

Achtergrondsonafhankelijke quantumzwaartekracht

Het formuleren van een theorie die quantummechanica en zwaartekracht verenigt is een grote open vraag in de moderne natuurkunde. Eén van de problemen is dat zo'n theorie 'achtergrondsonafhankelijk' moet zijn. In dit artikel legt Luka Vinck uit wat dat betekent, en hoe een algebraïsche kijk op het probleem misschien wel een route naar een oplossing biedt.



Afbeelding 1. Een astronaut zwevend in de ruimte met de aarde op de achtergrond. De algebraïsche kijk op quantumzwaartekracht suggereert dat de waarnemingen die een waarnemer kan doen, te formuleren zijn op een manier die onafhankelijk is van de ruimtetijdachtergrond, door de variabelen direct te relateren aan de waarnemer zelf. Bron: [NASA](https://www.nasa.gov/).

De moderne fundamentele natuurkunde is gebaseerd op twee zeer succesvolle theorieën: de [algemene relativiteitstheorie](#) en de [quantummechanica](#). Die eerste is een theorie van zwaartekracht, die erg goed de beweging van materie op grote schaal beschrijft; denk aan

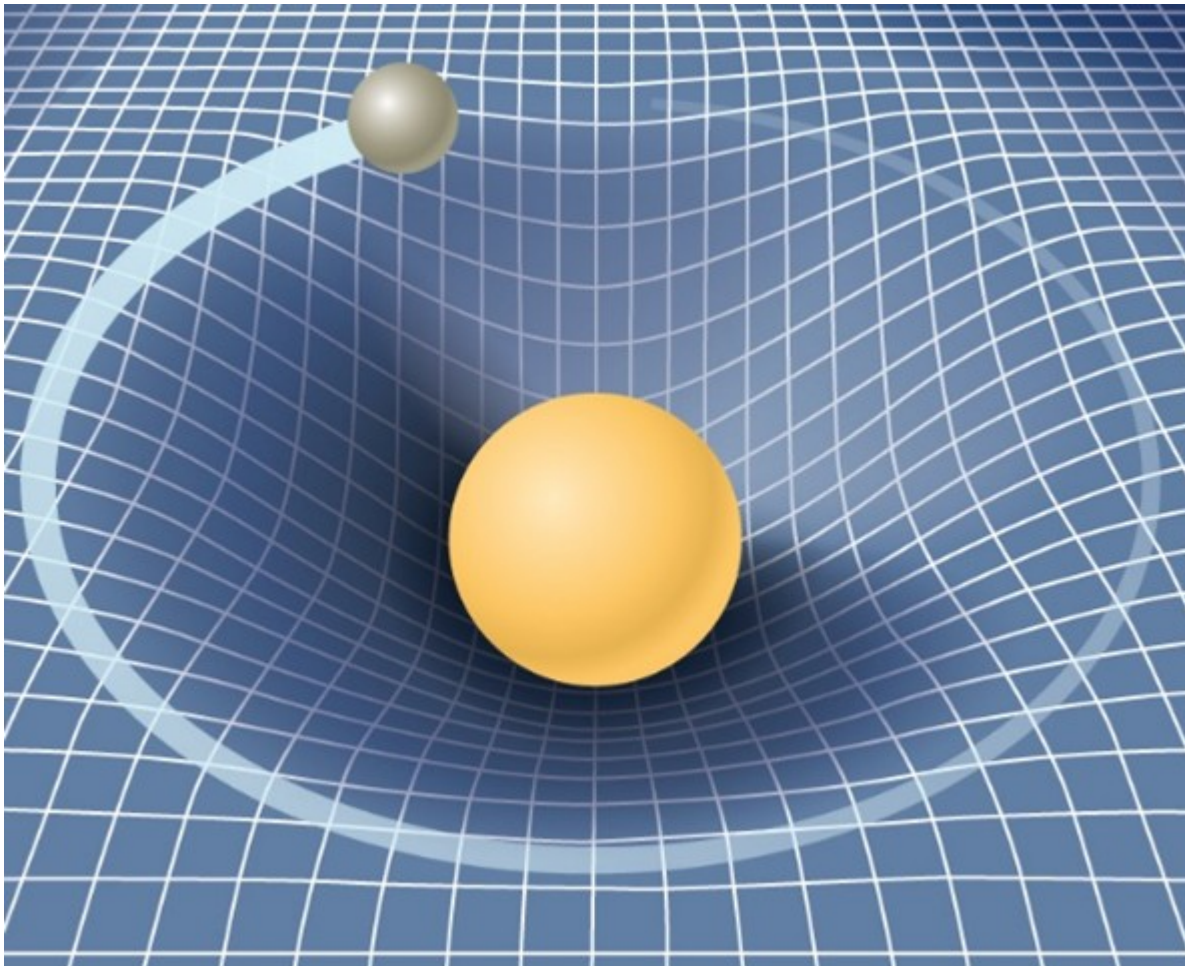
sterrenstelsels en zwarte gaten. De tweede, quantummechanica, beschrijft juist de kleinste bestandsdelen van de natuur: de elementaire deeltjes en hun onderlinge krachten.

Ondanks het succes van beide theorieën is het nooit gelukt om de twee te verenigen. Dat is op zichzelf geen probleem, zolang de domeinen waarin de theorieën geldig zijn niet overlappen. We snappen ongeveer hoe de eigenaardigheden van de quantummechanica plaatsmaken voor de wetten van de klassieke mechanica wanneer we naar steeds grotere verzamelingen van deeltjes kijken. Op dezelfde manier begrijpen we ook hoe de relativiteitstheorie reduceert tot de zwaartekrachtwet van Newton als we naar kleine en langzaam bewegende massa's kijken. Er zijn echter ook situaties waarin wordt gedacht dat zowel zwaartekracht als quantumeffecten een rol spelen – zoals bij de [verdamping van zwarte gaten](#), of in de [eerste picoseconden van het heelal](#), waarin er heel veel energie in een heel kleine ruimte besloten lag. In zulke situaties is dus noch de relativiteitstheorie noch de quantummechanica op zichzelf toereikend, en hebben we een nieuwe theorie nodig die beide combineert en overstijgt. Zo'n theorie wordt een theorie van '[quantumzwaartekracht](#)' genoemd.

Een complete theorie van quantumzwaartekracht hebben we nog niet. Er zijn veelbelovende kandidaattheorieën die ver komen, waarvan de bekendste waarschijnlijk [snaartheorie](#) is. Het probleem is dat de verschillen tussen snaartheorie en andere theorieën pas op dusdanig hoge energieschalen merkbaar worden, dat het erg moeilijk is om de theorie te verifiëren door middel van een experiment: om snaarachtige verschijnselen te zien zouden we een deeltjesversneller ter grootte van ons zonnestelsel nodig hebben. Het is dus praktisch onmogelijk om experimenteel vast te stellen of snaartheorie klopt, of [een van haar tegenhangers](#) – of misschien wel een compleet andere, onbekende theorie.

Een andere strategie is om op een meer filosofisch niveau na te denken over hoe een theorie van quantumzwaartekracht er überhaupt uit zou moeten zien, en welke elementen van relativiteitstheorie en quantummechanica deze moet bevatten. Zo bestaat er het idee dat een theorie van quantumzwaartekracht 'achtergrondsonafhankelijk' moet zijn. In de relativiteitstheorie zijn ruimte en tijd namelijk niet een soort absolute achtergrond waarop de theorie is geformuleerd, maar vormen ze samen een dynamisch toneel dat is gekoppeld aan materie en onderworpen aan [bewegingsvergelijkingen](#). Op die manier kun je ruimtetijd zien als een [veld](#), vergelijkbaar met bijvoorbeeld het elektromagnetische veld. Dit alles betekent

dat verschillende configuraties van materie in het universum resulteren in verschillende configuraties van het ruimtetijdveld, wat ertoe leidt dat de materie weer op een andere manier door het universum beweegt. Zo zorgt de massa van een ster bijvoorbeeld voor de kromming van de ruimtetijd eromheen waardoor een langsvliegend deeltje wordt afgebogen – dat is zwaartekracht. Op deze manier is de relativiteitstheorie dus niet afhankelijk van een specifieke, vast gekozen ruimtetijdsachtergrond, maar staan ruimte en tijd op eenzelfde voet als materie. Dit feit wordt gezien als het belangrijkste wat relativiteitstheorie ons heeft geleerd over het heelal. En om deze reden geloven natuurkundigen dat dit ook moet worden meegenomen in een theorie van quantumzwaartekracht: dat zou dan dus een achtergrondsonafhankelijke quantumtheorie moeten zijn, geformuleerd zónder vooraf een bepaald ruimtetijdtoneel te kiezen.



Zwaartekracht als kromming. De relativiteitstheorie beschrijft zwaartekracht als de kromming van de omliggende ruimtetijd door een massief object zoals een ster, waardoor andere massa's anders bewegen. Afbeelding: Openstacks University Physics, via [Wikimedia Commons](#).

Verschillende ideeën over achtergrondsonafhankelijkheid

Hoe achtergrondsonafhankelijkheid in zo'n quantumtheorie eruit moet zien, daar bestaat echter geen consensus over. In het algemeen wordt er verondersteld dat de ruimtetijdachtergrond op een of andere manier *dynamisch* moet zijn, maar dat kan verschillende dingen betekenen.

Zo stelt de oudste benadering tot het definiëren van achtergrondsonafhankelijkheid, geformuleerd door James Anderson in de jaren 60, dat een theorie om achtergrondsonafhankelijk te zijn geen 'absolute objecten' mag bevatten. Dat zijn objecten die hetzelfde zijn in alle oplossingen van de bewegingsvergelijkingen van een theorie, ongeacht wat de andere objecten doen. Het idee hierachter is dat een object dat altijd hetzelfde is, daarmee niet dynamisch is, en daardoor kan fungeren als een achtergrond. Het idee van achtergrondsonafhankelijkheid wordt hier dus breder opgevat dan alleen een gefixeerd ruimtetijdveld: ook bijvoorbeeld een elektrisch veld dat overal dezelfde sterkte heeft geldt als een 'absoluut object', en dus als achtergrond. Het probleem is echter dat deze interpretatie van de term wel érg breed is. Het is daardoor niet helemaal duidelijk of de algemene relativiteitstheorie volgens deze definitie zélf wel achtergrondsonafhankelijk is.

Een andere benadering stelt dat het, om 'dynamisch' te zijn, niet voldoende is dat een object voor alle oplossingen van de theorie hetzelfde is, zoals de absoluut-objectdefinitie suggereert, maar dat het object daadwerkelijk voorkomt als een variabele in een bewegingsvergelijking, die is afgeleid van een of ander 'variatieprincipe' – zoals het [principe van de minimale actie](#) in de klassieke mechanica. Deze kijk op achtergrondsonafhankelijkheid wordt toegeschreven aan Oliver Pooley (2017). Volgens zijn definitie is een theorie dan alleen achtergrondsonafhankelijk als álle objecten in de theorie dynamisch zijn in de bovengenoemde zin. Dit is in zekere zin een preciezere definitie dan die in termen van absolute objecten, maar ook deze beschrijving kent natuurlijk haar zwakheden. Zo kunnen we een theorie met een niet-dynamisch veld vaak herformuleren door het toevoegen van zogenaamde 'hulpvelden' en extra bewegingsvergelijkingen. Zulke velden hebben geen fysische betekenis, en we beschrijven in feite nog steeds dezelfde theorie; maar vanuit technisch oogpunt moeten we nu opeens het niet-dynamische veld als dynamisch beschouwen, en is dezelfde theorie dus opeens toch achtergrondsonafhankelijk. Dat is niet

wenselijk, aangezien het zou impliceren dat achtergrondsonafhankelijkheid geen fysische betekenis zou hebben, maar slechts een gevolg zou zijn van hoe we de theorie wiskundig formuleren. Veel fysici geloven echter, met de algemene relativiteitstheorie in gedachten, dat achtergrondsonafhankelijkheid echt een eigenschap is van de wereld om ons heen.

Een derde benadering, geformuleerd door Gordon Belot (2011), vat het ‘dynamisch zijn’ van de ruimtetijd weer op ene andere manier samen. Voor Belot betekent achtergrondsonafhankelijkheid dat alle *fysische* vrijheidsgraden gekoppeld zijn aan *geometrische* vrijheidsgraden. Fysische vrijheidsgraden zijn de parameters die de verschillende fysische configuraties van een theorie beschrijven – bijvoorbeeld de verschillende posities en snelheden die een object kan hebben. Geometrische vrijheidsgraden zijn de parameters die de verschillende *geometrieën* – oftewel de verschillende configuraties van het ruimtetijdveld – beschrijven die de theorie kan hebben. Als alle fysische vrijheidsgraden dus overeenkomen met geometrische vrijheidsgraden, betekent dat dat elke verschillende fysische configuratie – die dus leidt tot een daadwerkelijk meetbaar verschil – ook moet leiden tot een verschillende geometrie van de ruimtetijd, zoals dat ook in de algemene relativiteitstheorie gebeurt. Als we bijvoorbeeld een stuk materie zouden verplaatsen, zoals een planeet, dan zou ook de omliggende geometrie moeten veranderen, waardoor langsvliegende deeltjes anders bewegen. Alleen als op die manier bij elke fysische vrijheidsgraad ook een geometrische hoort, is de achtergrond volledig dynamisch, en is een theorie dus volledig achtergrondsonafhankelijk volgens Belots definitie.

Een algebraïsche benadering

Met deze verschillende ideeën over achtergrondsonafhankelijkheid in de hand, is het een tweede vraag hoe we een achtergrondsonafhankelijke *quantumtheorie* kunnen construeren. En dat is makkelijker gezegd dan gedaan – zoals ik eerder al schreef, is quantumtheorie normaal gesproken afhankelijk van een vast gekozen ruimtetijdachtergrond. De theorie vertelt dan bijvoorbeeld wat de kans is om een deeltje A op tijdstip t aan te treffen op plaats x . Zo’n theorie is zeker niet achtergrondsonafhankelijk volgens de hierboven besproken definities, aangezien de berekende kansen refereren aan de ruimtetijd-achtergrond: de coördinaten x en t hebben immers alleen een betekenis als je vooraf een ruimtetijd hebt gekozen waarin die coördinaten bepaalde punten aanduiden.

Een stap in een meer achtergrondsonafhankelijke richting wordt gedaan door de zogenaamde algebraïsche kijk op quantumtheorie. Dat is niet een nieuwe theorie, maar een andere benadering van dezelfde quantumtheorie, waarin op verschillende elementen een andere nadruk wordt gelegd.

In de gangbare beschrijving van quantumtheorie wordt een centrale rol toegekend aan de *toestanden* waarin het systeem zich kan bevinden – elk zo'n toestand beschrijft een specifieke 'staat van zijn' van het systeem, een specifieke configuratie. Zulke quantumtoestanden kunnen wiskundig worden beschreven met een constructie die de *Hilbertruimte* wordt genoemd. Vervolgens kunnen waarnemingen worden beschreven door verschillende soorten operaties op de toestanden uit te voeren (het uitgangspunt van quantumtheorie is immers dat elke waarneming in principe ook een niet te verwaarlozen interactie met het systeem betekent). Wat zo'n Hilbertruimte precies inhoudt is voor dit verhaal niet belangrijk. Wel van belang is het feit dat de constructie van die abstracte wiskundige ruimte waarin de toestanden van het systeem verzameld zijn, sterk afhankelijk is van specifieke aannames over de ruimtetijdachtergrond. Door de Hilbertruimte als het fundament van de theorie te zien, is de theorie dus bij voorbaat al niet achtergrondsonafhankelijk.

De algebraïsche benadering van quantumtheorie draait de dingen om door niet de Hilbertruimte maar de operaties op de toestanden, die verschillende soorten waarnemingen beschrijven, als het uitgangspunt van de theorie te nemen. Die operaties vormen samen een abstracte algebraïsche structuur of simpelweg een *algebra*. De algebra beschrijft bijvoorbeeld wat het verschil is tussen eerst een meting X doen en daarna een tweede meting Y , of eerst een meting Y doen en dan een tweede meting X . Op deze manier vat de algebra de oorzaak-gevolg relaties in de theorie samen zonder uit te gaan van een specifieke ruimtetijdachtergrond. Omdat de algebra geheel abstract blijft, kunnen de waarnemingen die die algebra beschrijft namelijk in principe worden uitgevoerd op allemaal verschillende soorten toestanden, die horen bij verschillende soorten Hilbertruimten, en dus bij verschillende soorten ruimtetijdachtergronden. De algebraïsche benadering beschrijft uiteindelijk hetzelfde als de normale quantumtheorie: waarnemingen die worden beschreven als operaties op toestanden. Maar het verschil zit in het uitgangspunt: wordt de specifieke ruimtetijdstructuur van de toestanden als basis voor de theorie gezien, of de abstracte

algebra van waarnemingen die de mogelijkheid van verschillende soorten achtergronden openlaat?

De algebraïsche benadering zet dus een stap in de richting van een meer achtergrondsonafhankelijke quantumtheorie. Maar het soort achtergrondsonafhankelijkheid dat we hier aantreffen lijkt anders te zijn dan de ideeën van de filosofen die ik hierboven heb besproken. Die definieerden achtergrondsonafhankelijkheid namelijk allemaal aan de hand van de eis dat de ruimtetijdachtergrond op een of andere manier *dynamisch* moet zijn: de ruimtetijdstructuur moet op een of andere manier gekoppeld zijn aan de materie en zich aanpassen op de beweging hiervan. Dat lijkt in de algebraïsche benadering niet het geval. Hier is de ruimtetijdachtergrond namelijk niet dynamisch, en we kunnen, door een specifieke toestand of Hilbertruimte voor de algebra te nemen, nog steeds voor een bepaalde gefixeerde ruimtetijdachtergrond kiezen, wat in de algemene relativiteitstheorie niet mogelijk is. Het punt is alleen dat we in de algebraïsche formulering de theorie, en specifiek de oorzaak-gevolgrelaties, tot op een bepaalde hoogte kunnen formuleren zonder zo'n keuze te hoeven maken. Op het niveau van de algebra betekent achtergrondsonafhankelijkheid dus niet dat de ruimtetijdachtergrond *dynamisch* is, maar veeleer dat we de algebra kunnen beschrijven zonder een specifieke achtergrond te kiezen, waardoor de ruimtetijdstructuur dus compleet *afwezig* is in de algebraïsche beschrijving. Deze vorm van achtergrondsonafhankelijkheid kan ook wel algebraïsche achtergrondsonafhankelijkheid worden genoemd.

De waarnemer en diens interne klokje

Het idee van algebraïsche achtergrondsonafhankelijkheid klinkt mooi. Maar er zijn nog een hoop haken en ogen aan het formuleren van zo'n theorie. Want als de ruimtetijdachtergrond 'afwezig' is – wat zijn we dan precies aan het beschrijven? Zoals ik al schreef willen we de operaties die de algebra vormen normaal gesproken interpreteren als *waarnemingen* die we kunnen doen. We beantwoorden dan bijvoorbeeld vragen zoals: 'wat is de positie van dit deeltje op tijdstip?' Maar als we geen ruimtetijdbeschrijving hebben, wat voor vragen moeten we dan stellen?

Verschillende natuurkundigen, waaronder recent ook de beroemde Edward Witten, hebben het idee geopperd dat we, wanneer we de ruimtetijdachtergrond weglaten, in plaats daarvan

waarnemingen direct aan een waarnemer moeten relateren. Die waarnemer staat dan niet meer buiten het systeem dat wordt geobserveerd, zoals dat vaak in de natuurkunde wordt verondersteld, maar maakt er zelf intrinsiek deel van uit. Misschien is dat sowieso logischer wanneer we over ons hele universum praten. In het lab kunnen we een systeem vaak erg goed isoleren, en vinden de interacties tussen de deeltjes die we meten op een zoveel kleinere schaal plaats dan die waarop wij leven, dat het realistisch is om te zeggen dat de onderzoeker zich op een 'oneindig grote' afstand van de deeltjes bevindt en met zijn aanwezigheid geen invloed uitoefent op het systeem zelf. Wanneer we het echter hebben over het heelal, dan kunnen we niet meer zeggen de waarnemer zich *buiten* het universum bevindt: het universum bevat immers per definitie alles wat er is. Daarnaast moeten we er in de beschrijving van zwaartekracht rekening mee houden dat de waarnemer zelf ook een massa heeft, en daarmee dus een invloed uitoefent op het systeem dat we willen observeren – zeker omdat zwaartekracht een kracht is die over grote afstanden werkt, zodat een waarnemer dus theoretisch ook invloed uitoefent op het *hele* universum. Het lijkt dan dus niet heel realistisch om de waarnemer weg te laten.

Het voordeel van het expliciet erbij betrekken van de waarnemer is dat we nu, in plaats van het beschrijven van waarnemingen aan de hand van hun plaats en tijd in referentie tot een achtergrond, de waarnemingen direct kunnen relateren aan de waarnemer zelf. De algebra die we formuleren kan dan worden geïnterpreteerd als een beschrijving van de waarnemingen die die specifieke waarnemer kan doen.



Ieder een eigen klokje. Elke waarnemer heeft voor zichzelf een duidelijk begrip van tijd. Deze tijd is niet voor alle waarnemer hetzelfde, maar elke waarnemer heeft zijn eigen interne klok die aangeeft welk dimensie deze als de tijdsdimensie ervaart. Afbeelding [via Peakpx](#).

Elke waarnemer heeft namelijk diens eigen interne klokje, en komt dus met diens eigen begrip van tijd – oftewel diens eigen manier van loskoppelen van tijd en ruimte, net zoals wijzelf ook allemaal duidelijk één tijd ervaren die zich onderscheidt van de ruimtedimensies. Dat interne klokje is zeker niet perfect, want het duidt niet een tijd aan die voor ons allemaal hetzelfde is. Ieder voor zich heeft echter in diens eigen ervaring een duidelijk idee van de volgorde van gebeurtenissen – en dat is precies wat we nodig hebben als basis voor de oorzaak-gevolgrelaties die de algebra moet beschrijven. Elke waarnemer zal een bepaald pad door de ruimtetijd volgen. De interne klok van de waarnemer kan worden gebruikt om punten langs dat pad te markeren met een bepaalde tijd. De algebra beschrijft dan waarnemingen langs dat pad die beantwoorden aan vragen zoals: ‘wat is de kans dat we de aanwezigheid van een deeltje meten op tijd t , of juist op $t + \Delta t$?’ Dit is nu dus niet meer een tijd die afhangt van de ruimtetijdachtergrond – een soort absolute klok die voor het hele universum geldt – maar juist een die overeenkomt met het interne klokje, en dus de directe tijdservaring van de waarnemer zelf. Op deze manier kunnen we voor elke waarnemer diens eigen algebra van

waarnemingen formuleren langs het pad dat deze volgt, zonder in die formulering iets vast te hoeven leggen over de achtergrond waarin de waarnemer zich beweegt.

De ideeën over algebraïsche achtergrondsonafhankelijkheid die ik in dit artikel besproken heb staan nog in de kinderschoenen, en het moet nog worden gezien of en onder welke voorwaarden achtergrondsonafhankelijke algebra's het ons bekende ruimtetijdplaatje kunnen reproduceren en daadwerkelijk quantumzwaartekrachteffecten kunnen coderen. De recente ontwikkelingen zijn echter veelbelovend en bouwen voort op inzichten die de afgelopen jaren zijn opgedaan in [holografie](#) en [informatietheorie](#). Het idee dat we, wanneer we variabelen niet ten opzichte van een ruimtetijdachtergrond kunnen definiëren, iets anders nodig hebben om de variabelen aan te relateren, lijkt logisch - en aangezien we uiteindelijk mogelijke waarnemingen willen beschrijven, is het misschien wel een intuïtieve uitkomst om de waarnemer zelf als ankerpunt te nemen. Zo komt de natuurkundige uiteindelijk toch zichzelf tegen in de natuurkunde.