violet voortdurend kleiner worden. Wanneer nu een bundel evenwijdige lichtstralen op een waterdruppel valt, dan wordt deze, zal de binnenste boog ontstaan, twee keer gebroken en eens teruggekaatst. Zooals wij gezien hebben, zullen de lichtstralen niet evenwijdig uittreden, doch alle zullen liggen aan dezelfde zijde van den lichtstraal, die de kleinste afwijking ondervindt. Deze laatste geeft den gewonen regenboog, terwijl de overige stralen altijd twee aan twee evenwijdig uittreden. Is nu het verschil der wegen, door deze twee evenwijdige lichtstralen binnen den druppel afgelegd, gelijk aan een oneven aantal halve golflengten, dan heeft men duisternis; is zij gelijk aan een even aantal halve golflengten, dan heeft men versterking van licht.

Heeft men nu niet licht van een enkele soort maar zonlicht, dan zullen de maxima van het roode en van het violette licht in de nabijheid van den regenboog niet op maar naast elkander vallen, en hierdoor ontstaan nu, volgens YOUNG, de overtallige bogen. Op plaatsen, verder van de binnenzijde van den regenboog gelegen, vallen de maxima der verschillende kleuren meer en meer op elkander en geven weer wit licht; dit verklaart tevens, waarom de hemel binnen den regenboog altijd veel helderder schijnt dan daar buiten.

YOUNG heeft de plaats der bogen bepaald, doch nauwkeurige metingen van regenbogen ontbraken, zoodat hij zijne theorie niet aan de natuur kon toetsen. De latere metingen van MILLER bij kunstmatige regenbogen en van GALLE bij de verschijnsels zelf hebben aangetoond, dat de door hem afgeleide plaats der bogen onjuist is, terwijl bovendien

de straal van den gewonen boog veranderlijk bleek te zijn. In 1838 had AIRY in de *Transactions of the Cambridge philosophical Society* evenwel een theorie gepubliceerd, waarin deze afwijkingen reeds bepaald werden.

Laten wij weer op den waterdruppel een bundel evenwijdige lichtstralen van een zelfde soort vallen, dan kunnen wij voor elken lichtstraal de richting van den gebroken straal bepalen. Verlengen wij deze uittredende stralen, totdat de opeenvolgende elkander snijden, dan zullen zij alle een bepaalde kromme lijn aanraken. Deze kromme lijn draagt den naam van brandlijn. In het door ons beschouwde geval bestaat deze kromme uit twee afzonderlijke takken, welke den minst afwijkenden lichtstraal steeds meer en meer naderen, zonder hem ooit te raken.

AIRY heeft het eerst den vorm dezer kromme onderzocht en bepaalde, — uitgaande van het beginsel van HUYGENS; dat elk punt eener dergelijke kromme, weer beschouwd mag worden als een punt, waarvan de trilling uitgaat, — de beweging, die een punt buiten de lijn zal aannemen, wanneer het onder den invloed is van de trillende bewegingen, die van alle punten der kromme lijn uitgaan. Op eenige plaatsen zullen deze trillingen elkander versterken, op andere elkander verzwakken; van daar dat wij ook weer maxima en minima van licht zullen waarnemen. De onderlinge afstand der maxima van een zelfde kleur hangt af van de grootte der waterdruppels; hoe kleiner deze zijn hoe grooter de afstanden. Deze afstanden zijn bij gelijke druppels grooter, wanneer de golflengte van het opvallende licht grooter is; bij gevolg voor rood grooter dan voor violet.

Behalve door de genoemde waarnemingen, wordt de theorie van AIRY ook door de proeven, welke verleden jaar door PULFRICH met glas-cylinders gedaan zijn, volkomen bevestigd; en dus is de regenboog niet slechts het gevolg van breking en terugkaatsing van de lichtstralen in de waterdruppels; maar de interferentie der verschillende lichtgolven, die na de breking den druppel verlaten, speelt hier de voornaamste rol.

Uit de theorie volgt, dat de stralen der regenbogen *niet* constant zijn, maar afhangen van de grootte der waterdruppels. Voor waterdruppels van 2 m.M. middellijn bedraagt het verschil tusschen de op deze wijze afgeleide waarde voor den straal en de door DESCARTES opgegevene reeds 12'.

Voor het ontstaan der overtallige bogen zijn volgens deze verklaring

waterdruppels van gelijke grootte noodig; en daar aan deze voorwaarde betrekkelijk zelden voldaan zal worden, verklaart dit de zeldzaamheid van het verschijnsel.

Ook is het nu gemakkelijk te begrijpen, waarom de regenboog zoo veel variaties in helderheid, straal, tint en verspreiding der kleuren vertoont en dat deze kleuren zelfs geheel verdwijnen, om een witten boog te geven, wiens straal hoe langer hoe kleiner wordt. Al deze veranderingen zijn gebonden aan de meerdere of mindere grootte der waterdruppels. Wanneer de regen bestaat uit groote druppels, dan vallen alle maxima dicht op elkander, en geven een gelijkmatig licht.

Is de middellijn der druppels gelijk 5 m.M., dan komt de plaats van de eerste maxima van 't rood en van 't violet overeen met die, welke volgens de theorie van DESCARTES zijn afgeleid.

Zijn de middellijnen kleiner dan 2 m.M., dan ziet men de overtallige bogen zeer sterk en talrijk. De maxima der verschillende soorten van licht, die nu samenvallen, zijn weer afhankelijk van de grootte der druppels, zoodat wij deze bogen zeer verschillend van tint kunnen waarnemen.

De regendruppels zullen evenwel, zooals ik reeds opmerkte, wel nooit alle even groot zijn; maar hoe geringer de verschillen zijn, hoe duidelijker men deze bogen zal waarnemen. Zijn de verschillen zeer groot, dan zullen de maxima der verschillende kleuren, door de verschillende druppels voortgebracht, samenvallen en wit licht geven.

Onderzoeken wij nu, hoe de regenboog zich zal vertoonen in zeer kleine druppels. Zijn hunne middellijnen 0,2 m.M. dan is de straal van den gewonen boog reeds 1° kleiner dan door DESCARTES is afgeleid. Hoe kleiner de druppels, hoe breeder elk maximum wordt, zoodat, wanneer de middellijnen 0,05 m.M. bedragen, de verschillende maxima elkander toch bedekken en weer wit licht geven. De boog moet in dit geval dus slechts wit zijn en enkel aan den rand een weinig gekleurd. De straal voor het midden van den boog is dan omstreeks 39°13'.

De kleinste tot nu toe waargenomen witte regenboog had een straal van 35°5' en werd door BOUGUER in de Cordilleras gezien.

Hierbij is nog op te merken, dat in druppels, kleiner dan 0,05 m.M. middellijn, de tweede maxima der kleuren elkander minder bedekken dan de eerste en dat de kleuren zich dan in een omgekeerde volgorde voordoen, dus rood aan de binnen- en violet aan de buitenzijde van den boog. Ook de volgende maxima zijn smaller en de kleuren kunnen dan ook

beter gescheiden zijn, zoodat men op deze wijze zeer eenvoudig de kringen verklaart, welke men somtijds in den mist aan de zijde, tegenovergesteld aan de zon, waarneemt. Hiertoe moeten de druppels ook weer gelijke middellijnen hebben; anders gaat het verschijnsel over in een helder witte plek, die zich bevindt op het punt van den hemel tegenovergesteld aan de zon. Deze plek neemt van het midden tot aan de grens van den gewonen regenboog in lichtsterkte af. Volgens de waarnemingen van KAEMTZ hebben de mistbolletjes een middellijn van omstreeks 0,02 mM., en wel in den winter iets grooter en in den zomer iets kleiner.

De vermelde witte bogen worden ook wel *mistbogen* genoemd, een verschijnsel, dat zich in de poolstreken zeer veelvuldig vertoont. Zijn de waterdruppels bijna alle even groot, dan ziet men in den mist om de schaduw van het hoofd des waarnemers gekleurde kringen, welke de *ringen van ULLOA* genoemd worden, omdat deze ze het eerst beschreef. Teneinde deze kringen evenwel waar te nemen, moet men hoog genoeg boven het oppervlak der zee zijn, om de schaduw van zijn hoofd in den mist te zien.

Men kan somtijds ook regenbogen van een elliptische gedaante waarnemen, doordat het licht, na door de regendruppels gebroken te zijn, op een watervlakte wordt teruggekaatst. Natuurlijk ziet men een anderen boog teruggekaatst, dan dien, welken men te gelijktijd rechtstreeks aan den hemel waarneemt; DUFOUR merkt hierbij evenwel op, dat de teruggekaatste regenbogen ook zelfs voor nauwkeurige waarnemers het beeld van de rechtstreeks waargenomene schijnen te zijn. Tevens zegt hij, dat men, de voorwaarde voor het ontstaan dezer bogen nagaande, bemerken zal dat deze meermalen verwezenlijkt worden dan men verwacht zou hebben.

Andere bogen, die ook geen zuiver cirkelvormige gedaante hebben, ziet men somtijds in de nevels boven weilanden of in de waterdruppeltjes boven de golven der zee. Bij de Franschen zijn deze verschijnsels bekend onder den naam van *Arcs en terre* en *Arcs en mer*.

Ook komen er gevallen voor, waarin men regenbogen ziet, die elkander snijden; dit wordt veroorzaakt, doordat het zonlicht eerst op een spiegelende vlakte wordt teruggekaatst en dan in de waterdeeltjes gebroken. Men heeft nu schijnbaar twee zonnen, van daar dat men ook regenbogen door beide veroorzaakt kan zien. MONGE heeft op deze wijze vier regenbogen waargenomen, terwijl de beide buitenste en ook de beide binnenste bogen elkander altijd in den horizon sneden.

Somtijds snijden zij elkander in andere punten; dat zij elkander juist in de toppen aanraken is een uiterst zeldzaam verschijnsel.

Staat de zon zeer hoog aan den hemel, dan kan men op deze wijze een volkomen cirkel in de lucht zien; meestal ontbreekt evenwel het bovenste deel, en men ziet dan het zeldzame verschijnsel van een omgekeerden regenboog.

Amersfoort, Maart 1889.
