

KVANT November 3 2023

Tidsskrift for Fysik og Astronomi 34. årgang

MINI-TEMANUMMER OM GALAKSER

- JAGTEN PÅ DE FØRSTE GALAKSER
- FØR HUBBLE: OM GALAKSERNES TIDLIGE HISTORIE
- STARBURSTGALAKSER
- AARHUS I RUMMET
- HAWKINGSTRÅLING OG UNRUHSTRÅLING
- AKTUELLE BØGER • BREDDEOPGAVER • PLANETKALENDER

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 Rugh

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 reprojekteret
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. 4-2023 udkommer ca. 15. december

Nr. 1-2024 udkommer ca. 15. marts

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

Indhold:

Jagten på de første galakser

Thomas Greve 3

I Nobelpristageres fodspor – Kirstine Meyer Aften med traditionsrigt
legat til ung astrofysiker

Cecilie Pedersen 7

Før Hubble: Om galaksernes tidlige historie

Helge Kragh 8

Nobelprisen i fysik 2023

Christine Pepke Gunnarsson 12

Starburstgalakser

Bitten Gullberg 13

Aarhus i rummet

Mads Fredslund Andersen, Andreas Dideriksen, Oliver Millinge 17

Hawkingstråling og Unruhstråling – Kvantemekanikken møder den
generelle relativitetsteori

Bernhard Lind Schistad 21

Laserstråle – breddeopgave 104 og 105

Jens Højgaard Jensen 26

Nyt fra Dansk Fysisk Selskab

Maren Malling 28

Planetkalender

Martin Götz 29

Aktuelle bøger

Jens Olaf Pepke Pedersen og Arne Nielsen 30

Kommende foredrag Bagsiden



Mini-tema om galakser

Dette nummer af Kvant har galakser som
tema. Læs om observationer af de fjerneste
galakser i universets tidlige historie, samt om
den opfattelse og viden man gennem historien
har haft om de objekter, vi i dag betegner som
galakser. Endelig kan du læse om de mystiske
starburstgalakser, der dannede stjerner 10–100
gange hurtigere end Mælkevejen.

Du kan desuden glæde dig til det næste nummer af Kvant, der har
kvantecomputeren som tema.

Billedet på forsiden viser “Webb’s First Deep Field”, som er det første
operationelle billede taget af James Webb-teleskopet. Billedet dækker et lille
område af himlen, der er synligt fra den sydlige halvkugle, og er centreret om
galaksehoben SMACS0723 i stjernebilledet Flyvefisken. Vi ser tilbage i tiden,
for billedet viser galaksehoben, som den så ud for 4,6 milliarder år siden, med
mange flere galakser foran og bagved hoben. De yngste af galakserne på billedet
er fra en tid mindre end en milliard år efter Big Bang.

Det kraftige gravitationsfelt i en galaksehob kan bøje lysstrålerne fra fjernere
galakser bag hoben, ligesom et forstørrelsesglas bøjer og fordrejer billeder. De
fremtrædende spidser på nogle af stjernerne skyldes diffraktion fra kanterne på
teleskopets spejle. Læs mere i artiklen af Thomas Greve på næste side.

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.

Jagten på de første galakser

Thomas Greve, Cosmic Dawn Centeret (DAWN), DTU Space

Flere af de mest spændende opdagelser, som Webb-teleskopet har gjort, har været i forbindelse med dets observationer af de fjerneste galakser i universets tidlige historie. I denne artikel vil jeg oprids de vigtigste af disse opdagelser og samtidig forsøge at opsummere, hvad de betyder for vores forståelse af de første galakser.

Den 12. juli 2023, på etårsdagen for offentliggørelsen af de første billeder af kosmos fra James Webb-teleskopet, tweetede den tidligere amerikanske præsident Barack Obama følgende: *"I can't get over these images from the James Webb Space Telescope! They're igniting curiosity and wonder in a whole new generation."* Tweetet blev ledsaget af fire fantastisk smukke billeder taget af Webb-teleskopet, som viser stjernetaget i vores egen Mælkevej. Dette siger måske noget om den enorme indvirkning, Webb-teleskopet har haft på den kollektive bevidsthed i store dele af verden i sin korte levetid. Interessen for Webb, både fra medierne og fra folk generelt, har været større og mere vedvarende end noget andet teleskop.

En ting er, hvad medierne og den brede offentlighed måtte mene om Webb-teleskopet. Hvad med astronomerne, som jo trods alt er dem, som teleskopet er bygget til, og som er dem, som bruger teleskopet. Har Webb haft et lige så stort impact, hvis man spørger dem? Svaret er et rungende ja. I skrivende stund er det blot 15 måneder siden, at Webb-teleskopet begyndte at indsamle data. I den tid har Webb-teleskopet leveret bemærkelsesværdige resultater på tværs af stort set alle astronomiens områder, og dets bidrag til vores forståelse af universet har allerede været banebrydende.

Hvorfor Webb?

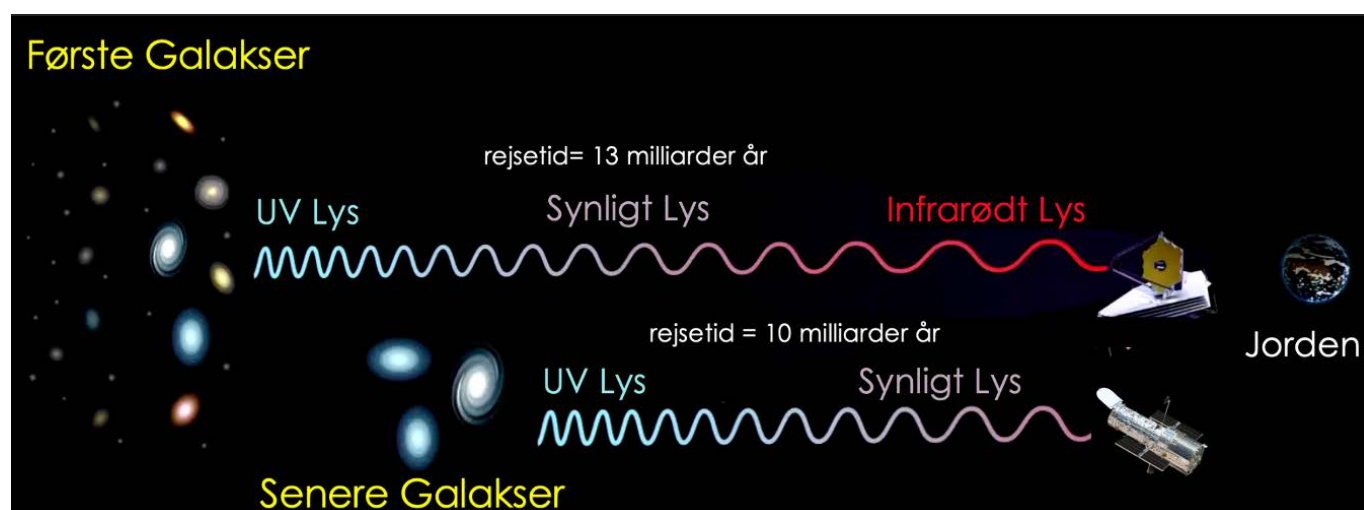
I over 30 år har Hubble-rumteleskopet været det førende optiske teleskop, og i den periode har det transformeret vores forståelse af universet på stort set alle fronter. Dog er Hubble fundamentalt begrænset i sin evne til at

observere de første galakser, primært fordi teleskopet er optimeret til observationer i det ultraviolette og synlige lys.

Udfordringen består i, at lyset fra stjernerne i de tidlige galakser hovedsageligt når Jorden som infrarødt lys med længere bølgelængder end synligt lys. Selvom Hubble kan observere en smule i det nær-infrarøde spektrum, er det ikke tilstrækkeligt til at observere de tidligste galakser.

De tidlige galakser udsender størstedelen af deres lys i den ultraviolette og synlige del af det elektromagnetiske spektrum, men på grund af universets udvidelse strækkes lysets bølgelængde under dets rejse mod Jorden. Dette fænomen kaldes kosmologisk rødforskydning og betegnes med bogstavet z . Det er sådan, at jo længere lyset rejser, desto mere bliver det rødforskydet. Helt præcist er det sådan, at forholdet mellem bølgelængden (λ_{udsendt}) af lyset, da det blev udsendt fra galaksen og bølgelængden ($\lambda_{\text{observeret}}$) af lyset, da blev observeret, er: $\lambda_{\text{observeret}}/\lambda_{\text{udsendt}} = 1 + z$. En galakses rødforskydning fungerer derfor som en målestok for, hvor langt væk galaksen er, og dermed også som en indikation af, hvor lang tid lyset fra galaksen har været på sin rejse mod os.

Webb-teleskopet er derimod optimeret til at detektere infrarødt lys, som strækker sig over et bølgelængdeinterval fra $0,6 \mu\text{m}$ til $28 \mu\text{m}$, dvs. fra det synlige røde lys til mid-infrarødt lys, og er altså "tunet" til at se lyset fra de første galakser.



Figur 1. Lys udsendt fra stjernerne i de tidligste galakser undergår kosmologisk rødforskydning på dets rejse gennem universet, og ankommer til os som infrarødt lys. Kun Webb-teleskopet har den fornødne følsomhed til at observere dette ekstremt svage infrarøde lys fra de første galakser. Til sammenligning er Hubble bedre egnet til at observere galakser, hvor lyset har været undervejs i lidt kortere tid, og dermed kun er blevet rødforskydet til det synlige og nær-infrarøde bølgelængdeområde.

Derudover har Webb-teleskopet et hovedspejl med en diameter på 6,5 m, hvilket svarer til et lysindsamlingsareal, der er godt syv gange større end Hubble, som havde en spejldiameter på 2,4 m. Dette gør, at Webb ikke alene kan indsamle mere lys end Hubble, og dermed observere svagere objekter, men teleskopet har også en markant bedre evne til at opfange detaljer. Denne evne kaldes vinkelopløsningen, θ , og den skalerer med λ/D , hvor λ er bølgelængden af det observerede lys, og D er teleskopets spejldiameter. Menneskeøjets vinkelopløsning er cirka 1 bueminut (1/60 grader), hvilket svarer til at kunne læse bogstaver, der er 1 cm høje i en afstand på 10 m. Til sammenligning kan man med Hubbles vinkelopløsning læse samme bogstaver i en afstand på godt 12 km. Webb-teleskopet har en tilsvarende vinkelopløsning, men i det infrarøde lys, hvilket er helt unikt.

Kort sagt er det Webbs evne til at observere infrarødt lys, kombineret med dets enorme hovedspejl, som giver teleskopet en enorm følsomhed og vinkelopløsning, der gør Webb til en hypereffektiv "maskine" til at detektere de første galakser.

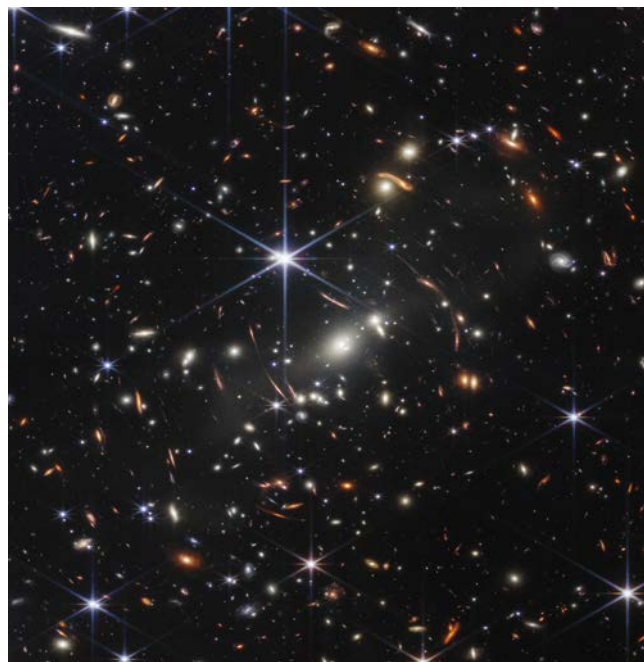
Rekorder sprænges

Før Webb var det, ikke overraskende, Hubble, som havde rekorden for opdagelsen af den fjerneste kendte galakse. Det drejede sig om galaksen GNz11 i stjernebilledet Storebjørn. I 2016 annoncerede man opdagelsen af GNz11, og det blev estimeret, at dens rødforskydning var $z \sim 11$, hvilket svarer til blot 400 millioner år efter Big Bang. GNz11 var en enestående opdagelse med Hubble. På trods af en ihærdig indsats over mange år fra forskellige forskerhold fandt man ingen andre galakser med Hubble så langt tilbage i det tidlige univers. Af den grund var der en forventning umiddelbart før Webbs opsendelse, at man måske ikke ville finde mange galakser i det meget unge univers.

De bekymringer blev gjort til skamme med offentliggørelsen af det første Webb billede den 11. juli 2022. Det første billede fra Webb, præsenteret af ingen ringere end præsident Joe Biden direkte fra Det Hvide Hus, demonstrerede med imponerende tydelighed teleskopets kraft. Billedet, kaldet *Webbs First Deep Field*, er centreret på en stor galaksehob, som befinder sig godt 4,6 milliarder lysår væk og bærer det prosaiske navn SMACS0723. Alene i dette billede, hvis udstrækning på himmelen svarer til størrelsen af et sandkorn holdt ud i strakt arm, kan man observere tusindvis af meget fjerne galakser. I dette første billede med Webb, som svarede til en samlet eksponeringstid på blot 12,5 timer, havde man opnået et skarpere og dybere billede af kosmos, der indeholdt endnu fjernere galakser, end dem man havde fundet i de dybeste og mest følsomme billeder med Hubble.

I de første måneder var der en hektisk aktivitet blandt astronomer, der med de nye sensationelle Webbdato stræbte efter at finde galakser endnu længere væk end tidligere, og dermed skubbe vores observationer af de første galakser stadig tidligere tilbage til the Big Bang. Næsten hver dag blev der fremført nye Webbdato påstande om, at man havde fundet ekstremt fjerne

galakser. Mange af disse resultater blev offentliggjort med det samme online og endda på Twitter uden først at gå igennem den påkrævede peer-review proces. De sidste nye Webbresultater blev præsenteret og diskuteret på Twitter.



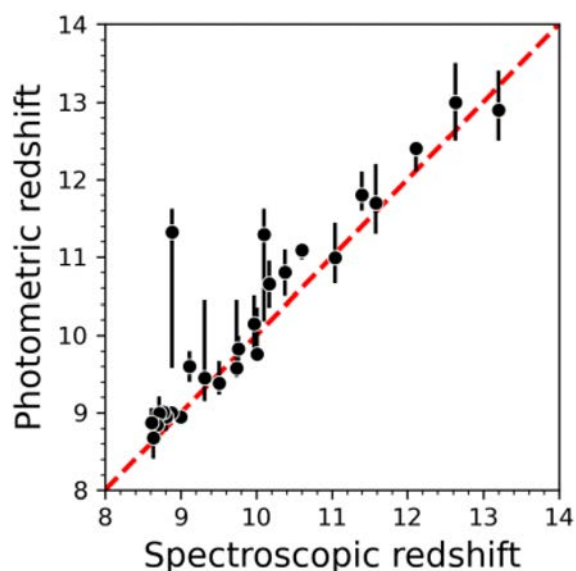
Figur 2. Webb's First Deep Field – det første billede fra Webb-teleskopet, offentliggjort den 11. juli 2022. Billedet viser galaksehoben SMACS0723 (afstand 4,6 milliarder lysår), og repræsenterer en samlet eksponeringstid med Webb på 12,5 timer. I dette første billede med Webb fandt man galakser, som sprængte Hubbles afstandsrekord. (NASA, ESA, CSA, STScI).

Set i bakspejlet gik det måske lige lovligt stærkt. I en hektisk søgen efter hurtige resultater, stolede man på rødforskydningsestimater, der var udledt fra enkle lysstyrkebaserede målinger – det man kalder fotometriske rødforskydninger. Disse er nemme at opnå, men langt mindre præcise end direkte målinger af rødforskydning. Sidstnævnte kan kun opnås gennem spektroskopiske observationer – såkaldte spektroskopiske rødforskydninger, hvor individuelle spektrallinjer og deres relative forskydning observeres – men kræver betydeligt længere observationstid.

I oktober 2022 udsendte Space Telescope Science Institute i Baltimore, som er dem, der er ansvarlige for at operere Webb, en opdateret kalibrering af NIRC-amdata, som betød en lille ændring i de lysstyrkebaserede målinger fra dette instrument. Det var dog nok til, at man i visse tilfælde måtte kraftigt nedjustere publicerede fotometriske rødforskydningsmålinger. Det var især mange af de ekstremt høje fotometriske rødforskydninger, som var blevet rapporteret i de første uger og måneder efter de første Webbdato, som viste sig at være ved markant lavere rødforskydninger.

Efterhånden som Webb har målt spektroskopiske rødforskydninger for flere og flere fjerne galakser, er det også blevet muligt at efterprøve den statistiske præcision af de fotometriske rødforskydninger. Det viser sig, at statistisk set er de fotometriske rødforskydninger overestimeret i forhold til den sande (spektroskopiske)

rødforskydning [1], hvilket er demonstreret i figur 3. Grunden til dette skyldes kombinationen af at, 1) man ser flere galakser ved lave end ved højere rødforskydninger, og 2) de fotometriske bestemmelser har en betragtelig usikkerhed. Det medfører, at der vil være flere galakser ved lav rødforskydning, hvor den fotometriske rødforskydning overestimerer den sande værdi, end der er fjerne galakser, hvis rødforskydning undervurderes via den fotometriske fremgangsmåde. Dette er et eksempel på en generel statistisk effekt, som den berømte britiske fysiker, Sir Arthur Eddington, som den første beskrev i 1913, hvorfor effekten er opkaldt efter ham (*Eddington bias*) [2].



Figur 3. Rødforskydningsbestemmelser af fjerne galakser baseret på fotometriske målinger (y-aksen), versus deres spektroskopiske rødforskydninger (x-aksen). Det ses, at der er en svag, men signifikant tendens til, at de usikre fotometriske rødforskydninger overvurderer de sande spektroskopiske rødforskydninger. Figuren er gengivet fra [1].

I skrivende stund er den fjerneste galakse, som er spektroskopisk verificeret, observeret med en rødforskydning på $z = 13,2$, hvilket svarer til 300 millioner år efter the Big Bang.

Forvoksede galakser?

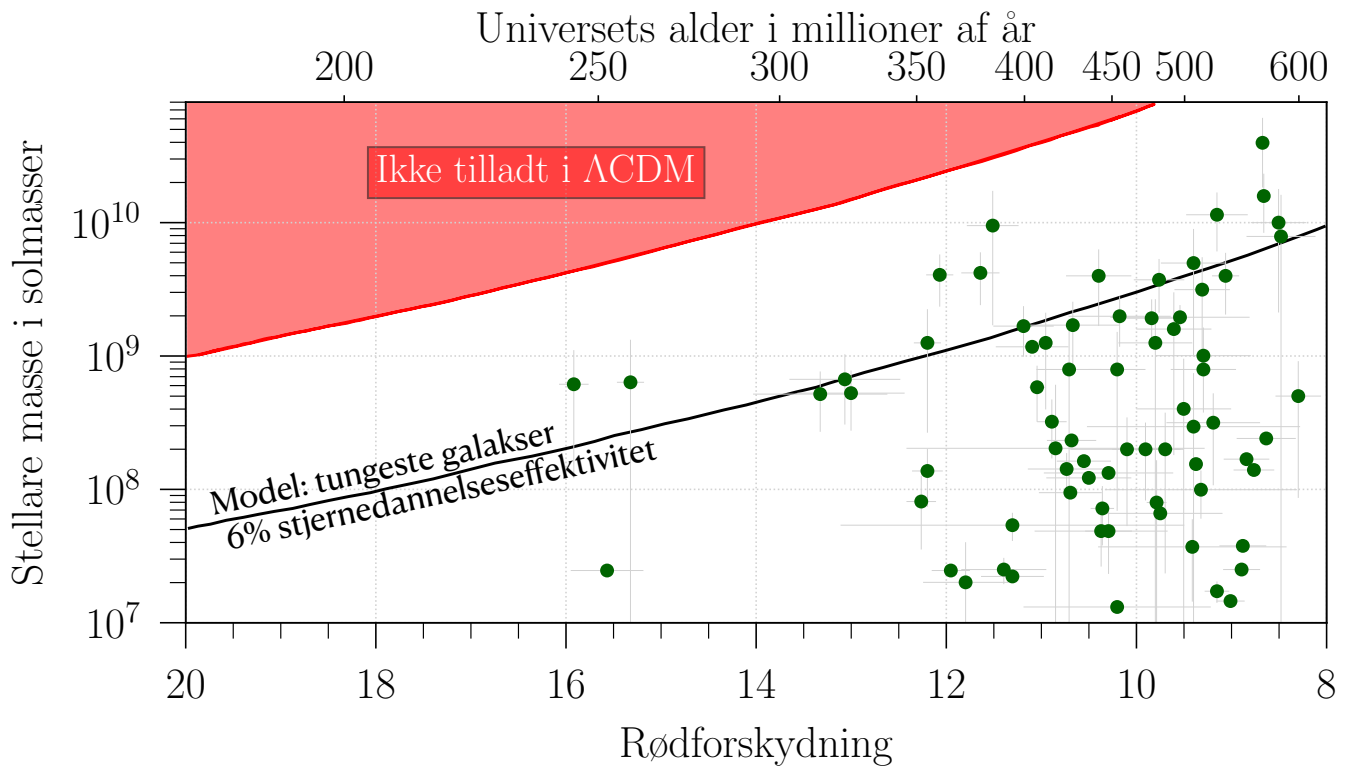
Det bedste værktøj, vi har til at forstå dannelsen af de første galakser, er Λ CDM-modellen, som er en teoretisk ramme, der beskriver universets udvikling i kølvandet på Big Bang. Ifølge Λ CDM-modellen, som bygger på præcisionsmålinger af den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling, såvel som målinger af fordelingen af galakserne på meget stor skala, udgøres universets makroskopiske bestanddele af mørkt stof, mørk energi, baryonisk stof (det stof vi kender og består af, det vil sige primært protoner, neutroner og elektroner) og fotoner. Mikroskopiske kvantefluktuationer i de allerførste øjeblikke af Big Bang blev eksponentielt forstørret af en inflatorisk udvidelse af universet og manifesterede sig som makroskopiske perturbationer i stof og energi i et varmt og næsten homogent univers. Den fortsatte udvidelse medførte en gradvis afkøling af universet som tillod en forstærkning af de positive perturbationer (områder med en overtæthed af stof og energi) under

påvirkning af tyngdekraften. Perturbationerne manifesterer sig primært i fordelingen af det mørke stof, som der er langt mere af end det baryoniske stof (forholdet er cirka 1:8), og det mørke stof klumper sig over tid sammen i haloer (*dark matter halos*), der fungerer som en slags "skeletter" for de første galakser. Under påvirkning af deres tyngdekraft, flyder den baryoniske gas ind i de mørke haloer, hvor den akkumulerer sig og bliver komprimeret, hvilket til sidst fører til dannelsen af de første stjerner og dermed de tidligste galakser i vores kosmiske historie. Denne fascinerende proces, hvor en lang række komplicerede fysiske processer gør sig gældende, markerer begyndelsen på den epoke af kosmisk evolution, som kaldes det Kosmiske Daggrø (Cosmic Dawn) og er af afgørende betydning for vores forståelse af, hvordan vores vidunderlige galakseverden blev til.

I Λ CDM-modellen vokser galakserne sig større og tungere hierarkisk over tid, således at mindre galakser med små mængder stjerner smelter sammen (merger) og danner større og tungere galakser, som så efterfølgende kan smelte sammen med andre tungere galakser. Λ CDM-modellen forudsiger således, at den relative forekomst af galakser i det meget unge univers er en funktion af galaksernes stjerneindhold (deres stellare masse): for et givet kosmisk volumen i det tidlige univers vil der være flest små og ikke særligt tunge galakser, mens tungere galakser vil være gradvist mere sjældne. Ifølge Λ CDM-modellen er der dog en øvre grænse for den maksimale stellare masse af en galakse vi kan forvente at finde for et givet kosmisk volumen. Denne øvre grænse svarer til, at al den baryoniske gas bliver brugt til stjernedannelse (100% stjernedannelseseffektivitet), se figur 4.

En vigtig observational test af Λ CDM-modellen er derfor at bestemme hyppigheden af tunge galakser i det meget unge univers for at se, om det stemmer overens med modellens forudsigelser. Webbs store følsomhed i det infrarøde lys gør den til det ideelle teleskop til at foretage netop denne test. Allerede i ugerne efter de første Webb-observationer begyndte man at finde adskillige eksempler på 'forvoksede' galakser, der eksisterede, da universet kun var nogle få hundrede millioner år gammelt. Disse galakser udviste en større lysstyrke (luminositet) og indeholdt dermed – var konklusionen – flere stjerner end Λ CDM-modellen kunne forklare for galakser på et så tidligt tidspunkt i universets historie. Disse resultater var potentielt epokegørende og i kølvandet på dem fulgte publikationer i det prestigefyldte tidsskrift samt forsidehistorier på CNN og andre mainstream medier [4].

En vigtig observational test af Λ CDM-modellen er derfor at bestemme hyppigheden af tunge galakser i det meget unge univers for at se, om det stemmer overens med modellens forudsigelser. Webbs store følsomhed i det infrarøde lys gør den til det ideelle teleskop til at foretage netop denne test. Allerede i ugerne efter de første Webb-observationer begyndte man at finde adskillige eksempler på "forvoksede" galakser, der eksisterede, da universet kun var nogle få hundrede millioner år gammelt.



Figur 4. De grønne cirkler viser målinger med Webb-teleskopet af fjerne galakseres stellare masse, altså hvor mange stjerner de har dannet, og deres rødforskydning. En given rødforskydning kan omregnes til en tilsvarende alder for universet. Den røde kurve svarer til, at alt det baryoniske stof i de tungeste haloer af mørkt stof er blevet omdannet til stjerner (100% effektivitet), hvilket er urealistisk. Adapteret fra [3]. Den sorte kurve svarer til vores bedste modelforudsigelse af den øvre grænse for de tungeste galakser, man ville forvente at finde i COSMOS-Webb-gennemmønstringen, som p.t. er den største gennemmønstring af himmelen med Webb (0,6 kvadrater). I modelforudsigelsen er det antaget, at 6% af det baryoniske stof er omdannet til stjerner, og det ses, at visse af galakserne observeret af Webb-teleskopet ligger betydeligt over forudsigelsen.

Disse galakser udviste en større lysstyrke (luminositet) og indeholdt dermed – var konklusionen – flere stjerner end Λ CDM-modellen kunne forklare for galakser på et så tidligt tidspunkt i universets historie. Disse resultater var potentielt epokegørende og i kølvandet på dem fulgte publikationer i det prestigefyldte tidsskrift samt forsidesider på CNN og andre mainstream medier [4].

I skrivende stund er denne tilsyneladende spænding mellem Webbs målinger af de tidligste galakser og forudsigelserne fra Λ CDM-modellen fortsat ikke løst. Men der er en voksende konsensus om, at det ikke er Λ CDM-modellen, der er noget galt med, men snarere de metoder vi benytter os af til at bestemme masserne af de tidligste galakser. For eksempel, når man skal estimere den stellare masse af en galakse, bliver man nødt til at gøre en antagelse om den relative hyppighed af lette versus tunge stjerner, der bliver dannet ud af gassen i galaksen. Generelt er det sådan, at der bliver dannet færre tunge stjerner end lette stjerner, og man har længe antaget, at dette forhold er tilnærmelsesvist “universelt” fra en galakse til den anden. Men man er begyndt at indse, at denne antagelse sandsynligvis ikke holder for de tidligste galakser. Gassen i disse galakser er formentlig ikke “forurenset” af tungere grundstoffer i samme grad som galakserne, som man finder til senere kosmiske tider. Dette medfører, at gassen har sværere ved at køle ned, fragmentere og danne lette stjerner og vil dermed resultere i en afvigelse i forholdet mellem

tunge og lette stjerner i de tidlige galakser, sammenlignet med det “universelle” forhold, som gør sig gældende i de senere galakser. Lysstyrken af de tidlige galakser ændres ikke nævneværdigt af dette, da den primært bestemmes af, hvor mange tunge stjerner der er. Anvender man det “universelle” forhold mellem tunge og lette stjerner, når man skal konvertere lysstyrken af de tidlige galakser til en stellar masse, vil man altså overvurdere, hvor tung galaksen er, hvilket kan give anledning til den spænding, man ser med Λ CDM-modellen. Anvendes derimod et mere realistisk forhold, nedjusteres masserne tilsvarende, og der er ikke længere nogen spænding.

En anden mulighed, som kan løse problemet for os, er, at vi har overset et ikke ubetydeligt bidrag til de tidlige galakseres lysstyrke fra det supertunge sorte hul, som vi forventer befinder sig i den centrale kerne af galakserne. Dette er blot to blandt flere forklaringer, som er i stand til at nedjustere de stellare masser af de tidligste galakser.

De næste 10 år med Webb

Med Webb-teleskopet er der taget hul på en ny fantastisk epoke i astronomien, hvor data, vi før blot kunne drømme om, nu er tilgængelige i overflod. Der er ingen tvivl om, at et nyt vindue er åbnet til det helt unge univers, og som jeg har forsøgt at redegøre for i denne artikel, er der allerede, efter blot godt 15 måneder af Webb-observationer, gjort vigtige nye opdagelser, og nye spørgsmål og udfordringer er opstået. Det forventes dog, at Webb vil leve i mindst 10 år endnu, og det

er endnu alt for tidligt at sige, hvad de største Webb-opdagelser vil være.

Litteratur

- [1] S. Serjeant og T. J. L. C. Bakx (2023) “Objects in JWST’s mirrors are closer than they appear”, *Nature Astronomy*, bind 7, side 1143–1144. arxiv.org/abs/2308.13347.
- [2] A.S. Eddington (1913) “On a formula for correcting statistics for the effects of a known error of observation”, *Mon. Not. R. Astr. Soc.*, bind 73, side 359–360.
- [3] C. Casey m.fl. (2023) “COSMOS-Web: Intrinsically Luminous $z \gtrsim 10$ Galaxy Candidates Test Early Stellar Mass Assembly”, *ApJ*, accepteret. arxiv.org/pdf/2308.10932.pdf

- [4] I. Labbé m.fl. (2023) “A population of red candidate massive galaxies ~ 600 Myr after the Big Bang”, *Natur*, bind 616, side 266–269. arxiv.org/abs/2308.13347.



Thomas Greve er professor og Co-Director af Cosmic Dawn Center på DTU Space. Han er dansk Co-Principal Investigator på det europæiske MIRI GTO-konsortium og forsker i dannelsen og udviklingen af galakser og galaksehobe.

I Nobelpristageres fodspor – Kirstine Meyer Aften med traditionsrigt legat til ung astrofysiker

Cecilie Pedersen

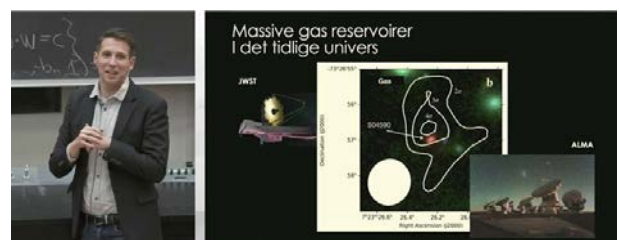


Den 23. oktober 2023 bød Selskabet for Naturlærens Udbredelse velkommen til en festlig Kirstine Meyer Aften med uddeling af det prestigefyldte Kirstine Meyers Mindelegat til astrofysikeren Kasper Elm Heintz fra Niels Bohr Institutet.

Dorte Olesen motiverede valget af Kasper Elm Heintz blandt mange gode kandidater indstillet af universiteterne i Danmark og sagde blandt andet:

“Kasper Elm Heintz’ forskning på Niels Bohr Institutet er inden for observationel astrofysik med specielt fokus på at undersøge universets spæde begyndelse. Han har arbejdet på alt fra at forstå, hvordan de diffuse hydrogen- og heliumatomer efterladt efter Big Bang blev akkumuleret og derved dannede de første galakser og stjerner, og den efterfølgende dannelse af de tungere grundstoffer, som vi kender fra Jorden i dag, såsom kulstof, ilt og nitrogen. Kasper bruger og analyserer data fra de største internationale observatorier, både på Jorden og i rummet, herunder specielt James Webb Rumteleskopet (JWST). Hans arbejde er i frontlinien af den internationale forskning inden for feltet. Kasper er 32 år og adjunkt, men allerede førsteforfatter til 20 videnskabelige artikler og medforfatter på yderligere

59, hvoraf nogle er publiceret eller under review i anerkendte journaler som Nature og Science. Med denne imponerende publikationsliste skilte Kasper sig ud i et felt, der ellers indeholdt mange virkelig dygtige unge forskere. I sidste uge kunne vi læse i videnskab.dk om nogle af hans spændende resultater om unge galakser, der netop er udkommet i Nature Astronomy. Han lægger også stor vægt på at formidle sin viden, ligesom han allerede er vejleder for en ph.d.-studerende og fem kandidatstuderende.”



Overrækkelsen af diplomtet blev foretaget af Merete Bilde, der selv fik legatet i 2001, og nu er professor ved Aarhus Universitet og i spidsen for grundforskningscentret Center for Chemistry of Clouds.

Aftenen bød på et foredrag af Merete Bilde om “Aerosoler i atmosfæren: fra havoverflade til skyer og klima”, hvor hun trak en linie tilbage til den forskning, hun i 2001 selv fik Kirstine Meyers Mindelegat for. Derefter talte Kasper Elm Heintz om “Et kosmos bliver dannet: Galakser i det tidlige Univers med JWST”.

Begge foredrag kan findes på SNU's Youtubekanal (www.snu.dk → Foredrag).

Legatet og aftenen var støttet af Carlsbergs Mindelegat.

Før Hubble: Om galaksernes tidlige historie

Helge Kragh, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Mens der i dag er næsten uendeligt mange galakser, har der gennem det meste af astronomiens historie kun været en enkel galakse, nemlig Mælkevejen. I artiklen gives et rids af tågernes historie fra oldtiden til slutningen af 1800-tallet, hvor det endnu ikke var anerkendt, at der findes galaktiske systemer hinsides vor egen Mælkevej.

Når astronomer taler om galaksernes historie, mener de den måde, galakser er blevet dannet og siden har udviklet sig. Men her skal "galaksernes historie" forstås på en helt anden måde, nemlig som den opfattelse og viden man gennem historien har haft om de himmelske objekter, vi i dag betegner som galakser. Det er altså ikke galakserne selv, der står i centrum, men de forskere der har kortlagt dem og søgt at forstå, hvad objekterne er. Vores egen Mælkevej er en typisk spiralgalakse, en enorm samling af stjerner og gasskyer, og den er kun én af de ufatteligt mange galakser, der flyder rundt i universet. Dette er en forbavsende ny erkendelse, idet den har mindre end 100 år på bagen. Artiklen beskriver dele af den tidligere historie indtil slutningen af 1800-tallet, mange år før det stod klart, at Andromeda og andre galakser befinder sig langt væk fra Mælkevejen.

En anden vigtig forbemærkning er af sproglig art. Ordet "galakse" har traditionelt været et synonym for Mælkevejen og derfor et entalsord, mens "galakser" i flertal hovedsageligt hører til perioden efter ca. 1950. Tidligere blev de på dansk typisk betegnet som "tåger" eller "stjernetåger", mens det engelske udtryk var "nebulae". Titlen på Edwin Hubbles velkendte bog fra 1936 var karakteristisk nok *The Realm of the Nebulae* og ikke "The Realm of the Galaxies" [1]. Strengt taget er det altså anakronistisk at tale om galakser i den periode, der her beskrives, hvilket jeg dog af pædagogiske grunde alligevel vil gøre af og til.

Fra Ptolemaios til Galilei

I sit berømte værk *Almagest* fra omkring 150 e.Kr. nævnte den græske matematiker og astronom Ptolemaios nogle få lyssvage stjerner, der mindede ham om tågeklatter, men uden at han hæftede sig ved dem. Han benævnte dem *nepheloeidés* fra det græske ord *nephos* (νέφος) for sky eller tåge. Da den persiske astronom Abd-al-Rahman al-Sufi 800 år senere skrev en udvidet version af Ptolemaios' stjerne-katalog, bemærkede han noget, der sært nok var undgået den græske autoritets opmærksomhed. Under optimale betingelser er Andromedagalaksen, der er Mælkevejens nabogalakse, nemlig synlig for det blotte øje, og den indgik i al-Sufis bog fra ca. 964 som en "tågeagtig klat". Senere blev al-Sufis bog om fiksstjerner kendt i Europa, hvor den og den tågeagtige klat blev bemærket af senmiddelalderlige astronomer (figur 1).

I starten af 1600-tallet var det dog Mælkevejen og ikke de små klatter på himlen, der tiltrak sig opmærksomhed, hvilket i høj grad skyldtes Galileis brug af den nye kikkert. I sin *Sidereus Nuncius* (Stjerne-

Budbringeren) fra 1610 kunne han konkludere [2, s. 62], at "Mælkevejen er intet andet end en talløs mængde af stjerner grupperet i klynger." På den anden side, om Andromeda eller andre af de tågede stjerner havde han intet at sige. Mælkevejen har jo altid været kendt og i overensstemmelse med græsk mytologi blev den af og til omtalt som *Galaxias* (Γαλαξίας), der er afledt af et græsk ord for mælk. Den latinske betegnelse er *via lactea*.



Figur 1. Håndskrift fra ca. 1420 med en latinsk oversættelse af al-Sufis skrift om fiksstjerner. Andromedatågen er angivet som en samling prikker ved munden af den store fisk.

Associationen mellem Mælkevej og galakse optræder i, hvad der muligvis er den første beskrivelse af Mælkevejen på dansk. I værket *Hexaëmeron Rhythmico-Danicum*, der var forfattet omkring 1630, men først udkom i 1661, skrev den lærde præst Anders Christensen Arrebo om Guds skabelse af verden [3, s. 205–208]. Han fandt også plads til at beskrive Galileis

kikkertobservationer og hvordan, de havde skabt et nyt billede af Mælkevejen:

Her giøris ej behof paa Melkevej at træde
 Oc med Viitløftighed beseer Galactis Sæde:
 Thi det ej andet er end Stierner smaa oc
 mange,
 Thi maae den Melcke-sti saa u-betraad
 hengange.
 Om du her tvister paa, Bruug Galilæi Øje,
 Saa kandst du selfver see, de Stierner i det
 høje.

Ligningen Mælkevej = galakse fremgår ikke blot klart af Arrebos værk, men også af al samtidig astronomisk litteratur.

En eller mange mælkeveje?

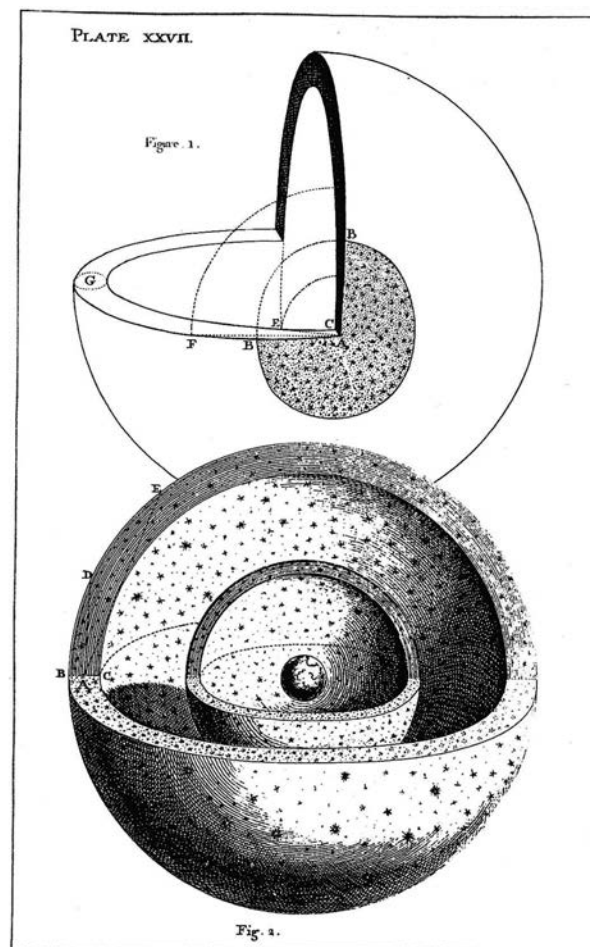
Oplysningstidens spekulative kosmologi som repræsenteret af Thomas Wright i England, Immanuel Kant i Tyskland og Pierre Louis Maupertuis i Frankrig, førte for første gang til ideen om galaktiske systemer hinsides Mælkevejen. Wright foreslog i 1750 en original men skrupforkert model for Mælkevejen, der for ham at se blot var et optisk bedrag (figur 2). Inspireret af Wrights tanker formulerede den 31-årige Kant fem år senere sin egen visionære kosmologiske teori i det anonymt udgivne værk *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels* eller, som titlen var i den danske oversættelse fra 1806, *Almindelig Naturhistorie og Theorie over Himmelen*.

Kants afhandling var en milepæl i kosmologiens idéhistorie, idet den argumenterede for et dynamisk univers, der i "myriader af millioner af århundreder" havde ændret sig og stadig befandt sig i en proces af både skabelse og forfald. I modsætning til Wright var han opmærksom på de fjerne tåger, som han ikke opfattede som enkelte stjerner, men derimod som hele verdener af stjerner af omtrent samme art som Mælkevejen. Kant hævdede, at tågerne ligesom Mælkevejen var formet som flade cirkulære skiver, der afhængigt af retningen til Jorden typisk ville ses som ellipser. "Disse elliptiske figurer er blot universer eller (så at sige) mælkeveje", skrev han [3, s. 221].

Med Kants værk har vi for første gang den grandiose idé om det materielle univers som bestående af enorme ekstragalaktiske strukturer, hvoraf Mælkevejen blot er en af utalligt mange. Senere talte man om denne kvalitative kosmologi som "ø-universet" (island universe), hvor tågerne eller galakserne er spredt ud over verdensrummet som øer i et gigantisk hav. Selv om Kant ikke selv benyttede denne metafor, brugte han en nærliggende, idet han betegnede tågerne som *Weltinseln*, altså verdens-øer.

Den tysk-franske polyhistor Johann Heinrich Lambert er kendt for sine bidrag til matematik og fotometri – nogle vil kende til "Lambert-Beers lov" – men han arbejdede også med astronomiske og kosmologiske emner. I *Cosmologische Briefe* fra 1761 fremlagde han en teori for universets struktur, der på flere måder

mindede om Kants, idet han som denne spekulerede, at tågerne var store samlinger af stjerner uden for Mælkevejen. Selv om ø-universet således var velkendt i oplysningstiden, varede det mere end et århundrede, før teorien vakte interesse blandt fagastronomer. Kants bog blev først alment kendt, efter Hermann von Helmholtz i et foredrag i 1854 henledte opmærksomheden på den.



Figur 2. Thomas Wrights koncentriske univers. Solen og Jorden befinder sig i den ydre kugleskal sammen med de fleste øvrige stjerner, hvilket Wright brugte til at forklare Mælkevejens udseende. I midten befinder sig Guds "hellige trone".

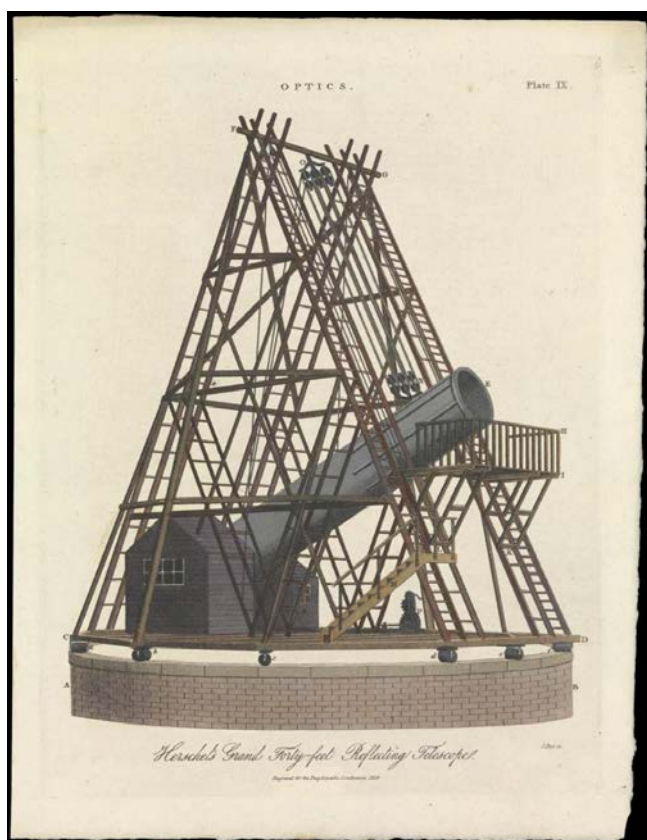
Tågerne kortlægges

Alt imens filosoferne filosoferede, påbegyndte astronomerne det møjsommelige arbejde med at indsamle data om de mærkelige tåger. Arbejdet startede så småt i 1716, da Edmond Halley i *Philosophical Transactions* beskrev 6 tåger, og det blev i første omgang fortsat af især franske astronomer. Således udgav Nicholas-Louis de Lacaille i 1755 – samme år som Kants afhandling udkom – et katalog, hvor han skelnede mellem tre kategorier af tågede objekter.

Det var dog først med Charles Messiers mere systematiske *Catalogue des Nébuleuses et des Amas d'Étoiles* (Katalog over Tåger og Stjerneheobe) fra 1774, at tågerne blev undersøgt i detaljer og søgt klassificeret. Messier, der primært var kometjæger, fandt i sin søgen efter kometer en række nye tåger, herunder som den første Krabbetågen alias M1. Kataloget omfattede oprindeligt 45 tågelignende objekter og i en senere version fra 1781

var tallet vokset til 103 objekter, som Messier angav med de numre, der stadig hyppigt benyttes. Således betegnede han Andromedatågen som M31, Oriontågen som M42 og Malstrømtågen som M51.

De nævnte arbejder blegnede dog i forhold til William Herschels langt mere omfattende og ambitiøse kortlægning med sine superbe spejlkikkerter (figur 3), der i 1786 resulterede i et *Catalogue of One Thousand Nebulae and Clusters of Stars*. I senere versioner af sit katalog udbyggede han det med yderligere ca. 1500 objekter og efter hans død fortsatte sønnen John Herschel det stort anlagte projekt. Den midlertidige kulmination kom i 1864, da John Herschel udgav et katalog med 5079 tågelignende objekter. Men hvad var de egentlig for noget? Var de samlinger af stjerner eller bestod de, eller i det mindste nogle af dem, af en tåget homogen substans der ikke lod sig opløse i enkeltstjerner?



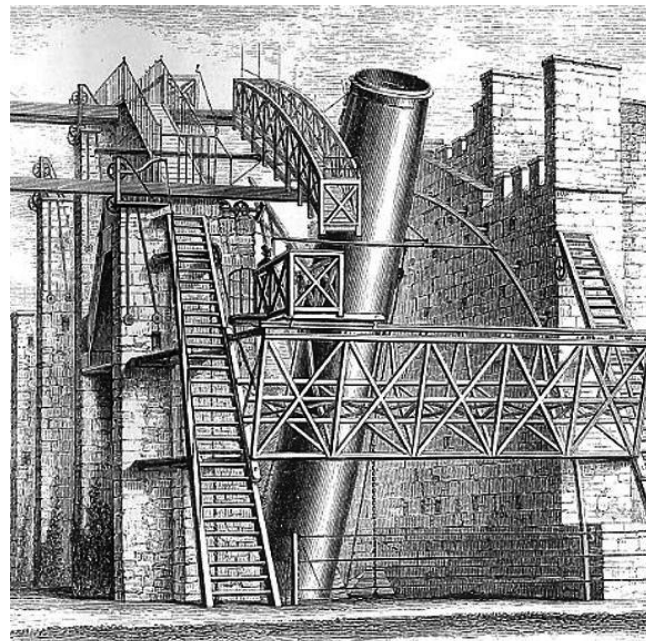
Figur 3. William Herschels store spejlteleskop fra ca. 1790 med spejlet monteret i et 12 m langt jernrør.

Med hensyn til dette fundamentale spørgsmål var William Herschel af to sind. Nogle af de undersøgte objekter fremstod som "en slags mælket tågethed, ligesom dette vidunderlige og uforklarlige fænomen omkring Q Orionis [M42]; mens andre skinner med et svagere, spraglet lys, som viser, at de kan opløses i stjerner" [5, s. 232]. Ikke desto mindre mente han, at med tilstrækkeligt gode kikkerter måtte alle tåger kunne opløses i enkeltstjerner. Senere ændrede han dog mening og konkluderede, at mange tåger bar deres navn med rette. Måske de var himmelske laboratorier, hvori stjernerne blev dannet ved kondensation af den tågede substans.

Herschel betegnede Mælkevejen som "vor tåge" og foreslog, omtrent som Kant tidligere havde gjort, at der var en nær analogi mellem tågerne og Mælkevejen. Desuden var han blandt de første til at indse, at når astronomer studerer tågerne, ser de tilbage i den umådeligt fjerne fortid: "Når vi ser ... en af disse meget fjerne tåger ... må lysstrålerne som overfører billedet til øjet have været der i ... næsten to millioner år [og for så lang tid siden] må dette objekt have eksisteret på stjernehimlen" [5, s. 235]. Med andre ord, han anslog eller rettere gættede på, at afstanden til tågerne var af størrelsesordenen en million lysår.

Parsonstowns Leviatan

Herschels formodning om at bedre og større kikkerter ville afsløre mysteriet om tågenes struktur og natur viste sig berettiget. I 1844 kunne den engelsk-irske rigmand og amatørastonom William Parsons alias Lord Rosse indvie et enormt spejlteleskop, der gennem de næste 70 år forblev verdens største kikkert. Det finpolerede spejl havde en diameter på næsten 2 meter, og det var monteret i et ca. 18 m langt rør (figur 4). I folkemunde var kikkerten kendt som "Parsonstowns Leviatan" efter lokaliteten i Irland og det kolossale monster Leviatan, der omtales flere steder i Det Gamle Testamente.

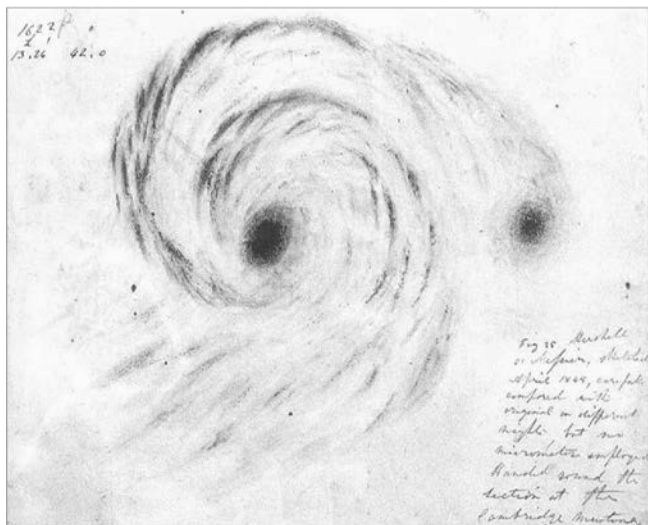


Figur 4. Leviatan-monstret fra Parsonstown.

Det højteknologiske monster gav straks vigtige resultater, hvoraf det vigtigste var opdagelsen af spiraltåger eller -galakser. Allerede i 1845 fastslog Parsons spiralstrukturen for M51 og senere viste han, at også M31, M99 og andre tåger havde den karakteristiske spiralform. De tegninger, som Parsons og hans assistenter lavede af spiraltåger, var forbløffende korrekte (figur 5). Den fotografiske teknik var endnu i sin spæde vorden, og først i 1880 lykkedes det den amerikanske amatørastonom Henry Draper at fotografere en tåge, nemlig Oriontågen. Det første fotografi af Andromeda stammer fra 1887.

Med Leviatan-kikkerten viste Parsons også, at der var stjerner i udkanten af Andromedatågen. Andre af hans

observationer antydede, at alle tåger i princippet kunne opløses i enkeltstjerner, sådan som Herschel først havde formodet. Selv om Parsons ikke selv hævdede denne påstand, vandt den i en tyveårig periode almindelig accept. Men med astrospektrografiens udvikling skulle det vise sig, at påstanden ikke holdt vand.



Figur 5. Parsons' tegning fra april 1845 af spiralgalaksen M51.

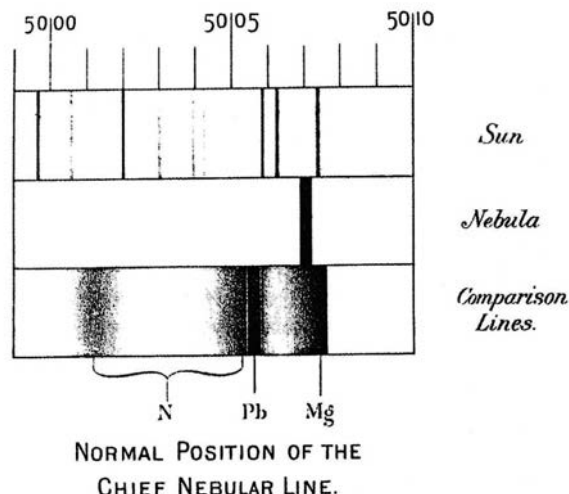
Galaktisk astrospektrografi

Som allerede antydte skyldtes en stor del af astronomiens fremskridt i 1800-tallet amatører. Endnu en af slagsen, og endnu en englænder, var William Huggins, der sammen med sin kone Margaret var en pioner i spektroskopiske studier af det svage lys fra stjerner og tåger. Ved at sammenligne spektret fra en tåge med spektre optaget i laboratoriet af henholdsvis gasser og glødende faste stoffer håbede han at kunne afgøre den gamle strid om tågernes sande natur. Han berettede senere om, hvordan han en aften i 1864 studerede lyset fra en såkaldt planetarisk tåge i stjernebilledet Dragen og til sin forbavselse kun så en enkelt spektrallinje [6, s. 106]:

Tågens lys var monokromatisk og kunne derfor ikke, i modsætning til ethvert andet lys jeg havde undersøgt med prisme, udbredes til at danne et fuldstændigt spektrum. ... Tågens gåde var løst. Svaret, som var kommet med lyset selv, lød: Ikke en samling af stjerner, men en lysende gas.

Huggins skelnede som den første mellem ægte tåger (som Oriontågen) og stjernehåger (som Andromeda), eller hvad der kom til at hedde galakser. Førstnævnte var karakteriseret ved diskrete emissionsspektre og sidstnævnte ved kontinuerte spektre. I den "katteøj-tåge" (NGC 6543), han observerede i 1864, fandt han to diskrete linjer, han ikke kunne identificere med et kendt grundstof og som han derfor foreslog at stamme fra et nyt grundstof, der kun fandtes i tågerne (figur 6). Det hypotetiske grundstof nebulium vedblev med at spøge, selv om der ikke var plads til det i det periodiske system. Først i 1927 blev spektrallinjerne afsløret som

stammende fra almindelig oxygen omend i form af den usædvanlige O^{2+} -ion [7].



Figur 6. Den dominerende nebulium-spektrallinje som gengivet i en afhandling af den amerikanske astronom James Keeler fra 1894.

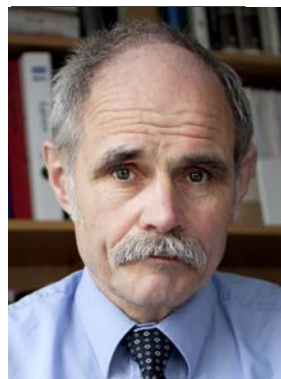
Selv om astrospektroskopien viste sig som et særdeles vigtigt redskab i astronomien, besvarede den ikke umiddelbart det afgørende spørgsmål om tågernes afstand og placering i forhold til Mælkevejen. Tanken om de egentlige stjernehåger som galakser i lighed med vor egen var nærliggende og blev diskuteret, men i slutningen af 1800-tallet var teorien om ø-universet stadig kontroversiel. De fleste astronomer ville nok bifalde, hvad den anerkendte astronomiske forfatter Agnes Mary Clerke sagde i sin bog *The System of the Stars* fra 1890 [8, s. 368]: "Spørgsmålet om, hvorvidt tåger er eksterne galakser, behøver næppe diskuteres længere. ... Ingen kompetent tænker, der har kendskab til al den tilgængelige information, kan nu hævde, at nogen enkelt tåge er et stjernesystem af samme art som Mælkevejen."

Der skulle gå mere end 30 år, før det viste sig, at Clerke og hendes meningsfæller tog helt og aldeles fejl. Når det varede indtil midten af 1920'erne, før Hubble afgjorde spørgsmålet om ø-universet, skyldtes det hovedsageligt, at man ikke kendte afstanden til Andromeda og andre galakser. Men denne mere succesrige del af historien, hvor usikkerhed og tvivl endelig blev til sikker viden, er uden for rammerne af nærværende artikel. Den er indgående beskrevet i videnskabshistoriske artikler og bøger [9; 10].

Litteratur

- [1] E. Hubble (1936) "The Realm of the Nebulae", Yale University Press.
- [2] G. Galilei (1989) "Sidereus Nuncius", red. A. Van Helden, University of Chicago Press.
- [3] H. Kragh (2005) "Dansk Naturvidenskabs Historie", bind 1, Aarhus Universitetsforlag.
- [4] I. Kant (2012) "Universal Natural History and the Theory of the Heavens", red. E. Watkins, Cambridge University Press.
- [5] O. Pedersen og H. Kragh (2000) "Fra Kaos til Kosmos", Gyldendal.

- [6] W. Huggins og M. Huggins (1909) "The Scientific Papers of Sir William Huggins", Wesley and Son.
- [7] R.F. Hirsh (1979) "The riddle of the gaseous nebulae", *Isis*, bind 70, side 197–212.
- [8] A.M. Clerke (1890) "The System of the Stars", Longmans, Green and Co.
- [9] R. Berendzen, R. Hart og D. Seeley (1984) "Man Discovers the Galaxies", Columbia University Press.
- [10] R. Smith (1982) "The Expanding Universe: Astronomy's Great Debate 1900–1931", Cambridge University Press.



Helge Kragh er professor emeritus ved Niels Bohr Institutet og arbejder især med de fysiske videnskabers nyere historie.

Nobelprisen i fysik 2023

Christine Pepke Gunnarsson, *Kvant*

ATTOSEKUNDFYSIK. Som læserne nok har hørt, gik Nobelprisen i fysik i år til Pierre Agostini fra Ohio Universitet i USA, Ferenc Krausz fra Max Planck Institutet i Tyskland og Anne L'Huillier fra Lunds Universitet i Sverige.



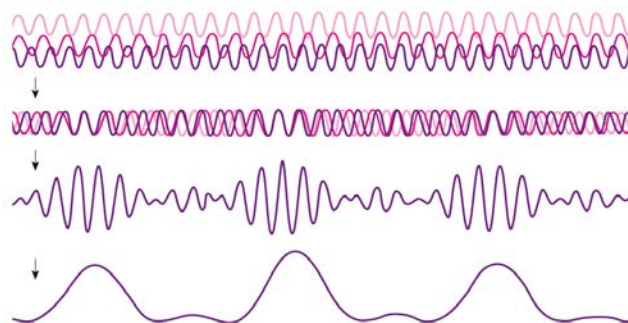
De fik sammen Nobelprisen for deres forskning i attosekundpulser, som er pulser, der er så korte, at man kan bruge dem til at se elektroners hurtige bevægelser. Atomers bevægelser foregår i løbet af femtosekunder, altså langsommere end elektronerne. Et attosekund er så lille en del af et sekund, at det svarer til antallet af sekunder, der har været i universet siden Big Bang! Til sammenligning slår et hjerte ca. 1 slag i sekundet. Nobelprismodtagernes forskning kan bruges til at generere attosekundpulser af lys til blandt andet at studere elektroners dynamik i stof.

Anne L'Huillier opdagede i 1987 dannelsen af attosekundpulser ved at studere vekselvirkningen af laserlys med atomer i en ædelgas. Pierre Agostini og Ferenc Krausz demonstrerede efterfølgende dannelsen af serier af lyspulser, som var meget kortere end tidligere muligt. I lang tid var et femtosekund anset som den nedre grænse for varigheden af en lyspuls, som man kunne producere i laboratoriet.

L'Huillier opdagede attosekundpulser, da hun sendte laserlys gennem en ædelgas og konstaterede, at der derved blev dannet lysbølger med højere frekvenser (højere-harmoniske bølger). De højfrekvente lysbølger dannes, når lyset fra laseren vekselvirker med atomerne i gassen og overfører ekstra energi til elektronerne, der er

tunneleret væk fra atomkernerne. Når elektronerne igen bliver bundet til atomkernerne, udsender de den ekstra energi som lysbølger ved højere frekvenser. L'Huillier viste, at når de højere harmoniske bølger er i fase, kan de overlapse og danne attosekundpulser.

Efterfølgende brugte Agostini og Krausz, L'Huilliers opdagelse til at danne attosekund-lyspulser. Agostini producerede en serie af lyspulser og ved at sammensætte lyspulserne med en forsinket del af den originale laserpuls, kunne de undersøge, hvordan de højere harmoniske bølger var i fase med hinanden. De kunne desuden bestemme pulslængden til 250 attosekunder.



Figur 1. Grafikken viser, hvordan ultraviolette højere harmoniske bølger er i fase (øverst), hvorefter de forstærker eller udslukker hinanden. Resultatet er attosekundpulser.

Samtidig lykkedes det Krausz at isolere en enkelt puls der varede 650 attosekunder fra lyspulsserien. Denne puls brugte de til at studere, hvordan elektroner bliver trukket væk fra deres atomkerner.

Nobelprismodtagernes bidrag har muliggjort at studere processer, der er så hurtige, at de tidligere var umulige at følge, og de har demonstreret, at de kan lave meget korte lyspulser, der kan følge elektroner, når de bevæger sig eller ændrer energi. I dag er det muligt at producere lyspulser ned til få attosekunder. Der er flere mulige anvendelser af forskningen. Indenfor elektronik er det vigtigt at forstå og kontrollere, hvordan elektroner opfører sig i et materiale. Desuden kan attosekundpulser bruges til at identificere forskellige molekyler, hvilket er vigtigt indenfor medicinsk diagnostik.

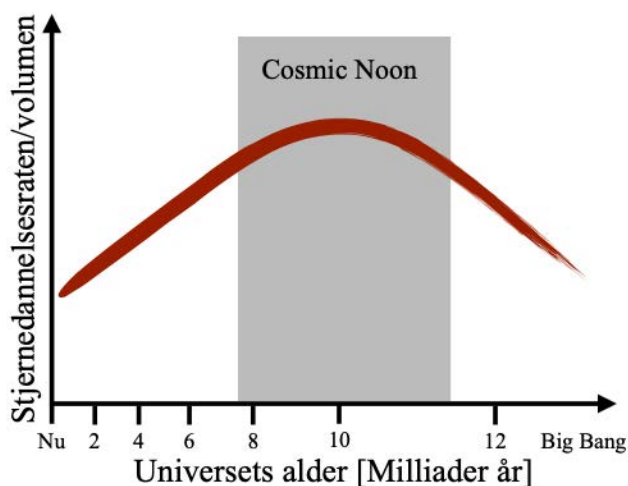
Kilde: nobelprize.org

Starburstgalakser

Bitten Gullberg, Cosmic Dawn Center (DAWN), DTU Space

Stjernedannelsesraten har varieret gennem universets udvikling, og de støvrige “starburst”-galakser dannede stjerner 10–100 gange hurtigere end Mælkevejen. Starburstgalakser er imidlertid svære at simulere i kosmologiske modeller, og deres udvikling er et stort mysterium.

Når vi ser på galakserne i det lokale univers, ser vi galakser med en mangfoldighed af former, farver og stjernedannelsesaktivitet, og vi spørger os selv: hvordan er disse galakser blevet født? Hvordan har de udviklet sig? Og hvordan “dør” de? Astrofysikere arbejder på at besvare disse spørgsmål ved at bruge universet som en tidsmaskine; jo længere væk de observerede galakser er, jo ældre er de. Så ved at kortlægge de lokale galakseres stamtræ forsøger vi at bestemme, hvordan de første galakser har udviklet sig til de galakser, vi ser i dag. Dette arbejde bliver desværre besværliggjort af, at produktionen af stjerner i galakserne ikke har været konstant gennem universets historie. Efter dannelsen af de første galakser for ca. 13 milliarder år siden, steg stjernedannelsesraten (dvs. hvor effektive de enkelte galakser er til at omdanne gas til stjerner, se figur 1), og toppede 1,5–5 milliarder år senere. Stjernedannelsesraten har sidenhen været aftagende, og de fleste stjerner, vi ser i de lokale galakser, er produceret, da stjernedannelsesraten toppede (for 8–11,5 milliarder år siden).



Figur 1. Stjernedannelsesraten som funktion af universets alder. Efter dannelsen af de første galakser steg stjernedannelsesraten for universet og toppede mellem ca. 8 og 11,5 milliarder år siden i en tidsalder, vi kalder Cosmic Noon (eller den kosmiske middag). Siden den tid har stjernedannelsesraten været aftagende.

Dengang så galakserne meget anderledes ud, end de gør i dag. Et eksempel på en anderledes galaksepopulation er de støvrige “starburst”-galakser. Disse galakser dannede stjerner ca. 10–100 gange hurtigere end Mælkevejen og bidrog derfor med ca. 30% til produktionen af stjerner, da stjernedannelsesraten toppede [1]. På trods af deres dominerende bidrag til stjernedannelsen, er

starburstgalakser svære at reproducere i kosmologiske simuleringer, og deres udvikling er derfor fortsat et mysterium. For at danne stjerner 10–100 gange hurtigere end Mælkevejen, skal galakserne bruge store mængder af gas, som stjernerne bliver dannet af. Men det er endnu en gåde, hvor denne store mængde gas kom fra, hvad der satte gang i denne høje stjernedannelsesrate, og hvad der efterfølgende fortsat har drevet stjernedannelsen.

Støv, gas og infrarød varmestråling

Disse starburstgalakser var rige på støv. Støv gør det svært at observere stjernerne i galakser, da det absorberer lyset fra specielt de unge og varme O- og B-stjerner. Denne absorbering af lys varmer støvet op og får det til at udsende varmestråling i den infrarøde del af det elektromagnetiske spektrum. Dette betyder, at selv om disse støvrige galakser er svære at se i optiske og ultraviolette bølgelængder, så er de meget klare i infrarøde bølgelængder. Starburstgalakser er som sagt meget langt væk (8–11,5 milliarder lysår), og i den tid lyset har rejst gennem universet, har universet udvidet sig, og har dermed strakt lyset, så dens bølgelængde nu er endnu længere. Det vil sige, at det lys, der blev udsendt for 8–11,5 milliarder år siden som infrarødt lys, observerer vi i dag ved millimeter (mm) eller submillimeter (sub-mm) bølgelængder. Disse galakser er derfor meget klare, når de observeres ved mm- og sub-mm-bølgelængder, men næsten usynlige ved optiske og UV-bølgelængder. De bliver derfor også kaldt sub-mm-galakser.

Ved disse mm/sub-mm bølgelængder kan man også observere den kolde gas i disse fjerne galakser. I modsætning til støv, som udsender varmestråling over et bredt bølgelængdeområde og i et næsten kontinuert spektrum, så udsender atomer og molekyler lys i meget specifikke bølgelængder. I atomer afhænger lysets bølgelængde af, hvilke energiniveauer elektronerne bevæger sig fra og til, og i molekyler afhænger den også af, hvordan molekylet roterer og vibrerer. Stjernerne bliver dannet af koldt (ned til 10 K) molekylært gas, som består mest af molekylær hydrogen (H_2). Desværre er linjerne fra H_2 meget svære at detektere. I stedet bruges det molekyle, der er næstmest af, nemlig carbonmonoxid (CO), som er blandet med H_2 , men har den fordel at være nemmere at observere. For at kunne blive klogere på, hvorfor starburstgalakser er så effektive til at danne stjerner, skal vi vide hvor varm og hvor tæt den molekylære gas er. Det gør vi blandt andet ved at observere forskellige rotationslinjer fra CO -molekyler. Molekyler både roterer og vibrerer, men fra CO er det ro-

tationslinjerne, der er mest brugt, da de er de klareste og nemmeste af observere. Når molekylerne i en gas støder ind i hinanden, så udveksler de energi, men molekylet vil gerne af med denne energi igen og udsender derfor en foton, som vi observerer som spektrallinjer. De linjer, vi ser, samt styrken af linjerne afhænger af, hvor tæt gassen er, og hvor meget molekylerne støder ind i hinanden, hvilket fortæller om densiteten og temperaturen af gassen. Ved at observere en række af rotationslinjerne fra CO for en galakse og sammenligne lysstyrken af linjerne, kan vi bruge modeller og beregninger til at bestemme den gennemsnitlige densitet og temperatur af den molekulære gas. Denne information er vigtig for at blive klogere på, hvordan gasforholdene er i starburstgalakser i et forsøg på at finde ud af, hvad der driver stjernedannelsen.

Observationer

De første starburstgalakser blev opdaget i slutningen af 1990'erne, ved brug af et sub-mm-teleskop på Hawaii med navnet James Clerk Maxwell Telescope (JCMT). Når man observerer ved lange bølgelængder som for eksempel mm/sub-mm bølgelængder, så vil selv et teleskop som JCMT, med en diameter på 15 m, give observationer med en lav opløsning. Sammenhængen mellem opløsning af observationer (Θ) og diameteren af teleskopet (D) er givet ved $\Theta \propto \lambda/D$. Det vil sige, at opløsningen er så lav, at man ikke kan se strukturer eller former på galakser, men kun hvor klare de er. Studiet af starburstgalakser blev derfor i mange år betragtet som "studiet af blobs".

Dette ændrede sig markant for 10 år siden, da teleskopet Atacama Large Millimeter / Sub-millimeter Array, også kendt som ALMA, blev taget i brug. ALMA består af 66 antenner fordelt på et plateau i Atacamaørkenen i Chile i en højde af ca. 5000 m (figur 2). I den højde er man mindre generet af vand og ustabiliteter i atmosfæren, som ellers gør det svært at observere ved mm/sub-mm bølgelængder. Hver antenne er 12 m i diameter og forbundet, så man kan kombinere signalerne fra hver antenne ved brug af interferometri. Dette fænomen kender de fleste, som har siddet på en badebro og smidt to sten i vandet samtidig. Der hvor krusningerne på vandet møder hinanden, vil der være konstruktiv interferens, når bølgetop møder bølgetop, og destruktiv interferens, når bølgetop møder bølgedal.

Ved at have 66 antenner kan man fordele dem over et område på op til 16 km i diameter, og man kan dermed simulere et teleskop med en diameter på 16 km. Andre teleskoper har benyttet sig af samme teknologi og bølgelængdeområde før ALMA, for eksempel Sub-mm Array (SMA) på Hawaii og Plateau de Bure Interferometer (PdBI) i Frankrig. Men ALMA har været banebrydende med antallet af antenner og følsomme detektorer, som kan observere i et bredere bølgelængdeområde end tidligere, samt de gode vejrforhold. ALMA er et samarbejde mellem astrofysikere i Europa, Nordamerika og Sydøstasien. ALMA har gjort det muligt for os at se detaljer såsom former på for eksempel starburstgalakser i mm/sub-mm bølgelængder, som vi

ikke havde mulighed for tidligere. De data, man får fra ALMA, er både billeder og spektroskopi samtidig. Data er det man kalder 3D, hvilket vil sige, at man får et billede for hvert bølgelængdeinterval, man observerer i, så man får en terning med dimensionerne (pixel-x, pixel-y, bølgelængde). Dette gør det muligt for os at se galaksernes strukturer i billederne og samtidig få lysstyrken og formen på spektrallinjer, som fortæller os hvilke grundstoffer og molekyler, der er i gassen i galaksen, samt hvor meget der er af disse gasser. Samtidig gør det os i stand til at bestemme temperaturen og tætheden af gassen.

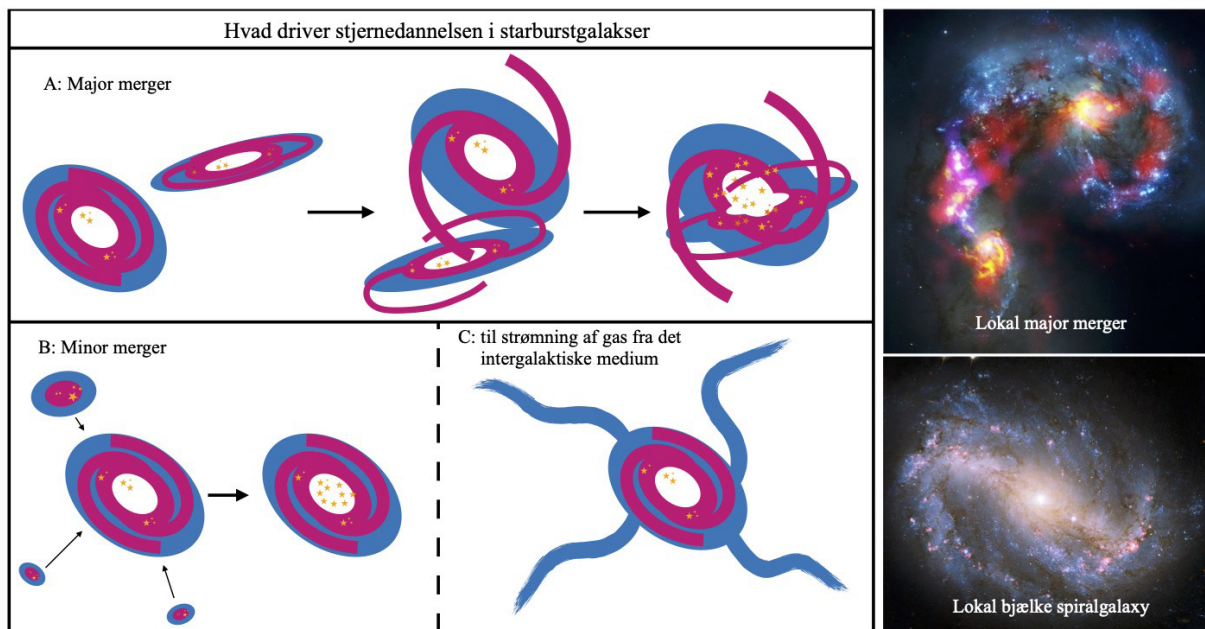


Figur 2. Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) på et plateau i Atacamaørkenen i Chile i ca. 5000 m højde. ALMA består af 66 antenner med en diameter på 12 m, der kan flyttes rundt, så man kan simulere et teleskop med en diameter på op til 16 km (ESO).

Det nyeste skud på stammen med hensyn til teleskoper og studiet af starburstgalakser er James Webb Space-Teleskopet (JWST). JWST blev sendt op den 25. december 2021 og befinder sig ca. 1,5 millioner km fra Jorden. JWST har flere instrumenter om bord, der kan tage både billeder og spektra. JWST observerer i det infrarøde, det vil sige længere bølgelængde end rumteleskopet Hubble, og det gør det muligt for os at se gennem støvet og få et detaljeret billede af, hvordan stjernerne er fordelt i starburstgalakser. Viden om, hvor støvet og den stjernedannende gas i galakserne er koncentreret i forhold til stjernerne, giver os ny viden om samspillet mellem de forskellige komponenter, og hvad der antændte og drev stjernedannelsen.

Kosmiske sammenstød eller galaksekannibalisme?

Da man først opdagede starburstgalakser i slutningen af 1990'erne [2], var deres sub-mm flux, og dermed deres anslåede stjernedannelsesrate så høj, at man kun kunne forklare det ved "major mergers"-begivenheder [3]. "Major mergers" eller "store sammenfletninger" er to galakser (på ca. samme størrelse som Mælkevejen), der kommer så tæt på hinanden, at tyngdekraften får dem til at indgå i en kosmisk dans over flere millioner år, og til sidst smelter sammen til en galakse (figur 3a). Denne sammenfletning tilfører store mængder gas til den endelige sammenflettede galakse, og kollisionen presser gassen sammen og antænder den høje effektivitet i stjernedannelsen.



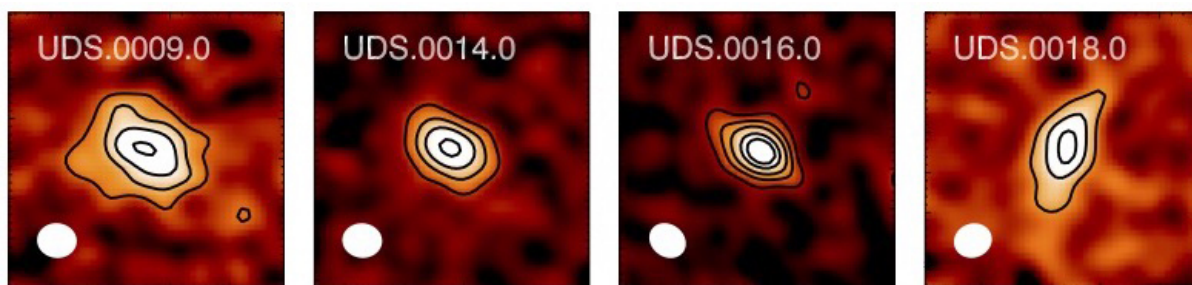
Figur 3. Panel A: major merger-begivenhed, hvor to store galakser smelter sammen til en galakse og dermed tilføjer store mængder gas til den endelige galakse samt antænder stjernedannelsen. Panel B: Minor merger-begivenhed, hvor en stor central galakse i en lille gruppe “spiser” de omkringliggende galakser, som dermed langsomt leverer gas til at holde den høje stjernedannelseseffektivitet kørende. Panel C: Tilstrømning af gas fra det intergalaktiske medium. Omkringliggende gas falder ned på galaksen og tilføjer dermed den nødvendige gas for at holde stjernedannelsen kørende. De to paneler til højre er eksempler på en lokal major merger-begivenhed (ALMA (ESO/ NAOJ/NRAO), NASA/ESA Hubble Space Telescope), og en lokal bjælkespiralgalakse (NASA, ESA og Hubble SM4 ERO).

Denne sammenfletning fører også til, at den endelige galakse har en irregulær form (morfologi), som ikke kan karakteriseres som en skive med spiralarme, eller elliptiske som nogle af de andre typiske galaksemorfologier, vi kender. Denne irregulære form er et af karakteristikaene for major mergers.

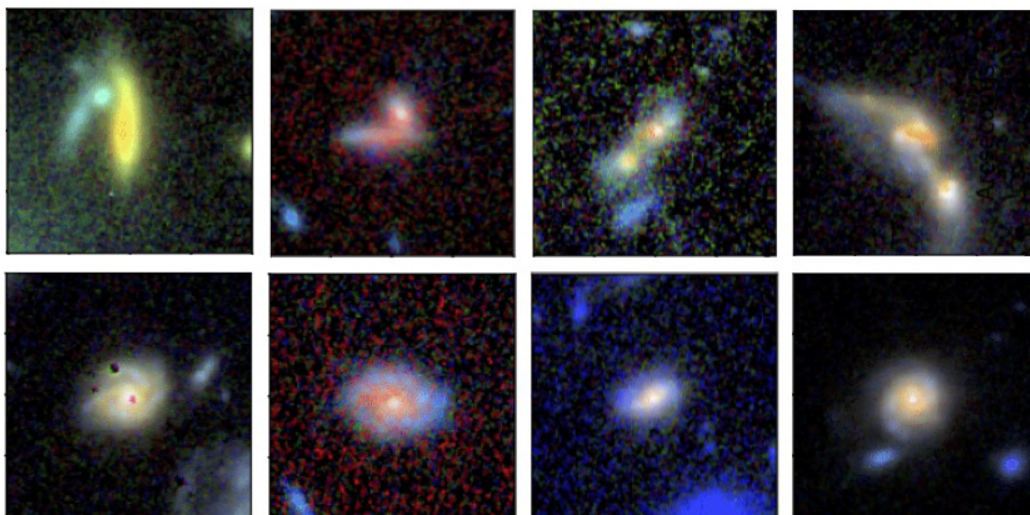
At den høje stjernedannelsesrate er drevet af major merger-begivenheder, har været den accepterede teori de sidste ca. 20 år. Men ALMA har været banebrydende og har afdækket, at det måske ikke er så simpelt, som vi tror. ALMA har givet os observationer med høj opløsning af støvet og gassen i disse galakser og har blandt andet afsløret, at morfologien af støvet kan sammenlignes med de bjælker, vi ser i den centrale del af spiralgalakser i vores lokale univers [4], selv Mælkevejen menes at have sådan en bjælke (figur 4). Denne mere ordnede morfologi er i modstrid med den irregulære morfologi, man forventer ved major merger-begivenheder. Det vil sige, at der formodentlig også er andre mekanismer, der kan antænde og drive stjernedannelsen. To andre muligheder

er minor merger-begivenheder (små sammenfletninger, figur 3b) og tilstrømning af gas fra det intergalaktiske medium til galakserne. Minor merger-begivenheder kan beskrives som en form for “galaksekannibalisme”, hvor en stor central galakse tiltrækker mindre satellitgalakser i nærheden, som så smelter sammen med den store centrale galakse. Minor merger-begivenheder menes at ske oftere end major merger-begivenheder og tilfører dermed sammenlignelige mængder af kold gas til den centrale galakse.

En tredje mulighed er tilstrømning af gas fra det intergalaktiske medium (figur 3c). Galakser hober sig ofte sammen i galaksehobe. Rummet imellem dem er ikke tomt, men kan indeholde store mængder kold gas. Denne gas kan “falde ned” på galakserne ved hjælp af tyngdekraften og bidrage til gasreservoiret til stjernedannelse. Minor merger-begivenheder og gastilstrømning er derfor også mulige forklaringer på, hvor de store mængder gas kommer fra.



Figur 4. Eksempler på starburstgalakser observeret med ALMA. Den aflange strukturer er tegn på, at støvet repræsenterer høj stjernedannelse i en central bjælke i en skiveformet galakse. Dette tyder på, at starburstgalakser måske har en mere ordnet struktur end den man forventer at se ved major merger-begivenheder.



Figur 5. Eksempler på observationer fra JWST af fjerne starburstgalakser. Øverste række: eksempler på major merger-begivenheder. Nederste række: eksempler på starburstgalakser, som er skriveformede og har antydninger af spiralarme og bjælker.

Samtidig er gastilførelsen så gradvis, at den ikke forårsager store ændringer på den store centrale galakses morfologi, hvilket betyder at spiralgalakserne kan beholde deres eventuelle bjælke og spiralarme, men stadig have en meget høj stjernedannelsesrate.

Observationer fra JWST har for nyligt givet et nyt indblik i, hvordan starburstgalakser ser ud. Ved at kende den præcise position fra ALMA til at udpege starburstgalakserne i observationer fra JWST, ser vi, at nogle af galakserne har tydelige tegn på major merger begivenheder i form af irregulære morfologier eller to galakser i gang med at flette sammen (Figur 5). Andre, derimod, har ordrede spiralstrukturer og tyder derfor mest på at være drevet af minor merger eller tilstrømning af gas fra det intergalaktiske medium. Alt dette tyder altså på, at stjernedannelsen i starburstgalakser er drevet af forskellige mekanismer, og at populationen er meget divers med mange forskellige morfologier. Det næste vil være at finde ud af, om en af de tre mekanismer til at tilføje, antænde og drive stjernedannelsen skete oftere end de andre, og om der er en sammenhæng mellem hvor høj stjernedannelsesaktiviteten er, og mekanismen der driver den.

Litteratur

- [1] C.M. Casey, D. Narayanan og A. Cooray (2014) "Dusty star-forming galaxies at high redshift", *Physics Reports*, bind **541**, side 45–161.
- [2] I. Smail m.fl. (1998) "A Deep Sub-mm Survey of the Distant Universe", *Bulletin of the American Astronomical Society*, bind **30**, side 1152.
- [3] A.W. Blain m.fl. (2002) "Submillimeter galaxies", *Physics Reports*, bind **369**, side 111–176.
- [4] B. Gullberg m.fl. (2020) "An ALMA survey of the SCUBA-2 Cosmology Legacy Survey UKIDSS/UDS field: high-resolution dust continuum morphologies and the link between sub-millimetre galaxies and spheroid formation", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, bind **490**, side 4956–4974.



Bitten Gullberg er postdoc og Carlsberg Fellow på DAWN/DTU Space.

PFEIFFER VACUUM

Nyhed

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



Tlf. 3166 8708
Lars.Scholte@pfeiffer-vacuum.dk
www.pfeiffer-vacuum.com

Aarhus i rummet

*Mads Fredslund Andersen, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet,
Andreas Dideriksen, Arctic Research Center, Aarhus Universitet,
og Oliver Millinge, Institut for Elektro- og Computerteknologi, Aarhus Universitet*

Siden 2019 har Aarhus Universitet haft studentersatellitter i kredsløb om Jorden, og det har sat gang i en rivende udvikling, som bl.a. har ført til det nationale studentersatellitprogram DISCO.

I 2015 blev Andreas Mogensen den første dansker i Rummet. Dette var en milepæl for Danmark og dansk rumforskning og blev startskuddet på Aarhus Universitets rumprogram¹. Universitetet fik tilbudt en gratis opsendelse og udsendelse af en lille satellit fra den Internationale Rumstation (ISS) som en direkte konsekvens af Andreas Mogensens tur.

Udviklingen i "cubesats", dvs. små terningformede satellitter i enheder af $10 \times 10 \times 10 \times \text{cm}^3$ (1U), har i løbet af de seneste ca. 20 år gjort, at man i dag kan opsende en forholdsvis kompleks satellit til en overkommelig pris. Dette skyldes blandt andet private firmaer som SpaceX, som tilbyder "rideshare" missioner, som kan sende mange små satellitter i rummet på samme tid. Aarhus Universitet købte derfor en 1U-satellit fra det danske firma GomSpace ved Aalborg. Denne satellit fik navnet Delphini-1, med henvisning til delfinerne i Aarhus Universitets segl, og den blev udsendt fra ISS den 31. januar 2019. Delphini-1 missionen blev en stor succes, og det lille kamera om bord på satellitten leverer den dag i dag stadig nogle af de bedste billeder fra en 1U-studentersatellit på verdensplan. Den store succes med Delphini-1 samt Aalborg Universitets fremtrædende position inden for udvikling af studentersatellitter førte efterfølgende til det nationale studentersatellitprogram DISCO (DanIsh Student Cubesat prOgramme). DISCO-1, som er en 1U-cubesat, blev opsendt i foråret 2023, og den mest ambitiøse danske studentersatellit til dato, DISCO-2, skal efter planen opsendes i slutningen af 2024.

Aarhus Universitets interesse inden for udforskning af rummet og rumteknologi har siden rumprogrammets start ført til opstarten af det interdisciplinære tematiske center Aarhus Space Centre, *SpaCe*², som skal samle aktiviteterne, der omhandler rummet, rumforskning og rumteknologi, herunder bl.a. DISCO-2 og den mere videnskabeligt drevne STEP (STars and ExoPlanets)-mission.

Delphini-1

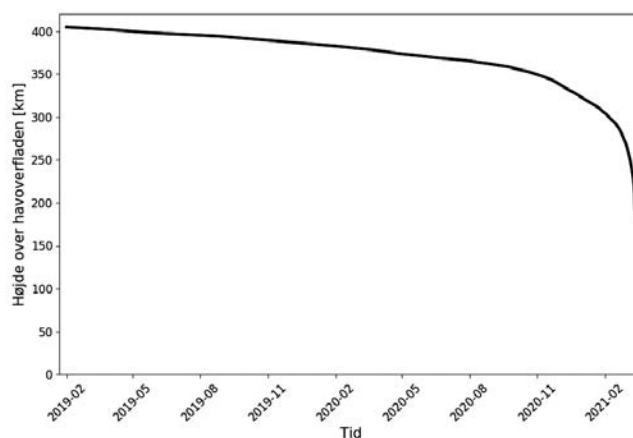
Delphini-1 missionen blev startet i 2016, da det europæiske rumagentur, ESA, tilbød en gratis opsendelse og efterfølgende udsendelse fra ISS. Denne takkede Aarhus Universitet ja tak til. Efterfølgende blev samarbejdet med GomSpace etableret, og studerende blev trænet i blandt andet satellitkommunikation ved dedikerede workshops. I 2017 blev satellitten samlet, testet og i 2018

transporteret til USA og afleveret til firmaet NanoRacks. Delphini-1 blev sendt i rummet med en SpaceX Falcon-9 raket den 5. december 2018 og ankom kort tid efter til ISS. Herfra blev den via NanoRacks robotarm sendt alene ud i rummet den 31. januar 2019. På figur 1 ses Delphini-1 lige efter udsendelsen fra ISS.



Figur 1. Delphini-1's udsendelse fra den Internationale Rumstation den 31. januar 2019. Satellitten blev udsendt fra NanoRacks robotarm, som ses øverst til højre, og Delphini-1 ses lige under solpanelet i bunden af billedet (NASA, NanoRacks).

Siden kredsede Delphini-1 omkring Jorden i lidt over 2 år, før den brændte op i atmosfæren den 14. marts 2021. Figur 2 viser satellittens gennemsnitshøjde over havoverfladen i løbet af dens tid i rummet.



Figur 2. Delphini-1's gennemsnitshøjde over havoverfladen fra udsendelse fra ISS til den brændte op i atmosfæren.

¹Marslab-gruppen på AU har tidligere sendt hardware i rummet. Se marslab.au.dk

²space.au.dk

Missionsmål

Delphini-1 missionen havde til hovedformål at vise, hvad det indebærer at gennemføre en satellitmission. Selvom selve satellitten var lille ($10 \times 10 \times 10 \times \text{cm}^3$), så skal den fremstilles, testes, opsendes og opereres. Desuden er der mange formaliteter og tilladelser, som skal være i orden, før en satellit kan sendes i rummet. Derudover var Delphini-1 en studenter satellit, hvilket betød at studerende var med i mange aspekter af missionen. Det var dem, der samlede satellitten, det var dem, der stod for den daglige kontakt til satellitten, og dem der planlagde, hvad der skulle tages billeder af og hvilke billeder, der skulle hentes ned via den dedikerede jordstation. Denne havde studerende også samlet og sat op på taget af en universitetsbygning i Aarhus.

Payload og data

Ud over computer, UHF-radio til kommunikation, batterier og solpaneler til strøm, og "magnetorquer rods", som er elektromagneter, der kan bruges til at stabilisere satellitten i forhold til Jordens magnetfelt, var Delphini-1 udstyret med et lille kamera (NanoCam 1CU) fra GomSpace. Dette havde en CMOS-farvesensor med 2048×1536 pixels på $3,2 \mu\text{m}$. Kameraet var udstyret med en 35 mm linse, som fra en højde på 400 km over havoverfladen vil give en opløsning per pixel på Jorden på ca. 40 m, den såkaldte "Ground Sampling Distance - GSD".

Uden aktiv kontrol skulle man være "heldig", at kameraet pegede mod det, man ønskede, når man ville tage et billede.

Den meget spændende og kritiske "første kontakt" tog lidt længere end håbet pga. en defekt på jordstationen. Da dette blev løst, blev der hurtigt skabt kontakt, og de studerende begyndte at tage billeder.

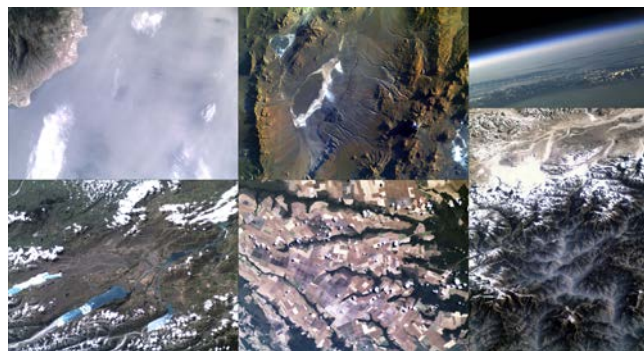


Figur 3. Delphini-1 temperatur- (øverst) og solsensor- (nederst) data fra ét kredsløb, hvor kun delen, hvor satellitten er i sollys, vises (fra 13:59 til 14:57). De farvede lodrette markeringer viser tidspunkter, hvor der blev taget et billede. De lille markeringer indikerer, at et billede pegede ud i det tomme rum (sort). De røde er, hvor kameraet pegede mod solen og de grønne er, hvor kameraet har taget billeder af Jorden (Delphini-1-holdet).

I løbet af de lidt over 2 år Delphini-1 var i rummet, blev banen og bevægelsen af satellitten analyseret for

bedre at kunne forstå, hvor og hvornår man bedst kunne tage billeder af Jorden. Data fra sensorer ombord på satellitten blev brugt i samspil med kameraet, som kunne verificere orienteringen. På figur 3 ses temperatur- og solsensordata for en periode på ca. en time i Delphini-1's kredsløb omkring Jorden. I denne time, hvor satellitten bevæger sig på den soloplyste side af Jorden, blev der systematisk taget billeder hvert fjerde minut, som kunne bruges til verificering af satellittens orientering.

Forståelsen af satellittens bevægelse i rummet blev kort tid inden missionens endeligt brugt til at afprøve en manøvre, som skulle ændre orienteringen. Det havde forinden vist sig, at det kun var muligt at tage billeder af Jorden på den sydlige halvkugle. Dette skyldes, at satellitten ret præcist orienterede sig i forhold til Jordens magnetfelt omkring aksens med kameraet. Manøvren i slutningen af missionens levetid blev en succes, og i månederne inden Delphini-1 efter planen brændte op i Jordens atmosfære, blev mange flotte billeder fra den nordlige halvkugle taget. Se eksempelvis figur 4 eller se flere på <http://projects.au.dk/da/ausatdk/delphini1dk/billeder>.



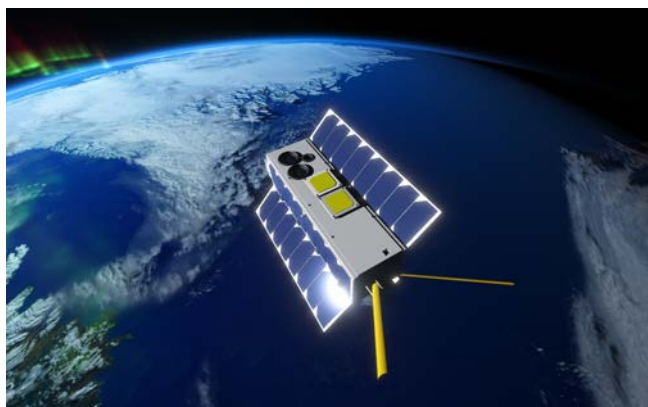
Figur 4. Billeder taget med Delphini-1 satellittens kamera. Øverst fra venstre: Gran Canaria, Chile, Horisonten over Himalaya. Nederst fra venstre: New Zealand, Brasilien, Nepal/Himalaya (Delphini-1-holdet).

DISCO-2

Det danske studenter satellitprogram DISCO (Danish Student Cubesat prOgramme) blev lanceret den 18. november 2020 og bidrager til at fastholde Danmarks position som en af de førende nationer inden for udvikling og produktion af CubeSats. Programmet lader studerende fra Aarhus Universitet, IT Universitetet i København og Syddansk Universitet være en del af alle aspekter af en satellitmission med henblik på at skabe dygtige kandidater med flair for rumteknologi til de voksende danske og europæiske rumvirksomheder. Derudover har programmet til formål at øge interessen for STEM-uddannelser i Danmark, og prioriterer derfor også, at de studerende besøger gymnasier og deltager i formidlingsevents. På denne måde skal DISCO sikre, at Danmark forbliver konkurrencedygtigt samt skabe fundamentet for fremtidige startups for ESABIC DK.

DISCO-2 bliver den anden satellit i DISCO-programmet, og den mest avancerede studenter satellit udviklet på dansk jord til dato. Studerende ønskede at bygge videre på erfaringerne gjort med Delphini-1. Dermed blev den ambitiøse mission om studiet af

klimaforandringer valgt den 7. juni 2021, efterfulgt af en lang periode med fundraising og forhandlinger med dansk industri. I januar 2023 blev satellitten bestilt hos Space Inventor A/S, og studerende er nu i gang med de sidste designdetaljer inden fremstillingen, tests og integration af hardware og software. De studerende bruger erfaringerne fra tidligere missioner samt ny viden til at presse de teknologiske grænser for CubeSats. Det endelige konceptdesign er en $10 \times 10 \times 30 \text{ cm}^3$ (3U)-satellit med 3 kameraer, som skal benyttes i studiet af klimaforandringer. Dertil forventes det, at DISCO-2 kan levere data med højere tidslig opløsning, end hvad der er muligt med data fra andre satellitter, som fx fra Copernicus Sentinel-2-satellitten. Efter planen skal DISCO-2 opsendes i efteråret 2024 med Momentus / SpaceX og blive bragt i et solsynkront polært kredsløb mellem 500 og 600 km's højde over havoverfladen. Et solsynkront kredsløb betyder, at en satellit i et sådant kredsløb vil flyve over samme sted på Jorden på samme tid hver dag. At banen er polær betyder, at DISCO-2 passerer over et punkt nær Nordpolen omtrent 15 gange i døgnet, imens Jorden roterer en omgang under satellitten. Netop dette kredsløb er valgt, da det giver mulighed for studerende og forskere at benytte satellittens kameraer til affotografering af områder på og omkring Arktis flere gange dagligt. Det forventes, at satellitten vil forblive operationel i 2–5 år, alt afhængigt af bl.a. solaktiviteten og specielt den præcise højde for udsendelsen.



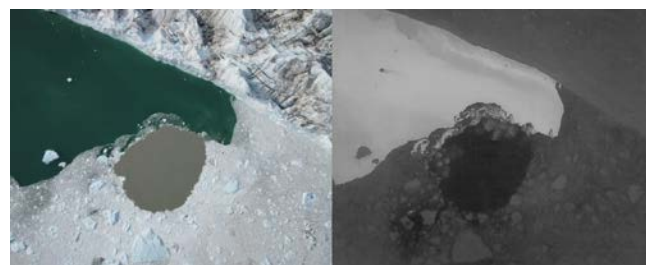
Figur 5. Illustration af DISCO-2 i kredsløb. (Grafik: Marcus Marcussen).

Missionsmål

For at bidrage til arktisk klimaforskning er DISCO-2 designet til at kunne måle og observere strukturer og dynamiske effekter i og omkring Grønland. Et af de videnskabelige mål for DISCO-2 er derfor at kunne foretage fotogrammetriske observationer, hvor der kan konstrueres et 3-dimensionelt billede af fx gletsjere og fjordsystemer m.m. Ved gentagne fotogrammetriske observationer forventes det derfor, at der kan beregnes, hvor hurtigt og hvor meget gletsjere i området formindskes. Ved fotogrammetriske observationer tager man en serie billeder af det samme objekt fra forskellige vinkler (fx ved en satellitoverflyvning af en gletsjerfront). Disse 2D-billeder kan herefter sammensættes til et 3D-billede for at opnå viden om størrelserne af de observerede objekter.

Foruden at se på gletsjerdynamik skal DISCO-2 også se på overfladetemperaturer ved hjælp af et termisk kamera. Især omkring gletsjerfronter kan overfladetemperaturen i fjorden variere meget og med meget veldefinerede grænser, da smeltevand fra gletsjere kan løbe ud i fjordene fra bunden af gletsjerne og derefter blandes med de dybereliggende og koldere vandlag. Pga. smeltevandets lave saltindhold vil dette skabe såkaldt subglaciale plumes, som "skubber" koldere vand op til overfladen og undervejs blander smeltevandet med fjordvandet. Et eksempel på en sådan plume kan ses både visuelt og termisk på figur 6. Observationer af disse subglaciale plumes er vigtige for at forbedre forståelsen af interaktionen i varmetransporten mellem hav/ocean og isen. Yderligere spiller subglaciale plumes også en rolle ved gletsjerkælvninger, hvilket igen påvirker afsmeltningen af gletsjere [2].

I samspil med eksisterende målestationer placeret på forskellige lokationer i Nordøstgrønland skal DISCO-2 også bidrage med at opskalere lokale "ground-truth"-observationer til større områder ved hjælp af satellitobservationer. Disse målestationer vil fungere som kalibreringspunkter for DISCO-2 samtidig med at DISCO-2 vil kunne benyttes til at forbedre forståelsen af klimaforandringerne i Nordøstgrønland på en større skala og over større arealer.



Figur 6. Visuel og termisk droneobservation af subglacial plume (grå cirkel i venstre billede) foran Hissingergletsjeren i Nordøstgrønland. Bemærk den tydelige temperaturforskel mellem plume og det omkringliggende overfladevand. (Jeffrey Taylor Kerby).

Payload og opbygning

De tre kameraer på DISCO-2 har hvert sit fokusområde og er sammensat ud fra et ønske om at kunne bidrage til arktisk klimaforskning og samtidig have mulighed for andre projektidéer for studerende fra de deltagende universiteter. To af kameraerne observerer i det visuelle spektrum og har ens CMOS-sensorer (Alvium 1800 U-2040 med Sony IMX541), men med forskellige optikker. Dette giver muligheden for at have både et vidvinkelkamera med et relativt stort synsfelt, hvilket gør det nemmere at genkende de områder, DISCO-2 observerer, samtidig med at det andet kamera med et mindre synsfelt giver mulighed for en bedre opløsning på $\approx 22 \text{ m/px}$. Det sidste er et termisk kamera fra FLIR, som observerer infrarøde bølgelængder mellem $7,5 \mu\text{m}$ og $13,5 \mu\text{m}$, og skal benyttes til at måle overfladetemperaturer. Se tabel 1 for nøgleparametre på de 3 kameraer. Udover de tre kameraer omfattes payloaden på DISCO-2 også af et SOM (System-on-Module)-modul, hvor observationer kan analyseres allerede inden billederne er sendt til

jordstationen ved hjælp af machine learning. Denne analyseproces skal hjælpe med at sortere i billederne, således at de mest anvendelige/bedste observationer bliver prioriteret i forhold til at blive downloaded først.

For at optimere brugen af DISCO-2 til videnskabelige observationer er satellitten foruden computer, UHF-radio, batterier, solpaneler og sensorer også udstyret med både en højhastigheds S-båndsradio og aktiv styring i form af 4 momenthjul. Disse hjul består af en motor med et fastmonteret svinghjul, hvor der ved at spinne op og ned på hastigheden af svinghjulet tilføjes et drejningsmoment, der får satellitten til at rotere langs en given akse. Udnyttes momenthjulenes fire akser, kan satellittens orientering styres med en nøjagtighed på 1° . Udover at orientere satellitten opstår der ved konstant rotation af momenthjulene også en impuls, som virker stabiliserende for satellitten, hvilket i sidste ende forbedrer muligheden for at opnå brugbare observationer.

Den store mængde data fra disse observationer kan så sendes til jordstationen, når DISCO-2 passerer over denne. S-båndsradioen giver mulighed for at opnå downloadhastigheder på flere Mbps, så alle billederne hurtigt kan blive hentet og analyseret på Jorden.

	Sensor str. [px]	Pixel [μm]	Fokal l. [mm]	FoV [km]	GSD [m/px]
Alvium	4512×4512	2,74	70	97×97	22
Alvium	4512×4512	2,74	16	42×425	94
Flir	640×512	12	36	117×94	183

Tabel 1: Nøgleparametre for de 3 kameraer på DISCO-2. Field of View (FoV) og GSD er beregnet ud fra en kredsløbshøjde på 550 km.

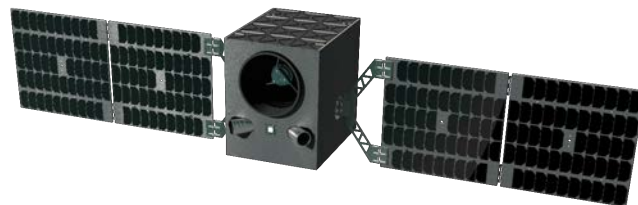
STEP

STEP (STars and ExoPlanet)-missionen, som hovedsageligt er finansieret via Dansk Roadmap for Forskningsinfrastruktur 2020 [1] og ESA's PRODEX-program, er en planlagt videnskabelig mission, der skal styrke dansk forskning og dansk rumindustri. Missionen, som er ledet af Hans Kjeldsen fra Aarhus Universitet, er delt op i to faser: STEP-A, som efter planen skal opsendes i andet kvartal af 2025, og STEP-B, som er et større internationalt samarbejde med Massachusetts Institute of Technology og Lawrence Livermore National Laboratory, som forventes opsendt i slutningen af 2026. STEP-A udvikles i tæt samarbejde med dansk rumindustri, hvor satellitten leveres af Space Inventor A/S og Terma udvikler og leverer detektoren. Et større nationalt og internationalt konsortium står bag missionen til den videnskabelige anvendelse.

STEP-A

STEP-A er en prototype, som skal demonstrere egenskaberne for den ultraviolette (UV)-detektor som efterfølgende også skal bruges på STEP-B. STEP-A vil fra et lavt jordkredsløb (LEO) i ca. 500–600 km højde

være i en polær solsynkron bane, hvorfra den vil benytte et 25 cm teleskop til at fokusere lys fra stjerner ned på UV-detektoren. Data vil blive sendt til jorden via en dedikeret X-bånds-jordstation, hver gang STEP-A passerer forbi Danmark. På figur 7 ses en illustration af STEP-A.



Figur 7. Illustration af STEP-A (Space Inventor A/S).

STEP-B

Efterfølgeren STEP-B bliver en større satellit i et tæt samarbejde med MIT og LLNL, hvor STEP-delen bliver UV-detektoren, imens satellitten vil indeholde flere forskellige teleskoper med forskellige detektorer; fx et reserve kamera fra TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite)-missionen. STEP-B (som nok får et andet navn i sidste ende) skal efter planen sendes i et geostationært kredsløb i ca. 35.000 km højde over havoverfladen, hvor den vil kredse med Jordens daglige rotation og dermed være over det samme punkt på Jorden hele tiden. Dette giver mulighed for kontinuert kontakt til satellitten fra en enkelt jordstation.

Litteratur

- [1] Uddannelses- og Forskningsstyrelsen (2021) "Dansk roadmap for forskningsinfrastruktur 2020", <https://ufm.dk/publikationer/2021/filer/roadmap-for-forskningsinfrastruktur-2020>
- [2] I. J. Hewitt (2020) "Subglacial plumes", *Annual Review of Fluid Mechanics*, bind 52, side 145–169.



Mads Fredslund Andersen (t.v.) er teleskop- og satellitmanager ved Institut for Fysik og Astronomi på Aarhus Universitet, og var leder af Delphini-1 missionen fra primo 2020. Han er nu leder af DISCO-2-missionen. Andreas Kjer Dideriksen (midt) er ph.d.-studerende ved Arctic Research Center, Aarhus Universitet, og Oliver Millinge (t.h.) studerer til bachelor i elektroteknologi ved Aarhus Universitet.

Hawkingstråling og Unruhstråling – Kvantemekanikken møder den generelle relativitetsteori

Bernhard Lind Schistad, Midtbyens Gymnasium, Mercantec

Siden Hawking's berømte teoretiske opdagelse i 1974 har det været kendt, at sorte huller udstråler sort hulrumsstråling fra begivenhedshorisonten. Denne stråling vil i sidste ende få hullet til at fordampe. Mindre kendt er det, at en accelererende observatør i et tomt rum vil observere sort hulrumsstråling fra rummet selv. Denne stråling kaldes Unruhstråling. De to fænomener er ikke identiske, men beslægtede. En interessant egenskab ved Hawkingstråling er, at den kun eksisterer for observatører, der er uden for hullet. Dette giver et paradoks, idet hullet ikke både kan forsvinde og ikke forsvinde.

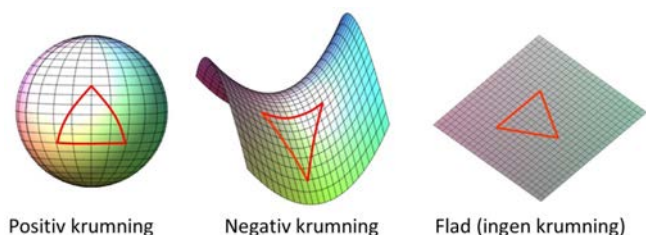
Indtil for nyligt regnede man med, at ingen af disse fænomener kunne observeres, men nu har en gruppe fysikere påpeget, at effekten måske allerede er observeret ved acceleration af elektroner.

Vi vil her gå lidt dybere ind i de to fænomener, hvor kvantemekanikken møder den generelle relativitetsteori. Samtidig vil vi knytte forbindelsen til den klassiske fysik ved at beskrive sorte hullers termodynamik og entropi.

Hawkingstråling

Det vakte stor opsigt i fysikerkredse, da Stephen Hawking i 1974 offentliggjorde en artikel, som viser, at vakuumpolarisation vil forårsage, at sorte huller udstråler fotoner og neutrinoer langs med begivenhedshorisonten [1]. Dette vil føre til, at hullet gradvis taber energi, indtil det helt forsvinder. Dette modsiger den hidtidige antagelse, at intet, heller ikke energi, kan undslippe fra et sort hul.

Før vi gennemgår Hawking's argumentation, vil vi først se på, hvad et sort hul er for en størrelse. I den generelle relativitetsteori påvirker masse og energi rummet, så det krummes i henhold til Einsteins feltligninger. En sådan krumning kan være positiv eller negativ som illustreret i figur 1.



Figur 1. Krumme rum.

I et fladt rum er afstanden mellem to punkter givet ved længden af den linje, som forbinder punkterne. Men i et krumt rum er afstanden lig med buelængden af den geodætiske kurve, som forbinder punkterne. Vi kan se, at siderne i den deformerede trekant i de krumme rum i figur 1 er længere end de lige sider i trekanten i det flade rum.

I 1916 kunne den tyske astronom Karl Schwarzschild offentliggøre løsningen af Einsteins feltligninger for rumtiden omkring en kugleformet masse. Denne løsning havde den mærkelige egenskab, at hvis radius af kuglen er mindre end en bestemt kritisk værdi, er alle afstande fra kuglen til omgivelserne lig med uendelig. Rumtiden omkring en sådan masse er vist på figur 2.



Figur 2. Rumtiden omkring et sort hul.

I dag kalder vi et sådant objekt for et sort hul. Det har den egenskab, at alt, der kommer indenfor den kritiske radius, kaldet begivenhedshorisonten, aldrig kan komme ud igen.

For et ikke-roterende sort hul er den kritiske radius, som også er begivenhedshorisonten, givet ved:

$$r_s = \frac{2GM}{c^2} \quad (1)$$

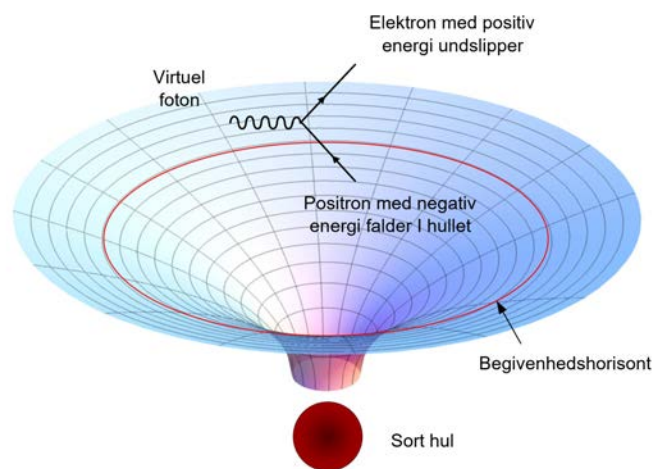
hvor G er gravitationskonstanten, og M er hullets masse.

I sin artikel undersøgte Hawking, hvad der sker med vakuumpolarisation omkring begivenhedshorisonten i et sort hul. Vakuumpolarisation er en effekt i kvantemekanikken, som udspringer fra Heisenbergs usikkerhedsrelation. I kvantefeltteori er rummet fyldt af et kvantefelt for hver type elementarpartikel. Da Heisenbergs usikkerhedsrelation skal være opfyldt, kan ikke alle disse felter være nul, når vi observerer over et kort tidsrum.

I et fladt rum vil der i hvert punkt være indkommende og udgående bølger med alle mulige frekvenser, både positive og negative, svarende til partikler og antipartikler. Men da der er lige mange indkommende og udgående bølger, sker der ikke nogen ophobning af energi. Hvis rummet er tomt, forbliver det tomt.

Men hvis vi betragter et punkt tæt på begivenhedshorisonten omkring et sort hul, vil de indgående bølger blive begrænset af, at de ikke kan have bølgelængder, der er længere end afstanden til begivenhedshorisonten. Derfor vil de indkommende bølger ikke kunne ophæve de udgående, og der vil være en overvægt af udgående bølger svarende til en stråling væk fra begivenhedshorisonten.

Vi kan også forestille os denne effekt som en produktion af partikel/antipartikel-par, hvor den ene "falder i hullet", mens den anden undslipper. Så kan partiklerne ikke annihilere, da ingen information kan komme ud af begivenhedshorisonten. Den partikel, som er udenfor, bliver så en reel partikel med positiv energi (figur 3). Denne energi kan kun komme fra hullet, det vil sige, at hullets masse aftager med præcis den masse, der svarer til energien i den undslippende partikel.



Figur 3. Partikelproduktion ved begivenhedshorisonten.

Da der vil produceres lige så mange partikler som antipartikler ved denne proces, vil de annihilere med hinanden, og resultatet bliver, at der udsendes fotoner.

Hawking kunne beregne, at spektret af de fotoner, der udsendes på denne måde, nøjagtig svarer til den varmestråling, der udsendes fra et sort legeme med temperaturen:

$$T = \frac{\hbar c^3}{8\pi G M k_b} \quad (2)$$

hvor M er massen, og k_b er Boltzmanns konstant.

Dette er ikke nogen høj temperatur. Hvis vi tager massen af de mindste sorte huller, der kan dannes ved kollaps af en stjerne (fire solmasser), får vi en temperatur på $1,54 \cdot 10^{-8}$ K.

Sorte hullers levetid

Da strålingen fra et sort hul ligner strålingen fra et varmt legeme, kan vi bruge Stefan-Boltzmanns lov til at bestemme den udstrålede effekt:

$$P = \sigma A T^4 \quad (3)$$

hvor A er arealet af begivenhedshorisonten, og σ er Stefan-Boltzmanns konstant:

$$\sigma = \frac{\pi^2 k_b^4}{60 c^2 \hbar^3} \quad (4)$$

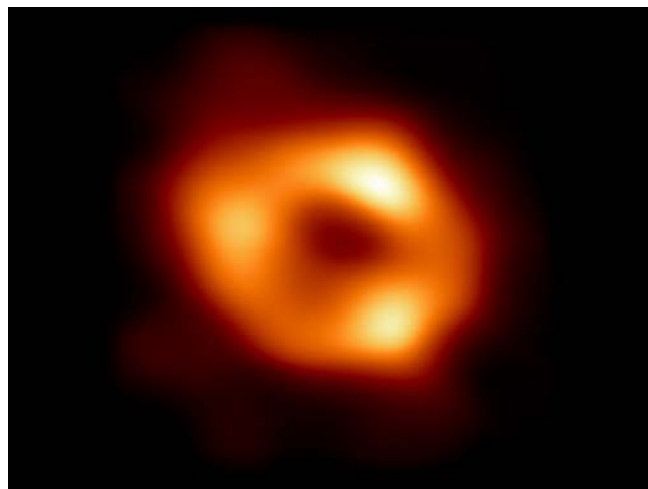
Arealet af begivenhedshorisonten er:

$$A = 4\pi r_s^2 = 4\pi \left(\frac{2GM}{c^2} \right)^2 = \frac{16\pi G^2 M^2}{c^4} \quad (5)$$

Dette giver:

$$P = \sigma A \left(\frac{\hbar c^3}{8\pi G M k_b} \right)^4 = \frac{\hbar c^6}{15360\pi G^2 M^2} \quad (6)$$

Vi kan nu udregne den udstrålede effekt fra det sorte hul i centrum af Mælkevejen (figur 4). Det har en masse på $8,26 \cdot 10^36$ kg. Effekten bliver $5,2 \cdot 10^{-42}$ W. Det er ikke meget, men effekten aftager med hullets masse i 2. potens. Hvis vi skulle lave et sort hul, der udstråler en effekt på 1W, ville massen være ca. $2 \cdot 10^{16}$ kg.



Figur 4. Det sorte hul i Sagittarius A*.

Bevæbnet med disse formler kunne Hawking beregne et sort huls levetid:

$$t = \frac{5120\pi G^2 M^3}{\hbar c^4} \quad (7)$$

For supermassive sorte huller, som det i centrum af Mælkevejen, vil dette give en meget lang levetid på 10^{86} år, men for et hul på størrelse med 4 solmasser, bliver levetiden 10^{69} år.

Vi ser, at små sorte huller fordampes hurtigere end store. Det medfører, at eventuelle sorte huller, der dannes ved partikelkollisioner (som man var bange for, da LHC startede), har en ekstremt kort levetid. Hvis for eksempel et protonsammenstød ved LHC skulle skabe et sort hul, ville det fordampe i løbet af 10^{-89} s.

Hvis vi ser på hvilke strålingstyper, et sort hul kan udsende, vil det kun være fotoner, indtil hullets temperatur når op på ca. $4 \cdot 10^9$ K.

Hvis vi prøver at forstille os, om vi kunne observere Hawkingstråling, ser vi, at det virker totalt urealistisk for astronomiske sorte huller.

Informationstab-paradokset

I 2007 publicerede fysikere ved universitetet i Cleveland en artikel, som påpegede et paradoks ved Hawkingstråling [2]. Det viser sig nemlig, at en observatør, som falder ind i hullet og passerer begivenhedshorisonten,

hverken observerer horisonten eller nogen Hawking-stråling. Han vil derfor konkludere, at hullet ikke vil fordampe. Desværre kan han aldrig komme ud og fortælle omverdenen, at de tager fejl.

Selv om Hawkingstrålingen fra et astronomisk sort hul er forsvindende lille og ikke kan observeres, er det alligevel ubehageligt for fysikken, at to observatører er uenige om, hvorvidt hullet fordampes eller ej. Det har været forsøgt at løse paradokset ved at antage, at den indfaldende observatør ikke kan observere strålingen fordi den relativistiske dopplereffekt forårsaget af hans acceleration væk fra begivenhedshorisonten, hvor strålingen dannes, medfører, at strålingens bølgelængde strækkes, så bølgelængden bliver længere end det apparatur, observatøren medbringer.

Dette paradoks er kun et specialtilfælde af et mere generelt paradoks, hvor al information, der passerer begivenhedshorisonten, er tabt fra det observerbare univers i modstrid med kvantemekanikkens princip om, at al information i et lukket system altid bevares.

Sorte hullers entropi

Da sorte huller på den store skala er simple termodynamiske systemer, kan vi udregne deres entropi på en simpel måde. Entropi er et udtryk for den samlede uorden eller tilfældighed i et system. Hvis entropi er et mål for graden af uorden i et system, må den være lig med antal bits af information, som systemet kan rumme.

Den mindste energimængde vi ifølge kvantemekanikken kan tilføre et sort hul, er en foton med bølgelængde λ lig med hullets diameter. Da diameteren er to gange Schwarzschildradien r_s , får vi, at energien i denne foton er:

$$E_{foton} = \frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{2r_s} \quad (8)$$

Energien i hullet er givet med Einsteins formel

$$E_H = Mc^2 = \frac{r_s c^4}{2G} \quad (9)$$

Da er antal bits og dermed entropien i et sort hul givet ved:

$$N = S_H = \frac{E_H}{E_{foton}} = \frac{r_s^2 c^3}{hG} \quad (10)$$

Vi kan i stedet udtrykke den ved arealet $A = 4\pi r_s^2$:

$$S_H = \frac{Ac^3}{4\pi G\hbar} \quad (11)$$

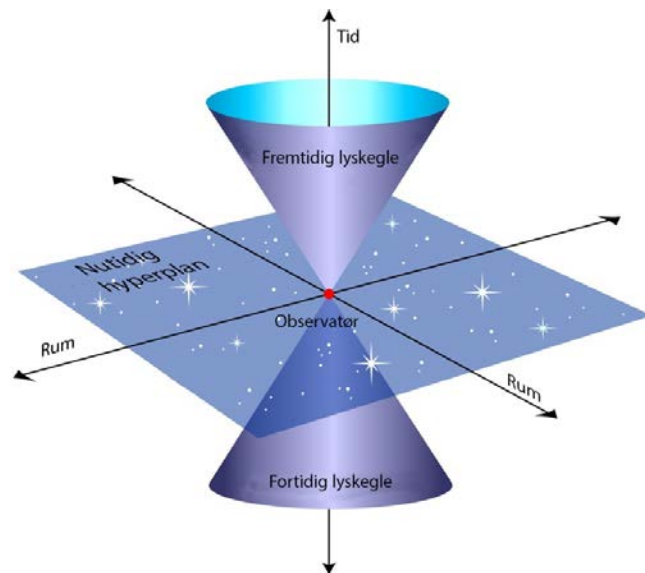
Det vil sige, at entropien af et sort hul er proportional med arealet af begivenhedshorisonten!

Unruhstråling

Kort tid efter, at Hawking beskrev stråling fra sorte huller, offentliggjorde tre fysikere, uafhængigt af hinanden, artikler, som beskrev et lignende fænomen omkring en accelererende observatør [3–5]. Denne stråling har fået navnet Unruhstråling efter den ene af fysikerne. Selv om det ikke er helt den samme mekanisme, som

danner Unruhstråling, er der flere paralleller. Det er ikke så overraskende, idet gravitation og acceleration ifølge Einsteins ækvivalensprincip er to sider af samme sag.

For at forstå, hvorledes strålingen opstår, vil vi betragte et forenklet rumtidsdiagram, hvor vi kun medtager to af de tre rumdimensioner i xy-planet og afbilder tiden på z-aksen. Ved tiden $t = 0$ befinder observatøren sig i origo, se figur 5.



Figur 5. Forenklet rumtidsdiagram

Her repræsenterer xy-planet alle begivenheder, der finder sted ved $t = 0$, altså i nutiden, mens alle begivenheder over planet er fremtid, og alle begivenheder under planet er fortid.

En lysstråle, som udgår fra origo, vil bevæge sig på en kegle (kaldet lyskegle). Keglenes vinkel bestemmes af lyshastigheden. Hvis vi måler i passende enheder, fx bruger lysår som længdeenhed, vil keglen danne en vinkel på 45° med planet.

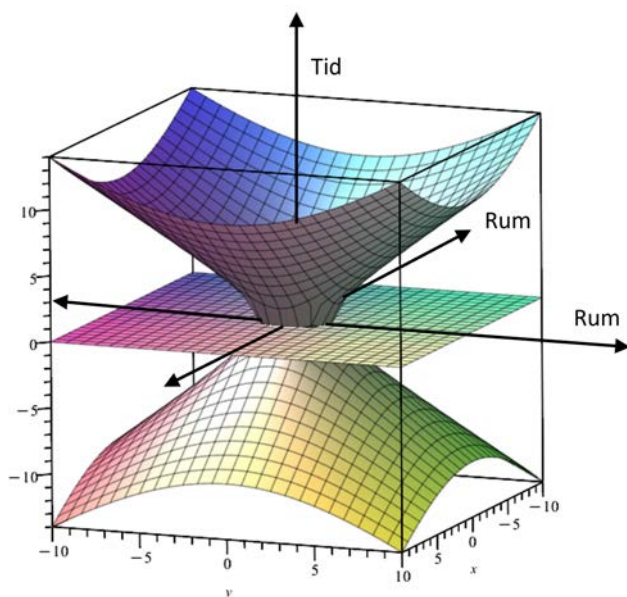
Alle lysstråler, der er udsendt i fortiden, og som kan ramme origo ved $t = 0$, vil ligge på keglen under planet. Alle punkter, der ligger indenfor den øvre lyskegle, kan nås af objekter, der befinder sig i origo, hvis de bevæger sig med passende hastighed. Tilsvarende kan et objekt i origo komme fra et hvilket som helst punkt på den nedre lyskegle.

Punkter, der befinder sig mellem de to lyskegler, kan ikke nås af et objekt i origo. De vil ikke kunne påvirkes af begivenheder, der sker i origo.

For to punkter, som ligger inden for lyskeglen, vil afstanden s være større end nul. Et sådant interval kaldes timelike. Ligger et eller begge punkter uden for lyskeglen, vil afstanden s være negativ, og intervallet kaldes spacelike.

Hvis vi laver den samme analyse, som Hawking gjorde for vakuumpolarisationen ved sorte huller, finder vi, at for en observatør, der bevæger sig med konstant hastighed, vil der i alle punkter langs banen være lige mange udgående og indkommende bølger ved alle frekvenser, og summen vil blive nul, så der ikke sker nogen ophobning af energi.

Men hvis derimod observatøren accelererer, ændres situationen. Da bliver lyskeglen til en hyperboloide (figur 6), fordi hastigheden vil øges asymptotisk mod lyshastigheden.



Figur 6. Rumtidsdiagram for en accelereret observatør.

For at se hvad der sker, vil vi betragte et Rindler-diagram (figur 7). Her er rumkoordinaterne forenklet til en dimension som per konvention kaldes z . Tiden for en stationær observatør er givet af t -aksen (y -aksen). I diagrammet er afbildet rumtidskurven (blå) for forskellige observatører med konstant acceleration langs rumaksen ζ . Sand tid for hver observatør er angivet ved de stiplede linjer, som angiver samme tidspunkt for hver kurve. Dette er den tid, som observatøren selv oplever. Jo tættere den blå kurve ligger på t -aksen, desto højere er accelerationen. Den røde linje betegner grænsen svarende til uendelig acceleration. Intet objekt eller signal afsendt fra en position til venstre for den røde linje vil nogensinde kunne nå observatøren og dermed påvirke ham. Dette medfører, at den røde linje er en begivenhedshorisont ligesom den, der omgiver et sort hul. Forskellen er, at observatøren selv ikke kan krydse begivenhedshorisonten, men hvis accelerationen øges, vil han komme tættere på den.

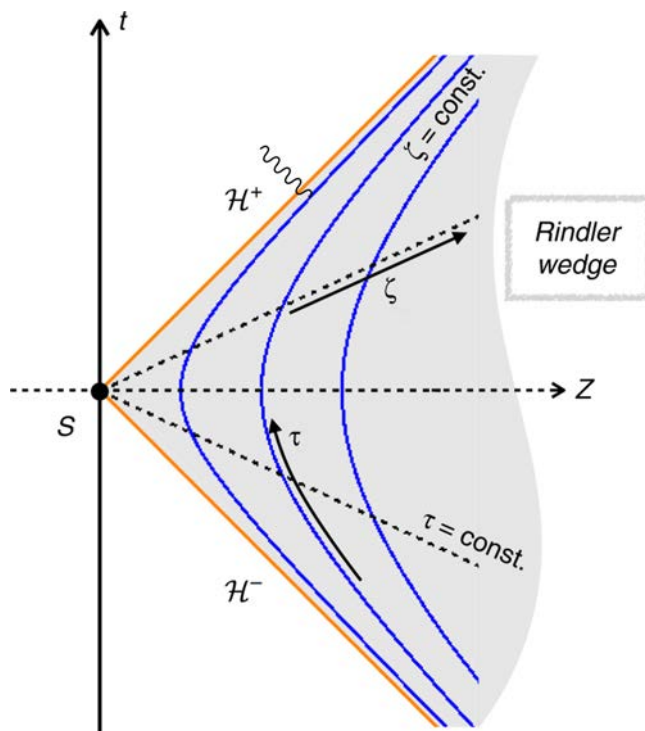
Men selv om vores accelererede observatør ikke kan krydse begivenhedshorisonten, vil virtuelle fotoner fra vakuum polarisation kunne gøre det. Derfor vil fotoner med bølgelængder længere end afstanden til den røde linje kunne forsvinde bag horisonten. De vil derfor mangle i de indkommende bølger, og vi får et netto overskud af udgående bølger. Dette vil give en stråling, som svarer til Hawkingstrålingen fra et sort hul. Vi kan også se, at effekten bliver større, når accelerationen øges, og vi kommer tættere på den røde linje.

Når vi beregner spektret af de fotoner, der udsendes, får vi igen det samme spektrum som varmestråling fra et sort legeme med temperaturen [6]:

$$T = \frac{\hbar a}{2\pi c k_b} \quad (12)$$

hvor a er accelerationen.

Vi skal ikke undre os over, at vi ikke har observeret denne effekt i dagligdagen. For eksempel er Unruh-temperaturen forårsaget af tyngdens acceleration lig med $4 \cdot 10^{-20}$ K. Bølgelængden for denne stråling ville være af størrelsesorden 10 lysår.



Figur 7. Rindlerdiagram for en accelereret observatør.

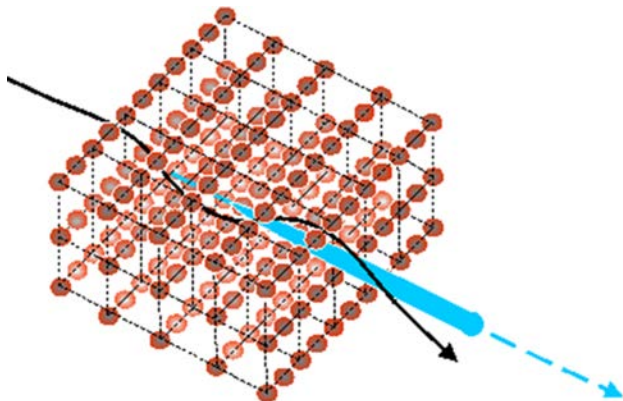
Observation af Unruhstråling

I første omgang ser det ud til, at Unruhstrålingen ville være helt umulig at observere, men i de seneste år er der fremkommet nogle interessante muligheder baseret på de høje accelerationer, der kan opnås i partikelacceleratorer. Et af forslagene kommer fra tre canadiske fysikere [7]. De foreslår at anvende Jaynes-Cummings-effekten til at påvise Unruhstråling. Denne effekt går ud på, at hvis et atom har to tilladte energiniveauer (for eksempel fordi det er lukket inde i en optisk kavitet), vil oscillationen mellem disse to niveauer påvirkes af ekstern elektromagnetisk stråling. Så længe atomet befinder sig i et inertialsystem, vil det kun påvirkes af stråling, hvor der er resonans med frekvenserne til de to energiniveauer, men ved stærk acceleration vil Unruhstrålingen kunne påvirke oscillationen. I deres artikel påviser de canadiske fysikere, at denne effekt kan blive så stor, at den rent faktisk kan observeres.

De opdagede, at ved at belyse accelererede atomer fra en molekylær partikelstråle med højintensitets lasere, kan Unruheffekten forstærkes så meget, at den bliver målbar. De opdagede også til deres store overraskelse, at en omhyggeligt balanceret acceleration efterfulgt af opbremsning kan gøre atomerne fuldstændig transparente over for elektromagnetisk stråling.

En anden gruppe af israelske fysikere mener, at man faktisk allerede har påvist Unruhstråling fra højenergetiske positroner i en siliciumkrystal [8-9].

Når en elektrisk ladning passerer gennem et materiale, vil den tabe energi ved at udsende et kontinuert spektrum af bremsestråling. Denne proces vil foregå ved spredning mod individuelle atomer, som har en tilfældig fordeling, som fx i amorfe krystaller i faste stoffer eller i væsker. Hvis vi derimod har en periodisk krystallisk struktur, kan vi betragte bevægelse langs med symmetriaksen som en "kanaliseret" bevægelse gennem en effektiv hul bølgeleder eller som bevægelse i et todimensionalt plan mellem atomare lag dannet af denne struktur. Da befinder den ladede partikel sig i en potentialbrønd og kan oscillere frem og tilbage i en retning på tværs af bevægelsesretningen. Denne oscillation vil medføre, at partiklen udsender en stråling kaldet channelingstråling (figur 8).



Figur 8. Channelingstråling.

Denne channelingstråling har været observeret ved meget høje energier i et forsøg ved CERN [10]. Her bestråles en siliciumkrystal med højenergetiske positroner fra CERNs SPS-accelerator. Positronerne har en energi på 178,2 GeV. Forsøgsopstillingen er vist på figur 9.

En indkommende stråle af kolliderede positroner passerer først tre scintillationsdetektorer, som udløser en trigger for indkommende partikler. Derefter passerer de to positionsdetektorer M1 og M2, som bruges til at bestemme den indkommende partikels bane. Positronen rammer derefter en siliciumkrystal, hvor channelingstrå-

lingen dannes. Denne er efterfulgt af en kraftig magnet, som afbøjer positronen, mens fotonerne ikke afbøjes. De rammer så en konverteringsfolie, hvor de giver ophav til elektroner og positroner via pardannelse. Deres impuls bestemmes ved hjælp af to par af positionsdetektorer M3, M4 og M5, M6 med en magnet imellem. Ved at måle afbøjningen i magnetfeltet, kan energien i de sekundære elektroner og positroner bestemmes og dermed energien i fotonerne i channelingstrålingen.

På grund af deres lave masse på 0,51 MeV/c udsættes positronerne for ekstremt høje accelerationer, når de vekselvirker med krystalgitteret. Den er faktisk så stor, at den almindelige kvantemekanik ikke gælder, da den ikke opfylder den generelle relativitetsteori. Dette har medført, at der har været problemer med at give en fuldstændig teoretisk forklaring på det observerede spektrum. Vi kan få en idé om accelerationen ved at anvende den teori for Unruhstråling, som vi allerede har gennemgået. Hvis en positron oscillerer med en vinkelhastighed ω_0 , vil den opleve en sand acceleration (efter Einsteins teori) på:

$$a' = \frac{\omega_0^2}{\pi m} \quad (13)$$

hvor m er dens masse. Dette vil give ophav til en rekyltemperatur (Unruh-temperatur) på:

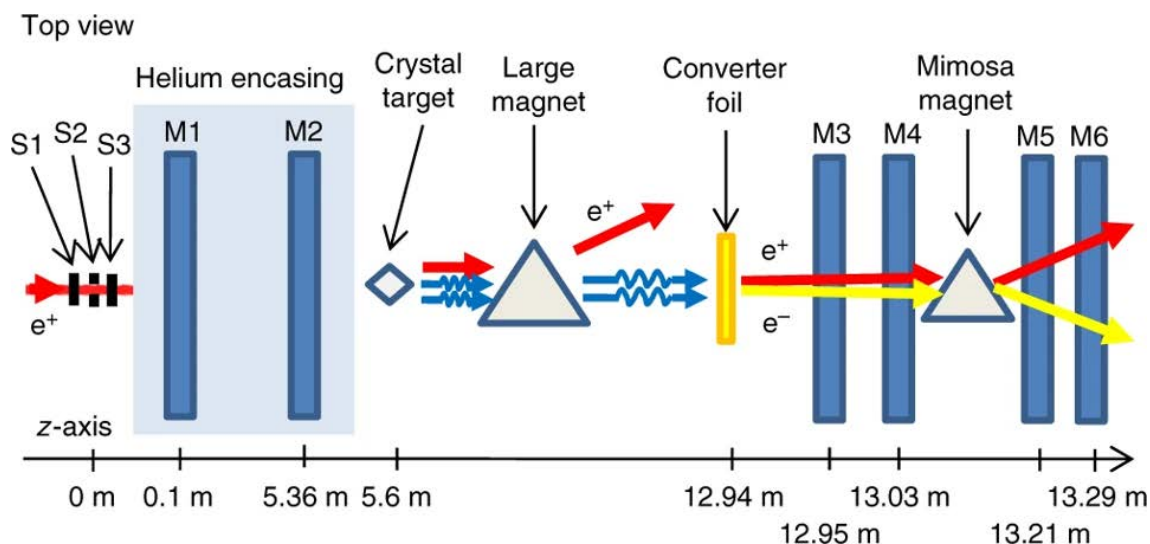
$$T_{RR} = \frac{\omega_0^2 \gamma^2}{2m\pi^2} \quad (14)$$

hvor γ er Lorentzfaktoren.

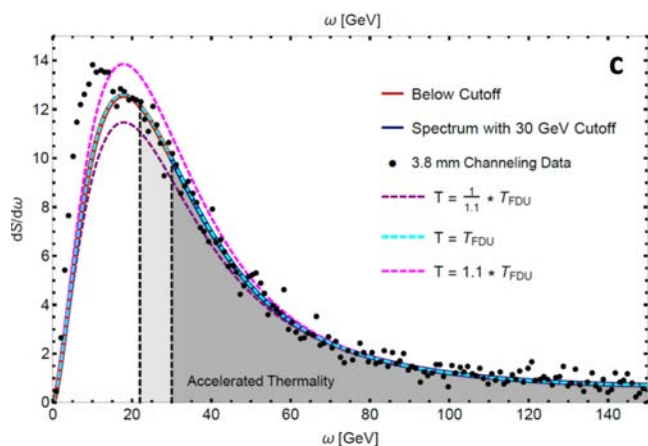
Ved de frekvenser, der blev observeret i forsøget, svarer dette til en temperatur på $1,8 \cdot 10^{19}$ K.

Det målte spektrum fra forsøget er sammenlignet med den teoretiske beregning (blå kurve) i figur 10.

Som vi ser, er der meget god overensstemmelse. Det er ikke muligt at få en tilsvarende god overensstemmelse med teoretiske beregninger baseret på klassisk elektrodynamik eller almindelig kvantefeltteori. Dette skyldes nok, at ingen af disse teorier gælder for accelerationer af størrelsesorden 10^{20} m/s².



Figur 9. Forsøgsopstilling ved NA7-eksperimentet.



Figur 10. Observeret spektrum af Unruhstråling.

Konklusion

Hawkingstråling og Unruhstråling er fænomener som opstår, når kvantemekanikken møder den generelle relativitetsteori. Indtil for nyligt troede fysikerne, at det var umuligt at observere disse fænomener, men de nyeste beregninger antyder, at vi allerede har observeret Unruhstråling. Dette ville være et bevis på, at Hawkingstråling fra sorte huller også eksisterer, da acceleration og tyngdekraft er intimt forbundet via Einsteins ækvivalensprincip. Den fulde teoretiske forståelse af disse fænomener må vente til vi har fundet teorien, der forener kvantemekanikken med den generelle relativitetsteori.

Litteratur

- [1] S. Hawking (1974) "Black hole explosions?", *Nature*, bind 248, side 30–31.
- [2] T. Vachaspati, D. Stojkovic og L. Krauss (2007) "Observation of incipient black holes and the information loss problem", *Physical Review D*, bind 76, side 024005.

- [3] S. A. Fulling (1973) "Nonuniqueness of Canonical Field Quantization in Riemannian Space-Time", *Physical Review D*, bind 7, side 2850–2862.
- [4] P. C. W. Davies (1975) "Scalar production in Schwarzschild and Rindler metrics", *Journal of Physics A*, bind 8, side 609–616.
- [5] W. G. Unruh (1976) "Notes on black-hole evaporation", *Physical Review D*, bind 14, side 870–892.
- [6] P. M. Alsing og P. W. Milonni (2004) "Simplified derivation of the Hawking-Unruh temperature for an accelerated observer in vacuum", *American Journal of Physics*, bind 72, side 1524.
- [7] B. Šoda, V. Sudhir og A. Kempf (2002) "Acceleration-Induced Effects in Stimulated Light-Matter Interactions", *Phys. Rev. Lett.*, bind 128, side 163603.
- [8] M. H. Lynch, E. Cohen, Y. Hadad og I. Kaminer (2021) "Experimental Observation of Acceleration-Induced Thermality", *Physical Review D*, bind 104, side 025015.
- [9] M. H. Lynch (2022) "Notes on the experimental observation of the Unruh effect". Et essay, som er skrevet for "Gravity Research Foundations".
- [10] T. N. Wistisen, A. Di Piazza, H. V. Knudsen og U. I. Uggerhøj (2018) "Experimental evidence of quantum radiation reaction in aligned crystals", *Nature Communications*, bind 9, side 785.



Bernhard Lind Schistad er cand.real. fra Universitetet i Oslo. Han har været forsker i partikelfysik ved Niels Bohr Institutet og CERN og senere arbejdet med udvikling af grafiske systemer og radar. Han underviser i fysik og matematik på Midtbyens Gymnasium, Mercantec, i Viborg.

Laserstråle – breddeopgave 104 og 105

Jens Højgaard Jensen, IMFUFA, INM, RUC.

Her bringes løsninger og kommentar til opgaverne fra forrige nummer samt en ny opgave. Opgaverne i sidste nummer af Kvant var disse to breddeopgaver (nr. 104 og 105 her i Kvant):

Breddeopgave 104 og 105. Laserstråle

Ved hjælp af to forskellige samlelinser kan man ændre diameteren på en laserstråle. Hvordan skal de to linser placeres i forhold til hinanden? Begrund svaret.

I et laserekspperiment kan det være ønskeligt at øge beamdiameteren. Dette kan gøres ved hjælp af en sprede- og samlelinse. Hvordan skal de to linser placeres i forhold til hinanden? Begrund svaret.

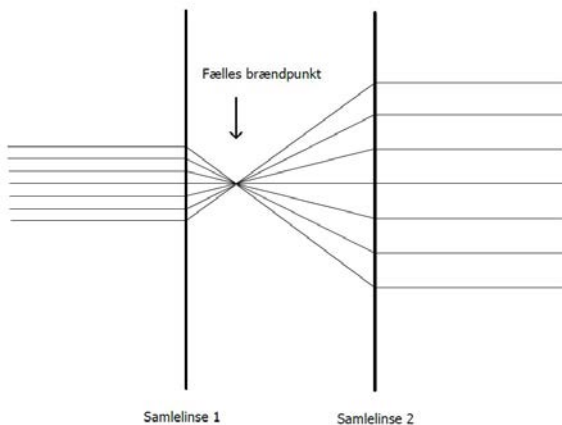
Løsninger

Løsningen til de to opgaver, der skyldes Tina Hecksher og er inspireret af en eksperimentopstilling, er i begge tilfælde, at linserne skal placeres i forhold til hinanden, så de får fælles brændpunkter. De to figurer leverer begrundelserne.

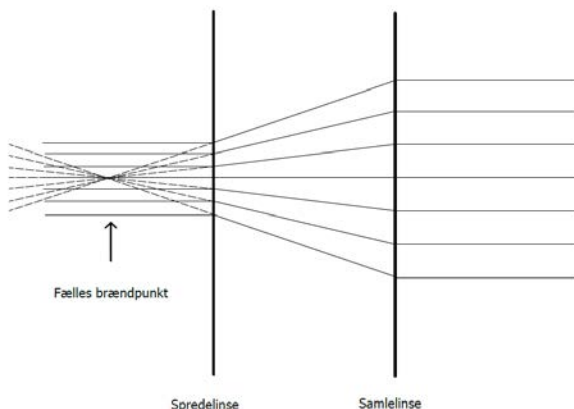
Kommentar

Selvom vi annoncerer "at lære at tænke som fysiker" som hovedformålet med breddekurset i fysik på RUC, har det også det sekundære formål at lære de studerende fysik i bredden. Til bredden hører geometrisk optik. Men stoftrængslen har kun tilladt os at berøre det ved en enkelt kursusgang på små to timer med tilhørende ca.

fire timers forberedelse med tilhørende breddeopgaver og 25 sider lærebogstekst.



Figur 1. Ændring af diameteren af en laserstråle ved hjælp af to samlelinser.



Figur 2. Ændring af diameteren af en laserstråle ved hjælp af en spredelinse og en samlelinse.

Fysikuddannelsen på RUC er nu omorganiseret og breddekurset samlet på kandidatdelen. Tidligere var det delt op i Fysisk problemløsning I på 10 ECTS-point på bachelordelen af fysikuddannelsen og Fysisk problemløsning II på 10 ECTS-point på kandidatdelen. Fysisk problemløsning I dækkede emner i mekanik, relativitetsteori, termodynamik, hydrodynamik og lidt om overfladespænding med modsvarende opgaver til eksamen. Fysisk problemløsning II dækkede, foruden repetition af pensum i Fysisk problemløsning I, elektrodynamik samt bølgelære, optik, kvantefysik, faststoffysik, atomfysik, kernefysik og partikelfysik i begrænset omfang. Eksamen var, som ved Fysisk problemløsning I, en skriftlig 4-timers prøve uden hjælpemidler, bortset fra et på begge sider beskrevet A4-ark efter eget valg. Men opgaverne blev stillet i det samlede pensum for de to problemløsningskurser.

Opgavernes sværhedsgrad ved Fysisk problemløsning II-eksamener, som de to opgaver her er fra, kunne være øget i forhold til Fysisk problemløsning I-eksamener. Formålet med de to opgaver her var imidlertid ikke at eksaminere på et løftet niveau. De var til for at sikre udfoldelsen af pensum. Hvis begreberne

strålegang og linsers brændpunkter er tilegnede, skulle de to opgaver være overkommelige. Men det var ikke altid, at de studerende overkom at orientere sig tilstrækkeligt i geometrisk optik med dets lille plads på kursuskskemaet.

Gennemgang af geometrisk optik er en god anledning til at minde de studerende om, at de nu kender til fire væsensforskellige forestillinger om lys. Den geometriske optiks forestilling om lys som stråler. Lys som bølgebevægelse af skalære størrelser tilsvarende mange andre slags bølger med tilknyttede diffraktionsfænomener. Lys som bølgebevægelse af vektorfelter med tilknyttede polarisationsfænomener. Og lys som elementarpartikler, der kan støde sammen med andre elementarpartikler.

Hvad er så lys? Stråler, bølger af forskellig slags eller partikler?

Det synes jeg, at der er to slags svar på. Det principielle og det praktiske. Principielt er lys elementarpartikler, hvis sandsynlighedsfordeling har bølgeegenskaber. Praktisk kan bølger også beskrives som lysstråler ved fx deres passage af et hul, hvis hullets diameter er større end lysets bølgelængde. Forståelsen af lys, som enten stråler, bølger af forskellig slags eller partikler, lader sig principielt rangordne. I praksis veksler fysikere mellem de forskellige forestillinger om lys, når de løser problemer.

Jeg nævner dette, fordi den erkendelsesteoretiske diskussion, med eksempler hentet fra fysik, mellem fx logiske positivister, Popper og Kuhn om, hvordan man etablerer evige og universelle sandheder, så vidt jeg kan se, ofte vildleder folk uden erfaring med fysisk problemløsning. Erkendelsesteoretiske grundlagsproblemer i fysik misforstås som udtryk for, at fysik metodisk er til forhandling, som meget andet er det. I en tid med pres på oplysningsidealene er det vigtigt at holde fast i, at ikke alt er til forhandling. Fx plejer fysiske problemløsninger at stå til troende i ret høj grad. Uanset om de er tilvejebragt ved fx at opfatte lys som stråler, bølger eller partikler. Som agnostiker, både hvad angår religion og fysik, synes jeg, at videnskabsteoriundervisning med blandt andet fysikeksempler, i stedet for at dreje sig om forskellige opfattelser af, hvordan universelle og evigtgyldige ontologiske sandheder nås, burde dreje sig om sammenligning af faktiske eksemplers forskellige grad af pragmatisk troværdighed.

Breddeopgave 106. Tycho Brahe

Inden næste nummer af Kvant udkommer, kan læserne eventuelt overveje løsningen til denne opgave fra breddekurset på RUC (fra eksamen januar 1999, nr. 106 i rækken her i Kvant):

Tycho Brahe havde været død nogle år, da Galilei som den første tog kikkerten i brug ved astronomiske observationer. Tycho Brahers målinger blev udført ved hjælp af sigteinstrumenter og ved brug af det blotte øje. Hans målenøjagtighed var nogle få bueminutter. Er det muligt med hans metode at måle nøjagtigere end han gjorde? Begrund svaret.

Løsning og kommentar bringes i næste nummer af Kvant.

Nyt fra Dansk Fysisk Selskab

Maren Mallong



Valg til bestyrelsen

Bestyrelsen af DFS består af en repræsentant for hver af selskabets sektioner (udpeget af sektionsbestyrelserne) og op til fire medlemmer samt to suppleanter, valgt direkte af og blandt selskabets medlemmer. Bestyrelsesmedlemmer vælges for en 2-årig periode.

Foreningen afholdt valg til bestyrelsen den 28. oktober 2023, og tre nye medlemmer blev valgt:

- Simon Olling Rebsdorf, seniorkonsulent ved Naturvidenskabernes Hus
- Søren Bang Korsholm, seniorforsker ved DTU Fysik
- Thea Bjørk, ingeniør hos OFS

Følgende medlemmer fortsætter i bestyrelsen:

- Ian Bearden, sektionen for kerne og partikelfysik
- Morten Bache, sektionen for atomar, molekylær og optisk fysik
- Louise Kindt, sektionen for uddannelse og formidling
- Maren Mallong, sektionen for Kvinder i Fysik
- Lau Blom Grøndahl, sektionen for Fysikstuderende i Danmark

Den nye bestyrelse konstituerer sig selv, og sammensætningen vil blive offentliggjort i næste nummer af Kvant.

Vi skifter medlemssystemet – hvad betyder det for dig som medlem?

Dansk Fysisk Selskab får nyt medlemssystem. Det gør vi for blandt andet at sikre, at vi overholder lovgivning om databeskyttelse (bedre kendt som GDPR), og for at gøre det lettere for både os og dig at sikre, at vi har de korrekte informationer på dig.

I det nye medlemssystem bliver det muligt for dig som medlem selv at ændre kontaktoplysninger og

adresse, så vi sammen sikrer, at du modtager vigtige e-mails og vores medlemsmagasin Kvant.

Vi påbegynder snart overflytningen af dine data til det nye system. Flytningen til det nye medlemssystem betyder, at alle der har været tilmeldt PBS indtil nu, bliver afmeldt, da det ikke er muligt at flytte disse informationer med over.

Derfor er det vigtigt, at du betaler den seneste opkrævning manuelt.

Opkrævning for 2023 bliver sendt til dig på e-mail eller almindeligt brev.

Hvis du modtager kontingentopkrævninger gennem almindelige breve eller slet ikke modtager nogen opkrævning, er det fordi vi ikke har en gyldig e-mailadresse på dig. Derfor er det vigtigt, at du genopretter dit medlemskab på www.danskfysiskselskab.dk, så vi kan sende en opkrævning til dig. Al opkrævning vil per 2024 foregå elektronisk. Hvis der skal foretages opkrævning per post, forbeholder vi os retten til at opkræve et gebyr på 50 kr. for administration.

Nye medlemmer oprettet siden sommeren 2022 vil ikke opleve nogle ændringer i opkrævningen.

Alle medlemmer burde i løbet af november måned have modtaget et login til vores nye medlemssystem, som hedder Foreningsadministration. Her må du meget gerne logge ind og tjekke, at vi har de korrekte data på dig, så vi er sikre på, at du modtager vigtig information.

Har du nogen spørgsmål, er du velkommen til at kontakte os på mail@danskfysiskselskab.dk

Årsmøde 2023

Årets højdepunkt for DFS er årsmødet, som blev afholdt den 13.-14. november på Nyborg Strand. Årsmødet er en fantastisk mulighed for at netværke med fysikere fra hele landet og byder på et program med foredrag om den nyeste forskning, tematiske parallelsessioner, en poster session med præmier og socialt samvær. I år var hovedtalerne professor Dorthe Dahl-Jensen fra Centre for Earth Observation Sciences, University of Manitoba, Canada og Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet; professor Marco van Leeuwen fra the National Institute for Subatomic Physics (NIKHEF) i Amsterdam samt talsperson for ALICE-eksperimentet ved CERN; og Lektor Manuel Meyer fra Institut for Fysik, Kemi og Farmaci, Syddansk Universitet. Følg med i næste nummer af Kvant, hvor du vil kunne læse mere om de spændende indlæg på mødet.

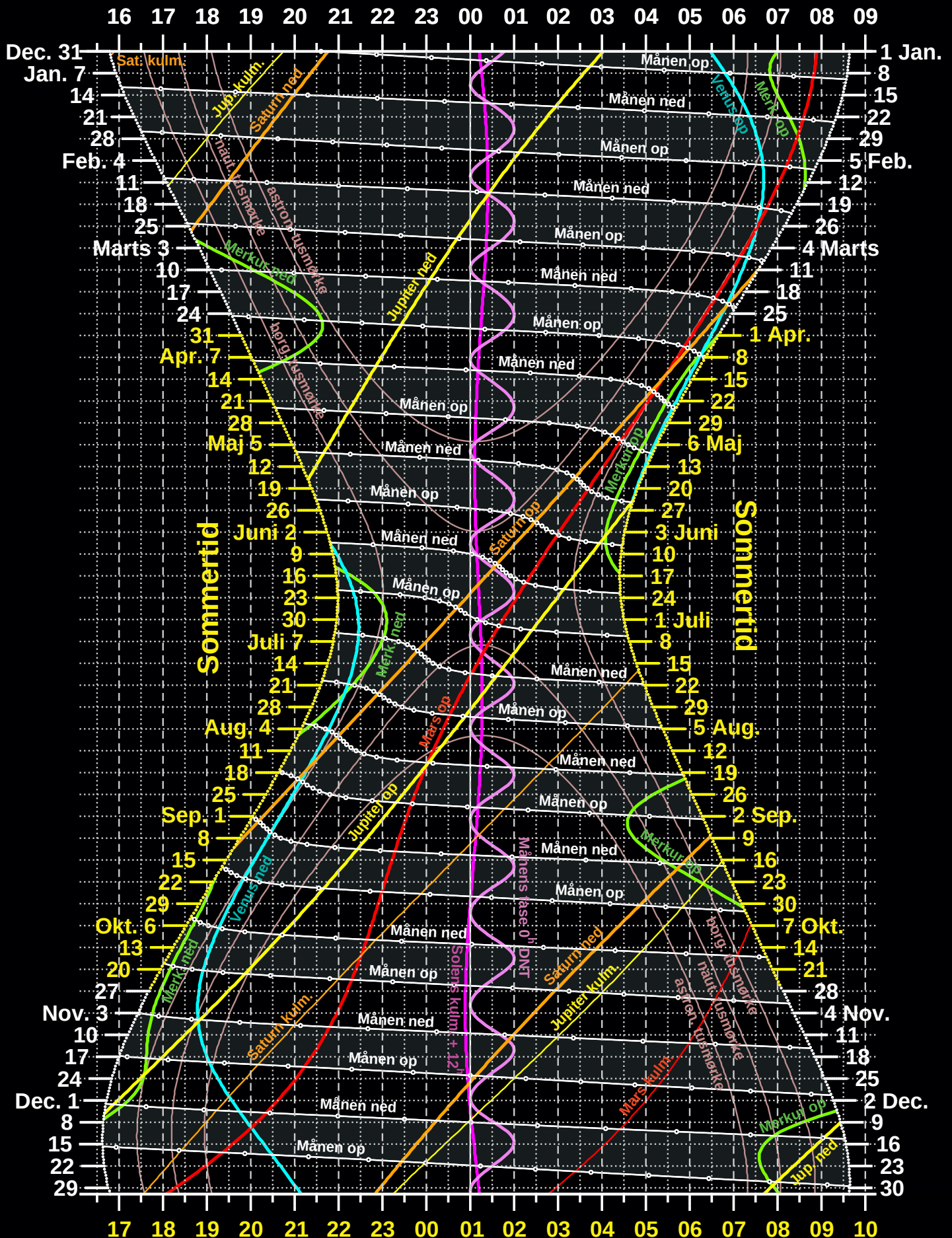
Følg desuden Selskabets aktiviteter på vores hjemmeside og LinkedIn profil:

<https://danskfysiskselskab.dk/>

<https://www.linkedin.com/company/dansk-fysisk-selskab>

Planetkalender for København 2024

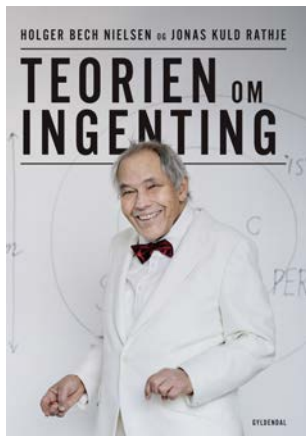
Dansk Normaltid



Aktuelle bøger

Jens Olaf Pepke Pedersen og Arne Nielsen

Teorien om Ingenting



Holger Bech Nielsen og Jonas Kuld Rathje, “Teorien om ingenting”, 2023, Gyldendal, 280 sider, hæftet, 300 kr.

Holger Bech Nielsen må være nationens mest kendte fysiker. Han har optrådt talrige gange på tv og i film, givet et utal af interviews, og hans foredrag kan bedst sammenlignes med et standupshow, hvor han optræder i rollen som den energiske, højtråbende og lidt mærkelige, men charmerende professor.

Nu er Bech Nielsen så bogaktuel med *Teorien om ingenting*, som han har skrevet sammen med Jonas Kuld Rathje, der er journalist og chefredaktør på Illustreret Videnskab, og bogen er en opfølgning på *Teorien om alt*, som makkerparret udgav i 2019. Dengang beskrev de Bech Nielsens jagt på en fundamental og forenet teori i fysikken, som han har kaldt “Tilfældig Dynamik”. Hovedantagelsen er, at man ikke skal antage noget som helst, eller i hvert fald så lidt som muligt, hvorefter naturlovene nærmest kommer dumpende ud af teorien helt af sig selv. Det lyder mærkeligt, og det er det også således, som det blev forklaret i bogen. Kvants læsere opfordres i stedet til at læse den glimrende artikel af Holger Bech Nielsen og John Rosendal Nielsen “Holgers jagt på den fundamentale teori”, som blev bragt i *Kvant* i juni 2020 side 23–28, og hvor man som læser bliver meget klogere.

En teori om ingenting lyder måske endnu mere mærkeligt, men det er den til gengæld ikke. Med udtrykket “ingenting” mener Bech Nielsen nemlig et vakuum, som ikke er et tomt rum, men en tilstand i kvantefeltteori med den laveste energi. I denne teori er kvantefysikken udvidet med et felt, der beskriver en egenskab ved rummet. Det kan være et elektrisk felt, men det kan også være et mere kompliceret felt, hvor for eksempel en elektron kan opfattes som en tilstand i et elektronfelt.

Det tomme rum er således fyldt med felter, der beskriver partikler, vi kan observere, som for eksempel

elektroner, protoner eller neutroner. Det bliver der brugt en del sider på at forklare, blandt andet fordi forfatterne tager os med på en af bogens mange omveje, som i dette tilfælde bliver en længere udflugt omkring skabelsesmyter i forskellige religioner, græske sagn og antikkens filosofi samt reinkarnation i hinduismen.

En vigtig egenskab ved et kvantefelt er, at feltet i ét område er sammenfiltret med feltet i naboområdet og dermed i princippet også med feltet i hele universet. Sammenfiltreringen aftager dog hurtigt, når områderne kommer længere og længere væk fra hinanden, men formelt betyder det, at man ved at forstyrre kvantefeltet i et lille område af rummet kan ændre feltets tilstand i hele universet. Bech Nielsen nævner adskillige gange Reeh og Schliedersætningen fra 1961, men uden at det rigtig bliver forklaret i bogen. Derfor en kort forklaring her: Reeh og Schliedersætningen er et rent relativistisk resultat i lokal kvantefeltteori. Sætningen medfører ikke-lokale effekter, fordi man ved at udføre lokale operationer inden for et bestemt område af rumtiden øjeblikkeligt vil kunne ændre feltets tilstand over et andet (rumligt) separeret område. Dette kan forekomme selv i vakuum, og ved at bruge passende operatorer kan en måling i et sted i laboratoriet få en elektron til at dukke op et helt andet sted. I stedet for at kigge efter en elektron, kan man også spørge, om der i et givet område fx på Månens bagside findes en lyserød elefant. Og der vil altid være en sandsynlighed, som ikke er nul, for at det er tilfældet, også selvom sandsynligheden er så ekstremt lille, at det ikke har nogen praktisk betydning.

Den lyserøde elefant fylder en del i bogen, og det forvirrer måske mere, end det gavner, men i hvert fald understreger det, at kvantefeltteorien beskriver en verden, der ligger langt fra vores dagligdags erfaringer.

Hvert kapitel i bogen afsluttes med flere siders “Eftertanker”, som gengiver en e-mailudveksling mellem de to forfattere. Den uredigerede form giver desværre bogen et præg af samtalebog, også fordi samtaleformen dukker op i form af dialoger inde i kapitlerne.

Bech Nielsen har mange fantasifulde tanker om universets mysterier, og i den tidligere bog *Teorien om alt* havde han også en forklaring på det mørke stof, som han mente var almindeligt stof, men komprimeret i centimeterstore “perler” med en vægt på en halv million ton, og som fløj rundt i galakserne. Ifølge Bech Nielsen vil Jorden med omkring hundrede års mellemrum blive ramt af en megatung perle, og det kunne fx forklare Tunguska-begivenheden, hvor en eksplosion over det østlige Sibirien 30. juni 1908 væltede alle træer i et område på størrelse med Sjælland. Under indtryk af et eksperiment i Gran Sasso-bjerget har Bech Nielsen nu ændret opfattelse af perlerne, der er skrumpet til nanometerstørrelse. De er stadig højt komprimerede, men på grund af den lille størrelse vejer de ikke mere end et sandkorn. Til gengæld er der mange af dem, som

rammer Jorden, uden at vi opdager det.

Bech Nielsen har også en teori om den endnu mere mystiske substans, mørk energi, som får universet til at udvide sig. Ifølge hans model består universet af forskellige typer vakuum, der er omgivet af hinder, som i takt med universets udvidelse overtager effekten af den mørke energi. Teorien om hinderne har den fordel, at universet om mange milliarder år kan begynde at trække sig sammen igen, hvilket passer bedre med Bech Nielsens forestilling om et cyklisk univers i stedet for et univers i konstant udvidelse. Desværre må han indrømme, at hans beregninger viser, at ideen ikke ser ud til at være troværdig.

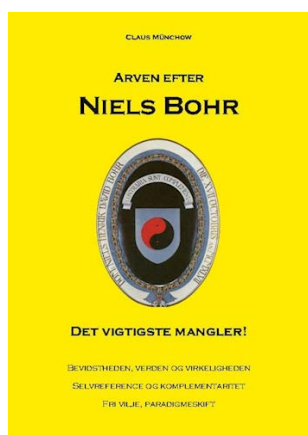
Holger Bech Nielsen er en utraditionel fysiker, der allerede lige efter sin kandidatgrad i 1968 leverede nogle af de første bidrag til strengteorien. Det er også befriende, at der i dele af fysikken fortsat er plads til de vilde og skøre ideer, og at han sidst i bogen advarer mod at tro, at videnskaben altid har ret. I stedet håber han, at det står klart for læseren, hvornår han skal tro på det, der står i bogen, og hvornår det er mere tvivlsomt.

Til den tvivlsomme del hører også Bech Nielsens mange lomme filosofiske tanker og betragtninger, hvor det ville have tjent både læseren og ikke mindst Bech Nielsen selv, hvis Jonas Kuld Rathje som journalist og redaktør havde kondenseret de mange spekulationer. I stedet sidder man efter endt læsning mest tilbage med oplevelsen af at have været udsat for en bogudgave af et af Holger Bech Nielsens hyperenergetiske foredrag. Det er god underholdning, men bagefter er det svært at forklare, hvad man egentlig fik at vide.

Jens Olaf Pepke Pedersen

Jens Olaf Pepke Pedersen er redaktør af Kvant. En tidligere udgave af denne anmeldelse har været bragt i Weekendavisen.

Arven efter Bohr



Claus Münchow, “Arven efter Niels Bohr – Det vigtigste mangler!”, 2023, Books on Demand, 76 sider, paperback, 100 kr.

Claus Münchow, som i augustnummeret af Kvant 2023 havde en artikel, hvori han kritiserede David Favrholtts udlægning af falsifikationsbegrebet i den logiske positivisme, har skrevet en bog med titlen

“Arven efter Niels Bohr”, med tilføjelsen “Det vigtigste mangler!”. Bogen er med sit lille omfang – 76 sider – bemærkelsesværdigt tankevækkende, idet den formidler – på sin egen måde – de idéer af filosofisk karakter, som Bohr selv tillagde stor vægt, og som synes overset af fysikerverdenen. Claus Münchow, som selv er kandidat i matematik og fysik fra KU, formår her at berette om Bohrs overvejelser på en måde, der indebærer agtelse for læserens egne tænkeevner. De i teksten fremsatte overvejelser er fremsat med en styrke, som er tilstrækkelig til, at læseren har muligheden for at være uenig, og når således i forhold til stoffet ud over rampen, hvilket sjældent forekommer i videnskabelig litteratur, som ofte har en tilbøjelighed til at lukke sig om sig selv. Uenighed kan jo også anskues som led i læserens arbejde med at forstå stoffet. I arbejdet med at forstå kvantemekanikken lå det jo Bohr meget på sinde at være meget opmærksom på antagelser, man uafvidende gør sig inden bekendtskabet med kvanteteorien, og som nok i mange sammenhænge bidrager til at gøre denne uforståelig.

Bohr lagde vægt på iagttagers rolle som deltager i verden, hvorfor de første fem kapitler i bogen bevæger sig i krydsfeltet mellem psykologi og filosofi, og som heri søger nærmere at indkredse iagttagers beskaffenhed. Årsagen til, at den filosofiske dimension i kvanteteorien er så overset, må nok ligge i, at kvanteteorien virker så utroligt godt, og at den i den form, som denne ofte præsenteres i, opretholder den skelnen mellem iagttagelse og objekt, som Bohr netop var kritisk i forhold til.

Tankevækkende er det også, at Claus Münchow allerede på side 12 erklærer sig som kreationist. Nu tænker jeg ikke, at han har bibeltro amerikanere i tankerne, men snarere, at han tager udgangspunkt i sit mirakelbegreb, som han definerer som principielt uforklarlige kendsgerninger. Som jeg forstår det, er det her matematikeren Claus Münchow, der her træder frem, idet han med Gödels sætninger i hånden opererer med det principielt uforklarlige. Jeg har det lidt svært med denne begrebsdannelse, for hvordan kan vi vide, at en fysisk kendsgerning er principielt uforklarlig? En ting er matematikken, men hvordan bærer man sig ad med at bevise, at et fysisk fænomen er principielt uforklarligt? Menneskene har før stødt ind i kendsgerninger, som de ikke kunne forklare, men som de senere kom efter, efter at have revideret deres begreber. At vi ved, at der findes lovmæssigheder, der unddrager sig deduktiv udledning, behøver ikke at indebære, at de unddrager sig undersøgelse. Kurt Gödel fremkom med sine sætninger i 1931, så vi må antage, at Niels Bohr kendte til dem.

Bogen indeholder ingen formler eller ligninger, og noteapparatet, som kan læses med udbytte som et kapitel i sin egen ret, henviser til en fil på nettet med links til kilder, som forfatteren har benyttet. Der kunne uden tvivl siges mere om denne bog, men læs den!

Arne Nielsen

Arne Nielsen har virket som programmør, biokemistuderende og laborant med en langvarig interesse for naturvidenskab, psykiatri og psykologi. Han er i dag folkepensionist.

Kommende foredrag

Dato	Tid	Foredragstitel	Foredragsholder	Forening
Jan 2024				
29/1	19.30	SNU, 200 års videnskabsformidling – fra enevælden til det moderne Danmark	Kristian Hvidtfelt Nielsen	SNU
Feb 2024				
5/2	18.15	Gravitationsbølgekilder – LIGO/VIRGO (Foredraget er på engelsk)	Daniele Malesani	AS (Kbh)
12/2	18.15	Vera Rubin – Rubin Observatoriet / LSST	Christa Gall	AS (Kbh)
12/2	17.45	Gravitationsbølgekilder – LIGO/VIRGO (Foredraget er på engelsk)	Daniele Malesani	AS (Aarh)
19/2	18.15	STEP: det nye danske rumteleskop	Mia Lundquist	AS (Kbh)
19/2	17.45	Vera Rubin – Rubin Observatoriet / LSST	Christa Gall	AS (Aarh)
19/2	19.30	H. C. Ørsted i rummet med Andreas Mogensen – hvorfor?	Anja C. Andersen	SNU
26/2	18.15	Tidevandssynderrivningsbegivenheder (Tidal disruption events)	Giorgious Leloudas	AS (Kbh)
26/2	17.45	STEP: det nye danske rumteleskop	Mia Lundquist	AS (Aarh)
Mar 2024				
4/3	18.15	NOT Transient Explorer: Et nyt instrument til Det Nordiske Optiske Teleskop og hvad vi vil bruge det til	Johan Fynbo	AS (Kbh)
4/3	17.45	Tidevandssynderrivningsbegivenheder (Tidal disruption events)	Giorgious Leloudas	AS (Aarh)
11/3	17.45	NOT Transient Explorer: Et nyt instrument til Det Nordiske Optiske Teleskop og hvad vi vil bruge det til	Johan Fynbo	AS (Aarh)
Apr 2024				
8/4	19.30	Martin Knudsen – den næsten glemte fysiker og havforsker Efter foredraget er der generalforsamling	Helge Kragh	SNU

AS (Kbh): City Campus, København (astronomisk.dk).

AS (Aarh): Astronomisk Selskab, Aarhus Universitet, Ny Munkegade 118, 8000 Aarhus C (bygning 1530, lokale G122).

Medlemmer af AS får tilsendt et nyhedsbrev før foredragsrækken går i gang med information om tilmelding. Andre interesserede kan tilmelde sig via Folkeuniversitetet i hhv. København og Aarhus.

Wieth-Knudsen Observatoriet, Margot Nyholms Vej 1, 3220 Tisvildeleje, har åbent hus-arrangementer med gratis adgang to lørdage om måneden. De kommende datoer er 9/12, 30/12, 13/1, 27/1, 10/2, 24/2, 9/3, 30/3, 13/4 og 27/4. 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).

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.