

Fabelachtige getallen en waar ze te vinden

Antonio Padilla

Fabelachtige getallen en waar ze te vinden

Een kosmische reis van nul tot in het oneindige

Vertaald door Koos Mebius

Ambo|Anthos
Amsterdam



ISBN 978 90 263 5350 5

© 2022 Antonio Padilla

All rights reserved including the rights of
reproduction in whole or in part in any form

© 2023 Nederlandse vertaling Ambo|Anthos *uitgevers*,
Amsterdam en Koos Mebius

Oorspronkelijke titel *Fantastic Numbers and Where to Find Them*

Oorspronkelijke uitgever Farrar, Straus & Giroux

Omslagontwerp bij Barbara, gebaseerd

op een ontwerp van Oliver Munday

Zetwerk Mat-Zet bv, Huizen

Verspreiding voor België:

Veen Bosch & Keuning uitgevers nv, Antwerpen

*Voor mijn meiden
(die me Gilderoy noemden)*

INHOUD

Een hoofdstuk dat geen getal is 9

GROTE GETALLEN

1,0000000000000000858 19

Een relativiteitsprint 19

Richting het middelpunt van de aarde 35

Een kijkje in de diepte 47

Googol 55

De verhalen van Gerard Grant 55

De kerker van de entropie 59

Googolplex 77

De quantumtovenaar 77

Waar is je dubbelganger? 104

Het getal van Graham 113

Dood door een zwart-gat-hoofd 113

Te veel informatie 126

Neem een getal in gedachten 139

TREE(3) 147
De game of TREES 147
De reset van het heelal 161
Het holografisch principe 169

KLEINE GETALLEN

Nul 185
Een wonderschoon getal 185
De geschiedenis van niets 192
Nul is symmetrie 214
Op zoek naar nul 218

0,0000000000000001 227
Het onverwachte higgsboson 227
Hoe zit dat nu met die deeltjes? 234
Het onvermijdelijke higgsboson 242
Technisch gesproken is er geen sprake van natuurlijkheid 265
De rode pimpernel 272

10^{-120} 278
Een pijnlijk getal 278
Zelfs Einstein had het er maar moeilijk mee 287
Een lot uit de loterij 301
De geest van Sir Isaac Newton 308

ONEINDIGHEID

Oneindig 317
Goden van het oneindige 317
Alfa en omega 328
Contact met het oneindige 349
De theorie van alles 363

Noten 379

Dankwoord 385

EEN HOOFDSTUK DAT GEEN GETAL IS

Vanaf het lichtelijk beduimelde vel papier op de oude eiken tafel staarde het getal me brutaal aan: nul! Ik had nog nooit een nul gekregen voor een wiskundetentamen, maar er was echt geen twijfel mogelijk. In rood en met een agressieve handbeweging neergekalkt pronkte het cijfer boven aan de proeve van bekwaamheid die ik ongeveer een week eerder had ingeleverd. Het was aan het begin van het eerste jaar van mijn studie wiskunde aan Cambridge University. Ik kon het minachtende gefluister van de geesten van de ooit aan de universiteit verbonden grote wiskundigen bijna horen. Wat ik op dat moment niet wist, was dat dit tentamen voor mij een ommekeer zou betekenen. Mijn relatie met zowel de wis- als de natuurkunde zou er ingrijpend door veranderen.

Een van de onderdelen van het tentamen was het leveren van een wiskundig bewijs. Zoiets begint meestal met een paar aannames, op basis waarvan je tot een logische gevolgtrekking moet komen. Stel dat je aanneemt dat Donald Trump zowel een oranje kleur had als dat hij president van de Verenigde Staten is geweest, dan kun je daaruit afleiden dat de Verenigde Staten ooit een oranje president heeft gehad. Uiteraard ging mijn tentamen niet over oranje presidenten, maar er was wel sprake van een aantal wiskundige stellingen die ik volgens een heldere en consistente logica had bewezen. Met dat laatste was mijn docent het eens – alle bewijzen waren aanwezig – maar tóch had hij me een nul gegeven. Zijn bezwaar, zo bleek, gold de manier waarop ik het allemaal op dat beduimelde vel papier had opgeschreven.

Dit frustreerde mij enorm. Met veel moeite had ik het in het tentamen gepresenteerde probleem weten op te lossen, en nu kwam die man met deze spijkers op laag water aanzetten. Het was alsof ik in een voetbalwedstrijd spectaculair had gescoord, waarna mijn docent de VAR had ingeschakeld en het doelpunt vervolgens wegens een nauwelijks zichtbare buitenspelpositie had afgekeurd. Maar inmiddels weet ik heel goed waarom hij dat deed. Hij wilde me het belang van een strikte werkwijze laten zien, hij wilde me laten voelen dat wiskundige ‘muggenzifterij’ een essentieel onderdeel is van het gereedschap van de mathematicus. Met enige tegenzin werd ik zelf ook zo’n muggenzifter, maar ik realiseerde me toen ook dat ik nog wat extra’s verlangde van de wiskunde. Voor mij moest wiskunde een soort persoonlijkheid hebben. Ik heb altijd van getallen gehouden, maar ik wilde ze ook tot leven laten komen – ze ergens toe laten dienen – en daarvoor bleek ik de natuurkunde nodig te hebben. En daar gaat dit boek dus over – de persoonlijkheid van getallen die een rol spelen in de fysieke wereld.

Een mooi voorbeeld daarvan is het getal van Graham. Dat is zo monsterlijk groot dat het een plek in het *Guinness Book of World Records* heeft weten te veroveren; het is het grootste getal dat ooit heeft gefigureerd in een wiskundig bewijs. Het is genoemd naar de Amerikaanse wiskundige (en jongleur) Ron Graham, die er met veel mathematische muggenzifterij fraai in slaagde het in de wiskunde te gebruiken. Maar het is niet die muggenzifterij die het getal van Graham tot leven wekt. Wat het tot leven wekt – of misschien beter gezegd: laat sterven – is de natuurkunde. Als je er namelijk in zou slagen je het getal van Graham voor te stellen – volledig uitgeschreven in het tientalig stelsel –, dan zou je hoofd tot een zwart gat imploderen. Die aandoening staat bekend als *dood door een zwart-gat-hoofd*, en er bestaat geen behandeling voor.

In dit boek ga ik je uitleggen waarom dat zo is.

Ik ga zelfs nog veel meer doen. Ik neem je mee naar een plek waar alles wat je altijd voor waar aannam, op losse schroeven komt te staan. Deze reis door *Fabelachtige getallen* begint met de grootste getallen in

het heelal en een poging inzicht te verschaffen in iets wat bekendstaat als het *holografisch principe*. Vormen de drie dimensies die we kennen slechts een illusie? Zitten we gevangen in een hologram?

Wil je deze vraag begrijpen, geef de lucht om je heen dan eens een paar stompen. Zit er niemand in de weg, haal dan eens flink naar voren en naar achteren uit, en naar links en naar rechts en naar boven en naar beneden. Je kunt je dus een weg knokken door de drie dimensies van de ruimte, in drie verschillende, loodrecht op elkaar staande richtingen. Maar is dat wel zo? Het holografisch principe stelt dat een van die dimensies nep is. Alsof de wereld een 3D-film is. Daarin zitten de concrete beelden immers in een tweedimensionaal scherm gevangen, maar zodra een toeschouwer een 3D-bril opzet, verschijnt er een 3D-wereld. In de natuurkunde wordt deze 3D-bril geleverd door de zwaartekracht, zoals ik in de eerste helft van dit boek zal uitleggen. De zwaartekracht creëert de illusie van een derde dimensie.

Pas toen we ons gingen bezighouden met de extreme vormen van de zwaartekracht werden we ons bewust van deze tovenarij. Dit boek gaat dan ook over extreme zaken. Onze zoektocht naar het doorgronden van het holografisch principe begint onvermijdelijk met Albert Einstein, zijn geniale inzichten, de perverse briljantie van relativiteit en de onderliggende structuur van ruimte en tijd. Uiteraard heb ik ookeen getal dat bij zijn geniale inzichten past: 1,00000000000000858. En dat noem ik, hoe vreemd het ook moge klinken, een groot getal. Ik kan me voorstellen dat je daar vraagtekens bij zet, maar hopelijk weet ik je ervan te overtuigen dat het inderdaad een groot getal is. Het staat namelijk voor een bepaald natuurkundig verschijnsel: de mogelijkheid die de mens heeft om de tijd te beïnvloeden. Willen we dat goed kunnen begrijpen, dan moeten we een stuk met de legendarische sprinter Usain Bolt meerennen. Moeten we afdalen naar de bodem van de Grote Oceaan, naar het diepste deel van de Marianentrog. En moeten we de grenzen van de natuurkunde opzoeken en ons gevaarlijk dicht bij een monsterlijk zwart gat begeven, terwijl het gulzig de sterren en planeten in het centrum van een verafgelegen sterrenstelsel opslokt.

Maar relativiteit en zwarte gaten zijn nog maar het begin. Om het holografisch principe te kunnen doorgronden moeten we nog vier

andere gigantische getallen vinden – numerieke reuzen die tot leven worden gewekt als ze met de fysieke wereld in aanraking komen. Zowel googol, googolplex, het getal van Graham als TREE(3) zijn giganten die de wetten van de natuurkunde lijken te tarten. Maar ze helpen ons vooral om een aantal zaken te doorgronden. Ze leren ons wat entropie nu eigenlijk is, iets dat vaak niet goed wordt begrepen en dat de turbulente fysica van mysterie en wanorde beschrijft. Ze laten ons kennismaken met de quantummechanica, de heerser van de micro-wereld, waar niets vaststaat en alles een kansspel is. We zullen het hebben over dubbelgangers, onmetelijk ver van ons vandaan, en over de mogelijkheid van een kosmische ‘reset’, waarbij alles in ons heelal onvermijdelijk weer in zijn oorspronkelijke staat terugkeert.

Uiteindelijk zullen we dan in dit land van reuzengetallen de werkelijkheid van het holografisch principe vinden. Onze werkelijkheid.

Ik ben een kind van het holografisch principe. Het idee daarvan werd gelanceerd rond de tijd dat ik die nul voor dat tentamen haalde, al had ik er toen nog nooit iets over gehoord. Toen ik ongeveer vijf jaar later met mijn promotieonderzoek begon, was het het belangrijkste nader uit te werken idee in de fundamentele natuurkunde in een halve eeuw geworden. Het leek wel of iedereen het er in de wereld van de natuurkunde over had. En nog steeds heeft iedereen het erover. Er worden moeilijke en belangrijke vragen over zwarte gaten en quantumzwaartekracht gesteld, en het holografisch principe biedt de antwoorden daarop.

Er was in die tijd, op de drempel van een nieuw millennium, nog iets anders waar iedereen over sprak: het mysterie van ons zo heel precies ‘afgestelde’, onwaarschijnlijke heelal. Dat heelal van ons is namelijk iets wat eigenlijk niet kan bestaan. Het is een heelal dat het leven mogelijk heeft gemaakt, dat ons een kans op overleven heeft geboden, terwijl die kans zo goed als nul was. Daar gaan we het in het tweede deel van dit boek over hebben, aan de hand van heel andere getallen – geen giganten, maar piepkleine opdonders van getallen.

Kleine getallen kunnen een loopje nemen met het onverwachte. Stel je ter illustratie hiervan voor dat ik de *X Factor*-talentenjacht zou

winnen. Neem van mij aan dat dat volkomen onwaarschijnlijk is, want ik kan absoluut niet zingen. Ik zing zelfs zo beroerd dat mij bij een musical op de middelbare school door de leraren werd gevraagd ver van de microfoon af te gaan staan. Dit in aanmerking nemende denk ik dat de kans dat ik een landelijke zangwedstrijd win ergens in de onderstaande orde van grootte ligt:

$$\frac{1}{\text{aantal inwoners van het VK}} \approx 0,000000015$$

Dat is een behoorlijk klein getal. Als ik zou winnen, zou dat dus tamelijk onwaarschijnlijk zijn.

Ons heeral is nog veel onwaarschijnlijker. Aan de hand van kleine getallen gaan we deze onwaarschijnlijke wereld verkennen. Overigens worden die niet kleiner dan nul, dat akelige getal dat mijn tentamen indertijd zozeer bezoedelde. De verachting die ik op die dag voor die nul voelde, zien we overal in de geschiedenis terug. Er is geen getal dat zo onverwachts opduikt en zo wordt gevreesd als de nul. Dat komt doordat het getal met het pure niets wordt geassocieerd, met de afwezigheid van God en met het kwaad zelve.

Maar in de nul schuilt niets kwaads en ook niets lelijks. Integendeel: het is het mooiste getal dat er bestaat. De schoonheid ervan kunnen we pas doorgronden als we inzien hoe elegant de fysieke wereld in elkaar steekt. Voor een natuurkundige is het belangrijkste aspect van nul de symmetrie ervan bij een wisseling van teken: min nul is exact hetzelfde als plus nul. Het is het enige getal dat deze eigenschap bezit. In de natuur verklaart symmetrie waarom dingen verdwijnen, waarom ze gelijk worden aan de mythische nul.

Het wordt verwarrend als we heel kleine getallen tegenkomen die nét niet gelijk zijn aan nul, doordat die zowel iets laten zien over de absurde manier waarop het heeral lijkt te zijn opgebouwd als over onze worsteling met het verklaren van dat raadsel. We gaan dat bijzondere verhaal vertellen met behulp van twee verontrustend kleine getallen. Het ene legt iets van de geheimen van de microwereld bloot, het andere doet hetzelfde voor de geheimen van de kosmos. Via het bizar kleine getal 0,0000000000000001 betreden we de subatomaire

gens de huidige kennis suggereren, zou er nooit iets uit voort zijn gekomen en zouden de sterrenstelsels, sterren en planeten nooit zijn gevormd. Jij en ik zouden niet bestaan. Ons onverwachte heelal is een zegen, maar ook een uiterst problematisch geval, gezien ons onvermogen om het goed te begrijpen. Het is een puzzel die mijn hele carrière tot nu toe heeft beheerst en dat nog steeds doet.

Maar er is in het verlengde daarvan nog iets dat veel dieper gaat dan onze zoektocht naar een holografische werkelijkheid of het doorgronden van ons onverwachte heelal. Om dat te ontdekken hebben we nog een laatste getal nodig, een getal dat niet altijd een getal is maar tegelijkertijd veel verschillende getallen is. Het is het getal waar wiskundigen al sinds mensenheugenis mee worstelen en dat sommigen van hen tot onderwerp van spot heeft gemaakt of zelfs tot waanzin heeft gedreven: oneindig.

De Duitse wiskundige David Hilbert, die baanbrekend werk heeft verricht op het gebied van de quantummechanica en de relativiteitstheorie, stelde ooit dat er geen vraagstuk bestaat dat de menselijke geest zo sterk in beweging heeft gebracht als dat van de oneindigheid. Oneindigheid vormt ongetwijfeld de sleutel tot de theorie van alles – de theorie die alle natuurwetten met elkaar verbindt en ooit het ontstaan van het heelal zal kunnen verklaren.

Georg Cantor, een buitenbeentje in de Duitse academische wereld van eind negentiende eeuw, was degene die zich steeds hoger op de oneindigheidsladder durfde te wagen en gestaag aan oneindigheden ná het oneindige heeft gewerkt. Zoals we zullen zien ontwikkelde hij een uitgebalanceerde theorie van sets, van bepaalde verzamelingen, waardoor hij zich een weg richting het onbereikbare wist te banen, met zijn ideeën over verschillende lagen van oneindigheid. Zoals bekend was hij er uiteindelijk geestelijk nogal slecht aan toe en bleef hij worstelen met getallen die meer tot het rijk der goden leken te behoren dan dat ze nog iets met de fysieke werkelijkheid te maken leken te hebben. Maar hoe zit het dan met die fysieke werkelijkheid? Is daar oneindigheid in aan te treffen? Is het heelal oneindig?

De zoektocht naar het doorgronden van de natuurkunde op het meest fundamentele niveau, zo puur en microscopisch klein als maar mogelijk is, is de zoektocht naar de meest heftige oneindigheden er-

van. Dan hebben we het over de oneindigheden die we in de kern van een zwart gat kunnen aantreffen, bij de zogenoemde singulariteit, waar ruimte en tijd oneindig uit elkaar worden getrokken en verwrongen en waar een oneindig sterke zwaartekracht heerst. Maar ook over de oneindigheden die we tegenkomen op het moment van het ontstaan van alles, tijdens de oerknal. Deze oneindigheden moeten we nog onder de knie krijgen en volledig doorgronden, maar er is op dit gebied een veelbelovende kosmische ‘symfonie’ – een theorie van alles waarin deeltjes zijn vervangen door minuscule snaartjes die in perfecte harmonie met elkaar in trilling zijn. Zoals we zullen ontdekken is het niet zo dat de ‘muziek’ van deze snaren als het ware door ruimte en tijd galmt – nee, ze is ruimte en tijd.

Het grote, het kleine en het beangstigende oneindige. Samen vormen ze de *Fabelachtige getallen*, trotse getallen met een persoonlijkheid, getallen die ons bij de grenzen van de natuurkunde hebben gebracht en zo een heel bijzondere werkelijkheid hebben onthuld: een holografische werkelijkheid, een onverwacht heelal, een theorie van alles.

Ik denk dat het tijd wordt om die getallen te gaan ontdekken.

GROTE GETALLEN

1,0000000000000000858

Een relativiteitssprint

Tussen alle bekende voetbalgerelateerde cadeautjes lag er dat jaar nog iets heel anders onder de kerstboom. Een *woordenboek*, zo'n klassieke dikke *Collins* waar je je in geval van nood veilig achter kon verschuilen. Ik weet niet waarom mijn ouders het een goed idee hadden gevonden om hun tienjarige zoon met een woordenboek te verblijden, aangezien ik tot dat moment nooit veel belangstelling voor woorden had getoond. In die tijd had ik twee grote passies: Liverpool Football Club en wiskunde. Als mijn ouders hadden gehoopt dat dit cadeau mijn horizon zou verbreden, hadden ze het vreselijk mis. Ik bekeek mijn nieuwe aanwinst aandachtig en besloot toen dat ik het in elk geval kon gebruiken om grote getallen in op te zoeken. Eerst kwam ik bij biljoen, toen bij triljoen, en het duurde niet lang voor ik 'quadriljoen' ontdekte. Dit spelletje ging zo door tot ik uitkwam bij het werkelijk magnifieke getal 'centiljoen'. Zeshonderd nullen! Dit was uiteraard allemaal in het Engels uit die tijd, voordat we met de 'korte schaal'-notatie gingen werken. Tegenwoordig heeft centiljoen 303 nullen, een stuk minder indrukwekkend. En dat oude biljoen (miljard in het Nederlands) heeft er nu maar negen in plaats van twaalf.

Maar daar bleef het bij. Mijn woordenboek kende googolplex niet, noch het getal van Graham, laat staan TREE(3). Wat had ik die reuzengetallen er achteraf gezien graag in tegen willen komen. Dergelijke fabelachtige getallen kunnen je meenemen naar de grenzen van ons

bevattingvermogen en naar de grenzen van de natuurkunde, en ze kunnen ook fundamentele waarheden blootleggen over de aard van onze werkelijkheid. Maar onze reis begint bij een ander groot getal, een getal dat ook niet te vinden was in mijn Collins-woordenboek: 1,0000000000000000858.

Ik kan me voorstellen dat je dit teleurstellend vindt. Ik heb je een tocht langs gigantische getallen beloofd, maar dit getal maakt bepaald geen grote indruk. Zelfs de leden van de Pirahã-stam in het Amazone-regenwoud kennen een getal dat groter is, terwijl hun numerieke systeem uit niet meer dan drie getallen bestaat: *hoí* (één), *hói* (twee) en *báagiso* (veel). Wat het nog erger maakt, is dat het zelfs geen mooi of elegant getal is, zoals pi of de wortel van 2. Aan dit getal lijkt op geen enkele manier iets interessants te ontdekken.

Dit verandert als we gaan nadenken over de aard van ruimte en tijd en de menselijke interactie die wij daar in extreme gevallen mee kunnen aangaan. Ik heb dit specifieke getal gekozen omdat het ondanks zijn geringe grootte om een wereldrecord gaat; het geeft namelijk de grens aan van onze fysieke mogelijkheid om de tijd te beïnvloeden. Op 16 augustus 2009 zag de Jamaicaanse sprinter Usain Bolt kans zijn klok met een factor 1,0000000000000000858 te vertragen. Niemand heeft de tijd ooit in die mate weten af te remmen, althans niet zonder mechanische hulp. De kans is groot dat jij je deze gebeurtenis heel anders herinnert, als het moment namelijk waarop tijdens de wereldkampioenschappen atletiek in Berlijn het wereldrecord op de 100 meter werd verbroken. Op die dag zaten Wellesley en Jennifer Bolt in het stadion naar hun zoon te kijken. Tussen de 60 en de 80 meterlijn behaalde hij een topsnelheid van 44,7 km/u (12,42 m/s). Voor elke seconde die hun zoon in die ogenblikken meemaakte, gold dat Wellesley en Jennifer een heel klein beetje méér tijd meemaakten: 1,0000000000000000858 seconde, om precies te zijn.

Willen we begrijpen hoe Bolt in staat was om de tijd te vertragen, dan moeten we hem eerst de lichtsnelheid geven. We moeten vragen wat er zou gebeuren als hij die snelheid daadwerkelijk zou halen. Je kunt dit een ‘gedachte-experiment’ noemen, maar vergeet niet dat Bolt op de Olympische Spelen in Beijing drie wereldrecords heeft weten te verbreken, en dat nota bene op een dieet van kipnuggets. Wie

weet waar hij toe in staat zou zijn geweest als hij echt gezond had gegeten.

Willen we de hoop koesteren dat we ons even snel kunnen verplaatsen als het licht, dan moeten we eerst aannemen dat de snelheid ervan eindig is. En dat is helemaal niet zo vanzelfsprekend. Toen ik tegen mijn dochter zei dat het licht dat op haar boek valt niet op exact hetzelfde moment haar ogen bereikt, reageerde ze onmiddellijk uiterst sceptisch en stond erop een experiment uit te voeren om te controleren of mijn bewering wel klopte. Ikzelf krijg steevast last van een bloedneus als ik me te dicht in de buurt van de experimentele natuurkunde waag, maar mijn dochter is een stuk praktischer ingesteld. Ze had het als volgt bedacht: doe de lamp in de slaapkamer uit, doe hem dan weer aan en tel hoelang het duurt voordat het licht bij je is. Dit lijkt sprekend op het experiment dat Galilei en zijn assistent vierhonderd jaar geleden uitvoerden met behulp van een met een doek bedekte lantaarn. Net als mijn dochter concludeerde hij dat de lichtstraal ‘mogelijk niet onmiddellijk [...] maar in elk geval buitengewoon snel’ bij hem arriveerde. Snel dus, maar met een eindige snelheid.

Tegen het midden van de negentiende eeuw slaagden diverse natuurkundigen, zoals de Fransman met de fraaie naam Hippolyte Fizeau, er steeds beter in een redelijk accurate – en eindige – waarde voor de lichtsnelheid te bepalen. Maar als we echt goed willen kunnen begrijpen wat het betekent om de snelheid van het licht te evenaren, moeten we eerst aandacht besteden aan de opmerkelijke prestaties van de Schotse natuurkundige James Clerk Maxwell. Dat illustreert ook mooi de prachtige synergie die er bestaat tussen de wiskunde en de natuurkunde.

Toen Maxwell onderzoek deed naar het gedrag van elektriciteit en magnetisme waren er al vage aanwijzingen dat het daarbij om twee verschillende verschijningsvormen van hetzelfde fenomeen kon gaan. Zo had Michael Faraday, die zonder dat hij een formele opleiding had genoten een van de meest invloedrijke wetenschappers van Engeland werd, kort daarvoor de inductiewet ontdekt, die aantoonde dat een verandering in een magnetisch veld een elektrische stroom oplevert. De Franse natuurkundige André-Marie Ampère had ook al geconstateerd dat er een verband tussen beide verschijnselen bestond.

Maxwell ging met deze ideeën en de bijbehorende formules aan de slag en probeerde ze een solide wiskundige basis te geven. Maar hij zag dat er iets niet helemaal klopte – met name de wet van Ampère leek tegen de regels van de rekenkunde in te gaan op het moment dat er een elektrisch stroom ontstond. Maxwell ging te rade bij de formules die het stromen van water beschreven en stelde een verbetering voor ten opzichte van de vergelijkingen van Ampère en Faraday. Met behulp van wiskundige logica ontdekte hij de ontbrekende stukjes van de elektromagnetische puzzel. Het eindresultaat was van een ongekende elegantie en schoonheid. Dit door Maxwell verrichte pionierswerk zou de basis vormen voor een nieuwe strategie, die in de twintigste eeuw de grenzen van de natuurkunde steeds verder heeft verlegd.

Toen hij zijn theorie van de samenhang tussen elektriciteit en magnetisme wiskundig had bewezen, viel Maxwell ineens iets magisch op. Zijn nieuwe formules suggereerden dat er van een golfverschijnsel sprake was, van een *elektromagnetische golf*, waarbij het elektrische veld steeds in één richting toe- en afneemt en het magnetisch veld in de andere richting. Stel je ter illustratie hiervan voor dat er terwijl je aan het duiken bent twee zeeslangen recht op je afkomen. Ze verplaatsen zich beide langs één denkbeeldige rechte lijn in het water; de ‘elektrische’ slang kronkelt op en neer en de ‘magnetische’ slang kronkelt van links naar rechts. En om het nog gruwelijker te maken: ze vallen je aan met een snelheid van 310.740.000 m/s. Over dat laatste aspect van de analogie ben jij waarschijnlijk het minst te spreken, maar het is tegelijkertijd het meest opmerkelijke aan Maxwells ontdekking. 310.740.000 m/s is namelijk de snelheid die Maxwell voor de elektromagnetische golf berekende – die waarde kwam gewoon, als een wiskundig duveltje-uit-een-doodsje, uit zijn formules tevoorschijn.

Wonderlijk genoeg lag die waarde ook heel dicht bij de schattingen voor de *snelheid van het licht* die Fizeau en anderen hadden gemeten. Vergeet niet dat niemand zich er in die tijd van bewust was dat magnetisme iets met licht te maken had, en toen bleek ineens dat er sprake was van golven, die zich ook nog eens met dezelfde snelheid voortplantten. Moderne metingen aan licht door een vacuüm hebben

een waarde opgeleverd van 299.792.458 m/s, maar de parameters van Maxwells formules zijn inmiddels ook met een grotere mate van nauwkeurigheid bekend, en de wonderlijke overeenstemming tussen beide waarden blijkt stand te houden. Door die overeenstemming realiseerde Maxwell zich dat het bij licht en elektromagnetisme wel om hetzelfde verschijnsel móést gaan: een verbazingwekkend verband tussen twee ogenschijnlijk verschillende aspecten van de fysieke wereld, dat door een wiskundige redenering was ontdekt.

En het is zelfs nog mooier. Maxwells golven omvatten niet alleen licht. Afhankelijk van de trillingsfrequentie of, anders gezegd, de snelheid waarmee de zeeslangen heen en weer kronkelen, beschreven de golfoplossingen ook radiogolven, röntgenstralen en gammastralen, en hoewel de frequenties daarvan verschillen, was hun snelheid steeds gelijk. Radiogolven werden in 1887 door de Duitse natuurkundige Heinrich Hertz aan de hand van metingen ontdekt. Toen men hem vroeg naar de betekenis van zijn ontdekking antwoordde Hertz heel bescheiden: 'Die golven hebben geen enkel nut. Dit was gewoon een experiment dat aantoonde dat Maestro Maxwell het bij het rechte eind had.' Maar het is natuurlijk een feit dat we er telkens als we op een radiostation afstemmen aan worden herinnerd hoe geweldig Hertz' ontdekking is geweest. Ook al stelde hij zich zelf zo bescheiden op, Hertz had wel groot gelijk dat hij Maxwell een 'maestro' noemde. Maxwell was immers de dirigent van de meest elegante wiskundige symfonie in de geschiedenis van de natuurkunde.

Voordat Albert Einstein een revolutie teweegbracht in ons begrip van ruimte en tijd werd algemeen aangenomen dat lichtgolven een medium nodig hadden om zich in voort te planten, vergelijkbaar met de manier waarop golven in de zee zich door een watermassa verplaatsen. Het veronderstelde medium voor licht stond bekend als de *ether*. Laten we even aannemen dat die ether werkelijk bestaat. Als Usain Bolt even snel zou willen lopen als het licht, zou hij dus met een snelheid van 299.792.458 m/s door de ether moeten rennen. Als hem dat zou lukken, wat zou hij dan precies zien terwijl hij met dat licht meeliep? Het licht zou zich dan niet meer van hem af verplaatsen en zou er dus uitzien als een elektromagnetische golf die op en neer en van links naar rechts ging maar afgezien daarvan op zijn plek bleef.