

# Hoera! 25 jaar AdS/CFT

In November 1997, iets meer dan 25 jaar geleden, werd de natuurkundige wereld opgeschrikt door een artikel met de titel [The Large  \$N\$  limit of superconformal field theories and supergravity](#). De auteur, de Argentijnse natuurkundige Juan Maldacena, liet zien dat een supersymmetrische versie van zwaartekracht in een vijfdimensionaal universum beschreven kan worden met dezelfde vergelijkingen als vierdimensionale quantumveldentheorie *zonder* zwaartekracht. Dat zijn heel wat technische termen bij elkaar, maar in eenvoudigere bewoordingen betekent het: twee verschillende theorieën beschrijven exact dezelfde natuurkunde.

Nu, 25 jaar na dato, is het artikel het meest geciteerde binnen het vakgebied, met meer dan 18.000 citaties, en vormt het idee dat eruit volgde, *AdS/CFT*, nog steeds een vruchtbare grond voor veel onderzoek. Hoog tijd dus om na te gaan wat we in de afgelopen 25 jaar geleerd hebben.

## The Large- $N$ Limit of Superconformal Field Theories and Supergravity

Juan Maldacena<sup>1</sup>

*Received September 15, 1998*

---

We show that the large- $N$  limits of certain conformal field theories in various dimensions include in their Hilbert space a sector describing supergravity on the product of anti-de Sitter spacetimes, spheres, and other compact manifolds. This

**Hoe het allemaal begon.** Het begin van het artikel dat Juan Maldacena in 1997 schreef en in 1998 publiceerde.

Op het eerste gezicht lijkt 'AdS/CFT' een arbitraire combinatie van letters, maar onder de oppervlakte verschuilt een van de diepste ideeën over quantumzwaartekracht – waarover later meer. De letters AdS staan voor *Anti-de Sitter*, waarmee een theorie wordt bedoeld die zwaartekracht beschrijft op quantumschalen in een universum met negatieve [kosmologische constante](#). Een hoop lastige woorden voor iets wat neerkomt op (quantum)zwaartekracht in een doos. Dit is iets dat vaker wordt gedaan om gecompliceerde fenomenen te begrijpen: eerst worden ze onderzocht in een beter controleerbare omgeving waarin alle deeltjes en interacties opgesloten zitten in een gesloten systeem, de 'doos'. De letters CFT staan op hun beurt voor *conforme veldentheorie* ('*conformal field theory*'), een speciale subklasse van quantumveldentheorieën die schaalinvariant zijn: de fysica ziet er op elke schaal hetzelfde uit. Een eerste hint dat de letters AdS en CFT iets met elkaar te maken hebben, is het feit dat de twee theorieën dezelfde symmetriegroep hebben. Wat echter bijzonder is, is dat de symmetrie groep van CFT in  $d$  dimensies, hetzelfde is als de symmetriegroep van AdS in  $d+1$  dimensies.

Maldacena was in 1997 de eerste die de relatie tussen AdS en CFT concreet maakte, en voor theoretisch natuurkundigen die de quantumzwaartekracht bestuderen is sindsdien de wereld niet meer hetzelfde geweest. Aanvankelijk was de gemeenschap verrast door dit bijna magische principe. Hoe kan een theorie met zwaartekracht hetzelfde zijn als een theorie zónder zwaartekracht, en ook nog met een dimensie minder? En hoe is het mogelijk dat alle 'informatie' over de zwaartekracht op de een of andere manier is opgeslagen in de CFT? Daar lijkt helemaal geen plaats voor. Maar het idee heeft alle tests die zijn opgeworpen grotendeels zonder kleerscheuren doorstaan, en zelfs een sterker vermoeden is inmiddels breed geaccepteerd: iedere CFT in  $d$  dimensies beschrijft hetzelfde als een theorie met quantumzwaartekracht in een AdS-universum met  $d+1$  dimensies.



## Juan Maldacena

AdS/CFT is cruciaal geweest in het (deels) oplossen van de [informatieparadox](#). In de jaren 70 liet Stephen Hawking zien dat zwarte gaten thermische straling uitzenden als gevolg van quantummechanische effecten rond de [horizon](#). Uiteindelijk zorgt deze straling ervoor dat het zwarte gat verdampt, maar wat is tijdens dit proces gebeurd met de informatie over de materie die het zwarte gat heeft gevormd? Ogenschijnlijk gaat deze informatie verloren, maar dit is in strijd met de wetten van de quantummechanica, een paradox. Laten we dit proces nu bekijken voor een zwart gat dat wordt gevormd in een AdS-universum. Hier weten we dat we het proces van stralende zwarte gaten net zo goed kunnen beschrijven in de CFT. En het mooie is: dat is een 'gewone' quantumtheorie, waar we weten dat informatie niet verloren kan gaan!

Maar hoe gaat het proces van verdamping in zijn werk? Een manier om informatie te meten in AdS is aan de hand van zogenaamde quantum-extreme oppervlakken. De hoeveelheid informatie die in een zwart gat is opgeslagen, kan worden bepaald aan de hand van de

oppervlakte van de horizon van het zwarte gat. Als het zwarte gat verdampt wordt het kleiner, en dus verandert het oppervlak van zijn horizon. Dit betekent dat de hoeveelheid opgeslagen informatie dus ook verandert. In de CFT is de equivalente berekening een berekening van [quantumverstregeling](#). In de CFT kan kunnen we ook berekenen wat er gebeurt met de informatie, en daaruit blijkt dat er geen informatie verloren gaat tijdens het verdampingsproces. Een oplossing van de paradox, dus. Of... deels, in ieder geval. Welk mechanisme ervoor zorgt dat de informatie over de vorming van het zwarte gat naar buiten komt tijdens de verdamping is nog een raadsel. Wie weet kan AdS/CFT ook bij deze vraag de weg naar een antwoord leiden.

De connectie tussen geometrische informatie van oppervlakken aan de ene kant en quantumverstregeling aan de andere kant is een hint naar een dieper idee: namelijk dat de  $(d+1)$ -dimensionale ruimtetijd in AdS tevoorschijn komt als gevolg van de quantumverstregeling in de  $d$  dimensionale CFT. Met andere woorden: zwaartekracht is 'emergent'. De logische vraag die dan opkomt is: is zwaartekracht wel zo fundamenteel als we denken, als deze kracht voortkomt uit puur quantummechanische principes? Het feit dat er überhaupt over wordt nagedacht dat de ruimte misschien niet fundamenteel is, valt volledig toe te wijzen aan AdS/CFT.

AdS/CFT heeft dus bijgedragen aan het begrip van zwarte gaten en de oorsprong van ruimtetijd, maar heeft tot op heden geen van deze (zeer grote) mysteries volledig kunnen oplossen. Daarnaast kan je zoals eerder gezegd AdS zien als zwaartekracht in een doos. Ons heelal is echter (voor zover we weten) geen AdS-ruimte; het heeft net als AdS een kosmologische constante, maar die is positief in plaats van negatief. De laatste jaren proberen veel wetenschappers AdS/CFT aan te passen om zo ook universa die meer op ons heelal lijken te kunnen beschrijven met een quantumtheorie in één (of meer) dimensies minder.

Al met al is dus veel van het begrip dat we de afgelopen 25 jaar hebben opgedaan grotendeels te danken aan AdS/CFT. De vraag die rest is echter, zoals altijd binnen de wetenschap: hoe nu verder? Kan AdS/CFT de diepste geheimen van de natuurkunde blootleggen; kunnen we de "magie" die ervoor zorgt dat zwaartekracht tevoorschijn komt uit een CFT ontrafelen? Alleen de toekomst zal het uitwijzen.

*Wil je meer weten over AdS/CFT? Eerder verscheen op deze website een [serie](#) artikelen waar veel van de bovengenoemde punten besproken worden.*