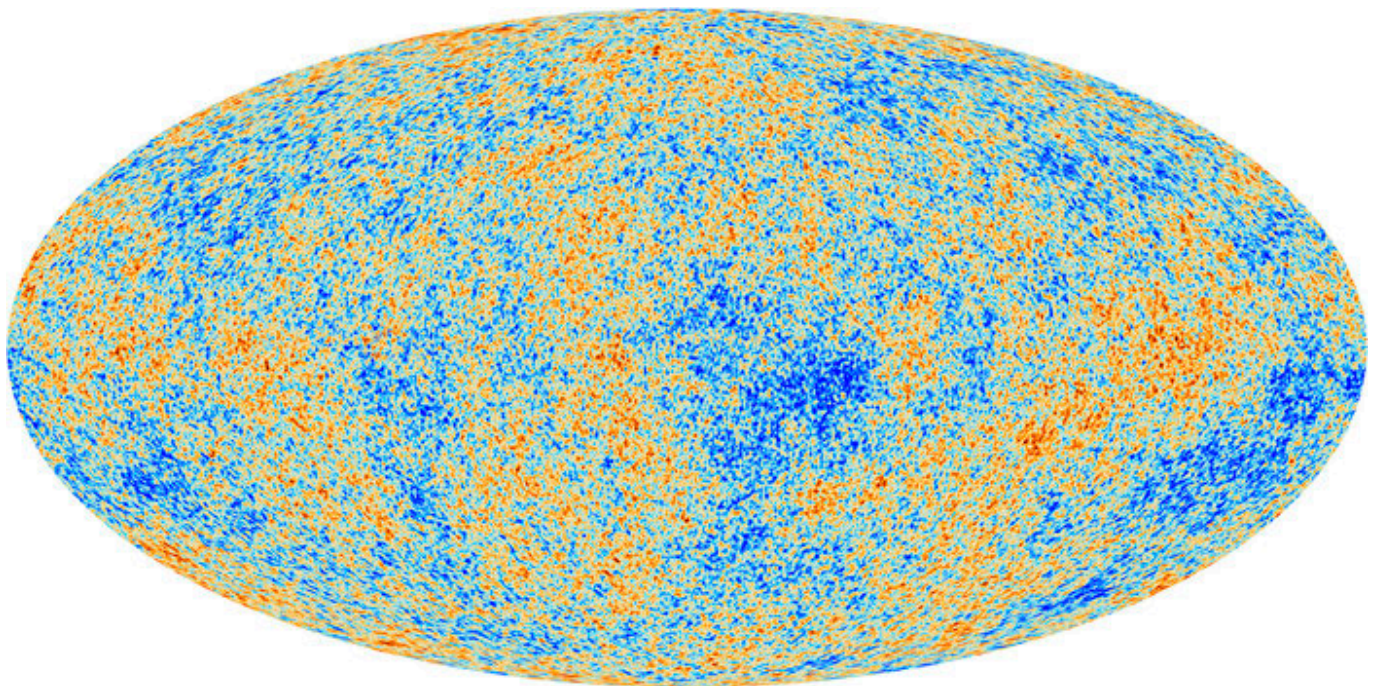


# Donkere Materie (4): Licht in de duisternis

**Donkere materie doordringt het universum op elke mogelijke schaal. In de voorgaande drie artikelen in dit dossier hebben we de zoektocht naar donkere materie op aarde, in onze Melkweg, in andere sterrenstelsels en in clusters van sterrenstelsels besproken. In dit vierde en laatste artikel kijken we naar donkere materie op de grootste schaal: de schaal van het hele universum.**

Hoeveel donkere materie is er in het heelal, en hoe kunnen we dat meten? Deze informatie ligt besloten in het oudste licht van het universum, dat ontstaan is in het begin van het heelal: slechts 380.000 jaar na de Big Bang. Toegegeven, dit lijkt lang als je erop moet wachten, maar op de 13,82 miljard jaar die het universum oud is komt het overeen met slechts 0.003% van de totale leeftijd. Om het aanschouwelijk te maken: dit komt overeen met een baby van een dag oud, in vergelijking met een honderdjarige man.



**Afbeelding 1. De kosmische achtergrondstraling.** De kaart geeft de temperatuursverschillen van de kosmische achtergrondstraling over de gehele hemel weer. Deze temperatuurverschillen worden veroorzaakt door de dichtheidsverschillen in het vroege heelal. Uit deze “babyfoto” kunnen wetenschappers veel informatie halen over de structuur en samenstelling van het huidige universum.

## Het eerste licht: de kosmische achtergrondstraling

Deze fotonen uit het begin van het universum zijn nu overal aanwezig en komen vanuit elke richting in het heelal, en worden daarom wel de ‘kosmische microgolf-achtergrondstraling’ (Cosmic Microwave Background radiation) genoemd. Deze achtergrondstraling werd in 1948 voor het eerst voorspeld door de Amerikaanse kosmologen Ralph Alpher en Robert Herman. Zij schatten de temperatuur van de kosmische achtergrondstraling op ongeveer 5 Kelvin (-268 graden Celsius) op basis van de oerknaltheorie. Volgens de heren Alpher en Herman had het heelal een minuscule kleine, dichte en hete oorsprong voordat het uitdijde tot het huidige formaat. Door deze hoge temperatuur zou het heelal straling hebben uitgezonden die nu nog steeds meetbaar is.

Het idee van Alpher en Herman raakte vrij snel in vergetelheid, maar werd in 1960 zelfstandig herontdekt door Robert Dicke. Slechts vier jaar later werden in New Jersey twee “Dicke radiometers” gebouwd. De eerste werd gebruikt door David Wilkinson en Peter Roll, collega’s van Dicke op de universiteit van Princeton, en was bedoeld om de voorspelde achtergrondstraling te meten. De tweede werd gebruikt door Arno Penzias en Robert Wilson van Bell Telephone Laboratories, en was bedoeld voor satellietcommunicatie. Het tweede experiment bleef echter last hebben van achtergrondruis met een temperatuur van 3,5 Kelvin.

Nadat Penzias en Wilson alles hadden geprobeerd om deze hinder tegen te gaan (uitstekende bouten afvijlen, duivenpoep verwijderen, et cetera) namen ze wanhopig contact op met de onderzoekers van Princeton. Dicke, Wilkinson en Roll hadden het direct door dat iemand ze voor was geweest: “Boys, we’ve been scooped.” Inderdaad waren het Penzias en Wilson die in 1978 de Nobelprijs ontvingen voor hun ontdekking. Voorspeller Robert Herman legde zich hierbij neer met de woorden: “You don’t give recognition to the person; you give it to the work.”

## De babyfoto van het heelal

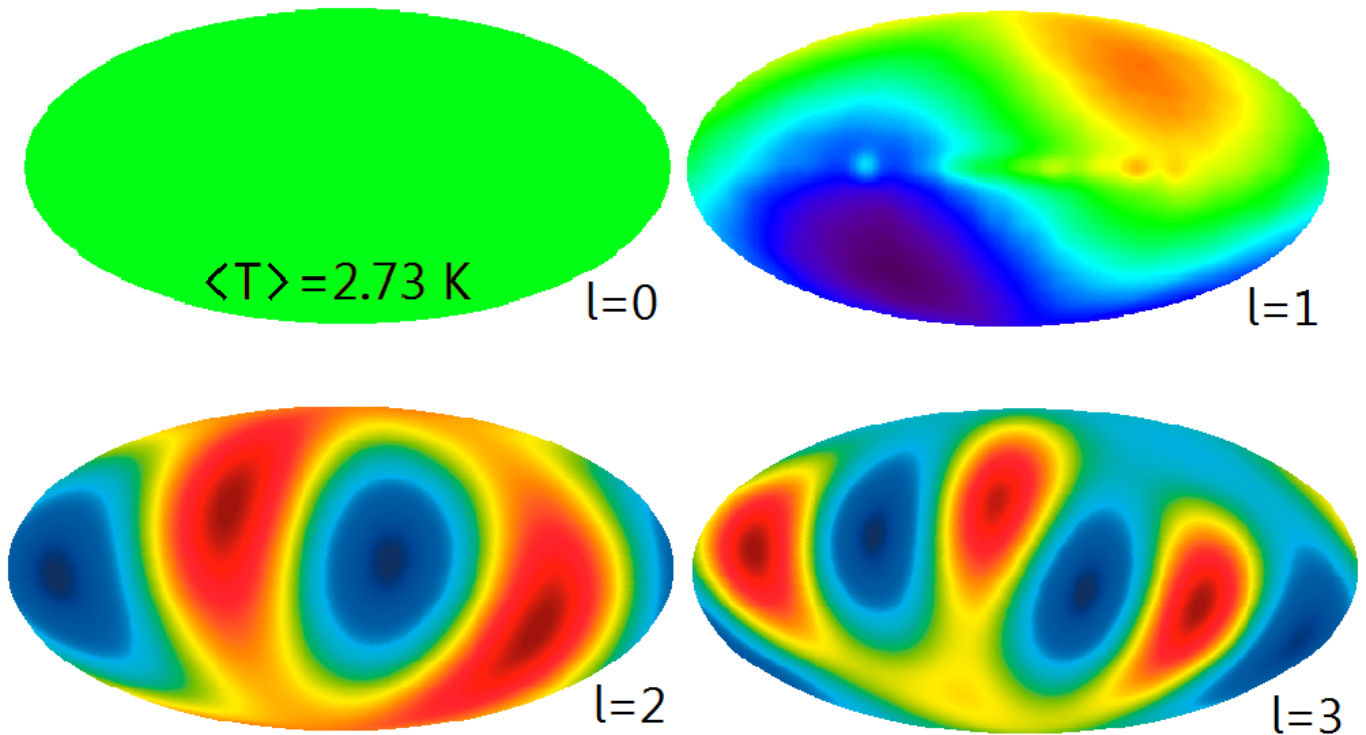
Door de manier waarop dit allereerste waarneembare licht ontstaan is, vertelt de kosmische achtergrondstraling ons onvoorstelbaar veel over de oorsprong, geschiedenis en samenstelling van het heelal. Je kunt het haast vergelijken met een “babyfoto” die astronomen bestuderen om te begrijpen hoe het heelal zich in de loop der tijd heeft ontwikkeld richting “volwassenheid”.

Het licht is namelijk ontstaan vlak na de oerknal, toen het heelal nog zo klein, dicht en heet was dat alle materie uit plasma bestond. Plasma is een toestand van materie (net als vast, vloeibaar en gas), waarin de elektronen door de hitte uit hun atomen worden gestoten. Binnen dit plasma werden alle aanwezige fotonen door de vrije elektronen verstrooid als ballen in een flipperkast, niet in staat om te ontsnappen. Toen 370.000 jaar later het heelal genoeg was uitgedijd en afgekoeld om de protonen en elektronen te laten combineren tot neutrale en meer verspreide deeltjes, kon het licht eindelijk aan haar lange reis door het heelal beginnen.

De temperatuur van deze fotonen bevat waardevolle informatie over de dichtheidsverdeling in het heelal op het moment dat ze voor het laatst door een elektron werden verstrooid. Omdat deze vroege dichtheidsverschillen onder invloed van de zwaartekracht en de uitdijning van het heelal uiteindelijk zijn ontwikkeld tot onze huidige structuren (clusters, melkwegstelsels, sterren, planeten en gekke kale apen met telescopen), wordt er veel aandacht besteed aan de studie van deze dichtheidsverschillen, en hoe deze hun licht kunnen laten schijnen op de inhoud en eigenschappen van het heelal.

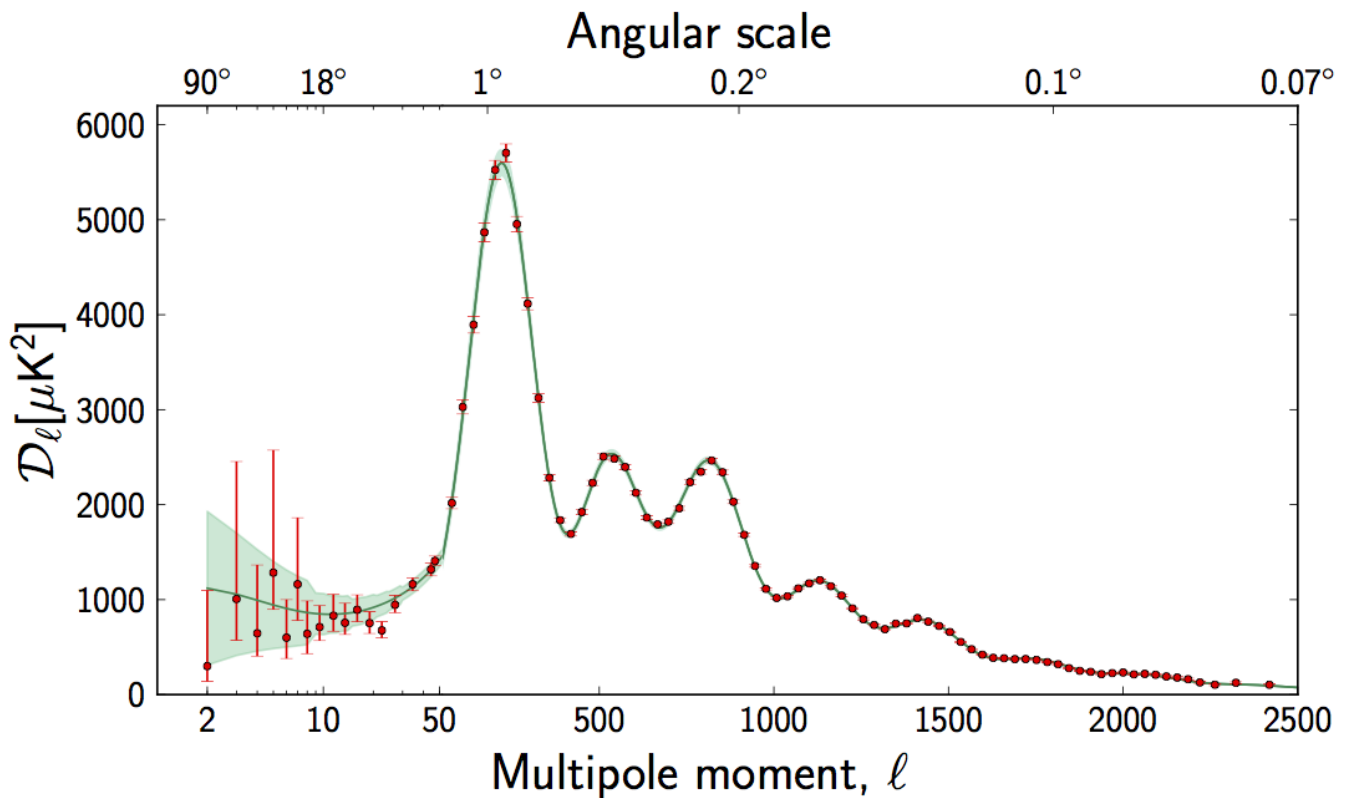
## Donkere materie en donkere energie

De kaart van de kosmische achtergrondstraling over de gehele hemel (afbeelding 1 hierboven) zegt op het oog niet veel over de vorm en inhoud van het heelal. De temperatuurverschillen van het licht, die de dichtheidsverschillen weergeven, kunnen echter wiskundig beschreven worden door het spectrum het zogenaamde “multipoolmoment”  $D_l$ . Dit is een maat voor de kracht van de fluctuaties op een schaal van ongeveer  $\theta=180/l$  graden aan de hemel.



**Afbeelding 2. Multipoolmomenten van de kosmische achtergrondstraling. De multipool  $l$  is omgekeerd evenredig met de schaal aan de hemel waarop temperatuurverschillen in de kosmische achtergrondstraling worden gemeten: hoe hoger  $l$ , hoe kleiner de fluctuaties.**

Dat wil zeggen dat  $l=0$  de gemiddelde temperatuur over de gehele hemel geeft (de monopool),  $l=1$  de fluctuatie op grote schaal over de helft van de hemel (de dipool),  $l=2$  de fluctuatie over de helft van de hemel (de quadrupool), et cetera - zie afbeelding 2. Naarmate de waarde van  $l$  stijgt worden de fluctuaties op steeds kleinere schalen gemeten, en dit wordt weergegeven door het spectrum van afbeelding 3.



**Afbeelding 3. Het spectrum van het multipoolmoment.** Het spectrum van het “multipoolmoment”  $D_l$  van de kosmische achtergrondstraling, gemeten door de Planck-telescoop, draagt veel informatie over de vorm en samenstelling van ons heelal.

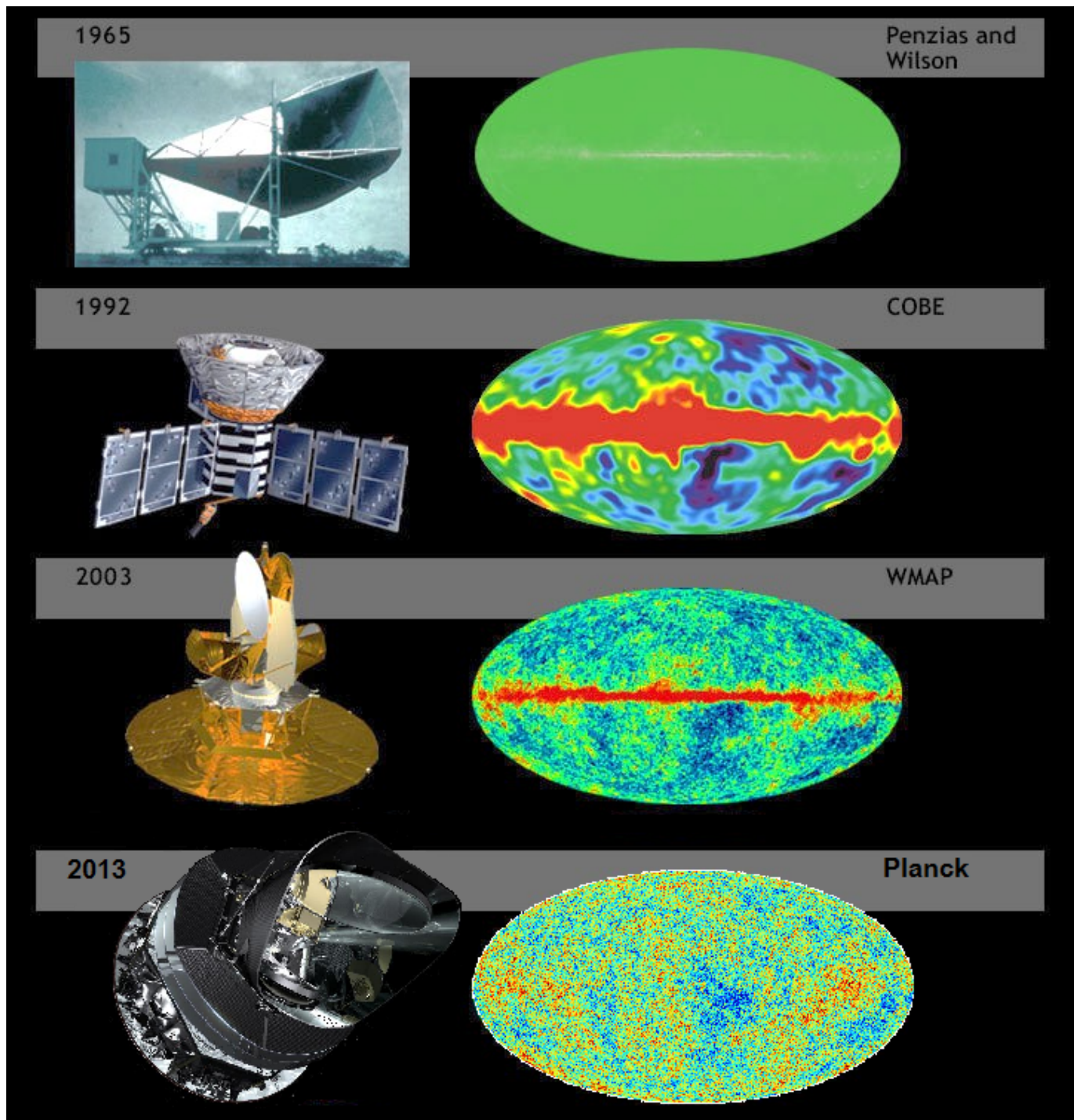
De pieken in het spectrum tonen op welke schaal de fluctuaties groot zijn. Fysisch gezien zijn deze pieken het gevolg van “akoestische oscillaties”, een soort geluidstrillingen die worden veroorzaakt door de strijd tussen de verschillende componenten in het vroege heelal – bijvoorbeeld de strijd die plaatsvond tussen de fotonen en de baryonen die zich in het plasma van het jonge universum bevonden. De fotonen willen de dichtheidsverschillen namelijk wegvagen, terwijl de materie juist bij elkaar wil klonteren onder invloed van de zwaartekracht.

Dit soort processen zorgt ervoor dat de pieken in het spectrum ons belangrijke informatie verschaffen. De eerste piek vertelt ons de totale energiedichtheid van het heelal, inclusief fotonen, baryonen, donkere materie en de donkere energie die de uitdijing van het heelal veroorzaakt. De totale dichtheid is gelijk aan de “kritieke dichtheid”: de [dichtheid waarop het heelal vlak is](#). De verhouding tussen de tweede en de eerste piek vertelt ons de dichtheid van normale materie, en de derde piek geeft de dichtheid van donkere materie.



## COBE, WMAP en Planck

Sinds de ontdekking van Penzias en Wilson zijn er door verschillende ruimtetelescopen steeds nauwkeurigere hemelkaarten gemaakt die de temperatuurverschillen in de kosmische achtergrondstraling weergeven: zie afbeelding 4. Dit is echter erg lastig, aangezien het relatieve temperatuurverschil kleiner is dan 0,001%.

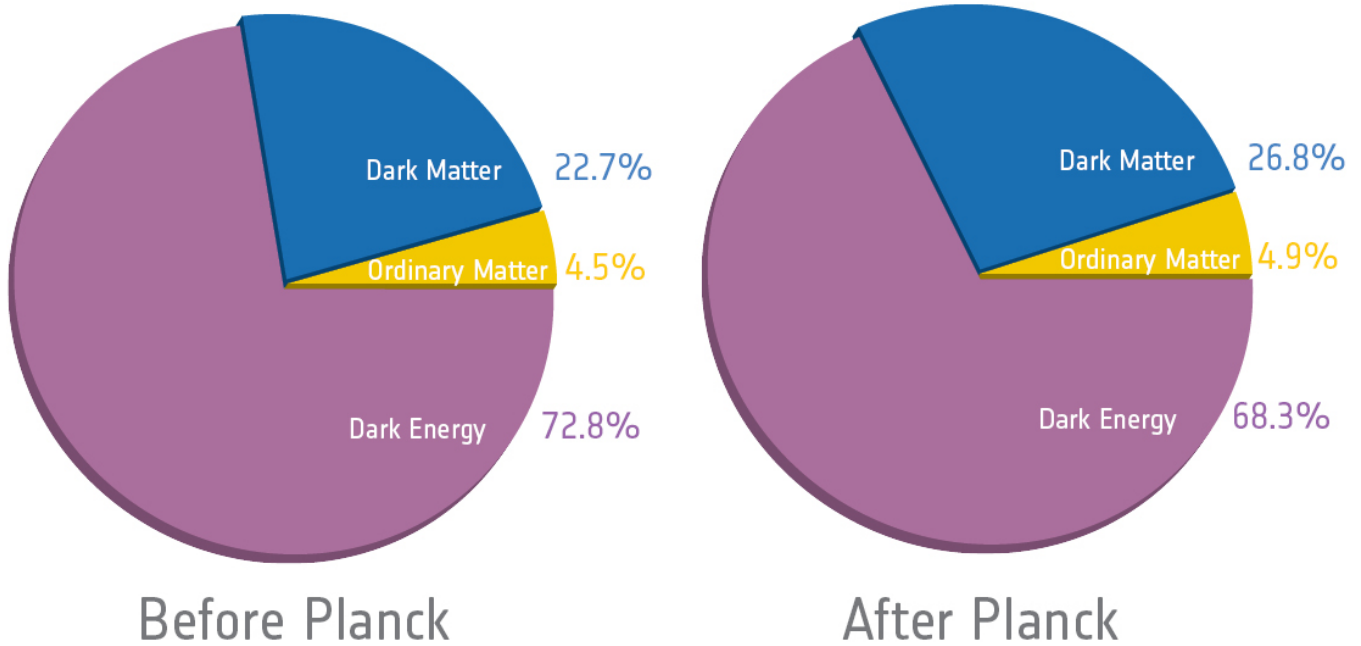


**Afbeelding 4. De belangrijkste metingen van de achtergrondstraling. De vier belangrijkste metingen van de microgolf-achtergrondstraling. Met elke nieuwe missie verwerven we meer kennis over de samenstelling van het universum. Bron bovenste drie afbeeldingen: [NASA](#). Bron onderste afbeeldingen: [ESA](#) (1,2).**

Het eerste project dat erin slaagde om dit verschil te meten was NASA's Cosmic Background Explorer (COBE), die gelanceerd werd in 1989. Samen met verschillende aan luchtballonnen bevestigde instrumenten stelde COBE vast dat de kosmische achtergrond exact overeenkomt met hittestraling van 2,7 Kelvin; een zeer sterk bewijs voor de oerknaltheorie. Helaas had deze telescoop een te lage resolutie om veel prijs te geven over de samenstelling van het heelal.

De hierop volgende Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP), genoemd naar de toen pas overleden voorspeller David Wilkinson, werd in 2001 gelanceerd door de NASA. De 33 keer hogere resolutie zorgde ervoor dat de leeftijd van het universum (13,73 miljard jaar), de vorm van de ruimte-tijd (vlak) en de dichtheid van baryonen (4,5%), donkere materie (22,7%) en donkere energie (72,8%) in het heelal konden worden bepaald. Dit veroorzaakte een revolutie binnen de kosmologie, waardoor de WMAP-artikelen zich lange tijd onder de meest geciteerde werken van de hele natuur- en sterrenkunde bevonden.

De nieuwste metingen van de achtergrondstraling, die in 2013 zijn uitgebracht, werden gedaan door de Planck-missie van de ESA. Deze telescoop, die in 2009 gelanceerd werd, heeft een nog hogere resolutie dan WMAP en geeft ons waarschijnlijk data met de beste kwaliteit die ooit kan worden bereikt op het gebied van de kosmische achtergrondstraling. Verbazingwekkend aan de resultaten was dat de samenstelling van het heelal veranderd leek ten opzichte van WMAP, zoals te zien is in afbeelding 5.



**Afbeelding 5. De samenstelling van het heelal.** Hoewel de samenstelling van ons heelal veranderd lijkt sinds de nieuwe resultaten van Planck, is dat niet zo. De nieuwe, preciezere getallen kunnen verklaard worden door een verandering in de gemeten waarde van de Hubble constante  $H_0$ .

Het lijkt hier alsof donkere energie iets heeft moeten inleveren terwijl gewone en donkere materie juist zijn uitgebreid, wat gezien het feit dat het heelal in het afgelopen decennium niet significant veranderd is, eigenlijk onmogelijk is. Dit alles komt echter doordat de door Planck gemeten waarde van de Hubbleconstante  $H_0$ , die aangeeft hoe snel het heelal uitdijt, lager is dan we op grond van WMAP dachten: slechts 67,8 in plaats van 70 km/s/Mpc.

Als blijkt dat het heelal minder snel uitdijt, betekent dit dat de substantie die de uitdijing veroorzaakt, donkere energie, waarschijnlijk in minder grote hoeveelheid aanwezig is, en dat de substanties die het tegengaan, normale en donkere materie, juist in grotere hoeveelheid bestaan. Ook betekent het dat het heelal er langer over gedaan heeft om de huidige omvang te bereiken, wat erop neerkomt dat het heelal ouder is dan we dachten. Zo kan het licht dat zo'n 13,8 miljard jaar geleden is ontstaan ons nog steeds voor verrassingen stellen.

*Afbeelding blokkenschema: ESA.*