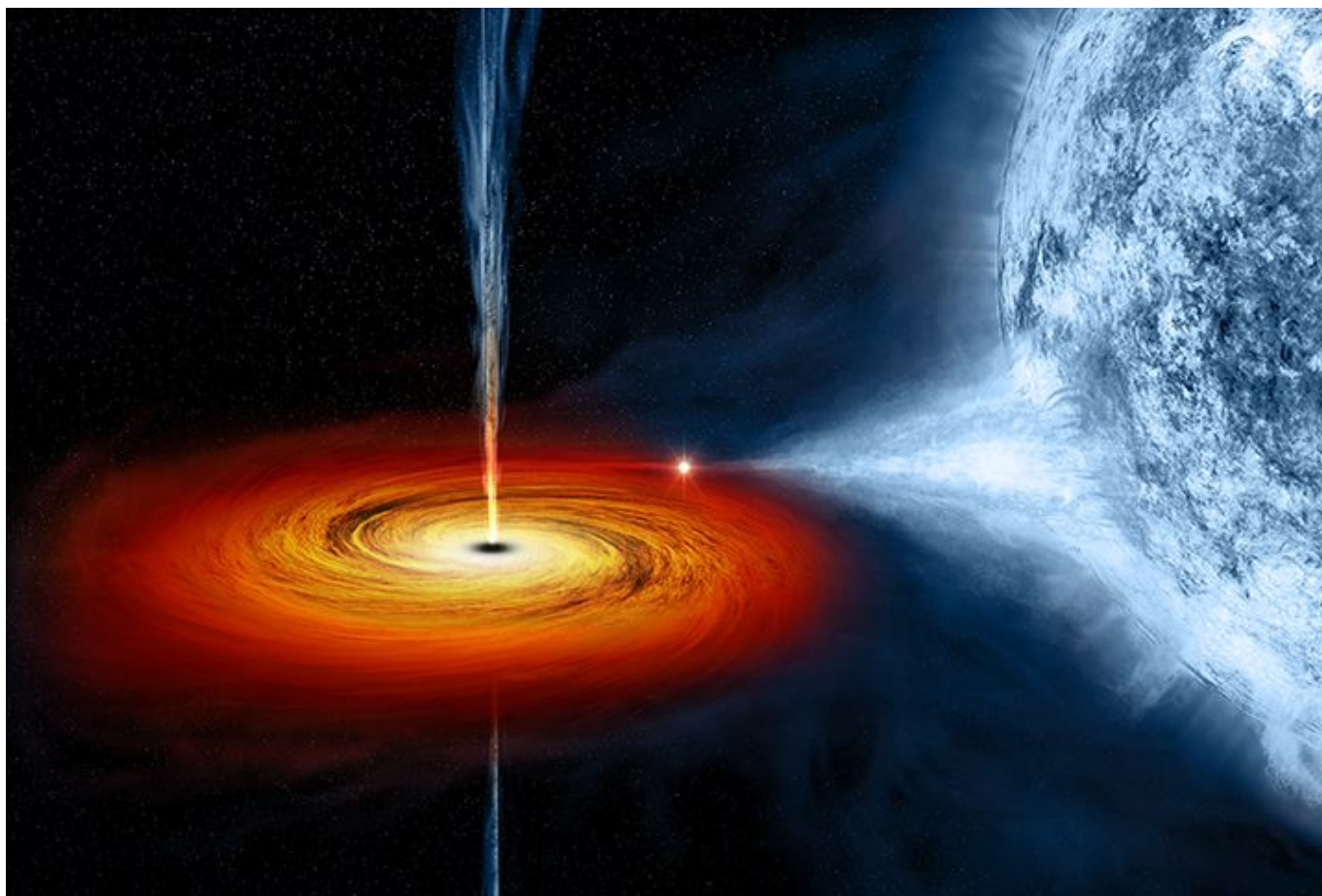


Wetenschapsagenda (1): ruimte, tijd en zwaartekracht

Sinds 2015 heeft Nederland een Nationale Wetenschapsagenda: een lijst van 140 vragen die het wetenschappelijk onderzoek in Nederland in de komende jaren een richting moeten geven. De komende maanden bespreken we zeven van deze vragen die goed bij de thema's van de Quantum Universe-website passen.

Vandaag:

[Wat is de ware aard van zwaartekracht, ruimte en tijd en wat kun je bijvoorbeeld leren van zwarte gaten?](#)



Afbeelding 1. Een zwart gat. Voor zaken die we nog niet begrijpen over ruimte, tijd en zwaartekracht zijn zwarte gaten de perfecte laboratoria – zowel voor de experimentator als voor de theoreet. Afbeelding: NASA.

Ruimte en tijd door de jaren heen

De eerste vraag uit de wetenschapsagenda die we behandelen is meteen een van de meest diepgaande uit de fundamentele natuurkunde. Al sinds de prehistorie vragen mensen zich van alles af over de ruimte en de tijd. Wat is tijd eigenlijk? Houdt de ruimte ergens op? Heeft het heelal altijd al bestaan, of is het ooit begonnen?

Tot ongeveer honderd jaar geleden was het zo dat bovenstaande vragen gingen over het *toneel* waarop de natuurkunde zich afspeelt. Ruimte wordt gezien als iets onveranderlijks waarbinnen alle andere natuurkunde plaatsvindt. Voor tijd gold iets soortgelijks: de ruimte bestaat op elk tijdstip, en terwijl de tijd loopt, veranderen de eigenschappen van objecten in de ruimte: hun plaats, temperatuur, energie, enzovoort. Het doel van de natuurkunde was om verschijnselen te beschrijven die zich afspelen binnen dat vaste kader van ruimte en tijd.

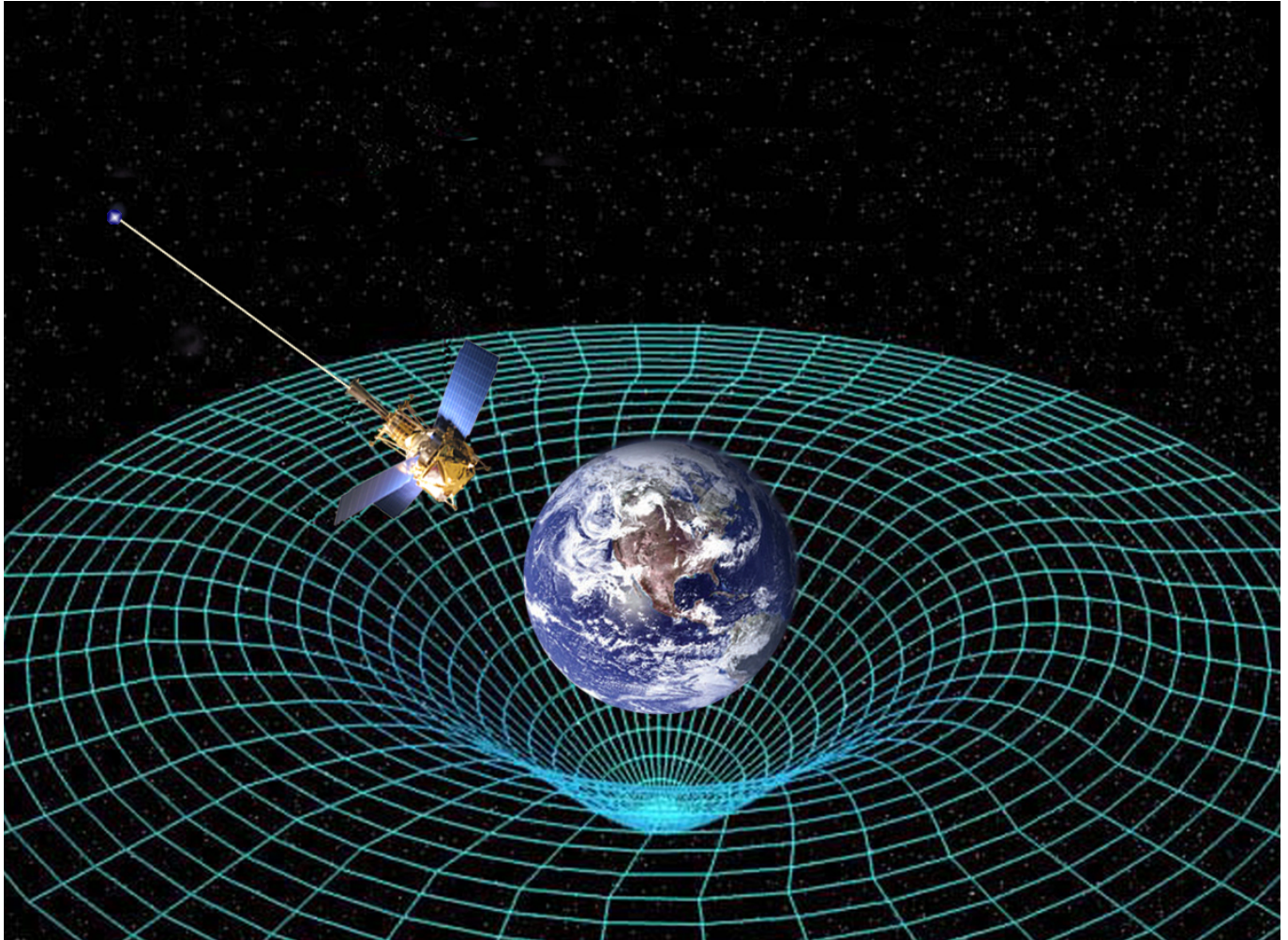
Sinds het begin van de twintigste eeuw weten we dat de werkelijke situatie heel anders is dan men altijd gedacht had. In zijn [relativiteitstheorie](#) liet Albert Einstein zien dat ruimte en tijd *zelf* natuurkundige grootheden zijn – geen onveranderlijk toneel, maar “spul” dat allerlei dynamische eigenschappen heeft

Zo is tijd in Einsteins beschrijving [geen absolute kosmische parameter meer](#), maar een grootheid die verschillende waarnemers op een verschillende manier kunnen waarnemen. Als mijn Zwitserse zakhorloge perfect één keer per seconde tikt, is het volgens de relativiteitstheorie prima mogelijk dat u, als u maar snel genoeg beweegt, dat horloge maar eens per anderhalve seconde ziet tikken.

Voor ruimte [geldt iets soortgelijks](#): een lineaal van een meter lengte die ik bij me heb, kan voor u, als u langs komt zoeven met een forse fractie van de lichtsnelheid, bijvoorbeeld een lengte van maar 80 centimeter hebben. Noch over afstanden, noch over tijden, hoeven verschillende waarnemers het dus eens te zijn.

Over één ding zijn alle waarnemers het wel eens: hoe ze de ruimte en de tijd ook zien, de hoeveelheid ruimte die een *lichtsignaal* in een seconde doorkruist zal [altijd een kleine](#)

[300.000 kilometer zijn](#). In de wankelende wereld van ruimte en tijd biedt een *snelheid*, de lichtsnelheid, ons dus nog enig houvast. Einstein leidde uit dat gegeven af dat het het beste is om ruimte en tijd samen als één vierdimensionaal geheel te zien: de ruimtetijd. Verschillende waarnemers kunnen die ruimtetijd op verschillende manieren indelen in ruimte en tijd, maar dat gebeurt altijd op zo'n manier dat de lichtsnelheid hetzelfde blijft.



Afbeelding 2. Kromme ruimtetijd. Ruimte en tijd vormen niet alleen één geheel, ze worden door zware massa's ook nog eens gekromd. Afbeelding: NASA.

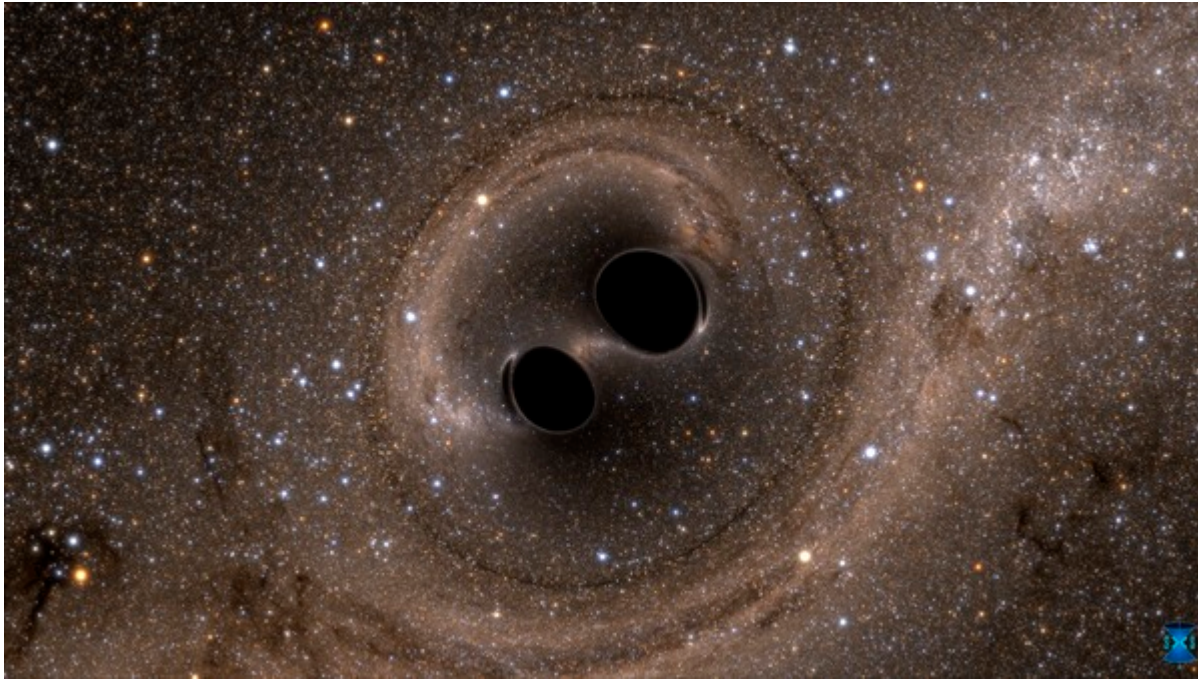
Einstein ging nog verder. Het geheel van de ruimtetijd was voor hem geen rigide toneel; niet alleed de achtergrond waartegen de rest van de natuurkunde zich afspeelt. Nee, de ruimtetijd doet zelf volop mee in natuurkundige processen. Ruimtetijd hoeft bijvoorbeeld niet vlak te zijn, maar kan door zware massa's zoals sterren en planeten [vervormd en gekromd](#) worden.

Op die manier kwam via een achterdeur ook de *zwaartekracht* het verhaal binnen. Einsteins interpretatie was namelijk dat we gekromde ruimtetijd ervaren als zwaartekracht. Wie door de gekromde ruimtetijd een zo recht mogelijke baan volgt, komt uiteindelijk toch steeds dichterbij zware sterren en planeten uit – precies de aantrekking die wij als zwaartekracht ervaren! Zwaartekracht, een kracht die altijd een geheel eigen status had gehad, werd zo opeens een integraal onderdeel van ons begrip van twee heel andere natuurkundige verschijnselen: ruimte en tijd.

Open vragen

Is met de relativiteitstheorie nu alles over ruimte, tijd en zwaartekracht bekend? Zeker niet! Ten eerste moet, zelfs honderd jaar na het bedenken ervan, de relativiteitstheorie nog op allerlei fronten grondig getest worden. Tot voor kort wisten we bijvoorbeeld alleen zeker dat Einsteins voorspellingen klopten in gevallen waarin de ruimtetijd maar mild gekromd is: rond sterren, planeten en sterrenstelsels. Om de theorie bij sterkere kromming dan dat te testen, moet bijvoorbeeld naar zwarte gaten gekeken worden – maar “kijken” naar zwarte gaten is natuurlijk per definitie erg lastig: ze zijn immers zwart!

Pas vorig jaar werd dit probleem echt opgelost, toen het LIGO-experiment de [eerste zwaartekrachtgolven van botsende zwarte gaten waarnam](#). Door niet met gewoon licht maar met zwaartekracht zelf te “kijken”, kon voor het eerst een proces bij een dergelijke gigantische ruimtetijdromping worden waargenomen. Einsteins theorie doorstond deze test op voorstellijke wijze, maar na één test zijn natuurkundigen natuurlijk nog niet tevreden. We zullen de komende jaren, zowel met zwaartekrachtgolven als waar mogelijk ook met andere middelen, de ideeën van Einstein in extreme omstandigheden moeten blijven testen. Veelbelovend zijn in dat opzicht ook de pogingen om de zwarte gaten in de kernen van ons eigen melkwegstelsel en onze naaste buren [met “gewoon” licht beter te bestuderen](#).



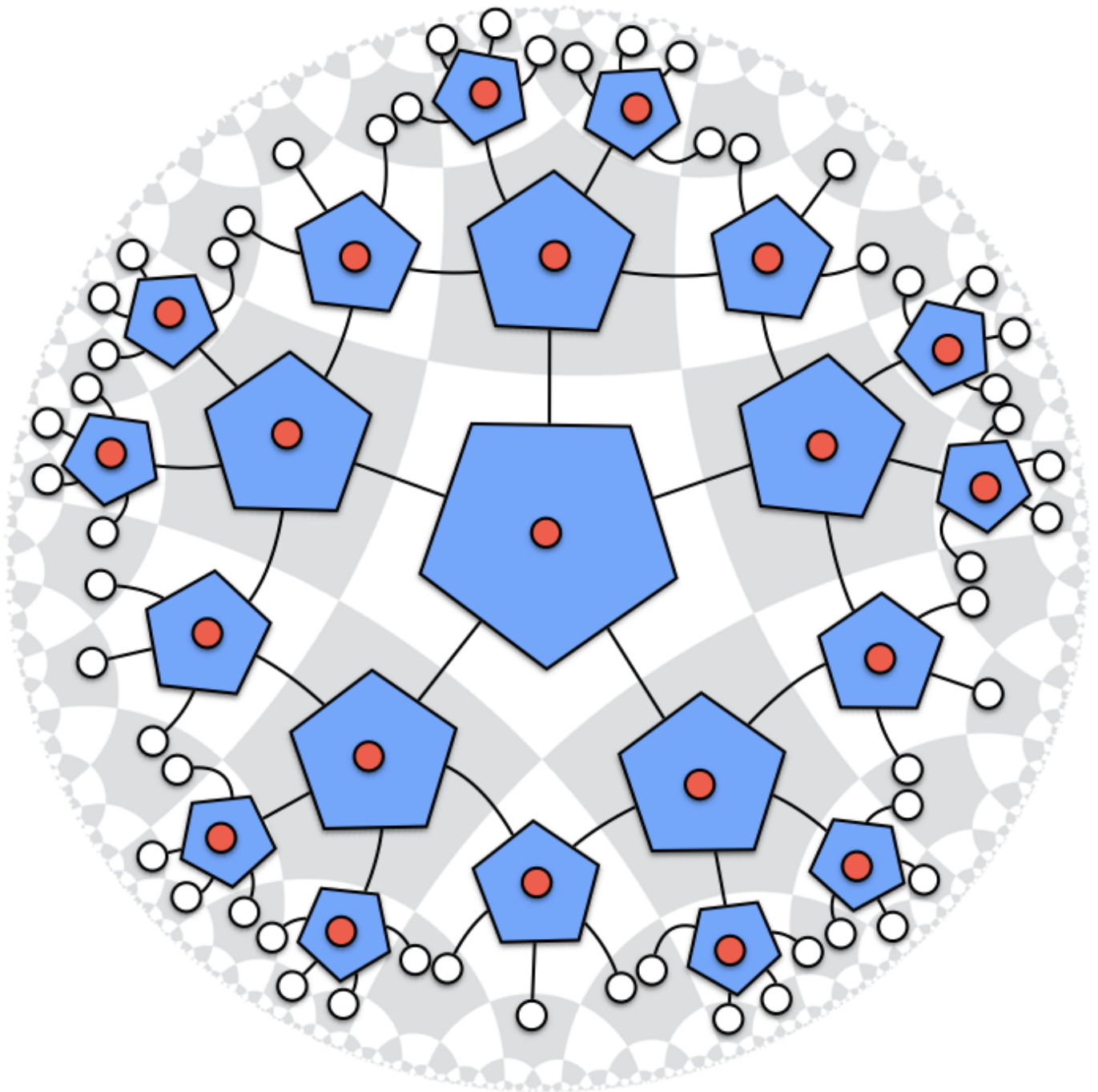
Afbeelding 3. Samensmeltende zwarte gaten.Een samensmelting van zwarte gaten - de ultieme test voor de relativiteitstheorie - werd vorig jaar door LIGO voor het eerst waargenomen. Afbeelding: LIGO.

Een ander gebied waarop nog heel veel onbekend is over ruimte, tijd en zwaartekracht, is op de allerkleinste schaal: die van de quantummechanica. Wat we zeker weten, is dat op die allerkleinste schaal de wetten van Einstein strijdig zijn met die van de quantummechanica. Ten minste één van de twee theorieën zal dus aangepast moeten worden voor we de ruimte en de tijd volledig begrijpen. De schaal waarop dit gebeurt valt overigens nog ver buiten ons experimentele kunnen, dus vooralsnog is dit het terrein van de theoretisch fysici, die proberen aan de hand van extrapolatie en wiskundige consistentie de mogelijke beschrijvingen van de sub-microscopische ruimtetijd in kaart te brengen. Ook hier spelen [zwarte gaten](#) weer een belangrijke rol: ook voor de theoreticus zijn dit de ideale “laboratoria” om nieuwe ideeën op te testen.

Eén mogelijke beschrijving van de combinatie van quantummechanica en relativiteit, en vooralsnog de meest succesvolle, is de [snaartheorie](#). Dat model begon ooit vanuit de aanname dat de elementaire deeltjes in ons heelal de vorm hebben van kleine trillende snaartjes, maar is een halve eeuw later uitgegroeid tot een veel breder raamwerk waarbinnen allerlei ideeën rond ruimtetijd en quantumzwaartekracht een rol spelen. Zo is er het idee van [holografie](#): het kunnen beschrijven van quantumzwaartekracht in een bepaald aantal dimensies met behulp van een “duale” theorie zónder zwaartekracht in een heel

ander aantal dimensies. Op het eerste gezicht een zuiver wiskundige truc, maar wel een heel behulpzame: met holografie kunnen natuurkundigen namelijk zaken die ze nog *niet* begrijpen over quantumzwaartekracht “vertalen” naar andere modellen die ze *wel* begrijpen.

Eén van de lessen die holografie ons geleerd heeft, is bijvoorbeeld dat in de beschrijving van ruimte en tijd op de allerkleinste schaal het begrip informatie (of in nettere termen: [entropie](#)) een cruciale rol speelt. Het lijkt erop dat ruimte en tijd zelf ontstaan uit de verdeling van informatie over de verschillende vrijheidsgraden in het heelal. Klinkt vaag? Dat is het niet alleen voor u, maar ook nog voor de natuurkundigen. Dát er belangrijke relaties tussen ruimte, tijd, zwaartekracht en informatie bestaan, is duidelijk, maar hoe die relaties er precies uit zien en wat voor gevolgen ze hebben is een open vraag waarnaar zeer actief onderzoek wordt gedaan. Een van de onderzoekers die dit doet is de Nederlandse fysicus Erik Verlinde, wiens werk aan de zogeheten [emergente zwaartekracht](#) de afgelopen maanden uitgebreid in het nieuws is geweest. Volgens Verlinde leidt een goed begrip van de relatie tussen ruimtetijd en informatie direct tot allerlei nieuwe resultaten, zoals een beter begrip van de vraag wat de [donkere materie](#) in het heelal eigenlijk is, en of die donkere materie überhaupt wel bestaat.



Afbeelding 4. Informatie, ruimte en tijd. De verdeling van de informatie over verschillende vrijheidsgraden in het heelal zou uiteindelijk moeten bepalen hoe de ruimte en de tijd eruit zien. Afbeelding afkomstig uit 'Holographic quantum error-correcting codes' van F. Pastawski, B. Yoshida, D. Harlow en J. Preskill.

Daarmee gaan we bijna naadloos over op de tweede vraag uit de wetenschapsagenda die we zullen bespreken:

[Wat is donkere materie en wat is donkere energie?](#)

Over die vraag binnenkort op deze website dus nog veel meer. Voor nu houden we het echter bij de ruimte en de tijd zelf, want ondanks dat we met zijn allen al millennia lang aan die begrippen gewend zijn, valt ook daarover nog meer dan genoeg te vragen en te onderzoeken.