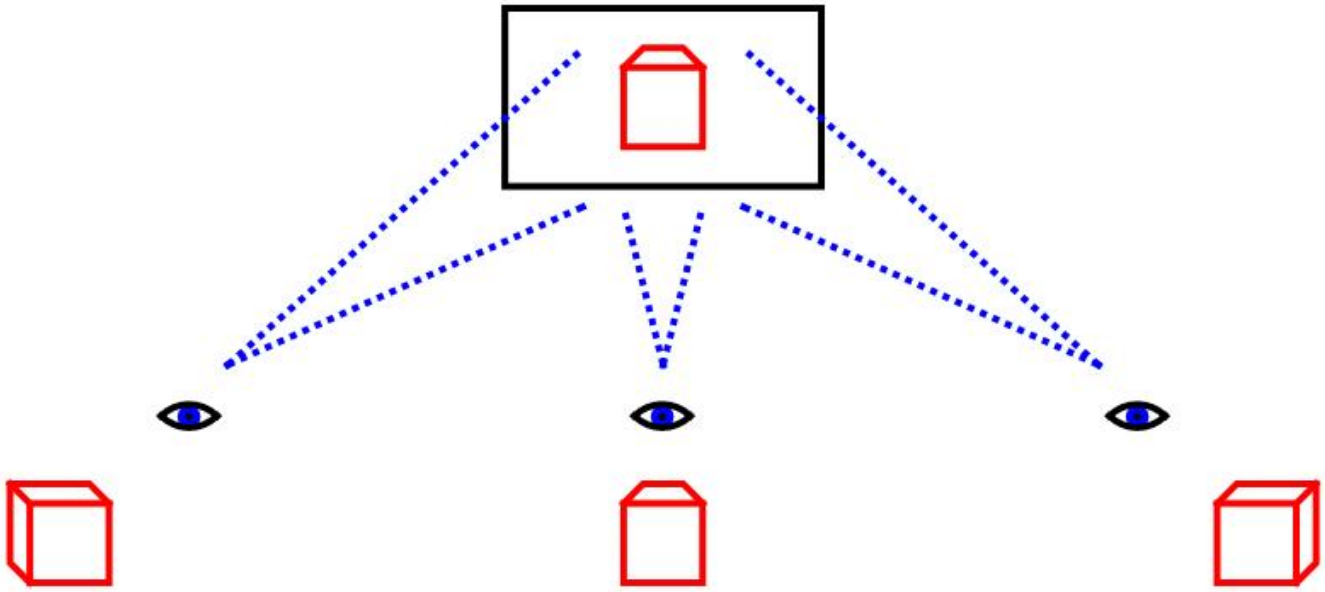
Snaren en holografie (1): Inleiding

“The world as a hologram”. Deze kreet, afkomstig van de theoretisch natuurkundige Leonard Susskind, is tegenwoordig in veel populairwetenschappelijke lezingen te horen. Maar wat houdt die uitdrukking eigenlijk in? Het holografisch principe is een begrip uit de moderne theoretische natuurkunde dat met name in de snaartheorie een belangrijke rol speelt. Met behulp van holografische beschrijvingen kunnen we in die theorie een quantummechanisch systeem mét zwaartekracht herformuleren als een quantummechanisch systeem zónder zwaartekracht. Vaak maakt de tweede beschrijving gebruik van een lager aantal dimensies dan de eerste – vandaar de vergelijking met een hologram. Dankzij het holografisch principe kunnen we onder andere meer leren over de mysterieuze combinatie van quantummechanica en zwaartekracht. In dit dossier wordt in enkele korte artikelen uitgelegd wat snaartheorie en het holografisch principe precies zijn, en tot welke resultaten de twee kunnen leiden.

(Dit inleidende artikel is een herschreven versie van een eerder verschenen artikel op deze website uit oktober 2012.)

In dit artikel:

- Hologrammen
- Holografie en snaartheorie
- Holografie en zwarte gaten
- Quantumzwaartekracht
- Vooruitblik



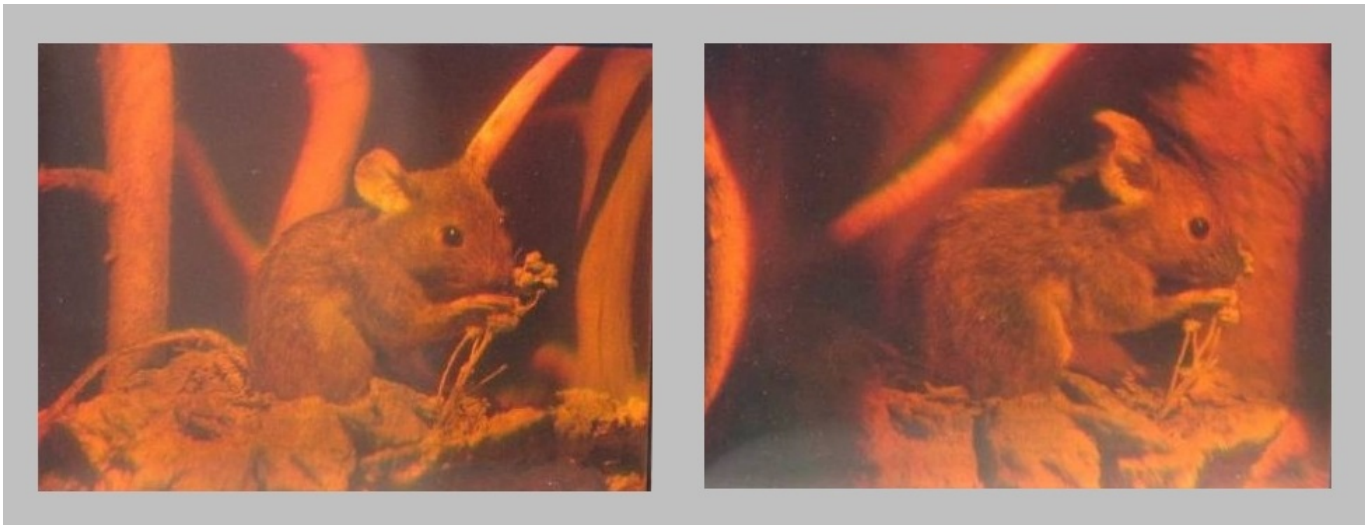
Afbeelding 1. Een hologram.Een schets van een hologram. Het hologram is tweedimensionaal, maar bevat toch driedimensionale informatie. Als we onder verschillende hoeken naar de afbeelding kijken, zien we een verschillend beeld.

Hologrammen

In het dagelijks leven is een hologram een tweedimensionale afbeelding die er driedimensionaal uitziet – zó driedimensionaal dat je door de afbeelding te draaien daadwerkelijk het gevoel krijgt dat je om een ruimtelijk object heen beweegt. Zo'n hologram is niet echt driedimensionaal: de tweedimensionale afbeelding is plat, maar bevat informatie over een driedimensionaal object. Afhankelijk van de hoek waaronder we naar het hologram kijken, komt een ander deel van die informatie op ons netvlies terecht.

Holografie, het maken van zulke hologrammen, is een erg interessant vakgebied waarbij de nodige natuurkunde komt kijken. Deze vorm van holografie is echter niet het onderwerp van dit dossier. Dit dossier gaat over een verschijnsel in de theoretische natuurkunde waarin een bepaald systeem zich net als een hologram *gedraagt*. Hoewel zo'n systeem bijvoorbeeld driedimensionaal is, en dus met driedimensionale wiskunde beschreven kan worden, blijkt er ook een beschrijving van het systeem te zijn in termen van tweedimensionale wiskunde. Met andere woorden: we kunnen twee lijstjes natuurwetten opstellen, waarvan het op het eerste gezicht lijkt alsof het ene een driedimensionaal systeem beschrijft, en het andere een tweedimensionaal systeem. Als we beter kijken, blijkt echter dat de twee lijstjes

natuurwetten wiskundig gezien exact hetzelfde zijn. Op de ene manier bekeken is zo'n systeem van natuurwetten dus tweedimensionaal, op de andere manier driedimensionaal – net als in een "echt" hologram.

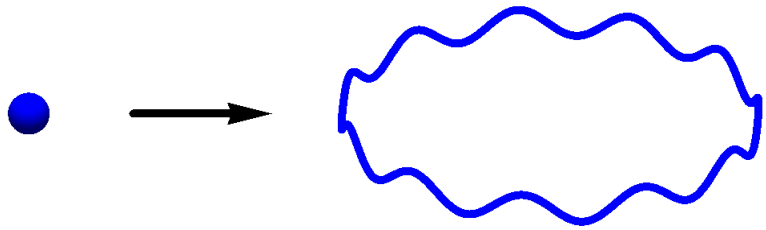


Afbeelding 2. Een hologram.Twee verschillende aanzichten van een 'echt' hologram. De tweedimensionale afbeelding bevat volledige informatie over een driedimensionaal object – in dit geval een muis. Op dezelfde manier bevatten holografische natuurkundige theorieën volledige informatie over duale theorieën in een ander aantal dimensies. (Hologram: Georg-Johann Lay.)

Naar boven

Holografie en snaartheorie

Het aantal dimensies waarop het holgrafisch principe toegepast kan worden, hoeft niet altijd twee en drie te zijn. In de theoretische natuurkunde kennen we ook allerlei systemen die vier- of hoger-dimensionaal zijn. Het bekendste voorbeeld daarvan is misschien wel de snaartheorie: een theorie waarin wordt aangenomen dat de bouwstenen van ons heelal geen puntvormige deeltjes zijn, maar kleine, trillende snaartjes. Om de wiskunde achter dit idee te laten werken, blijkt het nodig te zijn om de theorie te formuleren in maar liefts *tien* dimensies. Deze theorie biedt dus voldoende ruimte om holografische systemen te construeren in meer dan twee en drie dimensies.



Afbeelding 3. Snaren.Het centrale idee uit de snaartheorie: puntdeeltjes worden vervangen door minuscule trillende snaartjes.

In het algemeen kan het gebeuren dat een X-dimensionaal natuurkundig systeem ook beschreven kan worden als een Y-dimensionaal systeem, waarbij Y groter of kleiner is dan X. We noemen zulke paren van beschrijvingen *duaal*, en in al deze gevallen (ook als het verschil in dimensies groter is dan één) spreken we van ‘holografie’. Het is deze vorm van holografie waar we in dit dossier dieper op in zullen gaan.

Aangezien ons heelal drie ruimtelijke dimensies heeft, ligt de vraag natuurlijk voor de hand wat het nut is van zulke meer algemene holografische modellen. Het antwoord daarop is tweeledig. Ten eerste is het rekenen in een bepaald aantal dimensies vaak veel lastiger dan in een ander aantal dimensies. Als we dus iets willen weten over de natuur in onze eigen drie ruimtelijke dimensies kan dat heel lastig blijken te zijn, terwijl de overeenkomstige vraag in vier, vijf of tien dimensies soms veel eenvoudiger te beantwoorden is. Holografische systemen in ‘onnatuurlijke’ aantallen dimensies kunnen zo vaak dienen als *toy model*. In zulke toy models wordt in eerste instantie niet exact de vraag beantwoord waarin we geïnteresseerd zijn, maar krijgen we in een ander aantal dimensies goede intuïtie voor wat het antwoord in ons eigen heelal zou kúnnen zijn.

Ten tweede kunnen we holgrafie natuurlijk twee kanten op gebruiken. Als we geïnteresseerd zijn in een driedimensionaal systeem kunnen we dit systeem vaak ook met behulp van het holografisch principe herformuleren als een systeem in een hóger aantal dimensies. Soms kan ook deze formulering gebruikt worden om iets te leren – nu over het lagerdimensionale ‘fysische’ systeem. Deze aanpak blijkt bijvoorbeeld erg nuttig als we iets willen leren over systemen in de vaste-stoffysica zoals supergeleiders of halfgeleiders.

Naar boven

Holografie en zwarte gaten



Afbeelding 4. Een zwart gat.Een ‘artist impression’ van een zwart gat. Afbeelding: NASA.

Het idee van holografie is afkomstig uit de fysica van zwarte gaten. In het dossier over zwarte gaten dat op deze site verschenen is, hebben we het hierover al kort gehad. Als we de thermodynamische eigenschappen van een driedimensionaal zwart gat bestuderen, ontdekken we al snel dat die eigenschappen lijken op die van een *tweedimensionaal* systeem. In zekere zin is het alsof alle fysica die zich in het zwarte gat afspeelt, ook beschreven kan worden met behulp van natuurwetten die alleen op het oppervlak van het zwarte gat gedefinieerd zijn.

Dat is op zich een opmerkelijk feit, maar lange tijd leek het erg lastig om het idee van holografie preciezer te maken. Niemand had enig idee hoe de duale natuurwetten er in een lager aantal dimensies precies uit zouden zien. Dat veranderde in 1997, toen de Argentijn Juan Maldacena een artikel publiceerde waarin hij expliciet twee duale beschrijvingen van hetzelfde systeem gaf. Dit systeem was in zekere zin nog niet erg fysisch: Maldacena beschreef een heel symmetrisch zwart gat in vier ruimtedimensies (dus één meer dan in onze werkelijke natuur), met behulp van duale natuurwetten in drie ruimtedimensies. Al snel

bleek de beschrijving van Maldacena echter het topje van een ijsberg, en op den duur werden er ook allerlei duale beschrijvingen gevonden van systemen die de fysische werkelijkheid beter benaderen.



Afbeelding 5. Juan Maldacena.Foto: Institute for Advanced Study, Princeton.

Naar boven

Quantumzwaartekracht

Een steeds terugkerend thema in alle bekende voorbeelden van holografie is de zwaartekracht. De algemene les lijkt te zijn dat vrijwel elk systeem waarin de zwaartekracht een rol speelt, zoals bijvoorbeeld een zwart gat, ook beschreven kan worden op een duale, lagerdimensionale manier waarin de zwaartekracht geen rol speelt. Dit leidt direct tot een bijzonder nuttige toepassing van de holografie, aangezien we van zwaartekrachtstheorieën – zeker wanneer die zich op quantummechanische schaal afspelen – lang niet altijd alles begrijpen. In zo'n geval kunnen we de duale theorie dus gebruiken om van alles te leren over het zwaartekrachtssysteem. In het dossier over zwarte gaten zijn we hiervan al diverse voorbeelden tegengekomen.

Naar boven

Vooruitblik

Zoals we hierboven gezien hebben, spelen in de holografie twee zaken een belangrijke rol: snaren en zwarte gaten. Aangezien we het in een eerder dossier al uitgebreid gehad hebben over zwarte gaten, zullen we in dit dossier met name de snaartheorie centraal stellen. In de eerstvolgende artikelen in het dossier zullen we stap voor stap uitleggen wat die theorie precies inhoudt. Vervolgens zullen we bespreken hoe de ideeën achter de snaartheorie leiden tot voorbeelden van holografische systemen. Tenslotte gaan we het hebben over de vele toepassingen van de holografie: niet alleen in de fysica van zwarte gaten, maar ook in bijvoorbeeld de hydrodynamica en de fysica van vaste stoffen en half- of supergeleiders.

Naar boven

Afbeelding blokkenschema: in holografische dualiteiten bevindt de zwaartekrachtstheorie zich vaak in een hyerbbolische ruimte. Afbeelding: Claudio Rocchini.

Het tweede artikel in dit dossier gaat over dimensies.