

Het moeras van de quantumzwaartekracht

Is er een theorie die alle fundamentele natuurkunde beschrijft? En als die er is, hoe zou die er dan uitzien? Dit zijn twee van de grote vragen waar natuurkundigen 's nachts wakker van liggen.

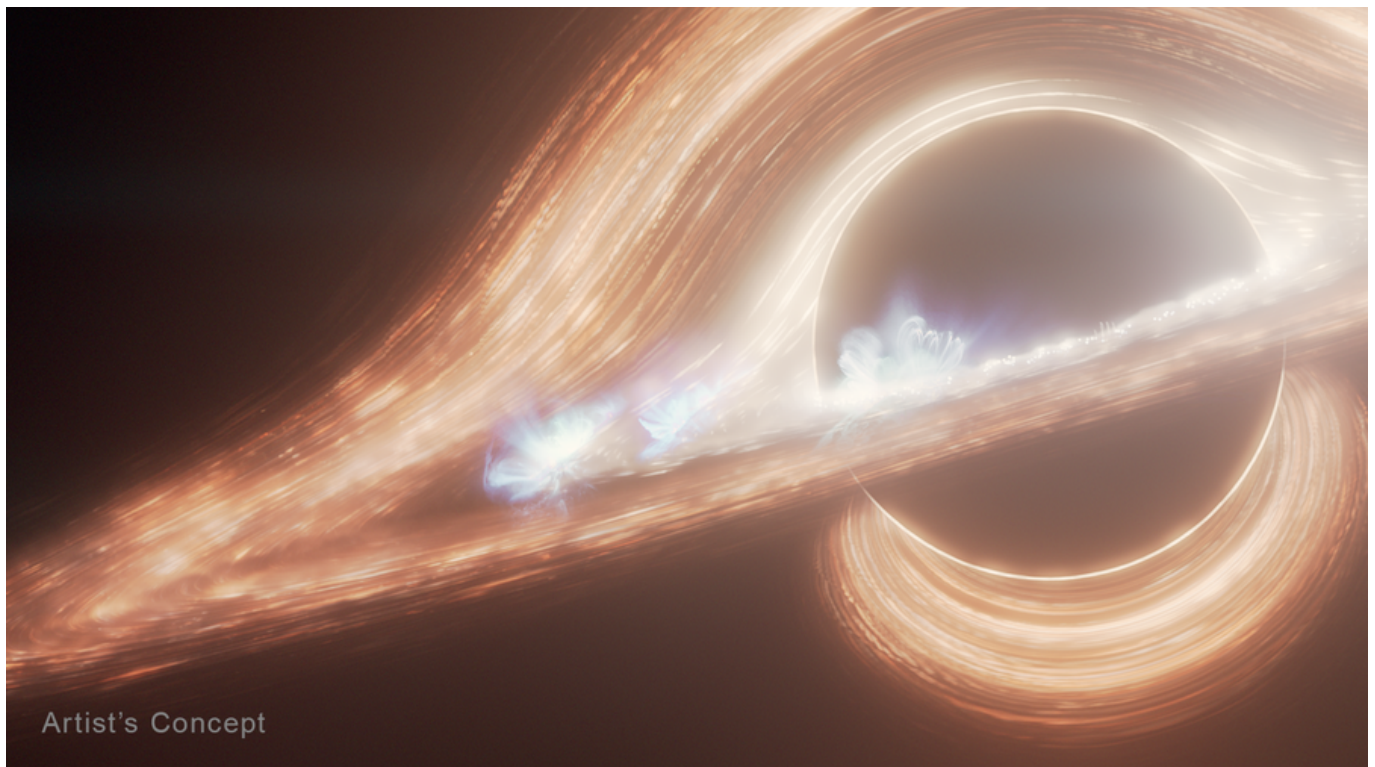


Foto van de *pillars of creation* gemaakt met de Hubble Space Telescope. Een kosmisch spektakelstuk waar onze twee theorieën samenkomen: de zwaartekracht vormt de

gigantische zuilen, terwijl diep binnenin quantummechanische processen zorgen voor de geboorte van nieuwe sterren. Bron: [NASA](#).

In de natuurkunde wordt onze kijk op de werkelijkheid voornamelijk bepaald door twee giganten: de [quantummechanica](#) en de [algemene relativiteitstheorie](#). De eerste theorie heerst over de wereld van het allerkleinste, zoals elektronen. De tweede, Einsteins meesterwerk, beschrijft het allergrootste en zwaarste, zoals de beweging van planeten en de kromming van de ruimte zelf.

De heilige graal van de moderne fysica is het verenigen van deze twee raamwerken. Je zou kunnen denken: “We voegen de formules gewoon samen, en klaar is Kees.” Maar de natuur laat zich niet zo makkelijk temmen. Het probleem is vergelijkbaar met het gebruiken van twee fundamenteel verschillende landkaarten. Stel je voor dat je een uiterst gedetailleerde plattegrond hebt van elke straatsteen in Amsterdam (quantummechanica), en een grove wegenkaart van heel Europa (relativiteitstheorie). Zolang je ze apart gebruikt, is er niets aan de hand. Maar wat als je aan een probleem werkt dat beide vereist?



Artist's impression van een zwart gat. Bron: NASA.

Die situatie vinden we bij [zwarte gaten](#). Hier wordt een enorme massa samengeperst, en dus is relativiteitstheorie van toepassing. Stephen Hawking ontdekte dat bij deze objecten iets

bijzonders gebeurt: [hawkingstraling](#). Zwarte gaten zijn niet helemaal zwart, maar ‘lekken’ energie in de vorm van deeltjes. Om dit proces volledig te beschrijven, moet je de quantummechanica combineren met de relativiteitstheorie. En daar gaat het mis: de schalen kloppen niet en de wiskunde geeft “onzin”-antwoorden.

We hebben dus een nieuwe, overkoepelende kaart nodig; dit wordt vaak [quantumzwaartekracht](#) genoemd en staat (als zo’n theorie ook alle andere natuurkrachten kan beschrijven) ook wel bekend als de “*Theory of Everything*”. Decennialang dachten natuurkundigen dat we door quantummechanica uit te breiden met zwaartekracht, een kloppend plaatje zouden krijgen. Hiervoor gebruiken we vaak een truc: we behandelen processen op extreem hoge energie los van wat er gebeurt bij lage energie. Dit staat bekend als een zogenaamde [effectieve veldentheorie](#) (EFT). Voor bijna de hele natuurkunde werkt dit idee geweldig. Ook bijvoorbeeld het [Standaardmodel](#) voor de deeltjesfysica kunnen we zien als een effectieve veldentheorie.

Helaas blijkt deze EFT-aanpak niet te werken voor de zwaartekracht. Om dit in te zien, gaan we terug naar de zwarte gaten. Hawking heeft namelijk een beroemde formule gevonden voor de [entropie](#) van een zwart gat:

$$S = \frac{A}{4}$$

Hierin is A de oppervlakte van het zwarte gat (een grootheid die je meet in de “macro-wereld”), en S is de entropie (een statistische grootheid die ontstaat in de “micro-wereld”). Preciezer: de entropie geeft een maat voor hoeveel microtoestanden er bestaan die we allemaal kunnen zien als dezelfde toestand op macroscopische schaal.

Denk aan een blokje ijs. De macrotoestand is het blokje zelf. De microtoestand is de specifieke positie van elk watermolecuul. Als ijs smelt tot water, krijgen de moleculen meer vrijheid. Er zijn dan veel meer manieren om de moleculen te verdelen; de entropie is hoog. Entropie vertelt ons dus iets over de verdeling van de allerkleinste deeltjes (en is daarmee een grootheid die ontstaat op de quantumschaal).

De formule van Hawking doet iets vreemds. De linkerkant (S) gaat zoals we gezien hebben over het tellen van minuscule quantumtoestanden. De rechterkant (A) gaat echter over de meetkunde van de ruimtetijd, oftewel: zwaartekracht. De formule smeedt deze twee

werelden aan elkaar. Dat betekent dat je de informatie van het allerkleinste niet kunt los zien van de kromming van het allergrootste. De aanname van de effectieve veldentheorie – dat je groot en klein gescheiden mag houden – valt hier in duigen.

We hebben dus een theorie nodig die van de grond af aan is opgebouwd om met beide ideeën – quantumfysica én relativiteit – om te gaan. Het beste voorbeeld voor een theorie die dat kan, is [snaartheorie](#). Deze theorie begint met een heel strikt raamwerk. Waar wij gewend zijn aan drie ruimtelijke dimensies en één tijdsdimensie, eist de wiskunde van snaartheorie in het bijzonder dat het universum uit wel tien dimensies bestaat.

Om de natuurkunde van onze eigen vierdimensionale wereld te reproduceren, moeten zes van die ruimtelijke dimensies “[gecompactificeerd](#)” zijn. Dit betekent dat ze zijn opgerold op een extreem klein, intern figuur (wiskundig bekend als een *variëteit*). Denk hierbij aan het oprollen van een A4’tje totdat het effectief een lijn is geworden. Je merkt van die compactificatie in het dagelijks leven niets, net zoals een tuinslang van grote afstand een eendimensionale lijn lijkt, terwijl hij van dichtbij wel degelijk een dikte en omtrek heeft. Als we de “extra” dimensies maar klein genoeg oprollen, lijken ze voor het grotere universum niet te bestaan.

De meetkundige vorm van deze opgerolde dimensies is cruciaal. De vorm bepaalt namelijk de eigenschappen van de theorie. Denk aan de massa van het elektron, of de sterkte van krachten; het wordt allemaal bepaald door hoe die zes dimensies in elkaar geknoopt zitten.

Hier stuiten we op een fundamenteel verschil met de oude methode van de effectieve veldentheorie:

- De oude methode (EFT): Hierin kun je de variabelen van de natuur (zoals de massa van een deeltje) “traploos” instellen. Het is alsof je aan een volumeknop draait; elke stand is mogelijk. Je hebt dus in theorie oneindig veel mogelijkheden.
- De Snaartheorie (quantumzwaartekracht): Als je de regels van consistente quantumzwaartekracht volgt, blijkt dat je niet zomaar aan de knoppen kunt draaien. Het aantal mogelijke, consistente theorieën is eindig.

Dit verschil – eindig versus oneindig – vormt een groot probleem. Omdat de toegestane theorieën als losse punten in een grafiek staan (discreet zijn), is het extreem moeilijk om te

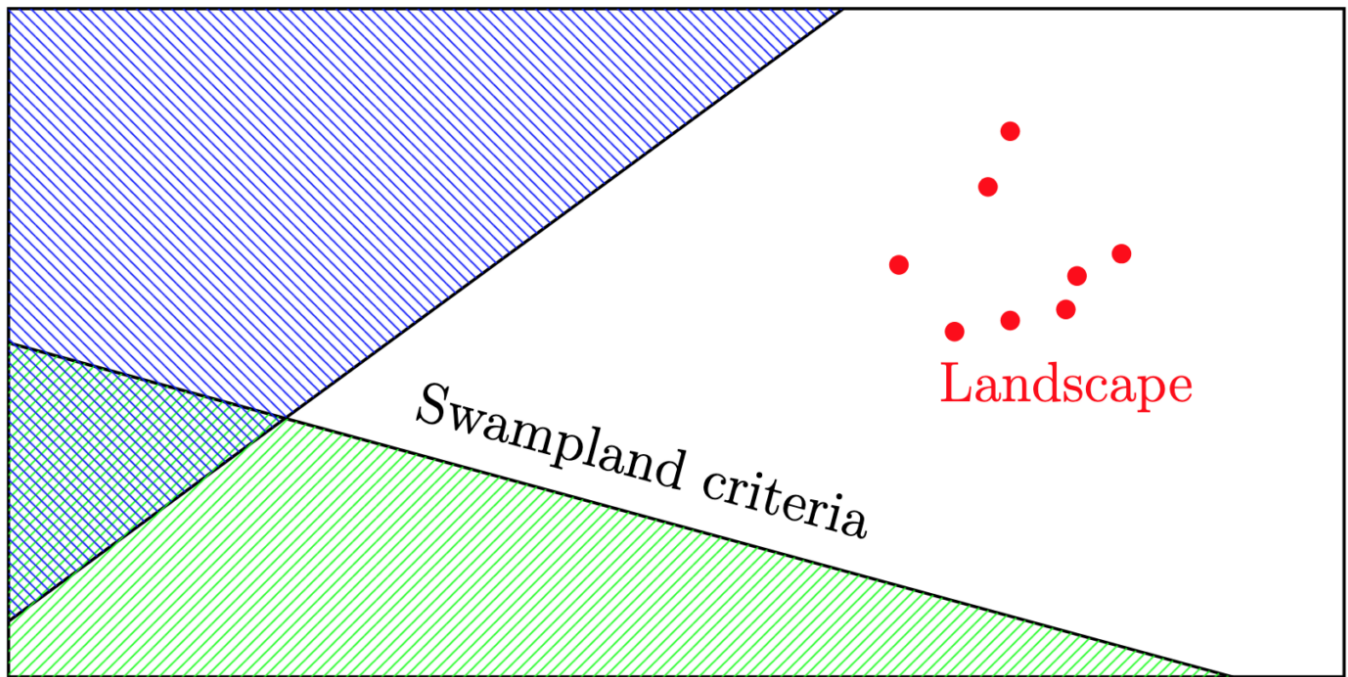
bewijzen of een theorie die wij op papier verzinnen precies overeenkomt met zo'n punt. Om dat zeker te weten, zou je natuurconstanten met extreem hoge precisie moeten meten, wat fysiek onmogelijk is. En zelfs als dat al zou lukken, dan zou je ook nog alle in de quantumzwaartekracht mogelijke modellen op een rijtje moeten hebben staan om te zien of er ééntje is die met je verzonden vierdimensionale theorie overeenkomt – ook dat is ondoenlijk.

Daarom draaien onderzoekers het probleem om. Het is vaak makkelijker om te bewijzen dat een theorie op hoge energie *niet* consistent is, dan om te bewijzen dat zo'n theorie dat wel is. Dit idee wordt het *swampland-programma* genoemd: we proberen te zien welk “landschap” van theorieën er bestaat door juist het “moeras” eromheen in kaart te brengen. Het centrale idee van het swampland-programma is dus niet om alle goede theorieën te vinden, maar juist om de foute theorieën te elimineren.

We kunnen de theorieën nu verdelen in twee kampen:

- Het moeras (“the swampland”): dit zijn theorieën die er volgens de oude regels (EFT) prima en consistent uitzien, maar die fundamenteel onmogelijk zijn zodra je ze probeert te koppelen aan zwaartekracht op het kleinste niveau. Ze missen een zogeheten “UV-completion” – de mogelijkheid om ver in te zoom op de kaart.
- Het landschap (“the landscape”): Dit zijn de theorieën die wél consistent samengaan met een model van de quantumzwaartekracht zoals snaartheorie.

Het swampland-programma zoekt naar de criteria om deze twee groepen van elkaar te scheiden. Deze criteria (of regels) zijn niet zomaar verzonden; ze zijn gebaseerd op universele eigenschappen die we zien in snaartheorie, en op algemene principes van de fysica, zoals de [thermodynamica van zwarte gaten](#).



Moeras en landschap. De ruimte van alle EFTs en de paar “gezonde” EFTs in het Landschap.

Nu we weten dat het “moeras” bestaat, is de grote vraag: hoe herkennen we het? De natuurkundigen hebben een aantal vermoedens (“conjectures”) opgesteld die dienen als de wetten van het landschap. Voor de liefhebbers noem ik ter afsluiting van dit artikel de belangrijkste:

The No Global Symmetries Conjecture (Geen Globale Symmetrieën):

In de fysica zijn we dol op symmetrieën. Denk aan het behoud van elektrische lading: de totale lading in het universum verandert nooit. In een wereld zonder zwaartekracht is dit ladingsbehoud een “[globale symmetrie](#)”. Maar zodra je zwaartekracht toevoegt, gaat dit idee van globale symmetrieën mis door zwarte gaten. Een zwart gat kijkt namelijk niet naar de eigenschappen van wat het opeet. Als je een kilogram protonen in een zwart gat gooit, of een kilogram ijzer, vergeet het zwarte gat de details. Als het zwarte gat vervolgens verdampt via hawkingstraling, komt die specifieke informatie niet zomaar terug. De regel is simpel: quantumzwaartekracht staat geen globale symmetrieën toe.

The Weak Gravity Conjecture (Zwakke Zwaartekracht):

Dit is de meest “rekenbare” regel. De Weak Gravity Conjecture (WGC) stelt dat

zwaartekracht altijd de zwakste kracht moet zijn. Aan de hand van de zwaartekrachtswet van Newton ($F_g = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$) en de wet van Coulomb voor elektrische krachten ($F_e = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$) kunnen we dit vermoeden beter begrijpen. De WGC eist dat er in elk consistent universum ten minste één deeltje moet bestaan waarvoor geldt dat de elektrische afstoting met een soortgelijk deeltje groter is dan de onderlinge aantrekking door zwaartekracht:

$$\left(\frac{q}{m} > \sqrt{\frac{G}{k}}\right)$$

Waarom willen we dat? Als zwaartekracht de sterkste kracht zou zijn, zouden kleine zwarte gaten nooit volledig kunnen verdampen. Er zouden dan ontelbare stabiele restjes overblijven die kleiner zijn dan een atoom maar zwaarder dan een berg. De wiskunde laat zien dat dit tot inconsistenties leidt. De natuur beschermt zichzelf dus door zwaartekracht altijd “zwak genoeg” te houden.

The de Sitter Conjecture (Het De Sitter-Vermoeden):

Deze regel is op dit moment de meest controversiële. Hij gaat over [donkere energie](#), de mysterieuze kracht die ons heelal steeds sneller laat uitdijen. Het De Sitter-vermoeden suggereert dat een universum met een constante positieve energie (zoals onze huidige verklaring voor donkere energie) in het moeras ligt. Volgens deze regel kan de energie van het vacuüm niet constant zijn; die energie moet langzaam afnemen, als een bal die van een heuvel rolt. Dit idee heet kwintessens (quintessence). Als dit vermoeden klopt, betekent dit dat de natuurwetten van ons universum heel langzaam veranderen en dat de versnelde uitdijning van het heelal ooit zal stoppen of veranderen.

The String Lamppost Principle (Het Snaar-Lantaarnpaal Principe):

Dit is meer een overkoepelende gedachte. Er wordt gesteld dat alle consistente theorieën van quantumzwaartekracht uiteindelijk naar de snaartheorie leiden. Het principe is vernoemd naar de grap over de dronken man die zijn sleutels zoekt onder de lantaarnpaal, niet omdat hij ze daar verloren is, maar omdat daar het licht schijnt. Het principe zegt eigenlijk: we zoeken onder de “lantaarnpaal” van de snaartheorie omdat dit de enige plek is waar we licht hebben, dat wil zeggen: we hebben consistente wiskunde. Het vermoeden is dat dit niet erg is, omdat elke lantaarnpaal die we zouden bouwen, uiteindelijk hetzelfde gebied zou

verlichten. Er is geen andere weg; alle paden uit het moeras leiden naar het eiland van de snaartheorie.

Welke van de bovenstaande vermoedens ook écht kloppen, en of we met die vermoedens ook echt het moerasgebied – en daarmee ook het landschap van “goede” theorieën – goed in kaart kunnen brengen, zullen we pas na heel veel vervolgonderzoek zeker weten. Het in kaart brengen van wat er wel en niet mogelijk is in de quantumzwaartekracht is in elk geval een enorm fascinerende zoektocht, waar veel natuurkundigen op dit moment vol overgave aan werken. Al van kinds af aan ben ik mateloos gefascineerd door de vraag hoe wij als mensen de schoonheid van de natuur kunnen beschrijven. Juist door de grenzen op te zoeken van wat theoretisch mogelijk is, hoop ik een glimp op te vangen van de fundamentele regels die onze werkelijkheid vormgeven.