

Roterende sorte huller

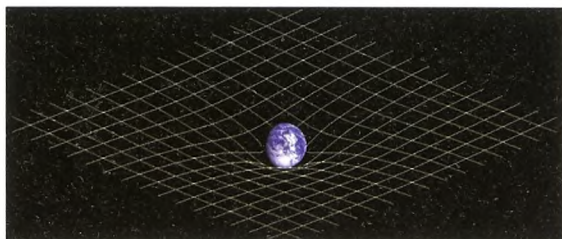
Af Kristian Jerslev, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet

Sorte huller har normalt været anset som statiske, mens alle andre legemer i Universet roterer. Dette stemmer imidlertid ikke overens med den nylige opdagelse af et roterende sort hul i midten af galaksen NGC 1365. Hvilken effekt har rotationen af et sort hul på legemer i dets nærhed, og hvordan kan astronomer i det hele taget måle, at sorte huller roterer?

Hvad er et sort hul?

Siden Einstein i 1915 udgav sin almene relativitetsteori, har mange forskere arbejdet med nogle af de mere eksotiske dele af denne. I 1960'erne var en af disse eksotiske dele kendt som sorte huller, hvis navn stammer fra fysikeren John Wheeler (der første gang benyttede udtrykket). Siden da har sorte huller været genstand for utallige forsknings- og observationsprojekter samt været benyttet i utallige science-fictionhistorier. Men hvordan opfatter den moderne astronomi et sort hul?

Sorte huller er objekter, hvis tyngdekraft er så stor, at intet kan slippe bort fra dem. Dette inkluderer også fotoner på trods af, at fotoner ikke har nogen hvilemasse. I relativitetsteorien betragtes tyngdekraft nemlig ikke som en fysisk kraft, men derimod som en krumning af hele rumtiden. På figur 1 kan man se, hvordan Jorden krummer rumtiden, der symboliseres ved et todimensionalt koordinatsystem, omkring sig. Da fotoner bevæger sig i rumtiden på samme måde som alt andet stof i Universet, vil de også mærke denne krumning og dermed påvirkes af tyngdekraften fra andre legemer.



Figur 1. Jorden krummer rumtiden i Jordens nærhed. Man kan tænke på rumtiden som en trampolin og Jorden som en tung kugle, der ved at ligge på trampolinen vil bøje den. Kilde: bruger Johnstone på Wikipedia.org.

Massen af et sort hul er koncentreret i et punkt, der opnår næsten uendelig høj tæthed. Dette punkt kaldes en singularitet og ligger i midten af det sorte hul. Ved selve singulariteten bliver tyngdekraften uendelig stor (ikke bare meget høj), hvormed hele rumtiden ødelægges. Lægger man afstand til et sort hul vil dets tyngdekrafts indflydelse efterhånden blive mindre og mindre. Ved en bestemt afstand fra singulariteten bliver tyngdekraftens indflydelse så lav, at undvigelseshastigheden (den fart et legeme skal opnå for at slippe helt bort fra det sorte hul) er lige så stor som lysets fart i vakuum (300.000 km/s, hvor undvigelseshastigheden fra Jordens overflade til sammenligning er omkring 11 km/s). Denne afstand definerer det sorte hulls begivenhedshorisont, som man kan tænke på som

værende overfladen på det sorte hul – vel at mærke en overflade, som man kan bevæge sig igennem. Falder et legeme gennem begivenhedshorisonten slipper det aldrig nogensinde væk igen. På denne måde kan man godt forestille sig, at legemet er faldet ned i et hul, der ikke er til at komme op af igen. I rummet vil sorte huller fremstå sorte, fordi fotoner heller ikke kan slippe væk.

Et sort hul er fuldstændigt beskrevet ved tre forskellige parametre: dets masse, M , samlede elektriske ladning, Q , samt dets totale impulsmoment J . Sorte huller, der hverken roterer eller har nogen elektrisk ladning kaldes for Schwarzschild-sorte huller opkaldt efter den fysiker, der første gang beskrev disse matematisk. Sorte huller med elektrisk ladning og/eller rotation navngives efter et system, der kan ses i tabel 1.

	Ikke roterende ($J = 0$)	Roterende ($J \neq 0$)
Ikke elektrisk ladet ($Q = 0$)	Schwarzschild [1]	Kerr [2]
Elektrisk ladet ($Q \neq 0$)	Reissner-Nordström [3]	Kerr-Newman [4]

Tabel 1. Typebestemmelse af sorte huller følger et fast mønster, der bygger på det enkelte sorte hulls målte parametre.

Roterende sorte huller uden elektrisk ladning kaldes Kerr-sorte huller, og det er denne type af sorte huller, vi i det følgende vil kigge nærmere på. Da sorte huller dannes ved kollapset af roterende kerner i gamle stjerner, forventes det, at kernens impulsmoment følger med over i det sorte hul. Derfor er studiet af roterende sorte huller en naturlig fortsættelse af studiet af Schwarzschild-sorte huller.

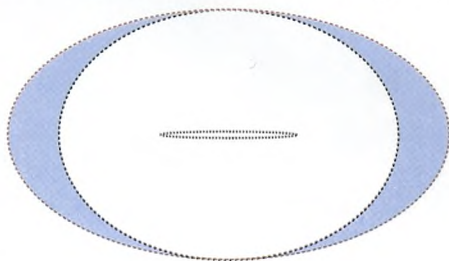
Observationer har indtil videre vist, at legemer i Universet er elektrisk neutrale, så den samlede elektriske ladning for sorte huller forventes at være eksakt lig nul. Massen af et sort hul kan måles ved at observere de stjerner, der er i kredsløb om det sorte hul. Det var på denne måde, at man tidligere har målt massen af blandt andet det supermassive sorte hul i Mælkevejens centrum. Det helt store spørgsmål har indtil for ganske nyligt været, hvor tilbøjelige sorte huller er til at rotere, og hvor stort impulsmoment de i så fald har.

Fra punkt til ring

Schwarzschild-sorte huller er prototypen af forestillingen om, hvordan et sort hul ser ud: en sort kugleoverflade, hvis radius svarer til begivenhedshorisontens afstand fra centret, hvor der befinder sig en punktformig singularitet, der indeholder hele massen af det sorte hul. Denne type af sorte huller er dermed sfærisk symmetriske. Tilsættes rotation til et sort hul ændres dette

billede markant, idet symmetrien ændres fra sfærisk symmetrisk til rotationssymmetrisk omkring det sorte huls rotationsakse.

I første omgang vil formen ændres fra at være kugleformet til at tage form som en fladtrykt kugle. Denne form kaldes for et oblat sfæroid og er næsten den samme form, som Jorden har (hvis man ikke tager højde for lokale forhold). Denne ændring på formen af det sorte hul skyldes, at begivenhedshorisonen deles op i to horisonter: en ny begivenhedshorison og en såkaldt ergoflade. Den nye begivenhedshorison fungerer fuldstændig som begivenhedshorisonen på et Schwarzschild-sort hul: falder man igennem, kommer man aldrig ud igen. Ergofladen er til gengæld helt unik for roterende sorte huller og befinder sig længere væk fra midten af det sorte hul end begivenhedshorisonen. Området mellem ergofladen og begivenhedshorisonen kaldes for ergosfæren og er endnu en unik egenskab ved Kerr-sort huler. Befinder man sig i ergosfæren, er det ikke muligt at stå stille i forhold til det roterende sorte hul – her bliver man tvunget til at rotere med rundt, men har man en motor med sig kan man sagtens slippe væk igen. Det er først, hvis man kommer indenfor begivenhedshorisonen, at man ikke længere kan slippe bort.



Figur 2. Skematisk oversigt over de horisonter, der er til stede for et Kerr-sort hul. Den yderste stiplede røde linje svarer til ergofladen, mens den indre sorte stiplede linje er det roterende sorte huls begivenhedshorison. Inderst finder vi ringsingulariteten, der på figuren er vist som en prikket cirkel.

Inderst i et roterende sort hul befinder sig ikke længere en punktsingularitet men derimod en ring-singularitet – en ring af punkter med uendelig høj tæthed. På figur 2 ses en skematisk oversigt over de forskellige horisonter i et roterende sort hul. Bemærk, at horisonterne ikke er kugleformede, men netop er fladtrykte langs den lodrette akse, der på figuren er sat som rotationsaksen. En tilsvarende figur over et Schwarzschild-sort hul ville blot indeholde en cirkel, der viser begivenhedshorisonen (og ergofladen, som er sammenfaldende med begivenhedshorisonen) samt et punkt i midten, der viser singulariteten.

Et sorte huls omgivelser

Med forskellen på et Schwarzschild- og et Kerr-sort hul på plads tager vi et skridt baglæns og kigger nærmere på, hvordan omgivelserne til et sort hul ser ud. På figur 3 ses en kunstners indtryk af, hvordan omgivelserne omkring et Schwarzschild-sort hul kunne se ud. På billedet ses tydeligt det sorte hul, der er omgivet af en såkaldt tilvækstskive. En tilvækstskive er en flad skive af materiale, der er i kredsløb om det sorte hul. Sådan

en skive består oftest af støv og gas, der i skiven gnider mod hinanden og dermed mister energi. Som tiden går, vil støv og gas dermed bevæge sig tættere og tættere på begivenhedshorisonen for til sidst at falde helt ind i det sorte hul. Gnidningen i tilvækstskiven danner varme, der varmer støvet og gassen op til meget høje temperaturer – så høje, at materialet tæt på begivenhedshorisonen begynder at udsende røntgenstråling. Denne røntgenstråling kan vores rumteleskoper ved Jorden opfange, og på den måde kan vi studere sorte huller.



Figur 3. En kunstners indtryk af, hvordan omgivelserne omkring et sort hul ser ud. Skiven af støv og gas omkring det sorte hul kaldes tilvækstskiven, mens strømmene af relativistiske partikler, der på billedet er blå, kaldes en jet. Kilde: NASA/JPL-Caltech.

Regner man ved hjælp af relativitetsteorien på kredsløb om sorte huller, opdager man noget, der adskiller sig markant fra Newtons fysik. Det er nemlig ikke muligt at kredse om et sort hul i cirkelbaner med en vilkårlig radius. Faktisk viser det sig, at der opstår en grænse tæt på det sorte hul, indenfor hvilken stabile cirkelbaner ikke længere er mulige. Denne grænse definerer dermed også grænsen for tilvækstskiven om et sort hul. Det viser sig yderligere, at grænsen for stabile cirkelbaner er forskellig alt afhængig af, om det sorte hul roterer eller ej (faktisk afhænger den også af hvilken vej det sorte hul roterer i forhold til tilvækstskiven). Her er altså en indikator på, hvorvidt et sort hul roterer eller ej. Hvis afstanden fra den indre kant på tilvækstskiven til midten af det sorte hul kan måles, kan det afgøres, hvorvidt det sorte hul roterer eller ej.

Der findes i øjeblikket tre forskellige metoder til at afgøre, om et sort hul roterer eller ej:

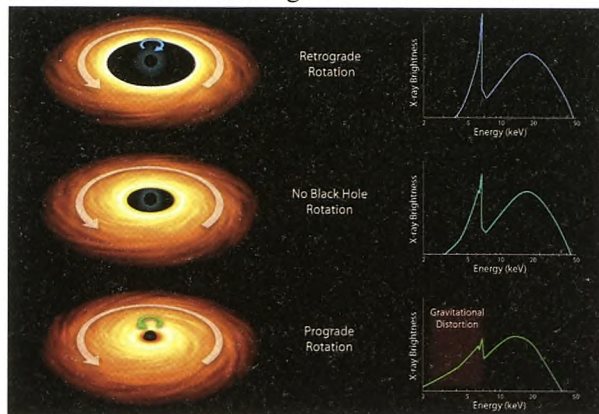
1. Tilpasning af modeller til kontinuumsdelen af røntgenspektret [5]
2. Tilpasning af modeller til en emissionslinje fra jern [6]
3. Modellering af de kvasiperiodiske oscillationer (KPO), der observeres i tilvækstskiverne [7].

I skrivende stund er det metode 2, der har den største succes på baggrund af observationer, så derfor vil vi i det følgende kigge nærmere på netop denne metode og et af dens mere opsigtsvækkende resultater.

Måling af rotation

I jernemissionsmetoden benyttes det, at jern har en emissionslinje, der ligger ved en energi på cirka 7 keV. Der er bred enighed om, at denne emissionslinje bliver dannet tæt på den indre kant af tilvækstskiven, hvor fotoner opnår en energi, der er høj nok til at blive absorberet af et jernatom. Dette medfører, at jernatomet

smider en af sine egne elektroner fra K-skallen ud, hvormed en elektron fra L-skallen falder ind i K-skallen og tager den udsendte elektrons plads. I denne proces udsendes en foton med en energi på omkring 7 keV. Hvis disse fotoner bliver udsendt i retning af vores teleskoper, vil vi se strålingen som en del af den såkaldte refleksionsstråling fra tilvækstskiven.



Figur 4. Skematisk oversigt over tilvækstskivens udseende samt røntgenspektret udsendt derfra for forskellige konfigurationer af sorte huller. Kilde: NASA/JPL-Caltech.

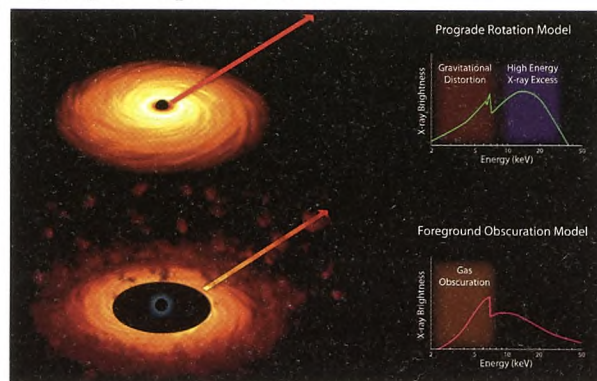
Emissionslinjer observeres ofte som meget smalle, men netop K-linjen fra jernatomet observeres som værende meget bred. Dette skyldes, at fotoner udsendt nær den indre kant af tilvækstskiven påvirkes kraftigt af ikke-Newtonske effekter på grund af tilstedeværelsen af det sorte hul. Placeringen af den inderste stabile cirkelbane vil påvirke, i hvor stor grad disse ikke-Newtonske effekter ændrer på emissionslinjen. Så ved at observere K-linjen og tilpasse teoretiske modeller til observationerne kan man bestemme radius på den inderste stabile cirkelbane og igennem denne finde ud af, om det sorte hul roterer eller ej. På figur 4 kan man se, hvorledes rotationen af det sorte hul påvirker radius på det centrale hul i tilvækstskiven, samt hvorledes rotationen påvirker røntgenspektret og K-linjen fra jern. Roterer det sorte hul modsat tilvækstskiven (retrograd rotation), vil det centrale hul blive meget stort, og jernlinjen bliver meget smal og får en høj intensitet. Er det modsatte tilfældet, hvor det sorte hul og tilvækstskiven roterer samme vej (prograd rotation), vil jernlinjens intensitet blive meget lavere, og linjens profil bliver bredere. Midt imellem disse to tilfælde kan man på figur 4 se, hvorledes røntgenspektret ville se ud, såfremt det centrale sorte hul ikke roterede.

Til at observere røntgenspektret udsendt fra tilvækstskiven benyttes rumteleskoper. Her er det især ESAs XMM-Newton (der måler røntgenfotoner med energier mellem 2 og 10 keV) og NASAs NuSTAR (der måler røntgenfotoner med energier mellem 10 og 60 keV), der benyttes. Netop disse to satellitter blev i de første måneder af 2013 benyttet til at finde den første observationelle evidens på, at sorte huller rent faktisk roterer.

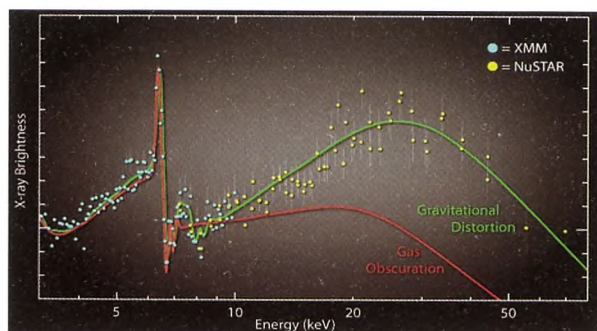
Støv i vejen

Som med alle astronomiske observationer er en af de største årsager til fejlfortolkninger tilstedeværelsen af

støv mellem objektet, der observeres, og teleskopet. Hvis et Schwarzschild-sort hul befinder sig bag en masse støv, vil røntgenspektret ligne spektret fra et Kerr-sort hul. Dette kan ses på figur 5, hvor den prograde rotationsmodeller og et Schwarzschild-sort huls røntgenspektre sammenlignes. De meget stærke gravitationelle effekter fra det roterende sorte hul i prograd rotationsmodellen har den største effekt på de lave energier i røntgenspektret. Desværre er det også her, at støv vil have den største effekt, hvorfor det kan være vanskeligt at skelne de to situationer fra hinanden. Her er det dog heldigt, at de to modeller giver hver sin forudsigelse for de høje energier i spektret. Tilstedeværelsen af støv vil resultere i, at de høje energier vil have en meget flad energifordeling, mens tilstedeværelsen af et roterende sort hul vil resultere i et overskud af højenergetiske fotoner. Det er derfor meget vigtigt, at man observerer både de lav- og højenergetiske fotoner fra røntgenspektret på samme tid.



Figur 5. Skematisk sammenligning af to meget forskellige astrofysiske modeller for den observerede røntgenstråling. Øverst ses et roterende sort hul samt røntgenspektret udsendt fra tilvækstskiven. Nederst ses en model, hvor det sorte hul ikke roterer, men spektret til gengæld påvirkes af støv og gas, der ligger mellem tilvækstskiven og teleskopet. Kilde: NASA/JPL-Caltech.



Figur 6. Målinger af røntgenspektret fra NGC 1365 taget med ESAs XMM-Newton og NASAs NuSTAR røntgensatellitter. En klar overensstemmelse med en model med et roterende sort hul ses. Kilde: NASA/JPL-Caltech/ESA/CfA/INAF og ESA.

I juli 2012 blev XMM-Newton og NuSTAR begge rettet mod centret af galaksen NGC 1365. Her observerede de røntgenstråling i omkring 36 timer. Der var altså tale om samtidige målinger af både den lavenergetiske og den højenergetiske del af røntgenspektret. På figur 6 ses resultaterne af disse observationer [8]. Her fremgår en tydelig forskel på de to modeller, der senere er blevet

benyttet i dataanalysen. Den røde linje er en model, hvor det centrale sorte hul ikke roterer, men hvor støv absorberer en del af røntgenstrålingen på dens vej til os, mens den grønne linje er en model, hvor det centrale sorte hul roterer. Det fremgår tydeligt på figuren, at observationerne matcher en model med et meget hurtigt roterende sort hul fremfor en model, hvor støv og gas absorberer fotonerne. De teoretiske modeller for de to forskellige astrofysiske situationer er begge kun tilpasset til den lavenergetiske ende af røntgenspektret (målingerne fra XMM-Newton), men på trods af dette

passer observationerne fra NuSTAR meget overbevisende med modellen for det roterende sorte hul. Denne overensstemmelse mellem observationer og model blev benyttet til at konkludere, at det centrale sorte hul i NGC 1365 er et Kerr-sort hul, der roterer næsten lige så hurtigt, som det tillades af Einsteins relativitetsteori.

Som tidligere nævnt er der andre metoder til at bestemme rotationsparametren for sorte huller. I tabel 2 opsummeres resultater, som er fremkommet ved brug af alle tre metoder.

Objekt	Rotationsparameter (GJ/Mc^3)	KF	Fe K linje	KPO	Kommentar
Cyg X-1	0,92-0,95	✓			
GRO J1655-40	0,94	✓		✓	Begge metoder viser tegn på meget hurtig rotation.
GRS 1915+105	0,55-0,98	✓	✓	✓	Forskellige metoder giver afvigende resultater.
NGC 1365	> 0,84		✓		
XTE J1550-564	-0,11-0,71	✓	✓	✓	Forskellige metoder stemmer ikke overens.
H1743-322	-0,3-0,82	✓		✓	Massen kendes ikke, og dette medfører stor usikkerhed på rotationsparametren.

Tabel 2. Oversigt over rotationsparametre bestemt for forskellige sorte huller, og hvorledes disse parametre er blevet bestemt. Rotationsparameteren er begrænset til værdier mellem -1 og 1 og vil have et positivt fortegn for prograd rotation, mens den vil have et negativt fortegn for retrograd rotation. KF er en forkortelse for metode 1, Fe K linje for metode 2, mens KPO er metode 3.

Fremtidsudsigter

Sorte huller er nogle af de mest ekstreme objekter, der findes i Universet. Deres enorme tyngdekraft skaber et perfekt laboratorium for studiet af fysik under påvirkning af meget stærk tyngdekraft. Siden opdagelsen af det første sorte hul i 1970'erne har disse objekter fascineret både forskere, forfattere og enhver, der kender til deres eksistens. Indtil videre har Einsteins relativitetsteori forudsagt sorte hullers opførsel meget præcist, og ingen observationer har endnu kunnet modsige relativitetsteoriens forudsigelser. Her er roterende sorte huller et meget aktuelt eksempel på, hvorledes studiet af sorte huller kan bruges som en test af relativitetsteoriens begrænsninger.

Sorte huller er dog ikke et lukket forskningsområde, da der fortsat er mange uløste problemstillinger. Disse inkluderer den teoretisk forudsagte Hawkingstråling [9], der endnu ikke er blevet bekræftet observationelt, samt hvorvidt der ved grænsen til begivenhedshorisonten vil befinde sig en såkaldt 'firewall' [10], der vil riste ethvert legeme, der falder gennem begivenhedshorisonten. Under alle omstændigheder er der rigeligt med løse ender at tage fat på.

Litteratur

- [1] Schwarzschild, K. (1916), Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie. *Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Berlin (Math. Phys.)*, bind 7, side 189-196.
- [2] Kerr, R. P. (1963), Gravitational field of a spinning mass as an example of algebraically special metrics. *Phys. Rev. Lett.*, bind 11, side 237-238.

- [3] Nordström, G. (1918), On the Energy of the Gravitational Field in Einstein's Theory. *Proc. Kon. Ned. Akad. Wet.*, bind 20, side 1238-1245.
- [4] Newman, E. T. et. al. (1965), Metric of a Rotating, Charged Mass. *J. Math. Phys.*, bind 6, side 918-919.
- [5] Gou, L. et. al. (2011), The extreme spin of the black hole in Cygnus X-1. *ApJ*, bind 742, side 85-101.
- [6] Blum, J. L. et. al. (2009), Measuring the spin of GRS 1915+105 with relativistic disk reflection. *ApJ*, bind 706, side 60-66.
- [7] Mukhopadhyay, B. (2012), Observational evidences for spinning black holes: A proof of general relativity for spacetime around rotating black holes. *Int. J. of Mod. Phys. D*, bind 21.
- [8] Risaliti, G. et. al. (2013), A rapidly spinning supermassive black hole at the centre of NGC 1365. *Nature*, bind 494, side 449-451.
- [9] Hawking, S. W. (1974), Black hole explosions?. *Nature*, bind 248, side 30-31.
- [10] Almheiri, A. et. al. (2013), Black holes: complementarity or firewalls? *JHEP*, bind 62.



Kristian Jerslev er kandidatstuderende i astronomi på Aarhus Universitet. Artiklen er skrevet på baggrund af hans bachelorprojekt om observationel detektion af roterende sorte huller, som han også forventer at arbejde med i sit speciale.