

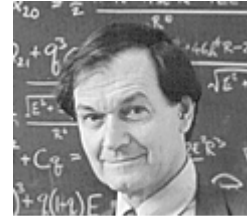
DE TWIST OVER ZWARTE GATEN EN RUIJMTETIJD

Guido van der Wolk

Recensie van Stephen Hawking & Roger Penrose, *De aard van ruimte en tijd*. Uitgeverij Ooievaar, Amsterdam. 3e druk, 1999, 170 bladzijden. Oorspronkelijke titel: *The Nature of Space and Time*. Princeton University Press, 1996.



Stephen W. Hawking



Roger Penrose

Our mistake is not that we take our theories too seriously, but that we do not take them seriously enough.
Steven Weinberg (1977)

Uit het debat tussen de twee kosmologische kopstukken Hawking en Penrose over zwarte gaten en kosmologie komt een verschil in hun interpretatie van de kwantumtheorie naar voren. Hieruit blijkt hoe verweven filosofie en fysica met elkaar zijn. Hawking blijft hardnekkig positivist bij het opstellen van zijn theorieën: ze hoeven alleen maar toetsbaar te zijn en symmetrisch. Terwijl Penrose blijft vasthouden aan het bestaan van een reële wereld; de asymmetrie van de kwantumtheorie en het heelal moeten met asymmetrische theorieën verklaard worden. Met hun twist pakken ze de draad op van het fameuze Einstein-Bohrdebat.

In *De aard van ruimte en tijd* zijn de zes lezingen en het slotdebat, die Stephen Hawking en Roger Penrose in 1994 hielden aan de Universiteit van Cambridge, gepubliceerd. Hierin bespreken de twee eminente Britse fysici de problemen, die ontstaan bij het opstellen van een kwantumgravitatie-theorie, een vereniging van de kwantumveldentheorie en Einsteins theorie van de zwaartekracht, de algemene relativiteitsleer. De problemen zijn wiskundig maar vooral filosofisch van aard. De twee kosmologische kopstukken redetwisten onder andere over de richting van tijd,

waarom het heelal anders is aan het begin dan aan het eind, de randvoorwaarden bij het ontstaan van het heelal en de manier waarop zwarte gaten informatie opslokken. Ook al delen de twee gezamenlijke bijdragen aan de fysica, – Penrose was lid van Hawking's Ph.D thesis committee aan Cambridge – ze verschillen van mening in hun visie op de kwantumtheorie en diens impact op de theorieën over de evolutie van het heelal.

Eén van Hawking's grootste ontdekkingen – gedaan in 1973, misschien wel de belangrijkste ontdekking van de vorige eeuw – was dat kwantumeffecten ervoor zorgen dat zwarte gaten deeltjes uitzenden. Het zwarte gat zal door dit proces verdampen en uiteindelijk zal er niks meer van overblijven. Maar tijdens de formatie van een zwart gat slokt deze informatie op, zoals de typen, eigenschappen en configuraties van de deeltjes die er invallen. Wanneer een zwart gat straling uitzendt, verliest het een stukje van de informatie, die het had. Volgens Hawking is dit verlies onherstelbaar en introduceert dit een extra onzekerheid bovenop de kwantumonzekerheid van Heisenberg. Die stelt dat je niet én de plaats én de impuls van een deeltje of, beter gezegd, niet én de toestand én de mate van verandering kan kennen, maar slechts één van beide.

Penrose, de ontwikkelaar van een twistortheorie, die voortbouwt op Einstein's algemene relativiteisleer, is een filosofisch scepticus van de kwantumtheorie. Hij voert aan dat experimenten de onoverwinnelijke kracht van de algemene relativiteitsleer bevestigen. Einstein's theorie van de zwaartekracht is vastgesteld op een nauwkeurigheid van 1 op 10^{14} , d.i. met veertien decimalen nauwkeurig. De kwantumveldentheorie moet het doen met een nauwkeurigheid van 1 op 10^{11} . Naast de twistortheorie heeft Penrose een verklaring bedacht voor de richting van de tijd in ons heelal. Volgens Penrose moet de kwantumgravitatie tijdasymmetrisch zijn. De tijdasymmetrie zal dan verklaren waarom het heelal in het begin uniform is, zoals uit de microgolfachtergrondstraling, een overblijfsel van de oerknal, blijkt, terwijl het einde van het universum wanordelijk moet zijn. Deze tijdasymmetrie heeft Penrose verwerkt in zijn Weylkrommingshypothese. Ruimtetime, het systeem met één tijdcoördinaat en drie ruimtecoördinaten waarmee fysici gebeurtenissen in het heelal beschrijven, is gekromd, zoals Einstein ontdekte, door de aanwezigheid van massa. Maar de ruimtetime kan ook intrinsiek gekromd zijn. Deze kwantiteit wordt Weylkromming genoemd. Zwaartekrachtsgolven en zwarte gaten, bijvoorbeeld, krullen de ruimtetime op zelfs in gebieden die leeg zijn. In het vroege heelal zal de Weylkromming nul zijn, maar in het 'late' heelal zullen de grote hoeveelheid zwarte gaten, voor een hoge Weylkromming zorgen.

Het belangrijkste wat in de lezingen naar voren komt is dat, de twee kosmologische kopstukken verschillen in hun interpretatie van de kwantummechanica. Volgens Hawking hoeft een theorie alleen verklaringen te produceren, die overeenkomen met de experimentele gegevens. Penrose denkt dat het simpelweg vergelijken van voorspellingen met experimenten niet voldoende is om de werkelijkheid te verklaren. Want de kwantumtheorie eist dat golf functies superposities van mogelijke toestanden zijn, wat tot absurditeiten leidt. De twee eminenten fysici pakken duidelijk de draad op van het fameuze debat tussen Einstein en Bohr, waarin Bohr Einstein niet van de verklarende kracht van de kwantummechanica heeft kunnen

overtuigen. Einstein noemde een fusie van de kwantummechanica en de algemene relativiteitsleer ‘kinderachtig’.

‘Hoewel de lezingen kennis van de fysica vereisen, beweegt een groot deel van het debat zich op een hoger niveau, dat een breder publiek zal interesseren,’ schrijft Michael Atiyah in het voorwoord. ‘De lezer zal tenminste een idee krijgen van de reikwijdte en de subtiliteit van de ideeën, die aan de orde komen en van de enorme uitdaging om een coherent beeld te scheppen van het heelal dat zowel consistent is met de gravitatie- als met de kwantumtheorie.’

Ik wil daaraan toevoegen dat, gezien de grote mate van verwevenheid tussen filosofie en fysica, de lezingen ook in hoge mate een kennis van de filosofie van de fysica vereisen. Waarom geven fysici de voorkeur aan symmetrische natuurwetten? Is de werkelijkheid belangrijk? Kunnen we nog spreken van ruimte en tijd; zijn die niet vervangen door de ruimtetijd? Hoe valt het Hawking-Penrosedebat te vergelijken met het Einstein-Bohrdebat? Kunnen asymmetrische natuurwetten asymmetrische gebeurtenissen verklaren? Is spontane kwantummeting magie? Kunnen we met een telescoop in de toekomst kijken? Is de kwantumtheorie toereikend voor macroscopische objecten?

Met dit soort vragen worden lezers, die de zes lezingen van Hawking en Penrose en het slotdebat verder willen uitdiepen, geconfronteerd. In deze recensie worden de standpunten van de twee fysici besproken en wordt gekeken in welke filosofische stromingen hun opvattingen zijn onder te brengen. Eerst laat ik Hawking aan het woord onder de titel *Hawking over de kwantumtheorie van zwarte gaten*, een samenvatting van zijn eerste twee lezingen. Daarna behandel ik de argumenten uit de eerste twee lezingen van Penrose onder de titel *Penrose over kwantumtheorie en ruimtetijd*. De laatste lezing van Hawking behandel ik in twee delen: *Hawking over kwantumkosmologie* en *Hawking over de richting van tijd*. De laatste lezing van Penrose over de door hem ontwikkelde twistortheorie wordt behandeld in *Penrose over kwantumkosmologie*. In *Het debat* blijkt het duidelijkst hoe de twee verschillen in hun interpretatie van de kwantummechanica en de gevolgen die deze hebben op de theorieën over de evolutie van het heelal. Ik eindig deze recensie met een categorisatie van de standpunten die in *De aard van ruimte en tijd* naar voren zijn gekomen en op grond daarvan kom ik met een evaluatie.

Hawking over de kwantumtheorie van zwarte gaten

Het probleem van de algemene relativiteitstheorie is dat het geen volledige theorie is. Ze voorspelt immers het bestaan van singulariteiten, theoretische punten met een volume van nul en een oneindige dichtheid, in twee situaties. Eén situatie is in de toekomst in de gravitationele ineenstorting van sterren en andere massarijke objecten tot zwarte gaten. De andere situatie, waarin de algemene relativiteitstheorie singulariteiten voorspelt, is in het verleden, bij het begin van het heelal, de oerknal. De veldvergelijkingen die in deze singuliere punten gelden kunnen niet worden gedefinieerd. Er kan niet voorspeld worden, wat er uit een singulariteit komt. Voor een singulariteit in het verleden kan dit probleem alleen worden aangepakt met de theorie van de kwantumgravitatie. De singulariteiten die voor de toekomst zijn voorspeld, zullen gelukkig voorkomen op plaatsen, zoals in zwarte gaten, die verborgen zijn voor externe waarnemers. De onvoorspelbaarheden, die volgens de algemene

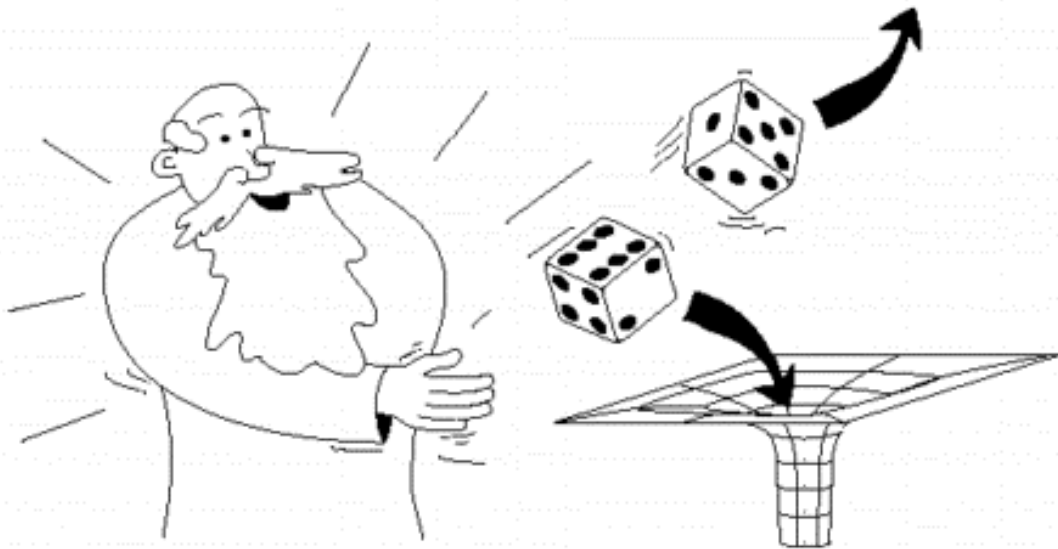
relativiteitsleer kunnen optreden in singulariteiten, hebben geen gevolgen voor wat er in de buitenwereld gebeurt.

Doordat de zwaartekracht altijd aantrekkend is, wordt de materie in het heelal samengetrokken tot objecten zoals sterren en sterrenstelsels. Die kunnen zich in het geval van sterren tegen verdere samenballing weren door de thermische druk, de kracht die vrijkomt bij het uitstralen van warmte. In het geval van sterrenstelsels weren ze zich tegen samenklontering door draaiing en interne bewegingen, het impulsmoment. Uiteindelijk verliest het object alle warmte en impulsmoment en begint te krimpen. Wanneer de massa kleiner is dan anderhalf keer de massa van de zon, kan de samenballing gestopt worden door de degeneratiedruk, de kracht uitgeoefend door de grote dichtheid van compacte materie, van elektronen en neutronen. Het object zal dan in de stabiele toestand van respectievelijk een witte dwerg of neutronenster belanden. Maar als de massa groter is dan anderhalve keer de massa van de zon, is er niets meer dat de samenballing kan tegenhouden. Wanneer het object is geslonken tot een bepaalde kritische omvang, wordt het zwaartekrachtveld aan de oppervlakte zo sterk dat de lichtkegels naar binnen hellen. Het is dus onmogelijk om van binnen naar buiten te ontsnappen. Daarom noemt men zo'n ineengestort object een zwart gat. De begrenzing daarvan wordt waarnemingshorizon genoemd, het lichtoppervlak gevormd door de lichtstralen, die nog net niet uit het zwarte gat kunnen ontsnappen en dus niet meer waargenomen kunnen worden.

Volgens Hawking blijkt, dat als een ster of sterrenstelsel ineenstort tot een zwart gat er een grote hoeveelheid informatie verloren gaat. Het ineenstortende object wordt beschreven door een groot aantal parameters, de soorten materie en de verdeling van massa en dichtheid volgens de zogenaamde multipoolmomenten. Het zwarte gat, dat zich vormt, is echter onafhankelijk van de soort materie en verliest snel alle multipoolmomenten, behalve de eerste twee: het monopoolmoment, dat de massa is, en het dipoolmoment, dat het impulsmoment is. Zo blijkt uit de *geen-haarstelling*, bewezen door Israel, Carter, Robinson en Hawking. Deze stelt, dat stationaire zwarte gaten worden beschreven door massa en impulsmoment en in het geval van de aanwezigheid van een elektromagnetisch veld ook door elektrische lading.

In de algemene relativiteitsleer is dat verlies van informatie niet echt belangrijk, omdat volgens de klassieke theorie alle informatie over de ineengestorte ster nog in het zwarte gat zit. Een waarnemer die een object ziet instorten tot een zwart gat kan nog steeds zeggen waar het gat van gemaakt is. Met de kwantumtheorie verandert dit. Ten eerste zal het ineenstortende object slechts een beperkte hoeveelheid fotonen, d.i. informatie, uitzenden, voordat het de waarnemingshorizon passeert. Een onvoldoende hoeveelheid om alle informatie over het ineenstortende object te verkrijgen. In de kwantumtheorie is er geen manier voor een externe waarnemer om de toestand van het ineenstortende lichaam te meten. Je zou denken dat dat niet veel uitmaakt omdat de informatie nog steeds in het zwarte gat zit, ook al kun je die niet van buiten af meten. Maar uit het tweede gevolg van de kwantumtheorie, toegepast op zwarte gaten, blijkt dat zwarte gaten thermische straling uitzenden en massa verliezen. Het lijkt erop, dat ze uiteindelijk volledig verdwijnen en de informatie, die ze bevatten meenemen. Dit betekent, dat de zwaartekracht een extra niveau van onvoorspelbaarheid introduceert, naast de onzekerheid die gewoonlijk wordt geassocieerd met de kwantumtheorie, namelijk Heisenbergs onzekerheidsrelatie. Deze stelt dat je niet én de plaats én de

impuls van een deeltje kan kennen, maar slechts één van beide. Deze extra onzekerheid in de fysica van zwarte gaten zal waarschijnlijk – in tegenstelling tot Heisenbergs onzekerheidsrelatie – nogal moeilijk experimenteel te bevestigen zijn. Einstein had ongelijk toen hij zei dat God niet dobbelt. ‘De studie van zwarte gaten doet vermoeden dat God dobbelt en de waarnemers in de war brengt door de dobbelstenen te gooien, waar ze niet te zien zijn, namelijk binnenin een zwart gat,’ aldus Hawking (figuur 1).



Figuur 1: God dobbelt. (Uit: De aard van ruimte en tijd, blz. 39).

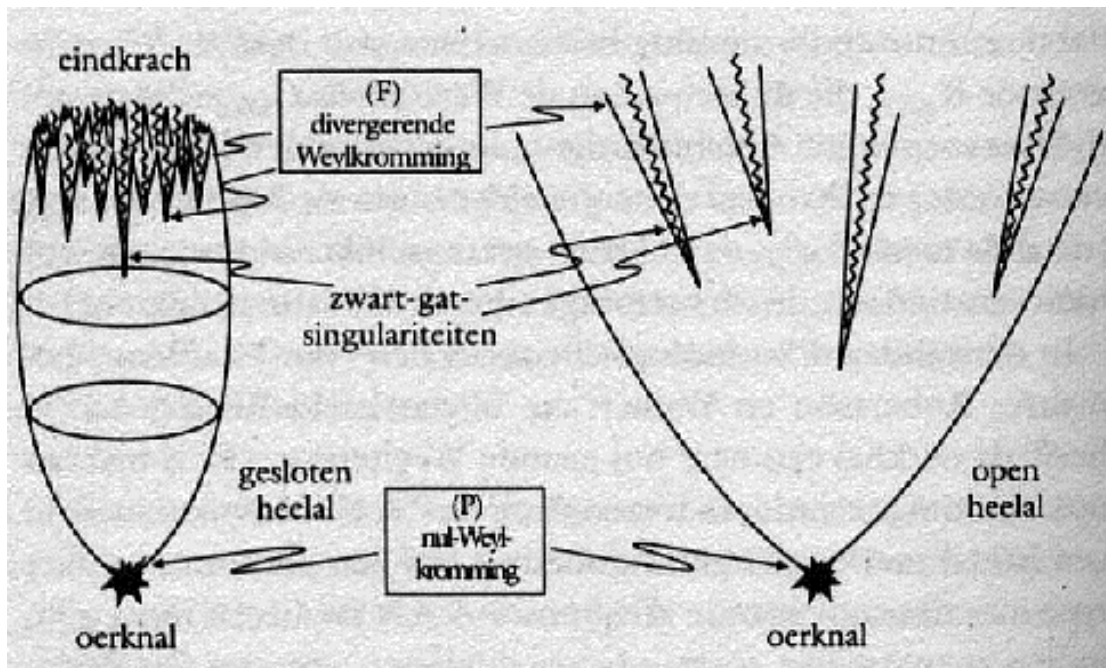
Penrose over kwantumtheorie en ruimtetijd

De twee klassen singulariteiten, theoretische punten met een volume van nul en een oneindige dichtheid, van het type verleden (P) en toekomst (F) gehoorzamen volgens Penrose volledig verschillende wetten. In tegenstelling tot Hawking's bewering, dat de kwantumgravitatie wetten voor de twee typen hetzelfde zijn. Als bewijs voor dit voorstel, voert Penrose drie argumenten aan. Ten eerste de tweede hoofdwet van de thermodynamica, die zegt dat de entropie, d.i. de wanorde, nooit kan afnemen en de entropie van een systeem als geheel groter is dan de som van de samenstellende delen. Ten tweede de waarnemingen die impliceren dat het heelal in het beginstadium zeer uniform is. Ten derde het feit dat zwarte gaten bestaan. Hieruit volgt namelijk dat de oerknalsingulariteit uniform is en op grond van de tweede hoofdwet van de thermodynamica, dat die vrij is van witte gaten. Want witte gaten, gedefinieerd als de tijdsomgekeerden van zwarte gaten – ze spugen materie uit in plaats van dat ze materie opslokken –, zijn in strijd met de tweede hoofdwet. Dus moeten er zeer verschillende wetten gelden voor de singulariteiten van zwarte gaten.

In de standaard kosmologische modellen heeft de oerknal een naar nul gaande Weyltensor, de tensor die de intrinsieke kromming van de ruimtetijd door bijvoorbeeld zwaartekrachtsgolven en zwarte gaten beschrijft. Zwarte en witte gaten hebben een naar oneindig divergerende Weyl-tensor. Volgens de Weylkrommingshypothese hebben beginsingulariteiten een naar nul gaande Weylkromming, ze bevatten weinig informatie, terwijl de Weylkromming bij eindsingulariteiten verwacht wordt te divergeren, ze bevatten veel informatie. In een gesloten heelal zal de eindsingulariteit,

de eindkrach, een divergerende Weyltensor hebben; in een open heelal hebben de zwarte gaten die ontstaan eveneens een divergerende Weyltensor (figuur 2).

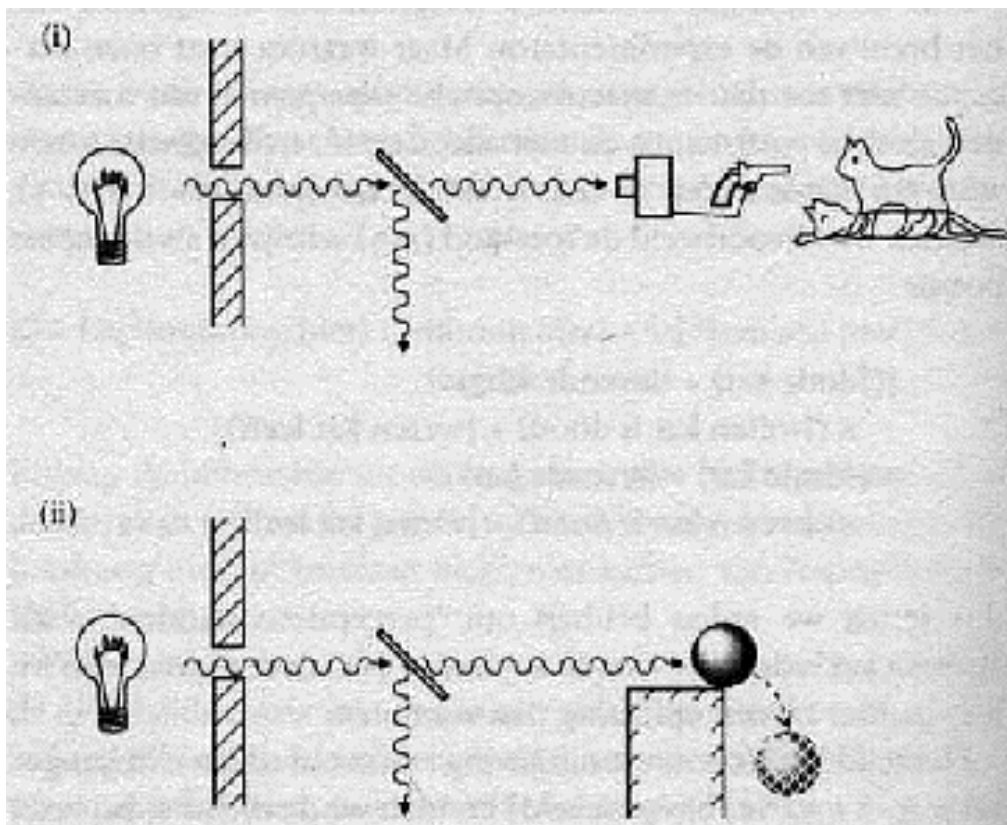
Steun voor deze hypothese komt volgens Penrose van het feit dat de beperking, dat het heelal in het beginstadium vrij gelijkmatig en vrij van witte gaten is, de faseruimte – een zesdimensionale ruimte met naast de drie ruimtecoördinaten ook drie bewegingscoördinaten – in het vroege heelal verkleint met een factor van ten minste tien-tot-de-tien-tot-de-honderddrieëntwintigste. Er moet dus een wet zijn, die dit onwaarschijnlijke resultaat afdwingt. De Weylkrommingshypothese zou een dergelijke wet verschaffen.



Figuur 2: de Weylkrommingshypothese: beginsingulariteiten zijn beperkt door een naar nul gaande Weylkromming, terwijl de Weylkromming bij eindsingulariteiten verwacht wordt te divergeren. (Uit: De aard van ruimte en tijd, blz. 50).

Over het informatieverlies in zwarte gaten zegt Penrose dat hij de hierdoor veroorzaakte onzekerheid als complementair met de onzekerheid van de kwantumtheorie ziet. En niet zoals Hawking een extra onzekerheid bovenop de kwantumonzekerheid. Penrose stemt ermee in dat het mogelijk is, dat er informatie uit door Hawkingstraling verdampende zwarte gaten ontsnapt. En dat deze informatiewinning veel kleiner zal zijn dan de uiteindelijke ineenstorting, de verdwijning van het zwarte gat. Dat deze extra onzekerheid complementair met de kwantumonzekerheid is stelt hij aan de hand van het gedachteexperiment van een zwart gat in een gesloten ruimte. Het faseruimtevolume zal dan afnemen door het informatieverlies in de singulariteit van het zwarte gat. Dit is in tegenspraak met de klassieke mechanica, de stelling van Liouville, die inhoudt dat volumes in de faseruimte constant blijven. Maar volgens Penrose wordt het verlies van faseruimtevolume gecompenseerd door een proces van spontane kwantummeting – het spontaan ineenstorten van de golffunctie – waarbij informatie wordt gewonnen en het faseruimtevolume toeneemt. Daarom ziet hij de onzekerheid, die het gevolg is van informatieverlies, als complementair aan de onzekerheid in de kwantumtheorie: het zijn twee kanten van dezelfde medaille.

Singulariteiten in het verleden bevatten weinig informatie, terwijl singulariteiten in de toekomst veel informatie bevatten. Dat is de onderliggende gedachte van de tweede hoofdwet van de thermodynamica. Aldus Penrose is de asymmetrie in die singulariteiten ook gerelateerd aan de asymmetrie van het meetproces, het meetprobleem van de kwantumtheorie. In het Schrödinger's kat gedachteexperiment (figuur 3i) kan een externe waarnemer niet honderd procent zeker weten wat de toestand van de kat in een kist is. Er wordt namelijk een foton naar een halfdoorlatende spiegel gezonden, en er is vijftig procent kans, dat de lichtgolf afbuigt naar een detector, die vervolgens een geweer triggert en de kat doodt. Als de detector niks detecteert blijft de kat leven. Pas als de kist wordt geopend kan worden gezegd of de kat leeft of dood is. De golf functie van het systeem, die ineens stort als de toestand van de kat bepaald wordt, is een superpositie van deze twee toestanden. Penrose vraagt zich af waarom de mens geen macroscopische superposities waar kan nemen, maar alleen de macroscopische toestand *kat is dood* of *kat leeft*.



Figuur 3: Schrödingers kat: is de kat dood óf leeft hij; is de kat dood én leeft hij? (i) Balanceert óf valt de massa; balanceert de massa én valt zij? (ii) (Uit: De aard van ruimte en tijd, blz. 92).

Penrose zoekt de oplossing voor dit verval in het één óf het ander van de twee mogelijkheden, hij noemt dit *objective reduction* – grappig genoeg is het acroniem OR Engels voor ‘of’ – bij de algemene relativiteitstheorie. Het asymmetrische van het meetprobleem is verklaarbaar vanuit het asymmetrische van het ontstaan van singulariteiten in het heelal. Er gaat namelijk iets mis met superposities van verschillende ruimtetijdmetrieken. Een superpositie van twee verschillende metrieken is waarschijnlijk instabiel en daarom vervalt de superpositie in één van de twee mogelijkheden. Om dit te bewijzen vervangt hij de kat door een massa die op het

uiterste randje van een afgrond balanceert (figuur 3ii). In dit systeem is er een superpositie van *vallen* en *balanceren*. Nu fixeert de Planck-schaal, de schaal van de allerkleinste afmetingen, de tijdschaal waarin de reductie in verschillende mogelijkheden plaatsvindt. Het criterium van de natuur om te bepalen wanneer twee metriecken significant verschillen is namelijk de Planck-schaal. De tijdschaal is daarom gelijk aan de Planck constante \hbar over de energie E , die nodig is om de massa over de rand te duwen. Voor een nucleon zou dit bijna 10^8 jaar zijn, dus niet experimenteel te bevestigen. Voor een spat water van 10^{-4} cm zou de ineenstorting ongeveer ééntiende seconde in beslag nemen. In de kwantumtheorie komen systemen zoals deze voor problemen met energiebehoud en lokaliteit te staan. De algemene relativiteitstheorie heeft echter een ingebouwde onzekerheid met betrekking tot de zwaarte-energie. De energie-onzekerheid in de supergepioneerde toestanden *vallen* en *balanceren* is volgens de algemene relativiteitsleer consistent met de vervaltijd.

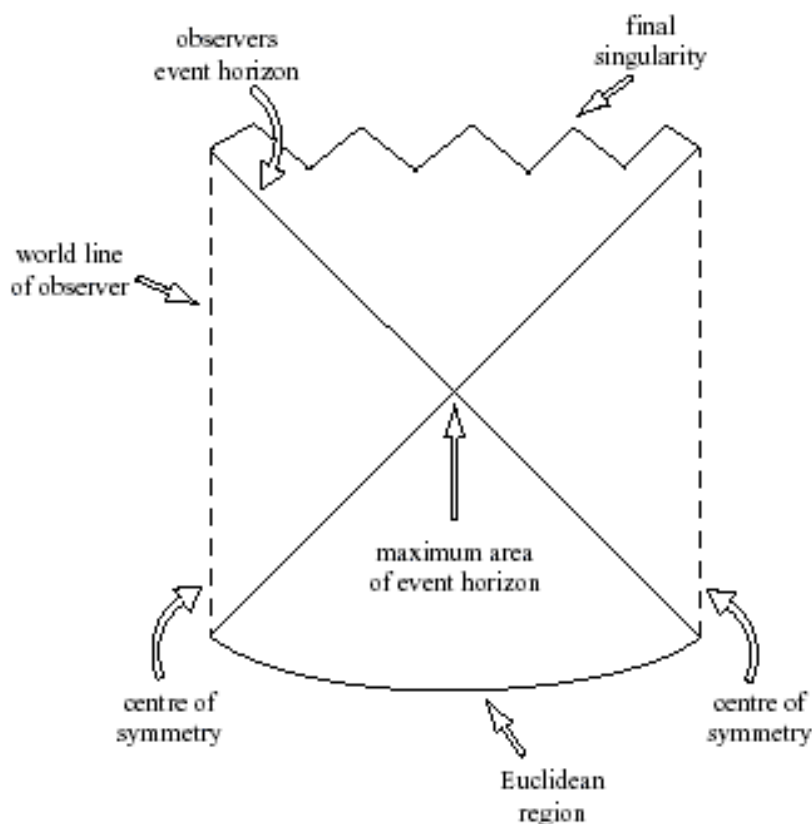
Hawking over kwantumkosmologie

Kosmologie werd in de vorige eeuw nog beschouwd als een pseudowetenschap. Daar waren twee redenen voor. De eerste was een vrijwel totale afwezigheid van betrouwbare experimentele gegevens. De enige belangrijke kosmologische waarneming tot de jaren twintig van de vorige eeuw was het feit dat de hemel 's nachts donker is. De afgelopen jaren zijn de kosmologische observaties in reikwijdte en kwaliteit toegenomen. Het is nu mogelijk heel diep het heelal in te kijken, naar het vroege verleden, en ook de achtergrondstraling, een overblijfsel van het vroege heelal, is goed in kaart gebracht. Dus het bezwaar tegen de kosmologie, dat ze geen empirische basis heeft, geldt niet meer. Het tweede, ernstigere, bezwaar is, dat de kosmologie niets over de toekomst van het heelal kan zeggen – dijt het verder uit, zal het weer inkrimpen – omdat de mens niks weet van de beginvoorwaarden van het heelal. Zonder een hypothese over het allereerste begin kan men alleen zeggen dat de dingen zijn zoals ze zijn doordat ze in het vroege heelal zo waren.

Dit bezwaar wordt nog verergerd door Hawkings en Penrose's stellingen, die aantonen dat er volgens de algemene relativiteitstheorie een beginsingulariteit in ons verleden moet hebben bestaan. De veldvergelijkingen bij die singulariteit kunnen niet worden gedefinieerd. De algemene relativiteitstheorie voorspelt dus dat ze het heelal niet kan voorspellen, dat de natuurwetten aan het begin van het heelal niet hoeven te gelden. Maar waarom zouden ze dan ergens anders wel gelden? Als de natuurwetten niet meer gelden in singulariteiten, dan hoeven ze nergens meer te gelden. In een goede wetenschappelijke theorie moeten de natuurwetten altijd gelden, ook aan het begin van het heelal. Maar dit is natuurlijk niet helemaal vanzelfsprekend. Die wetten zullen er misschien heel anders uit zien, omdat ze hele hoge energiën moeten verklaren. Misschien zijn de wetten die wij kennen lage-energiebenaderingen van hoge-energie wetten, die in de beginsingulariteit gelden. In ieder geval willen we niet dat er punten zijn, waarvan we niet kunnen weten wat er binnenin gebeurd.

Om aan dit probleem te ontkomen moet de kwantumtheorie er bij worden betrokken. Hartle en Hawking hebben voorgesteld dat de randvoorwaarde van het heelal is dat het geen rand heeft, het zogenaamde voorstel van onbegrensdheid. Met dit voorstel kan wellicht wel het heelal verklaard worden waarin we leven, een isotroop, d.i. in alle richtingen hetzelfde, en homogeen uitdijend heelal met kleine afwijkingen,

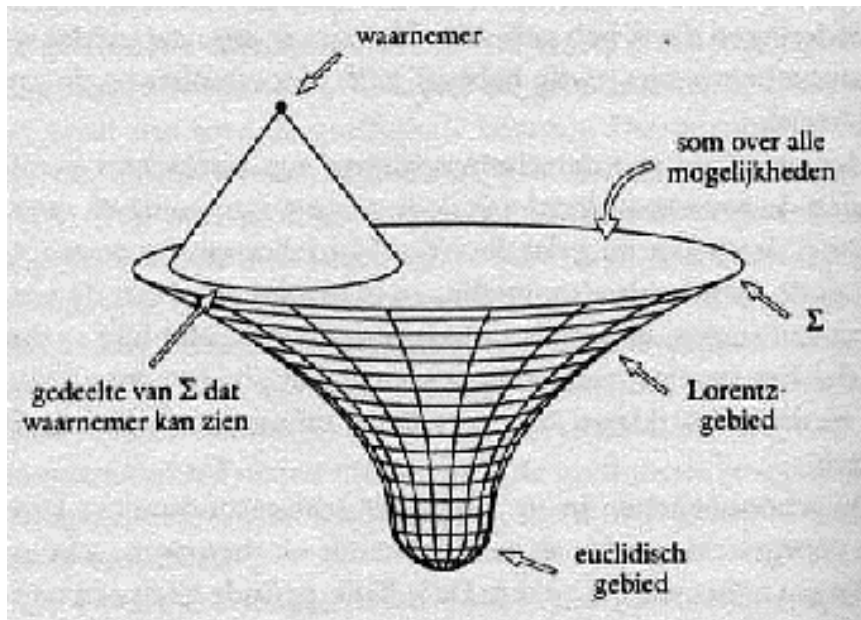
die zijn waargenomen in de microgolfachtergrondstraling. De resultaten van die waarnemingen komen overeen met de voorspellingen, die het voorstel van onbegrensdheid levert. Bovendien bevestigen de waarnemingen de extra onzekerheid, veroorzaakt door het informatieverlies in de zwartegatenfysica. Hiermee wordt de hoop op wetenschappelijk determinisme, dat we de toekomst met zekerheid kunnen voorspellen, de bodem ingeslagen. Het voorstel maakt van de kosmologie een wetenschap, omdat elke meting kan worden geformuleerd in termen van de golf functie van het heelal, de Wheeler-DeWittvergelijking. Het resultaat van elke willekeurige waarneming kan voorspeld worden binnen de grenzen van de kwantumtheorie in plaats van binnen de grenzen van de begin- en eindvoorwaarden van het heelal.



Figuur 4: het heelal stort in tot de eindsingulairiteit vóór de waarnemer het gehele heelal kan overzien. (Uit: De aard van ruimte en tijd, blz. 121).

Volgens Hawking impliceert het voorstel van onbegrensdheid, dat het heelal gesloten is. Een gesloten heelal stort weer ineen, voordat een waarnemer kans heeft gehad het hele heelal te overzien (figuur 4). Dat de mens slechts een deel van het heelal kan zien verklaart waarom we klassiek gedrag waarnemen. En waarom objecten als sterren en sterrenstelsels klassieke objecten zijn, ook al zijn ze gevormd door de kwantumschommelingen in het vroege heelal, die we nog steeds waarnemen in de microgolfachtergrondstraling. Als we naar het heelal kijken op een ruimteachtig oppervlak Σ (figuur 5), dat het gehele heelal in één keer omspant, dan bevindt het zich in een zuivere kwantumtoestand beschreven door de golf functie Ψ . Maar meer dan de helft van Σ valt er niet te zien en er valt niets te weten over het heelal buiten ons

verleden lichtkegel. Er moet dus gesommeerd worden over alle mogelijkheden voor het deel van Σ , dat we niet waarnemen. De sommatie heeft als gevolg, dat het deel wat we waarnemen veranderd wordt van een zuivere kwantumtoestand in een zogenaamde *gemengde toestand*, een verzameling van verschillende mogelijkheden. Die decoherentie, zoals dat genoemd wordt, is nodig wil het systeem zich op een klassieke manier gedragen en niet op een kwantummanier.



Figuur 5: een waarnemer kan alleen een deel van een willekeurig oppervlak Σ zien. (Uit: De aard van ruimte en tijd, blz. 120).

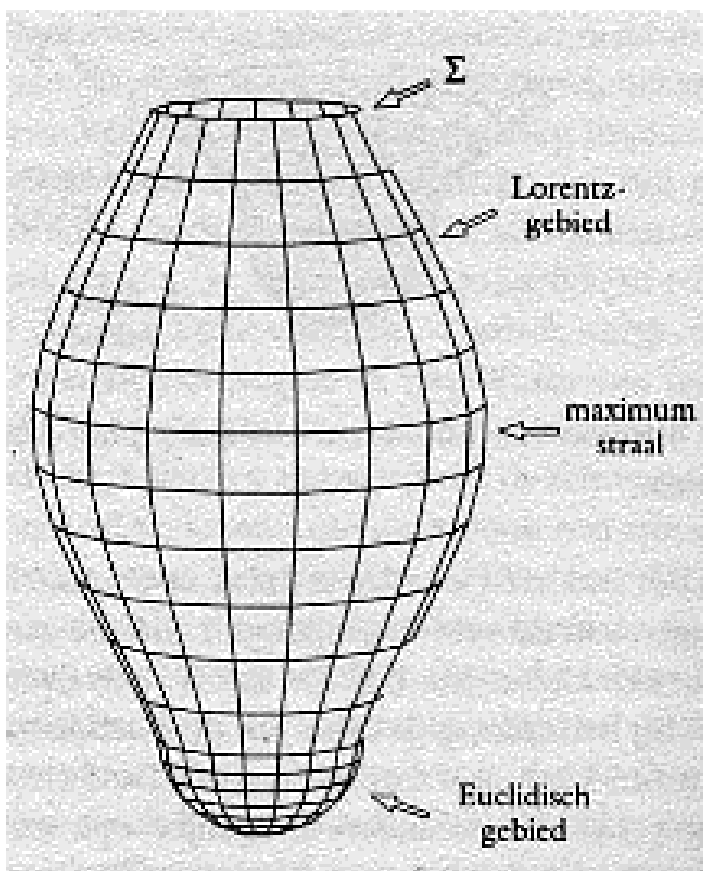
Hawking over de richting van tijd

De lokale wetten, waar fysische velden aan voldoen, zijn tijdsymmetrisch of preciezer CPT-invariant: lading (charge), pariteit (parity) en tijd (time) blijven hetzelfde onder omkering. Het overall om ons heen waargenomen verschil tussen verleden en toekomst – gebroken kopjes zijn niet terug te brengen in hun oorspronkelijke staat – moet dus komen uit de randvoorwaarden van het heelal. De Weylkrommingshypothese voorspelt dat het heelal heel anders zal zijn aan het begin dan aan het eind van het heelal, zowel in een open als een gesloten heelal (figuur 2). In het begin is het heelal glad en regelmatig. Als het weer ineensloort, in het geval van een gesloten heelal, zal het echter ongeordend en onregelmatig zijn. Omdat er zoveel meer ongeordende configuraties zijn dan geordende, betekent dit dat de begincondities heel erg nauwkeurig gekozen moeten worden.

Er moeten dus verschillende randvoorwaarden gelden aan de twee uiteinden van de tijd, zoals de Weylkrommingshypothese van Penrose voorstelt. Hawking voert twee bezwaren aan tegen deze hypothese. Ten eerste is deze niet CPT-invariant. Penrose vindt dat dat zo hoort, want het verklaart het asymmetrische van de richting van tijd. Hawking vindt dat we zolang mogelijk vast moeten houden aan symmetriën, tenzij er een dwingende reden is om ze te verwerpen. Het is niet nodig om CPT te verwerpen: vanuit de kwantumveldentheorie bekeken verwacht Hawking een theorie, die CPT-invariant is. Ten tweede kan de Weyltensor niet exact nul zijn geweest in het beginstadium van het heelal, dan zou het heelal precies homogeen en isotroop geweest

moeten zijn en voor altijd gebleven. Dat verklaart de afwijkingen in de achtergrondstraling en de kwantumschommelingen, waaruit sterrenstelsels en de mens zijn ontstaan, niet. Dat de Weyltensor klein was aan één uiteinde dient niet als randvoorwaarde opgelegd te worden, maar moet worden afgeleid van het voorstel van onbegrensdheid, het geen-randvoorwaardenvoorstel.

Met behulp van de metrieken, de kosmologische modellen voor het heelal, de helft van een Euclidische vier-bol en een daaraan vastgeplakt Lorentzgebied dat tot zijn maximale straal uitdijt en vervolgens weer slinkt, verklaart Hawking de Weyltensorhypothese (figuur 6). De zwaartekracht krult de ruimtetijd op, zodat die een begin en een eind heeft. Bovendien bestaat er een diep verband tussen de zwaartekracht en de thermodynamica, doordat de zwaartekracht zelf de topologie bepaalt van de ruimtetijd-variëteit waarop ze werkt.



Figuur 6: de helft van een Euclidische vier-bol geplakt aan een Lorentzgebied dat tot zijn maximale straal uitdijt en vervolgens weer slinkt. (Uit: De aard van ruimte en tijd, blz. 126).

Penrose over kwantumkosmologie

Penrose noemt de Weylkrommingshypothese fenomenologisch in plaats van verklarend en stemt met Hawking in dat er een onderliggende theorie nodig is om de hypothese te verklaren. Hij noemt het geen-randvoorwaardenvoorstel van Hawking een goede kandidaat om de structuur van het begin van het heelal te verklaren. Maar voor de aanpak van de eindtoestand is een andere theorie nodig. Volgens Penrose zou het een tijdasymmetrische theorie moeten zijn. Anders zou het de structuur van singulariteiten niet verklaren. En de asymmetrie van de Weylkrommingshypothese moet volgens Penrose in de theorie verwerkt worden. Ook stemt hij in met Hawkings

argument dat de Weyltensor in het begin van het heelal niet nul kan zijn. En daarom wijzigt hij zijn hypothese: in de beginsingulariteit nádert de Weyltensor naar nul.

Volgens Penrose impliceert het geen-randvoorwaardenvoorstel, dat er witte gaten, de tijdsomgekeerden van zwarte gaten, zijn. Het voorstel geeft namelijk twee oplossingen: (A) de verstoringen nemen toe met de afstand tot de singulariteit en (B) de verstoringen doven uit. (A) komt neer op de big bang, terwijl (B) een beschrijving is van singulariteiten in zwarte gaten en de eindkrach. De richting van de tijd, bepaald door de tweede hoofdwet van de thermodynamica, gaat van een (A)- naar een (B)-oplossing. Maar de (B)-oplossing sluit volgens Penrose geen witte gaten uit. Terwijl deze volgens Penrose helemaal niet bestaan in ons heelal.

Verder maakt Penrose zich zorgen over de Euclidesatieprocedure van Hawking. Volgens Penrose zijn er maar weinig ruimten waarin je een Euclidische en een Lorentzianse oplossing aan elkaar kan plakken. Want het is vereist, dat ze én een Euclidisch én een Lorentzianse deel hebben.

Vervolgens voert Penrose zijn twistorvisie op de ruimtetijd aan. Toegepast op de kosmologie heeft de begintoestand een zeer eenvoudige twistorbeschrijving. Die beschrijving wordt steeds ingewikkelder met het verstrijken van de tijd en de Weylkromming dringt steeds verder door. Dit is in overeenstemming met de waargenomen tijdasymmetrie in de meetkunde van het heelal.

Het debat

In het debat – het laatste hoofdstuk van het boek en filosofisch het interessantste – laat Hawking Penrose weten dat hij spontane kwantummeting een absurd idee vindt. Er kan geen fysisch proces zijn dat correspondeert met de instorting van de golffunctie. Dat klinkt Hawking meer als magie dan als wetenschap in de oren. Bovendien is er volgens hem helemaal geen noodzaak voor de spontane kwantummeting in het gedachteexperiment van het zwarte gat in een gesloten ruimte. Want het zwarte gat kan zich in verschillende toestanden bevinden. Dat impliceert dat er geen informatie in de ruimte zit, er kan dus ook geen faseruimtevolumeverlies optreden. En de spontane kwantummeting is ook niet nodig om de tijdsymmetrieschending van zwarte gaten te verklaren, want volgens Hawking zijn zwarte gaten kwantumtheoretisch gezien gelijk aan witte gaten – de tijdsomgekeerden van zwarte gaten. Wel is hij het met Penrose eens dat tijdasymmetrie moet worden geïntroduceerd om antwoorden te geven over vragen over waarnemingen, zoals bijvoorbeeld: kan de mens met een telescoop in de toekomst kijken? Hawking: ‘Volgens Penrose introduceert de ineenstorting van de golffunctie CPT-schending in de fysica. Hij ziet de schendingen aan het werk bij zwarte gaten en in de kosmologie. Ik stem in dat we tijdasymmetrie moeten introduceren in de manier waarop we vragen stellen over waarnemingen. Maar ik verwerp het idee, dat er zoiets is als een fysisch proces, dat correspondeert met de reductie van de golffunctie of dat het iets te maken heeft met kwantumgravitatie of bewustzijn. Dat klinkt mij als magie in de oren en niet als wetenschap.’

Hawking over theorieën: ‘Ik stel me op het positivistische standpunt, dat een fysische theorie alleen maar een wiskundig model is en dat het zinloos is te vragen of die theorie correspondeert met de werkelijkheid. Het enige wat je kunt vragen is of de voorspellingen van de theorie overeenkomen met de waarneming. De kwantumtheorie doet dat heel goed. Ze voorspelt dat de uitkomst van een waarneming is dat de kat

ofwel levend is, of dood. Het is net zoiets als dat je niet een beetje zwanger kunt zijn; je bent het, of je bent het niet,' aldus Hawking. 'Ik vraag niet van een theorie of die met de werkelijkheid overeenstemt, want ik weet niet wat dat is. Werkelijkheid is geen eigenschap, die je kan testen met lakmoespapier.'

Penrose houdt zich vast aan het bestaan van een reële wereld, en blijft sceptisch tegenover de kwantumtheorie: 'De kwantummechanica bestaat pas vijfenzeventig jaar. Dat is niet erg lang vergeleken met, bijvoorbeeld, de zwaartekrachttheorie van Newton. Het zou me dan ook niet verbazen als de kwantummechanica aangepast moest worden met betrekking tot macroscopische objecten.'

De twist over de kwantumtheorie van zwarte gaten en ruimtetijd is te vergelijken met het debat tussen Albert Einstein en Niels Bohr, nu zeventig jaar geleden, over de grondslagen van de kwantummechanica. Penrose neemt de realistische positie van Einstein in door te zeggen, dat er iets als een reële wereld moet bestaan, niet noodzakelijk beschreven door een golf functie. En Hawking neemt de positie van Bohr in, dat een golf functie alleen de kennis beschrijft die gebruikt kan worden voor het maken van voorspellingen. Hawking is een positivist door te zeggen dat een fysische theorie alleen maar een wiskundig model is en dat het zinloos is te vragen of die theorie correspondeert met de werkelijkheid. Het enige wat je kunt vragen is of de voorspellingen van de theorie overeenkomen met de waarneming.

Maar Hawking is wel een positivist in de moderne zin van het woord. Hij behoort niet tot de instrumentalisten, die zeggen dat wetten instrumenten zijn; dat ze niet waar of onwaar zijn, maar hooguit bruikbaar of minder bruikbaar. Hawking kan beter bij het constructief empiricisme, een stroming uit de jaren '80, die is ontwikkeld door Van Fraassen, worden ondergebracht. Voor een cognitief empiricist kunnen theoretische termen best referentiewaardes hebben en kunnen theorieën waar of onwaar zijn. Alleen kunnen we er nooit zekerheid over verkrijgen. Wat telt is of de theorieën observationeel waar of onwaar zijn.

Penrose claimt dat we wel kennis over de wereld kunnen hebben voorbij het observationele en voorbij de referenties van theoretische termen. Omdat hij ontkent een platonist te zijn, voor platonisten is onze wereld een afspiegeling van een hoger liggende ideële werkelijkheid, kan Penrose bij de constructief realisten worden ondergebracht.

Evaluatie

Als ik naar de belangrijkste argumenten, die uit de lezingen naar voren komen, kijk (tabel 1), kom ik tot de conclusie het vooral met Hawking eens te zijn. Hawking heeft de fysica van haar voorspelbaarheid berooft en haar die weer teruggegeven, zij het in vermindere zin. Dat is geen geringe prestatie. Zelfs Penrose geeft Hawking alle eer: 'Ik denk dat de reden waarom Einstein geen grote vorderingen meer maakte in de kwantumtheorie, was dat er een cruciaal element in ontbrak. Dit ontbrekende element was Stephens ontdekking van het feit dat zwarte gaten straling uitzenden. Het is dit verlies van informatie, tezamen met straling van een zwart gat, dat er een nieuwe draai aan geeft.'

Het Euclidische gravitatieprogramma van Hawking heeft daarnaast twee empirisch toetsbare voorspellingen opgeleverd. Hoeveel voorspellingen hebben de andere unificatieprogramma's zoals de snaar- of twistortheorie gedaan? De

snaartheorie, die de wereld om ons heen met elementaire deeltjes als eendimensionale entiteiten probeert te verklaren, kan niet eens de structuur van de zon beschrijven, laat staan zwarte gaten. Met het voorstel van onbegrensdheid verdwijnen de metafysische vragen over het begin van het heelal en tijd. Bovendien maakt het de Weylkrommingshypothese universeel. Het voorstel maakt korte metten met de problemen van de singulariteiten uit de algemene relativiteitsleer. ‘Alle roodborstjes zijn rood’ is alleen universeel als rood voor alle waarnemers hetzelfde is. Zo is de Weylkrommingshypothese universeel, omdat het binnen alle referentiekaders geldig is.

En met het metafysische van het door Penrose voorgestelde spontane kwantummeting hoeft geen rekening gehouden te worden. Pas als dit rare proces op zichzelf op een of andere manier toetsbaar zou kunnen zijn, kunnen we met zoiets rekening houden. Maar mij klinkt het, net als Hawking, meer als magie dan als wetenschap in de oren. Bovendien komt Hawking met een goed alternatief op de proppen.

| Stephen Hawking | Roger Penrose |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Positivist, constructief empiricist. • Kwantumveldentheoreticus. • Informatieverliesonzekerheid in zwarte gaten bovenop kwantumonzekerheid. Spontane kwantummeting geen fysica maar magie. • Kwantumgravitatiewetten voor verleden en toekomst singulariteiten hetzelfde. • Voorstel van onbegrensdheid verklaart Weylkrommingshypothese: wetten moeten tijdsymmetrisch zijn. • Een theorie moet voorspellingen doen, die met experimenten overeenkomen. • Kwantumtheorie doet het onderscheid tussen zwarte en witte gaten teniet, tijdsymmetrie hersteld. • God dobbelt. • Wat is de werkelijkheid dan? • Euclidisch kwantumgravitatieprogramma • Decoherentie: gemengde toestanden zijn mogelijk, daarom gedraagt het heelal zich klassiek. • Vergelijkbaar met Niels Bohr | <ul style="list-style-type: none"> • Constructief realist. • Algemene relativiteitstheoreticus. • Informatieverliesonzekerheid in zwarte gaten complementair met kwantumonzekerheid door fysich proces dat spontane kwantummeting veroorzaakt. • Kwantumgravitatiewetten voor verleden en toekomst singulariteiten anders. Er zijn geen witte gaten. • Voorstel van onbegrensdheid verklaart Weylkrommingshypothese niet helemaal: tijdasymmetrische theorie nodig. • Voorspellingen vergelijken met experimenten is niet genoeg om de realiteit te verklaren. • Kwantumtheorie moet aangepast worden aan macroscopische objecten. Zwarte gaten ontwikkelen zich tijdasymmetrisch. • Er is een reële wereld. • Schrödingers kat – kwantumtheorie correspondeert niet met de werkelijkheid. • Twistorthorie • Superposities van toestanden zijn niet mogelijk. • Vergelijkbaar met Albert Einstein |

Tabel 1: categorisatie van de argumenten uit de twist tussen Hawking en Penrose

Ook de steeds door Penrose voorgestelde asymmetrische theorieën worden telkens door Hawking rechtgetrokken tot symmetrische (toetsbare) theorieën. Het lijkt mij voor de universaliteit van natuurwetten wenselijk, zoveel mogelijk uit te gaan van symmetrie. Ook al moet er iets asymmetrisch verklaard worden. Wat kunnen we zeggen over de overtuiging dat een asymmetrie alleen door een asymmetrie veroorzaakt kan worden? Klassiek voorbeeld van de werking van deze overtuiging is de ezel van Buridanus. De ezel heeft honger en wordt geconfronteerd met twee balen hooi op gelijke afstanden links en rechts van hem. Hij heeft geen reden voor één van

de twee te kiezen. Zal het dan toch eten? Ons instinct vertelt ons dat als de ezel toch eet, dat er werkelijk geen symmetrie van rechts en links in de beginsituatie aanwezig is: bijvoorbeeld dat zijn linker- en rechterhelft van elkaar verschillen en dat hij daarom voor de linker hooibaal kiest.

De overtuiging dat een asymmetrie alleen veroorzaakt kan worden door een asymmetrie is als universeel principe waarschijnlijk onwaar en in ieder geval niet bruikbaar. Een indeterministische variant van Buridanus' ezel is namelijk in strijd met deze overtuiging. Want wat als de ezel van de linker hooibaal begint te eten zonder dat er een causale factor in het spel is die voorkeur geeft aan de linkerkant en er is ook geen voorwaarde die zegt: als er geen andere overwegingen zijn, kies dan de linker? Dan is zo'n voorwaarde een asymmetrie. Het indeterministische verhaal, die van de ezels keuze een kansgebeurtenis maakt, spreekt de overtuiging tegen. Want een asymmetrie zou dan uit het niets gecreëerd zijn en die zou niet afkomstig zijn van een vorige asymmetrie. De overtuiging, dat een asymmetrie alleen veroorzaakt kan worden door een asymmetrie, vereist, in zijn logische extreem, determinisme. Maar weten we wat voor weer het morgen zal zijn? Weten we of Schrödinger's kat leeft? Weten we welke informatie er nog in het zwarte gat zit? Nee, nee en nog eens nee.