

# Inhoud

---

Inleiding	7
<b>1. Gevangen in de ruimtetijd</b>	15
<b>2. In de voetsporen van Einstein</b>	29
Kader 1: Paradoxen	40
Kader 2: Snelheden optellen	45
<b>3. Wat recht was wordt krom</b>	47
<b>4. Een wereld van kansen</b>	57
<b>5. Kijken zover je kunt</b>	75
Kader 1: Ontsnappingsnelheid: een formule	78
Kader 2: De Schwarzschildstraal	79
Kader 3: De unruhtemperatuur	88
Kader 4: Stephen Hawking	89
<b>6. Het raadsel van de informatie</b>	93
Kader: Hoe warm is een zwart gat?	95
<b>7. Een muur van vuur</b>	113
Kader: Hawking en firewalls	130
<b>8. Hoe warm is lege ruimte?</b>	133
Kader 1: Temperatuur in universele eenheden	136
Kader 2: Logaritmen	140
Kader 3: Entropie en oppervlakte	146
<b>9. Wat een toestanden!</b>	157
<b>10. Voorbij zwarte gaten</b>	173
Kader: Verstremeling en wormgaten	188
<b>11. Het woord aan de natuur</b>	193
Dankwoord	211
Illustratieverantwoording	212
Bibliografie	214
Index	216



# Inleiding

---

Het heelal spreekt tot de verbeelding. Mensen houden nu eenmaal van extremen: we bewonderen de snelste autocoueurs, beklimmen de hoogste bergen en verzinnen zelfs records voor het opeten van zoveel mogelijk hotdogs. Nergens zijn de extremen echter zo groot als diep in het universum. Daar vinden we materie die bijna met de snelheid van het licht beweegt, sterren die zo groot en zwaar zijn dat ze onze zon als een nietig stofje zouden kunnen opslokken en processen die met zoveel energie gepaard gaan dat zelfs de ontploffing van een atoombom er volkomen bij vervaagt.

Dit boek gaat over zwarte gaten: objecten in het heelal, bijvoorbeeld ontstaan bij het ineenstorten van opgebrande superzware sterren, waar de zwaartekracht allesoverheersend is. Wie van extremen houdt, is bij zwarte gaten aan het juiste adres. Ze vestigen namelijk niet één, maar twee records tegelijk. Allereerst is er die enorme zwaartekracht: zo groot dat materie alleen maar met de hoogst mogelijke snelheid – die van het licht – in een zwart gat kan vallen, en vervolgens nooit meer rechtsomkeert kan maken. Om zulke ‘zwaartekrachtsgevangenis’ echt goed te kunnen beschrijven, zijn de alledaagse natuurwetten die we hier op aarde gebruiken niet genoeg. Daarvoor is de relativiteitstheorie nodig, die Albert Einstein aan het begin van de vorige eeuw heeft ontwikkeld.

Maar zwarte gaten zijn op een tweede, nog veel subtielere manier extreem. Volgens de relativiteitstheorie zou een zwart gat een *perfecte* gevangenis moeten zijn: zelfs licht kan er niet aan ontsnappen. In de jaren 70 ontdekte Stephen Hawking dat ook Einstein daarmee niet helemaal juist zat. Hawking bestudeerde zwarte gaten niet op de allergrootste, maar juist op de allerklein-

ste schaal, en ontdekte dat zich ook op die schaal heel bijzondere processen afspelen. We hebben het dan over de schaal van de quantummechanica: de theorie van de elementaire bouwstenen van ons heelal. Volgens de quantumtheorie kan er juist wél weer straling aan een zwart gat ontsnappen – al zal dat in de praktijk maar een heel klein beetje zijn.

Er is dus een kleine tegenspraak tussen wat de quantummechanica en de relativiteitstheorie ons over zwarte gaten vertellen. Die kleine tegenspraak blijkt echter gigantische gevolgen te hebben. Naarmate natuurkundigen het kleine scheurtje in dit theoretisch pleisterwerk van ons universum probeerden te dichten, gebeurde juist het omgekeerde. De scheur werd groter en groter, en langzaam maar zeker werd duidelijk dat zwarte gaten de sleutel zijn tot een veel algemener vraagstuk: waarom gaan relativiteitstheorie en quantummechanica niet goed samen? Gelukkig lijken zwarte gaten niet alleen dit probleem te onthullen, maar bieden ze ook een heel scala aan raadselachtige feiten die ons dichterbij een oplossing kunnen brengen.

In dit boek wil ik u zoveel mogelijk vertellen over zwarte gaten, over de natuurkundige mysteries die ze ontsluiten en over de oplossingen die diezelfde zwarte gaten voor deze mysteries aandragen. Daarbij spelen zoals gezegd fundamentele natuurkundige theorieën als de relativiteitstheorie en de quantummechanica een rol. Geen eenvoudige materie! Maakt u zich echter niet te veel zorgen: ik zal me beperken tot de ingrediënten die voor dit verhaal essentieel zijn, en proberen die op eenvoudige wijze uit te leggen. In de hoofdstukken van dit boek gebeurt dat vrijwel zonder formules; voor de echte liefhebber bespreek ik in een aantal kaders nog een enkele formule als extra – maar nooit noodzakelijke – toelichting. Gedegen achtergrondkennis van de fundamentele natuurkunde is dus beslist geen vereiste; geduld en doorzettingsvermogen zo nu en dan wel. Dat laatste geldt in het bijzonder voor de hoofdstukken 7 t/m 10, waar ik de interessante ontwikkelingen beschrijf die de theorie van zwarte gaten in de afgelopen jaren heeft doorgemaakt. Ondanks de soms pittige inhoud hoop ik dat juist deze hoofdstukken de geïnteresseerde lezer iets kunnen bieden wat hij of zij in andere populairwetenschappelijke boeken niet zal vinden. De zoektocht naar de oplossing van de mysteries waar zwarte gaten ons toe zullen leiden, is vandaag de dag nog volop gaande. In dit boek worden veel vragen gesteld en veel mogelijke antwoorden besproken. Naarmate het boek vordert, zullen die antwoorden wel steeds minder zeker worden. De fundamentele natuurkunde is nog altijd volop in ontwikkeling, en door u een beeld te schetsen van de situatie van vandaag, zal ik ongetwijfeld ook ideeën be-

schrijven die over tien, vijftig of tweehonderd jaar volkomen onjuist blijken te zijn. Waar ik onderwerpen beschrijf die tot dit *work in progress* van de moderne natuurkunde behoren, zal ik dat natuurlijk vermelden, zodat hopelijk steeds duidelijk is waar iets zich bevindt in het grote grijze gebied tussen 'idee' en 'theorie'.

### **Hoe het zo kwam**

Het boek dat nu voor u ligt heeft een lange ontstaansgeschiedenis, die begon met de publicatie van mijn vorige boek, *Snaartheorie*, in 2010. Trots op mijn nieuwe geesteskindje stuurde ik presentie-exemplaren naar diverse bekenden, waaronder mijn twee voormalige promotoren, Robbert Dijkgraaf en Erik Verlinde. Van beiden kreeg ik een enthousiast bedankje, waarmee ik dacht dat de kous af was.

Niets bleek minder waar, want ruim een jaar later kreeg ik een e-mail van Erik Verlinde. Ik was op dat moment postdoctoraal onderzoeker in Lissabon, en had net een contract getekend om een jaar te gaan werken aan de universiteit van Santiago de Compostela, in het noordwesten van Spanje. Erik had die zomer de Spinozapremie gewonnen – de belangrijkste Nederlandse wetenschapsprijs – en wilde graag een deel van het prijzengeld besteden aan het opzetten van een popularisatieprogramma over de fundamentele natuurkunde. Hij had mijn boek en diverse van mijn andere populairwetenschappelijke publicaties gelezen, en vroeg zich af of ik er iets voor voelde om terug te keren naar Nederland en hier samen met hem zo'n programma op te zetten.

Daar voelde ik zeker voor, maar het probleem was natuurlijk dat ik net mijn contract in Spanje had getekend. Was er haast bij het project? Dat was er gelukkig niet, en dus spraken we af dat ik in het najaar van 2012 als onderzoeker en outreachmedewerker naar de Universiteit van Amsterdam zou komen om daar het *Quantum Universe*-project op te zetten.

Dat project zou bestaan uit masterclasses voor middelbare scholieren, docentencursussen, profielwerkstukbegeleiding, lesmateriaal en alles wat we nog meer konden bedenken. De kern van dat alles werd een populairwetenschappelijke website: [www.quantumuniverse.nl](http://www.quantumuniverse.nl). Die site zou natuurlijk de aankondigingen en het materiaal van onze andere activiteiten bevatten, maar daarbovenop vooral informatief worden, met tweemaal per week een nieuw populairwetenschappelijk artikel of nieuwtje. Ons doel was om het wetenschappelijke nieuws direct vanuit de bron te brengen, en zo vooral het en-

thousiasme van wetenschappers voor de grote open vragen uit hun vakgebied op de lezer over te brengen. Ik werd hoofdredacteur van de site, en ben dat tot op de dag van vandaag.

Waar ik geen rekening mee had gehouden, was dat ik in die begindagen ook vrijwel de enige auteur van de site zou zijn. Een redactie bestond nog niet, en het was niet altijd makkelijk externe auteurs iets te laten schrijven voor een website die nog nauwelijks bekendheid genoot. Om mezelf het leven wat gemakkelijker te maken, vroeg ik de bouwers van de website om de mogelijkheid tot het aanmaken van 'dossiers': series artikelen over één onderwerp, die bijvoorbeeld wekelijks met nieuwe informatie aangevuld konden worden. Zo hoefde ik niet in één week alles over een onderwerp als quantummechanica, relativiteitstheorie of snaartheorie te schrijven, maar kon ik me steeds tot een klein deelgebied beperken en zo langzaam maar zeker een mini-encyclopedie over het betreffende onderwerp opbouwen.

Op den duur – mede door de steeds groeiende hoeveelheid informatie – kreeg *The Quantum Universe* steeds meer bezoekers, zetten we een fatsoenlijke redactie op en werden externe auteurs steeds meer bereid om voor de site te schrijven. Toch bleef ik, zij het met wat lagere frequentie, doorgaan met het schrijven van de dossiers. Ik had inmiddels ontdekt dat het ook gewoon heel leuk was om mijn kennis over bepaalde onderwerpen op die manier met een breed publiek te delen.

In april 2015 begon ik zo met een dossier over het onderwerp 'zwarte gaten'. Toen dat eind juli af was en ik het geheel nog eens teruglas, viel me op dat daarmee min of meer automatisch de basis van een nieuw boek was ontstaan. Zou het niet leuk zijn om het dossier verder aan te vullen en te polijsten, en er een écht boek van te maken?

Ik besepte dat dit nog heel wat werk zou zijn, dus ik ging niet direct met het idee aan de slag. *Snaartheorie* was inmiddels echter uitverkocht, en de uitgever had geen interesse in een nieuwe druk. Ik kreeg van diverse kanten daarom de vraag of ik niet een nieuw boek wilde schrijven. Een van de mensen die daar het meest enthousiast op aandrong was Charlotte Icke, organisator van een aantal populairwetenschappelijke themaweken waar ik aan meewerkte. Zij bracht me ook in contact met een nieuwe uitgever, Amsterdam University Press.

Op een bijzonder regenachtige dag in 2016 zat ik druipnat op het kantoor van AUP aan de Nieuwe Prinsengracht. De thee was gelukkig warm en het kennismakingsgesprek goed, dus toen ik het pand een uur later verliet, waren de eerste plannen gesmeed voor niet één, maar twee boeken: een boek over

zwarte gaten en een boek gebaseerd op een ander dossier, over snaren en holografie. Het eerste van die twee boeken ligt nu voor u; het tweede zal hopelijk in het najaar van 2018 verschijnen.

### **Over getallen, eenheden en formules**

In de inleiding van zijn boek *A brief history of time* (in het Nederlands uitgegeven onder de titel *Het heelal*) vertelt Stephen Hawking hoe zijn uitgever hem waarschuwde tegen het gebruik van formules. Elke formule zou het aantal lezers van het boek met een factor twee doen afnemen. Hawking gebruikte uiteindelijk in zijn hele tekst dan ook maar één formule: Einsteins beroemde  $E=mc^2$ .

Ik deel de angst van Hawkings uitgever niet helemaal. Ik vind het belangrijk om als populairwetenschappelijk auteur je lezerspubliek niet te onderschatten, zeker niet als dat zou betekenen dat je interessante informatie achterwege moet laten. Tegelijkertijd wilde ik graag een boek schrijven dat ook voor een lezer zonder wiskundekennis te volgen zou zijn. Uiteindelijk heb ik er daarom voor gekozen om net als Hawking vrijwel alle formules uit de hoofdttekst weg te laten, maar in een aantal kaders aan de hand van formules wel iets te vertellen over het rekenwerk dat onlosmakelijk met de theoretische natuurkunde verbonden is. Houdt u niet van wiskunde, dan kunt u die kaders zonder enig probleem overslaan.

Kennis die u als lezer wél nodig hebt, is die over wetenschappelijke notatie van getallen en eenheden. Nu is die kennis gelukkig in enkele alinea's samen te vatten. Om te zorgen dat de uitleg makkelijk terug te vinden is, zal ik dat direct in deze inleiding doen.

In de natuurkunde komen nogal eens enorm grote of enorm kleine getallen voor – zeker als we het over begrippen uit de kosmologie hebben. Hoewel het zeer indrukwekkend is om getallen als 0,000000000000003 of 17.000.000.000.000.000.000.000 volledig uit te schrijven, en ik dat zo nu en dan ook zal doen, wordt die notatie op den duur toch wat vermoeiend. Grote getallen schrijven we in de wetenschap daarom meestal als een kleiner getal dat vervolgens nog een bepaald aantal keren met 10 vermenigvuldigd moet worden. Doorgaans heeft dat kleine getal één cijfer voor de komma.  $2,23 \times 10^3$  betekent bijvoorbeeld: '2,23 vermenigvuldigd met drie factoren 10', oftewel 2230. Op het eerste gezicht lijkt die notatie niet zo efficiënt – 1.638.460.726 wordt bijvoorbeeld het beslist niet kortere  $1,638460726 \times 10^9$  – maar meestal

zijn we niet in alle cijfers van een getal geïnteresseerd, en kunnen we dit dus afronden naar iets wat wél korter is, zoals  $1,6 \times 10^9$ .

Voor heel *kleine* getallen doen we iets soortgelijks. We geven dan een groter getal, en geven daarna aan hoe vaak we dat getal door 10 moeten *delen* om het eigenlijk bedoelde getal te krijgen. Dat we willen delen door factoren tien geven we aan met een negatief getal in de exponent:  $3,7 \times 10^{-4}$  betekent bijvoorbeeld: '3,7 gedeeld door vier factoren 10', oftewel 0,00037.

<b>schrijfwijze</b>	<b>betekenis</b>
$10^3$	$10 \times 10 \times 10 = 1000$
$2,23 \times 10^3$	2230
$10^{-4}$	$1 / (10 \times 10 \times 10 \times 10) = 1 / 10.000 = 0,0001$
$3,7 \times 10^{-4}$	0,00037

Ook voor natuurkundige eenheden geldt dat ik daar in dit boek een korte standaardnotatie voor zal gebruiken. Een *eenheid* is de maat waarin we iets meten. Zo kunnen we afstanden meten in meters, kilometers, mijlen, inches, enzovoort. In de natuurkunde kiezen we vaak een aantal standardeenheden, die ook elk hun eigen afkorting hebben: meters (m) voor afstanden, seconden (s) voor tijden, kilogrammen (kg) voor massa's, enzovoort. Nu we het toch over conventies en gebruiken hebben: natuurkundigen spreken niet van 'gewicht' als ze het hebben over de hoeveelheid materie waaruit iets bestaat, maar over 'massa'. Ook die gewoonte zal ik in dit boek respecteren. Een *gewicht* is namelijk datgene wat je met een weegschaal meet. Op aarde is dat hetzelfde als massa, maar in het zwakke zwaartekrachtsveld op de maan zal de weegschaal waar ik op ga staan maar zo'n dertien kilogram aanwijzen, terwijl mijn massa – de hoeveelheid materiaal waaruit ik besta – daar net als hier een kleine 80 kilogram is.

Er bestaan in de natuurkunde ook allerlei samengestelde eenheden. Als we een snelheid meten, delen we bijvoorbeeld een afgelegde afstand door de tijd waarin die afstand is afgelegd. We meten een snelheid dus in meters per



seconde, oftewel m/s. Net als in de getalsnotatie hierboven geven we 'delen door' ook vaak aan met een negatieve exponent: de eenheid van snelheid kunnen we daarmee ook schrijven als  $\text{ms}^{-1}$ . Het nut van die laatste notatie zien we als we bijvoorbeeld het begrip versnelling bekijken. Een versnelling is de verandering van snelheid (in meters per seconde) in een bepaalde hoeveelheid tijd (in seconden), maar het schrijven van 'meter per seconde per seconde' of 'm/s/s' is wat omslachtig. We schrijven dat dus als  $\text{ms}^{-2}$ . Ook het vermenigvuldigen van eenheden kan met een (nu positieve) exponent weergegeven worden, maar dat is iets waar u allang bekend mee bent. De oppervlakte van een rechthoek wordt bepaald door de lengte (in meters) met de breedte (ook in meters) te vermenigvuldigen, en het zal u allerm minst verbazen dat we de bijbehorende eenheid 'vierkante meter' schrijven als  $\text{m}^2$ .

Daarmee hebt u voldoende informatie om de wetenschappelijke notatie die her en der in dit boek voorkomt te begrijpen. Bent u niet heel vertrouwd met deze notatie, slaat u dan bij het lezen van dit boek vooral deze inleiding nog eens open. En maakt u zich geen zorgen:  $9,99 \times 10^1$  procent van dit boek bestaat gelukkig uit gewone woorden.