

DE ONWEERSTAANBARE AANTREKKING VAN DE ZWAARTEKRACHT

Een **ontdekkingsreis** naar zwarte gaten



LUCIANO REZZOLLA

'Het meeslepende verhaal van een van de mooiste natuurkundige
avonturen van de afgelopen jaren' **Carlo Rovelli**

Inhoud

Op reis 1

- 1 Zwaartekracht... trekt aan! 5
 - 2 De vaders van de zwaartekracht 13
 - 3 Ruimtetijd, kromming en zwaartekracht 25
 - 4 De kromming van de ruimtetijd 49
 - 5 Neutronensterren, wonderen van de fysica 65
 - 6 Zwarte gaten, kampioenen van de kromming 103
 - 7 Het eerste beeld van een zwart gat 143
 - 8 Zwaartekrachtgolven: kromming in beweging 197
- Het einde van de reis 245
- Dankwoord 247
- Noten 249
- Index 261

Op reis

Zwaartekracht trekt aan, dat is zo evident dat dit boek niet nodig is om dat duidelijk te maken. Maar het is minder vanzelfsprekend dat de zwaartekracht reeds onze aandacht trekt en onze verbeeldingskracht prikkelt vóórdat ze dat als fysische interactie doet. We zijn nog maar net geboren of we hebben al een bewuste relatie ontwikkeld met het fysische universum, we kennen de zwaartekracht al op instinctief niveau en voor de rest van ons leven zal ze de enige van de vier fundamentele fysische interacties zijn waarvan we ons steeds bewust zullen blijven, maar waaraan we ons ook vaak zullen proberen te onttrekken.

Ik heb dit boek geschreven omdat ik u wil uitleggen wat zwaartekracht is en waarom we er – al was het alleen al op onbewust niveau – onweerstaanbaar door worden aangetrokken. Om dat te doen neem ik me voor samen met u op reis te gaan door de macrokosmos, in het bijzonder door die gebieden van de fysica die de revolutionaire zwaartekrachttheorie van Einstein, de algemene relativiteitstheorie, voor ons heeft ontsloten. Zeker, het zal een virtuele reis zijn, die ons naar een gebied zonder grenzen zal voeren: het rijk van de fundamentele vragen die de mensheid zich stelt. Zoals alle reizen, heeft ook deze ten doel onze visie op de wereld te verrijken, onze horizon te verruimen en, aan het eind gekomen, ons te laten ontdekken dat we iets hebben geleerd. Mijzelf heeft het schrijven van dit boek al deze dingen zeker opgeleverd.

Op de route die ik u voorstel zal ik mijn uiterste best doen om de verraderlijke wegen vol geleerdheid en het gebruik van technische termen zoveel mogelijk te vermijden. We zullen daar uit de buurt blijven en we zullen op onze intuïtie en onze verbeeldingskracht koersen. We zullen

op onze route ook een paar keer pauzeren om een beetje op adem te komen vanwege de nieuwe begrippen die in elk hoofdstuk aan de orde zullen komen, maar vooral om de noodzakelijke rust te vinden voor het geven van antwoorden op sommige eenvoudige, maar zeker niet triviale vragen, zoals:

*Waarom valt een appel van een boom en blijft hij
niet in de ruimte zweven?
Wat is ruimtetijd, wat is de kromming van ruimtetijd
en hoe komt die tot stand?
Kan de tijd gekromd zijn?
Hoe functioneert een zwart gat en hoe kunnen we een
zwart gat 'construeren'?
Hoe is het mogelijk een zwart gat te fotograferen als
het geen licht uitzendt?
Wat zijn zwaartekrachtgolven en waarom zijn die
moeilijk te meten?*

Zoals voor elke reis is het ook nu goed om u voor te bereiden, om te weten wat u kunt verwachten en om in onze bagage te stoppen wat we op de route nodig hebben. Ik zal, als uw gids, meenemen wat ik in dertig aan de studie van de zwaartekracht gewijde jaren heb geleerd, in het bijzonder wat betreft de aspecten die onlosmakelijk zijn verbonden met de astrofysica van zwarte gaten, neutronensterren en zwaartekrachtgolven. De lessen die ik in die jaren heb geleerd, hebben tot voorspellingen en ontdekkingen geleid. De laatste verovering op dat parcours vond plaats in april 2019, in het samenwerkingsverband Event Horizon Telescope: de totstandkoming van het eerste beeld van een superzwaar zwart gat.

Uw bagage mag daarentegen heel wat lichter zijn en hoeft slechts twee onmisbare elementen te bevatten: een rijke dosis verbeeldingskracht en het nodige geduld. Met het eerste kunt u de antwoorden ontdekken die 'wij vakmensen' uit de vergelijkingen weten te halen. Het tweede zal nuttig blijken omdat niet alles wat ik schrijf onmiddellijk duidelijk zal zijn – al garandeer ik u dat het beslist correct is. Ook zal niet alles wat u gaat lezen u meteen vanzelfsprekend voorkomen, misschien zal het zelfs wel onzinnig lijken. Maar toch, als u zich uitrust met verbeeldingskracht en geduld kunt u er zeker van zijn dat u antwoord krijgt op elk van de vragen die hierboven zijn gesteld en dat u zult begrijpen welke rol de begrippen

ruimtetijd en kromming spelen bij het verklaren van wat zwaartekracht, die mysterieuze kracht waardoor wij allen worden aangetrokken, nu eigenlijk is.

Vertrekkend met het irrationele instinct van een pasgeborene zal onze reis ons leiden naar pure verbazing, als we gaan begrijpen wat zwaartekracht werkelijk is en hoe sommige van de meest bizarre effecten ervan tot uiting komen, zoals in het gedrag van neutronensterren en zwarte gaten.

Dat zal onze reis zijn, van instinct naar verwondering en verbazing in het revolutionaire universum van Einstein.

1 ZWAARTEKRACHT... TREKT AAN!

Zoals ik al aangaf is de titel van dit hoofdstuk minder triviaal dan hij op het eerste gezicht lijkt. Ik wil er niet simpelweg mee zeggen dat er een fysische 'kracht' bestaat tussen twee objecten die massa bezitten en elkaar aantrekken, ook al bevinden ze zich op grote afstand van elkaar. Integendeel, in hoofdstuk 3 zullen we ontdekken dat dat idee, hoe wijdverbreid en gemakkelijk te begrijpen ook, in werkelijkheid onjuist en deels misleidend is. Mijn bedoeling is veeleer om te benadrukken dat er iets bestaat, namelijk de zwaartekracht, dat ons in de brede zin des woords aantrekt en vooral onze aandacht trekt. Behalve op fysische objecten oefent dit fenomeen een bijna onweerstaanbare kracht uit op onze verbeelding. Het kan onze fantasie naar volledig nieuwe, ongebruikelijke horizons sturen en vergezichten voor ons ontsluiten die zich tot ver buiten onze dagelijkse ervaring uitstrekken.

Maar laten we stap voor stap te werk gaan. Om iets beter te omschrijven wat zwaartekracht is, maken we in de kennis die we over die kracht bezitten onderscheid tussen drie verschillende maar met elkaar verbonden niveaus. We kunnen zeggen dat we over zwaartekracht *instinctieve kennis*, *rationele kennis* en *verbeeldingskennis* bezitten.

Laten we samen kijken waar het om gaat en hoe deze drie vormen van kennis van elkaar zijn te onderscheiden.

Instinctieve kennis

Het instinct is de natuurlijke, intrinsieke, dus zonder verstandelijke redeneringen of overwegingen functionerende neiging om een bepaalde gedraging in gang te zetten. Een voorbeeld van een instinctieve handeling is dat we, als



Fig. 1.1 Voorbeeld van een Moro-reflex.

Een pasgeborene reageert instinctief op een verlies van ondersteuning door de armen te spreiden en te proberen een houvast te vinden om zijn val te stoppen.

© V. Tverdokhlib/depositphotos.com

we onverwachts een heel hard, onbekend geluid horen, in elkaar duiken en ons hoofd proberen te beschermen. Als we het zo stellen is het moeilijk te geloven dat iets instinctiefs of irrationeels ons met zwaartekracht verbindt. En toch is dat zo.

Iedereen die met een baby te maken heeft gehad, heeft waarschijnlijk met eigen ogen de zogeheten Moro-reflex waargenomen, vernoemd naar de Oostenrijkse kinderarts Ernst Moro (1874-1951). Dat is een van de belangrijkste reflexen die meteen na de geboorte optreden. Hij wordt veelvuldig gebruikt om het functioneren van het centrale zenuwstelsel te beoordelen. Om de reflex op te wekken hoef je alleen maar een baby, zelfs als hij nog maar een paar seconden oud is, horizontaal te houden en... te laten vallen! Natuurlijk moet je hem wel weer opvangen voordat hij een hard oppervlak raakt. De pasgeborene reageert verrast op dat onverwachte verlies van ondersteuning door plotseling zijn armen en handen te spreiden op zoek naar steun, zoals in figuur 1.1.

Uit medisch oogpunt is het optreden van die reflex een belangrijke aanwijzing dat het zenuwstelsel fysiologisch uitstekend functioneert. Daarom ondergaan we die test allemaal. Wie dat als ouder heeft gedaan – mij is het drie keer overkomen – kent heel goed de opluchting die je voelt als je kind op de juiste wijze op die test reageert. Die opluchting gaat ook samen met een andere: de constatering dat de val is gestopt voordat het perfect werkende zenuwstelsel zou worden beschadigd.

Antropologisch gezien herinnert de Moro-reflex ons aan ons verleden als primaten, toen we naar alle waarschijnlijkheid meteen klaar moesten zijn om, zittend op haar rug, met onze moeders mee te gaan. Maar voor ons is van groter belang wat de reflex fysisch gezien betekent. Het optreden van deze reflex, enkele seconden na de bevalling, als we geheel weerloos zijn en niets weten van de wereld om ons heen, toont een belangrijk feit betreffende onze interactie met de zwaartekracht: we kennen haar op instinctief niveau, lang voordat we bewuste interacties hebben met de rest van het fysisch universum. Nadat we negen gemakkelijke maanden in de moederschoot hebben doorgebracht, bijna volledig geïsoleerd van alles, kunnen we onmiddellijk reageren op de zwaartekracht (of liever op de afwezigheid daarvan). Dat is geen gering detail.

De Moro-reflex verdwijnt na ongeveer zes maanden, dus onze kennis van de zwaartekracht verandert in de loop van de tijd, ook al blijft ze gedeeltelijk instinctief, terwijl we het vermogen ontwikkelen het fysisch universum waar te nemen en de wetten ervan te begrijpen.

Rationele kennis

Naarmate onze kennis van de wereld zich uitbreidt en onze intellectuele vermogens verfijnder worden, gaat onze kennis van de zwaartekracht over van instinctief naar rationeel. Met andere woorden, ze wordt deel van de verwachtingen die wij hebben over het functioneren van de wereld om ons heen. Dat wordt duidelijk geïllustreerd door eenvoudige visuele experimenten met tekenfilms bij heel jonge kinderen. Hoewel enkele van de betrokken kinderen zelfs nog niet konden lopen, bleken ze allemaal de beweging van een object in een zwaartekrachtveld consistent te interpreteren. Het klassieke voorbeeld is dat van een bol die over een tafel rolt: de kinderen reageren op verschillende manieren – met gezichtsexpressies en oogbewegingen – al naar gelang de bol, eenmaal bij de rand van de tafel

gekomen, ervan af valt, of zijn eigen beweging zonder enige verandering continueert, of zelfs omhoog vliegt. Dat bevestigt opnieuw hoezeer kennis van de zwaartekracht in onze geest is verankerd.

De zwaartekracht speelt een belangrijke rol in onze rationele perceptie van de werkelijkheid. Daardoor kunnen onze hersenen in heel weinig tijd zonder noemenswaardige inspanning oplossingen vinden voor zeer complexe dynamische problemen. Een heel eenvoudig voorbeeld is het snel afdalen van een trap. Dat is een van de meest complexe problemen bij het programmeren van robots (die dat nog steeds niet kunnen), maar wij mensen doen dat zonder dat we daar bewust bij nadenken. Toch is het helemaal geen triviaal probleem om te bepalen in welke volgorde en met welke snelheid onze bewegingen op die serie treden moeten worden uitgevoerd om de subtiele balans tussen de verschillende met de zwaartekracht wedijverende krachten te behouden.

Ten slotte is er nog een eigenschap van de zwaartekracht die de moeite waard is om over na te denken: het vermogen om onze verbeeldingskracht te prikkelen.

Kennis die onze verbeelding stimuleert

Het is duidelijk dat we zowel een instinctief als een rationeel begrip van de zwaartekracht hebben. Het is naar mijn mening even duidelijk dat deze ook een onweerstaanbare aantrekkingskracht op onze verbeelding uitoefent. Juist omdat we ons hele leven ondergedompeld zijn in en onderworpen zijn aan een gravitatieveld, worden we van nature gefascineerd door scenario's waarin de zwaartekracht zwak of afwezig is. Wie heeft nooit de wens gehad om van een hoge klif of bergtop af te springen en te vliegen? Wie heeft zich nooit ingebeeld een astronaut te zijn aan boord van het internationale ruimtestation (ISS), of een rol te spelen in een sciencefictionfilm waarin je zonder inspanning van de ene naar de andere plaats zweeft, omdat zwaartekracht daar afwezig is? Mij overkomt dat regelmatig... Met andere woorden, de zwaartekracht trekt onze aandacht en stimuleert onze verbeelding, juist omdat het de enige 'kracht' is waarvan we ons steeds bewust zijn en omdat we beseffen hoe moeilijk het is om je eraan te onttrekken. Wat anders dan verbeeldingskracht heeft eerst Newton en later Einstein ertoe gebracht om – op geheel verschillende wijze – de wetten te verklaren waaraan de zwaartekracht gehoorzaamt?

Er zijn talloze voorbeelden die illustreren hoe sterk de zwaartekracht onze verbeelding prikkelt, maar ik zal me tot slechts één voorbeeld beperken, omdat ik het representatief vind en het gemakkelijk te begrijpen is. In 2013 heeft de Spaanse regisseur Alfonso Cuarón een film opgenomen met de symbolische titel *Gravity*. Bijna twee uur lang wordt er in die film over niets anders gesproken dan over zwaartekracht, of liever gezegd, over het ontbreken daarvan. Niet veel mensen weten echter dat *Gravity* in het eerste weekend dat hij draaide het tot dan toe heersende inkomstenrecord brak van alle in de herfst uitgekomen films. Iemand zou kunnen beweren dat dat succes geheel te danken is aan de hoofdrolspelers, Hollywood-supersterren Sandra Bullock en George Clooney. Naar mijn mening speelde echter het feit dat wij – of we dat nu willen of niet – ons niet kunnen onttrekken aan de zwaartekracht en haar onweerstaanbare aantrekking op onze geest, een fundamentele rol.

Een van vier, maar beslist anders dan de andere

Wat we tot dusver hebben besproken, vormt een uitstekend aanknopingspunt voor nog een andere belangrijke overweging, die te maken heeft met de rol van de zwaartekracht binnen ons totale natuurbegrip. De moderne natuurkunde leert ons dat er vier soorten fundamentele interacties bestaan die in wezen alle in de natuur werkzame processen beschrijven: *de elektromagnetische interactie*, *de sterke interactie*, *de zwakke interactie* en *de gravitationele interactie*, dat wil zeggen de zwaartekracht.

De eerste, de *elektromagnetische interactie*, stelt ons in staat dit boek te lezen, ongeacht in welk formaat. Vanaf de pagina die u voor zich heeft reizen namelijk elektromagnetische golven (fotonen, of gewoon: licht) naar uw ogen. Daar worden die golven naar elektrische signalen omgezet die door de gezichtszenew worden doorgegeven aan de hersenen. Dankzij een complexe combinatie van elektrische en chemische wisselwerkingen zetten de hersenen die signalen om naar de woorden die u zojuist heeft gelezen. De elektromagnetische wisselwerking zorgt daarnaast ook voor de cohesie en de dynamica van de moleculen in ons lichaam: zonder deze interactie zouden we zelfs niet als menselijke wezens bestaan en zouden onze moleculen zich verspreiden als papiersnippers in de wind. De theorieën die haar beschrijven zijn zeer goed bekend, zowel op het niveau van de klassieke fysica (waar ze door de Maxwellvergelijkingen worden beschreven), als op