

KVANT

April
2024

1

Tidsskrift for Fysik og Astronomi 35. årgang

STORT TEMANUMMER OM KOSMOLOGI

- SORTE HULLER • UNIVERSETS BEGYNDELSE
- INHOMOGEN KOSMOLOGI: UNIVERSET TÆNKT FORFRA
- KAN VI SE GALAKSER FJERNE SIG HURTIGERE END LYSETS FART?
- PENROSE'S CYCLIC UNIVERSE • UNIVERSETS SORTE SPEJLE
- SNU FYLDER 200 ÅR • FYSIKERNE MELLEMLER VIDENSKAB OG POLITIK

Løssalgspris: 50 kr.

KVANT

Tidsskrift for Fysik og Astronomi

c/o DTU Space, Centrifugevej 356
DK-2800 Kgs. Lyngby

Hjemmeside : www.kvant.dk

E-mail : kvant@kvant.dk

Facebook  : [KVANT.fysiktidsskrift](https://www.facebook.com/KVANT.fysiktidsskrift)

ISSN (trykt) : 0905-8893

ISSN (web) : 2245-4942

Udgives af

Astronomisk Selskab (AS)

Dansk Fysisk Selskab (DFS)

Selskabet for Naturlærens Udbredelse
(SNU)

Redaktion

Jens Olaf Pepke Pedersen (ansv. red.),
DTU Space

Michael Cramer Andersen,

Christianshavns Gymnasium

Christine Pepke Gunnarsson (nyheds-
redaktør), DTU Electro

Ole Mørk Lauridsen, SNU

Steen Lærke, AS

Maren Malling, DFS

John Rosendal Nielsen

Lars Occhionero, AS

Dorte Olesen, SNU

Finn Berg Rasmussen,

Niels Bohr Institutet, KU

Svend Erik Rugb

Abonnementspris : 185 kr./år.

Kvant udkommer 4 gange årligt og er med-
lemsblad for de udgivende selskaber.

Abonnement tegnes på www.kvant.dk.

Øvrige henvendelser vedr. abonnement til
Christine Pepke Gunnarsson:

christine@kvant.dk (tlf. 27 51 01 76).

Annoncepriser

1/1 side: 3600 kr., 1/2 side: 2300 kr.

1/4 side: 1600 kr.

Priserne er excl. moms og for reproklart
materiale i farver. Henvendelser om annon-
cer til redaktøren på: kvant@kvant.dk

Tryk

Vestergaards Bogtrykkeri A/S.

Oplag: 2.500.



Tryksag
5041 0826

Produktionsplan

Nr. 2-2024 udkommer ca. 15. juni

Nr. 3-2024 udkommer ca. 15. september

Deadline for mindre bidrag og annoncer
er ca. en måned før, længere artikler skal
modtages to måneder før.

Indhold:

Sorte huller

Troels Harmark og Niels Obers 3

Læs Kvant på hjemmesiden! 6

Universets begyndelse

Charles Steinhardt 7

Errata 10

Inhomogen kosmologi: universet tænkt forfra

Asta Heinesen og Sofie Marie Koksang 11

Kan vi se galakser fjerne sig hurtigere end lysets fart?

Peter Laursen 15

Penrose's Cyclic Universe

John Rosendal Nielsen 23

Universets sorte spejle

Albert Sneppen 30

Generalforsamling i SNU 31

SNU fylder 200 år: jubilæumsåret og den historiske baggrund

Dorte Olesen 32

Fysikerne mellem videnskab og politik

Henry Nielsen og Casper Andersen 37

Kvant-nyheder: Verdensrekord i fusionsenergi og lys fanget i ekstremt lille volumen

Christine Pepke Gunnarsson 41

Nyt fra Dansk Fysisk Selskab

Maren Malling 42

Kommende foredrag 43

Kvant-nyheder: Massiv galakse udfordrer teorier om mørkt stof

Christine Pepke Gunnarsson Bagsiden



Temanummer om kosmologi

Dette nummer af Kvant har kosmologi som tema, og forsiden viser Taranteltågen i Den Store Magellanske Sky. Billedet er et mosaikbillede, der strækker sig over ca. 300 lysår, og er taget med NASAs James Webbteleskop. Billedet har afsløret titusinder af unge stjerner, der ikke er set tidligere, fordi de var indhyllet i kosmisk støv. Den mest aktive lyseblå region ser ud til at finkle med massive unge stjerner. Foto: NASA, ESA, CSA, STScI, Webb ERO Production Team. .

Kvant udsendes gratis, i ét eksemplar, til alle gymnasier, seminarier og HTX-kurser i Danmark, på Færøerne og i Grønland med velvillig økonomisk støtte fra Niels Bohr Institutet (KU), Institut for Fysik og Astronomi (AU), Institut for Fysik, Kemi og Farmaci (SDU), DTU Fysik og DTU Electro samt Institut for Naturvidenskab og Miljø (RUC).

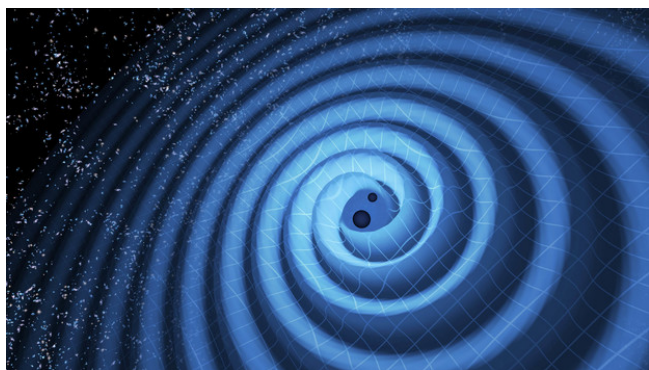
Kvant omdeles med PostNord. Såfremt bladet udebliver, opfordres du til at kontakte PostNords kundeservice på telefon 70707030 samt orientere Kvant på e-mail kvant@kvant.dk.

Sorte huller

Troels Harmark og Niels Obers, Niels Bohr Institutet

Vi befinder os i en bemærkelsesværdig tid for forskning i sorte huller. Dels er der enestående målinger af gravitationsbølger, der stammer fra sorte huller, der smelter sammen, og fantastiske nylige billeder af gigantiske sorte huller i galakseres centrum taget ved at kombinere billeder fra teleskoper over hele kloden. Dels er der spændende nye fremskridt i forståelsen af sorte hullers grundlæggende egenskaber, herunder når man tager hensyn til principperne for kvantemekanikken. Da singulariteten inde i et sort hul ligner den ved Big Bang, kan dette endda kaste lys over oprindelsen af hele vores univers.

Sorte huller er de mærkeligste objekter der findes. Vi ved ikke rigtig, hvad de består af, ud over at de er en slags hul i tiden og rummet. Tiden og rummet krummer og bøjer sig så meget inde i et sort hul, at det kan rive rumskibe i stykker. Tiden går langsommere tæt på kanten af et sort hul, så hvis man rejser tæt på med et rumskib, og derefter vender om og rejser hjem til Jorden igen, kan der i princippet være gået 1000 år tilbage på Jorden, selvom rejsen set fra rumskibet kun tog få år. Ja, faktisk står tiden stille på kanten af et sort hul set fra Jordens synspunkt. Inde i et sort hul, når man har passeret kanten, også kaldet begivenhedshorisonten, er krumningen af tiden og rummet så stærk, at man aldrig vil kunne slippe ud igen. Og helt inde i midten findes der en såkaldt singularitet. Et sted hvor tid og rum ikke længere kan beskrives med de fysiske love vi kender i dag. Et sted hvor tid og rum bryder helt sammen.

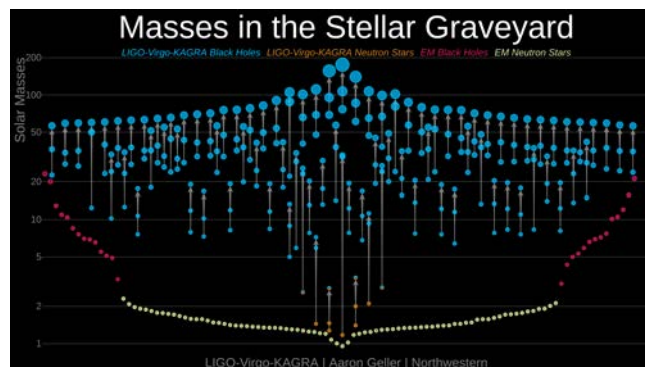


Figur 1. Sorte hullers spiraldans. Illustrationen viser sammensmeltningen af to sorte huller og gravitationsbølgerne, der bølger udad, når de sorte huller spiralerer mod hinanden. De sorte huller – som repræsenterer dem, der blev opdaget af LIGO – smeltede sammen og dannede et enkelt sort hul. Grafik: LIGO/T. Pyle.

Vi ved i dag, at sorte huller findes. I hvert fald har vi efterhånden mange videnskabelige observationer, som kun kan forklares med sorte hullers eksistens. Indtil år 2015 havde man kun observationer af stjerner i kredsløb om sorte huller, hvor man ikke kunne observere de sorte huller direkte, men man kunne udelukke alle andre muligheder. I 2015 kom så den første direkte observation af en gravitationsbølge skabt af to sorte huller [1,2]. Begivenheden selv skete faktisk ikke i 2015 men for 1,3 milliarder år siden. To sorte huller, som hver vejede omkring 30 gange så meget som Solen, kredsede

omkring hinanden, stødte til sidst sammen og blev til et stort sort hul (se figur 1). I den proces udsendtes en gigantisk gravitationsbølge som nåede frem til os her på Jorden den 14. september 2015 og blev målt af de to advanced-LIGO detektorer i USA som den første gravitationsbølge nogensinde. Efter at have rejst i 1,3 milliarder år var bølgens effekt blot en lille bitte forskydning af længden af de to arme i detektorerne på en tusindedel af størrelsen af en atomkerne. Men dengang bølgen blev skabt var dens energi større end alt lys fra alle stjerner i hele det kendte univers.

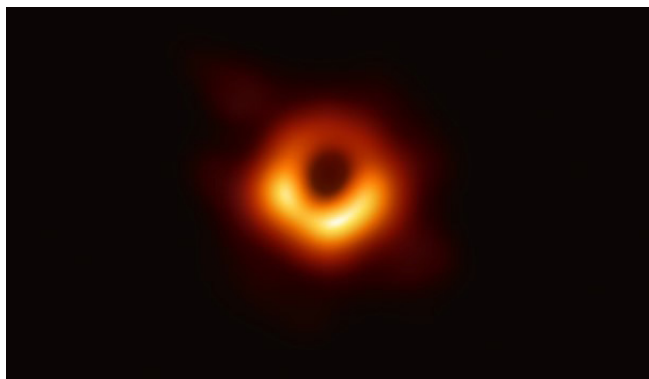
Takket være målingerne af gravitationsbølger kan vi derfor nu direkte “se” signaler fra sorte huller. Gravitationsbølger er en slags forskydning af de rumlige retninger på tværs af udbredelsesretningen, således at afstande kan ændres en lille smule, når en gravitationsbølge passerer. De passerer i princippet hele tiden igennem os og Jorden fra alle retninger og hvert eneste sekund, men indtil nu har vi målt omkring 100 af dem siden 2015 (se figur 2).



Figur 2. Oversigt over detekterede sorte huller og neutronstjerner fra gravitationsbølger. Pilene forbinder de to kolliderende legemer med det objekt, som blev resultatet af kollisionen. Grafik: LIGO-Virgo / Aaron Geller / Northwestern University.

En anden ny slags observation af sorte huller blev gjort af det såkaldte Event-Horizon teleskop i 2019, som for første gang tog en slags billede af et sort hul. Det kan ses på figur 3. Den karakteristiske donutform, man ser på billedet, er lysstråler som afbøjes af det sorte hul, når de passerer tæt på dets kant. Den nederste del af donutten er lidt lysere, fordi det sorte hul roterer omkring sig selv. Selve det sorte hul findes inde i midten af donutten. At sorte huller kan afbøje lys på denne måde

er et karakteristisk kendetegn for dem. I dette tilfælde viser billedet et gigantisk sort hul i midten af Messier 87 galaksen. Dette sorte hul vejer 6,5 milliarder gange så meget som Solen. Billedet er lidt sløret, da det sorte hul befinder sig 53 millioner lysår væk.



Figur 3. Det første billede af et sort hul blev lavet ved hjælp af observationer med Event Horizon Telescope af centrum i galaksen M87. Billedet viser en lys ring dannet i den intense tyngdekraft omkring et sort hul 6,5 milliarder gange Solens masse. Billede: Event Horizon Telescope Collaboration.

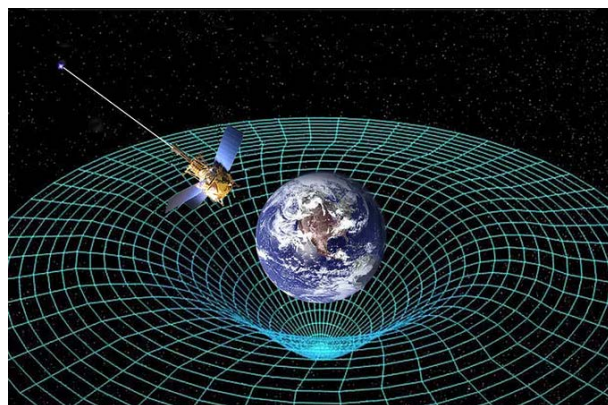
Hvorfor er disse nylige eksperimentelle fremskridt så spændende for fremtiden? Ud over at vi nu kan måle signaler direkte fra sorte huller, kan vi begynde at udforske grænserne for vores forståelse af tyngdekraften. En bemærkelsesværdig mængde information er skjult både i gravitationsbølgesignalet fra sammensmeltninger af sorte huller, samt i detaljerne af, hvordan lys afbøjes omkring dem. De signaler, vi modtager, kan nu sammenlignes med præcise beregninger fra Einsteins relativitetsteori. Med dette har vi mulighed for enten at bekræfte teorien med høj nøjagtighed eller finde "smoking guns" af nye teorier, som rækker videre end Einsteins. Det vil være spændende at se, om nogen af disse teorier har en chance for at blive bekræftet af de nye observationer. Hvis det er tilfældet, kan det potentielt pege os i retning af en ny grundlæggende forståelse af tyngdekraften. Dette er et meget aktivt forskningsområde globalt og også ved Niels Bohr Institutet.

Af disse grunde er der også mange spændende planer for at konstruere nye gravitationsbølgedetektorer. På den ene side omfatter dette rumbaserede detektorer (fx LISA, som er planlagt til at blive sendt op i 2035). Dette vil give os mulighed for at kigge endnu længere tilbage i fortiden og muligvis observere gravitationsbølger ikke kun fra gigantiske sorte huller, men også fra begyndelsen af vores univers udsendt lige efter Big Bang. På den anden side er der også planer om større jordbaserede detektorer, såsom det trekantede Einsteinteleoskop [3], der vil være i stand til at foretage præcisionsmålinger på mere end 100.000 sammensmeltninger af sorte huller hvert år.

Så hvad er et sort hul egentlig for noget? Det spørgsmål har forskerne beskæftiget sig med i næsten et århundrede. Den teoretiske forudsigelse af sorte huller skete i princippet i 1915 af den tyske fysiker Karl Schwarzschild kort tid efter, at Einstein offentliggjorde sin almene relativitetsteori. Schwarzschild fandt frem til

en løsning af Einsteins ligninger, og i dag ved vi, at den kan beskrive sorte huller. Dette gjorde han utroligt nok, mens han kæmpede som soldat ved østfronten i første verdenskrig. I årtierne efter var der mange forskere, som foreslog sorte hullers eksistens (se fx Oppenheimer og Snyders artikel om stjerne kollaps [4]). Der var dog meget tvivl om tolkningen af Schwarzschilds løsning og også om der fandtes realistiske måder, hvorpå løsningen kunne realiseres i den virkelige verden fra kollaps af stjerner. Derfor skal vi helt frem til år 1965, før et uafvendeligt argument for sorte hullers eksistens blev fremsat som en direkte forudsigelse af Einsteins almene relativitetsteori. I 1965 skrev Roger Penrose nemlig en artikel om sorte hullers eksistens, hvor man med avanceret matematik kunne påvise, at når først en stjerne begynder at kollapse efter at være løbet tørt for brændstof, er den eneste mulige udgang på denne proces at et sort hul bliver skabt. Denne revolutionerende artikel fik Penrose Nobelprisen for i år 2020.

Ifølge Einsteins almene relativitetsteori består et sort hul af en singularitet inde i dets midte samt en begivenhedshorisont, som markerer kanten af det sorte hul. Derudover er tiden og rummet bøjet kraftigt, ikke bare indeni det sorte hul, men også udenfor dets kant. Man kan med nogen ret hævde, at et sort hul faktisk består af tid og rum. Kun i singulariteten finder man noget ud over tid og rum, men singulariteten er i det hele taget noget, der ligger hinsides vores nuværende fysiske love.

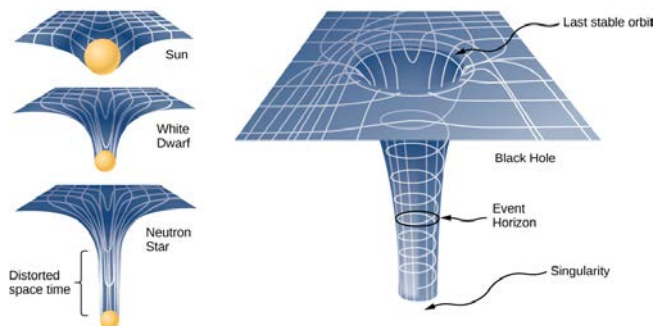


Figur 4. En illustration af rumtidskrumningen forårsaget af Jorden.

Motivationen bag Schwarzschilds løsning var i øvrigt slet ikke sorte huller, men i stedet søgte han efter en løsning af Einsteins ligninger for hvordan tiden og rummet krummer omkring en stjerne eller en planet (se figur 4). Senere blev det klart, at Schwarzschild-løsningen indeholder en stor overraskelse, nemlig at hvis du presser løsningens gyldighed til objekter, der bliver mere og mere tætte, afslører den muligheden for sorte huller, nemlig et objekt, der er så tæt, at det har en begivenhedshorisont, som er et område, hvorfra intet lys kan undslippe fra objektet, derfor navnet (se figur 5). Nu ved vi, at universet faktisk producerer sådanne objekter, både af solstørrelse og enorme sorte huller i centrum af galakser, og endda får dem til at kollidere med hinanden. Det er fantastisk at tænke på, at vi kan starte med en teori, som havde et helt andet udgangspunkt, nemlig stjerner

og planeter, og så ved at ekstrapolere den helt ind i det ukendte, kan den afsløre mysterier og vidundere, som vi så til sidst finder ud af faktisk realiseres i vores univers!"

Men nu hvor vi ved, at sorte huller eksisterer, står vi også over for en ny dyb gåde, nemlig hvordan man forener deres bizarre egenskaber med en anden teori, der er blevet testet med utrolig nøjagtighed, nemlig kvantemekanikken udviklet af Niels Bohr og andre. En af de største ubesvarede gåder er, hvad der sker med den information, der er indeholdt i det sorte hul. En anden måde at formulere dette spørgsmål på er: hvad er et sort hul lavet af? Ligesom vi ved, hvordan faste stoffer, væsker eller gasser er sammensat af atomer og molekyler, forventer vi også, at sorte huller har tilsvarende byggeklodser, der udgør det sorte hul. Det, vi søger, er på en måde byggeklodserne til rum og tid, som er relevante når vi går til de mindste afstande. Ved disse afstande skal vi tage hensyn til, at rum og tid skal overholde reglerne for kvantemekanikken, hvilket gør at rum og tid må opføre sig helt anderledes end i relativitetsteorien.

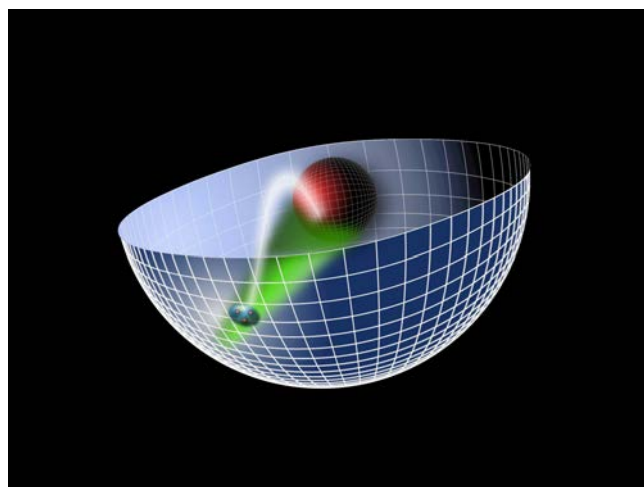


Figur 5. Rumtidskrumningen omkring hhv. Solen, en hvid dværg, en neutronstjerne og et sort hul.

En af de mest succesrige og lovende tilgange til at tackle disse spørgsmål er strengteori. Strengteorien postulerer, at universets grundlæggende byggeklodser ikke er punktformede partikler, men derimod små, vibrerende strenge. Nyere forskning i strengteori har givet indsigter i spørgsmålet om, hvad sorte huller består af, og hvordan information, der er gemt inde i det sorte hul, kan afkodes af observatører udenfor. Desuden antyder holografiprincippet, som er en integreret del af strengteorien, at informationen inden i et sort hul er indkodet i dets todimensionale overflade, hvilket udfordrer den traditionelle opfattelse af, at objekters informationsmængde vokser med deres volumen (se figur 6). Vores forskning ved Niels Bohr Institutet er i de senere år kommet med en ny måde at se på dette spørgsmål ved at studere forenklede modeller [5], der stadig bevarer de væsentlige træk ved den almene relativitetsteori. En vigtig ingrediens i denne udvikling har været erkendelsen af, at der eksisterer en hidtil overset måde at se på tyngdekraften, der ligger mellem Newtons og Einsteins, men stadig bruger konceptet om krumt rum og tid på en måde, der overholder ækvivalensprincippet, nemlig at alt stof falder med samme acceleration [7].

Yderligere spændende fremskridt kommer fra anvendelsen af det fascinerende koncept om kvantemekanisk sammenfiltring til fysikken af sorte huller [7].

Sammenfiltring betyder, at to partikler kan være i en kombineret tilstand, hvor man ikke kan adskille de to fra hinanden. Dette er en af de fantastiske og magiske forudsigelser af kvantemekanikken, og dens eksperimentelle verifikation blev hædret med Nobelprisen i fysik i 2022. Anvendelse af disse ideer på sorte huller har givet et nyt perspektiv på forholdet mellem et sort huls indre og ydre. Mens der klassisk set ikke kan være nogen kommunikation med omverdenen, når man først er inde i det sorte huls begivenhedshorisont, er det blevet fundet, at der kan være kvantemekanisk sammenfiltring mellem det indre og ydre. Den tætte sammenhæng mellem sorte huller og kvantebaseret informationsteknologi kan betyde, at vi måske endda på et tidspunkt kan bruge kvantecomputere til at simulere sorte hullers kvantemekaniske egenskaber.



Figur 6. Hologafi knytter en partikelteori uden tyngdekraft på grænsen af en krum rumtid til en teori for selve rumtiden med tyngdekraft. F_x svarer en proton på grænsen af rumtiden til en bestemt konfiguration af felter i rumtiden, deriblandt tyngdekraften.

Måske er et endnu dybere og mere fundamentalt spørgsmål ved sorte huller at forstå singulariteten i centrum af et sort hul. Løsningen, der følger af Einsteins berømte ligninger, antyder, at både rummet og tiden ophører med at eksistere på dette sted. Det singulære centrum af et sort hul deler mange egenskaber med den singularitet, der ligger til grund for vores eksistens, nemlig Big Bang-singulariteten, som universet startede med. Forståelsen af disse singulariteter inden for den almene relativitetsteori blev anført af Stephen Hawking og Roger Penrose. Men når man tager højde for kvantemekanikkens usikkerhedsrelation, finder man, at dette ikke kan være hele historien. At forstå dette til fulde ville kræve en såkaldt teori for kvantegravitation, og også her er håbet, at strengteori eller andre teorier vil kaste lys over dette mysterium. På samme tid er håbet, at vi ved hjælp af fremtidige generationer af gravitationsbølgedetektorer kan lære mere om singulariteter, både i midten af sorte huller og starten af vores univers.

Der findes fire fundamentale kræfter i naturen. Tre af dem, den elektromagnetiske, svage og stærke kraft, er smukt forenet i den såkaldte standardmodel for partikelfysik. Vores teoretiske forståelse af disse er blevet verificeret med utrolig præcision. Tyngdekraften

er den fjerde kraft. Ifølge Einstein er den faktisk ikke en kraft, men en egenskab ved rummet og tiden selv. Ironisk nok, selvom tyngdekraften er den af de fire kræfter, vi kender bedst fra vores dagligdag, er det samtidig den kraft vi forstår mindst. Men det bør være klart ud fra ovenstående, at vi lever i en af de mest spændende perioder, hvor et hav af nye data om tyngdekraften vil blive tilgængelige fra direkte observationer af sorte huller og gravitationsbølger. Forventningen er, at de vil kunne skubbe forståelsen af Einsteins teori til det yderste og indikere, hvor det er muligt at finde afvigelser fra den. Dette kan pege på det næste gennembrud i forståelsen og potentielt give hints til, hvordan den kvantemekaniske teori om tyngdekraften skal se ud. For over hundrede år siden antydede Merkurs perihelions præcession ufuldstændigheden af Newtons teori om tyngdekraften og førte delvist til Einsteins teori, som i sig selv førte til nye forudsigelser såsom bøjning af lys og eksistensen af sorte huller. I øjeblikket står vi på tærsklen til en lignende revolution i vores forståelse af tyngdekraften takket være førende eksperimentel og teoretisk forskning i sorte huller.

Litteratur

- [1] Verdensbilledet i forandring – et hundredårigt perspektiv, kapitel 2 og 6 (2016). Forlaget Epsilon.dk.
- [2] M. Vestergaard, T. Harmark og N. Obers (2017) “Tyngdebølger”, *Aktuel Naturvidenskab*, nr. 6. side 24–30.

https://aktuelnaturvidenskab.dk/fileadmin/Aktuel_Naturvidenskab/nr-6/AN6-2017tyngdebølge-tryk.pdf

- [3] M. Maggiore m.fl. (2020) “Science case for the Einstein telescope”, *JCAP03*, bind **2020**, side 050.
- [4] J.R. Oppenheimer og H. Snyder (1939) “On Continued Gravitational Contraction”, *Phys.Rev.*, bind **56**, side 455.
- [5] T. Harmark, J. Hartong og N. A. Obers (2017) “Nonrelativistic strings and limits of the AdS/CFT correspondence”, *Phys.Rev.D*, bind **D96**, side 086019.
<https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.96.086019>
- [6] D. Hansen, J. Hartong og N.A. Obers (2019) “Gravity between Newton and Einstein”, *International Journal of Modern Physics D*, bind **28**, side 1944010.
- [7] G. Musser (2022) “Paradox Resolved”, *Scientific American Magazine*, bind **327**, nr. 3, side 30.

<https://www.scientificamerican.com/article/how-physicists-cracked-a-black-hole-paradox/>



Troels Harmark (t.h.) og Niels Obers (t.v.) er teoretiske fysikere med speciale i sorte huller, relativitetsteori, holografiske dualiteter og superstrengteori. Begge er ansat ved Niels Bohr Institutet.



Nyhed

Oliefri vacuumpumpe - HiScroll (6-20 m³/t)
Ekstrem lyd- og vibrationssvag
pumpe med kompakt design



www.pfeiffer-vacuum.com

Læs Kvant på hjemmesiden!

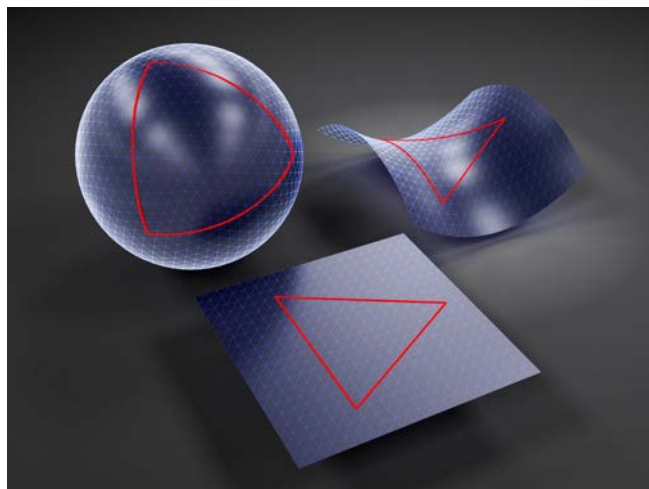
Det er nu muligt som abonnent at læse Kvant digitalt på bladets hjemmeside www.kvant.dk. I menuen øverst på hjemmesiden skal man vælge “Konto” og derefter “Log ind”. Som login skal man første gang bruge medlemsnummeret, som er trykt på bladets bagside og som er et sekscifret tal, der står lige ovenover navnet. Adgangskoden er den samme som medlemsnummeret. Når man er logget ind, kan man vælge sit eget kodeord og fremover bruge e-mailadressen som brugernavn. Nogle af medlemsoplysningerne udfyldt, og der er angivet midlertidig e-mailadresse, som man bedes rette, ligesom man kan udfylde eventuelle manglende oplysninger. Adresseændringer skal dog også meddeles direkte til kvant@kvant.dk. Som abonnent kan læse bladet på hjemmesiden og printe det som en pdf. Systemet er under udvikling, og i første omgang er der adgang til de nyeste udgaver. Nye abonnenter samt nye medlemmer af AS, DFS eller SNU er muligvis ikke registrerede i Kvants database, men kan henvende sig til Kvant på mail kvant@kvant.dk. God fornøjelse med læsningen!

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 Calçada.

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 hurtigst.

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 fjernliggende 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 fjernliggende 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.

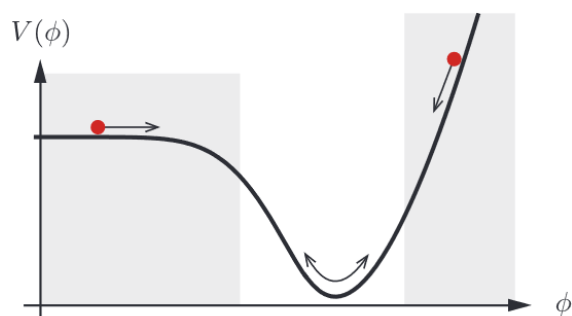
Når universet udvider sig, falder dets energitæthed. Dog afhænger hastigheden, hvormed den falder, af forholdet mellem potentiel og kinetisk energi. Almindeligt stof har en næsten ligelig blanding af potentiel og kinetisk energi. Tætheden af et felt domineret af potentiel energi vil falde meget langsommere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

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 volumenet, 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 vakuumet 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.

enklere 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 “Boltzmannhjerter”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 bachelorstuderende 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: $2(2^n - 1)$.

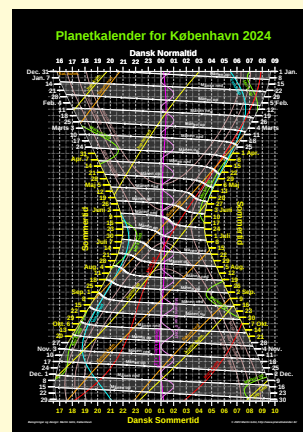
Galaksernes historie

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.martingoetz.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.

Inhomogen kosmologi: universet tænkt forfra

Asta Heinesen, Niels Bohr instituttet og Niels Bohr International Academy, Københavns Universitet, og Sofie Marie Koksang, CP3-Origins, Institut for Fysik, Kemi og Farmaci, Syddansk Universitet.

Moderne kosmologi er blevet erklæret som værende i krise. Uoverensstemmelserne mellem astronomiske observationer og kosmologiens standardmodel hober sig op, og kosmologer kan ikke finde konsensus om en løsning. I denne artikel introduceres først kosmologiens standardmodel og dens problemer. Derefter dykker vi ned i *inhomogen kosmologi* og spørgsmålet om, hvorvidt denne forskningsgren kan bringe kosmologien ud af dens krise ved at revurdere Einsteins over 100 år gamle antagelse om homogenitet af universets stof.

Moderne kosmologis begyndelse

Moderne kosmologi, læren om universet som helhed, er baseret på den førende teori for tyngdekraften, Albert Einsteins generelle relativitetsteori fra 1915. I denne teori er tiden ikke absolut, men er i en vis forstand bundet sammen med rummet, hvorfor vi i relativitetsteorien bruger det samlede begreb: rumtiden. Ifølge teorien er det, vi opfatter som en tyngdekraft, i virkeligheden et udtryk for at rumtiden krummer. Den tiltrækkende tyngdekraft som massive objekter har på mindre objekter skyldes i virkeligheden, at rumtiden krummer omkring objekter.

Vi kan opnå en fornuftig intuitiv forståelse af rumtidskrumningerne omkring legemer ved at forestille os dem som fordybninger i et lagen: hvis vi placerer andre små objekter på lagenet, vil de have en tendens til at falde ned i fordybningerne.

Rumtidens krumning beskriver vi via Einsteins ligning

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \quad (1)$$

hvor G er Newtons gravitationskonstant, c er lysets hastighed, og $g_{\mu\nu}$ er den såkaldte rumtidsmetrik, der beskriver objekters baner og afstande mellem dem.

Højresiden angiver fordelingen af energi i rumtiden. Ifølge Einstein er energi (E) og masse (m) to sider af samme sag, $E = mc^2$, så "energien" på højresiden af ligningen ($T_{\mu\nu}$) kunne eksempelvis være masserne af de velkendte atomer i vores periodiske system. Venstresidens første led ($G_{\mu\nu}$) beskriver rumtidens krumning (altså tyngdekraften), imens der ikke er konsensus omkring betydningen af det andet led.

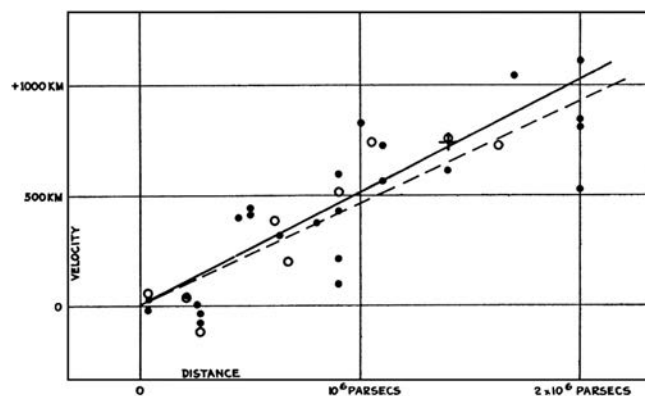
Symbolet Λ kaldes for den kosmologiske konstant. Den kosmologiske konstant blev indført af Einstein i 1917, da han som den første brugte ligningen til at beskrive hele universet. Første opgave for Einstein var at finde et passende udtryk til højresiden af sin ligning, det vil sige en beskrivelse af fordelingen af al energi i universet.

Einstein brugte til dette formål den simplest tænkelige model med en fuldstændigt ensartet fordeling af energi i universet. Den tilhørende ventreside viste sig at beskrive en rumtid, der ikke blot krummede, men som også var dynamisk: universet kan udvide sig og trække sig sammen. Men i 1917 var mange aspekter af universet endnu ukendt terræn for astronomerne. De

kendte fx ikke til galakser og de vidste heller ikke, at universet udvider sig.

Universets udvidelse blev først opdaget i 1920'erne og 1930'erne af astronomerne Georges Lemaître, Edwin Hubble og Vesto Slipher. Inden da troede astronomerne at universet var statisk, og Einstein indførte derfor den kosmologiske konstant i ligningen, fordi han fandt frem til at et sådant led kunne justeres, så det præcist forhindrede rumtiden i at være dynamisk.

Einstein var tilbageholdende med at acceptere at universet rent faktisk udvider sig, men da han endelig blev overbevist i 1931, smed han den kosmologiske konstant i skraldespanden [1]. Omkring årtusindskiftet genindførte kosmologer konstanten.



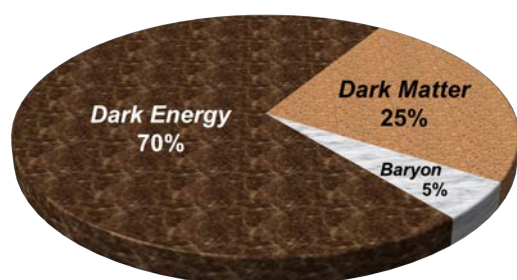
Figur 1. Hubble's oprindelige målinger fra 1929, der påviste universets udvidelse. Hastigheden er vist som en funktion af afstanden mellem os og de observerede galakser. Cirklerne og krydset repræsenterer middelmålinger for grupper af galakser. © US National Academy of Sciences.

Kosmologiens standardmodel

Denne gang var formålet med den kosmologiske konstant ikke at opnå et statisk univers. Målet var i stedet at få Einsteins ligning til at stemme overens med en accelereret ekspansion af universet. Uden en kosmologisk konstant viser Einsteins ligning, at rumtiden enten vil have en decelereret ekspansion eller et accelereret kollaps, såfremt højresiden kun indeholder energi fra kendte elementarpartikler såsom elektroner, kvarker og fotoner. Men supernovaobservationer fra slutningen af 1990'erne indikerer at universet udvider sig *hurtigere og hurtigere*. Den nemmeste måde at få den observerede accelererede ekspansion til at passe med Einsteins ligning er via den kosmologiske konstant. Den

kosmologiske konstant fungerer ved at have en form for antityngdekrafteffekt således, at den kan modvirke påvirkningen, som det almindelige stof har på rumtiden. Einstein kunne således bruge den kosmologiske konstant til at lave et statisk univers, men ved at justere lidt på talværdien af konstanten kan den kosmologiske konstant i stedet generere accelereret ekspansion af universet. Et af de største spørgsmål i grundlæggende fysik er at finde ud af, hvad den kosmologiske konstant repræsenterer. Mange kosmologer betragter konstanten som en indikation af, at universet indeholder en mystisk substans med antityngdekrafteffekt. Substansen er blevet døbt "mørk energi" og nu gælder det om for kosmologer at finde ud af, hvad mørk energi egentlig er for en størrelse.

Ved at sammenligne astrofysiske observationer med forudsigelserne fra Einsteins ligning, er kosmologer kommet frem til at mørk energi udgør omkring 70% af universets indhold i dag. De resterende 30% består af substanser der opfører sig almindeligt i forhold til tyngdekraften/rumtidskrumning. Substanserne opdeles i almindeligt stof – de kendte elementarpartikler – som udgør 5% af universets indhold, samt endnu en ukendt substans "mørkt stof", der udgør 25%. De fleste fysikere har på nuværende tidspunkt en forventning om at mørkt stof består af en eller flere typer af ukendte partikler. Partiklerne menes at bevæge sig meget langsommere end lyset, hvilket fysikere beskriver ved at kalde dem "kolde". Dermed er 25% af universets indhold på formen "koldt mørkt stof", på engelsk "Cold Dark Matter", CDM.



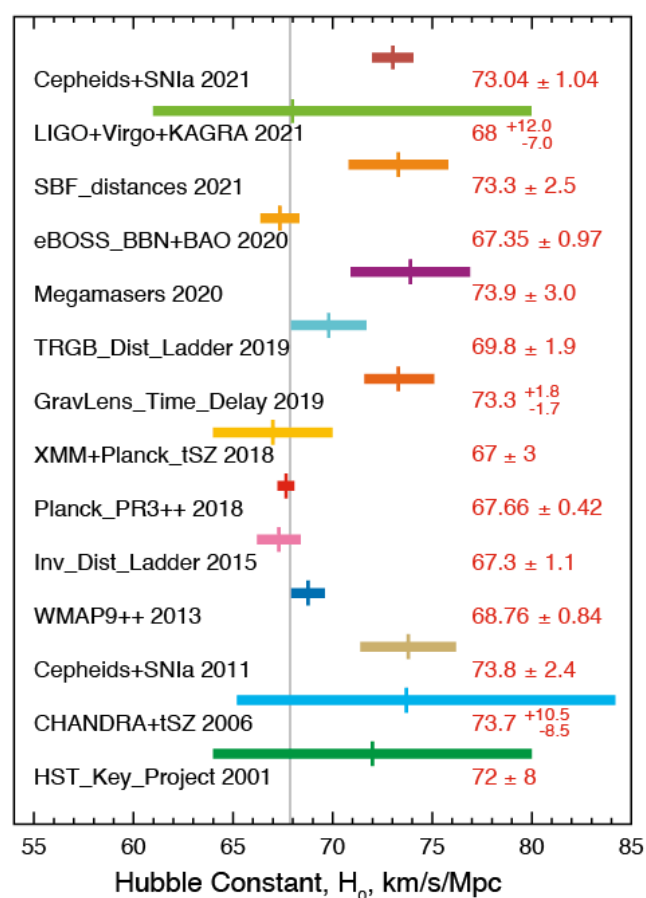
Figur 2. Fordelingen af forskellige typer af stof/energi i universet ifølge Λ CDM-modellen: mørk energi, mørkt stof og almindeligt stof ("Baryon").

Den førende kosmologiske model kaldes for kosmologiens standardmodel, og den nuværende af slagsen har fået betegnelsen Λ CDM-modellen, netop fordi den er karakteriseret ved at 95% af universets indhold ifølge denne model består af mørk energi (Λ) og koldt mørkt stof (CDM), det vil sige fuldstændigt ukendte substanser. Kosmologi har de seneste godt 20 år primært handlet om at lære mere om, hvad disse ukendte substanser er. Kosmologer har derfor også i nogen tid yndet at bemærke, at Λ CDM-modellen kun har to problemer: Λ og CDM. Men vittigheden er ikke længere sand. I dag har kosmologien nemlig fået et tredje problem, som er så alvorligt, at nogle kosmologer ligefrem har erklæret at vi har en kosmologisk krise.

Kosmologien i krise

I den første tid efter 1990'ernes supernovatriumf, der førte til indførelsen af mørk energi og dermed Λ CDM-modellen, var kosmologer godt tilfredse med deres

nye standardmodel. Modellen lod – i første omgang – til at passe forrygende godt med observationer. Men som tiden er gået, er observationerne blevet mere mangfoldige og præcise og i dag kan vi se, at Λ CDM-modellens forudsigelser faktisk ikke passer med det, vi observerer. Det mest kendte og simpleste observationelle problem kaldes Hubbletensionen og går ud på, at forskellige observationer af Hubblekonstanten giver forskellige resultater. Hubblekonstanten angiver, hvor hurtigt universet udvider sig *lige nu* og har dermed selvsagt kun én værdi. Men når vi bruger forskellige typer af observationer til at måle Hubblekonstanten for netop vores univers, får vi forskellige værdier. Uoverensstemmelsen mellem de forskellige målinger har nu en ekstremt høj statistisk signifikans på 99,9999% [2].



Figur 3. Diagrammet viser en række målinger af Hubblekonstanten baseret på forskellige astronomiske objekter. Målingerne er inkl. usikkerheder (vandrette farvede linjer). En række af de vandrette linjer overlapper *ikke*, hvilket betyder at de ikke stemmer overens. Grafik: NASA / LAMBDA Archive Team.

Men Hubble-tensionen står som sagt ikke alene. For eksempel indikerer observationer med endnu større statistisk signifikans end Hubbletensionen, at universet slet ikke er isotropt, det vil sige, at observationer viser, at universet har forskellige egenskaber i forskellige retninger [3]. Når vi fortolker data med Λ CDM-modellen er der desuden en række interne problemer med målingerne af den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling, lys der blev udsendt da universet kun var 380.000 år gammelt, og som vi har målt på siden 1960'erne. Disse og flere

observationelle udfordringer for Λ CDM modellen er sammenfattet i [4].

Inden for de seneste få år er kosmologers forskning derfor blevet fokuseret på at finde alternative kosmologiske modeller, der passer bedre med observationerne end Λ CDM-modellen. Nogle forsøger sig med blot at lave mindre ændringer af Λ CDM-modellen såsom at indføre nye typer af mørk energi eller nye former for vekselvirkninger mellem mørk energi og mørkt stof [5]. Inden for forskningsgrenen *inhomogen kosmologi* stiller vi i stedet spørgsmålstejn ved den vedvarende brug af de simplificerende antagelser, Einstein introducerede for over 100 år siden.

Strukturernes betydning

En mulig forklaring på Λ CDM-modellens observationelle problemer er, at den hviler på den forenklet beskrivelse af universets strukturer som værende udvaskede, og som Einstein introducerede i 1917. Det udgangspunkt er et muligt problem, fordi vores univers indeholder et væld af strukturer – fra mikroskopiske elementarpartikler til stjerner, galakser og enorme galaksehobe – som påvirker både den overordnede dynamik af universet samt lysets bevægelse igennem universet og dermed astrofysiske observationer.

Einstein var bevidst om dette mulige problem, men man kendte endnu ikke til galakser og galaksehobe i 1917, og det var nødvendigt med simple antagelser for at komme frem til resultater med de sparsomme målinger, der var tilgængelige på det tidspunkt.

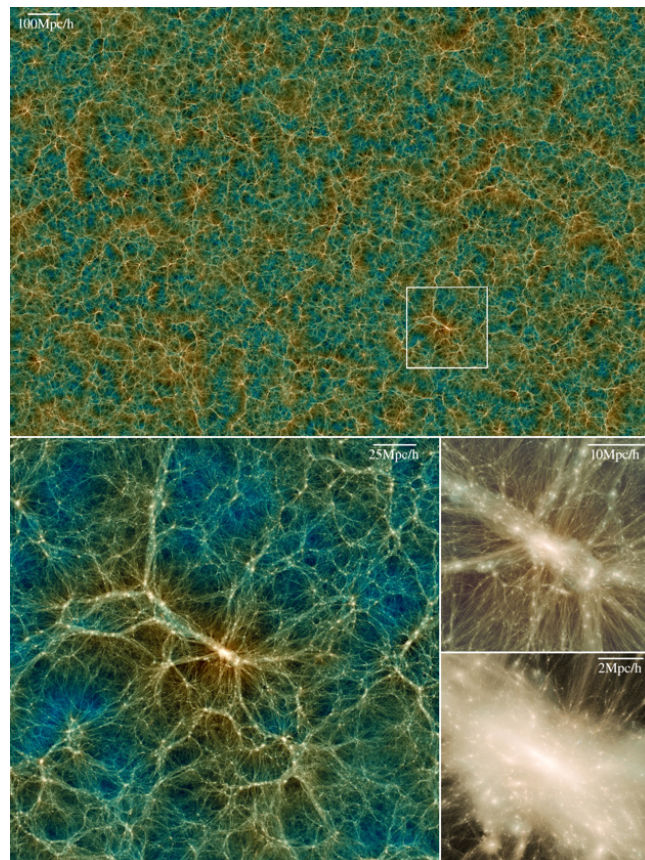
Den dynamik, som Einsteins ligning beskriver, når højresiden indeholder en ensartet substans gælder i virkeligheden kun for et univers, der er homogent og isotropt på *alle* skalaer, det vil sige et univers, som ikke indeholder nogen former for strukturer, og som dermed ikke kan repræsentere vores univers. Idet Einsteins ligning er et sæt af ikke-lineære, koblede partielle differentiaalligninger, er der forskel på dynamikken af et univers, der er homogent og isotropt på alle skalaer, og et der kun er det på meget store skalaer – selv hvis vi zoomer ud og ser på universet på skalaer, der er større end de største kendte strukturer.

Forskellen på de to typer af dynamik kaldes kosmisk tilbagevirkning. Vi ved ikke, hvor stor betydning kosmisk tilbagevirkning har i vores univers, men vi kan se, at den i visse teoretiske modeller kan generere accelereret ekspansion helt uden mørk energi. Der er derfor rig mulighed for at en kvantificering af den kosmiske tilbagevirkning kan afhjælpe visse af Λ CDM-modellens problemer.

Samtidig påvirker inhomogeniteterne såsom galaksehobe direkte lyset på dets vej fra stjernerne til vores teleskoper. Et område med høj densitet vil for eksempel udover at lave en stor lokal "fordybning" i rumtiden også udvide sig langsommere end omkringliggende tomme områder. Begge effekter påvirker lyset, når det bevæger sig imod vores teleskoper. Fænomenet er velkendt og forsøges medtaget indenfor standardmodellen ved at introducere små fluktuationer i den ellers homogene rumtidsbeskrivelse af Λ CDM-modellen. Men standardmodellen er kun approksimativ, og det er uklart, om

modellen er præcis nok til at beskrive den høje kvalitet af kosmologisk data, som vi har i dag.

Idéen om at inhomogeniteter kan forklare nogle eller alle de observationelle problemer, som Λ CDM-modellen står overfor, er nærmest radikalt konservativ i forhold til de mere gængse løsningsforslag, der involverer nye upåviselige partikler eller modifikationer af relativitetsteorien. Samtidig er det en idé, som er overordentligt svær at teste. Det kræver nemlig, at vi starter forfra med vores beskrivelse af universet og – ikke mindst – med at etablere en ramme til at fortolke observationer i et inhomogent univers.



Figur 4. Data fra computersimuleringen Uchuu (<https://skiesanduniverses.org/>). Øverste halvdel af figuren viser et udsnit af simuleringen af universet, hvor volumet er så stort, at strukturerne fremstår udvaskede. Et kvadratisk område er markeret. Der zoomes ind på området i billedet nederst til venstre, hvor det ses, at der er en stor struktur, som der zoomes ind på yderligere i de to figurer nederst til højre.

Observationernes afgørelse

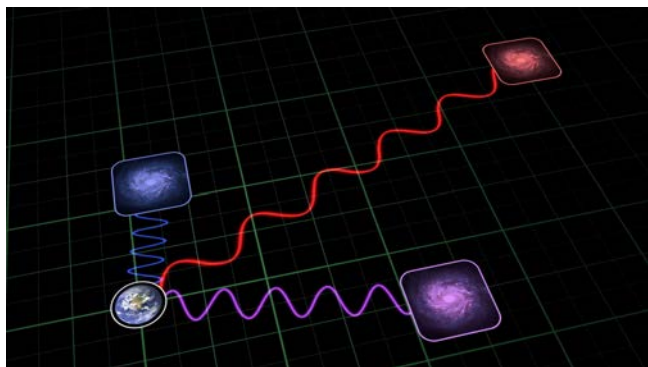
En af de helt store opgaver indenfor inhomogen kosmologi er dermed at udvikle et teoretisk udgangspunkt for at koble kosmisk tilbagevirkning til observationer samt at udlede observationelle relationer, der gælder for inhomogene universmodeller generelt.

De første skridt i den retning er allerede nået. Vi har blandt andet fundet flere observationelle signaler, der kan bruges til at kvantificere den kosmiske tilbagevirkning i vores univers. Metoden er baseret på den såkaldte *drivning* af lysets *rødforskydning*.

Når lys bevæger sig igennem en ekspanderende rumtid på sin vej mod vores teleskoper, vil dets bølgelængde blive udstrakt. Denne effekt kaldes rødforskydningen af

lyset. Navnet kommer fra at rødt lys har den længste bølgelængde af det synlige lys, så når bølgelængden af synligt lys udstrækkes, bliver lyset “mere rødt”. Rødforskydning af lys er en af de simpleste og vigtigste astronomiske målinger, vi kan lave.

Men rødforskydningen *driver*, det vil sige, at den ændrer sig med tiden. Hvis vi ser på lys udsendt fra en stjerne fra en fjern galakse, vil rødforskydningen af lyset langsomt ændres. Ændringen afhænger af den præcise krumning og ekspansion/kollaps af rummet langs lysstrålens vej mellem stjerne og teleskop. Drivningen af rødforskydningen viser sig at være en vigtig brik, når det kommer til observationelt at kvantificere effekten af astronomiske strukturer. Inden for de seneste år har vi vist, at rødforskydningens drivning kan bruges til at afsløre størrelsen af den kosmiske tilbagevirkning, og vi er endda i stand til at beskrive denne drivning i et vilkårligt inhomogent univers [6, 7].



Figur 4. Tre galakser i forskellig afstand til jorden udsender lys som rødforskydes forskelligt. Som tiden går vil rødforskydningen af lyset fra hver af galakserne ændres en anelse: Rødforskydningen *driver*. Grafik: NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (Caltech-IPAC).

Desværre er drivningen af rødforskydningen en enormt lille effekt, og vi kan derfor ikke måle effekten i vores astronomiske data endnu. Forventningen er dog at nyere teleskoper såsom Square Kilometer Arrayobservatoriet [8] vil kunne give os gode målinger af drivningen af rødforskydningen indenfor omkring 50 år. Da den amerikanske astronom Allan Sandage i 1962 som den første diskuterede drivningen af rødforskydningen [9] (men kun for homogene kosmologiske modeller), konkluderede han, at det med daværende teknologi ville kræve ti millioner års observationstid for at kunne detektere drivningen. Set i det lys, er 50 år måske ikke så ringe endda. Men 50 år er nu alligevel længe, hvis vi blot skal sidde på hænderne og vente. Kosmologer fortsætter derfor med at udvikle teknikker til at fortolke observationer i vores inhomogene univers, i håb om med lidt kortere tidshorisont at kunne kvantificere effekten af strukturerne i vores univers og deres indflydelse på den kosmologiske krise.

Litteratur

- [1] H. Nussbaumer (2014) “Einstein’s conversion from his static to an expanding universe”, *Eur.Phys.J. H*, bind **39**, side 37–62, arXiv:1311.2763v3.

- [2] A.G. Riess m.fl. (2022) “A Comprehensive Measurement of the Local Value of the Hubble Constant with $1 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ Uncertainty from the Hubble Space Telescope and the SH0ES Team” *Astrophys.J.Lett.*, bind **934**, side L7, arXiv:2112.04510.
- [3] L. Dam, G.F. Lewis og B.J. Brewer (2023) “Testing the cosmological principle with CatWISE quasars: a bayesian analysis of the number-count dipole”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, bind **525**, side 231–245, arXiv:2212.07733v2.
- [4] L. Perivolaropoulos og F. Skara (2022) “Challenges for Λ CDM: An update”, *New Astron.Rev.*, bind **95**, side 101659, arXiv:2105.05208.
- [5] E. Abdalla m.fl. (2022) “Cosmology intertwined: A review of the particle physics, astrophysics, and cosmology associated with the cosmological tensions and anomalies,” *JHEAp*, bind **34**, side 49–211, arXiv:2203.06142.
- [6] A. Heinesen (2021) “Multipole decomposition of redshift drift – model independent mapping of the expansion history of the Universe”, *Phys.Rev. D*, bind **103**, side 023537, arXiv:2011.10048v1.
- [7] S. M. Koksang (2021) “Searching for signals of inhomogeneity using multiple probes of the cosmic expansion rate $H(z)$ ”, *Phys.Rev.Lett.*, bind **126**, side 231101, arXiv:2105.11880v1.
- [8] <https://www.skao.int/>
- [9] A. Sandage (1962) “The Change of Redshift and Apparent Luminosity of Galaxies due to the Deceleration of Selected Expanding Universes,” *apj*, bind **136**, side 319, doi:10.1086/147385.



Asta Heinesen er Carlsberg Fellow på Niels Bohr instituttet og Niels Bohr International Academy på Københavns Universitet. Hun forsker i inhomogen kosmologi.



Sofie Marie Koksang er adjunkt og Villum Young Investigator på forskningscentret CP3-Origins på institut for fysik, kemi og farmaci på Syddansk Universitet. Hun forsker også i inhomogen kosmologi.

Kan vi se galakser fjerne sig hurtigere end lysets fart?

Peter Laursen, Cosmic Dawn Center (DAWN) og Niels Bohr Institutet

Hvis du interesserer dig lidt for fysik, har du sikkert hørt, at naturen har givet os en fundamental hastighedsbegrænsning: lysets fart. Uanset hvor hårdt du prøver, vil du aldrig kunne rejse hurtigere end lyset. Du ved måske også, at universet udvider sig, og har måske endda hørt, at de fjerneste galakser fjerner sig fra os med hastigheder, der overstiger lysets. Men er disse udsagn ikke i modstrid med hinanden? Og selv hvis nogle galakser fjerner sig hurtigere end lyset, må det vel betyde, at vi ikke kan se dem? I modsætning til denne populære opfattelse *er* vi faktisk i stand til at se galakser, som fjerner sig fra os hurtigere end lysets fart.

Lad os starte med konklusionen: Det er en udbredt misforståelse – selv blandt professionelle (og berømte) fysikere – at vi ikke er i stand til at se galakser bevæge sig væk fra os med hastigheder større end lysets hastighed. Eller sagt på matematisk, at vi ikke kan have – eller i hvert fald ikke kan *se* – galakser med $v > c$, hvor v er galaksens hastighed i forhold til os, og c er lysets hastighed.

Der er to måder at fortolke “at se galakser bevæge sig med $v > c$ ” på: Fordi det tager tid for det lys, vi ser, at rejse ned til os, ser vi altid alle galakser, som de så ud i fortiden¹. Deres fart i dag er ikke den samme som den var i fortiden, så vi kan både spørge

1. Kunne det lys, som vi ser fra en galakse, være blevet udsendt på et tidspunkt i fortiden, hvor hastigheden var $v < c$, men i mellemtiden har universets udvidelse accelereret, sådan at *i dag* er $v > c$?

og

2. Kunne galaksen virkelig have bevæget sig væk fra os med $v > c$, da den udsendte det lys, vi ser i dag?

Især spørgsmål 2 menes ofte at være umuligt. En variant af dette spørgsmål er

- 2.1 Kan en galakse, som *i dag* fjerner sig med $v > c$, udsende en foton *i dag*, som en eller anden dag i fremtiden når os?

Svaret til alle tre spørgsmål er “Ja”.

Oprindelsen til misforståelsen

Det er nok næsten almen viden, at intet kan bevæge sig hurtigere end lyset. Denne forudsigelse af Einsteins relativitetsteori er blevet bekræftet eksperimentelt igen og igen. Hvordan skulle det så være muligt for en galakse at bryde denne “lov”, for slet ikke at tale om, hvordan vi skulle kunne se den?

¹Og det gælder sådan set ikke bare galakser, men også Solen, Månen og dit armbåndsur, som du ser henholdsvis 8 minutter, 1 sekund og 1 nanosekund tilbage i tiden.



Figur 1. Lysets hastighed er præcis 299.792.458 m/s, men som astronom kigger dine kolleger mærkeligt på dig, hvis du ikke bare siger “300.000 km/s”. Det svarer nogenlunde til en milliard km/t. Men er det virkelig en hastighedsbegrænsning? Foto(shop): Peter Laursen.

Nøglen til at forstå dette tilsyneladende paradoks er, at den velkendte hastighedsgrænse er en forudsigelse af den såkaldte *specielle* relativitetsteori fra 1905 [1], som gælder *bevægelse gennem rummet*: To observatører i den samme, ikke-accelererede referenceramme (et såkaldt *inertialsystem*) kan ikke sende et signal til hinanden hurtigere end lyset. Men galakserne bevæge sig skyldes udvidelsen af selve universet, som ikke er et inertialsystem, og som regeres af den *generelle* (eller almene) relativitetsteori fra 1916 [2]. Og her gælder andre regler.

Lokalt kan intet rejse hurtigere end lyset, og lys rejser altid med $v = c$. Så det gælder altså stadig, at intet kan overhale en lysstråle. Men selve rummet kan udvide sig (eller trække sig sammen) så hurtigt eller langsomt, som det har lyst til, og kan dermed få to områder til at fjerne sig fra (eller nærme sig) hinanden med vilkårlig stor hastighed.

Universets udvidelse

Mens galakser, som ligger i nærheden af hinanden, holdes samlet i nærheden af hinanden af deres gensidige tyngdekraft, “trækkes” fjernere galakser fra hinanden med en fart v , som er proportional med deres afstand d .

Dette er essensen af Hubble-Lemaître-loven (som indtil 2018 var kendt som “Hubbleloven”, men med 78% stemmer mod 20% blev anbefalet af den Internationale Astronomiske Union at få sit navn ændret, for at anerkende den belgiske præst og fysiker George Lemaîtres rolle i opdagelsen):

$$v = H_0 d. \quad (1)$$

I denne ligning er H_0 en konstant, som kaldes Hubblekonstanten (men som vi vel nu burde kalde Hubble-Lemaîtrekonstanten?), der må bestemmes observationelt. Hubblekonstanten udtrykkes i “hastighed per afstand”, og fortæller altså, hvor hurtigt en galakse i afstanden d fra os fjerner sig.

Afstande i universet

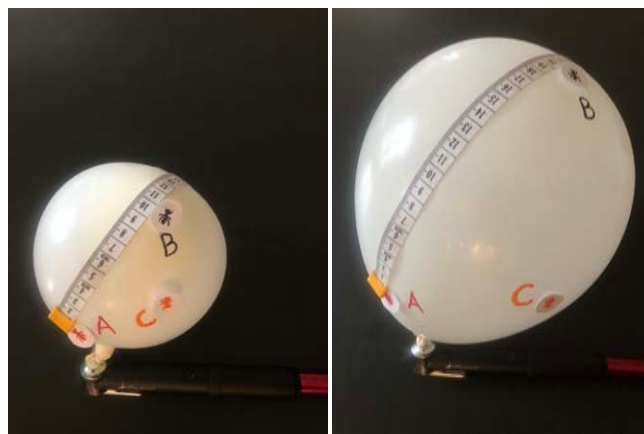
Afstande i universet kan måles i lysår, men i astronomi bruges normalt *parsec*, som er ca. 3,26 lysår. Store afstande måles gerne i millioner af parsec, dvs. megaparsec, forkortet Mpc. I denne artikel holder vi os dog mest til lysår.

Hubblekonstanten har en værdi på omkring² $H_0 \simeq 70$ km/s/Mpc. Det vil sige, at en galakse, der ligger fx 100 Mpc væk, fjerner sig fra os med 7.000 km/s, mens en galakse, der ligger 200 Mpc væk, fjerner sig med 14.000 km/s.

Sådan en udvidelse kaldes *homolog*, og er blevet sammenlignet med en rosinbolle (under hævnning): Efterhånden som gæren får bollen til at hæve, øges afstanden mellem to rosiner med en fart, som er proportional med deres indbyrdes afstand på et givet tidspunkt. Jo større afstanden bliver mellem to rosiner, jo hurtigere fjerner de sig fra hinanden. Det samme sker med galakser i rummet, og for store nok afstande overstiger den hastighed, de fjerner sig med, lysets fart.

Dette overtræder ikke relativitetsteorien, som kun siger, at intet kan rejse *gennem* rummet med $v > c$. Galakserne rejser godt nok også gennem rummet, sådan lidt hid og did, fordi de påvirker hinanden med deres tyngdekraft. Alt efter hvor store grupper de ligger i, giver dette anledning til såkaldte “egenbevægelser” med nogle 100 eller 1000 km/s. Men det kosmologiske Hubbleflow er anderledes; man kan sige, at rummet udvider sig og “trækker” galakserne med sig (selv om nogle ikke bryder sig om denne formulering), sådan at deres afstand til os – og til hinanden – øges. Hvorvidt denne bevægelse i virkeligheden kan kaldes “en hastighed” er blevet debatteret (se fx [3]), men begrebet overholder trods alt den normale definition af hastighed, dvs. “hvor hurtigt ændrer positionen (eller afstanden) sig?”.

En måske mere beskrivende analogi fås, hvis vi stepper en dimension ned, og betragter den todimensionale overflade på en ballon, hvorpå der kravler nogle myrer rundt (se figur 2).



Figur 2. Til venstre ses en let slatten ballon med tre myrer på, som hedder Alice (rød), Bob (blå) og Carlos (orange). Alice og Bob er 10 cm fra hinanden, mens Carlos ligger 5 cm og 7 cm fra hhv. Alice og Bob. Til højre har jeg pustet ballonen op til dobbelt størrelse. Bob er nu 20 cm fra Alice, og hvis jeg havde pustet hurtigt nok, vil jeg kunne få Bob og Alice til at fjerne sig fra hinanden med over-myrehastighed. Alle afstande fordobles, når ballonens diameter fordobles, så Carlos ligger nu 10 cm og 14 cm fra hhv. Alice og Bob. Myrerne selv tager dog ikke del i denne udvidelse, da elektromagnetiske kræfter holder sammen på deres exoskelet, og på samme måde vokser galakser heller ikke med universet, da tyngdekraften holder sammen på dem. Alle tre myrer tænker, at de ligger stille, mens de to andre fjerner sig, og derfor tror de, at de sidder i midten af ballonens overflade. Skøre myrer. Foto: Peter Laursen.

Myrerne i vores eksempel er lidt sløve i det, og kravler rundt med max 1 cm/s, så to myrer kan altså ikke umiddelbart komme hurtigere væk fra hinanden end med 2 cm/s.

Men hvis du giver dig til at puste ballonen op alt hvad du kan, kan du få afstanden mellem to myrer til at øges med fx 10 cm/s. Og jo længere der er mellem to myrer, jo hurtigere fjerner de sig fra hinanden. På samme måde kan galakser godt fjerne sig fra hinanden hurtigere end lysets fart, selvom hverken de eller fotoner kan bevæge sig gennem rummet hurtigere end lysets fart.

Universet udvider sig ikke “i noget”

Ballonen er også god til at vise, hvordan alle afstande vokser med den samme faktor. Men man skal ikke tage den alt for seriøst, for hvor ballonens 2D-overflade udvider sig i et 3D-rum, udvider vores 3D-univers sig ikke i nogen højere dimension. Man kan sige, at det “udvider sig i sig selv”; selve geometrien udvikler sig sådan, at afstande ændres.

Hubblesfæren og partikelhorisonten

Som nævnt ovenfor medfører ligning 1, at for tilstrækkeligt store d , vil v overstige lysets hastighed, og det er liget at beregne denne såkaldte Hubblelængde til

$$d_H = \frac{c}{H_0} \simeq 4400 \text{ Mpc} \simeq 14,4 \text{ mia. lysår}. \quad (2)$$

²En lille, men betydelig og uafklaret, forskel fås, alt efter hvilken metode man bruger til at måle H_0 . Om denne såkaldte “Hubble tension” kan du læse i en artikel, jeg skrev for nylig på videnskab.dk/rummet/hvilken-hastighed-udvider-universet-sig-med.

Observationelle faldgruber

Selvom ligning (1) angiver en lineær sammenhæng mellem afstand og hastighed, er hverken v eller d noget, som er sådan lige til at måle. Man kan (i nogle tilfælde) måle *rødforskydningen* z af en galakse, dvs. hvor meget dens spektrum er blevet forskudt. For små hastigheder er rødforskydningen $z = v/c$, men for større hastigheder kommer relativistiske effekter i spil, og fordi universets udvidelsestastighed desuden har ændret sig gennem tiden, bliver denne sammenhæng mellem hastighed og rødforskydning unøjagtigt for $z \gtrsim 0,1$.

Derfor er vi nødt til at konstruere en model for universets dynamik. Standardmodellen er den såkaldte Friedmann-Lemaître-Robertson-Walkermetric [4–9], som sammen med “det kosmologiske princip” – dvs. den antagelse, at universet på store nok skalaer er *homogent* (dvs. ens over det hele) og *isotrop* (dvs. ens i alle retninger) – giver den såkaldte *Friedmann-ligning*, der beskriver hvordan udvidelsehistorien er dikteret af, hvor meget der er af universets forskellige komponenter: mørkt stof, normalt stof, mørk energi og stråling.

En anden bekymring er, hvordan man beregner afstande. Eftersom vi ikke kan måle dem direkte, gør vi brug af såkaldte *standardlyskilder*, dvs. objekter som vi ved, hvor meget lys udsender, og sammenligner med, hvor meget lys vores teleskoper opfanger. Da deres lys har rejst gennem det ekspanderende univers, benytter vi igen Friedmannligningen for at få sammenhængen mellem det udsendte lys, det observerede lys, og afstanden.

Indenfor denne “grænse” fjerner galakser sig langsommere end c (også kaldet “subluminalt”), og udenfor fjerner de sig hurtigere (“superluminalt”). Området indenfor kaldes for “Hubblesfæren” (eller måske “Hubble-Lemaîtresfæren”? Okay, jeg stopper nu), men der er altså ikke noget særligt ved hverken galakserne indenfor eller udenfor.

Som tiden går, ser vi fjernere og fjernere galakser, efterhånden som deres lys når ned til os. Det fjerneste vi i princippet kan se – altså dét, der ligger så langt væk, at lyset derfra har brugt hele universets levetid på at nå os – kaldes *partikelhorisonten*, og afstanden d_P til denne horisont vokser altid, både fordi tiden går (så fjernere lyskilder bliver synlige), og fordi rummet udvider sig. Hvis rummet *ikke* udvidede sig, ville partikelhorisonten være 13,8 mia. lysår væk (fordi universet er 13,8 mia. år gammelt), men udvidelsen har båret horisonten væk til en nuværende afstand på $d_P = 46,3$ mia. lysår. Den del af universet, som ligger indenfor partikelhorisonten, kalder vi “det observerbare univers”, og udenfor den kugleformede del af universet, som vi altså kan se, ligger der formodentlig meget mere univers, måske endda uendelig meget.

Vi ser altid galakserne, som de så ud i fortiden, for milliarder af år siden. Men hvad hvis vi vil vide, hvordan de ser ud *i dag*? Ville nogle af disse galakser kunne udsende noget lys, som vi kan opfange en dag ude i fremtiden?

Måske har du hørt, at universet ikke bare udvider sig, men også *accelererer* i sin udvidelse. Men lad os først betragte et (hypotetisk) univers, som bare udvider sig uden acceleration. Det er en kontraintuitiv kendsgerning – men ikke desto mindre en kendsgerning – at der i et sådan univers ingen grænse er for, hvor langt vi kan se, hvis vi bare venter længe nok. Uanset hvor fjern en galakse er, og dermed hvor hurtigt den fjerner sig fra os, selv nok så superluminalt, kan den udsende en foton, som en dag i en fjern fremtid vil nå os, omend det kan tage milliarder af milliarder af år.

Fjerne galakser

Vi opdager rutinemæssigt galakser både 20 og 30 mia. lysår væk. I skrivende stund indehaves afstandsrekorden af JADES-GS-z13-0, en galakse der ligger 33 mia. lysår væk [10] (men hold skarpt øje med astroartikelarkivet arXiv.org, hvor der snart vil dukke en record-breaker op — du hørte det hér først). På grund af lysets lange rejsetid ser vi den, som den så ud for 13,5 mia. år siden, da universet var blot 300 millioner år gammelt.

En myre på en elastik

Dette tilsyneladende paradoks kan beskrives i en analogi, hvor problemet omformuleres til en myre, som kravler afsted med 1 cm/s, langs et elastikbånd som strækkes med 1 meter i sekundet (for at være eksPLICIT, så er elastikken en analogi for universet, og myren er en analogi for en foton). Den ene ende af elastikken fastgøres til en mur, og her starter myren; den anden ende tager du fat i, og løber væk. Vil myren nogensinde kunne nå dig for enden af elastikken? Utroligt nok viser det sig, at ja, det kan den.

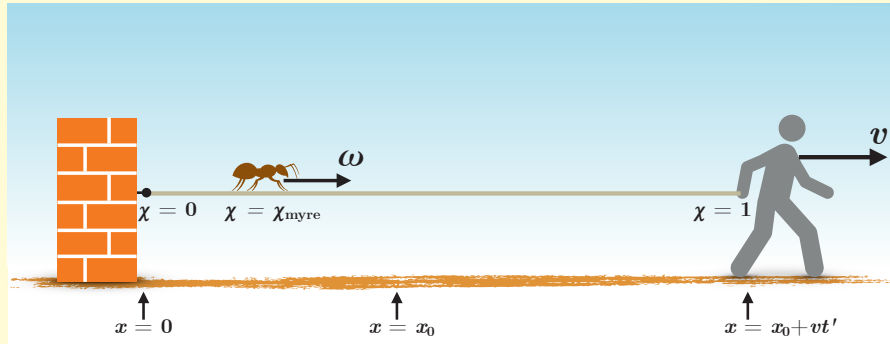
At løse dette problem kræver lidt matematik, som du kan hygge dig med i boksen på næste side, hvis du har lyst, men en intuitiv måde at få hovedet rundt om det på er at betragte myren fra startpunktet (muren) i stedet for målet (dig). Myren starter ud med en hastighed på 1 cm/s, men i takt med at den øger sin afstand til muren, får den ekspanderende elastik myrens hastighed i forhold til muren til at stige. Eftersom udvidelsen er den samme langs hele elastikken, udvider den sig både foran og bagved myren. Det vil altså sige, at på et hvilket som helst tidspunkt under rejsen, er *andelen* af den totale distance, som myren har tilbagelagt, uafhængig af udvidelsestastigheden, og uanset hvor stor denne udvidelsestastighed er, stiger andelen kontinuerligt fra 0 til 1. Denne sidste sætning indeholder løsningen på “paradokset”, så læs den lige igen.

Som tiden går, stiger andelen langsommere og langsommere, og det er måske ikke så intuitivt, at summen – eller rettere *integralet* – af de individuelle skridt, nogensinde vil nå 1. For at se dette, er vi nødt til at udføre den formelle matematiske løsning.

Myren på elastikbåndet: matematisk bevis

I følgende bevis vil vi måle myrens position på to forskellige måder; både med koordinater x i forhold til jorden, og som andelen χ af elastikken. Vi kan jo kalde dem hhv. jordkoordinater og elastikkoordinater.

Bind den ene ende af elastikbåndet fast til en mur, hold fast i den anden ende, og start så, når klokken er $t = 0$, ved positionen $x = x_0$ med at hive i elastikken med hastigheden v . Lad samtidig (dvs. til $t = 0$) myren starte med at kravle med hastigheden ω i forhold til båndet, fra $\chi = 0$ (som falder sammen med $x = 0$) henimod $\chi = 1$ (som er elastikkoordinaten for den ende du holder i). Den afgørende del er at indse, at uanset hvor hurtigt elastikkens ende trækker sig væk fra myren, så stiger myrens position i termer af χ altid (x stiger også, men *din* x -værdi stiger hurtigere, så det fortæller os ikke så meget).



På et senere tidspunkt $t = t'$ er båndet blevet strukket til en længde $x = x_0 + vt'$. Myren fortsætter med at øge sin tilbagelagte andel χ_{myre} , men hastigheden som denne andel stiger med, falder omvendt proportionalt med længden af båndet:

$$\frac{d\chi_{\text{myre}}(t')}{dt} = \frac{\omega}{x_0 + vt'}. \quad (3)$$

Ved integration af ligning (3) kan vi finde den tilbagelagte andel til tiden t' :

$$\begin{aligned} \chi_{\text{myre}}(t') &= \int_0^{t'} \frac{\omega}{x_0 + vt} dt \\ &= \frac{\omega}{v} \ln \left(1 + \frac{vt'}{x_0} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Hvis der er en tid t_{slut} , hvor myren når elastikkens ende, så må det gælde, at $\chi_{\text{myre}}(t_{\text{slut}}) = 1$. Fra ligning (4) må vi derfor have, at

$$1 = \frac{\omega}{v} \ln \left(1 + \frac{vt_{\text{slut}}}{x_0} \right),$$

eller

$$t_{\text{slut}} = \frac{x_0}{v} \left(e^{v/\omega} - 1 \right). \quad (5)$$

Hvis for eksempel myren kravler med $\omega = 1$ cm/s, og du starter ved $x_0 = 1$ meter og trasker afsted med $v = 1$ m/s, så fås fra ligning (5), at myren når dig efter en tid $t_{\text{slut}} = (e^{100} - 1)$ sekunder, eller knap en billion milliarder år – langt, langt længere tid end universets nuværende alder.

Løsningens eksponentielle natur gør, at forholdet mellem myrens og din hastighed har stor betydning for resultatet: Hvis myren kravler 10 gange hurtigere – dvs. med $\omega = 10$ cm/s – når den dig efter kun godt 6 timer, mens hvis den kravler med 4 mm/s, tager det en googol år.

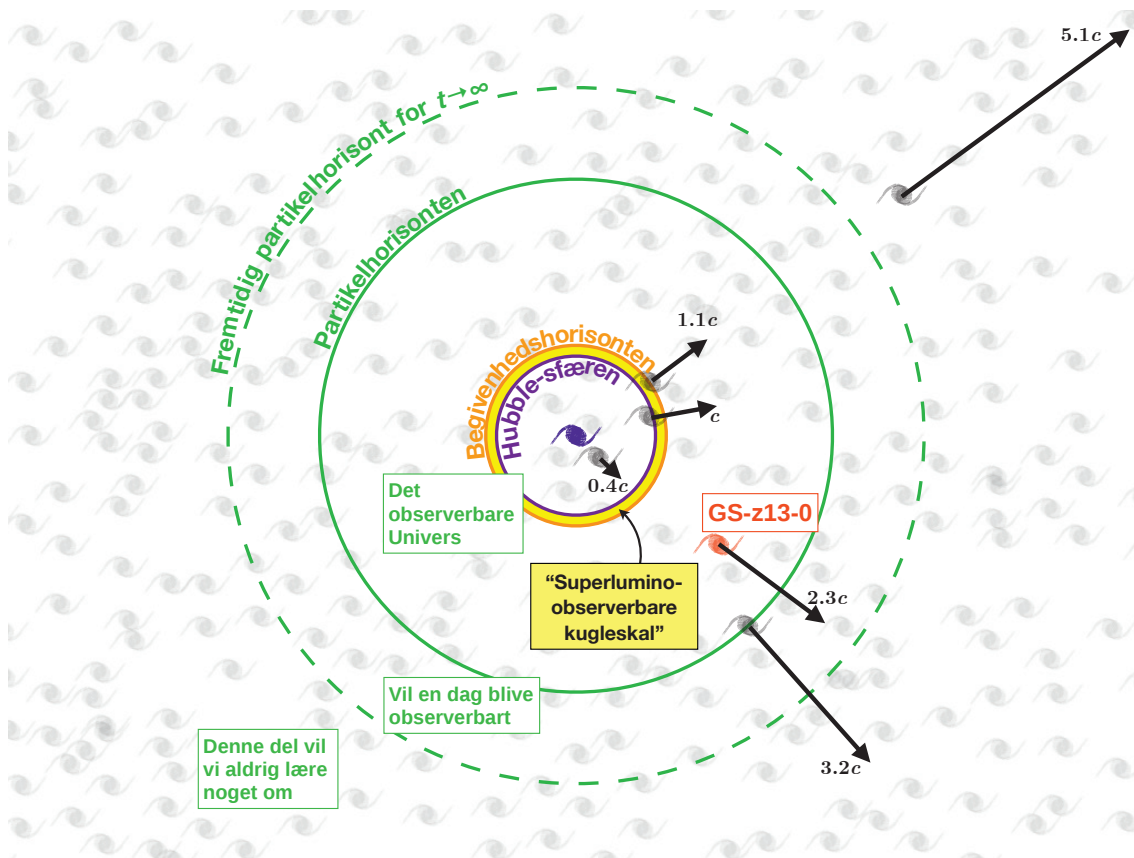
Men pointen med denne øvelse var ikke så meget det præcise resultat som det faktum, at uanset hvad forholdet er mellem hastighederne, så er det i princippet altid muligt for myren at indhente dig, så længe du ikke accelererer.

Den kosmiske begivenhedshorisont

I tilfælde af, at du sprang boksen over (hvilket jeg ikke vil holde dig op på), vil jeg bare lige gentage pointen: Uanset hvor langsomt en myre kravler på et elastikbånd, og uanset hvor hurtigt du strækker det, vil myren en dag nå dig, hvis du altså strækker det med *jævn* fart (vi ser her bort fra kedelige biologiske processer som fx

din og myrens levetid, og andre forstyrrende fakta). Det samme princip gælder i det ekspanderende univers: Hvis universet udvidede sig med jævn fart, så ville der ikke være nogen grænse for, hvor fjerne galakser vi kunne se, hvis bare vi ventede længe nok.

Desværre er vores univers ikke helt så simpelt; observationer af udvidelseshastigheden gennem universets



Figur 3. Et snapshot af universet i dag, centreret på Mælkevejen (blå). Galakser (grå) ligger spredt ud over det hele, måske i al uendelighed. De fjerner sig alle fra hinanden proportionalt med deres indbyrdes afstand; nogle få (mørkegrå) har deres fart indikeret i forhold til Mælkevejen. Den fjerneste galakse vi kender, JADES-GS-z13-0, fjerner sig med 2,3 gange lysets fart. Så længe de er indenfor partikelhorisonten (grøn solid) kan vi dog alligevel se dem, selvom vi altid ser dem i fortiden. Hvis vi vil se, hvordan de ser ud i dag, må vi vente, men hvis de ligger indenfor begivenhedshorisonten (orange), er det ikke noget problem, så længe vi er tålmodige; deres lys skal nok kunne nå os. Den tynde, gule skal mellem Hubblesfærens kant (lilla) og begivenhedshorisonten indeholder dermed galakser (omkring 10 milliarder styk), som fjerner sig hurtigere end lysets fart, men hvis lys udsendt i dag vi alligevel kan se. Ligger de længere væk, kan vi stadig se deres "fortidslys", men universets acceleration vil bære nutidslyset væk fra os for hurtigt til, at det kan overkomme udvidelsen. I fremtiden vil lyset fra fjernere galakser nå os, så partikelhorisonten vokser, men igen sætter accelerationen en stopper for spasen, idet den aldrig vil vokse længere ud end de galakser, som i dag er 62,8 mia. lysår væk (grøn stiple; men som altså i fremtiden kommer længere og længere væk med eksponentielt stigende hast.) Illustration: Peter Laursen.

historie viser os, at det i starten udvidede sig meget hurtigt, mens det langsomt bremsedes op pga. den gensidige tyngdekraft af alt det stof (og stråling) der nu engang ligger rundt omkring. Men efter omkring 10 mia. år begyndte det på mærkværdig vis at accelerere i sin udvidelse. Vi forstår ikke rigtig hvorfor, og vores bedste bud indtil videre er en form for mystisk egenskab ved selve det tomme rum, som vi for at lyde lidt dramatiske kalder for *mørk energi*.

Uanset hvad det skyldes, betyder denne acceleration at der *er* grænse for, hvor langt vi kan se. For en galakse længere væk end en bestemt afstand d_B , kendt som *den kosmiske begivenhedshorisont*, er den triste sandhed, at hvis den udsender en lysstråle i dag, så vil vi aldrig se den. På grund af accelerationen bevæger galakserne sig efterhånden ud på den anden side af denne horisont. Med andre ord, som tiden går, vil flere og flere galakser *ikke* være i stand til at sende nye signaler til os. Vi kan stadig se dem, men vi ser dem som de så ud i fortiden,

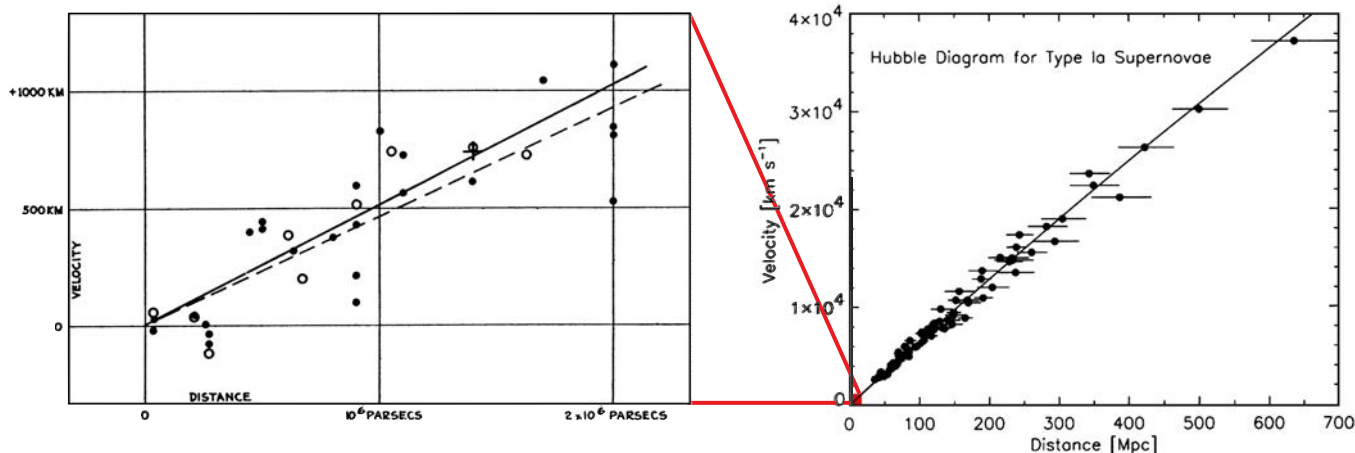
dvs. vi ser fotoner som blev udsendt for længe siden. De forskellige horisonter er illustreret i figur 3.

Afstanden til den kosmiske begivenhedshorisont kan beregnes ved et integrale, der involverer den såkaldte Friedmannligning, som afhænger af tætheden af universets komponenter³, og er i dag

$$d_B = 16,3 \text{ mia. lysår.} \quad (6)$$

Ligning (2) fortalte os, at alle galakser, der ligger længere væk end $d_H = 14,4$ mia. lysår, fjerner sig hurtigere end lysets fart. Samtidig fortæller ligning (6) os, at galakser, der ligger nærmere end $d_B = 16,3$ mia. lysår vil kunne udsende en foton i dag, som vi vil kunne se i en fjern fremtid. Alle galakser, der ligger mellem disse horisonter gør os i stand til at kunne sige "Ja, der findes galakser, som bevæger sig hurtigere væk fra os end lysets hastighed, men som vi alligevel kan se, ikke bare som de så ud i fortiden, men som de ser ud i

³Hvis du virkelig insisterer på at få ligningen, er den givet ved $d_B(t) = ca(t) \int_t^\infty a^{-1}(t') dt$, hvor "skala-faktoren" $a(t)$, som beskriver udvidelsen og er defineret til $a(\text{i dag}) = 1$, er givet ved $H^2(a)/H_0^2 = \Omega_r a^{-4} + \Omega_M a^{-3} + \Omega_k a^{-2} + \Omega_\Lambda$, hvor $\{\Omega_r, \Omega_M, \Omega_\Lambda\} \simeq \{ \lesssim 10^{-4}, 0,3, 0, 0,7 \}$ er andelen af energitæthederne af hhv. stråling, stof og mørk energi, mens $\Omega_k \simeq 0$ beskriver universets overordnede krumning. Held og lykke med at regne dén ud uden en computer.



Figur 4. Til venstre ses Edwin Hubbles [11] oprindelige diagram af en række nære galakser af afstand (x -aksen) og hastighed (y -aksen). Den ubrudte linje viser fits til de 22 bedst målte datapunkter, og hældningen på denne linje giver H_0 . Hvis du måler efter, vil du finde, at Hubbles H_0 er godt 500 km/s, mere end 7 gange hurtigere end hvad vi tror i dag. Det skyldes primært, at afstandene til galakser var temmelig under-estimerede. Til højre ses en moderne udvidelse af denne relation [12], hvor Hubbles diagram udgør den lille røde del nede i venstre hjørne.

Se det med dine egne øjne

Superluminale galakser ligger som beskrevet udenfor Hubblesfæren, dvs. mindst $d_H = 14,4$ mia. lysår væk. Man kan vise, at lyset herfra er rødforskydet med en faktor $z \gtrsim 1,48$. Det er trods alt ret langt væk, og sådan nogle galakser er derfor temmelig lyssvage set her fra Jorden. Derfor kræves normalt professionelle teleskoper og/eller lang eksponering med et kamera for at se dem. Men nogle af disse galakser indeholder ekstremt lysstærke *kvasarer* og ligger tilfældigvis bag en tung, lysforstærkende galaksehob, som gør dem synlige for det menneskelige øje med blot et (godt) amatørteleskop.

Hvis du selv kunne tænke dig at se et objekt, der bevæger sig væk hurtigere end lysets fart, skal du finde et, der opfylder følgende krav:

- Rødforskydningen skal være $z > 1,48$ (for at være så langt væk, at det er superluminalt).
- Den tilsyneladende størrelsesklasse skal være $m \lesssim 15$ (for at kunne ses i et lille teleskop uden kamera).
- Det skal have en deklination på $\delta \gtrsim -30^\circ$ (for at være observerbart fra Danmark).

Kvasaren APM 08279+5255 [14] i stjernebilledet Lossen har en rødforskydning på hele 3,9 og ligger 23,7 mia. lysår væk. Den fjerner sig dermed med 1,6 gange lysets fart. Dens størrelsesklasse er $m = 15,2$ og vil derfor lige akkurat kunne skimtes i et 12" eller måske endda et 10" teleskop. Og dét er altså bare med øjet; med et kamera monteret på selv et lille teleskop, og med bare et par minutters eksponeringstid, findes der masser af objekter, der ligger langt nok væk til at være superluminale, men synlige.

dag, hvis vi bare har tålmodighed". Alle galakser udenfor den lille Hubblesfære i figur 3 er superluminale, men vi kan alligevel se dem, så længe de er indenfor den grønne partikelhorisont. Og er de over i købet indenfor den orange begivenhedshorisont – dvs. i den gule skal – vil vi kunne se, hvordan de ser ud netop nu, hvis bare vi venter. Hvilke galakser der kan ses, og hvilke der ikke kan, visualiseres lettest med et såkaldt *rumtidsdiagram*, som dog ligger uden for rammerne af denne artikel. Den interesserede læser vil kunne få meget ud af at læse min tidligere kollega Tamara Davis' artikel herom [13].

Vi kan endda sige hvor mange galakser, det drejer sig om: Den "superlumino-observerbare kugleskal", som altså ligger mellem Hubblesfæren og begivenhedshorisonten, udgør en andel af hele det observerbare univers på

$$\begin{aligned} f_{\text{obs}} &= \frac{V(< d_B) - V(< d_H)}{V(< d_P)} \\ &= \frac{16,3^3 - 14,4^3}{46,3^3} \\ &\simeq 1,3\%, \end{aligned} \quad (7)$$

hvor V angiver volumener. Med omkring en billion galakser i det observerbare univers, drejer det sig altså om i omegnen af 10 milliarder superluminale, men observerbare, galakser.

Og dette var altså kun dem, vi tæller som synlige, hvis vi mener det lys de udsender *nu*. Der ligger mange flere superluminale galakser længere væk, hvis fortid vi dagligt (eller måske rettere natligt) kan beundre gennem vores teleskoper.

Konklusion

Ja, vi kan se galakser fjerne sig hurtigere end lysets hastighed.

Litteratur

- [1] A. Einstein (1905) "Zur Elektrodynamik bewegter Körper", *Annalen der Physik*, bind 322, side 891.

- [2] A. Einstein (1916) "Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie", *Annalen der Physik*, bind **354**, side 769.
- [3] E. R. Harrison (2000) "Cosmology. The Science of the Universe", Cambridge University Press, Cambridge.
- [4] A. Friedmann (1922) "Über die Krümmung des Raumes", *Zeitschrift für Physik*, bind **10**, side 377.
- [5] G. Lemaître (1927) "Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques", *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*, bind **47**, side 49.
- [6] H. P. Robertson (1935) "Kinematics and World-Structure", *Astrophysical Journal*, bind **82**, side 284.
- [7] H. P. Robertson (1936) "Kinematics and World-Structure II", *Astrophysical Journal*, bind **83**, side 187.
- [8] H. P. Robertson (1936) "Kinematics and World-Structure III", *Astrophysical Journal*, bind **83**, side 257.
- [9] A. G. Walker (1937) "On Milne's Theory of World-Structure", *Proceedings of the London Mathematical Society*, bind **42**, side 90.
- [10] E. Curtis-Lake m.fl. (2023) "Spectroscopic confirmation of four metal-poor galaxies at $z = 10.3-13$ ", *Nature Astronomy*, bind **7**, side 622.
- [11] E. Hubble (1929) "A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae", *Proceedings of the National Academy of Science*, bind **15**, side 168.
- [12] R. P. Kirshner (2004) "Hubble's diagram and cosmic expansion", *Proceedings of the National Academy of Science*, bind **101**, side 8.
- [13] T.M. Davis og C.H. Lineweaver (2004) "Expanding Confusion: Common Misconceptions of Cosmological Horizons and the Superluminal Expansion of the Universe", *Publications of the Astronomical Society of Australia*, bind **21**, side 97.
- [14] Wikipediaartikel om kvasaren APM 08279+5255: https://en.wikipedia.org/wiki/APM_08279+5255.



Peter Laursen er astrofysiker og videnskabsformidler på Cosmic Dawn Center, et grundforskningscenter under Niels Bohr Institutet og DTU Space, hvor han forsker i galaksernes tidlige udvikling.

Vakuumbudstyr - Rådgivning, support og service

Vi tilbyder vakuumbudstyr til ultimativt vakuum helt ned til 1×10^{-11} mbar.

Inden for dette område kan vi tilbyde følgende: Vakuumboliepumper, turbo-/diffusions- og ionpumper, membran-/skrue- og scrollpumper, vakuumbåleudstyr, fittings og vakuumbventiler, specialolier og vakuumbfedt samt helium læksøgere.



BUCH HOLM

Buch & Holm A/S - Marielundvej 39 - 2730 Herlev - tlf.: 44 54 00 00
e-mail: b-h@buch-holm.dk - www.buch-holm.dk

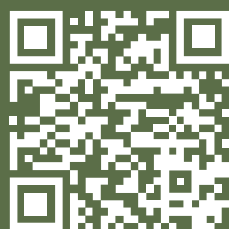
ATOMENERGI - FREMTIDENS ENERGIFORM?

Dette er ikke kun et vigtigt spørgsmål at stille eleverne i fysikundervisningen. Det er også titlen på en ny webBog.

Atomenergi - fremtidens energiform? beskriver de forskellige reaktortyper og teknologien bag. Bogen er teknisk og detaljeret og præsenterer samtidig eleverne for to danske virksomheder, Seaborg Technologies og Copenhagen Atomics, som nytænker atomkraft.

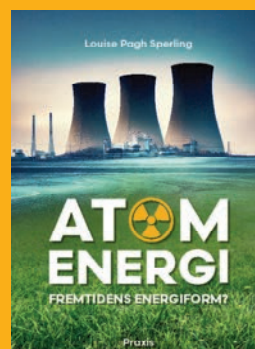
Udgivelsen folder atomkraft ud gennem flotte illustrationer, interaktive opgaver og forståelsesopgaver.

Atomenergi - fremtidens energiform? er en webBog og kan bruges på både B- og A- niveau. Det er også en virkelig god temabog til SAP.



Find bogen i
fysikfagpakken
www.fagpakker.dk

Eller på vores webshop,
hvor den også snart
kan bestilles i en
printet udgave.



Penrose's Cyclic Universe

John Rosendal Nielsen, *Kvant*

Sir Roger Penrose is an English 92 years old mathematician, mathematical physicist and philosopher of science. Apart from receiving the Nobel prize in physics in 2020, Penrose has received a lot of prizes and to mention them all would be an article in itself. Among others, in 1985 he was awarded the Royal Society Royal Medal and along with Stephen Hawking, he was awarded the prestigious Wolf Foundation Prize for Physics in 1988.

Besides his cosmological model which is known as Conformal Cyclic Cosmology or for short CCC, he has worked on consciousness, ways to map geometric objects in Minkowski space into the 4-dimensional complex space known as twistor theory and discovering the Penrose tiling, just to mention some of Penrose's research.

This article is based on an interview that I made with Sir Roger Penrose on February 6th, 2024, on the internet.

Usually, we do not bring English articles in KVANT, but when a Nobel prize winner, Sir Roger Penrose, agreed to be interviewed by KVANT we made an exception. His research is covering a lot of different topics in mathematics, physics, and cosmology. We will mostly be interested in his ideas for an alternative to the standard cosmological model.



Figur 1. Roger Penrose with the Nobel Prize for physics medal.

What are you working on in cosmology now? And what is the state of cosmology today in your opinion?

I'm trying to finish writing a paper with a Polish colleague, Krzysztof Meissner, on the scheme which I actually introduced ages ago. I think round about 2005 or slightly earlier, which is a scheme which I may say people having rather difficulty picking up on it, even though we have good evidence for it. That is what I call conformal cyclic cosmology.

The Big Bang is normally considered to be the beginning of the universe, but I was actually driven to this new view for many, many years. The second law of thermodynamics says it's got to be very special because the entropy goes up. That means the initial state must have been very special and the earliest direct observations of the universe we see are the microwave background. Well, I mean that's apart from some other things which I can mention, but the microwave background is noteworthy. Particularly, because it has

such a perfect Planck spectrum which means the entropy in the radiation is at a maximum and for some reason, people didn't puzzle about that. It seemed to me extraordinarily remarkable that it starts off at a maximum. Where's it got to go? It's already at the top piece.

The point is that what you're looking at is matter and radiation which is more or less at this early stage at the maximum entropy state. But what is at a low entropy is gravitation and the thing is it works in the opposite way for most things. For most things when you have an irregular state and the entropy goes up, it gets more and more regular, and the high entropy is very uniform. If you have some gas in a box, it spreads out and fills the little box uniformly. Whereas if you imagine a system with a lot of stars and they start to clump by gravity and they produce black holes, the entropy goes shooting up. Its entropy goes up but the irregularities in the system also go up and so the uniform state as far as gravity is concerned has very low entropy, whereas with regard to matter, it has very high entropy, which is a very strange situation. You've got gravity singled out as being very peculiar.

For some reason, people never picked up on that. I don't know why. It seems almost obvious but for some reason it's not stressed by people normally. That I had the view later on, partly stimulated by one of my former graduate students Paul Tod who had a nice way of stating the way in which the universe was special by saying that you conformally stretch it. I used to do a lot of work on looking at infinity by squashing it down and looking at how fields behave. The asymptotic behaviors of fields, gravitational waves, or electromagnetic fields and so on. It's very convenient trick to squash it down by conformal squashing and you can then look at infinity. It's a nice finite looking place, and because particularly electromagnetism is conformally invariant, it doesn't know infinity is anything special. In the future you can squash it down and the Big Bang can stretch it out. I was struck by the fact that if you do those two things, in the remote future you squash down and the Big Bang stretches it out. They look awfully similar.

You might say they look very different because one is very hot and dense and the other is very cold and rarefied but if you squash down cold and rarefied, it gets

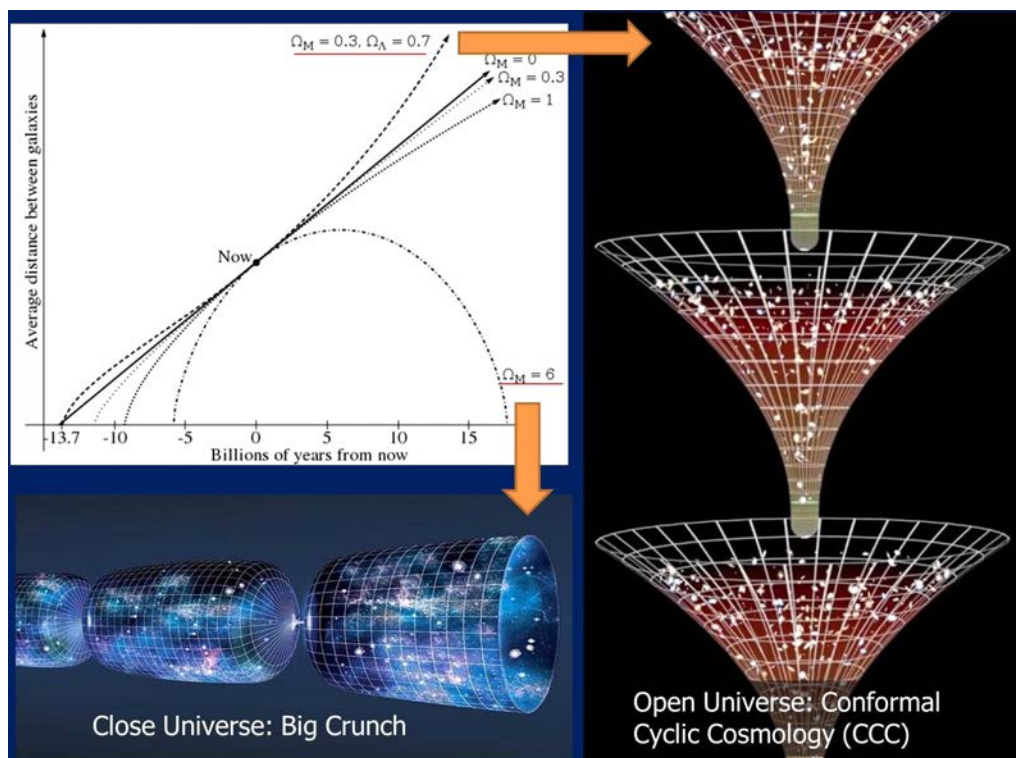


Figure 2. The two cyclic models of the universe, the closed model in standard cosmology has a density parameter Ω_M larger than 1 and the universe will collapse in a Big Crunch. The open model of the CCC has density parameter slightly smaller than 1 which means it will continue to expand.

hotter and denser. If you stretch out hot and dense, it becomes colder and more rarefied. They really look very much the same from a conformal point of view. So that's conformal. What that means is you're looking at shapes, small shapes and you're not interested in the size, so big and small are equivalent.

The only thing that distinguishes big from small is mass, basically. These are the two most famous equations of 20th century physics, $E = mc^2$ and $E = hf$. The last equation is the Planck formula which tells you that energy and frequency are equivalent. If you put the two together, you see that mass and frequency are equivalent. Mass basically determines frequency or it determines clocks and therefore it determines the scale. If you don't have mass, you don't have the scale. The argument is, that in the remote future you could say as simplification it's dominated mainly by photons and they don't have any mass. They wouldn't know big from small. In the early state of the universe, it's so hot that the energy and particles are dominated by their motion and not by the mass and the mass becomes irrelevant the closer you get to the Big Bang. The argument is now that if you can ignore the mass in the Big Bang and in the remote future, then the Big Bang and the remote future aren't so different from each other.

The conformal cyclic model is to say that our remote future will continue as the Big Bang or what I call the next Aeon. Our Aeon started with the Big Bang and that Big Bang was the continuation of the remote future of a previous Aeon. You have this picture of Aeons, one after the other, each with their Big Bang in their remote future. For a long time, I didn't know any way to test this and then eventually I persuaded an Armenian friend

of mine, Vahe Gurzadyan, and some Polish people quite independently looked at signals which I claimed might be able to come through from the previous Aeon.

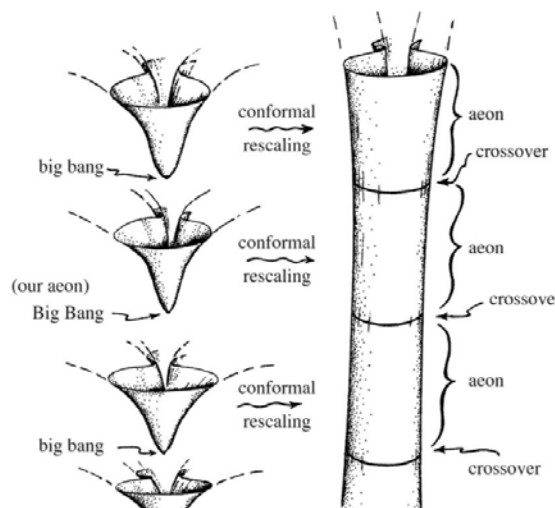


Figure 3. The Conformal Cyclic Cosmology. One Big Bang follows another from one Aeon to another. There is a crossover from one Aeon to another, where a conformal rescaling takes place. This means that the universe has expanded so much that size can be rescaled.

You have colliding supermassive black holes which is going to happen from time to time. As we know now, our Galaxy has a black hole in its center, and we are on a collision course with the Andromeda Galaxy which has a much bigger black hole in its center. When we collide, these black holes will search each other out and then finally spiral in towards each other. As the Andromeda

is much bigger than our galaxy, it more or less swallows ours up. But that will be the remote future of a galactic cluster and will be dominated by a black hole which is the result of various other black holes running into each other. As they do, they will emit enormous signals of gravitational waves. This will happen in the Aeon prior to ours. The gravitational waves can get through from one Aeon to the next, and so you might see the effects of these gravitational wave signals. You don't directly see the gravitational waves. Well, that might be an interesting test with gravitational wave detectors you might just be able to see the gravitational waves directly, but what you can see apparently is the residual effect that is hitting the dark matter and producing rings in the sky, which are detected and seen by both the Polish group and by our group. We wrote papers on this but nobody paid any attention.

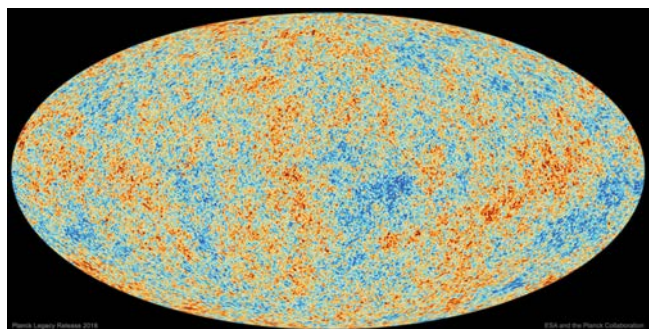


Figure 4. Planck satellite mapping of the Cosmic Microwave Background Radiation (NASA). Penrose used this mapping to find the Hawking spots with a high confidence.

Somewhat later, we had a different test which involves evaporation of black holes in galactic clusters. They'll sit around for ages, and then they will start to radiate by Hawking evaporation and eventually, this radiation, since it happened so late, will be concentrated in the single point which comes through what I refer to as Hawking points. These Hawking points describe spots in the sky of raised temperature. The Hawking points are seen, and we have a paper in the Monthly Notices of the Royal Astronomical Society about three years ago now. I don't think that I've seen any comment on the paper. I've seen comments on the archives which we had to take down as a condition for the paper being published. We saw these points with a confidence level of 99.98% confidence. Does anybody pay any attention to these signals? No. I don't think so. Very curiously. Some people claim not to see them and then you look at the paper and they do see them. Very strange. They seem to be there, and these points are evidence for this particular model.

Even recently there was a curious signal. People noticed rings of galaxies. There was a little bit of a noise about that just the last few weeks (see press release from January 11th 2024 [1]). That could be a possible signal I hadn't thought of it before. You might find that these rings of disturbance, which are gravitational wave signals, could be seeds of galaxies and the fact that they're in circular rings where this is one particular circular ring. I think there's an arc outside the ring and they have pretty well the same center. This is the sort

of thing you might see, because if these events happen several times, you might expect, they will produce rings with the same center. That's what Vahe Gurzadyan was looking for and now he seemed to find them.

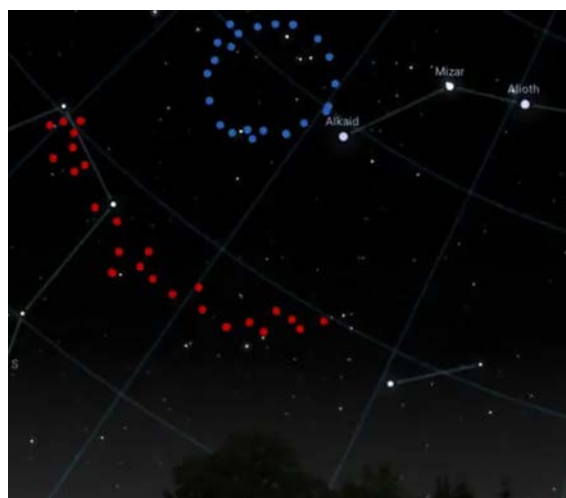


Figure 5. A newly discovered giant ring of galaxies (blue dots) and the earlier discovered arc of a ring (red) [1].

That's my answer to the state of cosmology. How well do they have it right? Well in a certain sense, a lot of the things they've done are very impressive. They don't seem to have got the big picture right. That's what I claim, although not many people agree with me.

Research has worked according to some kind of fashion. Hasn't it?

Yes, well there is a lot of fashion involved. I wrote this book called Fashion, Faith and Fantasy [2]. I mean, there's got to be evidence. There's certainly good evidence that the Big Bang was there, so I agree with that. In my very, very early days, I was a grand young graduate student, and I went to Cambridge, and I made friends with Dennis Sciama. I'd heard the lectures given by Fred Hoyle and this was on the steady state model. I was quite keen on the steady state model because it seemed to be sort of philosophically rather nice and it had a good thing in its favor, which unfortunately was a mistake. It depended on mixing up one kind of Cepheid variables with another kind. In those days, the universe was estimated to be younger than some of its contents. The Big Bang was estimated on the basis of these Cepheid variables to be younger than these very, very old globular clusters. The globular clusters seemed to be older than the universe and that didn't make any sense. The steady state model was born out of this. That was a mistake. They mixed up two different kinds of globular clusters. When they got that right then there wasn't this conflict. Then the microwave background was discovered, and I had a great respect for my very great colleague Dennis Sciama who taught me an awful lot of physics. I did pure mathematics as a graduate student and I learned an awful lot from him, including the steady state model. When the microwave background was confirmed, he changed his mind. He would go and give a big lecture where he would say, "I was wrong" at the beginning. I had a great respect for him.

I understand that inflation is not really necessary in CCC. Have I understood this right?

That's right. You see the inflation is needed in a standard picture for various things but in my scheme, you don't need it. In fact, it would cause trouble with my CCC model, but you see the thing is that inflation seems to indicate that there was evidence for an exponential expansion in the very early universe. I'm saying that this is evidence for the exponential expansion of the previous Aeon which didn't happen after the Big Bang, but it happened before the Big Bang because you're looking back into this exponential expanding phase of the previous Aeon. In many respects that looks rather like inflation. The picture of inflation comes about from kind of not having the view that there was a previous Aeon. This previous Aeon explains the things that you would otherwise might need inflation for.

It gets rid of inflation, which is a good thing as far as I'm concerned. It's such an artificial theory. You have to put in this inflaton field which doesn't do anything else apart from inflation. It doesn't even work because if inflation works to smooth out the Big Bang, which seemed to be the argument, why doesn't it happen again in the remote future? It doesn't really hang together. The remote future doesn't add itself up. You get black holes colliding and they produce a great mess. The singularities in black holes are a great mess. They're nothing like the Big Bang which is a singular state. I had this theorem which eventually seems to have won me a Nobel Prize which is flattering. This theorem was to show that in generic situations of gravitational collapse, you will get these singular states which are very peculiar and these singular states in the remote future are extremely different. They're high entropy singularities, whereas the Big Bang is very low entropy. It's got to be for the 2nd law of thermodynamics to work.

It's rather one of these things, I regard it's sort of obvious which for some reason you want a state in the beginning, which is at very, very low entropy and in low entropy in the gravitational field. If you put inflation in, it doesn't do it. You have to start it off with something that's already very uniform. Inflation doesn't even work without it being already very uniform. That doesn't solve that problem at all. Still most people still go down that line, so if you ask me what I think about current thinking in cosmology; it is seriously wrong. The conformal cyclic cosmology does other things. It produces dark matter. Another question you wanted to ask me about is dark matter and dark energy. People talk about dark energy to me. It is one of the worst names I know in physics and there are a lot of pretty bad ones. That's even worse because it's neither dark nor energy. It's not dark, it's invisible, which is quite different from dark. Look at the Galaxy edge on, and you see a dark line across the middle, which is dust, that's dark. The dark energy is invisible. It's not energy. That's the other thing energy attracts. This push. It's the other way around. It's not even the other right, it's just different. It's not energy. It doesn't behave like energy at all. It's an atrocious name just like the Big Bang. Fred Hoyle introduced the name Big Bang as a joke, trying to make fun of it. That was

the idea and now it's stuck. That's quite funny.

I assume that time is infinite or do you view it different in CCC?

It would be infinite, yes. Well, you see, I mean maybe there are only 73 Aeons. Who knows? The easiest scheme is to say an infinite number of Aeons and they continue indefinitely in both directions, in which case your timeline continues indefinitely in both directions. In the future, you have to worry about what you mean by time.

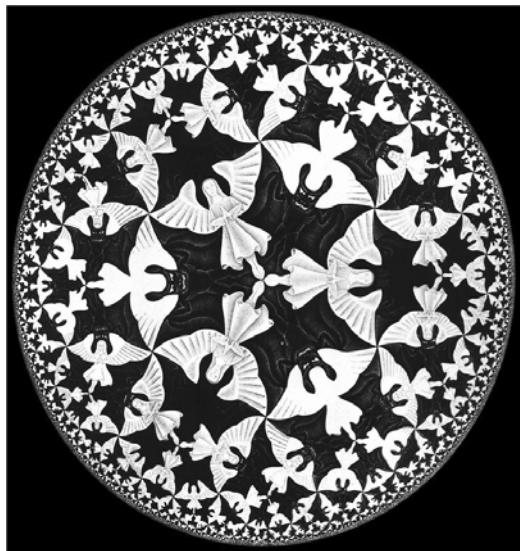
What do you mean by time normally? It depends on frequencies and these ultimately depend on mass. If you've got atomic and nuclear clocks, they really do depend on mass levels being slightly different. You have very precise clocks, and they depend on the matter having mass. The mass gives you a definite frequency and ultimately that's what gives you clocks. Now if the mass fades away and becomes a massless photon then you lose the concept of time, which is in a sense what you need to do in CCC because the timescale altogether comes somehow to an end. Even though, you might lose the concept of the clock because maybe the mass will fade out in the remote future. If this is a sort of hypothesis, I don't know whether you need to have it, but I think you do need something like that in order for the model to make sense. As long as you have massive particles and the ratio between the masses is fixed then you have a definite notion of time but if over a very, very long time scales the masses phase out then you don't have a universal notion of time. You may say, well, there isn't a universal notion of time which is really what I need for CCC because somehow you have to have a conformal time which enables you to continue into the next Aeon.

There are lots of things about the scheme which need to do be done in trying to complete a paper with the Polish colleague Krzysztof Meissner. We have a new idea about how the CCC thing works, and we keep running into snags. He wants to finish the paper within a few months because he's got a grant which he wants to be able to renew. He gets this grant for working with me and so he wants to be able to say we've got this paper which we've got accepted for publication. That would enable him to continue his work, which would be a good thing. That means finishing this paper, which is running into all sorts of snags. It's peculiar snags which need to be understood. Our view has changed slightly. I wrote a book which was called cycles of time [3]. That book presented my view about CCC but the view has changed a bit from what I described in that book. That's what Krzysztof and I are trying to explain – what determines the crossover? You should have a crossover from one Aeon to the next. That makes sense but to make it work in detail is more tricky.

When I asked if he wanted to elaborate more on the new idea, Penrose declined since they have not published about the idea yet.

Does it make a difference for your model what the curvature of the Universe is?

The curvature actually makes a difference. Curvature of space is almost flat. The calculations we do in our paper assume it's flat. If these Aeons have to continue and continue in order for this to work, the universe especially has to be slightly negative which is a curious but not a very popular idea. It should not be very negative. In fact, the observations are that any curvature is very, very tiny, but it you have to have a slightly negative curvature with the scheme to work.



Figur 6. M.C. Escher, Circle Limit IV, woodcut, 1960. This illustrates a negative curved universe, but Penrose also uses it as inspiration for his Conformal Cyclic Cosmology.

The negative curvature is the saddle form. You present this in the picture of Escher's angels and devils.

Yes, that's not what our paper is about, but it's one of the implications. Not even of our paper. It's independent actually. It is one of the implications of this CCC scheme, curiously enough, I never realized this until only very recently. That it really has to have very, very slightly negative curvature, and there might be other ways around it. The ordinary picture comes to this conclusion.

Does CCC not end up as another version of the multiverse theories?

I don't call it multiverse at all. You see the multiverse kind of picture is more or less sort of stacked up beside each other, so to speak, rather than temporarily on top of each other. I don't see the need for a multiverse. You see multiverses are partly trying to get around the idea that they regard the universe as very unusual. I don't know. It's all tied up with string theory and things like that, which I have lots more trouble with. I don't see any need for a multiverse. That's sort of universes that are going parallel to each other in some sense. I think some people argue that in order to have life in the universe, you have to have a very special universe. There may be all these dead universes around. The reason, we get away with having a second law of thermodynamics which is congenial to us, is that we just happen to live in the universe and that we can't live in these other ones, I don't think that the argument works. It doesn't make sense to me, but I think it's the kind of view that people have in the backs

of their minds that in order to allow the universe to be peculiar enough to have life in it, you've got to have lots of tries at the universe. Only the lucky ones with people in them are the ones which we have to be in because we're living things. I see that argument, but I don't think it makes any sense really. There are other reasons for why the universe has the specialty. It's nothing to do with multiverses but there may be string theory views. You see, people like string theory and multiverses, and I don't like string theory.

What's going to happen with the Higgs field at the end of the Aeons?

Well, you see, that was one of the things I kept worrying about in the book [2], but the new scheme avoids all those problems. You see the crossover occurs a little earlier. It depends on what physics is involved in the scheme, which I was trying to plug in that book. It did involve particle physics having some rather peculiar properties and maybe it doesn't have those peculiar properties. It depended on particle physics, and I certainly talked about the Higgs field without knowing much about it. This new proposal, we have, seems to sidestep that problem. It's not particle physics at all. It's another part of physics which is important. It does depend on the new scheme, so that part of the book is superseded at the moment, but I'm afraid we still haven't quite handed out all our problems.

You say that we can test for the gravitational waves from one Aeon to another, but will it not create a scenario with larger and larger fluctuations for each Aeon in the CCC-model?

I hope not.

My colleague is working on things called epochs. You have these different stages in the universe, where the main physics dominates what's going on. It changes from one state to another and it's a question of which physics is dominating different stages. You have matter dominated and radiation dominated, and these are different phases in the universe's behavior. Actually, there's a curious irony that the paper that we are writing arose partly from the discussion that I had with Alan Guth, one of the originators of inflation theory and he was trying to convince me that my theory had to be wrong, and inflation had to be right. He came up with an argument, if what you say is correct and this was the paper in the Monthly Notices of the Royal Astronomical Society [5]. We look at these spots in the sky which we call Hawking points and the diameter of these spots comes out to be a very definite amount and within cosmology this has to do with how much expansion there is from a certain stage to another stage. Alan Guth had worked this out. He had put himself in my shoes. I gave him all the credit. He said from your perspective, you should come out with spots which are only half the diameter than the ones you see. He says there's something wrong, so I get hold of Krzysztof and I said that Alan Guth told me that there's something wrong and the spots should be half the size that we see. Krzysztof has done a recalculation and then eventually

says he's right. The spots are the wrong size, so this has led us to this new view that we're holding, and this is the paper which I'm trying to write with Krzysztof.

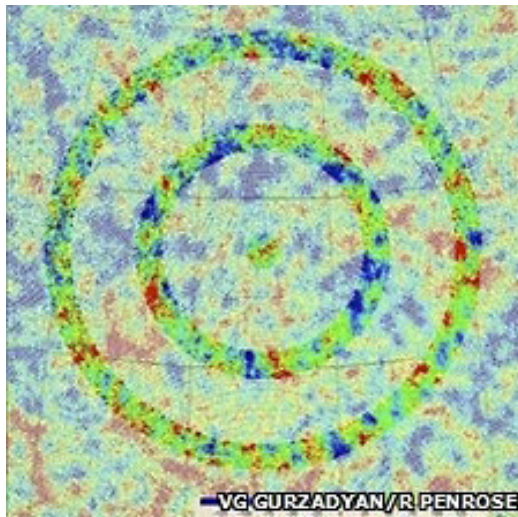


Figure 7. This is a close-up of a Hawking ring as seen in figure 4. The Guth anomaly found that these spots should have a diameter half of their observed size. Penrose and Krzysztof are working on a solution to this problem.

There is something different. We put it like this that there's another era (not to be confused with Aeon). You have these different stages in the universe where different features dominate. There's a certain stage where radiation dominated but before the radiation dominated era, there was something else which happened that gave an expansion phase and that's needed in order to explain the Guth anomaly. Apparently, according to Krzysztof, Guth was right. It depends on all sorts of particle physics, which I don't understand at all. I never know whether he was right or not but Krzysztof is an expert on these things, so I trust him when he says Guth is right on this. The trouble involves renormalizations of things and why do you only get a factor of 2 when you're subtracting one infinity from another infinity.

Well, you are skeptical about string theory. Why is that so?

You see, when I first heard about string theory, I quite liked the idea but then it very rapidly drifted off into having to have all these extra dimensions. Initially, they needed to have 26 dimensional and then they got it down to 10, which I suppose was an improvement. Now it's a mixture of being 26 and 10 or 11 dimensions at the same time.

I think 11 dimensions in M-theory?

I have a very strong objection to these arguments which I've made many times but again nobody pays any attention. The argument is that people are trying to tuck these extra dimensions into very tiny volumes. They're trying to say you don't disturb those tiny volumes. If the dimension of space-time is more than four then you have too many degrees of freedom and it would just swamp everything else. You don't see them. People would say you tuck them up into these little, tiny balls, but then why don't they leak into the universe – all those degrees

of freedom? The degrees of freedom are enormously bigger. It's not like adding a few degrees of freedom.

It's a complete change when you're changing the number of dimensions of the space from 3 to 9 or whatever. It's a very, very drastic thing to do. All your fields are of a completely different character. They would completely swamp everything else. Now they say, well, we don't swamp them because it needs too much energy to excite them, but that energy is not all that big. This is huge but compared with the Earth going around the Sun, it's extremely small. It's huge only if you think of it as a local energy but this is the energy for the whole universe and for the whole universe it's tiny. It's a little tiny bit of energy for the entire universe. Why can't you activate that little, tiny amount of it? The amount of energy per particle is tiny. It's a big energy because it's taking the whole energy, but you don't need the whole energy in the whole universe. Why can't you just use the energy locally?

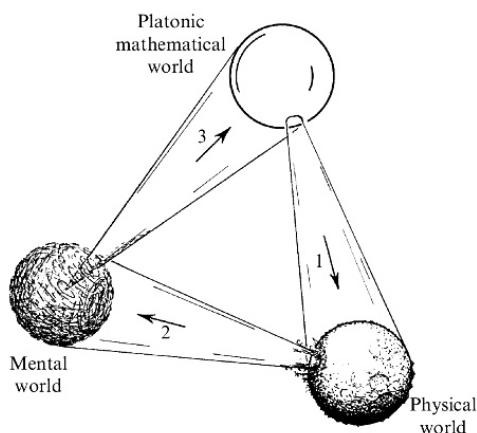
I've talked about these things many times, and again nobody pays any attention. I even write books on it, and people buy the books but they still don't pay any attention to the arguments as far as I can see. I have an opportunity to comment again on the new edition of *Fashion, Faith and Fantasy*, which I do have to think about in a serious way. The trouble with that is I don't really know where string theory has gone. I've just paid no attention to it. I don't think it's done anything. They haven't got the dimensions down. It's still just as bad as it was. It's got all these extra dimensions and it has not found of any way of getting rid of them, as far as I can see. I can't see that any progress has been made in that direction. I just think the dimensionality argument is wrong. You can't have more space dimensions without them having a huge effect on our physics.

While I was preparing for this interview, I read a book by Sabine Hossenfelder [6] where she thinks that physics is misled by mathematics. As you are a mathematician, I would like to hear your opinion about this.

Well, mathematics is what controls physics. Certainly, we can't get away from it. I think there's another thing where I might agree with her. Some people are carried away by things which they regard as very beautiful mathematics and I think this is one of the troubles with string theory. People regard mathematics as too beautiful to be false. That is absolutely a dangerous point of view, especially when you get the wrong number of dimensions of space. It could be as beautiful as it likes, but if it's got the wrong number of space dimensions then it's wrong.

I have this cartoon which I drew in various books of mine with the three worlds. I have the physical world, the mental world and the mathematical world. This is sort of a triangle and a small part of each world seems to control the entire other world. It's a very small part of the mathematical world, which seems to be relevant to physics. There's an enormous amount of mathematics hanging around. How much of that is to do with physics just the teeny-weeny little bit but if you get it right, it seems to produce physics in some sense. Then again,

there's only a small part of the physical world which seems to produce conscious beings and there's only a small part of the conscious thinking that involves thinking about mathematics. So this was some sort of slight joke in a way, but that was the way I had of representing this impossible structure of a small part of each world controlling the next one as you go around. That was a sort of jokey philosophical picture but I'm not saying that just because mathematics is beautiful, it needs to have anything to do with physics. We just seem to find that when you get it right with regard to physics, it has an enormous power and beauty of its own, which sometimes seem to transcend what you get in other areas.



Figur 8. The three “worlds”, the platonic mathematic, the physical and the mental world. According to Penrose, we only use an extremely small part of each world to describe the other worlds.

Should we be careful judging physics on how beautiful it is?

I mean we now have a beautiful explanation for the periodic table as you get it right down to the way that nuclear charge, nuclei and electrons behave and it's beautiful. It's not just that it's beautiful. It seems to be a correct description and there are corrections to it.

General relativity has an extraordinary precision. I mean now people know it's right to many decimal places. It's about the same with quantum mechanics. They both have a precision of a corresponding order to each other which is extraordinary. However, we know they can't be quite right. Quantum mechanics can't be quite right, because it doesn't explain the collapse of the wave function.

I have this slightly unconventional view combining general relativity with quantum mechanics. People say the Holy Grail is quantum gravity. You have to quantize gravity, bring it into the scope of quantum mechanics, pull it in to be covered by quantum mechanics. That's not what we really need. What we really need is the other way around, how gravity fixes the problems of quantum mechanics. Quantum mechanics has the problem that you have the reduction of the state. It doesn't follow the Schrödinger equation. It doesn't follow unitary evolution which is an idealization. People have arguments like

von Neumann¹ and it's a good argument, but it's not an answer when your assistant gets involved with the complicated environment. It's useful to change your perspective to one of those referred to as a density matrix, in order that you can handle it. But it's what I call a double ontology shift. It's not an answer to the problem. It's just a way of handling the problem you say. We'll use a density matrix and then we reinterpret the density matrix as probabilities of different kinds of states, and that's why you get the state reduction. It's not an answer. It's just a way of doing it I suppose. It's not a resolution of the problem of state reduction, collapse of the wave function, but it's a way of measuring how much is going to be there. It doesn't replace the theory by an improved theory in which the reduction of the state is part of theory. That in my view has to be a gravitational contribution bringing gravity and quantum mechanics together. That's a very important thing to do but it's not quantizing gravity. It's gravity using quantum mechanics. That's my unconventional view on that subject.

We ended the interview and the author thanked Penrose for his time and effort to present his ideas. I would also like to thank Penrose's personal assistant, Helen McGregor, for the technical support. The figure captions are solely the responsibility of the author.

Litteratur

- [1] A Big Cosmological Mystery: Discovery of a second ultra-large structure in distant space further challenges what we understand about the universe. Press Release University of Central Lancashire, 11 January 2024. <https://www.uclan.ac.uk/news/big-ring-in-the-sky>.
- [2] R. Penrose (2016) “Fashion, Faith and Fantasy in the New Physics of the Universe”, Princeton University Press.
- [3] R. Penrose (2010) “Cycles of Time”, The Bodley Head, London.
- [4] R. Howl, R. Penrose and I. Fuentes (2019) “Exploring the unification of quantum theory and general relativity with a Bose-Einstein condensate”, *New Journal of Physics*, vol. **21**, page 043047.
- [5] D. An, K. A. Meissner, P. Nurowski and R. Penrose (2020) “Apparent evidence for Hawking points in the CMB Sky”, *Monthly notices of the Royal Astronomical Society*, vol. **495**, page 3403–3408.
- [6] S. Hossenfelder (2018) “Lost in Math”, Basic Books, New York.



John Rosendal Nielsen er medlem af Kvants redaktion. Han beskæftiger sig hovedsageligt med videnskabshistorie, fundamental fysik og kosmologi.

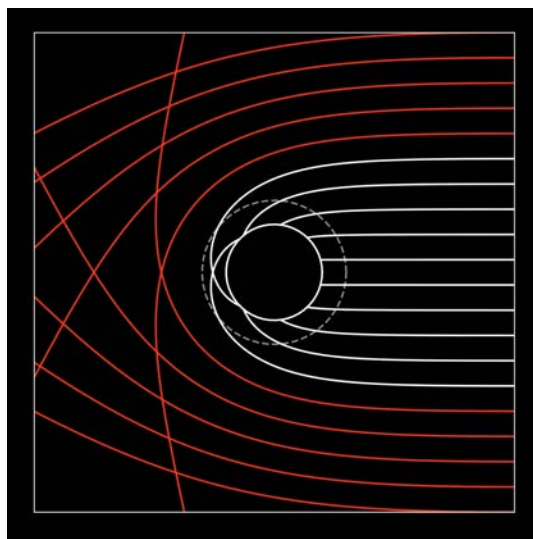
¹The von Neumann–Wigner interpretation is an interpretation of quantum mechanics in which consciousness is postulated to be necessary for the completion of the process of quantum measurement. It is known as “the consciousness causes collapse”.

Universets sorte spejle

Albert Sneppen, Cosmic DAWN Center og Niels Bohr Institutet

Lige udenfor randen af et sort hul ligger spejlbilleder af universet selv. Dette følger fordi de sorte huller store tyngdekraft får lys til at gå i kredsløb om hullet. Dette resultat fremgår fra forskning på Niels Bohr Institutet og The Cosmic DAWN Center, som måske kan åbne for en dybere forståelse af tyngdekraft, sorte huller og vores forunderlige flotte univers.

I et kosmos fyldt med matematiske skønheder og uhyrlige giganter er det sorte hul dog stadig en usædvanlig beboer, der bryder med den menneskelige intuition. Den standser tiden selv, fanger alt i sit indre og spejler universets lys på dens kant [1]. Sidstnævnte kan muliggøre tests af vores forståelse af tyngdekraft og er blevet belyst af forskning fra Niels Bohr Institutet og the Cosmic DAWN Center [2]. Selvom det umiddelbart lyder paradoksalt, at sorte huller skulle reflektere lys, så er fysikkens love heldigvis eksplicitte nok. Så lad os indstille vores teleskop og sammen gå på opdagelse i, hvordan sorte huller reflekterer universets lys. Nærmere bestemt skal du forestille dig, at du står foran en perfekt rund kugle af sorthed i skærende kontrast til et omkringliggende hav af stjerner, galakser og kosmiske lys.

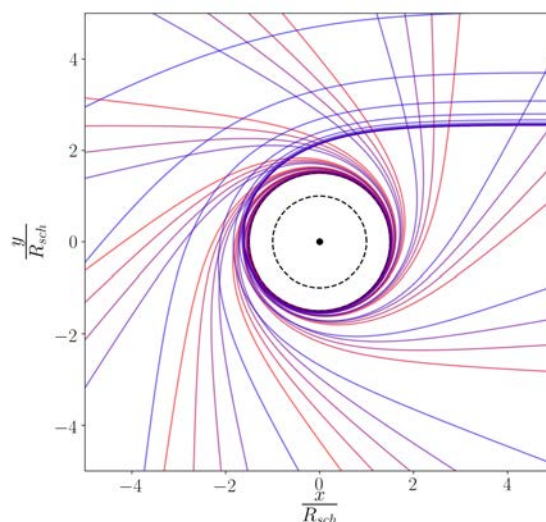


Figur 1. Billedet af lysets krummede baner i nærheden af et sort hul. Når man kigger på et sort hul (eller en neutronstjerne) kan man ikke bare se en side af objektet. Lys fra både forside og bagside kan rejse mod én, fordi lyset bøjes rundt om horisonten af tyngdekraften. På sorte huller, vil stjernerne altid stå over horisonten, selv når de faktisk fysisk ligger bag det sorte hul.

Et spejlbillede af universet

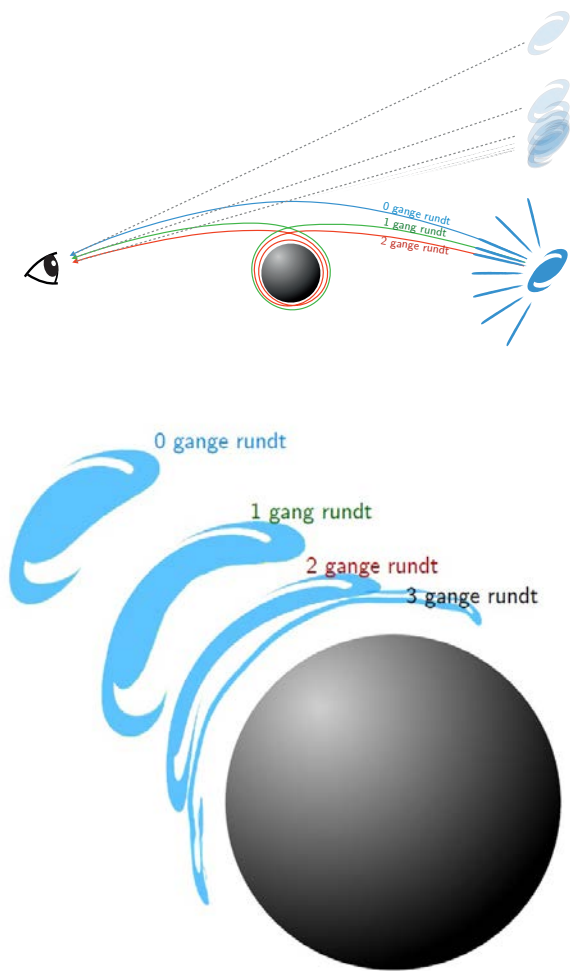
Vi stiller først vores blik på de stjerner, som ligger langt fra den sorte kugles omrids. Dette ligner vores vante nattehimmel. Her er lyset for langt væk til at tiltrækkes mod hullet – og vil derfor bevæge sig i lige linjer. Som man flytter blikket nærmere det sorte hul, vil stjernerne dog i stigende grad forvrænges, da tyngdekraften buer

lysets baner. Lyset drejer først nogen enkelte grader med den konsekvens, at stjernerne ikke længere er, hvor de burde være på nattehimlen. De er subtilt forskudte fra deres rigtige lokation. Endnu tættere på randen begynder lyset at afbøjes dusinvis af grader. Her kan man faktisk se de stjerner, der ligger bag den sorte gigant, da deres lys drejes rundt om hullet. Endnu tættere på afbøjes lyset nu hundredevis af grader, så meget at lyset begynder at rotere om det sorte hul.



Figur 2. Billede af lysets baner nær kanten af et ikke-roterende sort hul. Det sorte huls singularitet (uendeligheden i hjertet af hullet) er indikeret med en sort prik og begivenhedshorisonten (point of no return) er markeret med den stiplede linje. Længere ude er fotonsfæren, hvor lyset kan gå i kredsløb om det sorte hul. Desto tættere lyset kommer på fotonsfæren, desto længere kan det kredse om det sorte hul, men da banen ikke er stabil, vil lyset enten falde væk fra det sorte hul eller spiralere ind mod singulariteten.

De stjerner, som vi så langt fra det sorte huls omrids, skinner ikke kun mod os, men også i retningen af den sorte kugle. Nogle af deres stråler af lys snitter hullets rand, bøjer dramatisk og kastes ud i vores retning. Fra vores perspektiv kommer dette lys nu fra kanten af det sorte hul. Det vil altså sige, at du både ser disse stjerner på din vante nattehimmel, men også spejlet nær det sorte huls kant. På den måde bliver alle egne af universet reflekteret tæt på randen. Ja, selv lyset fra vores planet kan i teorien ses efter at have drejet en fuld rotation i det sorte huls racerspor. Det er ikke et tydeligt billede af os for lysstrålerne er få og forvrænget af deres rejse, men det er stadig vores omrids.



Figur 3. Skitse som viser, hvordan det samme objekt, her en galakse, kan ses flere steder på nattehimmelen nær et sort hul, fordi lyset kan tage mange forskellige baner om det sorte hul. De ekstra billeder af galaksen bliver mere og mere mast sammen, jo tættere vi kigger på det sorte hul. Grafik: Peter Laursen.

Uendelige kopier af universet

For at forstå det næste vores øjne ville se, når vores blik nærmer sig det sorte huls kant, har jeg nørket med Einsteins love og skabt et nyt matematisk udtryk for lysets baner. Det nye perspektiv forklarer, at det lys, som når endnu nærmere, kan rotere mange gange om hullet, ligesom Jorden om Solen, elektroner om atomkerner eller enhver god partner i folkedans. Derfor er der stråler af lys, som roterer 2 runder, 3 runder, eller måske endda 42 runder, før det kastes ud til os. Hver runde giver os et endnu et billede af stjernerne. Hvert af disse billeder ses evigt tættere på den sorte kugles kant, for desto tættere lyset kommer – desto mere afbøjes det – desto flere gange kan det rotere. Den nye forskning understreger desuden, at hvert af spejlbillederne af universet bliver klemmt i en smallere stribe end den sidste. Selvom billederne bliver evigt tyndere, så forsætter de til uendeligheden. Derfor – lige udenfor randen af et sort hul, vil du, din planet og lyset fra hele vores univers gentage sig til uendeligheden.

En sidste krølle på historien er, at rejsetiden for lyset bliver længere, jo flere gange det skal rundt om det

sorte hul. Det betyder af spejlbillederne ville blive mere og mere “forsinkede” og derved kommer fra fjernere og fjernere tidspunkter i fortiden. Hvis man forestillede sig en stjerne undergå en supernova-eksplosion i en bagvedliggende galakse, ville man derfor i teorien kunne se denne stjernedød ske igen og igen.

Den nye forskning afslører, at dette uendelige sæt af billeder gælder for alle sorte huller. Fra ensomme sorte huller, som roterer nær lysets hastighed, til den supermassive mastodont i midten af Mælkevejen. Spækket overalt i kosmos er sorte huller klædt i universets lys. Det er blandt andet derfor, det sorte hul er en noget usædvanlig beboer af universet. Et medlem, som både er uhyre skræmmende og så finurligt smuk. Både er en matematisk abstraktion og en fysisk realitet. Både definitionen af mørket selv og et spejl til universets lys.

Litteratur

- [1] J.-P. Luminet (1979) “Image of a spherical black hole with thin accretion disk”, *Astronomy and Astrophysics*, bind 75, side 228–235.
- [2] A. Sneppen (2021) “Divergent reflections around the photon sphere of a black hole”, *Scientific Reports*, bind 11, side 14247.



Albert Sneppen er ph.d.-studerende på Niels Bohr Institutet og The Cosmic DAWN Center, hvor han blandt andet har publiceret forskning om stjerners massefordeling i diverse galakser og om den ekstreme fysik af kolliderende neutron-stjerner. Sidstnævnte har ledt til den første præcise bestemmelse af geometrien af en såkaldt kilonova og til en ny måling af Hubble konstanten.

Generalforsamling i SNU

Generalforsamlingen i SNU afholdes den 8. april 2024 i Auditorium 1, i H.C. Ørstedbygningen, Universitetsparken 5, 2100 København Ø efter foredraget om Martin Knudsen (se side 43). Foredraget starter kl. 19.30.

Dagsorden:

1. Valg af dirigent
2. Præsidentens beretning for 2023
3. Godkendelse af regnskab for 2023
4. Forelæggelse af budget for 2024
5. Beslutning om kontingent for 2025
6. Valg af medlem til direktionen ifølge vedtægterne – Ole Mørk Lauridsen og Sven Frøkjær udtræder i 2024, og direktionen vil fremlægge forslag om indvalg af to nye medlemmer.
7. Valg af revisor
8. Orientering om programmet resten af året for 200-årsfejringen af SNU
9. Eventuelt

SNU fylder 200 år: jubilæumsåret og den historiske baggrund

Dorte Olesen

Selskabet for Naturlærens Udbredelse – i daglig tale kaldet SNU – fylder nu 200 år. Her fortælles lidt om SNUs tidlige historie og hvordan SNU vil fejre de 200 års formidling af naturvidenskab: blandt andet med en udstilling i Rundetaarn i august-oktober, udgivelse af en jubilæumsbog, uddeling af to H.C. Ørstedmedaljer i guld, to i sølv og to i bronze, og en jubilæumsfest sammen med UNF.

Her i 2024 kan Selskabet for Naturlærens Udbredelse – i det følgende kaldet SNU – fejre sit 200 års jubilæum. Mange studser i dag over det lidt gammeldags navn, men da H.C. Ørsted grundlægger Selskabet i 1824, er naturlære den gængse betegnelse for hvad vi i dag kalder fysik og kemi, taget i bred forstand – en lære der sammenfatter en opfattelse af naturen og de kræfter der virker i den. Og Ørsteds gamle selskab har bevaret sit oprindelige navn, selvom det i dag indimellem skaber pudsige situationer, for eksempel hvis “naturlære” høres som “naturlæge”.

I det hele taget er SNU en forening, der på nogle punkter konservativt fastholder sine traditioner, mens den på andre punkter tager nye initiativer i takt med tiden. Gennem alle sine mange år har SNU haft store foredragsrækker om de nyeste naturvidenskabelige og tekniske opdagelser, i nogle perioder helt offentlige, i andre kun for medlemmer – og siden begyndelsen af 1900-tallet har SNU også udgivet et tidsskrift og uddelt H.C. Ørstedmedaljer for fremragende forskning og formidling.

Gennem årene har der været vekslende aktiviteter rettet mod skoleelever, initiativer rettet mod at opmuntre unge forskere samt udstillingsaktiviteter om H.C. Ørsted og hvad hans store og banebrydende indsats har betydet for det moderne samfund.

En række af SNUs initiativer gennem de 200 år er efter en opstart hos SNU videreført af større organisationer og denne rolle som “first-mover” har været båret af en række initiativrige nøglepersoner, som har gjort en stor frivillig indsats.

I denne artikel vil vi primært kort fortælle lidt om de første 100 år af SNUs historie, de sidste 100 år kommer der meget mere om, når SNU udgiver sin 200 års jubilæumsbog kort før åbningen af en stor jubilæumsudstilling i Rundetaarn fra 17. august – 20. oktober i år. I jubilæumsbogen beskrives SNUs 200 år også set i lyset af den generelle samfundsudvikling i perioden, der jo spænder fra enevælden under Frederik VI i årene kort efter Napoleonskrigene, gennem de efterfølgende krige med Tyskland i 1800-tallet og de to verdenskrige i 1900-tallet frem til det moderne Danmark. Bogen indeholder også en række portrætter af fremtrædende danske fysikere og kemikere, der på forskellig vis har spillet en rolle i SNUs historie.

Jubilæumsåret vil også byde på uddeling af to H.C.

Ørstedmedaljer i guld, to i sølv og to i bronze samt sidst på året et større jubilæumsarrangement sammen med Ungdommens Naturvidenskabelige Forening, der i år fylder 80 år og oprindelig udsprang af SNU.

I det følgende vil vi se på, hvordan det hele begyndte.

Om Ørsteds egen tid

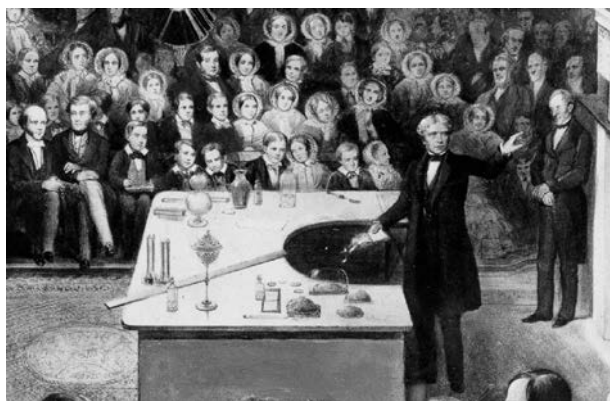
Efter sin banebrydende opdagelse i 1820 af sammenhængen mellem elektricitet og magnetisme rejser H.C. Ørsted de følgende år rundt i Europa og holder foredrag om elektromagnetismen. Her opdager han, at der flere steder er dannet selskaber, hvor almindelige borgere kan høre foredrag om de nyeste landvindinger indenfor naturvidenskab, og nogle steder har velhavende borgere og adelsmænd givet så store beløb til sådanne selskaber, at man kan finansiere både laboratorier og biblioteker. Det betyder både, at forskerne kan få bedre apparatur, og at interesserede borgere selv kan få adgang til at lave forskellige forsøg og tilegne sig ny naturvidenskabelig viden også gennem foredrag og læsning – en viden nogle af dem derefter kan omsætte til brug i deres erhverv.

I M.C. Hardings bog fra SNUs 100-års jubilæum [1] citeres blandt andet et brev fra Ørsted, sendt fra London den 9. juni 1823, hvor han skriver

“Blandt de skønneste Mindesmærker, Engländerne hvert Aar sætter flere af for deres Almenaand og stigende Interesse for Videnskaberne, er London Institution en Indretning, hvor der holdes Forelæsninger, der besøges af begge Køn, og hvor mange skønne og nyttige om end ikke dybtbundende Kundskaber udbredes. Den første Indretning af denne Slags var Royal Institution, derpaa fulgte London Institution, og siden har forskellige Dele af Byen faaet slige Indretninger, der vel ikke alle trives lige vel, men som dog ofte finder ny Understøttelse. . .”.

Senere den 16. juli 1823 skriver han fra Liverpool om en lignende institution: “Det er en Indretning for Undervisning i alle Dele af Naturvidenskab og dermed forbundne Videnskaber. Disse Indretninger vil forbedre Naturvidenskab i England saaledes, at ethvert Menneske, som ønsker at vide noget, vil have Kundskab deri. Den

Gavmildhed, hvormed Englænderne virker for dette Maal, er hædrende. I Liverpool havde 229 Mænd hver givet 100 Pund Sterling. Foruden disse Indretninger har de Læsehuse med Biblioteker, hvor der altid er fuldt af Læsere. Alt dette er indrettet med Subskription.”



Figur 1. Michael Faraday holder juleforelæsning i Royal Institution i London midt i 1800-tallet.

Danmark har lidt store tab under Napoleonskrigene og ved freden er Norge i 1814 blevet skilt fra Danmark, så man har brug for at finde nye og bedre produktionsmetoder både i landbruget og det øvrige erhvervsliv. Ved sin hjemkomst til Danmark udsender Ørsted derfor i oktober 1823 en indbydelse til dannelse af et lignende selskab i Danmark. Han får hurtigt positiv respons fra den videnskabeligt interesserede tronfølger, Prins Christian Frederik – den senere Christian VIII – og prinsens nærmeste kreds, herunder Overhofmarskal Hauch, der selv allerede har en stor samling fysiske apparater – samlingen findes stadig og kan besøges i “Hauchs Physiske Cabinet” i Sorø, lige ved Sorø Akademi.

Ved Selskabets officielle stiftelse i 1824 påtager prins Christian Frederik sig opgaven som Selskabets Patron, mens Kong Frederik VI bliver Selskabets Protektor. Prinsen er ganske aktiv i sin rolle som Patron, han leder møder og afholder også i 1839 selv en forevisning om daguerrotypi.

Der indmelder sig også ret hurtigt en række adelsmænd og godsbesiddere, embedsmænd og officerer, men almindelige landmænd og erhvervsdrivende kommer der ikke så mange af, deres økonomi er fortsat præget af de store tab under Napoleonskrigene og medlemskab er ikke gratis. En undtagelse er brændevinsbrænderen C.A. Brøndum, der er med allerede ved Selskabets officielle indstiftelse i 1824, og i 1825 kommer også ølbryggeren Christen Jacobsen med, og både han og ikke mindst han søn, J.C. Jacobsen, bliver trofaste medlemmer af Selskabet.

I 1825 er der ifølge [1, side 34] kommet 253 bidragsydere, hvoraf de 190 er medlemmer og 63 bidrager uden at være medlemmer, og SNU's ledelse varetages af en direktion på fem medlemmer, med Ørsted som livsvarig formand.

I Ørsteds tid bliver der i Selskabet i København både afholdt offentlige forelæsninger og særlige søndagsforelæsninger, som kun er tilgængelige for Selskabets

medlemmer. De offentlige forelæsninger er beregnet på at give indsigt i grundbegreberne i fysik og kemi og en vis forståelse i disse fags praktiske anvendelse. Ved Ørsteds første forelæsninger i almindelig kemi i 1824–25 var antallet af tilhørere 193, og i 1825–26 var det steget til 252. Andre forelæsere måtte nøjes med det halve antal deltagere.

Også andre steder i Danmark er SNU aktivt, dels finder Ørsted lokale ildsjæle, der holder foredrag, og dels sender man yngre foredragsholdere – rejselektorer – ud fra København. I december 1835 kommer en af disse – cand.polyt. J.C. Schythe – til Fredericia, hvor hans foredrag blandt mange andre tiltrækker prins Frederik – den senere Frederik VII – der bliver meget interesseret og senere i 1836 inviterer Schythe tilbage for at tale om flere emner. Der ydes også hjælp til borger- og realskoler, typisk i form af fysiske instrumenter, og til handels- og håndværkerskoler, samt bøger til biblioteker og lærere, og studiehjælp til både håndværkere og polyteknikere. Derudover er der en række landøkonomiske forsøg, fx med fremstilling af ost og smør. Aktiviteterne rundt om i landet danner flere steder grundlag for etablering af lokale tekniske skoler, og i takt med denne udvikling begrænses SNU's aktiviteter gennem årene mere og mere til København.

SNU's præsidenter 1824–1924

1824–1851: H.C. Ørsted, professor i fysik, direktør for Polyteknisk Lærestalt 1829–1851, rektor for Københavns Universitet i 2 perioder 1851–1865: J.G. Forchhammer, professor i geologi, direktør for Polyteknisk Lærestalt 1851–1865

1866–1886: C.V. Holten, professor i fysik, direktør for Polyteknisk Lærestalt 1872–83, medlem af direktionen 1861–66

1886–1887: Julius Thomsen, professor i kemi, direktør for Polyteknisk Lærestalt 1883–1902, medlem af direktionen 1887–1902

1887–1900: C. Christiansen, professor i fysik, medlem af direktionen 1881–86

1900–1939: Martin Knudsen, professor i fysik, rektor for Københavns Universitet 1927–28, medlem af direktionen 1939–49

I 1829 kommer Ørsted og SNU til at spille en aktiv rolle i forbindelse med oprettelsen af Polyteknisk Lærestalt. Den aktive matematiklærer på Borgerdydskolen, Georg Frederik Ursin, sender i 1827 et forslag til kong Frederik VI om oprettelse af en polyteknisk skole. Dette forslag går ud på efteruddannelse af håndværkere. Forslaget sendes af kongen til Universitetet, som nedsætter et udvalg med blandt andet Ørsted til vurdering af forslaget. Ørsted ser Kongens henvendelse til Universitetet som udtryk for, at der hellere bør skabes en højere skole for naturvidenskaberne, og ser en mulighed for synergi mellem en sådan institution og Selskabet – han foreslår, at man kan holde fælles forelæsninger, så Selskabets hidtidige foredragsserier om kemi og mekanik bliver egentlig undervisning for

den nye læreanstalts studerende, men stadig åbne for deltagelse af SNUs medlemmer, og de beløb, der hidtil er gået til SNU og derfra videre som honorarer til foredragsholderne, nu tilgår den nye læreanstalt, som så betaler for undervisningen. Hermed får Polyteknisk Læreanstalt en pengesum foræret, til gengæld får SNU gratis forelæsninger. Denne synergi opfattes fra begge sider som positiv, og på nær nogle ændringer i tidspunkter for forelæsningerne bliver store offentlige forelæsninger fælles for Polyteknisk Læreanstalt og SNU helt frem til 1851.

Ørsted selv bliver Direktør for Polyteknisk Læreanstalt, et hverv han varetager sammen med sit professorat ved Universitetet – Polyteknisk Læreanstalt er “i union” med Universitetet, og det betyder også, at den grundlæggende undervisning i fagene matematik, fysik og kemi er fælles for de to institutioner, en symbiose der varer helt op til 1960’erne.



Figur 2. På det nordiske naturforskersmøde i 1847 taler H.C. Ørsted med Roskilde Domkirke i baggrunden.

Anden halvdel af 1800-tallet

Ørsted er lige til sin død en meget aktiv foredragsholder i SNU, og efter hans død overvejes det at nedlægge Selskabet. Men man beslutter at fortsætte og kun nedlægge de fælles forelæsningsrækker med Polyteknisk Læreanstalt. Samarbejdet med læreanstalten fortsætter dog på en række punkter – blandt andet er det helt frem til 1977 sådan, at den til enhver tid siddende direktør (senere kaldet rektor) for Læreanstalten også sidder med i SNUs direktion.

Ørsted har været livsvarig formand, efter hans død går man over til årlige formandsvalg – og som første nye formand vælges professor i geologi Johan G. Forchhammer, der også efterfølger H.C. Ørsted som direktør for Polyteknisk Læreanstalt. Beslutningen om årlige nyvalg til formandsposten giver dog ikke anledning til stor udskiftning på denne post – i resten af 1800-tallet bliver der kun tale om i alt fire formænd, se faktaboksen

I Forchhammers tid kommer der gang i en ny offentlig aftenforelæsningsrække frem til 1859–61, hvor byggeri ved Polyteknisk Læreanstalt gør det vanskeligt at få lokaler, derefter er der enkelte foredragserækker om elektromagnetisme, meteorologi, optik og geometri frem til 1865–66, hvor der igen kommer en pause i foredragene. I 1866 overtager fysikprofessoren Carl Holten formandsposten og der bliver igen afholdt offentlige foredrag frem til 1874, hvorefter der indtræder en 25 år lang pause i denne virksomhed. Et af de få offentlige foredrag i denne periode bliver holdt af kemikeren og krystallografen Haldor Topsøe – ikke at forveksle med hans sønnesøn, der grundlægger firmaet Haldor Topsøe mange år senere. I løbet af sin formandstid er Carl Holten også direktør for Polyteknisk Læreanstalt, fra 1872–83, hvor han efterfølges af kemikeren Julius Thomsen, der så også i 1886 efterfølger ham som formand for SNU.

I løbet af anden halvdel af 1800-tallet er Danmark igen tabt af en krig og mister en tredjedel af sit landområde, Slesvig-Holsten. Men ingeniøruddannelserne er i vækst, og Julius Thomsen får i sin direktørtid opført det store Sølvtorvskompleks til Polyteknisk Læreanstalt, som står færdigt i 1890.



Figur 3. Sølvtorvskomplekset, hvor SNUs foredrag fandt sted i 70 år (DTU Teknologihistorie).

Fysikeren C. Christiansen er den sidste formand i 1800-tallet, fra 1887–1900, han er elev af Carl Holten og hans assistent ved Fysisk Samling, den store apparatsamling på Polyteknisk Læreanstalt, og han får omlagt undervisningen i fysik ved at introducere, at de fysikstuderende selv skal lave forsøg i forbindelse med undervisningen, apparaterne står i begyndelsen i vindueskarmene, på tilhørerbordene og katederet i auditoriet. Samtidig udgiver han på dansk en moderne lærebog i matematisk fysik, der baner vejen for oprettelse af et professorat i teoretisk fysik til Niels Bohr [2, side 37–38]. Dermed er der sket et brud med traditionerne efter H.C. Ørsted, hvor matematikken spillede en meget lille rolle i fysikundervisningen. C. Christiansen er i det hele taget en innovator, som også er vejleder for Martin Knudsen, der i år 1900 bliver formand for SNU.

Gennem de mange år uden offentlige foredrag er der dog god gang i foredragene for Selskabets egne medlemmer, hvor også formændene selv – Forchhammer, Holten, Thomsen og Christiansen – er på banen. Der bliver også i sidste halvdel af 1800-tallet holdt mange foredrag for latinskoleelever, ledsaget af eksperimenter. På dette

tidspunkt har skolerne kun meget beskedne samlinger af fysiske og kemiske apparater, og SNUs virksomhed er et værdifuldt supplement til skoleundervisningen.



Figur 4. Ørstedmonumentet fra 1876 (DTU Teknologihistorie).

Den 25. september 1876 kan man i SNU også glæde sig over, at brygger J.C. Jacobsen, der har været medlem af SNU siden 1825, ikke alene bekoster et stort monument til ære for H.C. Ørsted, som bliver afsløret i Ørstedsparken i København, men også samme dag opretter Carlsbergfondet med en tak til Ørsted for hans "Lære og vækkende Indflydelse, og som et Vidnesbyrd om taknemmelig Påskønnelse af hans Virksomhed for at udbrede Kundskabernes lys i videre Kredse" [1, side 89]. Det er gennem de offentlige forelæsninger om de kemiske processer bag ølgæring, at bryggerfamilien Jacobsen har fået en langt dybere forståelse af ølbrygning, og det glemmer J.C. Jacobsen aldrig.

1900–1924: Ny ung formand og revitalisering

I år 1900 vælger man en ny formand til SNU, den kun 29-årige daværende cand.mag. Martin Knudsen, som allerede nogle år før, i 1894, har vist sin interesse for mere folkelig formidling ved at skrive en populær artikel om "Elektriske udladninger gennem luften" i bladet "Naturen og Mennesket" [2, side 32–33]. Formandsvalget kommer efter en debat om SNUs fortsatte eksistens – virksomheden er svundet ind til kun at omfatte søndagsforelæsninger for medlemmerne, demonstrationer for skoleelever og enkelte spredte understøttelser til studenter, og man føler, at noget må ske. Dette formandsvalg bliver afgørende for det næste halve århundrede af SNUs virksomhed. Martin Knudsen kommer til at sidde som formand fra 1900–1939, og fortsætter som aktivt medlem af direktionen helt frem til 1949 – faktisk er han fungerende formand igen i 1943–45, mens efterfølgeren Niels Bohr er i USA under 2. verdenskrig.

Martin Knudsen bringer ligesom H.C. Ørsted både en usædvanligt stor arbejdskraft og et stort organisatorisk talent ind i SNU. I lighed med Ørsted bliver han i øvrigt også mangeårig sekretær for Videnskabernes Selskab og derudover påtager han sig mange andre organisatoriske poster, blandt andet i forbindelse med en international organisering af havforskningen, der blandt andet fører til stiftelsen af organisationen ICES – International Council for the Exploration of the Seas – en organisation der får hovedsæde i Danmark, i mange år på Charlottenlund Slot.



Figur 5. Foredrag i Royal Institution 1904 – helt så flot som hos dette forbillede har det måske ikke været i SNU.

Martin Knudsen tager i de følgende år en række initiativer, der revitaliserer SNU. Flere af disse er rettet mod latinskoolelever, det gælder f.eks. astronomiske forevisninger på Urania Observatoriet på Frederiksberg, hvor der ifølge [1, side 190] i årene 1901–24 deltager 252 hold med ca 3600 elever. Aktiviteten fortsætter mange år derefter i samarbejde med astronomen Luplau-Janssen.



Figur 6. Urania Observatoriet på Frederiksberg hvor SNU holdt forevisninger fra 1901.

Martin Knudsen udvirker også, at SNU i årene 1901–08 stiller forsøgsapparater og lokaler til rådighed, så eleverne selv kan lave fysikforsøg. Når denne succes

slutter allerede i 1908, skyldes det, at man er lykkedes med at få sådanne forsøg indført i skolen – det vedtages allerede i 1903, men først i 1908 er det fuldt implementeret.

Et andet tidligt initiativ fra Martin Knudsen er et forslag til direktionen om at genstarte et tidsskrift for fysik og kemi. Et sådant havde tidligere eksisteret, men var lukket ned, og flere initiativer til et nyt tidsskrift var mislykkedes. Direktionen er derfor betænkelig ved at kaste sig ud i et sådant projekt, men da den aktive fysiklærer fru Kirstine Meyer tilkendegiver vilje til at starte et sådant tidsskrift op, beslutter man at støtte det med et årligt tilskud. I 1905 går Tidsskriftet så godt, at man på generalforsamlingen i SNU beslutter at overtage udgivelsen, stadig med Kirstine Meyer som redaktør. Hun fortsætter som eneredaktør indtil 1912, men giver så stafetten videre til professorerne H.M. Hansen og E.S. Johansen. Tidsskriftet er i mange år en succes, der når ud til alle danske gymnasier og spænder over både undervisning og forskning. Først i 1990 transformeres det til bladet KVANT.



Figur 7. SNU's sekretær M.C. Harding til møde med direktionsmedlem i SNU, H.I. Hannover, på Hannovers rektorkontor i Sølvtorvskomplekset (foto fra DTU Teknologihistorie).

I 1908 får SNU en ny sekretær og kasserer, kemikeren M.C. Harding, som er inspektør ved Polyteknisk Læreanstalt og bliver en stor arbejdskraft for SNU, og samme år introducerer Martin Knudsen tanken om, at SNU også skal støtte den originale forskning ved at uddele en H.C. Ørstedmedalje i guld med tilhørende pengepræmie. Han mener, at selvom Carlsbergfondet på dette tidspunkt yder betydelige tilskud til den naturvidenskabelige forskning, er der for lidt fokus på at give en egentlig opmuntring og belønning til de mest originale forskere. Der fremstilles på Den Kgl. Mønt en medalje, modelleret af medaljør Gunnar Jensen, som på forsiden viser Ørsted i profil samt hans havnetræk, og på bagsiden en laurbær- og en palmegren samt en græsk lampe og en navneplade til modtagerens navn. Den første medalje gives i 1909 til Carlsberg Laboratoriums leder af den kemiske afdeling, professor S.P.L. Sørensen, for hans introduktion af pH-skalaen, og overrækkes af SNU's præsident, kronprins

Christian – den senere Christian X.

I de følgende år begynder SNU at tænke på oprettelse af et H.C. Ørsted Museum, og får tilsagn fra flere af Ørsteds efterkommere om at kunne overtage mange personlige genstande, som stadig ejes af familien. Tankerne tager fart, da Polyteknisk Læreanstalt i 1920 holder en H.C. Ørsted udstilling i forbindelse med fejringen af 100-året for Ørsteds opdagelse af elektromagnetismen, og et mangeårigt indsamlingsarbejde går i gang. Blandt de meget værdifulde genstande, som SNU gennem årene får overdraget, er også et maleri af Ørsted, lavet af den store maler C.F. Eckersberg.

I 1920 er SNU også med blandt initiativtagerne til et stort Nordisk H.C. Ørsted møde i København, hvor man slår kræfterne sammen med Dansk Elektroteknisk Komité, Dansk Ingeniørforening, Elektroteknisk Forening, Fysisk Forening, Kemisk Forening og Den Tekniske Forening. Det Nordiske Møde bliver en succes og giver økonomisk baggrund for oprettelse af en 100-års fond, som i de næste mange år kan finansiere H.C. Ørstedmedaljerne og deres tilhørende pengepræmier.

I 1924 kan SNU derfor fejre sit eget 100-års jubilæum med et stort arrangement, hvor kong Christian X – der nu er SNU's Protektor – overrækker H.C. Ørstedmedaljen i guld til Nobelpristageren Niels Bohr, der selv har været medlem af SNU siden 1910.

Det er således et revitaliseret og aktivt SNU, der tager fat på sit andet århundrede. Man kan som sagt læse mere om de næste 100 år i SNU's kommende jubilæumsbog, der forventes udgivet 14. august 2024 – på H.C. Ørsteds fødselsdag.

Litteratur

- [1] M.C. Harding (1924) "Selskabet for Naturlærens Udbredelse, H.C. Ørsteds Virksomhed i Selskabet og dettes Historie gennem hundrede Aar", Jul. Gjellerups Forlag.

Findes indscannet på

snu.dk/wp-content/uploads/2023/04/SELSKABET-FOR-NATURLAERENS-UDBREDELSE-ren-tekst-komprimeret.pdf

- [2] B. F. Knudsen (2021) "Martin Knudsen – på sporet af den glemte havforsker og fysiker", Forlaget Historia.



Dorte Olesen er konsulent på DTU Compute og har været medlem af SNU's direktion siden 1986. Hun var SNU's præsident i årene 1988–2022.

Fysikerne mellem videnskab og politik

Henry Nielsen, Center for Videnskabsstudier, Matematisk Institut, Aarhus Universitet, og Casper Andersen, Institut for Kultur og Samfund, Aarhus Universitet

Mange af de fysikere, der gennem det amerikanske Manhattanprojekt havde været med til at udvikle atombomben i årene 1942-45, forsøgte efter krigen at påvirke atomkapløbet mellem Øst og Vest. I denne artikel, som er et bearbejdet uddrag af kapitel 5 i vores bog *Minutter i midnat. En global historie om kernevåben* [1], beskriver vi, hvordan en række af de mest kendte vestlige fysikere og en enkelt russer greb problemet an på hver deres måde.

Manhattanprojektet og det efterfølgende kernevåbenkapløb mellem USA og Sovjetunionen skabte en helt ny situation for videnskaben og i særdeleshed for mange fysikere. De kom til at bevæge sig i en verden af store organisationer med interdisciplinær, projektorienteret forskning baseret på arbejde i store teams. Modsat den klassiske akademiske forskning var det en organisatorisk virkelighed med nærmest ubegrænsede ressourcer, men med modsvarende stort tidspres. De fik også meget tættere forbindelser til kommercielle, militære og politiske magtcirkler. Kernefysik og atomteknologi var blevet *big science*, en ramme og form for videnskab, som videnskabshistorikeren Jon Agar karakteriserer med de fem M'er: Money, Machines, Men, Military, Media. Store budgetter, gigantiske instrumenter og maskiner, tusindvis af mennesker organiseret hierarkisk, massiv militærbevågenhed og omfattende mediestrategier var centrale komponenter i de ændrede vilkår.



Figur 1. Manhattan-projektet var Big Science. På billedet ses en del af det gigantiske Hanfordanlæg ved Columbia River i Washington State. Det var i disse reaktorer, der blev produceret plutonium til bl.a. Trinity-bomben og bomben over Nagasaki. Foto: Wikimedia Commons.

Førende videnskabsfolk forholdt sig forskelligt til den nye situation. Fysikeren og nobelpristageren Arthur Compton, som havde været med til at rådgive præsident Truman om, hvordan atombomben skulle bruges i krigen mod Japan, og som efter krigen blev USA's repræsentant i UNESCO, mente, at kernevåben var så ødelæggende, at de ville forhindre nye verdenskrige. Han forfægtede også idéen om, at videnskaben trods den hastige vækst i regeringsfinansierede *big science*-projekter inkarnerede

en særlig etos, der gav håb om fred og sameksistens. Det lignede på nogle punkter den idealistiske internationalisme, der kom til udtryk i Niels Bohrs åbne brev til FN i juni 1950. Bohrs udgangspunkt var dog et andet. Hans internationalisme var et resultat af de erfaringer, han havde fået i sine bestræbelser på at gøre sit institut på Blegdamsvej i København til et verdenscenter for atom- og kernefysikere fra begge sider af de gamle frontlinjer i mellemkrigstidens splittede Europa. For Bohr krævede videnskabelig internationalisme omfattende åbenhed og en vedvarende diplomatisk indsats drevet af forskerne selv [2].



Figur 2. Fysiker Robert Oppenheimer og General Leslie Groves m.fl. ved resterne af tårnet, hvor Trinity, verdens første atomprøvesprængning, fandt sted om morgenen den 16. juli 1945. Foto: Wikimedia Commons.

Kampen mod atomvåbenkapløbet

De amerikanske videnskabsfolk, der op gennem Den Kolde Krig engagerede sig aktivt i kampen mod atomkapløbet, gjorde det på forskellige måder. Nogle afviste kompromisløst enhver omgang med kernevåben. Den nobelprisvindende kemiker Linus Pauling hørte til den gruppe. Han udgav i 1958 bogen *No more war!* og argumenterede i aviser, radio og TV for, at enhver udvikling og test af kernevåben var en forbrydelse både mod videnskabens moralske principper og mod de kommende generationer, der måtte leve med de sundhedsmæssige konsekvenser af våbenfremstilling og prøvesprængninger [3]. Pauling fungerede også som ekspertvidne i retssager anlagt af individer eller deres pårørende i forbindelse med sygdom og død, der

kunne knyttes til radioaktive udslip fra amerikansk kernevåbenproduktion og kernevåbenforsøg. Paulings videnskabelige aktivisme var græsrodsbaseret og rettet mod offentligheden.

Andre kritiske videnskabsfolk forsøgte at opnå mere direkte indflydelse ved at komme tættere på den politiske magt og regeringskontorerne. I en interessant bog fra 2017 har videnskabshistorikeren Paul Robinson påvist, hvordan disse kernevåbenskeptikere måtte acceptere at arbejde inden for rammer, der var knæsat af præsidenten, militæret og statsapparatet [4]. Konkret betød det en accept af afskrækkelsesrationalet i forholdet mellem supermagterne og dermed af, at kernevåben i en eller anden form måtte indgå i den langsigtede forsvarsstrategi. Inden for den ramme kunne forskerne forsøge at påvirke udviklingen i en i deres øjne lidt bedre retning – fx ved at arbejde for et atomprøvestop, for at forhindre spredning af atomvåben og for at begrænse tilførslen af midler til udviklingen af nye offensive og defensive kernevåben. Det betød i praksis, at fremtrædende videnskabsfolk med en moderat kritisk indstilling til kernevåben (som Robert Oppenheimer, Leo Szilard og Hans Bethe) fik en indskrænket rolle som sikkerhedsstatens tekniske eksperter – et problem de selv erkendte, men som de havde svært ved at undslippe.



Figur 3. Edward Teller møder Præsident Reagan i det ovale værelse den 14. september i 1982. Foto: Wikimedia Commons.

Splittede videnskabsfolk i Vesten

Kontrasten var stor i forhold til fx Edward Teller, der ofte kaldes brintbombens fader. Teller blev i sin samtid kritiseret for kynisme, men han opfattede sig selv som fortaler for en realisme, der i hans øjne gav den bedste mulighed for at undgå krig: “Jeg kan ikke lide våben. Jeg ønsker fred. Men for at have fred må vi have våben”, skrev han i 1954 [5]. Teller advarede desuden mod det, han opfattede som kollegernes misforståede moralisme, og han fastholdt, at de politiske beslutninger lå hos demokratisk valgte ledere, hvor de også rettelig burde ligge fremover. Det afholdt dog ikke Teller fra at være særdeles aktiv som politiserende videnskabsmand igennem en lang karriere, der varede helt frem til slutningen af Den Kolde Krig. Teller havde stærke allierede i det republikanske parti og var en hovedkraft i det store Lawrence Livermore-våbenlaboratorium, der blev grundlagt i Californien i 1952. Hans støtter talte

blandt andre Lewis Strauss, der i 1954 blev leder af den amerikanske atomenergikommission (AEC). De to bekæmpede i mange tilfælde – og ofte med succes – testforbud, ikke-spredningsaftaler og andre nedrustnings-tiltag med henvisning til, at Sovjetunionen alligevel ikke ville overholde aftalerne, hvorfor aftalernes eneste effekt ville være at sætte USA tilbage i våbenkapløbet. I modsætning til den venstreorienterede Pauling talte Teller og hans støtter koldkrigsstatens sprog, og der er ingen tvivl om, at deres indsats medvirkede til at forhale diverse nedrustningsaftaler og gøre dem mere tandløse. Desuden betød det forhold, at videnskabsfolk i Vesten ofte fremstod splittede i tekniske spørgsmål af vital betydning for deres nation, at det var muligt og bekvemt for politikerne at ignorere videnskabsfolk, som de ikke var enige med eller ikke brød sig om.

Et ikon for fredsbevægelsen

Generelt ved vi mindre om, hvad de sovjetiske forskere tænkte og mente, men Andrej Sakharov er et godt eksempel på det modsatte. Han opnåede i 1950'erne heltestatus i sit hjemland for sit store bidrag til at udstyre “sovjetmennesket” med brintbomben. I sin selvbiografi skrev han, at den ubetinget vigtigste grund til, at han og hans fysikkolleger arbejdede vanvittigt hårdt på bombeprojektet i begyndelsen af 1950'erne, var, at de anså dette arbejde som nødvendigt for at sikre, at ingen fjende ville vove at angribe Sovjetunionen. Og han fortsatte:

“Jeg kunne ikke undgå at erkende, hvilke frygtelige, umenneskelige sager, vi beskæftigede os med. [...] Med tiden hørte eller tænkte vi os frem til begreber som strategisk ligevægt, gensidig termonuklear afskrækkelse osv. Også i dag mener jeg, at der i disse globale ideer virkelig findes en vis (måske ikke fuldstændig og ikke helt tilfredsstillende) intellektuel retfærdiggørelse af udviklingen af termonukleare våben og vores personlige deltagelse heri. Dengang følte vi det dog snarest på det emotionelle plan. Den uhyrlige ødelæggende kraft, de enorme anstrengelser, der skulle til for at udvikle dem, de summer der blev taget fra det fattige, sultne og krigsødelagte land, de menneskelige ofre for den sundhedsfarlige produktion i minerne og straffelejrenes tvangsarbejde – alt dette forstærkede vores oplevelse af den tragiske dimension og fik os til at tænke og arbejde så intenst, for at de store ofre (der blev opfattet som uundgåelige) ikke skulle være forgæves” [6].

I løbet af 1970'erne blev Sakharov dog en stadig mere højlydt kritiker af det sovjetiske system. Han fik påbud om at afholde sig fra politisk virksomhed, men da han i 1980 tillod sig at protestere mod Sovjetunionens krig i Afghanistan, blev det for meget for de sovjetiske magthavere. Han kom for retten, som dømte ham til at leve i internt eksil i den lukkede by Gorkij [i dag Nisnij

Novgorod] nogle hundrede kilometer øst for Moskva. Et eksil, der varede frem til 1986, hvor Sovjetunionens nyvalgte ministerpræsident Mikhail Gorbatsjov endelig gav Sakharov lov til at komme tilbage til Moskva.



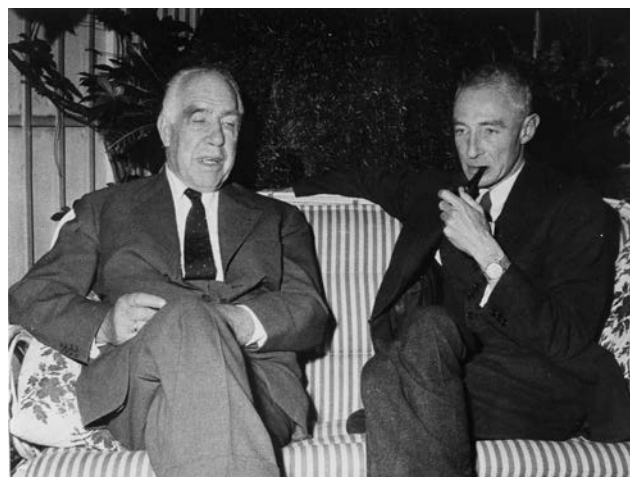
Figur 4. Andrej Sakharov og Jelena Bonner modtages med blomster i Amsterdams Lufthavn den 15. juni 1989. Foto: Wikimedia Commons.

Sakharov blev tildelt Nobels Fredspris i 1975, men da han var afskåret fra selv at hente prisen i Oslo den 10. december samme år, måtte hans kone Jelena Bonner gøre det. På det tidspunkt havde han for længst fuldført sin lange rejse fra rollen som hovedperson i udviklingen af den sovjetiske brintbombe til rollen som ikon for den internationale fredsbevægelse på begge sider af jerntæppet. Han døde i 1989.

Oppenheimers historie

Oppenheimers historie, som mange kender dele af fra Christopher Nolans fremragende film fra 2023, har visse lighedstræk med Sakharovs. Plaget af samvittighedskvaler efter at atombomberne var blevet kastet over Hiroshima og Nagasaki i august 1945, blev atombombens fader tvunget til at se på 1950'ernes dramatiske atomkapløb mellem USA og Sovjetunionen fra sidelinjen. Som offentligt kendt videnskabsmand, der sad i et utal af regeringsudpegede komiteer vedrørende atomspørgsmål i sidste halvdel af 1940'erne, og som alligevel tillod sig at have kommunistiske venner og lufte venstreorienterede synspunkter, måtte han før eller siden komme i sikkerhedsapparatets søgelys. Det havde han egentlig været længe, men takket være uforbeholden støtte fra general Groves (den militære leder af Manhattanprojektet), var han sikret arbejdsro, indtil han i 1950 direkte modarbejdede udviklingen af den amerikanske brintbombe. Dette forhold og en stadig tykkere FBI-sagsmappe med navnet Oppenheimer udenpå bevirkede, at han i 1954 blev indkaldt til en høring i et sikkerhedspanel, som var nedsat af en af hans fjender, den magtfulde formand for AEC Lewis Strauss. Efter en langvarig proces, som vi i dag kan følge i detaljer i et dokument med titlen *J. Robert Oppenheimer Personnel Hearings Transcripts* [7], blev Oppenheimer frataget adgang til alle fortrolige dokumenter og medlemskab af de mange komiteer, hvori han indtil da havde spillet en hovedrolle. Et utroligt fald fra magtens tinder, som mange af hans venner og kolleger begræd, men som blev hyldet fra den anden side af det politiske spektrum,

ikke mindst de mange, der var under indflydelse af den berygtede senator Joseph McCarthy, formanden for Komiteen for Uamerikansk Virksomhed, som så kommunister og landsforrædere alle vegne.



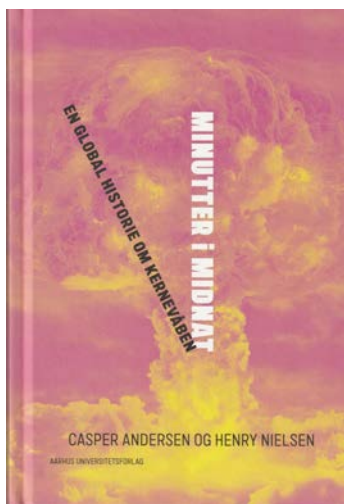
Figur 5. Niels Bohr og Robert Oppenheimer i samtale i København i 1958. Foto: Niels Bohr Arkivet.

Oppenheimer fungerede de næste mange år som direktør for Institute of Advanced Studies ved Princeton University, hvor han fortsat havde bestyrelsens opbakning, selv om Lewis Strauss flere gange prøvede at få ham afsat. Han blandede sig ikke længere i sikkerhedspolitiske spørgsmål, men kunne glæde sig over, at den amerikanske opinion efterhånden kom over på hans side – i Europa havde han hele tiden været helten, der blev uretfærdigt behandlet af skingre amerikanske antikommunister. I det sidste år af John F. Kennedys præsidentperiode fik han tildelt den ærefulde Enrico Fermi-pris som bevis på, at hans tid som paria i det amerikanske politiske establishment var endegyldigt forbi. Prisen på 50.000 dollars fik han dog først overrakt den 4. december 1963. Da var Kennedy lige blevet myrdet, og derfor var det afløseren, præsident Lyndon Johnson, der stod for overrækkelsen i Det Hvide Hus. Strauss, der ikke havde glemt sit gamle had til Oppenheimer, boykottede ceremonien, hvorimod Teller faktisk var til stede og ovenikøbet vekslede håndtryk med dagens hovedperson [8].

I 1965 var det tyve år siden, atombomberne detonerede over Hiroshima og Nagasaki, og i den anledning lavede TV-selskabet NBC en dokumentar med titlen *The Decision to Use the Atomic Bomb* om denne skelsættende begivenhed. Heri medvirkede en række af de personer, der havde haft afgørende indflydelse på beslutningen, og det gjaldt naturligvis også Robert Oppenheimer. Han fortalte bl.a. om Trinity-testen, og om hvordan han umiddelbart efter eksplosionen havde reciteret *Bhagavadgita*-citater: “Now I am become Death, the Destroyer of Worlds”. Og da interviewer spurgte ham, hvad han mente om senator Robert Kennedys nylige forslag om, at præsident Johnson burde indlede forhandlinger med Sovjetunionen om at stoppe spredningen af atomvåben, svarede han kort og klart: “Det er tyve år for sent – det skulle have været gjort dagen efter Trinity” [9]. Ikke mindst inspireret af Niels Bohr havde Oppenheimer da også siden 1945 argumenteret for nødvendigheden af international åbenhed

og kontrol med atomteknologi som den eneste vej til at undgå et kostbart og dødsensfarligt rustningskapløb mellem verdens lande.

I februar 1966 fik Oppenheimer, der havde været storryger hele sit voksne liv, stillet diagnosen strube-kræft. Selv om han straks kom under behandling, gik det hurtigt ned ad bakke med hans helbred. Han døde den 18. februar 1967. På det tidspunkt var Bohr, Einstein og de fleste andre ikoniske fysikere, der skabte det teoretiske grundlag for kernefysikken og atomteknologien, også gået bort. I kraft af deres personligheder og historie havde de en særlig gennemslagskraft, også i det offentlige rum. Generationens indflydelse aftog i sagens natur over tid, men den satte dog også varige spor, blandt andet i form af talrige Pugwash-konferencer, hvor videnskabsmænd fra Øst og Vest mødtes for at diskutere atomar nedrustning og andre fredsbevarende foranstaltninger. Pugwash-konferencerne var det mest synlige resultat af Einstein-Russell-manifestet fra 1955, hvori de to verdensberømte personligheder, filosofen Bertrand Russell og fysikeren Albert Einstein, advarede menneskeheden mod den overhængende fare for total udslettelse af arten *homo sapiens*, hvis det kom til en kernevåbenkrig.



Figur 6. “Minutter i midnat. En global historie om kernevåben”, Aarhus Universitetsforlag, 270 sider, udgivet juni 2022.

Pugwashorganisationen

Det længstvarende aftryk på nedrustningsbestræbelserne satte den polsk-britiske fysiker Joseph Rotblat. Rotblat var med i Manhattanprojektet, som han – i øvrigt som den eneste videnskabsmand – forlod i slutningen af 1944, da det stod klart, at atombomben ikke længere var nødvendig for at nedkæmpe Nazityskland. Han var medunderskriver af Einstein-Russell-manifestet fra 1955, og han fungerede i en årrække som sekretær for Pugwash-organisationen. Han fortsatte sit omfattende virke for nuklear nedrustning helt frem til sin død i 2005. Indsatsen i nedrustningens tjeneste var yderst relevant igennem disse årtier, der blandt andet er kendetegnet ved opsigtsvækkende nedrustningsaftaler mellem USA's Ronald Reagan og Sovjetunionens Mikhail Gorbatsjov i årene kort før Den Kolde Krigs ophør i 1989, men

også – og ironisk nok i endnu højere grad – af fortsat voksende kernevåbenarsenaler i de nye atommagter: Israel, Indien, Pakistan og Nordkorea. I 1995 delte Pugwash-organisationen og den da 87-årige Joseph Rotblat Nobels Fredspris “for deres indsats for at mindske den rolle, kernevåben spiller i international politik, og for i det lange løb at eliminere sådanne våben”[10].

Litteratur

- [1] C. Andersen og H. Nielsen (2022) “Minutter i midnat. En global historie om kernevåben”, Aarhus Universitetsforlag, side 133-139.
- [2] H. Knudsen og H. Nielsen (2012) “Pursuing common cultural ideals: Niels Bohr, neutrality, and international scientific collaboration during the interwar period”. Fra R. Lettevall, G. Somsen og S. Widmalm (red.) “Neutrality in Twentieth Century Europe: Intersections of Science, Culture and Politics after the First World War”, Routledge, side 115-139.
- [3] L. Pauling (1983) “No more war!” 25th anniversary edition, Dodd Mead.
- [4] P. Robinson (2017) “Redefining Science: Scientists, the National Security State, and Nuclear Weapons in Cold War America”, University of Massachusetts Press.
- [5] Teller citeret efter G. DeGroot (2005) “The Bomb. A History of Hell on Earth”, Pimlico, side 185.
- [6] A. Sakharov (1990) “Erindringer”, Forlaget Centrum, side 109-110.
- [7] www.osti.gov/opennet/hearing.
- [8] K. Bird og M.J. Sherwin (2005) “American Prometheus. The Triumph and Tragedy of J. Robert Oppenheimer”, Alfred A. Knopf, side 575-576.
- [9] Oppenheimer citeret efter K. Bird og M.J. Sherwin (2005) side 579.
- [10] nobelprize.org/prizes/peace/1995/rotblat/facts/



Henry Nielsen er lektor emeritus ved Center for Videnskabsstudier, Aarhus Universitet. Hans forskning har især været fokuseret omkring atomteknologi og dennes samfundsmæssige betydning..

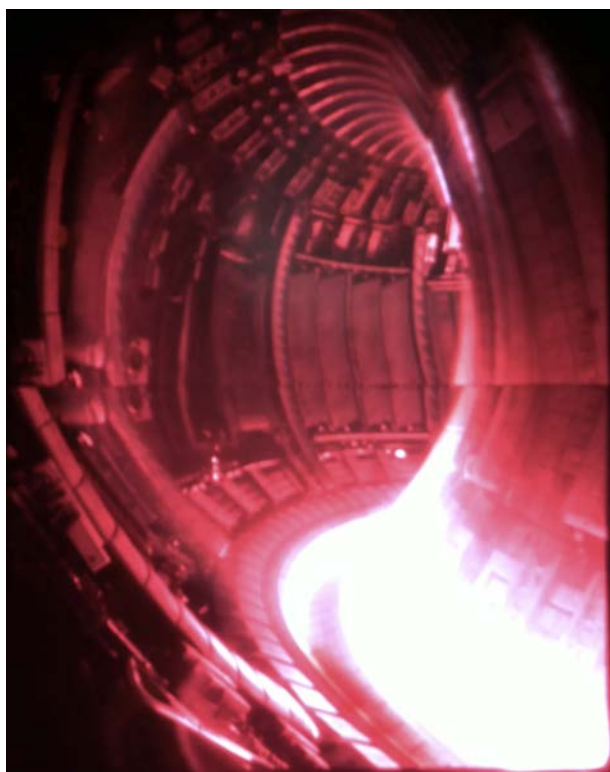


Casper Andersen er lektor i idéhistorie ved Institut for Kultur og Samfund, Aarhus Universitet, hvor han forsker og underviser i videnskabens og teknologiens globale historie fra ca. 1850 til i dag.

Ny verdensrekord i fusionsenergi

PLASMAFYSIK. Fusionsreaktorer som Solen og stjernerne er kilder til en ren og bæredygtig energiproduktion. Målet for fusionsforskere er at skabe en Sol her på Jorden, og det mål er vi nu kommet tættere på. Det er forskere Joint European Torus (JET) i Oxford i England, der har slået rekorden for hvor meget energi, der kan produceres i en fusionsreaktor på Jorden. Hele 69 MJ (megajoule) fusionsenergi blev dannet i 5 s ved kun at bruge 0,2 mg brændstof. JET er et af de største og mest kraftige fusionskraftværker, og JET producerede, hvad der svarer til en effekt på 13,8 MW. I 2021 blev den forrige rekord sat (også på JET), da der blev produceret 59 MJ i 5 s, hvilket svarer til en effekt på 11,8 MW. Den hidtidige rekord fra 1997 var kun 22 MJ på 5 s (4,4 MW) så der er sket en stor udvikling i fusionsreaktorerne i de seneste par år.

JET er en tokamak, et doughnutformet design, der ved hjælp af kraftige magnetfelter kan fastholde et plasma. Plasmaet, der dannes i JET, er 10 gange varmere end Solens indre kerne.



Figur 1. Plasmaudladning i JET. (Foto: UKAEA / EURO-fusion).

Fusion er den proces, der giver stjernerne energi og grunden til, at de lyser. I Solen og andre stjerner fusionerer hydrogenkerner sammen til heliumkerner og derefter til tungere grundstoffer. Som læseren nok husker fra gymnasiet, frigiver fusion af lettere kerner (indtil jernkerner) energi, mens kerner tungere end

jern frigiver energi ved fission (spaltning). For at danne fusionsenergi i en tokamak bruges to isotoper af hydrogen: deuterium og tritium. Når deuterium og tritium opvarmes til ekstreme temperaturer i et plasma, fusionerer de og producerer helium, hvorved en stor mængde fusionsenergi frigives.

Forskere fra hele verden, også fra DTU, var med til eksperimenterne i JET. I JET viste de også, hvordan de kan få kanten af plasmaet ind i en stabil tilstand og undgå, at det rammer væggen i tokamakken. Det er vigtig viden for at stabilisere plasmaet i et fremtidigt fusionskraftværk.

Målet i en tokamak er at producere mere energi end der bruges. Men her er JET for lille. Forsøgene på JET er dog vigtige for konstruktionen af ITER, som er en stor tokamak, der er ved at blive bygget i Frankrig. ITER forventes at være i stand til at udløse 10 gange så meget energi, som der sendes ind i plasmaet (der bruges energi til at opvarme plasmaet). ITER vil også bruge deuterium og tritium som brændstof. Der eksisterer meget deuterium og det kan blive udvundet fra vand. Tritium er en radioaktiv variant af hydrogen med en halveringstid på 12 år, som kan blive udvundet fra litium.

Håbet er, at vi i fremtiden kan producere nærmest ubegrænset energi med fusionskraftværker og bruge energien til varme og elektricitet. Fusionsenergi er rent og bæredygtigt, da der ikke bruges fossile brændstoffer og ikke produceres drivhusgasser. Desuden er fusionsenergi sikkert, da det ikke som kernekraft (fission) kan starte en løbsk proces. Ved fusionsenergi produceres der heller ikke restaffald, der er giftigt eller som har en lang levetid.

Kilde: phys.org og iter.org.

Lys fanget i ekstremt lille volumen

FOTONIK. Forskere fra DTU har designet en halvleder-kavitet, der kan fange lys på et ekstremt lille volumen, som er meget mindre end diffraktionsgrænsen. Diffraktionsgrænsen er som bekendt den nedre grænse for, hvor meget vi kan opløse lys, altså hvor små størrelser, vi kan se. Når forskerne fanger lyset i et volumen mindre end diffraktionsgrænsen, betyder det, at de fanger lyset i et volumen, der er mindre end en kasse med sidelængder på en halv bølgelængde.

Der er brug for nye komponenter, der kan integrere elektronik og fotonik, mens vekselvirkningen mellem elektroner og fotoner (lyspartikler) stadig forstærkes. Et af de elementer der er brug for, er en meget lille lysbeholder kaldet en kavitet, som det nu er lykkedes forskere at designe og fabrikere. Lyskaviteten er lavet af halvledermaterialet indiumphosphid (InP). Ved at bruge computersimuleringer og en matematisk metode kaldet topologioptimering, har forskerne fundet ud af, præcis hvordan de skal fabrikere lyskaviteten, for

at fange så meget af lyset som muligt på et meget lille område. Topologioptimering er en metode, der optimerer topologien (formen) af kaviteten med det formål at fange mest muligt af lyset, mens topologien af kaviteten kan ændres for at opfylde formålet.

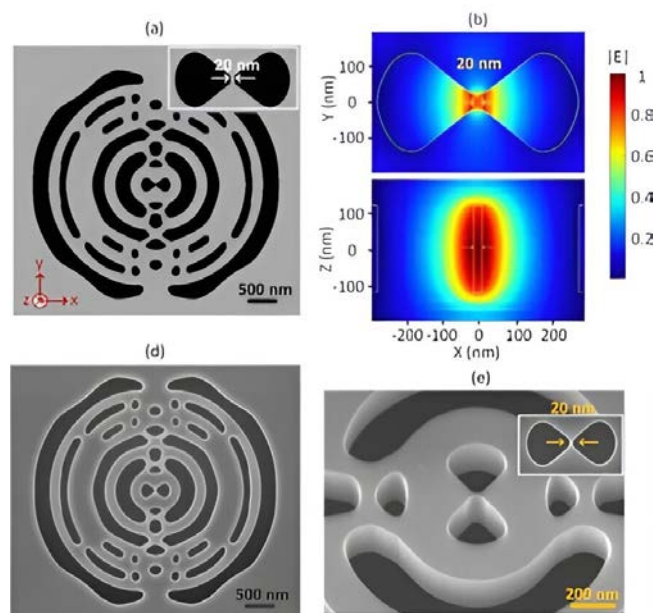
Forskerne fabrikerede derefter strukturen i et renrum ved hjælp af elektronstrålelitografi og kemisk ætsning. For at få en ekstrem høj lyskoncentration, må strukturerne være meget små i størrelsesorden af nanometer. På så lille en størrelsesorden er de særlig sensitive overfor fabrikationen og for små ændringer i den, og det er derfor en udfordring at fabrikere de designs, som forskerne får fra topologioptimeringen, men det er nu lykkedes.

Efter en finjustering af fabrikationen opnåede forskerne en kavitets størrelse på kun 20 nm som de så lavede topologioptimering på igen, hvilket gav dem en endelig kavitets størrelse på 0,26 af diffraktionsgrænsen, dvs. 4 gange mindre end diffraktionsgrænsen! De har dermed vist, at det volumen, som lyset er fanget i, er en størrelsesorden mindre end tidligere demonstreret.

Lignende kaviteter er dannet i silicium (Si) og det nye i forsøgene er derfor, at det er lykkedes i halvledermaterialet InP. InP er bedre egnet til fotonik end Si, da det har et direkte båndgab, og derfor kan forstærke lysudsendelsen. De ultrasmå nanokaviteter kan anvendes indenfor mange fotoniske enheder, som fx en nanolaser eller en nanoLED. Da kaviteterne forøger vekselvirkningen mellem stof og lys, kan de også bruges til meget effektive computere, der kan reducere energiforbruget. Desuden vil de kunne bruges til højopløsningsmikroskoper, hvilket er vigtigt især

inden for medicinske afbildningsteknikker.

Forskerne arbejder nu på at gøre fabrikationen endnu mere præcis, så de kan reducere volumenet endnu mere.



Figur 2. Billedet viser kavitets design (a), fordelingen af det elektromagnetiske felt (b) og SEM- (skanningelektronmikroskop)-billeder af den kavitets størrelse, forskerne har produceret i renrummet. Figur fra kilde.

Kilde: phys.org og M. Xiong m.fl. (2024) "Experimental realization of deep sub-wavelength confinement of light in a topology-optimized InP nanocavity", *Opt. Mater. Express*, bind 14, side 397-406.

Nyt fra Dansk Fysisk Selskab

Maren Mallings



Konstituering af ny bestyrelse

Bestyrelsen har ved bestyrelsesmødet den 14. december 2023 konstitueret sig som følgende:

Formand: Ian Bearden

Næstformand: Morten Bache

Kasserer: Louise Kindt

Øvrige bestyrelsesmedlemmer: Maren Mallings, Simon Olling Rebsdorf, Søren Bang Korsholm, Thea Bjørk og Lau Blom Grøndahl

Vi glæder os til et spændende år.

Opdatering af Dansk Fysisk Selskabs medlemsliste

Dansk Fysisk Selskab har skiftet til et nyt medlemsystem, og vi har derfor brug for at opdatere medlemmernes informationer. Særligt mangler vi stadig e-mailadresser fra mange. Fremover vil kommunikation til medlemmerne ske via e-mail, og det er derfor vigtigt, at vi har en gyldig e-mailadresse for alle medlemmer. Afsender står som Dansk Fysisk Selskab med adressen mail@danskfysiskselskab.dk, hvor det også er muligt at kontakte bestyrelsen direkte.

Vi minder vores medlemmer om, at Dansk Fysisk Selskab er en frivillig forening, hvor arbejdet hovedsageligt bliver udført i vores fritid.

Vi har nu flyttet de medlemmer, hvis e-mailadresse vi havde adgang til, til vores nye system, og de vil modtage en e-mail med brugernavn og adgangskode hertil. Ved login kan man opdatere eller ændre personlige oplysninger, der benyttes til at fremsende medlemsbladet Kvant og til løbende information om begivenheder mm. i DFS regi. Opkrævning af medlemskontingent vil fremover

ske via faktura per e-mail. Som noget nyt er det nu muligt at betale kontingentet via kortbetaling, men girokortindbetaling vil ophøre.

Ordinært medlemskab koster 400 kr. om året og studerende (inkl. ph.d.-studerende) betaler kun 150 kr. per år. Med i prisen får man fire numre af Kvant om året. Man får desuden rabat på deltagergebyret ved årsmødet og mulighed for at deltage i medlemsarrangementer.

Indmelding sker ved enten at indtaste følgende link (<http://tinyurl.com/mu2vrc2n>) i en browser eller scanne QR-koden her for at gå direkte til medlemsformularen.



Vi vil som altid samtidig gerne opfordre alle interesserede til at melde sig ind som medlem i DFS - Danmarks landsdækkende forening for fysik. Alle med fysik som baggrund er velkomne, og vi glæder os til at afsløre flere spændende nye tiltag i år.

Kvinder i Fysiks årsmøde

KIF PRIZE 2024

CALL FOR NOMINATIONS

Kvinder i Fysik (KIF), som er en sektion af DFS, afholder årsmøde den 4. juni 2024 kl. 14:00-18:45. Mødet afholdes i Aud. A på Niels Bohr Institutet, Blegdamsvej 17, 2100 København Ø, og alle er velkomne. Mødet bliver afholdt på engelsk og temaet er "Mentorship and Career Advancement". Hovedtaleren er Professor Anja Boisen fra DTU. Desuden bliver KIF-prisen 2024 uddelt på mødet, hvorefter prisvinderen vil give et foredrag. Det fulde program kan ses på kvinderifysik.dk, hvor man også kan læse mere om nominering af kandidater til KIF-prisen.

Kommende foredrag

Dato	Tid	Foredragstitel	Foredragsholder	Forening
Apr	2024			
8/4	19.30	Martin Knudsen – den næsten glemte fysiker og havforsker Efter foredraget er der generalforsamling	Helge Kragh	SNU
29/4	19.30	Tænkende maskiner fra Ada Lovelace og Alan Turing til dagens samtalerobotter	Thore Husfeldt	SNU
Maj	2024			
27/5	19.30	DMI's stormflodsmodel Efter foredraget uddeles H.C. Ørstedmedaljen til en inspirerende grundskolelærer	Jacob Woge Nielsen	SNU
Juni	2024			
4/6	14.00	Årsmøde i Kvinder i Fysik (KIF)		DFS

Wieth-Knudsen Observatoriet, Margot Nyholms Vej 1, 3220 Tisvildeleje, har åbent hus-arrangementer med gratis adgang to lørdage om måneden. De kommende datoer er 13/4, 27/4, 11/5, 25/5, 8/6 og 29/6. Se nærmere på astronomisk.dk/wieth-knudsen-observatoriet.

SNU: Aud. 1, H.C. Ørsted-bygningen, Universitetsparken 5, 2100 København Ø (snu.dk, facebook.com/SNU1824). Foredragene i SNU er åbne for alle – det er ikke nogen betingelse, at man er medlem.

OBS: Der må ikke parkeres ved hovedindgangen til Universitetsparken 5, og kun med særlig p-tilladelse andre steder i Universitetsparken eller på Ole Maaløes Vej 5. Der kan parkeres med Easypark på Nørre Allé.

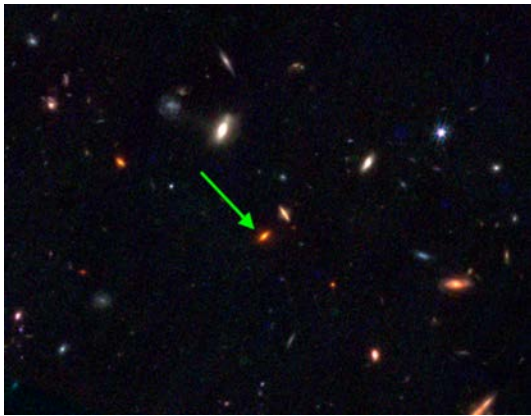
Foredragene i SNU videooptages med støtte fra Carlsbergs Mindelegat.

KIF: Årsmødet i KIF afholdes i Aud. A på Niels Bohr Institutet, Blegdamsvej 17, 2100 København Ø.

Massiv galakse udfordrer teorier om mørkt stof

Christine Pepke Gunnarsson, Kvant

KOSMOLOGI. Vores forståelse af galakse-dannelse og mørkt stof kan være ændret drastisk efter nye observationer fra James Webb-rumteleskopet (JWST). JWST har observeret en sjælden massiv galakse, der blev dannet meget tidligt i universet og som ifølge standardmodellen ikke burde kunne eksistere. Spektralanalyser har bestemt galaksen til at være 11,5 milliarder år gammel, men den indeholder en mængde stjerner, der er bestemt til at være endnu ældre, omkring 13 milliarder år gamle. Eftersom universets skabelse i Big Bang skete for 13,8 milliarder år siden, er stjernerne i galaksen derfor dannet "kort" tid derefter.



Figur 1. Den massive galakse ZF-UDS-7329, der blev dannet meget tidligt i universet (Foto: JWST).

Efter Big Bang var næsten alt stof fordelt ligeligt i universet. Men meget små forskelle i fordelingen, såkaldte kvantefluktuationer, som vi i dag stadig kan se i fluktuationer i temperaturen af den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling, betød, at nogle områder havde lidt mere stof end andre. De tætte stofområder kollapsede under deres egen tyngdekraft, og små stofklumper samlede sig til større stofklumper, som dannede stjerner og galakser. De ældste og mest rødforskudte galakser burde derfor være de mindste.

Mørkt stof spiller også en vigtig rolle i galaksedannelsen. Det meste stof i en galakse er faktisk mørkt stof, dvs. stof, der

hverken absorberer, reflekterer eller udsender lys, men som påvirker almindeligt stof med dets tyngdekraft. De nuværende modeller har vist, at galakser dannes, når mørkt stof klumpes sammen. Tyngdekraften fra mørkt stof trækker galakserne sammen og derfor er koncentrationen af mørkt stof på dannelses-tidspunktet vigtigt for galaksens udvikling. Ifølge standardmodellen har der kort tid efter Big Bang slet ikke været mørkt stof nok til dannelsen af ekstremt massive galakser. Derfor undrer det forskerne at finde en så massiv galakse fra så tidligt i universet.

Forskerne har brugt flere år på at bestemme galaksens alder med teleskoper på Jorden bl.a. Keck-observatoriet i Hawaii og Very Large Telescope i Chile, men det var svært, da den var så lyssvag og lyset meget rødforskudt. Til sidst måtte de bruge rumteleskopet JWST, og så lykkedes det at bestemme alderen. JWST er efterfølgeren til Hubble Rumteleskopet og er det mest kraftfulde infrarøde observatorium, der er sendt ud i rummet. JWST befinder sig i kredsløb omkring Solen i en afstand af 1,5 millioner km fra Jorden (til sammenligning befinder Jorden sig omkring 150 millioner km fra Solen).

Galaksen, som JWST har observeret, indeholder omkring 4 gange mere masse i form af stjerner end Mælkevejen. Observationen af en ekstremt massiv galakse med stjerner næsten lige så gamle som Big Bang skubber grænserne for vores forståelse af, hvordan galakser dannes og udvikler sig. Spørgsmålet for forskerne er nu, hvordan galaksen dannede sig så hurtigt i det tidlige univers, og hvorfor den stoppede med at danne stjerner. Forskerne har brug for flere observationer for at forstå, hvor almindelige de ekstremt massive galakser er og hvor tunge, de er. Forskerne håber, at resultaterne kan hjælpe med at forstå fysikken i galaksedannelse og særligt det mørke stof.

Kilde: phys.org og K. Glazebrook m.fl. (2024) "A massive galaxy that formed its stars at $z \sim 11$ ", *Nature*, <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07191-9>.