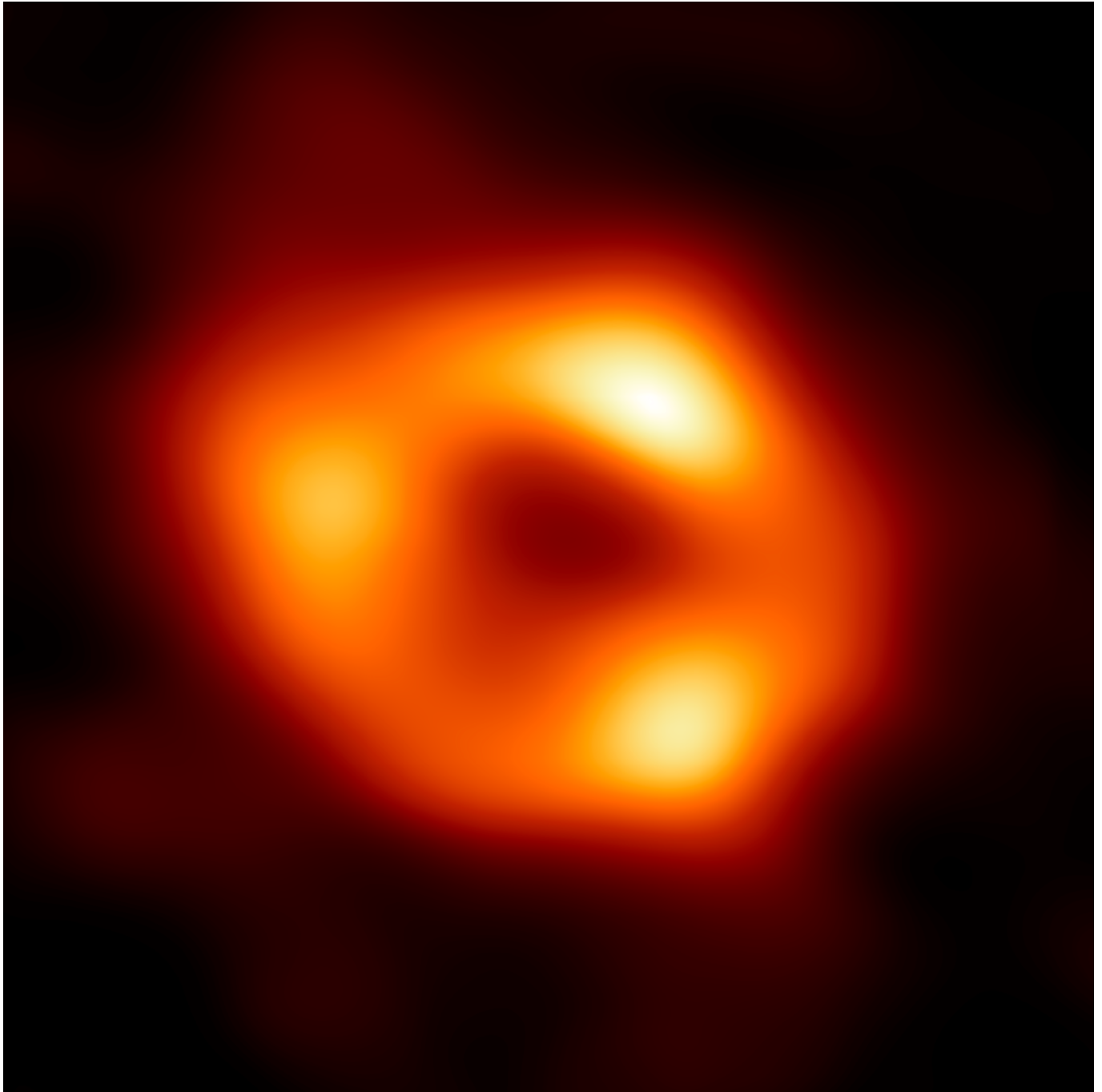


# Naar de horizon en daar voorbij

**De QU-redactie bestaat voor een groot deel uit PhD- en masterstudenten in de natuurkunde. Ook oud-redacteur [Evita Verheijden](#) combineerde haar promotie met het schrijven voor onze site; op woensdag 6 juli promoveerde ze op haar proefschrift getiteld “[Naar de horizon en daar voorbij: unitaire evolutie en niet-universele dynamica van horizonnen in holografie.](#)” Een technisch klinkend onderwerp, maar natuurlijk legde Evita ook in begrijpelijke, populairwetenschappelijke termen uit waarover haar onderzoek ging. Hieronder de Nederlandse samenvatting van het proefschrift.**

Naar de horizon en daar voorbij: niet alleen gemakkelijker gezegd dan gedaan, maar ook nog eens potentieel gevaarlijk. Want eenmaal voorbij de horizon van een zwart gat – een van de hoofdrolspelers van dit proefschrift – kun je nooit meer terug. Gelukkig is dit proefschrift gebaseerd op puur theoretisch onderzoek. Daarbij gloort achter de horizon vooral de heilige graal van de moderne theoretische natuurkunde: een theorie van alles, en in het bijzonder van quantumzwaartekracht.



**Afbeelding 1. Naar de horizon en daar voorbij.** Het zwarte in de Melkweg, Saggitarius A\*. In het binnenste donkere gebied bevindt zich de horizon. Foto: Event Horizon Telescope Collaboration.

Een dergelijke theorie moet de quantummechanica verenigen met de algemene relativiteitstheorie. Die eerste is van belang op de allerkleinste schaal: de interactie tussen elementaire deeltjes, terwijl de tweede cruciaal is op de allergrootste schaal: die van het heelal. De combinatie moet ons inzicht verschaffen in de fundamentele bouwstenen van de ruimtetijd. Dat is nodig om twee van de grootste mysteries in ons heelal te begrijpen: zwarte

gaten en de oorsprong van het heelal.

Zwarte gaten zijn alomtegenwoordig in ons heelal, zoals onlangs bevestigd werd door de foto van het zwarte gat (Sagittarius A\*) in het midden van onze Melkweg. Een zwart gat kan ontstaan als een ster aan het einde van diens leven, wanneer alle brandstof op is, ineenklaapt onder de eigen zwaartekracht. Heel veel massa wordt dan samengeperst in een klein volume, waardoor de zwaartekracht enorm wordt: zó groot, dat zelfs licht – dat met 300.000 km/s toch een behoorlijke snelheid haalt – niet meer kan ontsnappen. Stephen Hawking toonde echter aan dat zwarte gaten toch langzaam verdampen: ze zenden de naar hem genoemde Hawkingstraling uit. Dat is een puur quantummechanisch effect dat leidt tot allerlei vragen en paradoxen die we pas echt kunnen oplossen als we quantumzwaartekracht begrijpen.

Het tweede mysterie is de oerknal en de daaropvolgende periode van inflatie, waarin het heelal een exponentiële uitdijning doormaakte. In die fase was ´en het heelal heel klein, ´en de zwaartekracht heel sterk: ook hier is quantumzwaartekracht dus vereist voor een volledige beschrijving. Momenteel dijt het heelal ook versneld uit, en een goed begrip van de periode van inflatie is daarmee ook relevant om de huidige toestand en toekomst van ons heelal te begrijpen.

Zwarte gaten en een versneld uitdijend heelal hebben een belangrijke overeenkomst: beide hebben een horizon. In het geval van zwarte gaten is dat het ‘point of no return’: als je voorbij de horizon gaat, ben je verloren en kun je nooit meer ontsnappen aan de zwaartekracht van het zwarte gat. In een versneld uitdijend heelal is de horizon overal om ons heen, als de grens van wat we kunnen zien: doordat sterren steeds sneller steeds verder van ons weg komen te staan, kan hun licht ons uiteindelijk niet meer bereiken. Een goed begrip van beide typen horizonnen kan informatie verschaffen die nodig is om een theorie van quantumzwaartekracht op te stellen. Dat is het uiteindelijke doel van het onderzoek in dit proefschrift.

## Horizonnen in holografie

Een belangrijk stuk gereedschap in onze pogingen om quantumzwaartekracht te begrijpen is holografie. Het holografisch principe stelt dat een theorie van quantumzwaartekracht ‘dual is aan’ (equivalent beschreven kan worden als) een pure quantumtheorie in één dimensie

lager - vergelijkbaar met een hologram, waarin een tweedimensionaal object genoeg informatie bevat om een driedimensionaal beeld te produceren. Zo'n dualiteit is handig, want vaak zijn berekeningen die moeilijk zijn in de ene theorie juist makkelijk in de andere.



**Afbeelding 2. Een andere horizon.** Net als het aardoppervlak heeft ook een zwart gat een horizon: een denkbeeldige grens van waar voorbij je niet kunt zien. Foto: [Marcus Dall Col](#).

Een belangrijke aanwijzing voor het holografisch principe komt vanuit het bestuderen van de horizon van zwarte gaten. Zoals gezegd kan een zwart gat straling uitzenden; dat betekent dat het een temperatuur heeft. Daarnaast heeft een zwart gat ook een entropie; dat is een maat voor het aantal microtoestanden (configuraties op kleine schaal) waaruit een bepaalde macrotoestand (de collectie eigenschappen die wij van het zwarte gat zien, zoals massa of rotatie) opgebouwd kan zijn. Voor veel fysische systemen neemt de entropie evenredig toe met het volume: dit geldt bijvoorbeeld voor de configuraties van moleculen (hun posities en snelheden) die leiden tot dezelfde macrotoestand, een wolk gas van een bepaalde temperatuur en dichtheid. Voor zwarte gaten neemt de entropie echter evenredig toe met het oppervlak van de horizon: een teken dat die genoeg informatie bevat om het hele

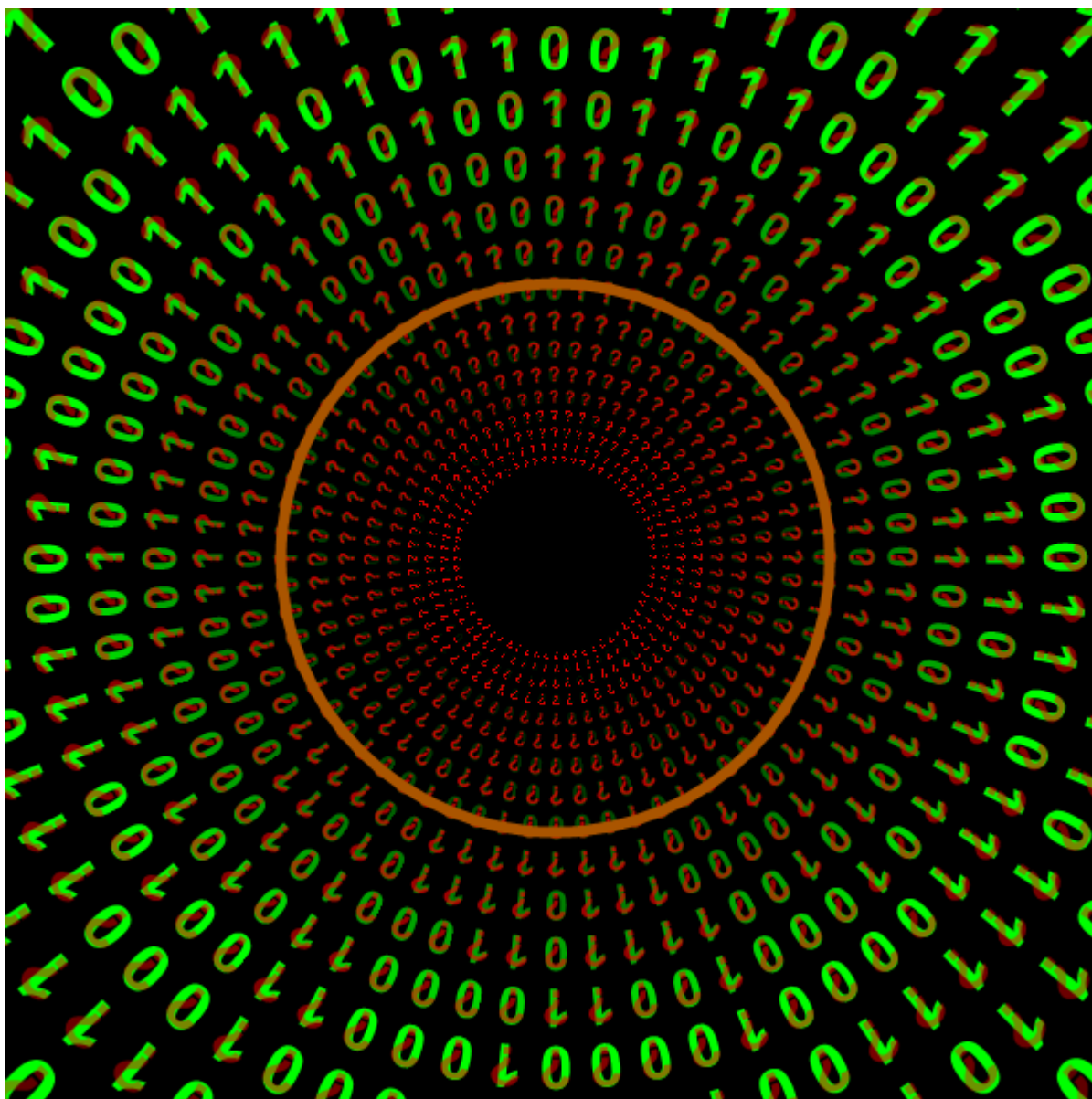
binnenste van het zwarte gat te beschrijven. Hetzelfde geldt voor de kosmologische horizon die een waarnemer in een uitdijend heelal omringt. Er wordt overigens nog wel gedebatteerd of die horizon dan alles wat erbinnen of erbuiten zit beschrijft.

Het holografisch principe heeft ons veel geleerd over zwarte gaten, maar er zijn nog veel belangrijke open vragen. Hoe werkt de verdamping van zwarte gaten op microscopisch niveau? Kunnen we holografie gebruiken om naast universele (gelijk voor alle soorten zwarte gaten) ook niet-universele aspecten van zwarte gaten te beschrijven? En (hoe) kunnen we holografie toepassen bij het bestuderen van ons uitdijend heelal? In dit proefschrift onderzoek ik deze vragen aan de hand van twee verschillende routes. In de eerste bestudeer ik de zogeheten informatieparadox voor zowel de horizon van een zwart gat als de kosmologische horizon.

In de tweede route onderzoek ik niet-universele aspecten van de horizons van verschillende soorten zwarte gaten; zulke aspecten zijn cruciaal bij het ontwikkelen van een microscopische theorie. Beide routes maken gebruik van een bepaald type tweedimensionale zwaartekracht; dit versimpelt de berekeningen zonder de interessante aspecten teniet te doen.

## **Unitaire evolutie en de informatieparadox**

Stel je voor dat je een document hebt met gevoelige informatie (bijvoorbeeld over de kabinetsformatie), en dat je daar op stel en sprong vanaf moet. Een gemakkelijke optie is het document te verbranden. Helaas zijn journalisten steeds inventiever geworden, en met behulp van alle snippertjes en asvlokken zijn zij (in theorie) in staat om dat verbrandingsproces ongedaan te maken. Een slimme politicus gooit zo'n gevoelig document daarom in een zwart gat: van de buitenkant heeft geen enkele journalist immers ooit toegang tot wat daarin verdwenen is. Toch?



**Afbeelding 3. De informatieparadox.** Komt alle informatie die we in een zwart gat gooien er weer uit, of niet? Afbeelding: Marcel Vonk.

Dat blijkt niet helemaal waar: informatie kan volgens de quantummechanica namelijk nooit verloren gaan. Zwarte gaten verdampen heel langzaam, en een journalist die al die Hawkingstraling zou opvangen, zou uiteindelijk de informatie in het document moeten kunnen reconstrueren. De natuurkundige formulering is dat de entropie van de opgevangen straling eerst moet toenemen (we weten niet wat er precies in die straling zit), maar uiteindelijk weer moet afnemen naar nul (als we alle straling hebben, moeten we volledige kennis hebben van wat er in het zwarte gat zat). Dit verloop van de entropie als functie van de tijd wordt de Page-kromme genoemd, naar de theoretisch natuurkundige Don Page. Toen Stephen Hawking de stralingsentropie van een verdampend zwart berekende vond hij echter

een almaar stijgende lijn. Deze schijnbare tegenstelling wordt de informatieparadox genoemd.

In 2019 is het theoretisch natuurkundigen decennia na het werk van Hawking en Page voor het eerst gelukt om de Page-kromme te reproduceren voor een verdampend zwart gat. In dit proefschrift bouw ik voort op dat onderzoek en beschrijf ik een nieuwe manier om de Page-kromme voor een verdampend zwart gat in twee dimensies te vinden. Daarbij gebruik ik holografie om het zwarte gat en de uitgezonden straling te begrijpen vanuit een duaal, driedimensionaal perspectief. Het onderscheid tussen het zwarte gat en de opgevangen straling is in die duale theorie als het in tweeën delen van een vijver met een visnet; het bewegen van de scheidslijn tussen deze twee systemen bootst de verdamping in twee dimensies na.

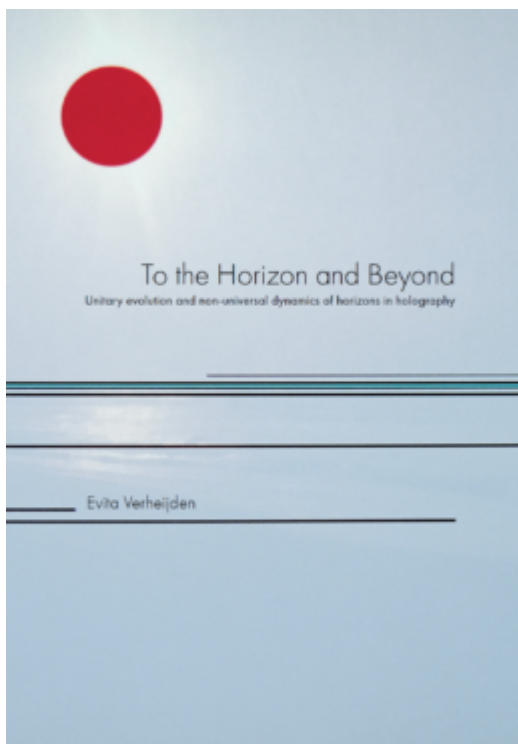
Het handige van deze beschrijving is dat die ook kan werken voor de kosmologische horizon van een uitdijend heelal. Zo'n horizon zendt ook straling uit: in ons heelal is dat de kosmische achtergrondstraling. Analoog aan de informatieparadox voor zwarte gaten kunnen we ons afvragen: als we al die kosmische straling zouden opvangen, kunnen we dan achterhalen wat zich achter de kosmologische bevindt? Door eenzelfde holografische methode toe te passen op een uitdijend heelal (wederom in twee dimensies), laat ik zien dat dit in theorie kan. Het verzamelen van zoveel straling blijft echter niet zonder gevolg: onze berekening laat zien dat die straling met waarnemer en al kan ineensorten tot een zwart gat.

## **Niet-universele dynamica en microscopische theorieën**

In de theoretische natuurkunde bestuderen we zwarte gaten van allerlei vormen en maten: ze kunnen elektrisch en magnetisch geladen zijn, ronddraaien, zich bevinden in (op grote afstand) vlakke of gekromde ruimtetijden, en bestaan in verschillende dimensies. Toch hebben ze enkele cruciale eigenschappen die universeel zijn. Die universaliteit vindt haar oorsprong in het feit dat alle 'extreme' zwarte gaten er gelijksoortig uitzien als we inzoomen op de horizon. Extreme zwarte gaten hebben een temperatuur gelijk aan nul; grof gezegd zijn dit de lichtst mogelijke zwarte gaten, omdat ze niet verder kunnen verdampen. Verhogen we vervolgens de temperatuur van zo'n extreem zwart gat een klein beetje (door er iets in te gooien), dan is de thermodynamische respons universeel: de massa neemt altijd kwadratisch, en de entropie lineair toe met de temperatuur. Hoeveel de entropie toeneemt met elke graad

opwarming, is dan wel weer afhankelijk van de precieze parameters van het zwarte gat. Daarnaast zijn er andere belangrijke aspecten van bijna-extreme zwarte gaten die niet universeel zijn.

De tweede route die ik in dit proefschrift volg richt zich op zulke niet-universele aspecten van bijna-extreme zwarte gaten. Ik bestudeer verschillende soorten zwarte gaten: ronddraaiende zwarte gaten in vijf dimensies, ingebed in een vlakke of gekromde ruimtetijd, en zwarte gaten met elektrische en/of magnetische lading in vier dimensies, eveneens in een vlakke of gekromde ruimtetijd. Het eerste doel van dit onderzoek is te begrijpen hoe zulke eigenschappen de geometrie van de horizon van bijna-extreme zwarte gaten beïnvloeden, en de interacties van deeltjes die in de buurt van het zwarte gat zijn. Zulke interacties krijgen kleine correcties, die perturbaties genoemd worden. Het tweede doel is om te berekenen wat het effect van deze perturbaties is ver weg van het zwarte gat: zijn ze nog zichtbaar voor een waarnemer die zich op veilige afstand bevindt? Daarbij blijkt het veel uit te maken of het zwarte gat zich in een vlakke of gekromde ruimtetijd bevindt.



**Afbeelding 4. To the horizon and beyond.** De kaft van Evita's proefschrift.

Dit onderzoek is van belang om de fundamentele bouwstenen van zwarte gaten te kunnen



begrijpen - en een holografisch duale theorie op te stellen. Zo'n theorie moet immers dezelfde informatie bevatten en dus dezelfde effecten en perturbaties kunnen beschrijven. Dat lukt goed voor de universele aspecten van zwarte gaten, maar niet voor de niet-universele aspecten die in dit proefschrift beschreven worden. Een beter begrip van zulke aspecten en de informatieparadox moet uiteindelijk tot de heilige graal leiden: een theorie van quantumzwaartekracht, die ons inzicht kan bieden in de grote mysteries van ons heelal.