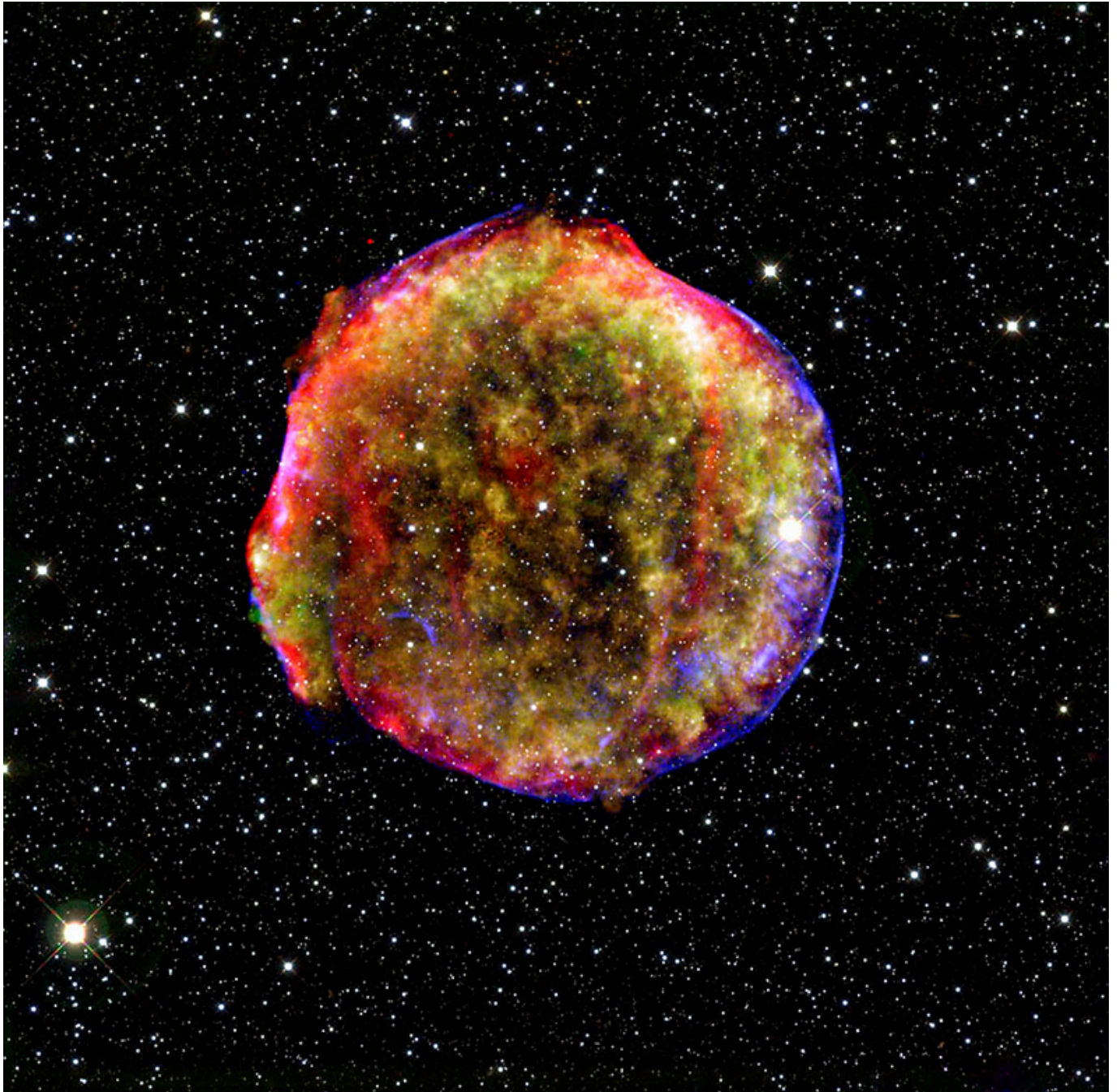


Zwarte gaten (13): Fuzzballs

In de afgelopen artikelen hebben we ons beziggehouden met een belangrijke vraag over zwarte gaten: hoe zien die er op microscopische (of beter: quantummechanische) schaal uit? Op grote schaal lijken alle zwarte gaten op elkaar. Ze hebben een massa en soms een elektrische lading of een draaisnelheid, maar verder lijkt alle gedetailleerde informatie zich achter de [horizon](#) te verstoppen. Tegelijkertijd is het, om de [thermodynamica van zwarte gaten](#) te begrijpen, belangrijk om te weten op hoeveel microscopische manieren zo'n macroscopisch zwart gat kan worden opgebouwd. Het probleem daarbij is dat we geen idee hebben van wat er zich achter de horizon van een zwart gat bevindt. Sterker nog: we beschikken zelfs niet over een definitieve theorie van de [quantumzwaartekracht](#) die het binnenste van een zwart gat zou kunnen beschrijven!

De beschrijving van de microscopische toestanden van een zwart is dus vooralsnog met name het terrein van theoretisch fysici, en nog niet van de experimentatoren. In het [vorige artikel](#) in dit dossier kwamen we al een eerste idee tegen over hoe de microscopische toestanden van zwarte gaten geteld kunnen worden. Vandaag bespreken we een tweede idee in die richting: dat van *fuzzballs*.



Afbeelding 1. Fuzzballs. Volgens een idee van Samir Mathur zouden we zwarte gaten kunnen beschrijven als een 'fuzzy kluwen van snaren'. De afbeelding is overigens alleen om een beeld te vormen: in werkelijkheid kijken we hier naar een gecombineerd beeld van zichtbaar en infrarood licht van de Tycho-supernovarestant. Foto: NASA.

In dit artikel:

- [Wat ligt er achter de horizon?](#)
- [Fuzzballs](#)

- [Toestanden tellen](#)
- [De informatieparadox](#)
- [Wat zie je als je in een fuzzball valt?](#)

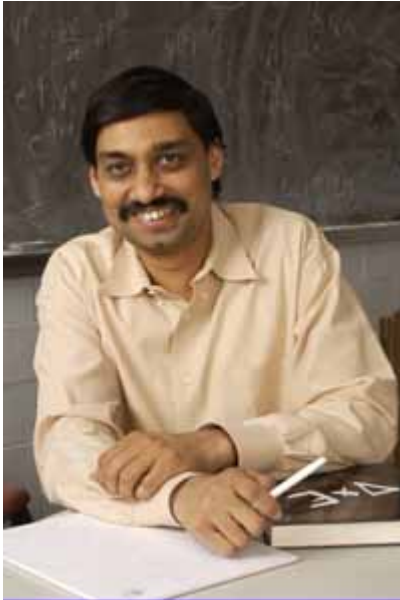
Wat ligt er achter de horizon?

Voordat we de vraag ‘wat zijn de microtoestanden van een zwart gat?’ kunnen beantwoorden, moeten we misschien wel eerst een ander raadsel oplossen: *waar* vinden we die microtoestanden precies? De horizon van het zwarte gat heeft zijn naam niet voor niets. We kunnen tot aan die horizon kijken, maar hebben geen idee wat er zich daarachter afspeelt. Als we de relativiteitstheorie als richtlijn nemen, lijkt het voor de hand te liggen dat er zich op die horizon zélf niets bijzonders afspeelt. Volgens de ideeën van Einstein zou een astronaut die de horizon van een groot zwart gat passeert, daar helemaal niets van merken. De ruimte (of in Einsteins termen: de [ruimtetijd](#)) gaan binnen die horizon gewoon verder op vrijwel dezelfde manier als erbuiten. Het enige verschil dat een astronaut uiteindelijk zal merken, is dat de ruimte en de tijd uiteindelijk steeds meer gekromd worden – maar dat is een geleidelijk proces, dat pas in het middelpunt van het zwarte gat extreem sterk wordt. Daar bevindt zich de zogeheten *singulariteit*: een plek waar de ruimtetijd volgens de formules van Einstein oneindig sterk gekromd is.

Zodra het begrip ‘oneindig’ in een beschrijving van de natuur voorkomt, weten we dat er iets mis is. ‘Oneindig’ betekent in het algemeen: ‘hier kunnen we niet meer met onze huidige theorieën rekenen – er moet dus iets nieuws bedacht worden’. Dat geldt ook voor het middelpunt van een zwart gat. Dat Einsteins berekeningen daar ‘oneindig’ opleveren, wil zeggen dat er een betere theorie nodig is om de fysica op dat punt te beschrijven. Aangezien we het hier hebben over de fysica in een minuscule klein gebied, ligt het voor de hand dat die betere theorie niet alleen de relativiteitstheorie omvat, maar ook de quantummechanica – de theorie van het allerkleinste. Kortom: het lijkt erop dat we om zwarte gaten écht te begrijpen, en om bijvoorbeeld hun microscopische toestanden te kunnen tellen, ten eerste een theorie van de quantumzwaartekracht nodig hebben, en ten tweede die theorie moeten toepassen op wat zich afspeelt rond de singulariteit.

Het is dit tweede punt – dat we de quantumzwaartekracht moeten toepassen *rond de singulariteit* – waar theoretisch fysici de laatste jaren steeds meer aan zijn gaan twijfelen. We

kwamen daar al een voorbeeld van tegen in ons artikel over [firewalls](#). Daarin leek het erop dat zwarte gaten ook al aan de horizon, en dus niet pas rond de singulariteit, allerlei onverwachte eigenschappen vertonen. Als het idee van firewalls juist is, is de horizon voor de invallende astronaut helemaal geen ‘gewoon’ stuk ruimtetijd, maar komt hij er een muur van vuur tegen waarin alles wordt verbrand!



Afbeelding 2. Samir Mathur. Samen met zijn student Oleg Lunin bedacht Mathur het idee van fuzzballs. Foto: Ohio State University.

Of het firewall-idee juist is zal moeten blijken, maar het minder extreme idee dat er al op de horizon zaken plaatsvinden die de relativiteitstheorie alleen niet kan verklaren, is op zichzelf al het onderzoeken waard. Een van de eersten die dit idee serieus nam, was de Indiase natuurkundige Samir Mathur. Samen met enkele collega's onderzoekt hij al ruimt tien jaar wat de [snaartheorie](#) ons kan leren over de mogelijke nieuwe natuurkunde die zich op en achter de horizon van een zwart gat afspeelt.

[Naar boven](#)

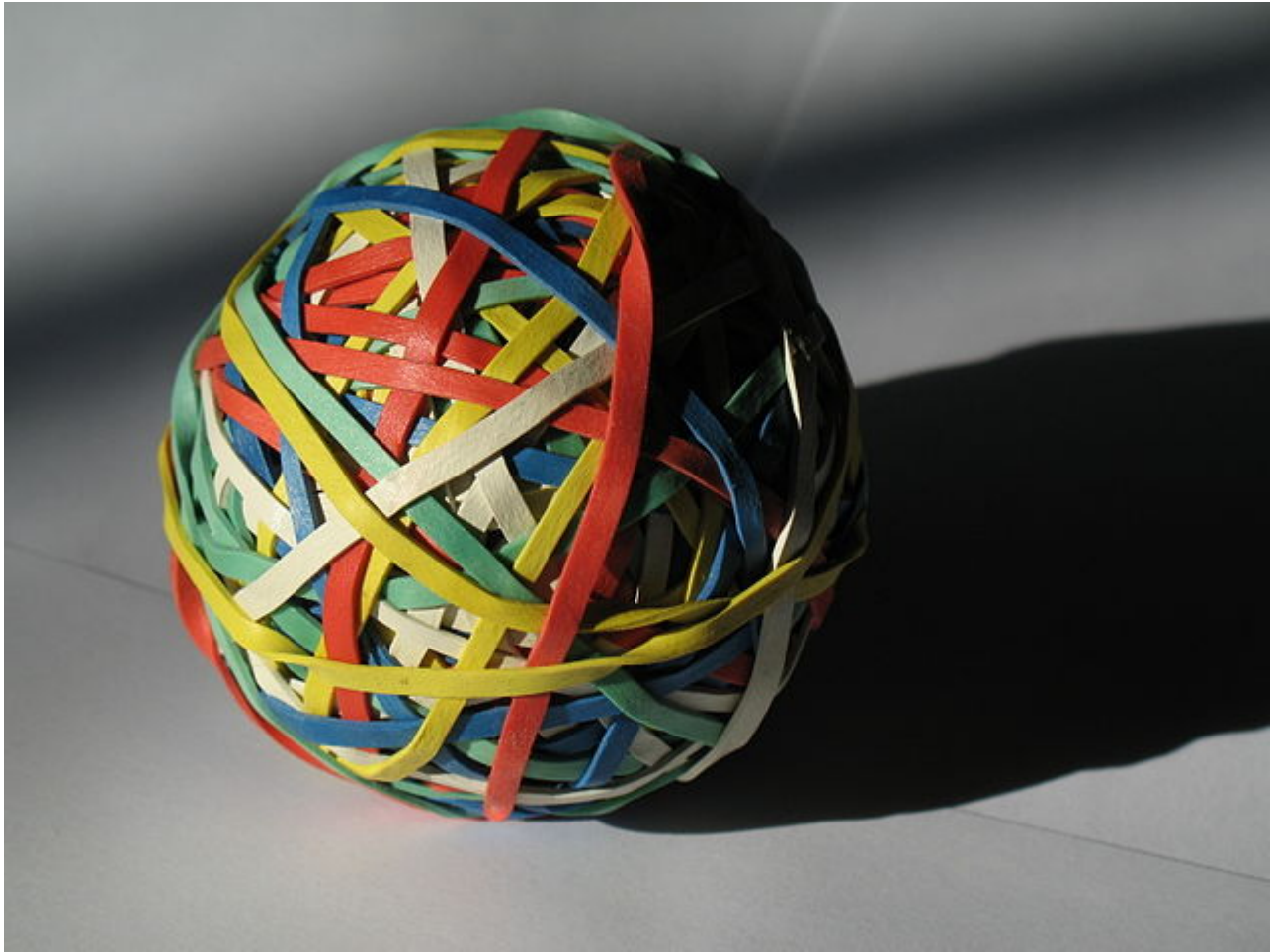
Fuzzballs

De snaartheorie kwamen we ook al in het [vorige artikel](#) in dit dossier tegen. Het basisidee van die theorie is dat de elementaire deeltjes in ons heelal geen puntvormige deeltjes zijn, maar extreem kleine, trillende snaartjes. Dat is een aanname die op dit moment nog lang

niet experimenteel bewezen kan worden (om dergelijke snaartjes te kunnen ‘zien’ zou een deeltjesversneller nodig zijn die zo groot is als het hele zonnestelsel), maar de aanname heeft wel belangrijke theoretische gevolgen. Met snaren als bouwstenen blijkt het namelijk wel mogelijk om tegelijkertijd de quantummechanica en de relativiteitstheorie te beschrijven. Snaartheorie is daarmee dus een kandidaat-theorie van de quantumzwaartekracht – op dit moment vrijwel de enige kandidaat die we hebben. Alleen daarom al is het dus interessant om uit te zoeken wat er in die theorie gebeurt op de rand van een zwart gat. In het allerbeste geval blijkt de snaartheorie volledig juist te zijn; in het slechtste geval is dat niet zo, maar krijgen we in elk geval een goed beeld van hoe een theorie over de quantumzwaartekracht de theoretische problemen die er op dit moment zijn (denk aan de [informatieparadox](#) en het [tellen van toestanden](#)) zou kunnen oplossen.

Mathur besloot daarom het idee van de snaartheorie serieus te nemen, en vroeg zich af: wat gebeurt er als we een zwart gat opbouwen uit een enorm aantal van zulke snaardeeltjes? Het antwoord was verrassend. Als we twee snaardeeltjes dicht bij elkaar brengen zullen die snaren al snel botsen, en bij dat botsen is de kans groot dat de snaren ‘openbreken’ en zich samenvoegen tot één nieuwe, langere snaar. Op diezelfde manier zal een heel grote verzameling van microscopische snaartjes in een zwart gat al snel een grote, vibrerende ‘kluwen’ vormen die effectief bestaat uit maar één extreem lange snaar. Mathur bedacht voor deze snaarkluwen de toepasselijke term ‘fuzzball’.

De volgende vraag die Mathur (in samenwerking met zijn student Oleg Lunin) zichzelf stelde, was: ‘hoe groot is zo’n fuzzball’? Eén enkele snaar is zoals gezegd minuscuul klein: een snaar is gemiddeld slechts zo’n 10^{-35} meter groot – maar dat is de lengte van de snaar als die in relatieve rust is. Als we een snaar echter veel energie geven zal die gaan trillen, en daarbij zal het ‘elastiek’ flink uitgerekt worden. De mega-snaar waaruit de fuzzball is opgebouwd, kan daardoor veel en veel langer zijn dan de lengte van één microscopische snaar. Mathur en Lunin slaagden erin om precies uit te rekenen hoeveel energie de fuzzball bevatte, en om daaruit te bepalen hoe groot zo’n fuzzball is. Het antwoord was verrassend: de fuzzball vult grofweg de hele ruimte binnen de horizon van een zwart gat! Kortom: als de snaartheorie het bij het rechte eind heeft, is het helemaal niet zo dat er voorbij de horizon van een zwart gat alleen maar lege ruimte is. Zodra we in de buurt komen van de horizon of die passeren, komen we direct de vibrerende fuzzball van elastische snaren tegen.



Afbeelding 3. Een bal van elastiek. Volgens het idee van Mathur is een fuzzball vergelijkbaar met een bal van elastiek - met als groot verschil met deze afbeelding dat de snaren in een fuzzball veel energie bevatten en continu trillen en bewegen. Foto: EEPROM Eagle via Wikimedia.

Daarmee lijkt de reikwijdte van de relativiteitstheorie alléén dus flink ingeperkt: die theorie is niet langer geldig tot ver achter de horizon van het zwarte gat. Al bij het benaderen van die horizon spelen ook quantumeffecten een rol, en is dus een volledige theorie van de quantumzwaartekracht nodig om te beschrijven wat er gebeurt. Het moge duidelijk zijn dat de singulariteit uit de relativiteitstheorie daarmee ook verdwijnt: rond die singulariteit zijn alleen de formules van Einstein al lang niet meer voldoende. De oneindige singulariteit is in Mathurs beschrijving vervangen door een veel meer ‘fuzzy’ kluwen van snaren.

[Naar boven](#)

Toestanden tellen

Lost Mathur's beeld van fuzzballs als beschrijving van zwarte gaten de raadsels rond deze objecten op? Daarnaast is nog veel onderzoek gaande, maar de resultaten zijn veelbelovend. Neem bijvoorbeeld de vraag die ons de afgelopen artikelen heeft beziggehouden: kunnen we het aantal microscopische toestanden van een zwart gat tellen, en komt het aantal dat we vinden overeen met de [entropie van een zwart gat](#) die Bekenstein en Hawking uit de thermodynamica berekenden?

Het antwoord is voorlopig een voorzichtig 'ja'. Het aantal toestanden van een fuzzball kan in principe geteld worden: we weten hoe lang de snaar waaruit de fuzzball bestaat, hoeveel energie erin zit, en op hoeveel manieren een snaar met die energie kan trillen. De berekening is gedaan voor een aantal eenvoudige gevallen, en in die gevallen is de uitkomst inderdaad van de juiste orde van grootte.

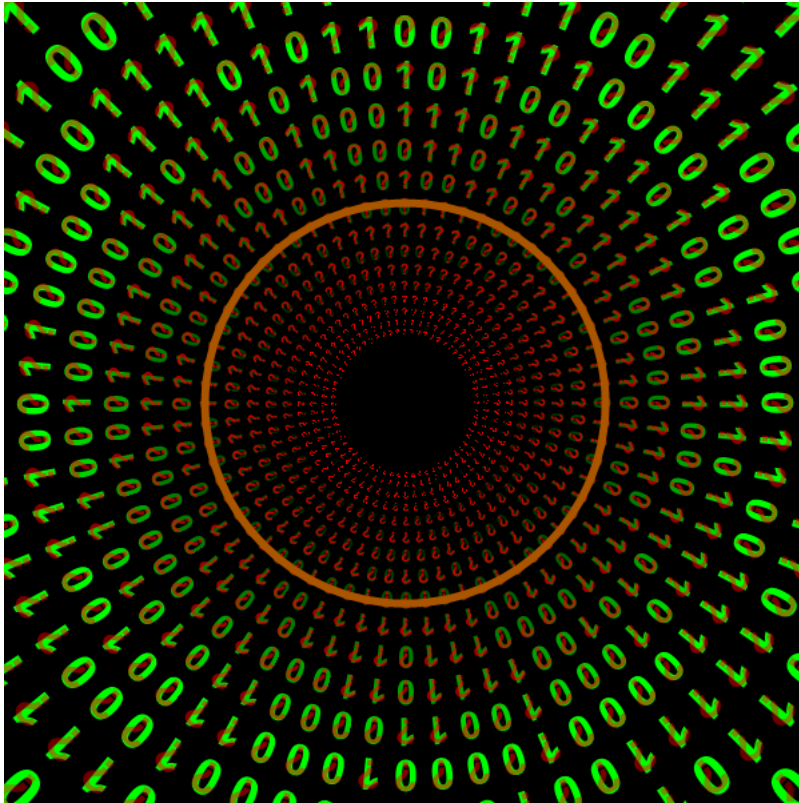
Daarmee is de situatie vergelijkbaar met het idee van Andrew Strominger en Cumrun Vafa dat we in het [vorige artikel](#) bespraken. Ook daar kon het aantal toestanden van zwarte gaten in eenvoudige gevallen geteld worden. Een voordeel van Mathurs idee ten opzichte van de D-brane-constructies van Strominger en Vafa, is dat het bij Mathurs fuzzballs niet nodig is om de zwaartekracht aan het begin van de berekening 'uit te zetten'. Voor Strominger en Vafa vormde die noodzaak een belangrijke horde: ze konden daardoor alleen de toestanden tellen voor een klasse van zwarte gaten waarvoor de zwaartekracht naar believen groter en kleiner gemaakt kan worden zonder het aantal toestanden te veranderen: de supersymmetrische zwarte gaten. Mathurs idee is in beginsel veel breder toepasbaar, al zijn de berekeningen voor meer algemene zwarte gaten wel veel moeilijker, en nog lang niet in alle gevallen uitgevoerd.

[Naar boven](#)

De informatieparadox

Het tweede grote raadsel rond zwarte gaten dat in dit dossier (en in de huidige theoretische natuurkunde) centraal staat, is de [informatieparadox](#). Volgens een beroemde berekening van Stephen Hawking zenden zwarte gaten langzaam [straling](#) uit, en verdampen ze daardoor, maar volgens diezelfde berekening bevat die straling geen enkele informatie over de inhoud en geschiedenis van een zwart gat. Het lijkt erop dat er na het vormen van een zwart gat dus informatie verloren gaat – een verschijnsel dat sterk in tegenspraak is met de

grondbeginselen van zowel de relativiteitstheorie als de quantummechanica.



Afbeelding 4. De informatieparadox. Waar blijft de informatie die in een zwart gat valt?

Hoe zit dat als we aannemen dat zwarte gaten fuzzballs zijn? Een fuzzball zelf kan heel veel informatie bevatten: die informatie zit verborgen in de precieze vorm en de precieze manier van trillen van de snaarkluwen. Het ‘verdampen’ van de fuzzball kunnen we zien als het ‘afbreken’ van kleine stukjes snaar die vervolgens aan de fuzzball weten te ontsnappen. Mathur rekende uit hoe de straling die op deze manier ontstaat eruit ziet, en hij ontdekte dat het resultaat vrijwel precies het [Planckspectrum](#) is dat Hawking ook in zijn berekening vond.

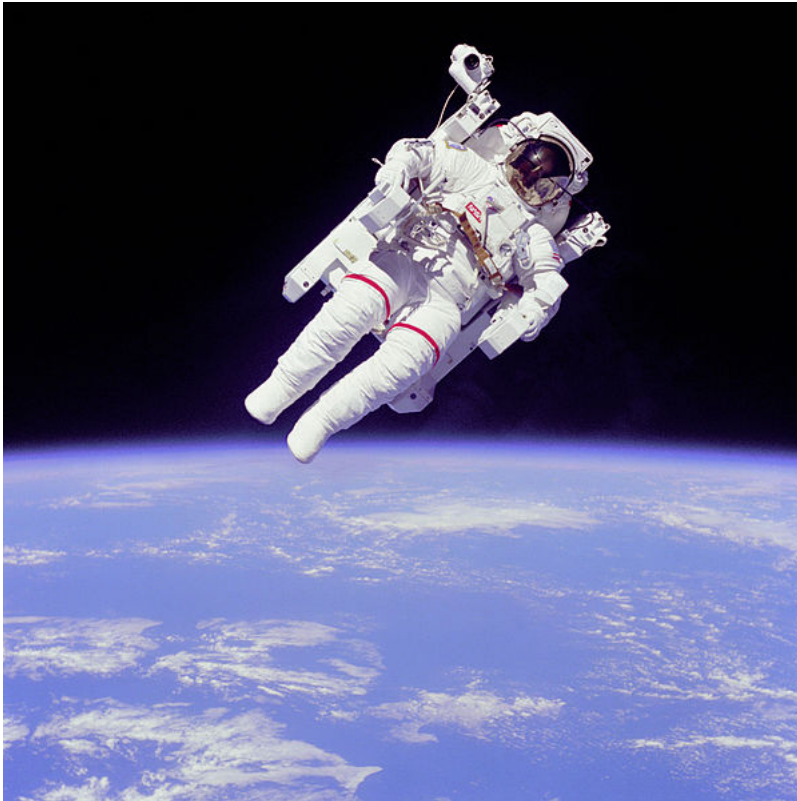
De clou zit hem in het ‘vrijwel precies’: omdat de straling bestaat uit stukjes snaar van de oorspronkelijke fuzzball bevat die straling namelijk, in tegenstelling tot de Hawkingstraling, wel degelijk kleine beetjes informatie over hoe de fuzzball eruit zag, en dus over hoe het zwarte gat oorspronkelijk gevormd werd. Het idee van Mathur lijkt dus ook de informatieparadox op te lossen.

[Naar boven](#)

Wat zie je als je in een fuzzball valt?

Daarmee is het idee van de fuzzballs veelbelovend, maar ook dit idee – net als vrijwel alle andere ideeën die we in de afgelopen artikelen hebben besproken – is nog lang niet zo ver ontwikkeld dat het algemeen door natuurkundigen geaccepteerd wordt. Er zijn nog voldoende open vragen. Lukt het ook om met dit idee de toestanden van meer algemene zwarte gaten te tellen? Is het idee van snaardeeltjes dat aan de basis van het idee ligt juist, en zo niet, welke lessen kunnen we dan toch hieruit leren?

Een andere interessante vraag is: wat ziet een astronaut die in een fuzzball valt? In Einsteins theorie was het zo dat zo'n astronaut helemaal niets bijzonders zou merken, maar hoe zit dat in het idee van Mathur? In een [zeer recent artikel](#) probeert Mathur deze vraag te beantwoorden. Het antwoord is wederom verrassend: de snaren waaruit de astronaut bestaat zullen in de buurt van de horizon vermengd worden met de snaren van de fuzzball-kluwen, maar het is niet uitgesloten dat de astronaut dit ervaart *alsof hij gewoon door de horizon valt*. Vergelijk dit idee met het idee van [complementariteit](#) dat we in een eerder artikel bespraken: een waarnemer op afstand ziet de astronaut opgenomen worden in de fuzzball-kluwen, maar voor de astronaut zelf lijkt er helemaal niets bijzonders te gebeuren. Of dit idee van 'fuzzball-complementariteit', nog vers van de pers, het verdere onderzoek zal overleven, zal de toekomst leren.



Afbeelding 5. Een astronaut. Een astronaut - hier nog veilig dicht bij de aarde. Wat zou deze astronaut ervaren als hij in een zwart gat valt? Foto: NASA.

Het moge duidelijk zijn dat we inmiddels zo ver in de open vragen rond zwarte gaten zijn gedoken dat de antwoorden steeds minder zeker worden. We hebben in de afgelopen artikelen geprobeerd de belangrijkste recente ideeën te schetsen, maar het is onmogelijk om te voorspellen welke daarvan juist zijn, en of het juiste idee rond sommige problemen überhaupt al bedacht is. In eerste instantie zal het rekenwerk daarin uitkomst moeten bieden. Iedereen kan een wild idee verzinnen, maar de goede ideeën gaan ook vergezeld van een grondig wiskundig formalisme, en alle vragen die we besproken hebben moeten in dat formalisme uiteindelijk toetsbaar zijn. Daarna zal het uiteindelijk toch het experiment moeten zijn dat de definitieve uitkomst biedt. Als een theorie over zwarte gaten alle wiskundige tests doorstaat, is de vraag welke voorspellingen zo'n theorie doet over de waarnemingen die we aan zwarte gaten kunnen doen, en zullen we moeten proberen door middel van dergelijke waarnemingen de theorie te bevestigen of juist onderuit te halen. We zitten momenteel middenin het 'theoretische' deel van dit proces, en lijken nog redelijk ver verwijderd van het 'experimentele' deel - er is dus nog genoeg voor komende generaties van natuurkundigen om aan te werken!

[Naar boven](#)

Voor wie door de bomen het bos niet meer ziet: in het [afsluitende artikel](#) in dit dossier zetten we alle open vragen en voorgestelde oplossingen in de theorie van zwarte gaten nog eens op een rijtje.