

Govert Schilling

Deining in de ruimtetijd

Einstein, zwaartekrachtgolven en
de toekomst van de astronomie

FONTAINE UITGEVERS

Inhoud

Voorwoord	7
Introductie	13
1 Een ruimtetijd-amuse	17
2 Relatief gesproken	34
3 Einstein op de proef	52
4 Wetenschappelijke Golfoorlog	72
5 Het leven van sterren	89
6 Uurwerkprecisie	106
7 Laserquest	125
8 De weg naar perfectie	142
9 Scheppingsverhalen	163
10 Koude kermis	180
11 Hebbes	199
12 Zwarte magie	219
13 Nanowetenschap	239
14 Plaats delict	259
15 Space Invaders	281
16 Surfen op de deining van de ruimtetijd	302
Recente ontwikkelingen	321
Appendix	323
Bronnen en bibliografie	333
Dankwoord	349
Illustratieverantwoording	351
Register	353

Voorwoord

Martin Rees

Einstein heeft een unieke en welverdiende plek in het Pantheon van de wetenschap. Zijn inzichten in ruimte en tijd hebben ons begrip van de zwaartekracht en de kosmos veranderd. Iedereen herkent de vriendelijke en onverzorgde wijze man van de posters en T-shirts. Maar zijn beste werk verrichtte hij al op jonge leeftijd. Hij was nog maar in de dertig toen hij wereldberoemd werd. Op 29 mei 1919 vond een zonsverduistering plaats. De astronoom Arthur Eddington nam met een groep collega's sterren waar die tijdens de eclips dicht bij de zon stonden. De metingen toonden aan dat de sterren van hun normale posities waren verschoven; hun licht werd afgebogen door de zwaartekracht van de zon. Dit bevestigde een van de belangrijkste voorspellingen van Einstein. Nadat het resultaat was gerapporteerd aan de Royal Society in Londen, werd het wereldnieuws. 'Het licht staat scheef aan de hemel; Einsteins theorie zegeviert', luidde de nogal overdreven kop in de *New York Times*.

Einsteins algemene relativiteitstheorie, voorgesteld in 1915, is een triomf voor zuiver denkwerk en inzicht. De implicaties voor ons op aarde zijn gering. Klokken in moderne navigatiesystemen moeten een beetje worden bijgesteld, maar Newton blijft volstaan om ruimtesondes te lanceren en te volgen.

Voor vele kosmische verschijnselen is Einsteins inzicht dat ruimte en tijd onderling zijn verbonden – dat de ruimtetijd materie voorschrijft hoe te bewegen; dat materie de ruimtetijd vertelt hoe te krommen – echter cruciaal. Maar het is moeilijk een theorie te testen waarvan de consequenties zo ver van ons bed zijn. Tot bijna een halve eeuw nadat

de theorie was voorgesteld, bleef algemene relativiteit een buitenbeentje binnen de gangbare natuurkunde. Maar sinds de jaren zestig groeide het bewijs voor de oerknal en de uitdijning van het heelal, en voor het bestaan van zwarte gaten – twee belangrijke voorspellingen van Einstein.

En in februari 2016, bijna honderd jaar na de befaamde bijeenkomst van de Royal Society over de eclipsexpeditie, kwam er nieuw bewijs voor Einsteins theorie – ditmaal in de Press Club in Washington DC, in de Verenigde Staten. Dat was de detectie van zwaartekrachtgolven door LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory). Dit is het thema van Govert Schillings boek. Hij heeft een schitterend verhaal te vertellen dat meer dan een eeuw omspant.

Einstein zag de zwaartekracht als het kromtrekken van de ruimte. Wanneer objecten onder invloed van de zwaartekracht van vorm veranderen, genereren ze rimpelingen in de ruimte zelf. Wanneer zo'n rimpeling de aarde passeert, 'trilt' onze ruimte een beetje: die wordt afwisselend uitgerekt en samengeperst zodra de zwaartekrachtgolf erdoorheen reist. Omdat de zwaartekracht zo'n zwakke kracht is, is dit effect zeer gering. De aantrekkingskracht tussen alledaagse objecten is minuscuul. Als je twee halters rondzwaait, zend je ook zwaartekrachtgolven uit, maar met een oneindig klein vermogen. Zelfs planeten die rond sterren draaien of om elkaar heen wentelende dubbelsterren zenden niet uit op een waarneembaar niveau.

Astronomen zijn het erover eens dat de enige bronnen die LIGO zou kunnen detecteren veel meer zwaartekracht uitoefenen dan gewone sterren en planeten. De beste kandidaten zijn zwarte gaten. We weten sinds bijna vijftig jaar dat zwarte gaten bestaan: de meeste zijn restanten van sterren die meer dan twintig keer zo zwaar zijn als de zon. Deze heldere sterren vinden hun dood in een supernova-explosie waarbij hun kernen ineenstorten tot een zwart gat. Het materiaal waaruit de ster was gemaakt, wordt afgesneden van de rest van het heelal, met achterlating van een afdruk van de zwaartekracht.

Wanneer twee zwarte gaten een dubbelstersysteem vormen, spiralisieren ze langzaam naar elkaar toe. Terwijl ze elkaar steeds dichterbij raken raakt de ruimte om hen heen steeds meer verwrongen, tot het moment dat ze samensmelten in een enkel rondtollend zwart gat. Dit zwarte gat klotst en rammelt, en genereert nog meer golven totdat het tot rust

komt. LIGO kan deze *chirp* ('tsjilp') – het steeds sneller en krachtiger schudden van de ruimte tot aan de samensmelting – opvangen. Dit soort cataclysmische gebeurtenissen komt in ons Melkwegstelsel minder dan eens in de miljoen jaar voor. Maar zo'n gebeurtenis geeft een waarneembaar LIGO-signaal, ook al vond hij plaats op een afstand van een miljard lichtjaar – er zijn miljoenen sterrenstelsels die dichterbij staan. Zelfs om de meest gunstige signalen te detecteren zijn uiterst gevoelige en peperdure instrumenten nodig. In de LIGO-detectoren worden krachtige laserstralen geprojecteerd op – en gereflecteerd door – spiegels aan elk uiteinde van vier kilometer lange vacuümbuizen. Door de lichtstralen te analyseren is het mogelijk om veranderingen te ontdekken in de afstand tussen deze spiegels, die afwisselend toeneemt en afneemt terwijl de ruimte uitzet en samentrekt. De amplitude van deze trilling is buitengewoon klein, ongeveer 0,000000000001 centimeter – miljoenen malen kleiner dan de grootte van een enkel atoom. LIGO bestaat uit twee identieke detectoren op een afstand van zo'n 3000 kilometer – eentje in de Amerikaanse staat Washington, de andere in Louisiana. Een enkele detector meet ook piepkleine aardbevingen, een voorbijrijdende auto et cetera, en om vals alarm uit te sluiten, kijken de onderzoekers alleen naar signalen die opduiken in beide detectoren.

Jarenlang detecteerde LIGO niets. De detector kreeg een upgrade en werd in september 2015 weer aangezet. Na decennia vol frustratie had de zoektocht resultaat: LIGO nam een *chirp* waar, het signaal van twee botsende zwarte gaten op een afstand van meer dan een miljard lichtjaar en opende daarmee een compleet nieuw wetenschapsgebied – onderzoek aan de dynamica van de ruimte zelf.

Helaas komt het voor dat sommige enthousiast gebrachte wetenschappelijke claims worden overdreven of verkeerd begrepen – dit boek somt er ook een aantal op. Ik schaar mijzelf onder de moeilijk te overtuigen sceptici. Maar wat de LIGO-onderzoekers claimden – een hoogtepunt in een decennialange poging van gerenommeerde wetenschappers en ingenieurs – is geloofwaardig, en deze keer verwacht ik volledig overtuigd te worden.

Deze detectie is groots. Het is een van de belangrijkste ontdekkingen van het decennium, samen met de vondst van het Higgsdeeltje, dé sensatie van 2012. Het Higgsdeeltje was het sluitstuk van het Standaard-

model in de deeltjesfysica, ontwikkeld gedurende tientallen jaren. Op dezelfde manier zijn zwaartekrachtgolven – de trillingen van de ruimte zelf – een cruciale en onderscheidende consequentie van Einsteins algemene relativiteitstheorie.

Peter Higgs voorspelde zijn deeltje vijftig jaar geleden, maar de ontdekking en het vaststellen van de eigenschappen moesten wachten op de voortschrijdende technologie. Er was een enorme deeltjesversneller voor nodig, de Large Hadron Collider in Genève. Zwaartekrachtgolven werden nog eerder voorspeld, maar de detectie moest wachten op het moment dat de grootschalige en ultraprecieze apparatuur voorhanden was om zo'n moeilijk waar te nemen effect te kunnen meten.

Nog los van de compleet nieuwe ondersteuning van Einsteins theorie, verdiepen deze resultaten ons begrip van sterren en sterrenstelsels. Het astronomische bewijs voor zwarte gaten en zware sterren is beperkt – het was moeilijk te voorspellen hoeveel er binnen bereik zouden zijn. Pessimisten dachten dat het er zo weinig zouden zijn dat zelfs de verbeterde LIGO-detectoren de eerste jaren niets zouden opvangen. Hoewel de onderzoekers buitengewoon veel 'beginnersgeluk' hebben gehad, lijkt het erop dat de astronomie er een nieuw deelgebied bij heeft gekregen, dat de ruimte zelf bestudeert in plaats van de materie die zich erin bevindt. Andere detectoren in Europa, India en Japan zijn ook betrokken bij de zoektocht, en er zijn plannen voor ruimtemissies.

Veel wetenschappers gaan de uitdaging om hun ideeën en ontdekkingen uit te leggen niet aan, omdat ze geloven dat ze mysterieus en onbegrijpelijk zijn. Professionele wetenschappers beschrijven hun ideeën met wiskunde – voor veel mensen een vreemde taal. Maar kernideeën kunnen in simpele taal worden verwoord door goed gekwalificeerde schrijvers. Govert Schilling is een van de besten, en heeft zichzelf in dit boek overtroffen. Zijn relaas omspant meer dan een eeuw. Het boek legt de kernbegrippen van de astrofysica uit in een helder en onderhoudend idioom en plaatst ze binnen de historische context. Hij schetst ook de verschillende betrokken persoonlijkheden. Sommigen waren 'obsessief', maar dat is geen verrassing – bezetenheid is een voorwaarde voor iedereen die jaren, zelfs decennia stopt in een experimentele uitdaging waarbij succes niet is gegarandeerd. De poging werd ondersteund door teams van honderden experts. Schilling verhaalt over spraakmakende controverses, tegensla-

VOORWOORD

gen en de verbazingwekkende technische prestaties van wetenschappers en ingenieurs, die decennialang worstelden om tot de vereiste precisie te komen. Hij verhaalt hoe zij zegevierend uit de strijd kwamen, met ont-hullingen over de fundamentele aard van ruimte en tijd. Het is een prachtig verhaal, pakkend en spannend verteld.

Martin Rees is fellow aan het Trinity College in Cambridge, Astronomer Royal, en emeritus hoogleraar kosmologie en astrofysica aan de Universiteit van Cambridge.

Introductie

In de buitenwijken van een spiraalvormig sterrenstelsel draait rond een gele dwergster een kleine planeet die zo'n 3,3 miljard jaar geleden is ontstaan uit samenklonterende stofdeeltjes en kiezels. Organische verbindingen die vanuit de ruimte in de lauwarme oceanen van de blauwe planeet neerregenden hebben zich geordend in zelf-replicerende moleculen. Momenteel zit het zeewater barstensvol eencellige organismen. Het zal niet lang meer duren voordat het leven zijn weg vindt naar de nu nog dorre continenten.

In een andere uithoek van het uitgestrekte universum is het leven van twee extreem zware sterren geëindigd in catastrofale supernova-explosies. Wat resteert is een nauwe dubbelster: twee vraatzuchtige zwarte gaten, beide tientallen malen zo zwaar als de verafgelegen gele dwergster. Hun zwaartekracht trekt gas en stof dat zich te dichtbij waagt naar binnen en buigt passerend licht af. Niets zal ooit kunnen ontsnappen aan de zwaartekrachtsgreep van deze kosmische valkuilen.

Als de zwarte gaten om elkaar heen draaien produceren ze golven: minutieuze rimpelingen in de ruimtetijd die zich voortplanten met de lichtsnelheid. De golven voeren energie met zich mee, waardoor de twee zwarte gaten steeds dichterbij elkaar toe bewegen. Uiteindelijk wentelen ze honderden keren per seconde om elkaar heen, met de helft van de lichtsnelheid. De ruimtetijd wordt uitgerekt en samengeperst; de verstoringen groeien uit tot gigantische golven. In een finale uitbarsting van pure energie botsen de twee zwarte gaten op elkaar en versmelten ze. Dan keert de rust weer, terwijl de laatste krachtige golven

zich door de ruimte verspreiden als een kosmische tsunami.

De doodskreet van de twee zwarte gaten doet er 1,3 miljard jaar over om de buitenwijken van ons spiraalstelsel te bereiken. Tegen die tijd is hun amplitude enorm afgenomen. Ze duwen en trekken nog steeds aan alles wat ze tegenkomen, maar niemand zou het ooit opmerken. Varen en bomen bedekken nu het oppervlak van de blauwe planeet; een planeetoïde heeft de reuzenreptielen weggevaagd, en uit een van de vele evolutielijnen van zoogdieren is een nieuwe soort van nieuwsgierige tweebe-nige schepsels ontstaan.

Nadat de zwaartekrachtgolven de buitengebieden van het Melkwegstelsel hebben gepasseerd, doen ze er nog maar 100.000 jaar over om in de buurt van de zon en de aarde te komen. Terwijl ze met een snelheid van 300.000 kilometer per seconde op de planeet afstormen, beginnen mensen het universum te verkennen waarvan zij deel uitmaken. Ze slijpen telescopen, ontdekken nieuwe planeten en manen, en brengen de Melkweg in kaart.

Honderd jaar voordat de golven aankomen – ze hebben dan 99,9999 procent van hun 1,3 miljard lichtjaar lange reis achter de rug – voorspelt de 26-jarige wetenschapper Albert Einstein hun potentiële bestaan. Nog een halve eeuw later gaat de mens er daadwerkelijk jacht op maken. Aan het begin van de 21^{ste} eeuw bereiken geavanceerde detectoren eindelijk de benodigde gevoeligheid. Slechts een paar dagen nadat ze zijn aangezet registreren ze minuscule trillingen, kleiner in amplitude dan de grootte van een atoomkern.

Op maandag 14 september 2015, om 09:50:45 Universal Time (11:50:45 Midden-Europese Zomertijd) wordt een honderd jaar oude voorspelling van Einstein bevestigd: astronomen vangen een zwaartekrachtbericht op van een botsing tussen zwarte gaten in een ver verwijderd sterrenstelsel.

De eerste detectie van een zwaartekrachtgolf wordt terecht bejubeld als een van de grootste wetenschappelijke ontdekkingen van de nieuwe eeuw. Meer waarnemingen met nog gevoeliger apparatuur zullen astronomen een compleet nieuwe manier bieden om het gewelddadige universum te bestuderen; natuurkundigen zullen de kans krijgen om de geheimen van de ruimtetijd te ontrafelen.

Enkele jaren voordat het verbeterde Laser Interferometer Gravitatio-

INTRODUCTIE

nal-Wave Observatory (LIGO) operationeel werd, kreeg ik het idee om dit boek te schrijven. Het leek mij geweldig wanneer de eerste waarneming van een zwaartekrachtgolf zou samenvallen met het afronden van mijn manuscript. Het boek zou dan vlak na de aankondiging kunnen uitkomen, met een toegevoegde epiloog over het nieuwe resultaat.

De wetenschap vorderde sneller dan ik verwachtte. Vrijwel niemand had kunnen voorzien dat de nieuwe detector tijdens zijn allereerste waarneemdagen al de hoofdprijs zou binnenhalen. Het grootste deel van mijn onderzoek en al het schrijfwerk vonden dus plaats na de monumentale ontdekking. Nu het boek klaar is, ben ik juist blij met de *timing* – de detectie vormt nu een integraal onderdeel van het verhaal in plaats van een naschrift.

De geschiedenis van zwaartekrachtgolven is eerder verteld, maar in dit boek is het slechts het halve verhaal. *Deining in de ruimtetijd* gaat ook over progressie binnen de wetenschap, over de wijze waarop ontdekkingen worden gedaan, over gebeurtenissen die vandaag de dag plaatsvinden, en over verwachtingen voor de toekomst waarin het onderzoek naar zwaartekrachtgolven een volwaardig onderdeel zal zijn geworden van de astronomie. De ontdekking van GW150914 – het signaal dat werd opgevangen op die gedenkwaardige maandag – is zowel het hoogtepunt van een honderd jaar lange zoektocht als het startpunt van een geheel nieuw hoofdstuk in onze exploratie van het universum.

1

Een ruimtetijd-amuse

Joe Cooper trekt zijn NASA-ruimtepak aan en zet zijn helm op. Hij heeft zuurstof beschikbaar voor het geval er iets misgaat tijdens de lancering. Technici helpen hem het ruimtevaartuig in te klimmen dat op de torenhoge raket is geplaatst. Hij hoort het aftellen via zijn radio en voelt de adrenaline door zijn aderen stromen. Cooper is geen watje, maar de ruimte worden in geschoten op een pilaar van vlammen is toch wel zenuwslopend.

Al snel is hij met zijn drie mede-astronauten op weg. Alles verloopt gesmeerd. Buiten de kleine raampjes van hun capsule maakt blauwe lucht plaats voor zwarte leegte. De motoren gaan uit, gewichtloosheid treedt in. Nu moeten ze het enorme ruimteschip dat met een snelheid van meer dan acht kilometer per seconde rond de aarde cirkelt bijhalen en daar aanmeren. Eitje.

Dit klinkt allemaal als een reguliere trip naar het Internationale Ruimtestation (ISS) aan boord van een Russische Sojoez. *Business as usual...* of toch niet? Je hebt nog nooit gehoord van een NASA-astronaut die Joe Cooper heet, en Cooper kan niet drie collega-bemanningsleden hebben. Iedere astronaut kan je vertellen dat een Sojoezcapsule veel te klein is om vier mensen mee te vervoeren; zelfs met drie zit hij al propvol.

Dan nu het vervolg van dit verhaal: het ruimteschip waar zij aanmeren heet *Endurance* en lijkt in geen enkel opzicht op het ISS. De astronauten reizen aan boord van *Endurance* naar Saturnus, verdwijnen via een wormgat, komen weer tevoorschijn in een ander sterrenstelsel, vliegen rond een gigantisch zwart gat met de naam Gargantua en bezoeken bui-

tenaardse planeten. Cooper duikt zelfs even in *hyperspace*. Hier is duidelijk iets aan de hand.

Dit scenario is ontleend aan de Hollywood-kaskraker *Interstellar* uit 2014, geregisseerd door Christopher Nolan; de rol van astronaut Cooper wordt vertolkt door acteur Matthew McConaughey. Als je een echte *space nerd* bent zou je de naam Joe Cooper hebben kunnen herkennen. Je hebt *Interstellar* misschien wel vaker gezien dan ik. Het is een geweldige film.

Een van de dingen waarin *Interstellar* zich onderscheidt van andere sciencefictionfilms is de lijst met uitvoerend producenten. Daarop prijken de namen van Jordan Goldberg (*Batman*, *Inception*), Jake Meyers (*The Revenant*) en Thomas Tull (*Jurassic World*). Maar ook die van Kip Thorne, emeritus Feynman-professor in de theoretische natuurkunde aan het California Institute of Technology in Pasadena, VS. Niet veel theoretisch natuurkundigen hebben een bijbaan als filmproducent.

Wat gebeurt er als een wetenschapper betrokken raakt bij de productie van een sciencefictionfilm? Je hoopt dan dat de wetenschap in de film klopt. En dat is ook zo, behoorlijk goed zelfs. Thorne schreef mee aan de verhaallijn. Hij praatte de scenarioschrijver, de regisseur, de mensen van de *visual effects* en de acteurs bij over astronomie en algemene relativiteit. Hij schreef zelfs de vergelijkingen uit op het bord van filmprofessor John Brand (gespeeld door Michael Caine). Hoewel Thorne helaas geen *cameo* in de film kreeg is KIPP, een van de robots, overduidelijk naar hem genoemd.

Weinig mensen zijn beter toegerust voor de rol van wetenschappelijk adviseur van een film over zwarte gaten dan Kip Thorne. Als er ook maar iemand iets begrijpt van de bizarre eigenschappen van de ruimtetijd is hij het. In 1990 won hij een 15 jaar oude weddenschap met zijn Britse collega en vriend Stephen Hawking over de ware aard van de astronomische röntgenbron Cygnus X-1. (De inzet was een jaarabonnement op het blad *Penthouse*.) Thornes boek *Black Holes and Time Warps* werd in 1994 een nationale bestseller.

Begin 2016 dook Thornes naam opnieuw overal op. Op 11 februari bevestigden wetenschappers de eerste succesvolle detectie van zwaartekrachtgolven. In het verre heelal waren twee zwarte gaten op elkaar gebotst en samengesmolten. De *crash* stuurde rimpelingen door de

ruimtetijd. Na een reis van meer dan een miljard lichtjaar arriveerden de golven op aarde op 14 september 2015. De twee gigantische detectoren van het Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO) in de Verenigde Staten registreerden de extreem kleine trilling. En dit observatorium is het geesteskind van Thorne en zijn collega-fysici Rainer Weiss en Ronald Drever.



Nooit zag iemand een zwart gat van dichtbij en niemand weet of wormgaten werkelijk bestaan. Zwaartekrachtgolven zijn veel te zwak om te meten zonder ongeloofelijk gevoelige instrumenten. De kromming van de ruimte, de vertraging van de tijd – allemaal veel te gecompliceerd en veel te ver van onze dagelijkse ervaring. Deze fenomenen kun je pas echt doorgronden wanneer je Albert Einsteins algemene relativiteitstheorie begrijpt.

Er is een beroemde anekdote over de Engelse astronoom Arthur Stanley Eddington. Aan het begin van de twintigste eeuw was Eddington een van de grootste popularisatoren van Einsteins nieuwe theorie van de ruimtetijd – we ontmoeten hem opnieuw in hoofdstuk 3. Na een lezing kreeg hij vanuit het publiek de vraag: ‘Professor Eddington, is het waar dat er maar drie mensen op de wereld zijn die algemene relativiteit echt begrijpen?’ Eddington dacht even na en antwoordde: ‘Wie zou dan de derde kunnen zijn?’

Nou ja, zó moeilijk is het nu ook weer niet. Tienduizenden theoretisch natuurkundigen over de hele wereld snappen de grondbeginselen van algemene relativiteit. Bovendien duiken de hele tijd nieuwe theoretische inzichten op, vooral op het gebied van zwarte gaten, waar quantumeffecten belangrijk zijn. Zo is daar Stephen Hawkings theorie van verdampende zwarte gaten, Kip Thornes wormgaten, Gerard ’t Hoofts holografisch principe en Leonard Susskinds *firewall*.

Ik ga hier niet in op de details, maar als de knapste koppen van deze tijd steeds met nieuwe en verrassende inzichten komen (en erover blijven redetwisten) is het duidelijk dat zij nog geen grip hebben op de volledige reikwijdte van algemene relativiteit. De voorbeelden die hier zijn gegeven zijn slechts enkele van de minst vergezochte ideeën. Het vak-

tijdschrift *Physical Review Letters* publiceert ook artikelen over elfdimensionale ruimtetijd, tijdreizen en het multiversum. En jij dacht dat *Interstellar* speculatief was?

Misschien is dit de reden dat zoveel mensen geïnteresseerd zijn in deze materie, ook al lijkt het nogal nutteloze kennis. Een presidentskandidaat hoeft niets te weten over zwarte gaten, en zwaartekrachtgolven lossen het probleem van de opwarming van de aarde niet op. We kunnen ons leven leiden zonder ons te bekommeren om algemene relativiteit. (Er is één frappante uitzondering, maar die bewaar ik voor hoofdstuk 3.) Toch is het een fascinerend en intrigerend onderwerp dat tot de verbeelding spreekt. Misschien is dat ook wel voldoende.

Bovendien maakt algemene relativiteit ons duidelijk hoe de wereld op het meest fundamentele niveau in elkaar steekt. Deze behoefte om de wereld echt te doorgronden is toch een van de dingen die ons onderscheidt van andere dieren?

Eigenlijk waren wij vele duizenden jaren lang helemaal niet zo goed in het begrijpen van de wereld. De eerste landbouwsamenlevingen kwamen zo'n 12.000 jaar geleden op in het Midden-Oosten. De mensen uit die tijd waren zich bewust van de cyclische bewegingen van zon en maan en zagen patronen in de sterren. Ze merkten zelfs een handjevol heldere dwaalsterren op die langzaam door de sterrenbeelden bewogen. Maar daar bleef het wel bij. Ze hadden geen flauw benul van de ware aard van de hemellichamen en geen enkele behoefte om er meer over te weten. Ze beschouwden de zon, de maan en de planeten als goden – boven en onder de alledaagse wereld.

Tot aan de tijd van de grote Griekse filosofen, zo'n 2500 jaar geleden, veranderde er maar weinig. Dat is dus 9500 jaar – en honderden generaties – zonder significante vooruitgang. Wanneer we 12.000 jaar geschiedenis samenpersen in één etmaal is het al na 19.00 uur 's avonds als Aristoteles met het eerste model van de kosmos komt, bestaande uit geneste kristallen bollen. Onze voorvaders hadden het denkvermogen (zij behoorden immers net als wij tot de soort *Homo sapiens*), maar het kon hun verder niet zo veel schelen.

De Grieken kon het wél schelen; zij concludeerden dat de aarde een bol is. Zij bepaalden de omtrek van de aarde zelfs met een verrassend grote nauwkeurigheid. (Sommige schoolboeken laten je nog steeds ge-

loven dat Christoffel Columbus de eerste was die de ware vorm van de aarde ontdekte, maar dat is gewoon niet waar.) De Grieken hadden verder geen idee wat de zon, de planeten of de sterren precies waren, maar ze deden in ieder geval hun best om hun ingewikkelde bewegingen te begrijpen.

Dit mondde uit in het geocentrische wereldbeeld van Claudius Ptolemaeus, die ongeveer negentien eeuwen geleden leefde in wat nu Noord-Egypte is. (Op onze tijdlijn van 24 uur sinds de opkomst van de landbouw is het nu 20.10 uur.) Zoals de naam al impliceert plaatste het model van Ptolemaeus de aarde in het middelpunt. Zon, maan en planeten cirkelden rond de aarde in een ingewikkelde kluwen van primaire en secundaire omloopbanen. Ptolemaeus' wereldbeeld verklaarde zelfs waardoor de planeten soms achterwaarts bewogen.

Leuk geprobeerd, maar helaas. Het duurde eeuwen voordat men zich realiseerde dat hier iets niet klopte. Dat gebeurde pas toen de Poolse astronoom Nicolaus Copernicus in 1543 zijn heliocentrische wereldbeeld publiceerde. Dat plaatste de zon in het middelpunt in plaats van de aarde. Op onze samengeperste tijdlijn is het nu net na 23.00 uur. Wat was het een frustrerend traag proces in de afgelopen 12.000 jaar om onze wereld te begrijpen.

Maar al snel na Copernicus kwam het tempo erin. Wetenschappers ontdekten dat het boek van de natuur is geschreven in de taal van de wiskunde, zoals de Italiaanse natuurkundige Galileo Galileï het zo mooi verwoordde. Galileï bestudeerde hoe dingen bewegen: hij bewees dat Aristoteles fout zat bij een aantal aannames en gebruikte wiskundige vergelijkingen om zijn bevindingen te beschrijven. Niet veel later formuleerde Johannes Kepler in Duitsland zijn beroemde wetten over de planeetbewegingen.

Maar wat heeft dit allemaal te maken met zwarte gaten, zwaartekrachtgolven en de geheimen van de ruimtetijd? Alles. Copernicus, Galileï en Kepler legden het fundament voor Isaac Newtons zwaartekrachttheorie, gepubliceerd in 1687. En Albert Einsteins algemene relativiteitstheorie – de theorie achter *Interstellar* – verving de oude ideeën van Newton. Ons begrip van de wereld is alleen mogelijk door het verbeteren van het werk van anderen. De kristallen bollen van Aristoteles en de wormgaten van Kip Thorne zijn verbonden door een intellectu-

eel koord van slimme ideeën en nieuwe ontdekkingen.

In de vroege zeventiende eeuw voltrok zich een volgende revolutie – een revolutie op het gebied van instrumentatie. De Nederlandse brillenmaker Hans Lipperhey vond de telescoop uit waarmee Galileï vervolgens ging experimenteren. Hij ontdekte kraters en bergen op de maan, donkere vlekken op de zon, maantjes rond Jupiter en ontelbare sterren in de Melkweg. Steeds grotere telescopen kwamen uiteindelijk dubbelsterren, planetoiden, nevels en sterrenstelsels op het spoor. En uiteraard zwarte gaten. Zonder de telescoop zou de astronomie nog steeds in de kinderschoenen staan.



We maken nu een snelle virtuele reis door de kosmos om er zeker van te zijn dat we het juiste beeld voor ogen hebben.

De aarde is een planeet. Hij draait rond de zon, net als zeven andere planeten. De vier binnenste planeten (Mercurius, Venus, Aarde en Mars) zijn tamelijk klein; ze bestaan uit metalen en gesteenten. De vier buitenste (Jupiter, Saturnus, Uranus en Neptunus) zijn veel groter; ze bestaan hoofdzakelijk uit gas en ijs. Tussen de banen van Mars en Jupiter bevindt zich een gordel van planetoiden – rotsachtige overblijfselen uit de geboortetijd van ons zonnestelsel. Voorbij Neptunus is nog een puingordel van ijsballen en bevroren dwergplaneten, waarvan Pluto de grootste is.

Kijk overdag naar de hemel en je ziet een enorme bol van gloeiend gas – de zon. De planeten in het zonnestelsel ontvangen al hun licht en warmte van de zon. Kijk 's nachts naar de hemel en je ziet duizenden andere zonnen – de sterren. Ze lijken klein, zwak en koud, maar dat is alleen maar doordat ze zo ongelofelijk ver weg staan. Als de zon op dezelfde afstand zou staan, zou je die ook als een van de vele speldenknopjes licht zien.

In hoofdstuk 5 vertel ik uitgebreid over sterren. Voor nu is het belangrijk te weten dat iedere ster een zon is met hoogstwaarschijnlijk een eigen familie van planeten om zich heen. Toen dit boek werd geschreven waren er al ruim 3000 van dit soort exoplaneten ontdekt.

Helaas kunnen we er niet heengaan om een kijkje te nemen, in ieder

geval niet in de nabije toekomst. Zelfs licht, dat reist met een snelheid van 300.000 kilometer per seconde, zou er 4,3 jaar over doen om de ster te bereiken die het dichtst bij de zon staat, Proxima Centauri. Daarom zeggen astronomen dat Proxima op een afstand staat van 4,3 lichtjaar. (Een lichtjaar is $300.000 \times 60 \times 60 \times 24 \times 365,24$ kilometer. Dat is bijna 9,5 biljoen kilometer.)

Heb je ooit geprobeerd de sterren aan de nachtelijke hemel te tellen? Met het blote oog kun je er een paar duizend zien, maar dan moet het wel goed donker zijn. De meeste staan tientallen of honderden lichtjaren ver weg, wat een onvoorstelbare afstand is voor de meeste mensen, maar relatief dichtbij voor astronomen – het gaat hier om onze kosmische achtertuin.

Het leeuwendeel van de sterren in ons Melkwegstelsel staat veel verder weg. Je hebt een telescoop nodig om ze te zien. Ze zijn er in alle maten en kleuren, en hun namen – rode dwergen, witte dwergen, gele subreuzen, blauwe superreuzen – doen denken aan de bewoners van een sprookjesbos. En ze zijn met veel. Sterrenkundigen schatten dat het Melkwegstelsel wordt bevolkt door enkele honderden miljarden sterren. Onze zon is er een van.

Maar we zijn er nog niet. Ons Melkwegstelsel is niet alleen. Het heeal zit vol met andere sterrenstelsels. Grote, statige spiraalstelsels zoals de Melkweg en Andromeda; enorme elliptische verzamelingen van oude sterren, en kleine onregelmatige dwergsterrenstelsels. De variëteit is overweldigend, net als de aantallen. Ze zijn verspreid over een gebied dat vele miljarden lichtjaren omspant.

In 1995 richtten astronomen de Hubble Space Telescope voor het eerst op een piepklein, ogenschijnlijk leeg stukje hemel. Ze lieten de camera'sluis tien dagen lang openstaan. Het resultaat: een adembenevende foto van meer dan duizend zwakke, verre sterrenstelsels in een gebiedje dat achter een speldenknop op een schijnbare armlengte afstand zou verdwijnen. Een speldenknopje naar links of rechts zou nog eens duizend verre sterrenstelsels aan het licht brengen.

Dus dit is ons huidige beeld van het waarneembare heeal: het is uitgestrekt, donker, koud en leeg. Maar het is door de hele leegte heen besprenkeld met honderden miljarden sterrenstelsels, samengeklonterd in groepen en clusters. Ben je verdwaald in *outer space* en zoek je de weg

naar huis? Zorg dan dat je een ongelofelijk nauwkeurig navigatiesysteem bij je hebt, want de kosmische snelwegen hebben geen bewegwijzering. Het is eenvoudiger om de spreekwoordelijke naald in de hooiberg te vinden.

Als je het Melkwegstelsel weet te lokaliseren, neem dan even pauze en laat het uitzicht op je inwerken. Een paar honderd miljard sterren zijn hier gerangschikt in prachtige spiraalarmen, te midden van sterrenhopen, heldere nevels en donkere stofwolken. Eentje daarvan is onze zon – een nogal onopvallende, heel gemiddelde ster. De zon leidt zijn leven in een van de rustige buitenwijken van het Melkwegstelsel, aan de binnenrand van een spiraalarm waar verder meestal weinig te beleven valt.

Rond dat kleine lichtbaken cirkelen acht minuscule planeten. Een van de vier kleinere is de aarde. Op dit stofje is de mensheid nog maar een paar eeuwen bezig om de geheimen van het universum te ontrafelen.

Nou ja, we proberen het tenminste.

Het is een nederig makende gedachte. *Homo sapiens* is bijna onvindbaar in de onmetelijke ruimte. Bovendien zijn wij debutanten op het kosmische toneel.

Hier volgt een onthullende metafoor. Stel dat de hele geschiedenis van het universum staat beschreven in een encyclopedie van veertien delen. Veertien dikke boeken met elk duizend dichtbedrukte pagina's. De oerknal staat op de eerste regel van de eerste pagina van deel 1. De eerste sterren en sterrenstelsels worden ergens halverwege deel 1 gevormd. De geboorte van de zon en de planeten wordt pas in deel 10 beschreven. De dinosaurïers sterven uit op pagina 935 van deel 14. *Homo sapiens* verschijnt op een vijfde van onderen op pagina 1000. En onze hele geschreven geschiedenis staat samengepakt in de tweede helft van de allerlaatste regel.



De astronomische visie is een van de manieren om onze wereld te doorgronden. Veel natuurkundigen zouden een andere benadering kiezen: niet simpel beschrijven wat je ziet (sterrenstelsels, sterren, planeten), maar uitzoeken waar alles van is gemaakt en hoe het allemaal werkt.

Stel je voor dat een astronoom en een natuurkundige beiden J.R.R. Tolkiens *The Lord of the Rings* zouden bestuderen. De sterrenkundige zou in zijn bevindingen de verhaallijn van de trilogie beschrijven, de hoofdpersonen, de metaforische betekenis, de schrijfstijl, enzovoorts. De natuurkundige zou het alfabet beschrijven, de letterfrequentie, de interpunctieregels en de grammatica.

Maar die zijn toch hetzelfde voor allerlei verschillende boeken? ‘Ja!’ zou de natuurkundige enthousiast antwoorden; dat is juist het mooie van deze benadering. Je kunt de specifieke kenmerken overslaan en gaan zoeken naar de gemeenschappelijke fundamenten om zo tot het grootst mogelijke inzicht te komen. Beide benaderingen hebben hun voor- en nadelen en vullen elkaar heel goed aan.

Net zoals elk boek is samengesteld uit een klein aantal verschillende letters en zich moet houden aan de grammaticaregels, zijn alle objecten in het universum samengesteld uit een klein aantal elementaire deeltjes die op elkaar inwerken via de fundamentele natuurkrachten.

De wereld om ons heen – punaises, personen, planeten, protoclusters – is verrassenderwijs samengesteld uit slechts drie typen elementaire deeltjes: de op-quark, de neer-quark en het elektron. En net zoals letters woorden, zinnen, paragrafen en boeken kunnen vormen, kunnen deze drie deeltjes atomen, moleculen en verbindingen maken, letterlijk elk object dat je je maar kunt voorstellen.

Fysici onderscheiden vier fundamentele natuurkrachten. Twee hebben een heel kort bereik; ze spelen uitsluitend een rol op de schaal van een atoomkern. Daarom heten ze de sterke en de zwakke kernkracht. De andere twee – de elektromagnetische kracht en de zwaartekracht – ervaren we ook in de grotere wereld van het dagelijks leven. Iedereen die ooit het licht heeft aangedaan of een wijnglas heeft laten vallen weet dat.

Heel veel details laat ik hier onbesproken. Neutrino’s, instabiele deeltjes, antimaterie, krachtdragende deeltjes, het beroemde Higgsdeeltje, donkere materie, supersymmetrische deeltjes, tetraquarks, een mogelijke vijfde kracht – de lijst is onuitputtelijk. Als het je interesseert, lees dan een populairwetenschappelijk boek over deeltjesfysica. Ik ga hier niet zo diep op in, al komen neutrino’s en donkere materie later in dit boek nog aan de orde.

Voor ons verhaal over de ruimtetijd en zwaartekrachtgolven is een

specifiek detail van belang en dat is het bijzondere karakter van de zwaartekracht. We zijn redelijk goed bekend met de vanzelfsprekende effecten. Maar op de een of andere manier gedraagt de zwaartekracht zich heel anders dan de andere drie fundamentele natuurkrachten. Volgens Albert Einstein komt dit doordat zwaartekracht nauw verbonden is met ruimte en tijd.

Probeer dat maar eens uit te leggen aan Isaac Newton. Newton kende de ware aard van zwaartekracht natuurlijk niet. Hij leidde een universele formule af die de aantrekkingskracht beschrijft tussen twee massa's op een bepaalde onderlinge afstand. Net als zijn tijdgenoten beschouwde Newton ruimte en tijd als twee onafhankelijke, absolute concepten.

Newtons kijk op ruimte en tijd lijkt veel op onze eigen intuïtieve ideeën. Ruimte is er gewoon – het driedimensionale niets dat altijd maar doorgaat. Een object (zoals een elementair deeltje of een planeet) bevindt zich op een bepaalde plek in de ruimte, of kan van de ene naar de andere locatie bewegen. Als we een referentiepunt kiezen kunnen alle andere locaties geïdentificeerd worden met behulp van slechts drie coördinaten. Met je referentiepunt als uitgangssituatie vertellen deze drie getallen hoe ver je naar voren of naar achteren, naar links of naar rechts en naar boven of beneden moet om die andere locatie te bereiken. De ruimte lijkt een beetje op driedimensionaal grafiekpapier. Het is de lege, onveranderlijke achtergrond waartegen alle gebeurtenissen in het universum zich afspelen.

En tijd? De denkbeeldige klok van de natuur *is ticking away the moments that make up a dull day*, in de woorden van Pink Floyd, maar ook de seconden sinds de geboorte van het heelal. De tijd als onfeilbare metronoom van de kosmos, die op elke gebeurtenis een uniek tijdstempel drukt. En ook nog eendimensionaal: als je een referentietijdstip kiest, heb je maar één getal nodig om te weten op welk tijdstip een andere gebeurtenis plaatsvindt.

Ik weet zeker dat je geen moeite hebt je voor te stellen hoe Newton tijd en ruimte zag. Het is de natuurlijke manier om ernaar te kijken. Ons brein is zo bedraad dat het met het gemakkelijkste beeld komt.

Helaas is het niet correct.

Einstein liet zien dat ruimte en tijd onderling verbonden zijn. De