

verschenen in Radix: <https://forumc.nl/radix/>

THEMA

Blik op oneindig: het grote verhaal van de natuurkunde

Carlo Beenakker

*To see a world in a grain of sand
and a heaven in a wild flower.
Hold infinity in the palm of your hand
and eternity in an hour.*

1. Inleiding

Deze verzen van de Engelse dichter William Blake (1757–1827) drukken de missie uit van de natuurkundige: concepten zoals wereld en hemel, oneindigheid en eeuwigheid, zijn zo groot dat we ze alleen via het kleine kunnen benaderen.

Het is wonderlijk dat dit kan. Er is een boek dat *The first three minutes* heet. Daarin beschrijft de natuurkundige Steven Weinberg de eerste drie minuten ná de oerknal, met details zoals de 3:1-verhouding tussen waterstof- en heliummoleculen. Dat we iets nauwkeurig en betrouwbaars kunnen zeggen over een gebeurtenis die 13,7 miljard jaar geleden plaatsvond is mogelijk, omdat de natuurwetten altijd en overal hetzelfde zijn.

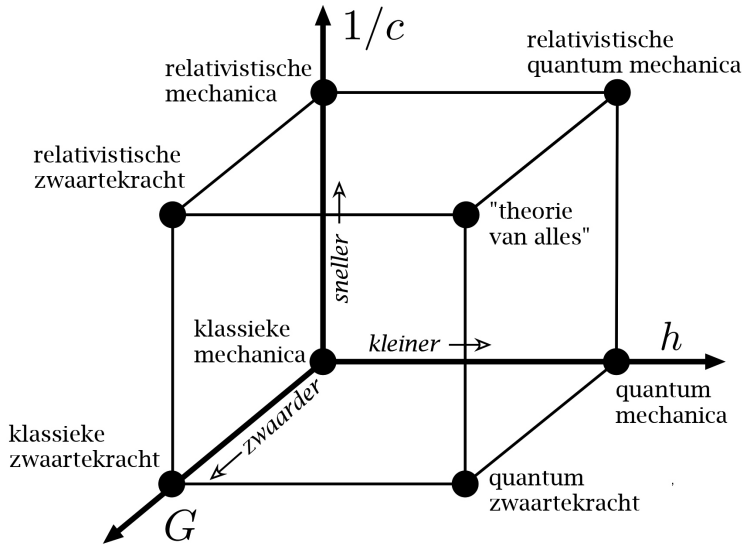
Zo is het 'grote verhaal' van de natuurkunde: een zoektocht naar het oneindig grote, oneindig kleine, oneindig snelle, geïnformeerd door alledaagse ervaringen. Er is een parallel met de zoektocht van de mens naar een goddelijke werkelijkheid, daar kan ik later op terugkomen. Nu eerst de natuurkunde.

2. Streef naar limieten

Voor de natuurkundige is de zoektocht naar het oneindige een streven naar limieten: hoe gedraagt de natuur zich in de limiet dat de massa van een voorwerp oneindig groot wordt, of de snelheid, of als de afmetingen oneindig klein worden? De verschillende limieten hangen met elkaar samen. Een manier om dit te illustreren staat bekend als de Bronsteinkubus van limieten.

Matvei Bronstein (1906–1938) was een theoretisch natuurkundige die het slachtoffer werd van de grootschalige campagne van vervolgingen in de Sovjet-Unie onder Stalin. Hij ontwierp een visuele gids in de vorm van een kubus (figuur 1) om de relaties te illustreren tussen verschillende fundamentele fysische beschrijvingen.

De kubus ligt langs drie assen, die elk een andere fysische limiet vertegenwoordigen:



Figuur 1. De Bronsteinkubus van limieten.

De eerste as vertegenwoordigt de overgang van klassieke mechanica naar quantummechanica, als een voorwerp zo klein wordt dat diens golflengte een rol gaat spelen. Omdat de golflengte evenredig is met de constante van Planck h , is deze constante langs de eerste as uitgezet.

De tweede as vertegenwoordigt de snelheid van het voorwerp ten opzichte van de lichtsnelheid c . Als voorwerpen zich voortbewegen met snelheden die de lichtsnelheid naderen, dan gaat de klassieke mechanica over in de relativistische mechanica.¹

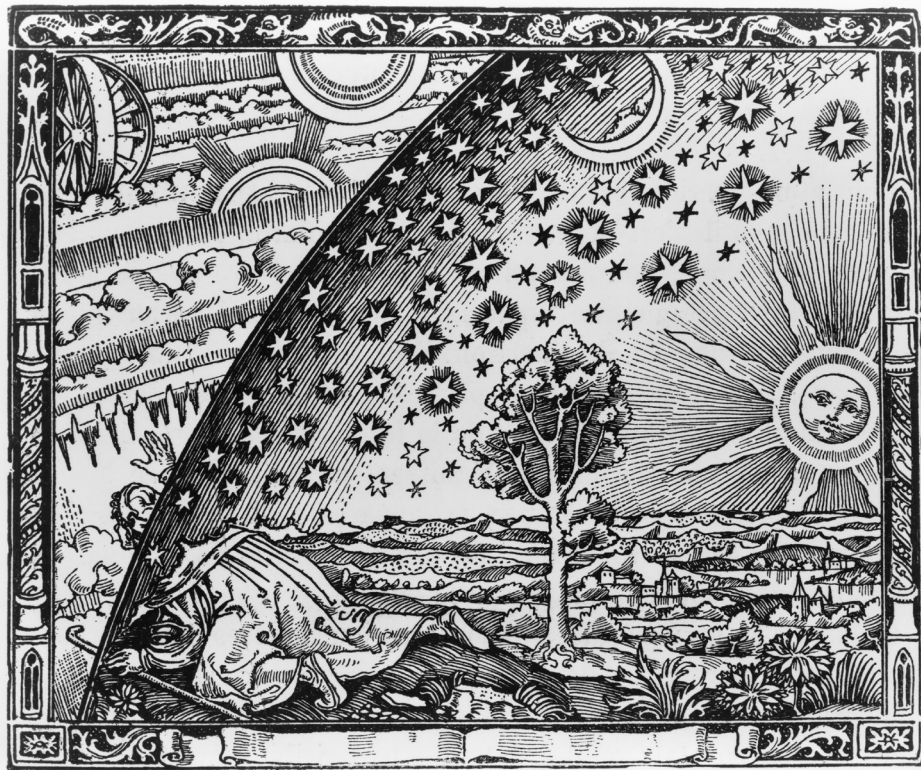
De derde as geeft de sterkte van de zwaartekracht aan, gekwantificeerd door de zwaartekrachtsconstante G . De zwaartekracht is de zwakste van alle bekende krachten; om die aantrekkingskracht te voelen heb je de massa nodig van een ster of een planeet.

De zoektocht naar zo'n 'theorie van alles' is een verhaallijn die natuurkundigen al meer dan een eeuw bezighoudt

De zoektocht begint in de oorsprong, het snijpunt van de drie assen. Dit is het domein van de klassieke mechanica, waar objecten groot zijn, snelheden langzaam zijn vergeleken met de lichtsnelheid en de effecten van de zwaartekracht te verwaarlozen zijn. Het verst weg liggende hoekpunt beschrijft voorwerpen met de grootste massa, de kleinste afmeting en de hoogste snelheid. Denk aan een zwart gat, waarin de massa van de zon is samengeperst tot een tennisbal die met tienduizend km/s door het heelal raast.

Wat we op dit moment weten is hoe we de relativistische mechanica kunnen verenigen

¹ In de figuur is langs de tweede as $1/c$ uitgezet, in plaats van c , omdat de relativistische limiet bereikt wordt als c klein is, en dus $1/c$ groot.



Figuur 2. Houtgravure van C. Flammarion, 1880 (bron: Wikimedia).

met de quantummechanica en met de klassieke zwaartekracht afzonderlijk – maar niet met beide tegelijk. De zoektocht naar zo'n 'theorie van alles', het verste hoekpunt van de Bronstein-kubus, is een verhaallijn die natuurkundigen al meer dan een eeuw bezighoudt.

3. Het oneindige is bereikbaar

Het was Isaac Newton die zich in de zeventiende eeuw als eerste realiseerde dat de beweging van een vallend voorwerp hier op aarde (hij sprak over een 'vallende appel') op dezelfde manier beschreven kan worden als de beweging van hemellichamen. Zijn zwaartekrachtwet maakte het mogelijk om te voorspellen dat de komeet die in 1682 was waargenomen in 1758 opnieuw zou verschijnen. Een triomf, de eerste stap langs de G -as van de Bronstein kubus.

De sprong van een vallende appel naar een komeet is groot, en er zouden nog veel grotere sprongen volgen. Door de zwaartekrachtwet los te laten op de beweging van de zon kon Vera Rubin in 1970 onze hele Melkweg wegen, met een raadselachtig resultaat: slechts vijf procent van het gewicht van de Melkweg is zichtbaar, de overige vijftien procent is 'donkere materie'. We hebben nog steeds geen idee waar het onzichtbare gewicht vandaan komt; is het een nog onbekend deeltje dat de hele ruimte vult?

De mensheid heeft duizenden jaren naar de Melkweg opgekeken als iets buitenwerlds, onbereikbaar, oneindig ver ons verwijderd. De moderne mens lijkt op de persoon uit een be-

kende houtgravure (figuur 2): met de voeten in klei steekt het hoofd door het hemelgewelf. Het oneindige is bereikbaar geworden door de natuurwetten die we om ons heen waarnemen toe te passen op voorwerpen die onvoorstelbaar ver weg zijn (afstanden tot 10^{23} km, een 1 gevolgd door 23 nullen).

4. Vorm je verbeelding

Het gedicht van Blake gaat over verbeelding, “*zie een wereld in een korrel zand*”. Verbeelding staat centraal in de tocht langs de h -as van de Bronsteinkubus, richting de limiet van het alerkleinste, atomen en moleculen, de bouwstenen van de materie. Ze zijn onzichtbaar, maar hun bestaan valt af te leiden uit alledaagse waarnemingen. Zo wist Jean Perrin in het begin van de twintigste eeuw de afmeting van een molecuul af te leiden uit de willekeurige beweging van pollen in water. Zijn schatting van 1/miljoenste millimeter is betrouwbaar gebleken.

De ultieme limiet langs de h -as komt uit bij het elektron, een puntdeeltje, afmeting nul.² Hier schiet de klassieke verbeelding te kort: Hendrik Lorentz, die in 1896 de massa van het elektron had berekend, kon niet met een puntdeeltje overweg. Het is paradoxaal: hoe kan een deeltje dat geen afmeting heeft wel een massa hebben? Een volgende generatie natuurkundigen heeft de overstap gemaakt naar de ‘quantumverbeelding’: Door aan een deeltje ook de eigenschappen van een golf toe te kennen, kunnen we het elektron een golflengte³ geven die klein is (typisch 1/miljoenste mm) – maar niet nul. Zo lost de paradox op: het elektron is een puntdeeltje omdat het ondeelbaar is, maar als golf heeft het toch een zekere uitgestrektheid.

De mensheid heeft
duizenden jaren naar de
Melkweg opgekeken als iets
buitenwerlds, onbereikbaar,
oneindig ver ons verwijderd

Het is bijzonder dat wij dit kunnen, ons een deeltje voorstellen dat tegelijkertijd een golf is. Onze verbeelding is niet beperkt tot de dingen die we waarnemen, we kunnen sprongen maken naar werelden die we nooit zullen binnentreden. Komend jaar vieren we het eeuwfeest van de quantumverbeelding. In honderd jaar is quantum zo ‘gewoon’ geworden dat het nu onderwerp is van natuurkunde op de middelbare school.

Belangrijk hulpmiddel voor het vormen van de quantumverbeelding is de wiskunde, bij uitstek een gereedschap om voorbij het voorstelbare te gaan. Dit weten we al lang: in de zestiende eeuw werden imaginaire getallen geïntroduceerd, denkbeeldige getallen zoals de wortel uit min één. De wiskunde geeft houvast om met het onvoorstelbare om te gaan, en zo hebben we ook geleerd hoe we om moeten gaan met deeltjes die tegelijkertijd golven zijn.

² Atomen zijn opgebouwd uit elektronen, protonen en neutronen. Het elektron is een puntdeeltje (afmeting nul), een proton of neutron is geen puntdeeltje (afmeting ongeveer 10^{-15} meter). Buiten het atoom komen meer soorten puntdeeltjes voor, zoals een neutrino of een muon.

³ De formule voor de golflengte is constante van Planck h gedeeld door het product van massa en snelheid.

5. Waag de sprong

Verbeelding kan ons tot radicale conclusies brengen, conclusies die het wereldbeeld op z'n kop zetten – als je de sprong in het onbekende aandurft. De tocht lang de c -as van grotere en grotere snelheid bracht natuurkundigen rond 1900 tot zo'n sprongpunt. Albert Einstein, de grondlegger van de relativiteitstheorie, gebruikte gedachte-experimenten om zijn verbeelding te vormen. Hij stelde zich een rijdende trein en een klok voor om tot het revolutionaire inzicht te komen dat 'tijd' een relatief begrip is. Omdat licht zich voor iedere waarnemer met dezelfde snelheid van $c=299.792.458$ m/s voortplant, zou een persoon op het perron zien dat een klok in de passerende trein langzamer tikt dan op het perron. De tijd verstrijkt langzamer in de trein dan op het perron, een passagier in de rijdende trein verouderd minder snel dan de persoon op het perron.

De formules die deze tijdvertraging beschrijven waren al eerder opgedoken. De vertragingfactor heet de "Lorentzfactor", maar niemand had het aangedurfd om hieruit te concluderen dat het begrip tijd zelf moest worden aangepakt. Lorentz zelf hield vast aan de 'ware tijd'

en beschouwde de vertragingfactor als een wiskundig hulpmiddel. Einstein durfde de sprong aan.

Heel veel 'waarom'-vragen hebben we kunnen beantwoorden, maar we moeten er rekening mee houden dat er zoiets bestaat als meta-fysica

Later gebruikte Einstein opnieuw een gedachte-experiment, een optrekkende lift, om op het idee te komen van de equivalentie van zwaartekracht en versnelling. Je wordt neergedrukt in de lift, *alsof* je zwaarder bent geworden. De gedachtesprong: laat dat 'alsof' maar weg, er

is geen verschil tussen zwaartekracht en versnelling. Hierop doorredenerend volgt dat ook de zwaartekracht een vertragend effect heeft op het verstrijken van de tijd. In een zwart gat staat de tijd stil.⁴

6. Het hele verhaal is groter

Het grote verhaal in de natuurkunde wordt wel beschreven als de zoektocht naar de 'theorie van alles'. De achterliggende gedachte is dat het kennen van de natuurkundige wetten op het meest fundamentele niveau voldoende is om het universum te begrijpen.

De fysicus Philip Anderson pleitte tegen deze reductionistische opvatting dat het gedrag van complexe systemen volledig begrepen kan worden door ze op te splitsen in hun elementaire onderdelen. In plaats daarvan benadrukte hij het belang van *emergente* verschijnselen, waarbij nieuwe en onverwachte eigenschappen ontstaan op hogere niveaus van organisatorische complexiteit. Supergeleiding is een voorbeeld: het wegvalen van de elektrische weer-

⁴ Het stilstaan van de tijd in een zwart gat wordt waargenomen door iemand die zich buiten het zwarte gat bevindt en veronderstelt dat het zwarte gat oneindig lang kan bestaan. Dat is vermoedelijk niet helemaal juist, maar de levensduur van een zwart gat is zeer veel groter dan de ouderdom van het heelal.

stand bij lage temperaturen is niet direct af te leiden uit de eigenschappen van het elektron. Elke laag van complexiteit heeft zijn eigen set regels en gedragingen. Naarmate we hoger in de hiërarchie belanden, komen we kwalitatieve verschillen tegen die nieuwe theoretische kaders en verklaringen vereisen.

Er kunnen ook principiële obstakels zijn die in de weg staan van een volledige fysische beschrijving van het universum. In de wiskunde zijn we er sinds het werk van Kurt Gödel mee vertrouwd geraakt dat er onbeslisbare vragen zijn: een consistent wiskundig raamwerk dat elke vraag met 'ja' of 'nee' kan beantwoorden bestaat niet; er zullen stellingen overblijven die wáár zijn maar onbewijsbaar.

Ook de natuurkunde zou vragen kunnen hebben waar geen antwoord op mogelijk is. Bijvoorbeeld: waarom hebben de natuurconstanten c , h en G de waarden die we meten? Of, waarom zijn er drie ruimte-dimensies en één tijd-dimensie? Heel veel 'waarom'-vragen hebben we kunnen beantwoorden, maar we moeten er rekening mee houden dat er zoiets bestaat als meta-fysica: een werkelijkheid die zich aan natuurkundige principes onttrekt.

Voor mij persoonlijk, als natuurkundige en christen, staat de fysische zoektocht naar het 'grote verhaal' niet los van mijn meta-fysische zoektocht naar een goddelijke werkelijkheid. Ik vind het geruststellend dat veel van de zoekprincipes tussen de natuurkunde en het christelijk geloof overeenkomen. Als natuurkundige en als christen ben ik op zoek naar het oneindige, uitgaande van de alledaagse werkelijkheid. Dat het oneindige bereikbaar is, verwoordde Augustinus van Hippo als "*homo capax Dei*": de eindige mens is in staat om de oneindige God te kennen. Deze zoektocht vraagt verbeelding, vorming van je intuïtie, en uiteindelijk: waag je de sprong?

Dr. C.W.J. (Carlo) Beenakker is als hoogleraar werkzaam op het Instituut-Lorentz voor theoretische natuurkunde van de Universiteit Leiden. E carlo@beenakker.com