

TYNGDEBØLGER

Om forfatterne



Marianne Vestergaard er astrofysiker med speciel forskningsinteresse i kvasarer og deres tunge sorte huller i centret af fjerne galakser. mvester@nbi.ku.dk



Troels Harmark og



Niels Obers er teoretisk fysiker med speciale i sorte huller, relativitetsteori, holografiske dualiteter og superstreng-teori.

De er alle ansat ved Niels Bohr Institutet på Københavns Universitet og deres forskning støttes af to separate bevilninger fra Danmarks Frie Forskningsfond | Natur og Univers.

Kun to år og fire spændende målinger efter man første gang kunne bekræfte eksistensen af det fysiske fænomen kaldet tyngdebølger, står det klart, at tyngdebølger tilbyder et helt nyt og enestående værktøj til at udforske og bedre forstå vores forunderlige verden.

Både som teoretisk konsekvens af Einsteins ligninger og som eksperimentelt felt har tyngdebølger haft en svær barndom. Det var først 30 år efter Einsteins oprindelige ide fra 1918, at der var enighed om, at tyngdebølger er en del af Einsteins relativitetsteori. Derefter skulle der gå yderligere 70 år, før målingen af tyngdebølger gik fra at være en fiks ide i hovedet på nogle få urokkelige idealister, til at man prøvede at bygge måleinstrumenter, og til at man endelig detekterede dem første gang i 2015. Eksperimentet "Advanced LIGO" (aLIGO), som målte tyngdebølgerne i 2015, tog det hele 40 år at udvikle og bygge. Eksperimentets succes gav i år anledning til en Nobelpris i fysik til dens tre primære drivkræfter: Rainer Weiss fra Mas-

sachusetts Institute of Technology, Barry Barish og Kip Thorne, begge fra California Institute of Technology. Alt dette har kulmineret i fire målinger af tyngdebølger fra kolliderende sorte huller, samt den nylige observation af to kolliderende neutronstjerner med aLIGO og dets "søsterekperiment" VIRGO i Pisa, Italien. Detektion og målinger af tyngdebølger fra sammenstød af den slags kompakte objekter åbner en hel ny verden for forskerne.

Tyngdebølger

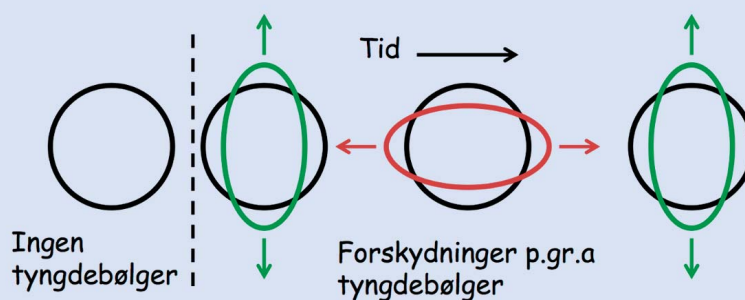
Før Einsteins relativitetsteori blev fremsat i 1915 mente forskerne, at man fuldt ud forstod, hvad rum og tid var, og at der ikke var noget nyt at lære. Einsteins relativitetsteori ændrede dette fuldstændigt. Ifølge relativitetsteorien er tiden og de tre rumlige retninger (læng-

de, højde og bredde) forenet i en fire-dimensional geometri, som kaldes for rumtiden. Rumtiden kan bøjes og krummes, og der kan udbredes bølger i rumtiden. Det, vi oplever som tyngdekraften, er i virkeligheden forårsaget af, at rumtiden krummes på grund af tilstedeværelsen af et tungt objekt. Så tyngdekraften er et udtryk for rumtidens geometri – eller med andre ord, hvor meget rumtiden krummer.

Legemer i hvile krummer rumtiden, fordi de har en masse. Når sådanne legemer accelereres i rumtiden sker der det interessante, at der opstår tyngdebølger. Disse er krumninger i rumtiden, som bevæger sig væk fra kilden (det accelererende legeme), på samme måde som bølger på vandover-

Illustration af to sorte huller i hurtig banebevægelse om deres fælles tyngdepunkt. Accelerationen i banebevægelsen skaber tyngdebølger, der bevæger sig væk fra de to sorte huller med lysets hastighed. At tyngdebølgerne forvrænger rumtiden er illustreret ved forvrængningen af de grønne tern på den blå baggrund. Energien til tyngdebølgerne kommer fra banebevægelsen: De to sorte huller mister bevægelsesenergi, hvilket bringer dem tættere og tættere på hinanden, hvor de til sidst kolliderer. I kollisionen forvrænges rumtiden voldsomt, amplituden i tyngdebølgen når sit maksimum, hvorefter det nye sorte hul stabiliserer sig.

Illustration: R. Hurt/Caltech-JPL



Virkning af en tyngdebølge

Forestil dig, at en tyngdebølge passerer gennem København og kommer direkte ovenfra. Set ovenfra er omridset af Rundetårn en cirkel. Når bølgen passerer, trykkes tårnet en smule ovalt i én retning: Cirklen bliver længere end cirkelens oprindelige omkreds i den ene retning (grøn cirkel) og kortere i den anden retning vinkelret derpå. Dernæst sker det modsatte, så tårnet (cirklen) trykkes oval i den anden retning (rød cirkel), vinkelret på den første. Cirklen bølger derefter frem og tilbage mellem de to ovaler som illustreret.

Tyngdebølger gør altså, at punkter på cirklen (eller ydermuren af Rundetårn) forskydes en lille smule i forhold til, hvor de var, før bølgen passerede. Det specielle er dog, at det egentlig ikke er selve Rundetårn, der forvrænges: Det er rummet selv, der forvrænges.

Man kan opfatte forskellen således: Når vandoverfladen bølger på et vandløb, ser vi et forvrænget *billede* af bunden af vandløbet, når bølgen passerer. Hvis vandbølger var tyngdebølger, ville vi ikke kun se et forvrænget billede, men selve vandløbsbunden ville blive forvrænget!

fladen bevæger sig væk fra din hånd, hvis du bryder en blikstille vandoverflade med hånden. Dog udbreder tyngdebølger sig med lysets hastighed igennem universet. Alle legemer med masse danner tyngdebølger – selv du, når du ændrer din løbehastighed i parken for undgå andre motionister. Dog er de forskydninger, der opstår, utroligt små. Det er kun *meget* tunge og kompakte objekter som sorte huller og neutronstjerner, der kan skabe tilstrækkeligt kraftige tyngdebølger til, at de er målbare. Det sker for eksempel, når de er i kredsløb om hinanden, idet de accelereres i banebevægelsen. Jo større accelerationen er, og jo tungere og mere kompakte objekterne er, jo kraftigere er tyngdebølgerne. Selv da er forskydningerne på en brøkdel (cirka $1/10.000$)

af udstrækningen af kernen i et brintatom, så det kræver meget fintfølende instrumenter at måle disse bittesmå forskydninger.

Hvordan sker disse forskydninger så? Lad os først se på bølgerne, der opstår, når du kaster en sten i en sø. Disse krumninger på vandoverfladen får ethvert punkt på overfladen til at hoppe lodret op og ned. Forskydningerne foregår her i blot én retning, vinkelret på bølgens bevægelsesretning væk fra stenens nedslagspunkt. Tyngdebølger er anderledes, idet de skaber forskydninger samtidigt i to retninger, vinkelret på hinanden, for eksempel lodret og vandret, og igen vinkelret på udbredelsesretningen. De er dog unikke, idet de ikke flytter på *positionen* af (vand- eller luft-) partikler i rummet,

ligesom vand- og lydbølger gør. Derimod flytter tyngdebølger *rummet selv*, når de passerer igennem selvsamme rum (se boks). Det faktum, at tyngdebølger forårsager forskydninger i rummet i to retninger vinkelret på hinanden, gør, at vi kan måle dem.

Sådan virker tyngdebølge-detektorerne

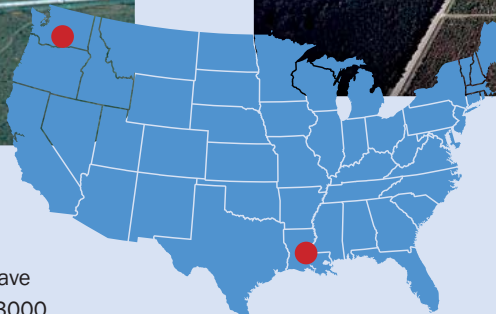
Detektorerne i eksperimentet Advanced LIGO (aLIGO) i USA udnytter en speciel egenskab ved lysbølger til at måle de bittesmå rumlige forskydninger, nemlig evnen til at skabe konstruktiv og destruktiv interferens. En laserstråle sendes til et spejl, som deler lyset i to. Derefter sendes hver lysstråle ud i hver deres 4 km lange arm, som står vinkelret på hinanden. Lyset reflekteres af et spejl for enden af



aLIGO, Hanford



aLIGO, Livingston



VIRGO, Pisa

Observatorierne aLIGO og VIRGO

Observatoriet Advanced Laser Interferometry Gravitational wave Observatory (aLIGO) består af to "teleskoper" placeret cirka 3000 km fra hinanden i Livingston i Louisiana og Hanford i Washington State, USA. Installationerne er ens, blot drejet i forhold til hinanden. Det gør, at forskerne nemmere kan filtrere de rigtige tyngdebølgesignaler fra støj. Hver af teleskoperne består af to 4 km lange arme, der står vinkelret på hinanden. De lange arme er nødvendige for, at man kan detektere de bittesmå forskydninger, som blot udgør en lille brøkdel af et atom. aLIGO er faktisk så nøjagtig, at den kan detektere forskydninger på helt ned til ca. $1/10.000$ af kernen i et brintatom, svarende til 10^{-19} meter. Det er cirka 10 gange mindre end de forskydninger, man målte i september 2015. aLIGO har været i brug siden 2015, og i august 2017 blev VIRGO i Pisa, Italien taget i brug (nederst).

VIRGO er bygget som aLIGO, blot med 3 km lange arme, i et samarbejde mellem Italien og Frankrig og en del andre medlemslande. De kortere arme gør, at signalet er svagere, men VIRGO har afgørende betydning for at bestemme, hvor signalet kommer fra i universet, idet der er brug for minimum to og helst flere detektorer til det formål.

Fotos: LIGO collaboration og VIRGO Collaboration.

armen og sendes direkte tilbage, hvorfra det kom. Når lysstrålerne mødes, samles de og rammer en detektor, som registrerer resultatet af lysbølgernes interferens. Afhængig af den reelle afstand, som lysstrålerne har tilbagelagt, vil det samlede lys skabe konstruktiv eller destruktiv interferens på detektoren, der registrerer laserlyset.

Når en tyngdebølge passerer observatoriet, vil armenes længder forskydes i forhold til hinanden, først i den ene retning, dernæst i den anden retning. Forskydningerne gør, at laserlysdetektoren ser effekten af tyngdebølgerne som

ændringer i laserlysets styrke: Lyset forsvinder og kommer igen.

Jo kraftigere laserlys, man sender igennem de lange arme, jo mere præcist kan man måle positionen af spejlene for enden af armene via de bittesmå forskydninger i lysets bølgetoppe og dale. Der er dog en grænse for, hvor godt det kan gøres, fordi den større mængde lyskvanter afsætter lidt energi i spejlene og skubber til dem på en usystematisk og uforudsigelig måde, så man ikke kan korrigere for effekten. Forskere ved kvante-optik laboratoriet på Niels Bohr Institutet i København er i samar-

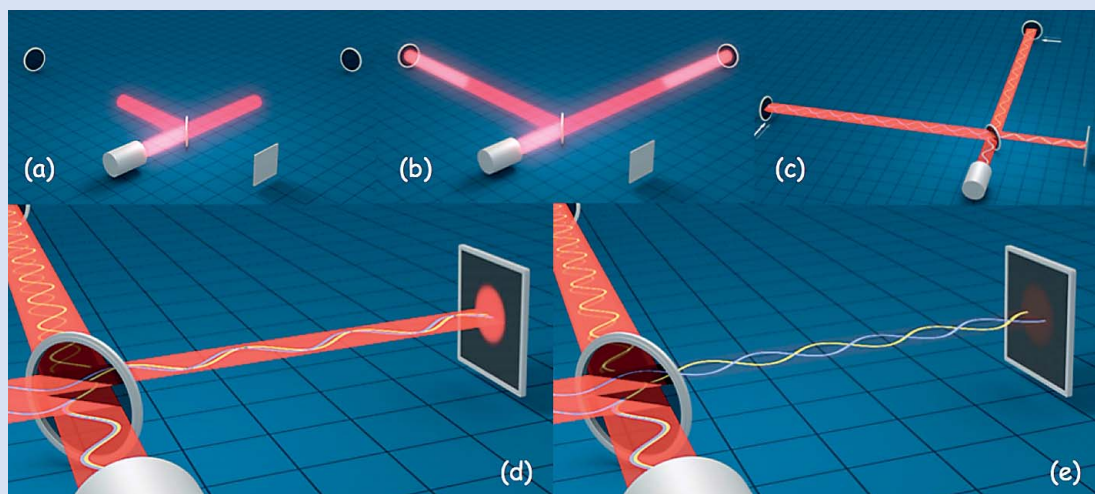
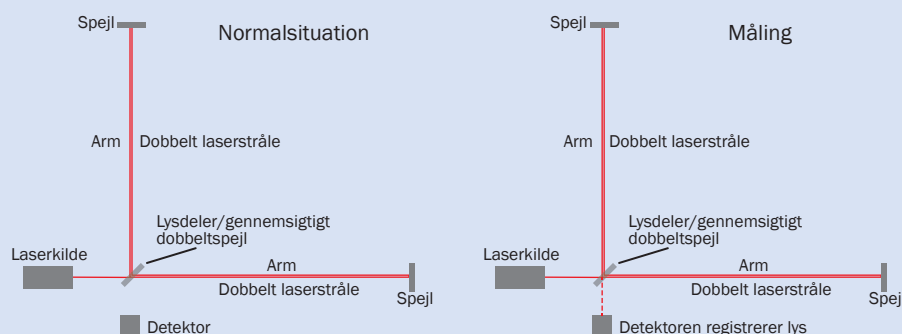
bejde med Dansk Institut for Fundamental Metrologi ved at undersøge lovende metoder til at omgå denne begrænsning, som, hvis det lykkes, kan gøre teleskopet så følsomt, at man forventer at kunne måle tyngdebølger fra et ti gange større volumen i universet.

Et epokegørende gennembrud

Den første detektion og måling af tyngdebølger skete kort efter den nyligt opgraderede aLIGO blev startet, nemlig den 14. september 2015. De svingninger, man målte og offentliggjorde i februar 2016, kom fra et sammenstød mellem to sorte huller cirka 1,3 milliarder

Måling af tyngdebølger

Principskitse:
I normalsituationen er laserlyset ude af fase og der kommer ikke noget lys til detektor. Ved måling af tyngdebølger kommer laserlyset i fase og der stømmer lys til detektoren.



Figuren er skabt af forfatterne på baggrund af en animation publiceret af LIGO-VIRGO samarbejdet.

Når tyngdebølger passerer aLIGO og VIRGO vil de to vinkelrette arme ikke længere være lige lange. Armene strækkes og komprimeres i forhold til hinanden. Dette afsløres på følgende måde (a) Laserlys sendes til spejlet som deler lyset og sender det ind i hver sin arm, vinkelret på hinanden. (b) Lyset reflekteres af et andet spejl for enden af armen. (c) Lyset samles igen og sendes mod detektoren helt til højre i figuren. (d) Når lyset fra de to arme er i fase, registrerer detektoren til højre i diagrammet et forstærket signal (konstruktiv interferens).

(e) Når lyset fra armene er ude af fase, svækkes eller udslukkes signalet helt (destruktiv interferens). Afstanden, som lyset tilbagelægger, afgør om de to delte lysstråler er i fase, når de samles igen. Uden påvirkning af tyngdebølger er lyset ude af fase (som i panel e). Når tyngdebølger strækker og sammenpresser hver af de to arme, vil afstanden lyset tilbagelægger ikke være ens, og som tyngdebølgerne passerer vil signalet først forstærkes og siden bølge imellem en forstærkning og svækkelse af lyset på detektoren.

lysår fra Jorden. De var begge cirka 30 gange så tunge som Solen og cirka 200 km i diameter og befandt sig i en hurtig dans om hinanden, hvorefter de tørnede sammen i en meget voldsom kollision. Kollisionen skabte et nyt sort hul på 62 solmasser, og en kolossal mængde energi svarende til hvilemassen af 3 sole blev udsendt i form af tyngdebølger op til og under kollisionen. Den energi svarer til lyset fra alle stjerner i universet – og der er flere stjerner end der er sandkorn på alle strande på Jorden.

Disse målinger er helt epokegørende! For første gang havde man

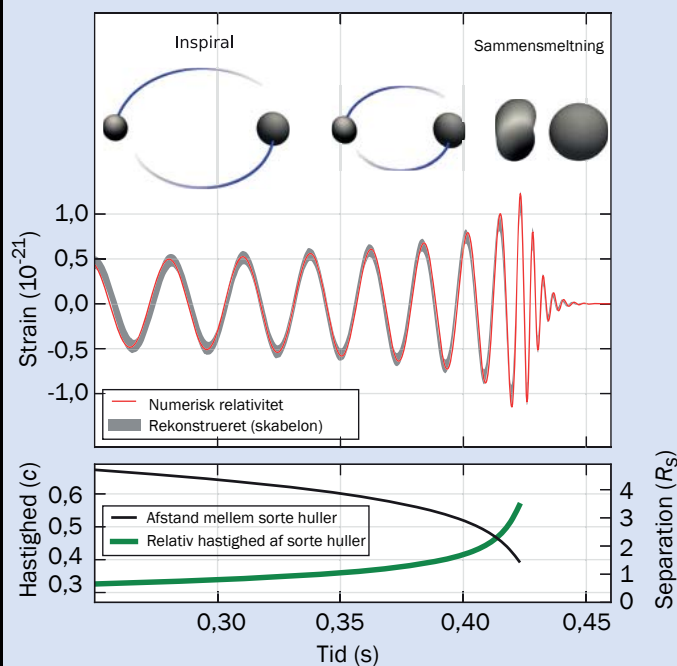
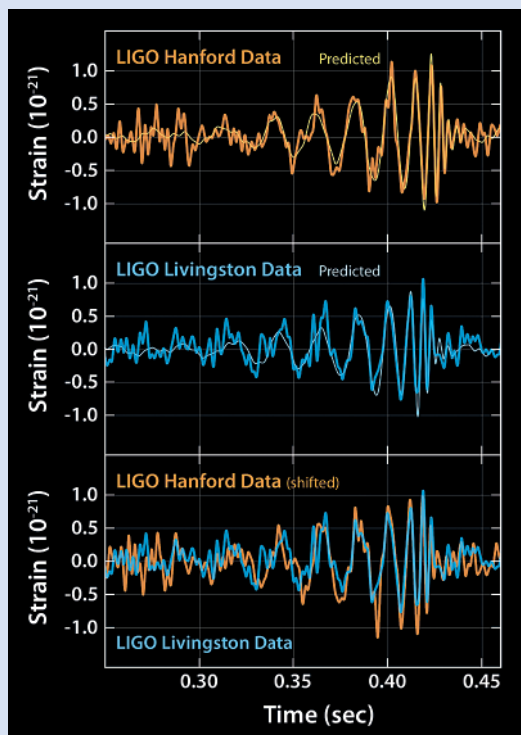
eksperimentelt bevis for, at tyngdebølger er en realitet: Nøjagtigt som Einstein forudså, kan voldsomme begivenheder få rumtiden til at bølge. Opdagelsen har flere vidtrækkende perspektiver, hvilket er årsagen til at den udløste Nobelprisen 2017. Dels viser den endnu en gang, at Einsteins relativitetsteori holder som en beskrivelse af vores verden: Rumtiden eksisterer og opfører sig præcist, som Einstein forudsagde. Og det er ikke blot en *statisk* rumtid, men også en *dynamisk* rumtid, der kan bevæge sig og bølge. Dels giver målingerne faktisk det hidtil bedste bevis for eksistensen af sorte huller.

Einsteins ligninger viser nemlig i store detaljer, hvordan de målte svingninger bør opføre sig, hvis to sorte huller kolliderer, fremfor hvis de kompakte objekter i stedet var for eksempel neutronstjerner eller almindelige stjerner.

Sidst men ikke mindst har forskerne nu en helt ny og anderledes metode, hvormed de kan veje, måle og undersøge universet. Det skyldes, at tyngdebølgerne skabes fysisk anderledes end almindelig stråling, som vi kender fra lys- og radiobølger.

Siden den første måling har man detekteret tre andre sammenstød

De første målinger fra aLIGO



De første målinger med aLIGO fra september 2015. Diagrammerne viser de relative forskydninger (kaldet "strain") i de 4 km lange arme, som svarer til absolutte forskydninger på cirka 10^{-18} meter eller en lille brøkdel af udstrækningen af en brintatomkerne. Til venstre ses de svingninger, der blev målt i de to detektorer over tiden. Selvom de sorte huller har været i banebevægelse om hinanden noget tid, er det først i de allersidste stadier, at hullernes acceleration i banen er stor nok til, at aLIGO kan detektere tyngdebølgerne. Frekvensen stiger som de to sorte huller nærmer sig (afstanden mellem bølgetoppe mindskes) og bevæger sig hurtigere og hurtigere omkring deres fælles tyngdepunkt (se tegningen til højre). Som de sorte huller nærmer sig hinanden

mindskes afstanden imellem dem (separationen, målt i forhold til radius af det sorte hul, kaldet R_s i figuren) og hastigheden stiger. Målingerne viser direkte det fantastiske faktum, at de to legemer til sidst kredser om hinanden med en afstand mellem deres centre på blot 350 km og med en utrolig stor hastighed på mellem 30 % og 50 % af lysets hastighed (1,09 milliard km/t; kaldet c i figuren). Når de to sorte hullers begivenhedshorisonter rammer hinanden, sammensmelter de to legemer, og svingningerne ophører hurtigt. I panelet til venstre er observationerne sammenlignet med forskernes modeller ("predicted", vist med en tynd kurve). Det nederste panel sammenligner direkte målingerne fra de to detektorer. Figur fra B. P. Abbott et al. 2016.

den 26. december 2015, den 4. januar 2017 og den 14. august 2017. Igen var det to tunge sorte huller med masser svarende til 10 – 30 sole, der kolliderede. Disse tre observationer viser, at "små" sorte huller, som dannes, når tunge stjerner dør, kan være ret tunge, faktisk tungere end forskerne forventede. For at skabe så tunge sorte huller, må stjernerne selv være skabt meget tidligt i universet (mindre end 2 milliarder år efter Big Bang) med et lavt indhold af tungere grundstoffer og veje

40 til 100 gange mere end Solen. Hvor hyppige sådanne kollisioner er, fortæller derfor om forholdene i galakserne, hvor stjernerne blev dannet. Observationerne vil også hjælpe til at forstå dannelsen og udviklingen af både stjerner og sorte huller igennem universets historie.

August 2017: Sammenstød af to neutronstjerner

Da man startede eksperimentet VIRGO i Pisa i august 2017 målte man to tyngdebølge-kilder. Den

sidste var speciel, idet man for første gang formåede at detektere et sammenstød mellem to neutronstjerner. Neutronstjerner kan maksimalt veje 3 Sole, så rumtidsforskydningerne er markant mindre end for sorte huller. Men signalet var det kraftigste, der endnu er målt, fordi kilden er relativt tæt på Jorden, nemlig i galaksen NGC 4993 blot 140 millioner lysår herfra. Og det skulle vise sig at blive en stor opdagelse med vidtrækkende konsekvenser. En meget vigtig ting er nemlig, at med både

VIRGO og de to aLIGO-detektorer i brug har forskerne kunne bestemme positionen af kilden langt mere nøjagtigt end hidtil. Det har betydet, at forskerne kunne vende verdens teleskoper (på Jorden og i rummet) mod denne position og se efter et elektromagnetisk signal (altså almindelig stråling). Det nye og utroligt spændende er, at dette dramatiske sammenstød faktisk blev observeret også i almindelig stråling ved forskellige bølgelængder, både ved de højeste energier i gamma-området, røntgen og helt ned til de laveste energier i det infrarøde område.

Mere end 70 rum- og jordbaserede teleskoper og tusinder af forskere verden over deltog i eksperimentet. Det har gjort, at man med sikkerhed nu har kunne sammenkæde fænomenet korte gamma-glimt med kollisioner af neutronstjerner, der indtil nu blot har været en formodning. Blot 1,7 sekunder efter kollisionen blev et gamma-glimt nemlig detekteret med de to højenergi-satellitter *Fermi* og *Integral*.

De mange observationer af elektromagnetiske signaler i timerne og ugerne efter kollisionen, hvor forskerne har kunne følge udviklingen af den kosmiske eksplosion, har gjort, at man også har kunne se, at der sker en opbygning af grundstoffer tungere end jern og mere sjældne grundstoffer som cæsium, tellurium og måske xenon. Det har meget stor betydning, fordi de meget tunge og sjældne grundstoffer, deriblandt guld og platin, ikke kan dannes inde i stjerner som andre grundstoffer. Det kræver helt specielle og derfor sjældne processer. Forskerne har formodet, at de måske kunne dannes i eksplosioner af stjerner (kaldet supernovaer) og i sammenstød af kompakte objekter, men der findes ikke direkte beviser for det.

Nu lader det til, at forskerne var på rette spor. De mange opfølgende analyser af de indsamlede data i månederne fremover vil afsløre, hvilke tungere grundstoffer der kan

Den danske forbindelse

Af de mange teleskoper, der bidrog til de spændende resultater fra den seneste detektion af tyngdebølger, er det danske 1,5m teleskop i Chile, det fællesnordiske 2,5m Nordic Optical Telescope, den delvis dansk-byggede X-shooter spektrograf installeret på Very Large Telescope i Chile samt Integral-satellitten, som er delvis bygget af forskere ved Danmarks Tekniske Universitet. Derudover har en håndfuld danske forskere fra Niels Bohr Institutet ved Københavns Universitet, som deltager i IceCube neutrino-eksperimentet på Sydpolen, også bidraget.

Over 25 danske forskere ved Niels Bohr Institutet og Danmarks Tekniske Universitet har samlet spillet en stor rolle i disse spændende målinger og opdagelser. Specielt har forskere ved forskningscentre DARK og StarPLAN på Niels Bohr Institutet været involveret i at lave opfølgende målinger af galaksen, som kilden befinder sig i, og været med til at fastlægge, at den farveudvikling (fra energirigt "blåt" lys til lav-energi "rødt" og infrarødt lys), der blev observeret i strålingen fra kilden, ikke skyldes dannelse af støv (som primært spreder det blå lys væk), men snarere skyldes en hurtig opbygning af tungere og sjældne grundstoffer (som fortrinsvist absorberer det blå lys og lader det røde lys slippe forbi). Analyserne af grundstofopbygningen har danske forskere ligeledes bidraget stort til.

dannes i disse typer kollisioner. De data, man har opnået, ligner nemlig ikke noget, forskerne har set før.

Et nyt værktøj for forskerne

Det er ikke muligt at overdrive vigtigheden af vores nye evner og muligheder for at måle tyngdebølger fra kosmiske kollisioner. Det er nok det største og mest epokegørende gennembrud i fysikken siden kvantemekanikken blev grundlagt. Årsagen er, at tyngdebølger er meget specielle. Processen, som skaber dem, er helt anderledes end fysikken, der skaber elektromagnetiske bølger og neutrinoer, og signalet kan ikke svækkes eller blive absorberet som elektromagnetisk stråling kan. Så forskerne får nogle helt andre informationer, end hvad lys alene kan give. Man kan opfatte det som at få en ekstra sans: Nu kan man både se og høre – eller måske mere passende, se og mærke.

Fordi målbare tyngdebølger skabes i meget kraftige tyngdefelter, vil de give forskerne et helt nyt indblik i fysikken i og omkring ekstreme

tyngdefelter, der er en million til en milliard gange så store, som vi kan måle på henholdsvis Solen og Jorden. Det vil tillade yderligere tests af Einsteins almene relativitetsteori. Hyppigheden af kollisionerne og fordelingen af de kompakte objekters masser fortæller om forholdene i de dele af galakserne, hvor kollisionerne sker og ikke mindst om fysikken i sorte huller selv.

Forskerne håber, at tyngdebølger som det nye værktøj, det er, vil skabe helt ny og banebrydende indsigt ligesom nye forskningsværktøjer tidligere har givet gennembrud indenfor astrofysikken eller højenergifysikken. Der er ét specielt ønske på forskernes liste: Kvantemekanikken viser, at lys opfører sig både som bølger og partikler (kaldet "lyskvanter" eller "fotoner"). Da vi nu ved, at tyngdebølger eksisterer, er der gode indicier for, at der analogt også findes en (kvante-)partikel tilknyttet tyngdefeltet, kaldet en "graviton". Da sorte hullers primære egenskab er deres tyngdefelt, håber forskerne, at tyngdebølger

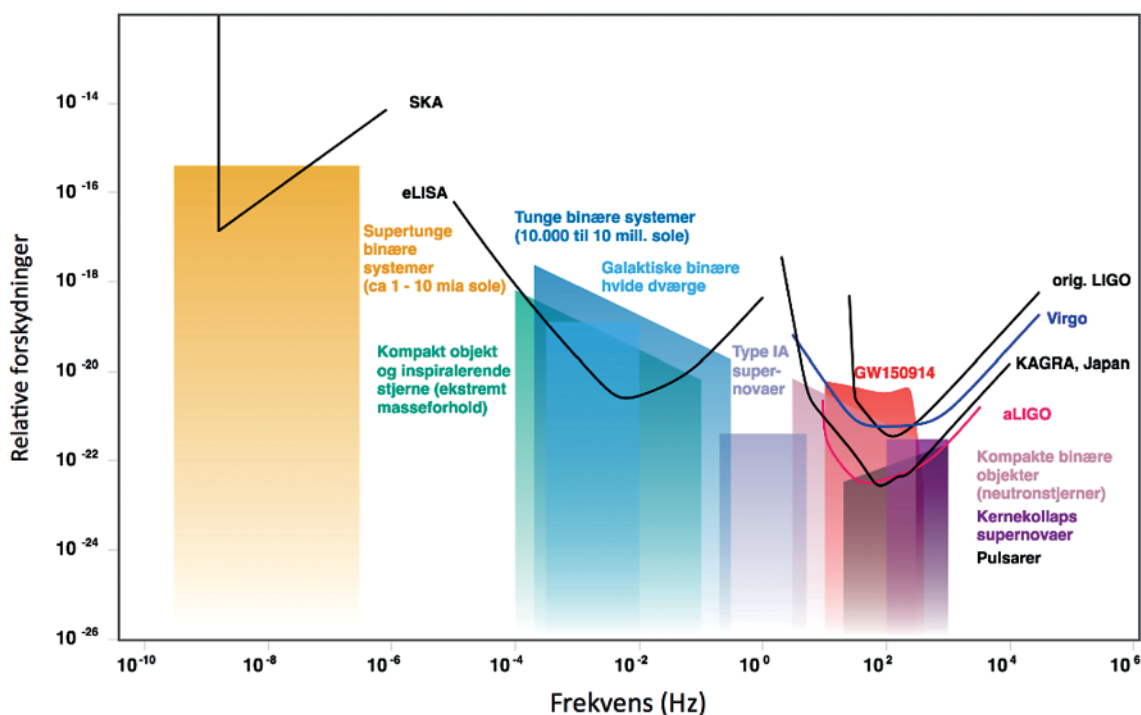
Videre læsning:
Kunsten at veje
et sort hul. Aktuell
Naturvidenskab nr.
5/2016.

Verdensbilledet
i forandring - et
hundredårigt
perspektiv. Forlaget
Epsilon 2016.

B. P. Abbott et al.
(LIGO Scientific
Collaboration and
Virgo Collaboration),
Observation of Gravi-
tational Waves from
a Binary Black Hole,
Phys. Rev. Lett. 116,
061102.

Hjemmsider:
<http://ligo.org>
www.virgo-gw.eu
[www.nobelprize.org/
nobel_prizes/
physics/laureates/
2017/popular.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2017/popular.html)

Ekstra materiale:
På siden
aktuelnaturvidenskab.dk
kan du finde ekstra
materiale til denne
artikel i form af fak-
tabokse om blandt
andet tyngdekraft,
rummets krumning
og sorte huller
(se blad nr. 6-2017).



Figuren viser med farvede stolper de relative forskydninger (lodret akse), som forventes i tyngdebølge-teleskopernes arme, samt frekvensintervallet (vandret akse), bølgerne kan måles ved, når tyngdebølgerne skyldes forskellige typer kilder. I alle tilfælde er kilderne to kompakte legemer i kredsløb om hinanden, dog er pulsarer en enkelt neutronstjerne med en radiojet i hurtigt rotation om sin egen akse. Forventnin-

gerne er baseret på Einsteins relativitetsteori. Kurverne viser følsomheden af de forskellige teleskoper, enten i brug (advanced LIGO, VIRGO) eller planlagte (Kagra i Japan; eLISA' – det rumbaserede teleskop, som forventes en realitet i år 2034; SKA skal ligge i Australien, New Zealand og Sydafrika og bliver verdens største radioteleskop i 2020, svarende til et enkelt teleskop med et areal på en kvadratkilometer).

kan bringe os et skridt videre til en teori om kvante-tyngdekraft samt om hvilke kvantebestanddele, sorte huller består af. Tyngdebølger har enormt potentiale for at afsløre ikke blot, hvad der er inde i et sort hul – noget som mange forskere og lægmænd igennem tiderne har diskuteret – men også hvordan Big Bang egentlig opstod og hvorfor. Det er emner, man er meget optagede af i den teoretiske høj-ener-gigruppe ved Niels Bohr Institutet.

Fremtiden tegner lys

Det seneste eksperiment viser, at fænomener som gamma-glimt og kollisioner af neutronstjerner er forbundet med de voldsomme begivenheder, der skaber tyngdebølger. Det giver nye muligheder for at teste og udforske de fysiske processer, der ligger til grund. Selvom fænomenerne er kendte, så er der mange uafklarede spørgsmål

og fysik, som man ikke hidtil har kunnet teste. Forskerne håber derfor at få ny information om disse fænomener, for eksempel om de helt eller delvist bidrager til opbygningen af de tunge og sjældne grundstoffer. Eksperimentet viser også, at tyngdebølger kan give uafhængige målinger af afstande i universet og dermed information om, hvor hurtigt universet udvider sig. Måske det kan give yderligere indsigt i den mørke energi, som er årsag til, at universet udvider sig stadig hurtigere?

Sidst men ikke mindst forventes flere og bedre tyngdebølge-teleskoper at blive bygget i fremtiden, så forskerne med tiden vil kunne udforske tyngdebølger ved alle bølgelængder. Det vil gøre det muligt at detektere signaler fra andre typer kilder end hidtil. Ved at gå til længere og længere bølgelængder (små

frekvenser) vil forskerne eksempelvis kunne måle sammenstød af tunge og tungere sorte huller, blandt andet de supertunge, som befinder sig i centret af fjerne galakser. I den sidste ende håber forskerne også at kunne måle tyngdebølger skabt i Big Bang.

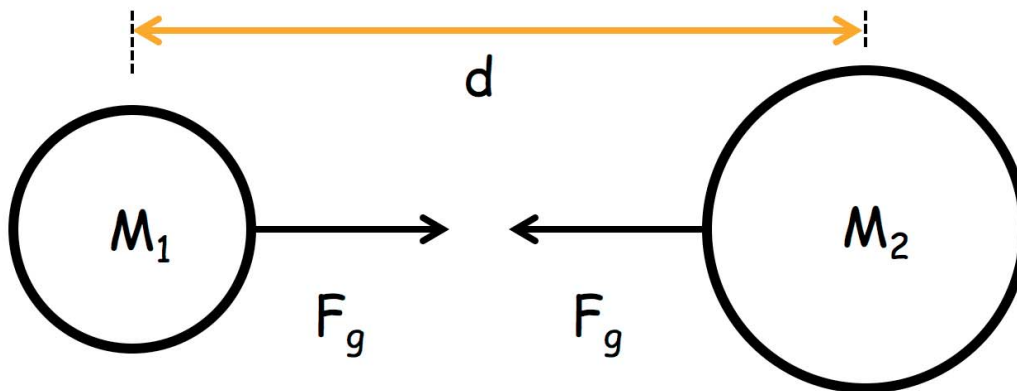
Kraftige detektorer er allerede planlagt i Japan (Kagra) og i rummet (eLISA), og man er i gang med at bygge et kæmpe radioteleskop på den sydlige halvkugle kaldet *Square Kilometer Array* (SKA). Det vil være i stand til at detektere de supertunge sorte huller, som forskerne ved har stor betydning for beskaffenheden af vores egen galakse og galakser i vores nærhed, og dermed for muligheden for liv i universet.

Fremtiden lover rigtigt godt for forskerne. De glæder sig som børn juleaften!

Ekstramateriale til artiklen Tyngdebølger

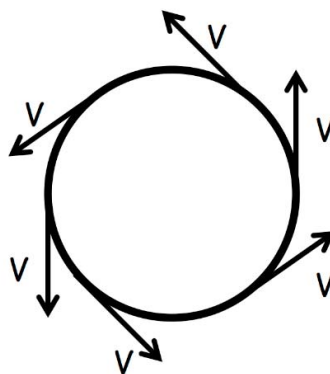
af Marianne Vestergaard, Troels Harmark og Niels Obers.

Aktuel Naturvidenskab nr. 6-2017



Tyngdekraft og acceleration

Tyngdekraften er en tiltrækningskraft, som opstår mellem to legemer med masser på henholdsvis M_1 og M_2 : $F_g = \frac{M_1 M_2 G}{d^2}$, hvor G er gravitationskonstanten. Kraftens styrke afhænger af de to masser, M_1 og M_2 , samt afstanden mellem de to legemer, d . Hvis afstanden fordobles, bliver kraften svagere med en faktor 4. Omvendt er styrken lineært proportionalt med produktet af de to legemers masser. Da $F = \text{masse} \cdot \text{acceleration}$, vil tilstedeværelsen af ét legeme (med masse M_1) i nærheden af et andet legeme (med masse M_2) skabe en (tyngde-)acceleration $a = F_g / M_1 = \frac{M_2 G}{d^2}$. Legeme 1 vil altså føle accelerationen a mod legeme 2. Analogt føler legeme 2 en tilsvarende acceleration bestemt af dens masse.



Acceleration. Acceleration er en ændring af hastigheden, Δv , per tidsenhed, Δt : $\mathbf{a} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t}$. Hastighed

er defineret som en fart med en bestemt retning (for eksempel mod nordøst, hævet 35 grader fra vandret). Hvis enten farten eller retningen ændres, sker der en hastighedsændring og dermed en acceleration. Det betyder, at et legeme i kredsløb om et andet legeme – for eksempel Månen i dens bane om Jorden – bliver accelereret, selvom farten i banen er konstant, netop fordi Månen hele tiden ændrer retning. Figuren illustrerer et legeme i banebevægelse med konstant fart i banen (længden af pilen, $|v|$, er den samme). Legemet oplever en acceleration grundet den konstante retningsændring.

Krumning af rumtiden

At legemer med masse krummer rummet, forklarer hvorfor objekter, som ikke vejer det samme, falder mod Jorden med den samme acceleration; dette kaldes ækvivalensprincippet, som allerede blev opdaget af Galilei og Newton. Einstein forstod, at dette betyder, at tyngdekraften ikke er en egentlig kraft som den elektriske eller magnetiske kraft. I stedet er den et udtryk for, at et objekt, der bevæger sig i en *krum* rumtid, ikke vil bevæge sig langs en ret linje, men vil følge rummets krumninger. Så tyngdekraften er et udtryk for rumtidens geometri – eller med andre ord, hvor meget rumtiden krummer. Modsat er de elektriske og magnetiske kræfter begge helt uafhængige af rumtiden og dens geometri. Eksempelvis vil magnetfelter hverken svækkes eller styrkes i et henholdsvis svagere eller kraftigere tyngdefelt.

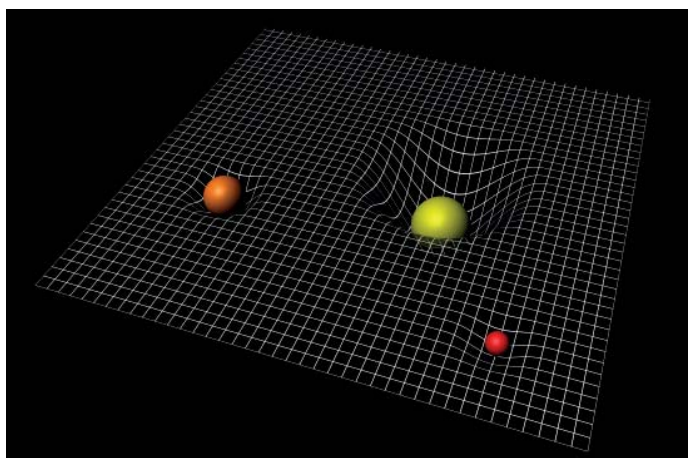


Illustration: ESA-C.Carreau

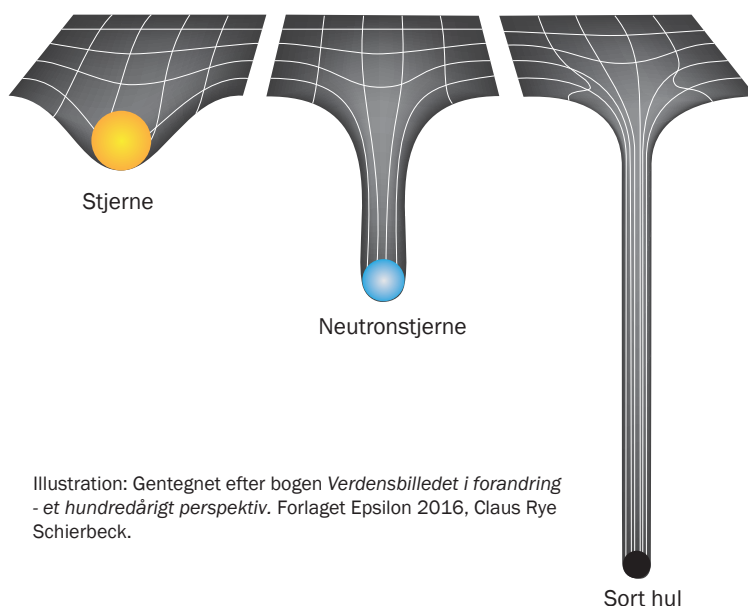


Illustration: Gentegnet efter bogen *Verdensbilledet i forandring - et hundredårigt perspektiv*. Forlaget Epsilon 2016, Claus Rye Schierbeck.

Det er svært at vise krumning af det tre-dimensionale rum, men det kan illustreres i det to-dimensionale rum: et plan. Tænk på rumtiden som et gummilagen. Hvis vi holder lagenet helt udstrakt ved at hive i alle fire hjørner, er det helt plant. Det svarer til, at rumtiden er plan. Hvis du nu triller en lille glaskugle på lagenet, vil den fortsætte i en lige bane på tværs af stoffet. Forestil dig nu, at du lægger en tung jernkugle i midten af gummilagenet. Så vil stoffet krumme nedad, hvor kuglen ligger. Det svarer til, at vi placerer et tungt himmellegeme som Jorden ind i den plane rumtid, og at rumtiden dermed krummes. Jo mere kompakt legemet er, jo dybere ligger legemet i gummilagenet (rumtiden), og jo mere krummer rummet.

Hvis vi igen triller den lille glaskugle på lagenet vil glaskuglens bane bøjes af, og kuglen vil bevæge sig ned mod den tunge jernkugle i midten af gummilagenet. Det svarer til, at man for eksempel slipper et æble, hvorefter det falder ned mod Jorden. Så på den måde er tyngdekraften et udtryk for rumtidens krumning. Dette har andre afledte effekter, såsom at tiden også bøjes, så den for eksempel går en lille smule langsommere tæt på Jordens overflade, end hvis man var højt oppe i atmosfæren. Netop det, at tiden går en smule hurtigere højt over Jordens overflade, gør, at urene i GPS-satellitter skal justeres, så de giver korrekte informationer til os nede på Jorden.



NASA/Jet Propulsion Laboratory-Caltech

Sorte Huller

Det kræver en vis mængde energi at undslippe tyngdekraften fra overfladen af ethvert himmellegeme. Den energi svarer til en bestemt hastighed kaldet undvigelseshastigheden:

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

her er G gravitationskonstanten, M er massen af objektet indenfor en radius, r.

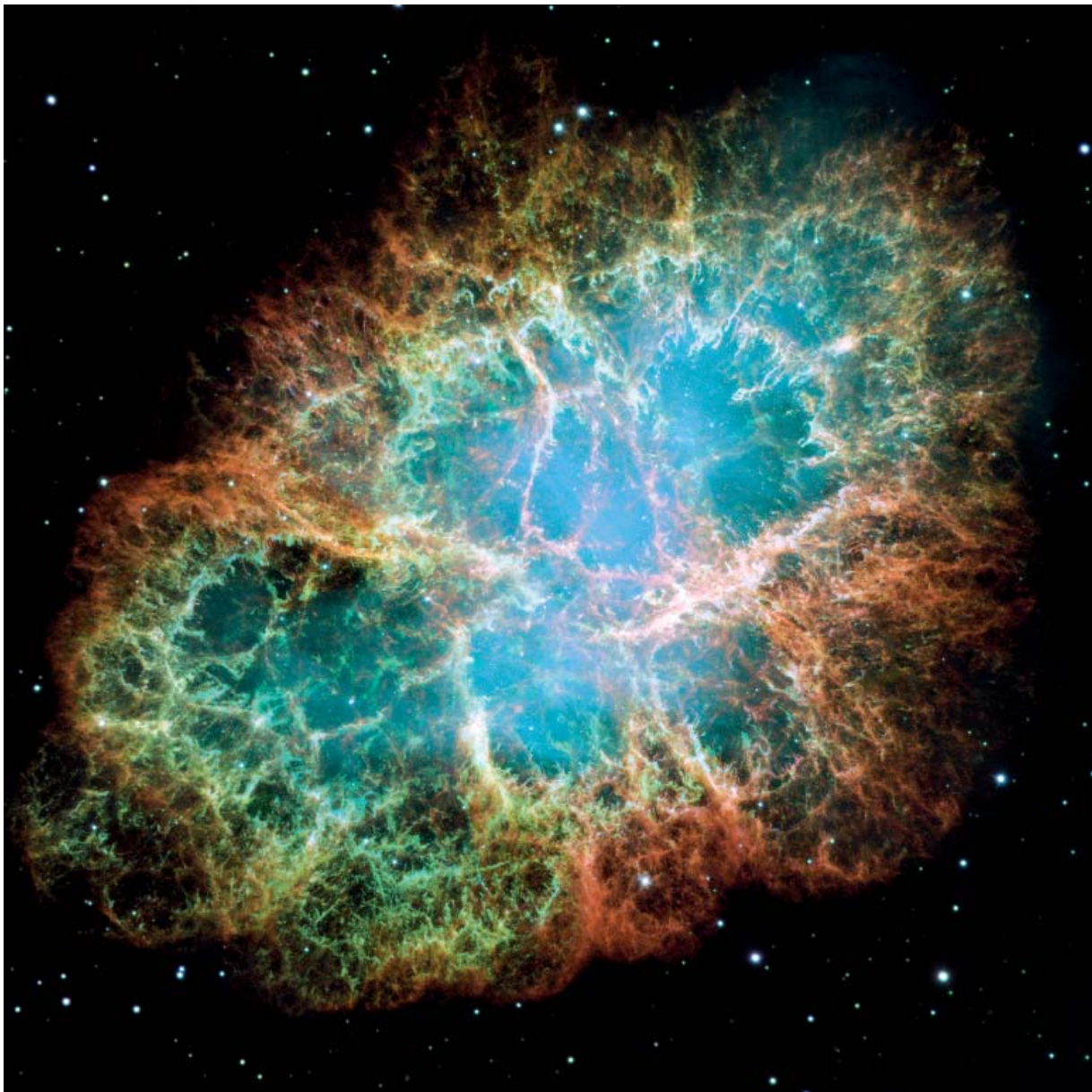
Sorte huller er legemer med den størst mulige massetæthed, der findes i universet. Hvis Jorden blev til et sort hul ville den have en diameter på kun 18 millimeter! At et sort hul er så kompakt gør, at selv lyset ikke kan undslippe fra "kanten" af hullet. Sorte huller har ikke en fast overflade som Jorden. I stedet betragter man det sorte huls afgrænsning (kaldet begivenhedshorisonten) som den afstand fra det sorte huls centrum, hvor undvigelseshastigheden er lig lysets hastighed.

$$r(\text{horisont}) = \frac{2GM}{c^2}$$

hvor c er lysets hastighed, M er massen af det sorte hul og G er gravitationskonstanten.

For Jordens masse på $5,98 \times 10^{24}$ kg, $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$ og $c = 2,9979 \times 10^8 \text{ m/s}$ får man $r(\text{horisont}) = 9 \times 10^{-6} \text{ m}$. Udstrækningen (diameteren) af Jorden, hvis den var et sort hul, er således 18 mm.

Da sorte huller hverken lyser eller har en overflade, er de helt sorte og svære at finde. Indtil for få år siden kunne man kun lokalisere sorte huller ud fra deres utroligt kraftige tyngdefelt eller ud fra den energirige stråling, der udsendes fra materiale, der falder ind på det sorte hul. Nu kan vi måle tyngdebølgerne fra sorte huller i bevægelse. Tegningen viser et sort hul omgivet af en skive af varm gas, der er på vej ned i det sorte hul. [Credit: NASA/Jet Propulsion Laboratory-Caltech].



Credit: NASA, ESA, J. Hester and A. Loll (Arizona State University)

Neutronstjerner

Når tunge stjerner har opbrugt deres gas i centret, falder kernen sammen til et kompakt objekt, og de ydre gaslag spredes mellem de andre stjerner i den efterfølgende supernovaeksplosion. Er kernen lettere end 3 sol-masser omdannes den til en neutronstjerne. Er kernen tungere, efterlader supernovaen et sort hul. I neutronstjerner er partiklerne (neutronerne) pakket så tæt sammen, at de næsten rører hinanden. Derfor er de meget tunge (og solide) på trods af deres lille udstrækning på cirka 10-20 km. Figuren viser Krabbetågen observeret med *Hubble* rumteleskopet. Neutronstjernen er efterladt i centret af supernovaeksplosionen, der skete i år 1054.

Gamma-glimt

Selvom de blot varer mellem en brøkdel af et sekund til adskillige timer, er gamma-glimt fra fjerne galakser nogle af de mest kraftige og energirige eksplosioner, man kender og kan observere lys fra. De detekteres først ved høje energier som gamma- og røntgenstråling og sidenhen, som ildkuglen ekspanderer, ved ultraviolette, optiske og infrarøde bølgelængder. Forskerne ved endnu ikke, om gammaglimt skyldes sammenfald af meget tunge stjerner eller sammenstød af kompakte objekter.