

Tunge sorte huller – hvad kan de bruges til?

Af Marianne Vestergaard, Dark Cosmology Centre, Københavns Universitet

I Einsteins almene relativitetsteori, fremsat for 101 år siden, giver masse anledning til krumning af rumtiden. Den største krumning sker, omkring sorte huller som er meget kompakte. Længe har sorte huller været omgærdet af mystik, dels pga. den ukendte fysik som hersker og dels da man ikke vidste, om de faktisk eksisterer. Vi ved nu, at sorte huller findes i stort antal og i mange størrelser. Jeg beskriver her, hvorledes tunge sorte huller kan bruges til at udforske Universet og til at forstå nogle af de mere specielle hjørner af fysikken.

Hvad er sorte huller?

Et sort hul er så kompakt (dvs. at det har en stor masse indenfor et relativt lille volumen), at selv lys ikke kan undslippe det faste greb fra dets tyngdefelt, når det kommer for tæt på. Størrelsen af et sort hul bestemmes af dets begivenhedshorisont (Schwarzschild radius), R_s , hvor undvigelseshastigheden er lig lysets hastighed:

$$R_s = \frac{2GM_{SH}}{c^2}. \quad (1)$$

Her er G og c hhv. den gravitationelle konstant og lysets hastighed, mens M_{SH} er massen af det sorte hul. For Jorden er $R_s = 9$ mm og Solen har $R_s = 3$ km. De allerstørste kendte sorte huller, med masser af størrelsesordenen 10 milliarder solmasser, har R_s af størrelsesordenen 25 lystimer (dvs. en udstrækning på ca. 50 lystimer).

Et sort hul er et ret simpelt objekt, da det kan beskrives ved blot tre egenskaber: masse, spin, og ladning. Massen er langt den vigtigste egenskab, som bestemmer dets tyngdefelt og dermed dets gravitationelle rækkevidde, samt hvor hurtigt det kan sluge materiale og dermed vokse sig større, såfremt der er nok materiale i nærheden. Astronomisk set er kun massen og spinnets af interesse.

Sorte huller findes!

Blot indenfor de sidste 20 år er det blevet bekræftet, at sorte huller ikke blot eksisterer men de findes alle vegne. Hver galakse har mindst ét, nemlig et kæmpestort sort hul med en masse over 1 million solmasser (én solmasse er massen af Solen, ca. $2 \cdot 10^{30}$ kg). Vores egen Mælkevej har et sort hul på 4 millioner solmasser, mens de tungeste vi kender er på ca. 10 milliarder solmasser. Et mindre antal galakser forventes også at have to tunge sorte huller fordi de er i slutfasen af, at to galakser smelter sammen; de sorte huller vil sidenhen også smelte sammen.

I en mindre brøkdel af de mest lysstærke galakser er det centrale tunge sorte hul i færd med at sluge gas, som er transporteret fra de ydre dele af galaksen ned til det sorte hul i centret. I processen udsendes så kraftigt lys, at de mest lysstærke af disse såkaldte aktive galaksekerner, kaldet kvasarer, kan observeres helt ud til de allerstørste afstande, hvor de første galakser kan observeres.

Selvom denne artikel har fokus på tunge sorte huller, er det værd at nævne, at der også er adskillige sorte huller i alle galakser med masser mellem ca. 3 og ca. 60 solmasser. De er dannet i processer der involverer

stjerners død. Den øvre massegrænse er noget usikker, da den dels beror på hvor store sorte huller der kan dannes når tunge stjerner dør og dels på, hvor hyppige sammensmeltninger af sådanne sorte huller er. Den nedre grænse (ca. 3 solmasser) bestemmes af tilstandsligningen for neutronstjerner. Mindre sorte huller end 3 solmasser, der er postuleret af nogle partikelfysikere, vil være uden astrofysisk betydning.

Dannelse af sorte huller

Små sorte huller, dvs. med en masse under 100 solmasser, ofte kaldet *stellare sorte huller*, dannes når tunge stjerner opbruger deres brændsel i centret. Der ved stopper atomkernefusionen, dannelsen af fotoner dør ud og kerneområdet falder sammen. Hvis denne kerne overstiger tre solmasser, kan end ikke tætpakkede neutroner opretholde det enorme tryk, og kerneområdet falder sammen til et sort hul.

Vi observerer de første galakser og kvasarer blot 700-800 mio. år efter Big Bang. Dette er for kort tid til, at kvasarernes tunge sorte huller (på 1000 til 10.000 mio. solmasser; se evt. figur 6 senere) kan være dannet fra stellare sorte huller som siden har vokset sig større ved at sluge omkringliggende gas. Man antager derfor, at det er muligt for store gasskyer på flere hundrede solmasser, eller mere, at falde sammen og danne et sort hul. Det er blot ikke ligetil, da en stor gassky skal kunne køle for at komme af med den varme, som opstår, når gas sammenpresses. Den gas, som fandtes i det tidlige univers, har svært ved at køle, fordi det kun bestod af brint og helium. Derfor mener man, at store sorte huller først kunne dannes efter den første episode af stjernedannelse, som dannede tungere grundstoffer i centret af de tunge stjerner. Tungere grundstoffer hjælper gassen med at køle langt mere effektivt.

Man mener nu, langt om længe, at have observeret én sådan kæmpe gassky. De er nemlig svære at observere, dels fordi skyen er meget lyssvag og dels fordi de fleste forekommer tidligt i Universet, hvorved det svage lys er blevet meget svagt når det endelig når Jorden [1].

Sorte huller i vækst: aktive galaksekerner og kvasarer

Et sort hul kan vokse sig større ved at smelte sammen med et andet sort hul som kommer indenfor dets gravitationelle rækkevidde. Den mest almindelige måde for et sort hul at vokse på er dog ved at sluge gas fra dets omgivelser, idet gasskyer er meget mere hyppigt forekommende. Specielt var der meget mere gas i det yngre og mindre Univers, hvor kvasarer også var langt hyppigere. Langt de fleste galakser, specielt de større,

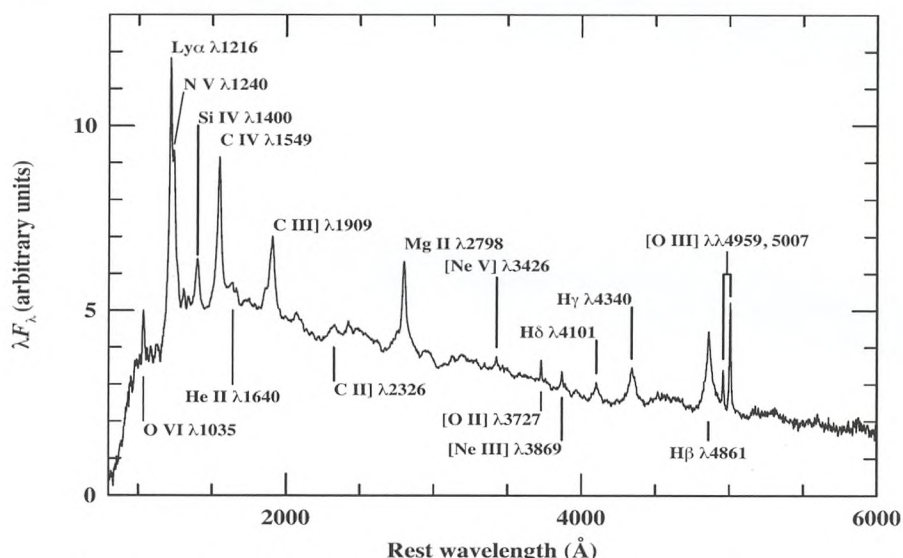
har været igennem en sådan tidlig *aktiv* fase. Selv vores nære galakser og Mælkevejen har været igennem en sådan vækstfase.

Når det sorte hul fortærer gassen udsendes kraftig røntgen-, ultraviolet- og optisk (synlig) stråling: Gassen bremses og dermed varmes den kraftigt op ved viskøse processer tæt ved det sorte hul og gassen lyser kraftigt. Aktive galaksekerner og kvasarer er derfor nemme at finde, pga. det kraftige lys fra den centrale "tilvækstskive" som gassen lægger sig i tæt ved det sorte hul, men de udsender også karakteristiske emissionslinjer (se figur 1) fra anden gas, som befinder sig nær det sorte hul. Linjerne er Dopplerudbredt af de høje hastigheder af gassen på mellem 2000 og 10.000 km/s.

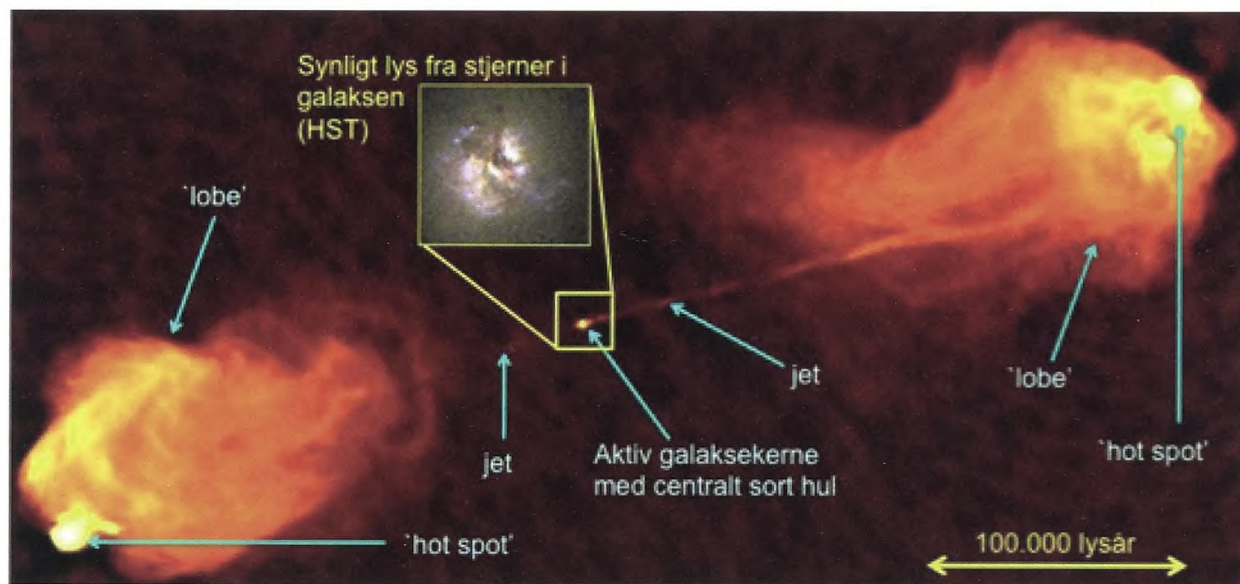
Et af de mere spektakulære eksempler på deres emission er de store jets af relativistisk plasma (især

bestående af elektroner og protoner), som udsendes af ca. 10 % af aktive galaksekerner og kvasarer. Plasmaen accelereres og udsendes fra et område tæt på det sorte hul til afstande på flere gange stjernelysets udstrækning i galaksen (se figur 2). Sorte huller er meget effektive partikelacceleratorer.

Den kraftige emission fra tunge sorte huller har en stor indflydelse på deres omgivelser. Det kan være energirig stråling eller hurtige jets af tæt molekylgas [2]. Det er derfor nødvendigt for forskerne, at forstå disse processer i større detalje for at kunne forstå beskaffenheden af nogle af de store massestrukturer i Universet, såsom galakser og galaksehobe. Da energien som det sorte hul formår at afsætte i omgivelserne primært afhænger af dets masse, er der stor forskningsaktivitet netop i at bestemme denne masse nøjagtigt.



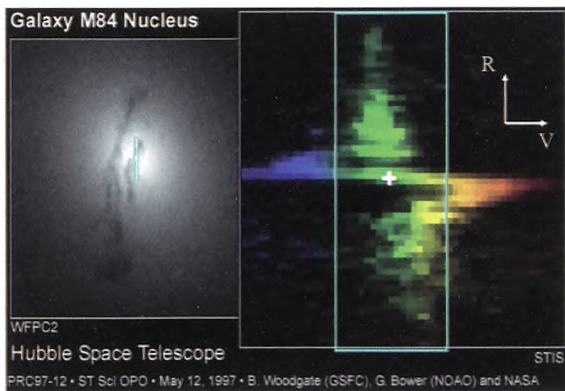
Figur 1. Typisk UV-optisk spektrum af en aktiv galaksekjerne. Kraftige, brede emissionslinjer af brint (Ly α , H δ , H γ , H β), kul (CIV, CIII), magnesium (MgII), silicium (Si), og kvælstof (NV) ses liggende over kontinuumstrålingen fra den centrale gasskive, hvis intensitet aftager med fotonernes bølgelængde. Linjer fra ilt (OVI, [OII], [OIII]), helium (He) og neon (Ne) ses også. De smalle linjer af ioniseret ilt, fx [OII] og [OIII], dannes i diffus gas i større afstand fra kernen. Kontinuumstrålingen ved fx 5100Å kan benyttes til at beregne den "monokromatiske luminositet" ved 5100Å, som benyttes til bl.a. mælemålinger (se evt. figur 5). Figuren er høfligt udlånt af Bradley M. Peterson og baseret på data fra Paul J. Francis og Craig Foltz.



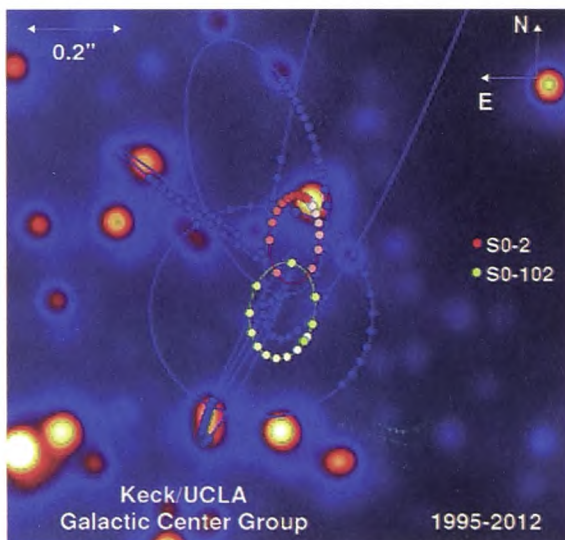
Figur 2. Radiostråling fra galaksen Cygnus A. Radio-jetten (orange/gul), der dannes tæt på det sorte hul i centret af galaksen, kan strække sig over afstande flere gange udstrækningen af stjernelyset i galaksen (kassen i centret). Jetten består af relativistisk plasma accelereret af det sorte hul og ses her som en tynd 'fokuseret stråle' af plasma. Billede: NRAO/AUI/STScI/NASA. Billedet er opmærket med forklaringer af forfatteren.

Massebestemmelse

Astronomer vejer objekter i Universet ved at måle på, hvordan andre himmellegemer bevæger sig omkring det relevante objekt. Fysikken fortæller os nemlig, at vi kan måle den masse som ligger indenfor en bestemt radius ved at kende den radius plus den fart, hvormed et andet objekt bevæger sig. På den måde kan vi fx (vha. Keplers tredje lov) bestemme Solens masse ved at måle på banebevægelsen af Merkur. Måler vi længere ude, på Mars' bane om Solen, bestemmer vi den samlede masse af Solen, Merkur, Venus, Jorden og Månen.



Figur 3. Den høje rumlige opløsning på Hubble Rumteleskopet skabte i 1990'erne et gennembrud i detektion og studiet af sorte huller i fjerne galakser som ikke kan foretages med jordbaserede teleskoper pga. atmosfærens udsmyring af lyset fra punktkilder. De kraftige hastighedsudsving (blåt og rødt) af gassen i de små afstande R fra centret (hvidt kryds) af M84 galaksen (venstre blå kasse) viser, at det centrale objekt er et sort hul med en masse på 800 millioner solmasser. Billede: STScI/NASA/B. Woodgate(GSFC)/G. Bower(NOA). Billedet er opmærket med forklaringer af forfatteren.



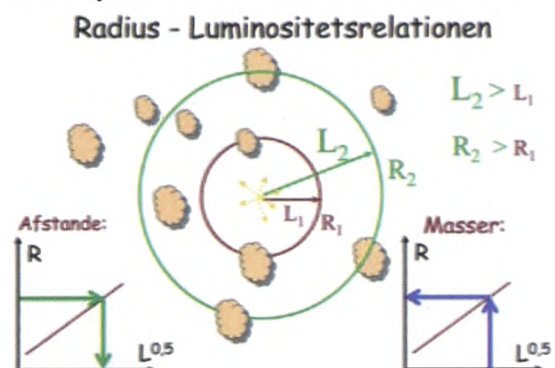
Figur 4. Stjerners banebevægelse tæt på det sorte hul i Mælkevejens centrum. Kun to stjerner har så korte omløbstider, at deres baner er fuldt kortlagte, hvilket giver mest information om det centrale objekt. Stjernen S0-2 med en omløbstid på 16 år, beviste eksistensen af det sorte hul. Stjernen S0-102 har en omløbstid på kun 11,5 år hvilket tillader tests af Einsteins almene relativitetsteori. Målinger på et større antal stjerner end vist her, viser at Mælkevejens sorte hul vejer 4 millioner solmasser. Billede: A. Ghez/UCLA/W.M. Keck Telescopes.

¹Man bestemmer den tid Δt (tidsskala: dage), det tager for lyset at tilbagelægge afstanden R til gassen ved at krydskorrelere lyskurverne for kontinuums emissionen fra skiven med linje emissionen som er en tidsforsinket version af kontinuumslyskurven, fordi gassen absorberer dette lys og genudsender linje emissionen øjeblikkeligt. Afstanden er så $R = c \cdot \Delta t$, hvor c er lysets hastighed.

På samme måde måler forskerne massen af sorte huller ved at måle på banebevægelserne af gas (se figur 3) og stjerner (se figur 4) tæt på det sorte hul. Her er det vigtigt, at man måler på stjerner og gas så tæt på det sorte hul som muligt, fordi metoden måler massen af *alt* indenfor den pågældende radius.

For store sorte huller i centret af normale galakser kræver metoden derfor en ret stor rumlig opløsning, for at man kan bestemme massen af det sorte hul alene. Derfor kan metoden kun benyttes i det lokale univers. På større afstande fra os er det kun de sorte huller i aktive galaksekerner, som vi kan bestemme massen af. Her benytter man i stedet tidlige variationer af emissionen fra skiven og emissionslinjegassen nær det sorte hul til at bestemme gassens afstand¹ og linjebredderne (se figur 1) til at bestemme gassens hastighed.

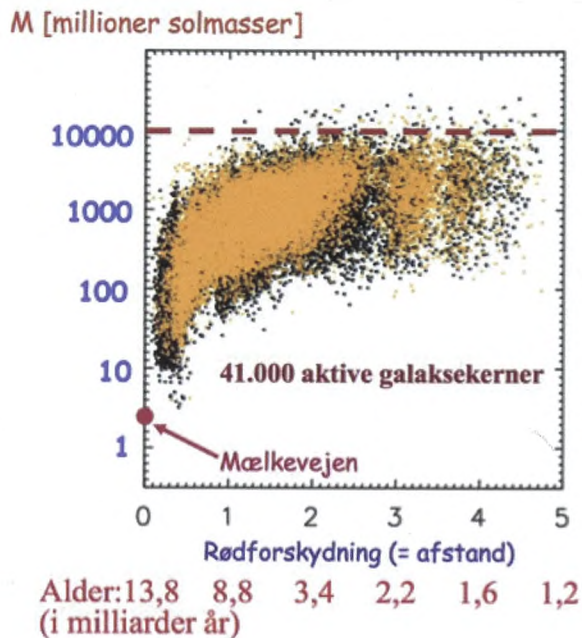
Metoden har nu været benyttet på 60 nære aktive galaksekerner med rødforskydninger under 0,3. I disse afstande har lyset været op til 3,4 milliarder år undervejs. Målingerne viser, at der er en tydelig sammenhæng mellem afstanden til emissionslinjegassen og hvor lysstærk tilvækstsskiven er. Denne sammenhæng, kaldet $R-L$ -relationen (se figur 5), benyttes til at estimere massen af de sorte huller i mere fjerne aktive galaksekerner [3]. Hastigheden af gassen bestemmes ud fra måling af linjebredder, og gassens afstand bestemmes ud fra styrken af lyset fra skiven vha. $R-L$ -relationen.



Figur 5. Jo mere lysstærk gasskiven omkring det sorte hul er (højere L), fra jo større afstand udsendes emissionslinjerne fra gassen omkring det sorte hul (højere R). Når relationen benyttes til massebestemmelser (blå pile) måles L som den "monokromatiske luminositet" ved 5100Å fra spektret (se evt. figur 1), som derved giver et estimat af R . Måler man i stedet R ud fra analyse af variabiliteten af lyset [4], se evt. fodnote 1, kan man bestemme hvad L må være (grønne pile) og dermed beregne den kosmiske afstand til den aktive galaksekerner, når den modtagne fluks fra objektet måles.

Vi måler at aktive galaksekerner vejer mellem 1 og 10.000 millioner solmasser. Selv de fjerneste kvasarer vi kender vejer over 100 millioner solmasser (se figur 6). Årsagen til den øvre grænse på 10.000 millioner solmasser kendes ikke med sikkerhed. Den afhænger sandsynligvis af flere forhold: (a) mangel på gas som det sorte hul kan sluge, (b) det tager tid at opbygge store sorte huller og med tiden udvider Universet sig og det bliver dermed sværere for galakser (og deres sorte huller) at smelte sammen, og (c) specielt er de allertungeste

sorte huller på 10.000 millioner solmasser sjældne, og for at de kan vokse hurtigt nok (før Universet spreder galakserne for meget), skal de smelte sammen med et større antal sorte huller af samme vægt. Det er en meget svær opgave – der tilsyneladende ikke har kunnet lade sig gøre.



Figur 6. Massen af tunge sorte huller i fjerne aktive galaksekerner og kvasarer vist som funktion af afstanden fra os (i enhed af rødforskydning), der også er omregnet til alderen af Universet, da lyset blev udsendt. Nutiden og Jorden befinder sig i Origo. Farvekodningen af målingerne er uden betydning. Målingerne viser, at der er en øvre grænse for, hvor tunge de sorte huller i fjerne aktive galaksekerner kan blive og at vi ikke kan detektere objekter som har sorte huller lettere end ca. 100 millioner solmasser med mindre de var aktive 9 milliarder år efter Big Bang (dvs. for $z < \text{ca. } 1$ på figuren). Den øvre grænse falder mod nyere tid, fordi de sorte huller stopper deres aktivitet, og derefter kan de ikke observeres. Det forventes at antallet af relativt mindre sorte huller langt overstiger antallet af relativt større sorte huller i Universet. Vi kan kun detektere de mest lysklare (og dermed tungeste) af den eksisterende population. Diagrammet viser kun et lille udsnit af de ca. 106.000 kendte aktive galaksekerner, hvoraf de fleste befinder sig relativt tættere på Jorden som antydnet i figuren. Mælkevejens centrale sorte hul (ikke aktivt) er indtegnet til sammenligning.

Hvad kan vi så bruge de sorte huller til?

Her gives et overblik over nogle af de vigtigste områder indenfor astrofysik og kosmologi, hvor tunge sorte huller kan bruges til at lære mere om naturen og Universet.

Ekstrem fysik:

De enorme tyngdekrafter nær sorte huller tillader studier af 'ekstrem fysik'. Blandt andet kan vi teste Einsteins almene relativitetsteori i et meget kraftigt tyngdefelt. Man kan bl.a. måle, at banen præcesserer (forskydes) en smule og laver et rosettamønster. Dertil kommer at der sker en relativistisk acceleration (en relativistisk gravitationel rødforskydning som øger radialhastighederne) tæt på det sorte hul. Det sidste kan måles, hvis man tager hyppige nok data af positioner og radialhastigheder.

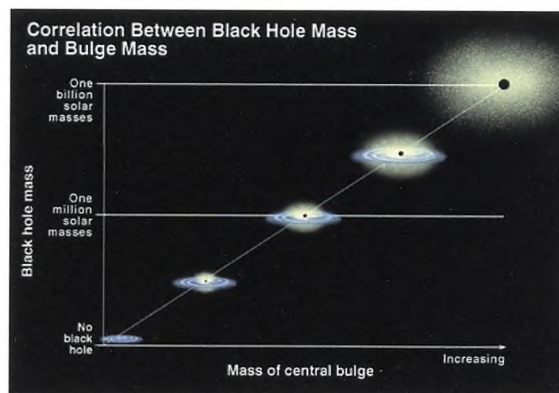
Forskerhold ved University of California og det Europæiske Sydobservatorium (ESO) vil bl.a. undersøge,

hvor meget banen af stjernerne S0-102 og S0-2 vil præcessere næste gang de vender omkring det sorte hul i Mælkevejens centrum (se figur 4). Derudover vil det nye GRAVITY instrument bruge de fire *Very Large Telescopes* ved ESO som ét teleskop, svarende til 130 m i diameter, til at teste Einsteins teori yderligere [5].

Specielt indenfor det sidste år har der været ekstra stor opmærksomhed omkring sorte huller, idet det er lykkedes forskerne ved *Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory* (LIGO) i USA et par gange at detektere tyngdebølger fra to sorte huller mens de smeltede sammen. Observationerne [6] bekræfter dels eksistensen af de sorte huller på ny, samt at der findes så tunge (ca. 30 solmasser) stellare sorte huller, hvilket ikke er helt oplagt. Da stjerner tungere end ca. 100 solmasser ikke kan eksistere på grund af det enorme strålingstryk, må det betyde, at der er mange sorte huller i vores galakse som kan smelte sammen og med tiden skabe tunge sorte huller med masser omkring 30-40 solmasser ude i Galaksen. Flere tyngdebølgeobservationer vil klarlægge netop, hvor hyppige så tunge stellare sorte huller egentlig er.

Galaksedannelse og -udvikling:

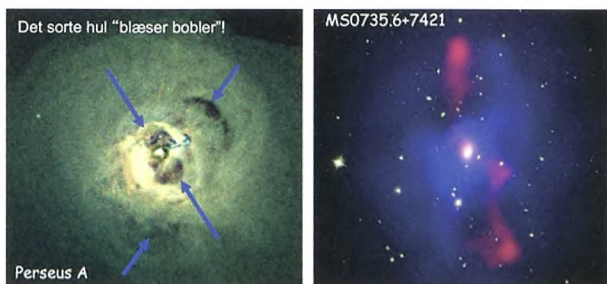
Indenfor de sidste 15 år er der sket et gennembrud i forståelsen af, hvorfor galakser ser ud som de gør, idet man har erfaret at sorte huller må spille en vigtig rolle for, hvordan galakser dannes og udvikler sig. Man finder bl.a., at de tungere galakser huser tungere sorte huller med næsten et konstant masseforhold, se figur 7.



Figur 7. Jo tungere galaksen er desto tungere er det sorte hul. Sammenhængen mellem massen af det tunge sorte hul (y-aksen) og massen af bulen af galaksen (x-aksen), målt gennem hastighedsdispersionen af stjernerne i bulen. De tungeste sorte huller sidder i store elliptiske galakser, der har hele deres masse i bulen. Dog ved vi nu, at galakser uden en bule sagtens kan huse et tungt sort hul, fordi vi kender sådanne galakser med aktive sorte huller. Tegning: K. Cordes og S. Brown (STScI).

Dette tyder på en vis tilpasning og en fysisk forbindelse eller vekselvirkning mellem galaksen og det sorte hul. At dette ikke er en trivial forbindelse understreges af de meget forskellige størrelsesskalaer af de to objekter. Det betyder nemlig, at et sort hul med en masse på fx 10 milliarder solmasser, med en udstrækning på mindre end 50 lystimer, tilsyneladende har information om massen af galaksen på en skala af 100.000 lysår eller mere, og omvendt! Hvordan den tilpasning blev til, vides endnu ikke men der forskes flittigt i emnet.

Det bedste eksempel på hvordan sorte huller kan have en direkte indflydelse på beskaffenheden af objekter i Universet er nok de såkaldte "røntgenhobe". I galaksehobe findes millioner af grader varmt gas, der køler ved at gløde i røntgenområdet, dvs. ved bølgelængder mindre end ca. $124 \text{ \AA}$ (eller fotonenergi større end 100 eV). I mange år stod forskerne med det mysterium, at der ikke blev skabt så mange stjerner i centret af disse hobe, som man forventede ud fra den kraftige røntgenstråling. Først i de seneste år har man fundet ud af, at røntgengassen er ujævnt fordelt eller har 'huller'. Man ved nu, at jetten fra den centrale radiogalakse kan opvarme gassen i centret, både ved at skubbe rundt på gassen og ved at virke som en radiator (se figur 8). Når gassen opvarmes, forhindres den i at køle nok af til at danne så mange stjerner som røntgenemissionen ellers indikerer.



Figur 8. Energien fra sorte huller i færd med at sluge gas kan skubbe og varme den kølende gas mellem galakserne i røntgenhobe. Til venstre ses huller i røntgengassen (grøn) angivet ved pilene. Til højre ses at radio-jetten (rød) fra den centrale galakse passer som hånd i handske i hullerne i røntgengassen (blå). Den mekaniske energi fra jetten svarer til den opvarmning af gassen der skal til for at forklare forskellen mellem den målte stjernedannelsesrate og den forventede på basis af røntgenemissionen fra gassen. Synligt lys fra galakserne i hoben (hvid) er fra rumteleskopet (NASA/CXC/STScI/A. Fabian (IoA)/B. McNamara (UWaterloo)). Originale billeder er opmærket af forfatteren.

Eksistensen af de tunge sorte huller er altafgørende for forklaringen på, at elliptiske galakser har tilfældige stjernebaner og samtidig ikke har dannet stjerner i flere milliarder år og heller ingen skive eller kold gas har. Til sammenligning har spiralgalakser en skive med masser af kold gas, hvorfra stjerner konstant dannes, og stjernerne bevæger sig i ordnede baner omkring centret i denne skive i galaksens plan. De tilfældige stjernebaner i elliptiske galakser kan skabes, når to næsten lige store galakser støder sammen og bliver til én galakse. Teoretiske modeller viser, at når dette sker, så smelter deres centrale sorte huller også sammen. Modellerne viser også, at den energi der frigøres, når gas under sammensmeltningen falder ind på de sorte huller, er stor nok til at opvarme og bortblæse den resterende gas i den endelige galakse, således at stjerner ikke længere kan dannes. Uden de sorte huller ville gassen i stedet blive koncentreret i centret af galaksen, og mange flere stjerner ville fortsat kunne dannes, stik imod hvad man observerer.

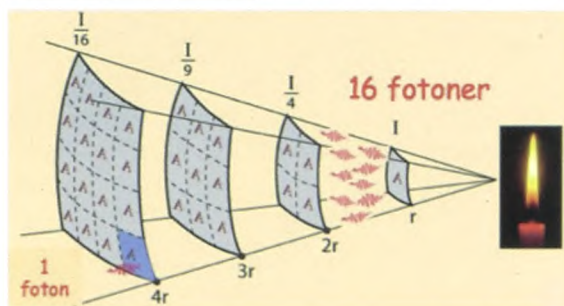
Kosmiske afstandsmålinger:

Indenfor kosmologien er sorte huller specielt brugbare og har stort potentiale for anvendelser. Lige siden 1980'erne, hvor man identificerede kvasarer som beliggende i store (dvs. kosmiske) afstande fra os har

astronomer haft interesse i at finde en metode, hvorved man kunne benytte målinger af kvasarer til at bestemme de store afstande i Universet, idet kvasarer udsender kraftigt vedvarende lys i modsætning til andre objekter som benyttes til afstandsmålinger. Det er specielt nyttigt, hvis man kan finde en egenskab ved kvasarer som afhænger af den indre lysstyrke, idet en simpel måling af den observerede fluks derved direkte giver afstanden, se boksen om *Standardlyskilde* og figur 9.

Standardlyskilde

Et objekt er en standardlyskilde (se figur 9) hvis der findes en egenskab som kun afhænger af den udsendte lysstyrke, L . Derved vil en simpel måling af den observerede fluks direkte give afstanden (eller rettere, "luminositetsafstanden", D_L , som det kaldes): $L = 4\pi D_L^2 F$. Her er L luminositeten (i enhed af energi per sekund) og F er fluksen (i enhed af energi per sekund per areal). En supernova af typen Ia er et eksempel på en standardlyskilde fordi eksplosionen altid sker når den hvide dværg i et dobbeltstjernesystem opnår en masse på 1,4 solmasser i den proces hvor den hvide dværg "stjæler" gas fra dens ledsagende stjerne. Når massen kendes ret præcist, kender vi også luminositeten af supernovaen og dermed afstanden når vi måler hvor meget fluks vi modtager.



Figur 9. Illustration af en standardlyskilde. Kendes intensiteten (dvs. luminositeten) af den udsendte stråling, kan man benytte den målte energifluks til at beregne afstanden til kilden. Antallet af fotoner er konstant men spredes over et større overfladeareal på den imaginære sfære, hvis radius er afstanden til kilden; dvs. energien per tidsenhed per arealenhed svækkes (med kvadratet på afstanden) jo længere væk lyskilden er. Figurer: Lawrence Livermore National Laboratory/Universe Adventure (øverst) og R. Nave, Georgia State University (nederst).

Det har længe ikke været muligt at finde en luminositetsafhængighed, som er tilstrækkelig entydig til at være nyttig. I 2011 lykkedes det at vise, at den kendte R - L -relation (se figur 5) har et stort potentiale for at kunne bruges til at bestemme de store afstande, selv til de allerførste galakser i Universet [7]. Dette er et stort gennembrud. I dette tilfælde benyttes R - L -relationen omvendt (se figur 5): Man måler R direkte i fjerne aktive galaksekerner ved hjælp af de tidligere nævnte variabilitetsstudier og dernæst estimeres L ud fra relationen, der så benyttes til at finde D_L fra formelen ovenfor. Pt. er metoden ikke helt så nøjagtig som fx *Supernova Ia*-metoden, men der er rige muligheder for at forbedre dens præcision, så forskerne er forhåbningsfulde og arbejder ivrigt på sagen. Gevinsten bliver nemlig, at vi kan måle afstande helt ud til de første galakser der blev dannet i Universet, hvor *Supernova Ia*-metoden kun kan benyttes ca. 10 milliarder år tilbage, dvs. tilbage til en tid hvor Universet kun var ca. 3,7 milliarder år gammelt.

Fremtiden

Der er sket rigtig mange fremskridt indenfor forskningen i sorte huller i de sidste ca. 100 år, siden Einstein fremsatte sin almene relativitetsteori og specielt indenfor blot de sidste 20 år. Det er svært at spå om de næste 100 år, men de næste 20 år lover rigtigt godt. Forbedringen af de første succesrige tyngdebølgeobservatorier og nye observatorier vil givetvis give os uanede mængder information om sorte huller og deres egenskaber. Et nyt teleskop, kaldet "Event Horizon Telescope", er i opstartsfasen. Det benytter radioteleskoper over hele jordkloden til at skabe en rumlig opløsning, der er stor nok til at se radiostråling fra området meget nær det sorte huls begivenhedshorisont. Forskerne arbejder på at opsætte et radioteleskop på Grønlands iskappe for at hjælpe med dette udfordrende arbejde [8].

Der er store forhåbninger om at kunne:

- a) se afbøjning af strålingen omkring det sorte hul (se evt. [9] om den gravitationelle linseffekt),
- b) se skyggen af det sorte hul idet det jo ikke lyser eller har en overflade hvorpå lys fra omgivelserne kan reflekteres,
- c) se hvordan radio-jets dannes nær det sorte hul,
- d) teste mange af de teoretiske ideer om fysikken i og omkring det sorte hul. Nye teoretiske ideer og tiltag er lovende for at vi snart kender langt mere til den ekstreme fysik som regerer i et sort hul. Danske forskere ved Niels Bohr Institutet er med til at bane vejen.

Så fremtiden lover godt! Vil du vide mere om sorte huller og udviklingen i vores forståelse deraf indenfor de sidste 100 år, kan du med fordel læse kapitel 6 i bogen *Verdensrummet i forandring – et hundredårigt perspektiv* [10]. Små dele af teksten i denne artikel er taget fra kapitel 6 i denne bog med tilladelse fra forlaget.

Litteratur

- [1] Hubble finds clues to the birth of supermassive black holes, European Space Agency Press Release heic1610; <http://www.spacetelescope.org/news/heic1610/?lang>.
- [2] ALMA finds a swirling, cool jet that reveals a growing, supermassive black hole; <http://phys.org/news/2016-07-alma-swirling-cool-jet-reveals.html>.
- [3] M.C. Bentz m.fl. (2013), The Low-luminosity End of the Radius-Luminosity Relationship for Active Galactic Nuclei, *Astrophysical Journal*, **767**, 149; DOI: 10.1088/0004-637X/767/2/149.
- [4] B.M. Peterson m.fl. (2004), Central Masses and Broad-Line Region Sizes of Active Galactic Nuclei. II. A Homogeneous Analysis of a Large Reverberation-Mapping Database, *Astrophysical Journal*, **581**, 197. DOI: 10.1086/423269.
- [5] Successful first observations of Galactic Centre with GRAVITY, ESO press release 1622; <https://www.eso.org/public/news/eso1622/?lang>.
- [6] J.O.P. Pedersen, M.C. Andersen (2016), Tyngdebølger observeret for første gang, *KVANT* nr. 1, Marts 2016.
- [7] D. Watson, K.D. Denney, M. Vestergaard, T.M. Davis (2011), A new cosmological distance measure involving Active Galactic Nuclei, *Astrophysical Journal Letters*, bind **740**, L49.
- [8] M.C. Christiansen (2016), Hvordan ser et sort hul ud?, <http://videnskab.dk/teknologi-innovation/hvordan-ser-et-sort-hul-ud>.
- [9] C. Grillo, L.B. Christensen, J. Hjorth (2015), Kosmiske forstørrelsesglas, *KVANT* nr. 4, December 2015; Michael F. Hansen (2016), Gravitationelle linser i galaksehobe, *KVANT* nr. 1, 2016.
- [10] Lone Bruun, Johan Fynbo og Michael Quaaed (red.), *Verdensrummet i forandring – et hundredårigt perspektiv*. Forlaget Epsilon 2016. Udgivet i forbindelse med Astronomisk Selskabs 100 års jubilæum.



Marianne Vestergaard er lektor og leder af et forskningsprogram støttet af Det Frie Forskningsråd til at forbedre massebestemmelserne af sorte huller i kvasarer og aktive galaksekerner, deriblandt de metoder hun selv har udviklet.

Almen Relativitetsteori i 100 år

Denne artikel er med i *KVANT*'s markering af 100-året for Einsteins almene relativitetsteori.

Læs mere om udviklingen af denne teori og moderne anvendelser i temanummeret om emnet, *KVANT* nr. 4 (2015) samt i *KVANT* nr. 4 (2014) og *KVANT* nr. 1 (2016).