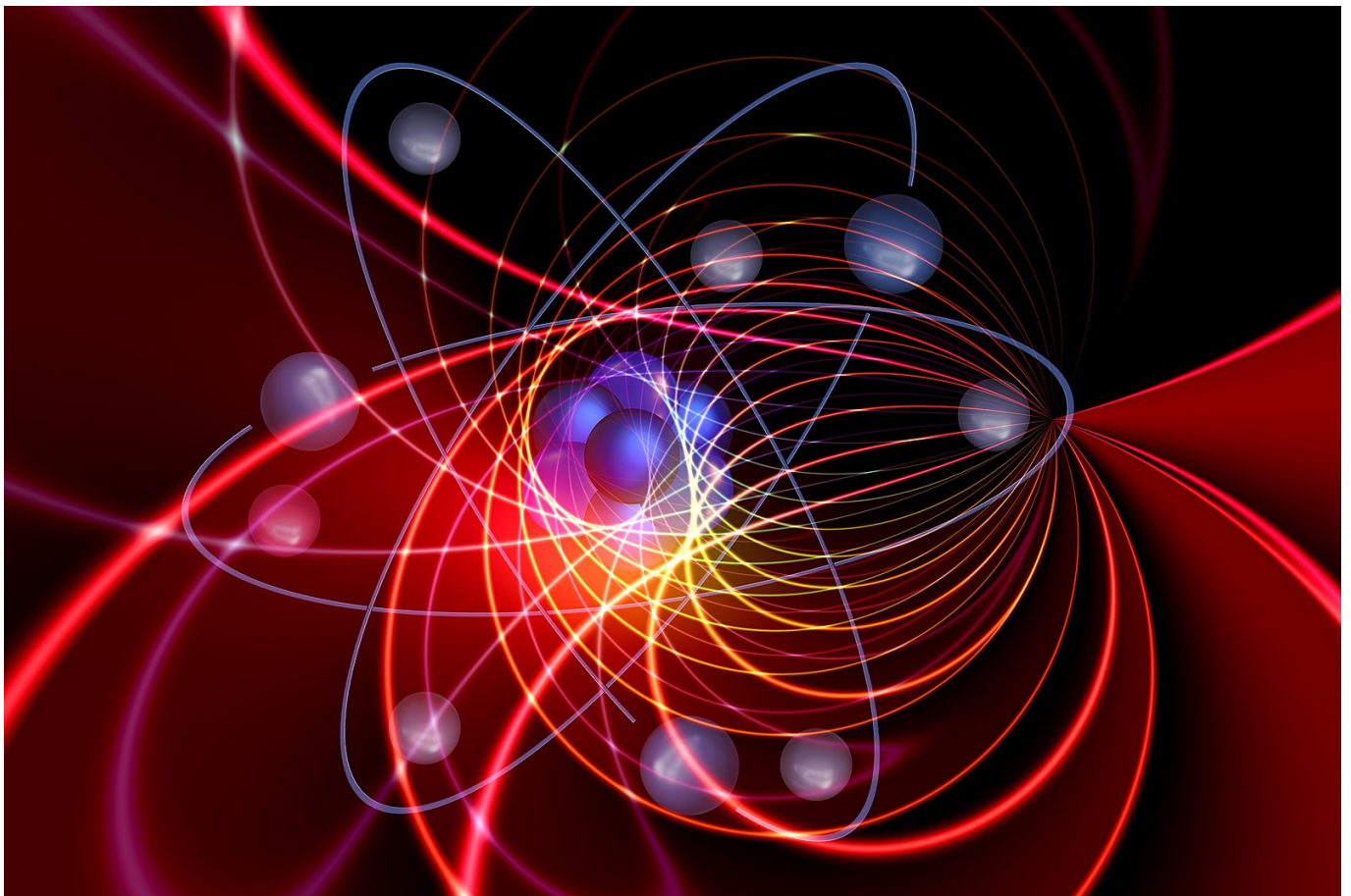


Het tragische leven van een foton

De grofweg duizend artikelen die je op de Quantum Universe-website kunt vinden hebben één ding gemeen: de redactie heeft bedacht waar ze over gaan. Nu wilden we wel eens weten: waar willen onze lezers eigenlijk meer over horen? Vandaar de rubriek: "Vraag het een natuurkundige". Het derde artikel in deze reeks beantwoordt de vraag van lezer Gijs: *bevindt een foton zich altijd in de singulariteit van een zwart gat?*



Een foton gedraagt zich zowel als een deeltje als ook als een golf.Afbeelding:

[Wikimedia Commons](#).

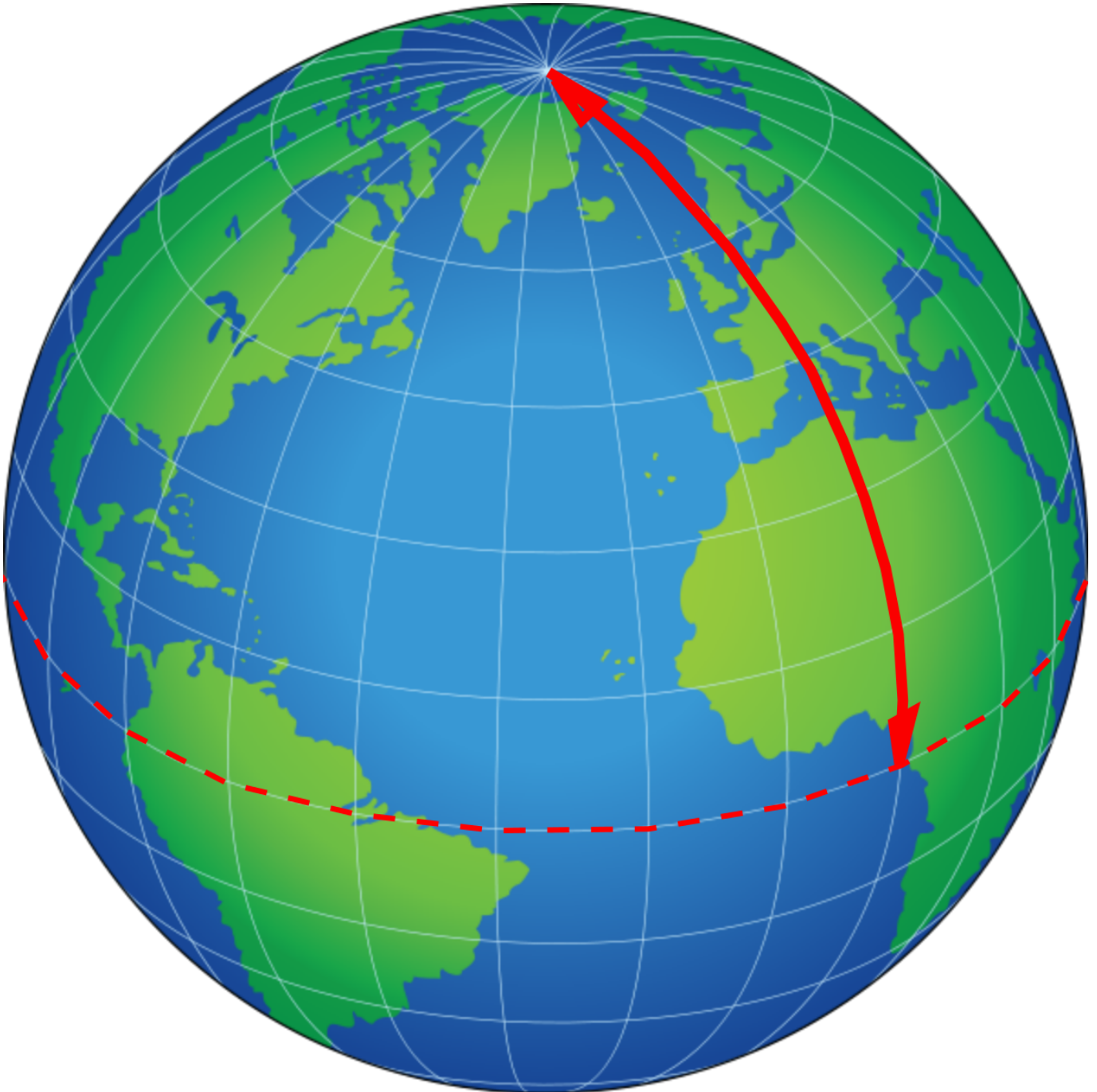
Een lichtdeeltje

Een foton is een elementair deeltje zonder rustmassa, maar gedraagt zich ook als een golf: fotonen kunnen interfereren en buigen, maar ook een wisselwerking aangaan met materie zoals een deeltje dat doet. Er bestaat dus een golf-deeltjes-dualiteit, een verschijnsel dat in 1905 aanleiding gaf tot het begin van de quantummechanica. (Zie ook [dit](#) artikel over het

foto-elektrisch effect.) Het foton beweegt zich voort met de lichtsnelheid, $c = 299.792.458$ m/s – de hoogst mogelijke snelheid in het universum. Ook heeft een foton geen lading. Het wordt daardoor niet beïnvloed door elektrische of magnetische velden, en dus kunnen fotonen vrij bewegen door het vacuüm. Het enige wat invloed heeft op de baan van een foton is de kromming van de ruimtetijd die ontstaat door aanwezigheid van massa in ons universum. Licht, en andere elektromagnetische straling, bestaan uit deze supersnelle elementaire deeltjes. De vraag van Gijs gaat over het perspectief van deze lichtdeeltjes. Hoe bewegen ze, wat ervaren ze, en hoe vormt de massa van het heelal zich om deze deeltjes heen?

Hoe beweegt licht zich?

Volgens de algemene relativiteitstheorie bewegen lichtdeeltjes niet over een rechte lijn, maar volgen ze altijd de kortste route: ze bewegen langs geodeten (*Engels: geodesics*). In een vlakke ruimte is zo'n geodeet wel degelijk een rechte lijn tussen twee punten, maar in een gekromde ruimte (zoals ons aardoppervlak) is de kortste route zelf ook krom – en wel zodanig dat de lengte van deze kromme tussen twee punten [stationair](#) is. Dat wil zeggen: de lengte verandert relatief weinig bij bepaalde kleinere veranderingen van de kromme. In de algemene relativiteitstheorie wordt een geodeet tussen twee gebeurtenissen beschreven als de kromme die deze twee *gebeurtenissen* met elkaar verbindt. De mate van kromming wordt daarbij veroorzaakt door de grootte van de massa die aanwezig is. Dat lichtdeeltjes zich over geodeten bewegen en beïnvloed worden door “massa van buitenaf” is mogelijk omdat fotonen een bepaalde energie hebben, en hierdoor ook een [impuls](#). (Zie ook [dit](#) artikel als je meer wil lezen over deze gekromde ruimtetijd.) Samenvattend: de lichtdeeltjes bewegen dus vanaf het punt van uitzending, met de hoogst mogelijke snelheid, langs de meest efficiënte route, tot een punt waar ze weer worden opgevangen.

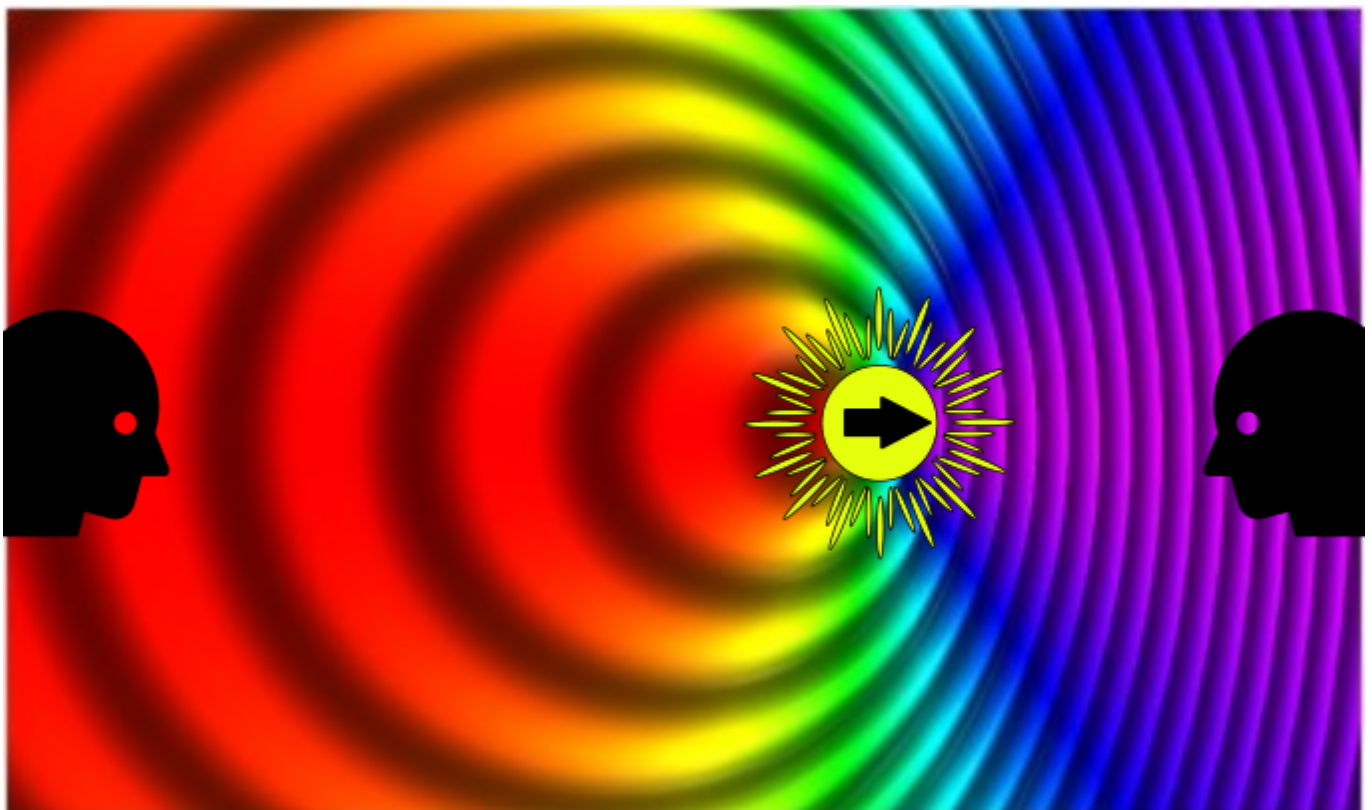


Een geodeet op ons tweedimensionale aardoppervlak. De rode pijl van de evenaar naar de Noordpool is een kromme geodeet. Afbeelding: [Wikimedia Commons](#).

De speciale relativiteitstheorie laat ons weten dat tijd niet universeel is, maar verschillend voor verschillende waarnemers die ten opzichte van elkaar aan het bewegen zijn. Hetzelfde geldt voor lengtes: objecten die ten opzichte van een waarnemer bewegen zijn korter dan wanneer ze stilstaan. Wanneer je ten opzichte van bijvoorbeeld de aarde met een snelheid dicht bij de lichtsnelheid beweegt, verstrijkt de tijd in jouw eigen referentiekader^[1] normaal: als je een klok mee zou nemen, zou deze een seconde doen over één tik met de

secondewijzer. De tijd buiten jou om, gemeten met de klokken in de omgeving die niet op jouw snelheid aan het bewegen zijn, gaat langzamer. Je kan van referentiekader veranderen door een wiskundige operatie die we kennen als een *Lorentztransformatie* uit te voeren. (Voor meer details en diepgang vind je een hele [serie artikelen over relativiteit](#) op de Quantum Universe-website.)

Wanneer je met snelheden in de buurt van de lichtsnelheid beweegt, zal je niet alleen de tijd en ruimte om je heen anders ervaren; ook wordt licht zelf rood- of blauwverschoven. Als jij naar de lichtbron toe beweegt, wordt de golflengte meer op elkaar gedrukt; de golflengte wordt dus kleiner en het licht dat je waarneemt lijkt daardoor blauwer. (Korte golflengtes liggen in het ultraviolet/blauw, grote golflengtes in het infrarood.) Als je van de lichtbron af beweegt, zal er juist een roodverschuiving plaatsvinden; de golflengte wordt meer uitgerekt en is groter dan de golflengte die iemand in het referentiekader van de lichtbron meet.



Rood- en blauwverschuiving van een lichtbron. Roodverschuiving treedt op wanneer de bron van de waarnemer af beweegt, blauwverschuiving wanneer deze naar de waarnemer toe beweegt. Afbeelding: [Wikimedia Commons](#).

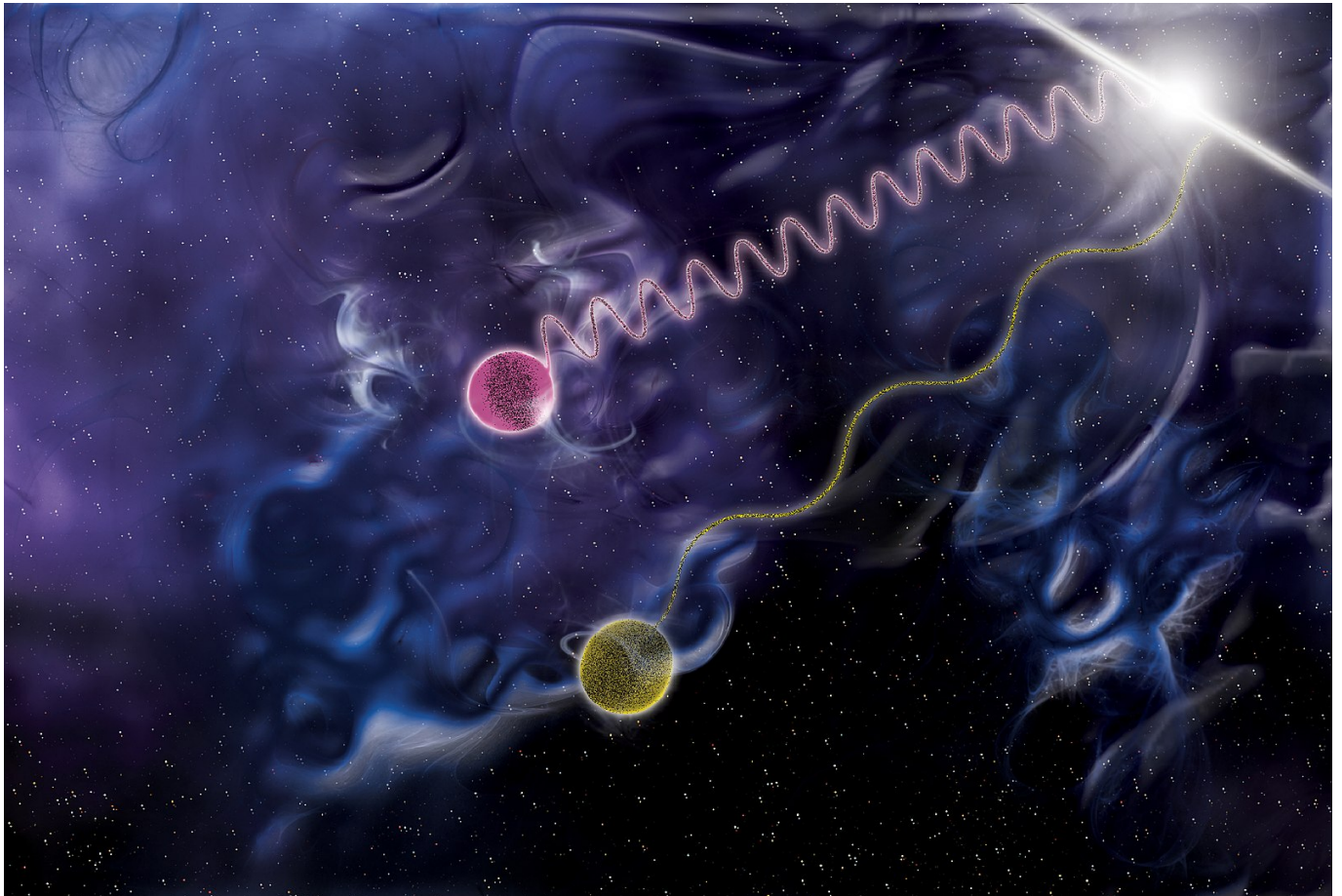
Het perspectief van een foton

Wanneer we een Lorentztransformatie uitoefenen op een foton en zo proberen in het referentiekader van een foton door te dringen, gebeurt er iets gekks: afgelegde afstand en reistijd worden gelijk aan nul. Voor ons is een foton een stabiel deeltje —dat wil zeggen dat het niet vervalt en altijd door zal blijven reizen vanaf het moment van uitzending, tot het moment dat het wordt opgevangen. Voor het lichtdeeltje zelf is de “reis” echter fictief: er bestaat geen tijd en er zijn geen interacties met de buitenwereld, behalve *creatie* (ontstaan) en *annihilatie* (vernietiging). Omdat deze twee gebeurtenissen twee verschillende interacties met materie zijn, houd ik deze gescheiden in deze uitleg. (Je zou ook kunnen zeggen dat de twee gebeurtenissen op een en hetzelfde moment plaatsvinden, aangezien tijd geen betekenis heeft in het referentiekader van een foton.) De afstand en tijd tussen creatie en annihilatie in het referentiekader van het foton zijn dus gelijk aan nul, hierdoor wordt de geodeet waarover licht zich beweegt ook wel de *nulgeodeet* genoemd (*Engels: null geodesic*).

Als we ons nu af zouden vragen wat een foton “ziet” of “ervaart”, is dat niet aan de orde. De transformatie naar het referentiekader van een foton is een gedachte-experiment om de effecten van relativiteit bij de lichtsnelheid te illustreren. Wanneer we toch proberen een beeld te schetsen vanuit het referentiekader van het foton, komen we tot rare uitersten. Er is geen tijd aanwezig voor een foton om een interactie aan te gaan met diens omgeving. Hierdoor leeft het in zijn eigen wereld waar alles op hetzelfde moment gebeurt. Voor een foton heeft tijd dus geen betekenis, evenmin als afstand. Niets beweegt als je het bekijkt uit het referentiekader van een foton, en er is dus ook geen mogelijkheid om een klok in het referentiekader van een foton te plaatsen. De vraag naar het gezichtspunt van een foton is hierdoor geen goed geformuleerd gedachte-experiment, en we kunnen ons niet verplaatsen in de “ervaringen” van een foton, die in onze ogen zeer tragisch zouden zijn.

De tragiek: het moment dat een foton wordt gecreëerd is hetzelfde moment als zijn einde, het is gedoemd direct geannihileerd te worden. Een foton wordt uitgezonden door de zon, een verre ster, of een sterrenstelsel biljoenen lichtjaren van ons vandaan en wordt opgevangen door bijvoorbeeld jouw oog. Voor ons heeft dat foton een extreem lange weg afgelegd. In andere gevallen is die weg juist zeer kort als het foton direct na uitzending in aanraking komt met bijvoorbeeld een elektron. Voor het foton maken deze afstanden echter geen verschil in “ervaring”: wanneer je beweegt met de snelheid van het licht, is er geen tijd

en overbrug je geen afstand. In deze zin zal je leven een instantaan proces zijn, en verga je direct nadat je gecreëerd bent. Dit lijkt wel een beetje op het leven van een eendagsvlieg, behalve dat de vlieg de sensatie van leven toch nog mag ervaren. Het foton is een nuldaysvlieg. Het heeft geen sensationeel bestaan en kan in die zin niet eens beginnen aan zijn leven; het begin is het einde.



Artistieke impressie van twee fotonen die in het vacuüm bewegen. De foton is hier afgebeeld als de golf en het deeltje. Uiteraard is deze afbeelding niet vanuit het perspectief van een foton zelf, omdat dat perspectief zoals ik in de tekst uitleg onmogelijk weer te geven is. Afbeelding: [Wikimedia Commons](#).

Materie om het foton heen

Laten we nu filosofisch nadenken over het leven van een foton en diens plek in het universum. Het foton ontstaat, wordt gecreëerd vanuit materie, en wordt opgeslokt, geannihileerd, door materie. Dit zijn de enige twee punten waarop het foton interactie heeft, en dus de enige twee punten waarop je zou kunnen zeggen dat het foton “ervaart”. Daartussen bestaat in zekere zin niets: afstand en tijd zijn nul.

In zijn bericht vroeg Gijs of het foton in zekere zin het centrum, de singulariteit, van een zwart gat is. Laten we aannemen dat het foton zich bevindt in het middelpunt van het universum – geen gekke aanname, aangezien het universum homogeen en isotroop is, wat wil zeggen dat er geen voorkeurslocatie in het heelal is: fysische eigenschappen zijn overal hetzelfde en in alle richtingen ziet het er hetzelfde uit. Misschien kunnen we dit dan interpreteren alsof het foton wordt gecreëerd vanuit het centrum van alle massa van het universum, en weer wordt opgeslokt door diezelfde massa. Het is echter niet zo dat deze massa de kans krijgt zich te vormen tot bijvoorbeeld een zwart gat. Daar zijn allerlei redenen voor, maar de belangrijkste in het kader van dit artikel is misschien wel dat er simpelweg geen tijd voorbijgaat tijdens de “levensloop” van een foton.

Zwarte gaten zijn plekken in de ruimtetijd waar de zwaartekracht zo sterk is dat zelfs fotonen er (gezien vanuit het perspectief van een externe waarnemer) niet aan kunnen ontsnappen. Wanneer een heel grote hoeveelheid massa zich binnen een te klein volume bevindt, kan er een singulariteit ontstaan: een punt in de ruimtetijd waar de natuurwetten falen. Dat gebeurt in het centrum van een zwart gat, maar het gebeurde bijvoorbeeld ook bij de oerknal.

Ik zou het een te grote claim vinden om de massa waaruit het foton wordt gecreëerd of geannihileerd, direct in verband te brengen met een zwart gat. Ook is een singulariteit niet automatisch een zwart gat: het is een punt waar een functie niet is gedefinieerd, of waar iets een oneindige waarde heeft. Omdat licht een rustmassa van nul heeft en met de lichtsnelheid beweegt, hebben we in de beschrijving van de “wereld” van het foton wél automatisch te maken met wiskundige singulariteiten. De vergelijkingen die we gebruiken in de speciale relativiteitstheorie werken inderdaad niet meer, omdat deze zijn gebaseerd op snelheden kleiner dan die van het licht. Wiskundige singulariteiten volop, dus, maar het foton bevindt zich niet in de singulariteit van een zwart gat.

Concluderend: een foton is een deeltje dat nooit zal ervaren en in zijn eigen wereld alleen de creatie van diens eigen bestaan meekrijgt, om vervolgens direct verwoest te worden. Hierin is in de wiskundige zin sprake van een singulariteit, maar geen sprake van de singulariteit van een zwart gat. Het foton is in deze zin zelf een singulariteit, zonder besef van een extern universum, tijd, of beweging.

[1] Jouw eigen referentiekader wordt beschreven door het [ruimte-tijddiagram](#) waarin jij stilstaat: in de speciale relativiteit kun je altijd aannemen dat jijzelf stilstaat en alles om jou heen beweegt.