

Kijken naar de Andromedanevel betekent kijken naar het verleden. We zien het sterrenstelsel zoals dat er circa twee miljoen jaar geleden uitzag. (Foto: Peter Verbeek, Dieren)

Al is een lichtstraal nog zo snel...

De nieuwe grens van het heelal

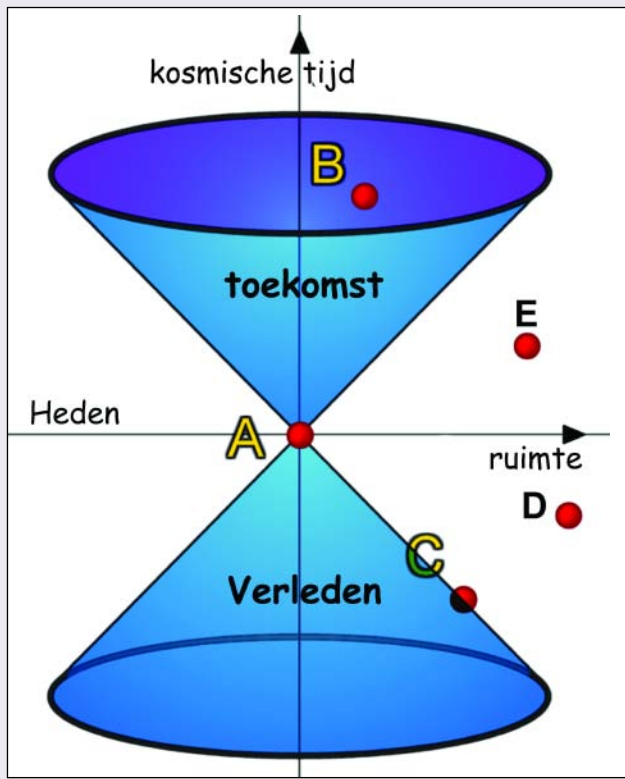
De grote revolutie in de sterrenkunde rond de eeuwwisseling was de ontdekking dat het heelal versneld expandeert. In zo'n heelal bestaat een nieuwe grens, een zogenoemde gebeurtenishorizon, ook wel waarnemingshorizon genoemd. Het licht van gebeurtenissen die op dit moment plaatsvinden in verre, maar gewoon zichtbare sterrenstelsels, kan ons ook in een verre toekomst niet meer bereiken. Die nieuwe grens ligt niet eens zo ver weg, op een afstand van tien miljard lichtjaar. Ook een buitenaardse beschaving kan voorbij deze horizon nooit constateren dat er op aarde een hoogontwikkelde samenleving bestaat. De radiostraling die wij de ruimte insturen zal in principe niet buiten de gebeurtenishorizon ontvangen kunnen worden. Volgens de kwantumnatuurkunde moet een gebeurtenishorizon te zien zijn als een gloeiend oppervlak met een bepaalde temperatuur die afhangt van de versnelling.

Het heelal is onnoemelijk veel groter dan we kunnen waarnemen. Het licht van verre objecten heeft nog niet de tijd gehad om ons te bereiken. Als we naar de sterrenhemel kijken, zien we het heelal niet 'direct': we kijken altijd in het verleden, afhankelijk van de afstand van het object dat we waarnemen. We kijken verder in het verleden naarmate de afstand tot een object groter is.

Grenzen aan het verleden noemen we een horizon. Op de aarde is de horizon de denkbeeldige lijn aan de gezichtseinder, maar in het heelal is de 'horizon aan het verleden' een bolvormig oppervlak: de grens van het waarneembare heelal. Onder bepaalde omstandigheden kan er ook een grens zijn aan het waarnemen van toekomstige gebeurtenissen.



Deze opname van de Hubble Space Telescope laat de allerverste uithoeken van het heelal zien. Ieder vlekje of stipje op deze foto is een sterrenstelsel bestaande uit vele miljarden sterren. De meeste verder dan 10 miljard lichtjaar verwijderd en liggen dus buiten onze waarnemingshorizon. We zien ze als gevolg van het licht dat ze in het verleden uitstraalden. (Foto: www.hubble.org)



Een gebeurtenis wordt gekenmerkt door een plaats en een tijd. Het is een punt in een grafiek waar de plaats wordt afgezet tegen de tijd. Een dergelijke grafiek wordt de tijd-ruimte genoemd. Een stilstaande waarnemer volgt een lijn recht omhoog door de kegel (een reeks gebeurtenissen met dezelfde plaats, alleen de tijd neemt toe). Punt A is de waarnemer op dit moment. Gebeurtenissen kun je indelen in verleden, zoals C: alles wat ons met een snelheid kleiner dan de lichtsnelheid kan bereiken en wat we dus kunnen waarnemen. Toekomst, zoals B: alles wat we met een snelheid kleiner of gelijk aan de lichtsnelheid kunnen beïnvloeden en E en D: gebeurtenissen die we op dit moment niet kunnen zien omdat kennis van D en de beïnvloeding van E een snelheid groter dan de lichtsnelheid vereist.

Toekomst

De 'horizon aan de toekomst' is ook een denkbeeldig (bolvormig) oppervlak, dat nog vóór de grens van het heelal kan liggen. Een supernova binnen het waarneembare heelal, die vandaag buiten die horizon ontstaat, krijgen we dan ook nooit te zien. Ook niet na heel lang wachten. Het heelal kent in zo'n situatie afgesloten gebieden. Die nieuwe gezichtseinder wordt een *gebeurtenishorizon* genoemd omdat bepaalde gebeurtenissen nooit waarneembaar zijn. De traditionele indeling van verleden en toekomst moet worden uitgebreid. Het verleden is alles wat we (kunnen) kennen, maar niet kunnen beïnvloeden. De toekomst is alles

wat we kunnen beïnvloeden, maar (nog) niet kunnen kennen. Daarnaast zijn er in het heelal ook nog plaatsen die we in het geheel niet zien, maar die we na lang wachten toch kunnen waarnemen.

Gebeurtenissen op die plek gaan in de toekomst tot ons verleden behoren, maar vallen nu nog buiten de horizon aan het verleden. En er is een vierde groep van gebeurtenissen die buiten de horizon van de toekomst liggen en die we nooit zullen zien.

Het heelal nu

Je spreekt er zo gemakkelijk over, het heelal nu, op dit moment in de kosmische tijd, maar het vreemde is dat we daarover geen enkele rechtstreekse informatie hebben. In de sterrenkunde kijk je altijd naar het verleden. We kunnen het huidige heelal niet zien omdat het licht er een tijd over doet om ons te bereiken. Een hypothetisch voorbeeld kan dat illustreren: de afstand tot de Andromedanevel is circa twee miljoen lichtjaar. Stel dat er in de Andromedanevel op dit moment, dus 13,7 miljard jaar na de oerknal, een exacte tweelingplaneet van de aarde bestaat die we voor het gemak Gaia zullen noemen. We nemen even aan dat op Gaia precies dezelfde biologische evolutie heeft plaatsgevonden, die precies synchroon loopt en ook leidt tot een technologische beschaving. Als een bewoner van Gaia met een ideale telescoop naar ons kijkt, ziet hij de aarde van twee miljoen jaar geleden, toen hier de voorloper van de mens net recht op begon te lopen. Als een aardbewoner op hetzelfde moment naar Gaia kijkt, ziet hij de toestand van circa twee miljoen jaar geleden en niet de huidige situatie. We kijken naar elkaar, maar zien slechts elkaars verleden.

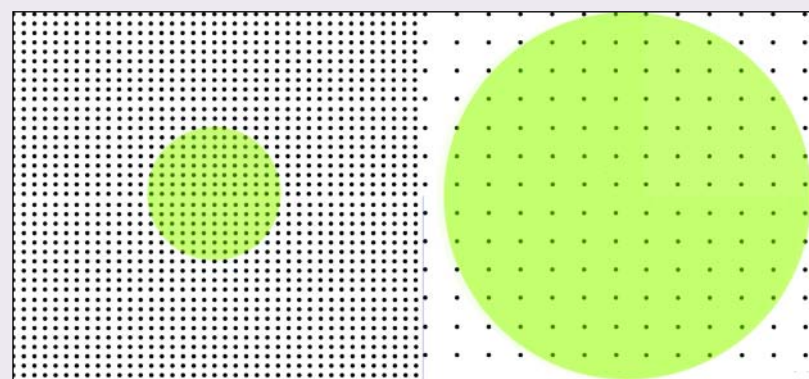
Horizon van het verleden

Het licht van de verstverwijderde objecten heeft nog niet de tijd gehad om ons te bereiken. Duurt het langer dan de leeftijd van het heelal, dan zien we (nog) niets. Is de reistijd van het licht korter, dan behoort dat object tot het waarneembare heelal.

Er is dus een natuurlijke grens die bepaalt tot waar we kunnen kijken, de grens aan het heelal. Deze grens wordt ook wel onze *deeltjeshorizon* genoemd. Het is de maximale afstand die een lichtdeeltje (foton) kan afleggen vanaf de oerknal tot de huidige tijd.

Naarmate de tijd voortschrijdt en de leeftijd van het heelal toeneemt, wordt het waarneembare heelal groter. Omdat licht er zolang over doet om ons te bereiken, krijgen we het heelal te zien in een tijd die steeds dichterbij de oerknal ligt. De grens aan het heelal (deeltjeshorizon) is dus als het ware een grens aan het verleden (ook wel *past horizon* genoemd). Die grens hangt af van de tijd. Naarmate de tijd verstrijkt, wordt de horizon groter. We krijgen dus een steeds groter ruimtelijk stuk te zien van het grote heelal, maar wel steeds op een vroeger tijdstip, steeds dichterbij de oerknal.

In de praktijk kunnen we niet tot deze theoretische grens van het heelal kijken. Vlak na de oerknal werd het universum namelijk ondoorzichtig door het troebele, hete gas: dat is de praktische grens van het heelal op een kosmische tijd van 380.000 jaar na de oerknal. Alleen neutrino's en zwaartekrachtstraling kunnen afkomstig zijn van de deeltjeshorizon. We zien de praktische grens als de zogeheten kosmische microgolffachtergrondstraling; dit is het prille begin, het moment waarop de ijle homogene materie van kort na de oerknal zich begint te onttrek-



Op de afbeelding zien we het waarneembare heelal op twee tijden: links na een miljard jaar, rechts nu, 13,7 miljard jaar na de oerknal. De grens van het waarneembare heelal (de zogeheten deeltjeshorizon) neemt toe met de tijd en is kort na de oerknal gereduceerd tot bijna een punt. De stippen zijn vaste plaatsen (sterrenstelsels) die zich door de uitdijning van elkaar verwijderen.

ken aan de geleidelijk afgekoelde fotonen van de oerknal. We zien dan de eerste materieconcentraties die 'straks' sterren en sterrenstelsels zullen vormen.

Expansiegeschiedenis

In de verre toekomst krijgen we een brede versie van de kosmische achtergrondstraling te zien. Bij een lagere temperatuur blijven we de toestand van het heelal zien op een kosmische tijd van 380.000 jaar. Wel zien we nieuwe stukken die nu nog deel uitmaken van dat onnoemelijk veel grotere, maar tot nu onzichtbare universum. Ieder deeltje in het heelal heeft zijn eigen horizon aan het verleden, vandaar de naam deeltjeshorizon. In de achtergrondstraling zien we het heelal tegelijk op één tijdstip, namelijk op 380.000 jaar na de oerknal. Iedere plek daarin heeft zijn eigen horizon.

De grootte daarvan hangt af van de expansiegeschiedenis van het heelal tot aan dat moment. De horizon is dus groter dan 380.000 lichtjaar omdat fotonen met de expansie meebewegen¹. De grootte blijkt op ongeveer twee keer de volle maan uit te komen. Plekken die verder weg liggen hebben geen gemeenschappelijk verleden en het is dus gek dat ze toch op elkaar lijken. Dit fundamentele probleem in de oerknaltheorie (het horizonprobleem) wordt opgelost door een extreem grote expansie aan het begin van de oerknal te veronderstellen (dit wordt inflatie genoemd) Daardoor wordt de deeltjeshorizon vergroot en krijgen alle plekken in de achtergrondstraling toch weer een gemeenschappelijk verleden en kunnen ze (en ook wij) in één oerknal samen ontstaan.

Horizon van de toekomst

Om te weten te komen hoe de Andromedanevel er op dit moment uitziet, moeten we nog twee miljoen jaar wachten. Maar, bereiken die signalen ons wel? En hoe zit het met de straling die van nog verder komt? Zien we die uiteindelijk wel? Stel dat op dit moment in de kosmische tijd een ster explodeert; zal deze ster dan uiteindelijk als een supernova aan

¹ Wegens de expansie van het heelal ligt de grens van het heelal op onze huidige kosmische tijd van 13,7 miljard jaar ook niet eenvoudig op 13,7 miljard lichtjaar, maar op een veel grotere afstand. Een plaats in het heelal die we nu aan de grens van het heelal zien, blijkt op dit moment in de kosmische tijd (dus in ons heden) op ongeveer 40 miljard lichtjaar te staan.

onze hemel oplichten? Men heeft altijd gedacht dat dit het geval is. Deze gedachtegang is inderdaad juist als we de oude heelalmodellen (met een uitdijingsnelheid die geleidelijk aan afneemt) in beschouwing nemen. Maar sinds we weten dat het heelal versneld expandeert, is dat niet meer het geval.

Ons heelal wordt begrensd door een andere horizon, een 'horizon aan de toekomst'. Deze horizon wordt meestal gebeurtenishorizon genoemd of ook wel *waarnemingshorizon*. Het is de maximale afstand die het licht kan afleggen, gerekend vanaf de huidige tijd tot in de verre toekomst. In een heelal met afnemende uitdijingsnelheid is deze afstand oneindig groot en dus zijn er geen beperkingen. We krijgen dan alles te zien. In een versneld uitdijend heelal is er wel een waarnemingshorizon en komen sommige gebeurtenissen nooit in beeld.

Kosmische beperkingen

Deze nieuwe horizon legt beperkingen op aan de toekomst en is dus van een andere aard dan de deeltjeshorizon aan het verleden. Een lichtstraal (foton) uitgezonden binnen de gebeurtenishorizon kan ons nog bereiken, daarbuiten wordt het

meegesleept door het steeds sneller uitdijende heelal en kan het nooit meer bij de aarde aankomen. In dit geval geldt: *'Al is een lichtstraal nog zo snel, de uitdijning achterbaalt hem wel'*. Het gaat hierbij dus om sterrenstelsels die nu gewoon zichtbaar zijn door het licht dat de stelsels in het verleden hebben uitgezonden.

Ook de omgekeerde vraag is van belang: is de aarde voor iedereen altijd waarneembaar? Kan iedere buitenaardse beschaving in het verre heelal uiteindelijk kennismaken van bijvoorbeeld de eerste radiostraling die de mensheid ruim een eeuw geleden begon uit te zenden? En kunnen ze zestig jaar daarna naar onze televisie-uitzendingen kijken? Nee, dat kan niet in een versneld uitdijend heelal.

De gebeurtenishorizon is symmetrisch. Als een sterrenstelsel (dat we nu gewoon aan de hemel zien) buiten onze gebeurtenishorizon ligt, dan bevinden wij ons ook buiten de gebeurtenishorizon van dat stelsel. Een buitenaardse beschaving voorbij die horizon ziet de aarde zoals die er lang geleden uitzag, maar zal nooit kunnen constateren dat er bij ons een technologische beschaving tot ontwikkeling is gekomen.

Waarnemingshorizon

Het verrassende is dat de waarnemingshorizon niet echt ver weg ligt, namelijk op een afstand waarop wij een roodverschuiving van 1,8 meten. Dat komt overeen met een sterrenstelsel dat tien miljard jaar geleden zijn straling uitzond. Op deze afstanden nemen astronomen tegenwoordig routinematig sterrenstelsels waar. Het blijken dus de verste stelsels waarin we ooit, in de verre toekomst, een gebeurtenis kunnen zien die in het heden (13,7 miljard jaar na de oerknal) heeft plaatsgevonden. Sterrenstelsels met een roodverschuiving van 1,8 passeren nu de waarnemingshorizon van het heelal. Een gebeurtenis als een krachtige gammaflits of supernova-explosie in zo'n stelsel die op dit moment in de kosmische tijd plaatsvindt, zal voor ons nooit te zien zijn; vandaar de naam gebeurtenishorizon (in het Engels aangeduid als *event horizon*). De deeltjeshorizon wordt steeds groter naarmate de tijd toeneemt, maar de gebeurtenishorizon blijft op een vaste afstand van de waarnemer zolang de versnelling van het heelal dezelfde blijft. Die afstand is minder groot dan de deeltjeshorizon. Daaruit kunnen we twee conclusies trekken: naarmate de tijd voortschrijdt krijgen we een groter stuk van het heelal te zien in de vorm van de condensaties in de achtergrondstraling. Maar in een versneld expanderend heelal (bijvoorbeeld in een heelal dat beschreven wordt door een kosmologische constante groter dan nul) is er een gebeurtenishorizon die vóór de deeltjeshorizon ligt. Ook al hebben we miljarden jaren geduld, we zullen nooit weten of er uit die eerste condensaties uiteindelijk ook planeten ontstaan met een evolutie die leidt tot een mens in een technologische beschaving. De tweede conclusie is dat alle sterrenstelsels als gevolg van het expanderende heelal in de zeer verre toekomst achter de gebeurtenishorizon komen te liggen. Immers, zolang de versnelling van het heelal constant is, ligt de gebeurtenishorizon op een vaste afstand. Ons verre toekomstperspectief is leeg en eenzaam. Maar wellicht valt het mee: we weten nog niet zeker of de versnelling van het heelal constant is.

John Heise

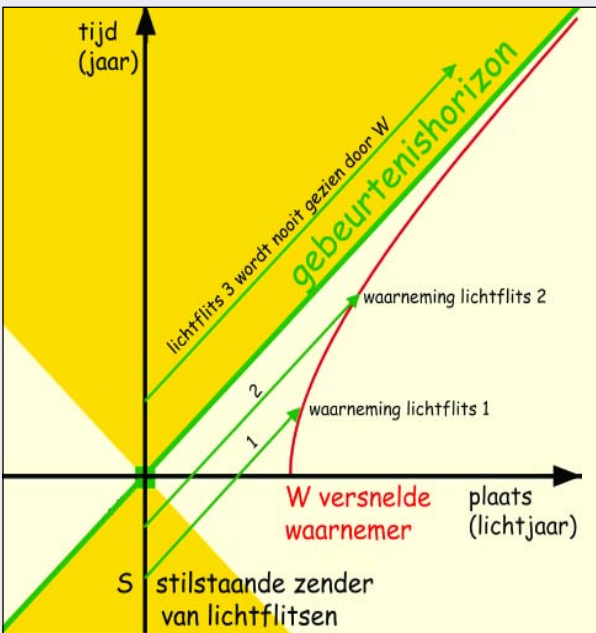
John Heise is werkzaam bij SRON, het nationaal instituut voor ruimteonderzoek, en als bijzonder hoogleraar ('actuele onderwerpen in de natuurkunde') verbonden aan de faculteit voor Natuur- en Sterrenkunde van de Universiteit Utrecht.

Eenvoudigste gebeurtenishorizon

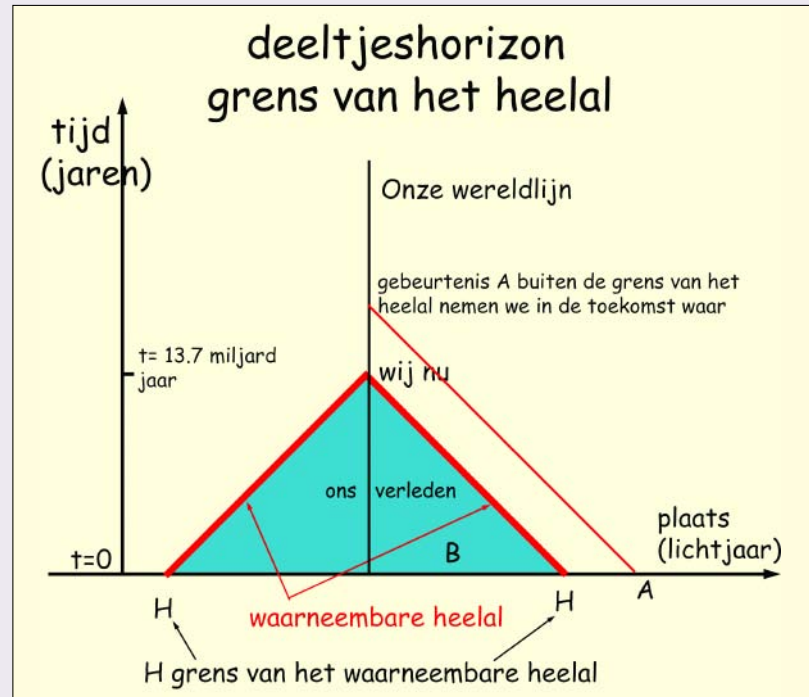
Een gebeurtenishorizon treedt niet alleen op in een ingewikkeld heelal-model met versnelde expansie, maar is meer in het algemeen geassocieerd met iedere blijvend versnelde beweging. We kunnen dat met een eenvoudig voorbeeld toelichten: stel een terrorist stijgt op met een vliegtuig dat niet sneller kan dan de geluidssnelheid, maar wel steeds dichterbij de limiet kan benaderen. Zijn snelheid neemt dus toe (versnelde beweging) maar blijft steeds net iets onder de geluidssnelheid. Elders patrouilleren straaljagers in de lucht die (even voor dit voorbeeld) precies met de geluidssnelheid gaan. Kunnen de straaljagers het vliegtuig van de terrorist inhalen?

Het antwoord hangt af van de plaats waar de straaljagers zich bevinden. Is die voldoende dicht bij de plaats des onheils, dan is het antwoord ja. De versnelde terrorist heeft even de tijd nodig om op snelheid te komen en de straaljagers kunnen daarvan profiteren en hem inhalen. Maar als de afstand te groot is, lukt het niet meer. Het verschil tussen de snelheid van de straaljagers (geluidssnelheid) en de bijna met de geluidssnelheid bewegende terrorist is daarvoor te klein.

De grens tussen deze gevallen is het equivalent van de gebeurtenishorizon. Vervang de straaljagers door fotonen en vervang de geluidssnelheid



Een gebeurtenishorizon in een vlakke, lege ruimte. Waarnemer W krijgt een steeds grotere snelheid. De helling van zijn baan neemt toe en nadert tot een hoek van 45 graden, de lichtsnelheid. Een stilstaande zender (S) stuurt lichtflitsen. Nummer 1 en 2 kunnen nog door W worden waargenomen, maar lichtflits 3 niet: de groene lijn is een gebeurtenishorizon voor de waarnemer W, maar niet voor de zender S.



De gebeurtenissen in het heelal die we nu waarnemen bevinden zich op de dikke rode lijn: dit is het waarneembare heelal. Het blauwe gebied is ons verleden, dat we kennen en dat ons beïnvloed kan hebben. Een gebeurtenis A is te ver weg, buiten het waarneembare heelal, maar de gebeurtenis kunnen we in de toekomst wel waarnemen.

door de lichtsnelheid. Het voorbeeld van een versnelde waarnemer in een verder lege en vlakke ruimte is afkomstig van Wolfgang Rindler, een fysicus en autoriteit op het gebied van de algemene relativiteitstheorie. Deze ruimte wordt wel Rindler-ruimte genoemd. Rindler is ook de man die de naam gebeurtenishorizon bedacht heeft. De theorie die men nodig heeft om dit voorbeeld door te rekenen, is de speciale relativiteitstheorie.

Een waarnemer (deeltje of wat dan ook) die vergeleken met iemand in rust een versnelde beweging ondergaat, zal wel steeds sneller gaan, maar toch niet sneller dan het licht bewegen. Zijn snelheid nadert steeds dichterbij de lichtsnelheid. De beweging die resulteert zien we hiernaast. En dat betekent uiteindelijk dat hij een aantal verder weg gelegen gebeurtenissen niet meer kan waarnemen: ze liggen buiten zijn waarnemingshorizon.

Versnelde beweging

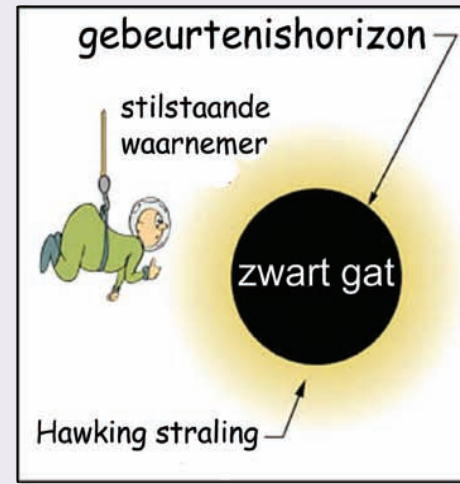
We bekijken nu wat de versnelde beweging als gevolg heeft voor de communicatie. Denk bijvoorbeeld aan een astronaut in een ruimtecapsule, in de vrije ruimte en ver weg van de zon. De capsule krijgt een steeds toenemende snelheid, ongeacht de grootte van de versnelling. Houdt de versnelling onbeperkt aan, dan neemt de snelheid steeds verder

toe om uiteindelijk de lichtsnelheid te bereiken.

Vanaf de aarde sturen we iedere seconde een lichtflits naar de astronaut. Hoe neemt de astronaut dat waar? Door de looptijd van de straling ziet de astronaut de eerste puls pas na enige tijd. Door zijn snelheid is hij iedere seconde een stukje verder en daardoor duurt het iets langer dan een seconde voordat de astronaut de volgende puls ontvangt. Hij ziet de klok van de aarde dus langzamer lopen. Er is nog een tweede effect: de golflengte van de lichtflits zal als gevolg van zijn snelheid verschuiven naar een langere golflengte (de zogeheten roodverschuiving die wordt veroorzaakt door het dopplereffect).

De roodverschuiving nadert tot oneindig naarmate je dichterbij de lichtsnelheid komt. Er is een moment waarop een lichtsignaal van de aarde niet meer bij de capsule aankomt en alle signalen daarna ook niet meer. Voor de astronaut ligt de aarde dan buiten zijn waarnemingshorizon. Op de aarde zelf gaat het leven gewoon door. Het enige bijzondere is dat de astronaut geen antwoord meer geeft op de verzonden boodschappen.

De gebeurtenishorizon is een grens in de communicatie. Vanuit de capsule gezien komt de aarde steeds dichterbij de waarnemingshorizon. De astronaut constateert dat de tijd op aarde steeds langzamer gaat



lopen en de roodverschuiving toeneemt. De tijdvertraging en oneindige roodverschuiving zijn essentiële kenmerken van gebeurtenissen vlak bij de waarnemingshorizon.

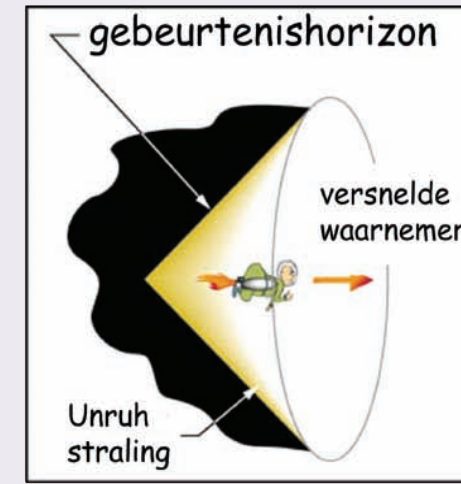
Zwarte gaten

Een gebeurtenishorizon of waarnemingshorizon treedt altijd op bij een versnelde beweging. Het begrip is vooral bekend geworden als beschrijving van de gebeurtenissen rond een zwart gat. Een zwart gat heeft zo'n sterke aantrekkingskracht dat niets, ook geen licht, eruit kan ontsnappen. Maar we kunnen het ook beschrijven aan de hand van iets dat er naar toe valt. Een object dat in het zwaartekrachtveld van een punt-massa van buiten naar binnen valt, krijgt vanuit onze zienswijze een steeds grotere versnelling. Het object is in vrije val en de snelheid nadert de lichtsnelheid.

Met dezelfde redenering als in de vorige paragraaf kun je dan aantonen dat men op aarde dat object in korte tijd steeds verder roodverschoven ziet. We constateren dat het voorwerp wel tot een zekere grens valt, maar hoe lang we ook wachten, we zien het die grens nooit passeren. De plaats waar de snelheid de lichtsnelheid nadert heet de gebeurtenishorizon.

Een betere definitie van een zwart gat is dan ook een object van een zekere massa, omgeven door een gebeurtenishorizon. Het is een bolvormig oppervlak waarbij wij aan de buitenkant zitten en niets kunnen zien van wat er zich binnen afspeelt. Een gebeurtenishorizon treedt ook op in andere situaties.

We noemen twee uitersten: tijdens de allereerste fase van de oerknal onderging het heelal een dramatisch grote, versnelde expansie welke inflatie genoemd wordt. In deze fase werd het heelal ook begrensd door een gebeurtenishorizon. Hier betreft



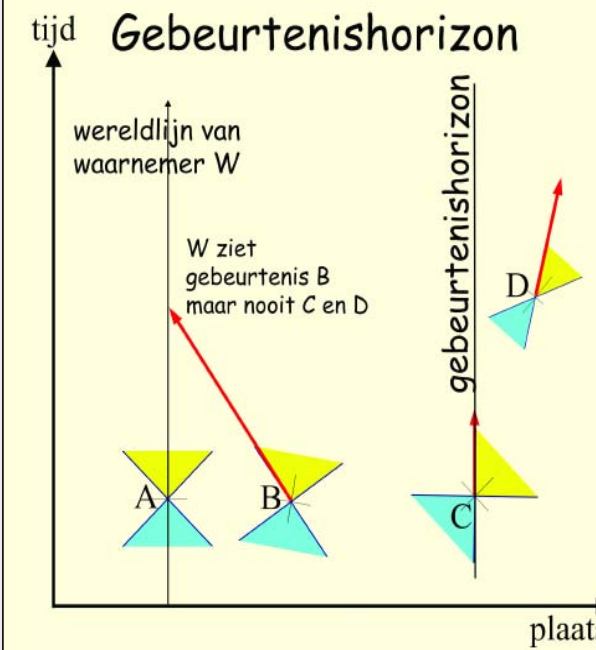
Volgens de kwantumnatuurkunde moet een gebeurtenishorizon te zien zijn omdat deze straling uitzendt. In het geval van een zwart gat (links) spreken we van Hawking-straling, die een zwart gat doet verdampen. Bij een versnelde waarnemer (midden) en een versneld expanderend heelal (rechts) heet dat Unruh-straling.

het een bolvormig oppervlak waarbij wij aan de binnenkant zitten, net als de gebeurtenishorizon in ons huidige heelal. Het andere voorbeeld is

dichterbij huis: in deeltjesversnellers op aarde worden deeltjes versneld tot bijna de lichtsnelheid. Ook daar moet sprake zijn van een horizon.

Belang van de gebeurtenishorizon

De precieze beschrijving van een gebeurtenishorizon is een kwestie voor de relativiteitstheorie. Maar er is iets spectaculairs aan de hand als we daarop een stukje kwantumnatuurkunde loslaten. Het blijkt dan dat je een gebeurtenishorizon letterlijk kunt zien: het verschijnt als een gloeiend oppervlak met een bepaalde temperatuur. Hoe groter de versnelling, hoe hoger de temperatuur. Deze grote verrassing werd tussen 1974 en 1976 ontdekt door de toen jonge studenten Bill Unruh, Jacob Bekenstein en Stephen Hawking. Hawking heeft daarmee voorspeld dat de horizon van een zwart gat toch een temperatuur heeft en dus straalt. Zwarte gaten kunnen verdampen. Deze berekeningen waren een poging om twee fundamentele theorieën, de relativiteitstheorie (over de zwaartekracht) en de kwantumnatuurkunde (over de straling) te combineren. Het is de eerste stap in de richting van een nog te maken volledige theorie, de kwantumzwaartekracht. Helaas is de voorspelde straling verwaarloosbaar klein voor astronomische zwarte gaten en dus nog nooit waargenomen.



In ieder punt in de tijdruimte geeft een lichtkegel aan vanuit welke richtingen een foton dat punt kan bereiken (de grens van de blauwe gebiedjes). En in welke richting de lichtsignalen worden uitgezonden (de grens van de gele gebiedjes). De lichtkegels hellen in de richting van materie, want licht en deeltjes worden door materie aangetrokken. De waarnemer W kan een gebeurtenis als B in de toekomst nog zien, maar als de helling van de lichtkegel te groot wordt (zoals in het grensgeval in C en D) dan kunnen C en D niet meer door de waarnemer W gezien worden. Het oppervlak van alle grensgevallen wordt de gebeurtenishorizon genoemd.

Instrumentendag op Sonnenborgh wederom succesvol

Op 13 april van dit jaar werd opnieuw een Instrumentendag gehouden op Sterrenwacht Sonnenborgh. Dat was dit jaar al weer voor de derde achtereenvolgende keer en met 170 bezoekers was dit wederom een succes. Deze dag wordt georganiseerd door Stichting 'De Koepel', Sonnenborgh – Museum & Sterrenwacht en de redactie van Zenit, met de bedoeling om zowel beginnende als gevorderde amateurs op één dag kennis te laten maken met verschillende aanbieders van astronomische instrumenten. Die aanbieders kunnen zowel professionele dealers zijn als amateurs met een zelfontworpen telescoop of montering.



Op het Terreplein van Sonnenborgh was er sprake van enig gedrang tussen de stands. (Foto: Edwin Mathlener).

Het idee achter deze dag is dat beginners er baat bij hebben om een keuze voor een kijker te kunnen maken, als ze naast elkaar gelijkwaardige kijkers bij verschillende aanbieders kunnen zien en vergelijken. Maar ook gevorderde amateurs mogen graag telescopen, oculairs en ccd-camera's op deze wijze onder de loep nemen, getuige het grote percentage gevorderden dat op deze dag afkomt.

Dit jaar waren er stands van de dealers Aquarius, Ganymedes, Robotics en Swan Optics, en ook de winkel van 'De Koepel' was deze dag open. Zelfbouwer Lucas Mesu toonde een robuuste, zelfontworpen montering, die hij ook voor anderen wil gaan bouwen.

Daarnaast was er natuurlijk weer een standje van Zenit waar Fred Hissink (hoofdredacteur Zenit) en Gilbert Peeters (samensteller Amateurs Actief) waarnaemsuggesties deden aan beginners en gevorderden en vragen beantwoordden over het doen van waarnemingen. Aan het eind van de dag toonden alle standhouders zich tevreden met de belangstelling van de bezoekers.

Sonnenborgh

Voor Sonnenborgh was deze dag een gewone openstelling, zoals iedere zondag, maar wel met meer publiek dan anders. Het museum had daar echter geen last van. De

standhouders stonden op de binnenplaats (het Terreplein) van het oude bastion, terwijl de rest van het museum gewoon toegankelijk bleef. Daar kon onder meer met de Merz-telescoop naar de zon worden gekeken, maar ook de expositie in de Weer- en Zonzaal met de historische zonnenspectrograaf en de tijdelijke tentoonstelling over poolonderzoek trokken de nodige belangstelling. Wel was het programma in de collegezaal aangepast. Daar werden nu lezingen gegeven door Harry Rutten, Fred Hissink, Robert Wielinga en Edwin Mathlener, die soms meer publiek trokken dan er eigenlijk in het zaaltje past.

Laagdrempelig

Binnen het jaarlijkse aanbod van sterrenkundige activiteiten heeft deze dag een bijzondere plek vanwege de speciale aandacht voor instrumenten en hoe deze te gebruiken, gecombineerd met de mogelijkheid om deze ook direct te kopen. En ofschoon de dag interessant is voor gevorderde amateurs, blijkt hij inderdaad ook laagdrempelig genoeg te zijn voor beginners om eens te komen kijken. Veel beginners kochten daadwerkelijk een kijker of gingen naar huis met plannen om binnenkort tot aanschaf over te gaan en serieus werk te gaan maken van de sterrenkunde hobby. En bovendien blijkt het reuze gezellig te



Optiekontwerper Harry Rutten gaf een voordracht over een speciale barlowlens om scherpe UV-beelden van de planeet Venus te kunnen maken. (Zie ook Zenit februari 2008, blz. 62.) (Foto: Edwin Mathlener).

zijn, zo'n drukke dag met telescopen-enthousiastelingen op Sonnenborgh. Reden genoeg voor de organisatoren

om alvast na te gaan denken over het programma voor de Instrumentendag 2009.

Scheepswolken achter vulkanen

Tijdens uitbarstingen vormen zich achter vulkanen af en toe langgerekte, bruine pluimen van vulkanische as. De uitstoot van schepen stimuleert boven de oceaan soms de vorming van een ander soort langgerekte pluimen, in dit geval bestaand uit witgetinte bewolking. Kunnen ook vulkanen vergezeld gaan van dergelijke 'scheepswolken'?

Tussen 14 juli en 15 december 2006 was de vulkaan Etna op Sicilië actief. Er waren talrijke uitbarstingen en de lava stroomde langs de hellingen naar beneden. Op 24 november gaf de noordwestenwind de door de vulkaan uitgestoten donkere, roodbruine aswolk de vorm van een langgerekte pluim. Deze werd boven de Middellandse Zee geleidelijk ijler naarmate de afstand tot de Etna toenam (foto 1). Door de aanwezigheid van de vulkanische as moest in die periode het vliegveld van Fontanarossa in het oosten van het eiland een nacht dicht.

Zo'n aswolk in de vorm van een pluim past goed in het beeld dat we van actieve vulkanen hebben. Net als grote uitbarstingen spreken ze meer tot de verbeelding dan bijvoorbeeld de minder spectaculaire, maar langer aanhoudende uitstoot van onzichtbare gassen of moeilijk zichtbare kleine deeltjes. Toch beïnvloeden ook die natuurlijke verontreinigingen uit pruttelende vulkanen de bewolking, de wisselwerking tussen dampkring



Foto 1: de Etna stoot een dikke, rood-bruine pluim uit met vulkanische as. Instrument: MODIS. Satelliet: Aqua. Datum: 24 november 2006. (Foto: NASA/GSFC/MODIS Land Rapid Response Team)

en zonlicht en daarmee het klimaat. Onlangs werd bekend dat daarbij onder andere dezelfde mechanismen werkzaam zijn als bij de vorming van de bekende wolkenpluimen van schepen, welke al sinds de jaren zestig van de vorige eeuw bekend zijn.

Scheepswolken

Scheepswolken hangen op een à twee kilometer hoogte boven delen van de oceanen waar het weer onder invloed staat van een hogedrukgebied. De wolkenstrepen zijn veelal ingebed in stratocumulusbewolking, maar kunnen ook vrijliggend voorkomen. Hun vorm is langwerpige; ze waaiëren enigszins uit en hebben daardoor wel wat weg van rookpluimen (foto 2). Wolkenpluimen van

schepen kunnen tot duizend kilometer lang worden en variëren in breedte van enkele kilometers, dicht bij het schip, tot enkele tientallen kilometers op grotere afstand.

De scheepswolken hebben een levensduur van enkele uren tot enkele dagen. Als ze zich voordoen is de onderste luchtlaag boven het zeeoppervlak, de zogeheten maritieme grenslaag, vrij vochtig en gevuld met relatief zuivere lucht. Daardoor heerst er een 'tekort' aan deeltjes in de atmosfeer die de druppelvorming op gang brengen, de zogenoemde condensatiekernen. De verbrandingsproducten van de scheepsmotoren vullen dit tekort aan: ze bevatten zwaveldioxide, dat hygroscopische sulfaatdeeltjes kan vormen die heel goed als condensatie-

Kees Floor

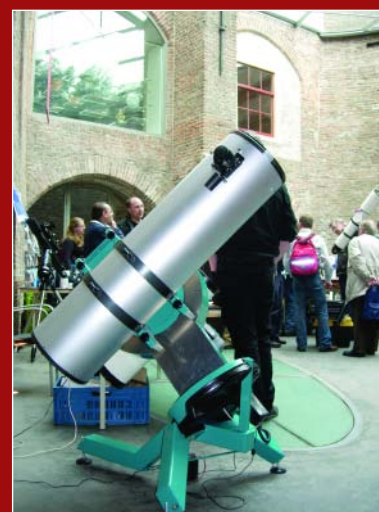
Kees Floor verzorgt cursussen, workshops, lezingen en geschreven teksten over het weer en aanverwante onderwerpen. Veel van zijn bijdragen aan Zenit (en andere tijdschriften) zijn te vinden op www.keesfloor.nl



Ook Robtics was dit jaar weer present met een diversiteit aan optische instrumenten en accessoires. Op de foto zien we eigenaar Rob Lefeber (links) en verkoopmanager Menno Marks. (Foto: Fred Hissink)



De aankoop van een optisch instrument is vooral een fysieke aangelegenheid. Links op de foto zien we eigenaar Rob Lefeber (links) en verkoopmanager Menno Marks. (Foto: Fred Hissink).



De indrukwekkende montering en kijker van Lucas Mesu. (Foto: Edwin Mathlener).

Edwin Mathlener

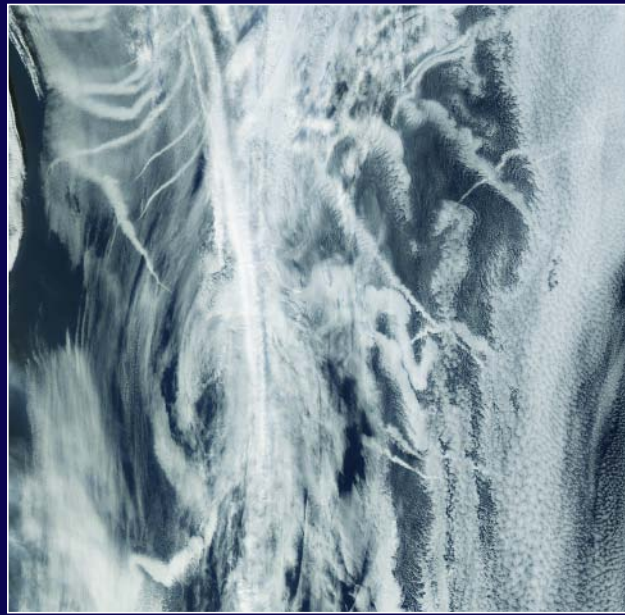


Foto 2: scheepswolken boven de Stille Oceaan ten westen van Canada en de Verenigde Staten. Onder de bewolking geheel rechtsboven bevinden zich de kustwateren van Zuidoost Alaska (US) en British Columbia (Canada). Instrument: MODIS. Satelliet: Aqua. Datum: 21 januari 2008. (Foto: NASA/Earth Observatory)

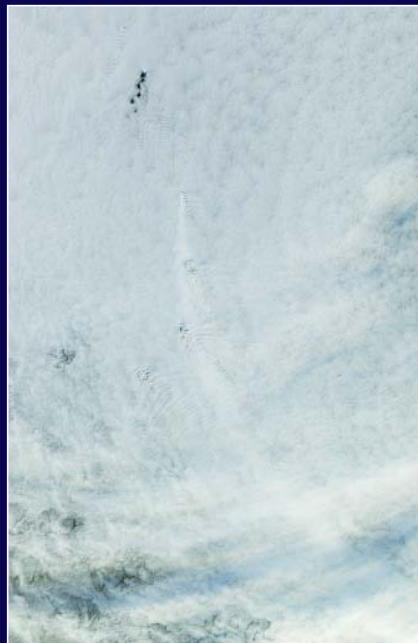
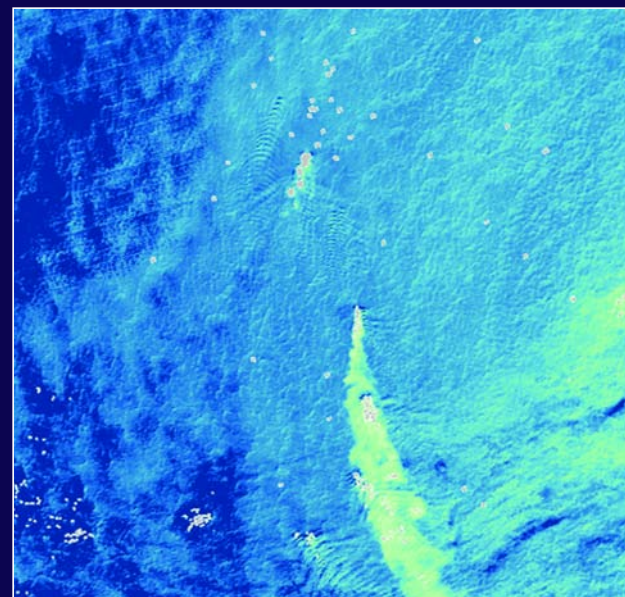


Foto 3: wolkenpluimen achter vulkanen van de Zuid-Sandwich-eilanden in het zuidelijk deel van de Atlantische Oceaan. Instrument: MODIS. Satelliet: Aqua. Datum: 27 april 2006. (Foto: NASA/Earth Observatory/Santiago Gassó)



tiekern kunnen dienen. In de rookpluim is het aantal deeltjes dat de druppelvorming in gang kan zetten, dan ook veel groter dan daarbuiten. Het reeds in de lucht aanwezige vocht verdeelt zich daardoor in de rookpluim van schepen over veel meer condensatiekernen dan daarbuiten. Wolken met veel kleine druppeltjes reflecteren het invallende zonlicht sterker dan andere wolken met evenveel water, maar verdeeld over een kleiner aantal grotere druppels. Op die manier worden de scheepswolken op satellietbeelden duidelijk zichtbaar en kunnen ze lichter afsteken tegen de overige bewolking.

Wolkenpluimen van vulkanen

Niet alleen schepen, ook pruttelende vulkanen kunnen grote hoeveelheden gassen en deeltjes uitstoten die een stempel drukken op de vorm die het bewolkingsspatroon stroomafwaarts aanneemt. De ontwikkeling van de wolkenpluimen achter vulkanen verloopt analoog aan die achter schepen. De pluimen beginnen bij verafgelegen vulkanische eilanden in de oceaan, waar de aanstromende lucht zuiver is, relatief weinig condensatiekernen bevat en geen invloeden heeft ondervonden van landoppervlakken. De uitstoot van de vulkanen bevat zwaveldioxide, hetzelfde gas dat een belangrijke rol speelt bij de vorming van scheepswolken.

Dergelijke wolkenpluimen achter vulkanen werden na gericht zoeken voor het eerst gezien in 2006 op satellietbeelden van de Amerikaanse satellieten Aqua en Terra. Foto 3 is gebaseerd op meetgegevens van het MODIS-instrument op de Aqua en geeft een situatie weer met zo'n wolkenpluim van vulkanische oorsprong. In beeld is het zeegebied van de zuidelijke Atlantische Oceaan in de omgeving van de Zuid-Sandwich-eilanden. Deze onbewoonde eilandengroep ligt ongeveer 2000 kilometer ten zuidoosten van de Falklandeilanden (Islas Malvinas) en bestaat uit elf eilanden, waarvan Saunders Island en Montagu de grootste zijn. Al die eilanden worden gevormd door actieve vulkanen; de hoogste daarvan is de Belinda op Montagu met een hoogte van 1370 meter. De Mount Michael op het zestig kilometer noordelijker gelegen Saunders Island heeft een hoogte van 990 meter.

De bovenkant van de gelijkmatig gevormde stratocumulusbewolking die het beeld in de getoonde weersituatie domineert, zit net boven de top van de Belinda. Achter de beide vulkanen zijn langgerekte, lichtgetinte pluimen zichtbaar, die elkaar vanaf Montagu overlappen. De totale lengte bedraagt ruim 400 kilometer. De pluim is ongeveer 35 kilometer breed en dat is breder dan de meeste scheepswolken.

In de stratocumulusbewolking zien we ook scheepsgolven (zie Zenit, maart 2007), die de ligging van Saunders Island, Montagu en verscheidene andere eilanden van de archipel veraden. Bovendien hebben zich achter een van de eilanden zogeheten Von Kármánwervels gevormd (zie Zenit, februari 1983 of september 2003).

Druppelgrootte

Het satellietbeeld van foto 4 berust eveneens op MODIS-metgegevens. Het beeld is zodanig kunstmatig ingekleurd dat lichtblauwe tinten overeenkomen met kleinere wolkendruppeltjes en donkerder blauw duidt op een grotere diameter van de waterdruppels. De bewolking in de pluim achter de vulkaan blijkt inderdaad kleinere druppels te bevatten, wat we op basis van de analogie met scheepswolken ook mogen verwachten.

De in de Verenigde Staten werkende Argentijnse onderzoeker Santiago Gassó, die de 'scheepswolken' achter vulkanen als eerste signaleerde, vond ze niet alleen achter de Britse eilanden, maar ook achter de Falklandeilanden (een door Argentinië opgeëiste eilandengroep). Ook achter vulkanen op Japan en op de Aleoeten in het noorden van de Stille Oceaan zag hij de wolkenpluimen optreden. Net als in de zuidelijke Atlantische Oceaan zijn de weersomstandigheden in die gebieden door de vrijwel onafgebroken aanwezige bewolking meestal te slecht om het verschijnsel goed te laten uitkomen op satellietbeelden. Vandaar dat de lange wolkenpluimen achter schepen, die zich overal kunnen voordoen waar schone lucht over de oceanen strijkt, zo veel langer bekend zijn.

Literatuur

Gassó, S. (2008). *The impact of weak volcanic activity on marine clouds*, Journal of Geophysical Research. Ter perse.

Foto 4: gemiddelde grootte van de wolkendruppeltjes in de situatie van foto 3, berekend uit MODIS-metgegevens. Lichte tinten duiden op kleinere druppels. De druppels in de pluim achter de vulkanen zijn kleiner dan die in de 'ongestoorde' bewolking.