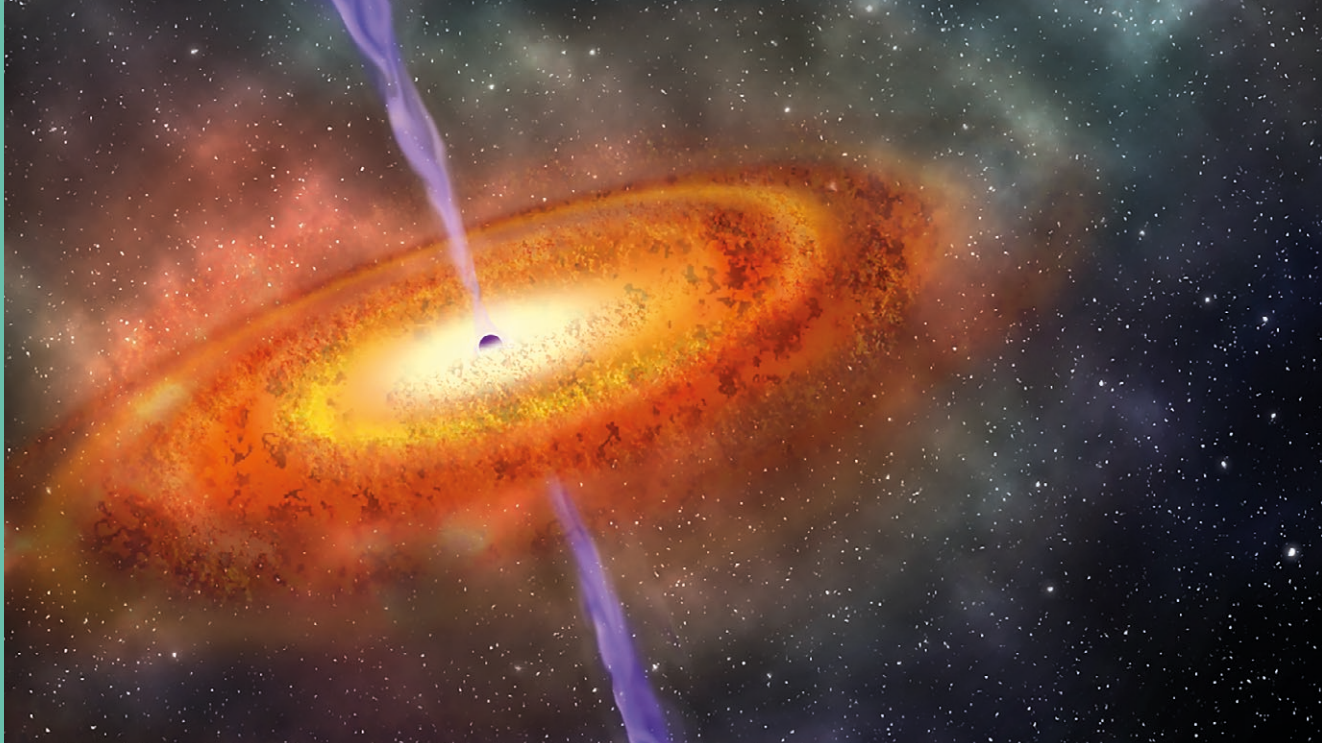


En kvasar opstår, når store mængder gas falder ned mod et supermassivt sort hul i centrum af en galakse. Gassen lægger sig i en roterende skive omkring det sorte hul og opvarmes, så den begynder at lyse voldsomt.

Illustration: Robin Dienel/Carnegie Institution for Science



KOSMISKE FYRTÅRNE GIVER NY VIDEN OM TIDLIGE GALAKSER

Kvasarer er objekter i universet, der kan lyse lige så kraftigt som hundredvis af galakser tilsammen. Astronomerne forsøger nu at udnytte disse kosmiske fyrtårne til at skaffe sig viden om galakserne i det tidlige univers for 10-12 milliarder år siden.

Om forfatteren

Af Henrik Bendix, videnskabsjournalist. bendix@vidmere.dk



DANMARKS FRIE FORSKNINGSFOND
INDEPENDENT RESEARCH FUND DENMARK

Artiklen er sponsoreret af Danmarks Frie Forskningsfond | Natur og Univers.

Danmarks Frie Forskningsfond dækker alle videnskabelige hovedområder og uddeler hvert år godt 1 mia. kr. til forskningsprojekter baseret på forskernes egne ideer. Danmarks Frie Forskningsfond består af 84 anerkendte forskere udpeget på baggrund af deres høje faglige kompetence. Formand for Danmarks Frie Forskningsfond | Natur og Univers er professor ved Københavns Universitet, Henrik Grum Kjærgaard. Læs mere på www.dff.dk

Professor Johan Fynbo fra forskningscenteret DAWN på Niels Bohr Institutet vil rigtig gerne vide mere om galakserne i universets vilde ungdom, men de er svære at blive klog på. Problemet er, at afstanden til de tidlige galakser er vokset i takt med universets udvidelse. Nu er de så langt væk, at det er svært at fange lyset fra dem.

Men astronomerne har fundet ud af, hvordan de kan lære de fjerne galakser bedre at kende, selv om de ikke kan se dem direkte. De efterlader sig nemlig spor i lyset fra de kosmiske fyrtårne, der kaldes kvasarer.

I et nyt forskningsprojekt vil et hold astrofysikere, heriblandt Johan Fynbo, udnytte kvasarerne til at grave sig ned i universets historie. Kvasarlyset kan nemlig give et væld af informationer om galakserne, herunder deres størrelse, indhold og udvikling gennem tiden.

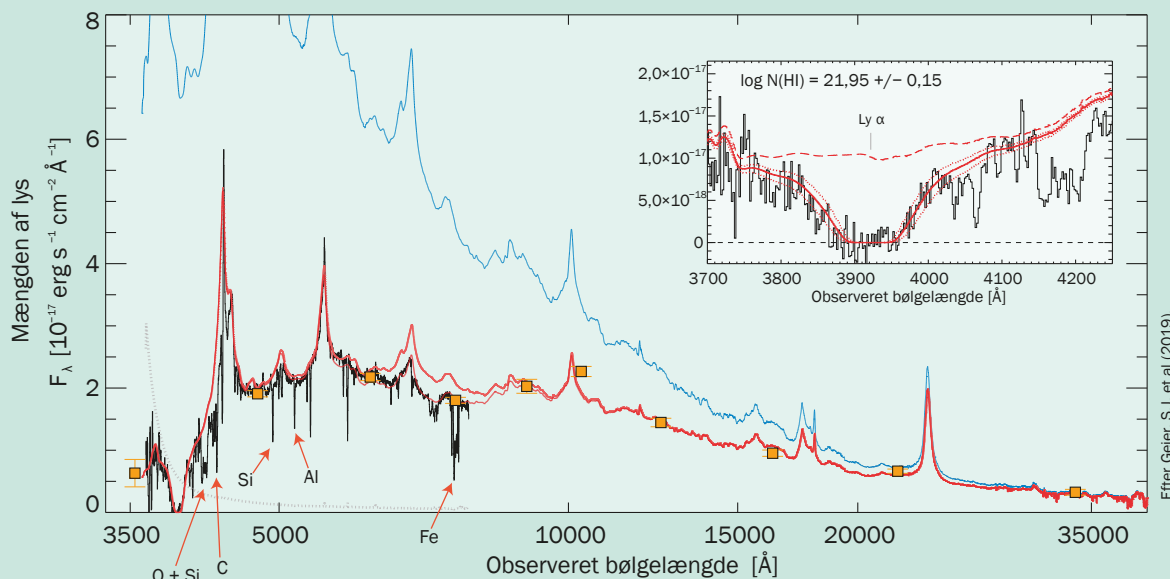
Kvasarer er en forkortelse for “kvasistellare objekter” – et navn, som refererer til, at disse meget fjerne objekter ved første øjekast ligner stjerner. Kvasarer blev opdaget i 1960'erne, efter man var begyndt systematisk at afsøge rummet for objekter, der udsender

radiobølger. En kvasar kan lyse så kraftigt som hundredvis af galakser tilsammen, og de hurtige variationer i kvasarernes lysstyrke røber, at de har en udstrækning omtrent svarende til Solsystemet.

Roterende gas lyser voldsomt op

Det store spørgsmål er, hvordan et objekt på størrelse med Solsystemet kan lyse flere billioner gange så klart som Solen. Den sovjetiske fysiker Yakov Zeldovich og den østrigskfødte amerikanske astrofysiker Edwin Salpeter kom med et godt bud på et svar allerede i 1964: Der må være meget store sorte huller på spil.

Kvasarlyset røber indholdet af en galakse



Når lyset fra en kvasar passerer igennem en galakse, bliver det generelt mere rødt, og noget af lyset bliver absorberet ved specifikke bølgelængder af galaksens gas. Det ses tydeligt i spektret af lyset fra kvasaren GQ1218+0832.

Da kvasarlyset ramte galaksen, blev ultraviolet stråling med en bølgelængde på 1215,67 ångstrøm (lyman-alfa-linjen) absorberet af galaksens hydrogenatomer. Dette måles i praksis ved en bølgelængde på godt 3900 ångstrøm. Det skyldes, at lyset har været på vej mod os i mere end 10 milliarder år, og imens har universet udvidet sig. Lyset er derfor blevet rødforskudt, så det nu har 3,226 gange længere bølgelængde. Ved 3900 ångstrøm ses en tydelig dæmpning af lyset. Den indsatte graf viser denne del af spektret i større detalje – udtrykket $\text{Log}N(\text{HI})=21,95 \pm 0,15$ angiver logarit-

men til søjletætheden af neutral hydrogen langs sigtelinjen (målt per cm^2). I denne galakse er der altså $10^{21,95}$ neutrale hydrogenatomer per cm^2 langs sigtelinjen.

Spektret rummer også tydelige absorptionslinjer fra tungere grundstoffer som silicium, oxygen, carbon, jern og aluminium (nogle af de tydeligste linjer for disse grundstoffer er markeret på figuren). På den måde kan astronomerne se, at den tidlige galakse rummede betydelige mængder af disse grundstoffer. Firkanterne angiver fotometriske målinger. Her måler man fluxen af objektet i bestemte bølgelængdeområder, som dækkes af forskellige filtre.

Den blå linje viser, hvordan kvasarens spektrum havde set ud, hvis lyset ikke var blevet dæmpet af en galakse undervejs.

»Det kan lyde mærkeligt, at et sort hul kan være en kilde til energi. Men det stof, der ligger tæt omkring det sorte hul, bliver meget varmt og lyser helt enormt op. Det er, hvad man kan se som en kvasar,« lyder det fra Johan Fynbo.

Når stof falder ned mod et sort hul, falder det ikke direkte i, men lægger sig i en såkaldt tilvækstskive omkring det sorte hul. Det svarer til, at al vandet i et badekar ikke kan forsvinde ud i afløbet med det samme, når man hiver proppen op. I stedet opstår der en strømhvirvel omkring afløbet.

Stoffet opnår en meget stor hastighed i faldet mod det sorte hul, hvor potentiel energi omdannes til kinetisk energi. Når faldet bremses i tilvækstskiven, bliver den kinetiske energi til varme, og stoffet udsender store mængder elektromagnetisk stråling, lige fra røntgenstråling til radiobølger.

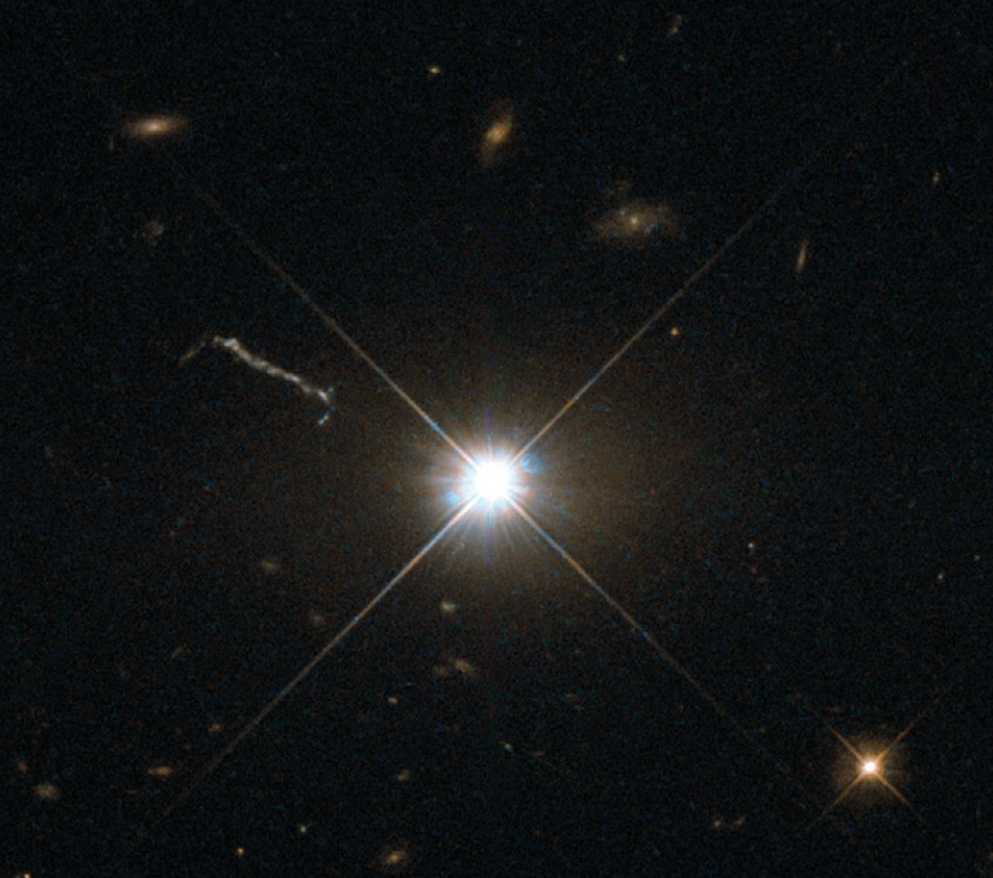
»Skiven af stof omkring det sorte hul har mange forskellige temperaturer. Der er varmest tættest på det sorte hul, og så falder temperaturen, jo længere udad man kommer. Så man får et meget bredt spektrum fra den termiske stråling,« siger Johan Fynbo og tilføjer, at

der også kan observeres såkaldt synkrotronstråling fra ladede partikler, der accelereres i det kraftige magnetfelt, der dannes omkring det sorte hul.

Lyset fra kvasarer kan passere igennem galakser

Netop fordi kvasarer er så ekstremt lysstærke, kan de ses på meget lang afstand, og når man kigger ud i universet, ser man også tilbage i tiden. Lyset har været 13 milliarder år undervejs fra de fjerneste kvasarer, så de giver et indblik i universets barndom.

Men for Johan Fynbo er det ikke



I et teleskop ligner 3C 273 en stjerne, men det ekstremt lysstærke objekt er i virkeligheden en kvasar – her fotograferet af Hubble-teleskopet. Den er cirka to milliarder lysår herfra og velkendt blandt amatørastrofysikere, for 3C 273 er det fjerneste objekt, det er muligt at få øje på gennem hobbyteleskoper. De fleste kvasarer er dog meget længere væk. Foto: ESA/Hubble & NASA

kan være milliarder af lysår herfra og lyser så meget svagere end kvasaren.

Ud fra størrelsen af dæmpningen kan man beregne antallet af neutrale hydrogenatomer, lyset har passeret igennem på sin vej imod os, og dermed få et mål for galaksens størrelse. Og ved at kigge på, hvor mange kvasarer, der får sit lys dæmpet af galakser, kan man få en idé om tætheden af galakser i universet.

De fleste tidlige galakser var ganske små

I midten af 1980'erne begyndte astrofysikere med amerikaneren Art Wolfe i front at bruge kvasarlyst til at studere galakser på den måde. Og til at starte med kom resultaterne bag på forskerne:

»Man fandt ud af, at kvasarlyst passerer igennem en galakse meget hyppigere end forventet ud fra tætheden af galakser i det lokale univers. Der var to mulige forklaringer: Enten var galakserne meget større før i tiden, eller også var der mange flere af dem,« forklarer Johan Fynbo og fortsætter:

»Nu var udfordringen at få øje på nogle af de galakser, så man kunne finde ud af, om de var store eller små. Det var noget af det, jeg arbejdede med i min ph.d. i slutningen af 1990'erne. Vi fandt efterhånden ud af, at langt de fleste af de galakser, der dæmper lyset fra kvasarer, må være små dværggalakser.«

»Der er mange flere dværggalakser

Johan Fynbo

Johan Fynbo er professor i astrofysik ved Niels Bohr Institutet på Københavns Universitet. Han er tilknyttet forskningscenteret The Cosmic Dawn Center (DAWN), der både har til huse på Københavns Universitet og på Danmarks Tekniske Universitet.



Johan Fynbo studerer galakser i det unge univers – dvs. de første 2-3 milliarder år efter Big Bang. Særligt arbejder han med at studere grundstofdannelse i de første galakser. Til det formål udnytter han lysstærke objekter som kvasarer og eftergløder fra gammaglimt. Johan Fynbo er også stærkt engageret i udvikling af nye instrumenter. jfynbo@nbi.ku.dk

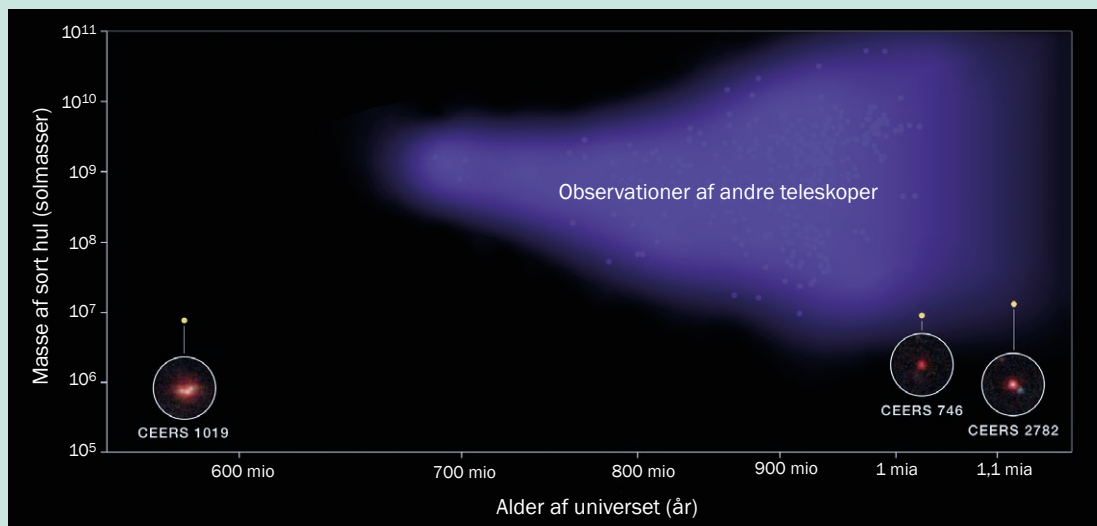
kvasarerne i sig selv, der trækker. Han er mere interesseret i de galakser, som befinder sig mellem kvasarerne, og de teleskoper, der bruges til at observere dem.

»Kvasarerne er spændende, men for mig er de et værktøj til at studere galakser, der er meget langt væk. Hvis lyset fra en kvasar passerer igennem en galakse, vil en del af lyset blive absorberet af galaksens materiale. Når man kigger på spektret fra kvasaren, vil man se

meget kraftige absorptionslinjer fra hydrogen, hvis der ligger en galakse i sigtelinjen,« siger han.

I første omgang kigger forskerne efter det dyk i spektret, der skyldes, at ultraviolet lys fra kvasaren absorberes af neutrale hydrogenatomer, der går fra grundtilstanden til første exciterede tilstand – den såkaldte Lyman-alfa-absorptionslinje. Dykket kan fortælle en hel del om galaksen, som i sig selv kan være uhyre svær at få øje på, fordi den

De første kvasarer var tidligt på den



Lyset fra CEERS 1019 har været 13,2 milliarder år undervejs. Det røber Webb-teleskopets infrarøde spektroskop, som giver en rødforskydning på 8,679. Credit: NASA, ESA, CSA, Leah Hustak (STScI)

I 2021 præsenterede et internationalt hold astronomer den hidtil fjerneste kvasar, der fik navnet J0313–1806. Kvasaren lyste kraftigt op, da universet blot var 670 millioner år gammel. Først nu, mere end 13 milliarder år senere, er lyset nået frem til os.

Astronomerne anslår, at kvasaren drives af et sort hul med en masse på 1,6 milliarder solmasser. Det er ikke helt nemt at forklare, hvordan et så stort hul kunne nå at være dannet så tidligt i universets historie.

For nyligt blev et endnu fjernere supermassivt sort hul fundet ved hjælp af Webb-teleskopet. Det sorte hul i

galaksen CEERS 1019 har en mere beskedne størrelse, idet massen estimeres til at være ni millioner gange Solens masse, og det var i fuld gang med at vokse sig større ved at sluge gas, da universet var 570 millioner år gammelt.

Den aktive galaksekerne i CEERS 1019 lyser ikke så voldsomt, at forskerne bag opdagelsen kalder den en kvasar. I stedet skriver de i den videnskabelige artikel, der publiceres i *The Astrophysical Journal Letters*, at der kan være tale om en galaksekerne, der senere udvikler sig til en kvasar – en form for forfader (progenitor) til de kvasarer, der opstår senere.

end større galakser som Mælkevejen, og når man går tilbage i tiden, var endnu flere af galakserne små. Det vidste man ikke på det tidspunkt.»

Selv med de største teleskoper kunne astrofysikerne kun sjældent få øje på de galakser, der efterlader absorptionsspektre i kvasarlyset. Det hænger sammen med, at de fjerne dværggalakser lyser så svagt, at de er umulige at få øje på i teleskoper. De er derude, men røber kun deres eksistens ved at dæmpe lyset fra kvasarer.

Ind imellem lykkes det dog at indfange og analysere lyset fra en af de galakser, der set fra Jorden ligger meget tæt på en kvasar. Det kræver et stort teleskop med en høj opløsningsevne, og her kom rumteleskopet Hubble, der blev opsendt i 1990, til hjælp.

Store galakser rummer tunge grundstoffer

I slutningen af 1990'erne kom endnu et nyt superteleskop til verden, nemlig Very Large Telescope (VLT), flagskibet for Det Europæiske Sydobservatorium (ESO). Observatoriet er placeret på toppen af det 2.625 meter høje bjerg Paranal i Atacama-ørkenen i Chile.

»I august 1999 var der en total solformørkelse i Europa, så de fleste europæiske astronomer blev hjemme. Så kunne jeg, som den første dansker, komme til at observere med det nybyggede VLT-observatorium. Her lykkedes det at fange lyset fra to galakser, der forårsager dæmpning af lyset fra kvasarer,« fortæller Johan Fynbo.

De galakser, som astrofysikerne kan observere direkte, rummer ikke bare hydrogen. I det absorp-

tionsspektrum, de synlige galakser efterlader i kvasarlyset, er der spektrallinjer fra en lang række andre grundstoffer som carbon, oxygen, silicium, jern og mange flere. Disse grundstoffer, der er tungere end helium, er dannet i stjernerne og spredt ud i galaksen, når tunge stjerner er eksploderet som supernovaer.

Men i rigtig mange absorptionspektre for de galakser, der ikke kan ses direkte, er der kun meget svage linjer fra de tunge grundstoffer. Her fandt forskerne frem til, at det må skyldes, at de små dværggalakser, der er svære at få øje på, ikke er store nok til at fastholde de tunge grundstoffer, der skydes ud fra supernovaer.

I supernovaeksplosionen får stoffet en hastighed, der er så høj, at den overstiger undvigelseshastigheden



DANMARKS FRIE FORSKNINGSFOND
INDEPENDENT RESEARCH FUND DENMARK



Det europæiske teleskop VISTA i Chile er blevet udstyret med en spektrograf, så astronomerne kan analysere lyset fra de cirka 200.000 kvasarer, de forventer at finde ved hjælp af rumteleskopet Gaia. Foto: G. Hühdepohl (atacamaphoto.com)/ESO

fra dværggalakser. De små galakser er ikke massive nok til, at de kan holde på supernovaernes tunge grundstoffer, der i stedet ender i det intergalaktiske rum.

De større galakser bliver til gengæld stadig mere beriget med tunge grundstoffer, efterhånden som tiden går. Ved at måle, hvor kraftige de forskellige spektrallinjer i spektret for en given galakse er, kan forskerne finde ud af, hvad galakserne rummer af grundstoffer. Og ved at måle rødforskydningen af spektrallinjerne kan de finde ud af, hvornår i universets historie, galaksen så sådan ud.

Kvasarerne står stille på himlen

Lyset fra kvasarerne rummer således et væld af informationer om de fysiske og kemiske egenskaber for galakser i forskellige epoker. Tjekker man mange tusinde kvasarer for absorptionspektre fra galakser, kan man få en statistisk overbe-

visende model for galakserne og deres udvikling gennem universets historie.

Her kommer det internationale forskningsprojekt The 4MOST-Gaia Purely Astrometric Quasar Survey, forkortet 4G-PAQS, ind i billedet. Det har til formål at bruge data fra det europæiske rumteleskop Gaia til at finde kvasarer, der efterfølgende kan studeres nærmere. Projektet ledes af danske Jens-Kristian Krogager, som er uddannet på Niels Bohr Institutet og nu arbejder på forskningscentret for astrofysik i Lyon i Frankrig, og det har deltagelse af Johan Fynbo og flere andre forskere fra Københavns Universitet.

Gaia blev sendt op i 2013 og er stadig i fuld gang med at affotografere himmelrummet igen og igen. Målet er at skabe et detaljeret, tredimensionalt kort over vores galakse. Med Gaia får astronomerne et katalog med position og hastighed for mere

end halvanden milliard af Mælkevejens stjerner, men som sidegevinst fanger rumteleskopet også lyset fra hundredtusindvis af kvasarer.

Stjerner står sjældent stille på himlen. De stjernebilleder, vi ser på himlen i dag, ser helt anderledes ud om 100.000 år, fordi stjernerne bevæger sig i alle mulige forskellige retninger, og det kan Gaia måle. Fordi kvasarerne er så langt væk, ser de til gengæld ud til at stå stille på himlen. Forskerne bag Gaia bruger kendte kvasarer som fikspunkter til at skabe en referenceramme, som stjernerne bevæger sig i forhold til.

Holdet bag 4G-PAQS bruger kataloget fra Gaia til at identificere kvasarer på en ny måde, nemlig ved at fokusere på himmellegemer, der ikke bevæger sig. Bagefter skal kvasarernes spektre analyseres, så forskerne kan finde ud af, om lyset dæmpes af galakserne – og hvilke egenskaber galakserne i så fald har.

Stort teleskop har fået spektroskopiske superkræfter

I retning af de galaktiske poler er der langt færre stjerner end i Mælkevejens plan, så i første omgang nøjes astronomerne med at kigge på himmellegemer, der ligger inden for 30 grader fra den galaktiske sydpol. På den måde bliver det nemmere at finde kvasarerne blandt de mange stjerner.

Når kvasarerne er lokaliseret, skal lyset fra dem analyseres, og her kommer det europæiske teleskop VISTA (Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy) i brug. Det store teleskop, der er placeret tæt på VLT i Chile, er netop blevet forsynet med en spektrograf kaldet The 4-metre Multi-Object Spectroscopic Telescope (4MOST). Med 4MOST kan astronomerne få spektre fra op til 2400 objekter ad gangen, og i alt regner forskerne bag 4G-PAQS med at analysere lyset fra cirka 200.000 kvasarer.

Det smarte ved denne metode er, at forskerne får alle kvasarerne med – i hvert fald alle dem, som lyser stærkt nok til, at Gaia kan fange dem. Og det er ikke en selvfølge, for normalt finder astronomerne kvasarer ved at kigge efter stjernelignende objekter, der udsender mere ultraviolet og blått lys, end stjerner normalt gør – det er umiddelbart den letteste metode til at skelne mellem en stjerne og en kvasar. Men hvis man finder kvasarer på den måde, går man glip af dem, der fremstår mere røde i det, fordi lyset fra dem har passeret igennem støv.

Når astronomer taler om støv, mener de ikke nullermænd, men partikler mindre end sandkorn – ganske små krystaller dannet af oxygen, silicium, carbon, magnesium og jern. Støvpartiklerne dannes blandt andet i dødskrammerne fra mellemstore stjerner og i supernovaer, og hvis lyset fra kvasarerne passerer igennem store støvskyer, ændrer det farve, siger Johan Fynbo:

»Støvkornene absorberer mere af det blå end af det røde lys. Så

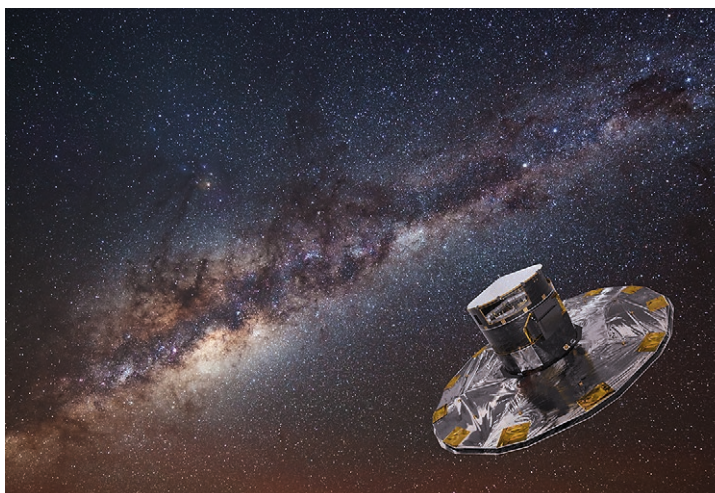


Illustration med det europæiske rumteleskop Gaia, som arbejder på kortlægge stjernerne i Mælkevejen. Kilde: ESA/ATG medialab; baggrund: ESO/S. Brunier

støvet har en rødfarvende effekt. Det kan vi også se for nogle af de kvasarer, der får dæmpet lyset af metalrige galakser – de fremstår røde på grund af støvet i galaksen. Andre er røde, fordi der er støv tættere på kvasarens sorte hul.«

Universets historie afsløres

På DAWN har forskerne tyvstartet arbejdet med at analysere røde kvasarer, før 4G-PAQS rigtig går i gang. Danmarks Frie Forskningsfond støtter projektet QUDES (quasars in dusty environments) med 2,5 mio. kroner, hvoraf en del er gået til at ansætte ph.d.-studerende Simone Vejlggaard Nielsen. For tiden arbejder hun med de røde kvasarer ved ESO's hovedkvarter i Sydtyskland.

Men hidtil har en del af kvasarerne – ikke mindst dem, hvis lys passerer igennem en galakse på vej mod os – undgået astronomernes opmærksomhed. Først med 4G-PAQS-studiet får de alle kvasarerne med, fordi forskerne ikke kigger på farven af objekterne, men kun om de står stille på himlen eller ej.

»Til næste år vil vi begynde at lave en komplet opmåling af kvasarerne i det område af himlen, vi kigger på. Vi vil se, hvordan kvasarpopulationen ser ud, når kvasarerne er fundet uden farveudvalgs kriterier,« siger Johan Fynbo og fortsætter:

»Når datasættet ikke er forstyrret af udvalgs effekter, kan vi begynde at undersøge, hvor mange af kvasarerne, der får lyset dæmpet af galakser. Og så kan vi finde ud af, hvor mange af de galakser, der var i universet få milliarder år efter big bang, der er rige på tunge grundstoffer.«

Lige efter big bang var der kun hydrogen, helium og en lille smule litium i universet. Resten af grundstofferne er kommet til senere. Med 4G-PAQS kan forskerne få svar på, hvordan grundstofindholdet i galakserne har udviklet sig gennem milliarder af år, og hvordan variationen blandt galakserne har været i tidens løb.

Desuden vil det store forskningsprojekt give masser af ny viden om kvasarerne i sig selv. Astronomerne vil bedre kunne bedømme antallet og størrelsen af dem og dermed også massen af de supermassive sorte huller i universets ungdom, og de får indsigt i, hvordan kvasarerne dannes og udvikler sig. Og så er der jo altid en chance for, at der dukker helt nye og spændende ting op, som aldrig er set før, slutter Johan Fynbo:

»Hvis der er en ny form for ekstragalaktisk objekt, som står stille på himlen, så vil vi se det. Vi har mulighed for at finde noget uventet.« ■

Videre læsning:

Geier, S.J. et al (2019): Gaia-assisted selection of a quasar reddened by dust in an extremely strong damped Lyman-absorber at $z = 2.226$. *Astronomy & Astrophysics*, Vol. 625, id.L9

Verdensbilledet i forandring – et hundredårigt perspektiv. Redigeret af Lone Bruun, Johan Fynbo, Michael Quaade og Nicolai Vestergaard-Hansen. Forlaget Epsilon, 2016.



DANMARKS FRIE FORSKNINGSFOND
INDEPENDENT RESEARCH
FUND DENMARK