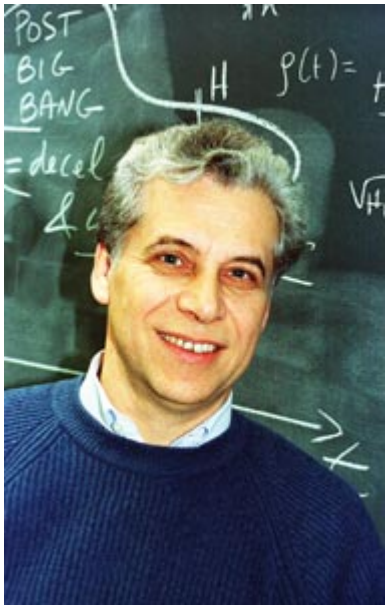
Snaartheorie: meer dan een theorie van snaren

Snaartheorie. De ene natuurkundige prijst de theorie de hemel in, de andere vindt het idee van minuscule snaartjes als elementaire deeltjes maar niets. Maar wat is snaartheorie nu precies, en waar zijn de loftuitingen en de kritiek op gebaseerd? In dit artikel een kort overzicht van de plus- en de minpunten.

In dit artikel:

- Snaartheorie
- Zwaartekracht en quantummeetkunde
- Een goed idee, met praktische problemen
- Belangrijke lessen
- Terug naar de natuur



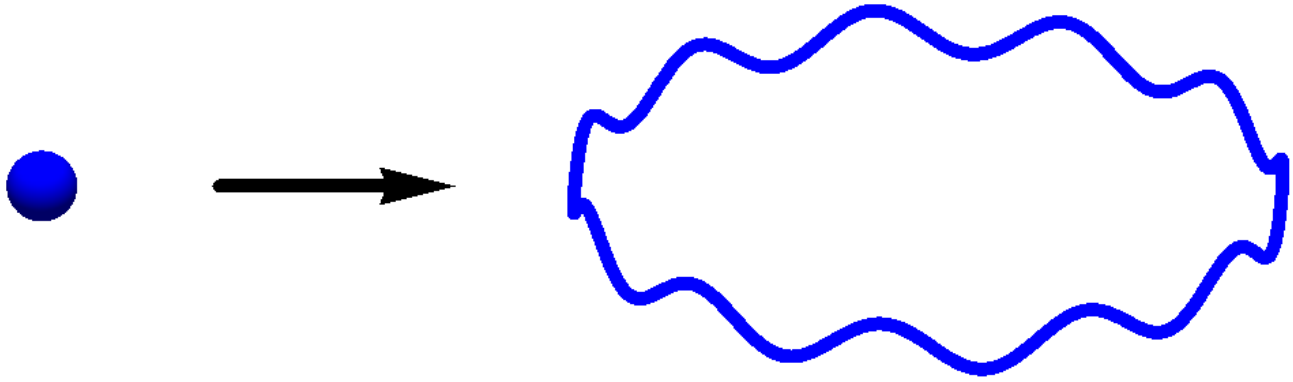
Afbeelding 1. Gabriele Veneziano.De ‘vader van de snaartheorie’, Gabriele Veneziano. Afbeelding: CERN.

Snaartheorie

In 1968 ontdekte de Italiaanse natuurkundige Gabriele Veneziano een opmerkelijke wiskundige formule. De formule, gebaseerd op een tweehonderd jaar oud resultaat van de Zwitser Leonhard Euler, beschreef een verband tussen de massa's en spins van hadronen. Hadronen – elementaire deeltjes, gekarakteriseerd door de eigenschap dat ze een kracht op elkaar uitoefenen die bekend staat als de "sterke kernkracht" – stonden al geruime tijd in de belangstelling. Uit experimenten was namelijk gebleken dat er naast de bekendste voorbeelden van hadronen, de protonen en neutronen waaruit atomen zijn opgebouwd, nog een enorme reeks van andere hadronen bestond. Elk van deze deeltjes had een andere massa (de natuurkundige benaming van wat we in het dagelijks leven 'gewicht' noemen) en een andere spin (grofweg de draaisnelheid waarmee het deeltje rond zijn eigen as tolt). Wetenschappers waren naarstig op zoek naar een manier om orde in deze chaos van verschillende deeltjes te scheppen.

Het leek Veneziano gelukt te zijn om die orde te scheppen. Zijn formule rangschikte de verschillende hadronen naar hun spin, en gaf een manier om voor elk hadron met een bepaalde spin de bijbehorende massa te berekenen. De berekeningen kwamen goed overeen met de experimenten, maar de situatie bleef onbevredigend. Hoewel Veneziano's resultaat het verband tussen massa en spin namelijk goed *beschreef,* gaf zijn formule geen *verklaring* van dat verband. De formule kreeg daarom geen breed gehoor in de natuurkundige gemeenschap, en werd al snel overvleugeld door de quantumelektrodynamica – de theorie die is gebaseerd op het idee dat hadronen zijn opgebouwd uit nog kleinere bouwstenen, de zogeheten quarks.

Ondanks het grote succes van de quarktheorie bleef een kleine groep wetenschappers Veneziano's formule bestuderen. De belangrijkste motivatie daarvoor was een resultaat uit 1970 van de drie natuurkundigen Yoichiro Nambu, Leonard Susskind en Holger Nielsen. Zij hadden aangetoond dat aan de formule van Veneziano wel degelijk een verklarende waarde kon worden toegedicht, maar dat daarvoor een verrassende aanname moest worden gemaakt. Veneziano's resultaat kon worden afgeleid als werd aangenomen dat hadronen geen klassieke, *puntvormige* deeltjes waren, maar deeltjes die de vorm hadden van kleine trillende elastiekjes – of, zoals deze hypothetische deeltjes al snel bekend kwamen te staan: *snaren*.



Afbeelding 2. Van puntdeeltjes naar snaren.Het centrale idee van de snaartheorie is dat elementaire deeltjes niet puntvormig zijn, maar de vorm hebben van minuscule trillende elastiekjes. Afbeelding uit het boek Snaartheorie.

Naar boven

Zwaartekracht en quantummeetkunde

Door het succes van de quarktheorie leek het weinig zinvol de snaartheorie nog als beschrijving van de hadronfysica te gebruiken. In 1974 stelden de natuurkundigen Joël Scherk en John Schwarz echter voor om de theorie te gebruiken bij een heel ander probleem: het combineren van de algemene relativiteitstheorie en de quantummechanica.

Sinds het begin van de 20e eeuw vormden deze twee theorieën de pijlers van de theoretische natuurkunde. De algemene relativiteitstheorie, het meesterwerk van Albert Einstein, beschrijft in groot detail hoe de zwaartekracht werkt. Het basisidee achter de theorie is dat zwaartekracht niets anders is dan de *meetkunde van gekromde figuren*. In de klassieke voorstelling van de zwaartekracht bewegen objecten onder invloed van die kracht langs gekromde banen door de “platte” ruimte. In de algemene relativiteitstheorie wordt het perspectief volledig omgedraaid. Einstein liet zien dat diezelfde banen nog preciezer beschreven kunnen worden door aan te nemen dat voorwerpen zich eigenlijk bewegen langs *rechte* lijnen in een door de zwaartekracht *gekromde* ruimte.

De andere van de twee fundamentele theorieën, de quantummechanica, beschrijft hoe elementaire deeltjes zich op de allerkleinste schaal gedragen. Ook in deze theorie is sprake van een belangrijke perspectiefwijziging. Al sinds het begin van de 19e eeuw stelde men zich

de bouwstenen van het heelal voor als kleine puntvormige kogeltjes. In de beginjaren van de 20e eeuw bleek dat elementaire deeltjes echter allerlei eigenschappen hebben die meer lijken op die van golven in het water. En omgekeerd: sommige eigenschappen van microscopische golven, zoals lichtgolven, kunnen beter verklaard worden vanuit het perspectief dat het hier eigenlijk gaat om een deeltjesverschijnsel. Op het allerkleinste niveau zijn de bouwstenen van de natuur golven noch deeltjes, maar een mengvorm die zich het best laat omschrijven als “een *golf* die aangeeft hoe groot de kans is dat een *deeltje* zich op een bepaalde plaats bevindt”. De quantummechanica beschrijft heel precies hoe deze “kansgolven” zich gedragen.

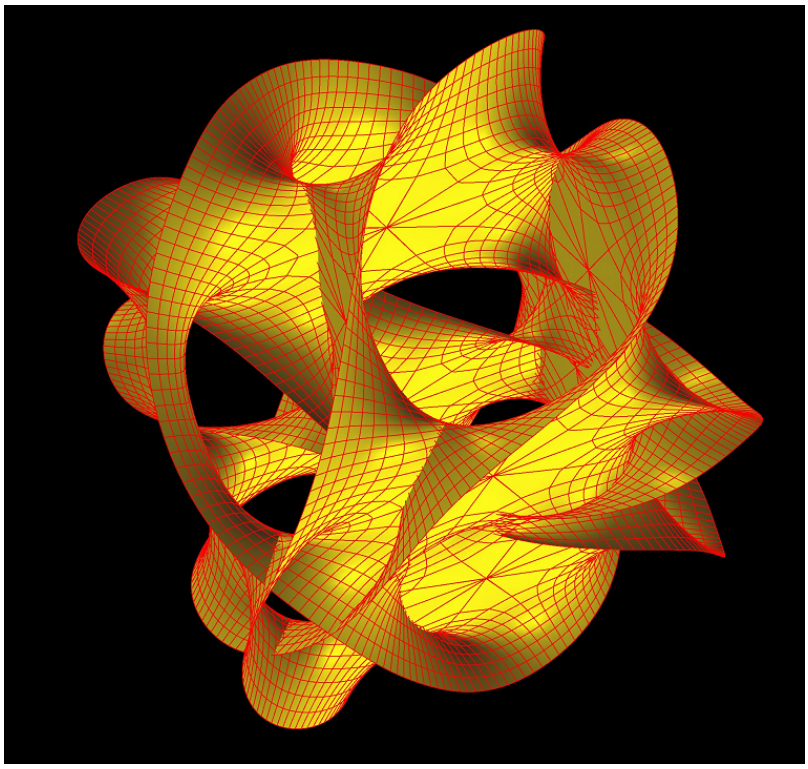
Als afzonderlijke theorieën hadden zowel de relativiteitstheorie als de quantummechanica grote experimentele successen geboekt. Het combineren van de twee ideeën was echter lastig gebleken – zo lastig, dat zelfs Einstein een groot deel van zijn carrière eraan besteedde zonder tot doorslaggevende resultaten te komen. Het leek bijna onmogelijk om de meetkunde die aan de basis van Einsteins relativiteitstheorie lag, zo uit te breiden dat er plaats was voor het idee van “quantisatie”: de dualiteit tussen puntdeeltjes en golven. Scherk en Schwartz zagen in dat de snaarhypothese van Veneziano hier een oplossing bood. Wanneer hetzelfde idee van quantisatie werd toegepast op *snaarvormige* deeltjes in plaats van op puntdeeltjes, bleken de resulterende formules *wel* een meetkundig karakter te hebben. Die formules waren een quantumvariant op de formules uit de relativiteitstheorie van Einstein.

Naar boven

Een goed idee, met praktische problemen

In eerste instantie leek daarmee de heilige graal van de natuurkunde gevonden. Eindelijk was er een raamwerk waarin zowel de zwaartekracht als de quantummechanica een plaats hadden. Het enige dat nog restte was om binnen dit raamwerk een precieze beschrijving te geven van alle krachten, deeltjes en natuurconstanten die we in de wereld om ons heen zien. Dit leidde in de jaren ’80 tot een enorme interesse in het snaaronderzoek. De laatste stap bleek echter allesbehalve eenvoudig. Het is geen enkel probleem om een snaartheorie op te stellen die interessante natuurkunde oplevert – er blijken talloze manieren te zijn om dat te doen. Het probleem is dat de resulterende “natuurkunde” in geen enkel bekend geval *onze*

natuurkunde is. Dat wil zeggen: in alle gevallen komen er in de resulterende theoretische natuurwetten deeltjes, krachten of natuurconstanten voor die we in de werkelijke wereld om ons heen niet waarnemen. Dat wil overigens niet zeggen dat een snaartheoretische beschrijving van de natuur überhaupt niet mogelijk is. Een studie van de fysicus Michael Douglas uit 2003 laat zien dat het aantal verschillende “natuurkundes” dat met behulp van snaardeeltjes kan worden beschreven, een getal is van tenminste 500 cijfers. Het is dus zoeken naar een microscopische speld in een hooiberg van astronomische proporties.



Afbeelding 3. Een meetkundige weergave van een snaartheorie.Een belangrijke rol bij het bechrijven van alle mogelijke snaartheorieën wordt gespeeld door de zogeheten *Calabi-Yauvariëteiten*: meetkundige vormen die bepalen wat de precieze inhoud van de theorie is. In de afbeelding zien we een van de talloze mogelijkheden van zo’n Calabi-Yauvariëteit. Afbeelding uit het boek Snaartheorie.

Hoewel er in de dertig jaar lange zoektocht naar een snaartheoretische beschrijving van de natuur grote vooruitgang is geboekt, heeft het uitblijven van een definitief model van ons heelal ook tot kritiek geleid. Bestaat alles om ons heen werkelijk uit minuscule trillende snaartjes? En als dat het geval is, hoe kunnen we dat dan ooit aantonen? De voorspelde lengte van de snaren (in centimeters uitgedrukt een getal met meer dan 30 nullen achter de komma) is dusdanig klein dat een experimentele test van het idee voorlopig uitgesloten lijkt.

Aan de theoretische kant hebben we bovendien een dusdanig groot aantal mogelijkheden dat het mogelijk lijkt *alles* met de snaartheorie te voorspellen – een situatie die natuurkundig natuurlijk ook allesbehalve bevredigend is.

Is de snaartheorie daarmee gedegradeerd tot een onbruikbare curiositeit? Allesbehalve. Ten eerste gaat de zoektocht gewoon door, en is het beslist niet uitgesloten dat in de komende jaren alsnog een volledige beschrijving van de natuur om ons heen in termen van snaardeeltjes wordt gevonden. Maar in de snaartheorie ligt nog een heel andere les verborgen. We kunnen er immers niet omheen dat de theorie erin slaagt de relativiteitstheorie en de quantummechanica te verenigen, en dus een enorm aantal oplossingen geeft voor de puzzel waar Einstein jarenlang mee worstelde. Voor de zoektocht naar *de* oplossing van die puzzel – dat wil zeggen: een quantummeetkundige beschrijving van de wereld om ons heen – is het van groot belang om te onderzoeken welke eigenschappen de 'surrogaatoplossingen' gemeen hebben, zodat we erachter komen wat de algemene kenmerken van een quantummeetkunde zijn. Dit begrip van quantisatie van de zwaartekracht in een breder kader is een belangrijke drijfveer achter het moderne snaartheorieonderzoek.

Naar boven

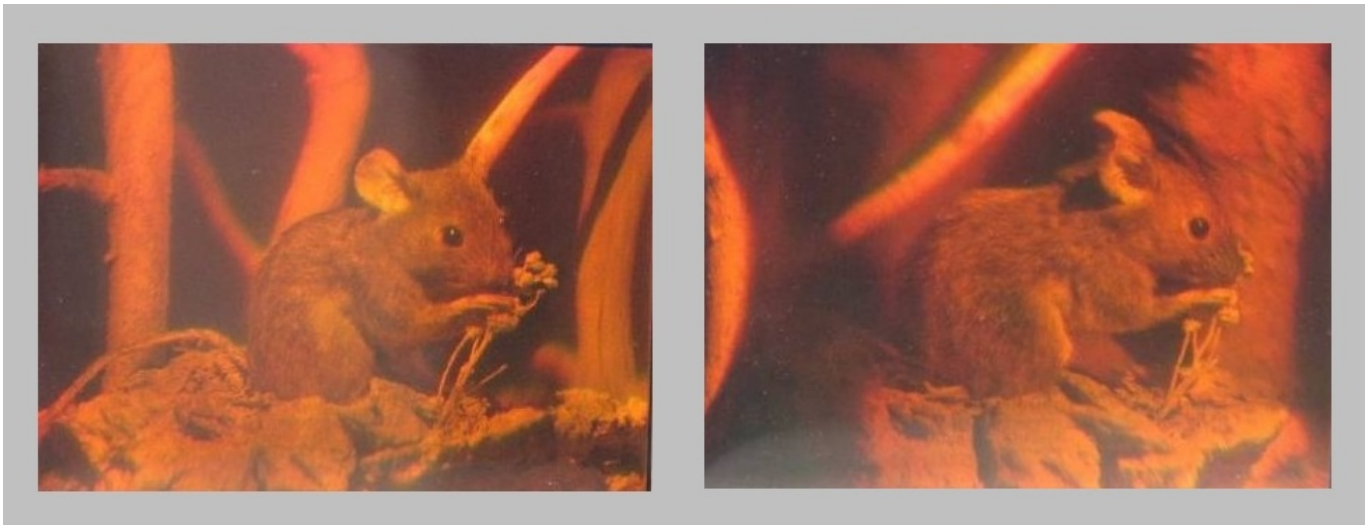
Belangrijke lessen

Hoewel het idee van quantummeetkunde nog altijd bekend staat onder de naam 'snaartheorie', is een eerste les die we in de loop der jaren geleerd hebben dat het hier gaat om veel meer dan een theorie van alleen snaren. Een snaar heeft in de letterlijke zin van het woord een dimensie die een puntvormig deeltje niet heeft: de snaar heeft een lengte, een uitgestrektheid. Daarmee ervaart een snaar de meetkunde van de ruimte om zich heen op een heel andere manier dan een puntdeeltje. Het blijkt dat deze uitgestrektheid cruciaal is voor het quantiseren van de snaardeeltjes. Maar er zijn natuurlijk allerlei andere uitgestrekte vormen denkbaar: denk aan een minuscuul klein tweedimensionaal trillend 'trommelvel' of een driedimensionale vibrerende 'gelatinepudding'. Het blijkt mogelijk te zijn allerlei van dergelijke objecten als elementaire deeltjes te beschouwen, en daarmee een nog groter aantal van mogelijke meetkundige quantumtheorieën te beschrijven.

Gelukkig blijkt er ook de nodige orde in deze veelheid aan theorieën te zijn. Veel op het oog

verschillende meetkundige quantumtheorieën zijn lang niet zo verschillend als ze lijken. Vaak blijkt dat de ene theorie – bijvoorbeeld een theorie van snaren in een heelal met een bepaalde vorm – exact equivalent is aan een andere theorie – bijvoorbeeld een theorie van membranen in een heelal met een heel andere vorm. Met 'equivalent' bedoelen we dat de twee theorieën uiteindelijk tot precies dezelfde natuurwetten leiden: alle uitkomsten van experimenten die in de ene theorie voorspeld kunnen worden, zijn exact hetzelfde in de andere theorie. Dit principe staat bekend onder de naam dualiteit.

Een derde belangrijke les die "the theory formerly known as strings" ons leert, is dat het principe van holografie een belangrijke rol speelt in het begrijpen van quantummeetkunde. Net zoals een hologram een driedimensionale afbeelding codeert in een tweedimensionaal object, zo blijkt ook de snaartheorie de quantummeetkunde van het heelal te kunnen coderen in een lagerdimensionale theorie. Dit is in feite een extensie van het idee van dualiteiten uit de vorige paragraaf. Het blijkt bijvoorbeeld dat bepaalde snaartheorieën voor een *driedimensionaal* heelal equivalent zijn aan theorieën in een *tweedimensionale* ruimte. Het bijzondere is dat deze laatste theorieën weliswaar quantumtheorieën zijn, maar *geen* zwaartekracht bevatten – het zijn "ouderwetse" quantumtheorieën van puntdeeltjes. De zwaartekracht in deze theorieën is verborgen als in een hologram, en komt pas tevoorschijn als we de theorie herformuleren als een theorie in een hoger aantal dimensies. De twee verschillende formuleringen leiden dus tot natuurwetten die wiskundig gezien precies hetzelfde zijn, maar waarvan de interpretatie totaal verschilt. Een groot voordeel van deze verrassende dualiteit is dat alle technieken die in de loop der jaren zijn ontwikkeld om theorieën van puntdeeltjes te bestuderen, nu op indirecte wijze kunnen worden toegepast om iets te leren over theorieën van uitgestrekte objecten, en daarmee over de quantumzwaartekracht.



Afbeelding 4. Holografie.Een hologram is een tweedimensionale afbeelding die informatie over een driedimensionale situatie bevat. Hier twee foto's, uit verschillende hoeken, van een hologram van een muis. In de snaartheorie wordt met 'holografie' een soortgelijk idee bedoeld: een theorie in een bepaald aantal dimensies beschrijft soms een situatie in een groter aantal dimensies. Hologram: Georg-Johann Lay.

Naar boven

Terug naar de natuur

De snaartheorie begon ooit letterlijk als een poging om de wetten van de natuur om ons heen te beschrijven in termen van trillende snaren – een idee dat nog niet tot een doorslaggevend experimenteel succes heeft geleid, maar waarnaar nog altijd bijzonder interessant onderzoek wordt gedaan. Tegenwoordig heeft het begrip 'snaartheorie' echter een veel grotere reikwijdte. De theorie is uitgegroeid tot een studie van quantummeetkunde in de ruimste zin van het woord: een studie van een groot aantal theorieën die als gemeenschappelijke eigenschap hebben dat ze de algemene relativiteitstheorie en de quantummechanica verenigen. Deze theorieën tonen aan dat de puzzel die zelfs voor Einstein te lastig was, opgelost kan worden met behulp van ideeën als uitgestrekte objecten, dualiteiten en holografie – nieuwe concepten die in oudere theorieën van puntdeeltjes geen plaats hadden. We leren daarmee iets over *waarom* eerdere benaderingen hebben gefaald.

Een quantummeetkundige beschrijving van de natuurwetten die we om ons heen ervaren, is daarmee nog niet gevonden. We leren op deze manier echter dagelijks nieuwe lessen die hopelijk uiteindelijk tot de definitieve oplossing van de puzzel zullen leiden. In hoeverre die

uiteindelijke oplossing zal lijken op de snaartheorieën waarmee men in de jaren ’70 begon, zullen we moeten afwachten. Dat veel van de basisideeën uit die theorieën een rol zullen spelen, lijkt echter gegarandeerd. Of, zoals de snaartheoreet Nathan Seiberg het in een interview in 2005 formuleerde: hoe de uiteindelijke theorie van de quantumzwaartekracht er ook uit zal zien, snaartheoreten zullen haar ongetwijfeld ‘snaartheorie’ noemen.

Naar boven

Dit artikel werd in 2011 geschreven voor een nieuw op te richten natuurkundetijdschrift, maar dat tijdschrift is helaas nooit van de persen gerold. Hierbij publiceren we het alsnog op quantumuniverse.nl. Voor de echte snaar-enthousiastelingen zal er op termijn ook een veel uitgebreider dossier over de snaartheorie op deze site verschijnen.