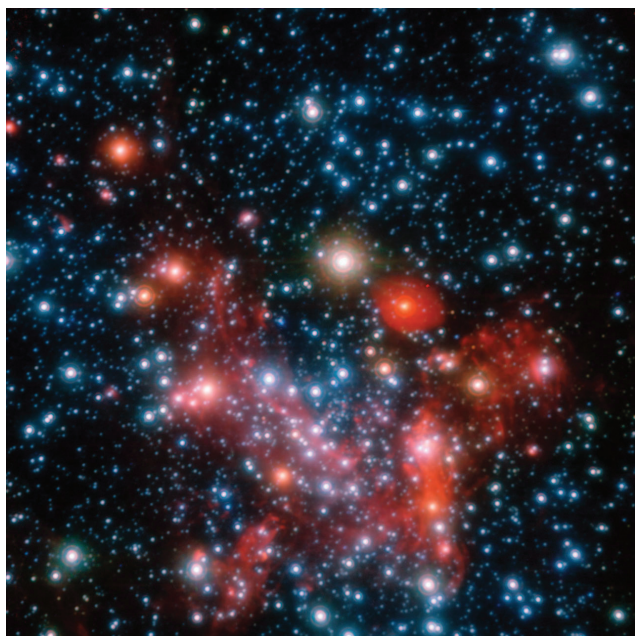


## Vintergatans mörka hjärta

*Nu är det belagt: mitt i vår hemgalax, Vintergatan, gapar ett monstruöst svart hål. Årets Crafoordpristagare har funnit de mest övertygande bevisen hittills för att supermassiva svarta hål verkligen finns. I decennier har de följt stjärnor i Vintergatans centrum och bättre förklaring till vad de såg går inte att finna. Med stjärnrörelserna som vägvisare kom **Reinhard Genzel** och **Andrea Ghez** var för sig fram till samma slutsatser.*

Vad annars skulle få stjärnorna längst in i Vintergatan att svänga runt med svindlande fart? Reinhard Genzel och Andrea Ghez, tillsammans med sina forskargrupper, uppskattade massan som tvingar stjärnorna att fara runt till omkring fyra miljoner solmassor. Och all denna materia är hoptryckt inom ett område mindre än vårt solsystem. Det finns bara en misstänkt – ett supermassivt svart hål, som man numera brukar kalla Sagittarius A\*. Allt annat som skulle kunna förklara vad astronomerna sett vore betydligt märkligare. Svarta hål är nog så märkliga.



En bild i infrarött av de stjärnor som kretsar kring Vintergatans centrala svarta hål, Sagittarius A\*. Avståndet till det svarta hålet är cirka 26 000 ljusår – det ljus vi ser idag skickades iväg då vi på jorden fortfarande hade full istid. Foto: ESO/S. Gillessen et al.

I sin moderna dräkt kommer svarta hål ur Albert Einsteins relativitetsteori. Den beskriver hur materia kröker rymden runt om sig. Om det samlas väldigt mycket materia på samma ställe blir krökningen oändlig, och ett svart hål bildas. Allt som kommer i närheten av ett svart hål försvinner in.

Mitt i alla svarta hål ruvar en singularitet. I matematiken dyker singulariteter upp när något delas med noll – svaret blir då en oändlighet. För fysiken förblir singulariteterna en gåta, de innebär att Einsteins teori missar något väsentligt i sin beskrivning av verkligheten. Ingen vet idag vad det kan vara för något.

Ett är dock säkert – råkar man falla in i ett svart hål är ödet helt bestämt, med ett ofrånkomligt slut i singularitetens dödsfälla. Det är som en brunn utan botten, allt som faller in utplånas nästan helt. Inte ens ljus kan ta sig ut. Samtidigt har brunnen ingen volym, ingen utsträckning.

Men det finns en storhet som svarta hål kopplas till, det är den så kallade Schwarzschildradien, också kallad händelsehorisonten. Den beskriver en gräns runt om det svarta hålet – allt som kommer innanför denna gräns dras in. Och det svarta hålet suddar ut nästan alla spår.

All materia, om den packas ihop tillräckligt tätt, kan bilda ett svart hål. Ju högre massa desto större är det svarta hålets Schwarzschildradie. För jordklotet gäller det att tryckas ihop till en storlek av en sockerbit innan det bildar ett svart hål med jordens massa, medan Schwarzschildradien hos ett svart hål med solens massa blir tre kilometer. Räknet åt andra hållet innebär detta att om det bara går att bestämma hur stor Schwarzschildradien är, så kan det svarta hålets massa räknas ut.

**Länge trodde forskarna** att svarta hål bara var fantasins verk. Trots att det redan på 1700-talet kom spekulationer om objekt så tunga att inte ens ljuset kunde fly dem. År 1939 föreslog bland andra Robert Oppenheimer, senare känd som ledare av det amerikanska atombombsbygget Manhattanprojektet, att singulariteter kunde bildas när mycket massiva stjärnor kollapsade vid sitt livs ände. Själva namnet – svarta hål – myntades så sent som 1967 av den amerikanske fysikern John Wheeler. Liksom många andra under det förra århundradet motsatte sig Wheeler först själva idén om svarta hål: hur kunde fysiklagarna leda till något som stred emot dem? Senare blev han en av de främsta utforskarna av gravitationsteorin och dess apokalyptiska förutsägelser.

Numera tror sig astronomer ha sett tecken på att det faktiskt finns svarta hål därute i rymden, även om inte alla låtit sig övertygas än. De allra minsta svarta hålen skulle kunna perforera rymden och, osynliga som de är, utgöra en riktig fara för oss på jorden. Något större svarta hål kan bildas när vissa tunga stjärnor, över 25 solmassor, får slut på sitt kärnbränsle. Då händer det att stjärnan exploderar som en supernova, samtidigt som dess inre kollapsar till ett svart hål på cirka 3–10 solmassor.

Så finns det också de supermassiva svarta hålen, rymdens våldsammaste monster som kan bli upp till flera miljarder solmassor tunga. Ett av de största sådana monster lär ruva mitt i den elliptiska galaxen M87 i stjärnbilden Jungfrun. Galaxen ligger 55 miljoner ljusår bort och hör till en av våra närmaste gigantgranar. De supermassiva svarta hålen tros numera kunna hittas inuti de flesta stora galaxerna.

De största utgör de mest aktiva kärnorna hos galaxer – kvasarer – som är bland de ljusstarkaste objekten i universum. Ungefär var tionde känd galax innehåller en aktiv kärna. Ursprunget till kvasarens starka strålning förmodas ligga hos gas som far omkring det svarta hålet innan den försvinner in för evigt. Ju närmare hålet i centrum desto snabbare gasrörelse och kraftigare strålning som sänds ut – de är tecknen på att det faktiskt borde vara ett svart hål som driver på.

Vintergatans Sagittarius A\* hör till den supermassiva svarta hål-familjen. Men det är bara fyra miljoner solmassor tungt och alltså ett hål av en ganska beskedlig sort för att ingå i den supermassiva klassen. Så hur ska man hitta det när det inte syns? Enda sättet, liksom med alla de andra svarta hålen, är att undersöka vilken verkan de har på sin omgivning.

**De första spekulationerna** om att ett svart hål döljer sig inuti vår galax kom för drygt 40 år sedan. Dels förutsades det teoretiskt av bland andra den brittiske astronomen Martin Rees (Crafoordpristagare 2005). Han föreslog att inte bara Vintergatan utan också att nästan alla de andra galaxerna gömmer ett svart hål innerst inne, dels upptäckte den amerikanske astronomen Eric Becklin att infraröd strålning kom från väldigt många stjärnor belägna i en radiovågskälla mitt i Vintergatan. Radiovågskällan gavs namnet Sagittarius A\* från stjärnbilden Skytten där Vintergatans centrum ligger. Utsikten mot Vintergatan skymms dock effektivt av rymdens mäktiga stofmoln, och för att se in i galaxens hjärta krävs längre våglängder än det synliga ljusets. Infraröd strålning blev lösningen, och Becklin kunde från teleskopet på Mount Wilson i Kalifornien konstatera att ju närmare radiokällan han tittade desto fler stjärnor trängdes där. Vad var källan till gravitationskraften som drog stjärnorna in mot Vintergatans mitt?

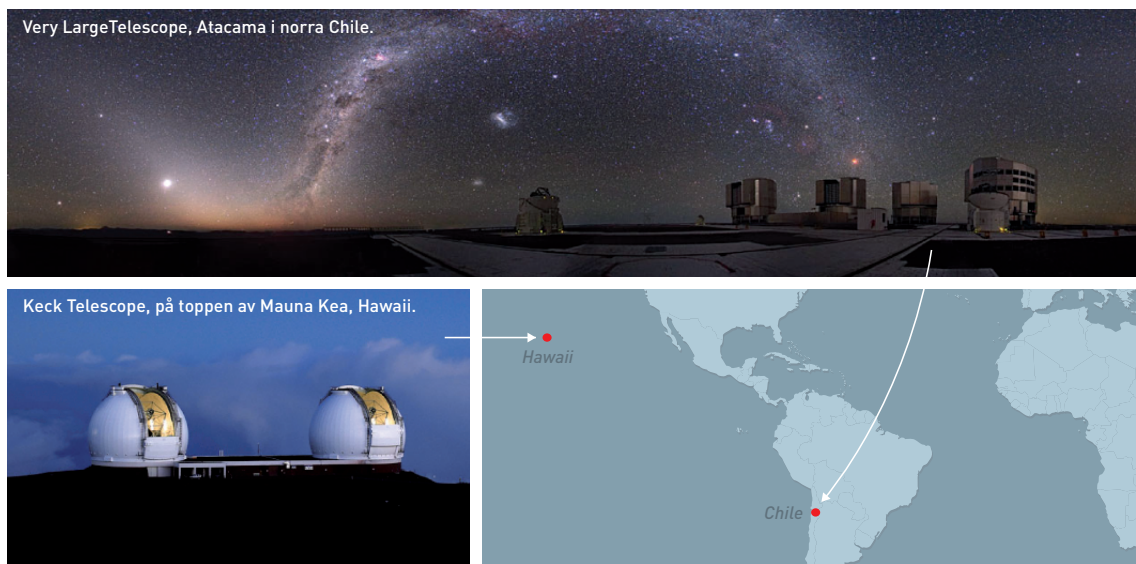
Misstankarna om ett svart hål i Sagittarius A\* kom även från Charles Townes, Nobelpristagare och pionjär inom astronomiska studier i infrarött. Townes och hans grupp såg interstellär gas färdas runt i Sagittarius A\*-regionen. Kunde ett svart hål ligga bakom? Det var inte många som trodde det då.

Det dröjde till 1990-talet då större teleskop och bättre hjälputrustning tillät metodiska studier av Sagittarius A\*. Årets pristagare Reinhard Genzel som fick sin inspiration från samarbete med Townes, och Andrea Ghez, som började arbeta på UCLA (University of California Los Angeles) där även Becklin var verksam, satte igång var sitt projekt att se genom stofmolnen ända in i Vintergatans hjärta. Tillsammans med sina forskargrupper utvecklade de och förfinade tekniken, byggde lämpliga instrument och satsade långsiktigt. Konkurrenten ingår i forskargärningen, men det hjälpte också att deras observationer kompletterade varandra. Ändå skulle det dröja många år innan de lyckades övertyga världen om att det svarta Sagittarius A\* inte bara var ett bisarrt påhitt. Numera, som redan nämnts, är Vintergatans svarta hål det mest övertygande belagda hittills.

**Bara världens största** teleskop dög till att spana mot de avlägsna stjärnorna. Ju större desto bättre gäller i allra högsta grad inom astronomin – med en dubbelt så stor teleskopspegel kan upp till sexton gånger ljussvagare stjärnor ses. Dessutom, för första gången på 100 år, lyckades Europa på 2000-talet komma ikapp USA när det gäller stora teleskopbyggen och det blev möjligt för europeiska astronomer att tävla med amerikanska.

Reinhard Genzel började med New Technology Telescope som European Southern Observatory (ESO), byggde på La Sillaberget i Chile. Det var föregångaren till de fyra dubbelt så stora jätteteleskopen, som ingår i Very Large Telescope (VLT), på Cerro Paranal (också i Chile) dit Genzel flyttade så småningom. VLT har världens största monolitiska speglar, dvs. stöpta i ett stycke, med drygt 8 meters diameter.

Andrea Ghez och hennes forskarkollegor använde ett av Keckteleskoptvillingarna som står på Mauna Kea-toppen på Hawaii. Med sina speglar på nästan 10 meter i diameter hör de till världens största i dag. Varje spegel liknar en honungskaka och består av 36 sexkantiga segment som kan styras var för sig för att bättre fokusera stjärnljuset.



**Reinhard Genzel** och hans forskargrupp gjorde sina upptäckter vid Europeiska sydobservatoriet (ESO) med bland annat Very Large Telescope (VLT), som står på drygt 2600 m.ö.h. på Cerro Paranal i Atacamaöknen, Chile. VLT består av fyra olika jätteteleskop med speglar på 8,2 meter i diameter. Dessa kan kopplas ihop till Very Large Telescope Interferometer (VLTI) som kan se objekt som är 25 gånger mindre än med de enskilda teleskopen.

**Andrea Ghez** med sin grupp har arbetat med Keckteleskopen på 4600 m.ö.h. på berget Mauna Kea, Hawaii. Dessa tvillingteleskop har speglar på 10 meter i diameter och hör till de största i världen. Spegelarna är sammansatta av 36 hexagonala segment. Teleskopens strålgång kan justeras för atmosfäriska störningar upp till 1000 gånger i sekunden!

FOTON: VLT: ESO/Y. BELETSKY. KECK: RICK PETERSON / W.M. KECK OBSERVATORY.

Men för att kunna skilja stjärnorna från varandra i det avlägsna stjärnmyllret krävs mer än bara jätteögon mot rymden. Hur stora teleskopen än är finns det alltid en gräns för hur små detaljer de kan se. Den är en följd av att vi bor på botten av ett nästan 100 kilometer djupt lufthav. Stora luftbubblor ovanför teleskopet, kallare eller varmare än omgivningen, fungerar som linser som bryter ljuset på dess väg ner till teleskopspiegeln och deformerar ljusvågen. Därför ser stjärnorna ut att blinka och därför blir bilderna oskarpa.

Så kallad adaptiv optik ska korrigera för detta. Teleskopet utrustas med en tunn extra spegel som ständigt omformas i takt med att datorn känner av en infallande ljusvåg från en äkta eller artificiell referensstjärna. Femhundra gånger i sekunden justeras spegeln genom att knycklas till åt olika håll med en precision på en miljondels meter.

**I decennier följde** Reinhard Genzel och Andrea Ghez och deras forskarkollegor sina stjärnor steg för steg för att försöka åstadkomma en bästa möjliga modell av deras banor. Det var enda sättet att fastställa egenkaperna hos det svarta hålet som med sin gravitationskraft styr stjärnornas rörelser runt den.

Under tiden utvecklade de och förädlade tekniken alltmer. Med allt större digitala ljussensorer, CCD, och allt bättre adaptiv optik, ökade noggrannheten mer än tusenfalt, vilket innebär att de nu kunde se 1 000 gånger svagare stjärnor. Astronomerna kunde också bestämma positionen av stjärnan med en noggrannhet på 30 tusendelar av en bågsekund, det är som att se en enkrona på 30 kilometers håll.

Tekniken förbättras ständigt. Nu håller ett nytt instrument på att byggas vid VLT som ska kombinera ljuset från alla fyra teleskopen. När det står färdigt om ett par-tre år kommer astronomerna att kunna slå fast stjärnornas positioner en miljon gånger noggrannare, ner till 10 miljondelar av en bågsekund. Dessa stjärnor rör sig tio gånger närmare det svarta hålet än de stjärnor som syns idag, med hastigheter upp till 10 % av ljusets hastighet (dvs. 30 000 km/s). Genom att stjärnorna kommer närmare det svarta hålet blir det möjligt att direkt studera effekter som förutsagts av den allmänna relativitetsteorin.

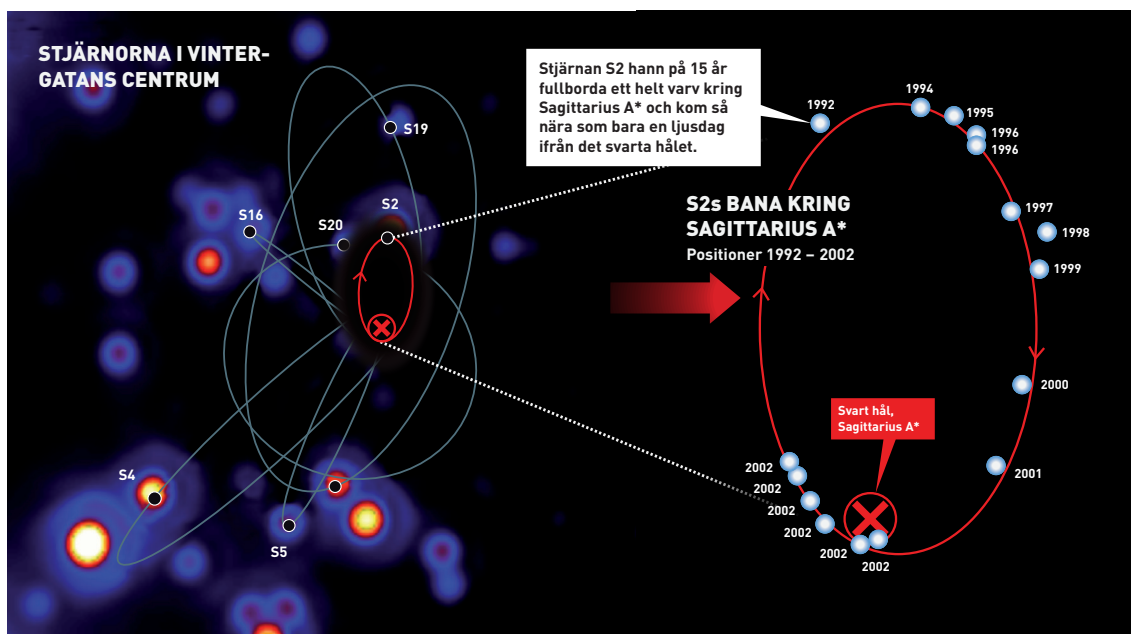
**Än så länge** räckte de välbeprövade Keplers rörelselagar från 1600-talet för att kartlägga banorna hos de 28 stjärnor som lyfte klarast i stjärnvimlet längst inne i vår galax. Mest kaotiskt går det till inom en radie på en ljusmånad från centrum. Där utför stjärnorna en rätt så rörig dans som mest påminner om en bisvärm. Utanför denna cirkel uppmättes sex av stjärnorna cirkla runt mitten inom en elliptisk disk i en mer ordnad rörelse.

En av stjärnorna, S2, hann på 15 år fullborda ett helt varv kring galaxmitten. Det är en rekordkort tid, tidigare kända stjärnor som kom i närheten av galaxens mittpunkt hade en omloppstid på 500 år. För att inte nämna att det för oss och solen tar ungefär 230 miljoner år att ta sig runt Vintergatans mittpunkt. Sist vi befann oss på samma ställe i vår galax som nu, vandrade dinosaurierna på vår planet. Men så är vi på betryggande 26 000 ljusårs avstånd från det svarta hålet. Det innebär att vi ser vad som försiggick där för 26 000 år sedan – så lång tid tar det för en ljustråle att ta sig hit.

Med de nya stjärnbanorna kan massan hos Sagittarius A\* inringas mycket bättre än tidigare. Men fortfarande befinner sig S2 hela 1 000 radier utanför den inre cirkeln, när den hamnar som närmast Schwarzschildradien. Och då är S2 bara en ljusdag ifrån det svarta hålet, bara några gånger längre bort än planeten Neptunus är från solen (50 miljarder kilometer). Aldrig tidigare har någon nått så långt in mot Vintergatans hjärta.

**Hur stort är** då det svarta hålet? Radiokällan Sagittarius A\* har studerats med flera radioteleskop sammanlänkade över hela jordklotet med så kallad Very long base-line interferometry (VLBI). Den verkar sträcka sig ungefär så långt som medelavståndet mellan jorden och solen. Det finns skäl att förmoda att radiostrålningen sänds ut av en radiokälla som ligger kring det massiva objektet i centrum.





Sagittarius A\* – ett supermassivt svart hål mitt i vår hemgalax, Vintergatan, styr stjärnorna runt om sig. I decennier har Reinhard Genzel och Andrea Ghez och deras forskarkollegor följt sina stjärnor steg för steg för att försöka åstadkomma en bästa möjliga modell av deras banor. Under tiden hann stjärnan S2 fullborda ett varv på 15 år kring det svarta hålet.

Tillsammans med de uppmätta stjärnbanorna ger mätningarna då en försiktig övre gräns för det supermassiva objektets storlek. Objektet är alltså säkert inte större än solsystemet och sannolikt betydligt mindre än så, vilket gör det mycket troligt att det verkligen är ett svart hål. I själva verket torde det vara det hittills säkraste beviset för att sådana objekt verkligen finns. I framtiden blir det kanske till och med möjligt att med sammankopplade radioteleskop i korta radiovåglängder få syn på själva svarta hålet som det avtecknar sig mot bakomliggande gas.

**Flera oväntade upptäckter** följde med stjärnobservationerna. Som att stjärnorna som råkade passera nära Sagittarius A\* för vidare iväg med svindlande hastigheter på över femton miljoner kilometer i timmen.

Oväntad var också upptäckten av att stjärnor som kom nära det svarta hålet inte nödvändigtvis blev förstörda, tvärtom – en del kanske till och med bildades där. Det skulle deras heta yta vittna om, ju hetare stjärna desto yngre lär den vara. Samtidigt är närheten av ett svart hål en ganska osannolik miljö för att tjäna som stjärnornas barnkammare.

En annan överraskning var mer eller mindre regelbundna utbrott av infrarött ljus. Utbrotten sker några gånger per dag och varar några tiotal minuter. Förmodligen kommer de från det svarta hålets omedelbara närhet, kanske bara 10 ljusminuter ifrån. Kanhända är utbrotten ett tecken på att hålet roterar. Det får framtiden utvisa. Liksom besvara en mängd andra frågor som nu ställs när det svarta hålet äntligen slagits fast.

Vad gör det stora monstret längst in i Vintergatans innersta vrår? På vilket sätt påverkar det sin omgivning och oss? Har det svarta hålet funnits där ända från tiden då vår galax började bildas någon miljard år efter big bang? Eller kom galaxen först och det svarta hålet sedan?

En möjlighet är att svarta hål och deras värdgalaxer på avgörande sätt påverkar varandras egenskaper. I så fall är dessa mörka förintelseverktyg oundgängliga för att något nytt ska uppstå – Vintergatan och Sagittarius A\* är ohjälpligt fjättrade samman på liv och död.

Ett är säkert nu – vårt närmaste supermassiva svarta hål finns mitt i vår galax, nästa ligger antagligen 100 gånger längre bort, i Andromedagalaxen. Med Sagittarius A\* kan nu astronomerna undersöka gravitationen och utmana den allmänna relativitetsteoris gränser. Kanske, som några fysiker spekulerat, bildar de svarta hålen en tunnel, en flyktväg mot ett helt annat universum på andra sidan den allslukande svärtn där helt andra fysiklagar gäller. Hur det nu skulle gå till.

---

## LÄNKAR OCH LÄSTIPS

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

### Populärvetenskapliga artiklar

Lär dig hitta hem, (2012) av Joanna Rose, *Forskning & Framsteg*, 1/2012:58–59.

Closing In on the Milky Way's Central Black Hole, (2008) by John Matson, *Scientific American Magazine*, December 2008: [www.scientificamerican.com/article.cfm?id=milky-way-black-hole](http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=milky-way-black-hole)

How Puzzling Stars Formed near Galactic Black Hole (2008) by JR Minkel, *Scientific American Magazine*, August 2008: [www.scientificamerican.com/article.cfm?id=how-stars-formed-near-black-hole](http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=how-stars-formed-near-black-hole)

### Vetenskapliga artiklar

**S. Gillessen, S. et al.** (2012) A gas cloud on its way towards the supermassive black hole at the Galactic Centre, *Nature* 481:51–54.

**Genzel, R., Eisenhauer, F. och Gillessen, S.** (2010) The Galactic Centre massive black hole and nuclear star cluster, *Review of Modern Physics* 82:3121–3195.

**Ghez, A.M. et al.** (2008) Measuring distance and properties of the Milky Way's central supermassive black hole with stellar orbits, *The Astrophysical Journal* 689:1044–1062.

**Genzel, R.** (2007) The power of new experimental techniques in astronomy: zooming in on the black hole in the centre of the Milky Way, *Highlights of Astronomy* 14:63–76.

**Schödel, R. et al.** (2002) A star in a 15.2-year orbit around the supermassive black hole in the centre of the Milky Way, *Nature* 419: 694–696.

**Ghez, A. et al.** (2000) The acceleration of stars orbiting the Milky Way's central black hole, *Nature* 407:349–351.

### Webbplatser

TED föredrag av **Andrea Ghez**:

[www.ted.com/talks/andrea\\_ghez\\_the\\_hunt\\_for\\_a\\_supermassive\\_black\\_hole.html](http://www.ted.com/talks/andrea_ghez_the_hunt_for_a_supermassive_black_hole.html)

Föredrag av **Reinhard Genzel**: [www.youtube.com/watch?v=ZDxFjq-scvU](http://www.youtube.com/watch?v=ZDxFjq-scvU)

Föredrag av **Andrea Ghez**: Stellar Orbits at the Galactic Center: Opportunities and Challenges:

[www.cfa.harvard.edu/events/2010/dyn/videos/Ghez.mov](http://www.cfa.harvard.edu/events/2010/dyn/videos/Ghez.mov)

Föredrag av **Reinhard Genzel**: Observed Dynamics of S Stars:

[www.cfa.harvard.edu/events/2010/dyn/videos/Genzel.mov](http://www.cfa.harvard.edu/events/2010/dyn/videos/Genzel.mov)

---

## PRISTAGARE

### **REINHARD GENZEL**

Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik, Garching, Tyskland

Tysk medborgare. Född 1952 (59 år) i Bad Homburg vor der Höhe, Tyskland. Fil. dr 1978 vid Universität Bonn, Tyskland. Professor vid University of California, Berkeley, CA, USA och vetenskaplig chef för Max-Planck-Institut fur extraterrestrische Physik, Garching, Tyskland.

[www.mpg.de/463069/extraterrestrische\\_physik\\_wissM1](http://www.mpg.de/463069/extraterrestrische_physik_wissM1)

### **ANDREA GHEZ**

University of California, Los Angeles, CA, USA

Amerikansk medborgare. Född 1965 (46 ar) i New York City, NY, USA. Fil. dr 1992 vid California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA. Professor vid University of California, Los Angeles, CA, USA.

[www.astro.ucla.edu/~ghez/](http://www.astro.ucla.edu/~ghez/)

Sakkunniga ur priskommittén för Crafoordpriset i astronomi: Bengt Gustafsson, Claes Fransson och Arne Ardeberg (ordf.)  
Text: Joanna Rose  
Illustrationer: Johan Jarnestad/Swedish Graphics  
Redaktör: Erik Huss  
©Kungl. Vetenskapsakademien