

Nobelpriset i fysik 2020

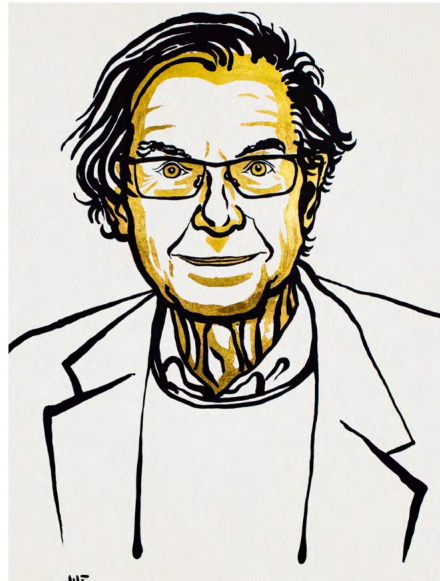
Peter Johansson
Institutionen för Fysik
Helsingfors Universitet

Fysikersamfundets virtuella julfest
Helsingfors, 07.12.2020

Prisvinnarna - Nobelpriset i fysik 2020

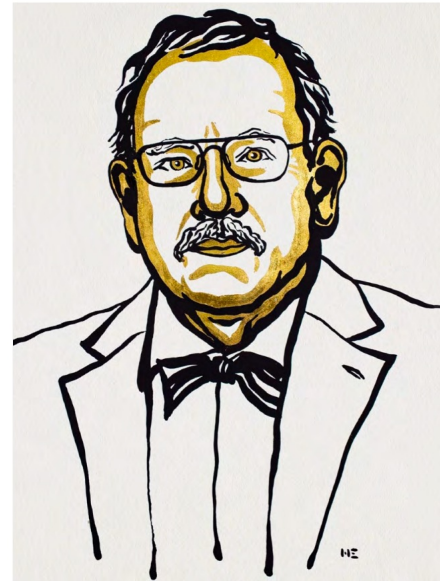
The 2020 Physics Laureates

Roger Penrose
"for the discovery that black hole formation is a robust prediction of the general theory of relativity"



Roger Penrose
Born: 1931, United Kingdom

Reinhard Genzel and Andrea Ghez
"for the discovery of a supermassive compact object at the centre of our galaxy"



Reinhard Genzel
Born: 1952, Germany



Andrea Ghez
Born: 1965, USA

ILL. NIKLAS ELMEDHED. © NOBEL MEDIA

En kort historik: Svarta hål

- John Michell (1783) och Pierre-Simon Laplace (1796) var de första som pratade om vad vi idag kallar för **svarta hål**, dvs. objekt som är så massiva att inte ljuset kan ta sig ut ur deras gravitationsfält.
- Från **Newtons mekanik** kan vi lösa den radie som krävs, om vi sätter hastigheten v till ljusets hastighet c :

$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{GMm}{r} = 0, \quad v = c \Rightarrow r = \frac{2GM}{c^2}$$

- Princeton fysikern Robert Dicke kom på namnet "**svarta hål**" från "**Black hole in Calcutta**", ett fängelse från kolonialtiden där ingen kom levande ut.

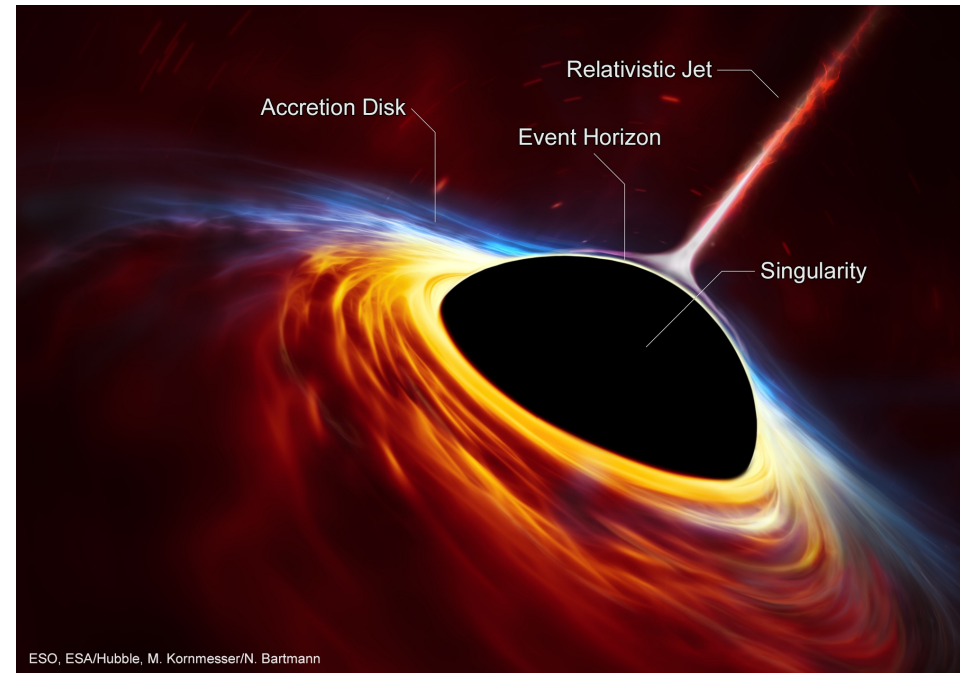


Svarta hål i allmänna relativitetsteorin

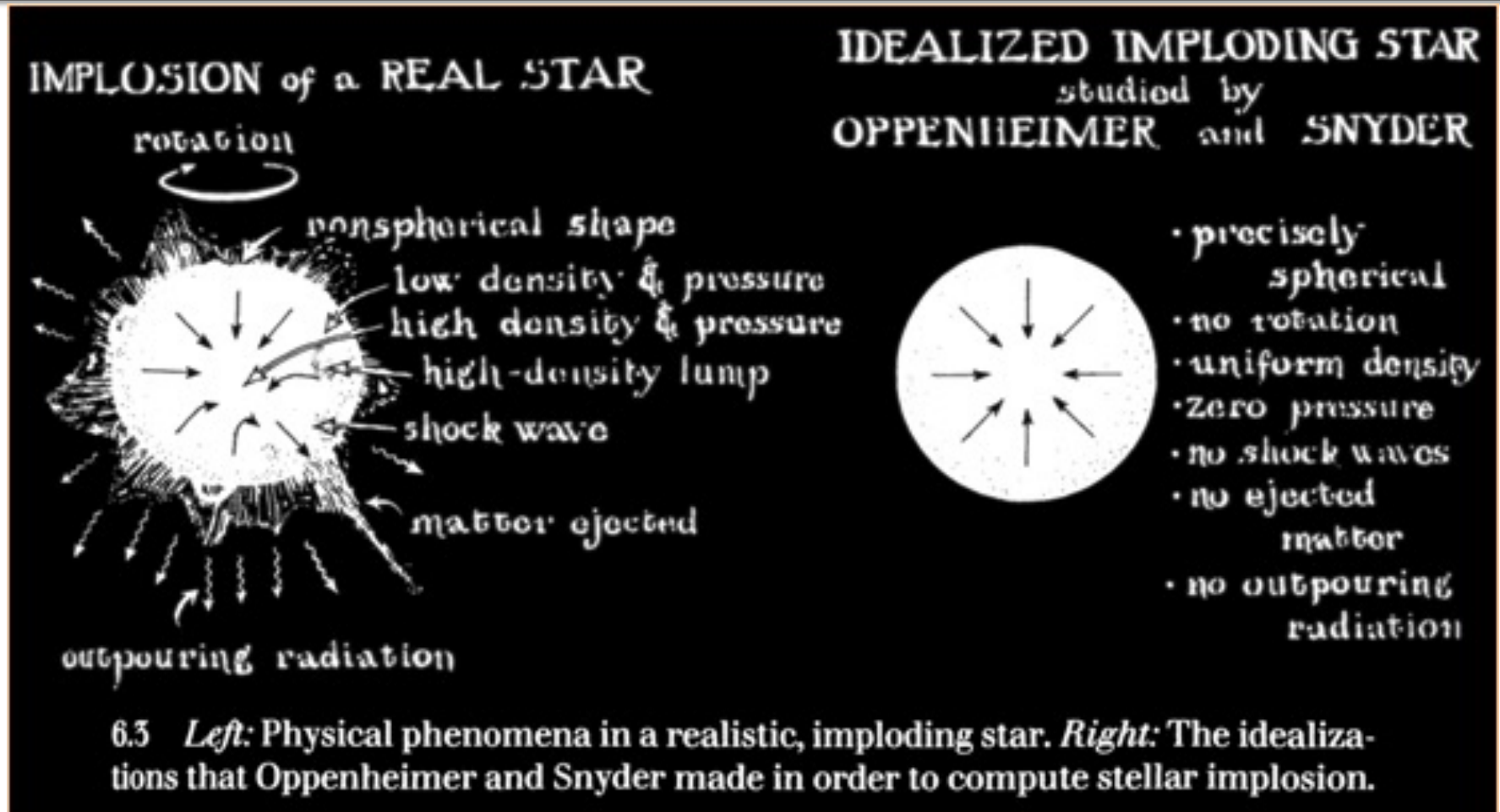
- Svarta hål forskningen fick en mer fysikalisk grund då **Albert Einstein** utvecklade den allmänna relativitetsteorin (1915).
- Karl Schwarzschild (1916) fann **Schwarzschildmetriken**, som beskriver rumtiden runt ett icke-roterande svart hål:

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right) c^2 dt^2 - \frac{1}{1 - \frac{2GM}{c^2 r}} dr^2 - r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2)$$

- **Två singulariteter** $r=0$ och $r=R_s=2GM/c^2$, som kallas också för **händelsehorisonten**, som avgränsar svarta hålet från resten av rumtiden.



Kollaps av en massiv stjärna

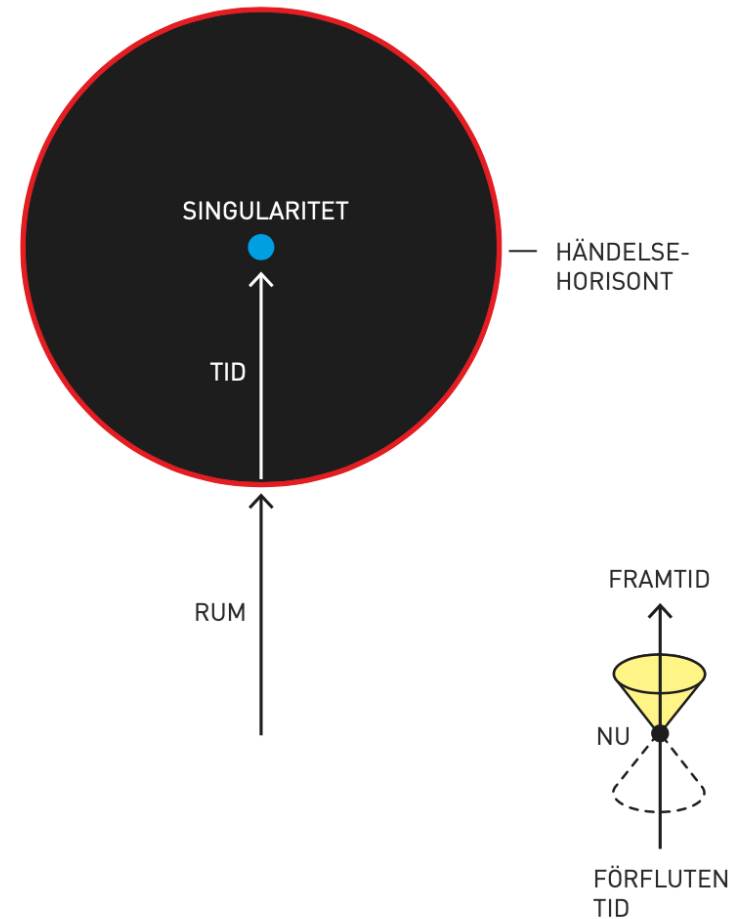


- **Robert Oppenheimer** (senare ledare av Manhattan-projektet) studerade år 1939 tillsammans med Hartland Snyder vad som händer då en "perfekt" sfärisk massiv stjärna kollapsar till ett svart hål.



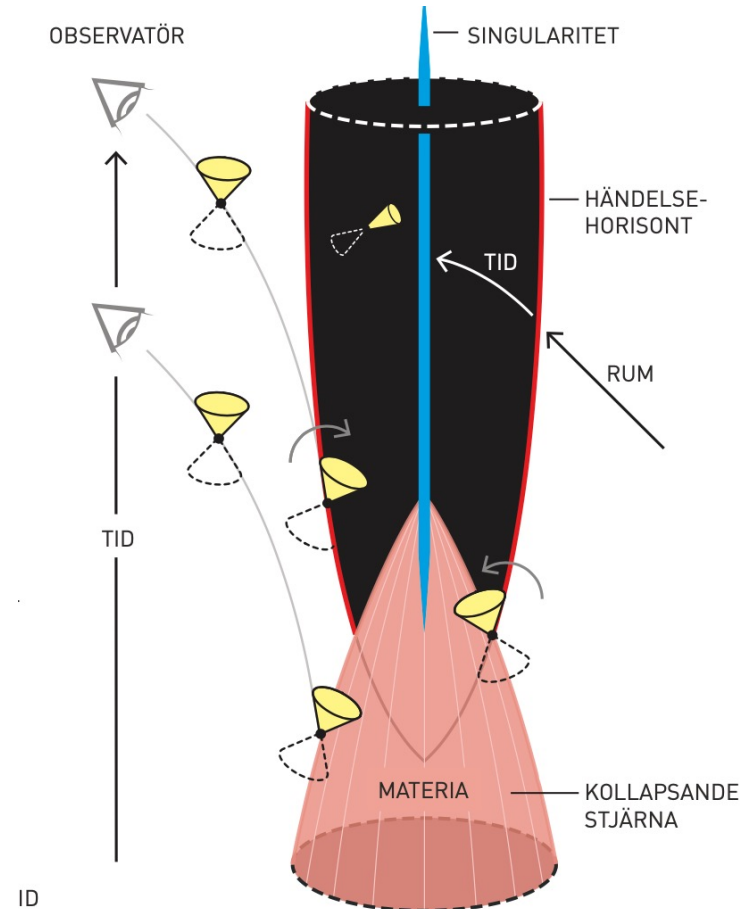
Singularitetssatsen I

- **Roger Penrose** härledde matematiska satser år 1965 som bevisade att oberoende vilken geometri ett massivt objekt har, så kommer det att kollapsa till ett svart hål.
- Penrose uppfann också nya matematiska begrepp inom topologin, så **som "trapped surface" ("fångad yta")** begreppet.
- En fångad yta tvingar alla strålar som faller mot den att peka mot mitten, oberoende av om ytan buktar utåt eller inåt.
- Med hjälp av fångade ytor kunde Penrose bevisa att det inuti ett svart hål **alltid döljer sig en singularitet**, en gräns där rummet och tiden tar slut och densiteten är där oändlig.



Singularitetssatsen II

- När fångade ytor väl formats då materia börjar kollapsa under den starka gravitationen, kan **inget stoppa en fortsatt kollaps**, det finns ingen väg tillbaka.
- Det går att korsa det svarta hålets händelsehorisont bara åt ett håll. **Tiden tar då rummets plats och alla vägar pekar bara inåt**, tidens flöde bär allt och alla mot det ofrånkomliga slutet i singularitetens oändliga gap.
- Om du faller igenom händelsehorisonten känner du inget särskilt, förutsatt att hålet är tillräckligt stort. Däremot utifrån sett kommer din resa mot horisonten att pågå i all evighet, ingen kan se dig falla in.



Energiproduktion i svarta hål



UNIVERSITY OF HELSINKI

- I stjärnor fusioneras väte till helium, med en energiverkningsgrad av 0.7%. I svarta hål är verkningsgraden mellan 6-42% (medeltal 10%) beroende på gasens impulsmoment och svarta hålets spin.
- Roger Penrose utvecklade år 1971 en teoretisk metod om hur man kan utvinna energi från ett roterande svart hål.

Ett svart hål i Vintergatans centrum?

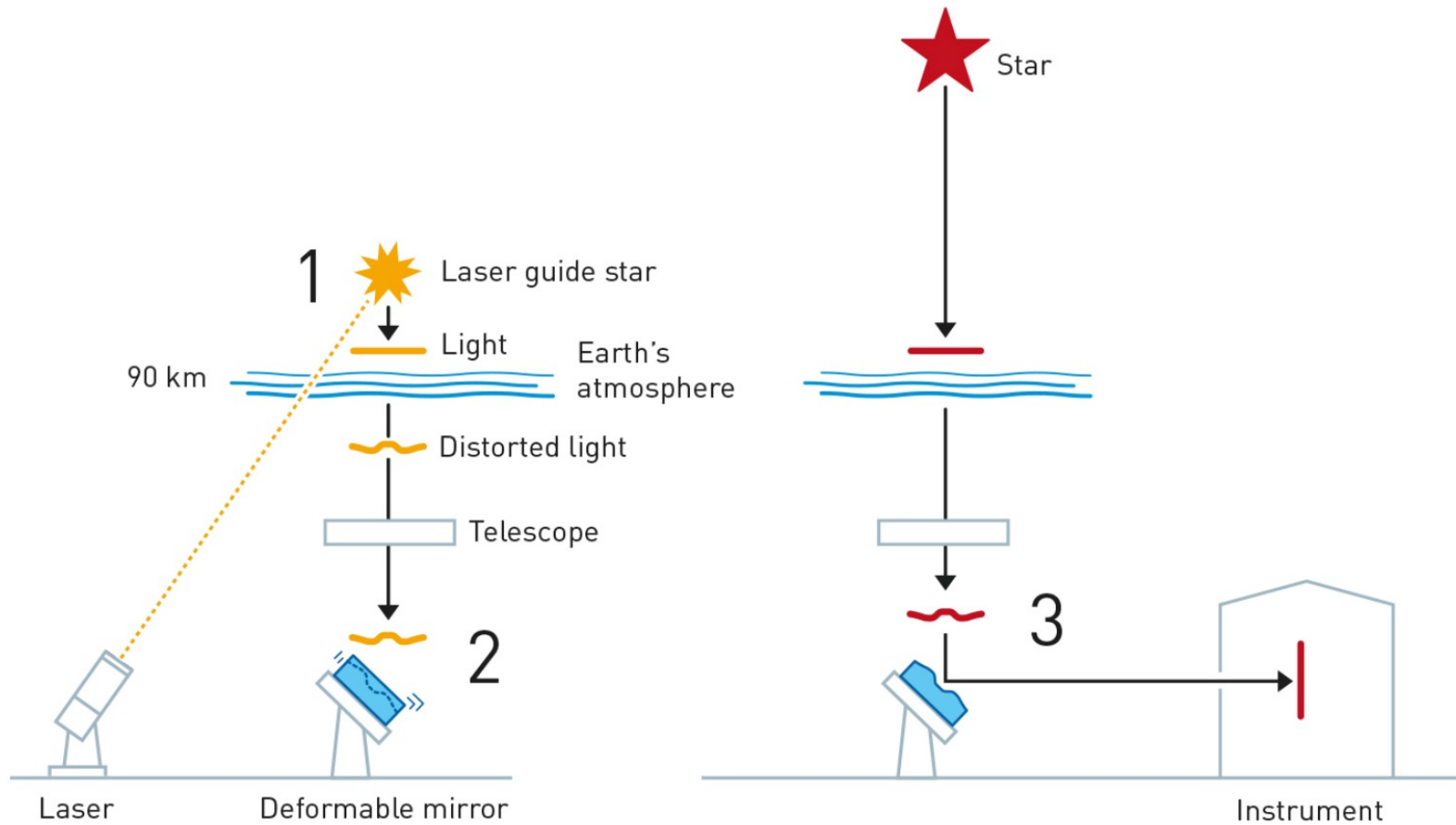
- Ett svart håls Schwarzschild radie (R_S) är direkt proportionell till massan (1 solmassa $\rightarrow$ 3 km R_S). Det betyder att medeldensiteten är proportionell till M^{-2} :

$$\rho_{\text{BH}} = \frac{c^6}{288\pi G^3 M^2}$$

- För svarta hålet i Vintergatans centrum, som har en massa på $M_{\text{BH}} = 4 \times 10^6 M_{\odot}$ betyder det här att **medeldensiteten är bara 40 gånger större än vattnets densitet.**
- I astronomiska enheter motsvarar det här $\rho = 6 \times 10^{23} M_{\odot}/\text{pc}^3$ (1 pc = 3.26 ljusår). Den tätaste stjärnhopen har en densitet på bara $\rho = 10^5 M_{\odot}/\text{pc}^3$.

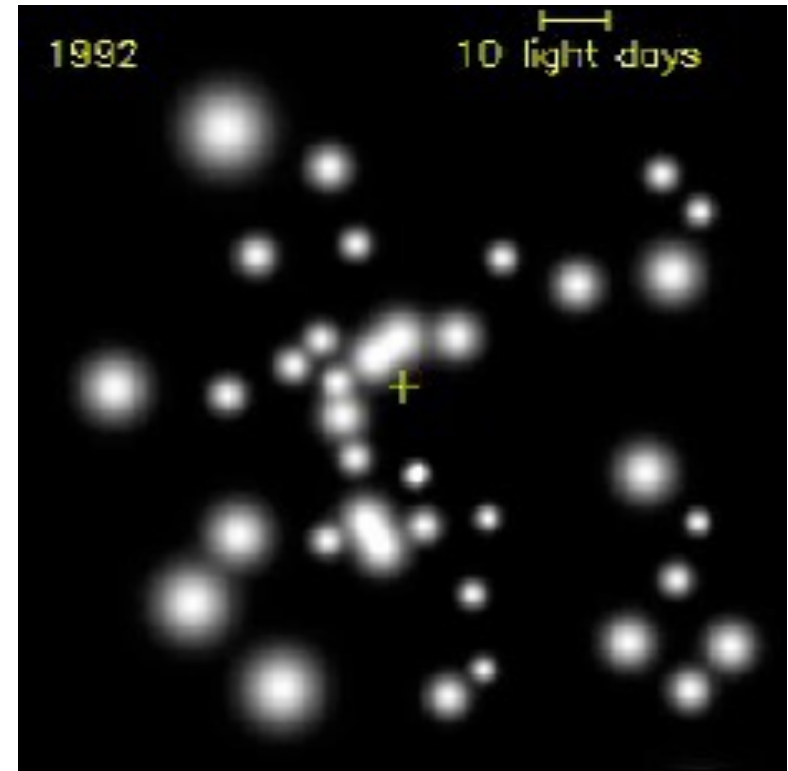
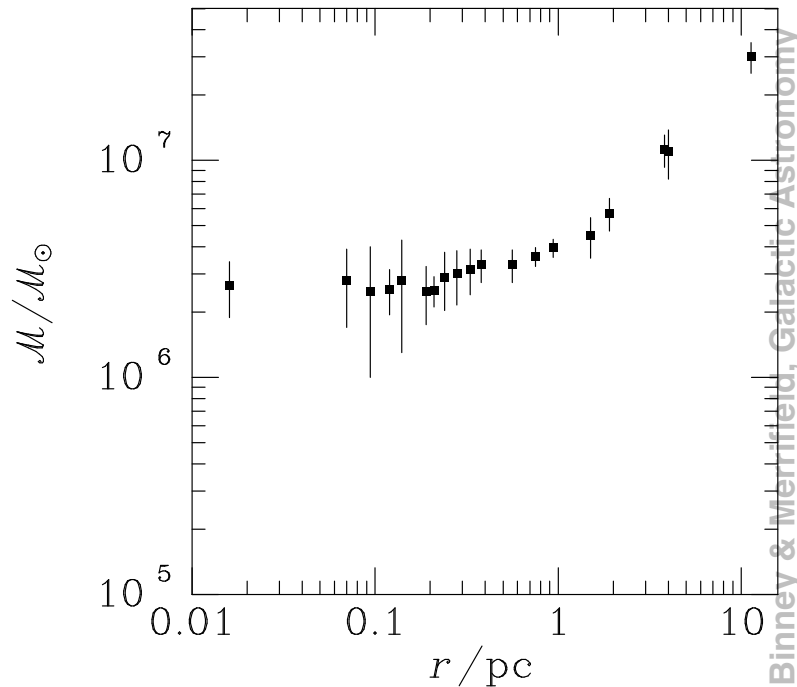


Nya teleskop och adaptiv optik



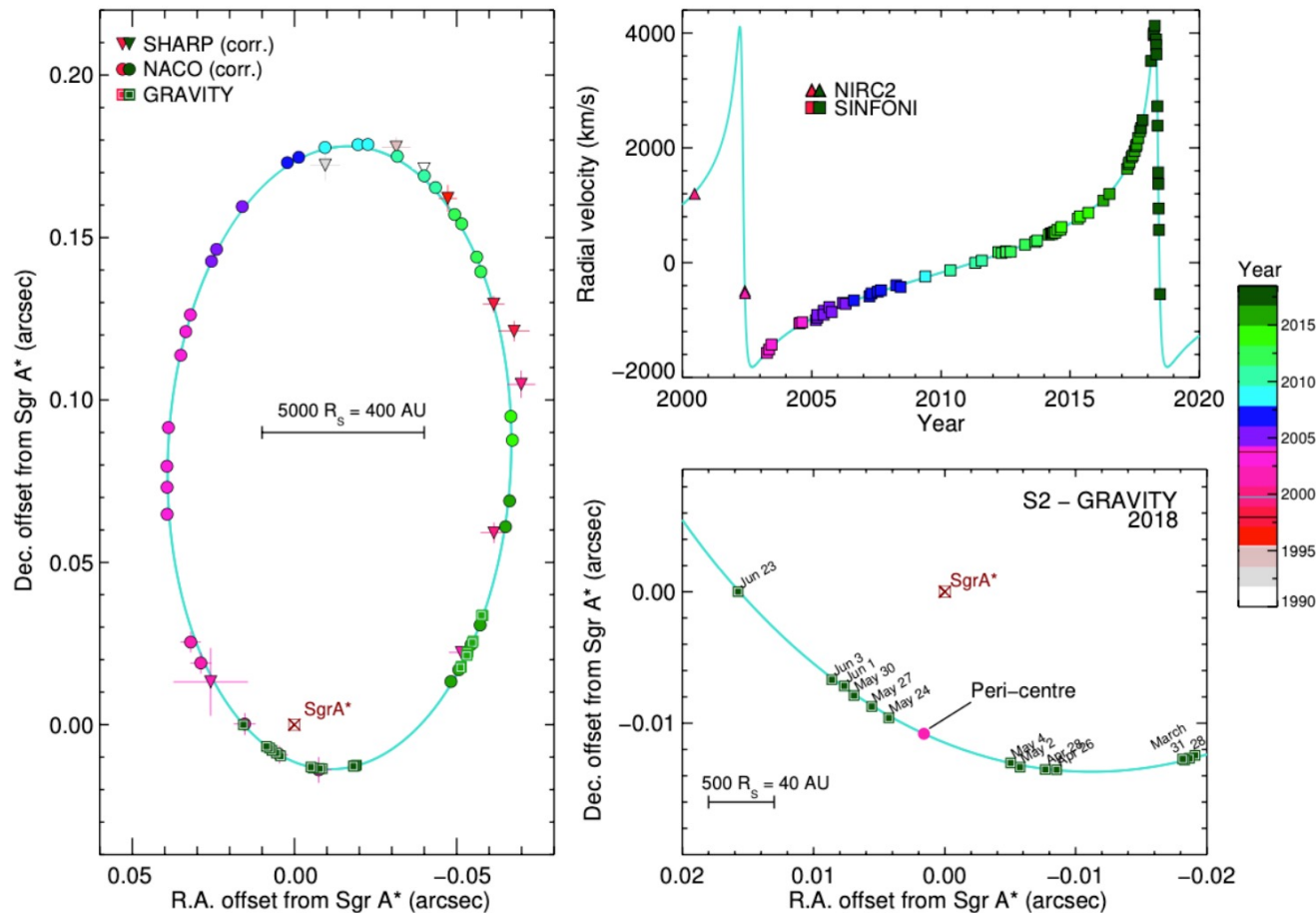
3. **Adaptiv optik:** Teleskopet utrustas med en tunn extra spegel som följer turbulensen i luften och rättar till den deformerade bilden.

Stjärnornas omloppsbanor i Vintergatans centrum



- Forskarna följer de trettiotal stjärnor som lyser klarast i stjärnvimlet. Mest kaotiskt går det till inom en radie av en ljusmånad från centrum. En av stjärnorna, **S2** hinner fullborda ett helt varv kring galaxmitten på nästan 16 år.
- Från stjärnornas hastigheter och rörelser kan man beräkna svarta hålets massa, som är $M_{\text{BH}} = 4.3 \times 10^6 M_{\odot}$. Avståndet till Vintergatans centrum är $R \sim 8.2 \text{ kpc}$.

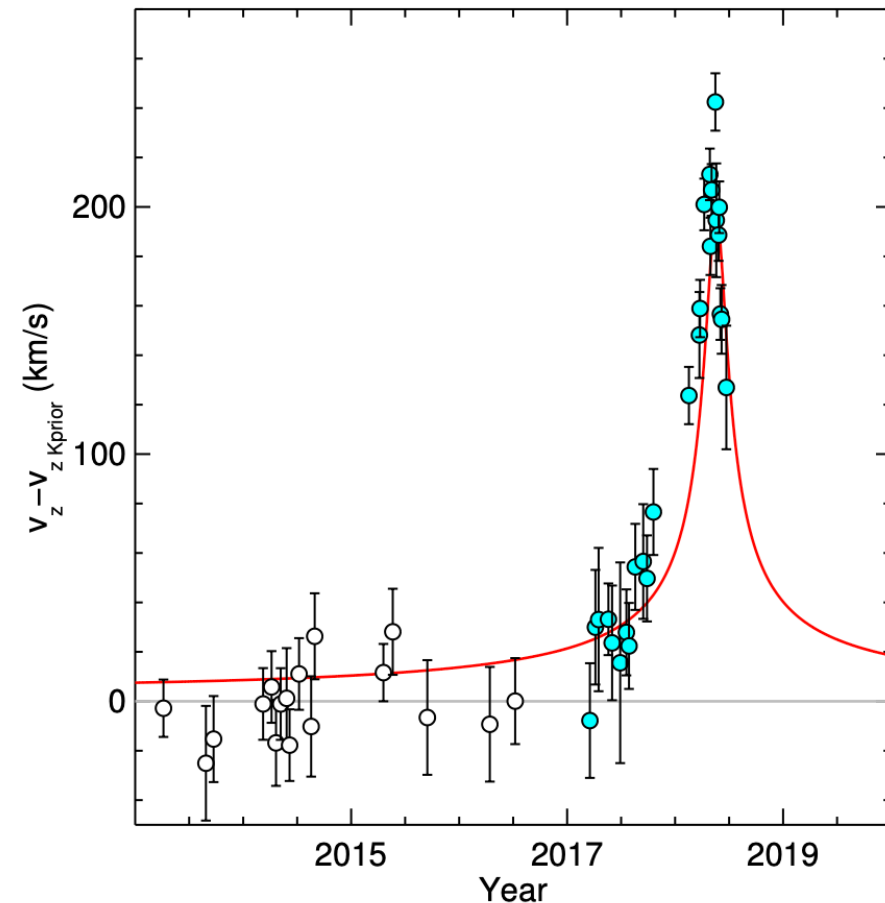
Nya observationer med GRAVITY



- År 2018 observerade Genzels grupp S2 stjärnans rörelse med rekordhög upplösning (GRAVITY-instrumentet på VLT). Stjärnan är som närmast bara 17 ljusminuter ($\sim 120 \text{ AU}$) från svarta hålet.

Svarta hålet och den allmänna relativitetsteorin

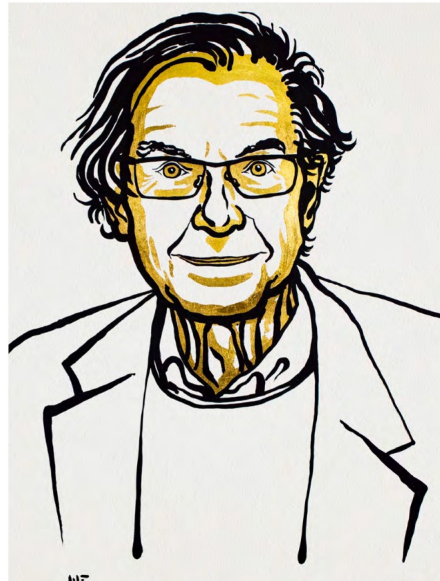
- S2 stjärnan rör sig som snabbast med en hastighet av 7650 km/s (2.5% av ljusets hastighet).
- Stjärnans dynamiska omloppsbana kräver korrektioner både från den speciella och allmänna relativitetsteorin (relativistiska Doppler effekten och gravitationsrödförskjutningen).
- Den nästa effekten som observationerna borde påvisa är Schwarzschild-precessionen (12 bågminuter för S2).
- För tillfället är det ännu inte möjligt att observera svarta hålets spin (Lense-Thirring precession).



Prisvinnarna - Nobelpriset i fysik 2020

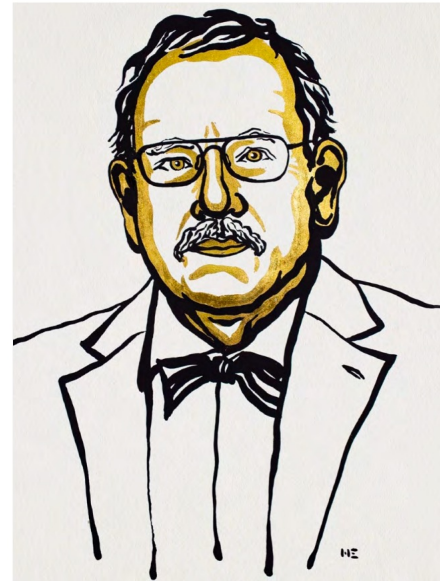
The 2020 Physics Laureates

Roger Penrose
"for the discovery that black hole formation is a robust prediction of the general theory of relativity"



Roger Penrose
Born: 1931, United Kingdom

Reinhard Genzel and Andrea Ghez
"for the discovery of a supermassive compact object at the centre of our galaxy"



Reinhard Genzel
Born: 1952, Germany



Andrea Ghez
Born: 1965, USA

ILL. NIKLAS ELMEDHED. © NOBEL MEDIA