

INHOUD

VOORWOORD	10
1. De onvoltooide kathedraal	15
De architectuur van de kosmos	19
Donkere fundamenten	24
Zwevend tussen twee oneindigheden	28
2. Verhalen over een zekere zwaartekracht	33
De koningin van de kosmos	34
De ordening van de hemelen	37
De mooiste theorie	55
3. Nieuwe boodschappers	63
Zwaartekrachtsgolven	67
Einsteins laatste geschenk	72
Spookdeeltjes	79
4. Zwarte gaten	85
Fenomenologie van het absurde	89
Quantumeffecten	94
Binnenkort te verwachten zwaartekrachtsgolven	98

5. Donkere materie	103
Halo's, stromen en lenzen	105
Nieuwe natuurkunde	110
Nieuwe portalen	114
6. Donkere energie	119
Mogelijke verklaringen	121
Quantummoorsprong	124
De toekomst	127
7. Quantumgenese	133
In den beginne	135
Inflatie	139
Oergolven	143
EPILOOG	147
NOTEN	152
BIBLIOGRAFIE	174
REGISTER	179
BEELDVERANTWOORDING	184

VOORWOORD

De spectaculaire vooruitgang van de moderne sterrenkunde heeft een onverwachte kosmos voor ons blootgelegd: een donker, mysterieus heelal, bevolkt door raadselachtige entiteiten waar we weinig van afweten, zoals *zwarte gaten*, of helemaal niets, zoals *donkere materie* en *donkere energie*.

Wetenschappers die, zoals ik, hun carrière begonnen aan het begin van het nieuwe millennium, konden het niet beter treffen. Het onderzoek naar deze mysteries plaatste ons voor een opwindende uitdaging en de ideeën en inzichten van onze voorgangers leken duidelijke aanwijzingen te bevatten voor onze aanpak, als een soort schatkaart.

Maar dat bleek een veel grotere uitdaging dan we hadden gedacht. In plaats van licht te werpen op het donkere heelal, hebben alle tot dusver uitgevoerde waarnemingen en experimenten het mysterie alleen maar groter gemaakt, en veel meer vragen opgeroepen dan ze hebben beantwoord. Hebben we de aanwijzingen op de schatkaart verkeerd begrepen? Of hebben ze ons misleid?

In dit boek bespreek ik hoe de opkomst van een nieuwe discipline, de *multimessenger-sterrenkunde*, een revolutie teweegbrengt in ons begrip van de kosmos. Ze combineert namelijk de traditionele, op de waarneming van het *licht* van hemellichamen gebaseerde benadering met een nieuwe aanpak, gebaseerd op andere ‘boodschappers’ – zoals zwaartekrachtsgolven, neutrino’s en kosmische straling – die informatie aandragen uit gebieden in het heelal die anders ontoegankelijk zijn.

Er is veel geschreven over de buitengewone, veelbelovende mogelijkheden van deze nieuwe discipline, vooral sinds de Nobelprijs voor de natuurkunde van 2017 werd toegekend voor de directe meting van zwaartekrachtsgolven. Maar ik wil hier de zaak vanuit een ander gezichtspunt bekijken en onderzoeken hoe zwaartekrachtsgolven en andere boodschappers ons zouden kunnen helpen om de impasse die de fundamentele natuurkunde vier

decennia heeft gekweld te doorbreken, en hoe ze de moderne kosmologie een sterker fundament kunnen geven.

In het eerste deel van het boek bespreek ik de ontdekking van de zwaartekrachtsgolven en het ontstaan van de multimessenger-sterrenkunde. Leentjebuurtje spelend bij de structuur van het *Paradijs* en de *Hel* uit Dantes *Goddelijke Komedie*, zal ik de grootste mysteries van de moderne kosmologie toelichten en betogen dat multimessenger-sterrenkunde, en in het bijzonder zwaartekrachtsgolven, een mogelijke sleutel kunnen vormen waarmee die mysteries ontsloten kunnen worden en dus kunnen helpen een brug te slaan tussen het domein van de zwaartekracht en dat van de quantumfysica (Hoofdstuk 1).

Voordat ik mij op de zwaartekrachtsgolven stort, zal ik met negen korte verhalen de fascinerende geschiedenis van de zwaartekracht belichten door het leven en de bijdragen van de meest vooraanstaande wetenschappers en sterrenkundigen onder de loep te nemen: van Tycho Brahes avontuurlijke leven en groteske dood tot Johannes Keplers intuïties en zijn hartstochtelijke proza, en van Newtons besluit om met zijn theorie van de universele zwaartekracht de gordiaanse knoop van de oorsprong van die kracht door te hakken tot Einsteins heroïsche strijd om de vergelijkingen van de algemene relativiteitstheorie af te leiden (Hoofdstuk 2).

Dan zal ik de uiterst belangrijke ontdekking van de zwaartekrachtsgolven in 2016 beschrijven, te beginnen bij een in verwarring verkerende Einstein die in 1936 de wetenschappelijke gemeenschap ervan probeert te overtuigen dat zwaartekrachtsgolven niet kunnen bestaan (!). Vervolgens zal ik de buitengewone inzichten en doorbraken toelichten die ertoe leidden dat de Nobelprijswinnaars van 2017, B. Barish, K. Thorne en R. Weiss, een geheel nieuw venster op het heelal konden openen. Zoals we zullen zien, markeerde deze prestatie het begin van een nieuw tijdperk in de wetenschap. De komende experimenten kunnen een ware revolutie in ons begrip van het heelal teweegbrengen (Hoofdstuk 3).

In het tweede deel van het boek zal ik betogen dat de vier grootste mysteries van de moderne natuur- en sterrenkunde – zwarte gaten, donkere

materie, donkere energie en de oerknal – geworteld zijn in de fysica van het oneindig kleine, en dat zwaartekrachtsgolven nieuw licht op elk van deze mysteries kunnen werpen en ze mogelijk zelfs kunnen oplossen.

Ik zal beginnen met zwarte gaten: extreme astronomische objecten die alle vormen van straling en materie in hun omgeving opslokken en alleen, zoals de fysicus John A. Wheeler zei, hun ‘gravitationele aura’ achterlaten. In die eindeloos intrigerende objecten ontmoeten de zwaartekracht en de quantumfysica elkaar. Sinds het pionierswerk van Stephen Hawking zijn zwarte gaten ‘theoretische laboratoria’ geworden om nieuwe fysische theorieën mee te verkennen. Ik vertel hoe de ontdekking van zwaartekrachtsgolven afkomstig van zwarte gaten en het eerste, in 2019 gepubliceerde beeld van een zwart gat de studie van deze objecten hebben veranderd en spoedig kunnen leiden tot nieuwe, baanbrekende ontdekkingen (Hoofdstuk 4).

Vervolgens zullen we onze aandacht richten op het probleem van de donkere materie, de mysterieuze substantie die het heelal op alle lengteschalen doordringt. Ik zal de waarnemingen van zwaartekrachtsgolven beschrijven die wellicht binnenkort de aard van deze materie kunnen ophelderen (Hoofdstuk 5).

Daarna zal ik het probleem van de donkere energie introduceren, een substantie die de uitdijning van het heelal lijkt te versnellen, en de huidige grote inspanningen bespreken om de oorsprong ervan aan het licht te brengen. Ik zal de verrassende recente ontdekking van een groeiende scheur in de kathedraal van de moderne kosmologie beschrijven, ontstaan door de meting van de uitdijingssnelheid van het heelal. Ik zal betogen dat het observeren van zwaartekrachtsgolven ons kan helpen om die scheur te dichten, of om dat prachtige gebouw af te breken, als er fatale fouten in blijken te zitten (Hoofdstuk 6).

Ten slotte zal ik mijn licht laten schijnen op misschien wel het grootste mysterie van allemaal: de oorsprong van het heelal. De woorden van J.L. Borges parafraserend (‘Hoe dan, kan ik de onbegrensde Aleph in woorden omzetten, die mijn strompelende geest nauwelijks kan bevatten?’) zal ik

duidelijk maken welk een buitengewone opgave het is om de fantastische, door fysici ter verklaring van de eerste ogenblikken van het heelal voorgestelde theorieën in woorden om te zetten. Ik zal ook de opwindende mogelijkheid bespreken dat de oorsprong van alles wat er in het heelal is kan worden vastgesteld door de zwaartekrachtsgolven te meten die in het oerheelal onmiddellijk na de oerknal zijn geproduceerd (Hoofdstuk 7).

In de epiloog vat ik de voornaamste conclusies samen en bespreek ik de implicaties ervan voor ons begrip van het heelal en onze rol daarin.

Ik heb geprobeerd dit boek toegankelijk te maken voor de doorsnee lezer zonder voorafgaande kennis van het onderwerp. In het bijzonder hoop ik dat het zijn weg zal vinden naar jonge lezers en dat zij zullen worden gestimuleerd om de opwindende wetenschappelijke ontdekkingen te volgen die ons in de komende decennia te wachten staan, en er misschien zelfs aan bij te dragen.

Collega's en experts zullen in de tamelijk uitvoerige noten aan het eind van het boek uitgebreidere discussies en preciezere uitspraken vinden. Ik heb ook een gedetailleerde bibliografie toegevoegd, voor hen die zich in de oorspronkelijke wetenschappelijke literatuur willen verdiepen.

Dit boek zou nooit zijn geschreven zonder de hulp, de steun en de aanmoediging van velen. Ik wil graag Emanuela Minnai bedanken die de publicatie van dit boek in alle stadia begeleid heeft. Ook Guglielmo Cutolo en Giuseppe Strazzeri van uitgeverij Longanesi bedank ik voor hun steun bij dit project. Speciale dank gaat uit naar mijn broer Antonio Bertone, voor het nauwkeurig lezen van de eerste versie van het boek en voor zijn vele suggesties. En naar Nadia Dominici, Lorenzo Tripodi, Roberto Trotta en Licia Verde, die de tijd vonden om de tekst te lezen en er commentaar op te leveren. Ze moedigen mij aan en hielpen de tekst te verbeteren. Veel dank ook aan de vele collega's met wie ik de inhoud van het boek kon bespreken. In het bijzonder was het een genoegen en een voorrecht om de geschiedenis van de wetenschap te bespreken met Jeroen van Dongen en Frans van Lunteren, en de kosmologie met Daniel Baumann.

Het is zeer bijzonder dat wij leven in een tijd waarin je comfortabel vanuit je eigen huis toegang kunt krijgen tot de primaire bronnen van kunst, wetenschap en literatuur, van hoge-resolutieweergaven van de papyrusrollen van het British Museum tot gedigitaliseerde versies van de belangrijkste wetenschappelijke historische teksten. Ik zou mijn dank willen uitspreken aan de ontwikkelaars en ondersteuners van digitale bibliotheken, het *Internet Archive*, *arXiv.org*, *open access*-tijdschriften en allen overal ter wereld die zich erop toeleggen om de culturele en wetenschappelijke erfenis van de mensheid voor iedereen gemakkelijk toegankelijk te maken.

Amsterdam 24-9-2020



1.

DE ONVOLTOOIDE KATHEDRAAL

*‘Waar zijn de woorden om de glorieuze kleuren te
beschrijven aan aardse ogen onbekend?’*

Edgar Rice Burroughs, De Goden van Mars

De buitengewone ontdekkingen van de moderne sterrenkunde, van de jaren twintig van de vorige eeuw tot enkele jaren geleden, zou je kunnen beschrijven als een lange zoektocht naar de kleuren van het heelal die voor het menselijk oog onzichtbaar zijn.

We zien immers slechts een heel klein deel van de *elektromagnetische golven* waaruit licht bestaat, en wat onze hersenen interpreteren als kleuren zijn niets anders dan de minuscule energiever schillen tussen deze golven. Het blauw van de oceanen heeft bijvoorbeeld een energie die nauwelijks 15 procent verschilt van het groen van de bossen.

Dankzij dat licht, dat we het *zichtbare* licht noemen, hebben onze voorouders het heelal leren kennen door duizenden jaren lang met het blote oog de regelmatige en nooit ophoudende beweging van de planeten en de sterren te observeren. In navolging van Galileo Galilei zijn de sterrenkundigen begonnen steeds krachtigere telescopen te bouwen om dat licht op te vangen

en te analyseren. Zo gaven ze de mensheid scherpere en gevoeliger ogen om het heelal mee af te speuren.

Sinds de jaren dertig is het kleurenpalet geleidelijk uitgebreid. We hebben nieuwe sterrenkundige instrumenten ontwikkeld, grote ‘kunstogen’, die de voor ons onzichtbare elektromagnetische golven kunnen zien. Deze hebben veel lagere energieën dan het licht dat wij als *rood* waarnemen, zoals de door de zon en onze Melkweg geproduceerde radiogolven en microgolven. Ook kunnen ze golven zien met veel hogere energieën dan de golven die wij als *violet* waarnemen, zoals röntgenstralen en gammastralen.

Dankzij die nieuwe waarnemingen en de inspanningen van theoretisch fysici zijn de natuurkunde en de sterrenkunde met reuzensprongen vooruitgegaan. Daardoor zijn wij nu in staat om eindelijk wetenschappelijk verantwoorde antwoorden te geven op enkele van de meest indringende vragen die de mensheid zich ooit heeft gesteld. Waaruit is het heelal opgebouwd? Hoe is het ontstaan? Hoe zijn de sterren en de planeten gevormd? Waar komen de chemische elementen vandaan waaruit ons lichaam bestaat?

Tegelijkertijd heeft de duizelingwekkende vooruitgang van de wetenschap het voor onze waarneming toegankelijke gebied van de kosmos enorm verruimd en ons een blik gegund op een mysterieuze en onverwachte wereld. Een donker, naar het schijnt onpeilbaar heelal, bevolkt door raadselachtige entiteiten waar we weinig over weten, zoals *zwarte gaten*, of zelfs helemaal niets, zoals *donkere materie* en *donkere energie*.

De wetenschappers die, zoals ik, aan het begin van het nieuwe millennium begonnen zijn met onderzoek, zouden het niet beter hebben kunnen treffen. Het onderzoek naar deze mysteries bood ons een moeilijke en spannende uitdaging en de ideeën en intuïties van onze voorgangers vormden als het ware een schatkaart die ons meer of minder nauwkeurige aanwijzingen gaf over hoe we het moesten aanpakken.

Dat avontuur is echter veel moeilijker gebleken dan we dachten. In plaats van licht te werpen op het donkere heelal, hebben de waarnemingen en de experimenten die we de laatste jaren hebben uitgevoerd het mysterie nog

verder vergroot en meer vragen opgeworpen dan antwoorden opgeleverd. Hebben we die kaart misschien verkeerd gelezen? Of bevatte die misschien verkeerde aanwijzingen?

En er is meer. Voortgestuwd door een overweldigende technologische vooruitgang hebben we in de tijd terug kunnen gaan tot de oorsprong van het heelal zelf, en daar hebben we aanwijzingen gevonden voor een duizelingwekkende theorie, die in de plooiën van het quantumvacuüm de kiem ziet van alles wat we in het heelal waarnemen. Een prachtige, elegante theorie, die echter, zoals we zullen zien, nog helemaal bewezen moet worden, en die nog steeds gehuld is in een wolk van onzekerheid en mysterie.

De kathedraal van de moderne kosmologie, een buitengewoon wetenschappelijk monument dat een precieze en fraaie verklaring geeft voor de evolutie van het heelal, rust dus op duistere en onzekere fundamenten. Hij loopt het risico weer te moeten worden opgegeven, of zelfs geheel in te storten, als we geen manier vinden om hem te stabiliseren door de fundamenten ervan te verstevigen.

In deze situatie vol twijfel en onzekerheid kwam op 11 februari 2016 de historische aankondiging van de directe waarneming van zwaartekrachtsgolven, waarvoor in 2017 de Nobelprijs voor de natuurkunde werd toegekend. Nieuws dat in de wetenschappelijke wereld insloeg als een bom.

Dat zwaartekrachtsgolven bestaan, was niet aan twijfel onderhevig. Einstein had ze al in een beroemd artikel uit 1917 voorspeld. Deze trillingen in het basisweefsel van het heelal waren bovendien al indirect waargenomen door twee Amerikaanse onderzoekers, die daarvoor in 1993 de Nobelprijs kregen.

Wat vooral zoveel opzien baarde, was de boodschap die de in 2016 waargenomen golven meebrachten: we hadden een signaal opgevangen dat was uitgezonden door de samensmelting van twee enorme zwarte gaten. Het was het bewijs dat er zwarte gaten bestaan met een massa tientallen keren groter dan de massa van onze zon, en dat ze op elkaar kunnen botsen. Dat de algemene relativiteitstheorie van Einstein werkt onder de extreme omstandigheden waarin die processen zich afspelen. Maar ook, en vooral, dat we

met zwaartekrachtsgolven verschijnselen kunnen ‘horen’ die anders in het duister van het diepe heelal verborgen zouden blijven.

Het is alsof de mensheid, toen het spectrum van de beschikbare kleuren eenmaal uitgeput was, nieuwe zintuigen ontwikkelde om het heelal mee te verkennen. Zoals de tastzin, de reukzin, het gehoor en de smaak ons informatie leveren over de werkelijkheid van alle dag en de via onze ogen verkregen informatie aanvullen, zo gaan we door middel van zwaartekrachtsgolven nieuwe informatie verzamelen en analyseren, afkomstig uit ver verwijderde en anders onzichtbare delen van het heelal.

Nauwelijks een jaar later, in 2017, konden we voor het eerst de botsing van twee andere extreme objecten waarnemen, namelijk van *neutronensterren*. Die botsing namen we niet alleen waar door middel van het veelkleurige licht dat ze produceerde, maar ook door middel van de zwaartekrachtsgolven. Deze eerste ‘multisensoriële’ gebeurtenis in de geschiedenis van de sterrenkunde betekende de geboorte van de zogeheten *multimessenger-sterrenkunde*.

De nieuwe ‘boodschappers’ van het heelal omvatten, naast licht en zwaartekrachtsgolven, ook *hoogenergetische neutrino’s*, spookdeeltjes die diep onder het ijs van Antarctica worden bestudeerd, en *kosmische straling*, bestudeerd met instrumenten in een baan om de aarde of verspreid over de Argentijnse pampa’s. Onze analogie voortzettend zouden we kunnen zeggen dat die apparaten, samen met de voor de waarneming van zwaartekrachtsgolven ontwikkelde apparatuur, nieuwe ‘zintuigen’ vormen, door de mensheid ontwikkeld om het heelal waar te nemen.

Dit boek vertelt hoe de multimessenger-sterrenkunde tegenwoordig een revolutie teweegbrengt in de bestudering van de kosmos en hoe die nieuwe wetenschap binnenkort tot de onthulling van enkele van de diepste en fascinerendste geheimen van de moderne wetenschap zou kunnen leiden, van de oorsprong van zwarte gaten tot de aard van donkere materie en donkere energie, en eveneens tot de ontdekking van wat er werkelijk is gebeurd in de eerste ogenblikken van het bestaan van het heelal.

We staan niet alleen voor een schier oneindig nog te verkennen front van

kennis, maar ook aan het begin van een wetenschappelijk avontuur dat voor altijd onze kijk op het heelal en onze rol daarin zal veranderen. Maar om de reikwijdte van die ontdekkingen en de doelen van dat avontuur te begrijpen, moeten we bij het begin beginnen. Wat weten we van het heelal en van wat het bevat? En vooral, wat weten we *niet* en moet nog worden ontdekt?

De architectuur van de kosmos

Sterren. Zwarte gaten. Sterrenstelsels. Het lijken abstracte begrippen, zo ver staan ze af van de werkelijkheid van alledag. Maar ze zijn niet minder werkelijk dan dat wat u omringt terwijl u deze regels leest.

Het probleem is dat de manier waarop wij de werkelijkheid kunnen waarnemen wordt beperkt door onze eigen menselijke omstandigheden, die, zoals Primo Levi in zijn meesterwerk *Is dit een mens* schreef, de ‘vijand van elk oneindige’ zijn. Wij zijn namelijk het resultaat van een zeer lang evolutieproces dat miljoenen jaren heeft geduurd, en onze hersenen zijn ontwikkeld om gebeurtenissen te begrijpen op tot de menselijke ervaring beperkte ruimte- en tijdschalen.

Het heeft daarom weinig zin telwoorden en vermenigvuldigingen aaneen te rijgen. We kunnen ons moeilijk de afmetingen van een sterrenstelsel voorstellen als iemand ons zegt dat het een diameter heeft van *duizendmiljard maal een miljard* meter.

Laten we proberen ons door de literatuur te laten inspireren, in het bijzonder door de beschrijvingen van Dante in het *Paradijs* van zijn *Goddelijke Komedie*. Weet u het nog? Negen sferen met de aarde als middelpunt en een steeds grotere diameter. De eerste zeven sferen waren verbonden met de destijds bekende hemellichamen: vijf planeten plus de zon en de maan. Eén met de vaste sterren, en één met wat Dante de *eerste beweger* noemde, waar de beweging van alle andere sferen uit voortspoot.

Tegenwoordig zou het zinloos zijn om met elke planeet of elk