

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 opridse 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?

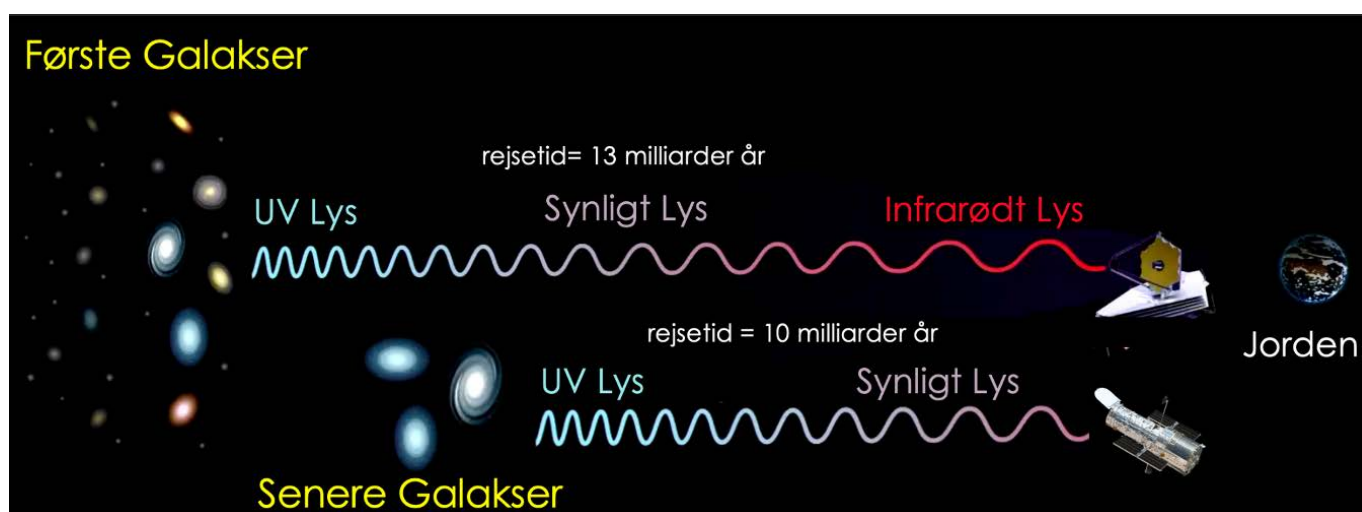
I over 30 år har Hubble-rumteleskopet været det førende optiske teleskop, og i den periode har det transformeret vores forståelse af universet på stort set alle fronter. Dog er Hubble fundamentalt begrænset i sin evne til at

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 ($\lambda_{udsendt}$) af lyset, da det blev udsendt fra galaksen og bølgelængden ($\lambda_{observeret}$) af lyset, da blev observeret, er: $\lambda_{observeret}/\lambda_{udsendt} = 1 + z$. 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 *Webb's 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.



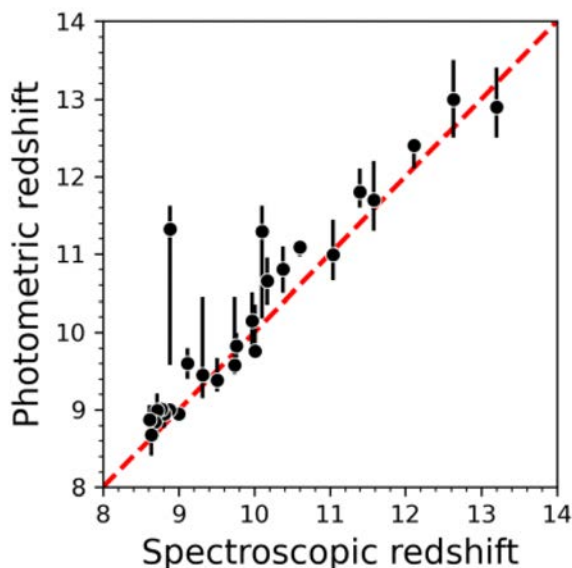
Figur 2. Webb's First Deep Field – det første billede fra Webb-teleskopet, offentliggjort den 11. juli 2022. Billedet viser galaksehoben SMACS0723 (afstand 4,6 milliarder lysår), og repræsenterer en samlet eksponeringstid med Webb på 12,5 timer. I dette første billede med Webb fandt man galakser, som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

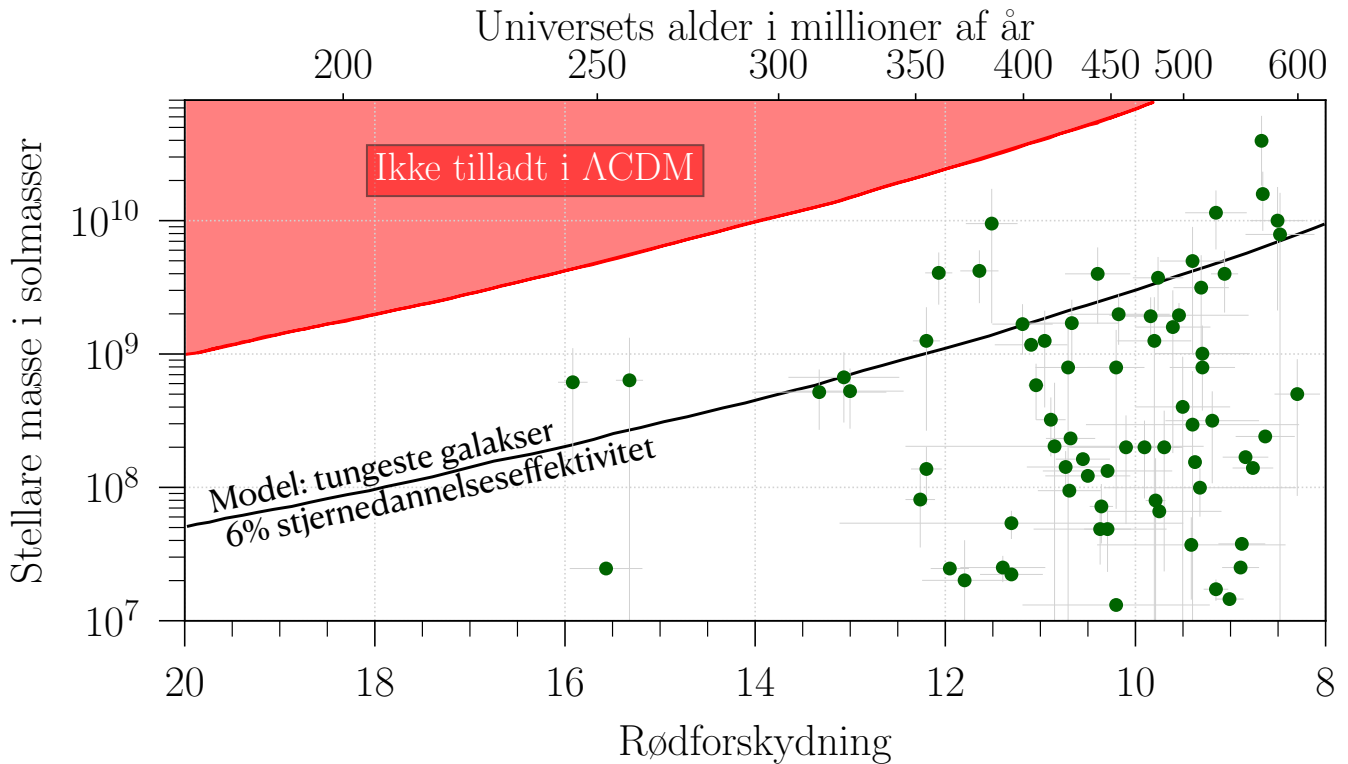
Det bedste værktøj, vi har til at forstå dannelsen af de første galakser, er Λ CDM-modellen, som er en teoretisk ramme, der beskriver universets udvikling i kølvandet på Big Bang. Ifølge Λ CDM-modellen, som bygger på præcisionsmålinger af den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling, såvel som målinger af 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 modelforudsigtelse af den øvre grænse for de tungeste galakser, man ville forvente at finde i COSMOS-Web-gennemmønstringen, som p.t. er den største gennemmønstring af himmelen med Webb (0,6 kvadratgrader). I modelforudsigtelsen 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 forudsigtelsen.

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 forsides historier 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 stellare 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

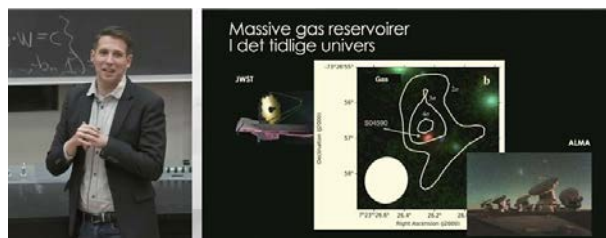


Den 23. oktober 2023 bød Selskabet for Naturlærens Udbredelse velkommen til en festlig Kirstine Meyer Aften med uddeling af det prestigefyldte Kirstine Meyers Mindelegat til astrofysikeren Kasper Elm Heintz fra Niels Bohr Institutet.

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](https://www.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 diplomaten 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.