

FEDDE BENEDICTUS

**OP ZOEK NAAR DE GRENZEN
VAN DE NATUURKUNDE**

Met een woord vooraf van Gerard 't Hooft

2020 Prometheus Amsterdam

© 2020 Fedde Benedictus
Omslagontwerp Jan van Zomeren
Foto auteur Marco Bakker
Illustraties Senne Trip
Zetwerk Elgraphic
www.uitgeverijprometheus.nl
ISBN 978 90 446 4220 9

1

NEWTON

Volgens de overlevering werd Isaac Newton (1642-1727) als jongeman door een appel die op zijn hoofd viel geïnspireerd tot het bedenken van de wet van de *universele zwaartekracht*.

Je hoeft geen historicus te zijn om je te realiseren dat je verhalen als over Newton en de vallende appel met een korreltje zout moet nemen, net als veel andere anekdotes uit de wetenschapsgeschiedenis. Vaak zijn de verhalen pas lange tijd na dato opgeschreven, en lijken ze vooral te zijn bedoeld om de wetenschapsgeschiedenis wat smeuïger te maken.

Denk bijvoorbeeld aan Archimedes, die zijn bad uit sprong en naakt door de straten van Syracuse rende terwijl hij 'eureka!' ('ik heb het gevonden') riep. Of aan Galileï, die het waagde 'en toch draait zij' te zeggen na een verhoor door de gevreesde en wrede inquisitie. Galileï ging daarmee in tegen de leer van de kerk, die stelde dat we uit de Bijbel kunnen opmaken dat de zon om een stilstaande aarde draait. Deze verhalen zijn pas eeuwen na de dood van Archimedes en Galileï opgeschreven,¹ dus de werkelijke gebeurtenissen zouden wel eens een stuk minder spannend geweest kunnen zijn dan de verhalen doen vermoeden.

Voor het verhaal over Newton en de appel ligt dat iets anders. Newtons tijdgenoot William Stukeley beschreef hoe hij de toen al 83-jarige Newton interviewde, terwijl ze op diens landgoed theedronken.² Daar vertelde Newton hoe ooit een vallende appel (en het feit dat de appel recht naar beneden viel) hem op het idee bracht dat er een universele aantrekkingskracht bestaat. We zijn er natuurlijk niet zeker van dat Newton echt door die appel op dit idee is gekomen, maar het was tenminste Newton zelf die kwam met de anekdote over de appel.

In dit hoofdstuk maken we kennis met de ideeën van Newton, en dan voornamelijk uit zijn hoofdwerk *De wiskundige beginselen van de natuurfilosofie* (voor het eerst gepubliceerd in 1687).³ Zijn ideeën over krachten en de beweging van objecten zijn onlosmakelijk verbonden met het idee van *relativiteit*, maar we zullen zien dat die relativiteit anders is dan de relativiteit van Einstein.

Relativiteitstheorieën

Wie denkt aan relativiteit, denkt aan Einstein. Dat is niet zo gek, want de relativiteitstheorie wordt vaak ‘Einsteins relativiteitstheorie’ genoemd. Aan de andere kant suggereert de term ‘Einsteins relativiteitstheorie’ meteen dat er ook een andere relativiteitstheorie denkbaar is dan die van Einstein. Ook dat is niet zo gek, en ik zal laten zien waarom.

De relativiteitstheorie beschrijft dingen ten opzichte van elkaar. Met andere woorden, de theorie beschrijft dingen relatief. Wat dat precies betekent is het gemakkelijkst in te zien als we spreken over snelheden. Wat we meten is niet de snelheid van een object als iets wat op zichzelf staat (een *absolute* grootheid), maar we hebben het altijd over de snel-

heid van het ene object ten opzichte van een ander object. We zullen er later achter komen wat absolute snelheid precies is; wat hier belangrijk is, is dat een meetbare snelheid altijd een relatieve snelheid is: meetbare snelheid is altijd een *relatieve* grootheid.

Neem een auto op de snelweg. Als we bijvoorbeeld zeggen dat deze met 100 kilometer per uur rijdt, bedoelen we dat de auto een snelheid van 100 kilometer per uur heeft *ten opzichte van de snelweg*. De snelheden waarover we spreken zijn altijd relatieve snelheden. Dat geldt niet alleen voor snelheden, maar voor alle meetbare grootheden. Een ander duidelijk voorbeeld is een gewicht in een weegschaal: 'het gewicht weegt een kilo' krijgt pas betekenis als je weet wat een kilo is (ongeveer een liter melk). Je moet het gewicht vergelijken met een ander gewicht, het gewicht dat je meet is een relatieve grootheid.

Als we een natuurkundige theorie willen die toetsbaar is (een theorie die voorspellingen doet over wat we zullen meten als we een experiment uitvoeren), dan komen we vanzelf uit op een theorie die je een 'relativiteitstheorie' zou kunnen noemen, omdat de theorie zo veel mogelijk over meetbare (en dus relatieve) grootheden gaat. Kortom: alles lijkt relatief.

De relativiteitstheorie?

Als iedere wetenschappelijke theorie uiteindelijk een soort relativiteitstheorie is, waarom heet Einsteins theorie dan 'de' relativiteitstheorie?

Dat komt doordat het begrip relativiteit een heel bijzondere rol speelt in de theorie van Einstein. Hij nam relativiteit als postulaat: hij stelde dat dezelfde natuurkundige wetten voor iedereen zouden moeten gelden (we komen daar later



3. Is de verboden vrucht, waarvan Eva at in het paradijs, de appel die Newton zag vallen?

nog op terug). Om te kunnen weten of de wetten inderdaad hetzelfde zijn voor iedereen, moet de theorie alleen gaan over meetbare, relatieve grootheden. Relativiteit is in Einsteins theorie dus niet een resultaat, maar een beginsel.

In de volgende paragraaf zullen we zien dat de bewegingswetten van Newton, ook al gebruikte deze de term ‘relativiteit’ niet, bedoeld waren om de relativiteit van zijn tijdgenoot Galileï vast te leggen. Laten we daarom eerst kijken naar de relativiteit van Galileï. De discussie op de volgende bladzijden is nogal abstract, maar ze is erg belangrijk voor ons verhaal. Zonder precies te weten wat de relativiteit van Galileï inhoudt, is het niet duidelijk waarom Newton met juist die wetten kwam waarmee hij kwam. Maar er is nog een reden waarom de relativiteit van Galileï zo belangrijk is: zonder de relativiteit van Galileï is Einsteins relativiteitstheorie niet te begrijpen.

Dierenartsen als waarnemers

Toen ik klein was, ging het aan de eettafel vaak over een 'waarnemer'. Mijn ouders hadden het dan niet over Galileï of Einstein, maar over een collega-dierenarts die eventueel tijdelijk de dierenartsenpraktijk zou kunnen overnemen als wij met z'n allen op vakantie gingen. Het was wel even wennen toen ze op school in de natuurkundeles ook vaak het woord 'waarnemer' gebruikten, maar dan als benaming van iemand die een (experimentele) observatie doet. Als Newton of Einstein het over een waarnemer heeft, dan hoeft dat niet eens per se een persoon te zijn. Een meetapparaat of computer kan ook best een waarnemer zijn.

Waarom is relativiteit belangrijk?

Newton was op zoek naar wetten waarmee de beweging van alles om ons heen beschreven kan worden, van bladeren die door de wind worden meegevoerd tot planeten die om de zon bewegen. De wetten zouden een beschrijving moeten zijn van alle krachten die op alle waargenomen objecten werken. Zulke natuurwetten zijn natuurlijk erg nuttig voor ons, ze vormen niet voor niets de basis van de wetenschappelijke (en later de industriële) revolutie. Maar als die wetten de natuurkunde vooruit moeten helpen, moeten de wetten voor zo veel mogelijk mensen hetzelfde zijn, zodat zij er allemaal dezelfde voorspellingen mee doen.

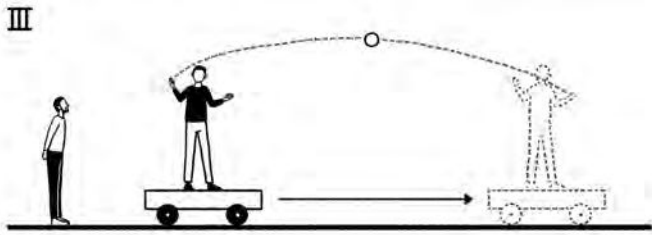
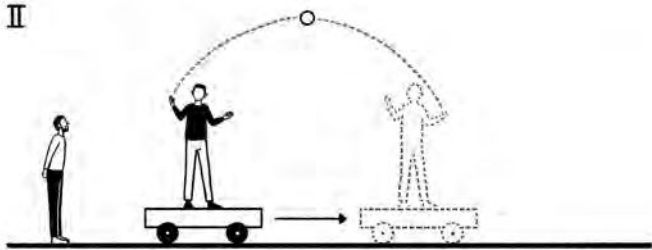
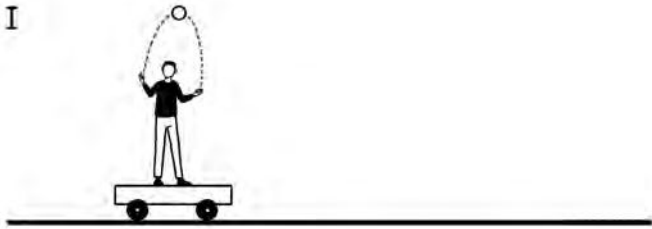
Als natuurkundigen in verschillende laboratoria op verschillende plekken op de wereld hun experimentele uitkomsten met elkaar vergelijken, dan heeft dat alleen maar zin als ze dezelfde natuurwetten gebruiken. Stel je voor dat iemand in China meet dat een appel er een seconde over doet om vijf me-

ter te vallen. Hij stuurt de appel met zijn meetresultaat naar iemand in de vs, zodat het experiment daar kan worden herhaald. Als het resultaat van de meting in China hetzelfde is als dat in de vs, lijkt het duidelijk dat appels in de vs even snel vallen als appels in China. Maar dan moeten de experimentatoren in China en de vs wel dezelfde wetten gebruikt hebben om de val van de appel te beschrijven, anders is het vergelijken van de meetresultaten als het vergelijken van appels met peren.

De vragen voor Newton

Het bedenken van zulke wetten lijkt makkelijk. We doen heel veel waarnemingen en beschrijven wat we zien. Laten we een simpel voorbeeld nemen. Een bal die omhooggegooid wordt, volgt een boog, en hoe groot de boog is hangt af van hoe hard en onder welke hoek de bal gegooid wordt. Als we de bal maar vaak genoeg omhooggooien, en onze waarnemingen zorgvuldig genoeg zijn, komen we er vanzelfachter dat de waargenomen boog de vorm heeft van wat wiskundigen een parabool noemen, zodat we heel precies kunnen beschrijven wat er gebeurt.

Maar dit is niet een erg bruikbare beschrijving, want een waarnemer die ten opzichte van ons beweegt, bijvoorbeeld als hij ons voorbijfietst, ziet de bal een parabool volgen die is uitgerekt of ingekort (zie figuur 4). Zelfs met behulp van onze beschrijving kan hij dus niet voorspellen waar de bal neer zal komen als hij de bal zelf omhoog gooit. Alleen voor waarnemers die stilstaan ten opzichte van ons zal een omhooggegooid bal dezelfde parabool lijken te volgen. Voor een waarnemer die ten opzichte van ons beweegt, is de beschrijving (de precieze vorm van de parabool) dus anders,



4. Hoe beschrijven we een omhooggegooide bal? Waarnemers die ten opzichte van elkaar bewegen zien verschillende dingen (de bal beweegt langs een meer of minder uitgerekte boog). Toch kunnen de waarnemers het eens worden over de bewegingswetten die bewegende objecten lijken te volgen (de relatie tussen de massa en de valversnelling) zolang ze maar met constante snelheid ten opzichte van elkaar bewegen.

maar er is ook een duidelijke overeenkomst: beide waarnemers zien een parabool. De details van de beschrijving zijn weliswaar verschillend, maar er is een wetmatigheid in de beweging van objecten die voor de verschillende waarne-

mers hetzelfde is. Het is precies die wetmatigheid die Newton in zijn wetten probeerde vast te leggen. Voor zijn systeem van wetten wilde Newton daarom deze twee vragen beantwoorden:

- 1) Voor welke waarnemers zijn er wetmatigheden?
- 2) Welke wetmatigheden zijn dat?

Voor zijn antwoord op deze vragen maakte Newton gebruik van een idee van een natuurkundige uit een generatie voor hem: Galileo Galileï. Het was Galileï opgevallen dat in veel situaties, zoals bij het omhooggooien van de bal hierboven, de resultaten van een experiment hetzelfde zijn. Het maakt niet uit wanneer een experiment is uitgevoerd ('s ochtends, 's avonds, drie jaar geleden, of honderd jaar in de toekomst); waar ter wereld het experiment wordt uitgevoerd (in Italië of in Engeland); en het maakt niet uit op welke snelheid je een experiment uitvoert. Alle waarnemers zien verschillende dingen, ze hebben allemaal een eigen perspectief. En toch kunnen ze het allemaal eens worden over de wetten die de beweging van objecten beschrijven.

Dat de plaats en het moment waarop een experiment wordt uitgevoerd niet zo belangrijk zijn voor de bewegingswetten zien we iedere dag. Een pen die van je bureau op de grond valt, valt thuis even snel als op kantoor; dat is volgende week niet anders. Maar 'het maakt niet uit op welke snelheid je een experiment uitvoert' – wat betekent dat?

Het schip van Galileï

Galileï beschreef het volgende voorbeeld⁴: stel dat iemand (een waarnemer) in het ruim van een schip zit en niet naar

buiten kan kijken. De zee golft niet, waardoor het schip niet op en neer deint. De persoon in het ruim ziet vallende objecten recht naar beneden vallen, en rook (van een olielamp) recht omhoogstijgen. Omdat hij niet naar buiten kan kijken, is voor hem niet vast te stellen of hij in een stilliggend schip zit of in een schip dat met een constante (niet-veranderende) snelheid vaart. Objecten in het schip bewegen niet anders wanneer het schip op constante snelheid vaart, dus kan de persoon in het ruim aan de beweging van objecten niet zien of het schip vaart of niet. Of het schip nu stilligt of met constante snelheid voortbeweegt, objecten vallen recht naar beneden en de rook gaat recht omhoog. De wetten die beschrijven hoe objecten bewegen zijn hetzelfde.

Verstorende versnellingen

Waarom hebben we het hier over constante snelheden? Waarom geldt de relativiteit van Galileï niet voor alle snelheden? De reden daarvoor is dat een versnelde beweging een *traagheidskracht* met zich meebrengt.

Waar komt die traagheidskracht vandaan? Laten we het voorbeeld van Galileï iets moderniseren: terwijl je in een cruiseschip over de Nijl vaart, speel je in het ruim van het schip een partijtje tafeltennis. Zolang je niet naar buiten kunt kijken weet je niet of het schip stilligt of een constante snelheid heeft; dat hebben we geleerd van Galileï. Pas als het schip versnelt (of afremt) is dat merkbaar, want dat versnellen brengt een traagheidskracht met zich mee die de normale gang van zaken verstoort. Afhankelijk van de richting waarin je speelt moet je harder of juist minder hard slaan om de bal aan de andere kant van de tafel te krijgen, terwijl het voor alle spelers moeilijker wordt om goed te mikken. Hoe komt dat?