

15 MILJOEN GRADEN

*Voor Valerie en Alan Green,
mijn ouders en rolmodellen*

Lucie Green

15 MILJOEN GRADEN

Wat de zon voor ons betekent

Nieuw Amsterdam Uitgevers

Auteur en uitgevers willen erop wijzen dat het gevaarlijk is om zonder bescherming naar de zon te kijken: dit kan blijvende oogschade veroorzaken. De zon kan alleen veilig worden bekeken met speciaal voor dit doel ontwikkelde filters, met een kleine gaatjescamera of door middel van andere indirecte waarnemingsmethoden. Zie de appendix op blz. 265.

Vertaling Eddy Echternach

© 2016 Lucie Green

Oorspronkelijke titel *15 Million Degrees*

Oorspronkelijke uitgever Viking, an imprint of Penguin Books

© 2016 Nederlandse vertaling Eddy Echternach

en Nieuw Amsterdam *Uitgevers*

Alle rechten voorbehouden

Tekstredactie Sophie Verburgh

Register Ansfried Scheifes

Ontwerp omslag Paul Pollmann

Ontwerp binnenwerk Yulia Knol

Foto omslag NASA/AIA consortium/Lucie Green

Foto auteur Max Alexander

NUR 917

ISBN 978 90 468 1442 0

www.nieuwamsterdam.nl/15miljoengraden



Inhoud

Inleiding	7
1 Licht: geloof uw ogen niet	11
2 Sterrenkracht	27
3 Zonnen en dochters	43
4 Het geheime leven van een foton	59
5 Zonnevlekken	76
6 De ronddraaiende zon: de dag dat de zon terugsloeg	94
7 De dynamische zon	109
8 Verduisteringen en regenbogen	126
9 Bon Voyage	142
10 Het ruimtevaarttijdperk	160
11 De licht ontvlambare zon	176
12 Coronale massa-ejecties	193
13 Leven in de atmosfeer van de zon	214
14 Wat staat ons nog te wachten?	233
Slot: Onze bijzondere zon	250
Appendix: Hoe kun je de zon veilig waarnemen?	265
Verantwoording	267
Verklarende woordenlijst	269
Literatuur	273
Register	280

INLEIDING

Dit boek gaat over één ster. Slechts een van de honderden miljarden sterren in ons sterrenstelsel, de Melkweg, dat op zijn beurt slechts een van de honderden miljarden sterrenstelsels in het ons bekende heelal is. Als je even stilstaat bij die enorme aantallen, zou je denken dat onze ster haast niet buitengewoon kan zijn. Maar na bijna twintig jaar zonneonderzoek ben ik tot de conclusie gekomen dat zij toch echt heel bijzonder is. En ik wil u laten zien waarom.

In het hart van de zon bevindt zich een reusachtige nucleaire oven. Een haast onuitputtelijke bron van energie die we op aarde graag zouden nabootsen. De zon heeft er een van nature en kan er ongeveer negen miljard jaar mee vooruit. De temperatuur in haar kern bedraagt meer dan 15 miljoen graden, en de daar aanwezige materie staat onder kolossale druk. Het is onder deze extreme omstandigheden dat zonlicht wordt geproduceerd. Ik kan me nog goed herinneren hoe verrast ik was toen ik hoorde dat zonlicht ontstaat als gammastraling, die er 170.000 jaar over doet om geleidelijk naar het zonneoppervlak te sijpelen, waarna het als zichtbaar licht aan zijn acht minuten durende reis naar de aarde begint. Maar licht is niet het enige dat de zon onze kant op stuurt. En dat maakt haar nog intrigerender.

De zon is bij vlaggen een onstuimige ster die de krachtigste explosies en uitbarstingen in het zonnestelsel produceert. In dit boek wil ik u alle aspecten van het karakter van de zon laten zien – van het serene, maar vlekkerige oppervlak dat we zien wanneer we de zon in zichtbaar licht bekijken, tot de explosieve en onvoorspelbare atmosfeer die op ultraviolette, röntgen- en gammagolflengten moet worden bekeken. Zowel de explosies als de uitbarstingen zijn prachtig om te zien, maar omdat we 150 miljoen kilometer van de zon verwij-

derd zijn, valt het niet mee om hun geheimen te ontraadselen. Daarvoor moesten we de ruimte in gaan.

In dit boek wordt het verhaal van enkele van de eerste ruimtepioniers uit de doeken gedaan. We zullen zien dat hun ruimtetelescopen waren gebaseerd op overbodig geworden technologie uit de Tweede Wereldoorlog.

De eerste opnamen van de zon vanuit de ruimte werden gemaakt met eenvoudige gaatjescamera's. Maar inmiddels kunnen we beschikken over zoiets als de Solar Dynamics Observatory, een NASA-satelliet die om de twaalf seconden tien zeer detailrijke opnamen van de zonneatmosfeer maakt. En dat zijn nog maar de gegevens van een van de drie instrumentenpakketten aan boord van de satelliet. Deze fenomenale kunstmaan voegt per dag 1,5 terabyte aan informatie aan onze archieven toe. In één week worden van die ene ster meer gegevens gegenereerd dan de Hubble-ruimtetelescoop in een jaar over de rest van het heelal verzamelt.

Het ruimtevaarttijdperk heeft ons de luxe gegeven om de zon op elk willekeurig moment en op elke golflengte van het elektromagnetische spectrum te bekijken. Het uitzicht van boven de aardatmosfeer is adembenemend, maar er hangt wel een prijskaartje aan. Om 1 kilogram de ruimte in te brengen, moet ongeveer 15.000 euro worden neergeteld, waardoor de kosten voor de grootste ruimtetelescopen kunnen oplopen tot een miljard euro. Zelf heb ik gewerkt met de SOHO-satelliet, die in 1995 werd gelanceerd en ruim 700 miljoen euro kostte (SOHO staat voor Solar and Heliospheric Observatory). Maar dat geld is goed besteed, gewoon hier op aarde: het heeft tal van hooggekwalificeerde ontwerpers en technici uit de academische wereld en het bedrijfsleven aan een baan geholpen. Ons onderzoek van de zon is belangrijk voor de wetenschap, maar óók voor de ruimtevaartsector als geheel. Alleen al in het Verenigd Koninkrijk wordt er een omzet van meer dan 13 miljard euro gedraaid en biedt de sector werk aan 34.000 mensen. Wereldwijd gaat er in de ruimtevaartindustrie bijna 260 miljard euro om.

De ruimtevaart is bepalend geweest voor het verloop van mijn wetenschappelijke carrière en ik wil u laten zien hoe belangrijk het

ruimtevaarttijdperk is geweest voor ons begrip van de zon. Het heeft letterlijk onze horizon verbreed en zelfs laten zien dat de atmosfeer van de zon zich uitstrekt tot een duizelingwekkende 18 miljard kilometer voorbij de aarde – dat is 120 keer de afstand zon-aarde. Eigenlijk leven we *in* de zonneatmosfeer! En terwijl deze atmosfeer door het explosieve gedrag van de zon veranderingen ondergaat, maakt de aarde kennis met het woelige ‘ruimteweer’. We zullen zien hoe dit een bedreiging vormt voor de moderne samenleving, vanwege zijn invloed op onze stroomnetwerken en communicatiesatellieten. Maar wees gerust: we leren het ruimteweer steeds beter voorspellen en houden, voor onze eigen veiligheid en ten behoeve van de ruimtevaarteconomie, de zon voortdurend in de gaten.

In dit boek zal ik laten zien wat er allemaal komt kijken bij onze schijnbaar eenvoudige wens om de zon te begrijpen – we hebben een hele reis voor de boeg! Duizenden jaren van waarnemingen met het blote oog (probeer dat niet zelf!), honderden jaren van telescoop-waarnemingen (ga naar een gespecialiseerde leverancier) en tientallen jaren van waarnemingen vanuit de ruimte (beelden gratis beschikbaar via internet) zullen de revue passeren. We zullen zien hoe het begrip van de zon afhankelijk is van deeltjesfysica, thermodynamica, elektriciteit, magnetisme, zwaartekracht en licht. We zullen zien hoe energie wordt getransporteerd en van gedaante verandert, en dat dit is ontdekt door een scheepsarts. En we zullen erachter komen dat de ontdekking van het magnetische veld van de zon een ongelooflijk samenspel van wetenschap en techniek vereiste. Dat heeft zelfs een nieuwe tak van wetenschap opgeleverd: de zonnefysica.

U zult waarschijnlijk denken dat ik geobsedeerd ben door de zon. En dat klopt ook wel. Maar daar wil ik bij opmerken dat onze zon de belangrijkste ster is die er ooit is geweest en er ooit zal zijn, omdat dit de ster is die het leven op aarde de energie schonk om te kunnen gedijen. Terwijl ik dit opschrijf zoeken wetenschappers naar leven elders in het heelal – zowel binnen als buiten ons zonnestelsel. We scannen de hemel af naar radiosignalen van geavanceerde beschavingen, zenden onze eigen boodschappen uit en kammen het oppervlak van Mars uit op micro-organismen. Er bestaan zelfs plannen om ook op de manen van planeten naar leven te zoeken. Maar

anno 2016 is nog maar op een van de planeten die om onze zon cirkelen leven ontdekt: op de aarde.

Toch zal ik het ook over andere sterren hebben. We zullen zien hoe deze ons leren begrijpen tot welke uitbarstingen onze zon op een dag in staat kan zijn. Omgekeerd zal ook blijken dat de zon een opstapje was naar ons begrip van de andere sterren in het heelal. De gedetailleerdheid waarmee we haar kunnen waarnemen, heeft een schat aan kennis opgeleverd. Alle andere sterren zijn zo ver weg dat ze zich slechts als kleine lichtstipjes vertonen. Het is aan ons onderzoek van de zon te danken dat we erachter zijn gekomen dat sterren in wezen bollen van plasma zijn, die stralen omdat zich in hun kernen nucleaire processen afspelen. Dat suggereert een wonderschone eenvoud. Het is dan ook niet zo vreemd dat de Britse wis-, natuur- en sterrenkundige Arthur Eddington in 1926 schreef dat ‘het redelijk is om te hopen dat we in de niet al te verre toekomst in staat zullen zijn om zoiets eenvoudig als een ster te begrijpen’.

Eddington overleed in 1944 op 63-jarige leeftijd, slechts enkele jaren voor het begin van het ruimtevaarttijdperk. Hij wist niet dat de zon een miljoenen graden hete atmosfeer heeft en dat we haar inwendige kunnen onderzoeken door gebruik te maken van geluidsgolven die daarin opgesloten zitten en hun bestaan kenbaar maken door het zonsoppervlak op en neer te laten deinen. Als Eddington nog zou leven, zou hij ongetwijfeld onder de indruk zijn van het niveau en de complexiteit van onze kennis. In dit boek zult u zien hoe ver we gevorderd zijn bij onze pogingen om ‘zoiets eenvoudig als een ster te begrijpen’.

LICHT: GELOOF UW OGEN NIET

Sommigen van u lezen dit boek misschien buiten in de zon – tijdens een strandvakantie bijvoorbeeld of gewoon in de tuin. Of misschien bent u tijdens de lunchpauze op uw werk naar buiten gegaan om wat zonnefysica op te snuiven. Hoe dan ook: dat u de krullen en hoeken van elke letter van elk woord kunt onderscheiden, is te danken aan het zonlicht dat op de bladzijden van dit boek valt. Waar het papier wit is, weerkaatst veel van het zonlicht in de richting van uw ogen. Waar inkt zit, word weinig zonlicht weerkaatst, waardoor donkere vormen verschijnen in de vorm van de letters van de woorden die u nu leest.

Het zonlicht dat u gebruikt om te lezen, vormt een onafgebroken stroom die bijna 150 miljoen kilometer heeft afgelegd voordat hij uw boek verlicht. * De productie van licht is wat onze zon tot ster maakt. Alle planeten, manen, planetoiden en al het andere in ons zonnestelsel zijn als de bladzijden van dit boek: ze geven geen licht, maar zijn zichtbaar omdat ze zonlicht weerkaatsen. Het licht dat de zon voortdurend uitzendt is een belangrijk verschijnsel – niet alleen voor ons zonnestelsel, maar ook voor het heelal als geheel. Onze beleving van het heelal komt tot stand via het licht dat door sterren is gegenereerd.

Als soort zijn we groot geworden met zonlicht. Elk mens dat ooit heeft geleefd was ervan afhankelijk, en onze lichamen zijn geëvolueerd en aangepast om het te gebruiken. Onze evolutionaire ge-

* In 2012 heeft de Internationale Astronomische Unie, de officiële instantie die verantwoordelijk is voor het goedkeuren van afstandseenheden in de sterrenkunde, de Astronomische Eenheid – de gemiddelde afstand tussen de zon en de aarde – vastgesteld op 149.597.870,700 kilometer.

schiedenis is nauw verbonden met de zon: de ontwikkeling van het oog, dat ons gezichtsvermogen geeft, de aanmaak van vitamine D en de pigmentatie van onze huid, die ons tegen zonnebrand en andere schade beschermt – onze relatie met het zonlicht is essentieel. Niet alleen stelt zonlicht ons in staat om te zien, het maakt onze rotsachtige planeet ook leefbaar voor miljoenen soorten planten en dieren. Het laat ons voedsel groeien, drijft ons weer aan en kan zelfs worden benut voor de opwekking van de stroom die nodig is om een moderne samenleving te laten draaien. Zonlicht is verbluffend veelzijdig, maar bovenal is het cruciaal voor ons bestaan. We zouden werkelijk niet zonder kunnen.

De alomtegenwoordige en centrale rol die zonlicht in ons leven speelt, roept onmiddellijk de vraag op: wat is het eigenlijk?

De aard van het licht

Hoewel licht zo gewoon is dat je er nauwelijks nog bij stilstaat, bewijst je eigen schaduw dat het wel degelijk ‘iets’ is. Dat we een schaduw kunnen maken door licht tegen te houden, betekent dat er plekken zijn waar geen licht is. Licht moet dus een object of verschijnsel zijn, en dat betekent dat we het vermogen hebben om het te onderzoeken. En dat is waar we al generaties lang mee bezig zijn.

Hoewel de vraag ‘Wat is licht?’ al vele eeuwen oud is, beschikken we pas ongeveer 150 jaar over de juiste middelen om deze te beantwoorden. Vóór die tijd konden we alleen onderzoeken wat licht doet. En er is een groot verschil tussen zien *hoe* zonlicht zich gedraagt en weten *waarom* het zo doet. Als echter eenmaal de noodzakelijke wetenschappelijke fundamenteën zijn gelegd, valt alles op zijn plek.

Het was hoofdzakelijk de verdienste van één persoon dat in 1666, door middel van een schijnbaar eenvoudig experiment met een wig van glas, een van de aspecten van zonlicht kon worden opgehelderd. Dit experiment, dat verklaarde waarom we kleuren kunnen zien, was het geesteskind van de beroemde wis- en natuurkundige Isaac Newton.

Slechts enkele decennia voor de geboorte van Newton was de te-

lescoop uitgevonden. En de primitieve instrumenten waren door mensen als Galileo Galilei al op de hemel gericht, zodat hun cirkelvormige glazen lenzen het licht van verre hemelobjecten konden verzamelen en tot een beeld konden focussen – net zoals de lenzen in uw ogen dat nu doen met het licht dat door de bladzijden van dit boek wordt weerkaatst. Het onderzoek naar de aard van het licht begon toen Newton zich afvroeg wat er zou gebeuren als licht door een stuk glas zou gaan dat niet cirkelvormig was.

Newton verduisterde zijn kamer en plaatste een driehoekig stuk glas, een prisma, in een straal zonlicht die via een kier in de raamluiken naar binnen scheen. Hij verwachtte een kring van kleuren op de tegenoverliggende muur te zien, net als in een telescoop. Maar in plaats daarvan verscheen een kleine ‘regenboog’ – niet gebogen, maar lijnrecht. Op dat moment ontdekte Newton een geheel nieuw aspect van het gedrag van zonlicht: het kan worden gebroken en tot kleuren worden ontleed. Belangrijker nog was zijn conclusie dat de regenboogkleuren een inherente eigenschap van het licht zelf waren: het was niet het glas dat het licht kleur gaf. Zonlicht bestond werkelijk uit een reeks kleuren die na samenvoeging wit leken. Newton leverde hier ook het bewijs voor door het proces om te keren: een tweede prisma kon de regenboog weer in een bundel wit licht veranderen.

Soms krijgen we tijdens of na een regenbui een grandioze versie te zien van wat Newton waarnam. Wanneer de zon van achter de wolken tevoorschijn komt en haar licht waterdruppeltjes in de lucht tegenkomt, fungeren deze als prisma's en worden de kleuren waaruit zonlicht bestaat uiteengehaald tot een regenboog. Misschien staat, terwijl u dit leest, naast u wel een glas water. Als dat zo is, kunt u het verschijnsel direct met eigen ogen bekijken. Zet het glas op een wit oppervlak in de zon, en u ziet de kleuren die het zonlicht krijgt bij in- en uitrede van het water.

Newtons theorie wordt gestaafd door het feit dat of je nu een prisma gebruikt of water of regendruppeltjes in de lucht, de kleuren van de regenboog altijd in dezelfde volgorde verschijnen: rood, oranje, geel, groen, blauw en violet. De bladzijden van dit boek lijken alleen maar wit, omdat ze al deze kleuren in gelijke

mate weerkaatsen. De wereld om ons heen is kleurrijk, omdat de verschillende voorwerpen verschillende hoeveelheden van deze kleuren weerkaatsen.

Newtons experiment, hoe verhelderend ook, gaf echter geen antwoord op de vraag: ‘Wat is licht?’ Newton veronderstelde dat licht een substantie was, bestaande uit bundels van minuscule deeltjes die afhankelijk van hun kleur meer of minder massa hadden. Wanneer licht van lucht overging naar glas en weer van glas naar lucht, werden deeltjes van verschillende massa op verschillende manieren afgebogen. Deze refractie of lichtbreking zou de oorzaak zijn van de ontrafeling van het zonlicht.

Newton was niet de enige die nieuwe waarnemingen deed over het gedrag van licht. Zowel de Engelse veelweter Robert Hooke als de Nederlandse wis- en natuurkundige Christiaan Huygens onderzocht de aard van het licht, maar geen van beiden onderschreef Newtons deeltjestheorie. Daar hadden zij ook alle reden voor: gebleken was immers dat twee lichtbundels dwars door elkaar heen konden gaan, zonder dat ze elkaar beïnvloedden. Dat is niet wat je zou verwachten als licht uit deeltjes bestaat: die zouden met elkaar in botsing komen. Maar het is precies wat je zou verwachten als licht uit golven bestaat – een idee dat Newton resoluut van de hand wees.

Hooke was de eerste ‘curator van experimenten’ van de Royal Society in Londen, en hij had bijdragen geleverd aan tal van takken van wetenschap. Ook was hij niet wars van discussie. Dus toen Newton, slechts een paar jaar nadat Hooke zijn golftheorie had openbaard, zijn eigen lichttheorie publiceerde, ontstond een grote rivaliteit tussen hen. Newton trok aan het langste eind, domweg omdat hij Hooke overleefde. Bovendien hield hij de details van zijn complete lichttheorie achter totdat Hooke in 1703 was overleden.

In datzelfde jaar werd Newton voorzitter van de Royal Society. Deze organisatie bestaat nog steeds – iets waar ik heel dankbaar voor ben, omdat zij mij als Royal Society University Research Fellow financiert. Ik ken de Royal Society en haar hoofdkwartier in Londen erg goed, en het is me opgevallen dat er niet één schilderij, portret of borstbeeld van Hooke te zien is. En dat komt doordat er

voor zover bekend geen bestaan – nogal eigenaardig voor iemand die zo'n belangrijke rol binnen de organisatie heeft gespeeld. Het (onbewezen) gerucht gaat dat Newton, toen hij voorzitter werd, alles wat met wijlen Robert Hooke te maken had, liet weggooien.

Newton overleefde ook Huygens, die in 1695 overleed. Huygens had het golfidee tot een veel gedetailleerdere theorie ontwikkeld, die na zijn dood voortleefde. Door zonlicht te beschouwen als een golf die zich door een onbekend medium voortplantte, zoals de rimpelingen op het oppervlak van een vijver, kon Huygens verklaren *waarom* zonlicht zich gedraagt zoals het doet. Zijn theorie sloot goed aan bij de waarnemingen. Refractie (lichtbreking) ontstaat wanneer het front van de golf doorzichtig materiaal onder een hoek treft, zodat het deel van het golffront dat in aanraking komt met het transparante materiaal afremt en de rest van de golf zich aanvankelijk met dezelfde snelheid blijft voortplanten. Dit verklaart waarom het golffront binnen het transparante materiaal een draai maakt en van richting verandert. Volgens de theorie van Huygens konden golven elkaar ongehinderd kruisen, omdat er geen materie was om mee in botsing te komen.

De volgende stap in de ontwikkeling van de golftheorie van het licht was om uit te vlooien om welk soort golven het ging. Waaruit bestond de substantie eigenlijk die licht in staat stelde om zich voort te planten? En wat golfde er precies? Het antwoord op deze vragen kwam uit onverwachte hoek – die van het elektriciteitsonderzoek.

Onze eerste ervaringen met elektriciteit – bliksemschichten tijdens een onweersbui en statische elektrische ladingen van de vloerbedekking – zijn zo oud als onze blootstelling aan licht. In de negentiende eeuw, meer dan een eeuw nadat we een eerste fundamenteel begrip van licht begonnen te ontwikkelen, was de elektriciteit aan de beurt om onder de loep genomen te worden. Dat was een hele onderneming, en wellicht komen de namen van degenen die het experimentele werk voor hun rekening namen u bekend voor. Ampère, Gauss, Ohm, Faraday en Coulomb leven voort in de eenheden die naar hen zijn genoemd. Zij legden het fundament voor een theorie die elektriciteit en licht met elkaar verenigde. De-

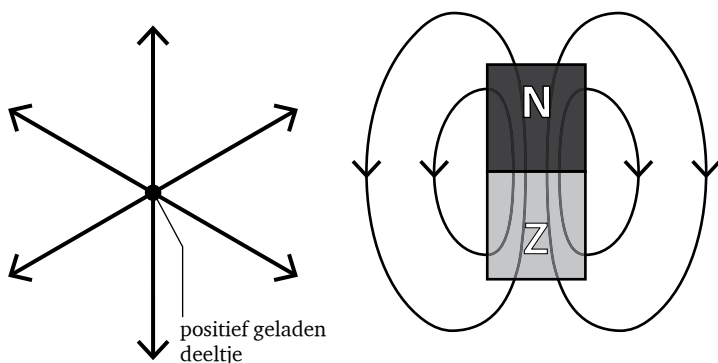
ze theorie werd in 1862 ontwikkeld en was het werk van de befaamde Schotse wiskundige James Clerk Maxwell.

In de elektriciteit draait alles om elektrische ladingen, die ‘positief’ dan wel ‘negatief’ zijn – willekeurige aanduidingen die mettertijd ingeburgerd zijn geraakt, maar die eigenlijk alleen maar aangeven dat het om twee soorten gaat. Deeltjes met dezelfde elektrische lading stoten elkaar af, maar deeltjes met ‘tegengestelde’ ladingen trekken elkaar aan. Deze kracht is werkzaam in elk atoom, en zorgt ervoor dat de negatief geladen elektronen in de buurt van de positief geladen kern in het centrum van het atoom blijven.

We maken allemaal dagelijks gebruik van bewegende elektrisch geladen deeltjes: je huis zit vol met draden waar elektrische stromen van traag bewegende elektronen doorheen lopen. Als elektrisch geladen deeltjes in beweging komen, gebeurt er iets waar je pas wat van merkt als je er een kompas bij pakt. Leg maar eens een kompasje (of een smartphone met kompasapplicatie) naast het snoer van je waterkoker. Als je de koker aan- en uitzet, zul je de kompasnaald een beetje heen en weer zien gaan. Dat komt doordat een bewegende lading een kracht opwekt: magnetisme. En om licht te begrijpen, moet je niet alleen kennis hebben van elektriciteit, maar ook van magnetisme.

Magnetisme is net zo’n spookachtige kracht als elektriciteit. Beide werken op afstand. Elektrisch geladen deeltjes stoten elkaar af of trekken elkaar aan zonder dat ze ooit met elkaar in aanraking komen. In beide gevallen kan het effect worden beschouwd als een soort invloedssfeer – doorgaans ‘veld’ genoemd – die wordt voorgesteld als een verzameling veldlijnen. Velen van u kennen de tekeningen van magnetische veldlijnen van de natuurkundeles op school: veldlijnen vormen gesloten lussen die wel wat weg hebben van elastiekjes. Waar de lijnen dicht op elkaar zitten, is het veld sterker, en waar ze verder uiteen liggen is het veld zwakker.

Hetzelfde geldt voor de minder bekende elektrische velden. Het elektrische veld van een geladen deeltje kun je je voorstellen als een reeks lijnen die straalsgewijs aan het deeltje ontspringen, ongeveer zoals spaken aan de naaf van een fietswiel. Dicht bij het centrum, waar zich het deeltje bevindt, liggen de veldlijnen dicht

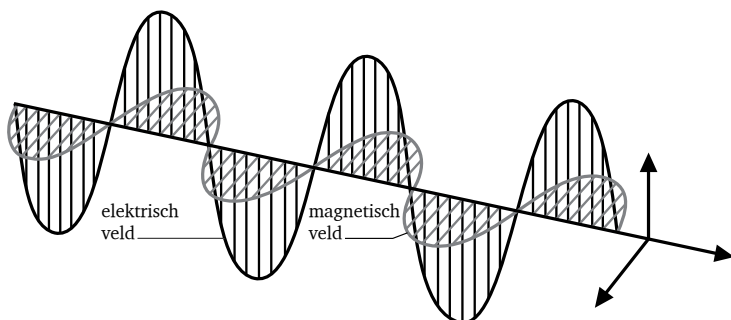


1.1 Schematische tekening van het elektrische veld van een stilstaand positief geladen deeltje (links) en de magnetische veldlijnen van een staafmagneet (rechts).

bij elkaar, wat aangeeft dat de kracht daar sterk is. Verder weg van het deeltje neemt hun onderlinge afstand toe, en wordt de kracht zwakker. Maar anders dan bij elektriciteit bestaan er geen deeltjes die een ‘magnetische’ lading hebben. In plaats daarvan verschijnt een magnetisch veld overal waar bewegende elektrische ladingen in het spel zijn. Vandaar dat er een magnetisch veld verschijnt wanneer je de waterkoker aanzet en de elektrische stroom begint te lopen.

Wanhoop niet als magnetische en elektrische velden u nogal mysterieus voorkomen. Dat ligt niet aan u, maar aan de natuurkunde. Gebleken is dat het twee kanten van dezelfde medaille zijn, en dat kan verwarrend zijn.

Tot nu toe hebben we het gehad over stilstaande geladen deeltjes die een elektrisch veld produceren en bewegende geladen deeltjes die een magnetisch veld produceren (ongezien zijn ook de elektronen in een staafmagneet in beweging – binnen hun atomen). Maar je kunt een elektrisch veld ook op een andere manier opwekken: met een bewegend magnetisch veld. Dat is wat we krijgen wanneer een geladen deeltje versnelt. Maar wanneer een elektrisch geladen deeltje van snelheid verandert, verandert automatisch ook het



1.2 Magnetische en elektrische velden wekken elkaar op in een eindeloze cyclus. Deze tekening laat zien dat het magnetische veld en het elektrische veld loodrecht op elkaar oscilleren.

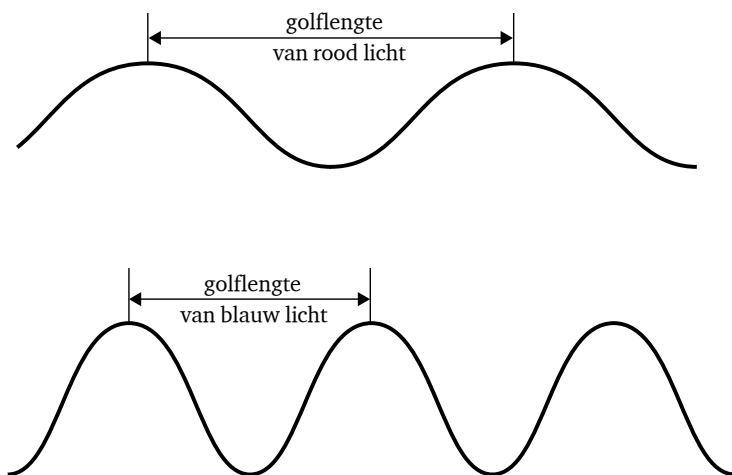
magnetische veld dat door het deeltje wordt gegenereerd. Hierdoor ontstaat een nieuw, secundair, elektrisch veld dat ook weer in beweging is, enzovoort.

Magnetische en elektrische velden zijn nauwer met elkaar verweven dan wie dan ook ooit had verwacht. Het was Maxwell die inzag dat een veranderend elektrisch veld, dat een veranderend magnetisch veld produceerde, dat een veranderend elektrisch veld produceerde, en ga zo maar door, in een elektromagnetische puls zou resulteren die, aan zichzelf overgeleverd, oneindig lang door de ruimte zou blijven golven: een zichzelf in stand houdende golf die geen medium nodig had om door te bewegen. In 1862 berekende Maxwell dat deze golf zich met een snelheid van 310.745 kilometer per seconde zou voortplanten – bijna precies de lichtsnelheid. De conclusie was onvermijdelijk: licht is een elektromagnetische golf. Voor het eerst was er een zinvol antwoord op de vraag ‘Wat is licht?’

De conclusie dat licht een elektromagnetische golf is, lost veel van de problemen waar Newton mee worstelde op. Golven kunnen door elkaar heen gaan zonder elkaar te verstoren. Elektromagnetische golven hebben ook geen materiaal nodig om ze te kunnen geleiden – vandaar dat een lichtgolf zich met een snelheid van 300.000 kilometer per seconde in het vacuüm van de ruimte kan

voortplanten. Bij deze snelheid doet zonlicht er maar ongeveer acht minuten en twintig seconden over om de afstand tot de aarde te overbruggen. Maar die snelheid geldt alleen voor een vacuüm: wanneer licht door een materiaal gaat, beweegt het langzamer. Licht beweegt in water 25 procent langzamer dan in lucht. Dat verklaart het verschijnsel lichtbreking.

De snelheid waarmee de golven in de elektrische en magnetische velden oscilleren is niet altijd gelijk, en het is deze variatie die we als verschillende kleuren waarnemen. Het zijn de verschillende oscillatiesnelheden die tezamen de verschillende kleuren zonlicht genereren die we in een regenboog zien. Licht dat heel snel oscilleert zien we als blauw licht, terwijl rood licht veel langzamer op en neer golft. Rood licht heeft een frequentie van 390 terahertz, wat betekent dat er langs elk punt in de baan van het licht 390 miljoen miljoen golftoppen per seconde passeren. Voor blauw licht is dat 700 terahertz. Dit betekent dat de verschillende kleuren licht ook verschillende golflengten hebben. Als alle lichtgolven zich met dezelfde snelheid voortplanten (en dat doen ze), terwijl het aantal



1.3 Een tweedimensionale tekening van twee golven van verschillende golflengten, die laat zien dat rood licht (boven) een langere golflengte heeft dan blauw licht (onder).

golftoppen dat per seconde langskomt varieert, moet ook de afstand tussen die toppen variëren.

Wanneer licht overgaat van lucht naar water, vertraagt het, maar daarbij verandert de frequentie van de golven niet. Ter compensatie verandert wel de golflengte. Voor onze ogen maakt dat geen verschil, omdat zij kleur onderscheiden aan de hand van de frequentie. Als een zonnestraal onder een hoek van precies 90 graden het water bereikt, verandert al het licht in de bundel gelijktijdig van snelheid. Maar als de zonnestraal onder een kleinere hoek invalt, bereiken de verschillende delen van de dwarsdoorsnede van de bundel het water op iets verschillende momenten. Licht dat het water eerder bereikt, zal vertragen voordat het aangrenzende deel van de lichtbundel dat doet. Het gevolg is dat de lichtbundel afbuigt en van richting verandert. Vergelijk het maar met een rijtje kinderen die hand in hand naast elkaar lopen. Aanvankelijk lopen ze allemaal met dezelfde snelheid en vormen ze een rechte lijn. Stel nu dat de kinderen aan het ene uiteinde wat langzamer gaan lopen dan die aan het andere. Dan lopen ze een achterstand op en begint de rij af te buigen. Als ze hun nieuwe snelheden aanhouden, kan het rijtje kinderen niet rechtdoor blijven lopen. Wanneer licht ten gevolge van dit effect van richting verandert, spreken we van ‘refractie’ – een verschijnsel dat we al bij de golftheorie van Huygens zijn tegengekomen.

Daar komt nog bij dat als het licht overgaat naar het water, de mate waarin zijn snelheid afneemt afhankelijk is van de frequentie. Licht met een hoge frequentie (blauw) wordt sterker afgebogen dan licht met een lage frequentie (rood). Omdat zonlicht bestaat uit een continu spectrum van kleuren die overeenkomen met een aaneengesloten reeks frequenties, zal water dat onder bepaalde hoeken een wateroppervlak treft tot een regenboog uiteengerafeld worden, waarbij blauw altijd aan het ene uiteinde ligt en rood aan het andere.

Daarmee is de kous nog niet af. Wanneer we aan licht denken, denken we aan iets wat we met onze ogen kunnen zien. Maar er steekt meer achter: als het om het begrijpen van de zon gaat, kunnen we niet vertrouwen op onze intuïtie c.q. datgene wat onze hersenen waarnemen. Net als een detective moeten we rekening hou-