

KUNSTEN AT VEJE ET SORT HUL

Om forfatterne
Marianne Vestergaard
Dark Cosmology Centre,
Niels Bohr Institutet
vester@dark-cosmology.dk
Carsten R. Kjaer,
Aktuel Naturvidenskab


**DET FRIE
FORSKNINGSRÅD**
DANISH COUNCIL
FOR INDEPENDENT
RESEARCH

Artiklen bringes i samarbejde med Det Frie Forskningsråd | Natur og Univers.

Det Frie Forskningsråd dækker alle videnskabelige hovedområder og uddeler hvert år godt 1 mia. kr. til forskningsprojekter baseret på forskernes egne ideer. Det Frie Forskningsråd består af 84 anerkendte forskere udpeget på baggrund af deres høje faglige kompetence. Formand for Det Frie Forskningsråd | Natur og Univers er professor ved Danmarks Tekniske Universitet, Lone Gram. Læs mere på detfrieforskningsraad.dk

I centrum af enhver galakse i universet findes et supertungt, sort hul. At kende den nøjagtige masse på disse sorte huller er en nøgle til at forstå, hvordan galakserne udvikler sig. Derfor er forskerne meget interesserede i at forfine kunsten at "veje" et sort hul.

Tænk på fænomenet "sorte huller", og fantasien kommer straks på overarbejde. For hvordan forestiller man sig et objekt så kompakt, at fx hele Jorden ikke ville fylde mere end en sukkerknald, hvis dens masse blev presset sammen til en tæthed svarende til et sort hul?

I virkeligheden er vores fantasi dårlig udrustet til at visualisere et fænomen som et sort hul. Nok kan vi finde dramatiske illustrationer af sorte huller på nettet, men fælles for sådanne illustrationer er, at alt det dramatiske på illustrationerne ikke viser selve det sorte hul, men det der foregår udenfor det sorte

huls grænse, som også kaldes begivenhedshorisonten. Det sorte hul kan vi dårligt illustrere på andre måder end som en sort klat på en sort baggrund. Ikke engang lys kan undslippe et sort huls tyngdekraft, og derfor er der ikke noget at "se" – ikke engang med de største teleskoper, vi kan pudse på dem.

Siden sorte hullers eksistens blev forudsagt med Einsteins relativitetsteori, er der gjort mange observationer, der har overbevist forskerne om, at sorte huller er en realitet. Forskerne mener således i dag, at sorte huller i mange forskellige størrelser er vidt udbredte i galakserne i universet. Alle galakser har mindst

et sort hul, som findes i centrum af galaksen – således også i vores egen galakse Mælkevejen. Dette sorte hul kaldes Sagittarius A*. De supertunge sorte huller i centrum af galakserne er samtidig de største sorte huller, vi kender, og de er i et astrofysisk perspektiv meget interessante, fordi de har væsentlig indflydelse på, hvordan deres værtsgalakser og galaksernes omgivelser udvikler sig. Dermed har de også betydning for, hvordan, hvor og hvornår planeter og liv i universet opstår.

De supertunge sorte hullers vekselvirkning med deres omgivelser afhænger grundlæggende af, hvor



Foto: NASA/JPL-Caltech

meget masse de indeholder – altså hvor meget, de vejer. For det sætter energiskalaen for de fysiske processer, der opstår, når det sorte hul “sluger” gas fra sine omgivelser. Derfor vil forskerne gerne kende de sorte hullers masse så præcist som muligt. I dag er man i stand til at måle massen af de sorte huller med en nøjagtighed på en faktor 3-4. Den nøjagtighed har den ene af artiklens forfattere, Marianne Vestergaard, tænkt sig at forbedre i et projekt støttet af Det Frie Forskningsråd | Natur og Univers. Helst skal nøjagtigheden blive bedre end en faktor 2, hvilket i overført betydning vil kaste mere lys over disse gådefulde objekter i universet.

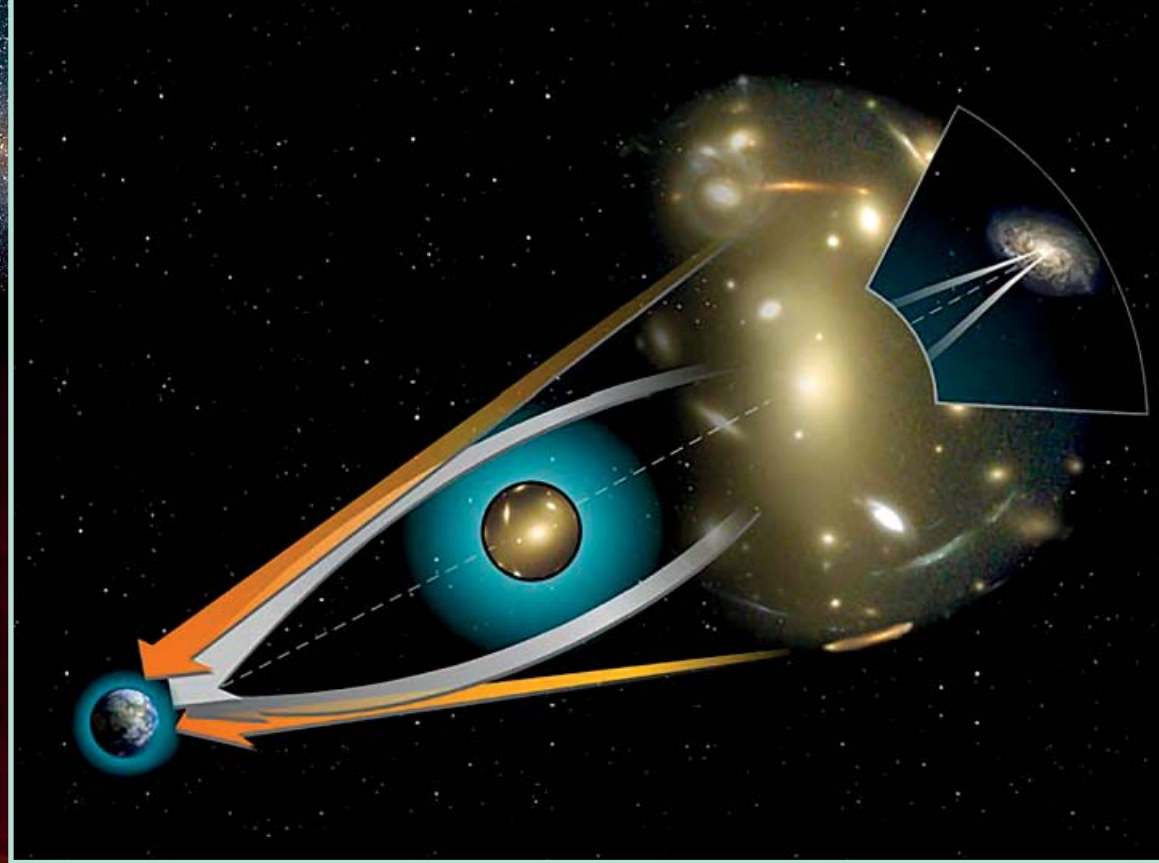
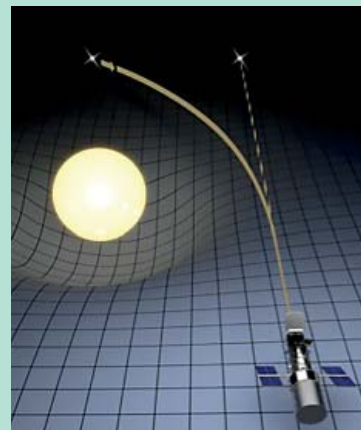


Illustration af den gravitationelle linseffekt, der afbøjer lys fra en fjern kilde omkring et tungt objekt. De orange pile viser den tilsyneladende position af lyskilden set fra Jorden, mens de hvide pile viser lysets vej fra den virkelige position. Illustration: NASA

Rummets krumning og sorte huller

Sorte huller er en konsekvens af Einsteins relativitetsteori, hvori rummet og tyngdefeltet opfattes som to sider af samme sag. Det betyder, at rummet krummer omkring alt, der har masse – også du og jeg. Jo mere masse, og jo større tæthed af massen, desto mere krummer rummet. Rummets krumning bestemmer, hvordan lyset og himmellegemerne bevæger sig. Alting, også lys, bevæger sig i en lige linje i rummet. Men når rummet krummer, vil det for en observatør – fx her på Jorden – se ud som om lyset bliver afbøjet, når det passerer et tungt objekt. Omkring sorte huller krummer rummet så voldsomt, at man i praksis kan se, hvad der er bagved det sorte hul – det kalder man den gravitationelle linseffekt. Lys, der passerer tæt forbi det sorte hul bliver også rødforskudt – dvs. energien af lyset sænkes kraftigt.



Grafik: NASA/HST

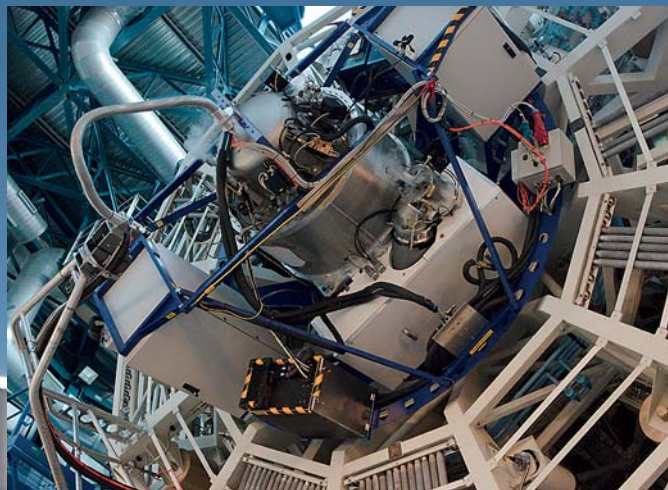
En anden måde at snakke om masse og tyngdefeltet på er ved at angive den undvigelseshastighed, der skal til for at overvinde tyngdefeltet fra en given masse. Hvis vi fx vil sende en raket ud rummet fra Jorden, skal raketten opnå en hastighed, der gør den i stand til at undvige Jordens tyngdefelt – det kræver en hastighed på ca. 11 km/s. Jo mere masse, der er presset sammen indenfor det samme rumfang, jo større bliver undvigelseshastigheden. Når undvigelseshastigheden overstiger lysets hastighed, har vi et sort hul. Den afstand fra hullets centrum, hvor dette sker, kaldes begivenhedshorisonten eller Schwarzschild-radius, og det er givet ved formlen:

$$R_s = 2GM_{sh}/c^2$$

Hvor G = gravitationskonstanten, c = lysets hastighed og M_{sh} = massen af det sorte hul

Marianne Vestergaard

Marianne Vestergaard er astrofysiker og lektor ved Dark Cosmology Centre på Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet. Marianne er en del af en international forskningsgruppe, som i mange år har studeret supertunge sorte huller i centrene af galakser. Hun deltager bl.a. i flere samarbejder med forskere primært i USA til at undersøge fysikken af de processer, der sker i de centrale dele, når de sorte huller "spiser" og vokser sig større. Marianne har selv udviklet metoder til at bestemme massen af sorte huller i fjerne galakser, og sammen med hendes forskerhold i København arbejder hun nu med en bevilling fra Det Frie Forskningsråd | Natur og Univers på at forbedre disse og relaterede metoder. Derudover arbejder holdet også på at forbedre forståelsen af de fysiske processer, de sorte huller er involveret i. På fotoet ses hun foran Very Large Telescope (VLT) i Chile.



Instrumentet X-shooter er delvist bygget ved Niels Bohr Institutet og er installeret på et af de fire 8-meter store Very Large Telescope ved det Europæiske Sydobservatorium i Chile. Det udmærker sig ved at kunne observere over et bredt energiområde fra det infrarøde til det optiske område. Foto: ESO



Små og store sorte huller

Den relevante måleenhed for sorte huller er "solmasser". En solmasse er i en jordnær målestok et kæmpestort tal, idet en solmasse svarer til ca. 10^{30} kg. Den nedre grænse for størrelsen af et sort hul er ca. 3 solmasser. Sorte huller med en masse mellem 3 og ca. 100 solmasser regnes for "små". Disse kaldes også stellare sorte huller, og de dannes, når en stor, tung stjerne har opbrugt alt sit brændstof i centret. Når stjernen slukkes, bæres det tilbageværende materiale i kernen ikke længere oppe af forbrændingens varme og bryder derfor sammen under sin egen vægt. Grænsen for, hvornår dette skaber et sort hul, er når massen i kernen overstiger ca. tre solmasser.

Er stjernen mindre, kan den i stedet ende sine dage som en såkaldt neutronstjerne, som også er et meget kompakt objekt, men slet ikke i samme grad som et sort hul.

I den anden ende af vægtklassen er det største sorte hul, man hidtil har opdaget, på ca. 10 milliarder solmasser.

Størrelsen (udstrækningen) og vægten af sorte huller hænger nøje sammen, idet størrelsen af et sort hul er givet ved den radius af en fiktiv kugleflade, som en given masse skal presses sammen indenfor, for at det kræver lysets hastighed at undslippe tyngdekraften fra kuglefladen. Denne radius kaldes begivenhedshorisonten

(eller Schwarzschild-radius). For en masse svarende til Jordens vil den samlede udstrækning af det sorte hul således være på 18 mm.

I forhold hertil kan de supertunge sorte huller i centrum af galakserne have en udstrækning på flere milliarder km. I en kosmisk målestok, hvor forskerne måler afstande i lysår, er det på ingen måde et stort objekt: Det største sorte hul har i denne målestok en udbredelse på ca. 50 lysår – mens en galakse som Mælkevejen har en udstrækning på ca. 100.000 lysår.

Signal fra de sorte huller

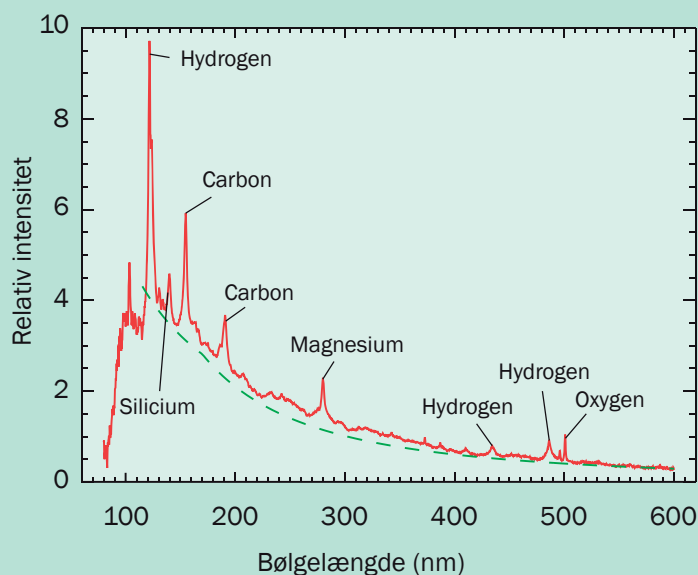
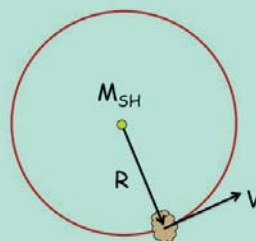
Det er vigtigt at bemærke, at et sort hul ikke er en konstant størrelse. Når et sort hul er dannet,

Massebestemmelse af det centrale tunge sorte hul i aktive galakser

Når gas bevæger sig i stabile baner omkring det sorte hul, kan man beregne den masse, der ligger indenfor gassens bane-radius, R . Det skyldes, at den acceleration V^2/R , som gassen har i sin bane, forårsages af tyngdeaccelerationen fra det sorte hul, $F_g/m = M_{sh} G/R^2$, hvor F_g er tyngdekraften og m massen af gassen:

$$M_{sh} = v^2 R / G,$$

hvor M_{sh} = massen af det sorte hul, v = gassens hastighed i banen, R = gassens afstand til det sorte hul, og G = gravitationskonstanten.



Kurverne viser et typisk UV-optisk spektrum fra en aktiv galaksekerne. Den grønne kurve er såkaldt kontinuumemission udsendt fra tilvækstskiven omkring det sorte hul. Den røde kurve viser karakteristiske kraftige emissionslinjer, som stammer fra gas, der befinder sig længere væk fra det sorte hul. Linjernes bølgelængde afslører den kemiske sammensætning og ioniseringen af gassen, og bredden af linjerne afslører hastigheden. Den er så høj som 2.000 - 10.000 km/s på nær oxygen-linjerne vist her, som stammer fra gas en del længere væk fra det sorte hul end gassen, der danner de andre linjer.

kan det vokse sig større ved at opsluge gas fra dets omgivelser eller ved at smelte sammen med et andet sort hul. Faktisk er den slags begivenheder vigtige for forskerne, for når de sorte huller fortærer materiale, giver de sig populært sagt til kende. Det sker i form af kraftig stråling, som udsendes fra den gas, der opsluges. Når gassen kommer tæt på det sorte hul, bremses den og varmes derved op pga. gnidningsmodstand og gassen lyser kraftigt. De sorte huller, som forskerne kan "se" er altså dem, der er i færd med at fortære gas fra deres omgivelser. Det mere generelle udtryk for dette fænomen for tunge sorte huller er "aktive galaksekerner", som forskerne observerer i en mindre brøkdel af de mest

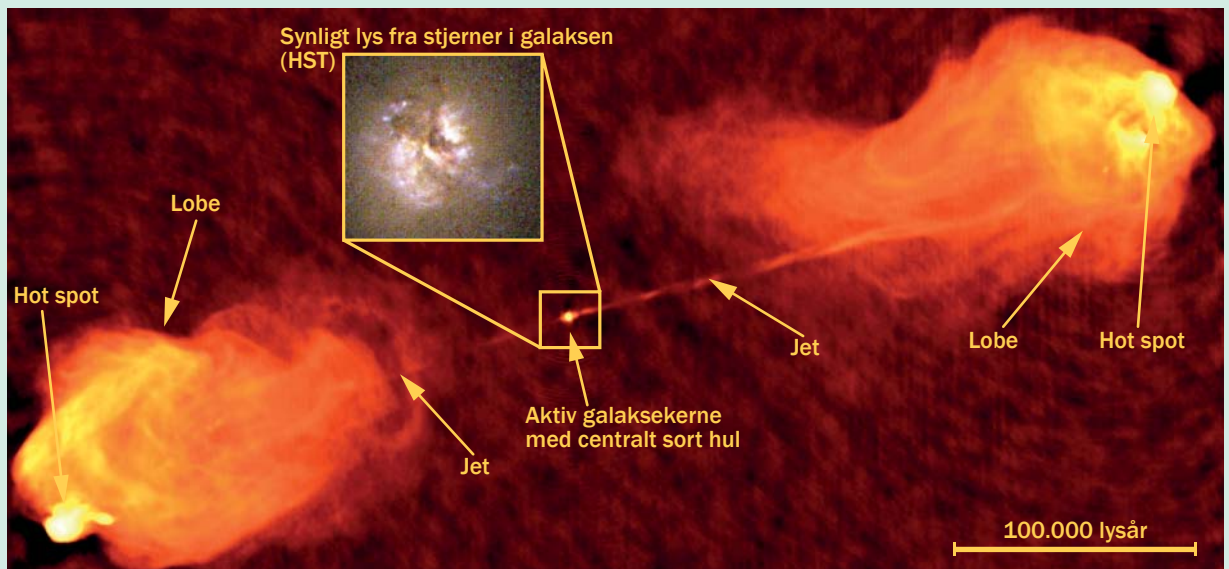
lysstærke galakser i universet. De allermest lysstærke af de aktive galaksekerner kaldes kvasarer, og de lyser så kraftigt, at de kan ses i de allerfjerneste galakser, som er dannet meget tidligt i universets historie – kun 700-800 mio. år efter Big Bang.

At veje ting i verdensrummet

Når man skal måle massen af et objekt i universet, må man gøre det ud fra den tyngdepåvirkning, det udøver på andre objekter. Man kan altså veje et sort hul ved at måle på, hvordan stjerner eller gas bevæger sig rundt om det. Hvis vægten skal være nøjagtig, skal man måle på gas, der ligger så tæt på det sorte huls begivenhedshorisont som muligt. Det er fordi banebevæ-

gelserne er påvirket af al massen inden for den radius, hvor man måler. At bestemme massen af netop det sorte hul i centrum af en normal galakse kræver derfor stor rumlig opløsning i observationerne. Man kan derfor kun bruge denne metode til at undersøge galakser, der ligger relativt tæt på os. Fx har forskere ud fra undersøgelser af stjerners bevægelse omkring det supertunge sorte hul i centrum af Mælkevejen bestemt dets masse til at være ca. 4 millioner solmasser.

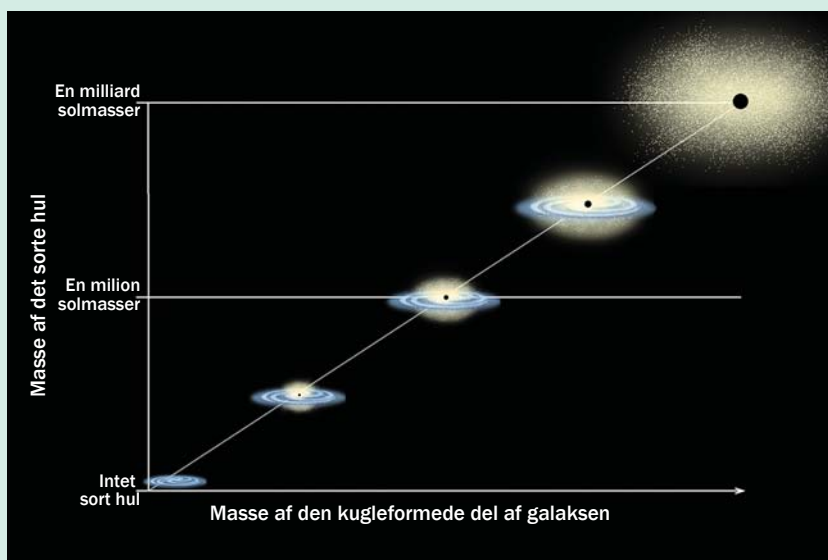
I fjerne galakser er det kun sorte huller i aktive galaksekerner, man kan veje, fordi man der kan bruge en helt anden metode, der ikke kræver en stor rumlig opløsning. I stedet studerer man spekteret af



Når sorte huller opsluger gas fra deres omgivelser, påvirker de stærkt deres omgivelser – fx ved at udsende energirig stråling eller jets af plasma eller tæt molekylgas. Et af de mere spektakulære eksempler er store jets af plasma (der primært består af elektroner og protoner, accelereret til hastigheder nær lysets),

som strækker sig til en afstand på flere gange udstrækningen af stjernelyset i galaksen. Disse jets udsendes fra centret af blot 10 % af aktive galaksekerne og kvasarer, i dette tilfælde fra galaksen Cygnus A.

Foto: NRAO/AUI/STScI/NASA



Observationer har afsløret et næsten konstant masseforhold mellem den kugleformede del af galakser og det supertunge sorte hul, de huser. Tilsyneladende foregår der en "massemæssig" tilpasning, dvs. en fysisk vekselvirkning, mellem det sorte hul og galaksen selv. Det er interessant, da der er tale om objekter på meget forskellige størrelses-skalaer – få lysår for det sorte hul i forhold til måske 100.000 lysår eller mere for hele galaksen.

Credit: K. Cordes & S. Brown (STScI)

udsendt stråling fra to regioner nær det sorte hul, og hvordan disse to typer stråling varierer over tid. Den ene type stråling kommer fra gas, som ligger i en såkaldt tilvækstskive omkring det sorte hul og som støt og roligt bevæger sig mod hullet. Den anden type stråling ses som meget brede og kraftige emissionslinjer i den aktive galaksekernes spektrum. Den kommer fra gas, der ligger længere væk fra hullet

og som bevæger sig i rasende fart omkring det. Da lyset fra denne gas er en smule forsinket – svarende til lysets rejsetid fra skiven til gassen – men ellers varierer i tid på samme måde, kan man på denne måde bestemme gassens afstand til det sorte hul. Og da bredden af emissionslinjerne afslører gassens hastighed, kan man ud fra disse oplysninger beregne massen af det sorte hul.

Styr på gassens hastighed

Netop måling af gashastigheden er en af de største udfordringer i forhold til at forbedre nøjagtigheden af massemålinger af sorte huller. Aktive galaksekerne befinder så langt væk, at vi ikke kan opløse rumligt geometrien og hastighedsstrukturen af den gas, vi måler på. Til massemålinger har vi kun brug for at kende hastigheden af den del af gassen, som bevæger sig

i stabile baner omkring det sorte hul. Men med de traditionelle målinger kan man ikke isolere den hastighedskomponent, man ønsker. Man kan altså ikke se, om dele af gassen i centret er på vej ind mod det sorte hul eller på vej væk derfra, skubbet af den kraftige og energirige stråling. Og det gør massemålingerne mindre nøjagtige.

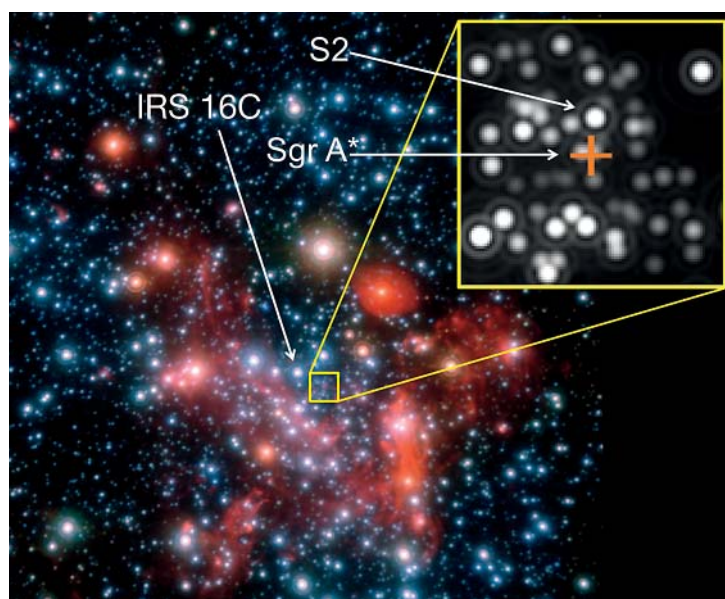
I forskningsprojektet vil vi tackle denne udfordring ved at etablere de mest sandsynlige hastighedsstrukturer af gassen ved at analysere høj kvalitetsdata på en ny måde. De er bl.a. optaget med *Swift*-satellitten og med X-shooter-instrumentet, som delvist er bygget ved Niels Bohr Institutet og er installeret på et af de fire 8-meter store Very Large Telescope ved det Europæiske Sydobservatorium i Chile.

Vi er i gang med et større studie med *Swift* af en stor mængde kvasarer, som er foretaget igennem det danske *Swift*-program støttet af Instrumentcentret for Dansk Astrofysik. Det er et vigtigt del-program, hvor vi kortlægger, hvor hurtigt det sorte hul spiser og bestemmer egenskaberne af den centrale energikilde i den aktive galaksekjerne, som det sorte hul er en del af. Fx vil vi undersøge, om energikilden er i stand til at skabe "vinde" fra tilvækstskiven, som omgiver det sorte hul. Det har nemlig betydning for hastighedsfeltet, vi forsøger at bestemme. Det kan sammenlignes med at tage pulsen og et hjertekardiogram af det sorte hul og dens umiddelbare omgivelser.

Modeller og målinger

I projektet samarbejder vi med forskere ved Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics i USA og Leicester University i England om at udvikle nye numeriske metoder til at skabe sandsynlige fysiske modeller af hastighedsfeltet af gassen, der benyttes til massebestemmelser.

Metoderne bygger bl.a. på nye avancerede tilgange til at analysere vores observationsdata, så vi får



indsigt i geometrien, hastighedsstrukturen og hældningen (i forhold til vores synslinje) af gasregionen, der skaber de kraftige emissionslinjer, som vi måler på. Ved at sammenligne vores målinger på modellerne af det samlede hastighedsfelt med observationer kan vi finde frem til, hvilke hastighedsfelter der er mest sandsynlige at finde i aktive galaksekerner. Derefter vil vi benytte vores fysiske modeller af gasregionen til at isolere den ønskede hastighedskomponent og bestemme en mere nøjagtig masse af det sorte hul.

Ved at analysere et stort antal spektre af aktive galaksekerner på denne måde kan vi bestemme den typiske hastighedsstruktur. Derved kan vi finde den typiske korrektion, der er nødvendig at påføre de traditionelle målinger for at få et mere realistisk mål for hastigheden af gaskomponenten, som vi har brug for til massemålingerne. Når vi har bestemt den korrektion, kan vi opdatere vores metoder til at bestemme massen af de sorte huller.

Ny indsigt i galaksernes udvikling

Med meget mere nøjagtige massemålinger af aktive sorte huller i universet vil forskerne i fremtiden blive i stand til at lave mere nøjagtige beregninger og studier af,

hvilken specifik rolle sorte huller spiller for udviklingen af galakserne. Fx viser der sig at være et næsten konstant masseforhold mellem galakserne i vores umiddelbare nærhed og det supertunge sorte hul, de huser. Forskerne ved endnu ikke, hvordan dette er opstået, men man går ud fra, at der er sket en vis tilpasning mellem galaksen og det sorte hul gennem den mængde gas det sorte hul har "til rådighed for at sluge" og den energi, som hullet sender ud i galaksen igen.

Det har også længe været en gåde, hvorfor elliptiske galakser ikke har kold gas og stjernedannelse som andre galakser. Der er numeriske modeller og simuleringer, som tyder på at sorte huller måske kan standse stjernedannelsen brat i en tidlig udviklingsfase af galakserne. Beregningerne beror dog på simple antagelser om, hvor meget energi det sorte hul producerer, og hvordan denne energi kobles til omgivelserne. Ved hjælp af langt bedre massebestemmelser kan man mere nøjagtigt bestemme energibudgetterne og dermed forhåbentlig opnå en langt større indsigt i de fysiske processer, som kan hjælpe med at opklare mysteriet om, hvorfor elliptiske galakser ingen unge stjerner har, og hvordan stjernedannelsen stoppede så brat. ■

Billedet viser centrum af Mælkevejen. Det røde kryds markerer det supertunge sorte hul i centrum, og de markerede stjerner er blevet brugt til målinger, der har afsløret, at det sorte hul vejer ca. 4 millioner solmasser. Kilde: ESO/MPE/S. Gillessen et al.

Videre læsning

Vestergaard, M.: Tunge sorte huller – hvad kan de bruges til? Kvant nr.3/2016.

Vestergaard, M., og Harmark, T.: 'Sorte Huller', Kapitel 6 i bogen 'Verdensbilledet i forandring - et hundredårigt perspektiv.' Forlaget Epsilon 2016. Udgivet i forbindelse med Astronomisk Selskabs 100 års jubilæum.



DET FRIE FORSKNINGSRÅD
DANISH COUNCIL
FOR INDEPENDENT
RESEARCH