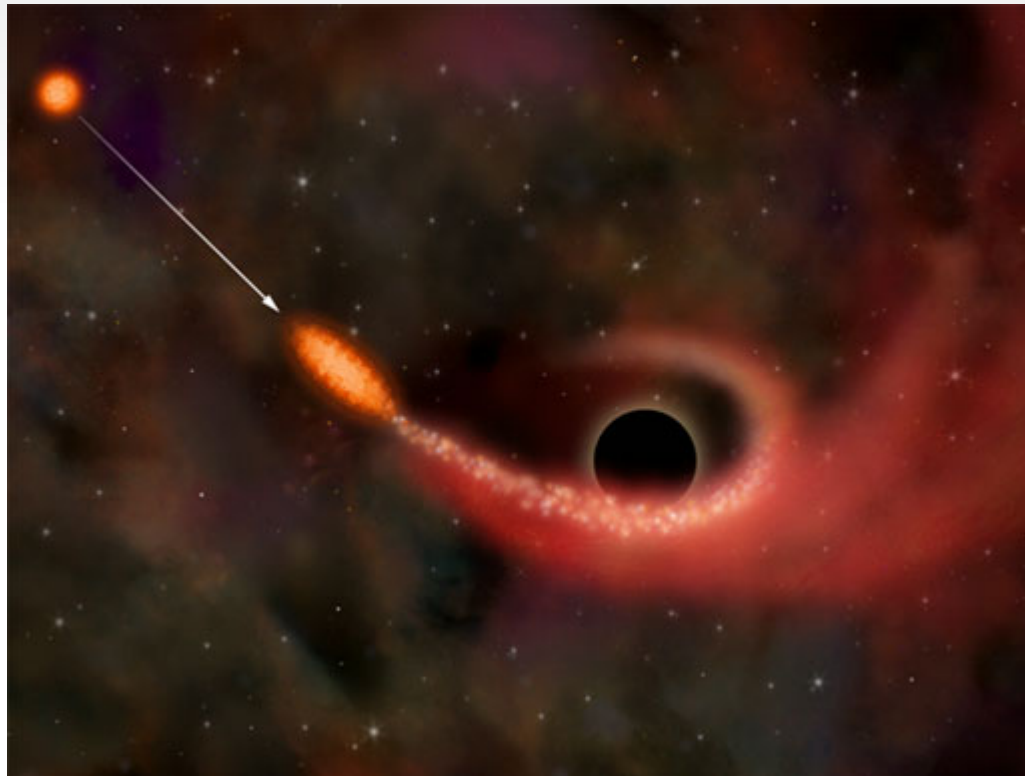


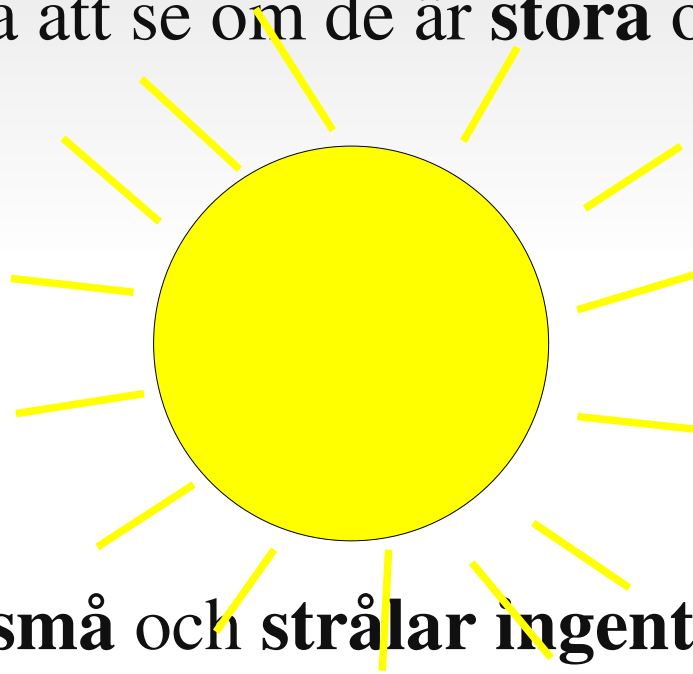
L9 : Observationer av svarta hål

- Boken : Kap. 3, Kap. 11 (sid 258-259)



Svarta hål är svåra att se!

- Den grundläggande svårigheten:
 - Objekt är lätta att se om de är **stora** och **strålar mycket**.



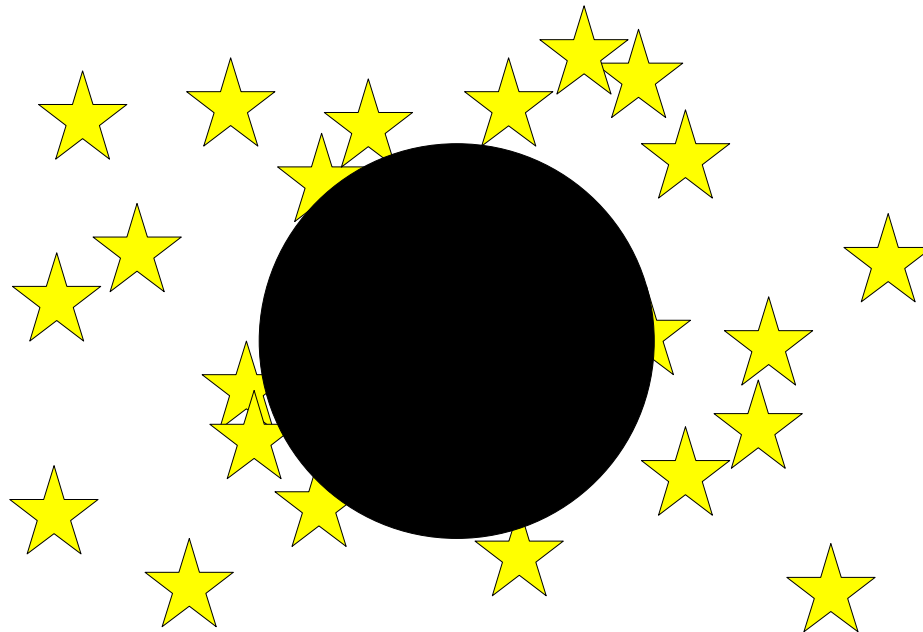
- Svarta hål är **små** och **strålar ingenting***.



** Frånsett Hawkingstrålning som vi behandlar i L10.*

Silhuetten

- Det är uppenbart att ett helt ensamt svart hål skulle vara svårt att upptäcka eftersom det inte strålar.
- Men kan vi se det blockera bakomliggande ljus, dvs kan vi se dess **silhuett**?



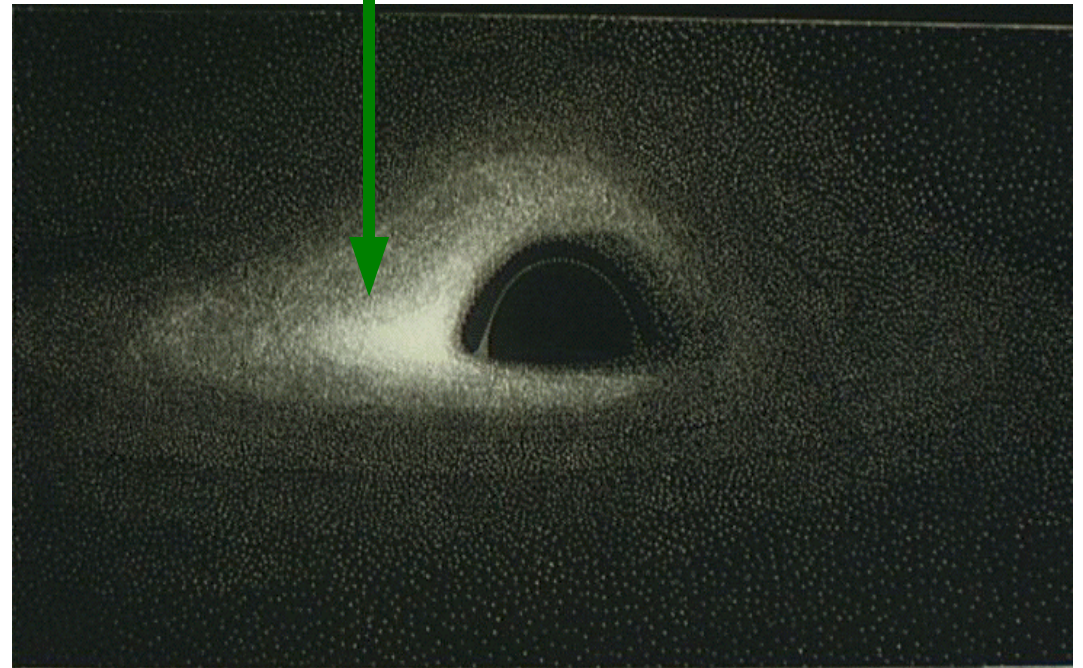
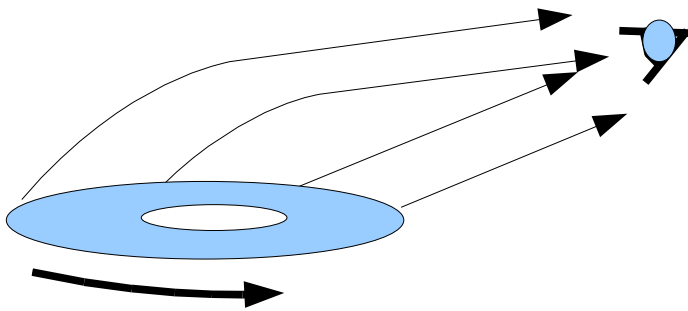
Silhuetten

- Detta är mycket svårt och osannolikt om bakgrundsljuset består av diskreta punkter (stjärnor och galaxer) : synfältet är redan fullt av ”mörka regioner”.
- Bakgrunden skulle dock istället kunna vara hålets **ackretionsdisk** (om det har en sådan).

Silhuetten

- I så fall blir effekten tydligare. Bilden av ett svart hål med **ackretionsdisk** skulle se ut ungefär som i den här simuleringen (se också sid 226 i boken):

Gasen som rör sig mot observatören strålar starkare pga Dopplereffekten.



Silhuetten

- Men även med en bra bakgrund så är ett *stellärt* ($M \sim 3-20 M_{\text{sol}}$) svart hål alldeles **för litet** för att upplösas med ens de bästa teleskopen, och kan därför inte fotograferas på det viset.

- Ett **supermassivt** svart hål är dock desto större:

$$M = 10^6 M_{\text{sol}} \quad \rightarrow \quad R_S = 4 R_{\text{sol}}$$

$$M = 10^9 M_{\text{sol}} \quad \rightarrow \quad R_S = 20 \text{ AU}$$

- Deras silhuetter är på gränsen till vad teleskopen idag kan upplösa. Vi återkommer till de supermassiva hålen i L11.

Material som faller in i hålet?

- Rymden mellan stjärnorna är inte tom, den innehåller gas och stoft, det sk **interstellära mediet**.
- Skulle vi kunna se någon emission som uppstår när detta material 'sugs' in i det svarta hålet?

Infallsenergi

- Svarta hål är de mest kompakta objekten som finns och ger därför de högsta fallenergierna : ungefär lika med **halva vilomassaenergin**. (Med Newtonsk gravitation : $GMm/R_s = GMm/(2GM/c^2) = 1/2mc^2$)

$$E_{fall} \approx \frac{1}{2} m c^2$$

För svarta hål.

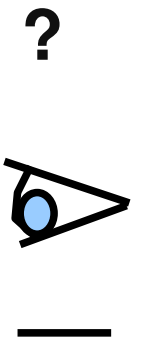
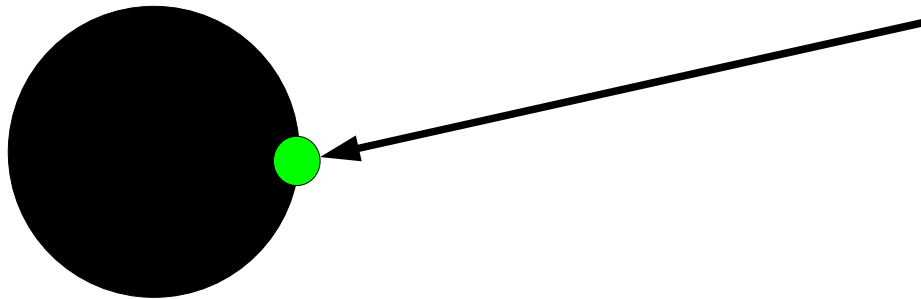
Infallsenergier mot massor med $M = 1 M_{\text{sol}}$

Objekt	Storlek [km]	Fallenergi [$*mc^2$]
Solen	700,000	0.000001
Vit dvärg	10,000	0.0001
Neutronstjärna	10	0.2
Svart hål	3	0.5

Jämför med effektiviteten för fusion : **0.007 mc^2**

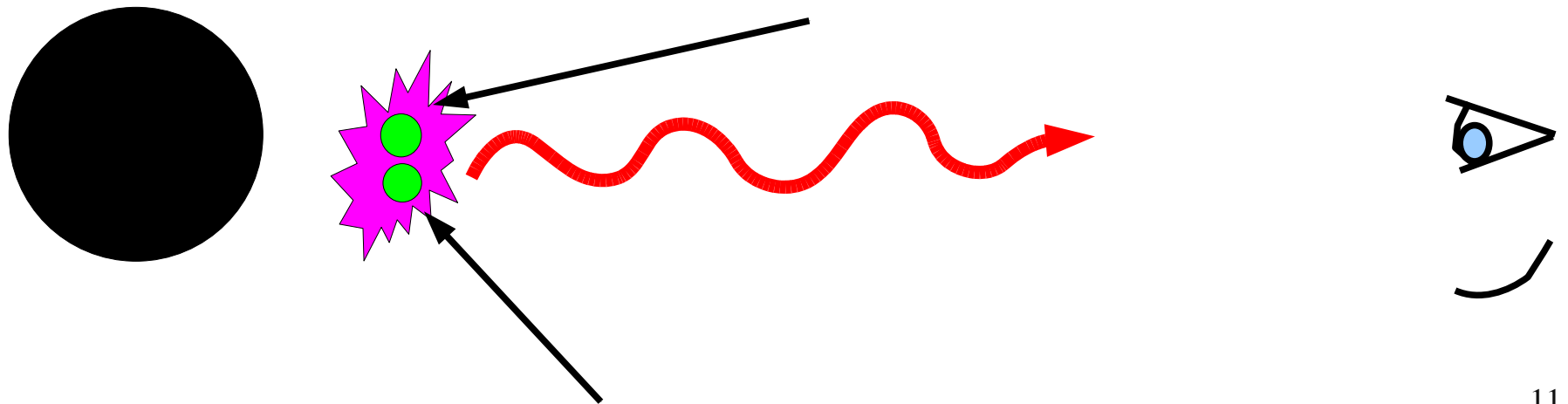
En partikel faller in i ett svart hål

- **Men**, såvida den infallande partikeln inte interagerar med någon annan partikel så försvinner den med hela sin energi in i hålet *utan att emittera någon strålning alls!*



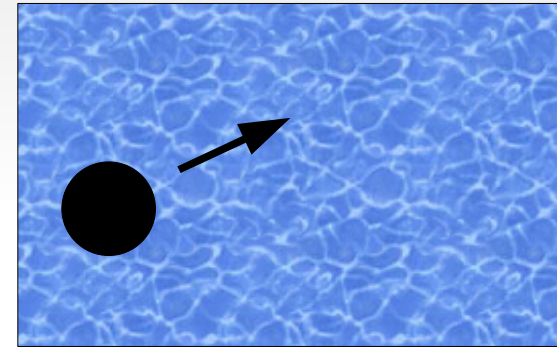
Flera partiklar faller in i ett svart hål

- I verkligheten **krockar** dock partikeln ofta med andra partiklar som också är på väg in, och en del av deras rörelseenergi omvandlas då till ljus som kan ses av en observatör.



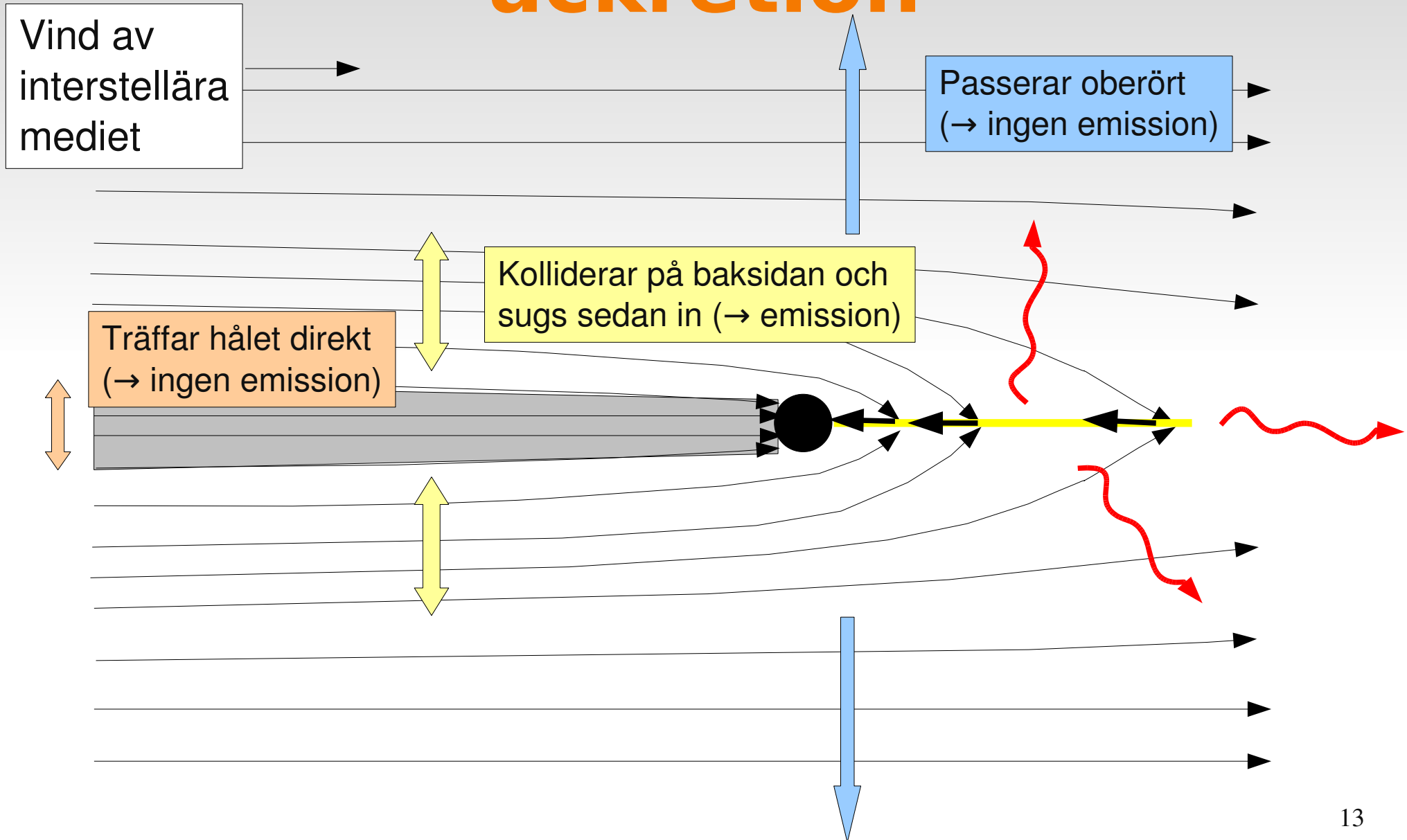
Ackretion : Ensamma hål

- Åter nu till iden om ackretion av det **interstellära mediet**.
- Denna process har fått namnet **Bondi-Hoyle-Lyttleton ackretion** efter dess huvudutvecklare.
- Om vi tittar på situationen i det svarta hålets referensram så upplever hålet att det blåser en 'vind' av partiklar förbi det.



*Rymden är inte tom: mellan stjärnorna finns gas och stoft : det **interstellära mediet**.*

Bondi-Hoyle-Lyttleton ackretion



Ackretion : Ensamma hål

- Räknar man på detaljerna visar det sig att ackretion av det interstellär mediet ger en ganska blygsam emission.
- Ett sådant svart hål kan bara upptäckas om det är inom ett par ljusår från oss. Men uppskattningen av avstånden mellan de svarta hålen är större än så (~30 ljusår, se L8). Slutsats:

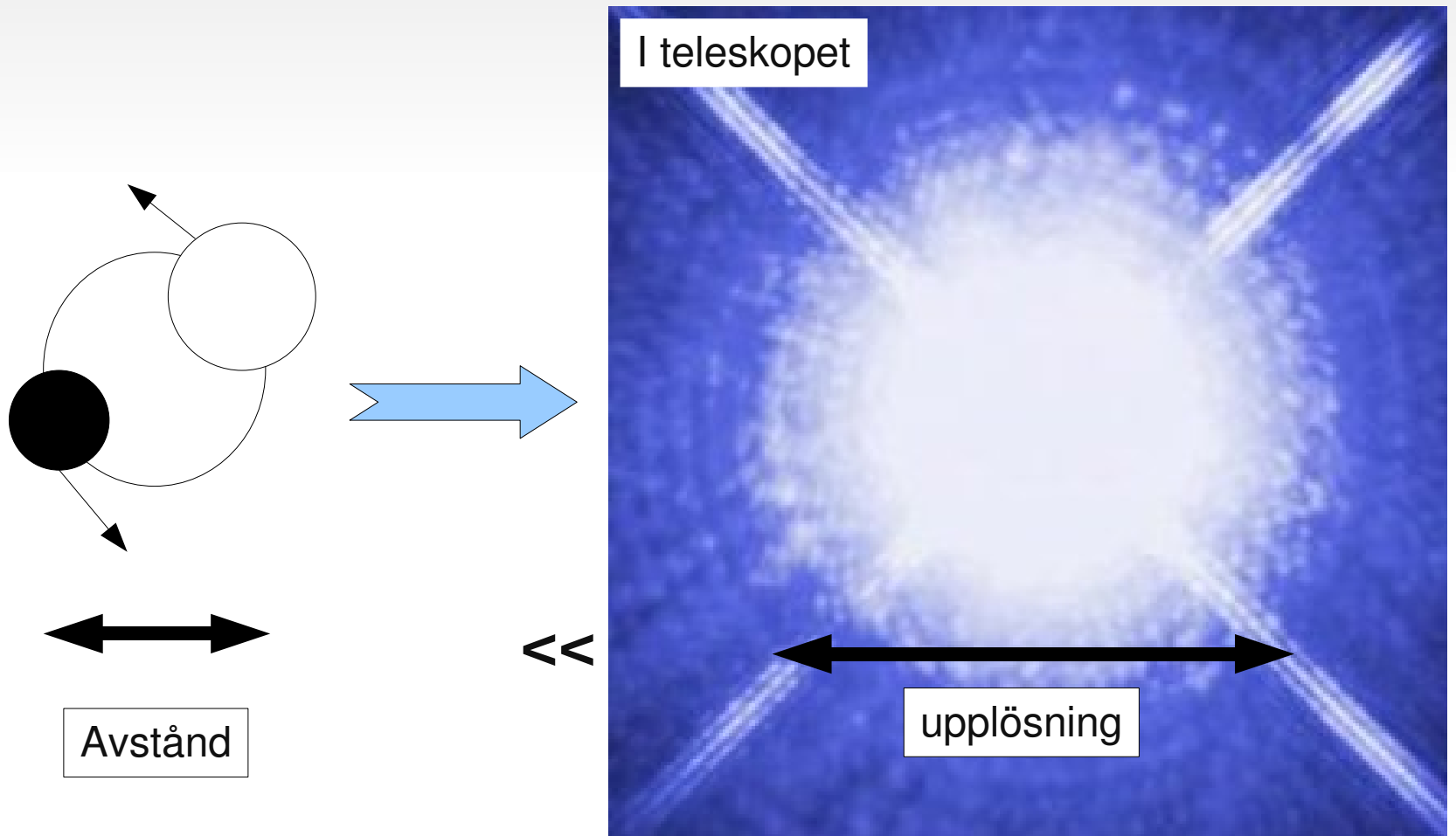
*Ensamma (stellära) svarta hål kan **inte** upptäckas genom sin ackretion av det interstellära mediet.*

Dubbelstjärnor

- Många av stjärnorna på himlen är i själva verket **dubbelstjärnor** (eller **binärer**), dvs två stjärnor i omlopp kring varandra.
- Skulle man kunna tänka sig en dubbelstjärna där den ena ”stjärnan” är ett svart hål, och att det svarta hålet avslöjar sig genom sin påverkan på den andra stjärnan?

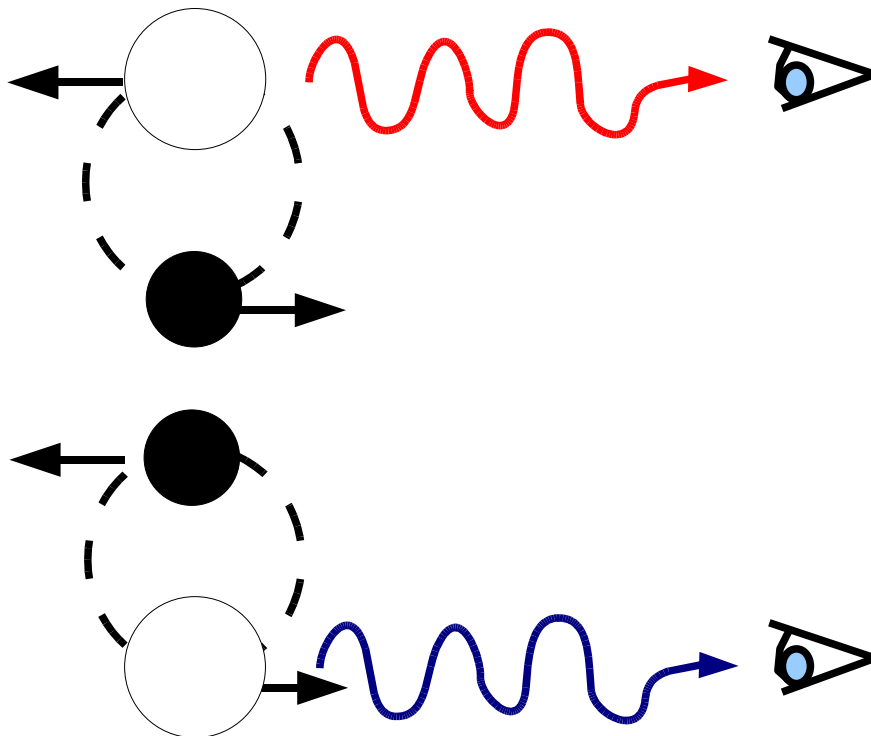
Analys av binärer

- Avståndet mellan stjärnorna i en binär är nästan alltid för litet för att kunna upplösas i ett teleskop.



Analys av binärer

- Den dubbla naturen identifieras istället genom att studera hur ljusets **färg** varierar på ett periodiskt vis.

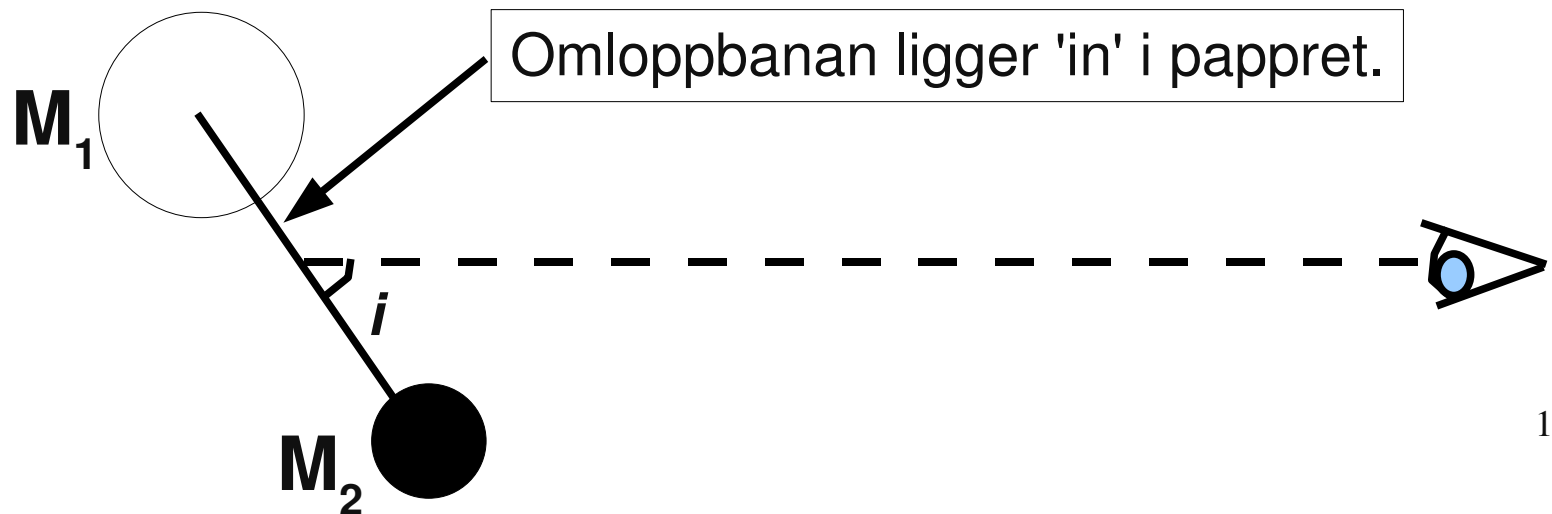


Stjärnan rör sig bort → rödaktigt ljus

Stjärnan rör sig mot → blåaktigt ljus

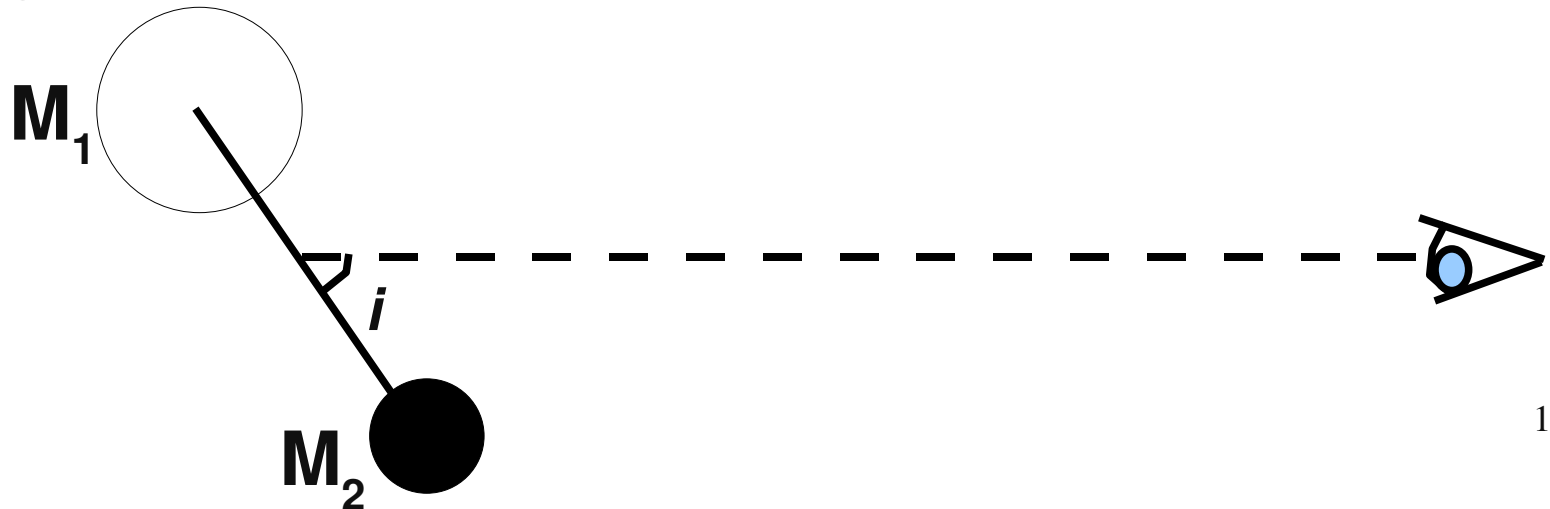
Analys av binärer

- Observationerna av färgförskjutningarna ger ett tal som beror på tre okända parametrar:
 - 1) Massa 1 (M_1)
 - 2) Massa 2 (M_2)
 - 3) Omloppsbanans vinkel i relativt observatören



Analys av binärer

- För att komma åt det kompakta objektets massa (M_2) måste M_1 och i bestämmas.
 - M_1 : Genom att tillämpa spektralteorier på det observerade spektrumet (olika massor ger olika form på spektrumet).
 - i : Begränsas av närvaron/frånvaron av **eklipser**.



Analys av binärer

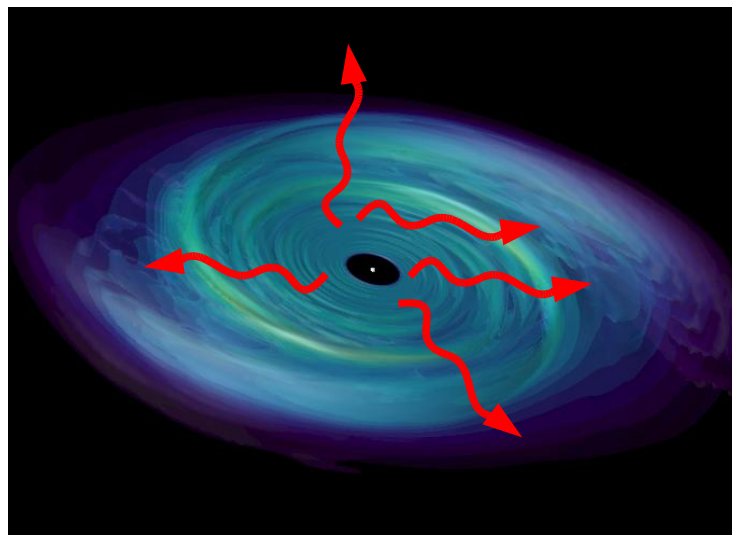
- I princip kan man därför hitta system där
 - Bara en stjärna syns, men dess rörelsemönster avslöjar att en kompanjon finns.
 - Kompanjonen har $M > 3 M_{\text{sol}}$.
- Eftersom vita dvärgar och neutronstjärnor inte kan bli mer massiva än 1.4 och $2-3 M_{\text{sol}}$ respektive, skulle man därför ha hittat ett svart hål.
- Problemet är att man kan alltid tänka sig att kompanjonen är ljussvag av andra anledningar, tex att den omges av stoft.

Analys av binärer

- Det måste därför till någonting *mer* för att verkligen hitta de svarta hålen.
- Vi måste leta efter signaturen för den mycket starka gravitation och kompakta storlek som ett svart hål har.

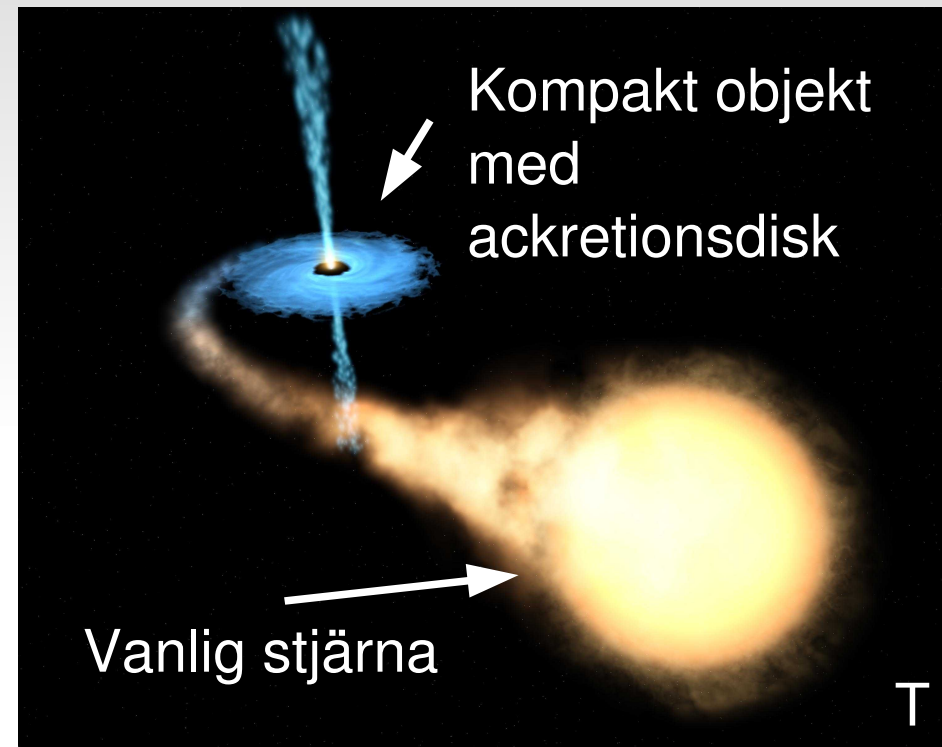
Massöverföring

- Som vi sett i tidigare lektioner (tex L7) kan massa överföras från den ena till den andra stjärnan via en **ackretionsskiva**.
- Runt neutronstjärnor och svarta hål är gravitationen så stark att ackretionsskivan hettas upp till miljontals grader, vilket orsakar **röntgenstrålning**.



Ackretion : Hål med kompanjon

- Ackretion i en binär med ett kompakt objekt (NS eller ett SH) borde därför emittera stark röntgenstrålning : ett sådant system kallas en **röntgenbinär**.

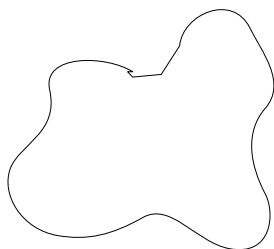
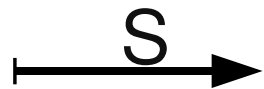


Tidsvariation

- För alla emitterande föremål så tar det en viss tid för en **förändring** i systemet att nå observatören.
- Strålningen från 'delen längst bort' tar tiden

$$\Delta t = \frac{S}{c}$$

'extra' att anlända till observatören, så detta är tiden det tar att se hela förändringen.



Tidsvariation

- Ett svart hål med $M = 10 M_{\text{sol}}$ har $R_S = 30 \text{ km}$.
- Antag att ackretionsskivan är en faktor ~ 10 gånger större än det svarta hålet $\rightarrow S = 300 \text{ km}$.
- Då får vi en tidsskala för förändringar som är

$$\Delta t = \frac{300 \text{ km}}{300,000 \text{ km/s}} = 0.001 \text{ s} \quad \longrightarrow$$

Emissionen från regionen runt (stellära) svarta hål kan variera på en tidsskala på ~ 1 millisekund!

Signaturen av ett svart hål

- Vi ser nu vad **signaturen** av ett stellärt svart hål borde vara:

Stark röntgenstrålning som kan variera på mycket korta tidsskalor (~ 1 ms).

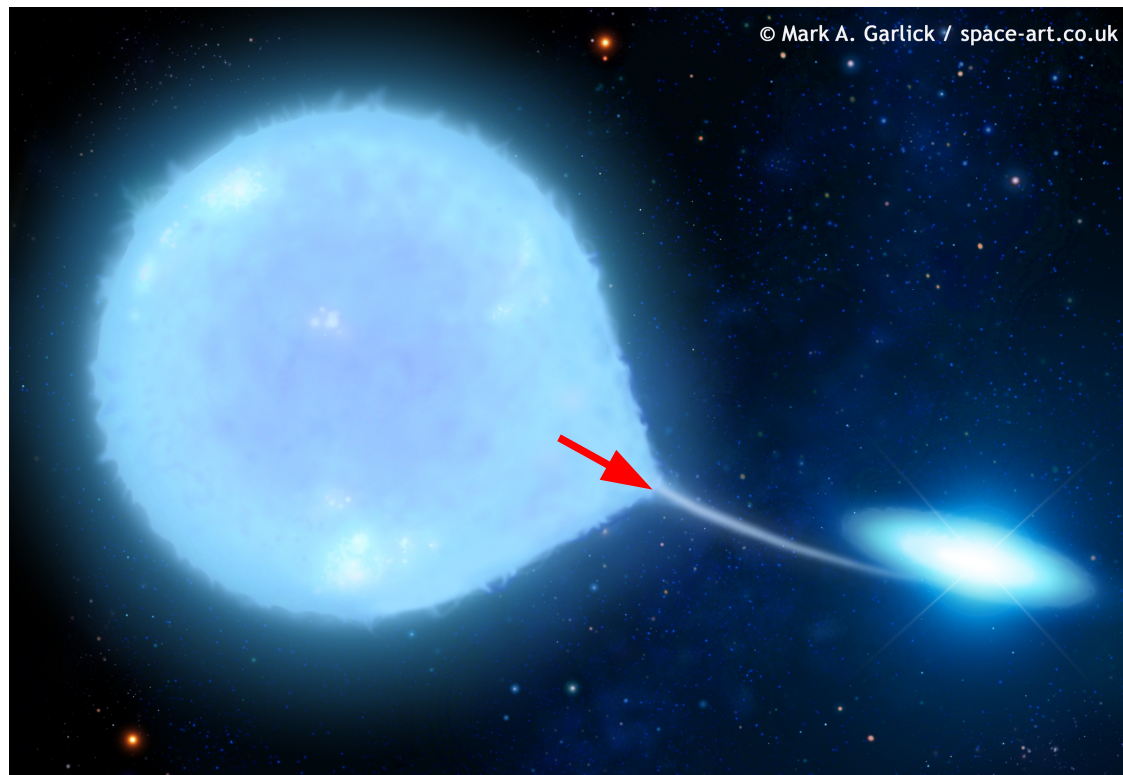
- Detta är dock inte en *unik* signatur, eftersom ackreterande neutronstjärnor kan åstadkomma i stort sett samma sak!

Klassifikation av röntgenbinärer

- Röntgenbinärer klassificeras i två grupper beroende på massan hos den *vanliga* (donerande) stjärnan
 - ↳ **Low-Mass X-ray Binary (LMXB)**
 - ↳ **High-Mass X-ray Binary (HMXB)**
- Man gör denna uppdelning för att själva **mekanismen** för massöverföringen skiljer sig åt mellan lågmassiva och högmassiva donatorer.

Lågmassiv donator

- Om donatorn är en **lågmassiv stjärna** sker ackretionen genom att dess yta kommer så nära det kompakta objektet att det kan suga åt sig material via **L1-punkten**.



Lågmassiv donator

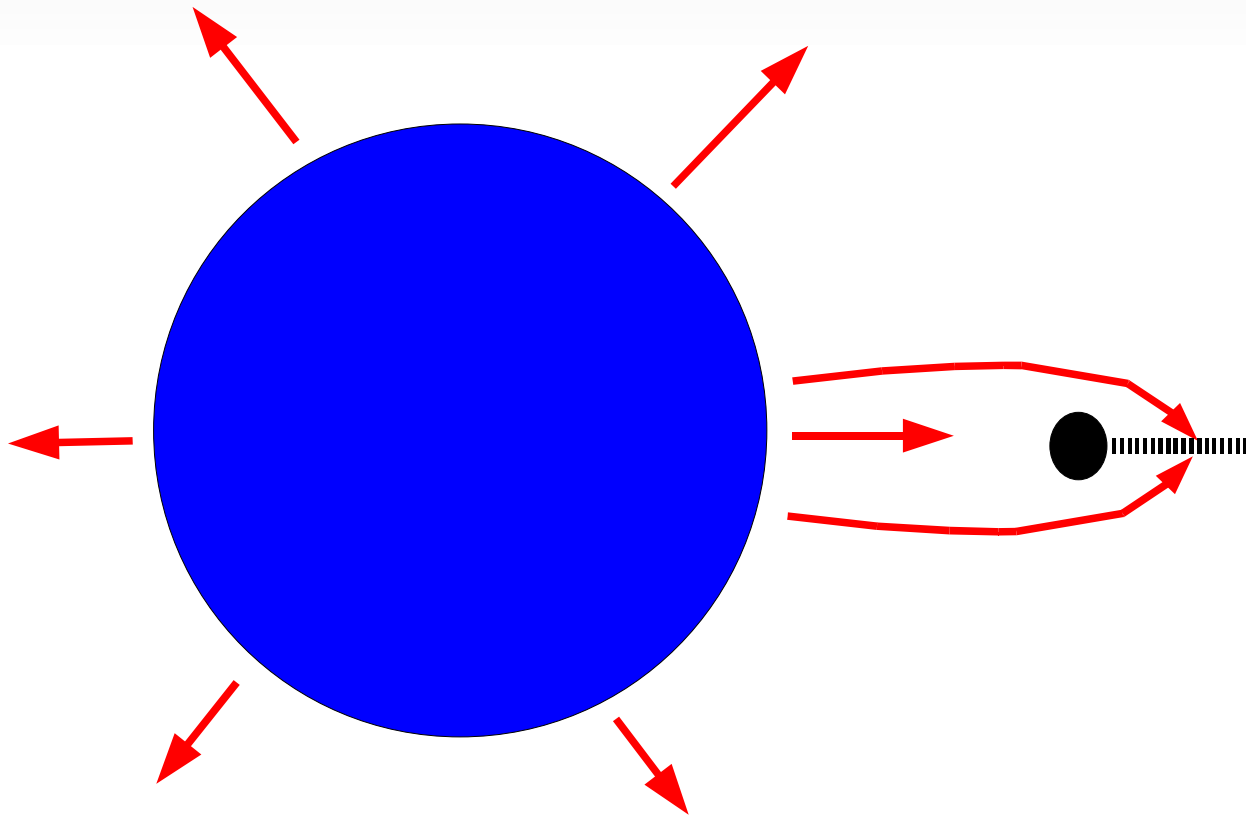
- Processen aktiveras när den lågmassiva stjärnan börjar svälla upp i slutet av sitt liv, och kan sedan pågå i 10^7 - 10^9 år tills den har krympt tillbaka och blivit en vit dvärg.

$$t_{LMXB} \sim 10^7 - 10^9 \text{ år}$$

- Eftersom donatorn är liten och ljussvag är den ofta svår att se; ackretionsdisken lyser starkare och dränker den med sin emission.

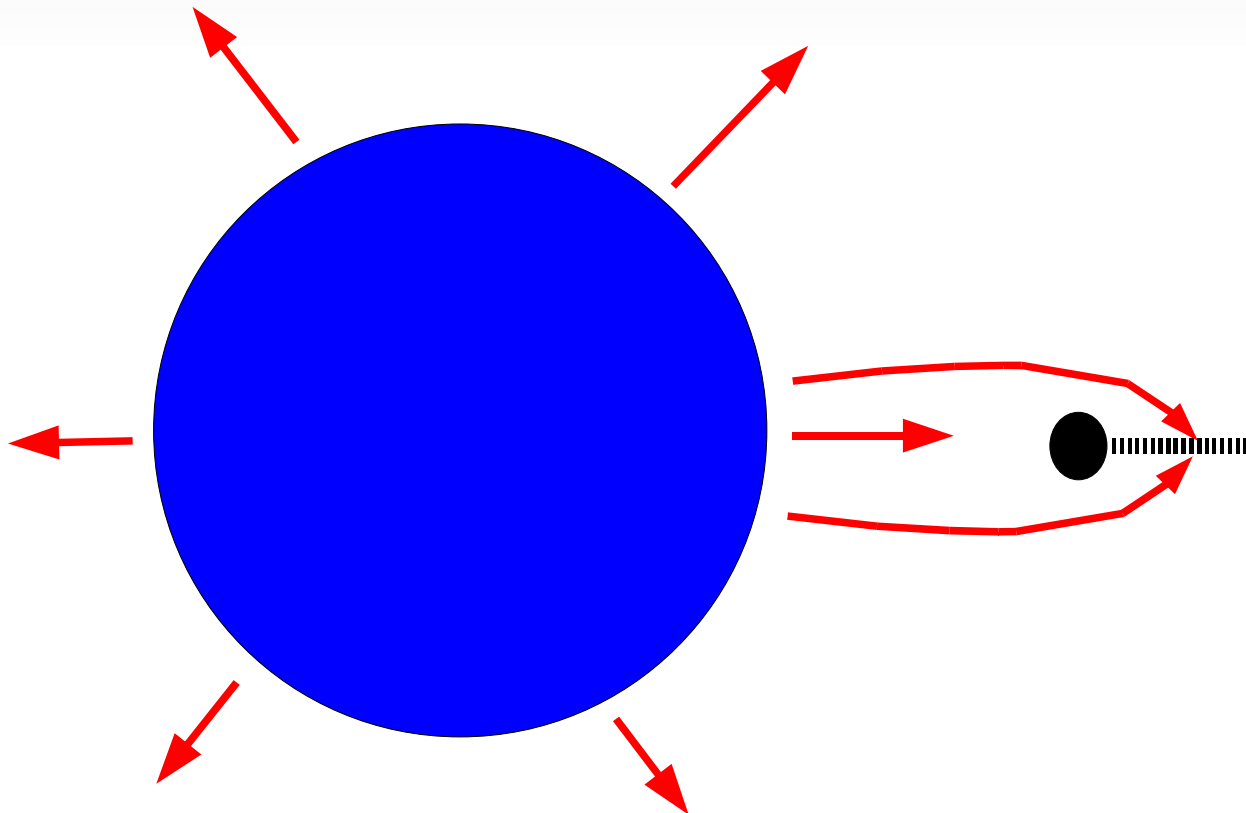
Högmassiv donator

- Om donatorn är en **högmassiv stjärna** sker istället ackretionen främst genom att en del av stjärnans **vind** träffar det kompakta objektet.



Högmassiv donator

- Mekanismen är densamma som i Bondi-Hoyle-Lyttleton-ackretionen, fast med betydligt mer 'bränsle' än vad interstellära mediet ger.



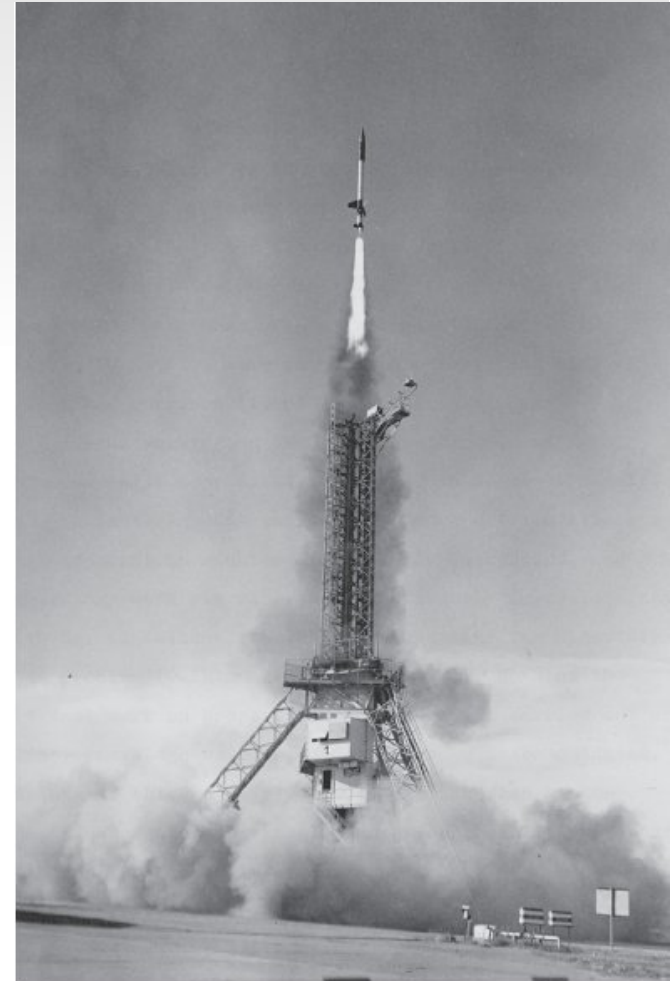
Högmassiv donator

- Eftersom en högmassiv stjärna bara lever i ungefär 10^7 år kan denna typ av process inte vara aktiv längre än så.
- Dessutom måste först den massiva stjärnan som *bildat* det kompakta objektet själv gå igenom sin utveckling.
- Eftersom ingen stjärna lever speciellt mycket kortare än 10^7 år blir tidsskalan är därför snarare runt 10^5 - 10^6 år.

$$t_{\text{HMXB}} \sim 10^5\text{-}10^6 \text{ år} \ll t_{\text{LMXB}}$$

Raketbaserad röntgenastronomi

- Röntgenstrålning tränger inte igenom jordens atmosfär, och måste därför observeras ifrån rymden.
- Före 1960-talet hade man ingen möjlighet att göra detta. Då började dock de första rymdraketerna byggas, och **raketbaserad röntgenastronomi** blev möjlig.



Scorpius X-1

- 1962 upptäcktes den första röntgenkällan utanför solsystemet med hjälp av raketer som bara tog några minuters data åt gången.
- Källan låg i Skorpionen och kallades **Scorpius X-1**. Den kunde optiskt matchas med en spektroskopisk dubbelstjärna på 9000 ljusårs avstånd.
- Med avståndet känt kunde röntgenluminositeten bestämmas till $60,000 L_{\text{sol}}$.

Scorpius X-1

- Den osynliga kompanjonen visades ha $M_2 \sim 1.4 M_{\text{sol}}$, och var därför antagligen en neutronstjärna. (TOV-gränsen är minst $1.5 M_{\text{sol}}$)
- 1967 visades utifrån detaljerna i röntgenemissionen att så också var fallet.

Neutronstjärna eller svart hål?

- Som Scorpius X-1 illustrerade är svårigheten med röntgenbinärer att särskilja om det kompakta objektet är ett svart hål eller en neutronstjärna.
- Den viktigaste skillnaden är att en neutronstjärna har en **fast yta** vilket kan åstadkomma
 - Regelbundna pulseringar → **Röntgenpulsarer**
 - Termonukleära explosioner → **Röntgenstrålningsutbrott (L7)**.

Röntgenpulsarer

- Röntgenstrålningen kommer i detta fallet delvis från kollisionen mellan gas och neutronstjärnans yta.
- Eftersom magnetfältet kanaliserar gasen ner till polerna bildar dessa **hotspots** som ger pulseringar i takt med rotationsperioden.

Vita dvärgar?

- Den tredje typen av kompakt objekt är **vita dvärgar**. Hur vet man att det inte är sådana som ackreterar i röntgenbinärer?
- Vita dvärgar är en faktor ~ 1000 gånger större än neutronstjärnor och svarta hål. Därmed är..
 - **Fallenergierna** \sim tusen gånger lägre vilket ger lägre temperatur och mjukare strålning.
 - **Variationstidsskalan** \sim tusen gånger längre.
 - **Ackretionsskivan** större och man kan visa att röntgenstrålningen får svårt att ta sig ut.

Röntgensatelliter

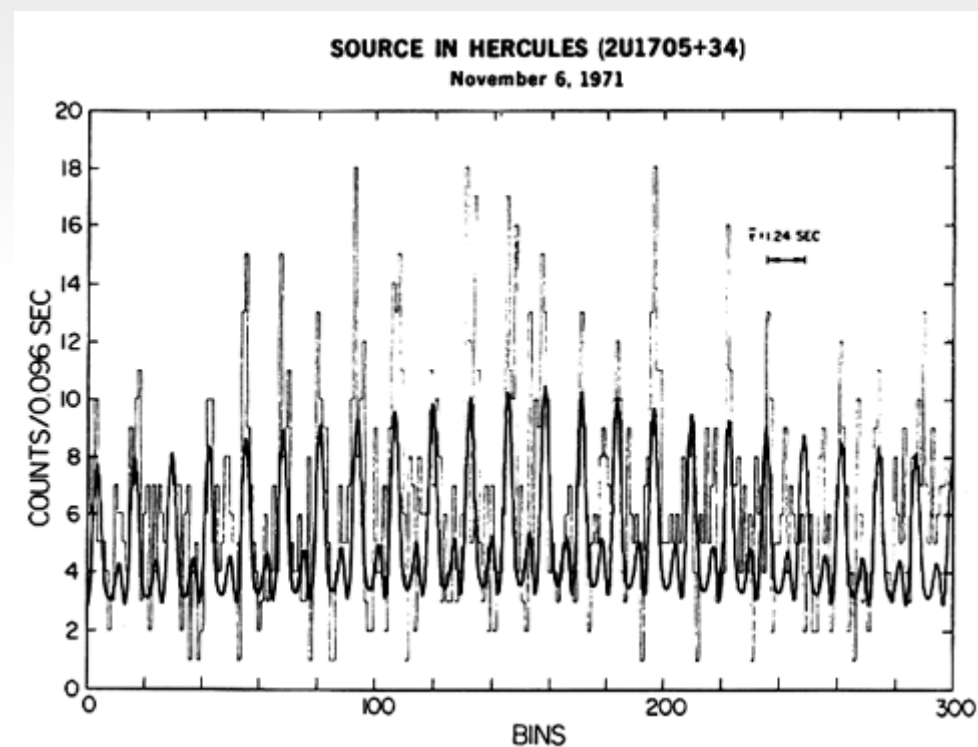
- För att komma vidare behövdes bättre data, vilket krävde att raketerna ersattes av **satelliter**.
- Den första röntgensatelliten var NASA's **Uhuru**, som sköts upp 1970. Den följdes av **Einstein** 1978. De upptäckte ytterligare binära system som emitterade röntgenstrålning, tex
 - Hercules X-1
 - Centaurus X-3

Einsteinsatelliten.



Röntgenpulsarer

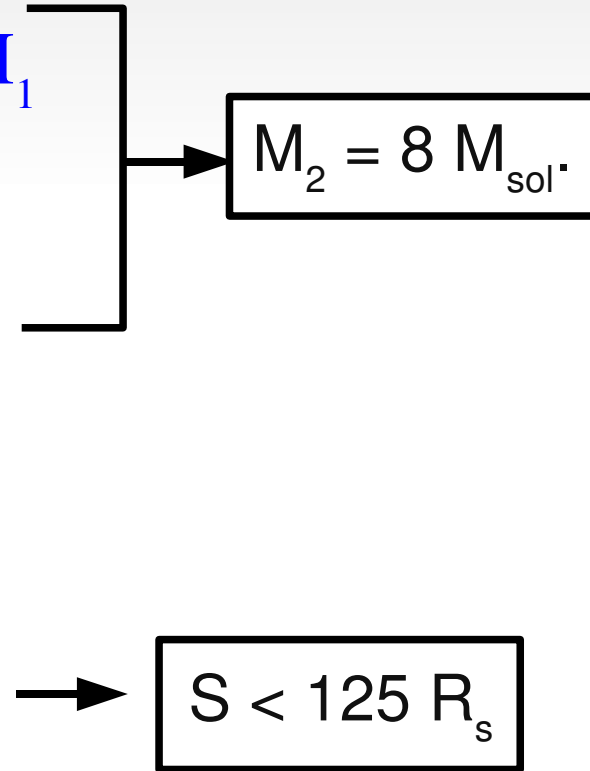
- Hercules X-1 och Centaurus X-3 visade sig ha **pulsationer** med en period på 4.84 respektive 1.24 sekunder.
- Detta talar om att de innehåller neutronstjärnor och inte svarta hål.



Det pulserande spektrumet från Hercules X-1.

Cygnus X-1

- Röntgenbinären **Cygnus X-1**, 6500 ljusår avlägset, har egenskaperna
 - Spektralklassen hos donatorn indikerar $M_1 \approx 20 M_{\text{sol}}$.
 - Inga eklipser $\rightarrow i > 55^\circ$.
 - Det finns inga pulseringar eller röntgenstrålningsutbrott.
 - Emissionen varierar på tidsskalor kortare än 10 ms



—————→ **Svart hål !**

Cygnus X-1

- Systemets dimensioner:



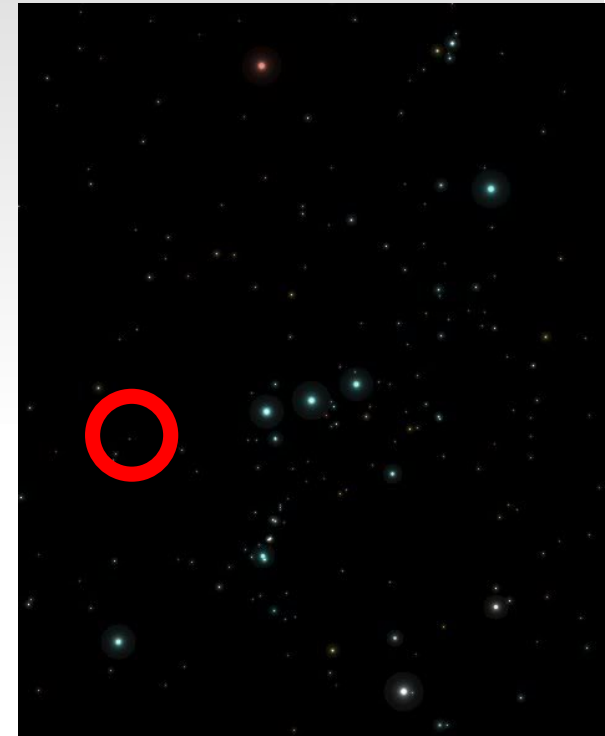
Donator = fotboll

Svarta hålet = sandkorn

Separation = 0.2 AU (1 cm)

A0620-00

- 3000 ljusår bort, det närmsta kända svarta hålet.
- Befinner sig i en LMXB, $M_2 > 3.2 M_{\text{sol}}$.
- Hade någon typ av utbrott 1917 och 1975, andra gången också i röntgen. Dessa utbrott är dock **typ II röntgenstrålningsutbrott** och orsakas av oregelbundenheter i ackretionen.



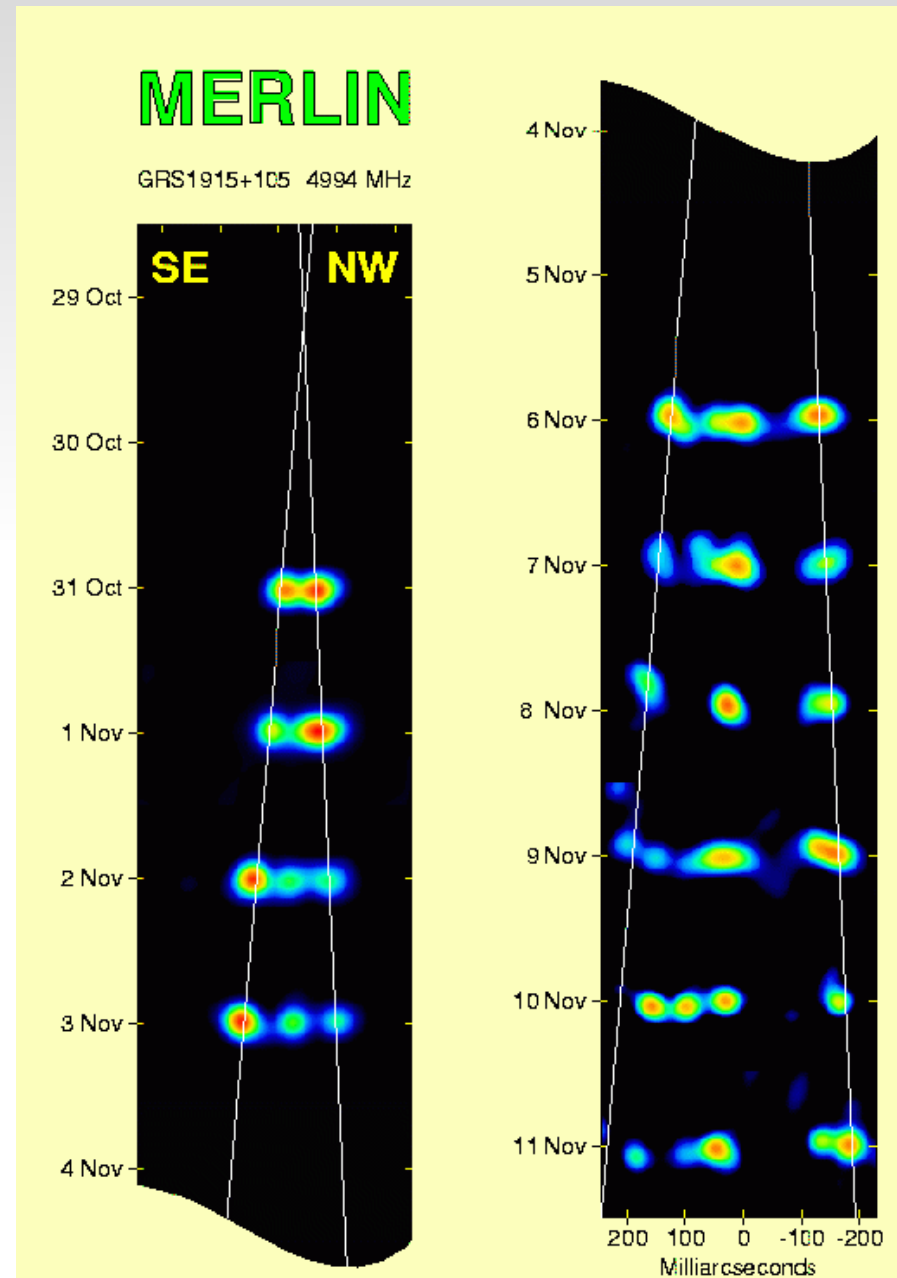
Det närmsta kända svarta hålet ligger i en riktning nära Orions bälte.

GRS 1915+105

- Det mest massiva kända svarta hålet ($M=14\pm 4 M_{\text{sol}}$).
- Man har mätt dess rotation till ~ 1000 varv per sekund.
- Tekniken bygger på att uppskatta radien för den sista stabila omloppsbanan SSO : denna beror på rotationen. SSO ligger längre in ju snabbare hålet spinner, och ackretionsskivan får därmed högre temperatur, vilket har uppmätts.

GRS 1915+105

- Det svarta hålet skjuter även iväg jets med $\sim 0.9c$.
- Ett sådant system kallas för en mikrokvasar.



Identifikation av ett svart hål

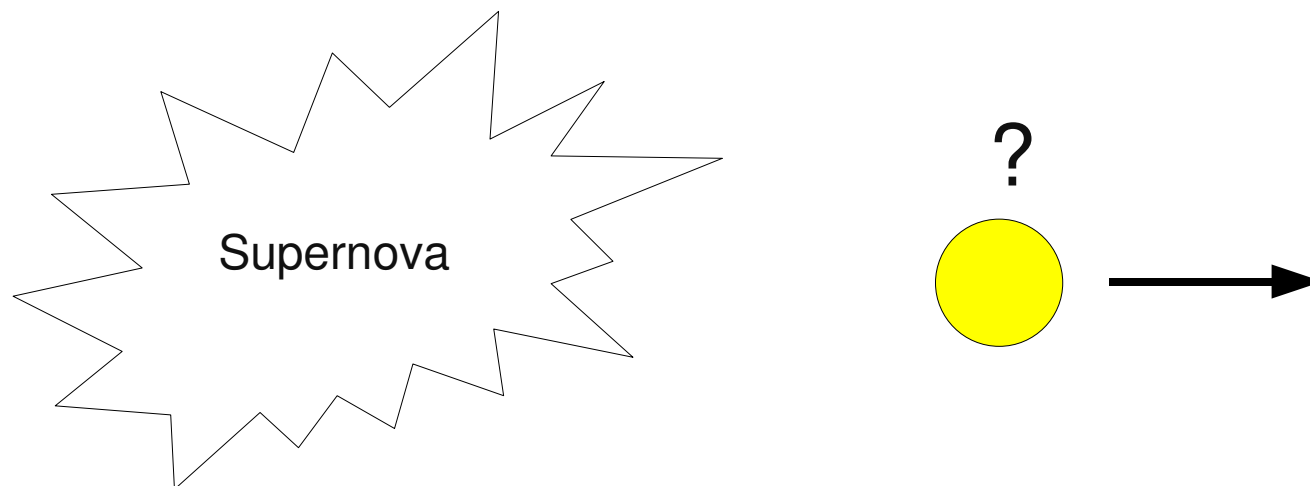
- Man idag identifierat ~ 20 röntgenbinärer där $M_2 > 3 M_{\text{sol}}$.
- $M > 3 M_{\text{sol}}$ visar att det inte kan vara en neutronstjärna (Tolman-Openheimer-Volkoff-gränsen) utan måste då vara ett svart hål.
- Slutsatsen måste stödjas av att inga pulsationer eller röntgenstrålningsutbrott (Typ I) förekommer.
- Millisekund-variation förekommer ibland men ofta inte.

Motargument till att det är svarta hål vi ser

- Det kompakta objektet är i själva verket **två** närliggande objekt.
- De kompakta objekten är **kvarkstjärnor**, hypotetiska stjärnor som man ännu inte vet om de existerar.
- Medan motargumenten inte helt kan förkastas är svarta hål-hypotesen den som som är *enklast*.

Formation av röntgenbinärer

- Har vi en fysikaliskt rimlig bild av hur dessa system bildats?
- Neutronstjärnor och svarta hål bildas (*nästan* alltid) i kraftfulla supernovaexplosioner. Hur undviker den andra stjärnan att flyga iväg i explosionen?



LMXB formation

- Separation försvåras ju...
 - ..hårdare gravitationellt bundna stjärnorna är.
 - ..mindre den exploderande stjärnan är.
- En detaljerad analys visar att

Stjärnorna separeras om mer än hälften av deras totala massa kastas iväg i supernovaexplosionen.

LMXB formation

- Antag att vi har ett stjärnsystem med en stjärna på $20 M_{\text{sol}}$ och en på $1 M_{\text{sol}}$.
- Ju mer massiv en stjärna är desto kortare lever den
→ den massiva stjärnan får slut på bränsle först.
- Den sväller då upp som en röd jätte.

LMXB formation

- Om den lilla stjärnan ligger tillräckligt nära kan det expanderande höljet nå den.
- Detta gör att stjärnorna 'fastnar' i varandra och
 - 1) Tappar omloppsenergi, hamnar närmare varandra, och är därmed **hårdare gravitationellt bundna**.
 - 2) Omloppsenergin överförs till stor del till den massiva stjärnans **hölje**, som delvis *lämnar systemet*. Den exploderande stjärnan blir därför **mindre**.

HMXB formation

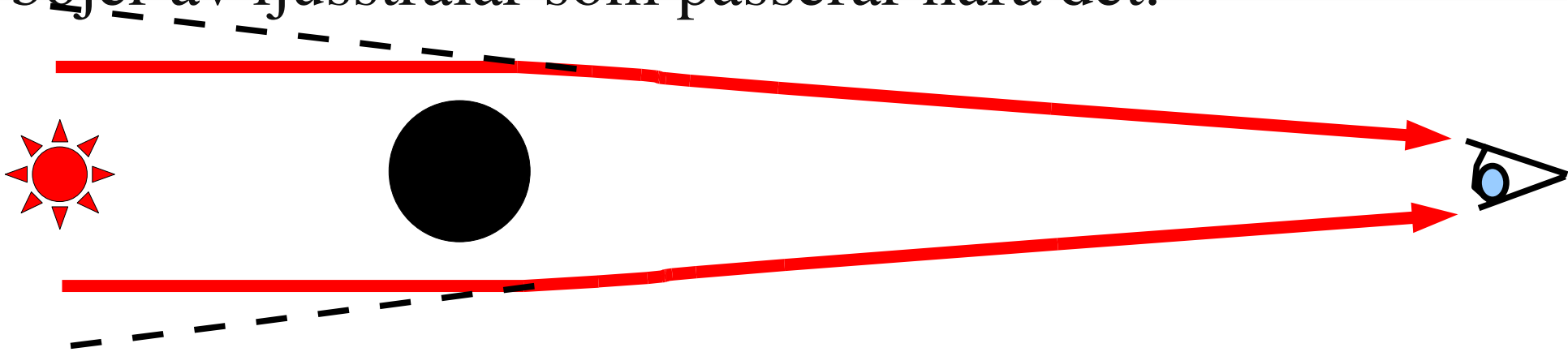
- Antag nu att vi istället har två massiva stjärnor på $20 M_{\text{sol}}$ och $10 M_{\text{sol}}$.
- Den med $20 M_{\text{sol}}$ sväller upp först.
- Men den andra stjärnan ($10 M_{\text{sol}}$) är så massiv att den kan börja suga åt sig stora delar av höljet via Roche-lob-överföring.
- Till slut är *den* stjärnan den mer massiva.
- När den första exploderar har den för liten massa (mindre än hälften) för att lösa upp systemet.

Ackretion runt supermassiva hål

- Einstein-satelliten upptäckte 1978 att röntgenstrålning också kommer från vissa galaxers centrum.
- Idag tror man att det finns ett mycket stort svart hål i de flesta galaxers centrum.
- Mer om detta under kursens sista delar.

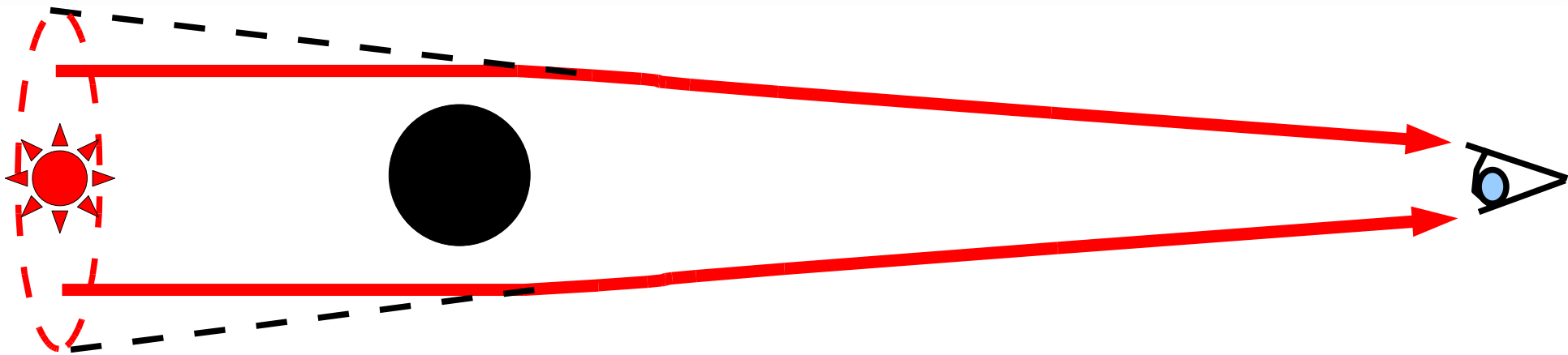
Gravitationell linsning

- Vi tittar nu på en helt annan metod att upptäcka svarta hål.
- Från allmän relativitetsteori vet vi att det svarta hålet böjer av ljusstrålar som passerar nära det.



Gravitationell linsning

- Effekten är symmetrisk i vinkel och det bakomliggande objektet avbildas som en **ring**. Denna kallas för **Einstein-ringen**.



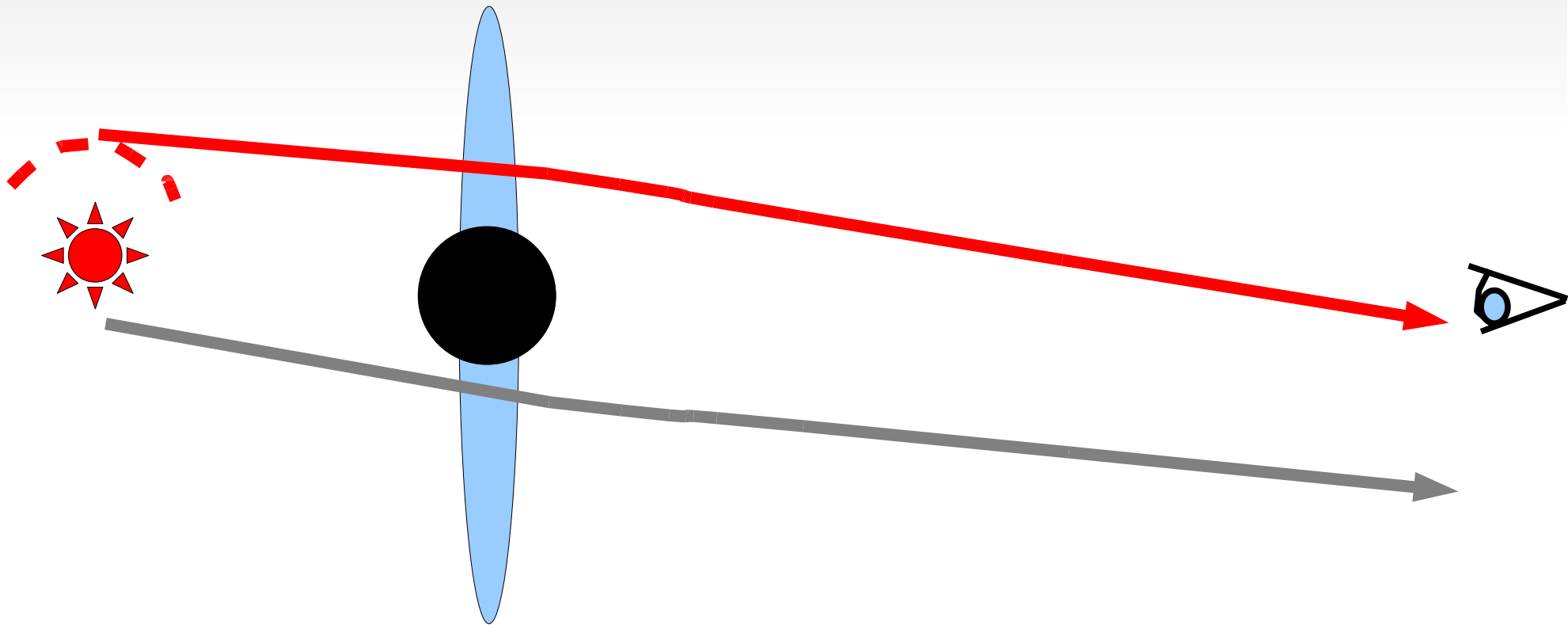
Gravitationell linsning

- Brytningen är liknande den som sker i en **lins**. Strålarna blir 'ihopfokuserade' och ljuset starkare.



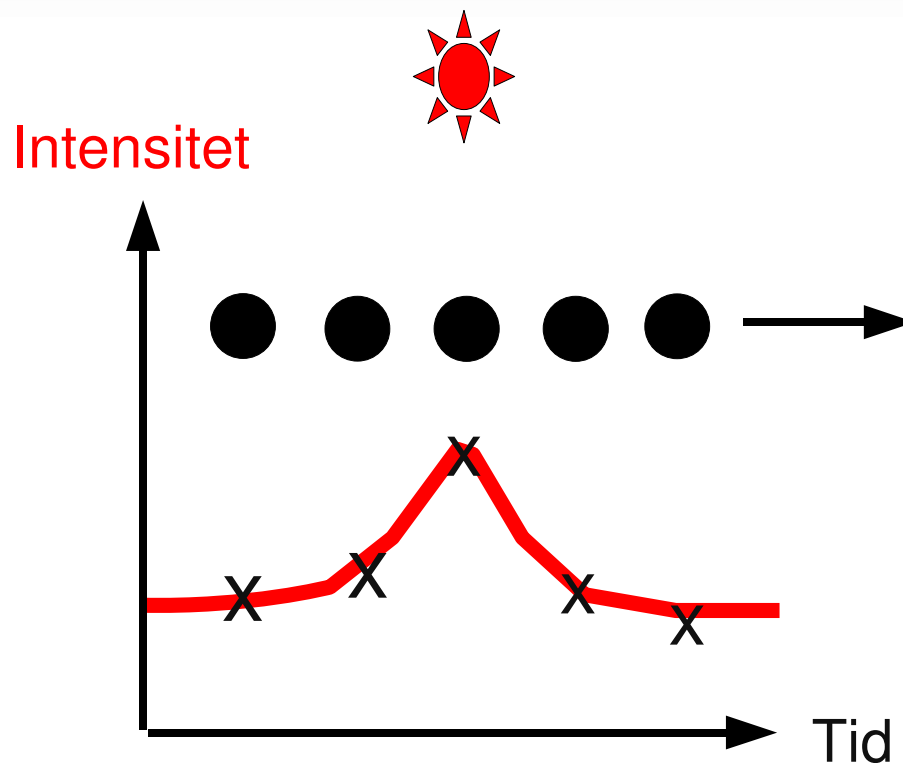
Gravitationell linsning

- Är källa och lins inte perfekt i linje (som de oftast inte är) bildas istället en **partiell ring**.



Gravitationell linsning

- Pga linseffekten kommer ett svart hål som passerar längs synlinjen till ett bakomliggande objekt att åstadkomma en **tillfällig intensitets-höjning**.



Gravitationell linsning

- Ett viktig egenskap för gravitationell linsning är att den påverkar *alla ljusstrålar på samma sätt*.
- Detta följer av att den allmänna relativitetsteori ser gravitation som en krökning av rummet, och den krökningen beror inte på vilken typ av foton som passerar.

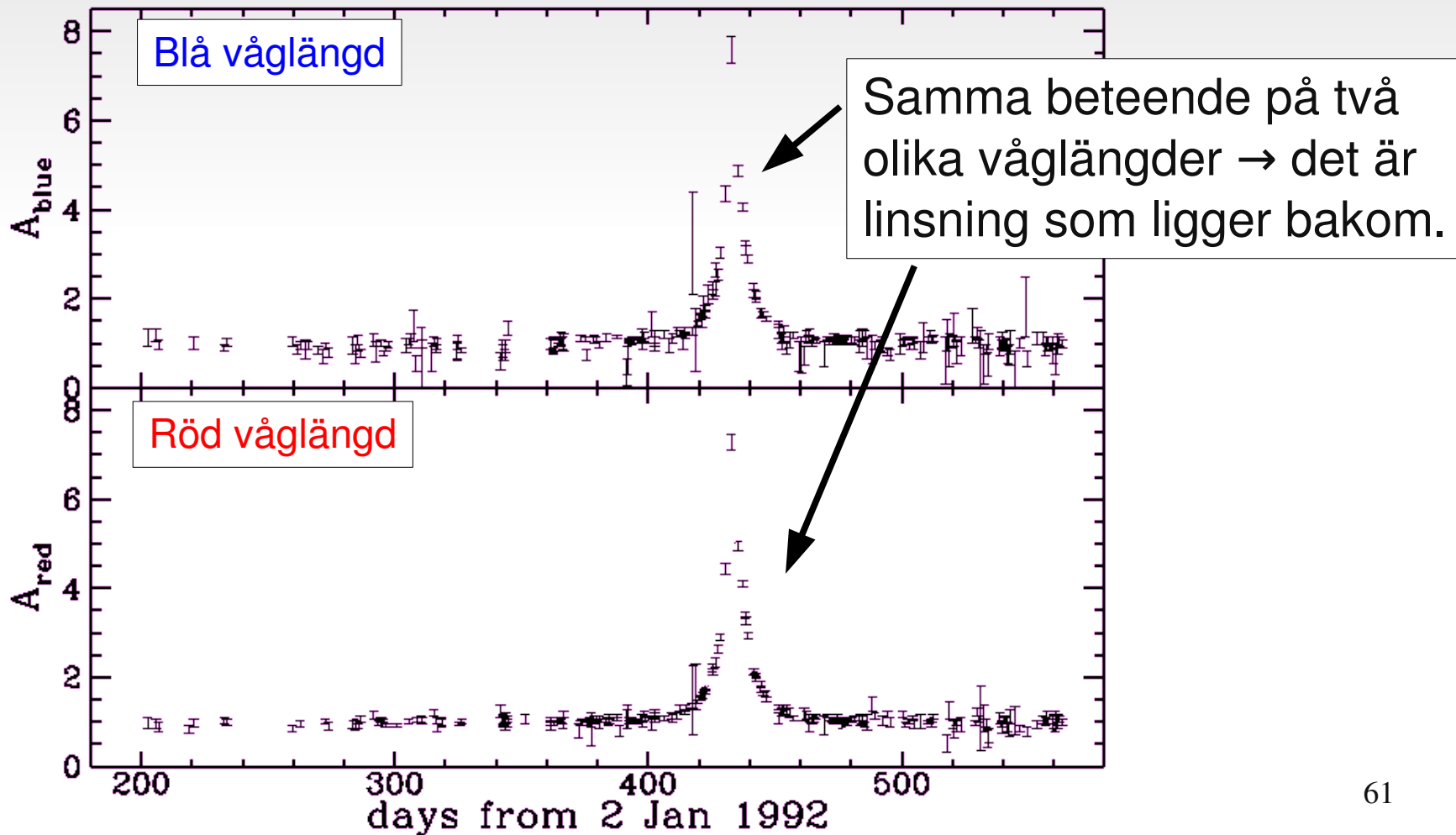
Ett viktigt 'test' för att se om en ljusförändring beror på linsning är därför att se om olika våglängder påverkar på precis samma sätt.

Gravitationell linsning

- Ett problem är att även andra kroppar än svarta hål kan agera linser.
- Tiden för intensitetsförändringen skalar som roten ur linsens massa : genom att mäta denna tid kan massan uppskattas.

Gravitationell linsning

- Observation av en linsning:



Gravitationell linsning

- Svårigheter med linsning
 - Liten chans att det ska hända
 - Ca 1 på 10 miljoner per bakgrundsobjekt för en given tidpunkt.
 - Svårt att visa att det är just ett svart hål som har agerat lins.

Hittills har ingen lins identifierats som ett svart hål.

Sammanfattning

- Ett svart hål kan potentiellt upptäckas på följande sätt
 - 1) Direkt observation av dess **silhuett**.
 - 2) Dess **påverkan på materia runt omkring sig**, främst i form av en röntgenbinär.
 - 3) Dess **gravitationella avböjning av ljus**.
- Alla kända hål hittills har upptäckts med den andra metoden.