

# *Over de oorsprong van ruimte en zwaartekracht*

Masterscriptie Theoretische Natuurkunde  
Universiteit van Amsterdam – Instituut voor Theoretische Fysica  
Geschreven door Manus Visser  
Begeleiding door prof. dr. Erik Verlinde

## **Populairwetenschappelijke samenvatting**

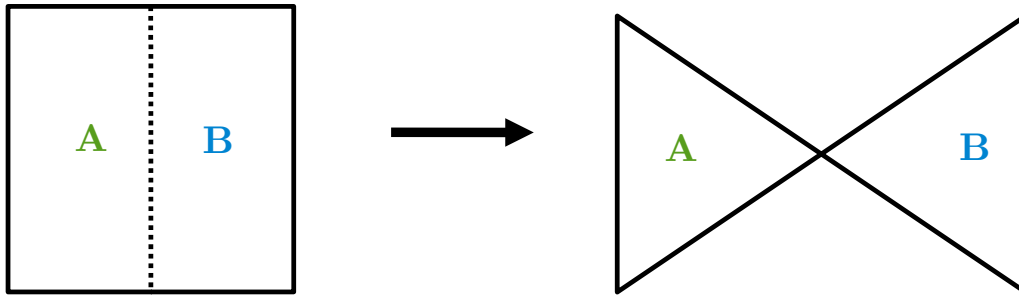
Heb je je wel eens afgevraagd waarom water bij kamertemperatuur een vloeistof is, en geen gas? Het is welbekend dat water uit  $\text{H}_2\text{O}$ -moleculen bestaat. Bij kamertemperatuur zijn deze watermoleculen met elkaar verbonden door zogeheten waterstofbruggen. Deze verbinding is zo sterk dat de watermoleculen *samen* een vloeistof vormen. Bij een temperatuur hoger dan 100 graden, daarentegen, breken de waterstofbruggen, en zwerven de moleculen los in de ruimte. In dat geval vormen de moleculen een gas, namelijk waterdamp.

We zien dus dat op kleine schaal “water” er anders uitziet dan op grote schaal. Op kleine schaal bestaat water uit moleculen met lege ruimte ertussen, terwijl op grote schaal water vloeibaar, of beter gezegd, “continu verbonden” is. Hiermee bedoelen we dat er in principe geen lege ruimtes aanwezig zijn in een bad met water – op een paar luchtbellen na dan. Dit lijkt wellicht een triviale observatie – we kunnen immers zwemmen in water zonder grote obstakels tegen te komen waar “geen water” is – maar als je je bedenkt waar water uit bestaat (moleculen met veel lege ruimte ertussen), dan is dit juist heel wonderlijk.

Deze continue verbondenheid van water is een voorbeeld van *emergentie*. Emergentie is simpel gezegd het fenomeen dat op grote schaal er nieuwe eigenschappen optreden die op kleine schaal niet aanwezig zijn. Een ander voorbeeld van emergentie is temperatuur. Temperatuur is een maat voor de gemiddelde snelheid van een heleboel moleculen. We kunnen dus niet zeggen dat één molecuul een temperatuur heeft. We kunnen pas een temperatuur meten als we heel veel moleculen samennemen – grofweg  $10^{23}$  moleculen of meer. Kortom, temperatuur emergeert uit de gezamenlijke interactie van moleculen, die op zichzelf genomen geen temperatuur hebben. De natuurkundige en Nobelprijs winnaar Phil Anderson heeft het fenomeen emergentie daarom samengevat met de slogan “More is different”. *Een heleboel moleculen samen* geven aanleiding tot *andere* eigenschappen, zoals temperatuur – en zelfs andere natuurwetten, zoals we straks zullen zien.

In deze scriptie stel ik een soortgelijke vraag over *ruimte*: waarom is de ruimte om ons heen continu verbonden? De analogie tussen ruimte en water is zeer treffend: net als je in water kunt zwemmen, kun je door de ruimte heenlopen, of zweven, zonder plekken tegen te komen waar “geen ruimte” is. Bij water kun je je nog iets voorstellen bij een plek “waar geen water is”, omdat er ook luchtbellen in water voorkomen. Maar ruimte is zoiets vanzelfsprekends dat we ons niet kunnen voorstellen dat het er niet is.

Recentelijk zijn er in de natuurkunde aanwijzingen gevonden dat de verbondenheid van ruimte, net als de verbondenheid van water, emergent is. Dat wil zeggen dat op een fundamenteel niveau ruimte niet verbonden is. En een ruimte die niet verbonden is, kun je haast geen ruimte noemen. Maar als er op kleine schaal geen ruimte is, wat is dan de oorsprong van ruimte? Net zoals water uit  $\text{H}_2\text{O}$ -moleculen bestaat, verwachten we dat ruimte ook uit kleinere bouwstenen is opgebouwd.



Figuur 1: Gedachte-experiment.

In mijn scriptie heb ik een bepaald voorstel onderzocht voor deze bouwstenen van de ruimte. Om dit voorstel te begrijpen moet ik eerst een ander begrip introduceren: *verstren- geling*. Verstregeling is een belangrijk fenomeen uit de kwantummechanica – de theorie van de fundamentele deeltjes – waarbij twee of meer deeltjes zodanig zijn verbonden, dat het ene deeltje niet meer volledige beschreven kan worden zonder het andere deeltje te noemen. Twee deeltjes kunnen in de kwantumwereld (d.w.z. op een schaal van ongeveer  $10^{-10}$  m of kleiner) zo sterk met elkaar verstrengeld zijn dat een meting aan het ene deeltje invloed heeft op de toestand van het andere deeltje. Daarbij hoeven zich deeltjes niet per se naast elkaar te bevinden; ze kunnen ook ruimtelijk van elkaar gescheiden zijn. Verstregeling wordt daarom ook wel een “niet-lokale kwantumcorrelatie” genoemd.

De Canadees Mark van Raamsdonk was de eerste natuurkundige die de verbondenheid van ruimte aan het begrip verstregeling koppelde. Zijn hypothese is dat de verbondenheid van ruimte emergeert uit de verstregeling van microscopische toestanden. Je kunt je de verstregeling als een soort lijm voorstellen die alle microtoestanden bij elkaar houdt. De lijm (vergelijkbaar met de waterstofbruggen tussen  $\text{H}_2\text{O}$ -moleculen) zorgt er uiteindelijk voor dat ruimte op macroniveau verbonden is.

Van Raamsdonks hypothese is een zeer kwalitatieve uitspraak, maar we kunnen haar ook kwantitatief maken. Van Raamsdonk baseerde zijn hypothese oorspronkelijk op een eenvoudige formule, die van toepassing is op de volgende situatie. Stel je voor dat we de ruimte (we nemen voor het gemak een vierkant) in twee gebieden opdelen  $A$  en  $B$ , zoals weergegeven in het linkerdeel van figuur 1. Dan geldt de volgende formule

$$S = \frac{\mathcal{A}}{4G_N}, \quad (1)$$

waarbij  $S$  een maat is voor de hoeveelheid verstregeling tussen de twee gebieden  $A$  en  $B$  (de zogeheten “verstregelingsentropie”),  $\mathcal{A}$  is de oppervlakte (“area”) die de twee gebieden scheidt, en  $G_N$  is de zwaartekrachtsconstante van Newton. Deze formule stelt dus een maat voor verstregeling (de verstregelingsentropie) gelijk aan een geometrische grootte (de oppervlakte). In mijn scriptie heb ik deze formule gecheckt voor een specifiek soort ruimte.

Laten we nu het volgende *gedachte-experiment* uitvoeren. Stel dat we de verstregelingsentropie  $S$  naar nul sturen, dan zegt deze formule dat de oppervlakte  $\mathcal{A}$  ook nul wordt. Oftewel het grensgebied dat  $A$  en  $B$  scheidt wordt een punt (aangezien een punt geen oppervlakte heeft). Deze situatie hebben we weergegeven in het rechterdeel van figuur 1. Het is duidelijk te zien dat de gebieden  $A$  en  $B$  van elkaar gescheiden zijn. Met andere woorden, als er geen verstregeling is tussen de ruimtes  $A$  en  $B$ , dan zijn ze niet met elkaar verbonden. We kunnen

dit ook omdraaien: als  $A$  en  $B$  wel verstrengeld zijn (en de verstrengelingsentropie  $S$  niet nul is), dan resulteert dat in de verbondenheid van de gebieden  $A$  en  $B$ . We concluderen dus dat de formule ons vertelt dat de verbondenheid van ruimte emergeert uit verstrengeling! Dit komt overeen met Van Raamsdonks hypothese.

To nu toe hebben we het alleen over ruimte gehad. Einsteins algemene relativiteitstheorie vertelt ons echter dat ruimte en zwaartekracht nauw met elkaar verbonden zijn. Kort gezegd, geeft de *kromming* van ruimte(tijd) aanleiding tot zwaartekracht. We hoeven dit hier niet precies te begrijpen. Het gaat er vooral om dat niet alleen ruimte, maar *ook zwaartekracht emergent blijkt te zijn*. Hiermee bedoelen we dat zwaartekracht, net als temperatuur, op fundamenteel niveau niet bestaat, en alleen verschijnt als een “thermodynamisch fenomeen” op grotere schaal. De belangrijkste aanwijzing voor de emergentie van zwaartekracht is dat de natuurwetten die zwaartekracht beschrijven (genaamd de “Einstein vergelijkingen”) equivalent zijn aan de wetten van de thermodynamica (die temperatuur, druk, warmte, et cetera beschrijven). Aangezien temperatuur en druk emergente grootheden zijn, wordt aangenomen dat zwaartekracht ook emergent is. In het tweede deel van mijn scriptie bestudeer ik waaruit zwaartekracht emergeert, oftewel wat de oorsprong van zwaartekracht is.

In een aantal zeer recente artikelen (van onder andere Van Raamsdonk) wordt de oorsprong van zwaartekracht gerelateerd aan de fysica van verstrengeling. Het blijkt dat Einsteins vergelijkingen ook equivalent zijn aan een bepaalde wet die verstrengeling beschrijft. Deze wet van verstrengeling stelt de verandering in verstrengelingsentropie gelijk aan de verandering in energie van een toestand. Het is interessant dat niet alleen deze verstrengelingswet nodig is om de Einstein vergelijkingen af te leiden, maar ook formule (1) die verstrengelingsentropie aan oppervlakte relateert. Formule (1) en de verstrengelingswet vormen samen de belangrijkste aannames voor de afleiding van de Einstein vergelijkingen. In hoofdstuk 5 van deze scriptie kan deze afleiding worden teruggevonden.

We concluderen dat de fysica van verstrengeling essentieel is voor de emergentie van ruimte en zwaartekracht. Ruimte, of beter gezegd oppervlakte, wordt gedefinieerd door de verstrengelingsentropie (formule 1). En zwaartekracht is grofweg het resultaat van het feit dat formule (1) altijd moet blijven gelden. Dat wil zeggen: als er een massa wordt geplaatst in de ruimte, dan wordt de ruimte zodanig gekromd dat formule (1) weer geldt. Deze afgemeten kromming van de ruimte resulteert in zwaartekracht. Kortom, de onveranderlijkheid van formule (1) geeft aanleiding tot zwaartekracht.

Daarmee neemt ons begrip van ruimte en zwaartekracht een andere wending dan Einstein ooit had kunnen vermoeden. Einstein noemde verstrengeling een *spukhafte Fernwirkung* (“spooky action at a distance”), omdat het de snelheidslimiet van informatieoverdracht leek te schenden. Het is ironisch te noemen dat nu juist dit fenomeen zo’n belangrijke rol speelt in de oorsprong van Einsteins theorie van zwaartekracht.