

ESA's mikrobølgesatellit PLANCK

Af Hans Ulrik Nørgaard-Nielsen, DTU Space, Institut for Rumforskning og -teknologi, Danmarks Tekniske Universitet

Med ESA's Planck satellit vil vi få kort over mikrobølge-baggrundstrålingen med hidtil uset følsomhed og detaljerighed. Disse data vil give nye unikke informationer om de allertidligste faser i Universets udvikling. DTU Space har været ansvarlig for levering af spejlsystemet til Planck og dermed sikret danske forskere's direkte adgang til denne enestående database. Planck satellitten skal sendes op i maj år og vil nå sin bane omkring Solen ca. 1,5 millioner km fra Jorden efter ca. 2,5 måneder. I artiklen vil de videnskabelige forventninger til Planck og det danske engagement blive nærmere beskrevet.

Den kosmiske mikrobølge-baggrundsstråling

CMB (Cosmic Microwave Background) blev opdaget i 1964 af de to amerikanske astronomer Penzias og Wilson. De var igang med at undersøge mikrobølgestrålingen fra vores egen Mælkevej (se figur 1). Til deres store overraskelse registrerede de et signal, som så ud til at være konstant, uafhængigt af hvor på himlen deres teleskop pegede. Som sagt var de meget overraskede over at finde dette signal, så de gjorde et meget stort nummer ud af at undersøge, om det kunne stamme fra en nærliggende radiostation, om signalet kunne komme fra vores solsystem, eller fra Mælkevejen. De undersøgte også omhyggeligt om dette kunne stamme fra deres radioteleskop selv. De gjorde sig endog den ulejlighed at rense hele det store volumen for duereder og duemøj. Men de måtte konkludere, at signalet måtte komme fra det ydre rum.



Figur 1. Penzias og Wilson foran det store radioteleskop de brugte til opdagelsen af CMB.

De publicerede deres opdagelse i det anerkendte amerikanske tidsskrift *Astrophysical Journal* i 1965. Her gør de detaljeret rede for deres omhyggelige arbejde med først at udelukke alle mulige kilder til dette signal, og at de er sikre på at signalet kommer langt fra Jorden, Solen og vores Mælkevejen. De har ikke noget bud på, hvor strålingen stammer fra.

I artiklen lige efter Penzias og Wilson's skriver en anden amerikansk gruppe, ledet af Robert Dicke, at de kender Penzias og Wilson's opdagelse, og at de har et

godt bud på, hvor strålingen kommer fra, nemlig at den er frigivet fra stoffet lige efter Big Bang.

At der bliver frigivet elektromagnetisk stråling lige efter Big Bang blev faktisk forudsagt allerede i 1948, bl.a. af den russiske fysiker Gamow, som i øvrigt arbejdede i flere år på Niels Bohr Institutet på Blegdamsvej.

Lige omkring Big Bang er de fysiske forhold i Universet selvfølgelig meget eksotiske, langt fra noget vi kender i vore dages Univers. Men nogle få minutter efter Big Bang består Universet faktisk af elementer, som vi godt kender idag. For Big bang foregår så hurtigt, at der kun bliver dannet det simpleste atom brint og en lille smule helium. Derudover var der en masse energi i form af lys. Naturligvis er temperaturen af stoffet meget høj, hvorfor brintatomerne er spaltet i frie atomkerner, positivt elektrisk ladede protoner, og negativt ladede elektroner. Pga af den såkaldte Thompson spredning bliver lyset, dvs. fotonerne, hele tiden spredt i alle retninger af de frie elektroner, så Universet er fuldstændig uigennemtrængeligt for lys.

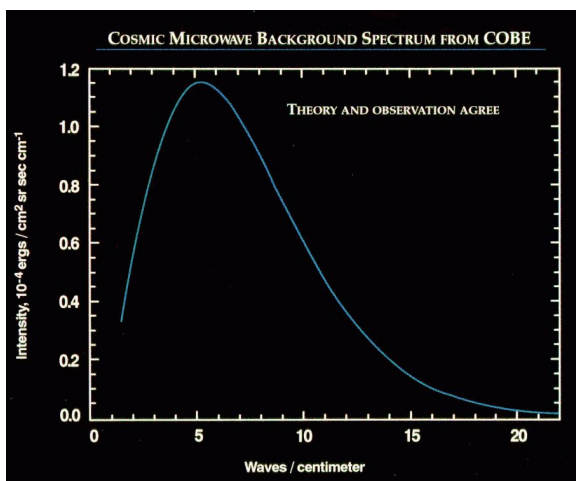
Men Big Bang betyder, at hele Universet eksploderer dvs. alt bevæger sig væk fra hinanden. Som konsekvens falder temperaturen og dermed bliver elektronernes hastigheder mindre og mindre. På et tidspunkt, ca. 400.000 år efter Big Bang, når temperaturen har nået 3.000 grader, er elektronernes hastigheder faldet så meget, at tiltrækningskraften fra de frie protoner er stor nok til at fastholde elektronerne, dvs. der bliver dannet neutrale brintatomer. Men det betyder, at de frie elektroner næsten momentant bliver fjernet, og at der derfor ikke længere er noget til at forhindre fotonerne i at bevæge sig gennem Universet. Det var det lys, som Penzias og Wilson for første gang så. For denne helt afgørende opdagelse for moderne kosmologi fik Penzias og Wilson i 1978 Nobelprisen i Fysik.

De amerikanske COBE og WMAP satellitter

Det er klart, at CMB er det tætteste vi nogensinde kommer til direkte at studere Big Bang, ihvertfald ved hjælp af elektromagnetisk stråling, for før den tid var Universet jo helt uigennemtrængeligt for lys. Derfor har der naturligvis siden Penzias og Wilson's opdagelse været udført store anstrengelser for at studere denne stråling i størst mulig detalje. Det første store gennembrud blev gennemført med den amerikanske

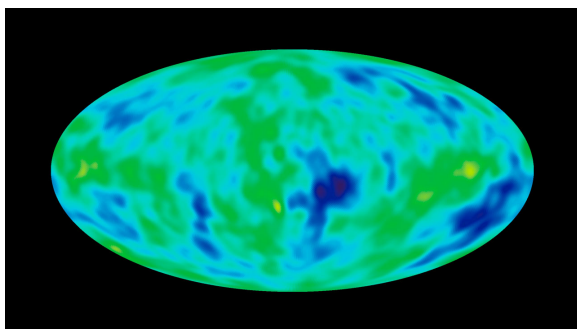
COBE satellit, som samlede data i starten af 1990'erne. Med FIRAS instrument blev spektret af CMB målt med meget stor nøjagtighed, nøje svarende til en temperatur på $2,725 \pm 0,002$ kelvin fra det absolutte nulpunkt $-273,16$ °C.

Den eneste kraft, der kan have dannet de strukturer, vi ser i Universet i dag, er tyngdekraften. Selvfølgelig virkede tyngdekraften også lige efter Big Bang, hvor tætheden jo var meget høj. Men hvis temperaturen var fuldstændig konstant, ophævede tyngdekraften fra de forskellige områder hinanden, og der var aldrig blevet dannet noget som helst. Da vi jo ved at der findes strukturer (galakser og galaksehobe, the Great Wall, stjerner, planeter, os selv) i Universet i dag, må der nødvendigvis være små (i størrelsesordenen 10 mikrokkelvin) temperaturforskelle, som så gennem tiden har vokset til vore dages strukturer. Disse ganske små temperaturforskelle blev første gang med sikkerhed detekteret af DMR, det andet instrument på COBE satellitten. For disse to eksperimentelle gennembrud fik de to amerikanske astronomer John Mather og Georg Smooth nobelprisen i fysik i 2006.



Figur 2. COBE/FIRAS CMB spektret. Kurven følger en Planck-strålingslov med en temperatur på 2,725 K. Målefejlene er mindre end tykkelsen af kurven!

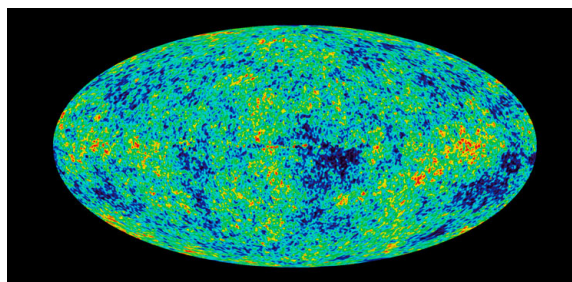
COBE/FIRAS CMB spektrum kan ses på figur 2. Det ses at spektret følger en Planck-strålingslov med temperatur på 2,725 K meget nøjagtigt, målefejlene er faktisk gemt under Planck kurven.



Figur 3. COBE/DMR kortet over temperaturvariationer på hele himlen. De falske farver viser temperaturvariationerne på ± 200 μ K i forhold til gennemsnittet 2,725 K.

Figur 3 viser kortet over hele himlen af de ganske små temperatureforskelle, som med sikkerhed blev detekteret med COBE/DMR. Men det er tydeligt, at figuren ikke viser særlig mange detaljer. Det skyldes, at DMR instrumentet kun kunne skelne ting på himlen som er mindst 7 grader fra hinanden.

I 2001 blev COBE efterfuldt af den amerikanske WMAP satellit. Denne satellit har siden virket upåklageligt. Det bedste WMAP kort over temperaturforskelle på himlen kan ses på figur 4. Det er tydeligt at WMAP's vinkelopløsning på ca. 15 bueminutter (svarende til $0,25^\circ$) har betydet detektionen af en masse finere detaljer i CMB.



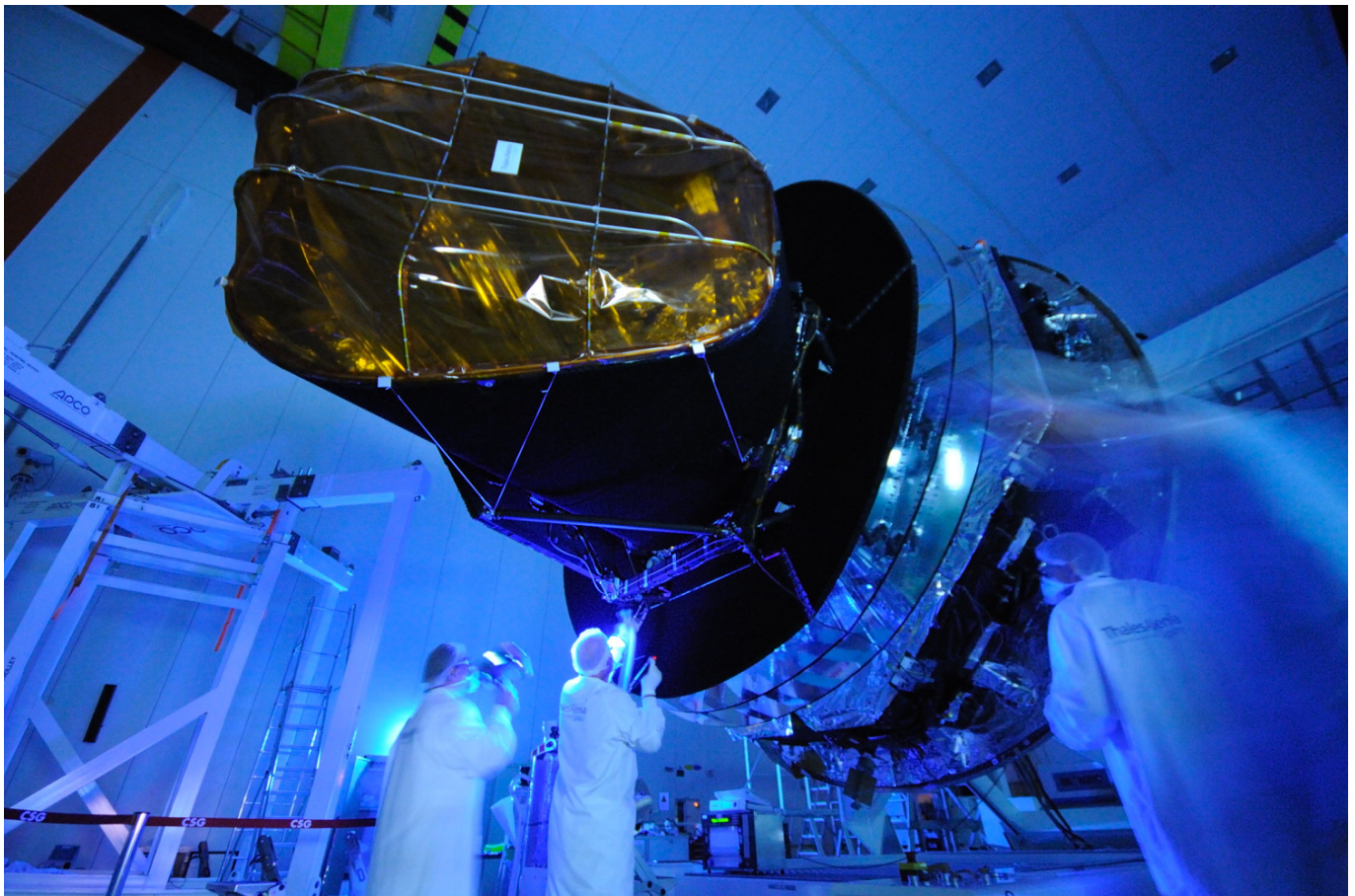
Figur 4. WMAP's CMB kort. Igen falske farver med den samme skala som figur 3 (± 200 μ K), hvor blå er koldere og rød er varmere end gennemsnittet.

CMB stammer fra tiden ca. 400.000 år efter Big Bang. Einstein har lært os at ingen fysisk påvirkning kan bevæge sig hurtigere end lysets hastighed, dvs. områder, der har haft mulighed for at påvirke hinanden, må være mindre end 400.000 lysår fra hinanden. På himlen betyder det, at områderne skal være tættere på hinanden end ca 1 grad. Da vi primært er interesseret i at undersøge, hvilke fysiske processer der foregik i Universet på dette tidspunkt, skal vi altså have en vinkelopløsning, der er væsentligt bedre end 1 grad. Med COBE/DMR's vinkelopløsning på 7 grader fik man derfor pløret flere fysisk set uafhængig 'universer' sammen og dermed gjort det meget svært at udtrække informationer om, hvad der foregik i Universet på det tidspunkt.

Det var helt anderledes bedre med WMAP, men der er selvfølgelig stadigvæk ønske om kunne studere CMB med endnu bedre vinkelopløsning og samtidigt kunne detektere så svage signaler som overhovedet muligt.

ESA's Planck mission

Med ESA's Planck mission (figur 5) bliver det muligt at studere CMB med hidtil uset detaljerigdom. Planck er en såkaldt 'Principal Investigator' mission, dvs. at det kun er de videnskabelige grupper, der leverer de videnskabelige instrumenter, der får adgang til dataene hele den lange tid det tager fra dataene bliver opsamlet til de er færdigbehandlet (mere end 3 år). På et tidligt tidspunkt besluttede ESA sig for, at Planck spejlsystemet skulle betragtes som et videnskabeligt instrument.

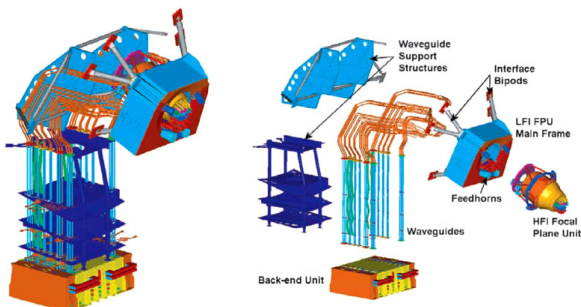


Figur 5. Planck-satellitten. Teknikerne foretager den sidste omhyggelige rengøring i det specielle rene rum i Kourou, Fransk Guyana.

Da studiet af de tidligste faser i Universets udvikling er et højt prioriteret forskningsområde i Danmark, undersøgte DTU Space muligheden for en dansk leverance. Det lykkedes at få Statens Naturvidenskabelige Forskningsråd (nu FNU) med på idéen, og i 1996 lavede DTU Space og ESA en kontrakt med et tysk firma (ASTRIUM, Friedrichshafen) om produktion af Planck spejlsystemet. Med dette engagement i Planck har DTU Space sikret danske forskeres adgang til denne unikke database.

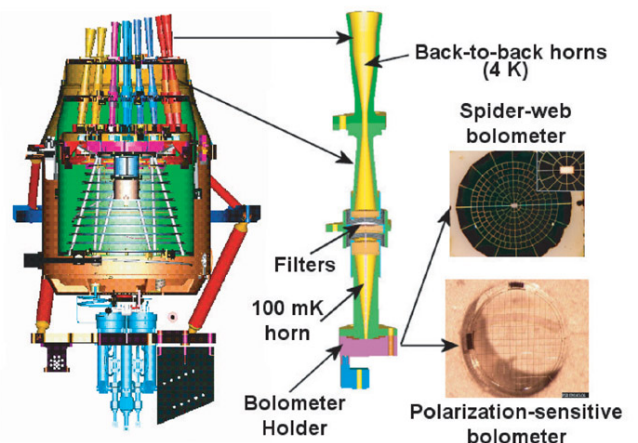
Planck's to detektorsystemer

I fokalplanet for Planck teleskopet er der anbragt en boks indeholdende to detektorsystemer: High Frequency Instrument (HFI) som dækker frekvensintervallet fra 100 GHz til 850 GHz og Low Frequency Instrument (LFI), som dækker fra 30 GHz til 70 GHz (30 GHz svarer til en bølgelængde af lyset på 1 cm).

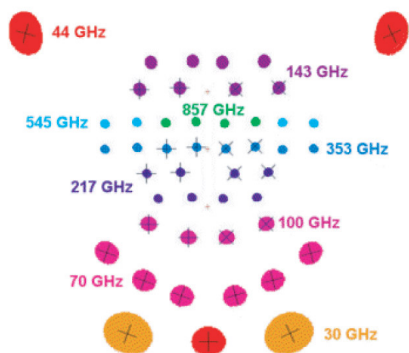


Figur 6. LFI detektorsystemet. Komplexiteten af instrumentet fremgår tydeligt.

LFI bygger videre på teknologien brugt i COBE/DMR og i WMAP. LFI består af en samling af 22 detektorer af indiumfosfid med 'high electron-mobility transistor' (HEMT) forstærkere. Vinkelopløsningen af LFI detektorerne varierer fra 33' til 14' (ét bueminut, 1', er lig 1°/60). De bliver kølet ned til ca. 20 K. LFI instrumentet er blevet udviklet af et internationalt konsortium, ledet af professor N. Mandolesi, Bologna. Den komplicerede opbygning af LFI fremgår af figur 6.



Figur 7. HFI detektorsystemet. Figuren viser kølesystemet (ned til 0,1 K!) og designet af hornene foran bolometrene, der kan måle temperaturstigninger.



Figur 8. Arrangementet af detektorerne i fokalplanen. Øverst ses en tegning hvor de forskellige horn til de forskellige frekvenser er placeret. Nederst ses et nærbillede af HFI-hornene, LFI-hornene kan ses i baggrunden.

HFI bygger på ny teknologi, hvor det lysfølsomme element er et bolometer. Når bolometret bliver belyst, så stiger temperaturen en lille smule. Det er denne temperaturstigning man måler. For at være følsom for mikrobølger er det nødvendigt at bolometrene bliver kølet ned til ca. 0,1 kelvin over det absolutte nulpunkt ($-273,16\text{ }^{\circ}\text{C}$). HFI består af 56 bolometre hvoraf 32 også er følsomme for polarisationen af mikrobølgerne.

På figur 7 vises opbygningen af HFI instrumentet, herunder designet af hornene foran bolometrene. Disse horn modvirker effekten af diffraktionen ved disse lange bølgelængder, og er helt nødvendige for at opnå den ønskede fine vinkelopløsning. HFI er blevet udviklet af et stort internationalt konsortium under ledelse af Prof. J-L. Puget, Paris. Arrangement af LFI og HFI detektorerne i fokalplanen ses i figur 8.

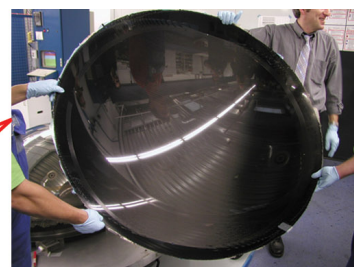
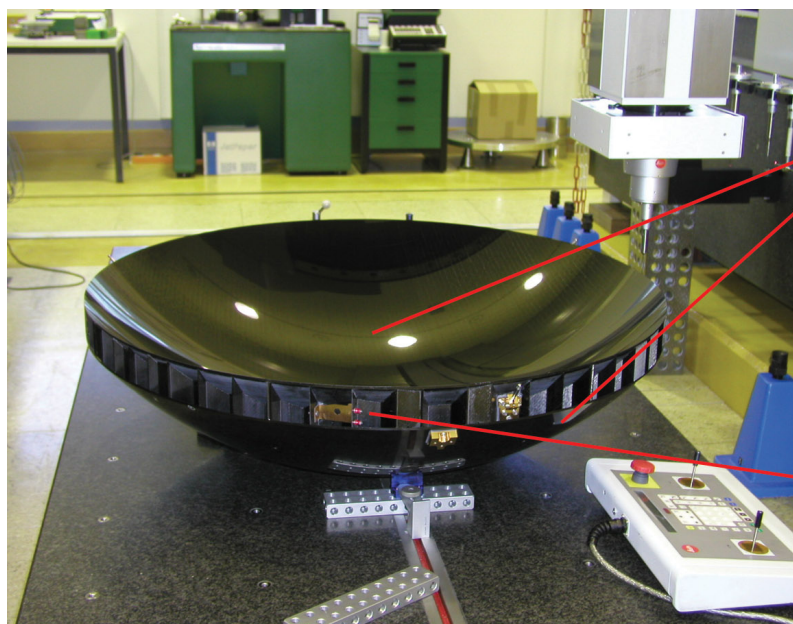
Planck teleskopet

Planck teleskopet er et 'off axis' (dvs. sekundærspejlet skygger ikke for hovedspejlet) design med to elliptiske spejle. Designet er optimeret for konfigurationen af HFI og LFI detektorer i fokalplanen. For yderligere at nedbringe effekten af diffraktion omkring spejlkantene bliver spejlene underbelyst, dvs. kun lys reflekteret af de inderste dele af spejlene rammer detektorerne.

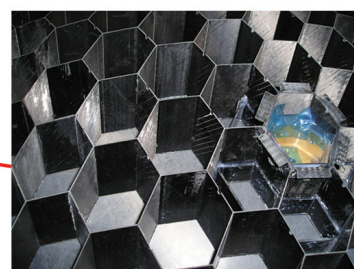
Som sagt har DTU Space været ansvarlig for levering af Planck spejlene. Der blev stillet hårde krav til disse spejle. Som sædvanlig, når vi snakker om grej, der skal sendes op i rummet, skal det veje så lidt som muligt (spejlene vejer tilsammen kun 40 kg). Spejlene skal selvfølgelig også tåle de enorme vibrationsbelastninger, de bliver udsat for ifm opsendelsen. Men det hårdeste krav var, at spejlene skulle kunne tåle at blive kølet ned til ca. $-220\text{ }^{\circ}\text{C}$ og stadigvæk holde formen.

Alle disse krav kan faktisk opfyldes med en konstruktion af Carbon Reinforced Plastic (CFRP). Med CFRP kan man med den rigtige kombination af kulfiber og epoxy og de rigtige vinkler mellem de enkelte lag opnå, at emnet ændre sig meget lidt under nedkølingen. Denne ændring er så lille at man kan tage højde for den i designet.

Konstruktionen består af to lag "hud" (skin), ca. 2 mm tykke, med 14 lag CFRP. Ind imellem de to skin er der en såkaldt 'honeycomp'-struktur, bestående af sekskanter (ligesom bitavlerne i en bistade). Opbygningen kan ses på figur 9.



Skin



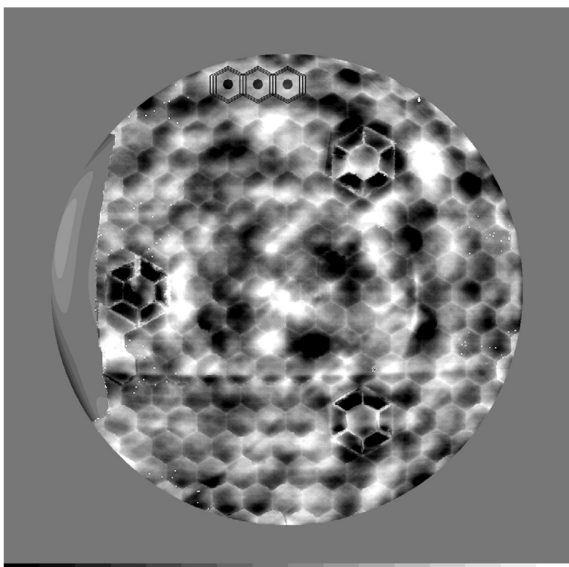
Honeycomp

Figur 9. Opbygningen af Planck CFRP sekundærspejlet.

Ifm. CFRP designet gennemførte DTU Space en omfattende 'Finite Element'-modellering. Disse beregninger er blevet bekræftet af omfattende målinger af spejlens overflader ved disse lave temperaturen ved "Centre Spatial de Liege".

SR interferometry map 50 K

scale +- 10 10 micron



Figur 10. Overfladefejlene af Planck sekundærspejlet ved 50 K fundet med interferometer-systemet ved Centre Spatial de Liege, Belgien. Tydeligvis kan alle cellevægge ses. Pga. effektens størrelse (kun ca. $0,4 \mu\text{m}$) og det lille areal de dækker betyder det ikke noget for funktionen af spejlet.

Figur 10 viser overfladefejlene på sekundærspejlet ved 50 K. Da spejlene bliver underbelyst er kravet til fejlene i de centrale dele en rms bedre end $5 \mu\text{m}$, mens kravet i de ydre dele kun er en rms mindre end $30 \mu\text{m}$. På figuren ses tydelig alle honeycomb-væggene. Da effekten kun er ca. $0,4 \mu\text{m}$, og de fylder en meget lille del af spejlens overflader har de ingen betydning for spejlens funktion i mikrobølgeområdet.

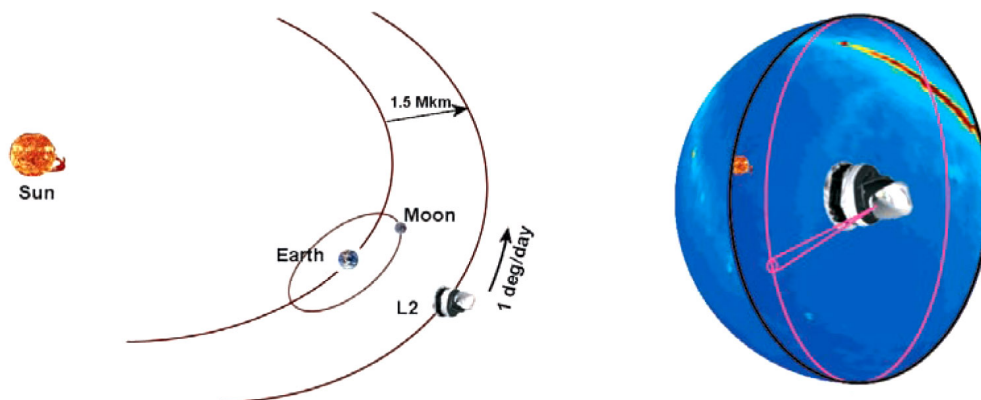
Planck-spejlene har været igennem en masse yderligere tests, og alle har vist at de til fulde opfylder de stillede krav.

Planck's bane

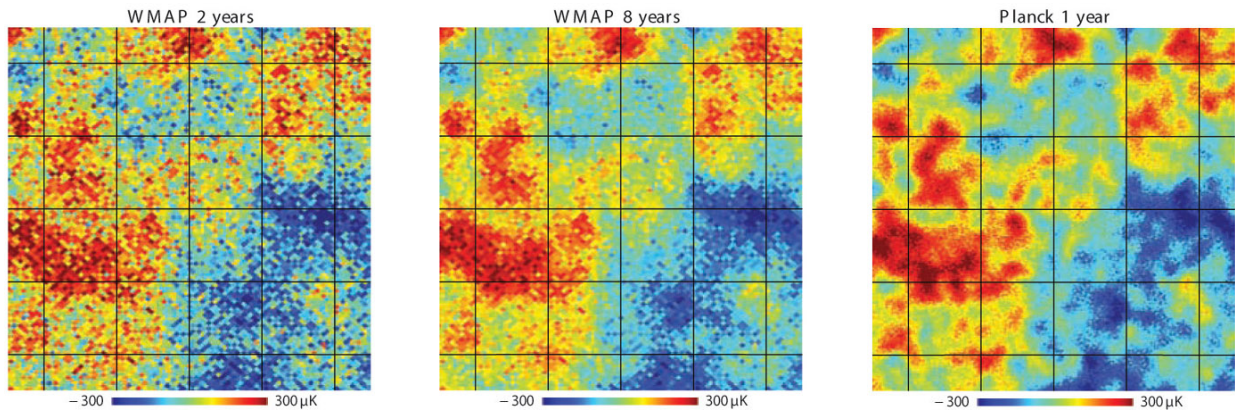
Det kosmologiske CMB signal er meget svagt. Derfor må man gøre det yderste for at sørge for, at når Planck kikker i en bestemt retning skal signalerne fra alle mulige andre retninger minimeres. Jorden, Månen og specielt Solen udsender en masse mikrobølger, så derfor vil man gerne have dem så langt væk som muligt fra den retning man kigger i. Planck bliver derfor sendt ud til det såkaldte Lagrange punkt nr. 2 (L2), et af de stabile punkter i Sol-Jord-systemet. Det ligger ca. 1,5 millioner km væk fra Jorden, i modsat retning af Solen (se figur 11). Planck roterer ca. 1 gang per minut, rotationsaksen peger væk fra Solen, og teleskopet peger ca. 85 grader fra rotationsaksen. Da L2 følger med Jorden i banen rundt om Solen, så vil Planck på den måde scanne hele himlen på ca. 6 måneder, bortset fra små områder omkring de ekliptiske poler. Planck forventes opsendt i maj 2009, og det vil tage ca. 2,5 måneder før den er ude i L2.

Planck science

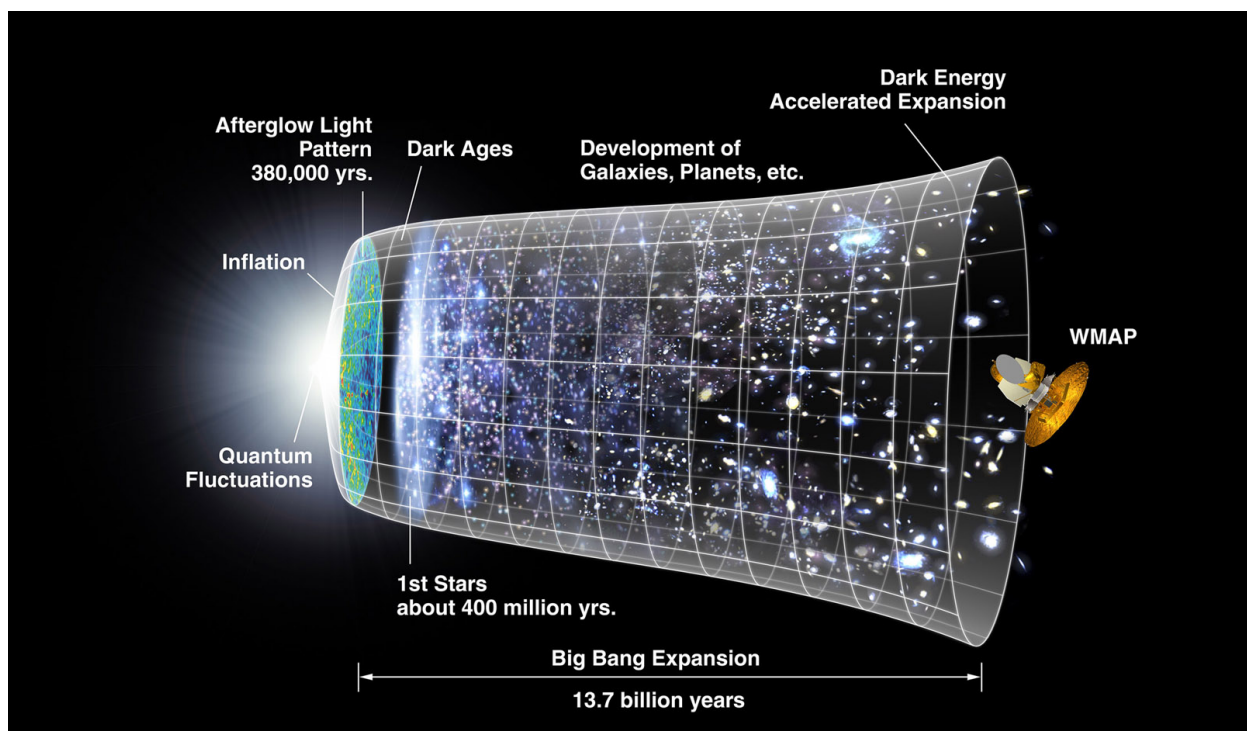
Hovedbegrundelsen for Planck er naturligvis, at den vil studere CMB i meget større detalje end tidligere missioner. Det betyder, at vi med Planck får helt nye informationer om, hvordan Universet så ud ca. 400.000 år efter Big Bang, og dermed bliver vi meget bedre til dels at ekstrapolere til hvordan Universet må have set ud før dette tidspunkt, og dels til at forstå hvordan disse ganske små temperatur- og tæthedforskelle er vokset op og er blevet til vore dages strukturer i Universet, f.eks galakser og galaksehobe. Figur 12 viser forskellen mellem hvor gode kort vi kan få med WMAP-satellitten, og hvad vi forventer at få med Planck. På den højre figur ses det, at med Planck vil vi få meget dybere kort med finere detaljer, end man kan opnå med WMAP, selv når man lægger data for 8 år sammen.



Figur 11. Planck's bane. For at undgå mikrobølger fra Solen, Jorden og Månen sendes Planck ud i Lagrange punkt nr. 2, ca. 1,5 millioner km modsat retningen til Solen.



Figur 12. Forskellen på kvaliteten af WMAP's CMB kort og det forventede Planck-kort. Af figuren ses at Planck på 1 år vil producere kort med større følsomhed og deltaljerighed end WMAP vil gøre på 8 år.



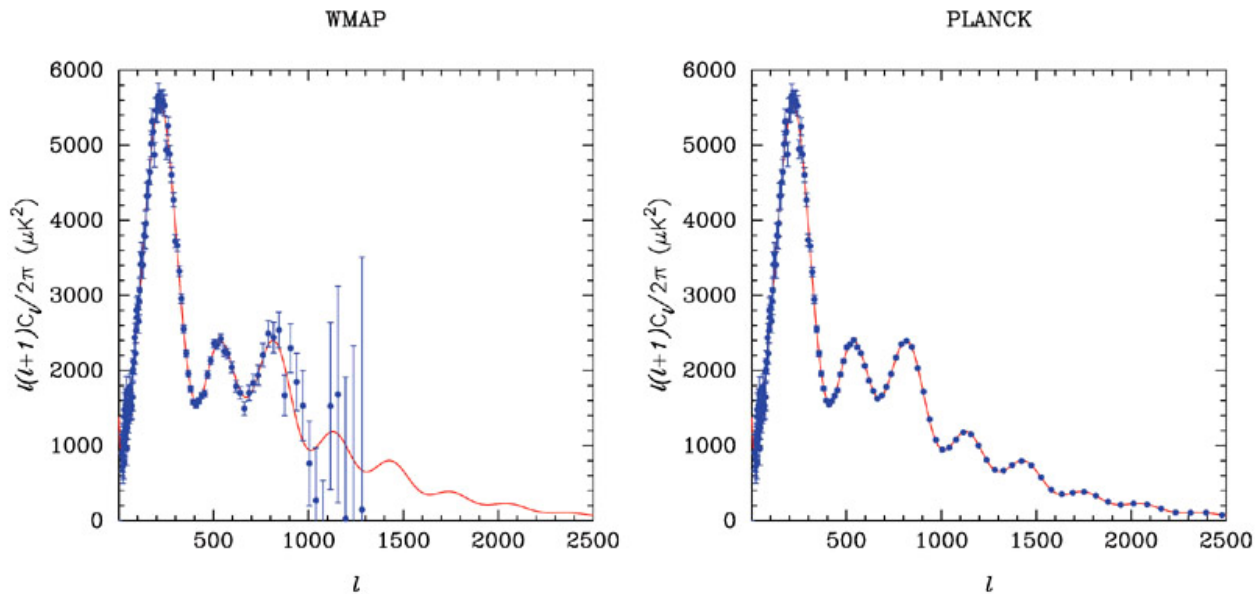
Figur 13. Ultrakort historie over Universets udvikling.

Figur 13 giver et overblik over Universets historie. Til venstre ses Big Bang og ganske kort tid (sammenlignet med Universets alder på 13-14 milliarder år) efter ses CMB. Derefter er der en periode, hvor der ikke rigtig sker noget, derfor bliver den kaldt 'Dark Age'. Det tager nemlig flere hundrede millioner år, før disse små tæthedsfluktuationer har vokset sig store nok til at danne stjerner og galakser. Da gassen i Universet kun indeholder brint og en lille smule (1/4) helium, er den første generation af stjerner meget tungere end Solen, ca. 1-200 gange. De ender deres liv, meget kort tid efter de er dannet, i nogle kæmpesæssige supernova-eksplosioner. Herved bliver den gas, som næste generation af stjerner bliver dannet af, beriget med de tungere grundstoffer der er dannet i den første generations indre. Disse tungere grundstoffer gør, at de næste stjerner bliver mere lig Solen. På figuren kan det ses, at der også begynder at blive dannet galakser og

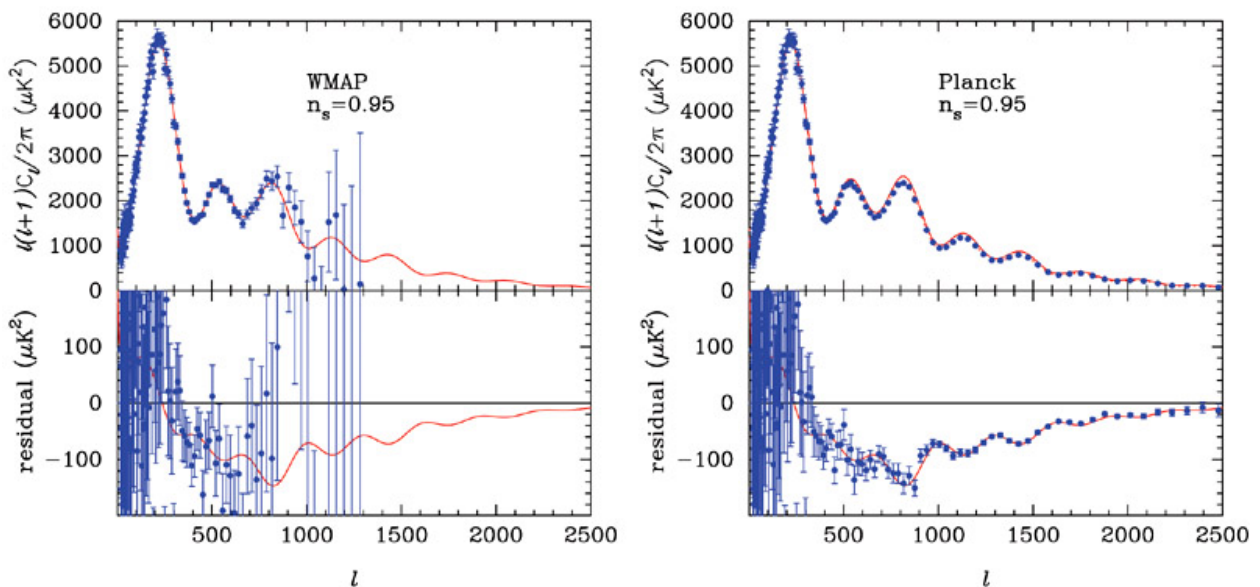
helt til højre ser vi vore dages Univers.

Traditionelt undersøger man CMB kort ved hjælp af et såkaldt 'powerspektrum'. Analogien i én dimension er Fourieranalyse, hvor man opløser en given funktion i sinus- og cosinusfunktioner på en entydig måde. På himmelkuglen opløser man CMB-kortene med sfæriske harmoniske funktioner, også på entydig måde. Hvis de områder, hvor CMB-temperaturen er over gennemsnittet og de områder, der ligger under gennemsnittet, er fuldstændig tilfældigt fordelt på himlen, så indeholder powerspektret al den information, der kan udtrækkes af kortet.

På figur 14 kan man se forskellen på det powerspektrum man får med WMAP's data, og det vi forventer at få med Planck. Skalaen på x-aksen svarer til store vinkelafstande til venstre og små vinkelafstande til højre ($l = 200$ svarer til en vinkelafstand på ca. 1 grad).



Figur 14. Teoretisk (forventet) powerspektrum af Plancks CMB-kort sammenlignet med et powerspektrum af WMAP's observationer.



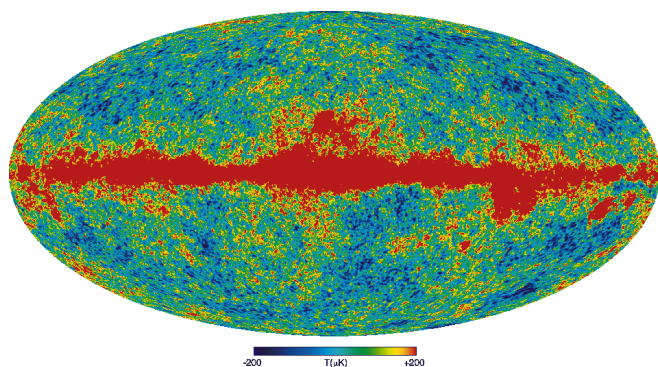
Figur 15. Viser hvor meget bedre man kan bestemme de basale kosmologiske parametre med Planck sammenlignet med WMAP. Eksemplet viser hvordan en lille ændring i antagelsen omkring de oprindelige tæthedvariationer tydeligt kan ses med Planck, men ikke med WMAP.

For at demonstrere hvor meget bedre man kan bestemme de basale kosmologiske parametre med Planck, giver figur 15 en simulering af hvad det betyder, at man i stedet for at tæthedsfluktuationer fra starten ikke har nogen karakteristisk skala, indbygger en lille forskel på de forskellige skalaer (parametren n_s ændres fra 1 til 0,95). Man ser tydeligt, at en sådan ændring er nem at se med Planck, men umulig at detektere med WMAP. På lignende måde vil Planck bestemme de andre basale kosmologiske parametre med hidtil uset nøjagtighed.

En af de helt centrale opgaver for Planck bliver at undersøge konceptet om en enorm faseudvidelse af Universet lige efter Big Bang, hvor Universet på 10^{-32} sek. blev 10^{26} gange større. Fænomenet kaldes 'Inflation'. Dette kan bl.a. forklare, hvorfor CMB er

så ensartet, når man ser områder, der f.eks. er mere end 50 grader fra hinanden på himlen. Disse områder har aldrig haft chance for fysisk at vekselvirke med hinanden så det er svært at forstå, at de har næsten samme temperatur. Inflationsteori er på nuværende tidspunkt ganske teoretisk, men har ikke desto mindre vist sig nødvendig for fortolkningen af CMB-målinger fra f.eks. WMAP.

Der findes mange hundrede forskellige inflationsteorier. Næsten alle forudsiger, at der i denne dramatiske faseudvidelse bliver udsendt en masse tyngdebølger, og at disse vil resultere i at CMB bliver en lille smule polariseret, specielt at der vil være hvirvler i magnetfelterne. Det er en ganske lille effekt, men der er ingen tvivl om, at Planck-dataene vil blive studeret meget nøje for at finde denne effekt.



Figur 16. WMAP's kort ved 40 GHz. At Mælkevejen udsender en masse stråling i mikrobølgeområdet ses tydeligt.

Figur 16 viser WMAP's 40 GHz kort. Det er tydeligt, at Mælkevejen udsender en masse stråling ved denne frekvens. Før man med sikkerhed kan udtrække det kosmologiske CMB signal fra Plancks data, skal man være overbevist om, at alle signaler fra andre kilder, herunder vores egen Mælkevej, er fjernet fuldstændigt. Begrundelsen for de meget brede frekvensområder, som Planck dækker, er netop at sørge for, at man kan løse dette problem på tilfredsstillende måde. På DTU Space arbejder vi på at forbedre metoderne til

fjernelse af disse 'forgrundskilder'. Men der er mange astronomer, som ikke ser disse som potentielle fejlkilder. De er netop meget interesseret i disse data til at få nye informationer om de fysiske forhold i Mælkevejen, da Planck-kortene vil blive meget bedre, end hvad der ellers findes.

Litteratur

- [1] ESA-SCI(2005)1: Planck: The Scientific Programme, http://www.rssd.esa.int/?project=PLANCK&page=pubdocs_top



Hans Ulrik Nørgaard-Nielsen, Lic Scient. Siden 1987 ansat som seniorforsker på DTU Space. DTU Space har siden 1994 deltaget i ESA's Planck mission. HUNN har været ansvar for levering af spejlsystemet til Planck. I forbindelse med Planck arbejder HUNN primært med metoder til at udtrække det kosmologiske signal på baggrund af signaler fra Mælkevejen.