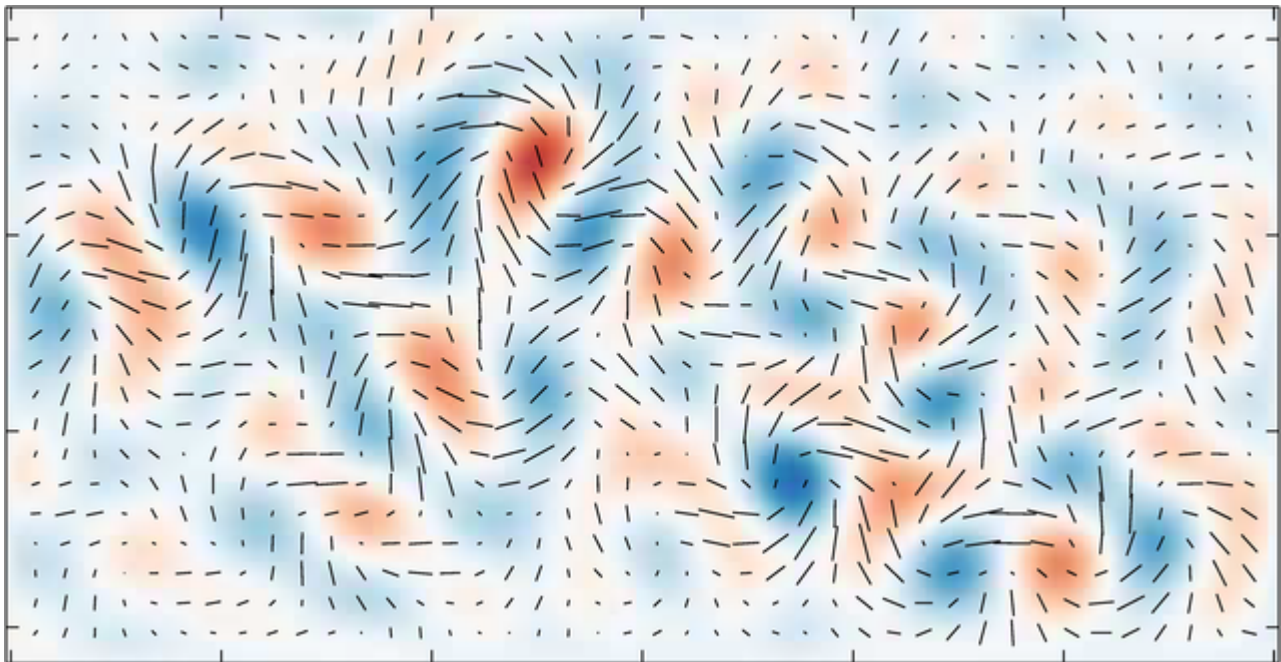


## Een echografie van het universum

*Waarnemingen van de kosmische achtergrondstraling worden wel eens liefkozend de babyfoto's van het universum genoemd. Deze alomtegenwoordige microgolfstraling is het oudste licht in de kosmos, en getuigt van de staat van het universum toen het nog maar zo'n 380 000 jaar oud was. Als de achtergrondstraling een babyfoto is, dan is waar we het vandaag over zullen hebben "de eerste echografie": primordiale zwaartekrachtgolven afkomstig van het universum vlak na zijn conceptie.*



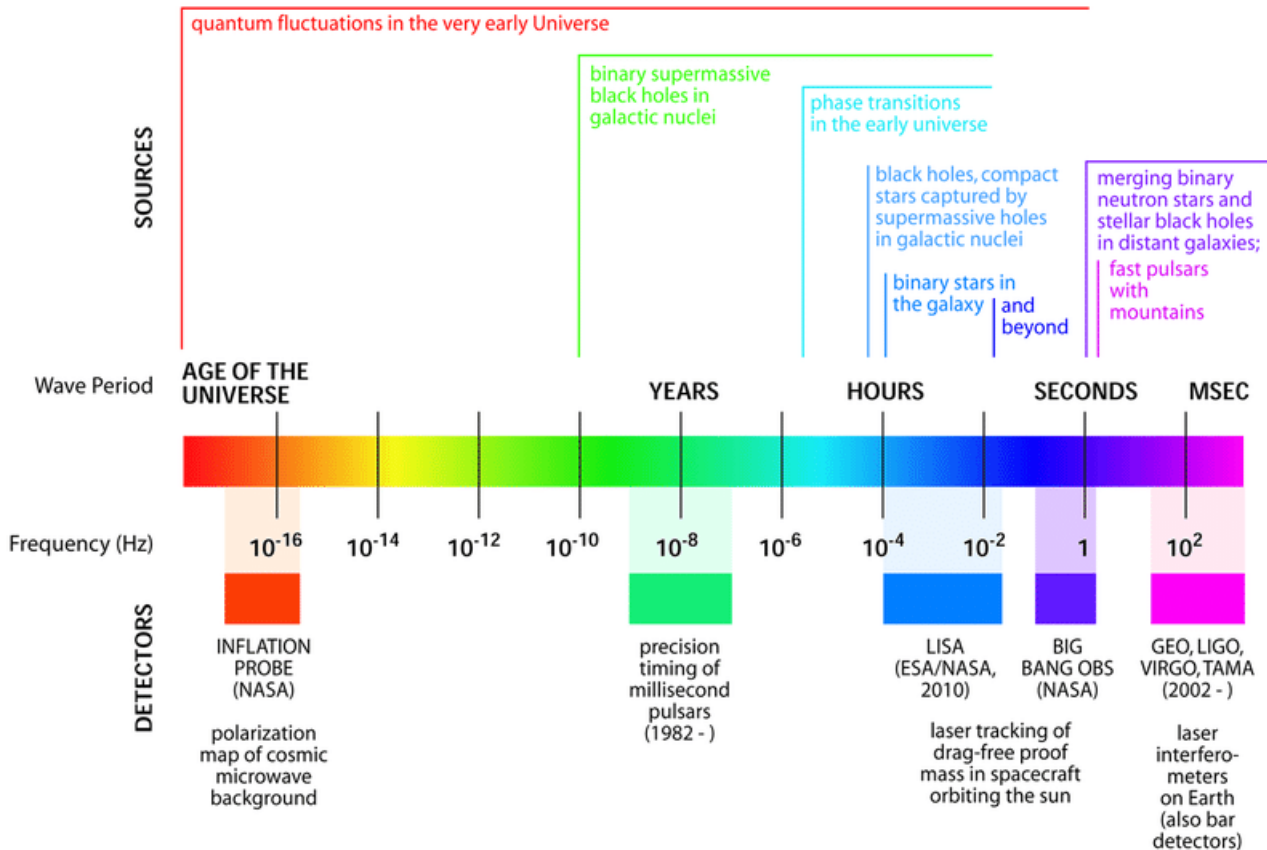
Afbeelding 1. Polarisatie van de kosmische achtergrondstraling. Primordiale zwaartekrachtgolven ontstaan een fractie van een seconde na de oerknal, en hebben een effect op de polarisatie van de achtergrondstraling. In deze plot worden de mate en oriëntatie van polarisatie volgens de B-mode voorgesteld door respectievelijk de kleurschaal en zwarte streepjes. Afbeelding: BICEP2 Collaboration.

Dat het tegenwoordig mogelijk is om zwaartekrachtgolven rechtstreeks waar te nemen is zonder twijfel een van de grootste wetenschappelijke triomfen van de afgelopen decennia. Sinds 2015 werden er al [elf observaties](#) bevestigd door de wetenschappers van de LIGO/Virgo-detectoren, en het lijkt geen twijfel dat deze ontdekkingen in de nabije toekomst

bijna routine zullen worden. Wat we door dit succes maar al te gauw vergeten, is dat we in een heel nauwe regio van het spectrum aan het “luisteren” zijn: rimpelingen in de ruimtetijd met een frequentie van om en bij de 100 hertz. Het is alsof we door het oerwoud lopen, maar enkel de kolibries kunnen horen zoemen. Het gebrul van de jaguar ontgaat ons.

Het elektromagnetisch spectrum gaat van heel korte golflengten (gammastraling) tot heel uitgestrekte (radiogolven). De ontdekking dat er nog veel meer te zien valt dan wat onze ogen kunnen waarnemen, heeft de astronomie onvoorstelbaar veel informatie opgeleverd. Hetzelfde geldt voor het gravitationele spectrum: wat we nu “horen” is slechts een teaser voor wat ons nog te wachten staat wanneer we ook diepere tonen kunnen waarnemen. Langere golflengtes – diepere tonen, dus – verwachten theoretici bijvoorbeeld van binaire sterren of supermassieve zwarte gaten, die veel trager rond elkaar bewegen dan de binaire zwarte gaten die tot nu toe werden waargenomen (afbeelding 2). De écht diepe bassen komen van zwaartekrachtgolven afkomstig van kosmische inflatie.

## THE GRAVITATIONAL WAVE SPECTRUM

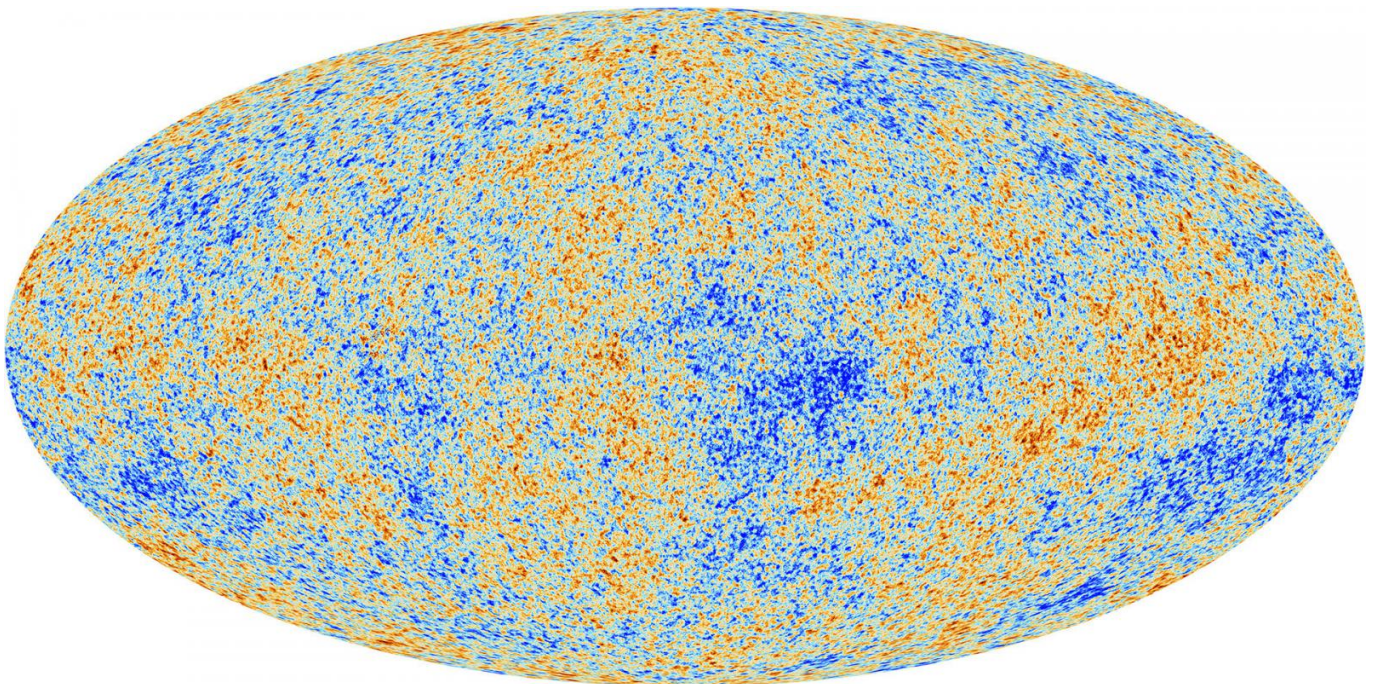


Afbeelding 2. Het gravitationele spectrum. De tonen (frequenties) van verwachte zwaartekrachtgolven, gaande van  $10^{-18}$  Hz (primordiale golven van kosmische inflatie) tot 100 Hz (golven van binaire zwarte gaten en roterende neutronsterren). Afbeelding: Institute of Gravitational Research/University of Glasgow.

Vorige week lazen we in een artikel op deze site al wat inflatie betekent en waarom we zulk een vergezocht idee nodig hebben om de details in de kosmische achtergrondstraling te verklaren. Tijdens de eerste  $10^{-35}$  seconden na de oerknal, een minieme fractie van een seconde, dus, zou het universum zichzelf wel 83 keer in grootte verdubbeld hebben. Deze absurde groeispruit is op dit moment de leidende verklaring voor het feit dat de achtergrondstraling zo “egaal” is: het is een uitleg voor het feit dat de microgolven van die

straling vanuit alle kanten van de kosmos een heel precieze golflengte van bijna 2 millimeter hebben.

Toch is de achtergrondstraling niet volstrekt egaal: door heel nauwkeurige waarnemingen door de [Planck](#)-satelliet werden minieme verschillen in de golflengtes in kaart gebracht (afbeelding 3). Ook die kleine fluctuaties worden verklaard door het model van kosmische inflatie. Ze hebben hun oorsprong in kleine onregelmatigheden in de dichtheid van het vroege universum, die het gevolg zijn van willekeurige quantumfluctuaties in de periode tussen de oerknal en de start van inflatie. Die fluctuaties werden als het ware opgeblazen en vormen de kiem van alle structuur in de vorm van de miljarden melkwegstelsels die we nu kennen - zie wederom het [artikel van vorige week](#). We zijn het gevolg van een extreem uitvergroete toevalligheid.



Afbeelding 3. Kosmische achtergrondstraling. Een deel van de kosmische achtergrondstraling, voorgesteld als een landkaart waarbij je niet naar het land kijkt, maar juist naar de hemel. Deze egale microgolfstraling heeft een heel precieze golflengte, maar analyse van de Planck-satelliet heeft toch piepkleine verschillen ("anisotropieën") in

beeld kunnen brengen, voorgesteld door rode en blauwe inkleuring. Deze verschillen zijn afkomstig van een vroeg universum met een net iets ongelijke dichtheid. Afbeelding: ESA/Planck.

Wanneer massa of energie zo'n (asymmetrische) uitvergroting ondergaat, zo leert Einstein ons, wordt de ruimtetijd waarin die zich bevindt aan het trillen gebracht. Die trillingen, die "inflatoire zwaartekrachtgolven" genoemd worden, verdwenen natuurlijk meteen na de periode van inflatie niet zomaar. Samen met de rest van het vroege universum, en na 380 000 jaar ook samen met de kosmische achtergrondstraling, bleven deze golven gestaag mee uitdijen. Geschat wordt daarom dat hun huidige golflengten een significant deel van de doorsnede van het zichtbare universum zouden kunnen zijn. Net als de achtergrondstraling komen deze zwaartekrachtgolven ons bovendien voortdurend en van overal aan de hemel tegemoet.

Voor de volledigheid: ook andere exotische processen in de vroege kosmos, zoals de "elektrozwakke faseovergang" en zogenaamde **topologische defecten**, kunnen de ruimtetijd verstoren. Alle tezamen worden deze zwaartekrachtgolven "primordiaal" genoemd, en belangrijk is dat deze diepe tonen énkél kunnen ontstaan in een universum dat inflatie ondergaan heeft. De waarneming van primordiale zwaartekrachtgolven zou dus rechtstreeks bewijs zijn voor kosmische inflatie: natuurkundigen noemen dit *smoking gun evidence*. Niet zo verbazend dus, dat we ze zo graag willen vastleggen.

Dat is gemakkelijker gezegd dan gedaan. Een directe waarneming met interferometers is vanwege de enorm lage trillingsfrequenties (één trilling iedere tien miljard jaar, bijvoorbeeld) alleen mogelijk over een heel lange tijdsperiode en met statistische analyse van waanzinnig veel data - en dan wellicht nog steeds niet. Een meer hoopvolle aanpak heeft opnieuw te maken met de kosmische achtergrondstraling. In het bijzonder schuilt de oplossing in de elektromagnetische polarisatie, ofwel: de gemiddelde voorkeur van de microgolven om in een bepaalde richting te trillen.

De polarisatie manifesteert zich in twee vormen: zogeheten E-modes en B-modes. Deze modes hebben alles te maken met respectievelijk "scalaire perturbaties" en "tensorperturbaties" in de dichtheid van de kosmos op het moment dat de straling voor de

babyfoto vrijkwam. Overweldigd door jargon? Dat is doodnormaal. De essentie: E-modes zijn al waargenomen; zien óók we B-modes in de CMB, dan is dit rechtstreeks bewijs voor primordiale zwaartekrachtgolven en dus voor inflatie. Zien we geen B-modes, dan wordt het erg lastig om de inflatietheorie met de observaties te verzoenen.



Afbeelding 4. BICEP2. Het waarnemingsstation van het BICEP-samenwerkingsverband, gesitueerd op de Zuidpool, observeert de polarisatie van een deel van de achtergrondstraling. De ontdekking van B-modes in 2014 werd helaas kort daarna ontkracht door de Planck-waarnemingen. Afbeelding: BICEP2 Collaboration (via nautil.us).

In 2014 [kondigde de BICEP2 Collaboration](#) aan dat hun zuidpooltelescoop B-modes ontdekt zou kunnen hebben (afbeelding 1 en 4). Erg indrukwekkend, vond de internationale

gemeenschap, want er bestaat een groot aantal zogenaamde “voorgrondfactoren” die detectie van het gewenste type polarisatie verstoren. Daartoe behoort het omvormen van E-modes naar B-modes door [gravitationele lenswerking](#), en helaas ook polariserend stof in de Melkweg. Het is dit laatste dat de BICEP2-wetenschappers de das omdeed: al gauw werd uit data van de Planck-satelliet duidelijk dat de “ontdekking” volledig toe te schrijven was aan interstellair stof. De enorme bijdrage van stof aan de B-modes betekende zelfs dat men nu vrij zeker was dat het aandeel van B-modes die *oorspronkelijk* in de achtergrondstraling zaten erg klein moest zijn. Zo klein, zelfs, dat sommige inflatietheorieën die een érg groot aandeel B-modes voorspelden (zoals de zogeheten “kwadratische inflatie”) juist het bijtje erbij moesten neerleggen, in plaats van triomfeerden.

De zoektocht gaat voort met [BICEP3](#), en (vanaf 2034) bijvoorbeeld ook met zwaartekrachtgolfdetector [LISA](#). Het vinden van primordiale zwaartekrachtgolven is van onschatbare waarde voor de natuurkunde: aandachtig luisteren naar de kosmische subwoofers is de enige manier om ons universum te bestuderen in zijn embryonale toestand.