

Det observerbare univers – og det udenfor

Erik Høg, Niels Bohr Institutet

Observationer i mikrobølger og i synligt lys viser, at universet er meget større end det observerbare univers (OU). Dette afgrænses ved *den sidste spredende overflade*, den kosmiske horisont, der stammer fra dengang, universet var 380.000 år gammelt. Imidlertid peger nye observationer i begge bølgelængdeområder på, at der kan være afvigelser fra det enkle svar, at fortsættelsen uden for horisonten statistisk set rummer det samme som indenfor.¹

Vi skal i denne artikel især tænke på universet, da det er blevet 380.000 år gammelt. Det bestod af en glødende gas, hvis temperatur var faldet til ca. 3000 grader. Sådan var det overalt i universet, og temperaturen varierede kun 0,02 K fra sted til sted, se figur 1, så der var slet ingen kontraster i lysstyrke eller farver, som ellers er det, der gør vort nuværende univers så smukt og levende.

Man tør nok sige, at hele universet dengang var i en *meget enkel og meget "kedsommelig"* tilstand! Denne artikel skal først handle om netop denne "*spændende*" tilstand, spændende, fordi gassen på det tidspunkt pludselig blev gennemsigtig, og fordi vi faktisk kan observere lyset derfra, det ældste lys i universet. Tilstanden var samtidig så enkel, at den må kunne forstås af interesserede lægfolk.

Universet ved 3000 K

Universets udvikling begyndte ved big bang (BB) for 13,8 milliarder år siden. Denne udvikling forstår vi i dag gennem den generelle relativitetsteori (GR), det ekspanderende univers og BB-fysik, og Kvant har bragt en artikel herom [1].

Ved en alder af 380.000 år indeholdt universet næsten kun brint og helium, hvor brinten var ioniseret. Rummet var derfor fyldt med frie elektroner, der blev dannet allerede i det første sekund efter big bang. Elektronerne spredte hele tiden lyset, så det hver gang blev sendt af sted i en ny retning, lyset kom altså ingen vegne: rummet var fyldt med stråling og derfor helt uigennemsigtigt.

Da temperaturen var faldet til ca. 3.000 K blev hver elektron bundet til en proton, så vi nu havde neutral brint. Der var desuden 25% helium, som også var ioniseret, men som allerede blev neutralt, inden brinten blev det. Der var kun ca. 270 atomer pr. cm^3 , så gassen var omtrent så fortyndet som det bedste vakuum, man kan skabe i et laboratorium på Jorden.

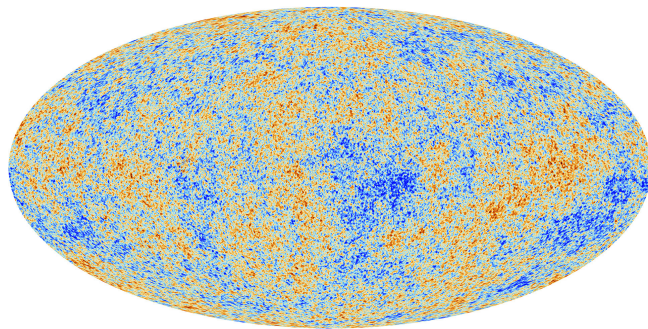
Denne tynde, neutrale gas var fuldstændig gennemsigtig for elektromagnetisk stråling, så de fotoner, de elektromagnetiske bølger, der netop var undervejs, fortsatte ligeud, og hver foton vil blive ved med det i al fremtid, hvis den ikke rammer noget. I tidens løb voksede lysets bølgelængde i takt med universets udvidelse og er nu, i vore dage, 1100 gange større, se nærmere nedenfor. Bølgelængden var først ca. $1 \mu\text{m}$ (som for

almindeligt synligt lys), og er nu i vore dage blevet 1 mm, lyset er altså blevet til mikrobølger, omtrent som strålingen i en almindelig mikroovn.

Hvor kom lyset fra?

Disse mikrobølger kommer fra alle retninger, fra hele himlen. Strålingen blev opdaget i 1964 af A.A. Penzias og R.W. Wilson under afprøvning af nye, meget følsomme kryogeniske mikrobølgemodtagere til radioastronomiske observationer, og de modtog i 1978 nobelprisen i fysik.

Strålingen er i de senere år blevet målt nøjagtigt fra flere videnskabelige satellitter. Figur 1 viser det billede, vi således har af himlen. Vi må spørge: Hvor kom dette lys fra? Svaret er: Lyset må være kommet fra gas, der lå så langt væk, at det netop har taget 13,8 milliarder år for lyset at nå hertil. Da lyset kommer fra alle retninger, må det være kommet fra en kugleskal med centrum i os, som vist i figur 2. Selvfølgelig blev der afsendt lys fra alle steder i gassen, og lys blev sendt i alle retninger. Vi modtager kun det, der netop tilfældigt havde retning, så det kunne træffe os nu i vort solsystem, der blev dannet af gas og støv små ti milliarder år senere.



Figur 1. Billede af hele himlen i mikrobølgestrålingen. Temperaturen er dermed målt til knap 3 K over det absolutte nulpunkt, faktisk præcis 2,725 K. Variationerne fra sted til sted på himlen, som ses på billedet, svarer til kun ca. 0,018 mK i den modtagne stråling og til kun 0,02 K i den oprindelige glødende gas, der var ca. 3.000 K varm (ESAs Plancksatellit).

Hvor langt er kugleskallen væk?

Den kugleskal skal vi nu tænke på, og det er jo kun en *tænkt* kugleskal. Gassen i denne kugleskal var ganske som den gas, der fyldte *hele* universet dengang. Enhver observatør hvor som helst i universet kan tænke på sin

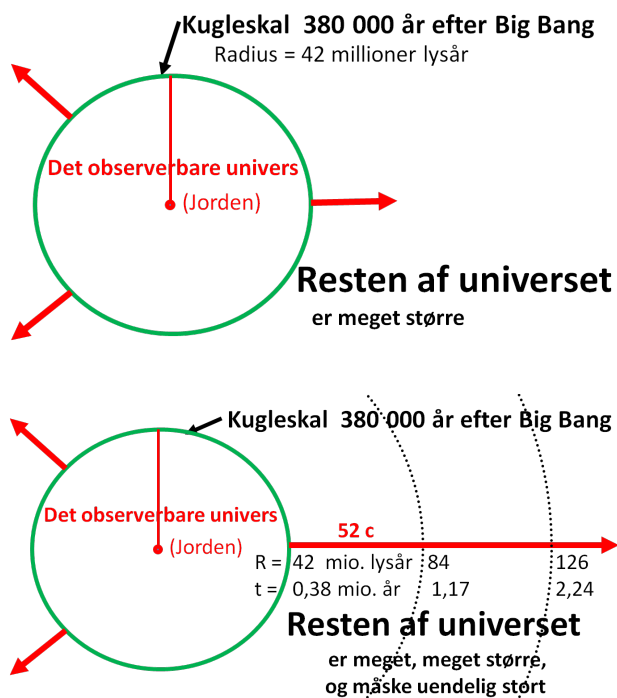
¹En stor tak skylder jeg Leif Hansen, Steen Harle Hansen, Peter Laursen og Jørgen Otzen Petersen, mine kolleger på Niels Bohr Institutet for mange år siden, for hjælp til afklarende spørgsmål. Jeg takker også mange læsere af tidligere versioner for nyttige kommentarer.

egen kugleskal, hvor han er i centrum, og hvorfra han netop nu modtager mikrobølger, ganske som vi gør.

Denne kugleskal kalder vi den *kosmiske horisont*, fordi lys fra det, der er længere ude, endnu ikke er nået frem til os. Det rum, der er inde i kugleskallen, kalder vi det *observerbare univers*.

Hvad var afstanden til skallen, da lyset til os blev afsendt, altså hvad var radius i vores kugleskal? Afstande og hastigheder er beregnet som angivet i [5], hvor man kan finde nærmere om formler og beregninger. Med universets ekspansion er radius i denne kugleskal af gas blevet 1100 gange større, og gassen er blevet til støv, stjerner og galakser ganske som i vores nære omegn i universet. Radius er øget fra 42 millioner lysår til nu at være 46 milliarder lysår, som nævnt ved figur 2. Radius er altså vokset med en hastighed i gennemsnit på $46/13,8 = 3,3$ gange lyshastigheden, c , som er ca. 300.000 km/s. Til at begynde med voksede radius endda med en hastighed på $52c$, som der står ved figur 2!

Vores kosmiske horisont



Figur 2. Øverst: Hele universet er fyldt med glødende gas. Overalt er der nøjagtig samme temperatur og tæthed. Gassen indeholder kun 270 atomer pr. cm^3 . Med grønt er markeret en kugleskal i gassen, hvorfra det tog lyset 13,8 milliarder år at nå frem til Jorden. Denne tegning siger noget væsentligt og også meget enkelt om universet dengang. Nederst: Den oprindelige, glødende gasskal udvider sig sammen med hele universet som vist ved de punkterede cirkler, hvor radius og tidspunkt er angivet ved R og t . Udvidelsen sker med en hastighed, der er 52 gange lysets til at begynde med. Stoffet i skallen har efterhånden dannet stjerner og galakser, som nu befinder sig i en afstand af 46.000 millioner lysår. I astronomien anvendes enhederne lysår (= 9.460 milliarder km) eller parsec (= ca. 3,26 lysår).

Her vil den opmærksomme læser undre sig over hastigheder og afstande og spørge, hvordan lyset overhovedet kan nå til Jorden, når det observerbare univers er større end den afstand, lyset kan nå at tilbagelægge i universets levetid. Beregningen af fotonens vej gennem

rummet viser, at dens hastighed i forhold til det lokale koordinatsystem altid er netop lyshastigheden c , men samtidigt vokser afstanden til Jorden på grund af ekspansionen, og den tilbagelagte vej vokser ligeledes. Når fotonen endelig når frem, er den tilbagelagte strækning større, end den ville have været i et statisk univers.

Selve navnet *observerbar* fører let til, at man tror, der menes det, der faktisk kan observeres, men det er forkert. Fx kan man ikke i en for mennesker overskuelig fremtid observere de galakser, der nu i dag ligger næsten ude, hvor horisonten ligger i dag, i en afstand fra os af 46 milliarder lysår; en afstand, der hele tiden vokser hurtigere end lyshastigheden. Derude lå stof, som har dannet stjerner og galakser, ganske som i vores omegn, men det skete mange millioner år efter BB.

På grund af lysets endelige hastighed, kigger vi tilbage i tiden, når vi kigger ud i universet. Derfor vil de fjerneste, observerbare galakser kunne ses på et meget tidligt stadium af deres udvikling i det tidlige/ynge univers. Lyset fra galakserne, som udsendes netop nu i retning mod Jorden, vil først kunne observeres om mange år efter en lang rejse gennem rummet. Observationer af fjerne galakser er for eksempel Hubble Ultra Deep Field. Et tilsyneladende tomt område af himlen er blevet observeret i dagevis med Hubble Rumteleskopet, hvilket afslørede en masse galakser på et meget tidligt stadium i deres udvikling. En af disse galakser vises i figur 4 i [1] fra 2012. Vi ser den ældste galakse, man dengang kendte, idet universet kun var 750 millioner år gammelt, da det lys blev udsendt, som vi modtager nu. Ved den alder var universet kun et barn på fem år, hvis vi sætter det nuværende gamle univers til 100 år.

Betegnelser eller navne om disse sager er ganske velvalgte, men misforståelser kan alligevel kun undgås ved stor omhu. Man kan også sige, at OU i dag er den del af universet, hvorfra optisk lys ville kunne have nået Jordens sted engang i løbet af hele tidsrummet fra BB til nu. Man ser somme tider, at astronomer kalder det observerbare univers for det *synlige univers*, men det kan jo også misforstås. Lad det være sagt allerede her: Den del af universet, der ligger uden for OU, må man IKKE kalde *det ikke-observerbare univers*, for den del er i princippet observerbar, som vi forklarer i et afsnit nedenfor. Dette fænomen ville straks blive misforstået på grund af selve navnet.

Universets udvidelse

Relativitetsteorien er den basale, fysiske lov, der giver os en matematisk beskrivelse af universets udvidelse. Albert Einstein præsenterede den *specielle relativitetsteori* (SR) i 1905, men den teori behandler kun bevægelser uden accelerationer i et rum uden tyngdekrafter. I 1915 forelagde Einstein den *generelle relativitetsteori*, der også omfatter accelerationer i et rum med tyngdekrafter. Derved blev SR et specialtilfælde af GR, så man kan sige, at der kun findes én relativitetsteori, og det er GR. *Det er først med GR at forskningsområdet kosmologi har fået et sundt teoretisk grundlag*, således som der står om relativitetsteori i Den Store Danske Encyklopædi, bind 16, side 97.

Observationer af fjerne objekter i universet viser,

at hastigheden bort fra os for fjerne objekter vokser med disses afstand. Sammenhængen mellem hastighed og afstand kan udtrykkes i en matematisk model baseret på GR, som nærmere beskrevet i [5]. Det kan siges i få ord: det matematiske rum i GR, dvs. det anvendte koordinatsystem, udvider sig, således at alle afstande vokser i samme forhold. Vi siger, at selve det fysiske rum udvider sig, eller bare: *selve rummet udvider sig*. Denne matematiske model for udvidelsens forløb beskriver altså det, man måler, men den siger intet om årsager til udvidelsen. GR er en *makroskopisk* teori, der beskriver rummets geometri og dynamik. Men den bryder sammen i det meget tidlige univers, hvor kvanteteori også spiller ind.

At rummet udvider sig, betyder ikke, at galakser eller en bygning på Jorden udvider sig. På Jorden, i galakser og galaksehobe dominerer tyngdekraften og holder sammen på det hele. I det lokale univers har objekterne relative hastigheder, der er beskedne i forhold til lyshastigheden, og i middel er hastigheden tæt på nul i forhold til det store univers – for eksempel målt i forhold til mikrobølgebaggrunden. Det må fremhæves, at tilsyneladende over-lyshastighed og andre forhold ved universets udvidelse kun kan beskrives korrekt ved hjælp af den matematiske form, som GR har i forbindelse med BB-modellen.

Alt dette lyder måske besynderligt i nogles ører, men det er korrekt i det store, sammenhængende billede af universet, som kosmologer er nået frem til gennem anvendelse af fysiske teorier og observationer. Dog er der selvfølgelig meget, teoretikerne stadig ikke forstår, eller er uenige om.

Det er en udbredt opfattelse, at intet kan bevæge sig hurtigere end lyset, så udbredt, at man kan tale om en almen viden blandt lægfolk. Denne populære opfattelse stemmer med SR, men ikke med GR anvendt på universets udvidelse. Alligevel går enkelte også i dag så vidt som til at forkaste al moderne kosmologi, på grund af over-lyshastighederne ved universets ekspansion. Det er en ekstra grund til at behandle dette emne grundigt her. I Appendiks anbefales note A4 og især reference [7].

GR siger ligesom SR, at et objekt ikke kan have en hastighed større end lysets i forhold til et andet objekt, der ligger i nærheden. Men det gælder ikke, hvis objekterne ligger så langt fra hinanden, at rummets udvidelse spiller en rolle. Det må betones, at det IKKE er stoffet, der farer gennem rummet følgende inertiens lov, som mange tror, og mange får bildt ind. For der er jo ikke tale om en eksplosion i rummet.

Universets størrelse

Den observerede fordeling af stoffet inde i det observerbare univers, OU, er ret homogen, ens overalt, når man ser på de store træk, hvad der gøres rede for i note A4 i [2]. Derfor er det nærliggende at mene, at dette må fortsætte udenfor. Det ville dog være mærkeligt, hvis Jorden netop var centrum i en kugleformet massefordeling med ingenting eller noget helt andet udenfor. Siden Kopernikus for 500 år siden flyttede Jorden bort fra centrum af verden, har en sådan tanke været umulig.

Desuden påvirker masserne uden for OU de masser, der er indenfor, gennem deres tyngdekraft, men hvis fordelingen fortsætter kuglesymmetrisk uden for OU, vil denne kraft netop ophæves, hvilket er en elementær følge af Newtons gravitationslov, der let kan bevises. Det betyder samtidig, at vi i princippet vil kunne se en virkning på fordeling og bevægelser af stjerner og galakser indenfor, såfremt massen udenfor IKKE er fordelt kuglesymmetrisk, altså hvis det kosmologiske princip, CP (se note A4 i [2]) ikke er opfyldt for hele universet. En sådan detektering kan kaldes global, og den tillader ikke detektering af enkelte objekter uden for OU, kun af globale afvigelser fra kuglesymmetri. Det vil dog være vildledende at kalde universet uden for “det observerbare univers” for “det ikke-observerbare univers”. Nogle vil nemt kunne tro, at der ligger en betydning i selve navnet, hvad der advares imod ovenfor.

Den slagside (bias) i mikrobølgestrålingen, der er fundet i Planckdata (se nedenfor), kan måske skyldes en asymmetrisk fordeling af masserne uden for det observerbare univers?

Hvad er der udenfor?

Det følgende er nærmere beskrevet og dokumenteret i noterne A4 og A5 i [2] med citater fra korrespondence med forskere, og hvor også skepsis kommer til udtryk.

En analyse fra 2018 (se dog diskussion i note A4) af observationer viser, at hele universet har en radius, der er mindst 5 gange større end det observerbare univers, altså mindst $5 \times 46 = 230$ Giga-lysår med 99% sandsynlighed. Imidlertid er det kun en nedre grænse, at udstrækningen af hele universet kun er 5 gange større end OU, som man her har fået fra analyse af observationer. Det kan stadig være meget, meget større. Hvad jeg også synes, er nødvendigt, hvis der overhovedet skal være plads til multiverset. Med *multivers* tænker vi her fx på den teoretiske mulighed, at der uden for vores OU findes andre områder, andre universer, hvor udviklingen har været lidt eller meget anderledes end i vores OU.

I samme analyse fra 2018 beregnes en sandsynlighed mellem 67% og 98%, for at universet er rumligt uendeligt: Forfatterne antager, at universet er præcist fladt, det betyder, at det er uendeligt, og så kan de give et statistisk mål for sandsynligheden for, at universet ikke er fladt, og dermed et statistisk mål for at universet ikke er uendeligt. Men det er alt sammen indenfor de samme begrænsninger: fx antager de en given kosmologisk model med stof, kosmologisk konstant, osv.

Andre analyser viser, at det observerbare univers ikke er helt homogent på meget stor skala. Data fra Planckmissionen viser bias (på dansk: slagside) for en halvkugle af himlen i forhold til den anden, såkaldt halvsfære-bias, på to måder: det ene bias drejer sig om den gennemsnitlige temperatur (dvs. temperaturvariationer), det andet drejer sig om, at der er større variationer i perturbationerne (dvs. tæthederne). Derfor konkluderer ESA (som står for Planckmissionen), at disse anisotropier (uensartetheder) er statistisk signifikante og ikke længere kan ignoreres.

Et antal observationer er meddelt som værende i modstrid med forudsigelserne om en maksimal størrelse

for strukturer i universet. Her er eksempler: 1. Den såkaldte Sloan Great Wall (SGW), opdaget i 2003, har en længde på 1380 millioner lysår, og det er kun lige netop foreneligt med det kosmologiske princip. 2. I november 2013 blev en ny struktur opdaget, som er 10 milliarder lysår borte, og som måler 6,6 til 10 milliarder lysår (mere end syv gange større end SGW), kaldet Hercules-Corona Borealis Great Wall, og det rejser yderligere tvivl om gyldigheden af CP.

Der er altså håndfaste tegn i observationer, både af mikrobølger og i optisk lys, på, at universet fortsætter uden for det observerbare, men også på at fortsættelsen ikke er helt som det, vi kender. Det må derfor ikke undre, hvis der er meget store forskelle på endnu større skala. Så der er rigelig plads til multiverset og til tanker om dette som fra Martin Rees i [3], en fremragende bog, der førte mig til at begynde på denne artikel om det, der er udenfor. Men en advarsel om multiverser: der findes mange forskellige forslag, se [4].

Litteratur

- [1] E. Høg, P. Laursen og J. Samsing (2012) Universets begyndelse, Kvant, bind 23, nr. 1, side 7–12.
- [2] E. Høg (2021) Det observerbare univers - og det udenfor. Hele artiklen med Appendiks A1-A9 findes på www.astro.ku.dk/~erik/xx/Udenfor.pdf.
- [3] M. Rees (1999) Just Six Numbers: The Deep Forces That Shape The Universe. En paperback udgave er trykt i 2015, men der findes ingen egentlig ny udgave.
- [4] L. Mersini-Houghton (2013), Birth of the Universe from the Multiverse, [de.arxiv.org/pdf/0809.3623](https://arxiv.org/pdf/0809.3623).
- [5] J. Samsing og E. Høg (2012), Noter til kosmologi, www.astro.ku.dk/~erik/xx/KosmoNote3.pdf.

Appendiks

Her følger to noter, A1 og A2, af de ni, som udgør hele appendikser, der findes i [2]. De ni noter, A1–A9, uddyber selve artiklen, men skønnes ikke nødvendige til en første læsning, hvor det først og fremmest drejer sig om rigtigt at forstå, hvad der menes med det observerbare univers, OU. Noterne er:

A1: Afstande i universet. A2: Andre kosmiske horisonter. A3: GR og inflation. A4: Det kosmologiske princip (CP). A5: Fra Wikipedias artikel om CP. A6: Over-lyshastigheder. A7: Relativitetsteori og komplekse tal. A8: Referencer. A9: Opdatering.

A1: Afstande i universet

Det er ikke så enkelt at tale om afstande i universet, hvad der gøres nærmere rede for i [5]. I denne artikel anvendes dog kun det, man i kosmologien kalder for proper distance på engelsk, og på dansk: metrisk afstand eller egenafstand. Afstande kan angives i km, men i astronomien anvendes enhederne lysår (= 9.460 milliarder km) eller parsec (= ca. 3,26 lysår). I kosmologien skal et lysår kun forstås som en afstand på så mange km. Man kan imidlertid ikke omsætte X lysår til, at lyset har været X år undervejs, hvis afstanden er

så stor, at universets udvidelse spiller en væsentlig rolle. Men ikke alle astronomer synes at vide dette, for et sted på nettet skriver en astronom: “Fordi Big Bang skete for 13,8 milliarder år siden, har lyset altså kunnet rejse 13,8 milliarder lysår. Det er grænsen for, hvad vi kalder “Det synlige univers”, forklarer han.” Det samme høres tit i populære foredrag.

Nogle astronomer foretrækker i kosmologisk sammenhæng slet ikke at tale om en afstand, men kun om hvor længe lyset har været undervejs. Det ville være upraktisk her, hvor vi skal kunne sige, hvor langt kugleskallen var væk, da lyset blev afsendt, og hvor langt den er væk nu i dag.

A2: Andre kosmiske horisonter

Man betragter i kosmologien også andre *kosmiske horisonter* end den horisont, som vi har særlig fokus på i denne artikel. Jeg har her defineret den kosmiske horisont som *overfladen for sidste spredning* af elektromagnetisk stråling. På det tidspunkt var universet allerede 380.000 år gammelt. Men faktisk foreligger der også information fra epoker, da universet var yngre. Meget vigtig er den tidlige kernesyntese (en fusion), hvor brint- og heliumkerner dannes ved velforståede processer kun få minutter efter BB.

Vi har information om dannelsen af variationer (perturbationer) i tætheden af det, der var der under *inflationsperioden*, men andre signaler er ifølge teorien også mulige såsom af neutrinoer og gravitationsbølger. Mere fundamental er derfor *partikkelhorisonten*. Ifølge GR kombineret med kvantefysik, er dette den yderste grænse for signaler, og den ligger ved et tidspunkt nær Plancktiden på omkring 10^{-43} s efter BB. Ifølge GR alene er det kun selve singulariteten, der er forbudt. Med kvantefysik vides, at fysikken før Plancktiden, og dermed muligheden for signaler, er ukendt. Plancktiden er det korteste tidsrum, det vil være muligt at måle ifølge Heisenbergs usikkerhedsrelation, men det korteste tidsrum, der hidtil faktisk er målt, er 10^{-21} s.

Det er egentlig opløftende, at det har været meget nemmere at inkludere mørkt stof og mørk energi i BB, end nogle troede, idet man ikke behøver noget principielt nyt fra Einstein 1915/16. Mørkt stof indgår helt som almindeligt kendt stof, og mørk energi er i BB-modellen Einsteins lambda-led.

De resterende noter A3 til A9 findes i [2].



Erik Høg er dr. scient. i astronomi. Han har arbejdet ved Hamborg Observatoriet 1958–73 og ved Københavns Universitet 1953–58 og 1973–2002, hvor han gik på pension. Han har især arbejdet med måling af positioner, bevægelser og afstande af stjerner med højest mulig præcision, fra Jorden og med to satellitter, Hipparcos og Roemer/Gaia.