Sorte huller

I.D. Novikov, Københavns Universitets Astronomiske Observatorium

Et sort hul er det mest fantastiske objekt i universet. Det er af en karakter og beskaffenhed, som langt overgår, hvad fantasien rækker til, og hvad der er skabt af mennesker.

Den opfattelse vi har nu er, at sorte huller er huller i rum og i tid. De gemmer i deres indre forbløffende fysiske processer. De grundlæggende fysiske principper for et sort hul er imidlertid ganske simple.

Lad os gøre følgende tankeeksperiment. Vi komprimerer en vis masse, f.eks. en stjerne. Tyngdekraften på stjernens overflade vil da vokse. Der skal derfor større og større hastigheder til, for at et legeme netop kan undslippe stjernens tyngdekraft og fortsætte til evig tid i rummet - dette er den såkaldte undvigelseshastighed. På et tidspunkt under sammentrækningen vil undvigelseshastigheden blive lig med lyshastigheden. Ved en yderligere lille sammenpresning vil undvigelseshastigheden blive større end lyshastigheden. Nu kan selv lys ikke undslippe fra den sammenpressede stjerne, hvilket heller ikke andet kan, idet intet kan bevæge sig med større hastighed end lyset.

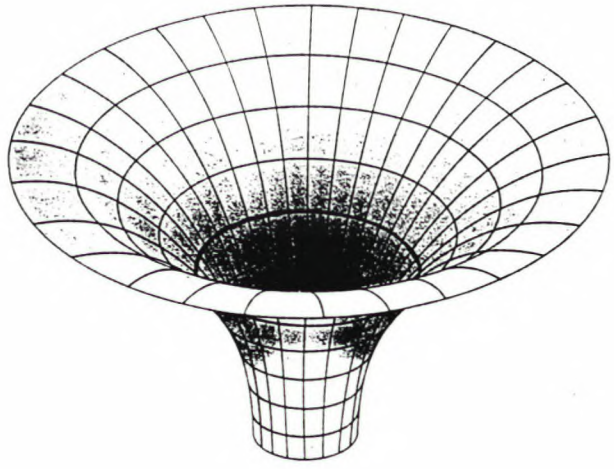
Nu har vi en stjerne, som omverdenen ikke kan se. Den er sort. Sådanne objekter kaldes for sorte huller. For at danne en usynlig stjerne er det nødvendigt at komprimere f.eks. solen ned til en radius på blot tre km. Denne kritiske størrelse kaldes for den gravitationelle radius, og dens værdi er proportional med stjernens masse.

Den berømte franske matematiker og astronom Pierre Laplace og den engelske præst og geolog John Michell benyttede denne idé, i henholdsvis 1795 og 1783, til at gøre opmærksom på den mulighed, at der kunne eksistere sorte huller i universet. Pierre Laplace påpegede, at istedet for en komprimering af en stjerne kunne man tilføre ny masse uden at ændre massetætheden. Resultatet ville blive det samme - forøget tyngdekraft og dannelse af en usynlig stjerne. Hans konklusion var utvetydig: ''Det er derfor muligt, at de største legemer i universet er usynlige.''

Dette var en imponerende forudsigelse og det var faktisk sandheden men dog ikke hele sandheden. Men hvorfor var det så ikke det? Årsagen var, at dengang vidste man endnu ikke, at Newtons teori om tyngdekraften ikke gjaldt for meget store tyngdekræfter.

Einsteins Univers

I begyndelsen af vort århundrede udviklede Albert Einstein en ny teori for tyngdekraften, gældende for de meget stærke gravitationelle felter, der er i omegnen af et sort hul. Ifølge Einsteins teori vil der ske det, at når man bevæger sig mod et tungt kompakt objekt, bliver rumgeometrien forskellig fra den velkendte Euklidiske geometri; man kan sige at rummet bliver mere og mere krumt. Det er naturligvis svært at forestille sig et krumt rum, men den to-dimensionale analogi på figur 1 kan være til hjælp. Figuren viser, hvordan rummet forvrides af tyngdekraften fra et sort hul. Fjernt fra hullet er



Figur 1. To-dimensional analogi til det krumme rum i nærheden af et stærkt tyngdefelt fra et sort hul.

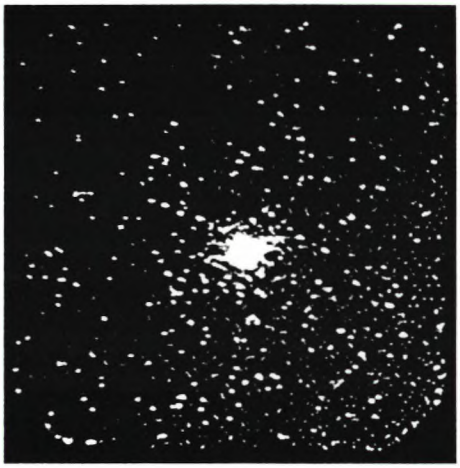
tyngdekraften svag og rummet er derfor ''fladt'' (dvs. det opfylder den Euklidiske geometri). Tæt på det sorte hul er tyngdekraften stærk, og rummet er meget krumt.

Man kan faktisk se, at det ligner et rigtigt hul i rummet. På den anden side påvirker tyngdekraften tiden. Fjernt fra et sort hul går ure deres normale gang, men pga. tyngdekraftens tidspåvirkning vil ure gå langsommere tæt på et sort hul og de går helt i stå på kanten af et sort hul. Tiden stopper fuldstændigt her. Så derfor ser et sort hul ud som et hul i både rum og tid.

Hvis et sort hul var dannet ud fra et roterende legeme ville, ifølge Einsteins teori, alt i nærheden af et sort hul blive trukket med af det hvirvlende tyngdefelt. Vi kan sige det således, at selve rummet er trukket med af hullets rotation.

Endelig må det tilføjes, at tyngdekraften på kanten af et sort hul går mod uendelig. Det betyder, at hvis en stjerne er komprimeret til en meget lille størrelse og danner et sort hul, vil ingen kræfter i universet kunne forhindre det totale kollaps af stjernen til et enkelt punkt i centret af det sorte hul. Alt kan falde ind i det sorte hul, men intet kan undslippe det. Selv nu, før diskussionen om de mulige meget interessante processer i omegnen af et sort hul, tror jeg, man vil være enig med mig i, at sorte huller er enestående fænomener.

På randen af et sort hul er der intet stof, kun tomt rum. Fysikere kalder dette tomme sted for ''begivenhedshorisonten''. Når det sorte hul en gang er dannet ved komprimering



Figur 2. Dette fotografi viser himlen som den ser ud i røntgenfrekvensområdet. Den klare kilde er Cygnus X-1, et potentielt sort hul. Billedet er taget af The High Energy Astrophysical Observatory 2, der er i omløb om jorden.

af masse til meget lille størrelse, består det af krumt rum og tid, tæt sammenslynget i hinandens struktur, hvilket man ikke kunne forestille sig før Einsteins teori. Forskning i sorte huller fører til en dybere forståelse af rum og tid - gældende for alle processer i universet.

Det har taget mere end et hundrede og halvtres år for astronomer at acceptere sorte huller som en seriøs forudsigelse af teorien. Indtil midt i tresserne anså mange astronomer universet for at være et pænt og velordnet sted, hvori de fleste fænomener var kendte og velforståede - sådan et sted var der ikke plads til noget så bizart som et sort hul. Denne holdning blev dog gjort til skamme midt i tresserne med opdagelsen af aktive galaksekerner og af kvasarer, som udsender stråling svarende til tusind milliarder stjerner fra et område på størrelse med solsystemet. I 1967 blev neutronstjerner opdaget. Disse usædvanlige stjerner er slutstadiet i udviklingen af en normal stjerne med moderat masse - ikke større end nogle få solmasser. Neutronstjerner er så sammenpressede af tyngdekraften, at de har en radius på kun ca. 10 km (solen har en radius på 700.000 km).

Teorien for stjerneudvikling viser sig at føre til den uundgåelige konklusion: Tunge stjerner med slut-masser større end tre gange solens masse må, når de afslutter deres liv, blive til sorte huller. En døende tung stjerne må føre til en stjernerest, der er for tung til at kunne bære sin egen tyngde og derfor er dømt til sammenfald, til at trække sig sammen og danne et sort hul.

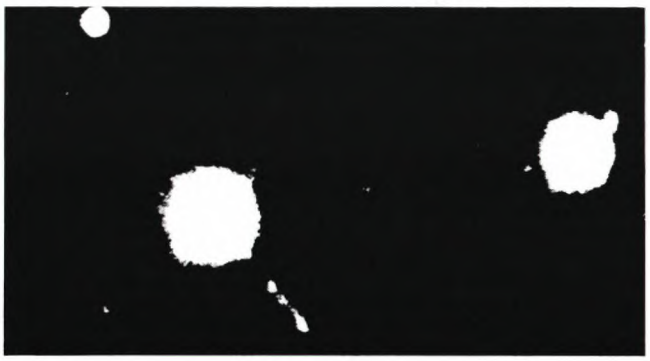
Symmetrien bag de sorte huller

Efter opdagelsen af neutronstjerner var det de sorte hullers tur til at blive opdaget. Men hvordan? For at kunne besvare dette spørgsmål, er det nødvendigt at kende egenskaberne af sorte huller. Tilfældigvis havde jeg min andel i det næste kapitel i historien om udforskningen af sorte huller.

Efter at have afsluttet mine videregående studier, kom jeg med i Professor Jakov Zel'dovichs gruppe på Instituttet for Anvendt Matematik i Moskva. På det tidspunkt havde jeg allerede i flere år været optaget af problemet angående dannelsen af sorte huller i tilfælde af en sammentrækning af et ikke-symmetrisk legeme. Hvilken form ville et sort hul have i dette tilfælde? Hovedsagen er, at på det tidspunkt gav teorien kun en beskrivelse af dannelsen af et sort hul i tilfældet for sammentrækningen af en sfærisk symmetrisk stjerne. Einsteins teori er alt for kompliceret til en direkte beregning af processen for dannelsen af et sort hul i det generelle tilfælde med sammentrækningen af et asymmetrisk legeme.

Dette er et væsentligt problem idet naturen aldrig indeholder et fuldstændig sfærisk legeme. Hvad nu, hvis det sammenfaldende legeme er asymmetrisk? Vil der da opstå et sort hul som følge af sammentrækningen? Og hvis svaret er "ja", hvilken form vil dette sorte hul da få? Vi - Professor Zel'dovich, min ven og jævnaldrende Dr. Doroshkevich og jeg - startede på at løse dette problem. Som jeg har nævnt, var direkte beregninger umulige. Sådanne beregninger kræver supercomputere, der endnu ikke var konstruerede i begyndelsen af 1960'erne.

Heldigvis var jeg uddannet på det Matematiske Fakultet ved Moskvas Universitet, hvor et meget stærkt team af professorer underviste os i matematiske tricks, som kunne bruges til at løse meget komplicerede problemer. I dette specielle tilfælde benyttede jeg metoden "reductio ad absurdum". I stedet for at regne på sammentrækningsprocesserne og tidsvariationerne af tyngdefeltet, betragtede vi mulige slutstadier og demonstrerede, at de alle, med undtagelse af én, førte til absurditeter. Vi viste faktisk, at hvis formen af et sort hul var asymmetrisk, ville dets størrelse blive uendelig stor. Men dette er jo det rene sludder!



Figur 3. Kvasaren 3C 273, hvis afstand fra jorden er ca. to milliarder lysår. Bemærk den lysstærke jet, der udsendes fra kvasarens kerne.

Dette betyder at alle sorte huller må være symmetriske, altid sfæriske, eller hvis de roterer, rotationssymmetriske.

Vores arbejde var et interessant eksempel på, hvordan man kan drage rigtige konklusioner angående konsekvensen af et fænomen, som er alt for kompliceret til at kunne beregnes.

Efter vores arbejde blev forskningen udviklet af andre specialister - Werner Israel, Brandon Carter, Stephen Hawking - og nu mener vi, at alle sorte huller er identiske. De afviger kun ved deres masser, og som et resultat af det, ved deres størrelser. Hvis et sort hul roterer, er der yderligere en parameter - vinkelhastigheden - men ingen andre detaljer.

Disse manglende ansigtstræk ved de sorte huller fik den amerikanske fysiker John Wheeler til at fremkomme med følgende aforisme: ''Sorte huller har ikke hår''. (''Black holes have no hair''). Så sorte huller er i en vis forstand meget enkle objekter. Ingen signaler kommer fra deres indre. De kan karakteriseres ved blot to parametre - masse og rotationshastighed. Alle andre legemer i universet er mere komplicerede. En stjerne f.eks. eller det menneskelige legeme består af mange milliarder partikler og kan ikke beskrives ved blot to størrelser, som et sort hul kan.

Denne bemærkelsesværdige enkelhed ved sorte huller fik engang den amerikanske fysiker Kip Thorne til at udtale følgende bemærkning: ''Det ville svare til at kunne slutte sig til samtlige egenskaber ved en kvinde blot man kendte to parametre: Hendes vægt og hendes hårfarve''.

Observationer af et sort hul

Lad os nu vende os mod de astronomiske observationer. Hvordan kan sorte huller påvises, når de hverken udsender eller reflekterer lys? Bemærk, at sorte huller er ekstremt små på en astronomisk skala - kun et par kilometer i de tilfælde, hvor sorte huller er dannet fra stjerner.

De første forsøg på at finde sorte huller, der blev foretaget af astronomer i 1960'erne, var ikke succesrige, og dette er ikke særlig overraskende. De mindede i høj grad om diskussionen mellem Kongen og Alice i Lewis Carrolls eventyr: Kongen spørger Alice om hun kan se nogen på vejen.

> ''Nej, jeg ser ingen på vejen'', sagde Alice.
> ''Ak, hvor ville jeg ønske, at *jeg* havde sådan nogle øjne!'', sagde Kongen irriteret. ''Tænk, at kunne se *ingen*! Og så oven i købet på så lang afstand!''.

Mon der findes betingelser i universet, under hvilke et usynligt sort hul bliver synligt? Ja, sådanne betingelser er mulige. De opstår f.eks. hvis det sorte hul er i et tæt dobbeltstjernesystem, i hvilket den anden komponent er en normal kæmpestjerne. I dette tilfælde vil der være en kraftig strøm af gas fra yderlaget af den normale stjerne over på det sorte huls tyngdefelt. Gassen i sådan et dobbeltstjernesystem kan ikke blot falde lige ned på det sorte hul. Rotationsbevægelsen får det til at danne en tilvækstskive omkring det sorte hul. Friktion mellem gaslagene opvarmer gassen til 10^7 Kelvin (selv før den synker ned i det sorte hul). En gas der er opvarmet til denne temperatur udsender røntgenstråling.

Vi konkluderer, at sorte huller skal søges blandt tætte dobbeltstjerner ligesom neutronstjerner. Denne forudsigelse blev foretaget af Hayakawa, Matsouka, Prof. Zel'dovich og mig selv midt i 1960'erne, kort efter at de første røntgenkilder var opdaget, og den blev yderligere udviklet af Shklovsky, Cameron, Mok og andre.

For at lede efter røntgenkilder på himlen, er det nødvendigt med røntgenteleskoper uden for atmosfæren. Sådan et teleskop installeret på UHURU satellitten opdagede et antal røntgenkilder i dobbeltstjernesystemer i 1972.

Hermed begyndte en ny æra for røntgenastronomien. Kun et stærkt tyngdefelt fra et meget kompakt objekt kan bevæge en gas med anselig hastighed og opvarme den til 10^7 Kelvin. Et kompakt objekt kunne være enten en neutronstjerne eller et sort hul. Men man må huske på, at massen af en neutronstjerne ikke kan være større end tre gange solens masse. En analyse fastslog, at mindst en af de identificerede dobbeltstjerners røntgenkomponent havde en masse, der var væsentligt over denne kritiske masse. Denne kilde ligger i stjernebilledet Cygnus og er nu kendt som Cygnus X-1.

Den normale synlige stjerne i dette dobbeltstjernesystem er en tung stjerne på omkring 30 gange solens masse. Den er kendt som HD 226868. Massen af dens ledsager, hvis omegn udsender røntgenstråling, er omkring 10 gange solens masse. Det er betydeligt mere end den kritiske masse. Tilvækstskiven omkring det sorte hul har en diameter på ca. $4 \cdot 10^6$ km. I de inderste 200 km over det sorte hul er der ekstremt varmt, og det er herfra der udsendes røntgenstråling. Teorien om tilvækstskiven blev udviklet af Shalura og Sunyaev, og videreudviklet i flere detaljer af Thorne og jeg selv, Lynden-Bell, Rees, Abramowizc, og mange, mange andre. Man kan derfor sige med en vis sikkerhed, at opdagelsen af det allerførste sorte hul i universet er sket, og at dette sorte hul befinder sig i det system, der indeholder Cygnus X-1 kilden.



Figur 4. Galaksen Messier 87, der har en aktiv kerne. Fotometri af det centrale område sammen med målinger af stjernernes hastighedsdispersion tyder på, at der er en central masse på flere tusind millioner gange solens masse.

To til tre kilder magen til Cygnus X-1 er blevet opdaget i de seneste år; de er alle kandidater til familien af sorte huller.

Kvasarer indeholder kæmpemæssige sorte huller

Indtil videre har vi diskuteret dannelsen af sorte huller fra objekter, der oprindelig var stjerner. Astronomer har god grund til at tro, at andre sorte huller, med en helt anderledes dannelseshistorie, også eksisterer.

Som jeg har nævnt tidligere, blev de meget usædvanlige stjernelignende objekter - kvasarer - opdaget i begyndelsen af 1960'erne. De er fantastisk kraftige energikilder. Deres lysstyrker overstiger sommetider hundrede store galaksers. Det blev hurtigt fastslået, at deres centrale drivkraft måtte være et meget kompakt objekt ikke meget større end vores solsystem.

På trods af den forholdsvis lille lineære udstrækning af kvasarerne, viste deres masser sig at være uhyre store - af størrelsesorden millioner gange solens masse. Store masser og små størrelser fører til tilstedeværelsen af et meget intenst tyngdefelt, og mistanken faldt på sorte huller.

Så tidligt som i 1964 foreslog Jakov Zel'dovich, jeg selv og den amerikanske astronom E. Salpeter, at centret i kvasarer kunne bestå af et supertungt sort hul, som kunne forklare alle de ekstraordinære egenskaber ved disse objekter.

I dag tror de fleste specialister, at drivkraften i en kvasar består af et kæmpemæssigt sort hul med en masse svarende til millioner gange solens masse. Diameteren af et sådant sort hul er en milliard kilometer. Det er blevet klart over de sidste ti år, at kvasarer er enormt aktive, strålende kerner af store galakser. Ganske ofte afsløres en intensiv gasstrøm i og fra dem.

Det blev også opdaget, at kernen i mange galakser minder om "baby kvasarer", som nogle gange udviser voldsom aktivitet (udsendelse af gas, variation i lysstyrken, etc.), som dog er mindre kraftig end rigtige kvasarers. Vi kalder dem aktive galaksekerner. Der er noget, der tyder på en vis lighed mellem de processer, der foregår i kvasarer og dem der foregår i ganske almindelige galakser som vores egen.

Indfaldet af gas mod et supertungt sort hul må være ledsaget af lignende fænomener som for indfald af gas mod et sort hul, der er opstået ved sammenfald af en stjerne. Imidlertid må disse processer dog, alt andet lige, være langt kraftigere. Desuden må centrum af kvasarerne være områder, hvor elektrisk ladede partikler bliver accelereret af oscillerende magnetiske felter båret mod det sorte hul af den indfaldende gas.

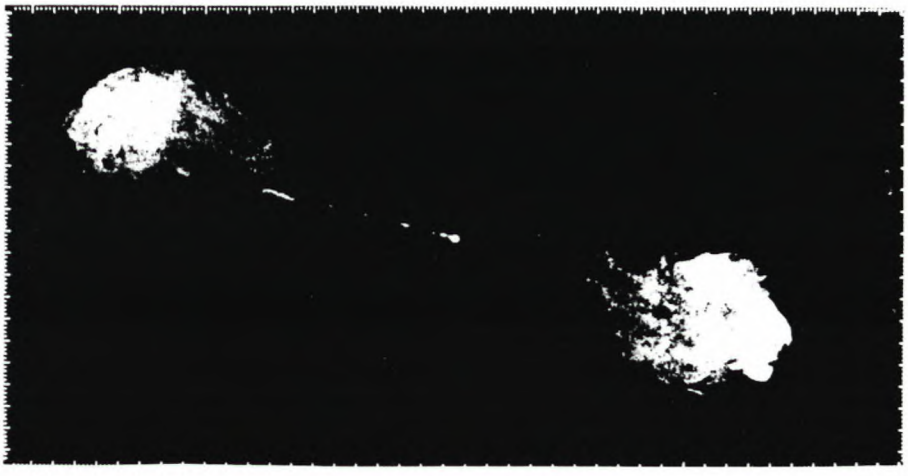
Under dissse betingelser kan et roterende sort hul fungere som en kæmpe stor dynamo. De amerikanske fysikere Blandford og Znajek viste i 1970'erne, at hvis et roterende sort hul befinder sig i et ydre magnetfelt, vil et kraftigt elektrisk felt blive genereret i området. Hvordan er dette muligt? Som læseren sikkert husker, er det magnetiske felt her båret af den interstellare gas, som falder mod det sorte hul. Dynamoen vil producere strøm lige så snart et ydre elektrisk kredsløb er opstået. Således kan ladede partikler genereret omkring et sort hul, som følge af vekselvirkningen mellem strålingen og de tilstedeværende partikler, resultere i et sådant ydre kredsløb.

Alt i alt vil disse processer resultere i dannelsen af en kvasar og i aktiviteten i en galaksekerne.

Ovenstående eksempel med et roterende sort hul, der virker som en kæmpe stor dynamo, er meget typisk.

Planlagte observationer

For en fjern iagttager vil et sort hul se ud, som om det har en overflade med en vis elektrisk ledningsevne og visse mekaniske egenskaber. Men selvfølgelig eksisterer sådan en overflade ikke! En iagttager kunne overbevise sig om dette ved at starte en rejse ind i hullet. Ikke desto mindre er forestillingen om en tilsyneladende overflade meget praktisk i nogle tilfælde, ligesom det kan være praktisk i astronomien at forestille sig, at himlens objekter bevæger sig på indersiden af en himmelkugle. Der findes ikke sådan en himmelkugle, men forestillingen om den gør både planlægning af



Figur 5. Et billede, i radiofrekvensområdet, af kæmperadiogalaksen - Cygnus A. Denne kraftige radiokilde har store jets, som svarer til udsendelse af gas langs symmetriaksen af et supertungt roterende sort hul omgivet af en tyk tilvækstskive.

observationer og beregningen af koordinater for himmelobjekterne nemmere.

Denne forestilling om en imaginær overflade af et sort hul - dens ''membran'' - blev introduceret første gang i astrofysikken af Kip Thorne og hans medarbejdere. De viste at inden for rammerne af membranteorien blev kompliceret matematik ofte enklere.

Men lad os vende tilbage til de astrofysiske aspekter. Det er højst sandsynligt at supertunge sorte huller eksisterer. Den franske forfatter Jules Renard sagde engang: ''En forsker er en person, som er næsten sikker på noget.'' Men som astronomien er, vil jeg undgå sådan en konklusion og opsummere diskussionen med én sætning: Kun yderligere observationer kan afklare situationen.

Københavns Universitets Astronomiske Observatorium planlægger at udføre denne slags observationer. Stjerner, der passerer tæt forbi et sort hul, vil blive splittet ad på grund af de kraftige tidevandseffekter i tyngdefeltet, og resultere i pludselige og kortvarige udbrud. Dette er vigtigt mht. en observationel afsløring af et sort hul, idet det vil give nogle karakteristiske observerbare signaler. Det danske 1,5 meter teleskop på La Silla i Chile og det nordiske 2,5 meter teleskop på den canariske ø La Palma vil blive benyttet til dette.

Dansk oversættelse og bearbejdning af Anja Andersen

Referencer

1) I.D. Novikov: *Black holes and the universe*, Cambridge University Press 1990.
2) J. Barrow og J. Silk: *The left hand of creation: the origin and evolution of the expanding universe*, Basic Books, Heinemann, London, 1983.
3) S.W. Hawking: *Hawkings Univers - De nyeste teorier om tiden og rummet*, Gyldendalske Boghandel 1988.
4) J. Silk: *The Big Bang*, W.H.Freeman, San Francisco, 1980.
5) L. Carroll: *Alice i Eventyr Land og Bag Spejlet*, Gyldendalske Boghandel, Nordisk Forlag A/S 1977.



Igor Novikov er professor ved Københavns Universitets Astronomiske Observatorium. Han har ydet betydelige bidrag til vor viden om sorte huller og deres observationelle manifestation, samt til vor forståelse af det tidlige varme univers. Han arbejder nu med problemstillinger omkring tidevandskræfter i stjerner under gravitationel vekselvirkning med et sort hul, samt med oprindelsen af storskala strukturene i universet.

Denne artikel er baseret på hans tiltrædelsesforelæsning ''Black holes in the Universe''.