

## Svarta hål lyser upp universum

*Svarta hål ger upphov till universums kraftfullaste strålning och till jetstrålar som kan sträcka sig många tusentals ljusår ut i rymden. Roger Blandfords teoretiska arbeten behandlar de våldsamma processer som ligger bakom dessa fenomen. Richard Kerr lade tidigt grunden för denna forskning när han hittade en matematisk beskrivning av roterande svarta hål, vilket blev en av de viktigaste teoretiska upptäckterna i modern kosmologi.*



ESO/WFI (visible); MPIfR/ESO/APEX/A.Weiss et al. (microwave); NASA/CXC/CfA/R.Kraft et al. (X-ray).

De kröker rummet och förvrider tidens gång. Allt som kommer nära ett svart hål faller obönhörligen in. Inget kommer ut, inte ens ljuset slipper undan. Svarta hål förblir osynliga. Längre har de varit ett mysterium, och fortfarande ruvar de på många mörka hemligheter. En hel del har dock numera kommit upp i ljuset och i dag vet vi att ett massivt svart hål kan snurra fort och få sin närmaste omgivning att lysa starkast i hela universum.

Svarta hål är den allmänna relativitetsteoriens märkligaste resultat. När Albert Einstein slutligen presenterade sin teori i november 1915 ställdes alla tidigare begrepp om tid och rum på ända. Istället för den bekanta newtonska tyngdkraften som får äpplet att falla raka vägen mot jorden beskrev Einstein gravitation som en geometrisk egenskap hos rummet och

tiden sammanbundna i en fyrdimensionell rumtid. Gravitationen är enligt Einsteins teori ingen kraft utan en följd av att rumtiden är krökt. Den påverkar även tidens gång – i närheten av en större massa går tiden långsammare, sett utifrån.

Alla massiva rymdobjekt kröker rumtiden, de bildar en grop dit andra mindre kroppar kan falla in. Tyngdkraften är alltså en illusion, äpplet faller ner därför att den följer den bana som jorden med sin massa ger upphov till. Ju större massa desto mer kröker den rumtiden. För små massor och korta avstånd är effekten densamma oberoende om man räknar med Einsteins allmänna relativitetsteori eller med Newtons drygt 200 år äldre rörelselagar.

Att hitta lösningar till den allmänna relativitetsteoriens ekvationer är mycket tekniskt komplicerat. Trots detta kunde den tyske astrofysikern, Karl Schwarzschild, bara några veckor efter publiceringen förse Einstein med en exakt lösning på hur ett gravitationsfält ser ut runt om en sfärisk stjärna som inte roterar. Lösningen innehöll faktiskt en beskrivning av det som senare kom att kallas ett svart hål. Men även om osynliga stjärnor har diskuterats tidigare i historien, dröjde det nästan ett halvt sekel tills något så bisarrt som svarta hål började studeras på allvar. Själva namnet – svarta hål – dök upp först i slutet av 1960-talet.

Schwarzschildts beräkningar visade att det för varje himlakropp gick att bestämma en sfärisk yta, en händelsehorisont. Vid händelsehorisonten stannar tiden (för den som tittar utifrån). Det svarta hålet, om det bildats en gång, håller sig för evigt gömt bakom sin händelsehorisont. Innanför den är rumtiden så krökt att inget ljus kan ta sig ut. Och längst inne döljer sig en avgrund utan botten, en singularitet där densiteten, enligt relativitetsteorin, är oändlig och även rumtidens krökning är oändlig. I singulariteten tar tiden slut. Men relativitetsteorin kan ha fel. För att reda ut vad som verkligen sker i det svarta hålets inandöme krävs en kvantteori för gravitation, och någon sådan teori finns inte än. Ju tyngre hål desto större är händelsehorisonten, alltså det område som avgränsar hålet från omvärlden. För att bilda ett svart hål och försvinna ur vår åsyn skulle jorden behöva tryckas ihop till en radie på cirka nio millimeter, och solen till ungefär tre kilometer.

Långt före Einstein spekulerade forskare rent teoretiskt om att massiva stjärnor borde kunna omvandlas till mycket tunga objekt. Nu, med hjälp av bland annat relativitetsteorin, gick det att räkna ut hur detta kunde gå till. Mot slutet av en riktigt massiv stjärnas liv, med cirka 10 solmassor eller mer, då kärnbränslet sinar och gastrycket utåt minskar allteftersom, har stjärnan allt mindre energi att sätta emot sin egna inåtriktade gravitation. En gravitationell kollaps blir oundviklig. I sitt dödsögonblick exploderar stjärnan som en supernova och kvar blir en extremt tätt sammanpackad rest – en neutronstjärna eller ett svart hål.

En neutronstjärna kan vara bara några kilometer tvärsöver, men ha en massa större än solens. Fast detta gäller bara neutronstjärnor på upp till 2–3 solmassor. Större neutronstjärnor kan inte stå emot gravitationen och då går det inte att hejda en vidare kollaps – den leder obönhörligen till att det bildas ett svart hål. En första beräkning av denna omvandling från en massiv stjärna till ett svart hål leddes i slutet av 1930-talet av fysikern Robert Oppenheimer, senare legendarisk ledare för Manhattanprojektet, det amerikanska atombombsbygget.

Fortfarande betraktades dock de svarta hålen som spekulativa teoretiska vidunder, naturen skulle i själva verket sky dem noga, trodde de flesta. Det kunde också ha berott på ett missförstånd, eftersom det inte var så lätt att få ordning på tidens gång i de olika referensramarna: om man skulle observera en stjärna kollapsa till ett svart hål skulle det ta oändligt lång tid. Det innebär att ett svart hål aldrig skulle formas, resonerade man.

Förklaringen till denna paradox är att allt beror på i vilken referensram som beräkningarna görs. Utifrån stjärnans synsätt skulle kollapsen vara över på mindre än en millisekund ifall stjärnan var några gånger tyngre än solen. John Wheeler var en av få ledande forskare i världen som i början av 1960-talet började intressera sig för svarta hål efter att länge ha tvivlat på deras existens ute i rymden.

Ett genombrott kom med Roy Kerrs lösningar på Einsteins ökänt komplicerade ekvationer för hur rumtiden ser ut kring roterande stjärnor och svarta hål. Nästan femtio år efter att den allmänna relativitetsteorin såg dagens ljus, lyckades Roy Kerr komma med något ingen annan lyckats med. Så när han i juli 1963 skickade in sin korta artikel på 1,5 sida för publicering blev den ett verkligt genombrott.

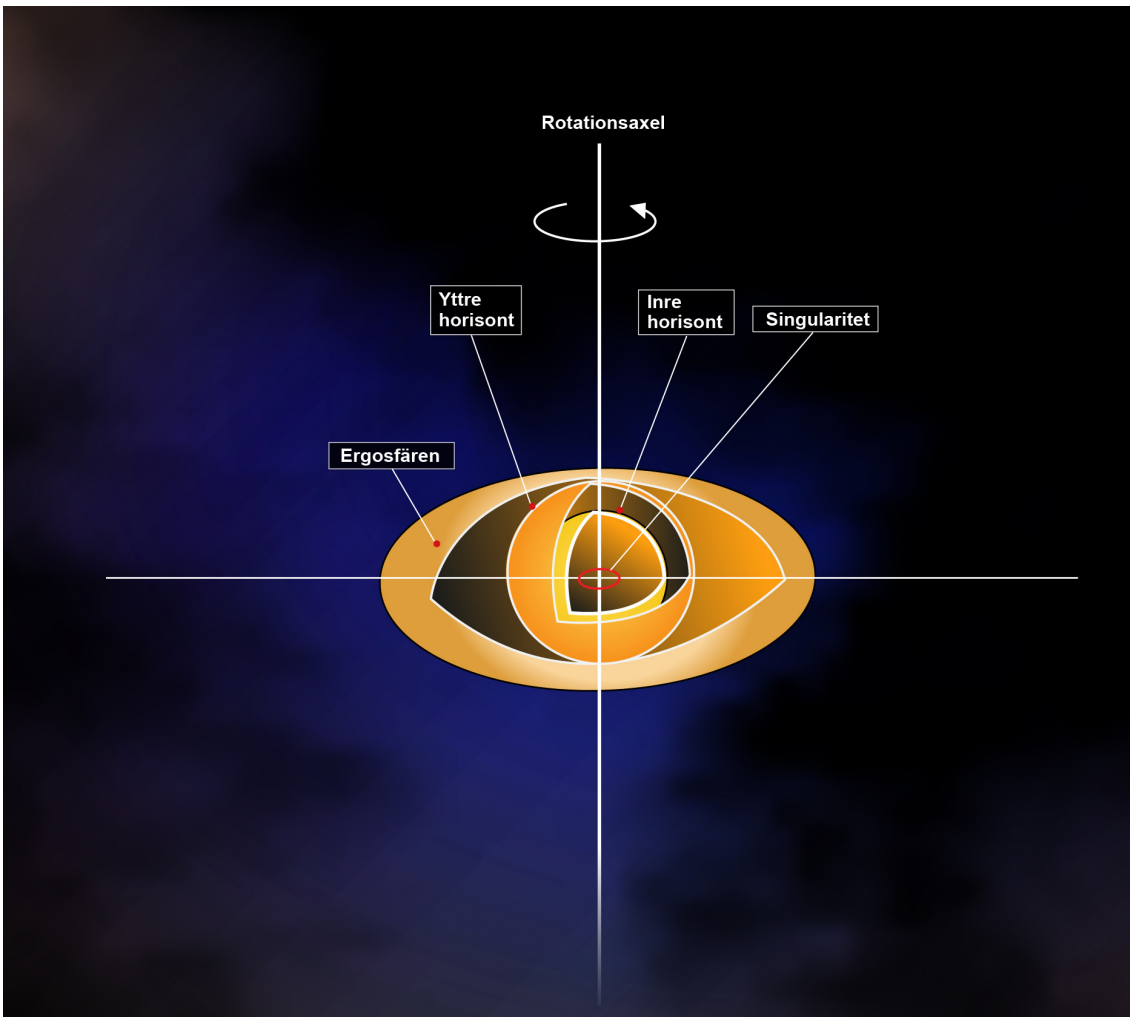
Det var dock inte många då som insåg hur epokgörande Kerrs gärning var. Den tidigare Schwarzschildlösningen för stationära svarta hål var bara en idealbild. Nu var det Kerr som kom närmast en riktig bild av vad som skedde i verklighetens svarta hål, eftersom nästintill alla rymdens stjärnor och svarta hål roterar. Vår sol till exempel snurrar ett varv runt sin axel på mellan 25 och 35 dygn.

Så småningom kom också upptäckten att varje svart hål kan beskrivas fullständigt med bara två egen-

skapar – sin massa och sin rotationshastighet. Hur det än gick till när ett svart hål bildades, är minnet av det förflutna helt dolt inuti det svarta hålet. Ett svart hål kan då te sig som ett enkelt rymdobjekt. Men inget kan vara mer vilseledande, för dess inre kan vara mycket komplicerat.

Kerr visade att rotationen förändrar det svarta hålets omgivning. Det är inte bara så att händelsehorisonten skiljer sig från Schwarzschildmodell, det skapas två viktiga gränser kring det svarta hålet. Sett utifrån kommer först en yttre horisont som inte är helt sfärisk utan tillplattad vid polerna. Innanför den yttre horisonten bildas ytterligare en händelsehorisont som markerar området utan återvändo. Ju närmare man kommer utifrån mot den yttre horisonten, desto långsammare går tiden. Allt som passerar denna horisont dras ohjälpligt med i det svarta hålets rotation, också rumtiden tvinnas runt det svarta hålet.

Mellan dessa två händelsehorisonter ligger ergosfären, ett namn som har att göra med energiproduktion (från grekiskans ergon – arbete). Mycket riktigt är det i processer runtom och inne i ergosfären där det svarta hålets rotationsenergi driver fram den häpnadsväckande starka strålning som kan synas tvärsigenom hela universum. Därifrån skjuts också laddade partiklar ut åt var sitt håll i två smala strålar, jetstrålar, för att färdas hundratusentals ljusår ut i rymden.



Alltsedan mitten av 1970-talet har Roger Blandford bland annat ägnat sig åt frågan om hur energiomvandlingen egentligen går till. De teoretiska modellerna utvecklas allteftersom nya astronomiska observationer strömmar in. Teleskop på jorden och observationer från satelliter förser ständigt forskarna med

alltmer detaljerade bilder av vad som försiggår omkring det svarta hålet.

De mindre svarta hålen, ungefär tio gånger tyngre än solen, hittas oftast som en del av en dubbelstjärna, där partnern är en vanlig stjärna. I dag är cirka 25 sådana dubbelstjärnesystem kända. Starkt röntgenstrålande Cygnus X-1 i stjärnbilden Svanen har blivit arketyper för sådana dubbelsystem då den var det första som upptäcktes redan 1964. Gas från grannen spiller över på det svarta hålet, den virvlar runt och bildar en så kallad ackretionsskiva. Friktionen i skivan får gasen att i spiral strömma in mot det svarta hålets rand. Men innan den helt försvinner hinner gasen hettas upp så mycket att den sänder ut kraftfull röntgenstrålning. Ofta följs de lysande ackretionsskivorna runt om ett sådant svart hål av ett par heta gasutflöden, jetstrålar.

År 1963 upptäcktes flera mäktiga men också gåtfulla källor stråla i radiovågor, som den bländande 3C 273 i Jungfruns stjärnbild. Den lyser 4 000 miljarder gånger starkare än solen. Det var alltför starkt för att komma från en vanlig stjärna och därför döptes det, liksom andra liknande objekt, till *quasistellar radio-source*, *quasar*, eller kvasar på svenska. Dessutom bestämdes avståndet till kvasarerna till flera miljarder ljusår från oss, vilket innebär att de sände iväg sina strålar när universum var ungt. Den äldsta i dag kända kvasaren började stråla starkt ungefär en miljard år efter big bang för knappt 14 miljarder år sedan.

Gigantiska svarta hål är den enda kända energikällan som kan förse kvasarerna med tillräckligt mycket energi inom den begränsade volym som strålningen kommer ifrån. Med en massa på mellan några miljoner till flera miljarder solmassor ligger de svarta hålen i centrum av sina värdgalaxer som matar dem med gas. Även om galaxerna själva kan vara oerhört stora, överglänser oftast kvasarerna dem helt.

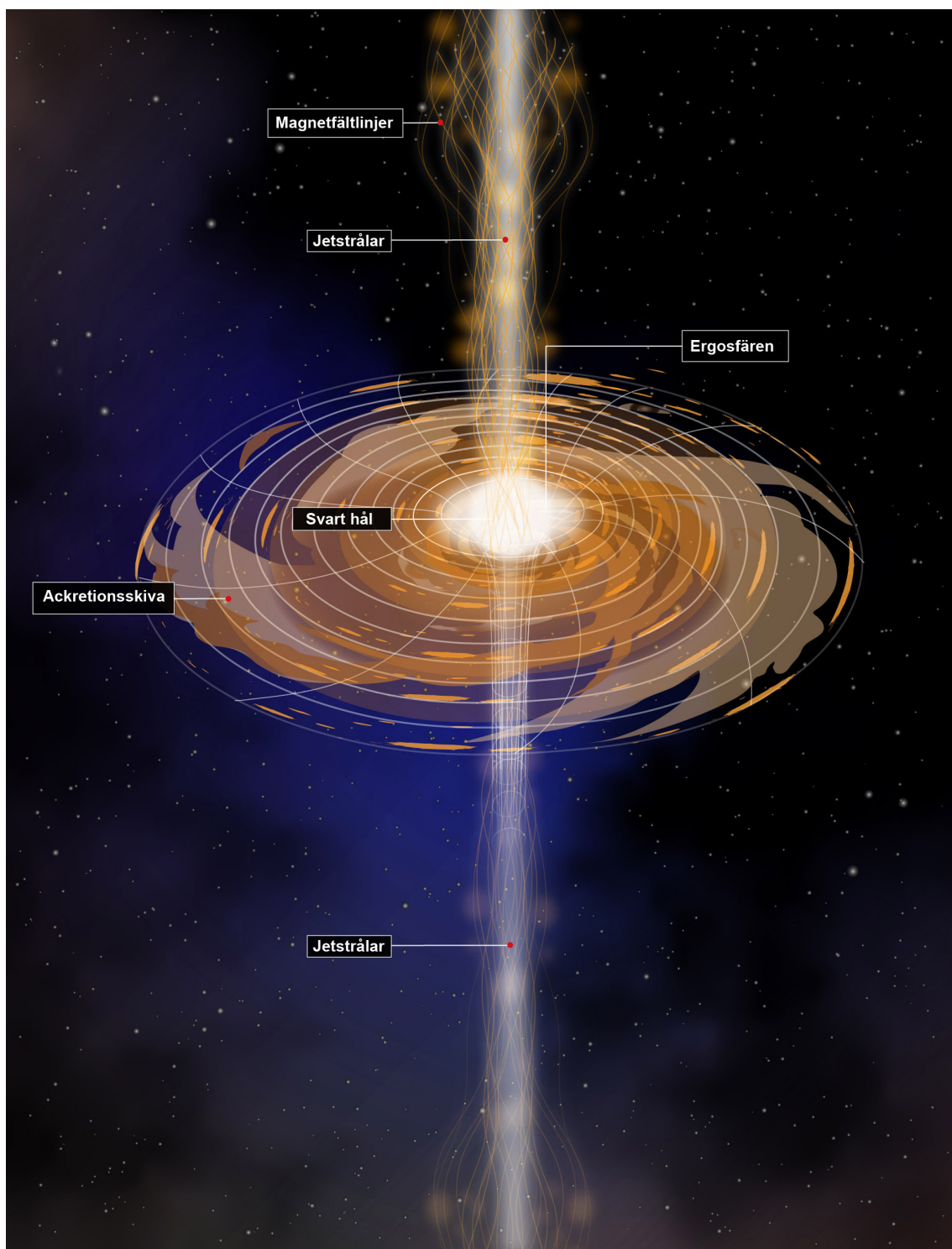
Hur skapas denna enorma strålningsenergi? Hur kan det svarta hålet sända ut två jetstrålar åt motsatt håll? Redan 1977 kunde Roger Blandford och hans kollegor komma med ett förslag till hur detta går till inne i det roterande hålets ergosfär. Nu har modellerna som sagt förfinats och blivit alltmer realistiska.

Magnetfältet är avgörande här, kombinerat med hydrodynamiken, läran om gasrörelser. Gasen som strömmar in, i huvudsak väte, blir så het av friktionen att den glöder och strålar, samtidigt som värmen får väteatomerna att spjälkas i positiva atomkärnor, protoner, och negativt laddade elektroner. Deras rörelser skapar ett magnetfält som spinns runt hålets rotationsaxel. Magnetfältlinjerna flätas samman till en spiral som leder den elektriskt laddade gasen. I form av jetstrålar skjuts gasen ut från det svarta hålet åt två motsatta håll. Jetstrålarna består alltså mest av laddade partiklar som nästan med ljusets hastighet korsar rymden tusentals ljusår bort.

All denna kraft har sin källa i rotationsenergin hos det svarta hålet. I själva verket är dessa processer i ackretionsskivan oerhört effektiva. Roterande svarta hål maktar att omvandla upp till 40 procent av den infallande materiens inneboende energi till strålning. Det är många gånger mer än vad som beräknats för stationära svarta hål. Dessa förmår omvandla bara sex procent av gravitationsenergin till strålning, medan kärnprocesserna inuti stjärnor, som solen, når upp till ynka en procent som mest.

Allt detta arbete gör att det supermassiva svarta hålet förlorar energi och rotationen bromsar in. Med tiden sinar också tillgången på föda hos kvasarernas värdgalaxer. Efter 10 till 100 miljoner år, när gasen i omgivningen glesnat alltmer, slocknar det svarta hålet. I universums unga dagar var tillgången på gas mycket större, därför lyste kvasarerna starkast då.

Men det tar lång tid för ljus att komma fram till oss, även om det färdas med högsta tillåtna hastigheten. Det kvasarljus som vi fångar idag sändes alltså ut för länge sedan när tillgången på materia fortfarande var god under universums unga år. Det kan också hända att om cirkelrörelser i en galax störs, till exempel



genom att den kommer alltför nära en annan galax, så länkas gas och stjärnor mot det mörka svarta hålet i centrum så att kvasaren tänds igen, om bara för en tid.

Också i centrum på vår galax, Vintergatan, finns ett stort, supermassivt svart hål – Sagittarius A\*. Det är mindre än de kända kvasargiganterna, ändå uppskattas det väga cirka fyra miljoner solmassor. Vi är inget undantag, i de flesta galaxer hittas ett svart hål längst in i mitten. Många av dem är som vårt svarta hål – tyst ruvar de därinne och kan ge sig tillkänna bara när stjärnbanorna runt dem studeras. Just sådana studier av Vintergatans svarta hål belönades med Crafoordpriset 2012.

I dag är det ingen som tvivlar på att det finns en stor mängd svarta hål i universum. En del lever ett rätt tillbakadraget liv i centrum på sina galaxer, andra är mer livaktiga och återfinns i de ljusaste dubbelstjärnorna och de kraftfulla kvasarerna. Sammanlagt uppskattas de svarta hålen sända ut så mycket som en tredjedel av all strålning i vårt universum. Fast hur de egentligen fungerar inuti är ännu fördolt, både bokstavligt talat och också för tanken, eftersom vår kunskap om den supertäta materien och den mest ihopkrökta rumtiden ännu är alldeles för bristfällig.

---

## PRISTAGARNA

### **ROY KERR**

Född 1934 (81 år) i Kurow, Nya Zeeland. Fil.dr 1959 vid University of Cambridge, Storbritannien. EmeritusProfessor vid University of Canterbury, Christchurch, Nya Zeeland.  
[www.phys.canterbury.ac.nz/people/kerr.shtml](http://www.phys.canterbury.ac.nz/people/kerr.shtml)

### **ROGER BLANDFORD**

Född 1949 (66 år) i Grantham, Storbritannien. Fil.dr 1974 vid University of Cambridge, Storbritannien. Luke Blossom Professor in the School of Humanities and Sciences, Stanford University, CA, USA.  
<https://physics.stanford.edu/people/faculty/roger-blandford>

---

## LÄNKAR OCH LÄSTIPS

Mer information om årets pris finns på Kungl. Vetenskapsakademiens webbplats,  
<http://kva.se/crafoordpriset> och [www.crafoordprize.se](http://www.crafoordprize.se)

### **Böcker**

Gustafsson, B. 2015. *Svarta hål*. Fri Tanke förlag.

Kip S. Thorne. 1994. *Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy*. W.W. Norton & Company.

Susskind, L. 2008. *Black Hole War: My Battle with Stephen Hawking to Make the World Safe for Quantum Mechanics*. Little, Brown.

### **Vetenskapliga artiklar**

Begelman, M. och Rees, M. 2010. Gravity's Fatal Attraction: Black Holes in the Universe. *Cambridge University Press*.

Melia, F. 2009. Cracking the Einstein Code. Relativity and the Birth of Black Hole Physics. *University of Chicago Press*.