

Wat is ruimte, wat is tijd?

Honderd jaar geleden veranderde Einstein ons begrip van ruimte en tijd volledig. Volgens natuurkundige Jan Pieter van der Schaar is er een nieuwe theoretische revolutie op komst, die de ware aard van ruimte, tijd en zwaartekracht verder zal blootleggen.



Afbeelding 1. Wat is ruimte, wat is tijd? Als we op quantschaal kijken kunnen ruimte en tijd er wel eens heel anders kunnen uitzien dan in ons dagelijks leven. Afbeelding: [Michael](#).

Het onderstaande artikel van Jan Pieter van der Schaar werd op 15 december 2015 gepubliceerd in [New Scientist Weekend](#). Quantum Universe dankt de auteur en de redactie voor de toestemming om het artikel op onze site te plaatsen.

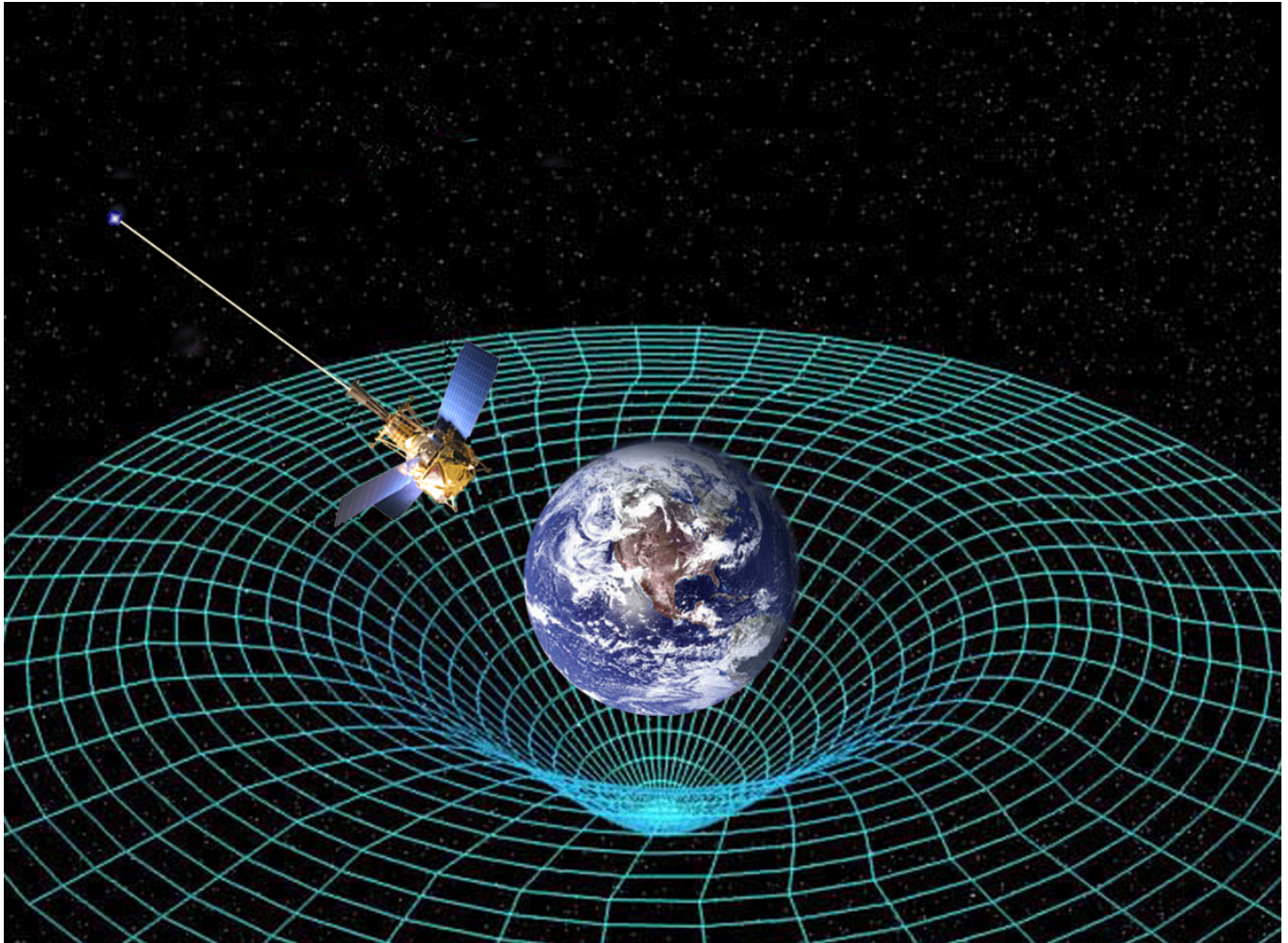
Wat is ruimte, wat is tijd? Het klinkt als een eenvoudige vraag: de ruimte tussen twee objecten komt overeen met de afstand (die je kunt meten met een lineaal), en de tijd tussen

twee gebeurtenissen meet je met een klok. En iedereen zal het toch eens zijn over de afstand en tijd tussen twee gebeurtenissen? Niet dus! Einstein ontdekte 100 jaar geleden dat ruimte en tijd niet slechts een onveranderlijk podium zijn waarop alles zich afspeelt, maar dat ze actief meedoen en zich afhankelijk van de waarnemer verschillend kunnen manifesteren. Dit alles is het gevolg van twee belangrijke observaties: dat de snelheid van het licht constant is en dat zwaartekracht niet te onderscheiden is van versnelling. Dat laatste impliceert dat zwaartekracht kan worden opgeheven door vrij te vallen.

Van zwaartekracht naar quantumzwaartekracht

Met recht kan Einstein's algemene relativiteitstheorie worden beschouwd als een absoluut hoogtepunt in de theoretische fysica. Op basis van een helder fysisch principe (equivalentie tussen versnelling en zwaartekracht) en gebruikmakend van verfijnde wiskundige technieken, leidde hij een set prachtige vergelijkingen af die de zogenaamde kromming van de ruimte en tijd relateren aan de hoeveel energie en materie. Bij kleine snelheden en massa's komen de uitkomsten keurig overeen met Newtons zwaartekrachtswet, maar Einsteins theorie voorspelt correcties daarop die tot nu toe alle experimentele toetsen hebben doorstaan. Toch mankeert er iets aan de theorie en dat heeft te maken met dat andere fundament van de natuurkunde: de quantummechanica.

De quantummechanica leert ons dat het universum op microscopische schaal bizarre eigenschappen heeft. Deeltjes lijken zich op verschillende plekken tegelijkertijd te kunnen bevinden en we kunnen slechts de *kans* voorspellen op een bepaalde uitkomst van een experiment. De wereld van elementaire deeltjes lijkt ongrijpbaar en onzeker. Alles wat niet verboden gebeurt, met een door de vergelijkingen bepaalde waarschijnlijkheid. Hoe absurd ook, de quantummechanische regels zijn keer op keer bevestigd in een veelheid aan experimenten. De klassieke, voorspelbare wereld, die zich in ons dagelijks leven aan ons presenteert en waar onze intuïtie op is gebaseerd, is slechts een (nog altijd niet volledig begrepen) benadering van de quantummechanica voor macroscopische objecten.



Afbeelding 2. Gekromde ruimtetijd. Volgens de relativiteitstheorie van Einstein moeten we zwaartekracht zien als een kromming van de ruimtetijd. Maar hoe zit het als we ook de quantummechanica in het verhaal betrekken? Afbeelding: NASA.

De quantummechanische regels zouden universeel moeten zijn, maar begrip van de werking ervan is tot nu toe beperkt gebleven tot het microscopische gedrag van deeltjes en de krachten tussen die deeltjes. De algemene relativiteitstheorie zegt dat de structuur van ruimte en tijd bepaald wordt door de verdeling van materie en energie. Op microscopische schaal gedragen materie en energie, oftewel deeltjes en krachten, zich quantummechanisch, en de vraag is dus: wat is het quantummechanische equivalent van ruimte en tijd? De quantummechanica leert ons dat krachten en deeltjes in ondeelbare eenheden worden uitgewisseld, en dat alleen de *kans* op een bepaalde uitkomst kan worden voorspeld. Een standaard technische procedure die de klassieke vergelijkingen van Einstein omtovert in een quantummechanische versie, gebruikmakend van ondeelbare eenheden van ruimte en tijd en met waarschijnlijkheden als uitkomst, leidt echter tot funeste inconsistenties die de theorie

onbruikbaar maken. De ware quantummechanische aard van ruimte en tijd, en daarmee ook van zwaartekracht, lijkt zich daarmee aan het zicht te onttrekken.

Doordat de typische zwaartekracht tussen elementaire deeltjes zo klein is in vergelijking met andere krachten, vinden de verwachte quantummechanische effecten plaats op ongelooflijk kleine afstanden en tijden, ver voorbij de huidige experimentele limieten. Het heeft er dus alle schijn van dat de quantumversie van de algemene relativiteitstheorie voorlopig het terrein blijft van theoretische gedachte-experimenten, die overigens wel van het grootste belang zijn voor het begrijpen van zwarte gaten en de ultieme oorsprong van het heelal. De vooruitgang in de laatste 10 jaar is echter zodanig dat mijn verwachting is dat er binnen afzienbare tijd een doorbraak plaats zou kunnen vinden die onze ideeën over ruimte, tijd en zwaartekracht voor altijd zullen veranderen.

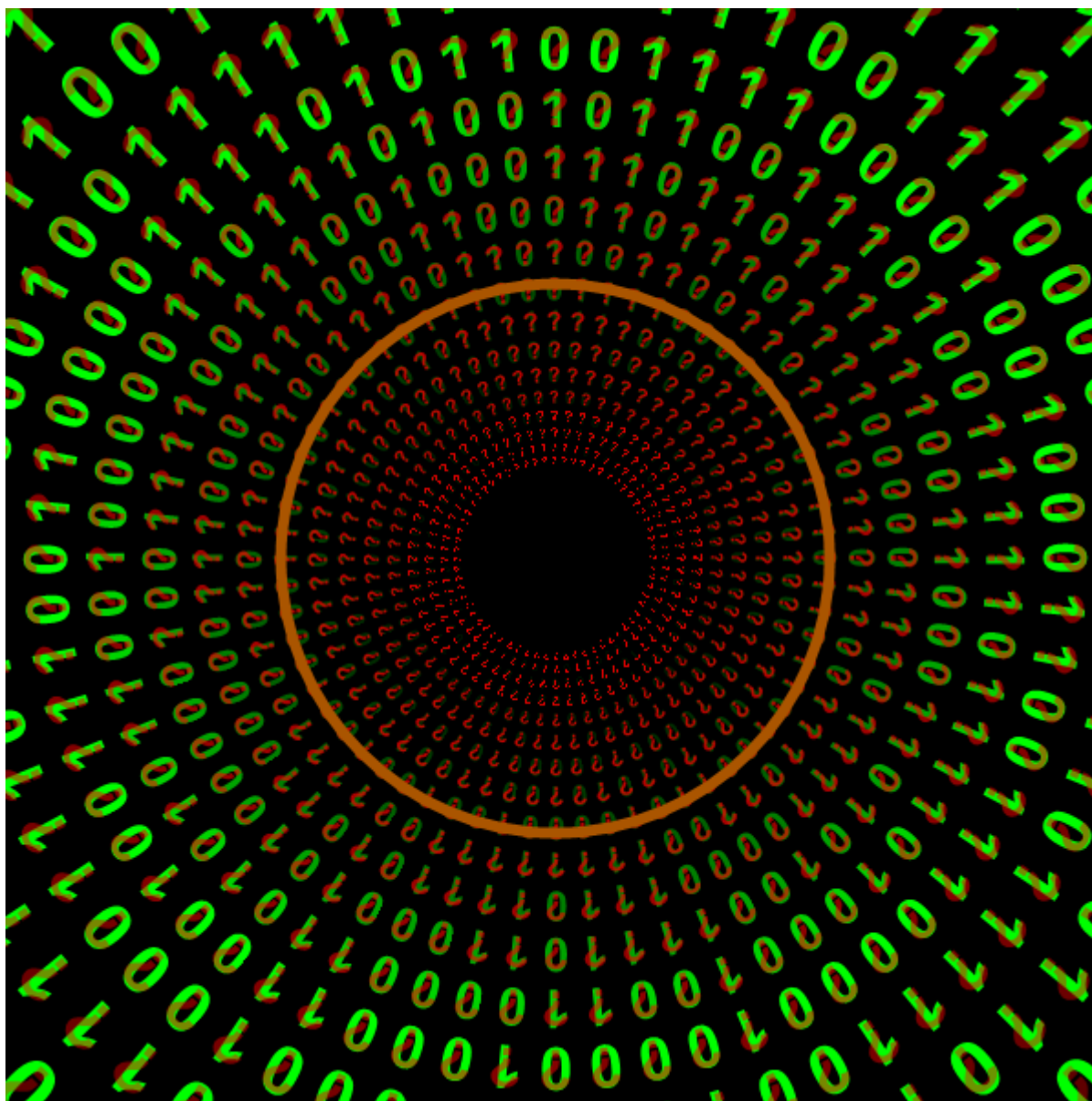
Snaren en verder

Zoals al aangegeven leidt de standaardprocedure voor een quantummechanische versie van de algemene relativiteitstheorie tot absolute nonsens. Wat de theorie ons lijkt te zeggen is dat op microscopische schaal een nieuwe structuur bestaat die niet kan worden afgeleid uit de (klassieke) aard van ruimte en tijd op macroscopische schaal. Er zijn dus nieuwe ingrediënten nodig om microscopische ruimte en tijd te kunnen vatten. Een eerste poging daartoe was en is de snaartheorie, die op de allerkleinste schalen een trillend snaartje als nieuw ingrediënt toevoegt. Het interessante gevolg is dat alle deeltjes en krachten, inclusief zwaartekracht, onvermijdelijk onderdeel zijn van de theorie. Een zeer aantrekkelijk idee, maar een belangrijke tekortkoming is dat snaartheorie alleen geformuleerd en begrepen is wanneer de zwaartekrachtseffecten klein zijn. De nieuwe microscopische structuur aangeleverd door snaartheorie lijkt daarmee slechts een deel van de oplossing.

Wat ontbreekt er nog? Via snaartheorie werd in de late jaren '90 ontdekt dat er een precieze relatie bestaat tussen een zwaartekrachtstheorie in een negatief constant gekromde ruimte-tijd in vijf dimensies, en een generalisatie van de sterke kernkracht in vier dimensies.

Oftewel: een consistente quantumtheorie *zonder* zwaartekracht in vier dimensies is in staat om een theorie *met* zwaartekracht te beschrijven in vijf dimensies, door gebruik te maken van een woordenboek dat de resultaten in de vierdimensionale theorie vertaalt naar de vijfdimensionale theorie. Dit concrete voorbeeld van het holografische principe, waarvan al

langer werd vermoed dat het een belangrijke eigenschap is van een quantumtheorie van zwaartekracht, heeft ons inmiddels een schat aan nieuwe inzichten gegeven over de mogelijke microscopische structuur van ruimte en tijd. Een quantummechanische generalisatie van informatie lijkt hierin een cruciale rol te spelen. Het heeft er alle schijn van dat de informatie opgeslagen in de quantummechanische toestanden van deeltjes en krachten op macroscopische schaal kan leiden tot een klassieke, gladde ruimte-tijd zoals beschreven door de algemene relativiteitstheorie van Einstein. Dit suggereert dat ruimte en tijd op microscopische schaal hun betekenis verliezen en slechts emergente begrippen zijn. Ruimte en tijd, en daarmee zwaartekracht, zijn wellicht slechts boekhoudkundige constructies die de verdeling en stroom van informatie, opgeslagen in de quantummechanische toestanden van deeltjes en krachten, bijhouden.



Afbeelding 3. Gekromde ruimtetijd en informatie. Wellicht moeten we, om de ruimtetijd op de allerkleinste schaal écht te begrijpen, de kromming daarvan wel interpreteren als een gevolg van quantum-informatie.

Een belangrijke groep theoretisch natuurkundigen houdt zich op dit moment bezig met dit soort revolutionaire gedachten over de quantummechanische structuur en betekenis van ruimte en tijd. De grootste uitdaging is om deze sterke aanwijzingen om te vormen tot een concrete en universele beschrijving van quantummechanische ruimte en tijd – en om die theorie vervolgens te gebruiken om de grote vragen rondom zwarte gaten en de ultieme oorsprong van ons heelal op te lossen. Zover is men helaas nog niet. De ingrediënten lijken echter voor een belangrijk deel bekend en het is nu wachten op de doorbraak: een uitgebalanceerd recept dat leidt tot een consistente en overtuigende beschrijving van quantumzwaartekracht. Daarmee zou de ware aard van ruimte en tijd eindelijk zijn ontsluitend. Ik kan niet wachten!

Maar lezen? Op deze site verschenen eerder uitgebreide dossiers over [quantumfysica](#), [relativiteitstheorie](#) en [snaartheorie](#), waarin heel veel achtergrondinformatie over de hier beschreven onderwerpen te vinden is.