

Slukar svarta hålen också information?

av Filip Jennerholm Hammar

Vad kan vi få veta om vad som pågår inuti ett svart hål? Är det ens möjligt? Filip Jennerholm Hammar berättar om en av vetenskapens mest spännande och mest överraskande gåtor. Den går under namnet informationsparadoxen.

Sett från nära håll förvränger ett svart hål himlen bakom. Astrofysikern Alain Riazuelo har räknat fram bilden.

Gåtan har gäckat fysiker och astronomer sedan ett halvt sekel tillbaka. Under 1970-talet började forskare förstå att svarta hål sannolikt förgör information. Insikten skulle inte bara komma att leda till en stor intellektuell strid teoretiker emellan. Den skulle till och med komma att rucka på fysikens självaste grundvalar.

Informationsparadoxen har satt sina spår även inom populärkulturen – i komediserien *The Big Bang Theory* dyker den upp som ett återkommande forskningsämne för Sheldon Cooper. Men dess egentliga mening, historia och innebörd för fysiken är mindre känd. Här hoppas jag kunna redogöra för allt detta och ge en inblick inuti svarta hålets gränser.

Men vi börjar hemma hos mig och min förträffliga men opålitliga katt.

Vad har katten ställt till med?

Varje morgon när jag går till jobbet lämnar jag min lägenhet under kattens uppsyn. Ett ständigt bekymmer är dock att när jag kommer hem igen så har hon förvandlat allt inom väggarna, taket och golvet till total oigenkännlighet.

Tack vare fysiken vet jag dock att jag kan återställa allt, atom för atom, oavsett vad katten ställt till med.

Inte nog med det: allt jag behöver är att mäta upp all den värmestrålning som sänds ut från utsidan av lägenheten. Tillsammans med information om hur allt såg ut innan, räcker denna strålning – fysiker kallar den svart-

kroppsstrålning – för att återställa allt (se rutan på motsatt sida). Då kan jag rekonstruera insidan av lägenheten och sedan mysa med katten i soffan. Lite så som ett kylskåp fungerar, där elektrisk energi används för att motverka entropiökningen på insidan och behålla temperaturen lägre än omgivningens.

Strålningen innehåller alltså information om läget i lägenheten. Så vad skulle hända om katten istället får förtroende att härja inuti ett svart hål? Kan ordningen fortfarande återställas?

Information går inte att få

Ett svart hål är en himlakropp där en så stor massa packas på en så liten volym att ingenting, inte ens ljus, kan komma ut därifrån. Inte heller värmestrålning, som ingår också i det elektromagnetiska spektrumet, kan släppas ut.

Ett svart håls yttre gräns kallas händelsehorisonten. Utan ljus kan ingen information om vad som sker innanför den slippa ut. Ingen svartkroppsstrålning kan alltså mätas från det svarta hålet. Katten kan få härja bäst den vill – ingen får någonsin reda på det.

Nu står vi faktiskt inför ett fruktansvärt och överraskande faktum: svarta hål förstör informationen om allt som de slukar. Detta är inte bara ett gruvligt brott mot energiprincipen, utan även mot den grundläggande föreställningen inom fysiken om orsak och verkan. Ingenting av det som försiggår i det svarta hålets inre kan nämligen beskrivas med dagens fysik.

Paradoxens historia börjar

Paradoxen som uppstår ur det att information permanent kan försvinna i ett svart hål har kommit att kallas för *svarta hålets informationsparadox*.

Jakob Bekenstein var en av de fysiker som tidigt insåg detta faktum när han under 1970-talet utforskade gränslandet mellan termodynamiken och teorin om svarta hål. År 1973 publicerade han artikeln *Black Holes and Entropy*, i vilken han noterade likheterna mellan de båda teorierna. Han kom att spela en viktig roll för formuleringen av det så kallade *No hair-teoremet* vilket just säger att svarta hål endast har tre observerbara egenskaper: massa, rotation (rörelsemängdsmoment) och elektrisk laddning. Inga andra, och definitivt inte här. En konsekvens av det är att allt som slukas av ett svart hål också väntas förstöras.

En annan forskare som bar på liknande tankar var Stephen Hawking. I inledningen till sin artikel *Breakdown of predictability in gravitational collapse* från 1976 skriver han följande:

”En singularitet är en plats där de klassiska koncepten kring rum och tid bryter samman, liksom alla kända lagar inom fysiken, eftersom dessa är formulerade mot en klassisk rumtid. Denna artikel hävdar att detta sammanbrott inte bara är ett resultat av vår okunskap om den korrekta teorin, utan även att det representerar en fundamental begränsning av vår förmåga att förutsäga framtiden, en begränsning som är likvärdig med den kvantmekaniska osäkerhetsprincipen.” (förf. övers.)

INFORMATION OCH FYSIKENS LAGAR

Termodynamikens första huvudsats, även kallad energiprincipen, säger att energi – och därmed information – varken kan skapas eller förstöras. Energi kan endast omvandlas från en form till en annan.

Termodynamikens andra huvudsats säger att vid alla processer där energi omvandlas till fysikaliskt arbete så övergår en del av energin till värme. Arbete är inom fysiken ett mått på den energimängd som går åt när en kraft utför en förflyttning.

Den andra huvudsatsen säger dessutom att denna process sker spontant eftersom att alla system har en tendens att utveckla termodynamisk jämvikt med sin omgivning, och alltså utveckla maximal entropi. Processen är alltså irreversibel; värme kan aldrig omvandlas helt till arbete. Och entropin kan ses som ett mått på den värmeenergi i systemet som inte kan omvandlas till arbete. Därför beskrivs entropi ofta som graden av oordning i ett system.

Även inom kvantfysiken, som beskriver hur de minsta partiklarna, elementarpartiklarna, växelverkar med varandra, är det i princip möjligt att hålla koll på information och återskapa vad som har hänt.

Kvantfysik på gränsen väcker hopp

Året innan hade Stephen Hawking även publicerat en annan artikel, *Particle creation by black holes*, i vilken han föreslog att svarta hål hypotetiskt sett skulle kunna avdunsta och därmed förlora massa genom att partikelpar bildas

SVARTA HÅL

spontant vid händelsehorisontens rand. Den ena partikeln återabsorberas av det svarta hålet, medan den andra sänds ut (se bild på motsatt sida). Processen leder till att det svarta hålet sänder ut en typ av svartkroppsstrålning som kallas *Hawkingstrålning*. Svarta hål var med andra ord inte längre helt svarta – de lyser, oerhört svagt – och dessutom kan de på sikt förlora massa och avdunsta helt.

Kunde den här strålningen bära ut information om vad som försiggår på insidan av händelsehorisonten? Stephen Hawkings slutsats var ett nej, eftersom den ena partikeln från varje par slukas.

Att svarta hål skulle kunna förlora massa strider dessutom mot den generella relativitetsteorin. Detta innebar dock startskottet för jakten på en lösning till informationsparadoxen. Kunde det vara så att den fysikaliska teori som vi idag besitter inte är komplett? Eller är det så att vi saknar matematiska verktyg?

Strängar på ingång

Jakten skulle komma att fortsätta ända in till början av 1990-talet, då den nederländske fysikern Gerard 't Hooft, som ägnat mycket möda åt att förena teorin för svarta hål med strängteori, skissade fram idéer kring hur information kan representeras holografiskt med färre dimensioner.

Dessa och andras idéer fångades upp av Leonard Susskind vid Stanforduniversitetet i USA. Hösten 1993 lade han, tillsammans med två andra fysiker, fram ett förslag till lösning: *svarta-hål-komplementariteten*. Gruppen vidareutvecklade några av 't Hoofts teorier och föreslog att svarta hål både kan reflektera och samtidigt absorbera information, något som de menade är en konsekvens av den allmänna relativitetsteorin.

En observatör som befinner sig på insidan av det svarta hålet skulle endast kunna se den strålning eller materia som redan fallit in. En utomstående observatör skulle däremot kunna observera uppvärmningen, tänkte sig

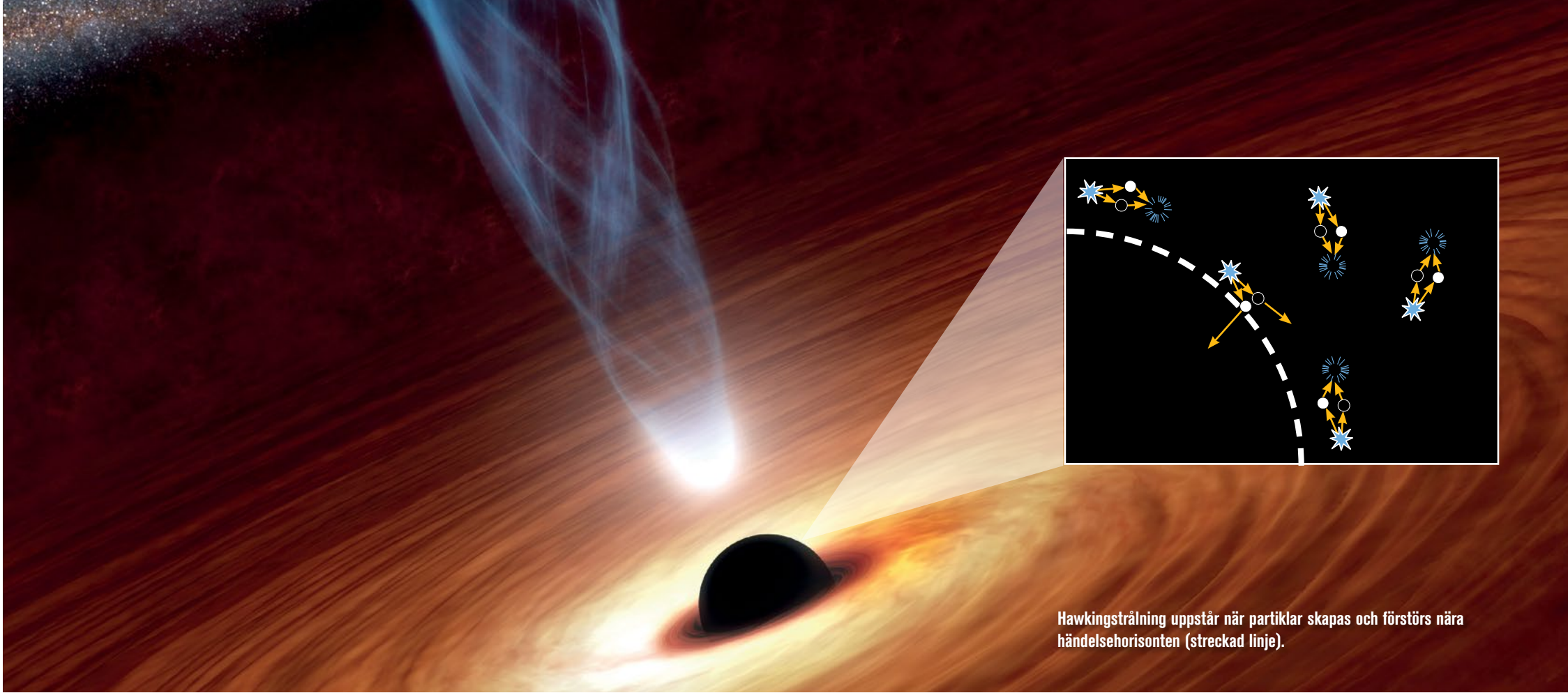
Susskind och hans kollegor, vid en hinna som skulle ligga alldeles precis utanför händelsehorisonten och som sedan sänder ut värmestrålning. Hinnan kallas *stretched horizon*. Det skulle dock inte vara möjligt att observera båda fenomenen på grund av kvantfysikens begränsningar, varför hypotesen inte kan bekräftas experimentellt.

Hologram förenklar bilden

Svarta-hål-komplementariteten hamnade i skymundan under de kommande decennierna, men Susskind strävade dock vidare. År 1995 publicerade han artikeln *The world as a hologram* där ett mer komplett matematiskt ramverk för lades fram för en holografisk lösning. I artikeln skriver han att en följd av föreningen av kvantfysik och gravitation är att de tre rumsdimensionerna kan ses som lagrade i en tvådimensionell projektion på en yta. Ett hologram, helt enkelt.

Enligt den *holografiska principen*, som teorin kallas, rymmer en viss maximal mängd information inom en viss volym. Denna volym begränsas i sin tur av en yta, exempelvis ett svart håls händelsehorisont. Därav följer att den tredimensionella informationen innanför ytan därför kan betraktas som holografiskt lagrad på den tvådimensionella ytan. Med en sådan teori skulle alltså paradoxen som uppstår ur termodynamiken kunna kringgås genom att mer fundamental fysik tillämpas, en ny teori om kvantgravitation.

Med den holografiska principen i ryggen betraktade Leonard Susskind därmed informationsparadoxen som löst, vilket kom att leda till en intellektuell strid mot Stephen Hawking och dennes idéer om att information går förlorad i svarta hål. De förblev dock goda vänner, skall tilläggas. År 2008 publicerade Susskind den populärvetenskapliga boken *The Black Hole War: My Battle with Stephen*



Hawkingstrålning uppstår när partiklar skapas och förstörs nära händelsehorisonten (streckad linje).

Hawking to Make the World Safe for Quantum Mechanics där han sammanfattade sin syn på dispyten.

Debatten om paradoxens varande eller icke-varande resulterade även i att Stephen Hawking, Kip Thorne och John Preskill i februari 1997 slog vad om informationsparadoxen och dess eventuella lösning. Hawking och Thorne stod fast vid att information förstörs i svarta hål, vilket Preskill inte höll med om. Vinnaren skulle få en valfri encyklopedi av förloraren. Hawking skulle långt senare komma att publicera en artikel där han ändrade ståndpunkt. Han förlorade vadet. Och som han även själv, med glimten i ögat, bittert konstaterade i en av sina föreläsningar:

”Det är som att elda upp en encyklopedi. Informationen går inte förlorad om du sparar askan och röken, men det blir svårare att läsa. [...] När jag upptäckte hur information kunde bevaras, så erkände jag mig besegrad. Jag gav John Preskill en encyklopedi. Kanske borde jag egentligen ha gett honom askan.” (förf. övers.)

Hologram, brandväggar och nya lösningar

Gåtan kring svarta hålets informationsparadox är än idag långt ifrån löst, även om astronomer nu har kommit ett steg närmare ett svar i och med den första direkta bilden av ett svart hål (se artikel på sidan 10). Idag ser många forskare den holografiska principen som en trovärdig kandidat till lösning, liksom att svarta hål på något vis avdunstar även om mekanismerna delvis är okända. Vissa sträcker sig till och med så långt som till att hävda att andra påståenden vore ”perversa”, som den amerikanske fysikern Steven Carlip skriver i en av sina studier. Andra, såsom den svenske astronomen Bengt Gustafsson, kritiserar dock hypoteser som denna och svarta-hål-komplementariteten och ser det som

”en extrem form av relativism” sprungen ur en vilja att hålla vissa teorier vid liv till varje pris.

Nya rön kring dessa förunderliga fenomen har dessutom lett till ytterligare en paradox om något som kallas *brandväggen*. Idén lanserades 2013 av fysikern Joseph Polchinski och tre kollegor, och rör en tänkt observatör som faller in genom ett svart håls händelsehorisont. Deras forskning springer ur ett försök att lösa vissa motsägelser inom svarta-hål-komplementariteten, som därmed har fått ny relevans. Enligt Albert Einsteins allmänna relativitetsteori så kommer en infallande observatör inte att märka någon skillnad från att sväva genom tomma rymden, men forskarna kunde genom sina beräkningar visa att observatören i stället kommer att krocka med en ”brandvägg” av partiklar och följaktligen se ut att brinna upp ur en yttre observatörs perspektiv. Detta bryter alltså mot den allmänna relativitetsteorin, och har givit astronomer än mer huvudbry.

Vi står alltså med denna hypotes inför två olika utfall: antingen försvinner information i svarta hål, och därmed bryter kvantfysiken samman inne i dessa, eller så existerar brandväggar. I så fall räcker inte Einsteins teorier för att förstå universum.

Det blir alltför svårt för astronomer att göra direkta mätningar av Hawkingstrålning, men nya studier av svarta hål kanske ändå ger nya svar på huruvida någon av de hypoteser som skulle kunna lösa informationsparadoxen stämmer eller ej. Kanske får även jag så småningom tillgång till teknik som kan rädda min lägenhet från kattens dagliga härjningar. Till dess får vi nöja oss med att sväva i ovisshet, och njuta av de svarta hålens dunkla mysterier. ★

FILIP JENNERHOLM HAMMAR är lärare och reporter för *Populär Astronomis* webbutplaga.



2015 talar Stephen Hawking om informationsparadoxen under en konferens om Hawkingstrålning vid Nordita i Stockholm.