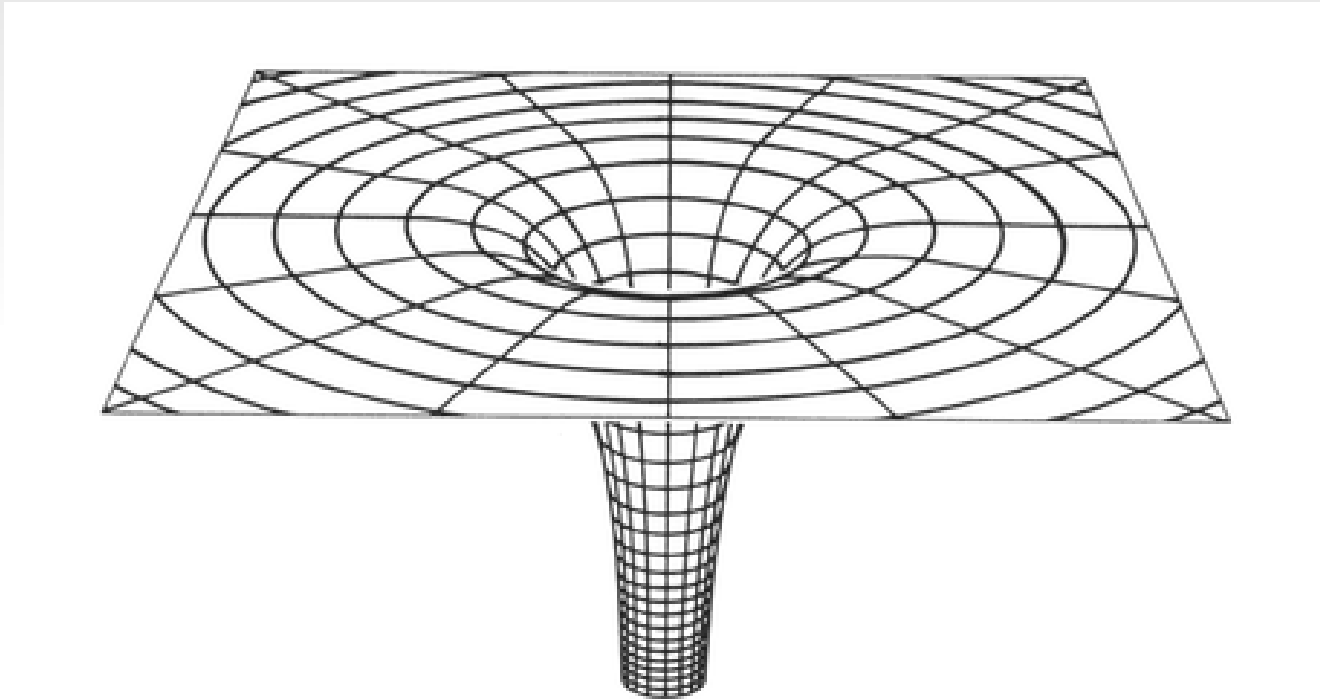


L8 Svarta hål : Grundteori

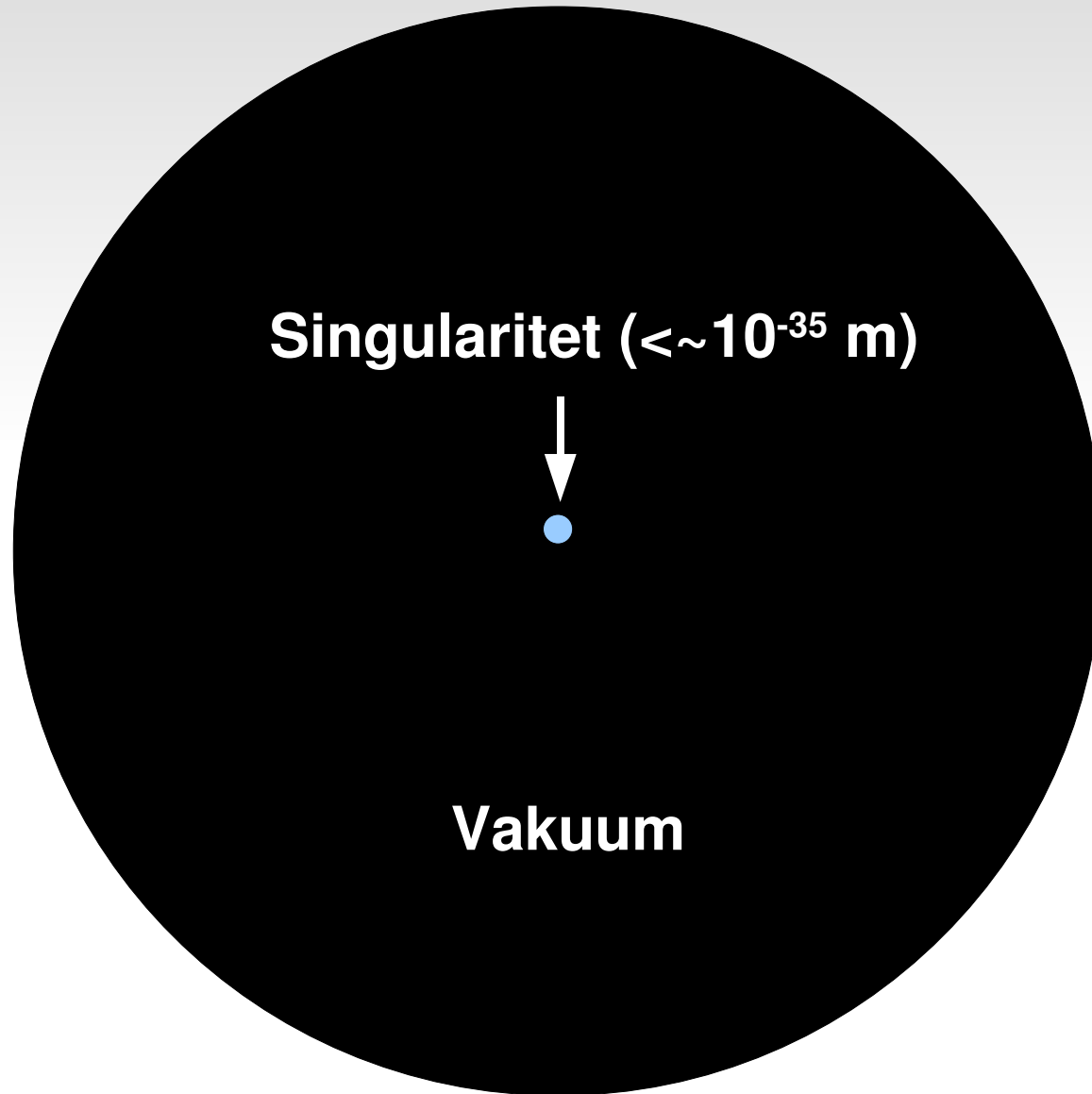
Boken : kapitel 1 & 2



Svarta hål : Tre snabba

- **Vad är ett svart hål ?**
 - *Ett svart hål är en **region av rymden** varifrån ingenting kan ta sig ut, inte ens ljus.*
- **Vad innehåller ett svart hål?**
 - *All materia finns samlad i en liten punkt i mitten kallad **singulariteten**. Vad som händer i denna punkt är okänt. Resten av det svarta hålet är tomt.*
- **Vet vi att de finns?**
 - *Ja, idag finns goda bevis för att svarta hål existerar i vårt universum.*

Strukturen av ett svart hål



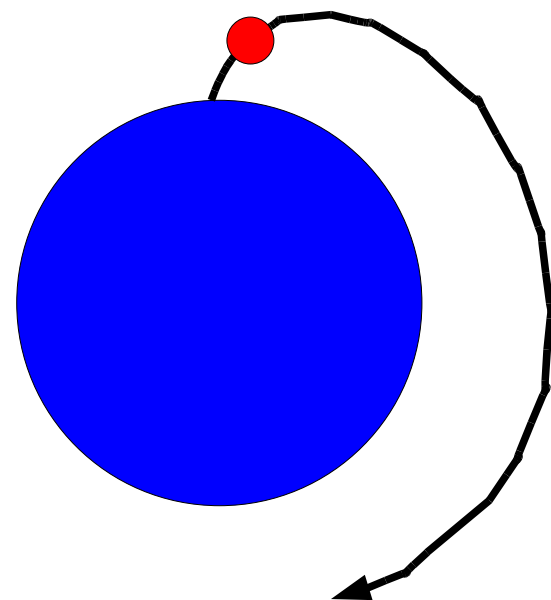
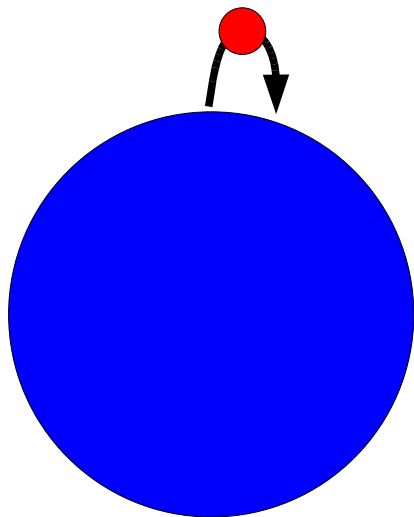
Ideer om svarta hål genom historien

- Vetenskapliga ideer om svarta hål har funnits i över 250 år. Låt oss följa utvecklingen, som startade med Newtons gravitationsteori.



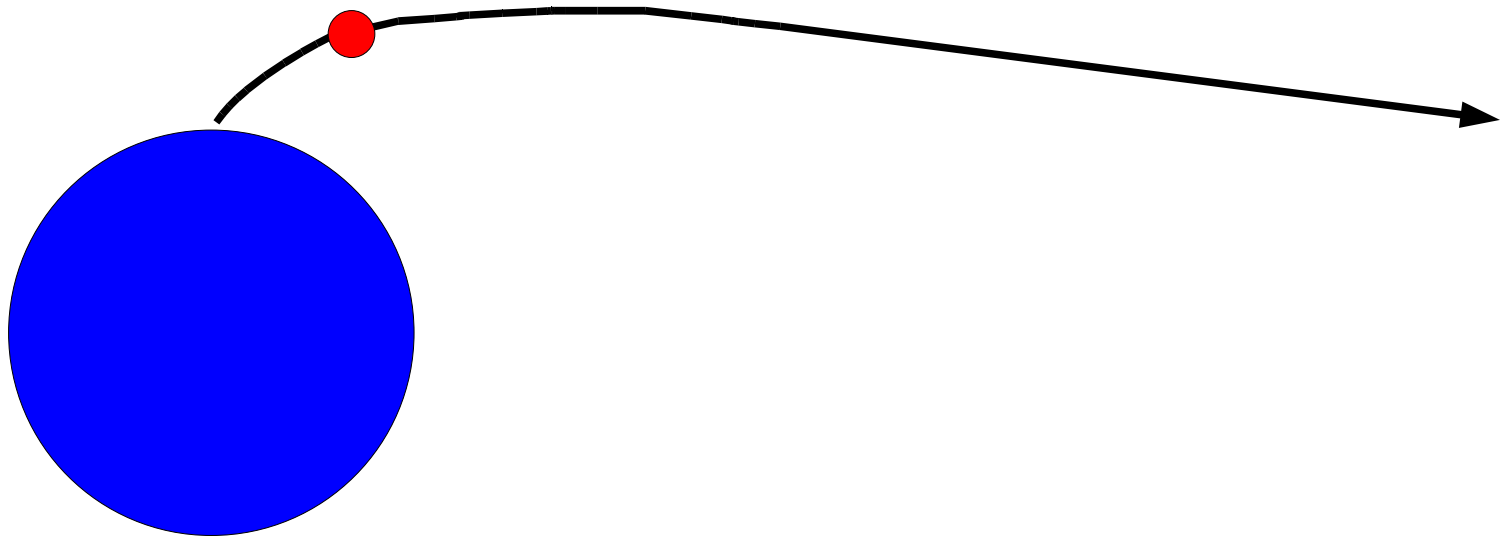
Flykthastighet

- Allting på jorden är fast i dess tyngdkraftfält. Kastar man en boll så tar den sig upp några meter och faller sedan tillbaka. Kastar man tillräckligt hårt kan den hamna i omloppsbanan som en satellit.



Flykthastighet

- Kastar man väldigt hårt så kommer bollen försvinna ut i rymden och aldrig komma tillbaka. Gränshastigheten där detta sker kallas **flykthastigheten**.



Flykthastighet

- För att föremålet ska 'orka' ta sig ur gravitationspotentialen krävs att det får en **rörelseenergi** som är större än den **gravitationella bindningsenergin**:

$$E_{\text{rörelse}} \geq E_{\text{bindning}}$$

- Sätter man in uttrycken för dessa energier ($1/2mv^2$ och GMm/R) får man:

$$v_{\text{flykt}} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

G = gravitationskonstanten ($6.67 \cdot 10^{-11}$)

M = massan (tex jordens massa)

R = radien (tex jordens radie)

Flykthastighet

- Värdet på jordens M/R är sådant att ett föremål behöver uppnå en hastighet av **11 km/s** för att försvinna ut i rymden och aldrig komma tillbaka.



*Rymdfärjor lämnar nästan jorden, men inte riktigt! (De lägger ju sig i omloppsbana) De accelereras upp till cirka **8 km/s**.*

Flykthastighet

- Värdet för några andra himlakroppar :

Månen : 2 km/s

Jupiter : 60 km/s

Solen : 620 km/s

1/150,000 av c

1/5000 av c

1/500 av c

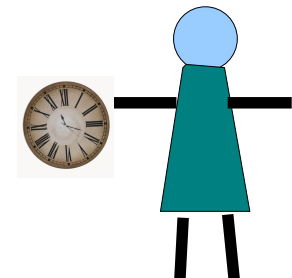
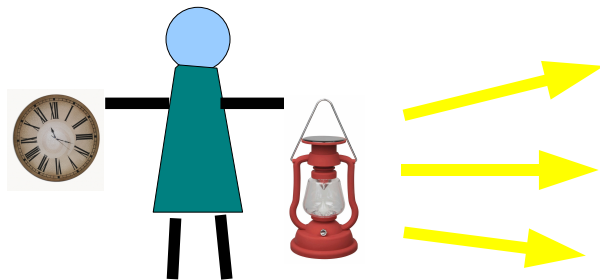
- Flykthastigheten verkar öka med kroppens massa!
- Detta kan vi förstå om vi antar att kropparna har ungefär samma densitet : då är $M \sim R^3 \rightarrow R \sim M^{1/3}$ --
> $M/R \sim M^{2/3}$!

Ljusets hastighet

- Den andra ingrediensen man behövde för att börja prata om svarta hål var kunskapen om att ljuset har en **ändlig (dvs icke-oändlig) hastighet**.
- Dess höga värde (300,000 km/s) gjorde det mycket svårt att vederlägga detta faktum.

Ljusets hastighet

- De första försöken att undersöka ljusets hastighet gjordes i mitten på 1600-talet. Man försökte då se om det var någon tidsfördröjning mellan utskick och mottagning av en ljussignal.
- Ingen tidsfördröjning kunde uppmätas.



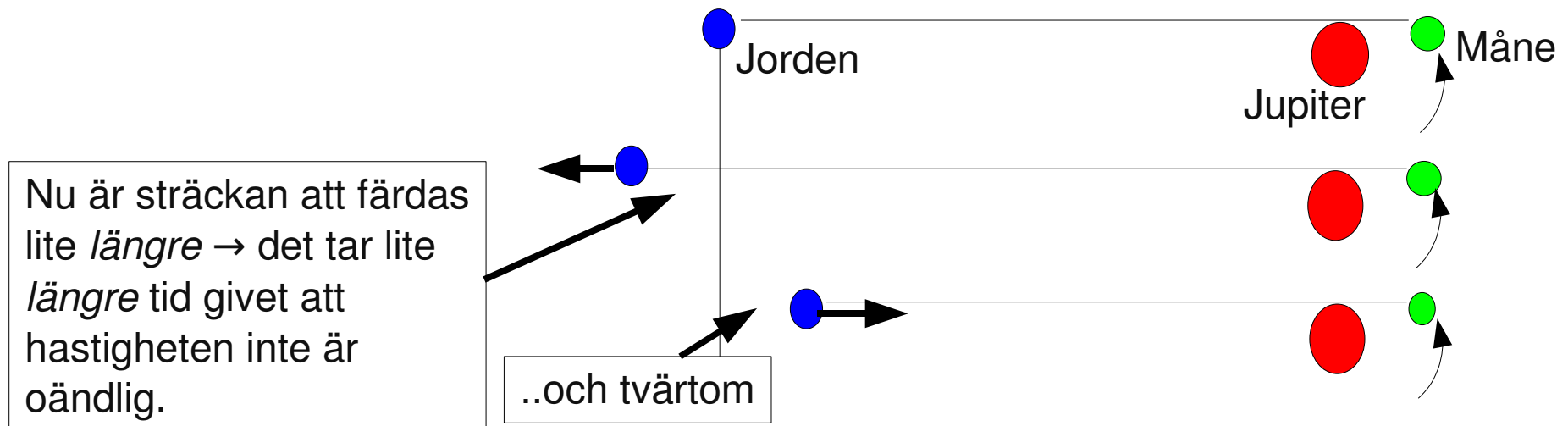
Ljusets hastighet

- Men 1676 gjorde dansken **Ole Römer** en mätning som visade att ljuset faktiskt inte färdades oändligt snabbt.



Ljusets hastighet

- Römer studerade hur lång tid det gick mellan att man såg en av Jupiters månar komma ut bakom Jupiter.
- Denna tid var lite längre när jorden rörde sig bort från Jupiter än när den rörde sig emot → *ljuset kunde inte gå oändligt snabbt.*



Första ideerna om svarta hål

- Med de två kunskaperna om

- 1) Flykthastighet

- 2) Ljusets ändliga hastighet

så finns alla ingredienser på plats för att fråga sig:

Finns det kanske någonstans i universum tyngdkraftfält som är så starka att flykthastigheten är större än ljusets hastighet?

- Den första personen som officiellt framlade denna tanke var **John Michell** år 1783.

Svarta håls storlek

- Genom att sätta $v_{\text{flykt}} = c$ i formeln för flykthastighet så får vi storleken på det svarta hålet:

$$R = \frac{2GM}{c^2} = 3\text{km} * M / M_{\text{sol}}$$

- Storleken för några olika massor:

| | |
|----------|--|
| Ett berg | 10^{-13} cm |
| Månen | 0.1 mm |
| Jorden | 1 cm |
| Solen | 3 km |
| Galaxen | 10^{-2} ljusår (\sim solsystemet) |

Svarta håls storlek

- Nu i efterhand vet vi att det finns två logiska luckor i denna härledning:
 - 1) Om kroppen är så kompakt att $v_{\text{flykt}} \approx c$ så är gravitationsfältet så starkt att **allmän relativitetsteori** måste användas istället för Newtonsk gravitation.
 - 2) Rörelseenergin för ljus följer inte det vanliga uttrycket $(1/2mv^2)$ eftersom dess massa är noll.
- Det visar sig dock att den moderna härledningen (med relativitetsteori) ger **precis samma svar** (vi återkommer till detta)!

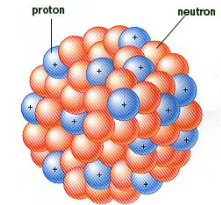
Svarta håls genomsnittliga densitet

- $R = 3 \text{ km} \cdot M/M_{\text{sol}}$ säger att massan M är proportionell mot radien R .
- Volymen V av en kropp är proportionell mot R^3 .
- **Densiteten**, dvs massan dividerat med volymen är då proportionell mot $R/R^3 = 1/R^2 = 1/M^2$ —————>

Ju större ett svart hål är desto lägre genomsnittlig densitet har det.

Svarta håls genomsnittliga densitet

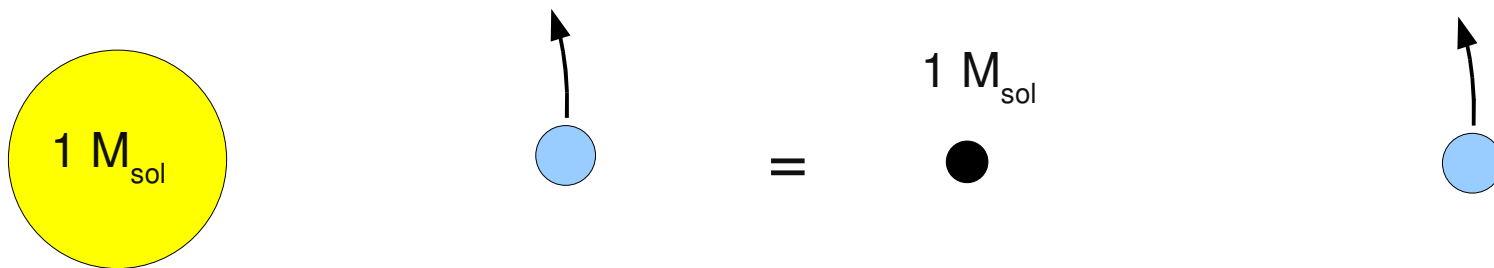
| MASSA SOM.. | STORLEK SOM SH | GENOMSN. DENSITET SOM SH [kg/m ³] |
|----------------|--|---|
| Ett berg | 10 ⁻¹³ cm | 10 ⁵⁶ |
| Månen | 0.1 mm | 10 ³⁴ |
| Jorden | 1 cm | 10 ³⁰ |
| Solen | 3 km | 10 ¹⁹ |
| | Densitet i atomkärnor : 10 ¹⁷ kg/m ³ . | |
| Massiv stjärna | 30 km | 10 ¹⁷ |
| | Stjärnor och planeter : 10 ³ kg/m ³ . | |
| Galax | 10 ⁻² ljusår | 10 ⁻³ |



Universums densitet : 10⁻²⁶ kg/m³.

Svarta hål på håll

- Från Newtonsk gravitation kan man visa att gravitationskraften från en sfärisk kropp beror bara på dess massa, inte dess densitet.
- *På avstånd skulle därför ett svart hål bete sig precis som vilken massa som helst.*

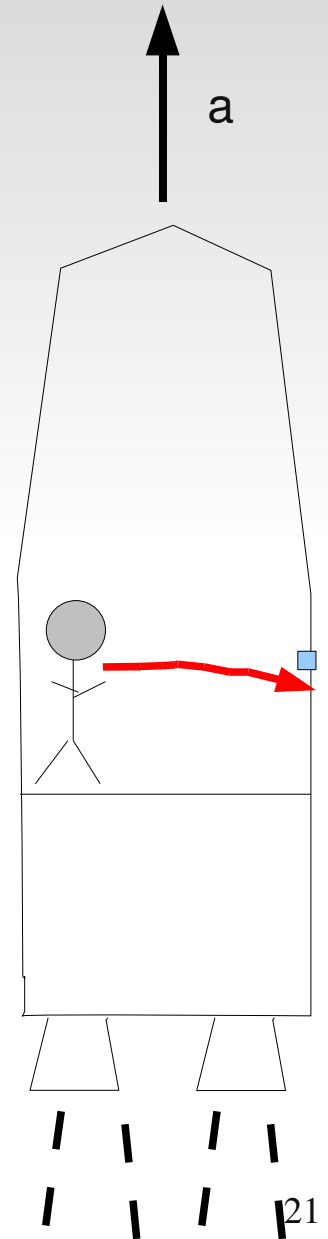


1800-talet

- Under 1800-talet föll iden om svarta hål i glömska. Detta var av två anledningar:
 - 1) Den nödvändiga **densiteten** var så hög jämfört med stjärnor och planeter ($\sim 10^{19}$ kg/m³ mot $\sim 10^3$ kg/m³, se förra sidan!) att det kändes tvivelaktigt att någon sådan bisarr himlakropp kunde existera.
 - 2) Man betraktade under detta århundrade främst ljuset som en **masslös våg**. Det var oklart hur en sådan våg skulle påverkas av Newtons gravitation som sa att kraften var proportionell mot massan.

Pånyttfödelse: Allmän Rel. Teori

- Men Einsteins Allmänna Relativitetsteori som kom 1916 sa att sättet saker rör sig på nära en stor massa berodde på själva rumtiden; därför spelade det ingen roll om ljuset var en partikel med massa eller en masslös våg.
- Detta eliminerade tvivlet om huruvida svarta hål *principiellt* kunde existera.



Allmän Rel. teori: Svarta hål är verkligen svarta!

- Den speciella relativitetsteorin sa också att *ingenting* kan färdas snabbare än ljuset; ett svart hål är därmed svart inte bara med avseende på ljus utan med avseende på *all* typ av kommunikation med världen utanför : Allmän Relativitetsteori gjorde därför svarta hål **definitivt svarta**.

Svarta hål i A.R.

- Den första lösningen till ekvationerna i allmän relativitetsteori gjorde **Karl Schwarzschild** 1916 (som han slängde ihop i ett dike under första världskriget!).
- Hans lösning gällde enklast möjliga situation; för vakuumet utanför en **sfärisk kropp utan rotation eller laddning**.



Schwarzschilds lösning

- Specifikationen av en rumtidsgeometri görs med en s.k. **metrik** som mäter ”intervallet” ds mellan två händelser. Schwarzschildmetriken ser ut som

$$ds^2 = -(1 - R_s/R) dt^2 + \frac{1}{(1 - R_s/R)} dr^2 + r^2 d\Omega^2$$

dt = tidsintervallet

dr = radiellt intervallet

$d\Omega$ = vinkelintervallet

- En kritisk radie, den sk **Schwarzschildradien R_s** , visar sig ha precis samma värde som ett svart håls radie i Newtonsk gravitation.

Schwarzschilds lösning

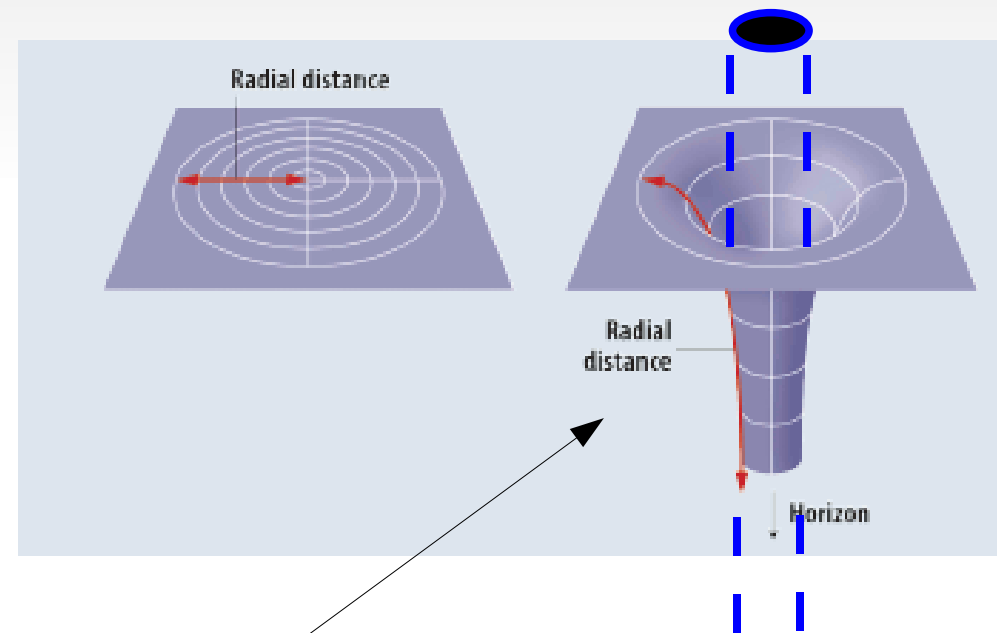
- Lösningen visar att innanför R_s är rumtidsgeometrin sådan att ingenting kan korsa R_s inifrån-och-ut : Schwarzschildradien är alltså radien som ett svart hål med massan M skulle ha.

$$R_s = 3 \text{ km} * M / M_{\text{sol}}$$

- Även om namnet myntades senare kallas denna radie även för **händelsehorisonten** : inga händelser innanför R_s kan nå observatörer utanför.

Händelsehorisonten

- Händelsehorisonten är en kritisk radie där rumtiden byter karaktär.
- Innanför R_s kan krökningen *ej* visualiseras i ett 3D diagram (men fortfarande analyseras med hjälp av metriken).



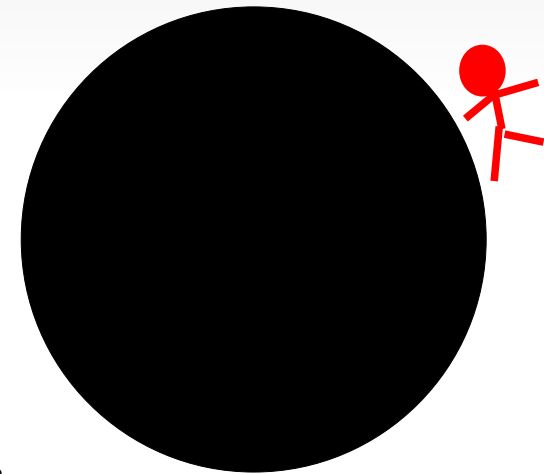
Endast rumskrökningen **utanför** ett svart hål kan illustreras.

Händelsehorisonten

- Som vi vet från ekvivalensprincipen så saktas tiden ner i starka gravitationsfält (L2).
- Schwarzschilds lösning visade att vid händelsehorisonten verkar tiden komma till ett fullständigt stopp.

Frusna stjärnor

- Länge gick svarta hål därför under namnet **frusna stjärnor** : när en stjärna kollapsar till ett SH borde vi se allt material ”frysa fast” på HH.
- Tidsdilatationen gör också att allt ljus får lägre frekvens och **rödförskjuts**. Vid händelsehorisonten blir rödförskjutningen oändlig och ljuset blir osynligt.



Händelsehorisonten

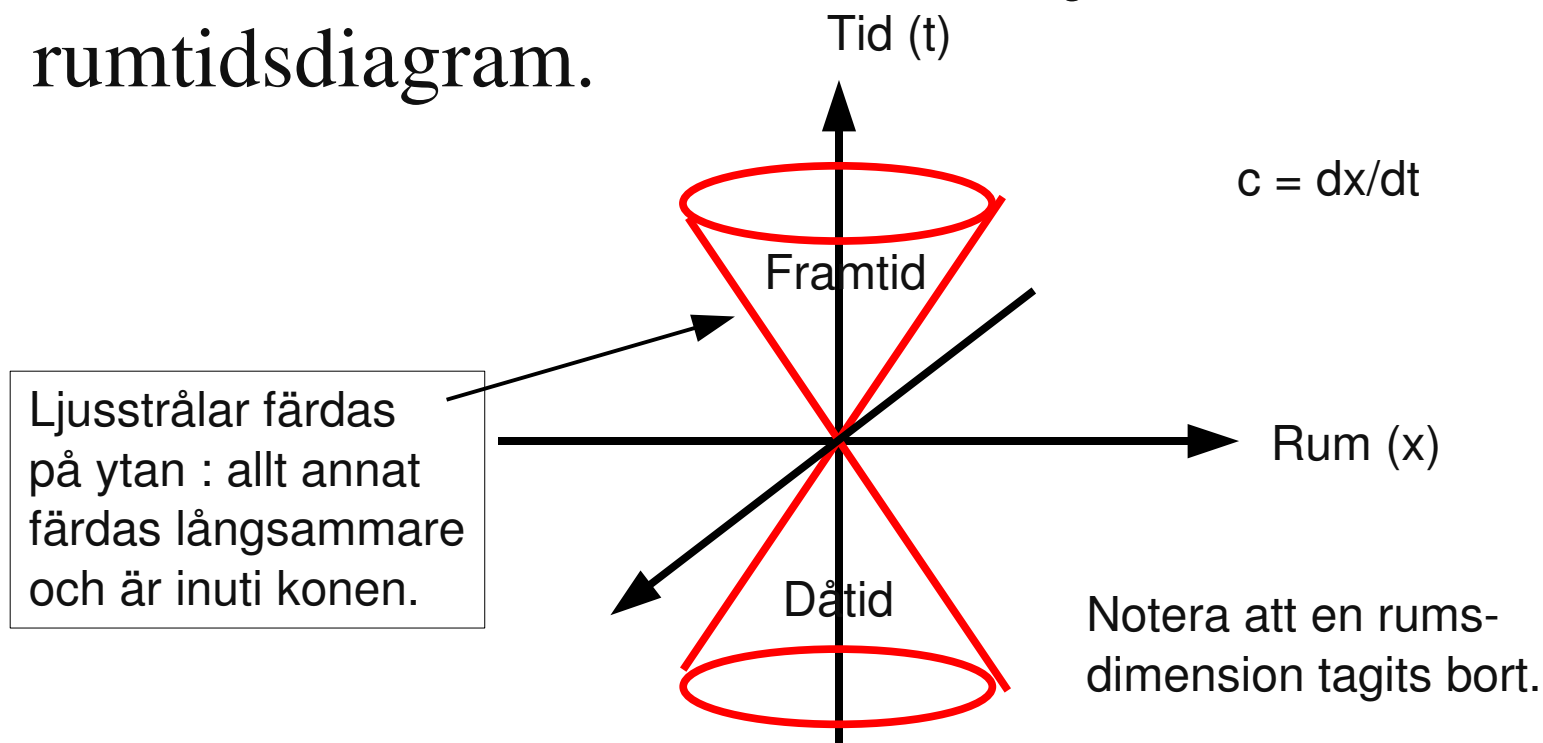
- Betyder detta att ingenting kan ta sig in i ett svart hål?
- Innebörden av singulariteten vid R_s var länge oklar och man kunde inte riktigt svara på vad som hände vid h.h.
- På 1930-talet argumenterade **Lemaitre, Eddington** och andra att singulariteten inte var reell utan bara orsakad av ett opraktiskt val av koordinater.

Händelsehorisonten

- 1958 ”återupptäcktes” denna insikt av **Finkelstein** som också lyckades få ståndpunkten allmänt accepterad.
- Med de nya koordinaterna kan man se att en observatör faller in genom H.H. på en *för honom* ändlig tid.
- *För en avlägsen observatör* får man dock samma resultat som med Schwarzschild-metriken : en frusen stjärna!

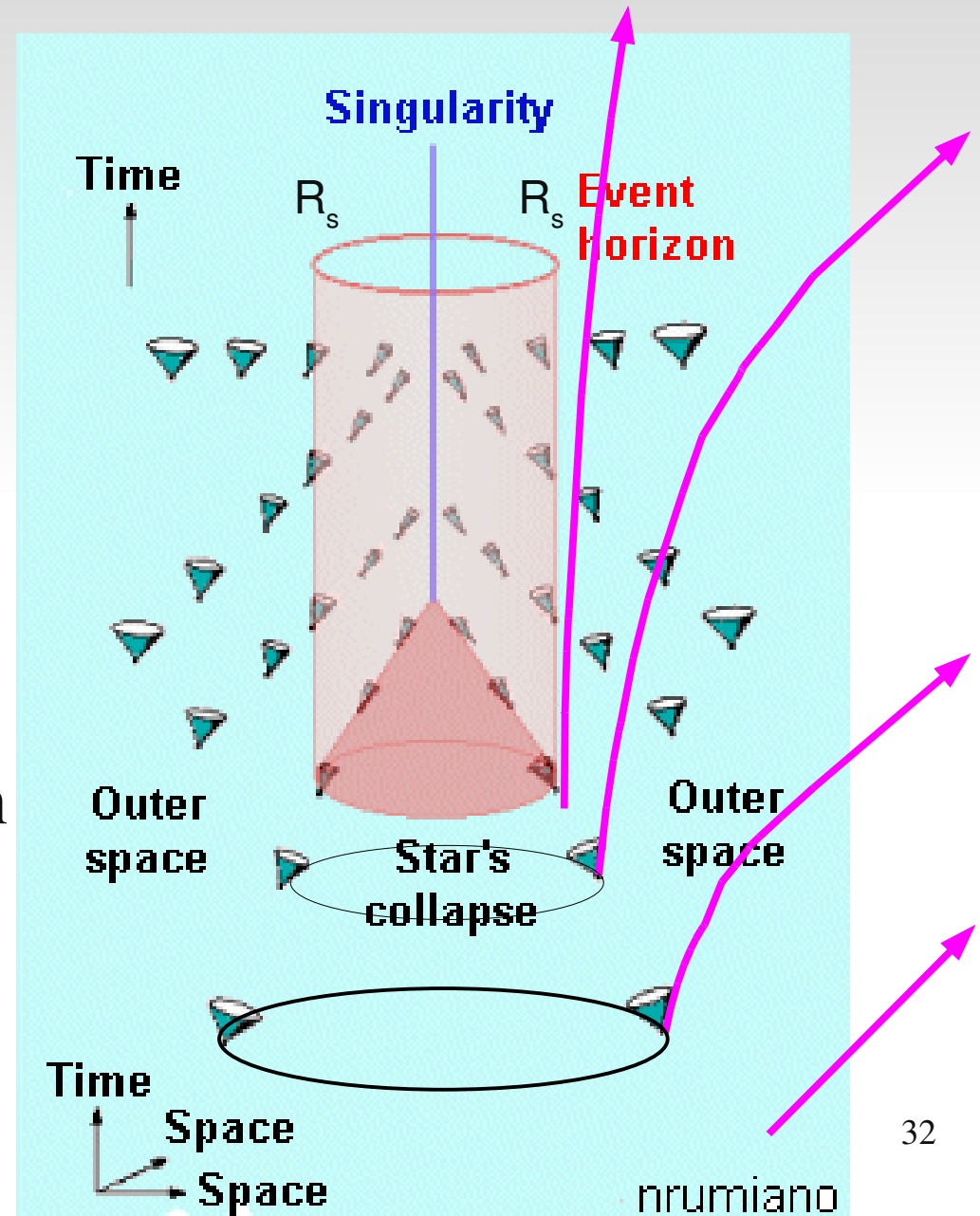
Ljuskoner

- Man kan också illustrera effekterna runt ett svart hål med hjälp av **ljuskoner**.
- En ljuskon är den yta som begänsar en partikels framtid och dåtid (sk världslinje) i ett rumtidsdiagram.



Ljuskoner

- I en krökt rumtid blir ljuskonerna förvridna.
- Vi ser tydligt
 - Hur **singulariteten** är oundviklig när man väl är innanför R_s .
 - Hur **ljussignaler** från den kollapsande stjärnan tar längre och längre tid att nå en avlägsen observatör.



Icke-roterande svarta hål : inuti

- Singularitetens oundviklighet kan förstås som att rummet inuti ett svart hål börjar bete sig som tid : precis som vi inte kan undvika att transporteras framåt i tiden kan man inuti ett svart hål inte undvika att transporteras framåt i rummet.
- Tidsintervallet för färden mellan horisont och singularitet är ungefär ljusets färdtid av R_s :

| | |
|--|--------------------|
| Stellärt | ~ 10 mikrosekunder |
| Supermassivt ($10^6 M_{\text{sol}}$) | ~ 10 sekunder |

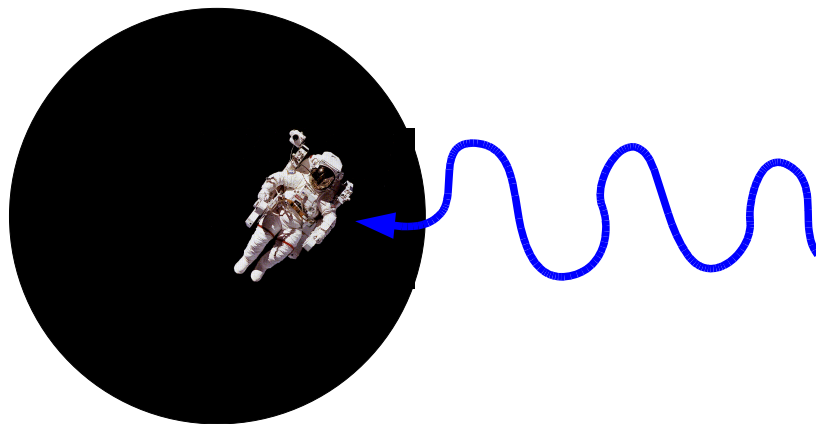
Att färdas in i ett svart hål

- Antag att vi nu själva färdas in mot ett svart hål.
- Ur vårt perspektiv är det det resten av universums klockor som verkar gå för fort.
- (Kom ihåg att tidsdilatation är symmetrisk med avseende på hastighet (speciell relativitetsteori) men inte med avseende på acceleration/gravitationsfält (allmän relativitetsteori)).

Att färdas in i ett svart hål

*Passage av händelsehorisonten märks
inte av på något särskilt sätt !*

- Man kan fortfarande nås av ljus från utsidan; horisonten är ett ”ogenomträngligt membran” bara i inifrån-och-ut-riktningen.

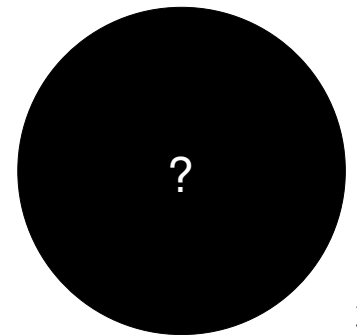


Att färdas in i ett svart hål

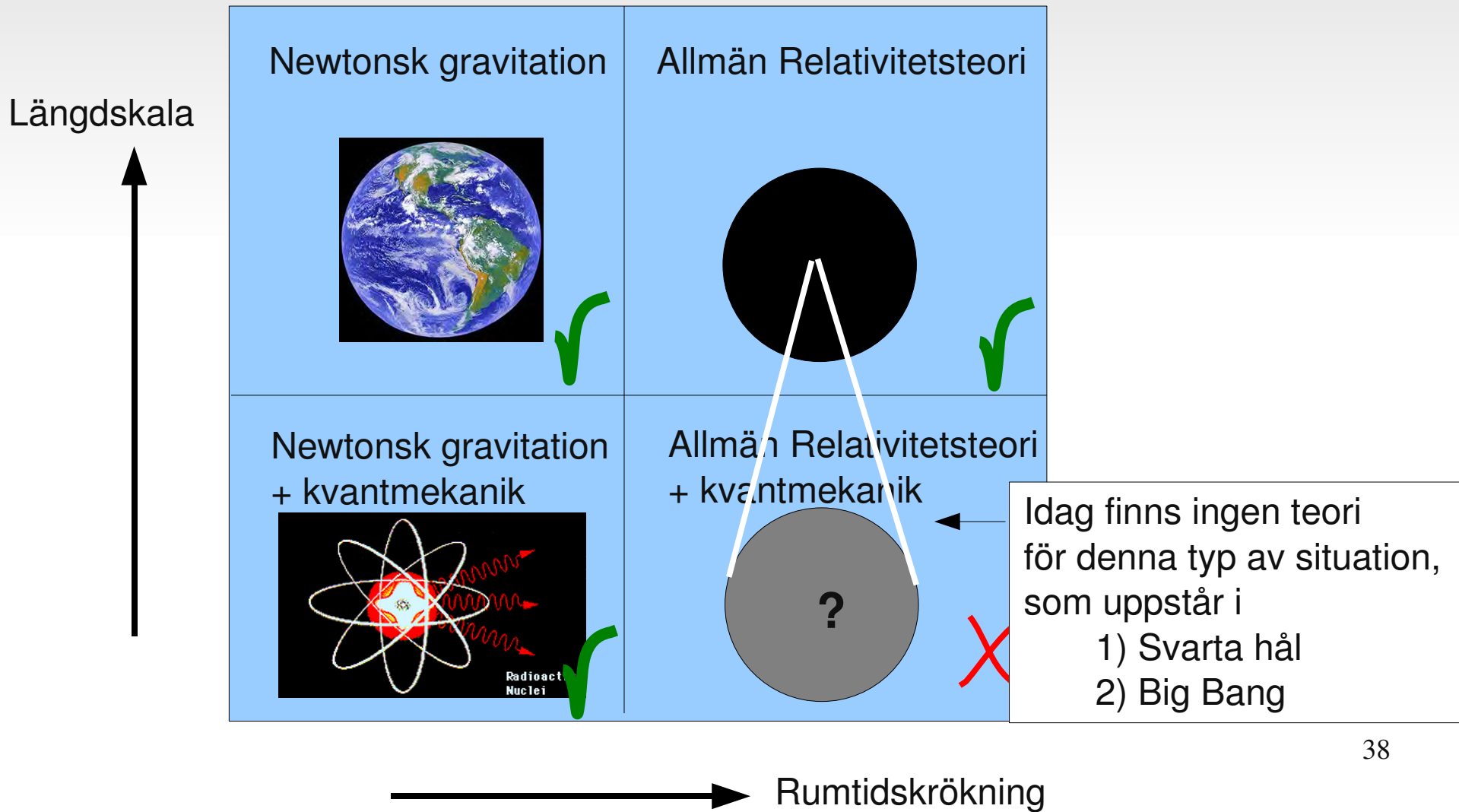
- För ett icke-roterande hål:
 - Inuti hålet kan man inte vara i vila, utan transporteras ständigt in mot singulariteten.
 - Inga fotoner kan gå från singulariteten och utåt; man får alltså aldrig reda på hur den ser ut.
 - Vid något avstånd från singulariteten blir tidvattenkrafterna så stora att alla partiklar slits sönder.
 - Resterna åker sedan in i singulariteten och mot ett okänt öde.

Singulariteten

- Går man tillräcklig nära $\mathbf{r=0}$ bryter dock lösningen samman : här får man en singularitet oavsett vilka koordinater man använder.
- Man når här gränsen för vad allmän relativitetsteori klarar av; själva singulariteten kan inte beskrivas pga att **kvanteffekter** blir viktiga och det finns än idag ingen teori för dess beskrivning.
- Skalan där detta sker är $\sim 10^{-35}$ m (jfr proton 10^{-15} m).



Teoriernas landskap



Tidvattenkrafter

- Styrkan på ett tyngdkraftfält ökar förstås ju närmare källan man kommer. Tex är tyngdkraften på dina fötter något större än tyngdkraften på ditt huvud eftersom fötterna är närmare jorden.
- Detta orsakar en slitande kraft på dig som kallas **tidvattenkraften**.
- Namnet kommer av att det är denna effekt som orsakar ebb och flod på jorden.

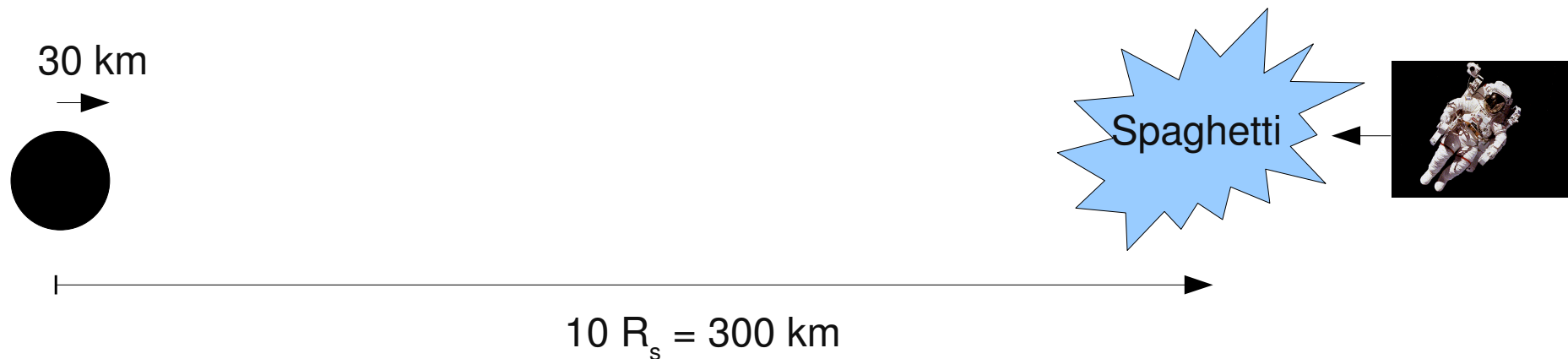
Tidvattenkrafter

- Utanför ett svart hål ändrar sig gravitationsstyrkan mycket snabbt, och en sammansatt kropp utsätts för stora påfrestningar.
- Den vetenskapliga termen för utdragning pga tidvatteneffekten är **spaghettifiering (!)**.



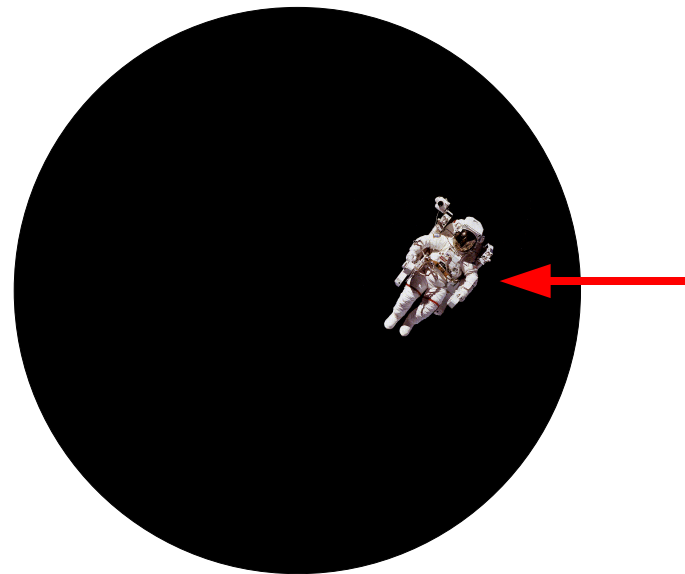
Tidvattenkrafter

- Den mänskliga kroppen tex skulle inte tåla den differentiella gravitationen närmre än $\sim 10 R_s$ från ett hål med massan $10 M_{sol}$.



Tidvattenkrafter

- Tidvattenkrafterna blir svagare ju *större* det svarta hålet är.
- För ett svart hål med $M > 1000 M_{\text{sol}}$ skulle en astronaut kunna överleva fram till och även innanför horisonten.



Icke-roterande hål : SSO och SCO

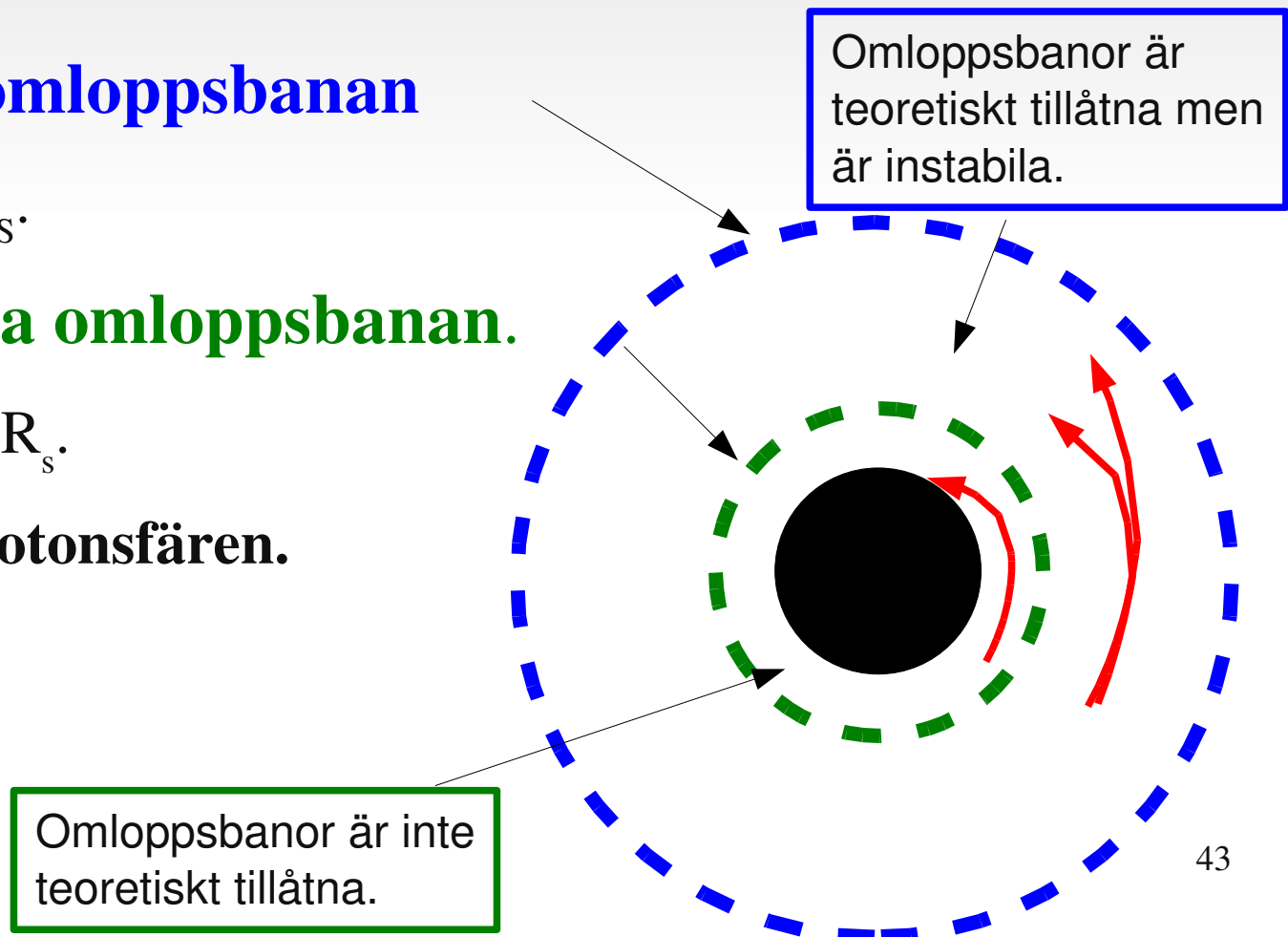
- Förutom h.h. existerar två andra kritiska radier för ett Schwarzschild-hål:

- **Sista stabila omloppsbanan**

- Ligger på $3R_s$.

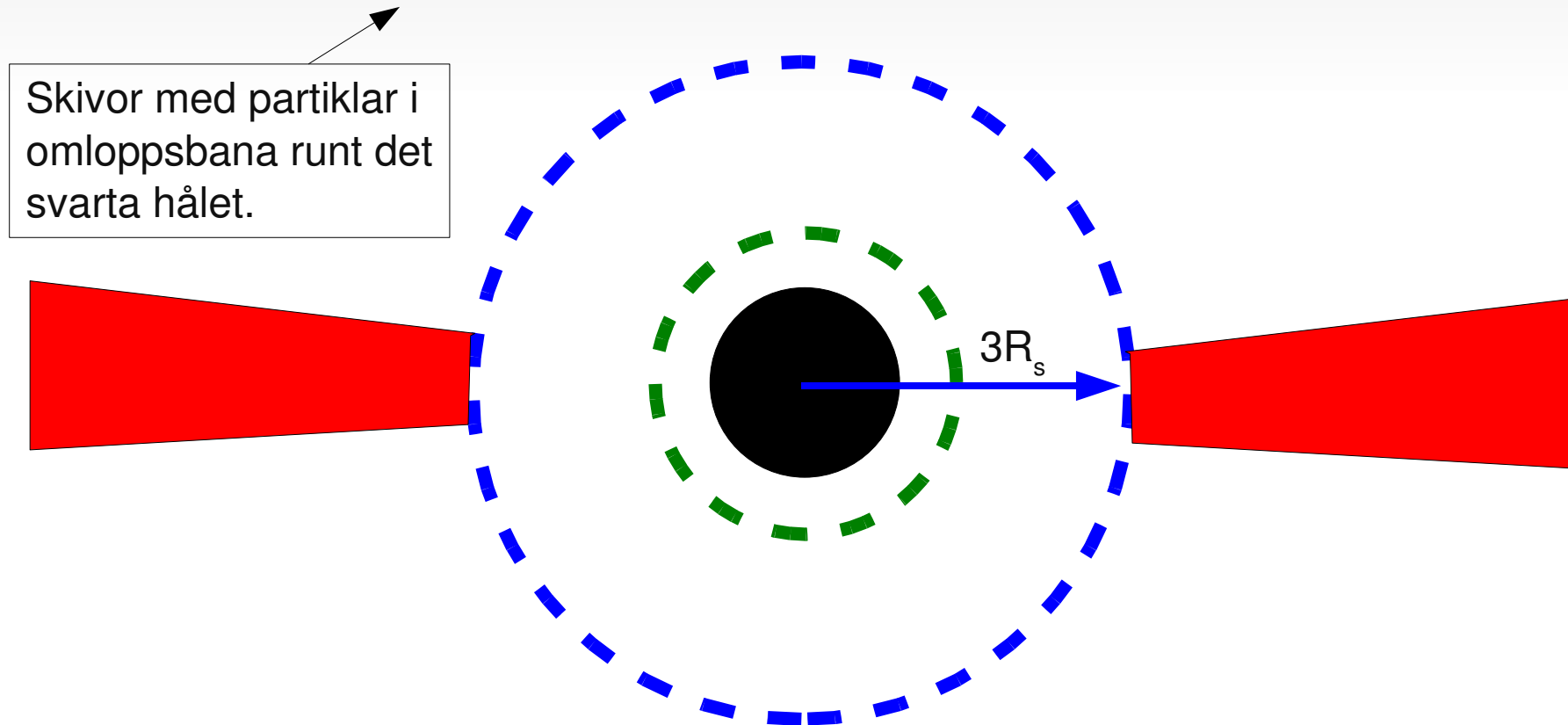
- **Sista cirkulära omloppsbanan.**

- Ligger på $1.5R_s$.
- Kallas även **fotonsfären**.



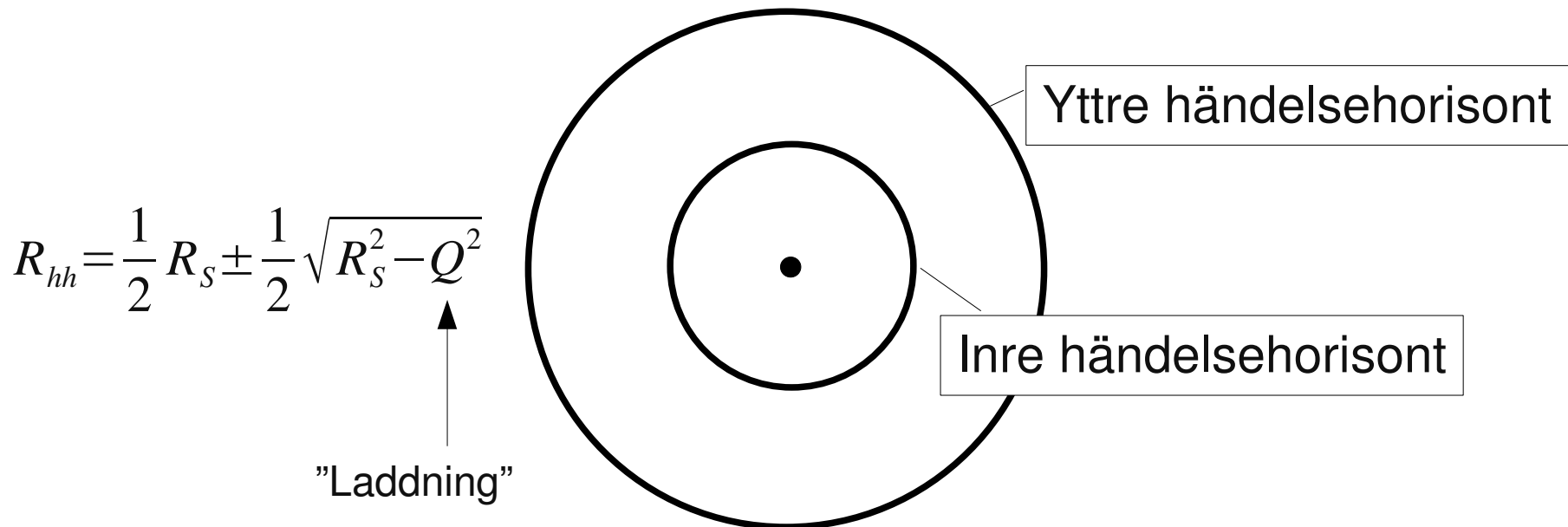
Icke-roterande hål : SSO och SCO

- Det faktum att inga stabila omloppsbanor finns innanför $3R_s$ sätter en gräns för den inre kanten av **ackretionsskivor** runt svarta hål.



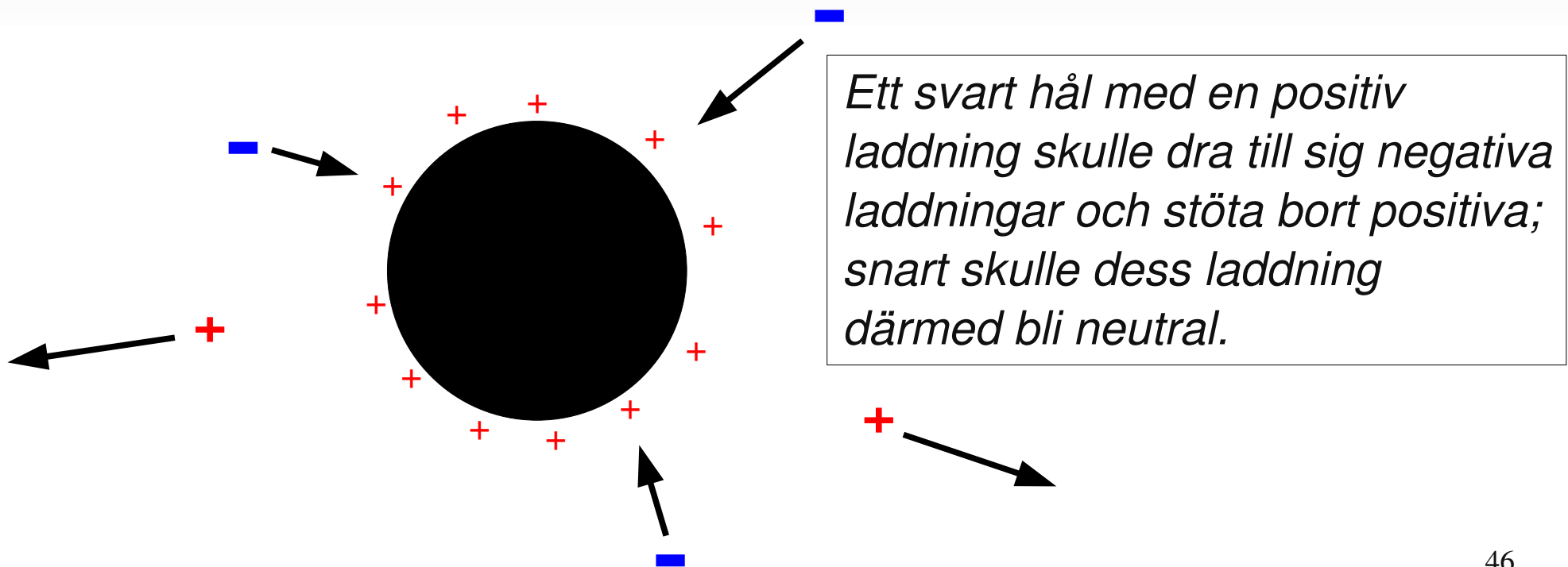
Elektriskt laddade hål

- **Reissner och Nordström** löste (1916 och 1918) fallet då hålet har en **elektrisk laddning**.
- Närvaron av laddning gör att h.h förflyttas inåt jämfört med R_s : dessutom dyker det upp en andra h.h innanför den första.



Elektriskt laddade hål

- I verkligheten förväntar man sig att svarta hål ganska snabbt **neutraliserar sig själva**, och vi kommer därför ej behandla dem vidare.



Stjärnkollaps

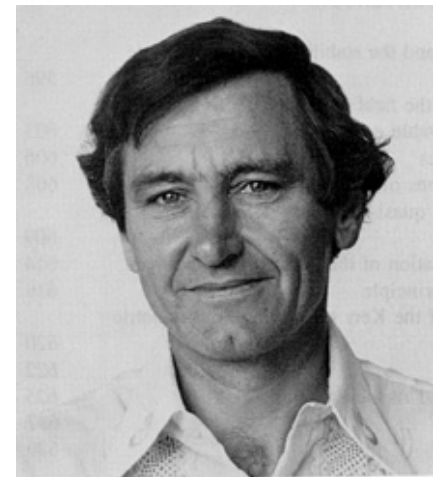
- Arbetet av Einstein, Schwarzschild, Reissner och Nordström visade att svarta hål var **teoretiskt möjliga** och man kunde nu uttala sig om några grundläggande egenskaper för sådana objekt.
- Men de flesta astrofysiker var fortfarande tveksamma till om svarta hål verkligen fanns i naturen; tvivlet huruvida den nödvändiga densiteten kunde åstadkommas var starkt.

Stjärnkollaps

- 1939 visade **Oppenheimer** och **Snyder** (med allmän relativitetsteori) att en icke-roterande stjärna kan kollapsa till ett svart hål när den får slut på kärnbränsle.
- Därmed hade man nu även en ide för *hur* dessa enorma densiteter skulle kunna uppnås : genom **massiva stjärnors kollaps**.
- Deras arbete fick dock måttlig uppmärksamhet. Inte mycket hände på ytterligare 25 år.

60-talet

- På 60-talet började saker och ting hända; utvecklandet av röntgenteleskop gjorde nu observationer av svarta hål tänkbara, och neutronstjärnor upptäcktes.
- 1963 löstes Einsteins ekvationer i det viktiga fallet med **rotation** av Nya Zeeländeraren **Roy Kerr**.



Roterande svarta hål

- Ju *mindre* en kropp blir desto *snabbare* måste den rotera för att bevara rörelsemängdsmomentet L .
- Man kan visa att ett svart hål kan ha ett maximalt rörelsemängdsmoment

$$L^{max} = \frac{GM^2}{c}$$

- $L_{sol} = 20\%$ av L_{max} → De flesta stellära svarta hål roterar antagligen tusentals gånger per sekund (jfr pulsarer).



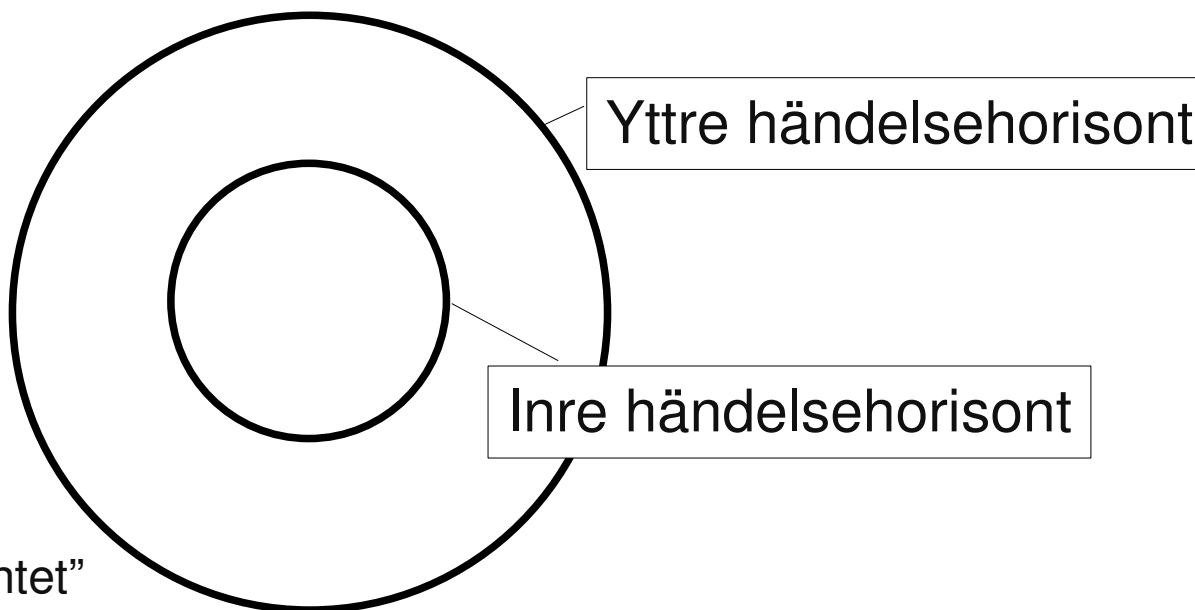
Roterande svarta hål

- Kerrs lösning visade att ett roterande hål får **två** händelsehorisonter precis som ett laddat hål.
- Vid passage av den inre horisonten återfår rumtiden sin ursprungliga karaktär : allting dras därför *inte* in i singulariteten.

$$R_{hh} = \frac{1}{2} R_s \pm \frac{1}{2} \sqrt{R_s^2 - L^2}$$

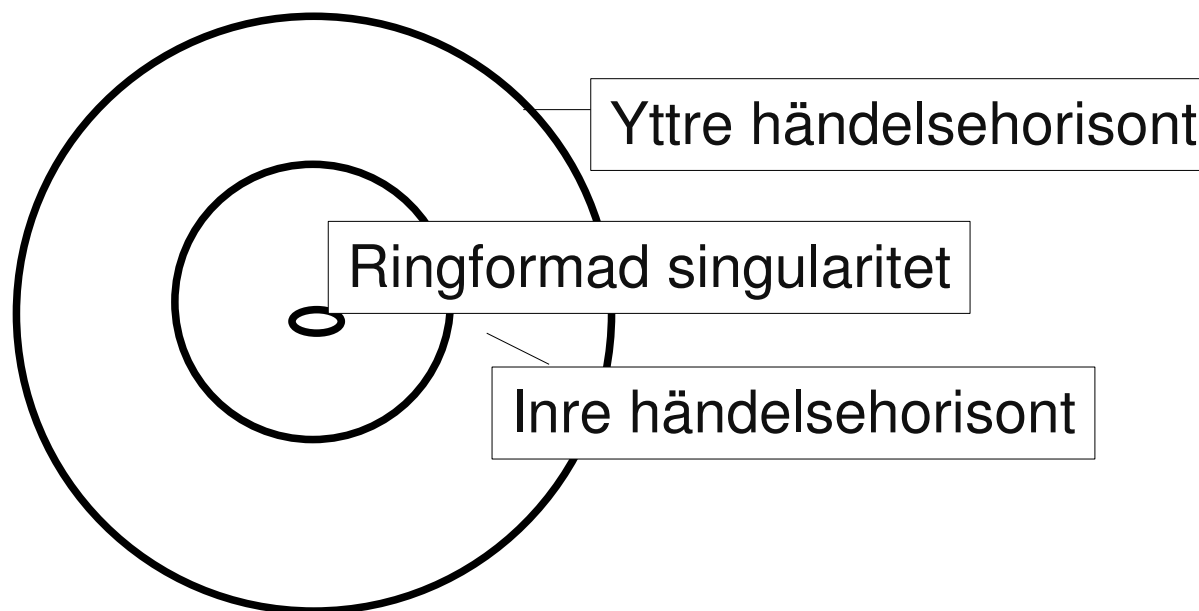


”Rörelsemängdsmomentet”



Roterande svarta hål

- Singulariteten blir dessutom **ringformad**.
- För ett roterande hål förefaller det möjligt att ta sig ut ur det svarta hålet, inte tillbaka till den del av rumtiden där man kom in utan till en annan del. Mer om detta på L10.



Inget hår-teoremet

- 1965 föreslogs att **ett svart hål bara har tre egenskaper**. Detta är det sk **Inget hår-teoremet**:

Ett svart hål kan fullständigt karakteriseras av tre egenskaper:

1) Massa

2) Laddning

3) Rotation

- Idag är Inget hår-teoremet matematiskt bevisat.

Inget hår-teoremet

- För att fullständigt beskriva ett vanligt objekt som en sked, ett träd eller en stjärna behövs miljarders miljarders tal.
- För ett svart hål krävs det bara **tre!** Känner vi dessa tre tal så vet vi allt som *finns* att veta om det svarta hålet för en utomstående observatör!
- Detta gör svarta hål unika i universum, de är de 'enklaste' makroskopiska objekt som finns.

Fyra fundamentala typer

- Inget-hår teoremet innebär att det bara finns **fyra fundamentala typer** av svarta hål.

| | LADDNING? | ROTATION | ? NAMN | ÅR |
|----|-----------|----------|--------------------|------|
| 1) | NEJ | NEJ | Schwarzschild | 1916 |
| 2) | JA | NEJ | Reissner-Nordström | 1918 |
| 3) | NEJ | JA | Kerr | 1963 |
| 4) | JA | JA | Kerr-Newman | 1965 |

Bildning

- Vilka storlekar svarta hål faktiskt har i vårt universum kontrolleras av vilka **bildningsmekanismer** som fungerar.
- Man har fyra mekanismer som ger fyra olika storleksklasser:
 - Mikro ($< M_{\text{månen}}$) **Hypotetisk**
 - Stellära (3-100) **Väletablerad**
 - Intermediära (100-1000) **Hypotetisk**
 - Supermassiva ($\sim 10^5$ - 10^{10}) **Väletablerad**

Bildning : Mikrohål

- Huruvida mikrohål existerar är mycket spekulativt : bildningen skulle i så fall ha skett vid **Big Bang**.
- Vi avvaktar med att behandla dem till L10.

Bildning : Stellära

- Det finns två tänkbara mekanismer för hur ett stellärt svart hål skapas
 - 1) Gravitationell kollaps av en massiv stjärna (*kan* signaleras med en supernova eller gammastrålningsutbrott).
 - 2) Materia ackumuleras på en neutronstjärna tills

$$M > M_{\text{Tolman-Oppenheimer-Volkoff}}$$

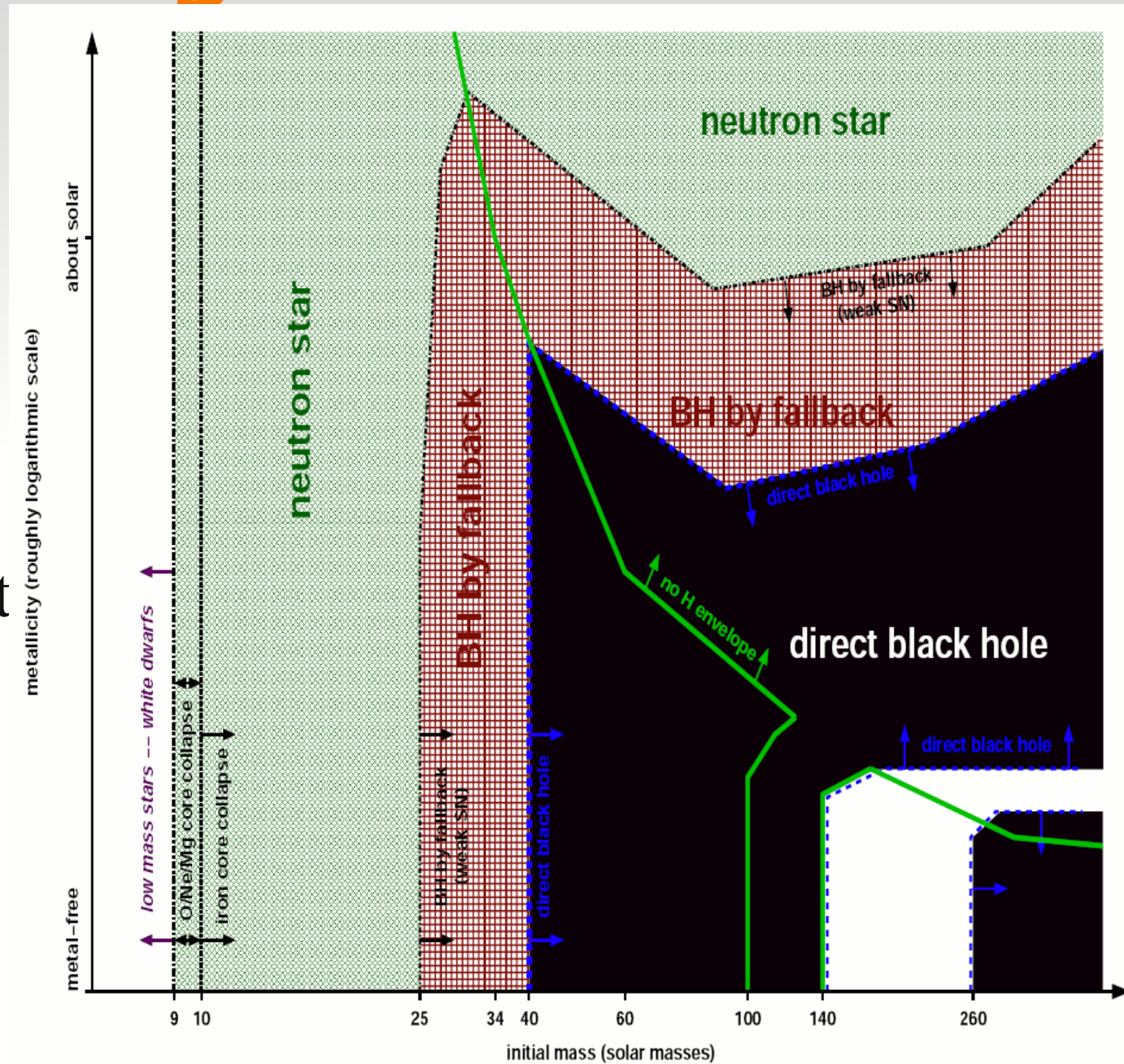
Bildning : Stellära

- När det gäller stjärnutveckling tror man att det är de **massiva stjärnorna** som kan sluta som svarta hål. Ett ungefärligt schema ges av:

| STJÄRNANS MASSA | SLUTPRODUKT | HÖGSTA MASSA |
|---------------------------|----------------|--------------|
| ■ Liten (< 8) | Vit dvärg | 1.44 |
| ■ Mellan ($8 < M < 25$) | Neutronstjärna | 2-3 |
| → ■ Stor (> 25) | Svart hål | ~ 100 |

Bildning : Stellära

- Men detaljerna är komplexa : även metalliciteten spelar in!
- Det svarta hålet kan bildas **direkt** eller via **fallback**.



Bildning : Stellära

- Den *minsta* möjliga massan för ett svart hål som bildas genom stjärnkollaps ges av **Tolman-Oppenheimer-Volkoff gränsen** som är 2 - 3 solmassor.
- Under denna gräns stabiliserar degenerationstryck stjärnan till en neutronstjärna (eller en vit dvärg).

Bildning : Stellära

- Samtidigt tror man att även de mest massiva stjärnorna blåser bort stora delar av sin massa under sitt liv och har bara cirka $\sim 10 M_{\text{sol}}$ kvar vid kärnkollapsen.
- Det finns därmed också en **högsta massa** för ett svart hål som bildas genom stjärnkollaps på $\sim 10 M_{\text{sol}}$.

Bildning : Stellära

- Hur många stellära svarta hål kan det finnas i galaxen?
- Ungefär 1 av 100 supernovor involverar en stjärna som är massiv nog att bilda ett svart hål. (I de andra 99 fallen bildas en neutronstjärna.)
- Stellära svarta hål är alltså ungefär hundra gånger mer sällsynta än neutronstjärnor. (Neutronstjärnor kan ju dock kollapsa till svarta hål så detta är ungefärligt.)

Bildning : Stellära

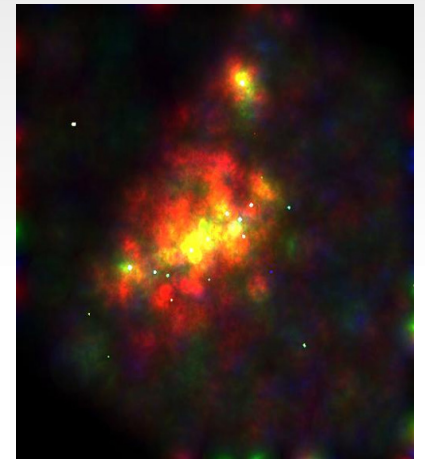
- Idag sker cirka en supernova per 100 år men tidigare har det varit en betydligt högre frekvens.
- Räkna på 1 per år i snitt. Galaxens ålder är cirka 10 miljarder år → 10 miljarder supernovor har skett hittills.
- 1/100 av dessa gav svarta hål → **cirka 100 miljoner stellära svarta hål finns i galaxen.**

Bildning : Stellära

- Om de är jämt utspridda i galaxen är medelavståndet mellan dem cirka **30 ljusår**.
- I praktiken är tätheten betydligt större in mot galaxens centrum och lägre ute i våra trakter.
- Det närmsta svarta hål vi känner till (A0620-00) ligger cirka **3000 ljusår bort**.

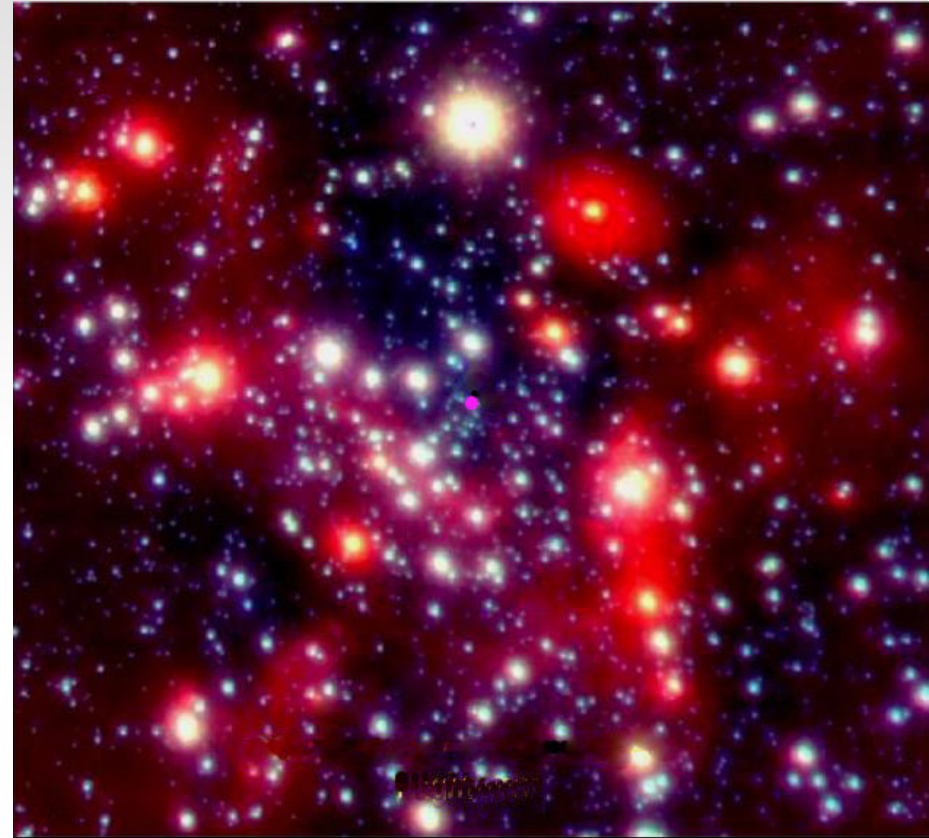
Bildning : Intermediära

- Denna klass har föreslagits för att förklara observationer av **ultraluminösa röntgenkällor**.
- En klar teoretisk ide för deras bildande saknas.
 - Flera stellära SH som gått samman?
 - Kollisioner av massiva stjärnor?
- Hål med $300 < M < 1$ miljon skulle kunna utgöra den baryonska delen av den mörka materian (se L11).



Bildning : Supermassiva

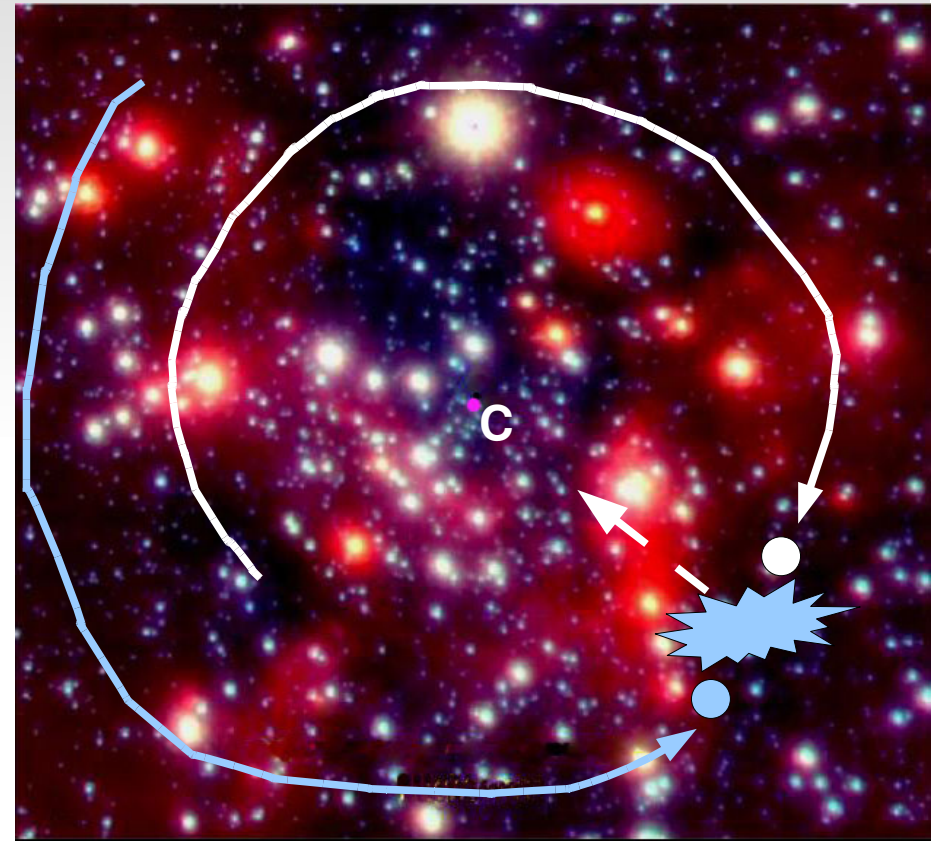
- I galaxers centrum är densiteten av gas och stjärnor mycket hög. Stjärnorna rör sig också fort relativt varandra.
- Dessa faktum innebär att stjärnorna faktiskt **kolliderar** med varandra relativt ofta (ca en kollision per 10,000 år).



I Vintergatans centrum är densiteten stjärnor cirka 10^8 gånger högre än i våra trakter.

Bildning : Supermassiva

- I en sådan kollision bildas antingen en ny, mer massiv stjärna eller 'splitter'. Oavsatt vad så tenderar rörelsemängdsmoment att försvinna och materialet sjunker ytterligare in mot galaxens centrum.



Bildning : Supermassiva

- Vi ser att kollisioner fungerar som en slags **dissipativ friktion** som gör att material faller in mot centrum.
- Gas och stjärnor som rör sig inåt blir så småningom slukade av svarta hål. Svarta hål kolliderar själva med andra svarta hål, och så småningom börjar ett **supermassivt svart hål** ackumulera allt annat material.