

Gamow kontra Hoyle

Dette dokument indeholder to artikler fra det amerikanske tidsskrift *Scientific American*. På det tidspunkt var det koutume, at tidsskriftets septemhernummer beskæftigede sig med et specielt emne, og i 1956 drejede det sig om astronomi.

Jeg har oversat artiklerne af *George Gamow*, der var hovedfortaler for et evolutionært univers, beskrevet ved, hvad man i dag kaldet *Big Bang*-teorien, og af *Fred Hoyle*, den mest markante tilhænger af et *Steady State*-univers.

På daværende tidspunkt må de to opfattelser siges at have stået omtrent lige stærke. Det skulle siden ændre sig, på afgørende vis med opdagelsen af den kosmiske baggrundsstråling i 1964.

Holger Nielsen

Spørgsmål:

- De to forfattere omtaler hinandens teorier. Hvilke argumenter benytter de, som taler imod modpartens teori?
- De omtaler også svagheder ved deres egne teorier. Hvordan behandles disse svagheder?
- Hvornår og hvor mener Gamow og Hoyle at de tunge grundstoffer blev dannet? Hvad mener man i dag?

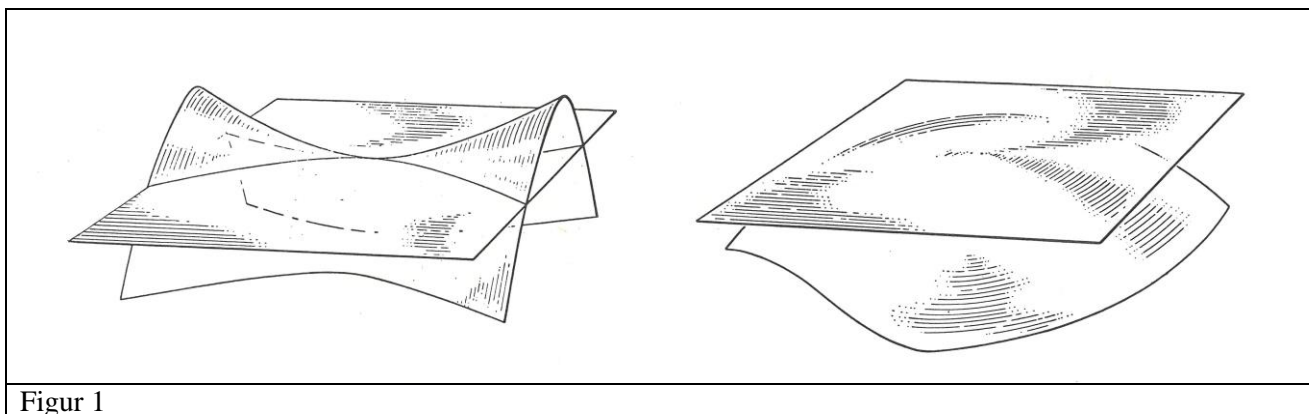
Det evolutionære Univers

George Gamow, *Scientific American*, september 1956, p. 136 ff.

De fleste kosmologer mener, at Universet begyndte som en tæt kerne af stof og stråling, der begyndte at udvide sig for fem milliarder år siden og senere samlede sig i galakser

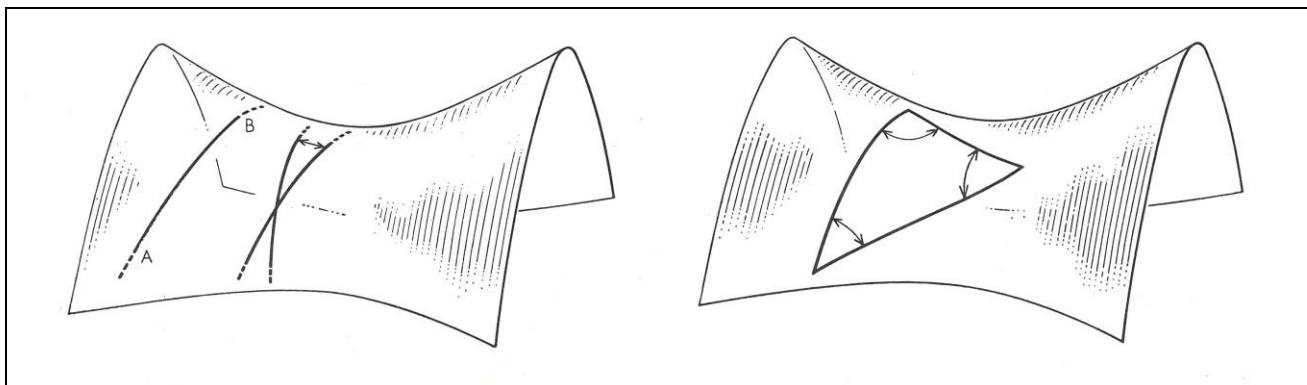
Kosmologi er studiet af Universets generelle egenskaber i rum og i tid - hvordan er det nu, hvordan var det tidligere og hvordan bliver det rimeligvis i fremtiden. Da de eneste kræfter, som virker mellem de galakser, der udgør den materielle verden, er gravitationskræfterne, er det kosmologiske problem nært knyttet til teorien for gravitation, især i den moderne form, som udgøres af Albert Einsteins generelle relativitetsteori. Inden for rammerne af denne teori er egenskaberne hos rum tid og tyngde forenet i et harmonisk og elegant billede.

Den grundlæggende kosmologiske opfattelse, som kommer til udtryk i den generelle relativitetsteori, voksede frem af arbejder udført af store matematikere i den 19. århundrede. I midten af det forrige århundrede opdagede to nysgerrige matematiske sjæle - en russer ved navn Nikolai Lobachevski og en ungare, János Bolyai - at den klassiske euklidiske geometri ikke var den eneste mulige. Faktisk lykkedes det for dem at konstruere geometrier, som var fuldt så logiske og konsistente som Euklids. De startede med at forkaste Euklids aksiom om parallelle linier: Nemlig at der kun kan tegnes én ret linje parallelt med en given ret linje gennem et punkt, som ikke ligger på den givne linie. Lobachevski og Bolyai udviklede begge geometriske systemer, inden for hvilke der kunne tegnes et stort antal linjer parallelt med en given linie gennem et punkt uden for linjen.



For at illustrere forskellene mellem euklidisk geometri og deres ikke-euklidiske systemer er det lettest kun at betragte to dimensioner, altså geometrien af overflader. En euklidisk overflade er flad og skolebøger bruger her betegnelsen ”plangeometri”. Men lad os nu undersøge egenskaberne hos en to-dimensional geometri konstrueret ikke på en plan flade, men på en krum. I tilfældet med Lobachevskis og Bolyais system kalder vi overfladens krumning for ”negativ”, idet krumningen ikke er som hos en kugleflade, men snarere ligner en sadel [Se figur 1]. Hvis vi nu ønsker at tegne parallelle linjer eller en figur som en trekant på denne saddelflade, må vi som det første beslutte, hvordan vi skal definere en ”ret linje”, svarende til den rette linje i plangeometrien. Den mest rimelige definition på en ret linje i euklidisk geometri er, at det er den korteste vej

mellem to punkter. På en lukket overflade bliver en kurve defineret på denne måde en krum linje, der kaldes en "geodæt".



Figur 2

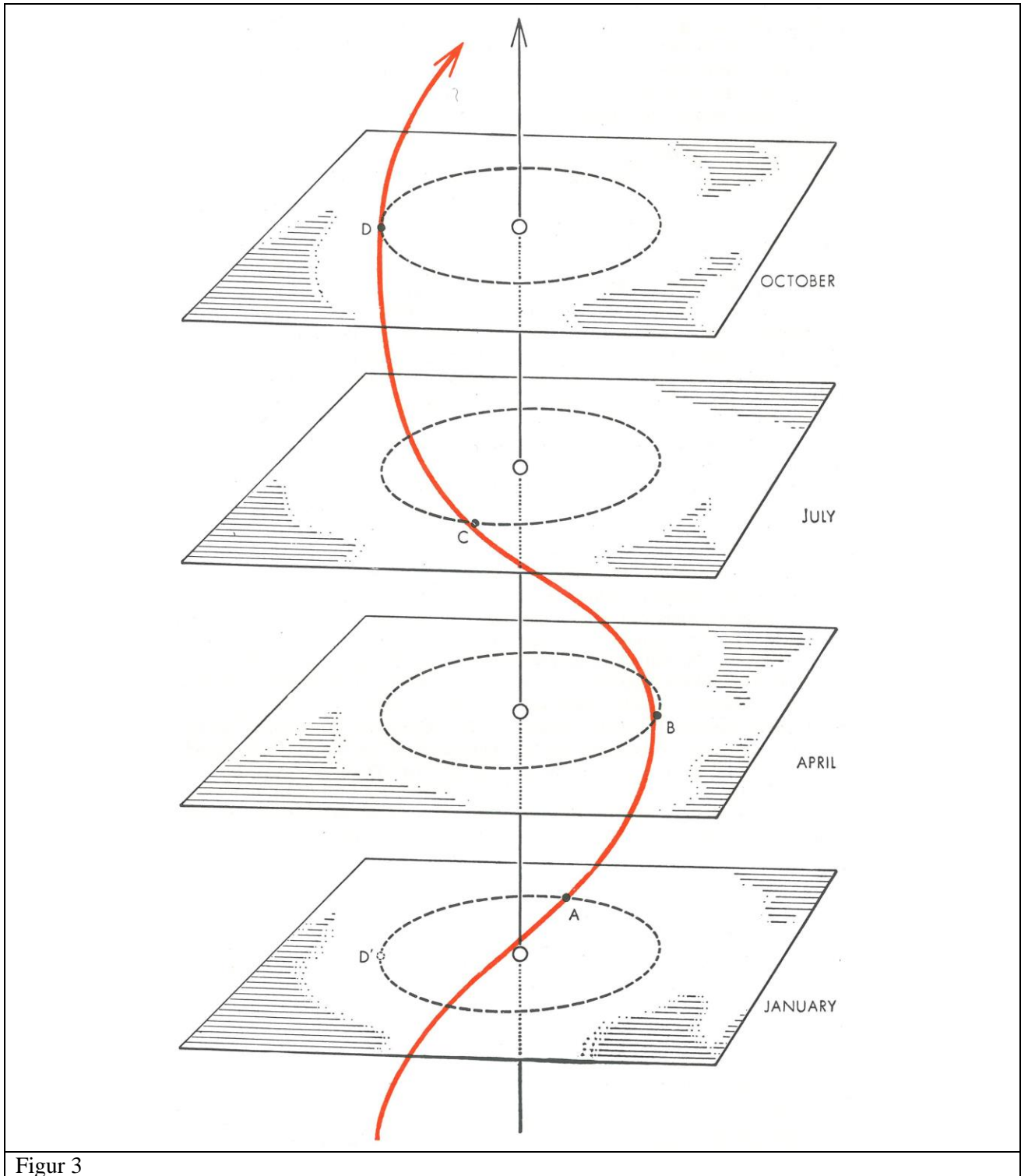
Betragter vi en krum flade som en sadel, ser vi, at hvis vi har forelagt en "ret linje" eller geodæt, så kan vi gennem et punkt uden for linjen tegne et stort antal andre geodæter, som på intet sted skærer den givne linje, uanset hvor langt de forlænges. Ifølge definitionen på parallelitet er de derfor parallelle med den givne linje. De mulige paralleller til den givne linje falder inden for visse grænser vist ved de skærende linjer til venstre på figur 2.

En konsekvens af forkastelsen af Euklids aksiom om parallelle linjer bliver, at mange af hans følgesætninger bliver ugyldige inden for den nye geometri. For eksempel gælder Euklids sætning om, at summen af vinklerne i en trekant er 180° , ikke længere på krumme flader. På en saddelformet flade bliver summen af vinklerne i en trekant dannet af tre geodæter mindre end 180° ; den relevante sum afhænger af trekantens størrelse. Endvidere har en cirkel på en saddelflade ikke de samme egenskaber, som en cirkel i en plan. Her vokser omkredsen af en cirkel proportionalt med cirkelns diameter og cirkelns areal vokser proportionalt med kvadratet på diameteren. Men for en cirkel på en saddelflade vokser både omkreds og areal hurtigere med diameteren end i det plane tilfælde.

Efter Lobachevski og Bolyai konstruerede den tyske matematiker Bernhard Riemann yderligere en ikke-euklidisk geometri, hvis to-dimensionale model er en overflade med positiv, ikke negativ, krumning, nemlig overfladen af en kugle. I dette tilfælde bliver en geodæt simpelt hen en storcirkel eller en del af sådan en cirkel, og eftersom to vilkårlige storcirkler nødvendigvis må skære hinanden i to punkter (polerne), findes der ingen parallelle linjer i denne geometri. Summen af vinklerne i en trekant er ikke 180° , men altid *mere* end 180° . Omkredsen af en cirkel vokser nu langsommere med diameteren og arealet vokser langsommere end kvadratet på diameteren.

Nu er alt dette mere end en øvelse i abstrakte tænkning, men angår direkte geometrien i det Univers, som vi lever i. Er Universets rum "fladt", som Euklid antog, er det negativt krummet (som hos Lobachevski og Bolyai) eller positivt (Riemann). Hvis vi var todimensionale væsener, som levede i et todimensionalt univers, ville vi kunne afgøre, om vi befandt os på en flad eller krummet flade ved at undersøge egenskaberne hos trekanter og cirkler tegnet på denne flade. På tilsvarende måde burde vi som tredimensionale væsener i et tredimensionalt rum ved at undersøge rummets geometriske egenskaber være i stand til at afgøre, hvilken krumning vores rum har. Riemann udviklede faktisk matematiske formler, som beskriver egenskaberne hos forskellige typer krumme rum i tre eller flere dimensioner. I begyndelsen af dette århundrede [1900-tallet] undfangede Einstein idéen om et krumt univers i fire dimensioner ved at indarbejde tiden som den fjerde dimension., og han anvendte Riemanns formler for at afprøve sin idé.

Einstein viste, at man kan opfatte tid som en fjerde koordinat, der supplerer de tre rumlige koordinater. Han forbandt tid og rum, og han indførte et "rum-tids-kontinuum" ved at benytte lysets fart til at sammenkæde den tidslige og de rumlige dimensioner. Men i erkendelse af, at rum og tid er fysisk forskellige størrelser, anvendte han det imaginære tal $\sqrt{-1}$ eller i til at udtrykke tidens enhed matematisk og formelt gøre tidskoordinaten ækvivalent med de tre rumkoordinater.



Figur 3

I Einsteins specielle relativitetsteori er geometrien af rum-tids-kontinuet strengt euklidisk, det vil sige fladt. Den fremragende idé, som han senere introducerede i sin generelle [relativitets]teori, bestod i, at tyngdekraften, hvis indflydelse var blevet udeladt af den specielle teori, måtte krumme rum-tiden. Han indså, at virkningen af tyngdekraften fra de masser, som fandtes fordelt i rummet og bevægede sig med tiden, kunne ligestilles med krumningen af det firedimensionale rum-tids kontinuum. Som erstatning for den klassiske newtonske tese, at "Solen frembringer et kraftfelt, som driver Jorden frem til at afvige fra retlinjet bevægelse og i stedet bevæge sig i en cirkel omkring Solen", fremførte Einstein den påstand, at "tilstedeværelsen af Solen bevirker en krumning af rum-tids-kontinuet i dens omegn"

Bevægelsen af et legeme i rum-tids-kontinuet kan beskrives af en kurve kaldet objektets "verdenslinje". Som eksempel herpå viser figur 3 verdenslinjen for Jorden i dens bevægelse omkring Solen i tiden (Her må rummet repræsenteres af kun to dimensioner; det ville være umuligt for en tredimensional tegner at illustrere den fjerde dimension i dette arrangement, men da Jordens bane omkring Solen ligger i en plan, er denne udeladelse uden betydning). Einstein hævdede faktisk, at "Jordens verdenslinje er en geodæt i det firedimensionale rum omkring Solen". Med andre ord repræsenterer kurven ABCD på tegningen den korteste *firedimensionale* afstand mellem Jordens position i januar (ved A) og dens position i oktober (ved D).

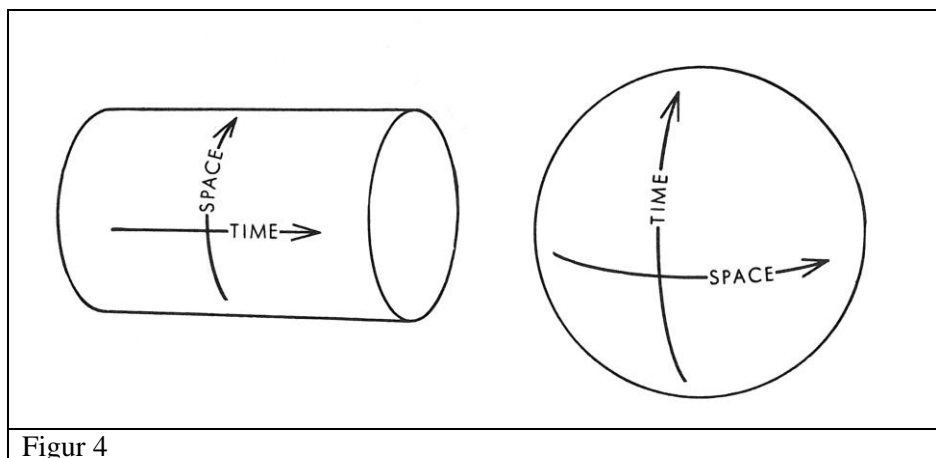
Einsteins idé om, at gravitationen krummer rum-tiden, blev naturligvis på slående vis bekræftet af forstyrrelser i bevægelsen af Merkur, når den kom Solen nærmest, og af afbøjningen af lys i Solens tyngdefelt. Einstein forsøgte dernæst at anvende idéen på Universet som et hele. Er det generelt set krumt, svarende til den lokale krumning i Solens gravitationsfelt? Hen var nu nødt til at betragte ikke bare et enkelt centrum for gravitationskraften, men utallige i et Univers fyldt med stof koncentreret i galakser, hvis fordeling svinger betydeligt fra et område af rummet til et andet. Set på stor skala er galakserne dog spredt ret ensartet i rummet så langt som vores største kikkerter kan se, og det er derfor forsvarligt at "udjævne" stoffet til en gennemsnitlig værdi (der viser sig at ligge på ét hydrogenatom per kubikmeter). Med denne antagelse har Universet overalt en konstant krumning.

Men hvis Universets rum er krumt, hvilket fortegn har krumningen så? Er den positiv som i vores todimensionale analogi med overfladen af en kugle, eller er den negativ som i tilfældet med saddelfluden? Og, eftersom vi ikke kan betragte rummet for sig, hvordan er dets krumning relateret til tiden?

Ved at analysere de relevante matematiske ligninger kom Einstein til den konklusion, at rummets krumning må være uafhængig af tiden, dvs. at Universet i sin helhed er uforandret (selv om det ændres lokalt). Men til sin overraskelse opdagede han, at ligningerne ikke havde nogen løsning, som gav et statisk kosmos. For at reparere på situationen var Einstein tvunget til at indføre yderligere en hypotese, nemlig antagelsen om, at en ny type kraft virkede mellem galakserne. Denne hypotetiske kraft måtte være uafhængig af massen (den samme for et æble, Månen og Solen!) og den måtte vokse i styrke med en voksende afstand mellem de vekselvirkende objekter (som ingen anden kraft i fysikken!)

Einsteins nye kraft, kaldet "kosmisk frastødning", tillod to matematiske modeller for et statisk univers. Den ene løsning, som blev udarbejdet af Einstein selv og blev kendt som "Einsteins sfæriske univers", havde en positiv krumning. Som en kugle var dette univers lukket og havde et endeligt rumfang. De rumlige koordinater i Einsteins sfæriske univers var krumme på samme måde som længde- og breddekoordinater på Jordens overflade. Rum-tids-kontinuets tidsakse forløb derimod helt retlinjet som i den gode gamle klassiske fysik. Det betyder, at ingen kosmisk begivenhed nogensinde ville gentage sig. Den todimensionale analogi til

Einsteins rum-tids-kontinuum er overfladen af en cylinder, med tidsaksen løbende parallelt med cylinderaksen og rumaksen vinkelret herpå (se tegning på figur 4).



Figur 4

tidskoordinat (se tegning på figur 4).

Den anden af de statiske løsninger, som byggede på den mystiske frastødende kraft, blev opdaget af den hollandske matematiker Willem de Sitter. I hans model af universet var både tid og rum krumme. Dens geometri svarede til kuglens, hvor længdegraden tjente som rumkoordinat og breddegraden som

Uheldigvis var astronomiske observationer i modstrid med både Einsteins og de Sitters statiske modeller for universet, og de blev snart forladt.

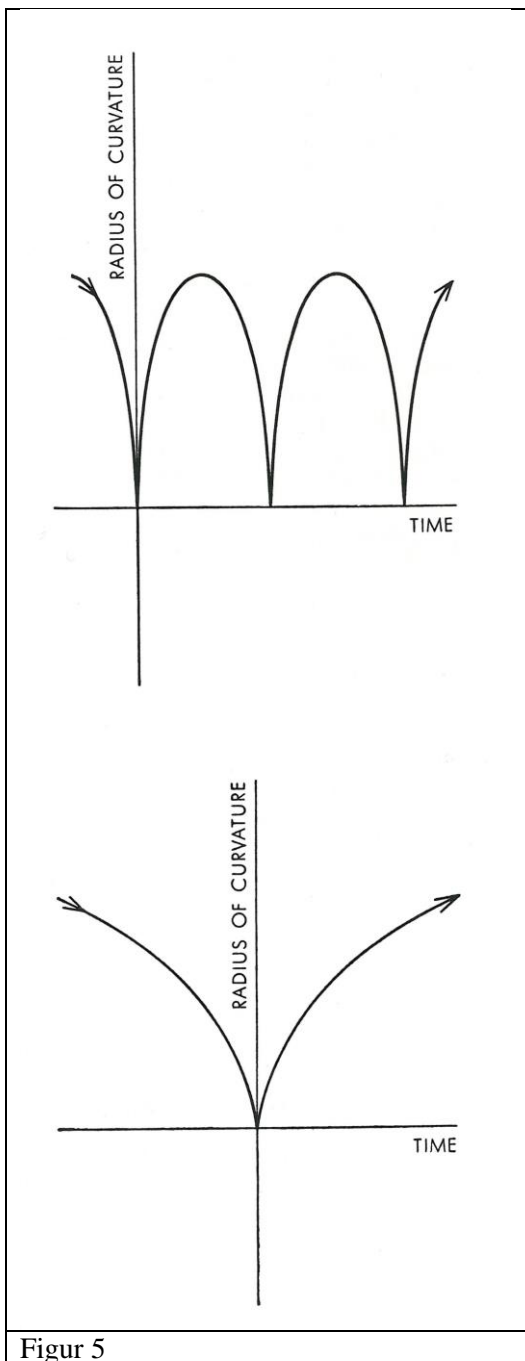
I året 1922 indtraf et større vendepunkt for det kosmologiske problem. En russisk matematiker, Alexander A. Friedman (af hvem denne artikels forfatter lærte relativitetsteori), opdagede en fejl i Einsteins bevis for et statisk univers. I sit bevis havde Einstein divideret begge sider af en ligning med en størrelse, som Friedman opdagede kunne være nul under visse omstændigheder. Da division med nul ikke er en lovlig algebraisk operation, kunne muligheden for et ikke-statisk univers ikke udelukkes under de nævnte omstændigheder. Friedman viste, at to ikke-statistiske modeller var mulige. Den ene viste et univers, som udvider sig med tiden; den anden et, der trækker sig sammen.

Einstein erkendte hurtigt betydningen af denne opdagelse. I den sidste udgave af hans bog *The Meaning of Relativity* skrev han: ”Matematikeren Friedman fandt en vej ud af dette dilemma. Han viste, at det ifølge feltligningerne er muligt at have en endelig tæthed overalt i det (tredimensionale) rum uden at ændre disse feltligninger *ad hoc*.” For mange år siden bemærkede Einstein over for mig, at idéen om kosmisk frastødning var den største bommert han have begået i sit liv.

På næsten samme tidspunkt hvor Friedman opdagede muligheden af et ekspanderende univers ud fra matematiske overvejelser, fandt Edwin P. Hubble fra Mount Wilson-observatoriet på den anden side af kloden det første bevis på en faktisk fysisk udvidelse gennem astronomiske observationer. Han lavede en liste over afstandene til et antal fjerne galakser, hvis lys var forskudt mod den røde ende af spektret, og det blev hurtigt klart, at forskydningens størrelse var proportional med galaksens afstand skønnet ud fra dens klarhed. Hubble og andre fortolkede rødforskydningen som en Doppler-effekt, det velkendte fænomen, som bevirker en forlængelse af bølglængderne af strålingen fra en kilde, som hurtigt fjerner sig (en togfløjte, en lyskilde eller hvad det nu kan være). Til dato er der ikke fundet nogen anden rimelig forklaring på galaksernes rødforskydning. Hvis forklaringen er korrekt, betyder det, at galakserne alle bevæger sig bort fra hinanden med en hastighed, der vokser som de fjerner sig

Friedman og Hubble lagde således grundstenen for teorien om det ekspanderende univers. Teorien blev snart videreudviklet af en belgisk teoretisk astronom, Georges Lemaître. Han foreslog, at vores Univers begyndte i en stærkt sammenpresset og ekstremt varm tilstand, som han betegnede ”uratomet” (”primeval atom”)

(Moderne fysikere ville nok foretrække udtrykket "urkernen" ("primeval nucleus")). Efterhånden som dette stof udvidede sig, tyndede det ud, blev afkølet og klumpede sig sammen i stjerner og galakser og dannede den meget komplekse struktur, som vi finder i Universet i dag.



Figur 5

Indtil for nogle få år siden var teorien om det ekspanderende univers plaget af en alvorlig modsigelse. Målinger af galaksernes flughastigheder og af deres afstande fra os viste, at udvidelsen måtte være begyndt for omkring 1.8 milliarder år siden. På den anden side viste målinger af alderen af gamle klipper på Jorden ved hjælp af deres radioaktivitets-ur (dvs. henfaldet af uran til bly), at nogle af disse klipper var mindst tre milliarder år gamle; nylige overslag, som bygger på andre radioaktive grundstoffer, øger alderen af Jordens skorpe til næsten fem milliarder år. Det er klart, at et 1.8 milliarder gammelt Univers ikke kan indeholde fem milliarder år gamle klipper! Lykkeligvis er denne modstrid nu gået i sig selv med Walter Baades nylige opdagelse af, at den målestok, som blev benyttet til afstandsbestemmelse (og som bygger på variable stjerners perioder [cepheide-metoden]) var fejlbehæftet og at afstandene mellem galakserne er mere end dobbelt så store, som man troede. Denne ændring af afstandene øger Universets alder til fem milliarder år eller mere

Friedmans løsning af Einsteins kosmologiske ligning tillod, som jeg har nævnt, to typer af universer. Vi kan kalde den ene for det "pulserende" univers. Ifølge denne model vil Universet, når det har nået en vis største udstrækning, begynde at trække sig sammen; det vil skrumpes indtil dets stof er blevet sammenpresset til en vis maximal tæthed, muligvis den man finder i atomkerner, der er hundrede millioner millioner gange større end vands; det vil derefter igen begynde at udvide sig og så videre cyklisk i det uendelige. Den anden model er "hyperbolsk": Den antager, at Universet trak sig sammen fra en uendeligt fortyndet tilstand for en evighed siden, indtil det nåede en maximal tæthed, fra hvilken det blev kastet tilbage til en ubegrænset udvidelse, som vil fortsætte i al evighed.

Spørgsmålet om hvorvidt vores Univers rent faktisk er "pulserende" eller "hyperbolsk" burde kunne afklares ved hjælp af den nuværende ekspansionshastighed. Situationen svarer til

en raket, som bliver skudt op fra Jordens overflade. Hvis raketten hastighed er mindre end 7 miles per sekund - den såkaldte undvigelseshastighed - så vil raketten stige til en vis højde og derefter falde tilbage til Jorden (hvis den var fuldstændig elastisk, ville den springe tilbage osv. osv.). Alternativt vil en raket affyret med en hastighed på mere end 7 miles per sekund undslippe fra Jordens tyngdefelt og forsvinde ud i rummet. Situationen med galakserne, som fjerner sig fra hinanden minder meget om en raket, som undviger, bortset fra, at vi i stedet for to vekselvirkende legemer (Jorden og raketten) har at gøre med et utal galakser, der

undviger fra hinanden. Vi måler, at galakserne bevæger sig bort fra hinanden med en hastighed syv gange større, end hvad der kræves for indbyrdes undvigelse.

Vi kan derfor konkludere, at vores Univers svarer til den "hyperbolske" model, og at dets nuværende udvidelse derfor aldrig vil ophøre. Vi må tage ét forbehold: Vurderingen af den nødvendige undvigelsesfart bygger på den antagelse, at praktisk talt hele Universets masse findes koncentreret i galakserne. Hvis det intergalaktiske rum indeholdt stof, hvis samlede masse var mere end syv gange galaksernes, måtte vi omgøre vores konklusion og slutte, at Universet er pulserende. Indtil nu har der imidlertid ikke været nogen antydning af, at der findes stof i det intergalaktiske rum, og det kunne kun have unddraget sig opdagelse, hvis det fandtes i form af ren hydrogengas, uden andre gasser og uden støv.

Er Universet endeligt eller uendeligt? Spørgsmålet kan omformuleres til følgende: Er rummets krumning positivt eller negativt - lukket som en kugleflade eller åben som en saddelflade? Vi kan søge svaret ved at undersøge de geometriske egenskaber ved dets tredimensionale rum, lige som vi undersøgte egenskaberne hos figurer på todimensionale flader. Astronomisk set er det mest bekvemt at undersøge sammenhængen mellem en kugles radius og dens rumfang.

Vi så, at i det to-dimensionale tilfælde vokser arealet af en cirkel med voksende radius hurtigere på en flade med negativ krumning, end på en euklidisk eller flad overflade; og på en flade med positiv krumning er den relative væksthastighed mindre. På tilsvarende måde vokser et rumfang hurtigere i et negativt lukket rum og langsommere i et rum med positiv krumning. I et euklidisk rum vil rumfanget af en kugle vokse proportionalt med kubus, dvs. tredje potensen, af radius. I et negativt krummet rum vokser rumfanger hurtigere end dette; i et positivt krummet rum langsommere [her synes Gamow at gentage sig selv]. Så hvis vi skuer ud i rummet og opdager, at rumfanget af kugler med større og større radius, som målt ved at tælle galakser i disse kugler, vokser hurtigere end kubus på afstanden til kuglens grænse (radius), så kan vi konkludere rummet i vores Univers har negativ krumning og derfor er åbent og uendeligt. Af samme grund, hvis antallet af galakser vokser langsommere end kubus på afstanden, så lever vi i et Univers med positiv krumning - lukket og endeligt.

Hubble tog denne idé op og undersøgte, hvordan galaksernes antal vokser med afstanden. Han skønnede over afstanden til fjerne galakser ud fra deres lysstyrke: galakser varierer betydeligt i absolut lysstyrke, men midlet over et meget stort antal galakser må man forvente, at disse variationer går ud. Hubbles beregninger førte til den konklusion, at Universet er et lukket system - et lille univers med en radius på kun et par milliarder lysår!

Vi ved nu, at den afstandsskala, som han benyttede, var forkert: Med den nye målestok bliver Universet mere end dobbelt så stort, som det han beregnede. Men man kan grundlæggende betvivle hans resultat. Hele metoden bygger på den antagelse, at en galakses egen lysstyrke forbliver konstant. Hvad nu hvis den ændrer sig med tiden? Vi ser lys fra fjerne galakser, der blev udsendt på vidt forskellige tidspunkter i fortiden - for 500 millioner, én milliard, to milliarder år siden. Hvis stjernerne i galakserne brænder ud, må galakserne blive mere lyssvage, når de ældes. En galakse to milliarder lysår borte kan ikke anbringes på samme afstandsskala som en galakse i 500 millioner lysårs afstand, medmindre vi tager højde for det faktum, at vi ser den nære [fjerne!?] galakse med en højere alder og en mindre lysstyrke. Den fjerne galakse er længere borte end hvad der fremgår af en sammenligning blot på grundlag af deres lysstyrker.

Når man korrigerer for den formodede nedgang i lysstyrke med alderen, bliver de fjernere galakser rykket ud til større afstande, end Hubble antog. Faktisk bliver beregning af rumfang ændret så drastisk, at vi kan blive nødt til at omgøre vores konklusion om rummets krumning. Vi kan ikke være sikre, fordi vi endnu ikke ved

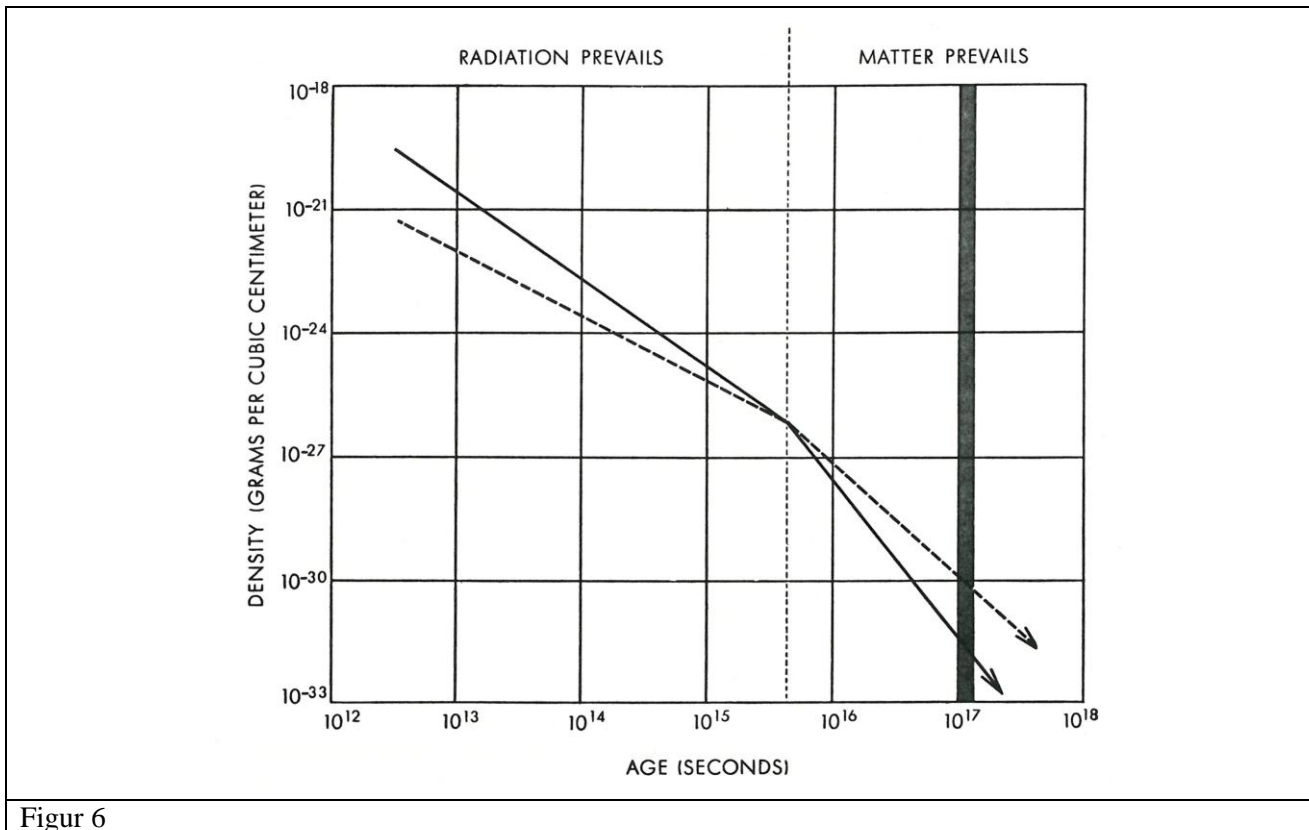
nok om udviklingen af galakser. Men hvis vi måler, at galaksernes absolut lysstyrke svinder med blot nogle få procent på en milliard år, nødes vi til at konkludere, at rummet er negativt krummet og at Universet er ubegrænset.

Faktisk findes der et andet argument, som understøtter den uendelige model. Vores Univers synes at være hyperbolsk og i evig udvidelse. Matematiske løsninger til de fundamentale kosmologiske ligninger viser, at et sådant univers er åbent og uendeligt.

Vi har gennemgået de spørgsmål, som dominerede kosmologernes tænkning i første halvdel af dette århundrede: Begreber som et fire-dimensionalt rum-tids-kontinuum, krumme rum, et univers i udvidelse og et kosmos, som kan være enten endeligt eller uendeligt. Vi må nu give os i kast med kosmologiens hovedspørgsmål i dag: Udvikler Universet sig rent faktisk eller befinder det sig i en *steady-state* tilstand af ligevægt, der altid har eksisteret og som vil fortsætte til evig tid. De fleste kosmologer støtter de evolutionære synspunkt. Men i 1951 fremsatte en gruppe ved University of Cambridge, hvis hovedtalsmand har været Fred Hoyle, den nye *steady-state* tanke. Det centrale i deres teori er, at Universet er uendeligt i tid og rum, at det hverken har en begyndelse eller en slutning, at tætheden af stof forbliver konstant, at nyt stof løbende opstår i rummet med en hastighed som præcis kompenserer for stoffets udtynding som følge af udvidelsen., at der derfor hele tiden dannes nye galakser og at Universets galakser følgelig har aldre, som strækker sig fra årsunger til veteraner på 5, 10, 20 eller flere milliarder år.. Efter min opfattelse må denne teori betragtes som meget tvivlsom på grund af det simple faktum (ud over andre grunde), at galakserne i vores omegn alle synes at have samme alder som Mælkevejen.. Men sagen er fundamental og har mange sider og kan kun afgøres ved at udvide undersøgelsen af Universet til så fjerne egne som muligt. Hoyle præsenterer *steady-state* teorien i den følgende artikel. Her vil jeg give et sammendrag af den evolutionære teori.

Vi antager, at Universet begyndte i en fase med meget høj massetæthed. I de tidligste stadier af udvidelsen dominerede strålingsenergi over stoffets masse. Vi kan måle energi og masse på en fælles skala ved hjælp af den velkendte ligning $E = mc^2$, der udtrykker, at den energi E som svarer til en stofmængde, er massen m af stoffet gange med kvadratet på lysets fart c . Omvendt kan energi oversættes til masse ved at dividere energien med størrelsen c^2 . Vi kan derfor tale om energiens "massetæthed". Nu var massetætheden af strålingsenergien til at begynde med umådeligt større end Universets stoftæthed. Men i et system, som udvider sig, aftager tætheden af strålingsenergien hurtigere end tætheden af stof. Førstnævnte udtyndes svarende til fjerde potens af den af den afstand, som udvidelsen har bevirket: Hvis systemets radius fordobles, så aftager tætheden af strålingsenergien til en sekstendedel. Tætheden af stof aftager med tredje potens: En fordobling af radius medfører en ottedobling af rumfanget og dermed en stoftæthed, som er otte gange mindre.

Hvis vi antager, at Universet til at begynde med helt og holdent var domineret af strålingsenergi, så kan vi beregne, at Universets temperatur var 250 millioner grader, da det var en time gammelt, faldt til 6000 grader (Solens nuværende overfladetemperatur), da det var 200 000 år gammelt og var faldet til minus 100 grader, da Universet nåede sin 250-millionte fødselsdag.

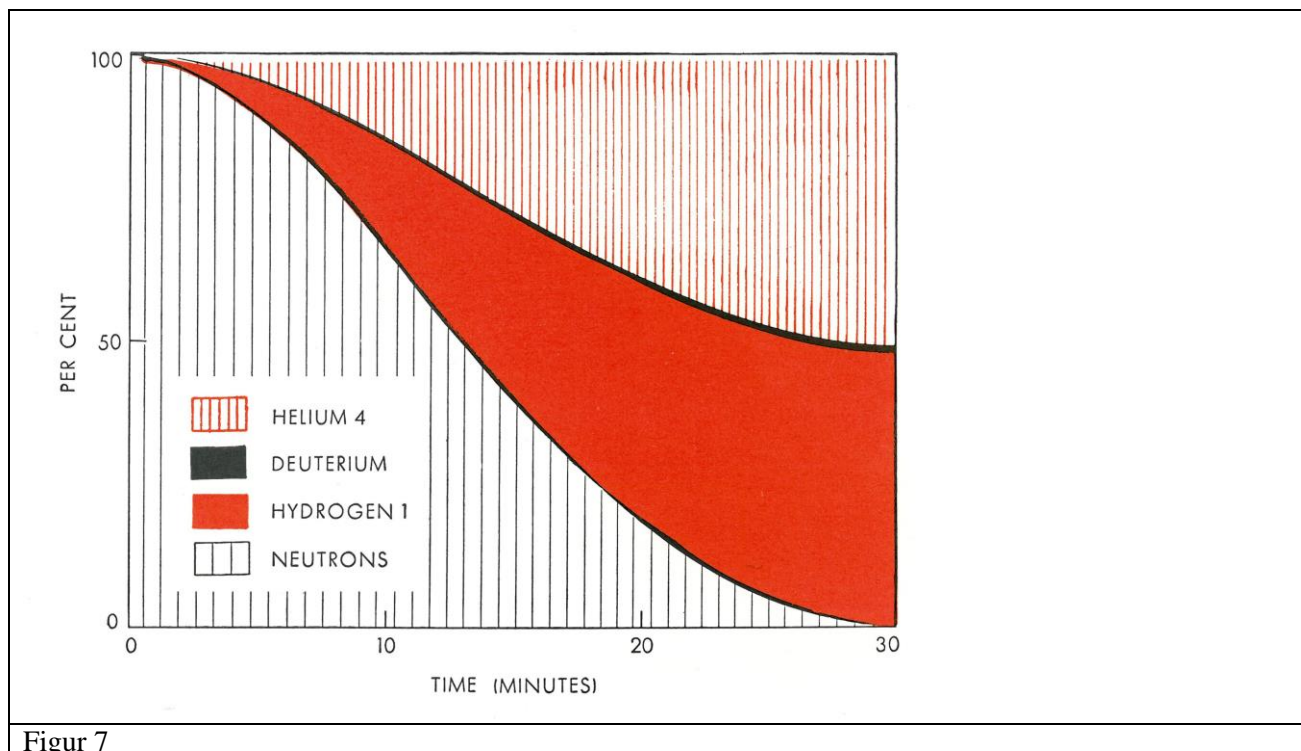


Figur 6

Denne bestemte fødselsdag var en skelsættende dag i Universets historie. Det var det tidspunkt til hvilket tætheden af almindeligt stof blev større end massetætheden hørende til strålingsenergien, en følge af sidstnævntes hurtigere aftagen, se figur 6. Overgangen fra strålingens dominans til stoffets dominans ændrede på afgørende vis stoffets opførsel. Gennem de æoner, hvor der var underlagt energien af stråling (dvs. lys), må det have været fordelt jævnt ud over rummet i form af en tynd gas. Men så snart stoffet gravitationelt overgik strålingens energi, begyndte det at antage en mere interessant karakter. James Jeans har i sine klassiske undersøgelser af fysikken ved en sådan situation for et halvt århundrede siden bevist, at en gas, som udfylder et stort rumfang, på grund af sin gravitation vil bryde op i individuelle gaskugler; størrelsen af disse bestemmes af gassens densitet og temperatur. I året 250 000 000 efter udvidelsens begyndelse, da stoffet blev befriet af strålingens diktatur, brød gassen op i gigantiske skyer, som langsomt drev fra hinanden, idet Universet fortsatte sin udvidelse. Ved at anvende Jeans matematiske formel for denne proces på den gas, som opfyldte Universet til dette tidspunkt, har jeg beregnet, at disse oprindelige gaskugler må have haft masser lige omkring dem, vi i dag finder i galakserne. De var dengang kun "proto-galakser" - kolde, mørke og kaotiske. Men gassen i dem fortættede sig snart til stjerner og dannede galakserne, som vi ser dem i dag.

Et centralt problem inden for dette billede af det ekspanderende univers består i at gøre rede for dannelsen af de forskellige former for bestanddele, som det er opbygget af, dvs. grundstofferne. Spørgsmålet behandles i detaljer i en anden artikel i denne udgave [William A. Fowler: "The Origin of the Elements"]. Jeg mener, at stoffet til at begynde med bestod ganske enkelt af protoner, neutroner og elektroner. Efter fem minutter må Universet have været afkølet nok til at tillade sammenklumpning af protoner og neutroner i større enheder, fra deuteroner (en neutron og en proton) op til de tungeste grundstoffer. Denne proces må være blevet afsluttet efter ca. 30 minutter, for til den tid må temperaturen af det ekspanderende Univers være faldet ned under den tærskelværdi, som er gældende for termioniske reaktioner mellem de lette

grundstoffer, og neutronerne må være blevet opbrugt under grundstofdannelsen eller være blevet omdannet til protoner.



Figur 7

For mange læsere kan påstanden om, at den nuværende kemiske opbygning af vores Univers blev afgjort i løbet af en halv time for fem milliarder år siden synes absurd. Men betragt et stykke jord på atomafprøvningsområdet i Nevada, hvor en atombombe blev bragt til sprængning for tre år siden. Inden for et mikrosekund producerede kernereaktionerne frembragt af bomben en lang række fissionsprodukter. I dag, 100 millioner millioner mikrosekunder senere er området stadig "hot" af tilbageværende fissionsprodukter. Forholdet mellem et mikrosekund og tre år er det samme som forholdet mellem en halv time og fem milliarder år! Hvis vi kan acceptere et forhold mellem tider af denne størrelse i det ene tilfælde, hvorfor så ikke også i det andet?

Den nu afdøde Enrico Fermi og Anthony L. Turkevich fra *Institute for Nuclear Studies* ved *University of Chicago* gennemførte en detaljeret beregning af de termionukleare reaktioner, som må have fundet sted i løbet af den første halv time af Universets udvidelse. De konkluderede, at reaktionerne ville have frembragt omtrent lige store mængder hydrogen og helium og udgøre 99 % af den samlede stofmængde og omkring 1 % deuterium. Vi ved, at hydrogen og helium rent faktisk udgør omkring 99 % af Universets stof. Det efterlader os med problemet med at få opbygget de tunge grundstoffer. Jeg har den opfattelse, at nogle af dem blev dannet ved indfangning af neutroner. Men da der ikke findes stabile atomkerner med atomvægt 5, er det usandsynligt, at de tunge grundstoffer kunne være blevet dannet i løbet af den første halv time i de mængder, som nu observeres. Jeg er enig i, at broderparten af de tunge grundstoffer meget vel kan være blevet dannet senere i stjernernes varme indre.

Alle teorier om Universets oprindelse, alder, udstrækning, sammensætning og natur bliver mere og mere gjort til genstand for afprøvning ved hjælp af nye instrumenter og nye teknikker, som beskrives i fælgende artikler i dette nummer. I artiklen om undersøgelser af rødforskydningen rapporterer Allan Sandage

som et foreløbigt resultat, at Universets udvidelse synes at bremse ned. Hvis dette bliver bekræftet, antyder det, at vi lever i et pulserende Univers. Men vi må ikke glemme, at vurderinger af afstandene til galakserne stadig bygger på den omdiskuterede antagelse, at galaksernes lysstyrker ikke ændres med tiden. Hvis galakser rent faktisk aftager i lysstyrke med alderen, så kan man ikke have tillid til beregningerne. Derfor er spørgsmålet om, hvorvidt galakser udvikler sig afgørende betydning for vort nuværende syn på Universet.

Steady-State Universet

Fred Hoyle, Scientific American, september 1956, p. 157 ff

Nogle kosmologer er uenige i det evolutionære synspunkt og hævder, at udseendet af Universet på stor skala ikke ændres og at dets densitet opretholdes ved skabelse af stof

Teorien om et *steady-state* univers fører til mange slående konklusioner. For at nævne nogle få: At Universet ikke har haft nogen begyndelse og ikke vil have nogen slutning, at rummet såvel som tiden er uendeligt, at der løbende skabes stof overalt i rummet. Da menneskets natur er som den er, har der været en tendens mod følelsesmæssige holdninger over for disse begreber, i stedet for at begrænse diskussionen til rent videnskabelige kriterier. Hvis forfatteren, sammen med kritikere, har overskredet grænsen i denne henseende, så lover han at råde bod herpå i denne artikel.

Steady-state-teorien hævder, at Universets strukturer set på stor skala ikke ændrer sig med tiden. Kun galakser og galaksehobe forandres; hvis vi udtværer stoffet jævnt over hele rummet og betragter Universets generelle egenskaber, så forandres det ikke. Universets udvidelse er et grundlæggende træk ved teorien. Den rejser spørgsmålet: Hvis galakserne bevæger sig væk fra hinanden, hvorfor bliver rummet så ikke mere og mere tomt? Teoriens svar er, at der løbende dannes nye galakser og galaksehobe og at dannelseshastigheden netop kompenserer for udvidelsens adskillende effekt. Der bliver på denne måde opretholdt en stabil situation.

Før vi går over til at betragte argumenter for, forudsigelse for og afprøvning af *steady-state*-teorien, må forfatteren fremhæve, at hans egen tilgang til teorien afviger ret markant fra Hermann Bondis og Thomas Golds. Tilsvarende gælder for opfattelsen hos William H. McCrea fra *University of London*. Forfatterens tilgang er matematisk og udviklet inden for rammerne af relativitetsteorien. Bondis og Golds bygger på et intuitivt, men stærkt fysisk princip. For at forstå deres synspunkt, må vi kigge nærmere på dette postulat, som kaldes "det kosmologiske princip"

Kosmologi afviger fra alle andre grene af de fysiske videnskaber på en meget afgørende måde. Medens andre fysikere altid beskæftiger sig med isolerede systemer, hvis "grænsebetingelser" kan defineres, så må en kosmolog beskæftige sig med et ikke-isoleret system. For at klare denne uheldige situation er han tvunget til at antage et "symmetripostulat", som siger, at Universet, bortset fra lokale udsving, vil se ens ud uanset hvorfra man betragter det. Med andre ord antages det, at iagttagere på forskellige galakser rundt om i Universet alle vil have det samme billede af Universet set på stor skala. Men hvis Universet ændrer sig med tiden, så må forskellige iagttagere sammenligne deres billeder til samme tidspunkt, hvilket naturligvis kræver, at vi kan definere, hvad vi mener med "til samme tidspunkt". For at muliggøre en definition af samtidighed, fremsatte matematikeren Hermann Weyl yderligere det postulat, at galaksernes bevægelse følger et regulært mønster, hvis præcise natur ikke behøver at blive beskrevet her.

I stedet for dette yderligere postulat foreslog Bondi og Goldet enkelt altomfattende "kosmologisk princip", nemlig at Universets strukturer på stor skala er de samme ikke bare set fra ethvert sted i rummet, men også set til ethvert tidspunkt. Denne hypotese om symmetri fører straks til den konklusion, at universet er i en stabil tilstand. Det er så ligegyldigt, om iagttagerne sammenligner deres målinger "til samme tidspunkt" eller ej.

Bondis og Golds synspunkt besidder en slående enkelthed. Symmetriargumenter har ydermere gentagne gange demonstreret deres styrke i fysiske teorier i indeværende århundrede (f. eks. positive og negative ladninger i kernefysikken). Men efter min smag er det at foretrække at starte med en matematisk definition af den kontinuerte skabelse af stof inden for rammerne af relativitetsteorien og derefter udlede en *steady-state* løsning som en konsekvens af feltligningerne.

Ved første øjekast kan skabelsen af stof synes som et sært begreb at indføre i videnskabelig tankegang. Men som det tydeligt fremgår af andre artikler i dette nummer, må dannelsen af stof indgå i enhver kosmologi. Nu til dags bliver det mere om mere åbenbart, at det oprindelige stof er hydrogen - det materiale hvoraf de øvrige grundstoffer er blevet dannet ved kernereaktioner inde i stjerner. Denne omdannelse står på hele tiden.

Hvorfor er der så overhovedet hydrogen tilbage i Universet? Hvorfor er det ikke alt sammen for længe siden blevet omdannet til tunge grundstoffer? Hvis vi antager, at Universets hydrogen har eksisteret uendeligt længe, ville der ikke være noget tænkeligt svar. Vi kunne mene, at hydrogenet ikke har haft tilstrækkelig tid til at blive forvandlet til andre grundstoffer, fordi stjernerne først var blevet dannet for nyligt, det vil sige inden for de seneste fem milliarder år eller så. Men så ville der heraf følge, at dette hydrogen var forblevet uomdannet i uendelige tidsrum og så pludseligt for fem milliarder år siden begyndte at trække sig sammen til stjerner og galakser. Det virker meget lidt sandsynligt. Den anden mulighed for at finde hydrogen til stede i dag, hvis vi stadig mener at det er uendeligt gammelt, ligger i, at de tungere grundstoffer dannet af det igen nedbrydes til hydrogen. Hovedindvendingen mod denne idé er vanskeligheden ved at forklare, hvorfra den til nedbrydningen nødvendige energi stammer fra. Spaltning af tungere grundstoffer til hydrogen kræver absorption af energi - det modsatte af den frigivelse af energi, som sker, når hydrogenkerner kombinerer. At tilvejebringe den energi, der er nødvendig for en tilstrækkelig storstilet nedbrydning af tunge grundstoffer ville kræve intet mindre end en implosion (modsat en eksplosion) af hele Universet.

Vi når således den konklusion, at det hydrogen, som vi observerer, ikke er uendeligt gammelt. Det er opstået inden for et endeligt tidsrum og er endnu ikke blevet omdannet til tungere grundstoffer. Både evolutionsteorien og *steady state*-teorien er enige på dette punkt. Men her ophører ligheden mellem dem. Evolutionsteorien hævder, at alt hydrogen blev dannet i en eksplosiv begyndelse for omkring fem en halv milliarder år siden (se George Gamows indlæg i forrige artikel). *Steady State*-hypotesen fremfører, at hydrogen er blevet dannet med en konstant hastighed gennem uendelig lang tid og stadig dannes med samme hastighed i dag.

Hvis hydrogen har været til stede i uendelig lang tid, og jævnt hen i stjerner er blevet omdannet til tungere grundstoffer, hvorfor iagttager vi så ikke galakser bestående af meget gammelt stof? Hvorfor ser vi kun forholdsvis unge galakser, som næsten udelukkende består af hydrogen? *Steady State*-teoriens svar er, at Universets udvidelse spreder galakserne bort fra hinanden, medens de ældes, og at det gamle materiale hurtigt fortyndes sammenlignet med middeltætheden af Universet i sin helhed. Nyt hydrogen og nye galakser dannes løbende lige så hurtigt. Ifølge teoriens matematik sker Universets udvidelse og skabelsen af nyt stof med sådanne hastigheder, at den gennemsnitlige tæthed af for eksempel materiale, som er 200 milliarder år gammelt, er mindre end tætheden af nyligt dannet stof med en faktor på 10^{43} (et 1-tal efterfulgt af 43 nuller). Det må understreges, at dette tal er et gennemsnit udjævnet af hele Universet: Det kan ikke anvendes på enkelte galakser eller galaksehobe. Udvidelsen finder sted i rummet *mellem* galakserne. De individuelle galakser og hobene udvider sig ikke selv. Det meget gamle stof i Universet er koncentreret i meget gamle galakser. I kraft af den universelle udvidelse er disse nu ekstremt langt borte. Muligvis findes der enkelte galakser af moderat alder inden for rækkevidden af vores kikkerter. Hvis man kunne finde en metode til at

identificere fjerne galakser bestående af forholdsvis gammelt stof, så ville det kunne teste *steady state*-teorien.

Hvis vi vil tage fat på *steady-state*-teorien fra et matematisk synspunkt, må vores første skridt tydeligvis bestå i at konstruere en matematisk lov, som udtrykker dannelsen af stof. Vi ønsker at formulere denne lov inden for rammerne af den generelle relativitetsteori. Lige som udviklingsteorien så benytter *steady state*-teorien sig af de kraftfulde ligninger udviklet af Albert Einstein til at beskrive det firedimensionale rum-tids-kontinuum (se den foregående artikel). Vi kan her kort angive nogle af hovedprincipperne, som indgår, skønt ligningerne selv er for udviklede til at blive undersøgt i detaljer.

Relativitetsteorien begynder med at generalisere de sædvanlige bevægelseslove, som vi kender fra det tredimensionale rum, til en beskrivelse af egenskaberne og den ikke-euklidiske geometri hos det firedimensionale rum-tids-felt. Disse love kan formuleres i fire ligninger: Én ligning der udtrykker loven om energibevarelse og tre som giver bevarelse af impulsmoment. Vores problem består i at udforme loven om stoffets oprindelse på en sådan måde, at den kan indgå i disse fire bevarelseslove.

Som et første trin på vejen må vi definere energi og bevægelsesmængde, for relativitetsteorien definerer dem ikke selv. Det mest rimelige består i at vælge definitioner, som så tæt som muligt ligger op ad de sædvanlige ligninger, der beskriver bevarelseslovene fra vores velkendte (euklidiske) verden. Ved første øjekast ser det ud som om evolutionskosmologerne har gjort dette, men det viser sig, at deres bevarelsesligninger ikke indeholder noget generaliseret udtryk, der svarer til visse led, kendt som "fluid stresses", som spiller en rolle i de sædvanlige ligninger. Når vi definerer energi og bevægelsesmængde på en måde, der leverer en sådan generalisering, bliver resultatet af ligningerne et *steady state*-univers, ikke et evolutions-univers.

De således generaliserede ligninger indebærer en tilbagekoblingsmekanisme mellem universets udvidelse og oprindelsen af stof. Såfremt udvidelsen overskrider en bestemt kritisk hastighed (der er knyttet til den hastighed, som stoffet skabes med), vil mekanismen bremse udvidelsen. Hvis udvidelsen tager af og underskrider et bestemt niveau, vil mekanismen øge udvidelsen. På denne måde opretholder vekselvirkningen mellem udvidelsen og dannelsen af stof en stabil tilstand i hvilken Universets stoftæthed forbliver konstant.

For mange mennesker synes forestillingen om en vedvarende skabelse af nyt stof i rummet at være et åbenlyst brud på sætningen om energiens bevarelse. I så fald er der tale om en forveksling mellem et lukket system og den meget anderledes situation i et åbent system. Relativitetsteorien siger, at i et åbent, uendeligt ekspanderende univers er lokale koncentrationer af energi forbundet med ekspansionsenergi for hele dette univers. Og ekspansionsenergien kan antage en form, der fører til kontinuert dannelse af stof.

Det samme spørgsmål som stilles vedrørende skabelsen af stof kunne også stilles om rødforskydningen af lyset fra fjerne galakser. Det rødforskudte lys er svagere, end da det begyndte sin rejse. Hvor bliver den tabte strålingsenergi af? Den medgår til en svag forøgelse af hele Universets udvideshastighed. Pointen er, at for at lave en samlet beregning af Universets energibevarelse for energi og stof, må vi indregne Universets udvidelse. Vi kan ikke afstemme energiregnskabet strengt og fuldstændigt inden for et afgrænset område, fordi intet sådant område er fuldstændig lukket.

Før vi forlader emnet, er det måske værd at bemærke, at uanset om vi betragter spørgsmålet om bevarelse i operationelle snarere end i teoretiske termer, så bliver slutresultatet det samme. Antag, at iagttagere på Jorden målte energiindholdet i et givent område af Universet, for eksempel det, som er inden for rækkevidde af 200 tommer teleskopet [verdens største teleskop på Mount Palomar] og antag, at dette udføres ved flere

lejligheder adskilt af lange tidsrum. Hvis energibevarelse skal gælde, så må det målte energiindholdet forblive uændret fra den ene måling til den næste. Det ville være tilfældet i et *steady state*-univers, men ikke i et evolutionært. Desuden er energibevarelsen i denne operationelle forstand gyldig for enhver iagttagelse i *steady state*-universet.

De to træk ved *steady-state*-teorien, som giver anledning til størst overraskelse er (1) at teorien klart hviler på et klart matematisk grundlag og (2) at teorien i høj grad er tilgængelig for afprøvning ved observationer. Hvordan kan den testes? Tydeligvis kan vi ikke prøve den af i et laboratorium - medmindre vi kan finde en metode til at kunstigt at øge skabelsen af stof - for hastigheden skabelser sker med, er, ifølge teorien, ubetydelig efter jordisk målestok: I et rumfang svarende til et gennemsnitligt fysiklaboratoriums skulle der vise sig ét nyt hydrogenatom i løbet af 1000 år. Men på kosmologisk skala findes der mange mulige tests.

For det første ser vi ved vores teleskopers yderste grænser galaktiske systemer, som de så ud for milliarder eller flere år tilbage i tiden. Man kan derfor opnå information om, hvordan forholdene var i fortiden, og denne information kan sammenlignes med den kosmiske scene, som ligger tæt på os i tid og rum. Eftersom *steady state*-teorien kræver, at der på stor skala ikke er forskel mellem fortiden og nutiden, som kan teorien klart nok afprøves på dette punkt. Egenskaber på stor skala kan anslås på mange forskellige måder: Tætheden af samlingen af galakser, styrken og farven af deres lys, radiostråling som signalerer sammenstød og andre betydningsrige begivenheder, forholdet mellem rødforskydning og afstand og så videre.

For det andet findes der tests, som kan gennemføres uden at kigge så langt væk hjemmefra. Vi kan opfatte dannelse af nye galakser som svarende til fødsel i biologisk forstand og deres adskillelse ved udvidelsen som svarende til død. I denne analogi fødes en ny generation af galakser ikke hvert 30. år, som tilfældet er hos mennesker, men i løbet af få milliarder år. Lige som en population af dyr uddør, hvis den ikke er i stand til at reproducere sig fra en generation til den næste, på samme måde vil egenskaberne på stor skala hos systemet af galakser ikke overleve, medmindre de på samme måde reproducerer sig selv. Hvis Universet er uendelig gammelt, som *steady state*-teorien hævder, må vi forvente kun at se de egenskaber overleve, som har stabiliseret sig, sådan at de bliver gendannet på nøjagtigt samme niveau fra generation til generation. Med andre ord er galakserne, ifølge *steady state*-teorien, ikke et produkt af tilfældige svingninger og fortætninger, som tilfældet er i evolutionsteorien, men repræsenterer et meget strengt kontrolleret system, som ligger under for en slags kosmisk økologi, i hvilken stoffets oprindelse spiller en kritisk rolle. Denne afgørende forskel mellem de to teorier kan danne grundlaget for stringente test. Sådanne undersøgelser kan anvendes på egenskaber som tætheden af galakser i rummet og galaksernes fordeling efter masse. Det vil sige at vi kan efterprøve, om fordelingen er regelmæssig eller ikke følger noget regulært mønster.

I løbet af de seneste fem år er det to gange blevet hævdet, at observationer har modbevist *steady-state*-teorien, men nu lader det til, at der i begge tilfælde kan rejses alvorlig tvivl over observationerne. De amerikanske astronomer Joel Stebbins og A. E. Whitford mente, at visse fjerne galakser udviste en større rødfarvning end det, der kunne tilskrives den sædvanlige rødforskydning, og dette blev udlagt som støtte til evolutionsteorien. Men Whitford opdagede senere, at noget af datamaterialet, som de have brugt, var fejlbehæftet. På det seneste har Martin Ryle i England rapporteret en optælling af radiokilder, som viste, at tætheden af galakser i rummet vokser med afstanden fra os - igen tilsyneladende i overensstemmelse med det evolutionære synspunkt. Ryles resultater er imidlertid blevet draget i tvivl af radioastronomen B. Y. Mills i Australien.

Efter min opfattelse findes den alvorligste mulige modsigelse af *steady-state*-teorien i de nylige målinger af rødforskydninger gennemført af astronomer i Californien som Allan Sandage rapporterer om i dette nummer. Men som Sandage fremhæver, så er resultaterne ind til videre meget usikre.

George Gamow har rejst den indvending mod *steady-state*-teorien, at elliptiske galakser (som menes kun at bestå af gamle stjerner) tilsyneladende ikke udviser den variation i alder, som teorien forudsiger. Som forsvar for teorien kan nævnes, at de omtalte målinger (undersøgelser af galaksernes farve i to områder af spektret) ikke er et særligt følsomt mål for galaksernes alder. I farvetesten burde en seks milliarder år gammel galakse se ud som en, der er tre milliarder år gammel. Det er nødvendigt med mere følsomme målinger.

Steady state-teorien vinder på den anden side støtte fra nylige beregninger, som viser, at grundstofferne efter hydrogen er blevet dannet i stjerner. Disse undersøgelser, som rapporteres i en artikel af William A. Fowler [i dette nummer], gør det mere sandsynligt, at grundstofferne bliver "brygget" i stjernerne, som *steady-state* kosmologien foreslår, snarere end at de blev dannet i en oprindelig eksplosion, som Gamow har hævdet.

Radioastronomi tilbyder en spændende mulighed for en direkte påvisning af skabelsen af stof i rummet. Hvis den samlede mængde stof i de galakser, som vi kan observere, blev spredt jævnt ud i hele rummet, så anslås tætheden at ville være omkring 10^{-30} gram per kubikcentimeter. *Steady State*-teorien forudsiger, at den gennemsnitlige tæthed af stof burde være 10 eller flere gange højere end denne værdi. Forskellen mellem de to værdier skyldes ifølge teorien tilstedeværelsen af hydrogen spredt ud i det intergalaktiske rum. Frem til i dag har det ikke været muligt at påvise intergalaktisk stof. Men inden for de næste par år kan nye radioteleskoper, indstillet på hydrogens "sang med én tone" [svarende til en bølgelængde på 21 centimeter], blive i stand til at afgøre, om sådanne mængder af hydrogen findes eller ikke findes i rummet.