

# Sorte huller

AF JENS HJORTH

## Indledning

For en fysiker er et sort hul et objekt – et område i ‘rumtiden’ – så kompakt og tungt, at tyngdeaccelerationen omkring det er så stærk, at ingen partikler, intet lys og ingen information kan undslippe det. Etymologisk menes begrebet at stamme fra 1960’erne i en analogi til »Black Hole of Calcutta«, et meget lille fængsel, hvor britiske krigsfanger blev holdt indespærret i 1756. Pladsen var trang, og ingen kunne undslippe.

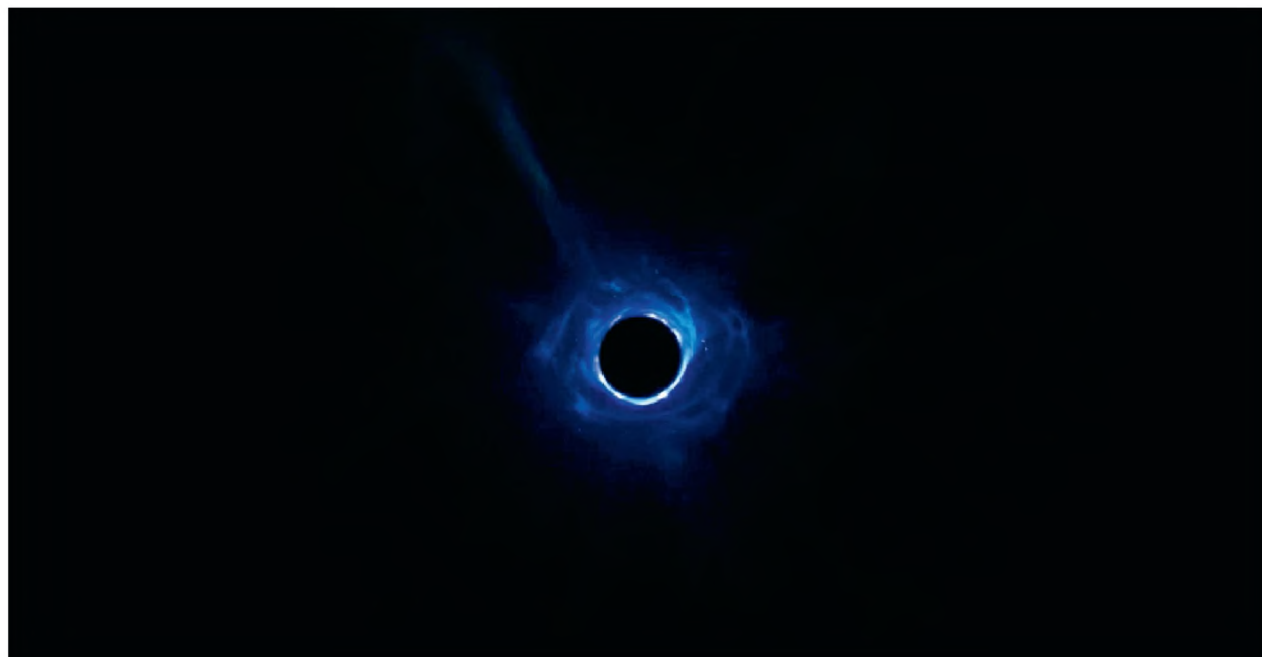
Mens sorte huller i dag er et veldefineret begreb fra fysikken, bruges analogien gerne i dagligt sprog (»mine penge forsvinder i et sort hul«) eller inden for andre grene af videnskaben. For eksempel argumenterer teologen Frederik Poulsen i sin doktorafhandling (Poulsen 2019) for, at eksilet kan ses som en slags litterært sort hul i midten af *Esajas’ Bog*. Det er så stærk en kraft, at det opsuger liv, lys og håb og alene medfører tavshed, mørke og død:

Et sort hul i rummet er jo en destruktiv kraft med så stærk en tyngdekraft, at selv lys ikke kan slippe

væk fra det. Vi kan kun observere sorte huller ud fra deres påvirkning af omgivelserne. På samme måde fornemmer vi i *Esajas’ Bog*, at der foregår noget afgørende, men vi har ikke noget direkte vidnesbyrd om, hvad der finder sted. Ligesom astronomerne ser på, hvordan andre ting i himmelrummet bevæger sig omkring det sorte hul, så ser jeg på teksterne før og efter begivenheden. Er der noget, der peger frem mod katastrofen? Hvilke refleksioner kan vi finde, der peger tilbage mod den? Det har været et rigtigt godt greb til at lave en læsning, hvor jeg sætter fokus på: hvad sker der inde i det her sorte hul? (Københavns Universitet 2019)

Sorte huller spiller naturligvis også en helt central rolle i mange science fiction-historier, film, spil og popkultur (figur 1).

Populære fremstillinger af fysikken for sorte huller på dansk findes fx i Vestergaard (2016), Vestergaard, Harmark & Obers (2017) og Sonne (2019).



FIGUR 1. Til frustration for mange afsluttedes sæson 10 af det populære online spil Fortnite i oktober 2019 ved, at alt blev opslugt i et sort hul. Nogle fortolkede det sorte hul som en metafor for en eksistentiel krise. Til glæde for de mange gamere verden over startede kapitel 2 af spillet dog op efter få dage. Efter [youtube.com/watch?time\\_continue=13&v=e9euTxcOmkc&feature=emb\\_logo](https://www.youtube.com/watch?time_continue=13&v=e9euTxcOmkc&feature=emb_logo).

## Einsteins almene relativitetsteori

Albert Einstein var optaget af et grundlæggende problem inden for fysikken, nemlig den tilsyneladende ækvivalens mellem gravitationel og inertiel masse. Med andre ord, fysikken er den samme, hvad enten man oplever Jordens tyngdekraft, eller man opholder sig i et rumskib, der accelereres langt væk fra nogen kilde til tyngdekraft. Disse tanker ledte i sidste ende til Einsteins almene relativitetsteori (Einstein 1916), der udtrykt i den berømte formel

$$G_{\mu\nu} = \frac{\delta\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

matematisk beskriver, at masse får rumtiden til at krumme, og at rumtidens krumning bestemmer, hvordan masser bevæger sig. Det hele er koblet sammen. Det, vi oplever som tyngdekraften, er i virkeligheden forårsaget af, at rumtiden krummes af et tungt objekt.

Einsteins teori var et eksempel på banebrydende grundforskning, drevet af fundamental nysgerrighed, og et forsøg på at besvare nogle halv-filosofiske spørgsmål. Einstein fulgte næppe slavisk principperne for design og planlægning af forskning som fx stipuleret i den danske kodeks for integritet i forskning (Uddannelses- og Forskningsministeriet 2015). Sagen er, at Einsteins teori havde en lang række utilsigtede konsekvenser, som ingen havde regnet med, og det var ikke derfor, den var blevet udviklet.

Disse utilsigtede konsekvenser stod ikke klart lige med det samme, men det fulgte hurtigt, at der måtte være tyngdebølger, at lyset, der passerer forbi tunge objekter, kan blive gravitationelt linset (afbøjet), og at universet ikke kan være statisk. Det stod også hurtigt klart, at der fandtes løsninger til ligningen, som tillod singulariteter. Fælles for alle disse konsekvenser er, at ingen tidligere havde været observeret. Faktisk forventede man ikke engang, at de ville kunne observeres eller verificeres. De sås snarere som matematiske kuriositeter, der ikke havde nogen relevans for den verden, vi kender.

## Matematiske egenskaber af sorte huller

Få måneder efter, at Einstein havde præsenteret sin teori, fandt Karl Schwarzschild (1916) en løsning for en punktmasse.<sup>1</sup> I en afstand, der nu betegnes som Schwarzschild radius,

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

hvor  $G$  og  $c$  er universelle konstanter,  $M$  er massen,

blev løsningen singularær, dvs. nogle af leddene i Einsteins ligninger blev uendeligt store. Sådanne løsninger betragtes ofte som 'ufysiske'. Det var ikke før end 1958, at David Finkelstein (Finkelstein 1958) beskrev Schwarzschild radius som en 'begivenhedshorison', hvor undvigelseshastigheden bliver lig med lysets hastighed (ligesom en raket skal have en vis hastighed for at kunne undslippe Jordens tyngdefelt). Med andre ord: Inden for denne radius kan lys ikke undslippe. Schwarzschild radius er således det samme som 'størrelsen' af det, man i starten af 1960'erne begyndte at kalde et sort hul.

Hvis man betragter en rumraket, der bevæger sig mod et sort hul, sker der underlige ting, når raketten nærmer sig Schwarzschild radius. Udefra ser det ud, som om tiden går langsommere og langsommere, og man vil aldrig kunne se raketten passere ind i det sorte hul. Det er, som om tiden går i stå, når man kommer tæt på denne radius. Vi vil derfor aldrig kunne observere et objekt falde ind i et sort hul. På den anden side vil astronauten ikke observere noget særligt på vej mod det sorte hul. Der vil ikke være noget skilt, der siger 'HERFRA ER DER INGEN VEJ TILBAGE!', og hun vil ikke observere, at tiden går i stå.<sup>2</sup> Med andre ord kan raketter og andet stof sagtens falde ind i et sort hul, vi kan blot ikke observere denne overgang udefra (dvs. fra lang afstand).

Schwarzschild radius for Jorden er blot 9 millimeter, så hvis Jorden skulle være et sort hul, skulle den være presset sammen og fylde mindre end en teskefuld. For Solen er Schwarzschild radius ca. 3 kilometer, så Solen er heller ikke et sort hul.

Fysikken for sorte huller er svær og på mange måder intuitivt kompliceret. Men som objekter i sig selv er de yderst simple. Det viser sig, at de fuldt ud kan karakteriseres ved blot tre størrelser: masse, spin og ladning. Deres masse er klart den vigtigste. Desuden kan de rotere, og deres 'spin' er en anden parameter. Endelig kan sorte huller i princippet have en elektrisk ladning.

I 1960'erne og 1970'erne udvikledes teorien for sorte huller yderligere, og med kendte fysikere som Roger Penrose og Stephen Hawking i spidsen fandt

1. Karl Schwarzschild udledte løsningen, mens han var udstationeret for den tyske hær ved den russiske front under 1. verdenskrig. Her pådrog han sig en autoimmun hudsygdom og døde kort efter i maj 1916.

2. Dog vil rumraketten og astronauten blive strakt ud, fordi de dele, der er tættest på det sorte hul, vil opleve større tyngdekraft end de dele, som er længst væk – en effekt, der er kendt som 'spaghettificering'. Effekten vil være større for små sorte huller, mens der ikke vil være en mærkbar ændring, når man passerer begivenhedshorisonen for et supermassivt sort hul.



man mange spændende egenskaber – bl.a. opdagede Hawking (1974), at sorte huller i princippet langsomt kan ‘fordampe’ ved at udsende, hvad man i dag kender som Hawking-stråling. Og ironisk nok ledte opdagelsen af singulariteter og svært fortolkelige resultater til nye halvfilosofiske diskussioner, som Einstein næppe i sin vildeste fantasi havde forestillet sig, da han forsøgte at løse gåden om ækvivalensprincippet. Men det blev ved tankerne. Indtil ...

### Hvor finder man sorte huller?

Den bedste måde at kigge efter sorte huller er at kigge op på himlen og ud i universet. Men hvor skal man kigge hen? Sorte huller er som bekendt usynlige (i og med, at intet lys kan slippe væk fra dem) og i sagens natur relativt små (mindre end Schwarzschild radius).

Universet er 13,8 milliarder år gammelt og har udviklet sig siden Big Bang. Samtidig har det udviklet sig fra at være en homogen og varm ursuppe domineret af stråling til at være et rigt sted bestående af mørkt stof, stjerner og galakser. En galakse som vores egen Mælkevej består af ca. 100 milliarder stjerner. Nogle stjerner er som vores egen Sol, mange stjerner er lettere end Solen, de er røde og lever længe. Andre er tungere, mere blå og lever kortere. Stjerner ‘dør’, når de ikke længere har brændstof (fra fusion af lette grundstoffer) nok til at lyse og modstå deres egen tyngdekraft. Når der ikke er mere brændstof, falder de sammen og kan blive til særegne objekter såsom hvide dværge eller neutronstjerner. Nogle af disse begivenheder er voldsomme og sker som supernova-eksplosioner. Selv om tunge stjerner har mere brændstof, lever de alligevel kortere, fordi de lyser langt kraftigere og dermed opbruger deres brændstof hurtigere. Lev stærkt, dø tung!

Samtidig med udviklingen af teorien for sorte huller i 1960’erne skete der fremskridt inden for astronomien, som på dette tidspunkt foregik ret uafhængigt af forskningen inden for teoretisk fysik. Man opdagede kvasarer – ekstremt klare lyskilder ved meget store afstande (Schmidt 1963) – som man i sidste ende ikke kunne forklare på anden måde end, at det var meget

tunge sorte huller (millioner gange Solens masse), der ‘spiste’ af deres omgivelser og dermed konverterede potentiel energi til stråling. Supernovaer var et kendt fænomen og man vidste, at de kunne lede til dannelsen af neutronstjerner pga. Antony Hewish’ og Jocelyn Bells opdagelse af pulsarer<sup>3</sup> (Hewish et al. 1968). Man vidste også, at en neutronstjerne tungere end omkring tre gange Solens masse måtte kollapse yderligere, for sandsynligvis at blive til et sort hul. I 1972 opdagedes den første kandidat til et sort hul (Murdin & Webster 1971; Bolton 1972; Webster & Murdin 1972). Det var røntgenkilden Cygnus X-1, der udsendte røntgenstråling, fordi stof faldt ned på det sorte hul. Så efter de teoretiske udviklinger i 1960’erne og 1970’erne og de parallelle observationelle fremskridt inden for astronomien nåede man frem til, at der nok var sorte huller på spil.

I det følgende ser vi på, hvad vi i dag ved om to typer af sorte huller, nemlig dem som Cygnus X-1, der vejer lidt mere end Solen, og dem, der vejer millioner eller milliarder gange så meget som Solen og giver anledning til kvasarer.

### Eksploderende stjerner

Supernovaer er ekstremt klare lyskilder, der lyser op i løbet af et par dage eller uger og så svinder ind igen i løbet af uger eller måneder. Stjerner kan eksplodere på mange forskellige måder, men kort sagt kender man to typer af supernovaer:

Type Ia supernovaer er resultatet af to stjerner, der vekselvirker, enten to hvide dværge, der støder sammen, eller en hvid dværg, hvortil der overføres masse fra en rød kæmpestjerne. Vi forventer ikke, at denne type supernova kan lede til dannelsen af et sort hul.<sup>4</sup>

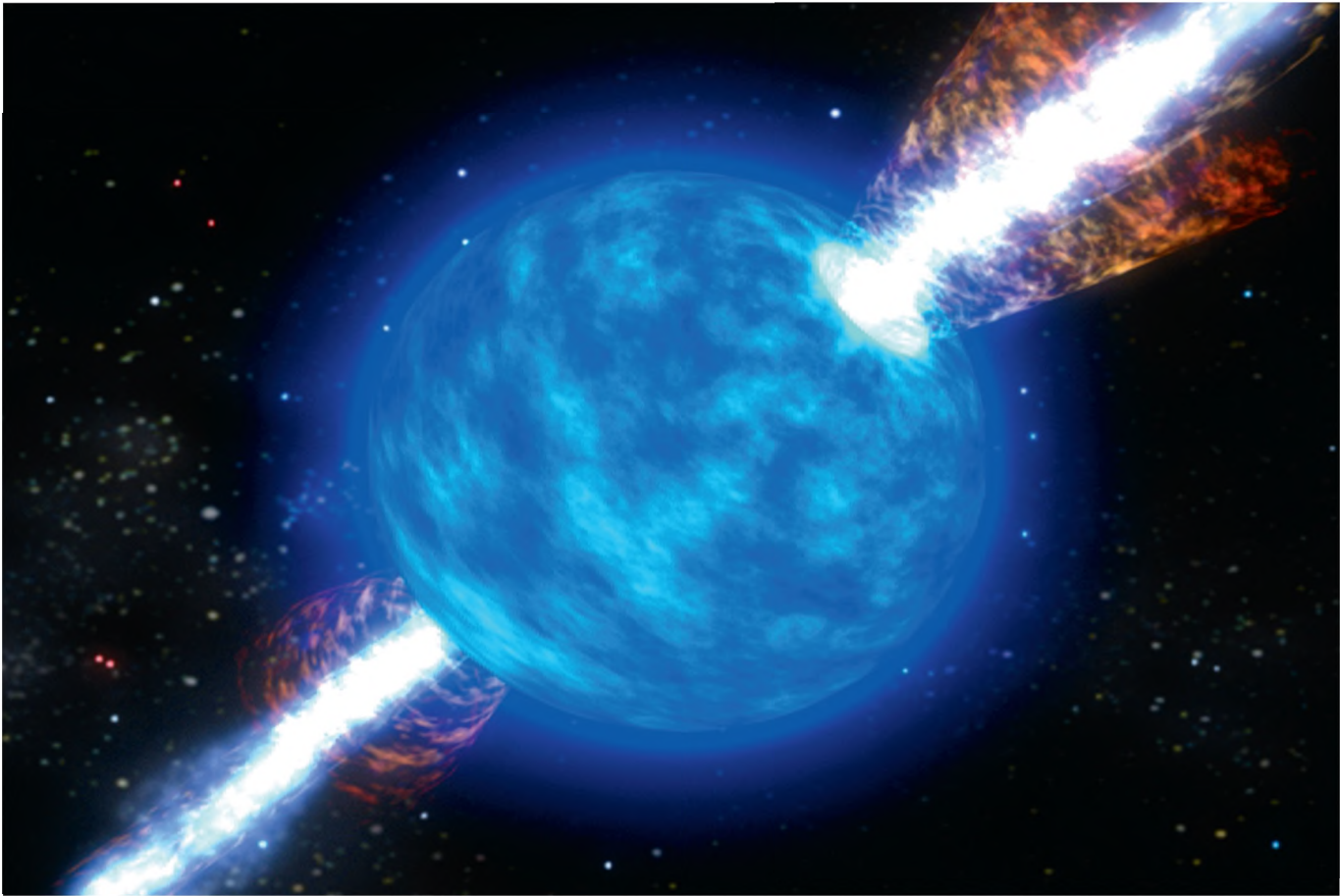
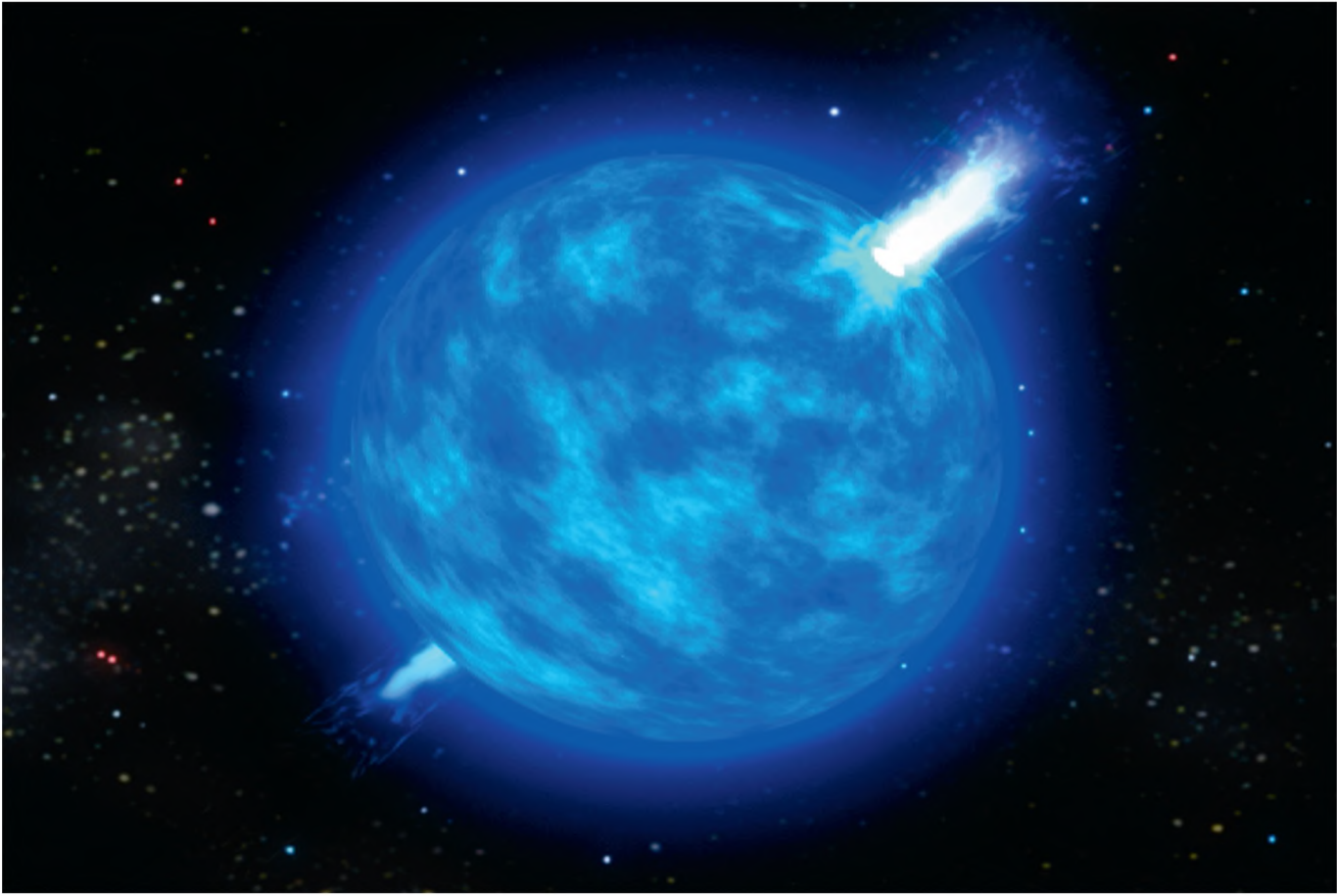
Type II supernovaer (samt Type Ib og Ic) er tungere stjerner, der kolliderer, når de mod slutningen af deres liv løber tør for brændstof og falder sammen. Hvis stjernen er tung nok, kan det lede til dannelsen af et sort hul. I nogle tilfælde kan der i den proces også dannes en stråle, en jet, der kan ses som et såkaldt gammaglimt, hvis jetten peger direkte mod os (figur 2; Hjorth et al. 2003). Se næste opslag.

3. Antony Hewish delte Nobelprisen med Martin Ryle i 1974. Jocelyn Bell, som var Hewishs studerende, fik ikke Nobelprisen, selv om det var hende, der gjorde selve opdagelsen. I 2018 fik hun »the Special Breakthrough Prize in Fundamental Physics« (3 millioner dollars) for sin opdagelse.

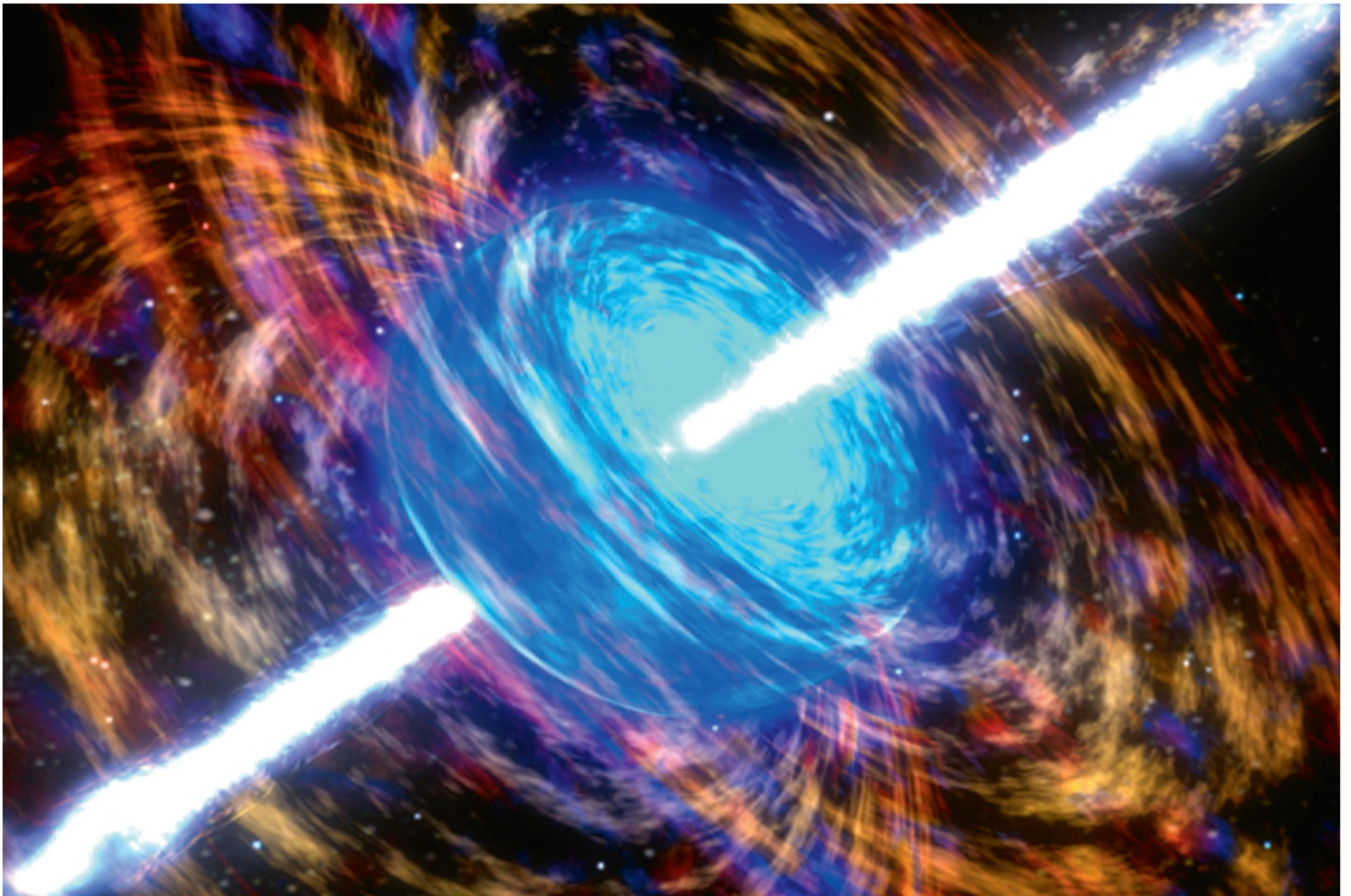
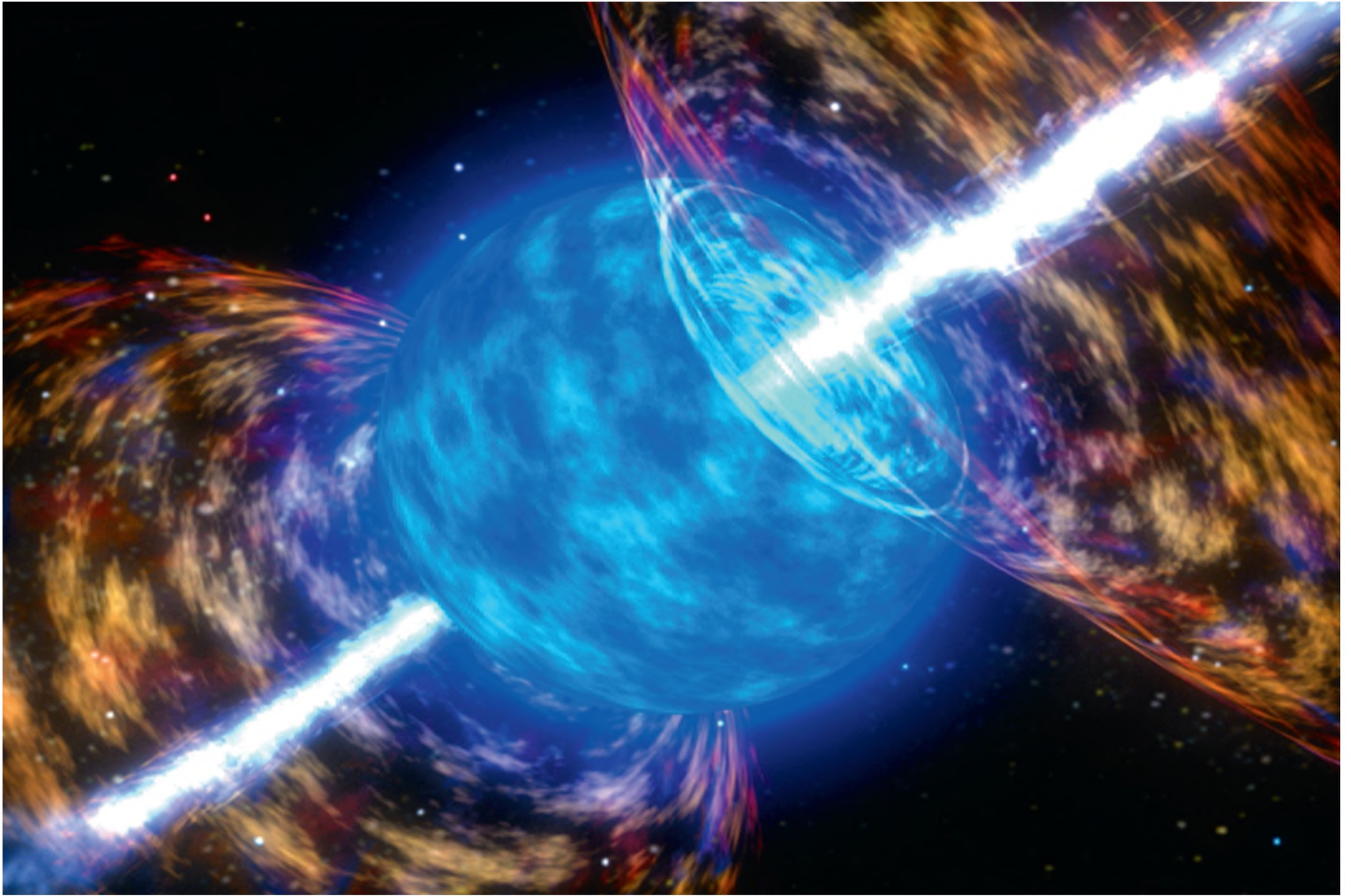
4. Man brugte Type Ia supernovaer til at opdage, at universets ekspansion tilsyneladende accelererer pga. såkaldt mørk energi (hvilket udløste en Nobelpris i 2011). Men det er en anden historie.

FIGUR 2. Dannelsen af et sort hul i forbindelse med et gammaglimt. I stjernens indre kolliderer materiale under dets egen tyngdekraft til et sort hul, og idet yderligere stof falder ned omkring det sorte hul, udsendes jets, der ødelægger stjernen og danner en supernova. Hvis en jet peger mod os, ser vi den som et gammaglimt. Efter [nasa.gov/centers/goddard/news/top-story/2003/0618rosettaborst.html](http://nasa.gov/centers/goddard/news/top-story/2003/0618rosettaborst.html). →











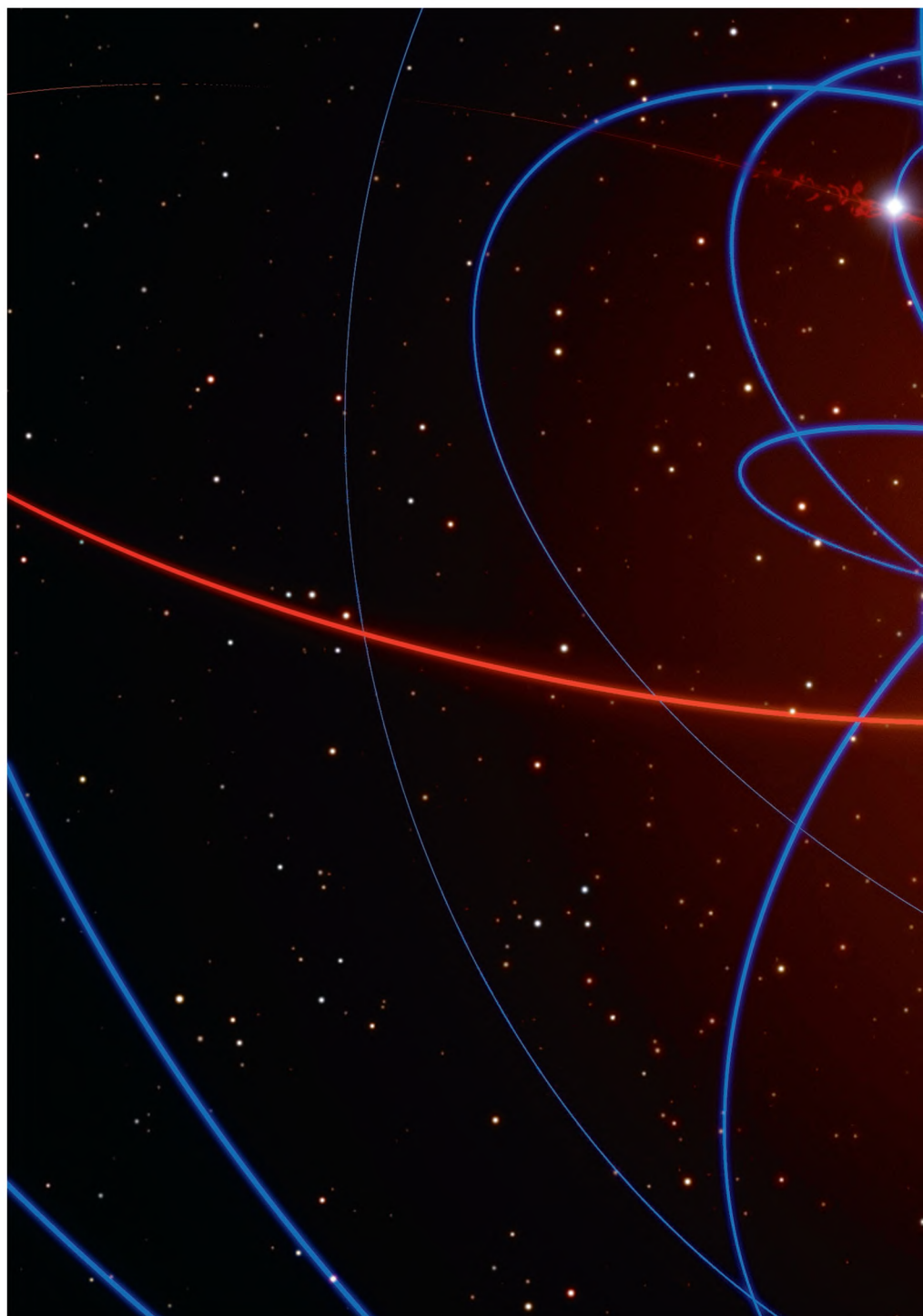
Man forventer også, at meget tunge stjerner (større end 50 gange Solens masse) kan falde sammen direkte til et sort hul, uden at der samtidig dannes en supernova. Alt det materiale, der ellers skulle lyse som en supernova pga. radioaktivt henfald, så at sige falder ind i det sorte hul, inden det kan nå at lyse op. Resultatet er mindre spektakulært og meget sværere at opdage. Det er en stjerne, som er der ... og så er den pludselig væk, uden at efterlade sig spor.

Som nævnt ovenfor er der gode indikationer på, at nogle af disse processer leder til sorte huller, både teoretisk og observationelt, fordi vi ser røntgenstråling fra kilder, som må indeholde et sort hul. Men det er også på sin plads at pointere, at mens vi forventer, at nogle stjerne-eksplosioner leder til dannelsen af sorte huller, er det ikke nemt direkte at bevise, at der dannes et sort hul og ikke en tung neutronstjerne.

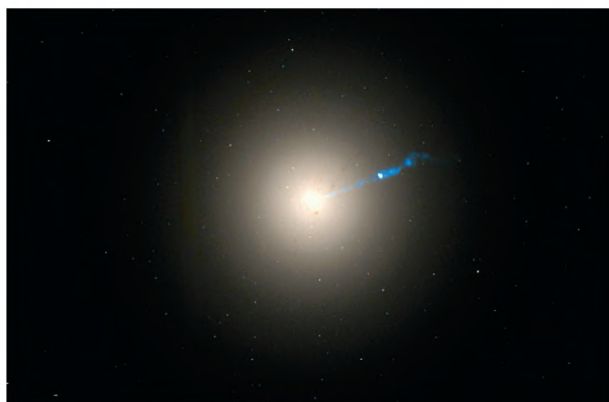
### Supermassive sorte huller

Kvasarerne (se s. 37) var et stort mysterium i 1960'erne. En af de udviklinger, som ledte folk til at acceptere, at de er ekstremt langt væk, var, at man fandt, at det stjernelignende objekt var omgivet af et (relativt) svagt udstrakt objekt - en fjern galakse. I dag ved vi, at supermassive sorte huller (millioner til milliarder gange Solens masse) befinder sig i centrum af mange galakser - måske endda alle galakser. Men ikke alle disse sorte huller er 'aktive', dvs. spiser af omgivelserne lige nu. Det er faktisk de færreste galakser, der er aktive. Men de, som er, udsender kraftig stråling. I nogle tilfælde er der ikke synlig optisk stråling fra centrum, men i stedet optiske eller radio jets (figur 3).

I vor egen galakse, Mælkevejen, er der dog ikke en aktiv galaksekerner. Men vi er ikke desto mindre ret sikre på, at der befinder sig et sort hul med en masse på omkring 4 millioner gange Solens masse. Forklaringen er simpel: Vi kan observere stjerners baner tæt på centrum i Mælkevejen, omkring en usynlig kilde,

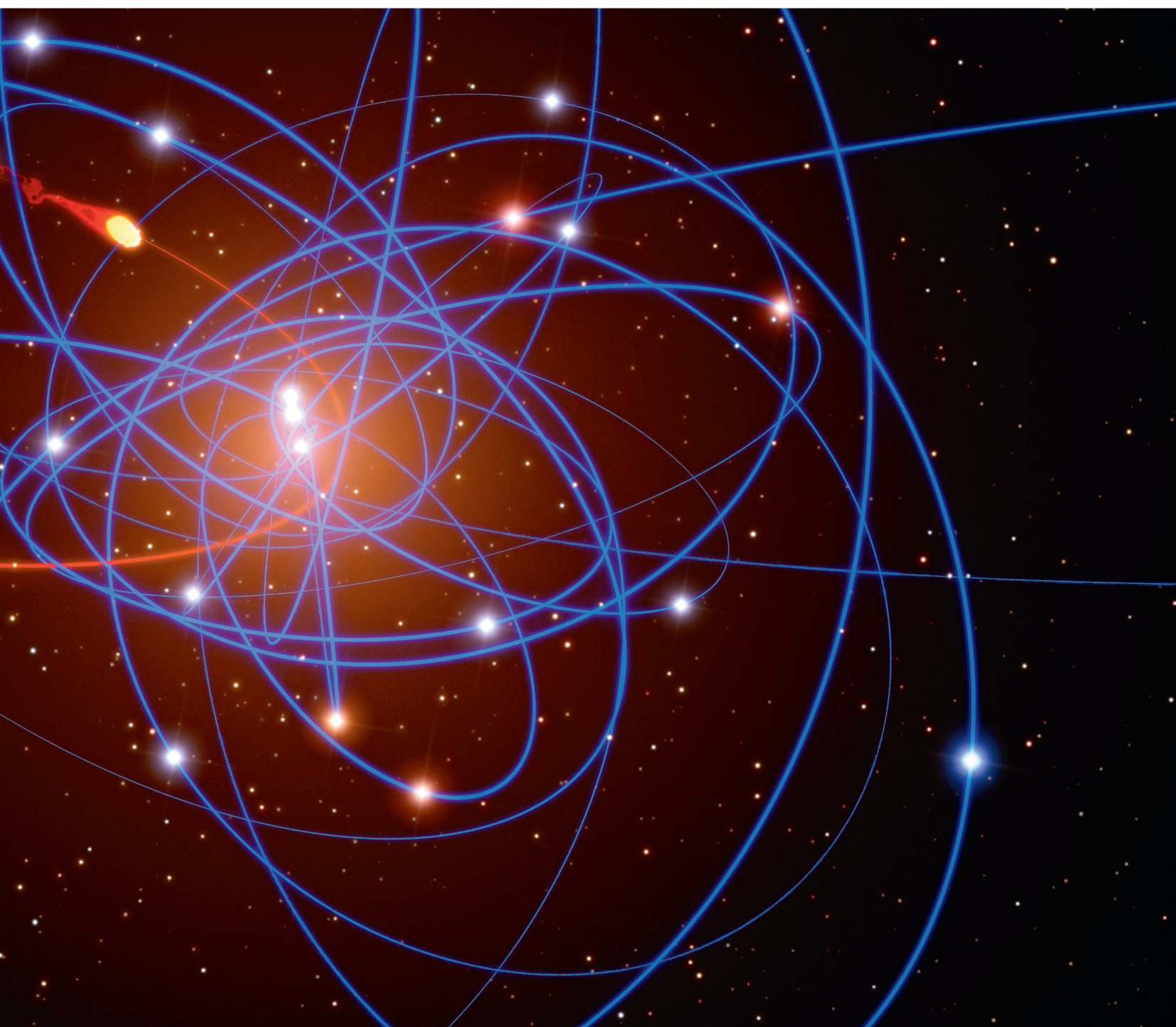


FIGUR 3. Billede af Messier 87, den centrale galakse i Virgo galaksehoben, omkring 50 millioner lysår borte. Man ser både optisk stråling (blåt) og radiostråling (ikke vist på billedet) fra materiale, der udsendes fra centrum af galaksen, hvor der formodes at befinde sig et supermassivt sort hul, som er ansvarligt for udsendelsen af strålingen. Efter wikisky.org/snapshot?.



som hedder Sagittarius A\* (figur 4). Og vi kan se, at de er på normale baner omkring dette centrum. På den måde kan vi bestemme massen af objektet, selv om vi





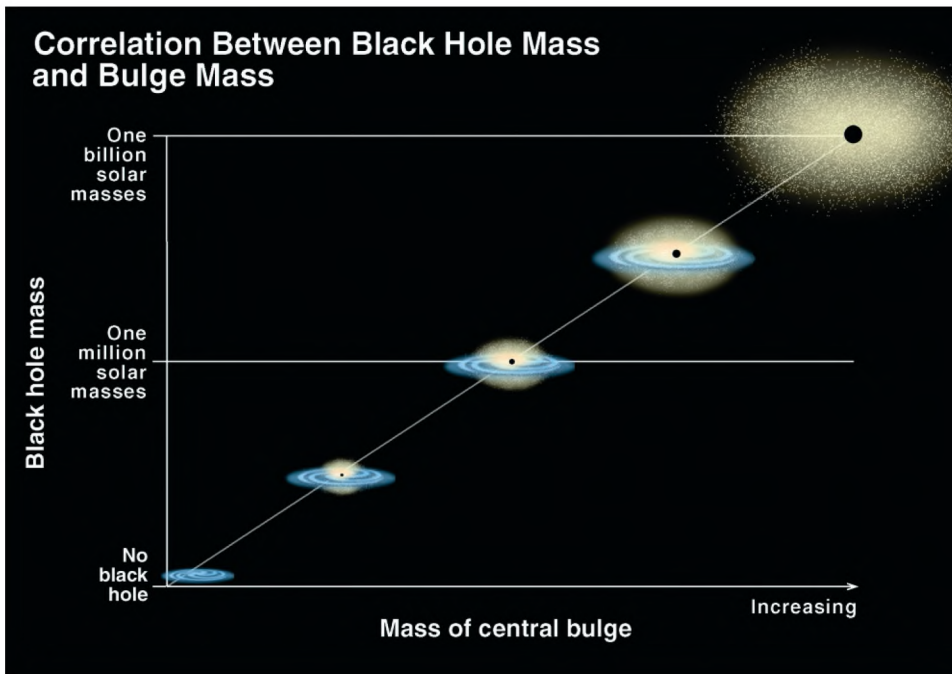
FIGUR 4. Simulering af stjerners bevægelse omkring Sagittarius A\* i centrum af Mælkevejen (25000 lysår borte). Ud fra stjernernes bevægelse kan man bestemme massen af det (usynlige) sorte hul i centrum. En videofilm af stjernernes bevægelse findes på [eso.org/public/news/es01151/](https://eso.org/public/news/es01151/).

ikke kan se det (vi bestemmer også Solens masse ved at se på Jordens og de andre planeters baner). Og resultatet er, at selv om vi ikke kan se objektet, så må

det være supertungt og konsistent med Einsteins teori (Do et al. 2019). Per definition er det et sort hul.

Vi har fundet kvasarer helt tilbage til, hvor universet blot var ca. 700 millioner år gammelt (dvs. at lyset fra dem har været undervejs i ca. 13,1 milliarder år) med masser på op til 10 milliarder gange Solens masse. Derfor ved vi, at de sorte huller må være dannet meget hurtigt efter Big Bang.





FIGUR 5. Galaxers masse er tilsyneladende korreleret med det centrale supermassive sorte huls masse.

## Dannelse og vækst af supertunge huller

Hvordan dannes supermassive sorte huller? Som beskrevet mener man, at sorte huller med masser mellem 1 og 100 gange Solens dannes som følge af stjerneeksplosioner. Ideen er, at de tungeste af disse (eller evt. endnu tungere sorte huller dannet via hidtil ukendte mekanismer) kan vokse sig større ved at spise af deres omgivelser, hvis de dannes tidligt i universets historie. De har i princippet haft god tid: over 10 milliarder år til at gøre dette. Det er også muligt for sorte huller at smelte sammen med andre sorte huller for på den måde at blive større. I og med, at vi har observeret supermassive sorte huller allerede omkring 700 millioner år efter Big Bang, må denne proces være relativt hurtig på en kosmisk tidsskala. Det er blevet et forskningsområde helt for sig selv at studere, hvordan sorte huller kan vokse sig så store på så relativt kort tid.

En interessant observation er, at massen af et supermassivt sort hul i centrum af en galakse tilsyneladende er direkte korreleret med massen af galaksen (figur 5).

Dette lyder måske ikke umiddelbart overraskende, men ved nærmere eftertanke er det ikke helt nemt at forklare. Selv om et sort hul har en kraftig indflydelse på sine nærmeste omgivelser, kan det ikke påvirke en hel galakse med sin tyngdekraft. Et supermassivt sort hul på en milliard solmasser bor typisk i centrum af en galakse, der vejer 1000 gange mere, dvs. en billion gange Solens masse. Hvordan kan galaksen vide, hvad dens sorte hul skal veje? Eller omvendt: Hvordan kan

det sorte hul vide, at det skal justere sin masse til, hvor meget galaksen vejer?

Én mulighed er, at galakser og sorte huller udvikler sig i parløb og influerer hinanden indirekte. For eksempel vil et aktivt sort hul gennem sine jets påvirke gassen i galaksen, så den måske stopper med at danne stjerner. Og omvendt, hvis der ikke er så megen gas tilbage i en galakse, stopper brændstofforsyningen til det voksende sorte hul.

## De nyeste udviklinger

Eksisterer sorte huller virkelig? Er Einsteins teori rigtig? Eller binder fysikere og astronomer befolkningen en god historie på ærmet?

Ny grundlæggende indsigt i den verden, vi lever i, vores verdensbillede, kræver solide beviser, hvis vi skal godtage det, specielt hvis det indebærer noget så underligt og fjernt fra sund fornuft som tyngdebølger, universets udvidelse og udvikling og sorte huller. Det kræver visioner og langsigtede investeringer i forskningsinfrastruktur at nå så langt. I de seneste par år, omkring 100 år efter Einsteins revolutionerende teori og omkring 50 år efter de spæde opdagelser af betydningen af sorte huller, har vi taget de næste store skridt fremad, båret af store investeringer i grundforskning.

LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) og Virgo er laserinterferometre (figur 6), der er designet til at detektere tyngdebølger som forudsagt af Einsteins teori (se s. 43-46).





FIGUR 6. Billede af Virgo-detektoren. Der sendes laserlys ud i de to 'arme'. Hvis der passerer en tyngdebølge, bliver længden af armene henholdsvis forkortet og forlænget en lille bitte smule, og det kan måles ved hjælp af laserlyset.

Tyngdebølger vil, når de passerer, lede til ekstremt små forskelle i de afstande, vi måler mellem to punkter. Forskellene er ufatteligt små, svarende til at måle en titusindedel af udstrækningen af kernen af et brintatom på flere kilometers afstand. En måling af tyngdebølger vil være en direkte verifikation af en forudsigelse af Einsteins teori. Og de mest oplagte kilder til tyngdebølger er sorte huller. Opbygningen af LIGO-Virgo samarbejdet har taget 40 år, uden nogen påviselige videnskabelige resultater indtil for ganske nylig.

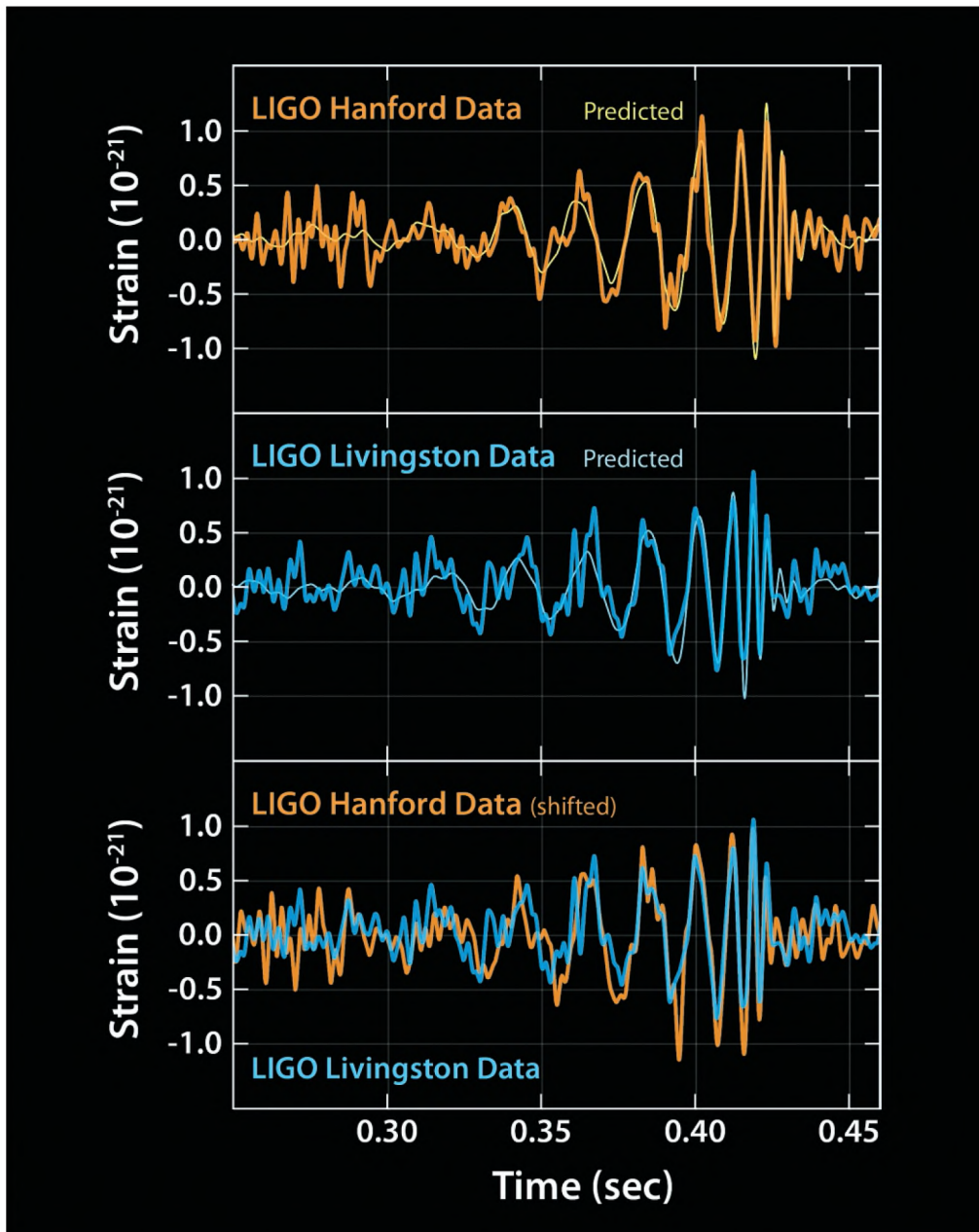
Event Horizon Telescope er et projekt, der er designet til direkte at måle begivenhedshorisonten for et sort hul (se s. 47f). Som tidligere nævnt er Schwarzschild radius ret lille, og læg dertil, at ethvert sort hul vil ligge meget langt fra Jorden. Derfor kræves et

kæmpeteleskop. Event Horizon Telescope er effektivt næsten lige så stort som Jorden, og derfor kan det forstørre signaler med ekstremt lille vinkeludstrækning på himlen. Formålet med Event Horizon Telescope er at tage et direkte billede af et sort hul, så vi ikke (kun) skal basere vores overbevisning om eksistensen af sorte huller på indirekte bestemmelser og fysiske lovmæssigheder (som det fx er vist i figur 4).

### Tyngdebølger

I hundredeåret for Einsteins teori målte LIGO 14/9 2015 for første gang en tyngdebølge direkte (figur 7; Abbott et al. 2016). Resultatet gav allerede i 2017 Nobelprisen til Rainer Weiss, Barry Barish og Kip Thorne.





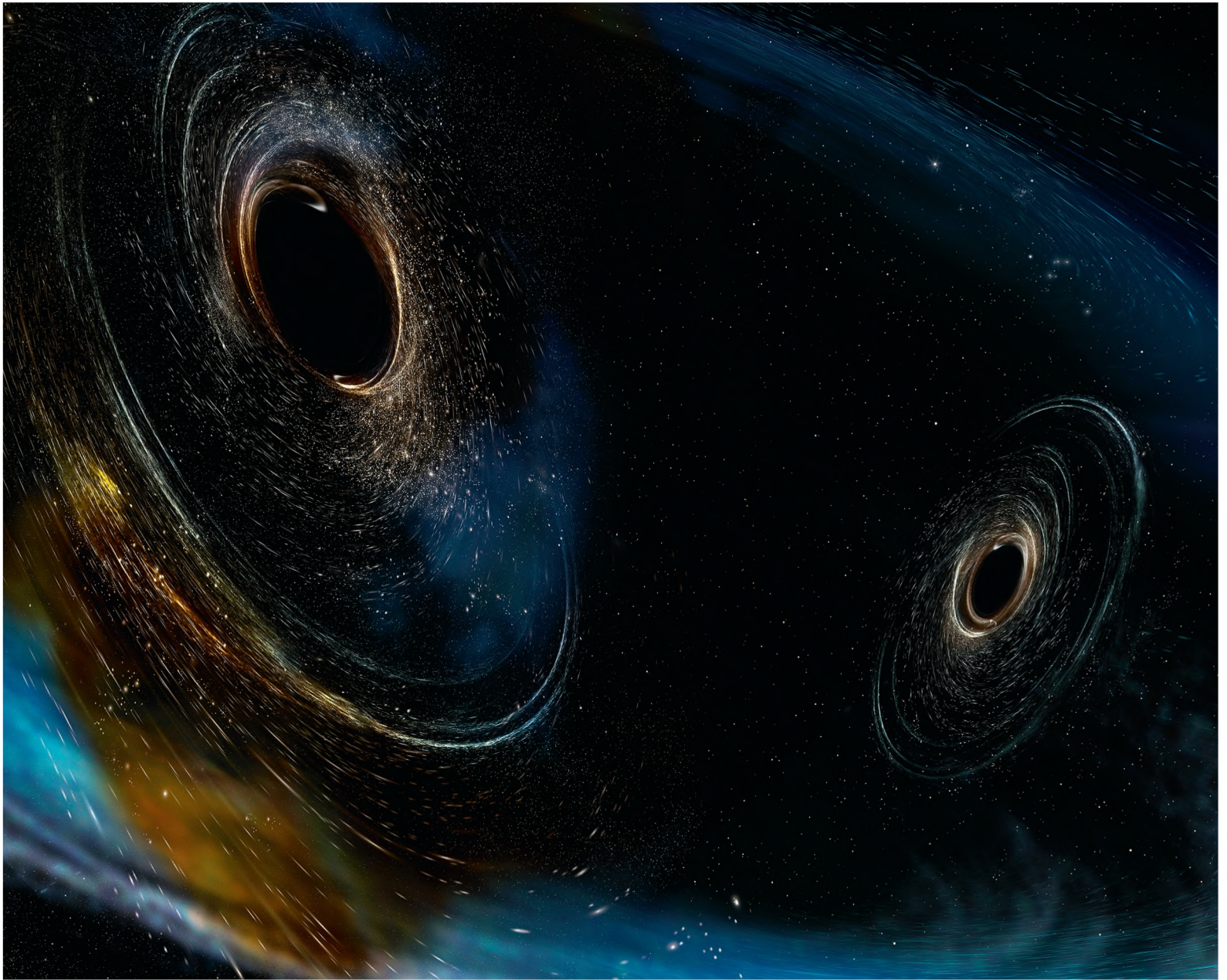
FIGUR 7. Den første direkte måling af en tyngdebølges passage gennem to detektorer placeret forskellige steder i USA (de to øverste paneler). Tyngdebølgen gav anledning til varierende længdemålinger og ankom med 7 millisekunders forsinkelse i den anden detektor (svarende til den tid, det tager bølgen at bevæge sig med lysets hastighed mellem de to faciliteter). Ellers var de to signaler ens (nederste panel) og konsistent med sammensmeltning af to sorte huller.

LIGO detekterede varierende afstande i to forskellige detektorer i USA, da tyngdebølgen ankom med lysets hastighed. Signalerne var ens i de to detektorer.

Ud fra Einsteins teori kan man beregne egenskaberne af det, som gav anledning til tyngdebølgerne: to sorte huller i en afstand af 1,3 milliarder lysår, hver med en masse på over 30 gange Solens masse og en diameter på ca. 200 km, som smeltede sammen til et enkelt sort hul med en masse på 62 gange Solens. Det kunne udelukkes, at det var andre typer af kompakte

objekter, der gav anledning til signalet, så dermed havde man for første gang detekteret tyngdebølger. Samtidig havde man også direkte påvist eksistensen af sorte huller med masser noget større end det, man forventede fra normale supernovaeksplosioner. Eksperimentet gav den hidtil bedste evidens for eksistensen af sorte huller (figur 8). Det er sandsynligt, at så relativt tunge sorte huller blev skabt mindre end 2 milliarder efter Big Bang fra stjerner, der vejede mellem 40 og 100 gange Solen.





FIGUR 8. Visualisering af to sorte huller, inden de smelter sammen.

Siden den første detektion af sådanne sorte huller er tilsvarende sammensmeltninger af sorte huller blevet observeret mange gange. Årsagen til, at man kun ser sammensmeltende sorte huller, er, som forudsagt i Einsteins teori, at et enkelt sort hul, der ikke vekselvirker med andre kompakte objekter, ikke vil udsende tyngdebølger. Det er ikke helt umuligt, at sammensmeltende sorte huller vil give anledning til udsendelsen af lys (elektromagnetisk stråling) således, at vi kan lokalisere mere præcist, hvor signalet kommer fra. Men det er dog relativt usandsynligt. Derimod målte vi allerede i 2017 elektromagnetisk stråling fra to sammensmeltende neutronstjerner. Det er sandsynligt, at

resultatet af denne begivenhed var dannelsen af et sort hul. I 2019 har man detekteret tyngdebølger fra sorte huller, der smelter sammen med neutronstjerner. Jagten går nu ind på at detektere lys fra sammensmeltningen af et sort hul og en neutronstjerne.

Samtidig arbejder man på at forstå, hvordan disse sorte huller overhovedet dannes. De fleste havde ikke forventet eksistensen af sorte huller med masser mellem 10 og 35 gange Solens masse. Faktisk har det endda været foreslået, at sådanne sorte huller måske kan udgøre det mørke stof i universet. Mørkt – eller snarere usynligt – stof udgør omkring 6 gange så meget masse i universet som normalt stof (normalt stof består



af protoner og neutroner, der er bestanddelene af atomkerner). Som astrofysiker Jonatan Selsing formulerede det i efteråret 2017:

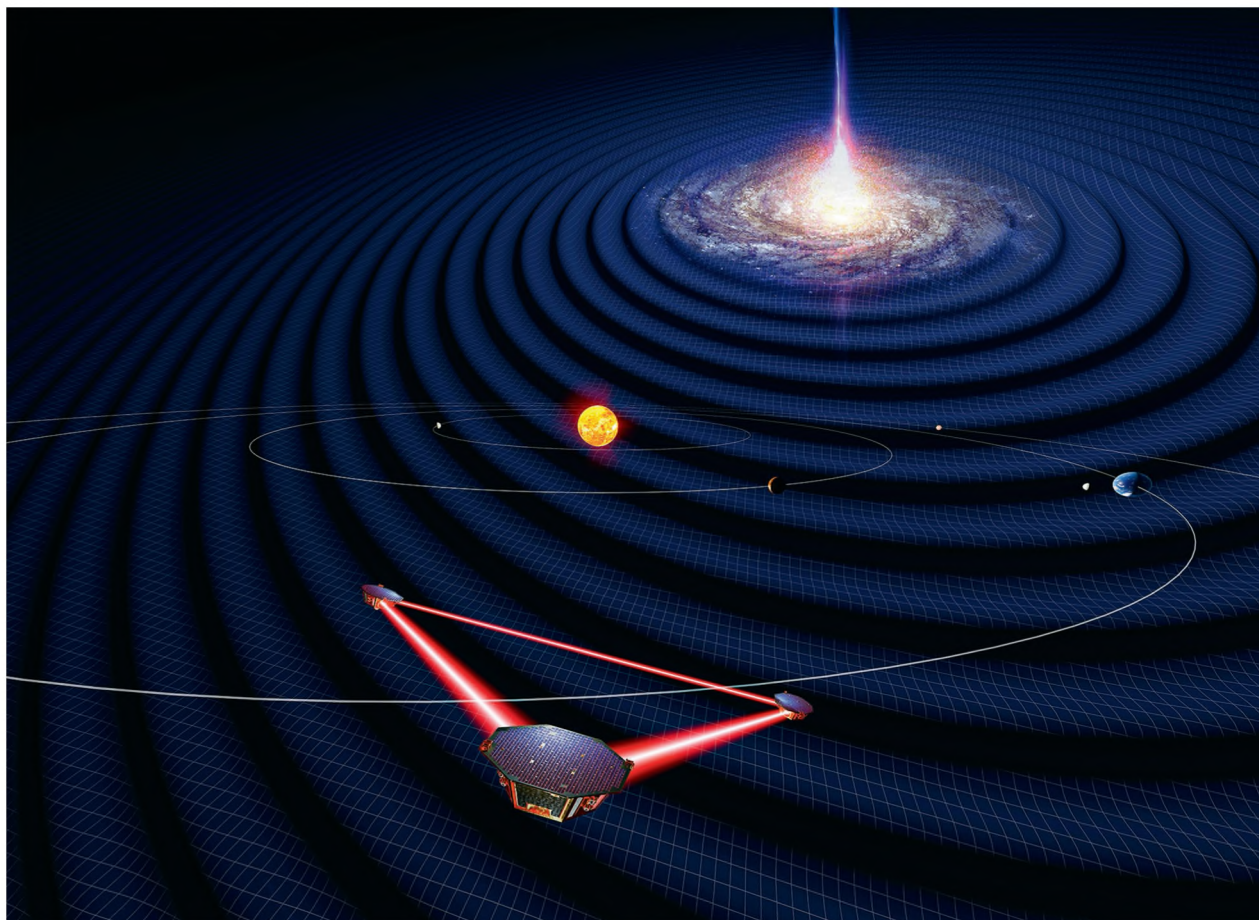
Vi har fået en ny sans, så vi nu også kan opfatte tyngdeverdenen. Nu kan vi både se og høre universet, så at sige. Forestil dig, at du er ude og gå en tur i skoven. Du hører noget pusle i skovbunden, og så ved du omtrent, hvor du skal kigge efter et dyr. Med lidt held får du øje på det. Sådan er det nu blevet i astronomien, fordi vi med tyngdebølgedetektorerne kan 'lytte' til universet og finde ud af, hvor vi skal kigge nærmere efter (DARK 2017).

Flere tyngdebølgedetektorer er under konstruktion, og de vil alle indgå i et fælles, jordomspændende netværk sammen med LIGO og Virgo. De vil give mulighed for at se sorte huller endnu længere væk, detektere sorte huller med lavere masse, se sammensmeltninger med forskellige typer af kompakte objekter og evt. detektere bølger fra andre typer af begivenheder. Desuden vil disse målinger give ny viden om sorte hullers fysik og teste Einsteins teori yderligere.

Med mere og mere præcise målinger vil vi måske engang se afvigelse fra denne.

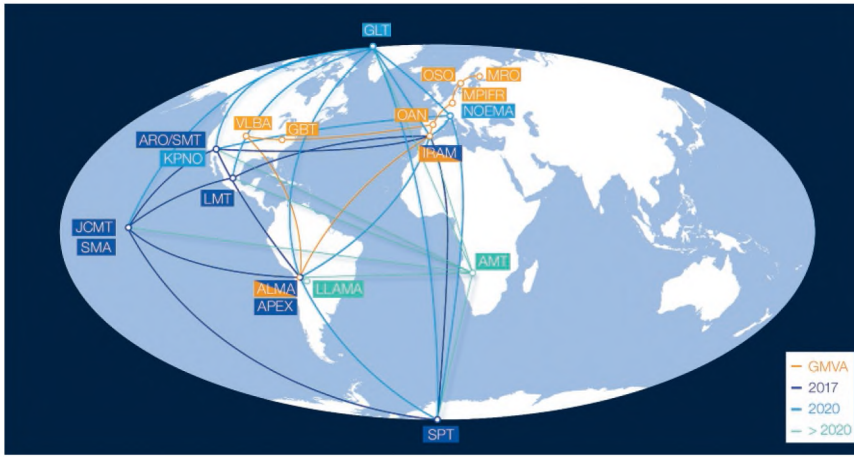
På endnu længere sigt planlægger den europæiske rumfartsorganisation ESA at opsende et interferometer i rummet, Laser Interferometer Space Antenna, bestående af 3 fritsvævende spejle (figur 9).

Princippet i konstruktionen er lidt som LIGO, bortset fra at afstanden mellem spejlene vil være ca. en million kilometer, ikke 4 kilometer som for LIGO. Man vil så kunne detektere sorte huller, som er langt større, dvs. giver anledning til tyngdebølger med langt større bølgelængder. Disse vil komme fra supermassive sorte huller, der smelter sammen, dvs. fra sammenstød mellem galakser. Laser Interferometer Space Antenna vil være følsom nok til at detektere alle sammenstød, der foregår i universet. Den typiske tid for sammensmeltningen af supermassive sorte huller er mange måneder (i modsætning til mindre end et sekund for de sorte huller, LIGO har observeret, jf. figur 7). Vi vil derfor kunne forudsige, hvornår et sammenstød vil ske, så snart vi ser de første signaler fra supermassive sorte huller, der nærmer sig hinanden.



FIGUR 9. Visualisering af Laser Interferometer Space Antenna i rummet. Opsendelsen er p.t. planlagt til 2034. Efter [facebook.com/LISAccommunity/photos/a.432956053447328/1587934831282772/?type=1&theater](https://facebook.com/LISAccommunity/photos/a.432956053447328/1587934831282772/?type=1&theater)





## Et billede af et sort hul

Hvad mere kan man ønske sig end den direkte observation af tyngdebølger, som beviser eksistensen af sorte huller? Hvad med at tage et 'billede' af et sort hul?

Som nævnt udsender et sort hul ikke lys, og man kan ikke tage et billede af ingenting. Men det sorte hul vil 'skygge' for lys, der måtte være udsendt bag ved det sorte hul. Desuden vil lys, der passerer tæt forbi det sorte hul, blive kraftigt forvrænget, fordi rumtiden omkring det sorte hul er krummet, nærmest til uken-delighed.

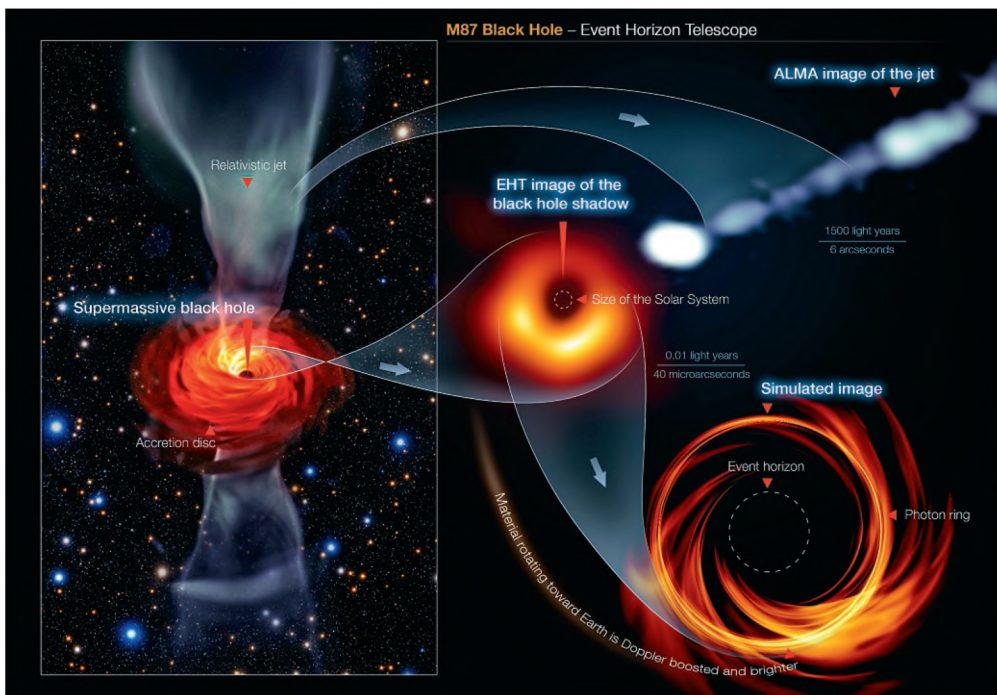
Men Schwarzschild radius er jo som omtalt lille. Så hvis vi skal have chancen for at observere en tilstrækkelig stor skygge, skal vi rette blikket mod et supermassivt sort hul, idet en høj masse vil give en stor Schwarzschild radius (og dermed areal af skyggen).

FIGUR 10. Illustration af placeringen af radiotelesko-perne, der tilsammen udgør Event Horizon Telescope (Goddi et al. 2019). Med blå og grønt vises fremtidige teleskoper, der kan tilsluttes til Event Horizon Telescope, inkl. Greenland Telescope (GLT). [eso.org/public/products/messengers/messenger\\_0177/](https://eso.org/public/products/messengers/messenger_0177/).

Desuden skal vi se på et sort hul, som ligger så tæt på os som muligt, da ting ser mindre ud, når de ligger langt væk. Der er ikke mange kandidater, som opfylder disse betingelser. De bedste er det sorte hul i Mælkevejen (som er relativt tæt på, men kun vejer i omegnen af et par millioner solmasser, jf. figur 4) og det sorte hul i centrum af den centrale galakse i Virgohoben, Messier 87 (som ligger 2000 gange længere væk end Sagitarius A\*, men som til gengæld vejer noget mere end en milliard solmasser, jf. figur 3).

Det er netop disse sorte huller, som er observeret samtidigt af en række radioteleskoper, der er placeret rundt på Jorden med henblik på anden astronomisk forskning (figur 10). Tilsammen er de blevet brugt til at tage en slags billede af centrum af de to galakser ved hjælp af interferometri. Eksperimentet, der blev omtalt s. 43, kaldes Event Horizon Telescope, fordi de mange separate antenner tilsammen kan bruges som et slags teleskop til at tage et billede af skyggen, der fremkaldes af begivenhedshorisonten.

Figur 11 viser billedet af det sorte hul i Messier 87 (Akiyama et al. 2019). Strengt taget er det den computer-rekonstruktion, som passer bedst med de data, der er



FIGUR 11. Billede af skyggen af det sorte hul i centrum af Messier 87, som blev taget af Event Horizon Telescope (EHT) i 2019 (i midten). Nederst til højre ses et simuleret billede af, hvordan man forventer, billedet ville se ud ved meget høj opløsning. Øverst til højre ses jetten, som også er vist på figur 4. Til venstre vises en model af, hvordan målingerne kan fortolkes. Efter [eso.org/public/products/messengers/messenger\\_0177/](https://eso.org/public/products/messengers/messenger_0177/).



blevet optaget. Hvad viser det? Et sort hul er som bekendt en singularitet – det har ingen udstrækning. Men vi bruger begivenhedshorisonten, Schwarzschild radius, som de facto størrelsen af det sorte hul. Alt lys bagved denne horisont kan vi ikke se. Det svarer lidt til en solformørkelse: Vi ser ikke lyset fra Solen, hvis det ligger bag Månen. Men her er det en smule mere kompliceret, og analogien er ikke perfekt, for under en solformørkelse ser vi lys fra Solen, som lige netop ikke er dækket af Månen. Det er ikke tilfældet med det sorte hul. Det lys, som vi ville forvente at se komme forbi lige uden for Schwarzschild radius, bliver afbøjet pga. rummets krumning, og man skal derfor et stykke længere væk fra Schwarzschild radius for at se lys bagved det sorte hul. Det er det, billedet (i midten af figur 11) viser. Til sammenligning vises, hvordan det muligvis ville se ud, hvis man havde en langt bedre opløsning, dvs. sådan som vi tror, det virkeligt ser ud.

Hvad er så det lys (mere præcist: den radiostråling), vi ser? Det er lys, der er udsendt fra det materiale, som er på vej til at falde ned på det sorte hul. Af billedet kan vi lære, hvordan den proces foregår meget tæt på det sorte hul.

Som nævnt er Schwarzschild radius et direkte mål for massen af det sorte hul. Det samme gælder størrelsen (diameteren) af skyggen. Med andre ord er billedet en meget præcis måling af det sorte huls masse. Man har tidligere haft en nogenlunde præcis ide om, hvad massen er, baseret på andre astronomiske metoder. Dette billede bekræfter fuldt ud disse tidligere estimater: Massen af det sorte hul i Messier 87 (M87\*) er 6,5 milliarder gange Solens masse.

Vi forventer, at nye resultater snart vil give et direkte billede af skyggen fra det sorte hul i Mælkevejens centrum og også en præcis bestemmelse af dets masse. Det bliver spændende at se, om det passer med de meget præcise målinger, vi har fra stjerners bevægelse omkring dette sorte hul. Og om der er materiale omkring det sorte hul, som vil give anledning til udsendelse af radiostråling.

I 1960'erne og 1970'erne diskuterede man stadig, om sorte huller eksisterede, eller om de var matematiske kuriositeter. De fleste var skeptiske. Siden da er det blevet en accepteret fortolkning af astronomiske data. Men det er kun med målingerne af stjerners bevægelse omkring Sagitarius A\*, tyngdebølgerne fra sammensmeltende sorte huller og det direkte billede af M87\*, at vi nu kan sige, at vi har bevist eksistensen af sorte huller observationelt.

## Et teleskop i Grønland

Der er som nævnt kun to supermassive sorte huller, vi realistisk kan tage gode 'billeder' af fra Jorden: de sorte huller i Messier 87 (M87\*) og i centrum af Mælkevejen (Sagitarius A\*). Vi kan derfor ikke forvente at få billeder af mange andre sorte huller. Men vi kan håbe på at få endnu skarpere billeder af de to, og vi vil kunne studere, hvordan lyset omkring dem – og dermed de fysiske begivenheder lige omkring de sorte huller – udvikler sig med tiden. Men hvordan får vi skarpere billeder? Vi har to muligheder.

For det første kan man bruge et større 'Event Horizon Telescope'. Størrelsen er begrænset af Jordens diameter, men for tiden dækker antennerne ikke de yderste punkter på Jorden. Med andre ord skal vi have placeret en antenne et fjernt sted, hvor der ikke allerede står en.

For det andet kan man observere ved en højere frekvens (lavere bølgelængde). Et teleskops opløsning, dvs. dets evne til at se detaljer, afhænger af den bølgelængde, der observeres ved. Jo højere frekvens, des bedre opløsning og dermed des skarpere billeder kan man opnå. Men det er ikke helt nemt at observere ved højere frekvens, for den type stråling absorberes desværre i Jordens atmosfære. Den effekt kan man minimere ved at observere fra et sted langt over havets overflade og et sted, som er tørt, uden ret megen vanddamp i atmosfæren.

Så vi skal finde et sted, der ligger højt, er tørt og langt væk fra andre steder, man har placeret antenner. Og endelig skal vi finde et sted, hvor det er logistisk muligt at placere en stor, højteknologisk antenne. Der er kun ét sted, der opfylder disse betingelser – Grønland, nærmere bestemt midten af Indlandsisen.

Danske astronomer, under ledelse af bl.a. Marianne Vestergaard, har derfor besluttet at samarbejde for at få placeret en antenne – Greenland Telescope – på Summit i 3200 meters høje (figur 12). Det internationale teleskop-team har allerede et samarbejde med Dorthe Dahl Jensen og Jørgen Peder Steffensen, der er topforskere i iskerneboringer, som kan gøre os klogere på Jordens klima tilbage i tiden. Planen er at flytte antennen fra Thule Airbase til Summit i løbet af de kommende år. Drømmen er at kunne tage billeder, der nærmer sig opløsningen af det simulerede billede på figur 11.





FIGUR 12. Greenland Telescope (GLT), p.t. placeret på Thule Air-base. Planen er at flytte det til Summit (markeret med en blå stjerne på kortet over Grønland til venstre) inden for få år (se også figur 10, der viser placeringen af GLT som en del af Event Horizon Telescope netværket).

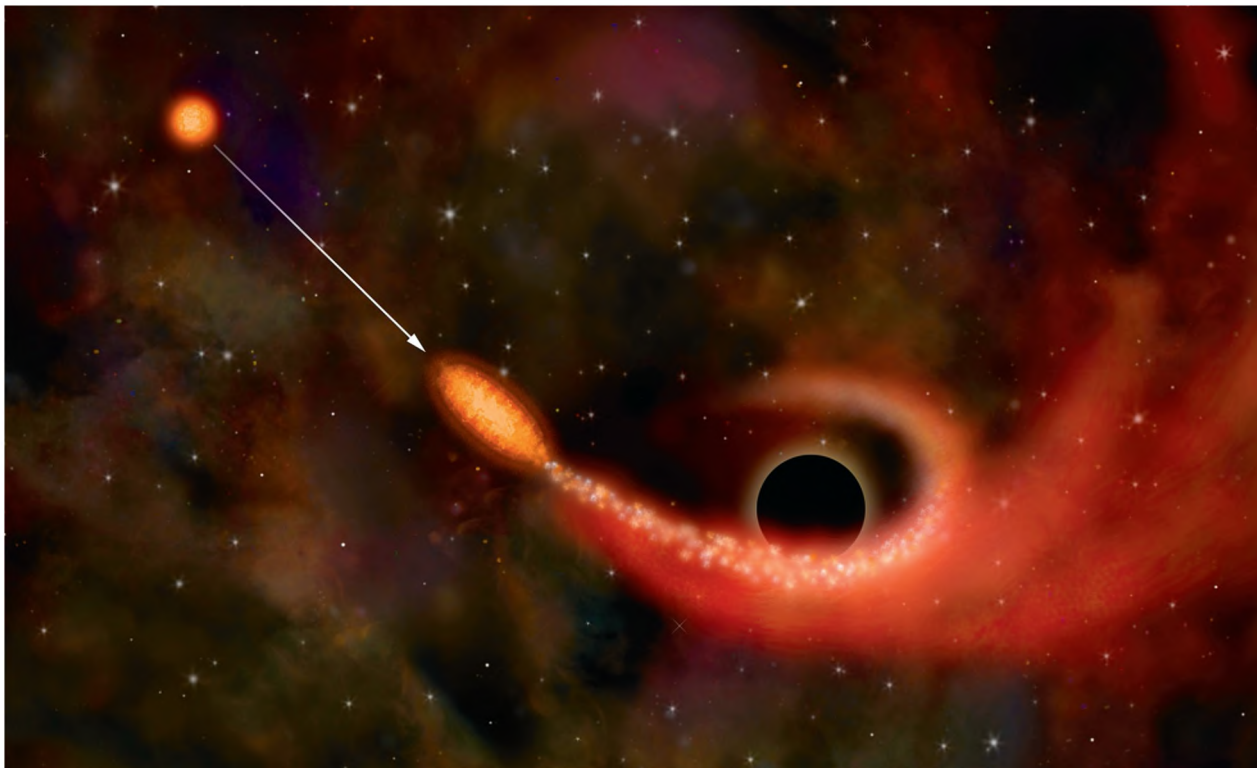
### Andre typer sorte huller

Et sort hul er som nævnt ret simpelt: Det kan karakteriseres ved dets masse, spin og ladning. Og massen er langt den vigtigste parameter. Vi har introduceret de to kendte typer: sorte huller, der vejer omkring 3-30 gange solens masse, og de supermassive sorte huller, der vejer 1 million-10 milliarder gange solens masse. Men der er intet til hinder for, at et sort hul kan have en hvilken som helst masse.

Det er oplagt at forestille sig, at der kunne eksistere sorte huller med noget mindre masser end en million gange solens masse. I sidste ende skal disse supermassive sorte huller jo vokse sig store gennem universets historie ved at 'spise' af deres omgivelser. Det er derfor forventeligt, at man også kan finde sorte huller, der endnu ikke er blevet så tunge. Problemet er, at den slags sorte huller ikke udsender så meget lys, når materiale falder ned på dem, og de er derfor ikke nemme at finde.

En ny lovende metode er at se på effekten af, at en enkelt stjerne nærmer sig et sort hul, hvorved en del af stjernen bliver spist, mens den anden del undslipper og slynges tilbage gennem tidevandskræfter (figur 13). Sådanne begivenheder kan bruges til at finde sorte huller, der ellers ikke er 'aktive'. Selv om dette fænomen er yderst sjældent, er det inden for de seneste år lykkedes at finde flere af denne type 'tidal disruption events', der detekteres som kraftigt varierende røntgen, ultraviolet og optisk lys. Det interessante er, at materiale kun kan undslippe, hvis det sorte hul ikke er for tungt, så på den måde er det lykkedes at finde sorte huller, der vejer mindre end en million solmasser. Håbet er at opdage endnu mindre sorte huller og i sidste ende få at vide, om der findes såkaldte 'inter-





FIGUR 13. Visualisering af dannelsen af et 'tidal disruption event'. Stjernen bliver strakt ud og rives i stykker, når den kommer for tæt på det sorte hul. Der udsendes karakteristisk stråling, som giver information om massen af det sorte hul. Efter [aasnova.org/2019/09/30/when-black-holes-shred-sun-like-stars/](https://aasnova.org/2019/09/30/when-black-holes-shred-sun-like-stars/).

mediate mass black holes', der blot vejer 1000–10000 gange solens masse.

En interessant hypotese er, at universets mørke (usynlige) stof kunne udgøres af sorte huller, der blev dannet kort efter Big Bang. Stephen Hawking har foreslået, at sådanne sorte huller kan have masser på så lidt som  $10^{-8}$  kg (så der skal være mange af dem for at udgøre det mørke stof). For nylig har japanske forskere ved hjælp af Subaru-teleskopet på Hawaii imidlertid udelukket den hypotese (Niikura et al. 2019). Det betyder ikke, at sådanne mini sorte huller ikke kan eksistere, men der er altså ikke nok af dem til at udgøre det mørke stof og dermed løse det mysterium.

### Afsluttende bemærkninger

Sorte huller gik hurtigt fra at være et matematisk kuriosum til at være vigtige astronomiske objekter i 1960'erne og frem. I de seneste par år har vi fået direkte evidens for eksistensen af sorte huller gennem detektion af tyngdebølger og med det første direkte billede af den 'skygge', et sort hul kaster på sin baggrund.

Der er ingen tvivl om, at tyngdebølgedetektorer fremover vil lære os meget mere om sorte huller. Er de

virkelig så simple, at de kan karakteriseres ved en begivenhedshorisont bestemt af masse, spin og ladning? Eller kan man forestille sig, at Einsteins teori ikke er komplet, og at vi vil opdage nye fysiske lov-mæssigheder som følge af nye observationer?

Og hvad med det sorte hul i Mælkevejens centrum? Resultaterne er i skrivende stund endnu ikke publiceret. Skal vi forvente overraskelser? Og vil vi med Greenland Telescope lære mere om, hvad der foregår omkring det sorte hul i Messier 87?

Endelig skal det nævnes, at Einsteins teori for sorte huller tilhører den 'klassiske' fysik i den forstand, at det ikke er en kvantemekanisk teori. Men ligesom med kvantemekanikken er der mange interessante konceptuelle spørgsmål vedrørende sorte huller, som endnu er ubesvarede. Hvad sker der for eksempel med 'information', der måtte ryge ind i et sort hul? Forsvinder den blot (i modstrid med kvantemekanikken), eller hvordan skal vi forene de to teorier? Og kan studiet af sorte huller lære os mere om, hvad der skete ved Big Bang?

Sorte huller fortsætter med at fascinere. Selv om sorte huller suger al gas og lys til sig, er det paradoksalt nok også sorte huller, som kan oplyse os og berige videnskaben om den forunderlige og skønne verden, vi lever i.



## Tak

Min forskning er støttet af VILLUM FONDEN og Carlsbergfondet, som jeg gerne vil takke her. Tak også for nyttige diskussioner og kommentarer til Cecilie Hede, Christa Gall, Dorthe Dahl Jensen, Jo Verwohlt Damm, Lars Hjorth, Marianne Vestergaard, Marie-Louise Nosch, Morten Valner S. Grymer-Hansen, Niels Obers, Radek Wojtak og Sandra Raimundo.

## Litteratur

- Abbott, B.P. et al. 2016: »Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger«, i: *Phys. Rev. Lett.* 116, 061102 .
- Akiyama, K. et al. 2019: »First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole«, i: *Astrophys. J. (Letters)* 875, L1.
- Bolton, C.T. 1972: »Identification of Cygnus X-1 with HDE 226868«, i: *Nature* 235, 271.
- DARK 2017: <https://dark.nbi.ku.dk/news/2017/astronomerne-har-faaet-en-ekstra-sans/>
- Do, Thuan et al. 2019: »Relativistic redshift of the star S0-2 orbiting the Galactic Center supermassive black hole«, i: *Science* 365, 664.
- Einstein, Albert 1916: »Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie«, i: *Ann. Phys.* 49, 769.
- Finkelstein, David 1958: »Past-Future Asymmetry of the Gravitational Field of a Point Particle«, i: *Phys. Rev.* 110, 965.
- Goddi, C. et al. 2019: »First M87 Event Horizon Telescope Results and the Role of ALMA«, i: *Messenger* 177, 25.
- Hawking, S.W. 1974: »Black hole explosions?«, i: *Nature* 248, 30.
- Hewish, A., S.J. Bell, J.D.H. Pilkinton, P.F. Scott & R.A. Collins 1968: »Observations of a rapidly pulsating radio source«, i: *Nature* 217, 709.
- Hjorth, Jens et al. 2003: »A very energetic supernova associated with the -ray burst of 29 March 2003«, i: *Nature* 423, 847.
- Københavns Universitet 2019: KU nyhedshistorie [https://nyheder.ku.dk/alle\\_nyheder/2019/03/katastrofen-der-forsvandt/](https://nyheder.ku.dk/alle_nyheder/2019/03/katastrofen-der-forsvandt/)
- Murdin, Paul & Louise B. Webster 1971: »Optical identification of Cygnus X-1«, i: *Nature* 233, 110.
- Niikura, Hiroko et al. 2019: »Microlensing constraints on primordial black holes with Subaru/HSC Andromeda observations«, i: *Nature Astronomy* 3, 524.
- Poulsen, Frederik 2019: *The Black Hole in Isaiah: A Study of Exile as a Literary Theme*. Tübingen: Mohr Siebeck.
- Schmidt, M. 1963: »3C 273: A Star-Like Object with Large Red-Shift«, i: *Nature* 197, 1040.
- Schwarzschild, K. 1916: »Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie«, i: *Sitzungsberichte der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Klasse für Mathematik, Physik, und Technik*, s. 189.
- Schwarzschild, K. 1916: »Über das Gravitationsfeld einer Kugel aus inkompressibler Flüssigkeit nach der Einsteinschen Theorie«, i: *Sitzungsberichte der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Klasse für Mathematik, Physik, und Technik*, s. 424.
- Sonne, Frederik Guy Hoff 2019: »Sorte huller: Her er alt, du skal vide«, <https://videnskab.dk/naturvidenskab/sorte-huller>.
- Uddannelses- og Forskningsministeriet 2015: »Den danske kodeks for integritet i forskning«, <https://ufm.dk/publikationer/2015/den-danske-kodeks-for-integritet-i-forskning>.
- Vestergaard, Marianne 2016: »Tunge sorte huller - hvad kan de bruges til?«, i: *Kvant* 3, 1.
- Vestergaard, Marianne, Troels Harmark & Niels A. Obers 2017: »Tyngdebølger«, i: *Aktuel Naturvidenskab* 6, 24.
- Webster, Louise B. & Paul Murdin 1972: »Cygnus X-1 - a spectroscopic binary with a heavy companion?«, i: *Nature* 235, 37.