

# Fragment “Natuurlijk niet!” (Roel Andringa-Boxum)

## Mythe 31

### Hawkingstraling bestaat uit virtuele deeltjes die vlak bij de waarnemershorizon van het zwarte gat ontstaan en ontsnappen

Op 8 januari 1942 kwam Stephen Hawking ter wereld, op de driehonderdste sterfdag van Galileo Galilei. En op 14 maart 2018 verliet Hawking onze wereld weer, op de dag af drieënzestig jaar na Einsteins laatste verjaardag. Het is in een wereld die tegenwoordig weer vaak als plat wordt bestempeld dus niet zo gek dat sommige mensen vermoeden dat Stephen Hawking een reïncarnatie van Galileo Galilei was (zie figuur 48).

#### Mensen vragen ook

Is Newton reincarnation of Galileo?



Was Stephen Hawking's born normal?



Was Stephen Hawking born rich?



What did Stephen Hawking discover?



Feedback

*Figuur 1 De prangende vragen die worden opgeworpen wanneer je Stephen Hawking googelt.*

Dankzij zijn neurologische aandoening ALS en zijn karakteristieke robotstem was Hawking binnen de natuurkundegemeenschap al een bijzondere verschijning, maar zijn bestseller *A Brief History of Time* uit 1988 en een goede pr-campagne maakten hem wereldberoemd. En niet alleen voor het grote publiek was hij opmerkelijk; binnen zijn eigen vakgebied was hij ook een begrip vanwege zijn scherpe geest, al kun je Hawkings heldenstatus buiten de natuurkundige gemeenschap gerust een mythe noemen wanneer je deze vergelijkt met zijn wetenschappelijke verdiensten.

Vanwege deze mythische heldenstatus maak ik tijdens lessen graag indruk met mijn Hawking-anekdote: aan het einde van mijn promotieonderzoek heb ik met Hawking

gedineerd en zelfs een goocheltruc voor hem gedaan. Mijn promotor had namelijk een nauwe samenwerking met een directe collega van Hawking, en toen deze collega de respectabele leeftijd van zestig jaar bereikte werd er een conferentie voor hem georganiseerd. Ik mocht als verzetje met mijn promotor mee naar deze conferentie en bijbehorend diner in Cambridge, in een indrukwekkende zaal die de sfeer van Harry Potter ademde. Tijdens het conferentiediner kwam er een goochelaar opdagen die zijn trucs pal voor de neus van Hawking uitvoerde. Tijdens één van deze trucs had hij een proefkonijn nodig, en uit de honderd aanwezige natuurkundigen werd juist ik gekozen. Het pakje kaarten kreeg ik als aandenken mee en maakt sindsdien deel uit van mijn nerdmemorabilia.<sup>1</sup>

Hawking hield zich vooral bezig met de technische aspecten van Einsteins zwaartekrachtstheorie, de kosmologie die daarop stoelt en de zwarte gaten die door deze theorie worden voorspeld. Maar Hawking keek verder dan Einsteins zwaartekrachtstheorie. Een groot deel van zijn carrière was namelijk gewijd aan proberen te begrijpen hoe je de kwantummechanica en Einsteins zwaartekrachtstheorie kunt combineren. De details hiervan zijn nog steeds een raadsel, en Hawking heeft belangrijke bijdragen aan ons begrip van deze zogenaamde 'kwantumzwaartekracht' geleverd.

In dit hoofdstuk gaan we ons richten op de belangrijkste voorspelling uit zijn hele carrière: dat zwarte gaten minder zwart zijn dan Einsteins zwaartekrachtstheorie ons wil doen laten geloven. Dat brengt ons bij een nogal complex fenomeen: de zogenaamde *Hawkingstraling*. En we zagen al in mythe 14 over de verklaringen van lift dat mensen bij complexe fenomenen behoefte hebben aan een snapgevoel, waardoor de kort-door-de-bocht verklaringen als paddenstoelen uit de grond schieten. We gaan in dit hoofdstuk de ware aard van Hawkingstraling uit de doeken doen.

Hawkings bestseller *A Brief History of Time* kwam al een paar keer voorbij in dit boek. Ik kocht het boek, in het Nederlands simpelweg *Het Heelal* geheten, toen ik vijftien was. Het boek kostte toen al iets van vijfendertig gulden, een investering waarmee ik ook twee zaterdagavonden half aangeschoten of één zaterdagavond voluit dronken in een discotheek

---

<sup>1</sup> Ik eindig de anekdote met de opmerking dat deze gebeurtenis het hoogtepunt van mijn leven vormde, waarna ik voor het onderwijs koos en mijn leven bergafwaarts ging.

had kunnen rondhangen. Maar de investering bleek iedere cent waard, want zoals ik al eerder opmerkte, zwengelde het boek mijn fascinatie voor de natuurkunde behoorlijk aan.

Helaas bleek de fascinatie ook hoger dan mijn begrip. Een van de vele concepten die ik toen niet kon volgen was Hawkingstraling, een eigenschap van de zwarte gaten die we in mythe 20 tegenkwamen. Dit wordt in Hawkings boek behandeld in hoofdstuk zeven, genaamd 'Zwarte gaten zijn zo zwart nog niet'. Hawking stond met dit hoofdstuk voor een dilemma waar elke populairwetenschappelijke schrijver voor staat als het om ingewikkelde wetenschap gaat: in hoeverre ga je de zaak versimpelen zodat je lezerspubliek niet afhaakt? Wel, Hawking koos bij het onderwerp 'Hawkingstraling' er duidelijk voor om zijn publiek een snapgevoel te verkopen – een *onterecht* snapgevoel, wel te verstaan, maar dat zou ik pas vele jaren later tijdens mijn studie natuurkunde ontdekken.

De gebruikelijke uitleg van het fenomeen Hawkingstraling gaat ongeveer als volgt. Heisenbergs onzekerheidsprincipe uit mythe 26 vertelt ons dat we niet de snelheid en de positie van een deeltje gelijktijdig met willekeurige nauwkeurigheid kunnen meten. En niet omdat we daar te dom voor zijn, maar omdat deze twee grootheden vanwege het golfkarakter van het deeltje domweg niet tegelijkertijd door de natuur nauwkeurig zijn bepaald. Dit onzekerheidsprincipe geldt echter niet alleen voor de snelheid en de plaats van een deeltje, maar ook voor de energie en tijd van een kwantumveld. Hierdoor kan gedurende een heel korte tijd de hoeveelheid energie van het onderliggende kwantumveld zodanig 'onzeker' zijn dat het kwantumveld een hoeveelheid energie van de natuur kan 'lenen' zodat er kortstondig een deeltje tevoorschijn komt. Dit kan ook in paren gebeuren. Normaliter verdwijnen ze weer bliksemsnel: volgens Heisenbergs onzekerheidsprincipe kunnen ze alleen kortstondig bestaan. Maar vanwege de enorme zwaartekracht rond een zwart gat kan één helft van dit deeltjespaar ontsnappen, terwijl de andere helft in het zwarte gat valt. De energie die het daarvoor 'leende' wordt door het zwarte gat 'betaald', en daardoor neemt de massa van het zwarte gat een heel klein beetje af. Hawking stelt dat deeltjes bij een zwart gat ook nog een negatieve hoeveelheid energie kunnen hebben, maar op dat moment was ik als vijftienjarige nerd al afgehaakt. Ik wist dat de kwantummechanica vreemd was, maar zó vreemd?

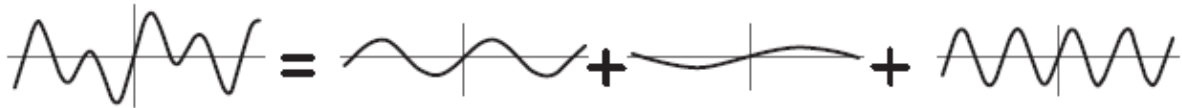
Inderdaad: Hawking wist zelf natuurlijk ook wel dat deze uitleg net zo opmerkelijk is als Einsteins aversie tegen sokken. Zijn uitleg is hooguit een analogie, zoals de busjesanalogie

van mythe 8 voor het transport van energie door elektriciteit. Wij gaan het mechanisme achter Hawkingstraling daarom op een andere manier proberen te begrijpen. Dit zal ook geen ideale uitleg zijn, want nogmaals: het is bijzonder technisch. We kunnen echter na alle dertig voorgaande mythen toch verrassend ver komen, en leren daarmee ook nog eens wat een deeltje precies is.

We beginnen weer bij een inmiddels oude bekende van ons: Isaac Newton.<sup>2</sup> In mythe 5 zagen we dat versnelde waarnemers 'schijnkrachten' waarnemen waar inertiaalwaarnemers dat niet doen. Versnelde waarnemers beweren bijvoorbeeld dat er schijnkrachten op voorwerpen zoals afgeschoten mortieren en orkanen werken, terwijl er eigenlijk een kracht op hen zelf werkt en zij simpelweg de traagheid van de mortieren en orkanen waarnemen. In de kwantumveldentheorie blijkt iets soortgelijks te gelden voor kwantumvelden. Dat zit namelijk zo. We zagen dat een kwantumveld 'aangeslagen toestanden' kan hebben, zoals een watergolf die op en neer deint. Elke 'aangeslagen toestand' van het kwantumveld is een discreet energiepakketje in het veld dat wij een 'deeltje' noemen. Als je nu een kwantumveld neemt met een willekeurig aantal deeltjes, zeg tien, dan zullen alle inertiaalwaarnemers het eens zijn over dit aantal, net zoals alle vissers langs de kant van een kanaal het eens zullen zijn over de hoogte van de voorbijkomende watergolven. Maar wanneer je gaat versnellen, zul je met een handformaat deeltjesdetector in de hand extra deeltjes gaan waarnemen. De precieze reden hiervoor is ook weer technisch. Het komt erop neer dat kwantumvelden golven, en dat we elke golf kunnen schrijven als de som van oneindig veel 'zuivere' golven met één enkele frequentie (en dus energie) die we *harmonische trillingen* noemen. Voor geluid geldt iets soortgelijks: een willekeurige toon zoals in figuur 48 kunnen we altijd ontbinden in zuivere tonen, namelijk de grondtoon en bijbehorende boventonen. Daarmee beschrijven we de willekeurige toon als de *som* van deze grondtoon en alle boventonen. De wiskunde hierachter noemen we de *Fourieranalyse*, en die speelt in elke tak van de (toegepaste) natuurkunde een waanzinnig belangrijke rol.

---

<sup>2</sup> Wie anders?



*Figuur 49 Een golf of trilling die niet als een simpele sinus geschreven kan worden, kunnen we altijd ontleden in trillingen die dat wel zijn en maar één enkele frequentie hebben. Dit soort trillingen met één enkele frequentie (of golflengte) noemen we ook wel 'harmonische trillingen'. Deze ontbinding geldt voor alle trillingen en golven, zoals geluidsgolven, watergolven, lichtgolven of hier: kwantumgolven.*

Een waarnemer zal een golf in het kwantumveld net zo beschrijven als de som van heel veel harmonische trillingen. Maar de precieze ontbinding in harmonische trillingen blijkt van de waarnemer af te hangen. Dat heeft weer te maken met het feit dat deze golven in het kwantumveld golven in plaats en tijd zijn, en plaats en tijd onderhevig zijn aan de lengtekrimp en tijdsvertraging uit mythe 19 en 21. Als je klaar bent met de ontbinding van de kwantumgolf in harmonische trillingen, blijken versnelde waarnemers een andere ontbinding te gebruiken dan inertiaalwaarnemers, en die verschillende ontbinding van de golven in het kwantumveld vertaalt zich in het meten van 'schijndeeltjes'. Dit effect noemen we het *Unruh-effect*, vernoemd naar de natuurkundige William Unruh, die dit fenomeen voor het eerst beschreef.

Om tot hier samen te vatten: een versnellende waarnemer zal in de alom-aanwezige kwantumvelden schijndeeltjes meten waar een inertiaalwaarnemer dat niet doet. Dit is vergelijkbaar met het verschijnen van schijnkrachten voor versnelde waarnemers. Ik noem dit 'schijndeeltjes', maar dat komt doordat we deeltjes normaal alleen definiëren voor inertiaalwaarnemers. Hetzelfde geldt voor schijnkrachten; elke inertiaalwaarnemer zal het erover eens zijn wanneer er een kracht op een voorwerp werkt of niet. Maar schijn of niet, de effecten van schijnkrachten zijn er niet minder om! De g-krachten waardoor een piloot knock-out gaat in een looping zijn dan misschien schijnkrachten, maar het bloed van de piloot stroomt nog steeds naar de benen, ongeacht de verklaring die je ervoor geeft.<sup>3</sup>

Datzelfde geldt voor de schijndeeltjes die versnelde waarnemers meten. Als je een lauw geworden kop koffie zou gaan versnellen, zou de koffie op een gegeven moment weer gaan opwarmen. Niet dat dit een effectieve manier is; de benodigde versnelling om dit enigszins

---

<sup>3</sup> Dat is eigenlijk vanwege de traagheid van het bloed in je lichaam, dat redelijk makkelijk door je lichaam kan stromen.

voor elkaar te krijgen is ongeveer 10.000.000.000.000.000.000.000 maal de valversnelling, oftewel 'tien triljard g'. Als je je bedenkt dat zelfs de meest geharde piloten bij tien g versnelling al bleek wegtrekken, dan zul je begrijpen dat een magnetron praktischer is om je lauwe koffie op te warmen dan je kop versnellen. Maar hoe klein ook, het Unruh-effect is er. De waargenomen deeltjes tijdens zo'n versnelling noemen we vanaf nu daarom ook *Unruhdeeltjes*. Mocht je nu denken dat dit fenomeen energiebehoud schendt, denk dan weer even terug aan de schijnkrachten; daar werkte de kracht niet op datgene wat jij als versnellende waarnemer ziet afbuigen, maar op j<sup>ó</sup>. Net zo komt de energie van de Unruhdeeltjes die jij als versnellende waarnemer meet eigenlijk van het mechanisme achter jouw eigen versnelling.

Onze opvattingen over deeltjes veranderen dus wanneer we kwantumvelden vanuit een versneld standpunt willen beschrijven. En nu zetten we het equivalentieprincipe uit mythe 16 in. Voor je leesgemak herhaal ik dat principe nog eens: *Op kleine lengteschalen en tijdens korte tijdsduren is een zwaartekrachtsveld experimenteel niet te onderscheiden van een versnelling*. Dat suggereert dus dat wanneer je je in een zwaartekrachtsveld bevindt, je verwacht dat er ook zoiets als een Unruh-effect optreedt. Een zwaartekrachtsveld is immers op kleine lengteschalen en korte tijdsduren experimenteel gezien niet te onderscheiden van een versnelling. Het Unruh-effect blijkt er inderdaad ook te zijn voor een zwaartekrachtsveld, maar met een belangrijke voorwaarde: niet zomaar elk zwaartekrachtsveld produceert Unruhdeeltjes. We zagen in mythe 21 dat versnelde waarnemers een waarnemershorizon zullen waarnemen, een ruimtetijdgebied van waaruit zelfs licht de versnelde waarnemer niet meer zal bereiken. Deze horizon blijkt een belangrijke rol te spelen in de productie van de Unruhdeeltjes. Zwaartekrachtsvelden met een waarnemershorizon kennen we ondertussen ook: dat zijn de zwarte gaten uit mythe 20!

We concluderen dus dat een waarnemer buiten een zwart gat met zijn deeltjesdetector Unruh-deeltjes zal meten vanwege het zwaartekrachtsveld en de horizon van het zwarte gat. Alleen noemen we deze deeltjes dan niet meer Unruhdeeltjes, maar Hawkingstraling. En dit is de beroemde Hawkingstraling die uit zwarte gaten lijkt te komen. Lijkt, want de deeltjes ontstaan in een groot gebied rondom de horizon, waarna ze worden uitgezonden in alle richtingen. Hawkingstraling kun je dus ook zien als het logische gevolg van het equivalentieprincipe en de vondst van Unruh dat versnelde waarnemers deeltjes in



dicht bij het zwarte gat – en dus diep in de zwaartekrachtspuut – een ‘deeltje’ anders zal definiëren dan iemand die ver weg van het zwarte gat en uit de zwaartekrachtspuut zit. De diepte van het water valt daarom goed te vergelijken met de ‘diepte van de zwaartekrachtspuut’.

We komen daarmee tot de hamvraag: is Hawkings populaire uitleg fout? Wel, zonder te pretenderen dat ik het genie Hawking ook maar enigszins evenaar of zelfs kan overtreffen: ja. Het verwarrende is dat Hawking een analogie gebruikt, maar dan met de natuurkundige begrippen die we ook gebruiken om het effect daadwerkelijk te verklaren. Maar zijn uitleg was dan ook heel erg uit de losse pols bedoeld en ging vervolgens een eigen leven leiden. Misschien komt dat ook wel doordat zijn vakgebied van kosmologie en kwantumzwaartekracht ontzettend technisch is, en veel mensen meer geïnteresseerd waren in hoeveel vingers Hawking precies kon bewegen<sup>5</sup> of hoe hij eigenlijk zijn kinderen had verwekt. Op beide vragen kan ik je geen antwoord geven; ik hou het in dit hoofdstuk bij de verwekking van Hawkingstraling.

## **Appendix: nog een analogie**

Met het gevaar je een overdaad aan analogieën te geven, volgt er toch nog een in deze appendix. We zagen in mythe 8 dat je zowel de busjes- als de wateranalogie kunt gebruiken om elektrische schakelingen te begrijpen, en dat beide analogieën hun voor- en nadelen hebben. Daarom geef ik je van kwantumvelden en zowel het Unruh- als Hawkingstraling ook nog een analogie die wat dichterbij de wiskunde van de kwantumveldentheorie ligt. Deze analogie zal ook weer een hele mooie brug zijn tussen de fenomenen ‘krachten in de Newtonse natuurkunde’ en ‘deeltjes in de kwantumveldentheorie’.

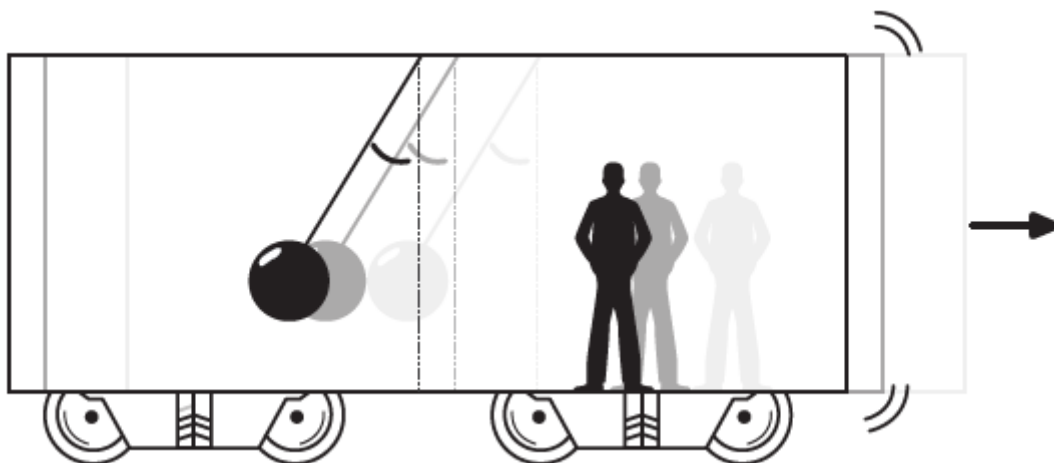
De wiskundige beschrijving van een kwantumveld doet sterk denken aan die van een slinger. Dat is niet zo gek: een kwantumveld golft immers, en een golf is een beweging die zichzelf herhaalt, net als een slingerbeweging. Een ideale slinger heeft een lengte waar aan het uiteinde een massa hangt, en het ‘ideale’ betekent dat we de massa van de lengte verwaarlozen ten opzichte van de massa aan het uiteinde. Als we ons zo’n ideale slinger

---

<sup>5</sup> Daarin overtreft ik Hawking overigens wel.

voorstellen als een koord met een kogeltje eraan, dan is in het ideale geval de kogel veel zwaarder dan het koord. De slingertijd zal alleen afhangen van de lengte van dit koord, en niet van de massa die eraan hangt. Ook dat is goed te begrijpen: de valversnelling van een voorwerp hangt immers in het ideale geval ook niet af van de massa (zie mythe 2). Laat je de slinger los, dan zal de slinger bij gebrek aan luchtwrijving voor eeuwig en altijd heen en weer slingeren. De uitwijking, oftewel *amplitude*, wordt gegeven door de beginuitwijking, en daarmee ook de energie die in de slinger zit.

Maar we kunnen ons een slinger ondertussen, met al die kwantummechanica die ons naar het hoofd werd geslingerd, ook kwantumstyle voorstellen. Zo'n kwantumslinger kan, in tegenstelling tot een gewone slinger, niet elke uitwijking hebben. Alleen bepaalde uitwijkingen in discrete stappen zijn mogelijk, zoals geldbedragen die je met munten en biljetten betaalt. De amplitude van een dergelijke kwantumslinger kan dan bijvoorbeeld alleen nul, tien, twintig, dertig... centimeter zijn. Elke tien centimeter amplitude komt overeen met één deeltje, en de evenwichtsstand noemen we *het vacuüm*: de toestand zonder deeltjes. Hoe groter de amplitude, des te groter de energie en dus het aantal deeltjes. Een kwantumveld gedraagt zich wiskundig gezien eigenlijk in elk punt van het veld precies als zo'n kwantumslinger!



*Figuur 2 Een slinger die in een versnellende trein hangt, zal een uitwijking hebben in zijn evenwichtsstand.*

We zagen echter in mythe 4 ook dat als we een slinger ophangen in een versnellende trein, de uitwijking van de slinger zelfs ongelijk aan nul zal zijn als wij als mee-versnellende

waarnemers de slinger vanuit het midden loslaten. Dit zie je in figuur 49. De oorzaak is volgens ons een schijnkracht die op de slinger werkt, terwijl voor een persoon op het perron de oorzaak domweg de traagheid van de slinger is. De evenwichtsstand van de versnellende slinger is daarom niet precies verticaal, en de evenwichtsuitwijking niet meer nul centimeter.

Het Unruh-effect is net zo iets: je zou het kunnen vergelijken met een kwantumslinger voor een versnellende waarnemer, die door zijn eigen versnelling een evenwichtsstand krijgt ongelijk aan nul. Wordt door de eigen versnelling de evenwichtsstand van de kwantumslinger tien centimeter, dan zal de versnelde waarnemer één deeltje meten, wordt de evenwichtsstand twintig centimeter, dan meet de versnelde waarnemer twee deeltjes, enzovoort. Net zo zal een grote massa naast de trein (zoals een enorme variant van de Schiehallion uit mythe 7) de kwantumslinger door zijn uitgeoefende zwaartekracht uit zijn evenwichtsstand trekken. Een waarnemer bij de slinger die de slinger daardoor ziet uitwijken zal dus claimen dat de kwantumslinger een deeltje beschrijft. Maar zet je dezelfde slinger vervolgens ver weg van deze massa, en laat je de slinger weer vanuit de evenwichtsstand los die op die plek, dan gaat de slinger niet slingeren; de evenwichtsstand is immers die verticale toestand. Zou die zware massa echter verdwijnen, dan zou de evenwichtsstand van de slinger nabij de massa plotseling weer verticaal worden, terwijl de slinger nog een kleine uitwijking heeft. De slinger zal daardoor slingeren, en als kwantumslinger betekent dat: één of meerdere deeltjes!

Kortom, we kunnen zeggen dat bij een gewone slinger de evenwichtsstand wordt veranderd door een versnelling of de aanwezigheid van zwaartekracht, en bij een kwantumslinger (oftewel kwantumveld) vertaalt dit zich in het feit dat de vacuümtoestand zal worden veranderd. En dat is precies het Unruh- of Hawking-effect (versnelling of zwaartekracht).