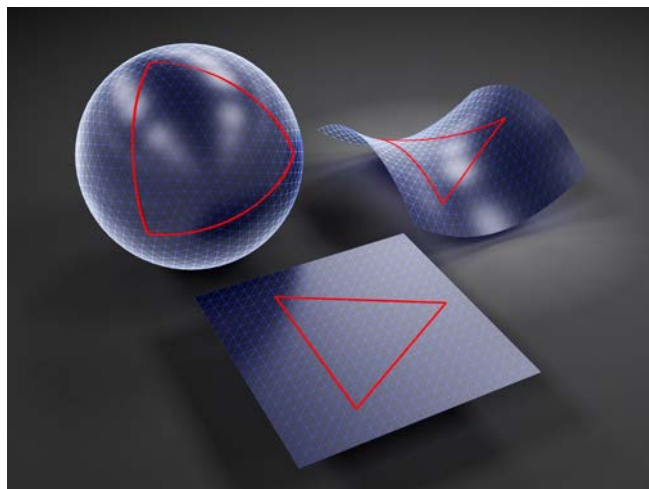


Universets begyndelse

Charles Steinhardt, Cosmic Dawn Center, Niels Bohr Institutet

Ifølge Big Bangteorien begyndte universet med en ekstrem varm og tæt tilstand, og teorien har haft succes med flere forudsigelser, som kan måles. Men der er også problemer med teorien. For eksempel har det vist sig, at modellen kræver meget specielle startbetingelser for universet, og det har ført til idéen om en kort periode med kosmisk inflation, fordi det kan forklare begyndelsesbetingelserne. Teorien om inflation er imidlertid heller ikke uden problemer, og muligvis er svaret et helt ny mekanisme, som vi endnu ikke har fundet. Måske er de første øjeblikke af Big Bang derfor det mest interessante spørgsmål i kosmologien.

Big Bangteorien postulerer, at universet begyndte som en eksplosiv udvidelse af rum og tid fra en ekstrem varm og tæt tilstand. Selvom det var kontroversielt, da teorien blev foreslået for næsten et århundrede siden, har Big Bangteorien siden præsteret adskillige vellykkede forudsigelser. Den måske mest berømte er den kosmiske mikrobølgebaggrund, som er lys, der blev udsendt, da universet var mindre end 400.000 år gammelt. Faktisk kan vi endda teste Big Bang-teorien langt tidligere – det meste af den brint, deuterium og helium, vi observerer i dag, blev dannet i de første øjeblikke efter Big Bang. Ved at måle deres nuværende fordeling kan vi bekræfte, at den modellen er en præcis beskrivelse af universet blot få sekunder efter Big Bang.



Figur 1. Universets forskellige potentielle geometrier som hhv. et fladt, et sadelformet og et sfærisk univers. Universet kan være krummet på forskellige måder, men alligevel ser det bemærkelsesværdigt fladt ud. Inflation forklarer, hvorfor enhver krumning hurtigt ville blive udjævnet. Grafik: ESO/L Calcada.

Først troede kosmologer, at Big Bang skulle begynde alene med et meget varmt og tæt univers. Men de nødvendige startbetingelser er faktisk meget mere specielle. Et eksempel er fladhedsproblemet. Ifølge den generelle relativitetsteori kan universets geometri være sfærisk, hyperbolsk eller fladt, afhængigt af energitætheden. Problemet er, at et fladt univers er en ustabil tilstand,

som kræver præcis den helt rigtige energitæthed. Hvis universet er bare en smule mere eller mindre massivt end denne kritiske energitæthed, bliver det mere og mere kraftigt krøllet over tid.¹

De nyeste målinger viser, at universet er inden for 1% af at være præcist fladt. Men da selv et meget lidt krøllet univers bliver mere krøllet over tid, skal universet have været meget, meget fladere lige efter det store brag. For at universet kan være inden for 1% af fladt i dag, skulle det lige efter Big Bang være inden for 10^{-62} af fladt. Det betyder, at selv en tilføjelse af mindre end 1 mg til det observerbare univers ville være en større ændring. Dette er bestemt ikke kun et tilfældigt udfald! Der er dog absolut intet i Big Bangteorien, som kræver det.

Et andet problem kommer fra det faktum, at vi kun kender til en begrænset del af universet, fordi lys rejser med en begrænset hastighed. Vi ved ikke, hvad der ligger uden for vores horisont, og relativitetsteorien fortæller os, at vi ikke kan blive påvirket af det. Så hvis vi ser så langt væk som muligt på den kosmiske mikrobølgebaggrund i modsatte retninger, ser vi dele af universet, som aldrig har været i kontakt med hinanden. Men hvorfor har de stadig den samme temperatur? Hvorfor skulle nye dele af universet, som vi aldrig har set før, ligne præcist vores? Dette horisontproblem forklares ikke af Big Bang-teorien.

Så vi indser nu, at Big Bangteorien kræver meget specielle startbetingelser, udover at være der skal være varmt og høj tæthed. Vi har derfor brug for en forklaring. Overraskende nok vil disse ekstra egenskaber være meget naturlige, hvis vi ser på en fjern fremtid. Selv når universet udvides, forbliver tætheden af mørk energi konstant, men på grund af den stigende størrelse, er der med tiden mere mørk energi.

I et mørkt energidomineret univers fortsætter dette med at accelerere ekspansionen. I et ekspanderende univers sker der to ting på samme tid: objekterne kommer længere væk fra os, men samtidig har lyset mere tid til at rejse, så horisonten kommer også længere væk. Spørgsmålet er, hvilken afstand, der vokser hurtigt.

Hvis universet ikke udvidede sig, så ville afstanden til horisonten være meget enkel: lys rejser med hastigheden

¹Før opdagelsen af mørk energi troede kosmologer også, at universets ekspansion blev langsommere over tid, og at universets geometri bestemte, om det ville fortsætte med at udvide sig for evigt, eller om der var tilstrækkelig tyngdekraft til at få universet til sidst til at trække sig sammen igen i et stort "crunch". Imidlertid producerer mørk energi i stedet en accelererende ekspansion, så nu tror vi, at universet vil fortsætte med at udvide sig for evigt.

c i tiden t , så det fjerneste objekt, vi kan se, er afstanden $c \cdot t$ væk. Et ekspanderende univers fortsætter imidlertid med at udvide sig, mens lyset rejser mod os, så den aktuelle afstand til et objekt vil være større end den vej, som lyset tilbagelægger.² Hvis universet var domineret af stof, kan vi løse de generelle relativistiske ligninger, der beskriver ekspansion, og vise, at horisontafstanden ville være cirka $3ct$. Nu udvider universet sig samtidig, så fjerne objekter kommer længere væk. Hvis vi løser de samme ligninger, finder vi ud af, at afstanden til et fjerntliggende objekt vokser som $t^{2/3}$. Da universet her vokser langsommere end horisonten, betyder det, at vi over tid vil kunne se mere og mere af universet.

Mørk energi skaber imidlertid en ekspansion, som er så hurtig, at afstanden til et fjerntliggende objekt i stedet vokser som e^t . Horisonten vokser stadig kun lineært i t , så nu får vi det modsatte resultat: objekter, vi plejede at kunne se, bevæger sig uden for vores horisont.

Denne hurtige udvidelse betyder, at universet bliver fladere og fladere over tid, ligesom en ballon, der pustes op, men den driver således også fjerne objekter væk fra os så hurtigt, at vi ser mindre og mindre af universet i vores horisont. Det er forklaringen på, at de dele af universet, som er lige uden for vores horisont, ser ud til at have været i kontakt med dele, vi kan se, fordi de indtil for nylig var i kontakt med hinanden.

Det samme koncept ligger bag idéen om kosmisk inflation. Ifølge denne teori var der lige efter Big Bang en kort periode, hvor universet udvidede sig eksponentielt. Dette varede kun omkring 10^{-34} sekunder. Men i dette øjeblik ville et objekt på størrelse med et atom have udvidet sig til at blive større end hele vores observerbare univers! Denne utrolige udvidelse var nok til at gøre universet fladt inden for 10^{-62} og til at forklare, hvorfor dele af universet, som ikke længere ser hinanden, alle ligner hinanden så meget.

Selvfølgelig kan vi som forskere ikke bare erklære, at inflation eksisterede. Først skal vi lave en model for mekanismen, hvormed inflation faktisk fungerer, og det betyder, at vi vil introducere et nyt felt kaldet en inflaton. I højenergifysik analyserer vi typisk opførslen af et felt ved at se på dets potentiale. Specifikt kan vi tænke på opførslen som en kugle, der ruller på en overflade formet som potentialet. Egenskaberne afhænger af forholdet mellem kinetisk og potentiel energi. Inflatonen skal nu gøre tre ting: blive den dominerende form for energi i en kort periode, dernæst opføre sig som mørk energi, og endelig forsvinde, så universet stopper med at inflatere. Vi kan se på alle tre egenskaber for at se, hvad der kræves.

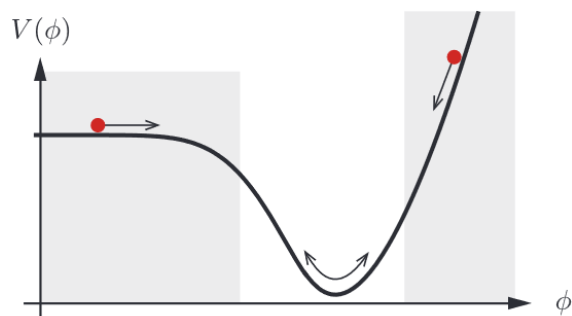
Når universet udvider sig, falder dets energitæthed. Dog afhænger hastigheden, hvormed den falder, af forholdet mellem potentiel og kinetisk energi. Almindeligt stof har en næsten ligelig blanding af potentiel og kinetisk energi. Tætheden af et felt domineret af potentiel energi vil falde meget langsommere end tætheden af stof³ og vil på et tidspunkt dominere universet. Dette

er en af grundene til, at vi tror, at mørk energi kunne være en kosmologisk konstant, bestående udelukkende af potentiel energi. Et felt domineret af kinetisk energi vil gøre det modsatte, nemlig falde meget hurtigt og blive irrelevant. Så for at blive den dominerende form for energi skal inflatonen hovedsageligt være potentiel energi. Dette kræver et meget fladt potentiale, så en kugle, der ruller på den overflade, kun ville rulle meget langsomt. En af mulighederne for mørk energi er, at dens potentiale er helt fladt, så den aldrig har nogen kinetisk energi. Hvis det er tilfældet, vil mørk energi være en kosmologisk konstant med den samme densitet, uanset hvordan universet udvider sig eller trækker sig sammen.

Desuden fortæller den generelle relativitetsteori os, at universets udvidelsehastighed afhænger af, hvor hurtigt dets energitæthed falder, når det udvider sig. Jo langsommere energitætheden falder, jo hurtigere er udvidelsen. Et felt med et næsten fladt potentiale, som mørk energi, vil til sidst dominere universet og derefter forårsage udvidelse hurtigere end lyset. Så ved at gøre inflatonpotentialet næsten fladt, har vi allerede ordnet udvidelsehastigheden.

Imidlertid er det sidste, vi har brug for, at inflatonen forsvinder, fordi inflationen skal stoppe. Dette kræver det modsatte af dens første egenskab, som var, at den skulle dominere universet. Så feltet skal ændre sig fra at være domineret af potentiel energi til at være domineret af kinetisk energi. Energitætheden af et felt domineret af kinetisk energi vil nu falde meget hurtigt, og vi behøver derfor ikke at bekymre os mere om det.

Ved at kombinere disse egenskaber skal inflatonpotentialet se ud som vist på figur 2. Feltet starter til venstre, hvor potentialet er tæt på fladt, og der er meget lidt kinetisk energi. Under denne "langsomme rulning"-fase vil inflatonen opføre sig som mørk energi. Det betyder, at den først begynder med at dominere universets energi, og derefter, når den gør det, forårsager inflation. Til sidst vil den ramme den stejle skrænt og øge hastigheden, når den ruller nedad. Når den kinetiske energi øges, får dette inflatonen til at stoppe med at opføre sig som mørk energi og forsvinde fuldstændigt.



Figur 2. Eksempel på et inflatonspotentiale. Inflation forekommer i de skraverede dele af potentialet.

Dette er idéen om inflation, som den blev udviklet i begyndelsen af 1980'erne. Denne korte periode med

²Det er derfor, nyhedsmedier nogle gange beretter, at vi kan observere en fjern galakse 33 milliarder lysår væk, selvom universets alder kun er omkring 14 milliarder år.

³I det tidlige univers er stråling faktisk endnu vigtigere end stof. Stråling har mere kinetisk energi, så dets tæthed falder derfor hurtigere end stof. Men af samme grund var der mere stråling end stof, da universet var meget lille.

en udvidelse hurtigere end lyset kan forklare de særlige indledende betingelser, der var den manglende brik i Big Bangteorien. Siden da har meget af forskningen om inflation været fokuseret på det næste skridt i den videnskabelige metode. For at en idé skal betragtes som videnskabelig, er det ikke nok bare at give en god forklaring. Det skal også være muligt at falsificere idéen gennem eksperimenter eller observationer. Kørsler af disse tests er derefter en måde at kontrollere modellen på, og jo flere vellykkede forudsigelser en model laver, desto mere overbeviste er vi om, at den sandsynligvis er korrekt. På samme måde skal en model, der ikke består disse tests, revideres eller endda helt kasseres.

Det har vist sig, at forklaringen med inflation muligvis ikke så god, som vi oprindeligt troede. I klassisk mekanik vil inflationen kun rulle nedad, hvilket fører til de indledende betingelser, som Big Bangteorien kræver. Men i kvantemekanik vil et felt nogle gange i stedet tunnelere opad. Så når det er tiden til, at inflationen skal stoppe, vil nogle (sjældne) regioner af universet i stedet fortsætte med at inflatere. Selvom dette kun er en meget lille del af volumen, er inflationen så hurtig, at de dele, der fortsætter med at inflatere, ender med at udgøre stort set hele universets volumen. Denne "evige inflation" er bestemt ikke det, vi ønskede, da vores observerbare univers selvfølgelig ikke inflaterer i dag. Hvis vi venter længe nok og vælger en tilfældig del af universet og opdager, at den med succes stoppede med at inflatere, ville det være som at vælge et tilfældigt reelt tal og opdage, at vi valgte et heltal.⁴ Selvom heltal eksisterer, er sandsynligheden for at vælge et heltal lig med nul!

Så nu det vigtige spørgsmål: er dette et problem? Da jeg er den, der skriver denne artikel, vil jeg benytte lejligheden til at give dig mit eget svar først. Ja, selvfølgelig er dette ikke godt. Vi introducerede idéen om inflation for at forklare en fantastisk tilfældighed, hvor det ser ud til, at Big Bangteorien kræver en meget speciel indledende tilstand, som ikke kan være tilfældig. Men inflation gør det faktisk værre – så usandsynligt som det synes, at universet tilfældigt skal være inden for 10^{-62} af præcis fladt, er dette langt mere sandsynligt end sandsynligheden for at vælge vores observerbare univers ud af et, der er evigt inflaterende. Min egen opfattelse er, at ingen af disse muligheder kan være tilfældige, og at vi skal finde en alternativ teori, som får det meste af universet til at se ud som den del, vi kan observere.

Imidlertid er flertallets opfattelse blandt kosmologer faktisk, at evig inflation er helt i orden. Deres idé bygger på en idé kaldet det antropiske princip, som påpeger, at vi ikke er en tilfældig observatør. For eksempel er størstedelen af vores observerbare univers ubeboeligt, men vi bor ikke på de steder. Vi bor på overfladen af en planet, i den rette afstand fra stjerner med meget lang levetid, som gør vores planet beboelig. På samme måde kan menneskelige observatører ikke eksistere i et inflatende univers, da udvidelseshastigheden er alt for stor til at tillade dannelse af struktur. Så grunden til, at

vi valgte et heltal ud af alle de reelle tal, er, at mennesker kun kan leve sammen med heltal. Vi kunne ikke have valgt noget andet.

Problemet med denne idé er, at det antropiske princip er iboende ikke-falsificerbart. Idéen om, at vores observerbare univers er specielt, og helt anderledes end størstedelen af resten af universet, kan ikke testes. Faktisk ville det være umuligt at opnå videnskabelige fremskridt med en sådan idé. Forestil dig, hvis svaret på Rutherford's guldfolieeksperiment var at konkludere, at atomer simpelthen opførte sig anderledes i hans laboratorium i stedet for at konkludere, at tidligere modeller var forkerte, og at atomer har kerner. Vi kunne måske aldrig have udviklet kvantemekanikken. Kravet om, at teorier skal være falsificerbare, og at vi forkaster idéer, som laver forkerte forudsigelser, er det der adskiller videnskab fra ikke-videnskab. Fordi det antropiske princip ikke kan falsificeres, er det ikke en videnskabelig idé.

Og selv hvis vi ønskede at acceptere det, sker der alle mulige andre mærkelige ting som følge heraf. For eksempel vil universet ifølge vores nuværende kosmologiske model fortsætte med at udvide sig for evigt, fyldt med vakuum. Og en anden ting, som kvantemekanikken fortæller os, er, at små energifluktuationer i vakuum kan skabe partikler. De samme fluktuationer kan også skabe alt andet, selvom sandsynligheden hurtigt bliver lavere for at skabe noget mere komplekst. Vi kunne endda skabe betingelserne for et nyt Big Bang. Dette er meget, meget komplekst, så sandsynligheden er meget, meget minimal. Men denne ekstremt lille sandsynlighed er ikke et problem, fordi vi har uendelig lang tid til at vente på det. Så hvis vi venter længe nok (dette vil tage meget lang tid), vil vi få de varme, tætte indledende betingelser, der er nødvendige for et nyt Big Bang, som ligner vores eget, og hvis vi venter bare lidt længere, kunne vi endda få flere mennesker.



Figur 3. Boltzmannhjerne.

Imidlertid vil vakuomet også skabe alle mulige andre ting. For eksempel vil galakser måske bare blive skabt direkte. En galakse er bestemt nok til at tillade mennesker, og fordi den er mindre kompleks end at skabe et nyt univers, vil dette ske langt oftere. Endnu

⁴Faktisk er det endnu værre end dette. De dele af Universet, der holder op med at inflatere, har alle mulige og forskellige slags egenskaber. Nogle vil have de indledende betingelser, vi ønsker, og se ud som vores eget, men enhver mulig kombination vil blive dannet. Dette er en af grundene til, at inflation ofte beskrives som skabende et multivers.

enkler kan det være at skabe en stjerne og en beboelig planet. Eller måske ville det allersimpleste ikke være et menneske overhovedet: en frit svævende hjerne midt i vakuum, i samme tilstand som din egen, ville faktisk matche alt, hvad du ved om verden omkring dig. Dette er ikke et særlig attraktivt syn på virkeligheden, og det giver ingen brugbare forudsigelser. Men langt, langt flere af disse såkaldt “Boltzmannhjerner”⁵ vil blive skabt end faktiske mennesker, der lever i et univers, der begyndte med et Big Bang. Så hvis vi tager det antropiske princip alvorligt, er dette så ikke vores bedste forklaring, der slår Big Bang, inflation og alt andet?

Kosmologer, som ikke er tilfredse med denne antropiske forklaring, fortsætter med at lede efter en ny idé. En mulighed kommer fra at tænke på fremtiden i stedet for fortiden. Husk, at inflation forsøger at efterligne de effekter, som mørk energi vil have i fremtiden. Hvis mørk energi er ikke bare en kosmologisk konstant, kan den i fremtiden også skifte fra potentiel til kinetisk energi. Universet begynder så at trække sig sammen i stedet for at udvide sig. Til sidst ville universet trække sig sammen næsten til et punkt og derefter spjætte, hvilket producerer et nyt Big Bang. På grund af denne periode med mørk energidominans før Big Bang vil de indledende betingelser være meget flade, og fordi

universet var forbundet før Big Bang, ville der ikke længere være et horisontproblem. Denne cykliske model af universet er en mulig forklaring.

Eller måske vil det rigtige svar involvere en helt anderledes mekanisme, som vi endnu ikke har fundet på. Uanset hvordan det skete, ved vi, at naturen på en eller anden måde frembragte et næsten fladt univers i udvidelse, hvor dele, der endnu ikke har set hinanden, stadig har meget ens egenskaber. At forstå, hvad der skete før Big Bang, eller måske i de første øjeblikke lige efter, forbliver en af de dragende spørgsmål indenfor kosmologi.



Charles Steinhardt er lektor ved Cosmic Dawn Center og Niels Bohr Institutet. Meget af hans forskning fokuserer på galakseudvikling og på de tidligste galakser. Fordi astronomi bruger enorme datasæt, forsker han også i maskinlæring og astrostatistik. Han afholder også et internationalt sommerforskningsprogram for bachelor-studerende på NBI.

Errata

Kvantealgoritmer

I artiklen “Kvantealgoritmer” i Kvant nr. 4 fra 2023 af Ulrich B. Hoff er der en fejl i et af formeludtrykkene på side 20 i slutningen af afsnittet “Ud i krogene af Hilbertrummet”. Der står

“en repræsentation af den generelle kvantetilstand ovenfor kræver specificering af $2^{2^n} - 1$ reelle parametre”.

Formeludtrykket skulle have været: $2(2^n - 1)$.

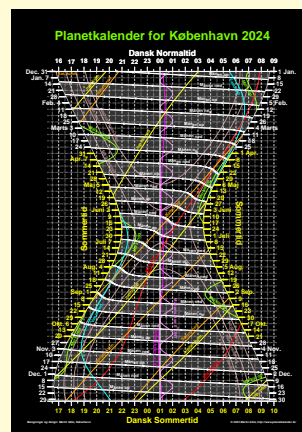
Galaksernes historie

Af artiklen “Før Hubble: Om galaksernes tidlige historie” i Kvant nr. 3 fra 2023 af Helge Kragh fremgår det på side 9, at Kant i sin bog fra 1755 benyttede betegnelsen *Weltinseln* (verdens-øer) om de fjerne tåger. Dette er forkert, idet betegnelsen først blev brugt af Alexander von Humboldt i første bind af sit værk *Kosmos* fra 1845.

Hvor er Breddeopgaverne?

På grund af de mange artikler til dette tema-nummer har det ikke været muligt at få plads til Breddeopgaverne, så løsningen på opgaverne 107–110 om Boltzmannfaktoren må desværre vente til næste udgave.

Planetkalenderen flytter



Martin Götz oplyser, at planetkalenderne for København fremover kan findes på

<http://www.martingotz.dk/pk/>

i stedet for den hidtidige hjemmeside

<http://www.planetkalender.tk/>, som er nedlagt.

På den nye hjemmeside kan man finde planetkalendere tilbage til 2004 samt en vejledning i at bruge kalenderen. Planetkalenderen for 2024 findes også i Kvant nr. 3 fra 2023 på side 29.

⁵Opkaldt efter Ludwig Boltzmann (af de kosmologer, der udviklede dette argument). I løbet af tilstrækkelig lang tid kan stokastiske fluktuationer få partikler til spontant at danne bogstaveligt talt enhver struktur af enhver grad af kompleksitet, inklusive en fungerende menneskelig hjerne.