

## Van Planck tot Leeftijd en samenstelling Cosmos

### Silde 1

Planck mat de variaties in microgolf achtergrondstraling. Hier zien we het belangrijkste resultaat de 'babyfoto' van het heelal. We leven als het waren in het centrum van een bol en dit is wat we rond ons waarnemen.

Ernaast staat het uit deze metingen afgeleide overzicht van de samenstelling van het heelal. Het doel van deze workshop is te laten zien hoe wetenschappers van het één naar het ander komen.

### Slide 2

In deze workshop heb je de mogelijkheid mee te doen door middel van het programma Mentimeter Wil je meedoen? Ga naar [menti.com](https://www.menti.com) en join de workshop met het weergegeven nummer.

Tik je naam in of een alias en die verschijnt op het scherm. Je krijgt misschien ook nog een herkenningssymbool toegewezen

### Slide 3

Om het heelal kwantitatief te kunnen beschrijven wordt uitgegaan van een aantal uitgangspunten: Het is een flinke lijst met uitgangspunten die ten grondslag liggen aan het standaard LambdaCMB model van het heelal.

1 en 2 zijn heel algemene uitgangspunten; we gaan ervan uit dat de ons bekende natuurwetten nu en in het verre verleden geldig zijn.

De overige uitgangspunten zijn meer specifiek, zij hebben een experimentele onderbouwing door de metingen aan de CMB, Dit geldt voor de punten 3 homogeniteit, 4 in het begin dicht en heet, expanderend en sterk afkoelend, 5 de samenstelling, 6 de ruimtekromming is ongeveer nul en 7 de Initiële fluctuaties zijn vrijwel schaalinvariant. We hebben het vandaag over het heelal als geheel. In het algemeen bedoelen we dan het zichtbare of het waarneembare heelal. Daar kunnen we afmetingen aan toekennen. Wat we weten is dat het heelal groter is dan een bol met een diameter van 90 miljard lichtjaar. Hoe groot het heelal is weten we niet en we kunnen dat ook niet weten. Dat gaan we even bekijken.

### Slide 4

Het vroege heelal voor de ontkoppeling van licht en materie (<380.000 jaar na 'oerknal') Het heelal was dicht en heet en je zou geen hand voor de ogen kunnen zien.

Het is te vergelijken met een weiland in dichte mist. Je staat ergens midden op het weiland; waar je ook kijkt je ziet een egale achtergrond.

Je weet niet of het weiland ophoudt, of eindigt met een sloot of een hek met prikkeldraad.

Dat is ook zo in het heelal. Je kunt geen idee hebben wat er achter datgene ligt wat je niet kunt zien. Je kunt je het best voorstellen dat het heelal zich oneindig ver in alle richtingen uitstrekt.

Als je heel goed en voldoende ver zou kunnen kijken zou je misschien plekken zien waar het iets lichter of donkerder is. En dat is het dan.

### Slide 5

Ons weiland is eindig groot, we zien hier dat er een grens is aangegeven door een hek. Ik kan me slecht voorstellen dat er in het heelal een plaats is met zo'n scherpe overgang waar de eigenschappen ineens heel anders worden. Het zou kunnen zijn dat op heel grote schaal de eigenschappen van het heelal op een continue manier veranderen en dan overgaan in een heelal met andere eigenschappen, waar bijvoorbeeld andere natuurwetten gelden. We kunnen niet weten of dat zo is.

Slide 6

Een belangrijk verschil met de mist boven een weiland is de temperatuur. We zien hier niet een mist van een paar graden boven nul maar een mist met een temperatuur van ruim 3000 kelvin.

Slide 7

Wat zien we hier doe eens een gok.

Slide 8

Dit was een stukje van het oppervlak van de ster Antares een rode superreus, gemaakt met de VLT in Chili.

De gemiddelde oppervlaktetemperatuur is 3600 Kelvin. We kunnen het oppervlak van de ster zien, maar we kunnen er niet in kijken, tenminste niet erg ver. Bij het heelal is het ook zo dichters dan 380.000 jaar na het begin van ons heelal kunnen we niet kijken. Het mechanisme is hetzelfde. In beide gevallen zijn er te veel vrije elektronen die het licht sterk verstrooien.

Slide 9

De hoofdbestanddelen van het huidige heelal en ook dat van de vroegste tijd dat we het kunnen waarnemen, zo'n 380.000 jaar na de oerknal. Het bestaat uit donkere energie, donkere materie en gewone materie.

Samen geven de een vlak heelal. Dat brengt ons bij de volgende vraag.

Slide 10

De ruimte is vlak, het heeft de kritische dichtheid. Dat betekent dat de energie inhoud van het heelal als geheel bekend is. Dat zegt nog niet hoe de samenstelling van het heelal is.

De eerste vraag kunnen we dus wel beantwoorden. Doe eens een poging.

Het antwoord is  $8 \cdot 10^{-27} \text{ kg/m}^3$  ofwel 5 à 6 protonmassa's per  $\text{m}^3$

Slide 11

Nog een vraag om erin te komen.

Alle materie die we kunnen zien is baryonische materie. Wat is de dichtheid hiervan en hoeveel kunnen we zien in sterren. Ga je gang.

Met het voorgaande antwoord mag die nu niet moeilijk zijn; een twintigste deel van de kritische dichtheid ofwel 0.25 tot 0,3 protonmassa per m<sup>3</sup>. Daarvan zit dan maar weer 10% in sterren.

#### Slide 12

Hoe het heelal er tijdens de ont koppeling uitzag is voor het eerst door de COBE satelliet gemeten. Dit is het equivalent van de wei in de mist. COBE mat in alle richtingen even veel straling met een temperatuur van ruim 2.7 Kelvin. Dit is het beste bewijs dat het heelal in die periode isotroop was. In microgolfstraling is het heelal ook nu nog vrijwel isotroop.

De microgolfstraling lijkt heel weinig te zijn. We kunnen die immers niet zien, maar dat is niet zo. De energie van deze straling is 100 maal zo veel als alle andere straling in het heelal, van sterren, planeten, quasars en sterrenstelsels, bij elkaar.

Nu is deze temperatuur 2.7 Kelvin. Bij de ont koppeling was de temperatuur meer dan 1000 maal zo hoog ofwel ongeveer 3000K

COBE zag ook minimale helderheidsverschillen in verschillende richtingen, die door de WMAP en de Planck satellieten veel gedetailleerder gedaan is. Zowel de WMAP als Planck gaven een babyfoto van het heelal. Die van de Planck is **de** 'babyfoto' van het heelal.

#### Slide 13

Hier zien die 'babyfoto' van het heelal. Dit plaatje alleen is al voldoende om de eigenschappen van het heelal kwantitatief te beschrijven. We zien de temperatuurvariaties, deze gaan samen met dichtheidsvariaties die we niet direct kunnen waarnemen. Bij een hogere temperatuur **is er een hogere dichtheid**. Uit metingen van COBE en WMAP was bekend dat de achtergrondstraling een temperatuur heeft van 2.7 Kelvin en in alle richtingen vrijwel gelijkmatig is met minuscule variaties. De temperatuurfluctuaties zijn niet meer dan een paar honderd microkelvin. Het gaat erom uit het plaatje de eigenschappen van de kosmos af te leiden.

Voor de analyse van de babyfoto is gebruik gemaakt een tweedimensionale fourieranalyse. Daardoor worden de temperatuurfluctuaties omgezet in kwantitatieve informatie.

#### Slide 14

Bij een normale Fourieranalyse zijn de basiselementen sinus of cosinus golven. Als we een verdeling in een vlak willen analyseren zijn tweedimensionale functies nodig. Voor het opsplitsen van de stralingsverdeling op een boloppervlak van de hemel worden harmonische bolfuncties toegepast. Ze worden gekarakteriseerd door twee getallen  $l$  en  $m$ .  $l$  geeft de verdeling in de richting van de polen,  $m$  de indeling langs de lange as, in ons geval parallel aan het vlak van de Melkweg.

Het zijn als het ware 2-dimensionale sinusfuncties,  $Y_{lm}$ . We zien er hier enkele afgebeeld. Rood is positief en blauw is negatief. Gemiddeld over het boloppervlak zijn ze nul (behalve die met  $l$  en  $m$  beide nul). Elke verdeling op de bol kan door een voldoende groot aantal van dit soort bolfuncties gereproduceerd worden. Er zijn functies met

voornamelijk verticale verdelingen en ook met voornamelijk horizontale verdelingen. Maar die zijn in dit geval minder nuttig.

Omdat de straling uit alle richtingen komt en omdat de straling niet richtingsafhankelijk is, zijn voornamelijk die functies waarbij  $m$  gelijk is aan een half  $l$  voor de CMB van belang. In dit plaatje is dat de middelste kolom. Bij de uitwerking blijkt dat ook: de analyse van de gegevens levert een matrix op waarvan alleen de diagonale elementen significant verschillend van nul zijn. Dat geeft een verband tussen  $l$  en  $m$ , en één ervan kan weggelaten worden. Hier wordt  $m$  weggelaten. Bij de Planckmissie levert dit een reeks getallen  $C_l$  op die de informatie bevatten.  $L$  is het multipool getal. Hoe groter  $L$  des te kleiner de hoekmaat.

Voor het uitwerken van de Planckmetingen zijn functies gebruikt met  $l$  waarden van 2 tot 2500.

#### Slide 15

De uitwerking van de analyse van de gemeten verdeling met behulp van bolfuncties levert de waarden van  $C_l$  als functie van het multipoolgetal  $l$ . In de figuren wordt  $DL$  gebruikt in plaats van  $C_l$  met  $DL = C_l * l * (l+1)$ .

Langs de horizontale as staat het multipoolgetal  $l$  langs de verticale as  $DL$ . Het plaatje geeft weer wat de bijdrage per (logaritmisch) multipoolgebiedje is aan de waargenomen temperatuurverschillen. De rode punten of streepjes zijn de meetresultaten en hun onzekerheid, de blauwe lijn is berekend met het model waarover het nu gaan hebben. Er zijn ook nog gegevens van de polarisatiemetingen en van de gravitationele lenswerking. Voor een ruwe analyse zijn ze niet nodig. Ze geven aanvullende informatie en maken het mogelijk de nauwkeurigheid te verhogen.

Om het heelal te beschrijven zijn (tenminste) zes parameters nodig die allemaal met behulp van deze grafiek bepaald kunnen worden.

Daar heb ik een vraag over: Als je zo naar dit plaatje kijkt welke parameters zou je dan willen gebruiken.

#### Slide 16

Als je naar het plaatje kijkt kun je dan parameters van deze grafiek bedenken die je zou willen gebruiken om het heelal te beschrijven. Wat zou je kiezen. Ga je gang

#### Slide 17

Ik heb deze gekozen.

De eerste drie parameters zijn relatief gemakkelijk uit de grafiek af te leiden. Ze zijn ook nodig.

De grafiek heeft meerdere maxima en minima. Zijn die dan niet belangrijk? Ja maar hun invloed is meer indirect. Hun positie volgt al uit de positie van het eerste maximum. Hun amplitude is belangrijker.

We zoeken nog een aantal andere parameters.

#### Slide 18

Ik heb een aantal suggesties opgesomd.

Maar als je denkt dat er nog een andere bij moet laat dan maar zien. We doen dat weer met Mentimeter

Slide 19

We hebben al drie parameters gevonden. We hebben er nog tenminste drie nodig. Jullie suggesties!

Slide 20

Dit zijn nog eens drie parameters, die met de 3 voorgaande voldoende zijn het heelal te beschrijven.

Slide 21

De tabel geeft de zes parameters op een rijtje in de volgorde waarop je in de Planck publicaties ziet.

We zien in deze tabel niet hoofdletter omega maar hoofdletter omega maal h kwadraat. Hoofdletter Omega geeft het energieaandeel als fractie van een vlak heelal, waarvoor Omega totaal 1 is. Vermenigvuldigd met h kwadraat levert dat de fysieke dichtheid op als fractie van de kritische dichtheid

Nu kunnen deze parameters niet onafhankelijk van elkaar bepaald worden. Ze worden alle zes in één proces bepaald. Daar gaan we zo naar kijken. Maar eerst iets anders. Nu zou het ideaal zijn als deze parameters volledige onafhankelijk waren. Dat maakt de analyse eenvoudiger. Maar dat is niet zo. Er zijn relaties tussen deze parameters. Dat maakt het ook nodig om ze samen te bepalen.

Slide 22

Welke van de parameters zijn gekoppeld. Voor twee ervan moet het niet heel moeilijk zijn. Ga je gang.

Nadat de mist van het vroege heelal was opgetrokken en de fluctuaties zichtbaar werden, ontstond er na een paar honderd miljoen jaar een lichte nevel, waardoor het contrast weer verminderd werd.

De amplitude van de van de variaties na ontkoppeling en de optische dichtheid van het universum na de reïonisatie spelen samen in wat we waarnemen.

Het contrast van de dichtheidsvariaties bij de ontkoppeling wordt verlaagd door de verstrooiing van de CMB fotonen later in het heelal. De contrastvermindering is meer dan 10% en dus niet verwaarloosbaar. We moeten dus beide kennen.

Er zijn nog meer correlaties maar die zitten wat meer verstopt. Daar kom ik nog op terug. We gaan eerst bekijken hoe de waarden van de verschillende parameters bepaald zijn.

Slide 23

De individuele parameters kunnen niet elk afzonderlijk met grote nauwkeurigheid bepaald worden. Voor de uitwerking van de Planck resultaten wordt het Metropolis-

Hastings algoritme gebruikt. Dit is een veel gebruikt Markov Chain Monte Carlo algoritme.

Wat is dit?

Er wordt begonnen met een willekeurige, selectie van waarden van de gekozen parameters binnen vooraf aan gegeven grenzen (Monte Carlo). Daarmee wordt berekend hoe goed de metingen, in dit geval het spectrum in de fluctuaties, beschreven worden. Dit leidt tot een nieuwe keuze van de parameters zo ontstaat een keten; de Markov Chain.

Sommige parameterkeuzen leiden tot een resultaat dat dicht bij de data ligt. Dat bepaald de keuze van het volgende punt. Dat werkt zo. Als er een voldoende aantal cycli doorlopen zijn komt een waarschijnlijkheidsverdeling tevoorschijn. Die bepaald dan de keuze van de volgende combinatie van parameters, dat is dan Metropolis-Hastings algoritme.

Als er geen a-priori gegevens zijn over de waarschijnlijkheidsverdeling dan wordt met een vlakke verdeling begonnen. Dat zien we links in de figuur. De parameter wordt een gelijke waarschijnlijkheid gekozen tussen de onder- en bovengrens.

Na een aantal stappen, in dit geval 13, komt dan de verdeling allengs tevoorschijn. Het aantal parameters,  $y$ , mag best wel groot zijn.

Op deze manier worden schattingen verkregen van alle meegenomen parameters.

Slide 24

Dit plaatje toont het resultaat van de berekening van een aantal parameters met de Metropolis-Hastings methode. In elk vierkantje zijn twee aan twee parameters tegen elkaar uitgezet. De kleuren geven de invloed van een derde parameter, hier de Hubble constante die daarbij hoort.

Elke stip is één punt van de iteraties het zijn er best wel veel. De eerste 30 procent van de iteraties zijn wegegelaten omdat dan de verdeling nog minder goed bepaald is. De ellipsen zijn de 1 en 2 sigma contouren.

Het bovenste en meest rechtse diagram geeft de verkregen waarschijnlijkheidsverdeling van de getoonde parameters. Zwart is alleen Planck, rood Planck met gegevens van WMAP, en grijs de WMAP alleen.

Dit figuur komt uit de eerste publicatie van de Planck satelliet over de kosmologische parameters en zijn minder scherp dan in de definitieve versie. In sommige opzichte zijn de gegevens van de WMAP, de lichtgrijze curven, nog beter. Daarom zien we hier ook gegevens van de WMAP. In de definitieve data is dit niet meer zo.

In de eerste kolom staat het resultaat voor  $\Omega_b h^2$ . Hier is  $\Omega_b h^2$ , de fysieke dichtheid van de baryonische materie en  $\Omega_b$  de fractie van de baryonische materie tov de dichtheid van een vlak heelal.  $h$  is bij definitie  $H_0/100$  km/sec/Mpc

Het bovenste veld geeft de waarschijnlijkheidsverdeling van de parameter. We zien dat  $\Omega_b h^2$  ongeveer 0,022 is.

De volgende kolommen zijn voor: donkere materie, de exponent van de schaalafhankelijkheid, de optische dichtheid na reïonisatie, de amplitude van de variaties en tenslotte donkere energie. In deze figuur staat donkere energie in plaats van de baryonische materie maar dat verandert het principe niet.

Op deze manier worden van alle parameters waarschijnlijkheden berekend.

Uit dit overzicht blijkt dat er correlaties bestaan tussen verschillende parameters. Tussen de meeste parameters zijn er zwakke correlaties, en zijn de onzekerheidsellipsen tamelijk rond en de onzekerheidsmarges klein. Uitzonderingen zijn de relaties tussen  $\tau$ , de optische dichtheid sinds reïonisatie, en  $A_s$  (lnAs) de amplitude van de temperatuurvariaties, die we al eerder zagen en die tussen de waarden voor de donkere massa en de donkere energie.

Dat betekent dat de combinatie goed bepaald is maar dat de afzonderlijke parameters moeilijker te bepalen zijn en er bijkomende gegevens gewenst zijn.

#### Slide 25

Belangrijk is nog om te weten is dat Planck niet alleen de fluctuaties in de temperatuur gemeten heeft maar ook de polarisatie van de CMB, de middelste figuur, en in welke mate de CMB nog beïnvloed is door de lenswerking van de materie tussen ons en het verre heelal bij 380.000 jaar na de oerknal, onderste figuur. Op deze drie figuren staan alle gegevens waaruit de eigenschappen van het heelal afgeleid zijn. De afgeleide correlatiespectra staan ernaast.

De bijkomende metingen helpen om het effect van de correlaties tussen de verschillende parameters te scheiden. We hebben gezien welke de waarde is van een flink aantal parameters die het heelal beschrijven.

Hoe de parameters bepaald zijn weten we nu. Daar gaan we nu naar kijken.

#### Slide 26

Hier zien we het overzicht van de waarde van de parameters van de definitieve analyse van de resultaten (Planck Legacy en Planck Cosmological Parameters).

Alle grootheden zijn met een nauwkeurigheid van minder dan een procent bepaald.

We hebben nu de waarden van 6 parameters die nodig en voldoende zijn om het heelal en de ontwikkeling in de tijd te beschrijven. Met behulp van deze parameters kunnen nog andere afgeleid worden

$\Omega_*$  volgt direct uit het spectrum.

De waargenomen amplitude van de fluctuaties wordt bepaald door het product van  $A_s$ , met  $e(-2\tau_{re})$ , het effect van deze twee parameters moet nog gesepareerd worden.

$N_s$  komt uit de overall helling van het spectrum

De baryonische materie  $\Omega_b h^2$  is in wisselwerking met de straling en veroorzaakt oscillaties. Hoe groter het aandeel baryonische materie des te sterker de fluctuaties. Als hun dichtheid gelijk zou zijn aan de kritische dichtheid zouden er fluctuaties van enkele milliKelvin optreden in de CMB, bijna 100 maal sterker dan waargenomen. Dit geeft een sterke beperking aan de maximale hoeveel baryonische materie. Op de massa-aandelen kom ik later nog terug.

Eerst eens kijken hoe optische dichtheid en amplitude van de fluctuaties ontward kan worden. Misschien heeft iemand een idee.

#### Slide 27

Ik heb een tijdje moeten zoek om te vinden hoe het opheffen van deze degeneratie mogelijk is.

Misschien heeft iemand een idee?

Vooral door gebruik te maken van de polarisatiemetingen; het EE spectrum.

Het polarisatie spectrum is gekoppeld aan het temperatuurspectrum en kan daaruit berekend worden. De reïonisatie werkt echter verschillend op beide, De temperatuur fluctuaties worden gedempt. Maar de polarisatie wordt juist versterkt, dat wil zeggen alleen op grote schaal, of wel lage  $l$  waarde, door de verstrooiing aan de materie in het latere heelal zelf die dan sterk aan het klonteren is.

Voor grote  $l > 30$  worden alle fluctuaties verminderd met de factor  $e^{-2l}$ , maar voor grotere schalen,  $l < 30$  worden ze juist versterkt door verstrooiing aan de vrijgekomen elektronen.

Slide 28

Daarmee konden deze twee parameters nauwkeurig bepaald worden.

Het definitieve resultaat:  $\tau = 0.0544 \pm 0.0070$  en daarmee  $A_s = 2.101 \pm 0.032 \cdot 10^{-9}$  en  $\ln 10^{10} A_s = 3.04 \pm 0.003$  is te zien in de figuur in rood.

Opmerking n.a.v. de workshop: dat ligt tamelijk ver van de weergegeven ellipsen.

In de hier getoonde figuur uit de eerste release van Planck waren de getallen nog minder goed bepaald, mede met de gegevens van WMAP met  $\tau = 0.089 \pm 0.013$  en daarmee  $A_s = 2.196 \pm 0.032 \cdot 10^{-9}$  en  $\ln 10^{10} A_s = 3.089 \pm 0.025$ . Dat ligt wel midden in de ellips.

Slide 29

We gaan nu bekijken hoe de massa uitwerkt.

De waargenomen fluctuaties in temperatuur en dichtheid hangen samen met initiële fluctuaties die ontstaan zijn in het heel vroege heelal. Een populaire theorie is dat ze ontstaan tijdens de periode vóór de inflatie. Na de inflatie was het stuk van het heelal zoals we dat nu kunnen waarnemen ongeveer 10 cm groot. Dat was ongeveer 10-35ste seconde na de oerknal.

Binnen drie minuten na de Big Bang was de samenstelling van het heelal zoals we die nu kennen, 75% waterstof 25 % helium en beetje deuterium en lithium. Verder waren neutrino's en straling. In deze periode waren de elektronen nog vrij en overheerste de straling.

Voor ons is van belang dat er fluctuaties in dichtheid van materie bestonden drie minuten na de oerknal toen het heelal de samenstelling had die we kennen.

De donkere materie heeft geen wisselwerking met de straling en zal zich gaan meteen lokaal gaan verdichten. De donkere materie vormt potentiaal putten waar ook de baryonische materie in willen vallen. Maar in een geïoniseerd medium zijn baryonische materie en straling gekoppeld. Materie geeft zwaartekracht en straling geeft tegendruk. Verdichtingen zullen door de zwaartekracht verder willen verdichten en verdunningen verder verdunnen. De straling wil het tegenovergestelde. De massa draagtheid zorgt ervoor dat er trillingen ontstaan.

Toen de inhoud van het heelal voldoende afgekoeld was na ongeveer 380.000 jaar vormden de protonen en elektronen waterstofatomen; het heelal wordt neutraal. Het heelal wordt dan transparant de koppeling gaat verloren, de trillingen houden op en hun toestand wordt dan bevroren. Wij kunnen de fotonen van die periode waarnemen. We



kunnen de verschillen in dichtheid niet zien, wel die van de temperatuur en polarisatie van de CMB.

#### Slide 30

Om de fluctuaties te kunnen duiden moeten we de uitbreidingsnelheid kennen, de geluidssnelheid. Doe eens een gok.

De geluidssnelheid was toen ongeveer de helft van de lichtsnelheid.

Die snelheid is niet constant maar neemt in de loop van de tijd wat af. Dat toont het volgende plaatje.

#### Slide 31

De maximale afstand die dichtheidsgolven kunnen bereiken in een bepaalde tijd wordt bepaald door de geluidssnelheid. Voor de condities die er in het heelal heersten vóór de ont koppeling kan de geluidssnelheid berekend worden, ze hangt af van de hoeveelheid straling en de baryonische materie.

Aanvankelijk is de snelheid iets minder dan 60% van de lichtsnelheid en hij neemt af naarmate de bijdrage van de fotonen afneemt. Als dat netjes doorgerekend wordt blijkt dat de golven ruim 130.000 lichtjaar hebben afgelegd op het moment dat het heelal doorzichtig wordt.

#### Slide 32

Wat hier van belang is waar de pieken in de correlaties van temperatuur (en polarisatie) optreden

Voor fluctuaties met een heel grote afmeting is er te weinig tijd verstreken voor het bereiken van een maximum. Uiterst links, daar zien we de niet versterkte initiële fluctuaties.

Bij de juiste afmeting wordt bij de ont koppeling een maximum in de verdichting bereikt. Dat zien we in de tweede kolom. Zwart is maximale verdichting. De tweede kolom valt samen met de eerste en grootste piek.

Als de afmeting is dan treedt na het maximum weer verdunning op. Deze bereikt zijn minimum op de tijd van de ont koppeling bij een ruwweg half zo grote schaal. Wit is maximale verdunning. En dat gaat zo nog even door.

Zowel verdichtingen als verdunningen geven in het correlatiespectrum aanleiding tot positieve pieken, het gaat immers om correlaties tussen temperatuurafwijkingen tussen punten op verschillende afstanden.

NB: We zien hier alleen verdichtingen en verdunningen van de normale baryonische materie. Omdat er weinig baryonische materie is wordt de donkere materie daar maar weinig door beïnvloed. De donkere materie blijft zich verder verdichten.

#### Slide 33

Wat hier van belang is waar de pieken in de correlaties van temperatuur (en polarisatie) optreden

Voor fluctuaties met een heel grote afmeting is er te weinig tijd verstreken voor het bereiken van een maximum. Uiterst links, daar zien we de niet versterkte initiële fluctuaties.

Bij de juiste afmeting wordt bij de ont koppeling een maximum in de verdichting bereikt. Dat zien we in de tweede kolom. Zwart is maximale verdichting. De tweede kolom valt samen met de eerste en grootste piek.

Als de afmeting is dan treedt na het maximum weer verdunning op. Deze bereikt zijn minimum op de tijd van de ont koppeling bij een ruwweg half zo grote schaal. Wit is maximale verdunning. En dat gaat zo nog even door.

Zowel verdichtingen als verdunningen geven in het correlatiespectrum aanleiding tot positieve pieken, het gaat immers om correlaties tussen temperatuurafwijkingen tussen punten op verschillende afstanden.

NB: We zien hier alleen verdichtingen en verdunningen van de normale baryonische materie. Omdat er weinig baryonische materie is wordt de donkere materie daar maar weinig door beïnvloed. De donkere materie blijft zich verder verdichten.

#### Slide 34

We zien de maximale afstand die de geluidsgolven hebben afgelegd terug in de hoekmaat van de correlaties. De afmeting is ongeveer 130.000 lichtjaar. De gemeten hoek is  $1.04/100$  radiaal ofwel  $0.6$  graad. De afstand die hierbij hoort is afhankelijk van de ruimtekromming.

Aannemend dat de ruimte vlak is zou hieruit een afstand  $d = 130.000/1.04 \cdot 10^{-2} = 12,5$  miljoen lichtjaar berekend worden. Maar we nemen dat nu pas waar. In die tijd is de ruimte met een factor  $Z+1$  groter geworden en ook die afstand.

Een ruwe schatting van de waarde van  $Z$  volgt uit de verhouding van de temperatuur bij ont koppeling en de waargenomen CMB temperatuur.  $3000 \text{ Kelvin} / 2,725 \text{ Kelvin} = 1100$ . Plank kan een eventuele bijdragen van de kromming met een nauwkeurigheid van 1% bepalen. In combinatie met de schaal van baryonische oscillaties wordt de nauwkeurigheid beter dan 0,1%. Het heelal is vlak binnen de meetnauwkeurigheid. Bij een heelal met een negatieve kromming zouden we een kleinere hoek zien bij een positieve kromming een grotere hoek

#### Slide 35

Als we de  $Z$  bij ont koppeling en de  $H_0$  waarde kennen, en daarmee de factor  $h$ , zijn de andere bekend

De totale hoeveelheid materie, vrijwel gelijk aan de som van de gewone en de donkere materie, bepaalt de hoever golven kunnen lopen in het geïoniseerde medium voor de ont koppeling. Dat levert een heel nauwkeurige relatie op tussen de totale massadichtheid en de hubbleconstante:  $\Omega_m \cdot h^3 = 0.0963 \pm 0.0003$ . Dat betekent een anticorrelatie tussen  $\Omega_m$  en  $h$ . zoals we eerder ook al zagen bij de optische dichtheid en de amplitude van de fluctuaties.

Hiervoor is een iets minder goede splitsingsmethode beschikbaar, de individuele parameters zijn minder goed vastgelegd, maar toch nog met een redelijke nauwkeurigheid van beter dan 1%. Het resultaat vinden we terug in deze tabel in de waarde voor  $H_0$  en  $\Omega_m$ . Dan kennen we ook  $\Omega_b$  en daarmee ook  $\Omega_d$ .

Dit plaatje geeft het resultaat voor enkele afgeleide parameters. Voor de afgeleide parameters worden alleen de gegevens van de basisparameters gebruikt. De rijen geven de waarde van de een paar afgeleide grootheden met hun onzekerheden uitgezet tegen elk van de basis parameters. De vlakke ellipsen van het resultaat tussen de dichtheid van de donkere materie en  $H_0$  en de materie dichtheid laten zien dat deze degeneraties niet goed opgeheven konden worden. De verschillende kleuren geven weer aan welke data gebruikt zijn. De blauwe ellipsen geven het uiteindelijke gerapporteerde resultaat.

#### Slide 36

In de voorgaande analyse is ook de waarde van  $Z$  bij ontkoppeling verstopt. In plaats van  $Z$  zouden we beter zeggen  $Z$ -equivalent want het is niet zo dat het heelal een scherm heeft opgetrokken bij een specifieke  $Z$ -waarde, maar net als bij mist op aarde is er een zekere afstand waarin de zichtbaarheid afneemt van 100% tot nul. We gaan eens kijken hoe dicht de mist was rond de ontkoppeling. De dichtheid van de 'mist' wordt bepaald door de dichtheid van vrije elektronen. Chluba en Sunyaev hebben berekend wat de dichtheid is van de vrije elektronen als functie van roodverschuiving. Dat is het bovenste plaatje. De dichtheid gaat van 1 bij  $Z = 1800$  naar  $1/1000$  e bij  $Z = 800$ . Het onderste plaatje geeft aan wat dat betekent voor de zichtbaarheidsfunctie, die aangeeft hoeveel straling we zien afkomstig van een bepaalde  $Z$ -waarde. Het maximum ligt bij iets minder dan 1100. De helft van we zien komt van  $Z = 1020$  tot 1150. Het zicht is dan ongeveer 75000 lichtjaar, niet iets waarvoor het KNMI zal gaan waarschuwen!!

#### Slide 37

Hier staan de uiteindelijk verkregen getallen van het heelal zoals we dat kennen, waarbij de vetgedrukte besproken zijn.

#### Slide 38

We zien hier een klein stukje strand in Katwijk. Daar heb ik een vraag over. Deze workshop gaat over hoe de eigenschappen van de kosmos uit de Planck gegevens afgeleid kunnen worden.

#### Slide 39

Ik zou graag je ideeën willen weten hoe dit plaatje past in het verhaal van de workshop. Ga je gang

#### Slide 40

De kosmische achtergrondstraling wordt gezien door een voorgrond waarin massa ongelijk verdeeld is. Het effect lijkt op water een ongelijk wateroppervlak doet met doorvallend licht. Er treedt een richtingverandering van het licht op en er zijn plaatsen waar het licht versterkt wordt en andere waar het verzwakt is. Dat heet gravitationele lenswerking.

Toch kunnen we ons een goed beeld vormen wat er op het zand te zien is, we kunnen het zand zelf ook zien.

Dit gebeurt ook met de kosmische achtergrondstraling. Door gravitatieeffecten treden extra fluctuaties op in de waargenomen straling. Omdat de hoekafhankelijkheid van de fluctuaties van de gravitationele lenswerking anders is dan die van de achtergrondstraling kunnen de effecten gescheiden worden.

Ernaast ook een Hubble foto met lenswerking van een sterrenstelsel op verder weg gelegen bronnen.

#### Slide 41

De workshop ging over twee plaatjes hier zien we ze nog eens.

Het ontstaan van de baby foto heb ik ook in een eerdere workshop behandeld. Het geeft een temperatuurkaart van het vroege heelal kort na de ontkoppeling van materie en straling.

De samenstelling van het heelal is de belangrijkste conclusie die hier getrokken kon worden. Ik hoop dat ik het hoe daarvan wat dichterbij heb gebracht.

#### Slide 42

Als toetje voor deze workshop een foto van een artistieke installatie die eiland-universum heet.

Ik was begonnen te zeggen dat we niet weten hoe groot het heelal is en of er achter de voor ons zichtbare grens, horizon, een heelal bestaat met andere eigenschappen. Dit is een vraag die niet alleen astronomen of kosmologen bezig houdt maar ook anderen inspireert, onder andere Josiah McElheny.

Wat we zien is een deel van een project genaamd: "An End to Modernity (2005)".

The set of ideas that informed this project came to fruition with Island Universe (2008), a large installation of five sculptures, each a model of a hypothetical universe. Island Universe is a fusion of design, science and the history of art, an installation that is at once a manifestation of design and ideas from the mid-1960s and a sculpture infused with contemporary sociology and cosmology.

#### Slide 43

--

#### Slide 44

In deze workshop heb ik willen laten zien hoe astronomen uit de babyfoto de samenstelling van het heelal hebben kunnen bepalen. Enerzijds is dat hoe ze het gedaan hebben (het Metropolis Hastings algoritme) en anderzijds welke natuurkunde er achter zit.

Ook heb ik willen proberen met Mentimeter de interacties te vergroten. Wat is daarvan terecht gekomen?

Extra slides; niet getoond.

#### Slide 46

$\tau$  Beschreven met twee modellen Model Tgh fuctie en FlexKnot

De roodverschuiving bij reïonisatie is ongeveer 8

#### Silde 47

Het bepalen van een spectrum gebeurt met Fourieranalyse.

We kennen dat van de muziek.

Je kunt een willekeurig geluid samengesteld denken uit verschillende frequenties, zoals bij deze muziekinstrumenten. Met een Fourieranalyse kunnen de frequenties zichtbaar gemaakt worden. Hoe ingewikkelder de geluidsvorm hoe meer frequenties het spectrum bevat. We zien dat bij het gaan van een stemvork, naar een Franse hoorn en naar een klarinet. Er is altijd een grondtoon en één of meer boventonen.

Omgekeerd kan met Fouriersynthese elk geluid samengesteld en opgewekt worden. In de muziek gebruikt men daarvoor een synthesizer.

Slide 48

Hier zien we het spectrum van de temperatuur variaties nog eens.

Het begin geeft informatie over de initiële condities, de hoofdpijk over hoever de dichtheidsgolven zich hebben kunnen uitbreiden, dan pieken die informatie geven over de verhouding van donkere en gewone materie, verderop wordt de invloed van de aanwezige straling steeds belangrijker. Tenslotte wordt de schaal van de fluctuatie niet veel groter als de afstand waarop fotonen kunnen doordringen, 'het zicht', er ontsnappen fotonen en de fluctuaties worden gedempt.

De tweede en derde piek zijn heel gevoelig voor de hoeveelheid donkere materie, De eerste en derde piek worden veroorzaakt door verdichtingen en tweede een verdunning. Omdat de donkere materie zich blijft verdichten werken de zwaartekrachtseffecten effecten van donkere en gewone materie samen, bij de tweede piek werken ze tegengesteld.

Slide 48

Hier hebben we nog een tool om het effect van belangrijke variabelen te laten zien.

We hebben drie knoppen om de samenstelling van het heelal te veranderen. Ook kunnen nog eisen dat het heelal vlak is of toelaten dat het dat niet is.

We beginnen met het standaard heelal. Dat is het stukje in de rechterbovenhoek.