

de natuurwetten
iconen van onze kennis





DE NATUURWETTEN

iconen van onze kennis

Sander Bais



Het jaar 2005 is wereldwijd uitgeroepen tot *World Year of Physics*

Colofon

Tweede druk 2007

Ontwerp Gijs Mathijs Ontwerpers, Amsterdam.

Deze uitgave is gedrukt op WOODSTOCK Camoscio van Fedrigoni

isbn 90 5356 714 3

nur 616/754

© Salomé – Amsterdam University Press, 2005

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden veeleenvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Voor zover het maken van kopieën uit deze uitgave is toegestaan op grond van artikel 16B Auteurswet 1912 j° het Besluit van 20 juni 1974, Stb. 351, zoals gewijzigd bij het Besluit van 23 augustus 1985, Stb. 471 en artikel 17 Auteurswet 1912, dient men de daarvoor wettelijk verschuldigde vergoedingen te voldoen aan de Stichting Reprorecht (Postbus 3051, 2130 KB Hoofddorp). Voor het overnemen van gedeelte(n) uit deze uitgave in bloemlezingen, readers en andere compilatiewerken (artikel 16 Auteurswet 1912) dient men zich tot de uitgever te wenden.

De auteur wil graag zijn collega's van het Instituut voor Theoretische Fysica van de Universiteit van Amsterdam, en in het bijzonder dr. Leendert Suttorp, bedanken voor opbouwend commentaar en ideeën. Deel van het werk is verricht tijdens een verblijf aan het Santa Fe Institute in de VS, de auteur wil het sfi danken voor de verleende gastvrijheid. Hij is ook dank verschuldigd aan degenen bij AUP die aan het project hebben bijgedragen, vooral aan Vanessa Nijweide, voor advies, enthousiasme en geduld.

De informatie in de biografieën komt uit verschillende bronnen, waaronder:

Concise Dictionary of Scientific Biography, Charles Scribners and Sons, New York, 1981.

The Mac Tutor History of mathematics Archive op:

www-groups.dcs.st-and.ac.uk/history

www.nobel.org

www.scienceworld.wolfram.com

Inhoudsopgave

6	Inleiding
11	Wiskundig gereedschap
18	Groei en verval De logistieke vergelijking
22	Mechanica en zwaartekracht De bewegingsvergelijkingen en universele zwaartekrachtwet van Newton
28	De elektromagnetische kracht De Lorentzkracht
32	Een lokale behoudswet De continuïteitsvergelijking
34	Elektrodynamica De Maxwell-vergelijkingen
40	Elektromagnetische golven De golfvergelijkingen
42	Solitaire golven De Korteweg-De Vries-vergelijking
44	Thermodynamica De drie hoofdwetten
50	Kinetische theorie De Boltzmann-vergelijking
54	Hydrodynamica De Navier-Stokes-vergelijkingen
58	De speciale relativiteitstheorie Relativistische mechanica
64	De algemene relativiteitstheorie De Einstein-vergelijkingen
70	Quantummechanica De Schrödinger-vergelijking
76	Het relativistische elektron De Dirac-vergelijking
80	De sterke kracht Quantumchromodynamica
84	Elektrozwakke wisselwerking Het Glashow-Weinberg-Salam-model
88	Snaartheorie Supersnaren en branen
93	Terug naar de toekomst Een laatste perspectief

Wiskunde als taal van de natuur

Dit boek gaat over de fundamentele natuurwetten. Deze wetten zijn de inspirerende uitkomst van onze niet-aflatende pogingen de wereld om ons heen te begrijpen. Ze geven een beknopte beschrijving van hoe de natuur werkt in de vorm van wiskundige vergelijkingen. Deze vergelijkingen kunnen niet worden verkregen door louter logisch redeneren, ze zijn het product van een kritische dialoog tussen zorgvuldige waarneming van de natuur, en de intuïtie en het creatieve denkvermogen van vele – soms geniale – onderzoekers.

Het doel van dit boek is niet om wis- of natuurkunde te onderwijzen in een strikte zin. Ik presenteer de wetten zonder diep in te gaan op hun empirische onderbouwing, ook al is het zo dat zij in bepaalde opzichten de vrucht zijn van de kritische observatie van patronen en processen in de natuur. Mijn doel is om de lezer tot op zekere hoogte deelgenoot te maken van de opwindende boodschap die deze wetten uitdragen.

Voor natuurwetenschappers is wiskunde een taal, een hulpmiddel dus, terwijl het voor de wiskundigen een doel op zich is. Het is een taal, die trouwens regelmatig moest worden uitgebreid wanneer dieperliggende lagen van de fysische werkelijkheid werden blootgelegd. Zo blijkt paradoxaal genoeg de meest kunstmatige taal uiteindelijk de meest natuurlijke.

Wetten als vergelijkingen

De natuurwetten nemen de vorm aan van vergelijkingen en, zoals het woord aangeeft, worden in een vergelijking bepaalde grootheden met elkaar vergeleken. Meestal drukt een vergelijking een relatie uit tussen variabelen die het fysische systeem beschrijven en bepaalt ze welke veranderingen in ruimte en tijd kunnen plaatsvinden. De relatie kan wiskundig worden weergegeven door specifieke symbolen zoals het isgelijktteken

6

Inleiding

Een taboe overtreden

Er is een algemene stelregel die zegt dat elke vergelijking die wordt opgenomen in een populair-wetenschappelijk exposé, het lezerspubliek halveert. Daarom rust er een taboe op het gebruik van vergelijkingen. Sommige mensen zijn als de dood voor vergelijkingen, terwijl andere ze prachtig vinden. Het taboe dwingt ons als het ware om over kunst te schrijven zonder afbeeldingen te laten zien. In dit boek doorbreken we dit taboe op radicale wijze: voor de verandering staan de vergelijkingen zélf in de schijnwerpers. Als we de natuurwetten zien als *iconen van onze kennis*, moeten we ze ook in al hun glorie laten zien.

- 7 (=), het groter-dan-teken ($>$), en het kleiner-dan-teken ($<$).
Er zijn heel wat natuurwetten maar ze zijn niet allemaal onafhankelijk van dezelfde orde. De wetten waar wij ons mee bezig zullen houden, markeren grote keerpunten in ons denken over de natuur. Ze vormen de knooppunten in een complex netwerk van ideeën dat rust op een gedegen empirisch fundament.

Wet en orde

Het heelal vertoont op alle niveaus een enorme ordening. Op grote schaal cirkelen er planeten rond sterren (zoals rond onze zon), bevinden de sterren zich in melkwegstelsels en vormen die stelsels op hun beurt clusters of superclusters. In de microwereld vinden we atomen, atoomkernen en de elementaire bouwstenen van de natuur, zoals quarks, elektronen en fotonen. En ertussenin bevindt zich een enorme verscheidenheid aan complexe structuren van veeldeeltjes systemen, zoals vloeistoffen, kristallen en zandhopen, maar ook de wonderbaarlijke moleculen van het leven, zoals eiwitten en DNA. De systemen die we zouden willen doorgronden zijn nogal divers: bevolkingsgroei, aandelenkoersen, leerprocessen, epidemieën – of zelfs het universum als geheel.

Eenvoudige vergelijkingen met complexe oplossingen

Om een systeem of structuur te onderzoeken, beschrijven we deze gewoonlijk in termen van een aantal variabelen, zoals plaats, populatie, dichtheid, spanning et cetera. Vervolgens proberen we relaties tussen deze ‘structurele variabelen’ te ontdekken, en die kunnen soms behoorlijk ingewikkeld zijn. De variabelen zijn de *onbekenden* waarvoor we de vergelijkingen willen opstellen, om ze daarna op te lossen.

De natuur heeft zich op allerlei schalen georganiseerd in configuraties met een verrassende diversiteit, stabiliteit en complexiteit. Rond deze stabiele configuraties hebben zich afzonderlijke, vaak gespecialiseerde vakgebieden ontwikkeld. Het is gebleken dat eenvoudige vergelijkingen heel goed complexe structuren kunnen beschrijven. Het verbazingwekkende is niet zozeer de complexiteit van de wereld, maar de eenvoud van de vergelijkingen die die complexiteit beschrijven.

Ons streven is meervoudig: ten eerste willen we de wetten vinden die de structuur en het dynamische gedrag van een systeem beschrijven; ten tweede willen we de onderliggende principes die ze uitdrukken begrijpen en tenslotte willen we de oplossingen vinden. Het vinden van de wetten is de taak van de natuurwetenschapper die het systeem kent dat hij of zij wil modelleren, maar bij het bepalen van de oplossingen is de wiskundige een onmisbare partner.

De oplossingen beschrijven niet alleen stationaire toestanden, zoals de structuur van een molecuul of kristal, maar ook dynamische processen, zoals de verstrooiing van deeltjes of de tijdevolutie van het systeem – het weer, een stromende rivier, de groei van een bacteriestam of het uitdijende heelal. Vaak hebben vergelijkingen een voorspellend vermogen en kunnen nieuwe oplossingen leiden tot nieuwe experimentele ontdekkingen.

Variabelen en constanten

Naast de onbekenden (variabelen) bevat een vergelijking gewoonlijk parameters. Dit zijn constante grootheden, als we de waarde daarvan veranderen kan dat de eigenschappen van de oplossingen drastisch beïnvloeden. Water zal bevriezen of verdampen afhankelijk van de temperatuur als parameter. Een baan kan veranderen van gebonden tot ongebonden door de sterkte van aantrekkingskracht te veranderen.

In de fundamentele vergelijkingen waar we ons op richten, komen zogenaamde universele constanten voor, zoals de constante van Newton, die de sterkte van de zwaartekracht bepaalt, de lichtsnelheid en de constante van Planck. De waarden van de belangrijkste natuurconstanten staan in de tabel op de binnenzijde van de voorflap. Zij bepalen in belangrijke mate hoe de zaken ervoor staan in ons heelal. Als we dezelfde wetten zouden nemen maar met andere waarden voor deze constanten, zou de natuur er heel anders uitzien. Het heelal zou in alle opzichten anders kunnen zijn, en waarschijnlijk zouden wij er niet eens zijn om ons erover te verbazen. Het is trouwens onbekend waaróm de waarden zijn wat ze zijn.

8

In vogelvlucht

De inhoud van dit boek vormt een soort berglandschap, waarin de natuurwetten de toppen zijn. Sommige bergen zijn moeilijk te beklimmen, maar wie op de top aankomt, wacht een schitterend uitzicht. Wij doen het rustig aan en vliegen over het landschap heen om zo een blik te werpen op de hoogste toppen, zonder ons zorgen te maken over hoe moeilijk het is om in de diepte van a naar b te komen. We laten de ijzige gletsjers met hun verraderlijke spleten en de steile bergwanden voor wat ze zijn, en gaan niet voor de 99% transpiratie, maar voor

9 Hoe dit boek te lezen?

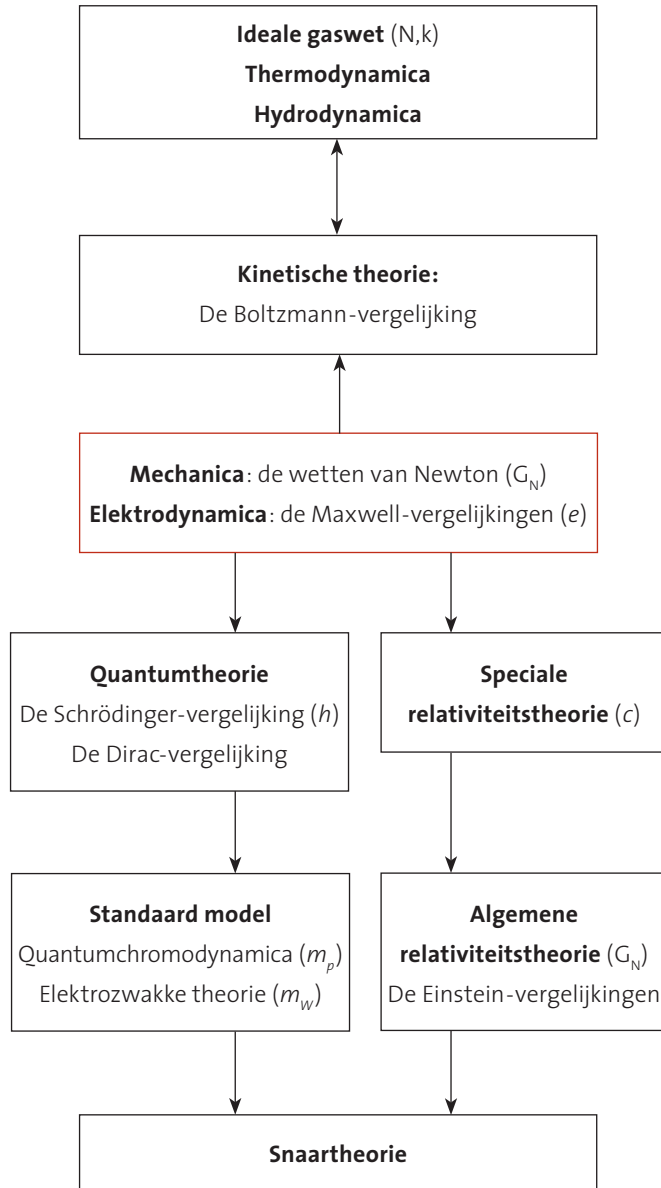
Het is raadzaam om eerst de inleiding door te nemen, daar worden in vogelvlucht enkele centrale wiskundige begrippen en symbolen geïntroduceerd. Enkele veelvoorkomende uitdrukkingen staan bij elkaar zodat je er later eventueel naar kunt terugkeren.

De hoofdstukken zijn met opzet niet genummerd omdat het boek niet van voor naar achteren gelezen hoeft te worden. Beschouw het eerder als een galerie, waar je van het ene kunstwerk naar het andere kunt wandelen. Bij elke vergelijking staat op de linkerpagina een zeer beknopte beschrijving van de vergelijking en zijn betekenis vetgedrukt. Wie meer wil weten, kan dan verder het hoofdstuk uit lezen. Wanneer de kennishonger dan nog niet gestild is – en daar kan ik mij van alles bij voorstellen – moet men zijn tanden zetten in meer gedetailleerde literatuur.

Ten slotte: de wetten kennen elkaar. Er zijn er die hand in hand lopen, elkaar zelfs omhelzen, en er zijn er die slaande ruzie hebben. Als er twee strijden, komt daar soms een derde uit voort. We lopen tegen tegenstrijdigheden aan die worden opgelost door het invoeren van nieuwe overkoepelende concepten: de crisis ontpopt zich dan als creatief moment bij uitstek. De natuurwetten vertellen het verhaal van schuivende paradigma's en geven zo een beknopt overzicht van de keerpunten in ons denken.

de 1% inspiratie (om een uitspraak van Edison over genialiteit te parafraseren). Wij dalen niet af naar de rotspaden, maar zien ze slechts als een fijnmazig net over het landschap liggen.

Omdat we alles alleen maar van bovenaf bekijken, blijft onze indruk beperkt. Voor velen is het de eerste reis door dit onbekend land, met een rijke poëzie in een vreemde taal geschreven. Dat geeft niet, als we na afloop maar terugkeren met meer dan waarmee we vertrokken. Daarom schetsen we voor we op pad gaan eerst een plattegrond.



Op deze plattegrond zijn enkele directe verbanden aangegeven tussen de onderwerpen van dit boek. De pijlen geven ruwweg de chronologische samenhang aan. We beginnen in het midden, waarna we ons omhoog bewegen, naar de macroscopische wereld van systemen die uit veel deeltjes bestaan. Vervolgens gaan we naar beneden, langs de paden van relativiteit en quantumtheorie.

Er is veel voor te zeggen om alle pijlen omhoog te laten wijzen, aangezien dat de structurele hiërarchie in onze wereld weerspiegelt. En het is ook de manier waarop de natuur zich ontvouwd heeft in de 13,7 miljard jaar sinds de oerknal: van de allerkleinste naar de allergrootste structuren. Deze allesomvattende evolutie, waarvan het 'recente' aardse hoofdstuk van Darwin een klein onderdeel is, toont aan hoe groot het succes van reductionisme in de wetenschap feitelijk is. Het feit dat de Natuur in razend tempo bezig is haar eigen oorsprong te bloot te leggen en te doorgronden, betekent misschien wel dat we bezig zijn een nieuwe evolutionaire drempel te overschrijden.