

Licht- en kleurverschijnselen in de atmosfeer



De kleur van de hemelkoepel kan zeer uiteen lopen. Behalve blauw zijn kan hij variëren van wit naar loodgrijs en bij lage zonnestand van rood naar geel en groen. Soms verschijnen er ook kleurrijke bogen of vlekken. De oorzaak van deze verscheidenheid is het feit dat er naast moleculen ook andere deeltjes, zoals druppeltjes of stofdeeltjes, in wisselende hoeveelheden in onze dampkring aanwezig kunnen zijn. De optische eigenschappen en concentraties van deze deeltjes zijn bepalend voor de kleuren die wij waarnemen. In dit artikel* zal worden ingegaan op de achtergronden van deze kleurverschijnselen.

Ofschoon het zonlicht de bron is van bijna al het licht dat wij waarnemen, is het toch niet dit licht *zelf* dat de kleur van het landschap en van de hemel om ons heen bepaalt. De wijze waarop wij dit zien hangt af van de manier waarop voorwerpen en deeltjes in de lucht het zonlicht naar onze richting toezenden. Dit licht is dan aanzienlijk verzwakt en heeft vaak een kleur gekregen, die wij als de kleur van het voorwerp of de lucht herkennen. Afhankelijk van de belichting en de aard van de voorwerpen die het zonlicht verstrooien, ziet men hierdoor het landschap en de lucht in een steeds wisselend beeld.

Wat voor het landschap geldt, is nog in sterkere mate het geval voor de hemel boven ons. Er is een enorm verschil in aan-

Fig. 1. Wolken die door de rode ondergaande (of opkomende zon) worden beschenen, vertonen een roze tot dieprode gloed, vergelijkbaar met het Alpengloeien. De stapelwolken op de foto bevonden zich aan de zuidwestelijke horizon en werden beschenen door de, voor de wolke toppen juist zichtbare, ochtendzon (foto B. Zwart).

blik tussen een blauwe lucht, een heilige atmosfeer en een zwaar bewolkte lucht; veranderingen kunnen zich hierbij in een hoog tempo voltrekken.

Onbewolkte en bewolkte lucht

In onbewolkte toestand is de hemel blauw. Dit licht is verstrooid zonlicht; de ver-



strooiing geschiedt door de luchtdeeltjes zelf. Deze deeltjes zijn bijzonder klein, want het zijn de gasmoleculen in de dampkring van de aarde. Indien onze dampkring niet bestond zou de hemelkoepel inktzwart zijn en waren de sterren overdag zichtbaar. Een dergelijke situatie kennen ruimtevaarders en maanreizigers uit ervaring, daar zij zich ver van onze dampkring hebben bevonden.

Moleculen zijn zeer klein; hun diameters zijn vele malen kleiner dan de golflengte van het licht. Hun vermogen om licht te verstrooien is daardoor maar gering, en alleen doordat zich zoveel van deze deeltjes in de dampkring bevinden wordt de totale hoeveelheid licht die ze verstrooien toch nog zo groot, dat wij het kunnen zien. Ongeacht hun samenstelling verstrooien zulke kleine deeltjes het blauw (licht met een kleine golflengte) veel effectiever dan het rood (licht met een grote golflengte). Hierdoor krijgt de hemelkoepel zijn markante, diepblauwe kleur.

Ijskristallen en waterdruppeltjes zijn daarentegen veel groter dan de golflengte van het licht. Zij verstrooien het licht veel effectiever dan moleculen. De strooiing is hier bovendien voor alle kleuren gelijk: wit licht wordt dus verstrooid als wit licht. De helderheid van dit licht is zo groot, dat er zich maar een vrij geringe hoeveelheid van deze deeltjes in de dampkring behoeft te bevinden om het blauwe hemellicht volledig te overstralen. Het aanzien van de hemelkoepel verandert dan ook al snel van blauw in melkwit als deze deeltjes in de dampkring komen; de waarnemer ervaart dit als het verschijnen van ijle bewolking.

Bij een flinke wolk is de overheersing van het witte licht volkomen. Een dergelijke wolk is geheel ondoorzichtig en overtreft in helderheid de blauwe lucht vele malen; hij tekent zich hierdoor helder af tegen de blauwe hemel. Men zegt dan dat de wolk veel zonlicht weerkaatst.

Lichtverdeling

Ook de lichtverdeling aan de hemel van een met druppeltjes of ijskristalletjes gevulde dampkring wijkt geheel af van die van de blauwe, onbewolkte hemel. Bij de blauwe lucht is de helderheid het grootst nabij de horizon. Hier kijkt men immers in een zeer veel langere kolom lucht dan wanneer men

recht naar boven kijkt; men ziet dus méér deeltjes die het zonlicht verstrooien. Als een waarnemer dwars op de zon kijkt, dus een gebied observeert dat zich op ongeveer 90° hiervan bevindt, zal hij bovendien opmerken dat de helderheid van het blauwe licht hier het geringst is. Zowel het gebied nabij de zon als de hemel hier tegenover, zenden duidelijk wat meer licht uit. Stof, druppeltjes en ijskristallen in de dampkring zorgen daarentegen voor een lichtverdeling waarbij globaal gesproken de helderheid het grootst is nabij de zon, en min of meer geleidelijk afneemt naarmate men hier verder vandaan kijkt.

Als de lucht zwaarbewolkt is wordt het strooiingspatroon verstoord, doordat er dan ook deeltjes oplichten door licht dat reeds één of meerdere keren eerder door andere deeltjes verstrooid is. Het resultaat is de bekende troosteloze diepgrijze lucht; hier is de helderheid het grootst boven de waarnemer. Ook in mist hebben wij met deze situatie te doen. Ofschoon het enigszins buiten het bestek van dit verhaal valt, is het toch wel interessant even stil te staan bij deze situatie. Een door de zon beschenen wolk heeft, zoals gezegd, aan de buitenkant een helderheid die vele malen groter is dan die van de blauwe lucht. Dit betekent ook, dat er slechts relatief weinig licht in de wolk kan doordringen en het erin of eronder dus behoorlijk donker is (fig. 3). Hierdoor ziet de buitenkant van een dikke wolk er volkomen anders uit dan het inwendige, waar slechts het zwakke, meervoudig verstrooide licht te zien is. De ge-

Fig. 2. Terwijl de aanblik van een witte wolk zeer fraai kan zijn (links), zien we binnen de wolk (of in mist) slechts een troosteloze, egaal verlichte grijswitte lucht (rechts).

waarwording die men ondergaat als men een wolk of mistbank ingaat, of als er een zware wolk overtrekt, is dan ook zeer spectaculair: de blauwe lucht met zijn helderwitte wolken verandert in één keer in een egaal verlichte witte tot loodgrijze lucht (fig. 2).

Het is een algemeen optredend verschijnsel dat het uiterlijk buiten en binnen een hoeveelheid deeltjes die tot strooiing aanleiding geven, dus van het naar buiten gestrooide (weerkaatste) licht en het doorgelaten licht, tegengesteld is. Het uit zich bijvoorbeeld ook duidelijk in een met stofdeeltjes gevulde dampkring. Vooral bij laagstaande zon is de hoeveelheid licht die dan verstrooid wordt aanzienlijk. Het doorgelaten licht verliest diens gevolg intensiteit; het grootste verlies is ook hier in het blauw. Het gevolg is een roodkleuring van de zon, hetgeen juist de kleur is die op zijn weg naar de waarnemer het minst verstrooid is en dus overblijft. Als dit licht op verre wolken wordt weerkaatst, verliest het op zijn terugweg naar de waarnemer nog meer van zijn helderheid, vooral in het blauw. Het gevolg is de dieprode gloed die

Fig. 3. Onder een zeer dikke wolk is de lucht donkergrijs tot zwart.



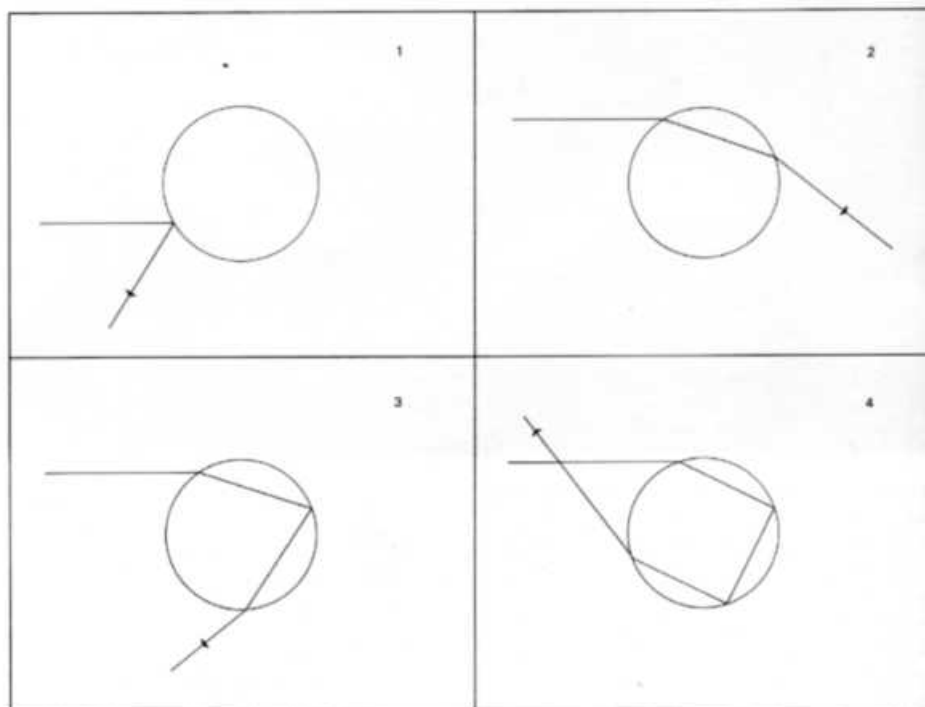
Fig. 4. Bij doorzichtige deeltjes zoals waterdruppels zijn er verscheidene mogelijkheden die tot lichtverstrooiing aanleiding kunnen geven. Naast gewone uitwendige reflectie (lichtweg 1) kan het licht ook de druppel intréden en vervolgens weer verlaten (lichtweg 2). Ook kan het licht na ingetreden te zijn één of meer inwendige reflecties ondergaan zoals weergegeven in lichtweg 3 en 4.

wolken kunnen hebben bij laagstaande zon (fig. 1). Hetzelfde treedt op bij weerkaatsing op verre gletsjervelden in de bergen; men spreekt dan van *Alpengloeien*. Verwant met dit effect zijn ook de schemeringskleuren die men aan de hemelkoepel ziet als de rode zon opkomt of ondergaat; iedereen kent de fraaie wijze waarop deze kleuren in elkaar over kunnen gaan.

Als de hoeveelheid ijskristalletjes of waterdruppeltjes in de dampkring zodanig is, dat het zonlicht slechts éénmaal door zo'n deeltje verstrooid is voor het de waarnemer bereikt, ontstaat er een lichtverdeling van de hemelkoepel die karakteristiek is voor de verstrooiende deeltjes. Ijskristallen in de dampkring zorgen dus voor een ander uiterlijk van de hemel dan waterdruppels; de verschillen hiertussen ontstaan doordat de optische eigenschappen van kristallen en druppels niet gelijk zijn. Deze karakteristieke lichtverdelingen zijn te zien als er niet te veel deeltjes zijn, dus bij dunne, min of meer egale bewolking die nog direct door de zon beschenen kan worden. Dit houdt overigens in dat de zon zelf nog te zien is, zij het dat hij behoorlijk afgezwakt kan zijn. Wij zien dan de 'zuivere' lichtverdeling die door de wolkdeeltjes veroorzaakt wordt en niet vertroebeld is door meervoudig verstrooid licht. Ook de buitenkant van dikkere wolken vertoont nog dit zuivere beeld; het wordt pas verstoord als wij ons zo diep in, of zo ver onder de wolk bevinden dat het directe zonlicht de deeltjes niet meer kan beschijnen. Het is wellicht nuttig er de aandacht op te vestigen dat regen, sneeuw of hagel ook een vorm van bewolking zijn, maar dat hier de afmeting van de samenstellende deeltjes zo groot is dat zij naar beneden kunnen vallen. Deze 'wolk' reikt dus tot de grond. Mist, motregen, regen, sneeuw en hagel zijn op deze wijze beschouwd dezelfde verschijnselen, die alleen in de afmetingen van de afzonderlijke deeltjes verschillen.

Breking en weerkaatsing door druppels

De strooiing van licht aan ijskristallen of waterdruppeltjes verschilt sterk van die aan stofdeeltjes of moleculen. Druppeltjes en kristalletjes hebben in het algemeen afmetingen die veel groter zijn dan de golflengte van het licht; bovendien zijn ze doorzichtig. Hierdoor zijn er *verschillende* mogelijkheden waarop strooiing tot stand kan komen: invallend licht kan, behalve uitwendig weerkaatsen te worden, ook een weg volgen door het deeltje heen. Het zonlicht kan dus verstrooid worden door uitwendige weerkaatsing, maar kan ook het deeltje binnentreden en nadat het al dan niet een



aantal keren inwendig weerkaatsen is er uit treden. Voor druppeltjes zijn een aantal van deze mogelijkheden weergegeven in fig. 4. Men moet hierbij bedenken, dat van een lichtstraal die de wand van zo'n doorzichtige druppel treft slechts een geringe hoeveelheid weerkaatsen wordt; het overgrote deel wordt gebroken en doorgelaten. Hierdoor is de tweede lichtweg in de figuur, waarbij het licht wel twee maal gebroken is maar niet inwendig weerkaatsen, verreweg het meest effectief. Licht dat deze weg gevolgd heeft overtreft hierdoor in helderheid alle andere mogelijkheden volkomen. Het blijkt nu echter, dat deze wijze van verstrooiing niet naar alle richtingen kan plaatsvinden en er dus gebieden aan de hemelkoepel zijn die niet kunnen oplichten door deze bijdrage. Op deze plaatsen zien wij *wel* het zwakkere licht dat op een andere wijze is gebroken en weerkaatsen. Het felle, twee keer gebroken licht is slechts te zien in de omgeving van de zon. Een door de zon beschenen regenlucht is daardoor zeer helder in de richting van de zon, maar veel donkerder in het gebied tegenover de zon.

Uitwendige weerkaatsing (lichtweg 1 in de figuur) kan wel naar alle richtingen geschieden. Men zegt dan dat het licht dat een dergelijke weg volgt in alle richtingen door het druppeltje verstrooid wordt. Dit betekent dat dit licht zich over de gehele hemelkoepel kan manifesteren. De helderheid ervan neemt echter snel af naarmate de strooihoek groter wordt, m.a.w. naarmate wij dit licht verder van de zon af beschouwen. Alle andere wijzen van lichtstrooiing aan waterdruppels kunnen echter maar in een beperkt gedeelte van de hemel voor het licht verantwoordelijk zijn. Dit kan men het gemakkelijkst inzien voor lichtweg 2, dus voor licht dat de druppel intreedt en zonder inwendige weerkaatsing er weer uitkomt. Als er bij in-

uit treden *geen* breking zou plaatsvinden, zou dit licht altijd rechtdoor gaan, ongeacht de plaats waar het de druppel is ingegaan. Deze brekingen treden echter wel op, en zorgen ervoor dat het licht een afwijkende richting krijgt. Zij zijn het sterkst bij een scherpe inval van het licht op de druppel; de inkomende en uit tredende lichtbundel maken dan een hoek van ongeveer 80° met elkaar. Is de inval minder scherp, dan zijn de brekingen geringer en is dus ook deze hoek kleiner. Hierdoor zal het licht van deze bijdrage zich nooit op een grotere hoekafstand dan 80° van de zon kunnen manifesteren, maar alleen hierbinnen te zien zijn.

Licht van weg 3 (twee brekingen en één inwendige weerkaatsing) verschijnt daarentegen slechts in een gebied van de hemelkoepel recht tegenover de zon. Het gebied dat door deze bijdrage oplicht strekt zich niet verder uit dan ongeveer 40° van het *tegenpunt* van de zon (dit is het punt recht tegenover de zon, het bevindt zich dus even ver onder de horizon als de zon erboven). Door dit alles ziet een door de zon beschenen 'regendruppelleder' er als volgt uit. Vanaf de zon tot op een hoekafstand van 80° hiervandaan zien wij het dominerende licht van weg 2 in fig. 4. Het licht van weg 3 overheerst in een gebied dat zich uitstrekt van het tegenpunt van de zon tot ongeveer 40° van dit punt. Tussen deze grenzen (dus tussen ongeveer 80° en 140° van de zon) zien wij hoofdzakelijk het zwakke licht van weg 1.

Grensgebieden: de regenboog

Van buitengewoon belang voor het uiterlijk van een met regendruppels gevulde dampkring is de wijze waarop het licht zich manifesteert nabij de *grens* van een gebied dat door een bepaalde lichtweg (dus door een bepaalde combinatie van brekingen en

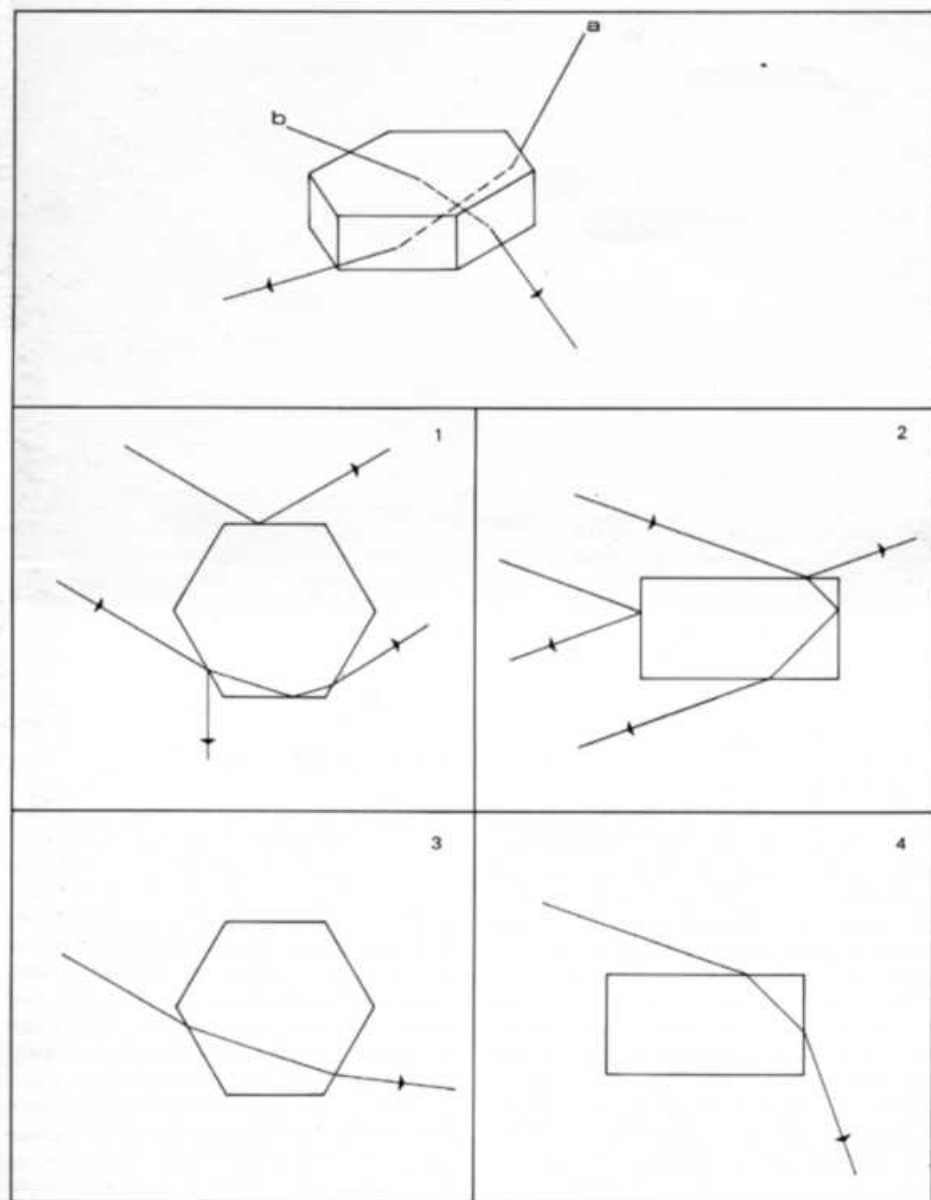


Fig. 5. Bij ijskristallen kan breking langs verschillende kristalhoeken geschieden, zoals in de bovenste figuur is aangegeven. Voor lichtbundel a is de brekende kristalhoek 60° , voor lichtbundel b is deze 90° . In de middelste figuur zijn als lichtweg 1 en 2 enkele voorbeelden gegeven van uitwendige en inwendige reflecties aan een dergelijk kristal; de inwendige reflecties kunnen hier totaal zijn. Lichtweg 3 en 4 in de onderste figuur geven wegen aan waar wél breking maar géén reflectie optreedt; deze lichtwegen zijn dezelfde als die weergegeven in de bovenste figuur.

is zeer intens en manifesteert zich als een prachtige gekleurde band aan de hemel: de regenboog (fig. 6). Slechts weinigen beseffen dat deze boog slechts een *grens* is van een cirkelvormig gebied rond het tegenpunt van de zon, dat door deze specifieke combinatie van brekingen en weerkaatsingen in een druppel oplicht; men kan opmerken dat de lucht buiten de boog aanzienlijk donkerder is dan daarbinnen. Deze strooiing is alleen zo goed te zien doordat de dominerende bijdrage van lichtweg 2 nooit dit gebied van de hemel kan doen oplichten. De enige verdere bijdrage van het licht in het gebied van de regenboog is afkomstig van uitwendige weerkaatsing (lichtweg 1). Het regenbooglicht, en al het licht van lichtweg 3 overheerst dit echter, ook al omdat hier de weerkaatsing onder een scherper hoek gebeurt.

Als verdere mogelijkheid tot strooiing heeft het licht in een waterdruppel weg 4: twee brekingen en twee weerkaatsingen. De grens van deze strooiingsweg bevindt zich op ongeveer 50° van het tegenpunt van de zon, dus niet ver van de regenboog. Ook hier is de helderheid maximaal op zijn grens. Globaal gesproken heeft licht dat deze weg gevolgd heeft de geringste helderheid van alle genoemde strooiingen, omdat hier sprake is van twee weerkaatsingen. Niettemin neemt de helderheid nabij de grens zodanig toe, dat het daar die van lichtweg 1 (één uitwendige reflectie) toch nog overtreft. Toevallig verschijnt dit licht juist in een gebied van de hemel waar noch het heldere licht van weg 2, noch dat van weg 3 kan komen en alleen lichtweg 1 dus een bijdrage levert. Hierdoor is deze grens toch te zien; zij manifesteert zich eveneens als een gekleurde band: de *nevenregenboog*. Deze band is breder dan die van de gewone regenboog, en zijn kleurevolgorde is omgekeerd. Als deze beide bogen samen te zien zijn, spreekt men vaak van een 'dubbele regenboog'. Tussen deze bogen is de lucht zeer donker; het is zelfs het donkerste gedeelte van de hemel. Hier zien wij dan ook alleen maar het zwakke licht van lichtweg 1; geen van de andere strooiingen kan in dit gebied een bijdrage leveren.

Helderheidsverloop regendruppeltjeslucht

Men zou zich kunnen voorstellen dat het licht nóg meer inwendige weerkaatsingen in

weerkaatsingen in de druppel) verlicht kan worden. In alle gevallen is het zo, dat de begrenzing van dit verlichte gebied enigszins anders is voor de verschillende kleuren waaruit (wit) licht is opgebouwd; de uiterste begrenzing wordt gevormd door rood licht. Voor het licht van weg 2 neemt nu de helderheid ervan geleidelijk af naarmate men dichter bij zijn grens kijkt. Dit speelt zich dus af op ongeveer 80° van de zon. Dit is de eerste wijze waarop de grens van zo'n verlicht gebied zich kan manifesteren. De helderheid van de bijdrage neemt dan geleidelijk af, zonder dat wij een scherpe grens van het verlichte deel van de hemel kunnen aangeven: het licht sterft als het ware uit bij een groter wordende hoekafstand tot de zon. Kleuren zien wij niet op deze grens, doordat in het gebied waar wij dit zouden kunnen verwachten (en dus de grens voor bijvoorbeeld geel licht wél, maar voor rood licht nog niet is overschreden) de helderheid van het licht al zeer gering is.

De begrenzing van zo'n door een bepaalde bijdrage verlicht gebied aan de hemel kan

echter ook op een andere wijze plaatsvinden. Hierbij neemt de helderheid van dit gebied juist *toe* naarmate men dichter bij zijn begrenzing kijkt, en wordt hij abrupt minder als men deze passeert. De helderheid van het licht van zo'n bijdrage is dan juist maximaal op de grens waar het licht zich nog juist kan manifesteren, dus op de grens van het verlichte gebied. Hierdoor zien wij zo'n grens zich duidelijk aftekenen aan de hemel, en doordat deze grens iets anders is voor iedere kleur is het verlichte deel van de hemelkoepel hier begrensd door een heldere, gekleurde band! De uiterste grens is rood, en deze kleur vormt dus de uiterste begrenzing van het verlichte gebied, maar hiervoor bereiken alle andere kleuren hun maximale helderheid. Dit gedrag van het licht nabij zijn grens komt bij een regendruppel voor bij de lichtwegen 3 en 4 in figuur 4.

Van deze twee mogelijkheden is het licht van weg 3 het helderste, doordat hier slechts van één inwendige weerkaatsing sprake is. De grens van het door deze lichtweg beschenen gebied aan de hemel, op ongeveer 40° van het tegenpunt van de zon,

Fig. 6. De regenboog verschijnt in een met druppels gevulde lucht tegenover de zon. Let op de kleurvolgorden en de donkere band tussen de bogen.



de druppel ondergaat voor het uittreedt, en dat deze lichtwegen ook voor regenbogen kunnen zorgen. Inderdaad zijn deze wegen mogelijk, maar door de vele weerkaatsingen die het heeft ondergaan is het licht dermate zwak, dat het in alle gevallen overstraald wordt door een van de bovengenoemde bijdragen. Hierdoor zijn lichtverschijnselen van deze bijdragen nooit te zien.

Door dit alles heeft de met regendruppels gevulde, en door zonlicht beschenen lucht het volgende uiterlijk: zeer helder bij de zon, en deze helderheid loopt geleidelijk af; op een hoekafstand van 90° van de zon is de lucht behoorlijk donker. Op ongeveer 120° neemt de helderheid geleidelijk toe en bereikt een maximum in de nevenregenboog. Verder van de zon af is de lucht bijna zwart, tot wij de grens van lichtweg 3 bereiken: de (hoofd)regenboog. Binnen deze band neemt de helderheid weer iets af, maar blijft toch aanzienlijk.

Een goed waarnemer zal kunnen zien dat egale bewolking die uit zeer kleine druppeltjes bestaat, globaal gesproken eenzelfde uiterlijk heeft. Een verschil is echter, dat de regenboog hier niet meer gekleurd is, maar wit. Op de plaats waar de regenboog zou verschijnen ziet men dan dat de bewolking relatief veel licht uitzendt. Kleine druppels, zoals die in deze wolken voorkomen, geven voorts nog aanleiding tot het ontstaan van kleine gekleurde ringen rond de zon (of maan) en rond het tegenpunt hiervan (de *krans* en de *glorie*). Anders dan bij de regenbogen ontstaan deze fraaie verschijnselen door interferentie-effecten aan deze kleine deeltjes; als zodanig vallen ze buiten het kader van dit verhaal.

Uit het bovenstaande blijkt wel, dat de met regendruppels gevulde lucht zeer sterk verschilt van de blauwe, onbewolkte lucht en dat deze verschillen in hoge mate veroorzaakt worden door het vermogen van druppels licht te verstrooien langs verschillende wegen. De regenboogachtige verschijnselen, dus de heldere grenzen van een door een specifieke lichtweg oplichtend deel van de hemel, geven het strooiingspatroon zijn zeer karakteristiek uiterlijk.

IJskristallen in de atmosfeer

Ook indien de lucht gevuld is met ijskristalletjes, dus als er zich wolken in de hogere, koudere lagen van de dampkring aanwezig zijn, ontstaat er een karakteristiek uiterlijk van de hemelkoepel. Ook bij ijskristallen kan het licht verschillende wegen door het deeltje heen volgen, waarvan er sommige regenboogachtige verschijnselen tweeweg kunnen brengen. Het strooiingspatroon van deze deeltjes verschilt echter sterk van dat van druppels. Hierdoor zorgen ijskristallen in de dampkring voor een geheel afwijkend uiterlijk

van de hemelkoepel, zoals wij in het nu volgende zullen zien.

IJskristallen zijn meestal zeshoekjes die aan de bovenkant en onderkant begrensd zijn door een plat vlak. Zo'n doorzichtige zeshoek kan het licht zoals een glazen prisma of een diamant op kleurige wijze in verschillende richtingen verstrooien. De oorzaak van deze kleurenpracht is ook hier gelegen in de wijze waarop het licht door het kristal verstrooid kan worden en het gedrag van de verschillende lichtwegen nabij de grens waar ze zich kunnen manifesteren. Er zijn hier echter veel meer mogelijkheden waarop lichtstrooiing tot stand kan komen dan bij druppels. Enkele van deze mogelijkheden zijn weergegeven in fig. 5.

Uitwendige en inwendige weerkaatsing zoals lichtweg 1 en 2 in fig. 5 zorgen voor een min of meer egale, witte verlichting van de hemelkoepel, juist zoals de uitwendige weerkaatsing aan regendruppels. Deze verlichting kan zeer intens zijn als bij de inwendige reflectie totale reflectie optreedt. Ook licht dat weg 3 of 4 gevolgd heeft is zeer helder, daar het geen weerkaatsingen heeft ondergaan. Zulk licht, dat twee keer gebroken is door vlakken die een hoek van 60° of 90° met elkaar maken (beide combinaties zijn mogelijk in zo'n kristal), kan echter ook maar in een bepaald gedeelte van de hemelkoepel terechtkomen. Licht dat een dergelijke weg volgt zal bijvoorbeeld nooit rechtdoor kunnen gaan, hoe de oriëntatie van het kristal ook is. Hierdoor levert het dus nooit een bijdrage tot de verlichting van de hemelkoepel in de buurt van de zon. Het blijkt nu, dat deze lichtwegen aanleiding geven tot het ontstaan van kleurverschijnselen die analoog zijn aan de regenboogeffecten bij verstrooiing aan druppels: de grens van een door een specifieke lichtweg oplichtend deel van de hemel is zeer helder en is te zien als een gekleurde band.

Halo's van 22° en 46°

De lichtverdeling van de hemelkoepel ziet er — bij willekeurige oriëntatie van de kristallen — als volgt uit: het is relatief *donker* in het gebied niet ver van de zon. Op 22° hiervan kan lichtweg 3 (breking aan een kristalhoek van 60°) een bijdrage gaan leveren, en wel het eerst in het rood. Ook hier is, juist zoals bij de regenboog, de helderheid het grootste bij deze grens; wij zien deze grens dus als een gekleurde kring rond de zon: de *halo* (fig. 7). De helderheid hiervan overtreft die van de regenboog vele malen, omdat wij hier te doen hebben met twee brekingen en met geen enkele weerkaatsing. Buiten deze kring neemt de helderheid weer snel af, tot wij op 46° van de zon de grens waarnemen van lichtweg 4, dus breking aan een kristalhoek van 90° . Hier herhaalt zich het kleurige fenomeen, en verschijnt er dus weer een kring met rood aan de binnenkant. Deze is minder lichtsterk dan de 22° halo, maar altijd nog veel helderder dan een regenboog.

De halo's van 22° en van 46° , die wel de kleine resp. grote kring genoemd worden, verschillen sterk in uiterlijk. Bij de eerste halo neemt de intensiteit van het licht in alle kleuren betrekkelijk langzaam af naarmate men verder van de zon kijkt, zodat er op plaatsen waar bijvoorbeeld het blauw of groen moet verschijnen, ook nog een aanzienlijke bijdrage van rood of geel licht is. Deze kleuren worden hierdoor behoorlijk gemengd, hetgeen resulteert in witachtig licht. Rood en geel zijn daarentegen wel goed te zien, aangezien deze kleuren natuurlijk veel minder gemengd worden: op deze plaatsen geven de andere kleuren nog geen bijdrage. De kleurenrijkdom is hierdoor veel geringer dan die van de regenboog, waar de menging van de kleuren doorgaans veel geringer is. Anders is echter de situatie voor de 46° halo. Hier neemt de

intensiteit voor iedere kleur veel sneller af bij zijn grens, waardoor bijvoorbeeld blauw nauwelijks gemengd wordt met rood of met een andere kleur. Het gevolg is dat deze halo van een schitterende kleurrijkdom is, die in dit opzicht een regenboog vele malen overtreft.

Verscheidenheid in halovormen

Bij ijskristallen doet er zich iets bijzonders voor, waardoor het uiterlijk van de 'ijskristalhemel' afhankelijk van de situatie spectaculaire veranderingen kan ondergaan. Ijskristallen zijn namelijk niet symmetrisch zoals regendruppels, en dwarrelen daardoor als boombladeren door de dampkring. In een rustige atmosfeer heeft zo'n deeltje de neiging zich te stabiliseren gedurende het vallen, en dus naar één bepaalde voorkeursoriëntatie te streven. De oriëntatie die dan aangenomen wordt hangt af van de vorm van het kristal. Halo's die door zwermen georiënteerde deeltjes gegenereerd worden hebben echter een afwijkende vorm: in plaats van een kring rond de zon zien wij in zo'n geval slechts op enkele plaatsen waar deze kring zou verschijnen kleureffecten. Deze verschijnselen zijn echter veel lichtsterker dan de gewone halo; het is alsof alle helderheid van deze kring geconcentreerd

wordt in enkele kleine gebiedjes aan de hemel. Het resultaat is dat er bijvoorbeeld zeer heldere, gekleurde vlekken ter weerszijde van, of gekromde boogjes boven of onder de zon verschijnen. De afstand van deze vlekken of boogjes tot de zon is ook ongeveer 22° of 46° ; hun kleurenvolgorde dezelfde als die van de kringen. De vlekken worden *bijzonnen* genoemd, de boogjes *raakbogen*. Het blijkt nu, dat de vorm van de boogjes sterk kan afhangen van de zonnestand, en bijvoorbeeld kan variëren van een sterke V-vorm bij een laagstaande zon tot een zwak tegengesteld gebogen boog bij een hoge zonnestand. Hierdoor is de aanblik van een 'ijskristalhemel' aan een voortdurende wisseling onderhevig. Het uiterlijk van deze lucht wordt bepaald door de voortdurende veranderende zonnestand en de mate waarin en de wijze waarop de ijskristallen in de dampkring georiënteerd zijn. Bovendien kunnen er soms op andere plaatsen aan de hemelkoepel halovormen verschijnen die het gevolg zijn van nog andere lichtwegen door de kristallen. Het bestuderen van deze lucht is daarom een lust voor de waarnemer, die zich echter doorgaans wel moet wapenen met een zonnebril vanwege de grote lichtsterkte van vele van deze verschijnselen. Het spectaculairst is misschien wel de vormverandering die men kan waarnemen aan boogjes onder de zon, en

wel speciaal bij een lage zonnestand. Omdat dit boogje zich dan *onder* de horizon bevindt is dit echter slechts mogelijk vanuit vliegtuigen.

Samenvattend kan worden gezegd dat de lichtverdeling aan de hemelkoepel wordt bepaald door de deeltjes in de dampkring die het licht het effectiefst verstrooien, terwijl men omgekeerd uit de lichtverdeling conclusies kan trekken omtrent de aard en toestand van deze deeltjes. Ondanks de enorme verscheidenheid in strooiingspatronen is er toch een uniformiteit in de verschijnselen die zich kunnen voordoen. De natuur gebruikt de atmosfeer als een 'optisch laboratorium' en demonstreert ons de vele mogelijkheden tot lichtverstrooiing; wij kunnen deze experimenten waarnemen als een schitterende wisseling van kleuren en intensiteiten aan de dagelijkse hemel.

Literatuur

- E. A. Mason, R. A. Munn en F. J. Smith, *Rainbows and glories in molecular scattering*, Endeavor 30, p. 91-96 (1971).
 G. P. Können, *Overeenkomsten en verschillen tussen deeltjesstrooiing en lichtstrooiing*, Ned. Tijdschrift voor natuurkunde 38, p. 265-271 en 283-287 (1972).
 M. Minnaert, *De natuurkunde van het vrije veld 1*, Thieme 1968.
 S. W. Visser, *Optische verschijnselen aan de hemel*, KNMI, Verspreide opstellen 3 (1957).

Fotoverantwoording

Opnamen van fig. 1, 2, 3 en 6: B. Zwart.
 Opnamen van fig. 7: G. P. Können.

* Dit artikel is ook verschenen in 'Intermediair' 13 no. 45 (11 nov. 1977)

Fig. 7. (links): In hoge bewolking, die uit ijskristallen bestaat tekent zich hier de kleine kring (straal = 22°) af. De zon bevindt zich achter de 'kop' van de lantarenpaal.
 (rechts): Ook rond de maan verschijnt regelmatig een halo (=lichtkring) zoals de tijdopname van ongeveer een halve minuut laat zien. De groenige tint van de hemel is niet echt, maar een gevolg van de relatief lange belichtingstijd.

