

De relatie tussen Stephen Hawkings kosmologische werk en zijn visie op religie

Matthijs Hoek

30 juni 2024

Bachelorscriptie Wiskunde en Natuur- & Sterrenkunde

Begeleiding: prof. dr. J.A.E.F. van Dongen, prof. dr. N.P. Landsman



Institute of Physics

Korteweg-de Vries Instituut voor Wiskunde

Faculteit der Natuurwetenschappen, Wiskunde en Informatica

Universiteit van Amsterdam



Samenvatting

Stephen Hawking was één van de bekendste kosmologen van de afgelopen honderd jaar. Hij had sterke anti-religieuze opvattingen en droeg deze uit in zowel zijn privédo-
mein als in het publieke domein. In dit wetenschapshistorische bachelorproject is ge-
keken naar het mogelijke verband tussen Hawkings kosmologische werk en zijn visie
op religie. In het bijzonder is gekeken naar het no boundary-voorstel en de verhou-
ding tussen dat kosmologische model en Hawkings theologische opvattingen. Uit dit
onderzoek volgt dat de verbanden die hij legde tussen kosmologie en religie kunnen
worden begrepen vanuit zijn biografie en dat het aannemelijk is dat zijn anti-religieuze
opvattingen invloed hebben gehad op de ontwikkeling van het no boundary-voorstel.

Titel: De relatie tussen Stephen Hawkings kosmologische werk en zijn visie op religie

Auteur: Matthijs Hoek, matthijs.hoek@student.uva.nl, 13188178

Begeleiding: prof. dr. J.A.E.F. van Dongen, prof. dr. N.P. Landsman

Tweede beoordelaars: prof. dr. R.A.M.J. Wijers, prof. dr. H. Peters

Einddatum: 30 juni 2024

Institute of Physics

Universiteit van Amsterdam

Science Park 904, 1098 XH Amsterdam

<http://www.iop.uva.nl>

Korteweg-de Vries Instituut voor Wiskunde

Universiteit van Amsterdam

Science Park 904, 1098 XH Amsterdam

<http://www.kdvi.uva.nl>

Inhoudsopgave

1	Inleiding	5
2	Achtergrond	7
2.1	Biografie Stephen Hawking	7
2.1.1	Hawkings jeugd en studietijd (1942 - 1962)	7
2.1.2	Hawking als doctoraatstudent (1962-1966)	8
2.1.3	Hawkings eerste huwelijk (1965 - 1995)	9
2.1.4	Hawkings wetenschappelijke carrière (1966 - 1988)	11
2.2	Christendom in het Verenigd Koninkrijk gedurende Hawkings carrière .	13
2.3	Relatie kosmologie-theologie en filosofie tot 1965	15
2.3.1	Steady state- versus oerknalmodel (1948 - 1965)	16
2.3.2	Kosmologie als wetenschap in de jaren vijftig	20
2.3.3	Fred Hoyle	21
3	Hawkings visie op de relatie kosmologie-theologie en wetenschapsfilosofie	23
3.1	Oorsprong van Hawkings visie op religie	23
3.2	Invloed Jane Hawking	24
3.3	Hawking in het publieke domein	27
3.4	Hawkings visie op wetenschapsfilosofie	32
3.4.1	Bedreef Hawking zelf wetenschapsfilosofie?	33
3.4.2	Mengde Hawking zich in het steady state- vs oerknalmodel debat?	36
4	No boundary-voorstel	38
4.1	Achtergrond	38
4.2	Wat zegt het no boundary-voorstel?	39
4.3	Feynmans padintegralen	42
4.3.1	Correspondentieprincipe	48
4.4	Wiskundige fundering van Feynmans padintegraal in de kwantumme- chanica	49
4.4.1	Voorkennis uit de maattheorie	49
4.4.2	Wiskundige problemen van de padintegraal	51
4.5	Stap naar de kwantumkosmologie	53
4.5.1	No boundary-golffunctie	53
4.5.2	Wiskundige fundering van het no boundary-voorstel	57
4.6	Ontvangst in de kosmologische gemeenschap	57
4.7	Relatie no boundary-voorstel en theologie	59
4.7.1	Theologische conclusie Hawking	59

4.7.2	Waarom trok Hawking theologische conclusies uit het voorstel? .	60
4.7.3	Kritiek van wetenschapsfilosofen en theologen	60
5	Conclusie	63
6	Dankwoord	65
	Bibliografie	66
	Populaire samenvatting	70

1 Inleiding

Stephen Hawking was één van de bekendste natuurkundigen van de afgelopen honderd jaar. Bij veel mensen zal, als er over hem gesproken wordt, het beeld opkomen van een man vastgeklemd in zijn rolstoel. Hoewel Hawking bij het algemene publiek bekend stond als een briljante wetenschapper, kon hij met name in zijn latere carrière vooral gezien worden als een media-persoonlijkheid. In 1988 publiceerde hij zijn bekende boek *A Brief History of Time*. Na deze periode volgden er nog vele boekpublicaties en optredens in de media. De Amerikaanse wetenschapsjournalist Charles Seife (1972 -) deelde Hawkings carrière op in drie periodes.¹ De eerste periode die van zijn geboortjaar 1942 tot en met eind jaren zestig liep, was de periode voordat Hawking zijn status als beroemde wetenschapper had bereikt. De tweede periode tussen eind jaren zestig en circa 1988, was het hoogtepunt van Hawkings wetenschappelijke carrière. In deze periode leverde hij zijn belangrijkste wetenschappelijke bijdrages, waaronder de singulariteitsstelling (1966 - 1970), de theorie van Hawkingstraling (1974) en hetgeen waar Hawking het meeste waarde aan hechtte: het no boundary-voorstel (1983). Het no boundary-voorstel was een kwantumkosmologisch model van het heelal: een theorie over het universum die een brug probeerde te slaan tussen de algemene relativiteitstheorie en de kwantummechanica. De laatste periode van Hawkings leven vanaf circa 1988 tot zijn dood in 2018, was de periode waarin zijn status als briljante wetenschapper gebeiteld was in steen. Echter, in deze periode was zijn wetenschappelijke werk nauwelijks nog relevant voor zijn status. Seife schreef als volgt:

Hij was als een ineengestorte ster; de ruimte om hem heen gloeide helder met zijn energie, maar in de kern was hij slechts een flauwe afspiegeling van wat hij was geweest. [1] (p. 9)

De supernova-explosie uit de quote, die symbool staat voor Hawkings beroemde wetenschappelijke ontdekkingen, dateert uit de middelste periode van Hawkings carrière. Het beeld van Hawking als briljante wetenschapper kwam dus tot stand in de middelste periode en bleef voortbestaan in de publieke geest tot vandaag de dag.

Hawking was uitgesproken atheïstisch en heeft veel uitspraken gedaan over religie, met name in de laatste periode van zijn leven. Deze uitspraken gingen zowel over zijn persoonlijke opvatting over het bestaan van een god, als over hoe deze opvatting in relatie staat tot zijn kosmologische werk. Hierin was met name het no boundary-voorstel belangrijk, aangezien hij duidelijk een theologische draai gaf aan zijn voorstel. Dit kan als opmerkelijk beschouwd worden, aangezien wetenschap door sommigen beschouwd wordt als discipline die onafhankelijk is van theologie. Bovendien zijn er

¹[1] (p. 9)

vele kosmologen die niet religieuze implicaties van hun theorieën bestuderen. De vragen die als motivatie dienden voor dit project waren: Waarom deed Hawking deze theologische uitspraken? Waarom verbond hij zijn theologische positie met zijn kosmologische werk? En heeft zijn visie op religie invloed gehad op zijn kosmologische werk?

Om deze vragen te beantwoorden, zal er gekeken worden naar de biografie van Hawking. Zo wordt er gekeken naar zijn opvoeding en jeugd om te analyseren of deze invloed hebben gehad op de manier waarop Hawking nadacht over religieuze vraagstukken. Bovendien staat Hawkings eerste huwelijk met Jane Hawking centraal in dit project, aangezien dit wellicht de belangrijkste factor was in het verklaren waarom Hawking zich fel uitsprak tegen religie, zelfs in wetenschappelijke context. Het christelijke geloof stond namelijk centraal in Jane's leven, waardoor Stephen in zijn huwelijk voortdurend in contact kwam met religie. Om deze reden zal de biografie van Hawking onderzocht worden in dit project.

Het doel van het project is om een beter beeld te krijgen van de persoon en wetenschapper Hawking, om op die manier zijn opvattingen over religie en de relatie tussen theologie en kosmologie die er volgens hem was beter te begrijpen. Bovendien zal er dieper ingegaan worden op het no boundary-voorstel om de theologische opmerkingen die Hawking maakte over dit voorstel te analyseren.

In Hoofdstuk 2 zal de biografische, sociale en wetenschappelijke achtergrond worden gegeven die nodig is om een beeld te krijgen van Hawking en de sociale- en wetenschappelijke context waarin hij opereerde. Zo wordt de invloed van het christendom in het Verenigd Koninkrijk gedurende zijn carrière en de staat van de kosmologie voordat Hawking kosmologisch onderzoek ging verrichten besproken. Bovendien zal er worden gekeken naar de mate waarin theologie tot 1965 een rol speelde in de kosmologie, de periode voordat Hawking zijn proefschrift had afgerond. In Hoofdstuk 3 zal dieper worden ingegaan op Hawkings visie op religie, op zijn opvatting over de relatie tussen kosmologie en theologie en op zijn visie op wetenschap. Vervolgens zal in Hoofdstuk 4 het no boundary-voorstel worden uitgelicht. Dit zal gedaan worden in zowel globale zin als met een aantal wis- en natuurkundige details van het voorstel. Bovendien zal er gefocust worden op de theologische draai die Hawking gaf aan zijn kwantumkosmologie: hij was namelijk van mening dat zijn kosmologie het bestaan van een schepper uitsloot.

Ter bronvermelding zal via voetnoten gerefereerd worden. Mochten er in één alinea meerdere referenties gebruikt worden, dan zullen deze referenties aan het einde van de alinea opgesomd worden in één voetnoot. Indien van toepassing worden ook paginnummers verschaft. Mocht er een citaat gebruikt zijn, zal er direct naar de bijbehorende bron worden gerefereerd.

2 Achtergrond

2.1 Biografie Stephen Hawking

2.1.1 Hawkings jeugd en studietijd (1942 - 1962)

Stephen William Hawking werd geboren op 8 januari 1942, precies driehonderd jaar na het overlijden van Galileo Galilei. Dit feit haalde Hawking voortdurend aan, bijvoorbeeld in zijn bekende boek *De Antwoorden op de Grote Vragen* (2018). Hij was de zoon van Frank en Isobel Hawking. Frank Hawking was een beroemde expert in tropische ziektes. Zo heeft hij een belangrijke rol gespeeld in de bestrijding van filariasis in China tussen de jaren vijftig en 1994. Mede door deze prestatie heeft Frank mogelijk een grote indruk gemaakt op de jonge Stephen. Isobel heeft politiek, economie en filosofie aan Oxford gestudeerd en heeft daarna verschillende banen gehad. Zo is ze bijvoorbeeld een belastingambtenaar en geschiedenislerares geweest. Hoewel zowel Frank als Isobel hebben gestudeerd en Frank bovendien uit een welvarend milieu kwam, hadden de Hawkings het financieel niet ruim. Deze financiële problemen zouden een thema in Stephens leven blijven.¹

Hawking groeide op in het naoorlogse Londen, maar in 1950 verhuisde hij met zijn gezin naar St. Albans, wat ten noorden van Londen lag. De zuinige ouders van Hawking onderhielden het huis niet: er was geen verwarming en kapotte ramen werden niet gerepareerd. In St. Albans ging Stephen achtereenvolgens naar de Highschool for Girls, waar ook jongens werden toegelaten tot ze tien jaar oud waren, en de St. Albans School. De schoolprestaties van de jonge Stephen waren zeker niet uitmuntend, waardoor de kans dat hij kon gaan studeren aan Oxford aanvankelijk klein was. In 1959 deed Hawking het toelatingsexamen voor de Universiteit van Oxford. Hij scoorde hier hoog genoeg op om aan Oxford te gaan studeren. Hawking wilde oorspronkelijk wiskunde studeren, maar Oxford had op dat moment geen medewerker wiskunde. In plaats daarvan ging hij natuurkunde studeren, tot ergernis van zijn vader, die hem liever geneeskunde zag studeren.²

In zijn studietijd besteedde Hawking weinig tijd aan natuurkunde studeren en vooral veel tijd aan andere activiteiten, zoals roeien, bridge, darts en bier drinken. Hawking gaf achteraf zelf toe dat hij lui was ten aanzien van zijn studie tijdens zijn jaren in Oxford. Bovendien had hij weinig interesse in wetenschapsgeschiedenis.

Zijn studietijd was tevens een tijd waarin Hawking politiek actief was. Hij stond sinds zijn jeugd al bekend als socialist en was duidelijk links georiënteerd. Zo werd hij meegenomen naar het plaatselijke politiebureau voor het beschilderen van een linkse

¹[1] (p. 378), [2] (p. 56), [3]

²[4] (p. 31-32), [1] (p. 375-376, 378)

leus op een plank die aan een brug bevestigd werd. In zijn latere carrière zou Hawking minder uitgesproken worden op politiek gebied, behalve wanneer een politieke discussie raakte aan de wetenschap, zoals bij klimaatverandering of nucleaire ontwapening. Tegen het einde van zijn leven sprak Hawking zich wederom meer uit over politieke kwesties, bijvoorbeeld over voormalig president Donald Trump en Brexit.³

Ondanks zijn studiehouding had Hawking aanleg voor natuur- en wiskunde. Vanwege zijn aanleg slaagde hij er in 1962 in met de hak over de sloot de eerste klasgraad te behalen waarmee hij datzelfde jaar aan zijn proefschrift in Cambridge kon beginnen.⁴

2.1.2 Hawking als doctoraatsstudent (1962-1966)

In 1962 begon Hawking aan zijn proefschrift onder de begeleiding van de natuurkundige Dennis Sciama (1926 - 1999). Sciama had zijn doctoraat behaald onder begeleiding van Paul Dirac (1902 - 1984) en was oorspronkelijk aanhanger van de zogenaamde *steady state-theorie*⁵, maar in 1965 nam hij weer afstand van deze theorie. In eerste instantie wilde Hawking student worden van de bekende kosmoloog Fred Hoyle (1915 - 2001), maar hij werd afgewezen aangezien Hoyle al genoeg studenten had om te begeleiden. In 1966 rondde Hawking zijn proefschrift genaamd *Properties of expanding universes* af. Zoals de titel al suggereert, behandelde Hawking verschillende eigenschappen van een expanderend universum, zoals gravitationele straling en singulariteiten. In zijn proefschrift behandelde hij tevens zijn beroemde *singulariteitsstelling*. Deze stelling had een complex wiskundig karakter en toonde aan dat, onder een aantal algemene aannames, een singulariteit aan het begin van het oerknaluniversum onvermijdelijk was in de relativiteitstheorie van Einstein.⁶

Hawking had in de eerste jaren van zijn promotie moeite met het vinden van het zwaartepunt van zijn proefschrift. Ondanks het feit dat Hawking in de eerste jaren van zijn proefschrift moeite had met het vinden van een duidelijk onderwerp, had hij wel al resultaat geboekt. Zo had hij aangetoond dat er een fout zat in een alternatieve zwaartekrachttheorie die de vorming van sterrenstelsels in het steady state-model beschreef. Dit was echter geen resultaat van grote waarde. Dit veranderde in 1965, toen de wiskundige Roger Penrose (1931 -) met behulp van topologische technieken zijn eigen singulariteitsstelling ontwikkelde. Deze stelling duidde op de onvermijdelijkheid van een singulariteit tijdens de ineenstorting van een ster tot een zwart gat. Hawking realiseerde zich dat deze methode van Penrose toepasbaar kon zijn op het gehele heelal in het oerknalmodel. Hiervoor moest hij één onderdeel van Penrose's theorie aanpassen: de richting van de tijd moest worden omgedraaid. Het idee hierachter was dat het oerknaluniversum klein begint en dan uitdijt, terwijl een ster juist groot begint en krimpt. Als men het oerknalmodel in de tegengestelde richting zou afspelen, dan zou dezelfde wiskunde die Penrose gebruikte impliceren dat het universum begon in een singulariteit. Om Penrose's wiskunde toe te kunnen passen op het universum moest

³[1] (p. 75, 374)

⁴[1] (p. 359, 375), [4] (p. 34)

⁵Zie Sectie 2.3 voor meer informatie over de steady state-theorie.

⁶[1] (p. 361-362), [4] (p. 36), [5] (p. 9)

Hawking, naast de richting van de tijd omkeren om zo een inkrimping van het universum te modelleren, ook een kernbegrip uit het bewijs van Penrose toepasbaar maken op het hele universum. Dit kernbegrip staat bekend als de *trapped surface condition*. Hier slaagde Hawking in en het resultaat werd het belangrijkste hoofdstuk van zijn proefschrift. Dit laatste hoofdstuk, waarin hij zijn singulariteitsstelling presenteerde, heeft hem dan ook zijn doctorsgraad opgeleverd. Later zouden Hawking en Penrose hun analyse van singulariteiten veralgemeniseren tot de nu bekende singulariteitsstelling van Penrose-Hawking (1970).⁷

Hoewel zijn proefschrift uiteindelijk een groot succes werd, was de beginperiode van zijn tijd in Cambridge lastig voor Hawking. Ten eerste, zoals al eerder benoemd, kreeg Hawking niet de begeleider van zijn eerste keuze en had hij moeite om een focuspunt voor zijn proefschrift te kiezen. Daarnaast werd Hawking in 1963 geconfronteerd met het nieuws dat hij aan een onbehandelbare en dodelijke ziekte leed. Hij leed aan de spierziekte *amyotrofische laterale sclerose*, beter bekend als *ALS*, waarbij de spieren één voor één uitvallen. De artsen vertelden aan Hawking dat hij nog slechts tweeënhalf jaar te leven had. Zelfs in deze heftige periode kwamen wederom de politieke idealen van Hawking naar boven. Toen zijn ouders een privékamer in het ziekenhuis voor hem wensten te betalen, weigerde hij dit vanwege zijn 'socialistische principes'.⁸

Het nieuws over zijn ziekte leidde ertoe dat Hawking een depressie kreeg. Hij verloor tevens de motivatie om verder te gaan met zijn proefschrift, aangezien hij dacht dat hij niet lang genoeg zou leven om het te voltooien. Bovendien verliep het begin van zijn promotie niet zoals hij wilde, al voordat hij het nieuws over zijn spierziekte te horen kreeg. Hawking had namelijk, naast de moeite met het kiezen van zijn onderwerp, ook moeite met de wiskunde die gebruikt werd in de kosmologie. Dit tekort aan wiskundige ervaring kwam met name doordat hij zich niet genoeg uitgedaagd had gevoeld door zijn studie in Oxford om zijn wiskundige vaardigheden te ontwikkelen.⁹

2.1.3 Hawkings eerste huwelijk (1965 - 1995)

"Het enige wat goed ging bij Stephen Hawking was zijn liefdesleven", aldus wetenschapsjournalist Charles Seife in zijn boek *Hawking Hawking: Een wetenschappelijke fenomeen ontrafeld*. Ondanks zijn worstelingen met zijn lichamelijke en geestelijke gezondheid vond Stephen uiteindelijk hoop in de liefde. Jane Beryl Wilde (1944 -) groeide op in St. Albans en zat tegelijkertijd met Stephen op de St. Albans High School for Girls. Het was echter pas tien jaar later, in 1962, dat Jane echt in contact kwam met Stephen. Drie jaar later, in 1965, zouden de twee gaan trouwen.¹⁰

Religie stond centraal in het leven van Jane. Al in haar opvoeding was er sprake van een sterk christelijke signatuur. Zo bezocht ze elke zondag de kerk en ging ze naar zondagsschool. De St. Albans High School for Girls was tevens een religieus ingestelde

⁷[1] (p. 344-347)

⁸[1] (p. 365-366), [6]

⁹[1] (p. 360, 366)

¹⁰[1] (p. 367), [2] (p. 11)

school.¹¹¹²

Toen Stephen en Jane net verloofd waren, was Jane twintig en bezig met haar tweede studiejaar aan het Westfield College. Stephen was tweeëntwintig en was promovendus onder begeleiding van Dennis Sciama. Op dat moment was het nieuws over Stephen zijn spierziekte al bekend. Wegens Stephens ziekte hadden zowel Jane als Stephen nooit verwacht dat hun huwelijk langer dan vijf jaar zou duren. Uiteindelijk waren ze dertig jaar getrouwd.¹³

Gedurende hun huwelijk waren er geregeld onenigheden tussen Stephen en Jane. Echter, hiervoor gaven beide een andere verklaring. Jane vond dat Stephen arrogant, denigrerend en koppig was in de omgang, met name richting haar. Stephen keek neer op het proefschrift over middeleeuwse Spaanse literatuur waar Jane aan werkte. Daarnaast leek Stephen niet in staat te zijn om compromissen te sluiten, met name als het ging om theologische kwesties. Wellicht het belangrijkste aspect van Stephen waar Jane moeite mee had was Stephens wereldbeeld. Volgens haar was Stephen "arrogant, egoïstisch en spiritueel verminkt" vanwege zijn "volledig op logica gebaseerde wereldbeschouwing [die] hem van zijn menselijkheid [had] beroofd".¹⁴ Jane zag haar geloof en spiritualiteit als haar levensbron en vond dat natuurkunde dat in de weg stond (althans, de interpretatie van natuurkunde die Stephen had). Het atheïstische gedachtegoed van haar man zou er volgens Jane toe leiden dat alle menselijke emoties, gevoelens en gedachten gereduceerd zouden worden tot wetenschappelijke formules en chemische reacties. Hiermee bedoelde ze vermoedelijk dat emoties, gevoelens en gedachten niet meer serieus zouden worden genomen, aangezien het enkel chemische reacties zouden zijn zonder verdere betekenis. Voor Jane was dit een nihilistisch wereldbeeld waarin vragen rondom moraal, waardering van kunst en bewustzijn niet gesteld konden worden, omdat de wetenschap zich niet bezighield met dit soort vragen. Jane karakteriseerde dit gedachtegoed als de filosofische positie genaamd *positivisme*.¹⁵ Hawkings positivisme zou bij het vergaren van kennis geen ruimte laten voor theologie en filosofie. Jane zag echter wel degelijk een rol voor deze vakgebieden in het proces van kennisvergaring. De visie van Hawking op wetenschapsfilosofie wordt nader toegelicht in Sectie 3.4.¹⁶

Jane schreef dat Stephens houding ten opzichte van haar geloof uiteindelijk zorgde voor het mislukken van hun huwelijk. De kern van het mislukte huwelijk was het

¹¹Het kerkelijke karakter van St. Albans High School for Girls wordt tevens benadrukt op hun eigen website <https://www.stahs.org.uk/about-stahs/heritage/>.

¹²[2] (p. 24)

¹³[1] (p. 186) , [2] (p. 5)

¹⁴[1] (p. 196)

¹⁵Positivisme is een brede stroming binnen de wetenschapsfilosofie. Hawking gaf zelf toe dat hij een positivist is [7] (p. 4) In het geval van Hawking betekent positivisme vooral dat wetenschap de enige manier is om aan echte kennis te komen en dat het geen nut heeft om na te denken wat de werkelijke aard van de realiteit is. Het is interessant om te benoemen dat Hawking zich tegelijkertijd duidelijk liet inspireren door wetenschapsfilosoof en criticus van het positivisme Karl Popper (1902 - 1994) [8] (p. 12). Het lijkt er echter op dat Hawking zich alleen liet inspireren door het deel van Poppers werk dat niet tegen zijn positivisme inging, namelijk het *falsificationisme*.

¹⁶[2] (p. 59, 156, 201, 320)

atheïstische, positivistische wereldbeeld van Stephen dat haaks stond op het christelijke, spirituele wereldbeeld van Jane.¹⁷

De uitleg van Stephen over het mislukken van het huwelijk was daarentegen anders. In Hawkings *My Brief History* (2013) liet hij doorschemeren dat de hechte band die Jane met Jonathan Hellyer Jones (1951 -) begon te ontwikkelen de reden was dat het huwelijk tussen Jane en Stephen mislukte. Jane leerde Jonathan in 1977 kennen bij een lokaal kerkelijk koor waar hij de meester was. In de jaren daarna werden ze steeds hechter en ontwikkelde ze gevoelens voor hem. Jonathan hielp mee in het huishouden van de Hawkings, onder andere bij het verzorgen van Stephen. Jane vond veel steun bij Jonathan, aangezien hij, in tegenstelling tot Stephen, haar wel leek te waarderen voor wie ze was. Volgens Stephen waren het de gevoelens die Jane had voor Jonathan hetgeen dat het huwelijk stuk lieten lopen, niet de discussies rondom het geloof van Jane.¹⁸

Echter, Seife schreef in zijn biografie van Hawking [1] dat het niet de conflicterende wereldbeelden of de affaire die Jane had met Jonathan waren die het huwelijk van Jane en Stephen deden mislukken. Volgens Seife liep het huwelijk stuk omdat alles in het gezin om Stephen ging draaien: de band tussen Jane en Stephen brak op het moment dat Stephen op het hoogtepunt van zijn roem was. Vanwege deze roem kwamen het gezin voor veel uitdagingen te staan, uitdagingen die te zwaar waren voor Jane. De vele verpleegsters die Stephen over de jaren hebben verzorgd waren al een grote inbreuk op Jane's privacy, maar daar kwamen vervolgens, na de uitgave van zijn bestseller *A Brief History of Time*, ook nog cameraploegen bij. Daarnaast voelde Jane zich niet gezien, omdat de schijnwerper alsmaar op haar man gericht was.¹⁹

Hoewel er verschillende verklaringen zijn voor het einde van het huwelijk tussen Jane en Stephen, is het duidelijk dat het positivistische wereldbeeld van Stephen voor Jane in de weg van het huwelijk stond. Er kan vastgesteld worden dat het huwelijk al langere tijd onder hoogspanning stond, spanning die Jane niet langer kon verduren.

2.1.4 Hawkings wetenschappelijke carrière (1966 - 1988)

Hawkings carrière kwam in een stroomversnelling door zijn proefschrift waarin hij zijn singulariteitsstelling presenteerde. Vanaf 1965 werkte hij samen met Roger Penrose aan de studie van singulariteiten. In 1970 leidde deze samenwerking tot de singulariteitsstelling van Penrose-Hawking.²⁰

Na deze periode richtte Hawking zich op een ander aspect van zwarte gaten: de waarnemingshorizon. Uit deze verandering in onderzoeksinteresse volgde uiteindelijk Hawkings oppervlaktetheorema (1971), waarin gesteld werd dat een zwart gat nooit kan krimpen. Daarna volgde in 1974 zijn volgende hoogtepunt, toen hij aantoonde dat op de rand van de waarnemingshorizon van een zwart gat een lichte gloed bestaat. Deze gloed was afkomstig van thermische zwartelichaamsstraling die vernoemd werd

¹⁷[1] (p. 186)

¹⁸[2] (p. 360, 394), [9]

¹⁹[1] (p. 238, 243), [2] (p. 537)

²⁰[1] (p. 16, 346)

naar Hawking zelf: *Hawkingstraling*. Hawkingstraling is een kwantumeffect waardoor een zwart gat kan krimpen. Dit gaat dus in tegen zijn oppervlaktetheorema van vier jaar eerder. Bij zwartelichaamsstraling hoorde een bepaalde temperatuur van het zwarte gat, de *Hawkingtemperatuur*. De periode waarin Hawking werkte aan de waarnemingshorizon van zwarte gaten (1970 - 1974) was het hoogtepunt van zijn wetenschappelijke carrière.²¹

In de jaren tachtig keerde Hawking terug naar het bestuderen van het ontstaan van en de aard van het universum. In 1983 presenteerde Hawking samen met Jim Hartle (1939 - 2023) het *no boundary-voorstel*. Het voorstel betrof een quantumkosmologisch model voor het heelal: een poging om quantummechanica te gebruiken om een theorie voor het universum te ontwikkelen. Dit idee kwam tot stand door een dertig jaar oude techniek van de bekende Amerikaanse natuurkundige Richard Feynman (1919 - 1988): Feynmans padintegralen. Het voorstel heeft zijn naam te danken aan het feit dat de initiële singulariteit van het universum vermeden werd. Hiermee was er geen begin van de tijd, of anders gezegd: de tijd had geen duidelijke grens. Bovendien was er in het voorstel ook geen grens in de ruimtedimensies. In Hoofdstuk 4 zal verder op het *no boundary-voorstel* worden ingegaan.²²

Sinds Hawkings wetenschappelijke doorbraak schuwde hij de schijnwerpers niet. Zo was hij betrokken bij meerdere filmprojecten en was hij een vast onderdeel van wetenschappelijke televisieprogramma's. Het televisieprogramma *Stem Cell Universe with Stephen Hawking* (2014) opende bijvoorbeeld met het beeld van de natuurkundige in zijn rolstoel terwijl er een sterrenstelsel om hem heen draaide. Zelfs in een programma over stamcellen, een vakgebied waar Hawking geen expertise in had, speelde hij dus een speciale rol. Dit was een thema gedurende zijn hele carrière als beroemde wetenschapper: hij sprak uitvoerig over thema's en vakgebieden waar hij geen expert in was. Hawking was voor het grote publiek de belichaming van de wetenschap, waardoor het niet uitmaakte of hij daadwerkelijk kennis van zaken had over een specifiek onderwerp. Deze positie als populaire wetenschapper zorgde ervoor dat Hawking zich over allerlei onderwerpen kon uitspreken terwijl mensen hem serieus zouden blijven nemen. Dit betrof zowel wetenschappelijke onderwerpen als politieke onderwerpen.²³

De iconische status van Hawking was, naast het feit dat Hawking zelf erg van zijn status leek te genieten, eveneens belangrijk voor de financiën van Jane en Stephen. Zo schreef hij zijn bestseller *A Brief History of Time* deels om bekender te worden buiten de natuurkundige gemeenschap, maar ook omdat hij het middelbare schoolgeld van zijn dochter Lucy wilde betalen. De spierziekte van Stephen bracht namelijk veel financiële zorgen met zich mee. Het was lastig om adequate zorg te vinden en te betalen, vooral aangezien slechts een kleine fractie van de kosten vergoed werd door de National Health Service (NHS). Jane schatte eind jaren tachtig in dat de kosten voor de verpleging al 36.000 pond per jaar zouden bedragen (omgerekend naar huidige waarde ruim 140.000 euro). Met name de inkomsten van zijn bestseller hielpen om de financiële druk op

²¹[1] (p. 37-38, 318, 320, 357)

²²[1] (p. 255), [7] (p. 79)

²³[1] (p. 20, 42-43, 75-76)

hem en Jane sterk te verminderen.²⁴

Door de inkomsten die verbonden waren aan Hawkings beroemdheid was Hawking afhankelijk van zijn status als bekende wetenschapper. Als hij die status zou verliezen, zou daarmee ook een groot gedeelte van zijn inkomen verdampen. Hierdoor was het voor hem belangrijk om deze status te bewaren. Echter, dit was niet makkelijk, aangezien hij zich aan de ene kant nederig moest opstellen, maar zich tegelijkertijd moest onderscheiden als een wetenschapper met de statuut van Newton, Galilei en Einstein. Hawking stond namelijk vooral bekend als de briljante wetenschapper met ALS, en was niet zozeer bekend vanwege zijn wetenschappelijke werk. Volgens Seife werd hij door zijn spierziekte enerzijds behandeld met respect maar anderzijds ook met een zekere vorm van neerbuigendheid. Dit zorgde er vermoedelijk voor dat Hawking zich ook nederig moest opstellen naar de buitenwereld om zijn imago te bewaren, ondanks dat hij helemaal niet bekend wilde staan om zijn spierziekte, maar juist om zijn wetenschappelijke verdiensten.²⁵

Hoewel Hawking er zelf liever niet over sprak, stond ALS altijd centraal in zijn leven. Zo zorgde zijn ziekte ervoor dat hij permanent in een rolstoel terecht kwam, zijn vaardigheid om te schrijven verloor en zijn spraak verloor. Hierdoor moest hij zijn latere boeken laten schrijven door ghostwriters. Hawking was dus zelf niet volledig betrokken bij het schrijfproces. Volgens Al Zuckerman, Hawkings literair agent gedurende onder andere de publicatie van *A Brief History of Time*, werd Hawkings naam uiteindelijk op de boeken gezet om "geld te verdienen".²⁶ Bovendien kon hij sinds de jaren zeventig, toen hij zijn schrijfvaardigheid verloor, geen wiskunde meer opschrijven, waardoor het voor hem moeilijk werd om collega's wiskundig bij te benen. In 1985 verloor Hawking zijn spreekvaardigheid door een heftige operatie in Genève waarbij een beademingsbuis werd aangebracht in zijn luchtpijp. Het volgende jaar kreeg Hawking zijn spraakcomputer waarmee hij weer op een relatief normale manier kon communiceren. Dit zorgde ervoor dat hij vaak delen van toespraken recyclede en uitspraken herhaalde, aangezien het voor hem veel moeite kostte om een volledig nieuwe speech samen te stellen via zijn spraakcomputer.²⁷

2.2 Christendom in het Verenigd Koninkrijk gedurende Hawkings carrière

Om in Hoofdstuk 3 Hawkings visie op religie in context te kunnen plaatsen, zal in deze sectie de staat van religie in het Verenigd Koninkrijk (VK) gedurende de carrière van Hawking besproken worden. Er wordt in deze sectie specifiek gefocust op het anglicanisme, aangezien dit de dominante religie was en is in het VK. Het anglicanisme is een christelijke denominatie. Bovendien was de eerste vrouw van Hawking, Jane Hawking, ook verbonden met de anglicaanse kerk.

²⁴[1] (p. 187, 257)

²⁵[1] (p. 18, 20, 24, 195-196)

²⁶[1] (p. 113)

²⁷[1] (p. 18, 112, 150, 269), [10]

Gedurende de Eerste Wereldoorlog (1914 - 1918) nam de aanhang van alle christelijke kerkgenootschappen in Groot-Brittannië af. In de jaren twintig bleef de aanhang stabiel maar nam vervolgens weer af. In de Tweede Wereldoorlog en de periode daarna (eind jaren veertig, begin jaren vijftig) nam het aantal gelovigen weer toe. Een mogelijke verklaring voor deze toename was de rol die het christendom speelde in de sociale cohesie gedurende de dreigingen van het nazisme en het communisme. Echter, in de jaren zestig veranderde het religieuze landschap van de westerse wereld, waaronder het VK, compleet. Zo nam het aantal kerkleden, kerkgangers en religieuze professionals zoals priesters af. Daarnaast daalde de mate waarin de christelijke identiteit werd overgedragen aan jongere generaties. Zelfs op politiek niveau was de afname van het christelijke geloof zichtbaar. Zo werd er in Groot-Brittannië tussen 1967 en 1969 een reeks aan wetten geliberaliseerd, zoals de legalisatie van homoseksualiteit, abortuswetgeving en wetgeving rond echtscheidingen. De afname van lidmaatschap en participatie sinds de jaren zestig in het VK was in het bijzonder groot voor de anglicaanse kerk. De afname was bij deze kerkgenootschap groter dan bij andere protestantse kerkgenootschappen. Het aantal anglicaanse vormsels daalde in de periode 1960-70 met 44% voor mannen en 41% voor vrouwen. Historicus Hugh McLeod vergeleek de jaren zestig zelfs met de Reformatie.²⁸

Het is duidelijk dat er een sterke daling was van de religiositeit in het VK in de jaren zestig, met name bij de anglicaanse kerk. Historici geven hier meerdere verklaringen voor.²⁹ Zo zijn er zowel trends die al decennia lang speelden als korte termijn gebeurtenissen die beide mogelijk hebben geleid tot de gebeurtenissen van de jaren zestig. Mogelijke gebeurtenissen die worden genoemd in de literatuur zijn onder andere welvaartsstijging vanaf het midden van de jaren vijftig in Groot-Brittannië en de seksuele revolutie tussen 1965 en 1969 in Groot-Brittannië.³⁰

Naast de verschillende periodes waarin de aanhang van het christendom toe- of afnam, is er in het algemeen van generatie op generatie een afname te zien van religieuze affiniteit in de twintigste eeuw in Groot-Brittannië. Het is daarentegen wel zo dat de levensfase van een persoon geen correlatie met gelovigheid laat zien (althans in de periode 1983-2002). Dit betekent dat de religieuze affiniteit van een persoon vooral in zijn of haar jeugd wordt bepaald. Hierdoor is de religie van de ouders van een kind een belangrijke factor voor de religiositeit van het kind.³¹

Na de jaren zestig bleef de religiositeit onder de bevolking in het VK afnemen. Zo was in 1983 66% van de Britten christelijk, in 2018 was dit nog maar 38%. Bovendien daalde in dezelfde tijd het aantal Britse anglicanen van 40% in 1983 tot 12% in 2018. De secularisering van de westerse wereld over de afgelopen decennia is een belangrijke factor om rekening mee te houden als het gaat over Hawkings uitspraken wat betreft religie in het publieke domein.³²

²⁸[11] (p. 440), [12] (p. 205, 220, 227), [13] (p. 36)

²⁹Voor een discussie over de mogelijke verklaringen voor de religieuze revolutie van de jaren zestig, zie onder andere [11], [12], [13] en [14].

³⁰[12] (p. 226)

³¹[15] (p. 577, 581)

³²[16] (p. 86), [17], [18] (p. 4-5)

2.3 Relatie kosmologie-theologie en filosofie tot 1965

In deze sectie zal gekeken worden naar hoe theologie en filosofie een rol hebben gespeeld in de geschiedenis van de kosmologie tot circa 1965, de periode waarin Hawking onderdeel werd van de kosmologische gemeenschap. Dit zal worden gedaan om een beter beeld te krijgen van de wetenschappelijke context waarin Hawking zich bevond toen hij aan zijn carrière begon. Voordat naar deze relatie tussen kosmologie en theologie gekeken kan worden, is het goed om eerst af te vragen waarom er überhaupt een relatie zou kunnen zijn tussen deze twee vakgebieden. Kosmologie probeert vragen te beantwoorden over het universum: het ontstaan, de structuur en de evolutie ervan. Hoe is het universum tot stand gekomen? Is het universum eindig in ruimte en tijd? Als men discussieert over deze 'grote vragen', dan komen theologische aspecten snel in het vizier. Theïsten zullen beweren dat er een god bestaat die het universum tot stand heeft gebracht. Daarnaast zullen de meeste van hen beweren dat het universum eindig oud is. Zo is het universum volgens de Bijbel ongeveer 6000 jaar oud.³³ Deze religieuze opvattingen raken direct aan de 'grote vragen' die kosmologen zichzelf stellen. Er zit dus een overlap tussen de vragen waar theologen en kosmologen zich mee bezighouden.

In de geschiedenis van het onderzoeksveld dat uiteindelijk kosmologie zou gaan heten, speelde theologie dan ook een belangrijke rol. In de dertiende eeuw werd het werk van Aristoteles geïntroduceerd op Europese universiteiten. Echter, de kosmologie van Aristoteles stond recht tegenover wat de Bijbel voorschreef: Aristoteles' kosmologie was namelijk eeuwig. Dit idee en andere ideeën van Aristoteles die ingingen tegen het christelijke geloof leidden tot hevige discussies tussen geleerden over hoe deze ideeën verenigd konden worden met het geloof. Eén van de geleerden die probeerde het werk van Aristoteles te verenigen met theologie was de Italiaanse filosoof en theoloog Thomas Aquinas (1225 - 1274). In zijn *De Aeternitatis Mundi* uit circa 1270 beargumenteerde Aquinas dat God wel degelijk een eeuwig universum kon schapen.³⁴ Dit kwam vanwege het feit dat voor acties van God geen oorzaak in de tijd nodig was volgens Aquinas. Hierdoor kon Aquinas aristotelisme, de leer van Aristoteles, en het christendom verenigen. Echter, vlak na zijn dood kwam de spanning tussen aristotelisme en het katholieke geloof tot een hoogtepunt. In 1277 gaf de bisschop van Parijs, Étienne Tempier, een lijst met verboden proposities uit, waaronder de propositie dat het universum eeuwig was. In de jaren erna werden aristotelisme en katholicisme toch verenigd, vooral doordat er veel gezag werd toegekend aan Aquinas. In 1323 werd Aquinas heilig verklaard en in 1325 trok de bisschop zijn lijst met verboden proposities in.³⁵

De spanning tussen het aristotelische en christelijke model van het universum in de dertiende eeuw is slechts één van de vele voorbeelden waarin de relatie tussen theo-

³³[19] (p. 40)

³⁴Hoewel Aquinas dus beargumenteerde dat het niet logisch uitgesloten is dat God een eeuwig universum heeft geschapen, geloofde hij nog steeds in een universum met een eindige leeftijd [20] (p. 5) [21].

³⁵[20] (p. 3-5)

logie en kosmologie zichtbaar was. Zo bracht het heliocentrische zonnestelsel van Copernicus (1473 - 1543) ook problemen voor het christendom met zich mee. Daarnaast werd Galileo Galilei (1564 - 1642) in 1633 veroordeeld door de rooms-katholieke kerk vanwege zijn overtuiging dat Copernicus' wereldbeeld niet enkel een rekenmodel was die waarnemingen kon voorspellen, maar het echte zonnestelsel beschreef. Isaac Newton (1643 - 1727) schreef in zijn tweede versie van *Principia* uit 1713 dat het universum ontworpen was door een hemels wezen. Tot in de twintigste eeuw waren theologische en filosofische aspecten onderdeel van de kosmologie. In de periode 1948 - 1965 waren er twee kosmologische modellen die concurreerden voor de titel van standaardmodel. In deze periode van de geschiedenis van de kosmologie kwamen wederom filosofische en theologische aspecten naar boven.³⁶

2.3.1 Steady state- versus oerknalmodel (1948 - 1965)

In 1948 kwamen er twee nieuwe kosmologische modellen tot stand: het steady state-model en een versie van het oerknalmodel. Het *steady state-model* is tot stand gebracht door Hermann Bondi (1919 - 2005), Thomas Gold (1920 - 2004) en Fred Hoyle.³⁷ Deze drie kosmologen kwamen alle drie uit het zuiden van Engeland. Alle aanhangers van het steady state-model, wat er overigens maar ongeveer twaalf waren, waren Brits. Aangezien de theorie in Groot-Brittannië was ontwikkeld en haar aanhangers zich daar ook bevonden, kan de steady state-theorie worden aangemerkt als een Brits model.³⁸

Het steady state-model is gebaseerd op het *perfecte kosmologische principe*, wat gezien kan worden als een uitgebreide versie van het kosmologische principe. Volgens het perfecte kosmologische principe geldt niet alleen dat op grote schaal het universum er overal hetzelfde uit ziet, maar ook in de tijd altijd hetzelfde eruitziet. Hier dankt het model ook zijn naam aan, het universum blijft in een 'stabiele staat'. Het perfecte kosmologische principe impliceert daarnaast een eeuwig universum. Om ervoor te zorgen dat het steady state-universum inderdaad stationair is terwijl het uitdijt, moet er een constante creatie van materie zijn. Als het universum namelijk stationair is, moet de dichtheid ook constant blijven terwijl het uitdijt. Om dit mogelijk te maken moet er een constant materie worden toegevoegd aan het universum.³⁹

Hoyle werkte onafhankelijk van Bondi en Gold en kwam met een andere steady state-theorie dan zij. In de steady state-theorie van Bondi en Gold werd het perfecte kosmologische principe als een axioma gezien. Dit betekende dat als een gevolg van een bepaalde natuurkundige theorie inging tegen dit principe, ze die natuurkundige theorie niet accepteerden. In het bijzonder accepteerden ze de algemene relativiteitstheorie niet, omdat deze impliceert dat er behoud van massa is: er is geen massabehoud in een uitdijend heelal volgens het perfecte kosmologische principe. Hoyle wilde daarentegen zijn steady state-theorie opbouwen binnen het raamwerk van de algemene

³⁶[20] (p. 7, 9)

³⁷Voor het steady state-model van Bondi, Hoyle en Gold waren er ook andere steady state-modellen, maar het verschil met de oudere modellen was dat in hun model het universum expandeert [21].

³⁸[1] (p. 362), [22] (p. 180), [23] (p. 396)

³⁹[22] (p. 186)

relativiteitstheorie. Hiervoor moest Hoyle een extra term toevoegen aan de einstein-vergelijkingen, zodat de einsteinvergelijkingen ook creatie van materie toestonden. Alhoewel beide modellen dus gebaseerd waren op het perfecte kosmologische principe, waren er zeker verschillen. Bondi en Gold hadden kritiek op Hoyle's model, aangezien Hoyle vasthield aan de algemene relativiteitstheorie. Hoyle had eveneens kritiek op het model van Bondi en Gold aangezien Hoyle vond dat dat model te revolutionair was, mede omdat het de algemene relativiteitstheorie ontkende. Deze controversie tussen Bondi en Gold aan de ene kant en Hoyle aan de andere was echter klein in vergelijking met de strijd die zij alle drie samen voerden tegen het rivaliserende model: het oerknalmodel.⁴⁰

Het *oerknalmodel* kent een langere geschiedenis dan het steady state-model. De Belgische natuurkundige Georges Lemaître (1894 - 1966) publiceerde in 1927 al een paper waarin hij liet zien dat uit de relativiteitstheorie volgde dat het heelal uitdijde. In 1931 kwam hij met een oerknalmodel. Lemaître's paper uit 1927 bleef in eerste instantie onder de radar van de meeste natuurkundigen, maar in de jaren dertig werd het paper onder de aandacht gebracht. Bovendien had Edwin Hubble (1889 - 1953) in 1929 zijn beroemde Hubble-wet gepubliceerd, die de correlatie gaf tussen de afstand van sterrenstelsels en de snelheid waarmee ze van de aarde af bewogen. In de vroege jaren dertig werd, mede door het werk van Lemaître en Hubble, de theorie van een uitdijend universum geaccepteerd door de meerderheid van sterrenkundigen. Dit impliceerde volgens de meeste astronomen in die tijd echter niet direct dat het universum een eindige leeftijd had. Hierdoor werd Lemaître's oerknalmodel niet algemeen geaccepteerd: in de kosmologie van de jaren dertig heerste de overtuiging dat het universum eeuwig was. Pas in de jaren zestig veranderde dit beeld over de leeftijd van het universum.⁴¹

In 1948 ontwikkelde George Gamow (1904 - 1968) en zijn doctoraatstudent Ralph Alpher (1921 - 2007) in de Verenigde Staten een nieuwe variant van het oerknalmodel. Hoewel Lemaître gezien kan worden als de grondlegger van het oerknalmodel, speelde zijn oerknalmodel geen rol in de ontwikkeling van het model van Gamow en Alpher. Gamow was een kernfysicus en geloofde dat de enige manier waarop zwaardere elementen opgebouwd konden worden uit nucleaire reacties een onomkeerbaar, explosief evenement was aan het begin van de tijd zelf. Dit zou later bekend worden als de oerknal. Naast Gamow en Alpher werkten er nog meer mensen aan het oerknalmodel, zoals Robert Herman (1914 - 1997) en James Follin (1919 - 2007). Het oerknalmodel van Gamows groep trok niet veel aandacht buiten de Verenigde Staten. Het onderzoeksproject van Gamow, Alpher en Herman was meer een kernfysische theorie dan een astronomische theorie. Het model liet alleen zien hoe atoomkernen tot stand kwamen in het vroege universum, niet hoe het universum zich daarna verder ontwikkelde.⁴²

Gedurende de periode tussen 1948 en 1965 was er binnen de kosmologische gemeenschap een debat over welk van de twee modellen het standaardmodel zou moeten zijn: het steady state-model of het oerknalmodel. Beide modellen hadden te maken met kri-

⁴⁰[22] (p. 187) , [23] (p. 393, 395)

⁴¹[22] (p. 152, 156), [24] (p. 61)

⁴²[22] (p. 178, 183)

tiek. Zo kreeg het steady state-model met name kritiek op het feit dat er een constante creatie van materie nodig was om aan het perfecte kosmologische principe te voldoen. Deze creatie van materie geschiedde *ex nihilo*, oftewel creatie 'uit het niets'. Dit betekende dat er een fundamentele natuurwet werd overtreden: behoud van energie. Het oerknalmodel daarentegen kreeg kritiek op het feit dat het model niet goed de aanwezigheid van elementen zwaarder dan 5 amu kon verklaren. Dit kwam omdat er geen stabiele isotopen bestaan met massagetal 5 of 8. Deze isotopen waren noodzakelijk om elementen zwaarder dan helium te creëren aan de hand van neutronenvangst. Dit staat ook wel bekend als het 'mass gap problem'. Gamow en zijn collaborateurs dachten dat alle elementen in het universum gevormd waren tijdens de oerknal. Daarentegen waren er in de jaren vijftig al wetenschappers die beweerden dat zwaardere elementen niet gevormd werden tijdens de oerknal, maar in supernovae en sterren. Ruim een decennium na de publicatie van het oerknalmodel van Gamow en Alpher, in de vroege jaren zestig, werd er algemeen aangenomen dat de formatie van zwaardere elementen veroorzaakt werd door een combinatie van kosmologische en stellaire processen. Door dit nieuwe inzicht werd het 'mass gap problem' als een minder sterk argument tegen het oerknalmodel gezien.⁴³

Het debat tussen het steady state- en het oerknalmodel, dat voornamelijk in Groot-Brittannië plaatsvond, was deels theologisch en filosofisch van aard. De filosofische aard van het debat kwam met name terug in de argumenten die gerelateerd waren aan methodologie. Een voorbeeld hiervan was het argument van Bondi voor het steady state-model. Bondi, geïnspireerd door de wetenschapsfilosofie van Karl Popper (1902 - 1994), beweerde dat het steady state-model beter kon worden gefalsificeerd middels waarnemingen dan het oerknalmodel. Dit had ook te maken met Bondi's overtuiging dat kosmologie tegen die tijd al een volwaardige wetenschap was geworden. Falsificeerbaarheid was voor hem een belangrijke eis voor de geloofwaardigheid van een wetenschappelijke theorie. Hiermee beweerde Bondi dus dat het steady state-model 'wetenschappelijker' was dan het oerknalmodel.⁴⁴

Het theologische aspect van de discussie is vooral te vinden in argumenten voor en tegen het oerknalmodel. Als reactie op de ontwikkeling van het oerknalmodel verklaarde paus Pius XII in 1951 dat oerknalkosmologen achter dezelfde waarheid waren gekomen als theologen die dat al meer dan een millennium eerder hadden gedaan: het universum heeft een eindige leeftijd en is gecreëerd door een schepper. Kosmologen reageerden vervolgens weer op deze verklaring van de paus. Gamow citeerde de uitspraak van de paus in een paper in het Amerikaanse tijdschrift *Physical Review* en gebruikte dit als een argument voor zijn oerknalmodel. Hoyle gebruikte deze verklaring juist als een argument tegen het oerknalmodel.⁴⁵

Het is goed om op te merken dat het te betwisten viel of het steady state-model en het oerknalmodel inherent respectievelijk atheïstisch en theïstisch waren. Dit bleek bijvoorbeeld uit het feit dat de grondlegger van het oerknalmodel, Lemaître, zelf vond

⁴³[20] (p. 240), [22] (p. 187), [23] (p. 385-386)

⁴⁴[22] (p. 196-197), [23] (p. 385)

⁴⁵[22] (p. 196-197), [23] (p. 383)

dat het oerknalmodel geheel los stond van religie. Bovendien was Aquinas van mening dat God zowel een eeuwig als een universum met een eindige leeftijd had kunnen schapen. Anders gezegd: het geloof van een persoon was niet geheel bepalend voor welk kosmologisch model ze aanhingen. Desondanks werden verbanden tussen religie en beide modellen toch getrokken door wetenschappers, theologen en het publiek van (populaire) wetenschap. Het ontstaan van het universum werd namelijk vaak in verband gebracht met het christelijke scheppingsverhaal, omdat het oerknalmodel een ontstaansmoment van het universum impliceerde. Daarentegen werd het steady state-model soms als agnostisch of atheïstisch bestempeld. Dit kwam mede door het feit dat het oerknalmodel, onder andere door de paus, werd gekenmerkt als een theïstisch model. Aangezien het steady state-model de tegenhanger was van het oerknalmodel, heeft dit ertoe kunnen leiden dat het steady state-model als anti-theïstisch gezien werd. Bovendien was het onduidelijk hoe een schepper een oneindig oud universum had kunnen creëren.⁴⁶

Naast het feit dat de twee modellen in verband werden gebracht met discussies over theïsme door zowel kosmologen als theïsten, waren de anti-religieuze opvattingen van Hoyle, Bondi en Gold een directe motivatie voor het steady state-model. Hoewel er geen directe referenties naar religie waren in de originele papers uit 1948, vonden Hoyle, Bondi en Gold een universum met eindige leeftijd niet wenselijk. Dit kwam door een combinatie van methodologische en theologische argumenten. Ze vonden namelijk dat het ontstaan van het universum niet op een wetenschappelijke manier kon worden onderzocht. Dit ging, in hun opvatting, in tegen de methodologie van de wetenschap. Daarnaast moest volgens Hoyle, om toch het ontstaan van het universum te verklaren, aanspraak worden gemaakt op theologische argumenten, zoals het bestaan van een schepper. Dit waren redenen voor Hoyle, Bondi en Gold om te werken aan een kosmologisch model waarin het universum eeuwig was. Hoewel het te betwisten viel of één van beide modellen inherent (a)theïstisch was, vonden veel wetenschappers, theologen en commentatoren het natuurlijk om het verband te leggen tussen (a)theïsme en kosmologie en hier discussies over te voeren.⁴⁷

De reden dat het debat tussen het steady state- en oerknalmodel een theologisch en filosofisch aspect bevatte, kan verklaard worden door het feit dat er nog geen doorslaggevende waarnemingen waren die duidelijk één van de theorieën ondersteunden. Zowel de steady state-kosmologen als de aanhangers van het oerknalmodel waren het erover eens dat alleen dit soort observationele resultaten de controverse tussen de twee modellen kon beëindigen.⁴⁸ Aangezien deze resultaten er nog niet waren, werd het debat tussen de rivaliserende modellen verbreed naar een debat over wat kosmologie nou precies zou moeten zijn.

⁴⁶[20] (p. 242), [21], [23] (p. 398), [24] (p. 99)

⁴⁷[20] (p. 196, 234)

⁴⁸[23] (p. 398)

2.3.2 Kosmologie als wetenschap in de jaren vijftig

Vanaf de ontdekking van de *kosmische achtergrondstraling* in 1965 werd het oerknalmodel het standaardmodel in de kosmologie en werd het steady state-model achterwege gelaten. Sindsdien kwam de naam 'kosmoloog' op voor een wetenschapper die zich voltijds bezighield met het ontstaan van en de evolutie van het universum. Hiervoor werd kosmologie namelijk gezien als een hobby voor wis-, natuur- en sterrenkundigen. Het aantal kosmologische papers dat gepubliceerd werd groeide ook. In de periode 1950 - 1962 werden er jaarlijks gemiddeld dertig kosmologische papers gepubliceerd. Daarentegen steeg het gemiddelde tussen 1962 en 1972 van vijftig naar 250 papers per jaar. Hoewel kosmologie voor veel wetenschappers in deze tijd een wetenschappelijke discipline werd, was kosmologie nog steeds een klein vakgebied in vergelijking met andere vakgebieden binnen de natuurkunde en astronomie.⁴⁹

Voor deze tijd was er een debat over het wel of niet kunnen bestempelen van kosmologie als wetenschap, een debat dat al eeuwen oud was. Zo schreef filosoof Immanuel Kant (1724 - 1804) al in 1781 in zijn bekende *Kritik der Reinen Vernunft* dat kosmologie als wetenschap onmogelijk was. Deze discussie ontstond met name doordat het gebruik van waarnemingen en natuurkundige theorieën nog geen vast onderdeel was van kosmologie. Tot aan de twintigste eeuw ontbraken er nog verschillende technieken en apparatuur om metingen te verrichten die bepaalde kosmologische modellen konden testen. Tot de ontdekking van de kosmische achtergrondstraling was er bijvoorbeeld nog geen definitieve waarneming die de impasse tussen het oerknal- en steady state-model kon doorbreken. Hierdoor werden theologische of filosofische argumenten gebruikt in kosmologische vraagstukken, zoals in de patstelling tussen het steady state-model en het oerknalmodel.⁵⁰

Twee hoofdrolspelers in dit debat dat plaatsvond in de jaren vijftig waren Bondi en Gerald Whitrow (1912 - 2000). Zij bediscussieerde in 1954 in de *British Journal for the Philosophy of Science* de vraag of kosmologie een wetenschap was.⁵¹ Whitrow argumenteerde dat kosmologie niet als een wetenschap kon worden aangemerkt. Eén van de redenen hiervoor was volgens hem het feit dat metingen een cruciale rol speelden in de wetenschap. De resultaten van metingen zouden onbetwistbaar moeten zijn, waardoor er een neiging is naar algemene acceptatie van bepaalde wetenschappelijke kennis. Hierbij kan gedacht worden aan een standaardmodel in de kosmologie, zoals het oerknalmodel heden ten dage. Volgens Whitrows visie was dit in 1954 nog niet het geval, aangezien er telkens herzieningen waren van de kennis die tot die tijd was opgedaan.

Een andere reden dat kosmologie niet als wetenschap kon worden aangemerkt volgens Whitrow was hetgeen dat kosmologie bestudeerde: het universum. Volgens hem veronderstelden alle theoretische wetenschappen bepaalde filosofische postulaten. Dit noemde hij de 'achtergrond' van een theorie. Deze postulaten werden zoveel mogelijk vermeden volgens Whitrow, maar het universum is juist de 'achtergrond' waar weten-

⁴⁹[22] (p. 200, 215)

⁵⁰[20] (p. 14), [21]

⁵¹[22] (p. 196)

schappelijke theorieën op berusten. Voor Whitrow was het bestuderen van het universum, en daarmee kosmologie, daardoor geen onderdeel van de wetenschap. Bondi vond daarentegen dat kosmologie wel degelijk al een volwaardige wetenschap geworden was, aangezien volgens hem kosmologische modellen werden aangenomen op basis van waarnemingen in plaats van filosofische of theologische argumenten.⁵²

Dit bredere debat over de staat van kosmologie speelde zich met name af in Groot-Brittannië. Vanaf 1961 begon de aanhang van het steady state-model af te nemen, toen Martin Ryle (1918 - 1984) verbeterde data van radiogolven presenteerde, data die onverenigbaar was met het steady state-model. Met de ontdekking van de kosmische achtergrondstraling in 1965 kwam er einde aan dit debat en werd het oerknalmodel aangenomen als het standaardmodel binnen de kosmologie. Tussen 1948 en het heden is het oerknalmodel drastisch veranderd, bijvoorbeeld door de introductie van de inflatietheorie. Toen Hawking begon aan zijn proefschrift, bevond de kosmologie zich dus nog steeds in dit debat.⁵³

2.3.3 Fred Hoyle

Een belangrijke speler in het debat gedurende de periode 1948 - 1965 was Fred Hoyle. Hij was de belangrijkste architect van de steady state-theorie. Daarnaast was hij 's werelds bekendste wetenschapper die astronomie en kosmologie toegankelijk maakte voor het brede publiek. Als populaire wetenschapper gebruikte hij de radio en de televisie als nieuw mediakanaal om het publiek te bereiken. De jonge Hawking had Hoyle vroeger ongetwijfeld gehoord op de radio. Naast Hoyle's optredens op de radio en televisie, was hij tevens bekend door zijn bestseller *The Nature of the Universe* uit 1950. Hierin besprak hij zowel het oerknalmodel als het steady state-model en de consequenties van deze modellen voor ethiek, politiek en religie. Door dit boek kreeg het steady state-model publieke aandacht.⁵⁴

Hoyle was een fel tegenstander van het oerknalmodel. Hij verzoonde de denigrerend bedoelde term 'big bang' als benaming voor de oerknal in een radio-uitzending van de BBC. Deze afschuw van het oerknalmodel kwam voornamelijk door Hoyle's anti-religieuze overtuigingen. In zijn tienerjaren had hij al geconcludeerd dat religie een sprookje was zonder enige relatie met de realiteit. Hoyle vond dat het oerknalmodel te sterk verbonden was met de noodzaak voor een schepper. In 1982 schreef Hoyle zelfs dat het oerknalmodel "religieus fundamentalisme op haar sterkst"⁵⁵ was. Toen paus Pius XII verklaarde dat het oerknalmodel overeenkwam met het christelijke scheppingsverhaal, nam Hoyle deze connectie tussen theïsme en het oerknalmodel over om dit als argument tegen het oerknalmodel te gebruiken.⁵⁶

Alhoewel Hoyle dus duidelijk een connectie legde tussen religie en het oerknalmodel, legde hij nooit direct de connectie tussen atheïsme en het steady state-model. Hij

⁵²[22] (p. 196), [25] (p. 277)

⁵³[20] (p. 233), [22] (p. 201)

⁵⁴[1] (p. 362), [2] (p. 59), [20] (p. 235), [22] (p. 195)

⁵⁵[20] (p. 235)

⁵⁶[20] (p. 234-235), [22] (p. 195), [23] (p. 398)

heeft tevens nooit beweerd dat het steady state-model het bestaan van God weerlegde. Hoyle's uitspraken riepen echter wel agnostische gevoelens op bij veel mensen. Hierdoor werd hij een controversieel figuur en kreeg de BBC veel brieven van radioluisteraars die bezwaar maakten tegen Hoyle's schijnbare anti-religieuze uitspraken.⁵⁷

Er zijn interessante parallellen te trekken tussen Fred Hoyle en Stephen Hawking. De jonge Hawking voelde zich aangetrokken tot Hoyle. Net zoals Hawking stond Hoyle graag in de schijnwerpers. Daarnaast waren ze beide populaire wetenschappers zowel binnen als buiten de wetenschappelijke gemeenschap en bereikten ze veel mensen via verschillende mediakanalen. Beide mannen waren atheïstisch en hadden anti-religieuze opvattingen. De vraag die voortkomt uit deze parallellen is of Hawking gezien kan worden als een opvolger van Hoyle.⁵⁸

De geschetste parallellen hierboven geven zeker de indruk dat Hawking tot op zekere hoogte gezien kan worden als een opvolger van Hoyle. Hawking werd waarschijnlijk geïnspireerd door Hoyle in zijn jeugd en zijn studietijd, aangezien hij Hoyle vroeger ongetwijfeld beluisterde op de radio en hij graag bij Hoyle zijn proefschrift wilde schrijven. Deze vroege ervaringen die Hawking met Hoyle had hebben vermoedelijk invloed gehad op de gelijkenissen tussen Hawkings latere carrière en de carrière van Hoyle. Beide wetenschappers trokken tevens theologische conclusies uit hun kosmologieën die niet door iedereen als gerechtvaardigd werden beschouwd, zie Sectie 4.7.

Daarentegen zijn er ook verschillen tussen de twee aan te duiden. Ten eerste bleef Hoyle tot aan zijn dood trouw aan het steady state-model, terwijl Hawking na de ontdekking van de kosmische achtergrondstraling in 1965 het steady state-model zoals velen uitsloot.⁵⁹ Daarnaast werd Hoyle door zijn anti-religieuze opvattingen als een controversieel figuur gezien. Het tegenovergestelde leek te gelden voor Hawking: het publiek wilde graag Hawkings mening over religie weten, waardoor men zou kunnen beargumenteren dat Hawking juist niet als controversieel persoon werd gezien door de meeste mensen. Hier zal in Sectie 3.3 verder op worden ingegaan.

⁵⁷[20] (p. 236)

⁵⁸[1] (p. 362-363)

⁵⁹[4] (p. 33)

3 Hawkings visie op de relatie kosmologie-theologie en wetenschapsfilosofie

In dit hoofdstuk zal Hawkings visie op religie en wetenschapsfilosofie worden belicht. Dit betreft zowel zijn opvattingen over religie als zijn visie op de relatie tussen kosmologie en theologie. Daarnaast zal de oorsprong van Hawkings visie en zijn uitspraken over religie in de media worden besproken. Er zal dan een poging worden gedaan om zijn opvattingen en uitspraken te duiden aan de hand van zijn persoonlijke, maatschappelijke en wetenschappelijke achtergrond.

3.1 Oorsprong van Hawkings visie op religie

Hawking was een atheïst. Zijn ouders waren ook beiden atheïstisch, waardoor Hawking van huis uit niet gelovig werd opgevoed.¹² Het atheïsme van zijn ouders zal vermoedelijk voor een groot deel Hawkings visie op religie hebben bepaald.

In zijn tijd op het St. Albans begon Hawking al na te denken over theologische kwesties. Zo had hij discussies met zijn vriendjes over de oorsprong van het heelal en de rol die God daarin zou spelen. Eén van deze discussies ontstond na een bezoek van de Amerikaanse pastoor Billy Graham (1918 - 2018) aan Engeland in 1954. Sommige klasgenoten van Hawking waren, in tegenstelling tot Stephen zelf, onder de indruk van de toespraken van Graham. Zoals Hawkings jeugdvriend Michael Church het beschreef, probeerde Hawking hem uit te lokken tot uitspraken over religie om hem vervolgens belachelijk te maken. Voor Church voelde het alsof Hawking vanuit de hoogte op hem neer keek wanneer ze het over religie hadden. Dit verhaal bevestigt de arrogantie die Hawking volgens Jane regelmatig vertoonde wanneer hij met mensen discussieerde over religie, met name wanneer de ander affiniteit voelde voor een religie. Dit was ook een thema in het huwelijk tussen Stephen en Jane.³

De arrogantie die Hawking vertoonde richting zijn klasgenoten die onder de indruk waren van Graham, kwam eveneens terug in zijn opvatting dat wetenschap interessanter was dan theologie. Als kind was Hawking overtuigd dat het universum onveranderlijk en eeuwig was, aangezien dit voor hem natuurlijker aanvoelde dan een

¹[2] (p. 46)

²Alhoewel Hawking niet gelovig werd opgevoed, vertelde zijn vader vermoedelijk wel Bijbelverhalen toen hij klein was [1] (p. 380). Wellicht deed zijn vader dit om Hawking kennis te vergroten over de Bijbel, niet om zijn zoon te bekeren.

³[1] (p. 379-380), [4] (p. 32-33)

dynamisch universum met een mogelijk eindige leeftijd.⁴

Hawking betrad in de jaren zestig het vakgebied van de kosmologie. In deze periode was er een sterke afname van de invloed van religie op de Britse samenleving. Hawkings afkeer tegen religie kan geplaatst worden in deze tijdgeest van de jaren zestig, maar het is duidelijk dat Hawking voor de jaren zestig ook al atheïstisch was. Het is daarentegen wel zo dat steeds meer mensen in het Verenigd Koninkrijk en de westerse wereld atheïstisch werden en daarmee Hawkings visie op religie deelden.

De ouders van Hawking hadden beiden een sterk linkse achtergrond. Stephens moeder was zelfs lid van de Young Communist League.⁵ Hawking stond in zijn studenten-jaren bekend als een socialist. Deze linkse idealen zouden mogelijk in verband kunnen staan met het atheïsme van Hawking en zijn ouders, aangezien atheïsme een fundamenteel onderdeel is van bijvoorbeeld het (marxistische) communisme.

3.2 Invloed Jane Hawking

Om Hawkings visie en uitspraken over religie te begrijpen, zal er in deze sectie gekeken worden naar hoe Stephens eerste huwelijk, zijn huwelijk met Jane Hawking, dit beïnvloed heeft. Jane Hawking was christelijk opgevoed en hield ook erg vast aan het geloof. In haar memoires *Music to Move the Stars* schreef ze zelfs dat het geloof en spiritualiteit haar levensbronnen waren.⁶

Standpunt Jane

Hoewel Jane sterk gelovig was, bleef ze met een kritische blik naar haar eigen geloof kijken. In haar memoires schreef ze bijvoorbeeld dat toen ze achttien was, ze niet alles automatisch accepteerde wat haar was aangeleerd. Daarnaast verliet ze tijdens haar talenstudie, Frans en Spaans, aan het Westfield College de Christian Union vanwege het sterke orthodoxe karakter van de vereniging. Bovendien was ze van mening dat de paus te dogmatisch was en dat hij de vrijheid van wetenschappers beperkte. Deze mening ontstond als gevolg van het bezoek aan het Vaticaan dat Jane met Stephen maakte in 1981. Stephen was uitgenodigd voor een conferentie van de jezuïeten bij de Pauselijke Academie. De Pauselijke Academie is een geleerdengenootschap dat advies geeft aan de paus over verschillende wetenschappelijke onderwerpen. Tijdens de bijeenkomst in 1981 suggereerde de paus dat, hoewel wetenschappers de evolutie van het universum mochten onderzoeken, de vraag waar het heelal vandaan kwam enkel beantwoord moest worden door de Bijbel en niet door wetenschap. Dit zou namelijk ingaan tegen het christelijke verhaal waarin het universum is geschapen door God.⁷

Net zoals Stephen bekritiseerde Jane deze uitspraak van de paus, aangezien het de vrijheid om vragen te stellen over het universum inperkte. Ze trok zelfs de vergelijking

⁴[1] (p. 380)

⁵[1] (p. 382)

⁶[2] (p. 320)

⁷[2] (p. 24, 46-47, 388, 391), [26]

tussen de uitspraak van de paus en aantijgingen aan het adres van Galileo driehonderd jaar eerder. De felheid van de kritiek van Jane jegens de paus wordt ook duidelijk uit de volgende passage van haar memoires:

For myself, I could not accept a Christianity which was based on dogma or on exclusiveness. Why would a loving God who has given His Creation complete freedom of will seek to restrict that freedom by placing boundaries on the human intellect or by obstructing the quest for knowledge? I could no more sympathize with the Pope's decree that scientists should refrain from asking certain questions about the origins of the universe than I could, as an undergraduate many years before, agree with the Westfield chaplain's insistence that salvation was only for the fully converted, genuflecting, church-going righteous. If the essence of Christianity was couched in the terms of such pronouncements, I could not call myself a Christian since for me, God had to be more broad-minded, more imaginative, more willing to admit the challenge of the human intellect and much more open to the diversity and the limitations of human experience. [2] (p. 392)

In dit citaat wordt duidelijk dat Jane moeite had met het dogmatische karakter van het christendom. Deze dogmatiek kwam in Jane's ogen terug in het decreet van de paus en in de Christian Union. Bovendien vond Jane het begrijpelijk dat Stephen zich niet bekommerde over theologie in zijn kosmologische werk. Dit zou er namelijk toe leiden dat zijn zoektocht naar de wetten die het universum dicteren vervaagd zou worden als gevolg van religieuze overwegingen. Er kan dus gesteld worden dat Jane voor de academische vrijheid stond en dat religie volgens haar niet deze vrijheid moest inperken.⁸

Alhoewel Jane met een open blik naar haar geloof durfde te kijken, had ze grote moeite met Stephens anti-religieuze houding gedurende hun huwelijk. Deze visie was volgens Jane niet alleen een visie die haar man had, maar ook een visie die andere kosmologen hadden, waar Hawking later in zijn carrière mee samenwerkte.^{9,10} De oorzaak van de frictie tussen Jane en Stephen kent meerdere redenen.

Om te beginnen had Jane het gevoel dat Stephen haar niet serieus nam en dat hij haar geloofsovertuiging belachelijk maakte. Hier kwam ook, volgens Jane, Stephens arrogantie bij kijken, met name als het ging over discussies rondom religie. Tevens noemde ze Stephen in haar eigen memoires arrogant. Hij deed vroeger al provocatieve uitspraken waarmee hij weinig respect toonde voor anderen. Zo had hij tegen de studiebegeleider van Jane gezegd dat het bestuderen van middeleeuwse literatuur net zo nuttig was als het bestuderen van kiezelstenen op het strand. Jane was hier boos over omdat Stephen hiermee haar kans ondermijnde om het onderzoek in te gaan. Bovendien toonde Stephen geen interesse in haar proefschrift. Echter, Stephen vond dat zijn

⁸[2] (p. 46, 391)

⁹Jane vond dat de relativisten, waarmee Stephen in zijn vroege carrière mee samenwerkte, veel meer interesse toonden in anderen en in andere vakgebieden dan de deeltjesfysici waar Stephen later mee zou gaan samenwerken [2] (p. 296).

¹⁰[2] (p. 155)

intellectuele argumenten niet persoonlijk moesten worden opgevat. Jane had hier grote moeite mee.¹¹

Stephen had voor deze gevoelens van Jane maar weinig begrip. Sterker nog, de hele familie Hawking had weinig begrip volgens Jane. Hawkings familie was vooral gefocust op het intellect van een persoon en beoordeelden mensen daarop in plaats van op sympathie of integriteit. Jane voelde zich hierdoor totaal niet gewaardeerd door haar schoonfamilie, die haar, volgens haar, meer zagen als een verzorgster en iemand die Stephens kinderen baarde. Een ander voorbeeld van hoe Jane zich niet gewaardeerd voelde door Stephen was hoe Stephen handelde na een ziekenhuisopname in 1976. Zodra hij was ontslagen uit het ziekenhuis, ging hij niet eerst naar zijn gezin, maar naar een vijfdaagse conferentie in Oxford. Deze keuze van Stephen raakte Jane hard en sterkte het gevoel dat Jane had alleen maar verder aan.¹²

Tegen het einde van hun huwelijk bezochten Stephen en Jane Jeruzalem om de Wolfprijis voor Stephen en Roger Penrose in ontvangst te nemen. Tijdens dit bezoek werd Stephen voortdurend gevolgd door camera's en journalisten die vragen stelden over Stephens opvatting over de christelijke god. Jane was er in eerste instantie al niet blij mee dat ze uitgerekend met haar man, die kritisch was op religie, een reis maakte naar het beloofde land, maar toen Stephen ook nog in Jeruzalem tegen journalisten het bestaan van God ontkende, raakte Jane dat wederom. Hoewel Jane uiteraard bekend was met het atheïsme van haar man, raakte het haar toch, aangezien hij zelfs in Jeruzalem zijn atheïsme verkondigde tegenover journalisten. Dit is een ander voorbeeld van hoe Stephens anti-religieuze houding Jane dwars zat en ertoe leidde dat ze zich aangevallen voelde in haar eigen religiositeit.¹³

Naast dat Jane zich gekwetst en miskend voelde door Stephens uitgedragen minachting jegens religie, meende Jane dat Stephens wetenschapsfilosofie haaks stond op haar levensovertuiging. In haar ogen leidde Stephens opvatting over de relatie tussen de wetenschap en religie tot een nihilistisch wereldbeeld waarin er weinig waarde werd gehecht aan emotie en spiritualiteit. Aangezien Jane veel waarde hechtte aan haar gevoelens, geloof en spiritualiteit, botste dit erg met de visie van haar man.

De kritiek die Jane uitte op het decreet van de paus in de Academie, uitte ze eveneens richting Stephen. Waar de paus kosmologen verbood om de vraag waar het universum vandaan komt te bestuderen, verboden Stephen en zijn anti-theïstische collega's op hun beurt ook bepaalde vragen te stellen over fundamentele onderwerpen. Volgens Jane werden vragen die niet binnen het wetenschappelijke domein van Stephen pasten afgedaan als ongepaste vragen.¹⁴ Zo zou de vraag hoe het universum of de mens tot stand zou zijn gekomen niet relevant zijn, omdat het (mogelijk) niet aan de hand van de wetenschappelijke methode kon worden achterhaald. Dit standpunt werd tevens gearticuleerd in Hawkings *A Brief History of Time*, waar hij schreef

... if ... we know only what has happened since the big bang, we could not

¹¹[2] (p. 5, 59, 290)

¹²[2] (p. 56, 241, 302, 364)

¹³[2] (p. 488, 494)

¹⁴[2] (p. 201)

determine what happened beforehand. As far as we are concerned, events before the big bang can have no consequences, so they should not form part of a scientific model of the universe. We should therefore cut them out of the model and say that time had a beginning at the big bang. [8] (p. 55)

Hawking vond dat deze vragen binnen het domein van theologie of metafysica vielen en daarom namen hij en zijn collega's die vragen niet serieus. Daarnaast waren er volgens Jane ook vragen rondom het menselijk handelen die wetenschap niet kon beantwoorden: vragen over waarom mensen altruïsme vertonen of waarom sommige mensen bereid zijn hun leven te geven voor anderen. Jane noemde dit een voorbeeld van de scheuring tussen religie en wetenschap, een scheuring die zelfs tot in hun huwelijk was toegetreden. Jane was van mening dat in het proces van kennisvergaring theologie en wetenschap in harmonie samen zouden moeten werken. De scheuring tussen religie en wetenschap stond haar visie echter in de weg.¹⁵

Effect van discussies tussen Stephen en Jane op Stephens uitingen over de relatie kosmologie-theologie

De discussies tussen Jane en Stephen werden gedurende hun huwelijk steeds feller.¹⁶ Hierdoor werd Stephen haast iedere dag geconfronteerd met religieuze opvattingen waartegen hij zich verzette. Net als de discussies met zijn klasgenoten op het St. Albans werden de discussies met Jane volgens haar getekend door Stephens arrogantie en koppigheid. Vermoedelijk voelde Stephen zich door het geloof van zijn vrouw en de bijkomende discussies geroepen om zich uit te blijven spreken tegen religie en bovendien een anti-religieuze draai te geven aan zijn kosmologische werk.

Het feit dat Hawking zich met Jane in discussies begaf over haar geloof ondanks zijn atheïsme, doet de vraag oproepen of hij Jane's geloof wellicht aantrekkelijk of interessant vond. In plaats van zich afzijdig te houden van de religie van zijn vrouw, bemoeide hij zich er voortdurend mee. Dit zou samen kunnen hangen met een mogelijke interesse van Hawking in het geloof van Jane.

3.3 Hawking in het publieke domein

Uitspraken uit het verleden

Hawking heeft gedurende zijn loopbaan meermaals uitspraken gedaan over theologie, wetenschapsfilosofie en hoe deze gebieden zich verhouden tot zijn kosmologische werk. Zijn uitspraken schetsen een beeld van een wetenschapper die zich veel bezighield met religieuze kwesties en die zijn gedachten hierover graag deelde met het brede publiek.

De meeste van Hawkings bekende uitspraken komen uit de periode na 1988, wanneer zijn bestseller *A Brief History of Time* gepubliceerd werd. Zo schreef hij in zijn boek

¹⁵[2] (p. 200-201)

¹⁶[2] (p. 201)

over de volgens hem mogelijke connectie tussen het oerknalmodel en theologische interventie. Het zou God namelijk vrij staan om de initiële staat van het oerknaluniversum te kiezen in de singulariteit. Daarnaast ging Hawking in op de vraag waarom het universum voor het menselijk leven gemaakt lijkt te zijn. Eén van de mogelijke verklaringen die hij daarvoor gaf was hemelse interventie. Alhoewel Hawking niet achter deze verklaring stond, betrok hij dus theologie in de discussie om vervolgens te laten zien dat daar geen ruimte voor was binnen zijn visie op kosmologie.¹⁷

In zijn laatste boek *De Antwoorden op de Grote Vragen* (2018) schreef Hawking dat de antwoorden op de 'grote vragen', zoals de vraag of er een god bestaat, gevonden moesten worden door middel van wetenschap, niet door middel van metafysica of theologie. Hij was namelijk van mening dat wanneer een wetenschappelijke theorie alleen maar geldt op bepaalde momenten gedurende de evolutie van het universum en niet aan het begin, het niet een echte wetenschappelijke theorie is. Of zoals hij zelf verwoordde: "Een wet is geen wet als hij slechts af en toe geldig is".¹⁸

Het is interessant om op te merken dat deze uitspraken, die connecties legden tussen kosmologie en religie, tegen zijn eigen opvatting over wetenschap in lijken te gaan. Stephen was namelijk van mening dat vraagstukken die in zijn ogen metafysisch of theologisch waren, niet tot de wetenschap toebehoorden. Het is waarschijnlijk dat Hawking de theologische opmerkingen die hij maakte over kosmologische modellen als metafysisch of theologisch zou bestempelen. Dit zou een mogelijke paradox kunnen zijn in zijn opvatting over wetenschap.

Er zijn nog vele andere voorbeelden van Hawkings uitlatingen over dit onderwerp. Zo draagde hij een filosofisch argument aan tegen de theologische visie op kosmologie. Hawking stelde dat als God daadwerkelijk kon interveniëren in het universum en in de tijd, dat God ook in de tijd moest bestaan. Echter, volgens Hawking kon een mogelijke god alleen buiten de tijd bestaan, aangezien een god zelf de tijd heeft gecreëerd.¹⁹

Een ander voorbeeld is dat Hawking heeft gezegd dat God niet de schepper van het heelal is. Dit standpunt heeft hij tevens verkondigd in Jeruzalem en het Vaticaan, twee plekken waar de uitspraak gevoelig ligt. Dit laat Hawkings standvastigheid ten aanzien van dit onderwerp zien. Bovendien heeft hij duidelijk gemaakt dat hij atheïstisch was.²⁰

In een interview met *Time* heeft hij gezegd dat religie een "kracht voor het kwade" is geweest door de geschiedenis heen.²¹ In hetzelfde interview vermeldde Hawking ook dat men niet kon bewijzen dat er geen schepper bestaat. Het enige wat we volgens Hawking konden doen is meer plausibele verklaringen vinden voor bepaalde fenomenen door middel van de wetenschap. Bovendien heeft Hawking in een ABC News interview uit 2010 aangegeven wat volgens hem het verschil was tussen religie en wetenschap:

¹⁷[8] (p. 55, 142, 208)

¹⁸[4] (p. 79-80)

¹⁹[8] (p. 201)

²⁰[1] (p. 96), [27]

²¹[28]

There is a fundamental difference between religion, which is based on authority, [and] science, which is based on observation and reason. Science will win because it works. [29]

Alhoewel Hawking dus duidelijk atheïstisch was, gebruikte hij God wel vaak als metafoor. Dit deed hij bijvoorbeeld toen hij aan het slot *A Brief History of Time* schreef

However, if we do discover a complete theory, it should in time be understandable in broad principle by everyone... . Then we shall all, ..., be able to take part in the discussion of the question of why it is that we and the universe exist. If we find the answer to that, it would be the ultimate triumph of human reason - for then we would know the mind of God. [8] (p. 209-210)

Een mogelijke motivatie voor het gebruik van deze metafoor was om een prikkelend effect te hebben op het publiek. Zoals vermeld in Hoofdstuk 2 hield Hawking erg van de schijnwerpers. Het was tevens zo dat het brede publiek erg geïnteresseerd was in de visie van de natuurkundige op religie. Door verwijzingen naar God te verwerken in zijn werk, wekte dat impliciet de illusie op bij het publiek dat Hawking theologische wijsheden onderzocht. De uitspraak dat we, door het vinden van een complete theorie voor het heelal, "de geest van God" zullen leren kennen, beloofde voor veel lezers die theologische wijsheid. Toen echter in zijn boek *Het grote ontwerp* (2010) duidelijk werd voor het grote publiek dat Hawking niet geloofde dat God de schepper van het heelal was, waren er honderden krantenartikelen van over de hele wereld waarin verbaasd gereageerd werd. Zo kopte de *New York Times* destijds 'Hawking: God did not create Universe'. Er trad dus verwarring op omtrent de religieuze opvattingen van Hawking door het gebruik van de metafoor. Deze reactie van de media laat zien dat de referenties naar het goddelijke ervoor zorgde dat Hawking en zijn werk veel media-aandacht vergaarden. Dit was gunstig voor Hawking, aangezien hij graag in de schijnwerpers stond en hevige discussies aanging en opwierp. Bovendien hielp de media-aandacht met de verkoopcijfers van zijn boeken. Dit hielp Hawking om om te gaan met zijn financiële situatie, zoals beschreven in Hoofdstuk 2. Of Hawking de mogelijke financiële gevolgen van de metafoor in zijn hoofd had toen hij ermee kwam, is onduidelijk.²²

Een andere mogelijke reden heeft te maken met de manier waarop Hawking het heelal bestudeerde. In 2002 kwam Hawking tot het besef dat hij zijn bestseller, *A Brief History of Time*, vanuit het verkeerde perspectief geschreven had. Hij had zijn boek namelijk vanuit een 'godenperspectief' geschreven. Dit betekent dat het heelal van buiten af wordt beschouwd, net zoals men een afgebakend experiment beschouwd in een laboratorium. Hawking kwam dus tot de realisatie dat dit niet het goede perspectief was om kosmologie mee te bedrijven; we zitten immers zelf in het universum. Aangezien Hawking in de tijd van het schrijven van zijn bestseller nog wel het godenperspectief gebruikte in zijn kosmologische werk, kon hij God ook als metafoor gebruiken. Hawking heeft later zelf aangegeven wat hij met de slotzin van zijn bestseller bedoelde,

²²[1] (p. 93)

namelijk dat we alles zouden kunnen weten dat God zou weten. God zou namelijk buiten het universum staan: de geest van God kennen houdt dus in alles weten over het universum vanuit het perspectief van een buitenstaander. Hawkings perspectief op de kosmologie voor 2002 stelde hem dus in staat om deze metafoor te gebruiken.²³

Waarom sprak Hawking zich fel uit?

Uit de bovenstaande uiteenzetting van uitspraken van Hawking kan de vraag volgen: waarom sprak hij zich zo uit over religieuze kwesties? Er zijn tenslotte veel andere natuurkundigen met een mening over deze kwesties, natuurkundigen die niet zo uitgesproken zijn in het publieke domein als Hawking dat was. Bovendien haalde Hawking zijn visie op theologie ook aan in relatie tot zijn kosmologische werk. In deze deelsectie zal deze vraag onderzocht worden.

Ten eerste leek Hawking veel waarde te hechten aan 'de grote vragen'. Zijn laatste boek [4] was zelfs toegewijd aan deze vragen. Aangezien hij vond dat deze vragen beantwoord moesten worden door middel van wetenschap, voelde hij zich mogelijk geroepen om deze vragen proberen te beantwoorden vanuit zijn kosmologie. De vraag of er een god bestaat, was één van deze vragen.

Ten tweede was het vermoedelijk zo dat Hawking zich vaker fel kon uitspreken vanwege zijn iconische status die hij verkreeg na de publicatie van *A Brief History of Time* (1988). Hij kon vanwege zijn status uitspraken doen over onderwerpen waar hij wellicht geen expert in was, zonder dat mensen zich dit aantrokken. Dit betekende mogelijk dat hij vergaande uitspraken kon doen over religie en de relatie kosmologie-theologie, zonder dat zijn status als briljante wetenschapper in het geding kwam. Dit kan samenhangen met het feit dat de meeste van Hawkings felle uitspraken uit de periode na zijn bestseller komen. Voor de publicatie van *A Brief History of Time* deed hij ook felle uitspraken, maar minder dan daarna. De meeste uitspraken deed Hawking dus gedurende het tijdperk waarin hij een internationale bekendheid was, zowel onder kosmologen als onder het brede publiek.

Ten derde is het denkbaar dat Hawking zich fel uitsprak omdat hij de behoefte voelde zijn atheïsme uit te dragen. In het privé-domein deed hij dit al, zoals in zijn huwelijk met Jane, maar wellicht voelde hij de noodzaak om zich ook in de media uit te spreken. Dit kan te maken hebben met Hawkings mogelijke verlangen naar controverse. Als kind probeerde hij al discussies uit te lokken met klasgenoten over religieuze onderwerpen. In zijn huwelijk probeerde hij Jane eveneens uit te lokken tot discussies over religie. Het verlangen naar discussies en controverse dat blijkt uit Hawkings levensloop kan een belangrijke rol gespeeld hebben in de ongenueanceerde uitspraken die Hawking deed in het publieke domein.

Ten vierde is het mogelijk dat er een financiële prikkel was voor Hawking om zulke uitspraken te doen. Het brede publiek was erg geïnteresseerd in theologische wijsheden van de natuurkundige. Doordat Hawkings uitspraken over God en religie in de smaak vielen bij het bredere publiek, zou het kunnen zijn dat de verkoopcijfers van zijn

²³[24] (p. 212), [28]

boeken stegen en zijn media-aandacht toenam. Om een voorbeeld te noemen: Hawking suggereerde zelf dat als hij zijn bekende slotzin uit *A Brief History of Time* weg had gelaten, hij maar de helft van de verkoopcijfers zou hebben gehaald. Bovendien zaten de kranten bovenop Hawkings uitspraken over religie, met name na het uitbrengen van *Het grote ontwerp* (2010) en *De Antwoorden op de Grote Vragen* (2018). Hij schreef respectievelijk dat God niet de schepper van het universum was en dat God niet bestond. Deze uitspraken werden door de media aangegrepen en er werden artikelen over gepubliceerd. Vermoedelijk had Hawking financieel belang bij zijn theologische uitspraken. Dit kan een rol hebben gespeeld, met name als men herinnert dat Hawking gedurende zijn leven een constante financiële last met zich mee droeg vanwege zijn permanente zorgbehoefte.²⁴

Ten vijfde begonnen zijn successen in de wetenschap eind jaren tachtig te vermindern. Sindsdien heeft Hawking geen baanbrekende ontdekkingen meer gedaan in de natuurkunde. Veel van zijn wetenschappelijke verdiensten werden zelfs niet meer serieus genomen door de natuurkundige gemeenschap. Dit kwam doordat Hawking tevergeefs probeerde zijn publieke bekendheid, die hij had verkregen door onder andere de publicatie van zijn boeken, te verenigen met zijn vooraanstaande wetenschappelijke status binnen het onderzoeksveld. Als teken dat Hawking binnen de natuurkundegemeenschap niet gezien werd als één van de grootste wetenschappers aller tijden, deed tijdschrift *Physics World* in 1999 een enquête onder ongeveer 200 natuurkundigen. In de enquête werd gevraagd om vijf natuurkundigen te noemen, levend of dood, die de grootste bijdrage hadden geleverd aan de natuurkunde. Einstein, Newton en Maxwell vormden de top drie, Hawking stond onderaan de lijst met één enkele stem.²⁵²⁶

Echter, Hawking stond onder het brede publiek nog steeds bekend als één van de briljantste wetenschappers sinds Einstein en misschien wel de slimste mens op aarde. Hier zien we dus een verschil tussen hoe de wetenschappelijke gemeenschap Hawking zag en hoe het brede publiek hem zag. Dit kan verklaard worden door het feit dat Hawking bij het publiek niet per se bekend was voor zijn wetenschappelijke werk. Het algemene beeld dat bestond over Hawking onder de bevolking was dat van een briljante wetenschapper met ALS en een interessante persoonlijkheid. Dat beeld bevatte dus nauwelijks iets over zijn specifieke wetenschappelijke bijdragen. Dit betekende dus dat Hawkings reputatie onder het brede publiek niet afhing van zijn wetenschappelijke verdiensten, maar van zijn spierziekte, humor en felle uitspraken.²⁷ Aangezien Hawking graag in de schijnwerpers stond en zijn reputatie hoog wilde houden, was het vermoedelijk nodig om felle uitspraken te doen over hetgeen waar hij zich al zijn hele leven tegen verzette: religie. Dit terwijl Hawking zelf graag bekend wilde staan om zijn

²⁴[30] (p. 343), [31]

²⁵Ter vergelijking: Einstein kreeg 119 stemmen, Newton en Maxwell beide 67 stemmen.

²⁶[1] (p. 9, 135), [30] (p. 332, 334)

²⁷Een interessant voorbeeld van hoe het collectieve bewustzijn over Hawking voor een groot deel bestond uit zijn uitspraken over religie is een cartoon van Fokke en Sukke waarin Hawking in zijn rolstoel voor de poorten van de hemel komt: <https://www.nrc.nl/nieuws/2018/03/14/flonkerende-geest-in-roerloos-lichaam-a1595582>.

wetenschappelijke werk en niet om zijn persoonlijke gezondheid of meningen.²⁸

Vergelijking met Hoyle

In Sectie 2.3.3 zijn al een aantal parallellen genoemd tussen Hoyle en Hawking. Zo waren beide mannen naast natuurkundigen ook publieke figuren en waren ze beide uitgesproken anti-theïstisch. Een groot verschil tussen de twee was hun reputatie. Als gevolg van zijn anti-theïstische uitspraken, werd Hoyle namelijk een controversieel figuur in het publieke bewustzijn. Hoewel Hawking door sommigen als controversieel werd gezien, leek dit bij Hoyle in een sterkere mate het geval te zijn. Dit valt mogelijk te verklaren door de tijdgeest van de periodes waarin Hoyle en Hawking actief waren. Hoyle deed zijn belangrijkste ontdekkingen in de jaren vijftig. Bovendien kreeg hij veel kritiek in 1950, aangezien zijn bestseller *The Nature of the Universe* in dat jaar uitkwam en het interview met de BBC waarin Hoyle de term 'big bang' introduceerde één jaar eerder plaatsvond. Hawking deed zijn uitspraken over religie voornamelijk vanaf de publicatie van zijn bestseller in 1988 tot zijn dood in 2018. De secularisering in de Britse en westerse wereld heeft zich in die tijd verder doorgezet. Allicht heeft dit ervoor gezorgd dat het algemene publiek meer openstond voor de anti-religieuze opmerkingen van Hawking dan dat het publiek openstond voor de uitspraken van Hoyle.

Bovendien had Hawking, zoals eerder vermeld, na zijn bestseller een vrijwel onaanastbaar imago als briljante wetenschapper opgebouwd. Zoals in deze sectie is aangestipt, heeft deze status mogelijk bijgedragen aan de acceptatie van Hawkings felle uitspraken onder het publiek. Hoyle's status in de jaren vijftig was minder groot dan de status die Hawking kreeg na 1988. Dit kan een andere reden zijn waarom Hoyle, in tegenstelling tot Hawking, veel kritiek kreeg vanuit het grote publiek over zijn opvattingen over religie.

3.4 Hawkings visie op wetenschapsfilosofie

In deze sectie zal Hawkings visie op de wetenschapsfilosofie behandeld worden. Hawking heeft gedurende zijn carrière hevige kritiek geuit over wetenschapsfilosofie en wetenschapsfilosofen. Zo schreef hij in *Het grote ontwerp* "de filosofie is dood" en dat de wetenschapsfilosofie "geen gelijke tred [heeft] kunnen houden met moderne wetenschappelijke ontwikkelingen, met name op het gebied van de fysica"²⁹. In *A Brief History of Time* schreef hij tevens dat sinds Kant de wetenschap te technisch was geworden voor filosofen en zij zich sindsdien met name zijn gaan focussen op taal. Hawking vond dit een afgang voor de wetenschapsfilosofie. Daarnaast heeft hij tijdens een lezing in 1992 gezegd dat filosofen simpelweg de wiskundige competentie missen om intelligent commentaar te leveren op de ontwikkeling van de natuurkunde. Bovendien heeft hij in dezelfde lezing verkondigd dat wetenschapsfilosofen een 'ondersoort' vormen van de filosofen en dat ze 'gemankeerde natuurkundigen' zijn. In deze opmerkingen kwam

²⁸[1] (p. 8, 20, 24)

²⁹[1] (p. 96)

Stephens hoogmoed en denigrerende kijk op wetenschapsfilosofen duidelijk naar voren. Dit valt te vergelijken met de arrogantie die Hawking toonde jegens Jane en zijn klasgenoten op het St. Albans ten aanzien van hun religiositeit.³⁰

3.4.1 Bedreef Hawking zelf wetenschapsfilosofie?

Hoewel Hawking dus felle kritiek had ten aanzien van de moderne wetenschapsfilosofie, kan men zich niet aan de indruk onttrekken dat Hawking zelf wel degelijk wetenschapsfilosofische posities innam. Zo schreef de Vlaamse kosmoloog Thomas Hertog (1975 -), die jaren lang samen met Hawking heeft samengewerkt, in zijn boek *Het ontstaan van de tijd* (2023):

... [ik] kon de gedachte niet onderdrukken dat Stephen, voor iemand die de filosofie had afgewezen, er in zijn werk toch vrijmoedig - en creatief - gebruik van maakte. [24] (p. 10)

Om te begrijpen waarom Hawking zelf gebruikmaakte van wetenschapsfilosofie, is het goed om in zijn academische werk de relatie tussen aan de ene kant kosmologie en aan de andere kant religie en metafysica te analyseren. Hawkings visie op deze relatie is al aangestipt in Sectie 3.2 vanuit Jane's perspectief. Jane karakteriseerde Stephens visie op deze relatie als 'positivisme'. In deze visie op de wetenschap zou er geen ruimte zijn voor theologie en metafysica in het proces van kennisvergarig.

Hawking kenmerkte zijn eigen visie ook als positivisme. Hij beschreef zijn visie zelf als volgt:

I take the positivist viewpoint that a physical theory is just a mathematical model and that it is meaningless to ask whether it corresponds to reality. All that one can ask is that its predications should be in agreement with observation. [7] (p. 3-4)

Hawkings 'positivisme' hield dus in dat natuurkundige theorieën enkel wiskundige modellen zijn. Deze modellen zouden wellicht kunnen corresponderen met de realiteit, maar volgens Hawking was het betekenisloos om deze vraag te bestuderen. Hieruit zou men kunnen afleiden dat, volgens Hawking, het niet mogelijk was om vanuit wetenschappelijke theorieën uitspraken te doen over de dieperliggende realiteit die wellicht schuilgaat achter onze waarneembare realiteit. Hoewel binnen Hawkings positie niet werd ingegaan op de vraag of natuurkundige theorieën corresponderen met de realiteit of niet, werd er wel ingegaan op de status van waarnemingen in de wetenschap. Natuurkundige theorieën moesten namelijk overeenkomen met waarnemingen. Voor Hawking was het principe van popperiaanse falsificatie erg belangrijk om vast te stellen of een theorie 'in overeenstemming' was met observaties.

Het 'positivisme' van Hawking, wat vanaf nu zal worden aangeduid als Hawking positivisme (HP), kan gezien worden als een vorm van wetenschappelijk *anti-realisme* (vanaf nu aangeduid als 'anti-realisme'). Wetenschappelijk realisme (in het vervolg

³⁰[1] (p. 96, 212), [8] (p. 209)

'realisme' genoemd) wordt in de literatuur op verschillende manieren gedefinieerd,³¹ maar de positie kan doorgaans gedefinieerd worden aan de hand van drie criteria. Deze drie criteria beslaan alle drie een andere dimensie van de filosofie. Ten eerste, in de *metafysische* dimensie kan realisme worden gezien als de positie dat er een wereld bestaat onafhankelijk van de geest. Dit is tevens de wereld die beschouwd wordt binnen de wetenschap, oftewel de wereld waar de wetenschappelijke theorieën uitspraken over doen. De tweede dimensie is de *semantische*³² dimensie, waarin realisme gekenmerkt wordt door een letterlijke interpretatie van wetenschappelijke theorieën. Dit betekent bijvoorbeeld dat een uitspraak als "Er bestaat een gravitatieveld" niet geïnterpreteerd wordt als een theoretische definitie die ons helpt bepaalde fenomenen te verklaren. Een realist zal deze uitspraak interpreteren als het feit dat er echt een gravitatieveld bestaat in de fysieke wereld. Deze letterlijke lezing van een theorie leidt ertoe dat elke theorie een waarheidswaarde, waar of onwaar, heeft. In de laatste dimensie, de *epistemische*³³ dimensie, kan realisme getypeerd worden als de positie dat wetenschappelijke theorieën kennis vormen over de fysieke wereld achter de waarneming. Dit staat bijvoorbeeld in contrast met filosofisch scepticisme, dat stelt dat er geen kennis vergaard kan worden over de wereld door middel van wetenschap.

De opsomming van deze drie posities zijn typerend voor realisme. Realisme kan zodoende gezien worden als de opvatting dat men uitspraken kan doen over de fysieke wereld achter de waarneming die juist zijn. Anti-realisme kan gezien worden als de verzamelterm van alle posities die op één of meerdere dimensies afwijken van het realisme. In het geval van HP, geldt dat het afwijkt van realisme in de epistemische dimensie, aangezien HP niet ervan uit gaat dat wetenschappelijke theorieën kennis bevatten over de realiteit.³⁴

Tegelijkertijd merken we op dat Hawking een duidelijk verband legde tussen kosmologie en theologie. Dit lijkt op het eerste gezicht tegenstrijdig. Aan de ene kant volgt uit HP dat men geen conclusies kan trekken over de realiteit uit kosmologie, terwijl Hawking aan de andere kant wel degelijk theologische implicaties van kosmologische modellen benoemde. Als men vragen binnen de theologie en rondom het goddelijke beschouwt als vragen die aan de dieperliggende realiteit van het universum raken, dan is er tegenstrijdigheid in Hawkings visie op wetenschap en de manier waarop hij gebruik maakt van wetenschap.

³¹[32]

³²Semantiek, oftewel betekenisleer, is de wetenschap die de betekenis van symbolen en uitdrukkingen bestudeert. De vragen "hoe moet een wetenschappelijke theorie gelezen worden?" of "wat betekent de theorie?" zijn voorbeelden van semantische vragen die gesteld kunnen worden over wetenschappelijke theorieën.

³³Epistemologie, ook wel kennistheorie, is de tak van filosofie die kennis onderzoekt. Binnen de context van natuurkunde is bijvoorbeeld de vraag of een natuurkundige theorie kennis bevat over de wereld om ons heen een epistemische vraag.

³⁴HP deelt veel gelijkenissen met het *constructief empirisme*, geïntroduceerd door de Nederlands-Amerikaanse wetenschapsfilosoof Bas van Fraassen (1941 -) in 1980 [32]. Beide standpunten kunnen gezien worden als anti-realistisch en beide gaan ze in tegen het realisme in de epistemische dimensie. Constructief empirisme stelt dat een theorie 'empirisch adequaat' moet zijn. Dit betekent dat hetgeen dat de theorie zegt over waarneembare fenomenen waar moet zijn. Dit is ook wat HP stelt.

Deze kritiek is ook aangedragen door de Amerikaanse theoloog en filosoof William Lane Craig (1949 -). Craig beweerde dat Hawking niet kon ontkomen aan wetenschapsfilosofie als hij theologische verbanden wilde leggen met de kosmologie. Door deze theologische verbanden te leggen, betrad Hawking dus de wereld van de wetenschapsfilosofie. Hierdoor was Craig tevens van mening dat Hawking niet simpelweg wetenschapsfilosofie en metafysica kon ontkennen of wegzetten als 'dode' disciplines. Sterker nog, Hawking zou filosofische argumenten tegen zijn theologische opmerkingen moeten beantwoorden met zijn eigen filosofische argumenten, in plaats van zich terug te trekken in zijn 'positivisme'. Craig beweerde dus dat Hawking zich óf moest onthouden van theologische of filosofische uitspraken, óf bereid moest zijn om deze uitspraken te verantwoorden met een filosofische onderbouwing.³⁵

Bovendien gaat HP in tegen de beschrijving die Hertog gaf van Hawkings wetenschapsfilosofie. Volgens Hertog hing Hawkings opvatting over wetenschap samen met de discussie tussen Einstein en Lemaître zeventig jaar eerder. Deze discussie ging over de algemene relativiteitstheorie en de oerknal. Einstein verzette zich tegen het idee van een oerknal, aangezien deze volgens hem enkel bewerkstelligd zou kunnen worden door een bovennatuurlijke kracht. Lemaître daarentegen zag geen reden voor God om zich te bemoeien met de oerknal. Voor Lemaître kon men in de natuurkunde geen waarheden openbaren over het fysieke heelal achter de waarneming. Hertog verwoordde het als volgt:

Lemaître lijkt uitstekend te hebben gevoeld dat hoe abstract het ook wordt, ons vermogen om wetenschap te bedrijven geworteld blijft in onze verhouding tot het heelal. [24] (p. 100)

Voordat Hawking in 1998 met Hertog samen ging werken, hing Hawking Einsteins standpunt aan dat natuurkundig onderzoek objectieve waarheden produceert over de fysieke wereld achter de waarneming.³⁶ Dit kan gezien worden als een vorm van realisme. Dit blijkt tevens uit het feit dat Hawking verbanden legde tussen theologie en kosmologie, aangezien dit alleen mogelijk lijkt te zijn als men aanneemt dat de kosmologie ook daadwerkelijk objectieve waarheden genereert. Mocht het, zoals Hawking zelf beweerde, puur wiskundige modellen zijn zonder duidelijk connectie met de realiteit, dan is het wellicht onnatuurlijk om theologische conclusies te trekken uit kosmologie. Hertogs beschrijving van Hawkings wetenschapsfilosofie gaat dus in tegen HP. Het lijkt erop dat Hawking zich wilde presenteren als een wetenschapper die HP onderschreef, maar in de praktijk Hertogs beschrijving volgde.³⁷

Een ander duidelijk voorbeeld waarin Hawking zich bekommerde over wetenschapsfilosofische kwesties komt uit een gesprek dat Hawking had met Hertog in Cambridge, toen Hawking zei dat fysische theorieën niet in een platonische hemel wonen.³⁸ Hiermee nam Hawking afstand van het godenperspectief op het universum. Door hier

³⁵[33] (p. 487)

³⁶Het is niet duidelijk of Hawking zich letterlijk uitsprak over de discussie tussen Einstein en Lemaître. Zijn opvatting over natuurkunde kwam enkel overeen met die van Einstein.

³⁷[24] (p. 89, 101)

³⁸[24] (p. 219)

bewust mee bezig te zijn en over na te denken, bedreef Hawking zelf ook wetenschapsfilosofie in zijn wetenschappelijke werk. Dit gaat in tegen HP, aangezien volgens HP het zinloos is om filosofische vragen te behandelen in de wetenschap.

3.4.2 Mengde Hawking zich in het steady state- vs oerknalmodel debat?

Om Hawkings visie op wetenschapsfilosofie beter te begrijpen, wordt in deze sectie gekeken naar hoe Hawking zich verhiel tot het debat rondom het steady state-model en het oerknalmodel. Toen Hawking voor zijn proefschrift naar Cambridge ging, wilde hij graag studeren onder de begeleiding van Hoyle. Uiteindelijk werd hij student van Sciamia, maar wellicht had Hawking wel het steady state-model verdedigd als hij student zou zijn geweest onder Hoyle. Hoyle was namelijk één van de grondleggers van het model en bleef het model verdedigen, zelfs na de ontdekking van de kosmische achtergrondstraling in 1965. In tegenstelling tot deze mogelijkheid probeerde Hawking de steady state-theorie te ontkrachten. Tijdens een publieke bijeenkomst in 1964 van de Royal Society in Londen presenteerde Hoyle een nieuwe versie van het steady state-model. De tweeëntwintigjarige Hawking bezocht de bijeenkomst en stond na de presentatie van Hoyle op om hem uit te dagen. Hawking had namelijk van tevoren de theorie ingezien en vond een zwakke plek in de wiskunde van de theorie. Dit legde hij publiekelijk voor aan Hoyle, de bekendste astrofysicus van het Verenigd Koninkrijk in die tijd. Hawking had gelijk en dit werd nog een probleem voor het steady state-model, dat tegen 1964 al veel aanhang verloren had.³⁹

Het eerste hoofdstuk van Hawkings proefschrift was ook gewijd aan het steady state-model. Hierin staat tevens de kritische analyse jegens het steady state-model die hij verwoordde bij de Royal Society.⁴⁰ Interessant is dat Hawkings opvatting ten opzichte van die van zijn jeugd dus veranderd was: de jonge Hawking vond een eeuwig, statisch universum natuurlijker dan een eindig, dynamisch universum zoals het oerknalmodel voorschreef.

Hawking had tevens kritiek op het oerknalmodel. De oorsprong van het heelal, de oerknal, kon namelijk niet causaal verklaard worden. Dit kwam omdat bij de oerknalsingulariteit de huidige natuurwetten afbreken. Hier wordt ook wel naar gerefereerd als het 'problem of creation'. Er valt een parallel te vinden tussen Hoyle's kritiek op het oerknalmodel tegenover het steady state-model en Hawkings kritiek op het oerknalmodel. Beiden beweerden dat het oerknalmodel in bepaalde mate tegen hun beeld van de wetenschap inging vanwege het 'problem of creation'. Hoyle was hierin feller dan Hawking, aangezien Hoyle het oerknalmodel direct verbond aan theologie, terwijl Hawking minder stellig was over deze connectie. Desondanks legde Hawking een link tussen theïsme en het oerknalmodel, maar minder uitgesproken dan Hoyle. Voor Hoyle was deze kritiek op het oerknalmodel een motivatie voor het steady state-model, terwijl het voor Hawking een motivatie was om te werken aan zijn eigen kwantumkosmologie: het no boundary-voorstel. Hoewel zowel Hoyle als Hawking dus soortgelijke

³⁹[1] (p. 368-369), [34]

⁴⁰[24] (p. 104)

kritiek hadden op het oerknalmodel, kwamen ze ieder met een ander alternatief.

De kritiek die beide mannen hadden was wetenschapsfilosofisch van aard, aangezien het raakt aan de vraag wat wetenschap precies hoort te zijn. Zou de wetenschap een kosmologische theorie moeten accepteren die niet kan verklaren waar het heelal vandaan kwam of hoe het begon? Om de gehele dynamische geschiedenis van het universum te beschrijven in een wetenschappelijke theorie, is het namelijk noodzakelijk om naast evolutiewetten die vertellen hoe het universum evolueert over de tijd, tevens zogenaamde randvoorwaarden ('boundary conditions') in de theorie te hebben. Deze randvoorwaarden kunnen gezien worden als beperkingen op de mogelijke universa die de theorie kan voortbrengen. Als men wetenschappelijk determinisme aanneemt, dan legt de beginstaat van het universum samen met de gegeven evolutietheorie een uniek universum vast. De beginstaat van het universum kan dus gezien worden als een randvoorwaarde voor een kosmologisch model.⁴¹ De eerdergenoemde vraag kan dus geherformuleerd worden als: zou de wetenschap een kosmologische theorie moeten accepteren die geen randvoorwaarden bevat en ook causaal verklaarbare randvoorwaarden lijkt uit te sluiten? Hawking was van mening dat de wetenschap zou moeten streven naar een theorie die wel randvoorwaarden bevatte. Hier refereerde hij naar als een alomvattende theorie.

Het is mogelijk dat Hawkings afkeer van het oerknalmodel geïnspireerd werd door de impasse tussen het steady state-model en het oerknalmodel, aangezien Hawking dezelfde argumentatie had tegen het oerknalmodel als Hoyle. Bovendien speelde het debat tussen het steady state-model en het oerknalmodel zich vooral af in Groot-Brittannië en dus stond Hawking midden in de discussie. Dit bleek ook uit de confrontatie die hij had met Hoyle in de Royal Society in 1964 en het feit dat zijn begeleider, Sciama, een steady state-theoreticus was. Daarnaast ontstond het steady state-model in Cambridge, de stad waar Hawking zijn proefschrift zou gaan schrijven en de stad waarmee hij zijn hele leven verbonden zou blijven. Dit maakt het aannemelijk dat Hawkings kritiek op het oerknalmodel inderdaad mede gevormd is door de impasse tussen beide modellen.

⁴¹Er vanuit gaand dat het kosmologisch model een universum met eindige leeftijd voorschrijft zoals het oerknalmodel.

4 No boundary-voorstel

In het huidige hoofdstuk van deze scriptie zal worden gekeken naar het *no boundary-voorstel* van Hawking en Hartle. Dit was een voorstel voor een kwantumkosmologisch model van het universum dat dateert uit 1983. De analyse van Hawkings biografie en zijn visie op theologie en wetenschapsfilosofie zal worden gebruikt om dit voorstel in een bredere context te kunnen bekijken. Vragen die centraal staan in dit hoofdstuk zijn: hoe kwam dit voorstel tot stand? Wat zegt het no boundary-voorstel? Hoe kunnen we het no boundary-voorstel begrijpen vanuit de biografie van Hawking? Hoe ontving de kosmologische gemeenschap het model en was het voorstel wiskundig goed gegrond? Bovendien zal er worden gekeken naar de theologische conclusie die Hawking trok uit zijn no boundary-voorstel en waarom hij dat deed.

4.1 Achtergrond

Een centraal begrip in het no boundary-voorstel is Feynmans padintegraal. De padintegraal, vernoemd naar Feynman, kwam tot stand in 1948 in een poging om kwantumdeeltjes die door krachtevelden bewegen op een andere, inzichtelijkere manier te beschrijven dan hoe de golf functie-methode van de kwantummechanica dit deed. Een padintegraal is een integraal over alle mogelijke paden die een kwantumdeeltje af kan leggen. Elk van deze paden heeft een contributie aan zich verbonden. Door al deze contributies te sommeren in een integraal verkrijgt men hetzelfde resultaat als de golf functie voor dat deeltje. Deze golf functie die verkregen wordt uit de padintegraal voldoet tevens aan de Schrödingervergelijking. Hawking wilde de padintegralen niet alleen toepassen op kwantumdeeltjes, maar op het gehele universum. Uit deze poging om padintegralen uit te breiden naar de kosmologie volgde zijn no boundary-voorstel.¹

Hawking kwam voor het eerst echt in contact met Feynmans formalisme via zijn collega Hartle, die het formalisme als doctorandus in Caltech had geleerd van Feynman. Hawking en Feynman zagen elkaar in de jaren zeventig regelmatig in Caltech. Hawking was een groot bewonderaar van Feynman en zijn padintegralenmethode. Hawkings liefde voor de padintegraal kan dus als een grote motivatie gezien worden voor het no boundary-voorstel. Het no boundary-voorstel was een erg ambitieus plan, aangezien de uitbreiding van de toepasbaarheid van de padintegraal van het kwantumniveau naar het kosmische niveau verre van vanzelfsprekend was. Met hun no boundary-voorstel betraden Hawking en Hartle in 1983 al het vakgebied van de kwantumkosmologie, een discipline die amper twintig jaar bestond. Het no boundary-voorstel blies nieuw leven in de kwantumkosmologie sinds de ontwikkelingen in de jaren zestig van

¹[1] (p. 250, 255)

voornamelijk John Wheeler (1911 - 2008), Bryce DeWitte (1923 - 2004) en Charles Misner (1932 - 2023).²

Verdere motivatie van Hawking voor het no boundary-voorstel had te maken met zijn houding tegenover het oerknalmodel. Hawking was kritisch op het oerknalmodel, aangezien het ontstaan van het universum niet verklaard kon worden aan de hand van het model zelf. Zijn eigen singulariteitsstelling betekende tenslotte dat het oerknaluniversum begonnen moest zijn in een punt waar de moderne natuurkunde afbrak. Dit ging in tegen Hawkings overtuiging dat een alomvattende theorie van het universum zowel moest vertellen hoe het universum evolueerde, als wat de randvoorwaarden waren. Deze kritiek op het oerknalmodel was een ander motief voor Hawking om te werken aan zijn eigen kwantumkosmologie. Met zijn nieuwe kwantumkosmologie wilde hij dus de singulariteit in het vroege universum vermijden om zo ook de randvoorwaarden van het heelal in te kunnen bedden in de theorie.

Bovendien was er reden om het vroege universum te bestuderen als een kwantummechanische golffunctie. De reden hiervoor was dat uit de golffunctie van een object veel informatie over de staat van het object valt af te leiden. Hartle zag een verband tussen het vroege universum en de grondtoestand van de golffunctie. Dit verband werd gelegd omdat het vroege universum simpeler en homogener zou zijn en in meer thermodynamisch evenwicht zou zijn dan het huidige universum. Dit waren eigenschappen die Hartle ook aan de grondtoestand van een golffunctie toekende: de meest simpele staat met de laagste energie. Men zou dus het vroege universum kunnen bestuderen door de golffunctie van het universum te bepalen en daarvan de grondtoestand te berekenen. Hawking was onder de indruk van dit verband dat Hartle legde. Hierdoor raakte Hawking vermoedelijk nog meer gemotiveerd om aan het voorstel te werken.³

In de tijd dat Hawking werkte aan het voorstel, was hij door zijn spierziekte zijn schrijfvaardigheid al verloren. Hierdoor kon hij niet efficiënt wiskunde bedrijven en was hij aangewezen op zijn intuïtie. Het no boundary-voorstel is daarmee dus ook met name gebaseerd op intuïtie en minder op wiskundige degelijkheid. Dit verklaart tevens het topologische karakter van het voorstel, dat zichtbaar zal worden in de volgende secties. Dit punt stond centraal in de kritiek die men had op het voorstel.

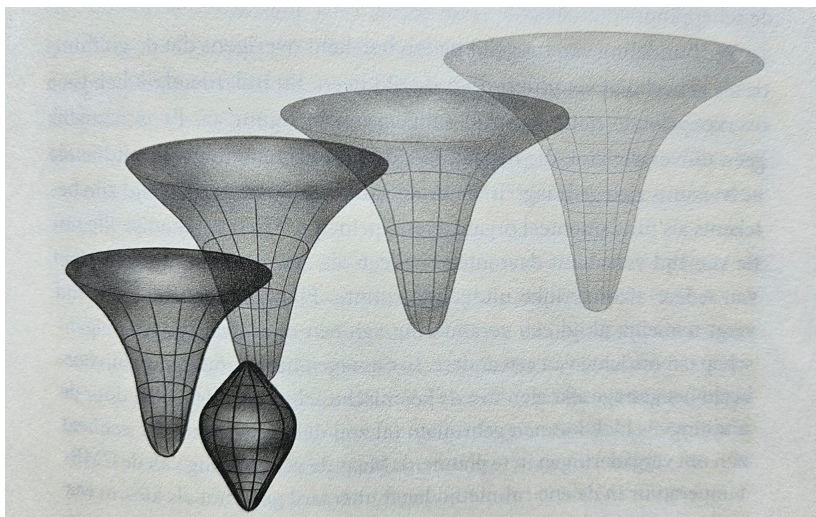
4.2 Wat zegt het no boundary-voorstel?

Voordat de technische details van het no boundary-voorstel besproken zullen worden in Secties 4.3 tot en met 4.5, zal eerst in globale termen de inhoud van het voorstel gepresenteerd worden. Deze sectie heeft dus met name als doel om een intuïtieve schets te geven van het voorstel, niet om de technische details te verschaffen.

Zoals vermeld in Sectie 4.1 is het hoofdidee van het no boundary-voorstel om het universum te beschrijven door middel van een kwantummechanische golffunctie, in de vorm van een padintegraal. De grondtoestand van deze golffunctie staat centraal in

²[1] (p. 251), [24] (p. 126-127), [35] (p. 3)

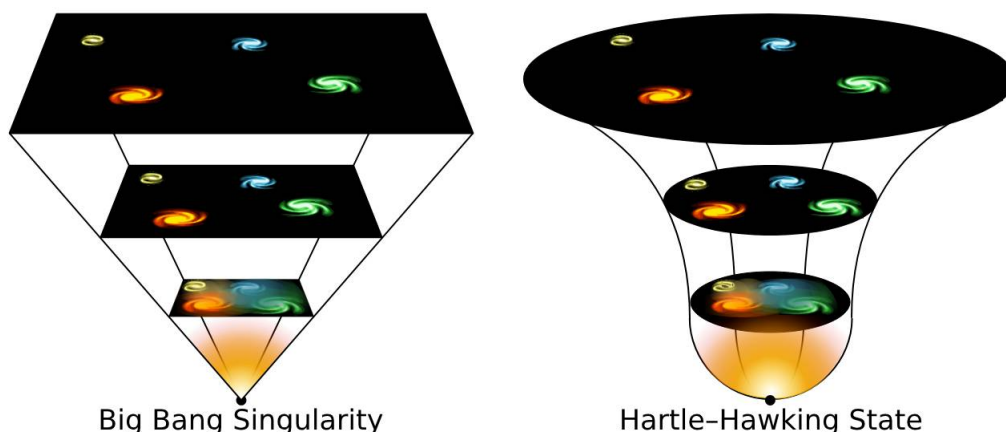
³[1] (p. 251-252)



Figuur 4.1: Visuele weergave van mogelijke uitdijingsgeschiedenissen van het universum. Hoe donkerder de geschiedenis, hoe waarschijnlijker deze is. Hier is de tijdas omhoog gericht en de overige dimensies zijn ruimtedimensies. [24] (p. 163)

het voorstel, aangezien deze toestand overeenkomt met het vroege universum. Binnen de kwantummechanica wordt de padintegraal van Feynman genomen over alle mogelijke paden die een deeltje kan nemen tussen twee punten in de ruimtetijd. Soortgelijk gaat de padintegraal van het no boundary-heelal over alle mogelijke uitdijingsgeschiedenissen die het universum heeft kunnen doorlopen van het verleden tot nu, zie Figuur 4.1. Analooq aan Feynmans padintegraal draagt elk van deze geschiedenissen een contributie bij aan de totale amplitude van de padintegraal. Hoe groter de contributie, hoe groter de kans dat het universum de bijbehorende uitdijingsgeschiedenis heeft doorlopen.

Wat voor evolutie van het heelal schrijft de Hartle-Hawking golffunctie voor? Net zoals in het oerknalmodel dijt het no boundary-universum zich uit over tijd, zie Figuur 4.2. Het verschil met het oerknalmodel treedt op zodra we de tijd terugdraaien tot aan het vroege universum. Volgens het oerknalmodel zal het universum steeds dichter op elkaar klonteren naarmate de tijd teruggedraaid wordt, totdat er een singulariteit ontstaat. In het no boundary-universum zal echter geen singulariteit ontstaan. Dit komt omdat in het vroege universum de tijddimensie ombuigt tot een extra vierde ruimtelijke dimensie. Hierdoor kan men zeggen dat de tijd ontstaat uit een omgebogen ruimtedimensie. Dit wordt weergegeven door de bolvormige onderkant aan de rechterkant van Figuur 4.2. Anders geformuleerd: er is geen begintijd waarop het universum ontstond aangezien de tijddimensie geen duidelijk begin kent. Dit is tevens waar het no boundary-voorstel zijn naam aan te danken heeft: er is geen begrenzing in de tijddimensie waar het universum ontstond. Bovendien bevat het voorstel ook geen grenzen in de ruimtedimensies. Hawking schreef in *A Brief History of Time* dat “de rand-



Figuur 4.2: De evolutie van het heelal volgens het oerknalmodel (links) en het no boundary-model (rechts). De tijdas is omhoog gericht en de overige dimensies zijn ruimtedimensies. [36]

voorwaarde van het universum is dat het geen grenzen bevat”.⁴ De ombuiging van de ruimtedimensie naar een tijddimensie kan gezien worden als een kwantumwazigheid in het prille begin van het heelal.⁵

Het no boundary-voorstel bevat dus twee eigenschappen die op het eerste gezicht tegenstrijdig met elkaar lijken te zijn. Aan de ene kant is er geen singulariteit waarin het universum ontstond, maar aan de andere kant heeft het universum een eindige leeftijd, aangezien de tijd niet oneindig ver terug gaat. Door de ronde bodem van de ruimtetijd in het no boundary-universum wordt een singulariteit voorkomen. Dit is ook wat Hawking wenste, aangezien deze beginsingulariteit in het oerknalmodel ervoor zorgde dat de oerknaltheorie geen alomvattende theorie kon zijn. Het no boundary-voorstel kon volgens Hawking daarentegen dus wel een alomvattende zijn.

Om het no boundary-voorstel wiskundig te construeren, is de notie van de *imaginaire tijd* noodzakelijk. De imaginaire tijd kan verkregen worden uit de ‘reguliere’ tijd door een Wick-rotatie uit te voeren: $t \mapsto -i\tau$ met τ de imaginaire tijd. Door deze transformatie verandert de lorentziaanse metriekruimte in een euclidische metriekruimte. Dit is precies wat er in de kromming onderin de rechterkant van Figuur 4.2 gebeurt: de euclidische ruimte verandert in een evoluerende lorentziaanse ruimtetijd. Hier zal in Sectie 4.5 verder op worden ingegaan.

Het no boundary-universum heeft geen grenzen als er door de bril van de imaginaire tijd gekeken wordt.⁶ Als men met de ‘reguliere’ tijdsbril naar het no boundary-heelal zou kijken, zou er wel een oerknalsingulariteit zijn. In de echte tijd zijn er dus weldegelijk grenzen aan het no boundary-universum. Op deze manier komt het no boundary-universum toch overeen met de observationele aanwijzingen die we al heb-

⁴[8] (p. 155)

⁵[24] (p. 129)

⁶[37]

ben van de oerknal. Aangezien er in de imaginaire tijd geen oerknalsingulariteit is waar de natuurwetten afbreken, kan het no boundary-voorstel ook geïnterpreteerd worden als de stelling dat de natuurwetten overall geldig zijn. Hawking claimde dat de manier waarop het no boundary-universum begon gedictieerd werd door natuurwetten, iets wat niet duidelijk is in het oerknalmodel.

Bovendien voorspelt het no boundary-voorstel dat het universum is ontstaan uit een uitbarsting van inflatie. Hoewel inflatie vaak gezien wordt als een periode van extreme expansie van een al bestaand heelal, is de inflatie juist het begin van het no boundary-universum. Echter, een probleem waar het no boundary-voorstel mee te maken had was dat het de kleinst mogelijke inflatiespurt voorspelde. Dit zou uiteindelijk leiden tot een *Big Crunch*: de expansie van het universum zou te klein zijn om de gravitatiekracht op te heffen en zou daarmee in elkaar storten. Dit komt niet overeen met ons universum. Dit is dan ook een kritiekpunt die andere natuurkundigen hadden op het no boundary-voorstel. Dit probleem kon echter omzeild worden. Met hulp van een collega Don Page (1948 -) en diens doctoraatsstudent Raymond Laflamme (1960 -) kwam Hawking tot de realisatie dat hij een fout had gemaakt: het no boundary-voorstel hoefde helemaal geen big crunch te impliceren.⁷

4.3 Feynmans padintegralen

Om dieper in de details van het no boundary-voorstel te kunnen treden, zal eerst een korte introductie van de padintegralenmethode van Feynman uit 1948 moeten worden gepresenteerd.

Beschouw een deeltje dat zich beweegt van punt $a = (x_a, 0)$ naar punt $b = (x_b, t)$. We introduceren de padintegraal dus aan de hand van één ruimtelijke dimensie. De uitbreiding naar meer ruimtelijke dimensies volgt natuurlijk uit het één-dimensionale geval. In de klassieke mechanica kan het pad van een deeltje bepaald worden aan de hand van het *principe van stationaire actie*. De actie S wordt gedefinieerd als

$$S[b, a] = \int_0^t L(\dot{x}, x, \tau) d\tau, \quad (4.1)$$

waarbij $\dot{x} := \frac{dx}{d\tau}$ en L de lagrangiaan is van het systeem.⁸ In deze sectie zal het pad dat het deeltje neemt van a naar b genoteerd worden als $x(\cdot)$. Dan schrijven we ook wel $S[b, a] = S[x(\cdot), t]$ waarbij het pad van $\tau = 0$ tot $\tau = t$ loopt. Voor een deeltje met massa m in een potentiaal $V(x, \tau)$ geldt tevens dat $L = \frac{m}{2}\dot{x}^2 - V(x, \tau)$. In de theorie van de klassieke mechanica zou het deeltje dus het pad volgen waarvoor S stationair is, oftewel $\delta S = 0$.

Om de stap te maken naar de kwantummechanica, moet niet enkel het klassieke pad, genoteerd met $\bar{x}(\cdot)$, worden beschouwd, maar alle mogelijke paden die een deeltje kan nemen van a naar b . Anders gezegd, voor de padintegraal draagt niet alleen het

⁷[24] (p. 158-159)

⁸[38] (p. 26)

klassieke pad bij aan de totale amplitude om van a naar b te gaan, maar elk pad. Dit betreft tevens paden die niet mogelijk zouden zijn vanuit de natuurwetten. Al deze paden dragen bij in dezelfde magnitude, maar in verschillende fases. De kans $P(b, a)$ om van a naar b te gaan wordt gegeven door $P(b, a) = |K(b, a)|^2$, waarbij $K(b, a)$ de amplitude is om van punt a naar punt b te gaan. Deze amplitude $K(b, a)$ is de som van alle contributies $\phi[x(\cdot)]$ van elk pad:

$$K(b, a) = \sum_{\text{paden van } a \text{ naar } b} \phi[x(\cdot)], \quad (4.2)$$

waarbij $\phi[x(\cdot)] = Ae^{(i/\hbar)S[x(\cdot), t]}$ met $A \in \mathbb{C}$ een normalisatieconstante. De contributie ϕ is dus in het één-dimensionale geval een functie van alle mogelijke paden in het (x, τ) -vlak naar $\mathbb{C}$.

In zijn originele paper uit 1948 waarin Feynman zijn padintegraalmethode introduceerde, stelt Feynman twee postulaten op voor zijn formalisme. De twee postulaten kunnen worden samengevat als volgt:⁹

- I. De kans dat een deeltje zich van punt $a = (x_a, 0)$ naar punt $b = (x_b, t)$ beweegt is gegeven door het kwadraat van de absolute waarde van de som van alle contributies van alle paden tussen a en b . Oftewel $P(a, b) = |K(b, a)|^2$.
- II. Elk pad draagt evenveel bij in magnitude, maar de fase van de contributie van ieder pad wordt gegeven door de klassieke actie S (in eenheden van $\hbar$). Oftewel $\phi[x(\cdot)] \propto e^{(i/\hbar)S[x(\cdot), t]}$.

Uit de bovenstaande postulaten leidde Feynman zijn padintegraal af. Hoewel de contributie $\phi[x(\cdot)]$ als een postulaat werd gepresenteerd, valt de formule voor $\phi[x(\cdot)]$ ook deels af te leiden. Dit zal hieronder gedaan worden.

Beschouw een pad van a naar b dat door punt c gaat. Het pad kan beschouwd worden als bestaande uit twee delen: het deel van a naar c en het deel van c naar b . De totale amplitude van het pad wordt dan gegeven door het product van de amplitudes van beide delen.¹⁰ Voor een pad $x(\cdot)$ van a naar b zien we dus dat

$$\phi[x(\cdot)] = \phi[x_{ac}(\cdot)]\phi[x_{cb}(\cdot)], \quad (4.3)$$

waarbij $x_{ac}(\cdot)$ en $x_{cb}(\cdot)$ de twee delen zijn van $x(\cdot)$. Aangezien (4.3) geldt voor elk pad $x(\cdot)$ van a naar b via c , volgt dat deze relatie ook geldt voor de som van alle paden van

⁹[39] (p. 371)

¹⁰[38] (p. 37)

dit type. Hieruit volgt

$$\sum_{\text{paden van a naar b}} \phi[x(\cdot)] = \sum_{\text{paden van a naar b}} \int_{-\infty}^{\infty} \phi[x_{ac}(\cdot)] \phi[x_{cb}(\cdot)] dx_c \quad (4.4)$$

$$K(b, a) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\left(\sum_{\text{paden van a naar c}} \phi[x_{ac}(\cdot)] \right) \left(\sum_{\text{paden van c naar b}} \phi[x_{cb}(\cdot)] \right) \right] dx_c \quad (4.5)$$

$$K(b, a) = \int_{-\infty}^{\infty} K(b, c) K(c, a) dx_c. \quad (4.6)$$

Vanaf nu kiezen we het punt $c = (x_c, t_c)$ vast. Dan merken we op dat voor de klassieke actie geldt dat

$$\int_0^t L(\dot{x}, x, \tau) d\tau = \int_0^{t_c} L(\dot{x}, x, \tau) d\tau + \int_{t_c}^t L(\dot{x}, x, \tau) d\tau \quad (4.7)$$

$$S[b, a] = S[b, c] + S[c, a]. \quad (4.8)$$

Nu we de bovenstaande identiteiten hebben afgeleid, kunnen we $\phi[x(\cdot)]$ gaan bepalen. Ons startpunt is de aanname dat $\phi[x(\cdot)] \propto f(S[b, a])$ waarbij $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ continu. Deze aanname volgt uit fysische overwegingen, zoals het principe van stationaire actie. Ons doel is om te bepalen wat f dan moet zijn. Uit eis (4.3) volgt dat

$$f(S[b, c]) f(S[c, a]) = f(S[b, a]) = f(S[b, c] + S[c, a]), \quad (4.9)$$

waarbij in de laatste stap gebruik wordt gemaakt van de additiviteitseigenschap van de actie (4.8). Dit impliceert dat

$$f(S[a, a]) = f(S[a, c] + S[c, a]) = f(S[a, c] - S[a, c]) = f(0). \quad (4.10)$$

Bovendien merken we op dat de kans om van punt $(x_a, 0) \rightarrow (x_a, 0)$ te bewegen gelijk is aan 1, aangezien het deeltje in kwestie zich al op het punt $(x_a, 0)$ bevindt. Hierdoor krijgen we $f(0) = 1$. De wiskundige vraag die nu opkomt is welke continue functies $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ voldoen aan de volgende eisen:

1. $f(s)f(s') = f(s + s')$
2. $f(0) = 1$

Hier komt de eerste eis overeen met de identiteit uit (4.10). Om te achterhalen welke functies dit zijn, zal een lemma uit de topologie geïntroduceerd worden. Hiervoor roepen we eerst de definitie van een *Hausdorff-ruimte* in herinnering.

Definitie 4.3.1. Een topologische ruimte X is een **Hausdorff-ruimte** als er voor elk paar elementen x_1, x_2 uit X met $x_1 \neq x_2$ disjuncte omgevingen bestaan.

Oftewel een Hausdorff-ruimte is een topologische ruimte waarvoor elk paar verschillende elementen $x_1, x_2 \in X$ er open verzamelingen U_1, U_2 bestaan zodanig dat $x_1 \in U_1$, $x_2 \in U_2$ en $U_1 \cap U_2 = \emptyset$.

Lemma 4.3.1. Zij f en g twee continue functies zodanig dat $f : X \rightarrow Y$ en $g : X \rightarrow Y$ met Y een Hausdorff-ruimte. Stel dat $f(x) = g(x)$ voor alle $x \in D \subseteq X$ waarbij D dicht is in X . Dan geldt

$$f(x) = g(x) \text{ voor alle } x \in X.$$

Bewijs. Stel dat er een $x_0 \in X$ bestaat zodanig dat $f(x_0) \neq g(x_0)$. Uit het feit dat Y een Hausdorff-ruimte is volgt dat er open verzamelingen $U, V \subseteq Y$ bestaan zodanig dat

$$f(x_0) \in U, g(x_0) \in V, \text{ en } U \cap V = \emptyset.$$

Definieer vervolgens $W := f^{-1}(U) \cap g^{-1}(V)$. Dan volgt dat $x_0 \in W$. Merk op dat W een open verzameling is vanwege de continuïteit van f en g en de definitie van open verzamelingen. Aangezien D dicht is in X , volgt dat $D \cap W \neq \emptyset$. Oftewel er is een $a \in D \cap W$. Omdat $a \in D$, volgt uit de aanname dat $f(a) = g(a)$. Uit het feit dat $a \in W$ volgt dat

$$f(a) = g(a) \in U \cap V \implies U \cap V \neq \emptyset.$$

Dit is een tegenspraak aangezien we eerder aannamen dat $U \cap V = \emptyset$. Uit deze tegenspraak volgt het bewijs. $\square$

Met behulp van Lemma 4.3.1 kan het volgende lemma bewezen worden:

Lemma 4.3.2. De enige continue functie $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ die voldoet aan

1. $f(s)f(s') = f(s + s')$
2. $f(0) = 1$

is $f(s) = e^{cs}$ met $c \in \mathbb{C}$ een constante.

Bewijs. We zullen de functie f die aan beide eisen voldoet construeren. Hiervoor construeren we eerst de restrictie $f|_{\mathbb{Q}} = f' : \mathbb{Q} \rightarrow \mathbb{C}$. Wegens de continuïteit van f is f' ook continu. Uit de continuïteit van f en het feit dat $f(0) = 1$ volgt dat er een $m \in \mathbb{N}$ bestaat zodanig dat $f'(1/m) \neq 0$ en $f'(-1/m) \neq 0$. Uit eis 1 volgt dan dat

$$f'(1) = f'(\underbrace{\frac{1}{m} + \dots + \frac{1}{m}}_{m\text{-keer}}) = f'(1/m)^m \neq 0$$

$$f'(-1) = f'(\underbrace{\frac{-1}{m} + \dots + \frac{-1}{m}}_{m\text{-keer}}) = f'(-1/m)^m \neq 0.$$

Aangezien $f'(\pm 1) \neq 0$ en $f'(\pm 1) \in \mathbb{C}$ kunnen we aannemen dat $f'(\pm 1) = e^{\pm c}$ voor zekere $c \in \mathbb{C}$. Het toepassen van eis 1 levert het volgende resultaat op voor alle $n \in \mathbb{N}$:

$$f'(n) = \underbrace{f'(1) \cdot \dots \cdot f'(1)}_{n\text{-keer}} = e^{nc}$$

$$f'(-n) = \underbrace{f'(-1) \cdot \dots \cdot f'(-1)}_{n\text{-keer}} = e^{-nc}.$$

Voor alle $p \in \mathbb{Z}$ en $q \in \mathbb{N}$ kunnen we tevens bepalen wat $f'(p/q)$ is. Aangezien $f'(1) = f'(1/m)^m = e^c$, volgt automatisch dat $f'(1/m) = e^{c/m}$. Uit eis 1 volgt vervolgens dat

$$f'(p/q) = f'\left(\underbrace{\frac{1}{q} + \dots + \frac{1}{q}}_{p\text{-keer}}\right) = f'(1/q)^p = e^{cp/q}.$$

Nu merken we op dat we $f|_{\mathbb{Q}} = f' : \mathbb{Q} \rightarrow \mathbb{C}$ op een unieke wijze, naast de keuze van c , hebben geconstrueerd die aan eisen 1 en 2 voldoet. We weten dus dat $f(s) = e^{cs}$ voor alle $s \in \mathbb{Q}$. Bovendien is het bekend dat $\mathbb{Q}$ dicht is in $\mathbb{R}$ en dat $\mathbb{C}$ een Hausdorff-ruimte is. We definiëren de functie $g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ met $g(s) = e^{cs}$. Het is gemakkelijk te zien dat $f(s) = g(s)$ voor alle $s \in \mathbb{Q}$. Uit Lemma 4.3.1 volgt dan dat

$$f(s) = g(s) \text{ voor alle } s \in \mathbb{R}.$$

Aangezien de constructie van f' uniek was, volgt automatisch dat $f = g$ ook de unieke functie van $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ is die aan beide eisen voldoet. Hiermee is het bewijs geleverd. $\square$

Uit Lemma 4.3.2 volgt dat de contributie $\phi[x(\cdot)] \propto f(S[b, a]) = f(S[x(\cdot), t])$ van de vorm $Ae^{cS[x(\cdot), t]}$ moet zijn met $c, A \in \mathbb{C}$ constantes. Dit komt overeen met de daadwerkelijke formule $\phi[x(\cdot)] = Ae^{(i/\hbar)S[x(\cdot), t]}$.

De vraag die opkomt is hoe we de padintegraal wiskundig goed kunnen definiëren. Er zijn namelijk overaftelbaar veel paden tussen twee punten in de ruimtetijd. Om de padintegraal te construeren moet eerst de notie van een pad gediscetiseerd worden. We breken het tijdsinterval $[0, t]$ op in tijdstappen van lengte ϵ . Er geldt dus $\epsilon = t_{i+1} - t_i$ en $N\epsilon = t$ waarbij $N + 1$ het aantal punten $x_0, \dots, x_N$ is dat het discrete pad vormt. Op elk tijdstip t_i kiezen we een speciaal punt x_i (we werken hier nog steeds in één dimensie). We construeren dan een pad door al deze punten te verbinden met rechte lijnen, zie Figuur 4.3.¹¹ Hierdoor krijgen we de volgende uitdrukking

$$K(b, a) \sim \int \dots \int \phi[x(\cdot)] dx_1 dx_2 \dots dx_{N-1}, \quad (4.11)$$

waarbij er niet geïntegreerd wordt over $x_0 = x_a$ en $x_N = x_b$ aangezien deze punten vaststaan.

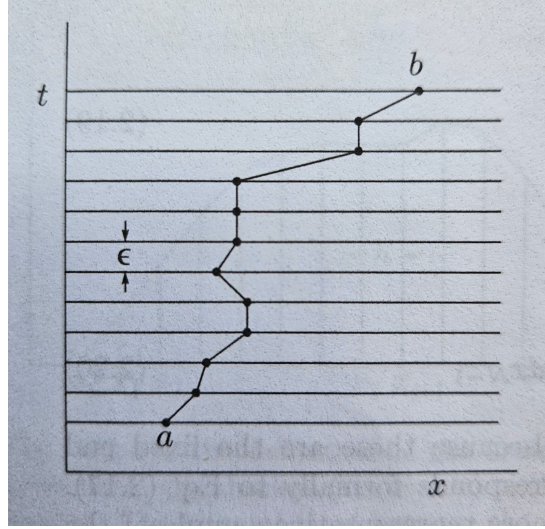
Uiteindelijk willen we het limiet nemen van $\epsilon \rightarrow 0$ om van discrete naar continue paden te gaan. Er moet een normalisatiefactor worden toegevoegd zodat het limiet van $\epsilon \rightarrow 0$ niet divergeert. Het is nog niet bekend hoe dit in het algemeen moet, maar voor alle praktische voorbeelden is er wel een bekende definitie.¹² Als de lagrangiaan gegeven wordt door $L = \frac{m}{2}\dot{x}^2 - V(x, \tau)$ dan is de normalisatiefactor gegeven door¹³

$$C = \left(\frac{m}{2\pi i \hbar \epsilon}\right)^{N/2}. \quad (4.12)$$

¹¹Dit hoeven niet per se rechte lijnen te zijn. Feynman verbond de punten in zijn 1948 paper bijvoorbeeld met klassieke paden die de actie minimaliseert in plaats van rechte paden [40] (p. 12).

¹²Dit kan gezien worden als een teken dat de padintegraal wiskundig wellicht niet goed gefundeerd is.

¹³Voor de afleiding van de normalisatiefactor C , zie [38] (p. 77-78).



Figuur 4.3: Mogelijke discretisatie van een pad van a naar b met tijdstappen van ϵ . [38] (p. 34)

De expressie voor de padintegraal is dan als volgt:

$$K(b, a) = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} C \int \dots \int e^{(i/\hbar)S[x(\cdot), t]} dx_1 \dots dx_{N-1}. \quad (4.13)$$

De padintegraal wordt in de literatuur ook wel genoteerd als

$$K(b, a) = \int_a^b e^{(i/\hbar)S[x(\cdot), t]} \mathcal{D}x(\cdot), \quad (4.14)$$

met $\mathcal{D}x(\cdot) = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} C \int \dots \int dx_1 \dots dx_{N-1}$. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een slordige notatie $\int_a^b$, waarbij $a = (x_a, 0)$ en $b = (x_b, t)$ niet de grenzen zijn van een bepaalde integraal, maar parameters in de actie $S[x(\cdot), t]$ die niet moeten worden vergeten. Zoals vermeld kan de padintegraal op een natuurlijke wijze worden uitgebreid naar drie ruimtelijke dimensies:

$$K(b, a) = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} C^3 \int \dots \int e^{(i/\hbar)S[x(\cdot), t]} dx_1 \dots dx_{N-1} dy_1 \dots dy_{N-1} dz_1 \dots dz_{N-1} \quad (4.15)$$

$$= \int_a^b e^{(i/\hbar)S[x(\cdot), t]} \mathcal{D}\mathbf{x}(\cdot), \quad (4.16)$$

met

$$\mathcal{D}\mathbf{x}(\cdot) = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} C^3 \int \dots \int dx_1 \dots dx_{N-1} dy_1 \dots dy_{N-1} dz_1 \dots dz_{N-1}, \quad (4.17)$$

waarbij $a = (x_a, y_a, z_a, 0)$, $b = (x_b, y_b, z_b, t)$ en er in de eerste regel voor elke ruimtelijke dimensie een factor C voor de integraal komt. De analogie met de golf functie-formulering van de kwantummechanica volgt uit het feit dat de Schrödingervergelijking kan worden afgeleid uit de padintegralenmethode en vice versa.¹⁴

¹⁴Zie hiervoor bijvoorbeeld [40].

4.3.1 Correspondentieprincipe

Nu we de padintegraal gedefinieerd hebben, zal er nu worden gekeken naar in hoe verre de klassieke mechanica herleidbaar is uit Feynmans formalisme van de kwantummechanica. Het *correspondentieprincipe* is het principe dat uit de postulaten van de kwantummechanica de klassieke mechanica herleidbaar moet zijn.¹⁵ Eén formulering van dit principe is dat in het limiet van $\hbar \rightarrow 0$, de klassieke mechanica voortvloeit uit de kwantummechanica. Om te kijken of Feynmans formalisme aan het correspondentieprincipe voldoet merken we eerst op dat $\phi[x(\cdot)]$ ook gerepresenteerd kan worden als een vector in het complexe vlak dankzij de formule van Euler. Uit deze formule volgt dat

$$\phi[x(\cdot)] = A e^{(i/\hbar)S[x(\cdot),t]} = A \left[\cos \left(\frac{S[x(\cdot),t]}{\hbar} \right) + i \sin \left(\frac{S[x(\cdot),t]}{\hbar} \right) \right]. \quad (4.18)$$

Bovendien merken we op dat $\hbar = 1.054 \cdot 10^{-34}$ Js. De actie $S[b, a]$ is op macroscopisch niveau vrijwel altijd van een veel grotere orde dan $\hbar$. Zo is de actie voor een massa van 1 g dat valt vanaf hoogte $h = 1$ m tot $h = 0$ in de orde 10^{-3} . Hierdoor zal de fase ($S[b, a]/\hbar$) van een orde 10^{31} zijn.¹⁶ Hieruit volgt dat een kleine afwijking in het pad $x(\cdot)$ leidt tot een groot verschil in de fase. Paden die erg op elkaar lijken kunnen dus als contributie vectoren opleveren die in allerlei verschillende richtingen staan. Deze willekeurige distributie van complexe vectoren zorgt ervoor dat de som van al deze contributies op 0 uitkomt.

Voor het klassieke pad $\bar{x}(\cdot)$ gaat het bovenstaande verhaal niet op. Voor dit pad is de actie stationair, waardoor een kleine afwijking van $\bar{x}(\cdot)$ nauwelijks een verandering in S teweegbrengt. Hierdoor zullen $\bar{x}(\cdot)$ en paden die weinig afwijken van het klassieke pad bijna dezelfde fase hebben, waardoor ze constructief bijdragen aan de som in (4.2).¹⁷ Voor willekeurig andere paden zullen de fases ongecorreleerd zijn en elkaar opheffen. Hierdoor zal de kans dat een deeltje een 'klassiekachtig' pad volgt groter zijn dan een willekeurig ander pad. Dit komt tevens overeen met onze belevingswereld. Dit zou dus betekenen dat het padintegraalformalisme van de kwantummechanica voldoet aan het correspondentieprincipe.

Echter, deze conclusie kan in twijfel worden gebracht. Het is inderdaad het geval dat 'klassiekachtige' paden het meeste bijdragen aan de totale som (4.2). Dit betekent dat een deeltje een grotere kans heeft om deze paden te volgen dan andere soorten paden. Hieruit volgt echter niet dat het deeltje in kwestie daadwerkelijk een klassiekachtig pad zal volgen. Er zal wel aan het correspondentieprincipe worden voldaan als de paden zelf een waarschijnlijkheid met zich mee dragen en als bovendien geldt dat $\hbar \rightarrow 0 \implies P(\bar{x}(\cdot)) \rightarrow 1$. Dit is echter niet wat uit het formalisme van Feynman volgt, aangezien de paden zelf geen waarschijnlijkheid met zich meedragen. De padintegraal

¹⁵De term 'correspondentieprincipe' werd voor het eerst gebruikt door de Deense natuurkundige Niels Bohr (1885 - 1962) in 1920. Over de exacte definitie van Bohr's correspondentieprincipe is geen algemene overeenstemming, maar vaak wordt de term gebruikt op de manier zoals hier gepresenteerd.

¹⁶[40] (p. 15)

¹⁷[41] (p. 162)

neemt namelijk alle mogelijke paden mee, waaronder ook paden die uitgesloten zijn door de natuurwetten. Beschouw bijvoorbeeld het pad van een deeltje dat zich van de ene kant naar de andere kant van een kamer beweegt. Klassiek gezien zal het deeltje waarschijnlijk een pad volgen dat volledig in de kamer zelf ligt. Echter, in de padintegraal wordt eveneens rekening gehouden met het volgende pad: het deeltje verlaat eerst de kamer, vervolgt zijn weg naar Alpha Centauri en weer terug in 1 seconde en ten slotte gaat het deeltje naar de andere kant van de kamer. Dit pad is in strijd met de wetten van de natuurkunde, aangezien het deeltje sneller moet gaan dan de lichtsnelheid om in 1 seconde van en naar Alpha Centauri te reizen. Hoewel dit pad dus onfysisch is, draagt dit pad nog steeds bij aan de totale som (4.2) met een contributie ongelijk aan 0. Als de contributie van een pad direct kon worden geïnterpreteerd als een waarschijnlijkheid, zou er dus een kans ongelijk aan 0 zijn dat het deeltje een onfysisch pad volgt. Aangezien dit niet mogelijk is, kan worden gesteld dat de paden zelf geen waarschijnlijkheid met zich meedragen. Hierdoor valt het te betwisten of het padintegraalformalisme voldoet aan het correspondentieprincipe.¹⁸

4.4 Wiskundige fundering van Feynmans padintegraal in de kwantummechanica

Feynman en Albert Hibbs (1924 - 2003) schreven zelf in hun boek *Quantum Mechanics and Path Integrals* (1965) dat de manier waarop ze paden van a naar b construeerden via discrete paden wellicht niet de beste was voor wiskundige doeleinden.¹⁹ Stel bijvoorbeeld dat de lagrangiaan afhangt van de versnelling $\ddot{x}$. Vanwege de discretisering van het pad is de snelheid waarschijnlijk discontinue op de punten (x_i, t_i) . Dit zou resulteren in een oneindige versnelling, wat tot problemen kan leiden in de bepaling van de padintegraal.

Dit roept de vraag op of de padintegraal (4.14) wiskundig goed gedefinieerd is. Deze vraag is terecht, aangezien er zeker wiskundige obstakels en tekortkomingen verbonden zijn aan de padintegraal.²⁰ Om deze obstakels te behandelen, is het noodzakelijk om eerst enkele definities uit de maattheorie te benadrukken.

4.4.1 Voorkennis uit de maattheorie

Definitie 4.4.1 (Maat). Zij X een set en Σ een σ -algebra over X . Een **maat** is een functie $\mu : \Sigma \rightarrow [0, \infty]$ met de volgende eigenschappen:

1. $\mu(\emptyset) = 0$
2. (σ -additiviteit) Voor alle aftelbare collecties $\{E_k\}_{k=1}^{\infty}$ met $E_i \in \Sigma$ en $E_i \cap E_j = \emptyset$ met

¹⁸[40] (p. 18)

¹⁹[38] (p. 34)

²⁰[42] (p. 103-104)

$i \neq j$ geldt dat

$$\mu(\cup_{k=1}^{\infty} E_k) = \sum_{k=1}^{\infty} \mu(E_k).$$

Een maat kan dus gezien worden als een functie die aan bepaalde deelverzamelingen van een verzameling X een waarde toekent uit $[0, \infty]$. We noemen de waarde die een maat μ toekent aan een verzameling $E \in \Sigma$ de *maat* van de verzameling. De kwantiteit $\mu(E)$ is dus de maat van E . We zeggen dat μ een *eindige maat* toekent aan een verzameling E als geldt dat $\mu(E)$ eindig is.

Om de wiskundige fundering van het no boundary-voorstel te bestuderen, zal er gekeken moeten worden naar een specifieke maat, de zogenaamde *Lebesgue-maat*. Om deze te definiëren, hebben we echter eerst twee andere definities nodig.

Definitie 4.4.2 (Lebesgue-buitenmaat). Voor elke deelverzameling $E \subseteq \mathbb{R}$ is de **Lebesgue-buitenmaat** $\mu^*(E)$ gegeven door

$$\mu^*(E) := \inf \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} l(I_k) : \{I_k\} \text{ een reeks van open intervallen met } E \subset \cup_{k=1}^{\infty} I_k \right\},$$

waarbij $l(I) = b - a$ voor elk interval $I = (a, b) \subseteq \mathbb{R}$.

Definitie 4.4.3 (Lebesgue-meetbaar). Een verzameling $E \subseteq \mathbb{R}$ heet **Lebesgue-meetbaar** als er voor elke deelverzameling $A \subseteq \mathbb{R}$ voldaan wordt aan de volgende identiteit

$$\mu^*(A) = \mu^*(A \cap E) + \mu^*(A \cap E^c),$$

waarbij E^c het complement is van E .

Nu we de definities van de Lebesgue-buitenmaat en Lebesgue-meetbare verzamelingen hebben, kunnen we de Lebesgue-maat zelf definiëren. Op verzamelingen waar de Lebesgue-maat gedefinieerd kan worden, komt de Lebesgue-maat overeen met de Lebesgue-buitenmaat.

Definitie 4.4.4 (Lebesgue-maat). Zij E een Lebesgue-meetbare verzameling. Dan is de **Lebesgue-maat** $\mu(E)$ van E gedefinieerd als $\mu(E) := \mu^*(E)$.

De benodigde maattheoretische definities zijn hiermee gegeven. Er is echter nog één ander wiskundig begrip die nodig is om verder te gaan met de wiskundige analyse van het no boundary-voorstel. Dit is het begrip *Hilbertruimte*.

Definitie 4.4.5 (Hilbertruimte). Een **Hilbertruimte** is een reële of complexe vectorruimte met een inproduct die tevens een volledige metriekruimte is, waarbij de metriek geïnduceerd wordt door het inproduct.

Een volledige metriekruimte is een metriekruimte waarin elke Cauchy-rij convergeert. Een voorbeeld van een Hilbertruimte is $\mathbb{R}^n$ met het standaard vectorinproduct.

4.4.2 Wiskundige problemen van de padintegraal

Er zijn verschillende wiskundige problemen met de definitie van de padintegraal zoals gepresenteerd in Sectie 4.3. Een aantal van deze problemen zullen in deze deelsectie worden besproken.

We beginnen met op te merken dat de padintegraal geen reguliere integraal is over het domein van een functie die geïntegreerd wordt. Er wordt geïntegreerd over functies, namelijk paden. Het integratiedomein is dus niet langer een regio in de ruimte, maar een functieruimte. Hierdoor wordt $K(b, a)$ ook wel een *functionele integraal* genoemd: een integraal waar het integratiedomein een functieruimte is.

Het eerste probleem is het niet duidelijk of de padintegraal convergeert of niet. De padintegraal bevat namelijk geen dempend mechanisme waardoor extreme oscillaties voorkomen zouden worden. Om dit probleem te voorkomen, kan gebruik worden gemaakt van een Wick-rotatie ($t \mapsto -i\tau$) zodat $e^{(i/\hbar)S[b,a]} \mapsto e^{-I[b,a]/\hbar}$ waarbij I de zogenaamde euclidische actie is (er geldt $S := iI$, zie Sectie 4.5). Hiermee wordt dus de exponentiële term vervangen door een dempende exponentiële term waardoor de padintegraal wellicht wel convergeert. De resulterende padintegraal wordt ook wel euclidisch genoemd. Hier maken Hartle en Hawking gebruik van in hun no boundary-voorstel. Ten derde is het, zoals vermeld, niet bekend hoe de normalisatieconstante C in het algemeen afgeleid kan worden. Momenteel is dit alleen mogelijk voor speciale gevallen.²¹

Daarnaast is het zo dat de $\mathcal{D}x(\cdot)$ term in de integraal (4.14) in de natuurkunde als Lebesgue-maat wordt geïnterpreteerd. Echter, er bestaat geen Lebesgue-maat op een oneindig-dimensionale ruimte zoals de ruimte van alle paden. De ruimte van alle paden kan worden getransformeerd naar een Hilbertruimte.²² De volgende stelling laat zien dat het onmogelijk is om een Lebesgue-maat te hebben op een oneindig-dimensionale Hilbertruimte:

Stelling 4.4.1. Zij $\mathcal{H}$ een oneindig-dimensionale Hilbertruimte. Er bestaat geen maat die zowel invariant is onder translaties als rotaties en die bovendien een eindige niet-nul maat toekent aan begrensde open verzamelingen.

Voordat het bewijs²³ geleverd wordt, is het belangrijk om te vermelden dat een Lebesgue-maat aan alle eisen in de stelling voldoet. Hierdoor laat de stelling zien dat er geen Lebesgue-maat kan bestaan op een oneindig-dimensionale Hilbertruimte.

Bewijs. Stel dat er wel een maat μ bestaat zoals beschreven in de stelling. Neem een oneindige orthonormale verzameling van vectoren $\{e_i\}_{i \in \mathbb{N}}$. Dit is altijd mogelijk in een

²¹[41] (p. 163, 168)

²²[43] (p. 4, 61-63), [44]

²³Het bewijs is geïnspireerd door [43].

oneindige Hilbertruimte. Definieer vervolgens de open ballen

$$B_i := \left\{ x \in \mathcal{H} : \|x - e_i\| < \frac{1}{2} \right\}.$$

Claim: $\{B_i\}_{i \in \mathbb{N}}$ is een disjunctie collectie van verzamelingen.

Bewijs van de claim. Stel dat de verzamelingen niet disjunct zijn. Dan bestaan er dus $i, j \in \mathbb{N}$ met $i \neq j$ zodanig dat er een $y \in B_i \cap B_j$ bestaat. Dit betekent dat $\|y - e_i\| < \frac{1}{2}$ en $\|y - e_j\| < \frac{1}{2}$. Uit de driehoeksongelijkheid volgt dan:

$$\|e_i - e_j\| \leq \|y - e_i\| + \|y - e_j\| < \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1.$$

Noteer voor het inproduct van de Hilbertruimte $\langle e_i, e_j \rangle := \|e_i\| \cdot \|e_j\| \cos \theta$ waarbij θ de hoek is tussen e_i en e_j . Aangezien deze twee vectoren orthonormaal zijn, weten we dat $\theta = \pi/2$ als $i \neq j$, oftewel

$$\begin{aligned} \langle e_i, e_j \rangle &= 0 \\ \langle e_i, e_i \rangle &= \langle e_j, e_j \rangle = 1. \end{aligned}$$

Als we de driehoeksongelijkheid kwadrateren verkrijgen we:

$$1 > \|e_i - e_j\|^2 = \langle e_i - e_j, e_i - e_j \rangle = \langle e_i, e_i \rangle + \langle e_j, e_j \rangle - 2\langle e_i, e_j \rangle = 1 + 1 - 0 = 2.$$

Hier vinden we dus een tegenspraak waarmee we de claim hebben bewezen.

De open ballen zijn dus disjunct. Bovendien hebben we voor elke $x \in B_i$ dat

$$\|x\| \leq \|x - e_i\| + \|e_i\| < \frac{1}{2} + 1 < 2.$$

Hieruit volgt dat de vereniging van open ballen B_i bevat is in de open bal $B(2) := \{x \in \mathcal{H} : \|x\| < 2\}$. Wegens de aanname in de stelling volgt dat $B(2)$ een eindige maat moet hebben aangezien $B(2)$ zowel open als begrensd is. Uit het feit dat de maat μ translatie-invariant is volgt dat alle B_i 's dezelfde positieve maat $a > 0$ hebben. Uit de σ -additiviteit van μ volgt tevens dat

$$\infty > \mu(B(2)) \geq \mu(\cup_{i=1}^{\infty} B_i) = \sum_{i=1}^{\infty} \mu(B_i) = \sum_{i=1}^{\infty} a = \infty.$$

Dit levert de gewenste tegenspraak op. Er volgt dat er niet een maat μ kan bestaan met de gestelde eisen uit de stelling. $\square$

Aangezien de ruimte van alle paden getransformeerd kan worden naar een Hilbertruimte, volgt uit Stelling 4.4.1 dat er geen Lebesgue-maat bestaat op de ruimte van alle paden.

Er moet echter wel een maat zijn op de ruimte van alle paden om een integraal te nemen over de paden. Eén manier om de padintegraal toch te definiëren maakt gebruik van de *Wiener-integraal*. Het idee is dat men de euclidische padintegraal gebruikt die verkregen wordt door een Wick-rotatie. De padintegraal kan dan goed geconstrueerd worden aan de hand van deze nieuwe maat. Deze methode omzeild dus het probleem rondom de Lebesgue-maat. Meer informatie kan gevonden worden in [42].

4.5 Stap naar de kwantumkosmologie

Nu de padintegraal behandeld is, kan deze vanuit de kwantummechanica worden uitgebreid naar de kwantumkosmologie of kwantumgravitatie. Net zoals in de kwantummechanica staat binnen de kwantumkosmologie de golffunctie centraal. Echter, waarbij in de kwantummechanica de golffunctie de staat van een subatomair deeltje beschrijft, beschrijft de golffunctie in de kwantumkosmologie het hele universum. Hartle en Hawking waren voornamelijk geïnteresseerd in gesloten universa. Dit zijn universa met genoeg massa om uiteindelijk de expansie van het heelal om te zetten in een inkrimping. Dit impliceert dat een gesloten universum een positieve kromming heeft. Hoewel Hartle en Hawking hiervan uitgingen, is het onduidelijk of ons universum gesloten is of niet. Vermoedelijk hebben ze de keuze gemaakt voor een gesloten universum omdat dit makkelijker te analyseren was in hun formalisme.

4.5.1 No boundary-golffunctie

De golffunctie van het universum kan geschreven worden als

$$\Psi[\tilde{h}_{ij}, \tilde{\Phi}, B] = \sum_M \int \mathcal{D}g_{\mu\nu} \mathcal{D}\Phi \exp(-I[g_{\mu\nu}, \Phi]), \quad (4.19)$$

waarbij I de euclidische actie is, M een verzameling van variëteiten, $g_{\mu\nu}$ een vier-dimensionale metriek en Φ een materieveld. In (4.19) komt de vorm van de padintegraal (4.14) terug. Ten eerste wordt er gesommeerd over alle mogelijke 'paden' die het universum heeft kunnen doorlopen. Dit komt overeen met alle uitdijingsgeschiedenissen die worden gegeven als vier-dimensionale variëteiten M . Daarnaast draagt elke uitdijingsgeschiedenis een contributie met zich mee voor de totale golffunctie, namelijk een exponentiële functie van de (euclidische) actie, net zoals in het kwantummechanische geval.

De euclidische actie I verkrijgt men door de transformatie $t \mapsto -i\tau$ toe te passen op de klassieke actie S . We merken op dat $dt = -id\tau$ en $\frac{dx}{dt} = i\frac{dx}{d\tau}$, dus

$$S = \int \left[\frac{1}{2}m \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 - V(x) \right] dt = \int -i \left[-\frac{1}{2}m \left(\frac{dx}{d\tau} \right)^2 - V(x) \right] d\tau \quad (4.20)$$

$$= i \int \left[\frac{1}{2}m \left(\frac{dx}{d\tau} \right)^2 + V(x) \right] d\tau := iI, \quad (4.21)$$

waarbij $I = \int \left[\frac{1}{2}m \left(\frac{dx}{d\tau} \right)^2 + V(x) \right] d\tau$ de euclidische actie. Een *euclidische padintegraal* is een padintegraal waarbij gebruik gemaakt wordt van de euclidische actie. De kwantiteit τ wordt ook wel de *imaginaire tijd* genoemd. De transformatie van reguliere tijd naar imaginaire tijd komt overeen met een Wick-rotatie van de lagrangiaan.

De reden dat Hartle en Hawking een Wick-rotatie toepasten was omdat de padintegralenmethode alleen werkt in een variëteit met een euclidische meetkunde, niet met

een lorentziaanse.²⁴ Dit heeft te maken met het feit dat de padintegraal in lorentziaanse meetkunde niet hoeft te convergeren. Dit was ook het geval voor de kwantummechanische padintegraal, waarbij er geen gebruik werd gemaakt van de euclidische actie maar van de klassieke actie S . Aangezien de ruimtetijd in de algemene relativiteitstheorie lorentziaans van aard is, kan de padintegralenmethode dus niet direct toegepast worden zonder Wick-rotatie. In de lorentziaanse ruimtetijd geldt voor de afstand s tussen twee punten dat

$$s = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2 - t^2}. \quad (4.22)$$

Als men de bovengenoemde Wick-rotatie toepast op deze afstandsformule, dan verkrijgt men

$$s' = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2 - (i\tau)^2} = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2 + \tau^2}. \quad (4.23)$$

Dit komt precies overeen met de afstandsformule voor een vier-dimensionale euclidische metriekruimte. Dit laat zien dat een Wick-rotatie de lorentziaanse ruimtetijd transformeert in een euclidische ruimtetijd waarin de padintegralenmethode toegepast kan worden.

De golf functie uit (4.19) geeft de amplitude dat het universum een drie-dimensionaal oppervlakte B bevat met daarop een metriek $\tilde{h}_{ij}$ en een scalair materieveld $\tilde{\Phi}$. Dit materieveld kan voor verschillende velden staan die corresponderen met allerlei verschillende deeltjes, behalve het gravitatieveld. Bovendien kan $\tilde{\Phi}$ voor meerdere materievelden tegelijk staan. In het vervolg zal er van één enkel materieveld uit worden gegaan, maar men kan dit direct uitbreiden naar meerdere materievelden. De som gaat over alle variëteiten die B als hun rand hebben, over alle metrieken $g_{\mu\nu}$ en materievelden Φ op M die respectievelijk overeenkomen met $\tilde{h}_{ij}$ en $\tilde{\Phi}$ op B , zie Figuur 4.4. Deze variëteiten zijn de mogelijke variëteiten die de ruimtetijd van het universum kunnen beschrijven. Hierdoor wordt de padintegralenmethode ook wel de 'som over geschiedenissen-methode' genoemd wordt, de variëteit van de ruimtetijd geeft als het ware de geschiedenis van het universum weer.²⁵

Het no boundary-voorstel (NB) is een topologische stelling die zegt over welke variëteiten gesommeerd en metrieken geïntegreerd moeten worden in (4.19).²⁶ Het NB kan als volgt worden geformuleerd:

No boundary-voorstel

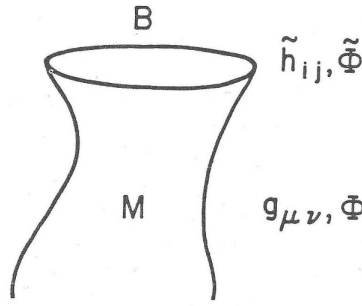
De padintegraal voor kwantumgravitatie (4.19) moet genomen worden over alle compacte vierdimensionale variëteiten met één enkele rand B en euclidische metrieken.^a

^a[7] (p. 79).

²⁴[1] (p. 252)

²⁵[35] (p. 3, 39)

²⁶[35] (p. 39)



Figuur 4.4: Visuele weergave van de variëteiten waarover gesommeerd wordt in (4.19). [35]

Volgens Hawking waren deze compacte vierdimensionale ruimtes met euclidische metrieken de enige natuurlijke keuze voor de padintegraal.²⁷ Uit deze definitie volgt direct ook de motivatie voor de naam van het voorstel. De enige rand ('boundary') van de variëteiten waarover gesommeerd wordt is namelijk B . Deze rand kan gezien worden als de bovenkant van de rechterkant van Figuur 4.2. Hierdoor is er in het bijzonder aan de onderkant van dezelfde figuur geen rand. Dit feit was van grote waarde voor Hawking, aangezien dit volgens hem betekende dat het no boundary-universum geen initiële singulariteit bevatte. Het feit dat Hawking dit van grote waarde vond, volgt tevens uit de naam die hij en Hartle aan het voorstel gaven. Bovendien domineren de variëteiten zoals de rechterkant van Figuur 4.2 de padintegraal.²⁸

Om beter inzicht te krijgen in de motivatie achter deze keuze voor compacte variëteiten met één enkele rand, zal Hawkings afleiding van deze keuze worden gepresenteerd. Hawking beschouwde een gesloten variëteit $\bar{M}$ die enkelvoudig samenhangend was.²⁹ Onder deze aanname deelt B de variëteit $\bar{M}$ op in twee delen M^+ en M^- , zie Figuur 4.5.

Men kan het oppervlakte B zien als een randvoorwaarde voor de golf functie. B zou bijvoorbeeld de drie-dimensionale ruimte kunnen zijn van het universum op (imaginaire) tijdstip $\tau = 1$. Het geeft de staat van het universum op een bepaald moment aan. Als men voor B precies de huidige ruimtelijke staat van het universum kiest, dan kan men M^+ en M^- respectievelijk zien als het 'verleden' en de 'toekomst' in de imaginaire tijd van het universum. De golf functie voor de variëteit $\bar{M}$ kan in dit geval geschreven worden als het product van de golf functies voor M^+ en M^- , oftewel:

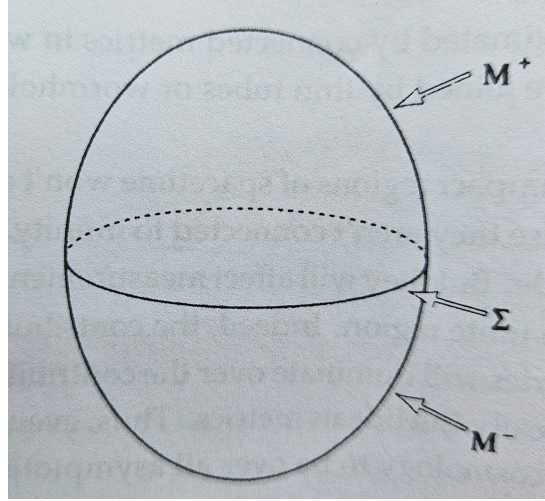
$$\Psi_{\bar{M}}[\tilde{h}_{ij}, \tilde{\Phi}, B] = \Psi_{M^+}[\tilde{h}_{ij}, \tilde{\Phi}, B] \cdot \Psi_{M^-}[\tilde{h}_{ij}, \tilde{\Phi}, B]. \quad (4.24)$$

In de meeste gevallen geldt dat Ψ_{M^+} en Ψ_{M^-} gelijk zullen zijn.³⁰ De golf functie Ψ_{M^+} is

²⁷Voor meer informatie over de motivatie voor compacte euclidische metriekruimtes, zie [7] (p. 76-79).

²⁸[47] (p. 770)

²⁹[7] (p. 80)



Figuur 4.5: Visualisatie van de variëteit $\bar{M}$, de drie-dimensionale oppervlakte $B = \Sigma$ en de variëteiten M^+ en M^- . [7] (p. 80)

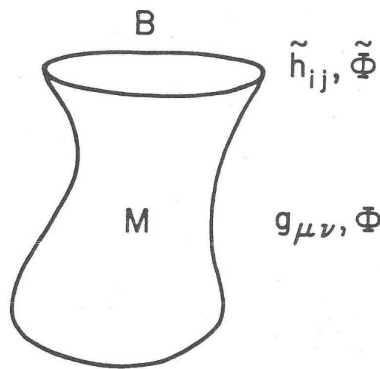
de golffunctie van het universum onder de aanname dat de ruimtetijd in dat universum beschreven wordt door M^+ . In de som in (4.19) wordt gesommeerd over alle mogelijke variëteiten voor M^+ . Bovendien merken we op dat aangezien $\bar{M}$ gesloten is, er volgt dat M^+ compact is met als enige rand B . Aangezien er in (4.19) gesommeerd wordt over deze M^+ , volgt dat het NB impliceert dat er enkel gesommeerd hoeft te worden over compacte variëteiten M die als enige rand B hebben met daarop de geïnduceerde metriek en materieveld $\tilde{h}_{ij}$ en $\tilde{\Phi}$, zie Figuur 4.6.

Het verschil met de algemene interpretatie van de golffunctie van het universum is dus dat in het algemeen gesommeerd wordt over M waarvoor B niet de enige rand hoeft te zijn. In het algemeen kunnen de variëteiten waarover gesommeerd worden dus meerdere randen hebben.

Zij $\mathcal{M}$ de verzameling van compacte variëteiten met als enige rand B met daarop de geïnduceerde metriek en materieveld $\tilde{h}_{ij}$ en $\tilde{\Phi}$. Definieer tevens de verzameling $\mathcal{C}$ van alle vier-dimensionale euclidische metrieken die $\tilde{h}_{ij}$ induceren op B . Ten slotte, definieer $\mathcal{P}$ als de verzameling van alle materievelden Φ die reduceren tot $\tilde{\Phi}$ op B . Dan kan de NB golffunctie genoteerd worden als

$$\Psi_{NB}[\tilde{h}_{ij}, \tilde{\Phi}, B] = \sum_{\mathcal{M}} \int_{\mathcal{C}} \int_{\mathcal{P}} \mathcal{D}g_{\mu\nu} \mathcal{D}\Phi \exp(-I[g_{\mu\nu}, \Phi]). \quad (4.25)$$

³⁰Voor deze scriptie is de reden voor dit feit weinig relevant, waardoor deze ook niet besproken wordt of bestudeerd is. Om dezelfde reden zal in het algemeen in deze deelsectie sommige details weggelaten worden. Voor meer details, zie [7], [35], [45], [46].



Figuur 4.6: Visuele weergave van de variëteiten waarover gesommeerd wordt in formule (4.19) in het no boundary-voorstel. Het verschil met Figuur 4.4 is dat hier de variëteit M het oppervlakte B als enige rand heeft. [35]

4.5.2 Wiskundige fundering van het no boundary-voorstel

Don Page, voormalig student van Hawking, schreef over het no boundary-voorstel het volgende:

Ook al oogt het voorstel op het eerste gezicht conceptueel duidelijk (tenminste, voor wie de concepten begrijpt en zich niet druk maakt om details), als je naar de details kijkt, merk je dat het voorstel in wiskundig opzicht niet nauwkeurig is. [1] (p. 148-149)

Bovendien heeft Jonathan Halliwell, voormalig PhD-student van Hawking, gezegd dat het lastig om Ψ_{NB} een wiskundige betekenis te geven. Het no boundary-voorstel is inderdaad wiskundig niet goed gedefinieerd. Dit heeft te maken met de problemen rondom een rigoureuze definitie van de padintegraal in de kwantumkosmologie, namelijk dat er gesommeerd wordt over mogelijke variëteiten en metriecken in plaats van over paden van deeltjes. Voor meer informatie over de wiskundige gebreken van het no boundary-voorstel, zie [47]. Het gebrek aan wiskundige degelijkheid hangt samen met het feit dat Hawking zijn schrijfvaardigheid verloor voordat hij aan het voorstel begon. Hierdoor kon hij niet op een adequate manier wiskunde bedrijven en was zijn voorstel met name gebaseerd op intuïtie. Bovendien kan men stellen dat Hawkings ambitie om Feynmans padintegralenmethode toe te passen en de initiële singulariteit van het universum weg te werken groter was dan Hawkings verlangen naar een solide wiskundige fundering van het NB.

4.6 Ontvangst in de kosmologische gemeenschap

Hawking zag zijn no boundary-voorstel als zijn belangrijkste bijdrage aan de natuurkunde. Echter, waarschijnlijk waren er weinig natuurkundigen die deze mening met

hem deelden. Zo zei de natuurkundige Neil Turok (1958 -):

Ik zou zeggen dat negentig procent van de kosmologen en theoretisch natuurkundigen zich hierover geen mening heeft gevormd. Van degenen die dat wel doen, zegt negentig procent dat ze het er waarschijnlijk niet mee eens kunnen zijn, of dat ze menen dat er een probleem mee is. [1] (p. 149)

Het voorstel werd dus grotendeels genegeerd in de kosmologische gemeenschap en de natuurkundigen die het voorstel tot zich namen, waren meestal kritisch. Er waren een aantal kritiekpunten waardoor het voorstel door weinig natuurkundigen serieus werd genomen.

Ten eerste, de wiskundige problemen die aan het no boundary-voorstel vastplakten was een belangrijke reden waardoor het voorstel niet meer aanhang had. Ten tweede dacht Hawking in eerste instantie dat het NB een hele kleine inflatiespurt voorschreef en daarmee een Big Crunch zou veroorzaken. Aangezien dit niet overeenkwam met ons universum, waren er weinig natuurkundigen die het voorstel aannamen. Bovendien kon deze kleine inflatiespurt twee belangrijke problemen in de kosmologie niet uitleggen: het *flatness*- en *horizon problem*. Het flatness problem bestaat uit de vraag waarom het universum vrijwel geen kromming lijkt te hebben, aangezien dit een erg specifieke dichtheid vereist in het heelal. Het horizon problem gaat over het feit dat het lijkt alsof verschillende regionen van het universum met elkaar in causaal contact hebben gestaan in het verleden. Dit gaat ook over regionen die zo ver van elkaar af staan dat zelfs licht niet tussen beide regionen heeft kunnen reizen in de geschiedenis van het heelal. Er wordt gedacht dat beide problemen opgelost kunnen worden door de inflatietheorie. Daarvoor is echter wel een inflatiespurt nodig die groot genoeg is om beide problemen te verklaren. De inflatiespurt die het no boundary-voorstel voorschreef voldeed niet om deze problemen te verhelpen.³¹

Daarnaast was er kritiek op de overgang van de reële tijd naar de imaginaire tijd. Doordat het no boundary-voorstel enkel uitspraken deed over het universum in de imaginaire tijd, was het moeilijk te interpreteren wat het voorstel daadwerkelijk zei over ons universum. Ons universum heeft namelijk een lorentziaanse metriek, die afwijkt van de euclidische metriek die het no boundary-universum heeft. De riemannse meetkunde die het no boundary-universum beschrijft, gedraagt zich compleet anders dan lorentziaanse meetkunde. Hierdoor is het lastig om te zien wat het no boundary-voorstel zegt over ons heelal.

Het feit dat het voorstel met scepsis werd ontvangen in de kosmologische gemeenschap bleek ook toen Hawking en Hartle hun manuscript wilden publiceren waarin het voorstel geïntroduceerd werd. Ze wilden hun manuscript, genaamd *The Wave Function of the Universe* (1983), laten publiceren in het tijdschrift *Physical Review*. Dit liep echter moeizaam. De eerste referent vond dat ze de padintegralenmethode van Feynman op een absurde wijze hadden geëxtrapoleerd naar de kosmologie. Als reactie hierop vroegen Hawking en Hartle om een *second opinion*, die uiteindelijk leidde tot de publicatie.

³¹[24] (p. 159-160), [46] (p. 4)

De noodzaak van een second opinion om tot de publicatie te komen hangt samen met de algemene kritische houding die er was jegens het no boundary-voorstel.³²

4.7 Relatie no boundary-voorstel en theologie

Zoals al vermeld is in de inleiding van deze scriptie, gaf Hawking een theologische draai aan zijn no boundary-voorstel. In het vervolg zal deze draai geanalyseerd en geplaatst worden in de context van de biografie van de persoon en wetenschapper Hawking die in Hoofdstukken 2 en 3 is geschetst. Centrale vragen in deze sectie zijn: Waarom hechtte Hawking zoveel waarde aan het NB? Wat voor theologische conclusie trok Hawking uit het NB? Waarom deed hij dat? Hoe kunnen we dit plaatsen in de biografie van Hawking? En welke kritiek was er op de theologische conclusie van Hawking?

4.7.1 Theologische conclusie Hawking

De meeste collega's van Hawking namen het no boundary-voorstel niet serieus. Dit kwam omdat het no boundary-voorstel zowel aan wiskundige als filosofische kant rammelde. Desondanks zag Hawking het no boundary-voorstel als zijn belangrijkste bijdrage aan de kosmologie. Om dit te begrijpen, is het belangrijk om te kijken naar de implicaties van het NB. Aangezien het NB enkel sommeerde over compacte euclidische metriekruimtes, voorkwam het volgens Hawking de initiële singulariteit van het universum.³³ De initiële singulariteit leidde tot het 'problem of creation'. Dit was een doorn in het oog voor Hawking. Zoals zijn collega en voormalig student Thomas Hertog het verwoordde, wilde Hawking "niet langer door zijn eigen singulariteitsstelling gegijzeld worden", aangezien dit de stelling was die de initiële singulariteit voorspelde in het oerknalmodel.³⁴

Wat vond Hawking ingewikkeld aan de initiële singulariteit? Aangezien de singulariteit leidde tot het 'problem of creation', konden theologen beweren dat het universum geschapen was door God. Deze kritiek werd ook aangedragen door Hoyle in het debat rondom het oerknalmodel en het steady state-model. Hawking wilde geen plaats laten bestaan voor theologische en metafysische elementen in zijn no boundary-voorstel.

Dit is precies wat Hawking bereikte met zijn NB. Aangezien het NB het 'problem of creation' omzeilde, was er binnen het NB geen ruimte voor theologie of metafysica volgens Hawking. Dit is tevens de theologische conclusie die hij trok uit zijn NB: de theorie sluit het bestaan van een god uit:

So long as the universe had a beginning, we could suppose it had a creator. But if the universe is really completely self-contained, having no boundary or edge, it would have neither beginning nor end: it would simply be. What place, then, for a creator? [8] (p. 160-161)

³²[24] (p. 130)

³³Mits men door de imaginaire tijdbril kijkt.

³⁴[1] (p. 16, 246), [24] (p. 114)

Hij nam nog wel de mogelijkheid in beschouwing dat God enkel de natuurwetten heeft kunnen bepalen, maar daar zette hij zijn vraagtekens bij.³⁵ In essentie was Hawkings argument als volgt: in een kosmologisch model is de enige rol die voor een god zou zijn weggelegd het kiezen van de randvoorwaarden, oftewel de initiële staat van het universum. Aangezien het NB geen randvoorwaarden bevatte, was er ook geen plaats voor een god.

4.7.2 Waarom trok Hawking theologische conclusies uit het voorstel?

Om de vraag te beantwoorden waarom Hawking deze theologische conclusie trok uit zijn NB, moeten we terug naar Hawkings biografie. In Sectie 3.3 zijn al een aantal mogelijke verklaringen besproken voor het feit dat Hawking zich fel uitsprak over religie, zoals Hawkings verlangen naar controverse en aandacht. Deze verklaringen hangen ook samen met de theologische conclusie die hij uit het NB trok. Zo kreeg Hawkings conclusie dat God niet bestaat veel aandacht in de media, wat leidde tot controverse. Een ander mogelijk motief voor de theologische conclusie die Hawking trok uit zijn voorstel is laten zien dat wetenschap en religie onverenigbaar waren. Hij wilde niet enkel de religieuze vraag of er een god bestaat negeren, maar hij wilde deze ook kunnen beantwoorden met een "nee". Dit is precies wat hij deed met het no boundary-voorstel.

Hoewel het NB niet primair werd opgesteld met de intentie om het te gebruiken als een argument tegen het bestaan van God, is het denkbaar dat Hawking deze conclusie wel al klaar had liggen voordat hij het NB opstelde. Hawkings directe motivatie voor het voorstel was zijn liefde voor Feynmans padintegralenmethode. Echter, Hawking was actief bezig om in zijn no boundary-universum de singulariteit aan het begin van het heelal weg te werken. Dit deed hij vanwege zijn afschuw voor theologische interventie. Hij had tevens al voor de publicatie van het voorstel zijn ongenoegen uitgesproken over de initiële singulariteit. Dit kan gezien worden als een teken dat Hawking naar zijn theologische conclusie aan het toewerken was. Hawking presenteerde zich daarentegen als iemand die puur op wetenschappelijke basis theorieën aannam en daarbij geen subjectieve, filosofische of (a)theologische motieven mee liet spelen. Dit beeld dat Hawking probeerde te schetsen over zichzelf lijkt dus in te gaan tegen zijn werkhouding ten aanzien van het NB.

Daarnaast was het no boundary-universum niet gebaseerd op een goede wiskundige fundering. Desondanks trok Hawking de conclusie uit zijn voorstel dat God niet bestaat. Dit kwam vermoedelijk doordat hij zo veel waarde hechtte aan de theologische implicaties, dat het gebrek aan wiskundige degelijkheid hem er niet van kon weerhouden om deze implicaties expliciet te benoemen, bijvoorbeeld in *A Brief History of Time*.

4.7.3 Kritiek van wetenschapsfilosofen en theologen

Naast de kritiek die natuurkundigen hadden op het no boundary-voorstel zelf, was er ook kritiek op het verband dat Hawking trok tussen zijn voorstel en theologie. Zo was

³⁵[8] (p. 208)

er in de jaren negentig een discussie tussen de filosofen William Lane Craig en Quentin Smith (1952 - 2020) over de religieuze implicaties van het no boundary-universum.³⁶ Craig had kritiek op de manier waarop Hawking theologie verbond met zijn voorstel. Volgens Craig was Hawkings uitspraak dat er geen ruimte zou zijn voor God in het no boundary-universum in strijd met HP. Als volgens HP natuurkundige theorieën inderdaad enkel wiskundige modellen zouden zijn die geen uitspraken kunnen doen over de realiteit achter de waarneming, hoe kon Hawking dan uit zijn theorie conclusies trekken over het bestaan van God? Om deze conclusie toch te trekken, moest Hawking er volgens Craig vanuit gaan dat het no boundary-voorstel de realiteit beschreef. Dit betekende echter ook dat de realiteit beschreven zou worden aan de hand van de imaginaire tijd en Feynmans "som over geschiedenissen-methode". Hier was Craig kritisch op, tevens omdat Hawking zelf heeft gezegd dat het gebruik van imaginaire tijd enkel een wiskunde truc was en dat het zinloos was om af te vragen of de 'reële' of de imaginaire tijd correspondeerde met de realiteit.³⁷

Bovendien was Craig kritisch op het feit dat Hawking zich, volgens Craig, bezighield met metafysica, terwijl Hawking zich hier juist tegen leek te verzetten. Het feit dat Hawking speculeerde over de aard van de ruimte en de tijd in zijn no boundary-voorstel zag Craig als een teken dat Hawking zich wel degelijk bezighield met metafysica. Craig was daarom van mening dat Hawking zijn denkbeelden moest verdedigen met filosofische argumenten, in plaats van filosofie af te doen als een nutteloze exercitie.³⁸³⁹

Hoewel Smith, net zoals Craig, vond dat Hawking geen filosofische argumenten aandroeg voor zijn standpunt dat er geen plaats zou zijn voor een schepper in zijn voorstel, probeerde Smith, in tegenstelling tot het bekritisieren van het gebrek aan filosofische argumentatie van Hawking, deze argumentatie juist aan te leveren. Dit deed hij in zijn artikel [49] (1994). Volgens hem waren klassiek theïsme en de kwantumkosmologie van Hawking onverenigbaar. Onder klassiek theïsme viel voor Smith het geloof in een alwetende en almachtige god, een god die bovendien het universum gecreëerd heeft. Het argument van Smith berustte op het feit dat het no boundary-voorstel impliceerde dat er een kans kleiner dan 1 was dat het universum ontstond met een metriek h_{ij} en materieveld ϕ . Aangezien God almachtig is volgens Smiths interpretatie van klassiek theïsme, zou God Zijn gewenste universum met een 100% kans kunnen scheppen. Dit was volgens Smith in strijd met de probabilistische aard van de no boundary-golffunctie. Hierdoor zou het no boundary-voorstel klassiek theïsme uitsluiten.⁴⁰

Daarnaast is het interessant om op te merken dat Hawking in zijn no boundary-voorstel gebruikmaakte van de imaginaire tijd. De theologische conclusie die Hawking

³⁶De discussie werd gevoerd in een reeks van papers, zie [33], [48], [49], [50], [51].

³⁷[33]

³⁸Craig had daarnaast ook kritiek op de analyse van de golffunctie van het universum van Hawking. Craig beweerde dat deze analyse het zogenaamde *Many Worlds Interpretation* veronderstelde. Volgens hem was er geen reden om deze interpretatie van de kwantummechanica te verkiezen boven de *Copenhagen Interpretation* [48] (p. 294).

³⁹[33] (p. 487)

⁴⁰[49] (p. 236-237)

trok uit het NB viel alleen te trekken door het universum in de imaginaire tijd te beschouwen. Enkel en alleen in de imaginaire tijd bevat het no boundary-universum namelijk geen initiële singulariteit. Aangezien Hawking veel waarde leek te hechten aan de theologische implicatie, is het aannemelijk dat hij de imaginaire tijd beschouwde als de tijd die de werkelijkheid beschrijft. Dit blijkt ook uit de volgende uitspraak van Hawking:

Je zou kunnen stellen dat kwantumgravitatie en in feite heel de natuurkunde zich eigenlijk in imaginaire tijd afspelen en dat het enkel een gevolg is van onze perceptie dat we het heelal in reële tijd interpreteren. [24] (p. 133)

Deze opvatting zou echter ingaan tegen Hawkings uitspraak dat, aangezien natuurkundige theorieën enkel wiskundige modellen zijn, het betekenisloos is om af te vragen of de reële of imaginaire tijd echt is.⁴¹ Aan de ene kant vond hij dus dat deze vraag betekenisloos was, terwijl hij aan de andere kant afhankelijk leek te zijn van het antwoord op deze vraag om daadwerkelijk theologische conclusies te kunnen trekken.

Deze en soortgelijke kritiek van wetenschapsfilosofen leken door Hawking te worden genegeerd. Dit hangt samen met Hawkings negatieve opvatting over wetenschapsfilosofen.

⁴¹[8] (p. 159)

5 Conclusie

In dit project zijn de verbanden die Hawking trok tussen kosmologie en theologie onderzocht. Vragen die hierbij centraal stonden waren: Waarom sprak Hawking zich uit tegen religie? Waarom trok hij verbanden tussen zijn kosmologische werk en theologie? En had zijn opvatting over religie invloed op zijn kosmologische werk? Om deze vragen te beantwoorden, is er gekeken naar de biografie van Hawking. Hieruit volgde dat Hawking zich sinds zijn jeugd in het privé-domein ook al uitsprak tegen religie. Dit kwam met name terug in zijn eerste huwelijk met Jane Hawking. Stephen en Jane hadden regelmatig discussies over het anglicaans christelijke geloof van Jane. Hieruit volgde het beeld van Hawking als een man die zich voortdurend wilde uitspreken tegen theologie.

Bovendien is er gekeken naar de status van het christendom in het Verenigd Koninkrijk gedurende Hawkings carrière. De invloed van de anglicaanse kerk in het Verenigd Koninkrijk nam in de jaren zestig sterk af en nam vervolgens nog verder af in de opvolgende decennia. Dit hangt vermoedelijk samen met het feit dat Fred Hoyle, die zich ook fel uitsprak tegen religie en hier tevens zijn kosmologische werk bij betrok, meer kritiek kreeg vanuit het algemene publiek over zijn anti-religieuze standpunten dan dat Hawking kreeg. Bovendien zijn er interessante parallellen te trekken tussen Hoyle en Hawking: ze trokken beiden theologische conclusies uit kosmologische modellen en hadden beiden soortgelijke kritiek op het oerknalmodel. Hoyle's alternatief hiervoor was het steady state-model, Hawkings alternatief was het no boundary-voorstel.

Voordat Hawking aan zijn kosmologische carrière begon, was er tussen 1948 - 1965 een impasse binnen de kosmologie. Er was in die tijd namelijk geen standaardmodel binnen de kosmologie. Er waren twee mogelijke kandidaten voor de titel van standaardmodel: het oerknalmodel en het steady state-model. In de periode 1948 - 1965 was er nog geen doorslaggevende waarneming gedaan die duidelijk één van de modellen uitsloot. Hoewel er wel al andere waarnemingen waren gedaan die de geloofwaardigheid van het steady state-model deden afzwakken, kwam de beslissende waarneming in 1965 met de kosmische achtergrondstraling. Het oerknalmodel is sindsdien het standaardmodel binnen de kosmologie. Hawking zat middenin deze impasse, onder andere aangezien de begeleider van zijn proefschrift, Dennis Sciama, zelf een prominent aanhanger was van de steady state-theorie. Het is hierdoor denkbaar dat Hawkings afkeer tegen het oerknalmodel deels geïnspireerd was door de discussies rondom het oerknal- en steady state-model.

In dit onderzoek stond het no boundary-voorstel van Hawking en Hartle centraal, aangezien Hawking een duidelijke theologische draai gaf aan deze theorie. Het voorstel betrof een kwantumkosmologisch model van het universum, gebaseerd op Feynmans padintegraalformalisme. Ondanks het feit dat het voorstel wiskundig gezien niet

goed gedefinieerd was, trok Hawking vanuit het voorstel de conclusie dat God niet bestond. Dit kon verklaard worden door te kijken naar zijn biografie, met name het feit dat Hawking in het privédoein vermoedelijk een verlangen voelde om zijn atheïsme uit te dragen en zich expliciet uit te spreken tegen theologie. Daarnaast omzeilde het no boundary-voorstel de initiële singulariteit aan het begin van het universum. Hier hechtte Hawking veel waarde aan, aangezien de initiële singulariteit er voor zou zorgen dat er geen alomvattende theorie van het universum zou bestaan en dat er aanspraak zou moeten worden gemaakt op theologie of metafysica.

Bovendien leek er een tegenstrijdigheid te zijn tussen Hawkings opvatting over wetenschap en de theologische draai die hij gaf aan het no boundary-voorstel. Hij beweerde namelijk dat natuurkundige theorieën enkel wiskundige modellen waren die geen uitspraak konden doen over de dieperliggende realiteit achter de waarneembare realiteit. Desondanks vond Hawking dat zijn no boundary-theorie wel uitspraken deed over de dieperliggende realiteit. Daarnaast is het opmerkelijk dat hoewel Hawking een negatief beeld had van wetenschapsfilosofie en -filosofen, hij zelf ook wetenschapsfilosofische posities leek in te nemen.

Ter conclusie kan er gesteld worden dat Hawkings atheïstische opvattingen invloed lijken te hebben gehad op zijn kosmologische werk. Dit komt met name terug in zijn no boundary-voorstel, waarbij het leek alsof hij naar zijn theologische conclusie aan het toewerken was. Het feit dat Hawking verbanden legde tussen theologie en kosmologie en zich in het algemeen fel uitsprak tegen religie, kan begrepen worden vanuit zijn biografie.

In een mogelijk vervolgonderzoek zouden de wiskundige details van het no boundary-voorstel verder onderzocht kunnen worden, om een beter beeld te krijgen van de gebrekkige wiskundige fundering van het voorstel. Bovendien zou het interessant kunnen zijn om interviews te houden met kennissen van Hawking, om zo een beter beeld te krijgen van hem. Door deze nieuwe invalshoek zou de analyse die in dit project is gemaakt kunnen worden uitgebreid. Als laatste zou er gekeken kunnen worden naar Hawkings holografische kosmologische model waar hij samen met Thomas Hertog aan werkte tot aan zijn dood in 2018. Wellicht verbond Hawking ook theologische conclusies aan dit model, die zouden kunnen leiden tot een interessant vervolgonderzoek.

6 Dankwoord

Ik zou graag mijn beide begeleiders, prof. dr. van Dongen en prof. dr. Landsman willen bedanken voor hun bijdrage aan dit project. De begeleiding en feedback die ik heb mogen ontvangen hebben mij erg geholpen in het proces. Bovendien zou ik Dylan Goudberg willen bedanken voor zijn hulp met Hoofdstuk 4, Raf Bocklandt voor zijn advies over Hoofdstuk 4 en Jessie Volkstedt voor het helpen met de verwoording van mijn scriptie.

Bibliografie

- [1] Seife, C. (2021). *Hawking Hawking: Een wetenschappelijk fenomeen ontrafeld*, atlas contact
- [2] Hawking, J. (1999). *Music to Move the Stars. A life with Stephen*. Macmillan
- [3] Ferguson, K. (2024, 20 februari). Stephen Hawking, "Equal to Anything!" [Excerpt]. *Scientific American*. Geraadpleegd van <https://www.scientificamerican.com>
- [4] Hawking, S. (2018). *De antwoorden op de grote vragen*. Spectrum
- [5] Hawking, S. W. (1966). *Properties of expanding universes* [Apollo - University of Cambridge Repository]. <https://doi.org/10.17863/CAM.11283>
- [6] *Wat is ALS - Stichting ALS Nederland*. (2024, 11 juni). Stichting ALS Nederland. <https://www.als.nl/wat-is-als/>
- [7] Hawking, S. & Penrose, R. (2015). *The Nature of Space and Time*. Princeton University Press
- [8] Hawking, S. (2016). *A Brief History of Time: From the Big Bang to Black Holes*. Bantam Press.
- [9] Moorhead, J. (2015, 16 mei). Jane Hawking: 'There were four of us in our marriage'. *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/lifeandstyle/2015/may/16/jane-hawking-there-were-four-of-us-in-marriage-stephen-hawking-theory-of-everything>
- [10] Sandle, P. (2018, 14 maart). 'Stephen Hawking's voice was his tool and his trademark'. *Reuters*. <https://www.reuters.com/article/lifestyle/science/stephen-hawkings-voice-was-his-tool-and-his-trademark-idUSKCN1GQ2XC/>
- [11] Heyck, T. W. (1996). The Decline of Christianity in Twentieth-Century Britain. In *Albion: A Quarterly Journal Concerned With British Studies* (pp. 437–453). The North American Conference on British Studies. <https://www.jstor.org/stable/4052171>
- [12] McLeod, H. (2005). The Religious Crisis of the 1960s. *Journal Of Modern European History / Zeitschrift Für Moderne Europäische Geschichte / Revue D'histoire Européenne Contemporaine*, 3–3(2), 205–230. <https://www.jstor.org/stable/10.2307/2626581>

- [13] McLeod, H. (2001). The Sixties: Writing the Religious History of a Crucial Decade. In *Kirchliche Zeitgeschichte* (Nummer 1, pp. 36–48). Vandenhoeck & Ruprecht (GmbH & Co. KG). <https://www.jstor.org/stable/43100019>
- [14] Brown, C. G. (2009). The Death of Christian Britain. In *Routledge eBooks*. <https://doi.org/10.4324/9780203879436>
- [15] Crockett, A. & Voas, D. (2006). Generations of Decline: Religious Change in 20th-Century Britain. In *Journal For The Scientific Study Of Religion* (Vols. 45–45, Nummer 4, pp. 567–584). <https://www.jstor.org/stable/4621936>
- [16] Norris, P. & Inglehart, R. (2004) *Sacred and Secular: Religion and Politics Worldwide*. Cambridge University Press
- [17] *In U.S., Decline of Christianity Continues at Rapid Pace: An update on America's changing religious landscape*. (2019, 17 oktober). Pew Research Center. <https://www.pewresearch.org/religion/2019/10/17/in-u-s-decline-of-christianity-continues-at-rapid-pace/>
- [18] Bruce, S. & Voas, D. (2019). Religion, Identity, behaviour and belief over two decades. In *British Social Attitudes: The 36th Report*
- [19] Lisle, J. (2006). *Taking back astronomy: The Heavens Declare Creation*. New Leaf Publishing Group.
- [20] Kragh, H. (2004). Matter And Spirit in the Universe - Scientific and Religious Preludes to Modern Cosmology. In *History of modern physical sciences*. <https://doi.org/10.1142/9781860946042>
- [21] Halvorson, H. & Kragh, S. (2021). Cosmology and Theology. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Winter 2021 Edition). <https://plato.stanford.edu/archives/win2021/entries/cosmology-theology/>
- [22] Kragh, H. (2007). *Conceptions of Cosmos: From Myths to the Accelerating Universe: A History of Cosmology*. Oxford University Press.
- [23] Hetherington, N. S. (1993). *Cosmology: Historical, Literary, Philosophical, Religious and Scientific Perspectives*. CRC Press.
- [24] Hertog, T. (2023) *Het ontstaan van de tijd: Mijn reis met Stephen Hawking voorbij de oerknal*. Spectrum
- [25] Whitrow, G. J. & Bondi, H. (1954). Is Physical Cosmology a Science?, *The British Journal for the Philosophy of Science* (Vol. 4, No. 16, pp. 271-283) <https://www.jstor.org/stable/686077>
- [26] *Address to the Plenary Session and to the Study Week on the Subject 'Cosmology and Fundamental Physics'*. (z.d.). <https://www.pas.va/en/magisterium/saint-john-paul-ii/1981-3-october.html>

- [27] Boyle, A. (2014, 24 september). "I'm an Atheist": Stephen Hawking on God and Space Travel. *NBC News*. <https://www.nbcnews.com/science/space/im-atheist-stephen-hawking-god-space-travel-n210076>
- [28] Ducharme, J. (2018, 14 maart). Stephen Hawking Was an Atheist. Here's What He Said About God, Heaven and His Own Death. *TIME*. <https://time.com/5199149/stephen-hawking-death-god-atheist/>
- [29] ABC News. (2010, 1 oktober). Stephen Hawking on Religion: "Science Will Win". <https://abcnews.go.com/WN/Technology/stephen-hawking-religion-science-win/story?id=10830164>
- [30] White, M., & Gribbin, J. R. (2015). *Stephen Hawking: A Life in Science*. Little, Brown Young Readers.
- [31] Picheta, R. (2018, 17 oktober). 'There is no God,' says Stephen Hawking in final book. *CNN*. <https://edition.cnn.com/2018/10/16/health/stephen-hawking-final-book-intl/index.html>
- [32] Chakravartty, A. (2017). Scientific Realism. *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <https://plato.stanford.edu/entries/scientific-realism/>
- [33] Craig, W. L. (1990). "What Place, Then, for a Creator?": Hawking on God and Creation. *The British Journal For The Philosophy Of Science*, 41(4), 473–491. <https://www.jstor.org/stable/687861>
- [34] *Stephen Hawking: Milestones of a life in physics* — Features: Faculty Insights. (z.d.). <https://www.maths.cam.ac.uk/features/stephen-hawking-milestones-life-physics>
- [35] Halliwell, J. J. (2009). Introductory Lectures on Quantum Cosmology (1990). *arXiv (Cornell University)*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.0909.2566>
- [36] Waterced, Big Bang Singularity and Hartle-Hawking State diagram. CC BY-SA 4.0. *Wikimedia Commons*. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Big_Bang_Singularity_and_Hartle-Hawking_State.jpg
- [37] *Stephen Hawking Estate*. (z.d.). <https://www.hawking.org.uk/in-words/lectures/the-beginning-of-time>
- [38] Feynman, R. P., Hibbs, A. R., & Styer, D. F. (Ed.) (2010). *Quantum Mechanics and Path Integrals*. Courier Corporation.
- [39] Feynman, R. P. (1948). Space-Time Approach to Non-Relativistic Quantum Mechanics. *Reviews Of Modern Physics*, 20(2), 367–387. <https://doi.org/10.1103/revmodphys.20.367>
- [40] Vissers, T. (2024). *The Path to and from Graßmann Numbers in QFT*. Radboud Universiteit

- [41] Narlikar, J. V. & Padmanabhan, T. (1983). Quantum cosmology via path integrals. *Physics Reports*, 100(3), 151–200. [https://doi.org/10.1016/0370-1573\(83\)90098-4](https://doi.org/10.1016/0370-1573(83)90098-4)
- [42] Roepstorff, G. (1994). *Path Integral Approach to Quantum Physics: An Introduction*. Springer Verlag.
- [43] Boutros, D. W. (2020). *Mathematical aspects of the Feynman path integral*. Rijksuniversiteit Groningen
- [44] Hall, B. C. (2013). Quantum Theory for Mathematicians. In *Graduate texts in mathematics*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7116-5>
- [45] Hartle, J. B. & Hawking, S. W. (1983). Wave function of the Universe. *Physical Review. D. Particles, Fields, Gravitation, And Cosmology/Physical Review. D. Particles And Fields*, 28(12), 2960–2975. <https://doi.org/10.1103/physrevd.28.2960>
- [46] Flinn, G. (2020). *The Wave Function of The Universe* (Door J. J. Halliwell, Imperial College London, New York University, & Imperial College London).
- [47] Penrose, R. (2007). *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*. National Geographic Books.
- [48] Craig, W. L. (1997). Hartle-Hawking Cosmology and Atheism. In *Analysis* (pp. 291–295). Oxford University Press on behalf of The Analysis Committee. <https://www.jstor.org/stable/3328091>
- [49] Smith, Q. (1994). Stephen Hawking’s Cosmology and Theism. In *Analysis* (Vol. 54, Nummer 4, pp. 236–243). <https://www.jstor.org/stable/3328811>
- [50] Smith, Q. (1997). Quantum Cosmology’s Implication of Atheism. In *Analysis* (Vols. 57–57, Nummer 4, pp. 295–304). Oxford University Press on behalf of The Analysis Committee. <https://www.jstor.org/stable/3328092>
- [51] Smith, Q. (1998). Why Stephen Hawking’s Cosmology Precludes a Creator. *Philo*, 1(1), 75–93. <https://doi.org/10.5840/philo1998117>

Populaire samenvatting

Op de middelbare school wordt wetenschap vaak geportretteerd als een opeenstapeling van kennis. Zo wordt natuurkunde in tekstboeken vaak gepresenteerd aan de hand van allerlei wetten: de wetten van Newton voor de klassieke mechanica, de wet van Snellius voor optica, de kwadratenwet voor astrofysica en nog veel meer. Er wordt hierdoor soms het idee geschetst dat natuurkundige theorieën enkel tot stand komen uit waarnemingen. Dit is echter niet het geval.

Wetenschapsgeschiedenis is een tak van de geschiedenis die de ontwikkeling van de wetenschap bestudeert. Als men de geschiedenis van de wetenschap goed bestudeert, ontstaat het beeld dat de wetenschap niet een opeenstapeling is van kennis die puur gebaseerd is op waarnemingen. Zo spelen onder andere persoonlijke, sociale, maatschappelijke of filosofische factoren een rol in de wetenschapsgeschiedenis. Om een beter beeld te krijgen van wat wetenschap daadwerkelijk is en hoe het tot stand komt, is het van belang om deze factoren ook te onderzoeken.

In dit project heb ik specifiek gekeken naar Stephen Hawking, een van de bekendste wetenschappers van de afgelopen honderd jaar. Hoewel Hawking zich presenteerde als een wetenschapper die puur op basis van waarnemingen en wetenschappelijke methodes een theorie aannam, wordt uit mijn onderzoek duidelijk dat dat zeker niet het geval is. Hawkings atheïsme leek namelijk een significante rol te spelen in zijn kosmologische werk. Kosmologie is de tak van de natuurkunde die de globale structuur en evolutie van het heelal bestudeert. Als het gaat om het belang van Hawkings religieuze opvattingen bij zijn kosmologische werk, dan staat het zogenaamde no boundary-voorstel van hem centraal. Dit is een model van het universum die gebaseerd is op zowel de algemene relativiteitstheorie van Albert Einstein, als de kwantummechanica. Hawking heeft gezegd dat zijn no boundary-voorstel impliceert dat er geen schepper van het universum kan bestaan. Twee vragen die hierbij opkomen zijn: Waarom vond Hawking dit? En waarom probeert Hawking religie te verbinden met kosmologie?

Om met de eerste vraag te beginnen, Hawkings conclusie dat er geen schepper kon zijn in zijn no boundary-universum hangt samen met hoe het vroege universum eruitzag in het no boundary-model. In het oerknalmodel, het standaardmodel binnen de kosmologie tegenwoordig, begint het universum met de oerknal. Tijdens de oerknal was het universum zo dicht op elkaar gedrukt dat er een punt was met een oneindige dichtheid. Dit wordt ook wel een singulariteit genoemd. De wetten van de natuurkunde die wij kennen breken af in een singulariteit, waardoor we niet kunnen voorspellen wat er gebeurt in een singulariteit. Aangezien het oerknalmodel begint in een singulariteit, is het dus niet mogelijk om met de huidige natuurwetten te verklaren waar het universum vandaan komt. Theologen zouden kunnen beweren dat God het universum heeft geschapen, en de wetenschap kan er geen wetenschappelijke verkla-

ring tegenover zetten. Voor Hawking was dit een doorn in het oog en hij wilde daarom deze singulariteit vermijden. Dit is precies wat het no boundary-voorstel deed: het vermeed de singulariteit aan het begin van het heelal. Hierdoor vond Hawking dat er geen ruimte was voor God in zijn kosmologische model.

De tweede vraag valt te beantwoorden door te kijken naar de biografie van Hawking. Hawking was atheïstisch opgevoed en sprak zich in zijn jeugd al uit tegen religie. Bovendien had hij met zijn eerste vrouw Jane vaak discussies over religie, aangezien Jane christelijk was. Als je goed naar de biografie van Hawking kijkt, lijkt het erop dat hij altijd al een verlangen had om religieuze discussies aan te gaan en te laten zien dat religie geen waarheden bevat. Hierdoor valt het beter te verklaren waarom hij zelfs zijn kosmologische werk verbond met religie, aangezien hij zo kon laten zien dat wetenschap en religie onverenigbaar waren.