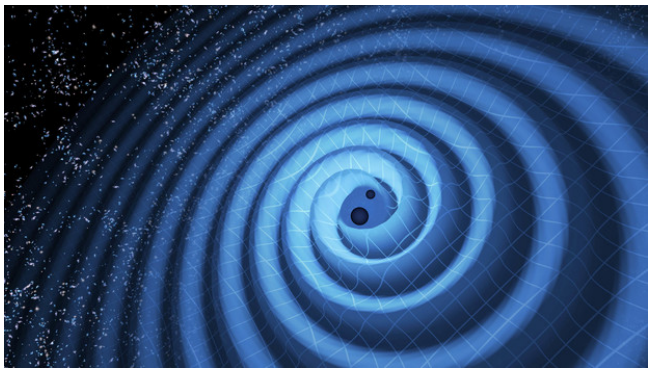
Sorte huller

Troels Harmark og Niels Obers, Niels Bohr Institutet

Vi befinder os i en bemærkelsesværdig tid for forskning i sorte huller. Dels er der enestående målinger af gravitationsbølger, der stammer fra sorte huller, der smelter sammen, og fantastiske nylige billeder af gigantiske sorte huller i galaksers centrum taget ved at kombinere billeder fra teleskoper over hele kloden. Dels er der spændende nye fremskridt i forståelsen af sorte hullers grundlæggende egenskaber, herunder når man tager hensyn til principperne for kvantemekanikken. Da singulariteten inde i et sort hul ligner den ved Big Bang, kan dette endda kaste lys over oprindelsen af hele vores univers.

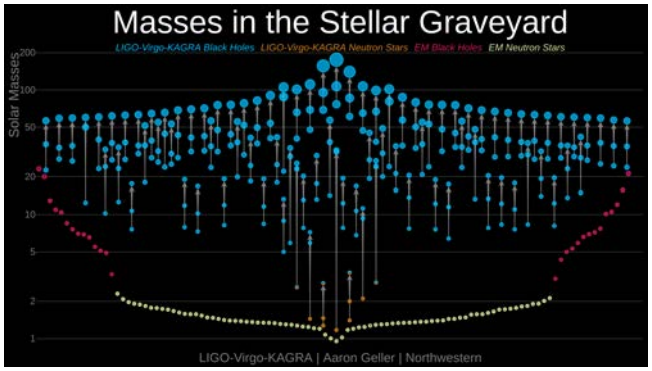
Sorte huller er de mærkeligste objekter der findes. Vi ved ikke rigtig, hvad de består af, ud over at de er en slags hul i tiden og rummet. Tiden og rummet krummer og bøjer sig så meget inde i et sort hul, at det kan rive rumskibe i stykker. Tiden går langsommere tæt på kanten af et sort hul, så hvis man rejser tæt på med et rumskib, og derefter vender om og rejser hjem til Jorden igen, kan der i princippet være gået 1000 år tilbage på Jorden, selvom rejsen set fra rumskibet kun tog få år. Ja, faktisk står tiden stille på kanten af et sort hul set fra Jordens synspunkt. Inde i et sort hul, når man har passeret kanten, også kaldet begivenhedshorisonten, er krumningen af tiden og rummet så stærk, at man aldrig vil kunne slippe ud igen. Og helt inde i midten findes der en såkaldt singularitet. Et sted hvor tid og rum ikke længere kan beskrives med de fysiske love vi kender i dag. Et sted hvor tid og rum bryder helt sammen.



Figur 1. Sorte hullers spiraldans. Illustrationen viser sammensmeltningen af to sorte huller og gravitationsbølgerne, der bølger udad, når de sorte huller spiralerer mod hinanden. De sorte huller – som repræsenterer dem, der blev opdaget af LIGO – smeltede sammen og dannede et enkelt sort hul. Grafik: LIGO/T. Pyle.

Vi ved i dag, at sorte huller findes. I hvert fald har vi efterhånden mange videnskabelige observationer, som kun kan forklares med sorte hullers eksistens. Indtil år 2015 havde man kun observationer af stjerner i kredsløb om sorte huller, hvor man ikke kunne observere de sorte huller direkte, men man kunne udelukke alle andre muligheder. I 2015 kom så den første direkte observation af en gravitationsbølge skabt af to sorte huller [1,2]. Begivenheden selv skete faktisk ikke i 2015 men for 1,3 milliarder år siden. To sorte huller, som hver vejede omkring 30 gange så meget som Solen, kredsede omkring hinanden, stødte til sidst sammen og blev til et stort sort hul (se figur 1). I den proces udsendtes en gigantisk gravitationsbølge som nåede frem til os her på Jorden den 14. september 2015 og blev målt af de to advanced-LIGO detektorer i USA som den første gravitationsbølge nogensinde. Efter at have rejst i 1,3 milliarder år var bølgens effekt blot en lille bitte forskydning af længden af de to arme i detektorerne på en tusindedel af størrelsen af en atomkerne. Men dengang bølgen blev skabt var dens energi større end alt lys fra alle stjerner i hele det kendte univers.

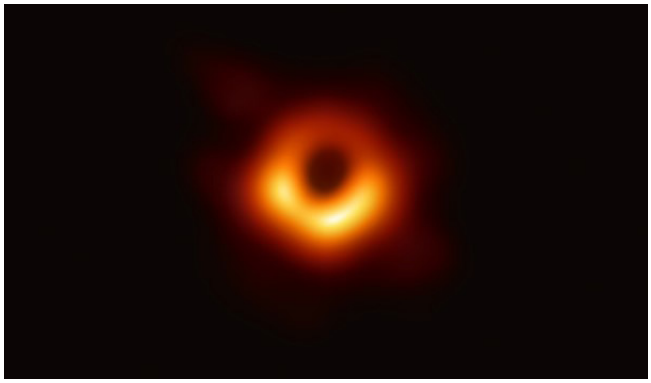
Takket være målingerne af gravitationsbølger kan vi derfor nu direkte "se" signaler fra sorte huller. Gravitationsbølger er en slags forskydning af de rumlige retninger på tværs af udbredelsesretningen, således at afstande kan ændres en lille smule, når en gravitationsbølge passerer. De passerer i princippet hele tiden igennem os og Jorden fra alle retninger og hvert eneste sekund, men indtil nu har vi målt omkring 100 af dem siden 2015 (se figur 2).



Figur 2. Oversigt over detekterede sorte huller og neutronstjerner fra gravitationsbølger. Pilene forbinder de to kolliderende legemer med det objekt, som blev resultatet af kollisionen. Grafik: LIGO-Virgo / Aaron Geller / Northwestern University.

En anden ny slags observation af sorte huller blev gjort af det såkaldte Event-Horizon teleskop i 2019, som for første gang tog en slags billede af et sort hul. Det kan ses på figur 3. Den karakteristiske donutform, man ser på billedet, er lysstråler som afbøjes af det sorte hul, når de passerer tæt på dets kant. Den nederste del af donutten er lidt lysere, fordi det sorte hul roterer omkring sig selv. Selve det sorte hul findes inde i midten af donutten. At sorte huller kan afbøje lys på denne måde

er et karakteristisk kendetegn for dem. I dette tilfælde viser billedet et gigantisk sort hul i midten af Messier 87 galaksen. Dette sorte hul vejer 6,5 milliarder gange så meget som Solen. Billedet er lidt sløret, da det sorte hul befinder sig 53 millioner lysår væk.



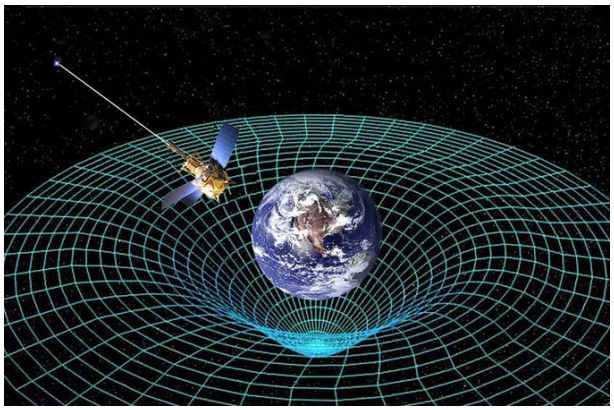
Figur 3. Det første billede af et sort hul blev lavet ved hjælp af observationer med Event Horizon Telescope af centrum i galaksen M87. Billedet viser en lys ring dannet i den intense tyngdekraft omkring et sort hul 6,5 milliarder gange Solens masse. Billede: Event Horizon Telescope Collaboration.

Hvorfor er disse nylige eksperimentelle fremskridt så spændende for fremtiden? Ud over at vi nu kan måle signaler direkte fra sorte huller, kan vi begynde at udforske grænserne for vores forståelse af tyngdekraften. En bemærkelsesværdig mængde information er skjult både i gravitationsbølgesignalet fra sammensmeltninger af sorte huller, samt i detaljerne af, hvordan lys afbøjes omkring dem. De signaler, vi modtager, kan nu sammenlignes med præcise beregninger fra Einsteins relativitetsteori. Med dette har vi mulighed for enten at bekræfte teorien med høj nøjagtighed eller finde "smoking guns" af nye teorier, som rækker videre end Einsteins. Det vil være spændende at se, om nogen af disse teorier har en chance for at blive bekræftet af de nye observationer. Hvis det er tilfældet, kan det potentielt pege os i retning af en ny grundlæggende forståelse af tyngdekraften. Dette er et meget aktivt forskningsområde globalt og også ved Niels Bohr Institutet.

Af disse grunde er der også mange spændende planer for at konstruere nye gravitationsbølgedetektorer. På den ene side omfatter dette rumbaserede detektorer (fx LISA, som er planlagt til at blive sendt op i 2035). Dette vil give os mulighed for at kigge endnu længere tilbage i fortiden og muligvis observere gravitationsbølger ikke kun fra gigantiske sorte huller, men også fra begyndelsen af vores univers udsendt lige efter Big Bang. På den anden side er der også planer om større jordbaserede detektorer, såsom det trekantede Einsteinteleskop [3], der vil være i stand til at foretage præcisionsmålinger på mere end 100.000 sammensmeltninger af sorte huller hvert år.

Så hvad er et sort hul egentlig for noget? Det spørgsmål har forskerne beskæftiget sig med i næsten et århundrede. Den teoretiske forudsigelse af sorte huller skete i princippet i 1915 af den tyske fysiker Karl Schwarzschild kort tid efter, at Einstein offentliggjorde sin almene relativitetsteori. Schwarzschild fandt frem til en løsning af Einsteins ligninger, og i dag ved vi, at den kan beskrive sorte huller. Dette gjorde han utroligt nok, mens han kæmpede som soldat ved østfronten i første verdenskrig. I årtierne efter var der mange forskere, som foreslog sorte hullers eksistens (se fx Oppenheimer og Snyders artikel om stjerne kollaps [4]) . Der var dog meget tvivl om tolkningen af Schwarzschilds løsning og også om der fandtes realistiske måder, hvorpå løsningen kunne realiseres i den virkelige verden fra kollaps af stjerner. Derfor skal vi helt frem til år 1965, før et uafvendeligt argument for sorte hullers eksistens blev fremsat som en direkte forudsigelse af Einsteins almene relativitetsteori. I 1965 skrev Roger Penrose nemlig en artikel om sorte hullers eksistens, hvor man med avanceret matematik kunne påvise, at når først en stjerne begynder at kollapse efter at være løbet tørt for brændstof, er den eneste mulige udgang på denne proces at et sort hul bliver skabt. Denne revolutionerende artikel fik Penrose Nobelprisen for i år 2020.

Ifølge Einsteins almene relativitetsteori består et sort hul af en singularitet inde i dets midte samt en begivenhedshorisont, som markerer kanten af det sorte hul. Derudover er tiden og rummet bøjet kraftigt, ikke bare indeni det sorte hul, men også udenfor dets kant. Man kan med nogen ret hævde, at et sort hul faktisk består af tid og rum. Kun i singulariteten finder man noget ud over tid og rum, men singulariteten er i det hele taget noget, der ligger hinsides vores nuværende fysiske love.

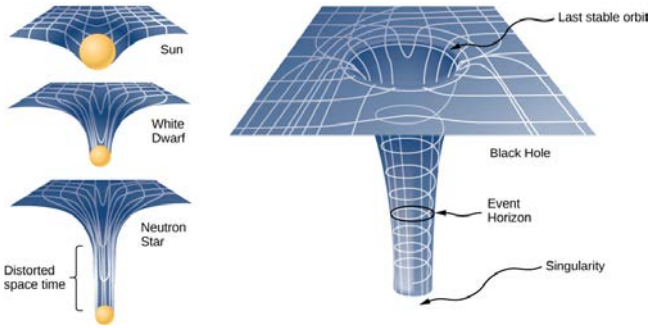


Figur 4. En illustration af rumtidskrumningen forårsaget af Jorden.

Motivationen bag Schwarzschilds løsning var i øvrigt slet ikke sorte huller, men i stedet søgte han efter en løsning af Einsteins ligninger for hvordan tiden og rummet krummer omkring en stjerne eller en planet (se figur 4). Senere blev det klart, at Schwarzschild-løsningen indeholder en stor overraskelse, nemlig at hvis du presser løsningens gyldighed til objekter, der bliver mere og mere tætte, afslører den muligheden for sorte huller, nemlig et objekt, der er så tæt, at det har en begivenhedshorisont, som er et område, hvorfra intet lys kan undslippe fra objektet, derfor navnet (se figur 5). Nu ved vi, at universet faktisk producerer sådanne objekter, både af solstørrelse og enorme sorte huller i centrum af galakser, og endda får dem til at kollidere med hinanden. Det er fantastisk at tænke på, at vi kan starte med en teori, som havde et helt andet udgangspunkt, nemlig stjerner

og planeter, og så ved at ekstrapolere den helt ind i det ukendte, kan den afsløre mysterier og vidundere, som vi så til sidst finder ud af faktisk realiseres i vores univers!"

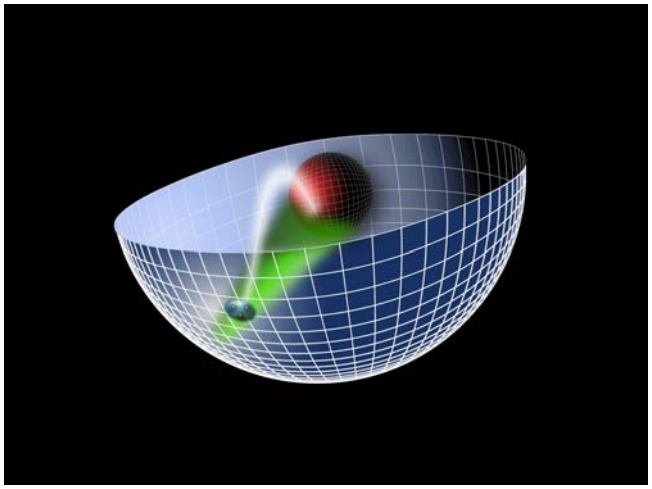
Men nu hvor vi ved, at sorte huller eksisterer, står vi også over for en ny dyb gåde, nemlig hvordan man forener deres bizarre egenskaber med en anden teori, der er blevet testet med utrolig nøjagtighed, nemlig kvantemekanikken udviklet af Niels Bohr og andre. En af de største ubesvarede gåder er, hvad der sker med den information, der er indeholdt i det sorte hul. En anden måde at formulere dette spørgsmål på er: hvad er et sort hul lavet af? Ligesom vi ved, hvordan faste stoffer, væsker eller gasser er sammensat af atomer og molekyler, forventer vi også, at sorte huller har tilsvarende byggeklodser, der udgør det sorte hul. Det, vi søger, er på en måde byggeklodserne til rum og tid, som er relevante når vi går til de mindste afstande. Ved disse afstande skal vi tage hensyn til, at rum og tid skal overholde reglerne for kvantemekanikken, hvilket gør at rum og tid må opføre sig helt anderledes end i relativitetsteorien.



Figur 5. Rumtidskrumningen omkring hhv. Solen, en hvid dværg, en neutronstjerne og et sort hul.

En af de mest succesrige og lovende tilgange til at tackle disse spørgsmål er strengteori. Strengteorien postulerer, at universets grundlæggende byggeklodser ikke er punktformede partikler, men derimod små, vibrerende strenge. Nyere forskning i strengteori har givet indsigter i spørgsmålet om, hvad sorte huller består af, og hvordan information, der er gemt inde i det sorte hul, kan afkodes af observatører udenfor. Desuden antyder holografiprincippet, som er en integreret del af strengteorien, at informationen inden i et sort hul er indkodet i dets todimensionale overflade, hvilket udfordrer den traditionelle opfattelse af, at objekters informationsmængde vokser med deres volumen (se figur 6). Vores forskning ved Niels Bohr Institutet er i de senere år kommet med en ny måde at se på dette spørgsmål ved at studere forenklede modeller [5], der stadig bevarer de væsentlige træk ved den almene relativitetsteori. En vigtig ingrediens i denne udvikling har været erkendelsen af, at der eksisterer en hidtil overset måde at se på tyngdekraften, der ligger mellem Newtons og Einsteins, men stadig bruger konceptet om krumt rum og tid på en måde, der overholder ækvivalensprincippet, nemlig at alt stof falder med samme acceleration [7].

Yderligere spændende fremskridt kommer fra anvendelsen af det fascinerende koncept om kvantemekanisk sammenfiltring til fysikken af sorte huller [7]. Sammenfiltring betyder, at to partikler kan være i en kombineret tilstand, hvor man ikke kan adskille de to fra hinanden. Dette er en af de fantastiske og magiske forudsigelser af kvantemekanikken, og dens eksperimentelle verifikation blev hædret med Nobelprisen i fysik i 2022. Anvendelse af disse ideer på sorte huller har givet et nyt perspektiv på forholdet mellem et sort huls indre og ydre. Mens der klassisk set ikke kan være nogen kommunikation med omverdenen, når man først er inde i det sorte huls begivenhedshorisont, er det blevet fundet, at der kan være kvantemekanisk sammenfiltring mellem det indre og ydre. Den tætte sammenhæng mellem sorte huller og kvantebaseret informationsteknologi kan betyde, at vi måske endda på et tidspunkt kan bruge kvantecomputere til at simulere sorte hullers kvantemekaniske egenskaber.



Figur 6. Holografi knytter en partikelteori uden tyngdekraft på grænsen af en krum rumtid til en teori for selve rumtiden med tyngdekraft. Fx svarer en proton på grænsen af rumtiden til en bestemt konfiguration af felter i rumtiden, deriblandt tyngdekraften.

Måske er et endnu dybere og mere fundamentalt spørgsmål ved sorte huller at forstå singulariteten i centrum af et sort hul. Løsningen, der følger af Einsteins berømte ligninger, antyder, at både rummet og tiden ophører med at eksistere på dette sted. Det singulære centrum af et sort hul deler mange egenskaber med den singularitet, der ligger til grund for vores eksistens, nemlig Big Bang-singulariteten, som universet startede med. Forståelsen af disse singulariteter inden for den almene relativitetsteori blev anført af Stephen Hawking og Roger Penrose. Men når man tager højde for kvantemekanikkens usikkerhedsrelation, finder man, at dette ikke kan være hele historien. At forstå dette til fulde ville kræve en såkaldt teori for kvantegravitation, og også her er håbet, at strengteori eller andre teorier vil kaste lys over dette mysterium. På samme tid er håbet, at vi ved hjælp af fremtidige generationer af gravitationsbølgedetektorer kan lære mere om singulariteter, både i midten af sorte huller og starten af vores univers.

Der findes fire fundamentale kræfter i naturen. Tre af dem, den elektromagnetiske, svage og stærke kraft, er smukt forenet i den såkaldte standardmodel for partikelfysik. Vores teoretiske forståelse af disse er blevet verificeret med utrolig præcision. Tyngdekraften

er den fjerde kraft. Ifølge Einstein er den faktisk ikke en kraft, men en egenskab ved rummet og tiden selv. Ironisk nok, selvom tyngdekraften er den af de fire kræfter, vi kender bedst fra vores dagligdag, er det samtidig den kraft vi forstår mindst. Men det bør være klart ud fra ovenstående, at vi lever i en af de mest spændende perioder, hvor et hav af nye data om tyngdekraften vil blive tilgængelige fra direkte observationer af sorte huller og gravitationsbølger. Forventningen er, at de vil kunne skubbe forståelsen af Einsteins teori til det yderste og indikere, hvor det er muligt at finde afvigelser fra den. Dette kan pege på det næste gennembrud i forståelsen og potentielt give hints til, hvordan den kvantemekaniske teori om tyngdekraften skal se ud. For over hundrede år siden antydede Merkurs perihelions præcession ufuldstændigheden af Newtons teori om tyngdekraften og førte delvist til Einsteins teori, som i sig selv førte til nye forudsigelser såsom bøjning af lys og eksistensen af sorte huller. I øjeblikket står vi på tærsklen til en lignende revolution i vores forståelse af tyngdekraften takket være førende eksperimentel og teoretisk forskning i sorte huller.

Litteratur

[1] Verdensbilledet i forandring – et hundredårigt perspektiv, kapitel 2 og 6 (2016). Forlaget Epsilon.dk.

[2] M. Vestergaard, T. Harmark og N. Obers (2017) "Tyngdebølger", *Aktuel Naturvidenskab*, nr. 6. side 24–30.

https://aktuelnaturvidenskab.dk/fileadmin/Aktuel_Naturvidenskab/nr-6/AN6-2017tyngebolge-tryk.pdf

[3] M. Maggiore m.fl. (2020) "Science case for the Einstein telescope", *JCAP03*, bind **2020**, side 050.

[4] J.R. Oppenheimer og H. Snyder (1939) "On Continued Gravitational Contraction", *Phys.Rev.*, bind **56**, side 455.

[5] T. Harmark, J. Hartong og N. A. Obers (2017) "Nonrelativistic strings and limits of the AdS/CFT correspondence", *Phys.Rev.D*, bind **D96**, side 086019.

https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.96.086019

[6] D. Hansen, J. Hartong og N.A. Obers (2019) "Gravity between Newton and Einstein", *International Journal of Modern Physics D*, bind **28**, side 1944010.

[7] G. Musser (2022) "Paradox Resolved", *Scientific American Magazine*, bind **327**, nr. 3, side 30.

https://www.scientificamerican.com/article/how-physicists-cracked-a-black-hole-paradox/

Troels Harmark (t.h.) og Niels Obers (t.v.) er teoretiske fysikere med speciale i sorte huller, relativitetsteori, holografiske dualiteter og superstrengteori. Begge er ansat ved Niels Bohr Institutet.

Læs Kvant på hjemmesiden!

Det er nu muligt som abonnent at læse Kvant digitalt på bladets hjemmeside www.kvant.dk.
I menuen øverst på hjemmesiden skal man vælge "Konto" og derefter "Log ind". Som login skal man første gang bruge medlemsnummeret, som er trykt på bladets bagside og som er et sekscifret tal, der står lige ovenover navnet. Adgangskoden er den samme som medlemsnummeret.
Når man er logget ind, kan man vælge sit eget kodeord og fremover bruge e-mailadressen som brugernavn. Nogle af medlemsoplysningerne udfyldt, og der er angivet midlertidig e-mailadresse, som man bedes rette, ligesom man kan udfylde eventuelle manglende oplysninger. Adresseændringer skal dog også meddeleles direkte til kvant@kvant.dk.
Som abonnent kan læse bladet på hjemmesiden og printe det som en pdf. Systemet er under udvikling, og i første omgang er der adgang til de nyeste udgaver. Nye abonnenter samt nye medlemmer af AS, DFS eller SNU er muligvis ikke registerede i Kvants database, men kan henvende sig til Kvant på mail kvant@kvant.dk.
God fornøjelse med læsningen!