

Martijn van Calmthout

MACH

TIGE

KRACH

TEN



Het onzichtbare cement  
van het universum

New Scientist  
Pocket Science

Van de makers van  
**NewScientist**

# Inhoud

Vooraf 7

1. Duwen en trekken 9
2. De appel 19
3. Deeltjes en velden 35
4. Alledag 53
5. Schijn 65
6. Vermoedens 77

Dankwoord 88

Index 89

Meer lezen? 93



# Vooraf

*Krachten lijken de gewoonste zaak van de wereld. Tot je erover nadenkt. Dan komen de vragen.*

Fietsend tegen de wind in weet iedereen precies wat een kracht is. Iets wat het ons bemoeilijkt om vooruit te komen. Of als we de andere kant op moeten: iets dat helpt om vaart te maken. Kracht, zo leren we uit ervaring, is iets wat een beweging beïnvloedt. Iets dat duwt, of trekt. Naar de grond bijvoorbeeld. Dat noemen we de zwaartekracht, de kracht die we van jongs af aan elke dag voelen. De trap op. Fietsend. Op de weegschaal.

Op school hebben we zelfs geleerd hoe krachten eruitzien: krachten zijn pijlen met een richting en een lengte. Het is nu lastig iets anders te denken.

We zijn zo gewend aan het bestaan van krachten dat het zelfs vervreemdend kan werken als we er wetenschappelijk over proberen na te denken. Dan komen de vragen vanzelf. Waarom is een hangend gewicht even zwaar als een gewicht dat op een weegschaal staat? Hoe trekt de zwaartekracht aan een massa? Waarom valt één kilo even snel als tien kilo? Hoe kan de zon de aarde op afstand in zijn baan houden? Waarom word ik in een draaimolen naar buiten geslingerd?

Kracht is zo dominant in het leven dat het nauwelijks hoeft te verbazen dat de wetenschap zich er al eeuwen mee bezighoudt. Dat heeft zoals vaak geleid tot kennis die veel verder reikt dan onze alledaagse ervaringen. Zwaartekracht blijkt in feite onderdeel van het weefsel van het universum zelf. En in de materie heersen diverse krachten die we nooit zullen kunnen ervaren, maar die toch cruciaal zijn voor ons bestaan. Aan de andere kant heeft de wetenschap veel alledaagse krachterevaringen ontrafeld en ontdaan van elke magie. We weten hoe tegenwind ons hindert. Wat wrijving doet. Waarom stoom een zuiger in beweging zet. En waarom een veer en een hamer in principe even snel vallen, al kunnen we dat pas goed aantonen als we op de maan staan.

In dit boekje maken we een rondgang langs de verschillende domeinen waarin de natuurkunde het verschijnsel kracht indeelt en bestudeert. Van de klassieke denkers en de klassieke mechanica naar de deeltjeswereld. Van effectieve krachten als wrijving, veerkracht en hardheid tot gevoelskrachten zoals we in de draaimolen ervaren. Ten slotte beantwoorden we ook de vraag of er niet nog meer krachten tussen hemel en aarde kunnen zijn dan we nu denken.

Op school rekenen en tekenen we met formules en diagrammen om krachten te doorgronden. Blokjes op hellingen. Gewichten aan touwen. In dit boekje houden we het grotendeels bij tekst en uitleg, om vooral intuïtief wat meer te begrijpen van de krachten die we gemakshalve al denken te kennen. Het tegendeel blijkt geregeld het geval.

Voor wie echt aan de slag wil is er natuurlijk een bibliotheek vol dikkere lees- en leerboeken, waarvan we er tot slot een paar zullen aanbevelen.

*Martijn van Calmthout*  
*voorjaar 2022*

# 1

## Duwen en trekken

*Waarom het zo lang duurde voor we begrepen wat kracht is en doet.*

Rond 350 voor Christus formuleerde de Griekse filosoof Aristoteles bewegingswetten die tweeduizend jaar lang door talloze geleerden zouden worden overgeschreven. Die wetten waren fout. Ze voorspelden niet wat objecten in de echte wereld doen. Pas in de zeventiende eeuw begrepen denkers als Galileo Galilei en Isaac Newton wel hoe objecten bewegen. Drie simpele wetten volstaan daarbij: de wetten van Newton, die we in hoofdstuk 2 zullen bekijken.

Een belangrijke vraag is hoe we het tweeduizend jaar lang zo bij het verkeerde eind konden hebben. De verklaring daarvoor is in één woord te geven: wrijving. Wie wrijving negeert, kan het universum niet echt goed begrijpen.

Wrijving is geen basiskracht van de natuurkunde, maar iets dat optreedt als bewegende objecten langs elkaar schuren. Kleine oneffenheden van het ene object blijven haken achter kleine oneffenheden in het andere object. Het vergt kracht om de objecten over elkaars obstakels heen te trekken of te duwen. Bij ruwe oppervlakken meer dan bij gladde.

Aristoteles en de andere oude Grieken leefden in een wereld vol wrijving. Om iets in beweging te krijgen moesten ze duwen, of trekken. Er was *kracht* nodig om bijvoorbeeld een zware kar met houten wielen over een verharde weg te bewegen. Hoe harder ze duwden, hoe harder de kar vooruitkwam. Maar als ze stopten met duwen, kwam de kar ook weer snel tot stilstand. Aristoteles trok uit zulke ervaringen een logische conclusie: er is een kracht nodig om voorwerpen in beweging te houden. Hij schreef er acht boeken over, die alleen in de overlevering deels bewaard zijn, getiteld *Fysica*.

Het antieke wereldbeeld van Aristoteles komt op ons primitief en simplistisch over. Hij verdeelde het universum in concentrische bollen die hij sferen noemde, zowel voor de aarde (de wereldsferen) als daarbuiten (de hemelsferen). Er waren volgens hem vier elementen waaruit alles op aarde was gemaakt: aarde, water, lucht en vuur. Daarnaast was er nog de ether, een zuiver element waaruit de hemel bestond.

De vier elementen hebben in Aristoteles' universum meteen ook een vanzelfsprekende plaats. Aarde is het zwaarste element en zinkt dus. Daarom bevindt het zich onder al het andere in het centrum van het universum. Het wat lichtere element water blijft vanzelf op de gezonken aarde drijven. Lucht en vooral vuur hebben daarentegen juist de neiging om op te stijgen.

Aristoteles meende, niet als eerste filosoof trouwens, dat zware materialen vooral uit het zware element aarde bestaan. Lichtere stoffen bevatten deels ook andere elementen dan aarde, dacht hij.

Dit alles geeft meteen ook een basis voor de mechanica van de wereld. Wat zwaar is wil naar beneden. De snelheid van een vallend voorwerp zal volgens Aristoteles evenredig zijn met het gewicht van het voorwerp. Twee voorwerpen met een



verschillend gewicht, bijvoorbeeld een ijzeren en een houten bol, zullen met verschillende snelheden vallen. De zwaarste het snelst. Aristoteles baseerde zich bij deze ideeën niet op experimenten, maar op filosofische principes. Dat hij niet helemaal was losgezongen van de werkelijkheid blijkt tegelijk ook uit de rol die hij wel nog ziet voor de dichtheid van het medium waarin een voorwerp valt. Een zwaar voorwerp valt in lucht sneller dan het zinkt in water, weet hij. Niet op basis van experimenten, maar weer filosofisch beredeneerd.

Het zal tot in de zestiende eeuw duren voor andere denkers wel experimenten gaan doen. Zij ontdekken meteen dat de wetten van Aristoteles niet kloppen en dat vallende voorwerpen zich heel anders gedragen. Hoofdpersoon in dat verhaal is de Italiaanse wiskundige en natuurvorser Galileo Galilei (1564–1642). Hij gaat met proeven na of het waar is dat zware voorwerpen echt sneller vallen dan lichte, en komt tot de conclusie dat het tegendeel het geval is: zware voorwerpen vallen even snel als lichte. Daarbij heeft hij overigens nooit de valproeven gedaan vanaf de scheve toren van Pisa die verhalenvertellers graag aan hem toeschrijven. De val van de toren is te snel om eventuele verschillen op te merken. In plaats daarvan gebruikte hij hellende houten goten waarlangs hij kogels omlaag liet rollen. Dat geeft een langere valtijd omlaag en dus meer tijdsverschil als dat er is. Galilei vond geen enkel tijdsverschil. Zware kogels vallen even snel als lichte, stelde hij vast.

Galilei was niet de enige die knaagde aan de inzichten van Aristoteles. In Delft deed de Vlaamse legeringenieur Simon Stevin wel daadwerkelijk valproeven, met hetzelfde resultaat. Wat verderop, in Voorburg, deed Christiaan Huygens in dezelfde periode proeven met loden knikkers op houten hellingbanen. Opnieuw bleek de zwaarte van de kogels de valsnelheid niet te beïnvloeden.

## 6

# Vermoedens

*Hebben we toch nog niet alle krachten in het universum ontdekt? Of zijn alle krachten uiteindelijk juist hetzelfde?*

Het lijkt erop dat we het krachtenspel in het universum inmiddels behoorlijk hebben doorgrond. Er zijn vier fundamentele krachten die de materie en zelfs ruimte en tijd beheersen. Dat zijn de twee kernkrachten, sterk en zwak, en de elektromagnetische wisselwerking, allemaal gedragen door speciale quantumdeeltjes; en de zwaartekracht die massieve objecten over enorme afstanden dirigeert, tot en met het universum zelf aan toe. We weten zelfs dat de zwakke kernkracht en het elektromagnetisme in feite twee kanten van eenzelfde theoretische medaille zijn, twee uitingen van de zogeheten elektrozwakke wisselwerking.

Alle andere krachten die we in de echte wereld meten en ervaren, zijn afgeleiden van dit beroemde viertal. Sommige daarvan zijn schijnkrachten, die ontstaan door onze eigen bewegingen, vooral als er versnellingen in het spel zijn. Andere krachten zijn grootschalige effecten van microscopische krachten, zoals wrijving en veerkracht. En de zwaartekracht zit zelfs zodanig in ons lichaam en onze bewe-

gingen ingebed dat het gek blijft om te horen dat juist die de zwakste kracht van allemaal is.

Maar zijn er echt maar vier fundamentele krachten? Is het helemaal uitgesloten dat we misschien nog iets over het hoofd zien? Een subtiele vijfde kracht? Of zelfs een aantal extra krachten?

Theoretisch is er geen enkele dwingende of logische reden dat er precies vier fundamentele krachten actief zijn in het universum. De kwestie is eigenlijk meer als de dronkaard die 's nachts besluit zijn eerder op de avond verloren sleutels onder een lantaarnpaal te gaan zoeken omdat het daar tenminste licht is. De vier natuurkrachten zijn de krachten die ons in onze versnellerexperimenten en kosmische speurtochten zijn opgevallen. Dat leverde heel veel op. Maar heel andere of veel grotere experimenten zouden misschien iets anders laten zien.

Als er meer dan vier fundamentele fysische krachten bestaan, zullen die hoe dan ook zwak zijn, of over heel korte afstanden actief. Zo zijn er theoretici die denken dat het higgsdeeltje in het standaardmodel een kracht draagt. Normaal gesproken wordt het higgsveld geen krachtveld genoemd, omdat het een scalair veld is, dat alleen een waarde aan een plaats in de ruimte geeft maar geen richting.

Maar in de details van de higgsvergelijkingen is wel dege-lijk een zogenoemde yukawa-term, genoemd naar de Japanse theoretisch natuurkundige Hideki Yukawa, te vinden die als kracht kan worden opgevat. Een kracht die wordt overgebracht via virtuele higgsdeeltjes die heel even uit het vacuüm kunnen opduiken, omdat een lege ruimte volgens de quantumwetten nooit helemaal leeg is. Berekeningen laten wel zien dat deze 'kracht' een reikwijdte zal hebben van  $10^{-18}$  meter en een biljoen keer zwakker is dan de zwakke kernkracht. Dat is in alle modellen en experimenten

verwaarloosbaar weinig en een goede reden dat het higgs-deeltje normaal niet als krachtdeeltje wordt opgevat. Zijn echte kracht ligt vooral heel ergens anders: massa geven aan alle elementaire deeltjes. Bekende en misschien zelfs onbekende deeltjes.

...

Deeltjesfysici zijn in hun metingen eigenlijk altijd op zoek naar afwijkingen van wat de theorie voorspelt. Afwijkingen maken de natuurkunde spannend. Daarmee wordt het standaardmodel voortdurend getest, doorgaans met groot succes ook. Maar bovendien kunnen afwijkingen een idee geven hoe het standaardmodel eventueel nog kan worden uitgebreid of misschien ingebed in een bredere theorie. De laatste jaren lijken er wat voorzichtige aanwijzingen te zijn voor afwijkingen die er echt toe doen.

Hoofdrolspeler daarbij is interessant genoeg haast steeds het muon, het tweehonderd keer zwaardere broertje van het verder eigenlijk identieke elektron. Er zijn twee experimenten in het bijzonder die onderzoekers voor een raadsel stellen en mogelijk duiden op wat natuurkundigen 'nieuwe fysica' noemen.

Het ene experiment wordt gedaan in een betrekkelijk kleine deeltjesring op het Amerikaanse onderzoekscentrum Fermilab vlak bij Chicago, waarin muonen rondcirkelen. In de opstelling worden metingen uitgevoerd aan het magnetische moment  $g$  van het muon, een getal zonder dimensies. In het standaardmodel is de waarde daarvan precies 2. Maar al langer laten metingen zien dat dat toch niet helemaal klopt. Theoretisch is daarvoor wel een reden te bedenken: in het vacuüm rondom een muon duiken door quantumonzekerheid voortdurend en heel kort virtuele deeltjes op die de