

# Inhoud

Inleiding	II
1 Weer en klimaat	26
2 Donkere materie, donkere energie en het kosmisch web	65
3 Sterrenstelsels en het subraaster	98
4 Zwarte gaten	134
5 Kwantummechanica en kosmische oorsprong	163
6 Denken	203
7 Simulaties, wetenschap en werkelijkheid	241
Dankwoord	265
Noten	267

## Inleiding

Heel soms kan een enkele gebeurtenis je geest verruimen naar een nieuw domein. Mijn collega's in de sterrenkunde herleiden hun liefde voor de ruimte tot de dag dat ze een telescoop kregen, een nacht onder de sterren of het zien van de maanlandingen. Het moment dat mij bijblijft is de ontdekking op zevenjarige leeftijd van mijn vaders computer ZX Spectrum. Mijn vader was musicus van beroep; hij had een achtergrond in elektronische techniek en werkte met een reeks vroege digitale muzieksynthesizers. Het gebruik van de thuiscomputer was het volgende gebied om te verkennen. De plasticachtige Spectrum, met een rubberen toetsenbord en een regenboogmotief, werd aangesloten op een oud televisietoestel in het klamme souterrain en hield me al gauw elke dag urenlang bezig. Je kon hem instructies geven om bijna alles te doen, of zo leek het tenminste.

De Spectrum sloeg games en andere programma's – apps of code in de huidige terminologie – op audiocassettes op. Een programma starten was een onbetrouwbaar proces waarbij je gewoon moest gokken: snel vooruit- of terugspoelen naar het juiste punt op de band, LOAD intikken, op play drukken op het bedieningspaneel en een paar minuten wachten terwijl er bizarre sciencefictiongeluiden klonken en psychedelische kleuren over het scherm flitsten. Uiteindelijk kwam het proces abrupt tot een einde en begon het spel, als je geluk had.

Op een dag vond ik ergens op mijn vaders talloze cassettes een programma genaamd SatOrb.<sup>1</sup> Dit juweeltje daagde je uit om een satelliet te lanceren rond een planeet van eigen keus (je kon een willekeurige planeet van het zonnestelsel kiezen). Het vroeg om een initiële hoogte en snelheid, en volgde dan wat er met je hypothetische ruimtevaartuig gebeurde. Terwijl een geel, pixelachtig pad zich langzaam aftekende op het zwarte scherm, kon je beginnen met raden: zal het neerstorten op het oppervlak van de planeet, de ruimte in schieten, of het doel van een stabiele baan om de planeet bereiken? Met wat oefening kon je je ruimtevaartuig in een geschikte baan plaatsen, en zou het een mooie looping uitvoeren – net als de maan, of een van de duizenden kunstsatellieten die om de aarde draaien.

SatOrb heeft mijn belangstelling voor natuurkunde en informatica aangewakkerd, waardoor ik een groot deel van mijn tienerjaren in het souterrain doorbracht met het schrijven van computercode om zelf programma's te maken. Ik had wat boeken over de ruimte, die ik graag doorbladerde, en ik keek af en toe naar de nachtelijke hemel. Maar ik heb er nooit aan gedacht om een telescoop te vragen. Het blokkerige, wazige, bonte universum in deze kleine zwarte doos leek me reëler dan de verre uithoeken van de ruimte.

Ik wist toen nog niet dat SatOrb een rudimentaire simulatie was.

Simulaties proberen een echt scenario na te bootsen in een computer, en ze worden zo wijdverbreid gebruikt dat we hier in elk onderdeel van ons leven mee te maken hebben. De weersvoorspellingen waarop we allemaal vertrouwen, zijn gebaseerd op simulaties van de dampkring rond de aarde; als we in een auto rijden of met een vliegtuig reizen, zijn die al via simulaties getest voordat ze werden gebouwd; simulaties vormen de kern van de met computers gegenereerde speciale effecten voor films en televisieprogramma's; games op com-

puters, bouwkundige modellering, financiële planning en zelfs besluitvorming op het gebied van de volksgezondheid stoen allemaal op simulaties.

Mijn werk als kosmoloog houdt in dat ik het hele universum simuleer op computers. Het doel is te begrijpen wat er in de ruimte is, waar het vandaan komt, en hoe het verband houdt met ons leven hier op aarde. We gebruiken de computer zo ongeveer als een laboratorium. Kosmologen kunnen geen traditionele experimenten uitvoeren zoals andere wetenschappers: er is geen manier om het heelal in zijn geheel te manipuleren, en zelfs als dat wel kon, zouden we een periode op een kosmische tijdschaal – miljarden jaren – moeten wachten op de resultaten. Simulaties bieden ons een gecomputeerd universum waarin we ruimte en tijd kunnen beheersen.

Vanwege de mogelijkheid om virtuele werelden vorm te geven ben ik een enthousiast gebruiker van computers geworden, maar mijn leven is tegenwoordig niet meer een kwestie van alleen in een donkere kamer zitten en op een toetsenbord tikken. Ik werk samen met tientallen collega's hier in Londen en over de hele wereld. We publiceren onze resultaten in tijdschriften die honderden anderen bereiken. De hele onderneming steunt op het cumulatieve werk van duizenden, waarbij gebruik wordt gemaakt van krachtige computers die grote geklimatiseerde vertrekken vullen.

Er is nog een verschil tussen mijn huidige werk en SatOrb: de baan van een ruimtevaartuig om een planeet kan worden berekend met pen en papier. Handmatige berekeningen zijn misschien vervelend en foutgevoelig, maar een afgestudeerd natuurkundige kan met enige volharding alles tot stand brengen wat SatOrb doet, en geen enkel resultaat dat SatOrb produceert zal dan een verrassing zijn. SatOrb onthult beslist geen nieuwe waarheden over de werkelijkheid waarin we leven. Als we daarentegen het universum als geheel proberen

te simuleren, komen we echt iets nieuws te weten, omdat de resultaten geregeld elke verwachting tarten.

Waarom dat zo is, ga ik in de loop van dit boek duidelijk maken. Het gaat niet alleen om de absurde fysieke omvang van het heelal, hoewel dat zeker de moeite waard is om even bij stil te staan. Het is al moeilijk genoeg om je voor te stellen dat de aarde bijna 13 000 kilometer in doorsnee is, laat staan om je voor te stellen hoe groot de zon is, waarin onze planeet 1,3 miljoen keer zou passen. De zon is slechts een van de honderden miljarden sterren in ons eigen sterrenstelsel, de Melkweg, dat op zijn beurt weer deel uitmaakt van de honderden miljarden sterrenstelsels in verschillende vormen, maten en kleuren, die allemaal zijn gerangschikt in een uitgestrekt patroon dat bekendstaat als het kosmisch web. Simulaties laten zien hoe deze verschillende structuren, ondanks hun buitensporige schaal, allemaal een rol hebben gespeeld in onze eigen oorsprong: ik zal laten zien dat de op koolstof gebaseerde levensvormen op een kleine rotsachtige planeet niet hadden kunnen ontstaan zonder deze gigantische ondersteunende structuren. Het is verbijsterend. Ik denk niet dat we dit ooit echt kunnen vatten.

Maar het heelal is niet alleen enorm groot, het is ook enorm complex. Simulaties zijn het waardevolst wanneer ze een caleidoscoop van miljarden individuele sterren, zwarte gaten, gaswolken en stofdeeltjes volgen. Het kan buitengewoon moeilijk zijn om het collectieve gedrag van zo'n groot aantal elementen bij elkaar te voorzien. Het volgt niet gemakkelijk uit de natuurkundige eigenschappen van de afzonderlijke componenten.

Een indruk van dit grote verschil tussen individueel en collectief gedrag kun je krijgen door sociale insecten hier op aarde te bestuderen. Trekmieren zwermen bijvoorbeeld uit om kolonies kleinere insecten op te sporen, die ze dan verslinden. Tijdens dit uitzwermen leveren ze buitengewone

prestaties van samenwerking, waarbij ze hun lichamen gebruiken om het terrein glad te strijken, of zelfs om bruggen over oneffen terrein te bouwen. En toch is er geen individuele mier die een route naar het voedsel uitstippelt, een blauwdruk voor een brug tekent of verordonneert waar kuilen moeten worden opgevuld. Er is geen organiserend principe, en toch ontstaan er georganiseerde structuren; deze structuren zijn moeilijk te voorzien door een afzonderlijke mier te bestuderen.

Dit kan in eerste instantie contra-intuïtief aandoen, omdat menselijke sociale organisaties zo sterk berusten op hiërarchie en planvorming. Voor menselijke ogen doet het collectieve gedrag van de trekmiëren vermoeden dat een leidinggevende binnen de kolonie strategieën formuleert om prooien efficiënt te bereiken. Maar zo'n individu is er niet. Er zijn gewoon afzonderlijke miëren die eenvoudige onveranderlijke regels volgen, zoals tot een miërenbrug toetreden als er veel individuen achter hem kruipen en de brugstructuur verlaten als er geen andere overheen kruipen.<sup>2</sup> De verfijning komt voort uit het grote aantal individuen dat deze regels volgt.<sup>3</sup>

Inzicht in de wijze waarop een coherent, georganiseerd heelal ontstaat uit een gewoel van sterren, gas en stof is een van de centrale doelstellingen in de kosmologie. We bouwen computersimulaties op basis van de natuurwetten – zwaartekracht, deeltjesfysica, licht, straling en nog zo wat – om voorspellingen te krijgen die kunnen worden getoetst aan waarnemingen van de nachtelijke hemel. Omdat computers nauwkeurig en snel rekenen, kunnen ze herhaaldelijk eenvoudige regels toepassen op miljoenen of miljarden subelementen, en zo voor ons onthullen hoe een vaste set regels aanleiding kan geven tot nieuw en verrassend collectief gedrag.

Met simulaties kunnen we ons een beeld vormen van het

grote geheel, waarin het universum de kleinschalige wetten overstijgt. Aan het eind van dit boek zul je hebben gezien hoe radicaal dat beeld is, dat een beschrijving vormt van een ingewikkeld kosmisch ecosysteem waarvan ons eigen bestaan afhankelijk is.

## Het ambacht van een simulatie

Om het universum in een computer te vangen is een zekere mate van brutaliteit nodig. De moeilijkheden zijn inherent aan het doel: het is fundamenteel moeilijk te begrijpen hoe een groot aantal kleine invloeden samen een algemene uitkomst bepalen. Als de simulatie een van de invloeden verkeerd weergeeft, al is het maar een klein beetje, kan de conclusie gemakkelijk volkomen fout zijn. De kunst van een simulatie ligt in het zo nauwkeurig mogelijk karakteriseren van de afzonderlijke elementen, terwijl je oog hebt voor de resterende tekortkomingen, zodat de conclusies met de nodige voorzichtigheid kunnen worden geformuleerd.

Deze grillen kunnen verrassend zijn. Het universum volgt een strakke, onbetwistbare set wetten, zo krijgen we althans op school te horen, en het is in principe waar dat je een virtueel universum kunt construeren door een rechtstreeks beroep te doen op de als een raderwerk functionerende natuurwetten die nauwkeurig en uitgebreid zijn geverifieerd. Deze aanpak lijkt weinig ruimte te laten voor fouten. De wetten zijn een geformaliseerde verzameling van kennis en verwachtingen, die zijn geschreven in de precieze taal van de wiskunde – perfect om te vertalen naar computercode. Maar niet alles is wat het lijkt.

Denk maar eens aan het weerbericht. De presentatoren die je vertellen wat je morgen kunt verwachten, baseren hun verwachtingen op simulaties van de atmosfeer rond de aarde,

waarbij alle ontelbare kleine invloeden op wind, wolken en regen worden gecombineerd om een voorspelling voor de toekomst op te stellen. Maar de wind, wolken en regen figureren niet rechtstreeks binnen de wetten van de natuurkunde, die zijn geschreven met betrekking tot individuele atomen of moleculen. Het weer ontstaat uit de gecombineerde effecten van de  $10^{44}$  moleculen in de aardatmosfeer, en een simulatie zou kennelijk op de hoogte moeten zijn van de plaats en de beweging van elk daarvan.

Dat is onmogelijk. De opslagcapaciteit van elke computer is eindig, en kan worden gemeten in bits, de kleinst mogelijke eenheden van opslag, overeenkomend met schakelaars die aan of uit kunnen staan. Op zichzelf bevat een enkele bit niet veel informatie, maar je kunt alles opslaan als je er genoeg van hebt. Zwart-witafbeeldingen kunnen bijvoorbeeld worden weergegeven door bits op een raster: ingeschakeld kan een bit een zwarte stip voorstellen, en uitgeschakeld een lege cel. Cijfers, letters, kleuren, geluiden, video's, Facebook-vriendschappen: ze kunnen allemaal worden opgeslagen als reeksen bits, en hoe meer bits je hebt, hoe uitgebreider je beschrijving kan zijn. Een ZX Spectrum had bijna 400 000 bits geheugen; de laptop waarop ik zit te typen heeft 100 miljard bits; sommige supercomputers hebben er meer dan 10 000 biljoen.

Dit is nog lang niet genoeg om simulaties van de aardatmosfeer op moleculair niveau mogelijk te maken. Als je zelfs maar één bit informatie per molecule wilt opslaan, moet je de huidige opslagcapaciteit van de rekencentra in de wereld al met een factor  $10^{21}$  vergroten.<sup>4</sup>

Een weersvoorspelling kan dus niet worden opgesteld op basis van atomen en moleculen, en een simulatie die ons informatie verschaft over hele sterrenstelsels zal deze fundamentele bestanddelen zeker ook niet kunnen volgen. Om in computers te passen moet een beschrijving van het weer, van een sterrenstelsel of van het hele universum enorme aantal-



len moleculen op een hoop gooien en beschrijven hoe deze en masse bewegen, tegen elkaar duwen, energie transporteren, reageren op licht en straling, enzovoort. En dat alles gebeurt dan zonder expliciete verwijzing naar de ontelbare afzonderlijke eenheden daarbinnen.

Als het doel is om de werkelijkheid met behulp van computers na te bootsen, zijn de beschikbare middelen lachwekkend ontoereikend; de beperkingen van wat in de praktijk kan worden bereikt zijn vaak overduidelijk. En toch is de kosmologische simulatie in de afgelopen vijftig jaar, met een gestage verbetering in de technologie, door een groeiende gemeenschap van astrofysici werkbaar gemaakt met behulp van listige natuurkundige sluiproutes en trucs.

Ik zal hier laten zien hoe deze trucs zijn uitgevonden – soms door het harde werk van eenzame promovendi die vochten voor de erkenning van hun ideeën, soms door hele laboratoria die zich verenigden om moeilijke problemen op te lossen, en in sommige gevallen als het resultaat van nationale onderzoeksprioriteiten die op het hoogste regeringsniveau waren vastgesteld. Sommige daaruit voortvloeiende sluiproutes zijn goed onderbouwd, terwijl andere meer weg hebben van een lukraak probeersel. Daarom kan niet alles in een gesimuleerd universum voetstoots als waar worden aangenomen.

Dit probleem is overigens niet uniek voor de kosmologie. De mensheid vertrouwt steeds meer op simulaties, modellen en algoritmen, waarbij de scheidslijnen tussen deze categorieën vaag zijn. Ik denk meestal aan algoritmen als regels voor een te ondernemen actie: bijvoorbeeld hoe een automatische piloot de koers van een vliegtuig corrigeert, hoe een website in de sociale media beslist welke berichten worden getoond, of hoe een satellietnavigatiesysteem berekent welke route je moet volgen. In gevallen waarin deze beslissingen niet helemaal rechtlijnig zijn, moet er een onderliggend model

zijn – een beschrijving van relevante verschijnselen, zoals de dynamiek van het vliegen, de menselijke concentratieduur of de toekomstige verkeersstroom. En als een model grote aantallen verschillende elementen omvat die op elkaar inwerken, kan dit het best worden gekarakteriseerd als een simulatie.

Een goed voorbeeld van de dunne scheidslijn tussen algoritme, model en simulatie is de financiële handel, waar inspiratie uit de natuurkunde een grote rol speelde bij de economische crash van 2008.<sup>5</sup> Het doel van financiële modellering is het voorspellen van de toekomstige beweging van aandelen op de markt, uitgaande van alle beschikbare informatie uit de reële wereld. Zulke voorspellingen kunnen onmogelijk heel gedetailleerd zijn, maar in het begin van de eenentwintigste eeuw werden de hedgefondsen verliefd op theoretisch natuurkundigen en hun vermogen om gefundeerde gissingen over de toekomst te doen. Met een paar eenvoudige aannames over hoe afzonderlijke aandelen in de loop der tijd van waarde veranderen, bouwden zogeheten ‘kwantitatief analisten’ simulaties van de marktbevingen die zich op de lange termijn voordoen.<sup>6</sup> Op basis van de resulterende voorspellingen begonnen fondsbeheerders speculatieve inzetten te doen.

Maar modellen en simulaties zijn geen nabootsing van de werkelijkheid, en zijn daarom slechts zo goed als de vereenvoudigde aannames waarop ze berusten. Wanneer de markten een beetje zenuwachtig heen en weer gaan, raken individuele handelaren al snel in paniek en gaan ze elke beslissing in twijfel trekken. Het is erg moeilijk om regels op te stellen voor hoe aandelen zich in deze omstandigheden gedragen, en speculatieve inzetten kunnen volkomen verkeerd uitpakken. Fondsbeheerders die zonder de juiste omzichtigheid en veel te zelfverzekerd blindelings inzetten op de voorspellingen van de modellen of simulaties, zagen hun fortuin zeer snel keren.