

Het terugkerend raadsel van de zwaartekracht

Geen natuurkracht is ons vertrouwder dan de zwaartekracht en tegelijkertijd is het de meest onbegrepen kracht. Anders dan de drie andere fundamentele krachten weigert de zwaartekracht zich te laten vangen in een quantumtheorie. Mede daardoor lukt het ook niet om de gravitatie te incorporeren in het standaardmodel. Het is niet voor het eerst dat de gravitatie zich onttrekt aan de gangbare fysische modellen. Onbegrip volgt de zwaartekracht sinds de opkomst van de moderne wetenschap in de zeventiende eeuw. Dat onbegrip manifesteerde zich het sterkst na de publicatie van Newtons *Principia* eind zeventiende eeuw en na de doorbraak van Maxwells veldentheorie eind negentiende eeuw.

Een nieuw natuurbeeld

In de decennia rond het midden van de zeventiende eeuw maakten geleerden als Descartes, Boyle en Huygens korte metten met het klassieke natuurbeeld van hun voorgangers. Volgens dat natuurbeeld, dat bovenal teruggaat op Aristoteles, gedraagt alles in de natuur zich doelmatig, zelfs levenloze voorwerpen. Zo beweegt een losgelaten steen omlaag omdat deze streeft naar zijn natuurlijke plek en dat is het midden van de wereld. Vuur beweegt van nature omhoog naar de hoogste lagen van het aardse domein, direct onder de maansfeer. Tijdens de renaissance kreeg het aristotelische natuurbeeld weliswaar concurrentie van neoplatonistische opvattingen, maar dat veranderde niets aan het doelmatige gedrag van de natuur. Veeleer kregen sommige verklaringen een meer magisch aandoend karakter.

Zo identificeerden vroege heliocentristen als Copernicus en Kepler de zon met de platonische wereldziel, die de wereld verlichtte, verwarmde en in beweging zette en daarmee een plaats toekwam in het midden van de wereld. Copernicus zelf verklaarde het vallen van stenen eveneens op een platonistische wijze. Door hun diepe verwantschap streven steen en aarde ernaar zich met elkaar te verenigen. Evenzo verklaarde William Gilbert de aantrekking van ijzer door een magneet. Een naburige magneet wekt in een stuk ijzer een sluimerende, verwante ziel en de wederzijdse begeerte doet de rest. In navolging van Gilbert zag ook Kepler magnetisme als een kosmische kracht. Zo verklaarde hij bijvoorbeeld de getijden door een soort magnetische aantrekking van het oceaanaanwater door de maan.

In de zeventiende eeuw raakte dit hocus-pocuswereldbeeld geleidelijk in diskrediet. Een modern denker als Galilei verwierp Keplers 'kinderachtige' en 'occulte' verklaring van de getijden. Nog iets later meenden Descartes en Boyle dat de natuur goed beschouwd niet anders werkt dan een machine, oftewel 'mechanisch'. Net als bij een klok wordt beweging doorgegeven door met elkaar in contact zijnde onderdelen, zoals tandwielen. De wereld bestaat uit talloze passieve deeltjes van verschillende vormen en groottes. Daarbuiten bezitten zij geen enkele eigenschap. Zij streven nergens naar en kunnen zelf geen beweging initiëren, enkel die overdragen op andere deeltjes middels direct contact.

Met name Descartes blonk uit in het bedenken van puur mechanische verklaringen voor de meest uiteenlopende verschijnselen. Rond de zon wervelt de uiterst subtiële hemelmaterie in een reusachtige kosmische draaikolk. De planeten zitten gevangen in deze draaikolk en bewegen bij gevolg alle in dezelfde richting rond de zon. Evenzo zitten manen gevangen in kleinere wervels rond de planeten. Door de hoge snelheid van de werveldeeltjes overstijgt hun centrifugale tendentie die van losse voorwerpen op het oppervlak van planeten als de aarde. Bijgevolg worden die omlaaggedrukt, hetgeen hun 'zwaarte' verklaart. Aanzienlijk complexer waren zijn mechanische verklaringen voor de raadselachtige magnetische verschijnselen. Maar ook daar volstonen wervelende materiedeeltjes met, in dit geval, bijzondere vormen.

Niet iedereen was evenzeer onder de indruk van Descartes' fantastische verklaringen. Maar zijn belangrijkste punt was gemaakt, namelijk dat aanschouwelijke – lees: mechanische – verklaringen altijd mogelijk zijn en er geen noodzaak bestaat om een beroep te doen op doelgerichte of magische eigenschappen. Zoals Christiaan Huygens benadrukte, was de grote verdienste van de nieuwe mechanische natuurwetenschap haar begrijpelijkheid en aanschouwelijkheid. Was de voornaamste taak van de natuurfilosofie immers niet het verklaren van de natuurverschijnselen? Het toeschrijven van allerlei occulte eigenschappen aan natuurlijke objecten verklaart welbeschouwd niets.

Newtons onbegrijpelijke aantrekking

Het was in dit wetenschappelijke klimaat dat Newton, in zijn in 1687 verschenen *Principia*, een steen in de vijver wierp. Hij stelde vast dat alle materiële objecten in het universum elkaar aantrekken, zelfs op kosmische afstanden door een ruimte die goeddeels als leeg moet worden beschouwd. Huygens was diep onder de indruk van Newtons verklaring van de wetten van Kepler. Dat er sprake was van een centripetale kracht rond de zon en rond de planeten, achtte hij dan ook onbetwistbaar. Maar dat betekende hooguit dat Descartes' werveltheorie enige aanpassing behoeftte, en wel zodanig dat rond zon en planeten de gewenste centripetale kracht resulteerde. Waarom Newton claimde dat aarde en steen elkaar aantrokken was hem een raadsel. Een dergelijke aantrekking achtte hij onverklaarbaar, absurd en overbodig.

De Duitse geleerde Leibniz was het roerend met Huygens eens. Newtons aantrekking betekende goed beschouwd een terugkeer naar achterhaalde occulte eigenschappen. Een dusdanige werking op afstand was niet langer acceptabel. Andere continentale geleerden sloten zich bij hen aan. In Engeland had men er minder moeite mee. Sommigen daar zagen de onverklaarbaarheid van de aantrekking juist als een aanbeveling. Inderdaad was materie in haar aard volstrekt passief. Dat betekende dat die aantrekking enige hulp van hogerhand vereiste. Aldus bewees Newton niet alleen dat de wereldmachine een product was van een goddelijke schepping, maar ook dat die wereldmachine een voortdurende goddelijke aandrijving behoeftte. In Leibniz' ogen maakte die opvatting, waarvan hij ook Newton verdacht, de gravitatie tot een 'eeuwigdurend wonder'.

Newton zelf reageerde op zijn critici in de tweede druk van zijn *Principia* door te stellen dat hij het woord aantrekking enkel gebruikte in wiskundige zin, als een door hem aangetoonde neiging van materiële objecten tot wederzijdse toenadering, en niet in fysische zin, als een eigenschap van de materie zelf. Over de oorzaak wilde hij zich niet uitlaten, want daar had hij geen onderzoek naar gedaan. En, anders dan Descartes, deed hij niet aan wilde speculaties. Maar die disclaimer, volgde direct op een suggestief betoog waarin hij zijn godsbeeld uiteenzette. Newtons God bleek bovenal een 'Heerser', almachtig en letterlijk alomtegenwoordig (niet virtueel, maar substantieel,

zoals Newton benadrukte), zonder weerstand te bieden aan bewegende objecten, maar met het vermogen overal te handelen, op een niet-mechanische, immateriële wijze. Voor de moderne lezer klinkt het haast als een veldentheorie.

Een vertrouwde onbegrijpelijkheid

De Britse breuk met de strikt-mechanische natuurfilosofie vond lange tijd geen navolging op het Europese continent. Continentale geleerden vonden het vermengen van natuurwetenschap en religie onacceptabel en hechtten aan een begrijpelijke wetenschap. Geleidelijk ontstonden er echter barsten in die eensgezindheid. In de jaren twintig van de achttiende eeuw publiceerden twee jonge hoogleraren, 's Gravesande in Leiden en Van Musschenbroek in Utrecht, nieuwe natuurkundeleerboeken die volledig op newtoniaanse leest geschoeid waren. Hier was vermoedelijk geen sprake van werking op afstand: beiden waren korte tijd in Engeland geweest waar zij Newton persoonlijk hadden ontmoet. Zij accepteerden Newtons aantrekking als een bewezen feit, waarvan enkel de oorzaak onbekend was. En zij beriepen zich op de Britse filosoof Locke die had betoogd dat wij eigenlijk niets weten van de aard van de materie. Die geleerde onwetendheid had overigens wel zijn grenzen, want een mechanische verklaring voor Newtons aantrekking achtten zij volledig uitgesloten. Tien jaar later kregen zij navolging van enkele jonge Franse wiskundigen, bovenal Maupertuis. Goed beschouwd, stelde Maupertuis, is contactwerking even onbegrijpelijk als werking op afstand. Waarom lichamen bij contact een deel van hun beweging overdragen weten wij niet. Zijn desertie veroorzaakte enige consternatie onder zijn landgenoten. Medeleden van de Parijse Academie zagen hem als een landverrader. Maar hij kreeg geleidelijk bijval van andere jonge wiskundigen als Clairaut en d'Alembert. Belangrijker nog was de steun van Maupertuis' zelfverklaarde bekeering Voltaire. In diens populaire *Lettres philosophiques, ou Lettres Anglaises* (1733) en zijn *Éléments de la philosophie de Newton* (1738) verspreidde Voltaire het nieuwe evangelie onder de Franse beau monde. En met succes. Halverwege de eeuw was het modegevoelige Parijs volledig in de ban van Newton. Geleidelijk kwam er ook enige empirische ondersteuning voor Newtons aantrekking. De Franse wiskundigen die in opdracht van de Parijse academie naar Peru waren gezeld om via graadmetingen de vorm van de aarde te bepalen, hadden daar ter plekke geconstateerd dat de Chimborazo een schietlood zeven boogseconden uit het lood trok. Om dat te verklaren zou een cartesiaan een extra wervel rond de berg nodig hebben. Eind achttiende eeuw zou Cavendish zelfs de aantrekking tussen twee metalen ballen meten. Maar het is veelzeggend dat dit laatste experiment niet meer gepresenteerd werd als een bewijs voor Newtons theorie, maar enkel als een meting van de massa van de aarde. De vraag naar diepere oorzaken van Newtons gravitatie werd inmiddels steeds meer gezien als zinloos. Aantrekking was, zoals de fysicus Ernst Mach later zou

opmerken, een vertrouwde onbegrijpelijkheid geworden. Een van de redenen voor deze vertrouwdeheid was de wonderbaarlijke vermenigvuldiging van op afstand werkzame krachten die in de tweede helft van de achttiende eeuw had plaatsgevonden. Zo had men zich inmiddels ook verzoend met aantrekkende en afstotende elektrische en magnetische krachten, alsmede allerlei krachten die zich enkel op microscopische afstanden manifesteerden, zoals de chemische krachten, cohesiekrachten, alsmede de krachten tussen materiedeeltjes enerzijds en warmtedeeltes en lichtdeeltjes anderzijds. Ook botsingen zag men inmiddels als het gevolg van afstotende krachten. Waar men aanvankelijk werking op afstand als absurd van de hand had gewezen, was men nu eensgezind dat alle fysische werking op afstand plaatsvond. Newtons gravitatie was niet langer de uitzondering, maar veeleer hét model voor alle fysische werkingen.

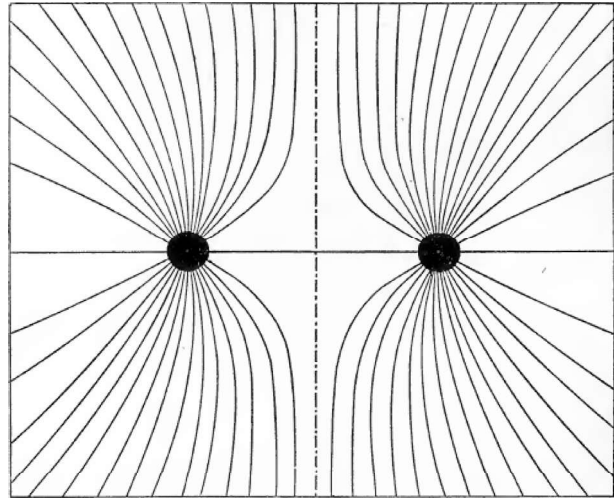
Dat nam niet weg dat er in de tussentijd diverse pogingen waren gedaan om een dieperliggende theorie te vinden. Newton zelf verraste in 1717 vriend en vijand door zijn suggestie van een subtiele en elastische ether als oorzaak van de gravitatie. Mogelijk vond hij een al te directe rol voor God toch wat ongemakkelijk. Zijn aanhangers besloten eensgezind deze late oprisping te negeren. Maar anderen wilden zich niet bij voorbaat neerleggen bij de onverklaarbaarheid van elkaar aantrekkende materiedeeltjes. Zo werkte de grote wiskundige Euler eveneens aan een elastisch medium ter verklaring van de zwaartekracht. En hij was zeker niet de enige die zich bleef verzetten tegen een werking op afstand.

Het ijverigst van allen was de achttiende-eeuwse Zwitserse geleerde Lesage die van een mechanische verklaring zijn levenswerk maakte. Stel het universum wordt in alle richtingen doorkruist door minuscule rechthoekige bewegende deeltjes, die vrijwel ongehinderd door materiële lichamen heen bewegen (een soort neutrino's). Een klein deel van hen botst tegen de veel grovere materiedeeltjes en verliest daarbij een minuscule fractie van de oorspronkelijke snelheid. Twee op enige afstand van elkaar verkerende deeltjes zullen ten gevolge van dit bombardement naar elkaar toe worden gedreven met een kracht omgekeerd evenredig met het kwadraat van de afstand. Lesage correspondeerde met alle groten der aarde over zijn theorie, maar op een paar vertrouwelingen na bleek niemand geïnteresseerd. Mechanische verklaringen waren domweg uit de mode geraakt. Pas honderd jaar later zou William Thomson, oftewel Lord Kelvin, de theorie opnieuw naar voren schuiven.

Een hernieuwd isolement

De ommekeer in deze berustende houding voltrok zich in de tweede helft van de negentiende eeuw. En weer waren het de Britten die een einde maakten aan de bestaande eensgezindheid. Dat begon met Faraday, die in zijn pogingen meer greep te krijgen op elektrische en magnetische verschijnselen, de ruimte vulde met gekromde krachtlijnen. In zijn ogen vormden krachten, niet materiedeeltjes, de bouwstenen van de werkelijkheid. Door

zijn eigenzinnige opvattingen en zijn onvermogen die in wiskundige vorm te gieten, isoleerde hij zich echter van de internationale wetenschappelijke elite. Dat veranderde pas toen wiskundig geschoolde Britse wetenschappers als Kelvin en vooral Maxwell Faradays esoterische ideeën een wiskundige vorm probeerden te geven en ze onderbouwden met begrijpelijke mechanische modellen. Bij Maxwell stonden de gebogen krachtlijnen niet op zichzelf, maar representeerden ze spanningstoestanden in een materieel medium. Die spanningen, gevolg van wervelbewegingen en elastische vervormingen in het medium, duidde hij aan met de term 'velden'. Ze resulteren in krachten werkzaam op geladen lichamen, stroomdraden en magneetpolen. Maxwell maakte daarbij aannemelijk dat ditzelfde medium verantwoordelijk was voor de voortplanting van lichtgolven. Naarmate het beeld van de elektrische en magnetische krachten kanteelde, rezen de twijfels over Newtons zwaartekrachttheorie. Steeds meer Britse fysici herontdekten de 'absurditeit' van werking op afstand en zochten bijgevolg naar een verklaring voor Newtons aantrekking. Het is in dit licht dat we Kelvins herleving van de theorie van Lesage moeten begrijpen. Franse en Duitse fysici zagen dit alles met enige verbazing aan. Ook Maxwell zocht naar een veldentheorie voor de zwaartekracht, maar stuitte op een in zijn ogen onoverkomelijk probleem. Vul een lege ruimte met geladen lichamen, elektrische stromen en magneten en de energiedichtheid van de resulterende velden neemt overal toe. Vul daarentegen een lege ruimte met materie en de energie van het denkbeeldige gravitatieveld neemt af. Omdat Maxwell zich geen negatieve energie kon voorstellen, meende hij dat deze weg doodliep. Anderen waren volhardender. Karl Pearson en Arthur Schuster kwamen onafhankelijk van elkaar tot eenzelfde suggestie. Vul de gehele ruimte met een ideale vloeistof. Plaats in die ruimte punten (atomen) waar vloeistof verdwijnt (putten) of juist geproduceerd wordt (bronnen). Dergelijke atomen trekken elkaar aan volgens Newtons wet. Verbindt bronnen en putten eventueel via een hogere dimensie. Daar bronnen en putten elkaar afstoten vinden we in onze omgeving maar één soort atomen. Als volwaardig atoommodel schoot de theorie echter in veel opzichten tekort en hetzelfde gold voor verschillende alternatieven. Na de definitieve internationale doorbraak van Maxwells veldentheorie rond 1890 erkende iedere Europese fysicus van naam dat de zwaartekracht een obstakel was geworden voor een alomvattende fysische theorie. Nu licht inmiddels gezien werd als een elektromagnetisch verschijnsel, en menigeen een elektrische oorsprong vermoedde voor de moleculaire krachten, lag het voor de hand het elektromagnetische medium ook een rol toe te kennen in de gravitatie. Maar die liet zich niet gemakkelijk inpassen. Elektrische krachten laten zich afschermen, de zwaartekracht niet, en zo waren er meer problemen. Vrijwel iedere lezing over de nieuwe elektronentheorie met haar schier eindeloze verklarensbereik verwees naar het hardnekkige probleem van de zwaartekracht. Experimentatoren



De denkbeeldige zwaartekrachtlijnen van twee elkaar aantrekkende massa's volgens Maxwell. Deze hebben dezelfde vorm als de elektromagnetische krachtlijnen van twee elkaar afstotende ladingen of magneetpolen. Maar waar elektromagnetische krachtlijnen de neiging hebben te contraheren, hebben de gravitationele krachtlijnen de neiging zich te verlengen. De massa's worden dus niet naar elkaar toe getrokken, maar geduwd. Dit zien we dan ook in bijvoorbeeld Lesage's theorie.

zochten ijverig, maar vergeefs, naar mogelijkheden de zwaartekracht te beïnvloeden. Fysici als Hertz en Lorentz bogen zich over de astronomische consequenties van een zich met eindige snelheid door het medium voortplantende zwaartekracht. Het leverde weinig op, althans geen verklaring voor de afwijkende beweging van het perihelium van Mercurius.

Epiloog

Het zou 25 jaar duren voordat een fysicus erin slaagde de gezochte achterliggende theorie te vinden en aldus af te rekenen met de weer in diskrediet geraakte werking op afstand. Einsteins oplossing bestond erin om de gravitatiekracht niet in verband te brengen met elektromagnetische processen, maar met de geometrie van de ruimtetijd. Eerder al had hij eigenhandig afgerekend met het elektromagnetische medium, dat zijn oudere tijdgenoten nog onmisbaar achtten. Maar Einsteins triomf bleek een tijdelijke. De opkomst van de quantumtheorie veranderde het speelveld blijvend, uiteindelijk culminerend in quantumveldentheorieën voor de andere fundamentele krachten. Alweer liet de zwaartekracht zich moeilijk inpassen in het heersende paradigma. Zoals Steven Weinberg in 1987 opmerkte, driehonderd jaar na de verschijning van Newtons Principia: "Oddly enough, of all the forces that we know about, the one that we've studied longest, gravitation, is the one we understand least".

BRON

1 F. van Lunteren, *Framing Hypotheses: Conceptions of Gravity in the 18th and 19th Centuries* (dissertatie Utrecht, 1991), bit.ly/thesislunt