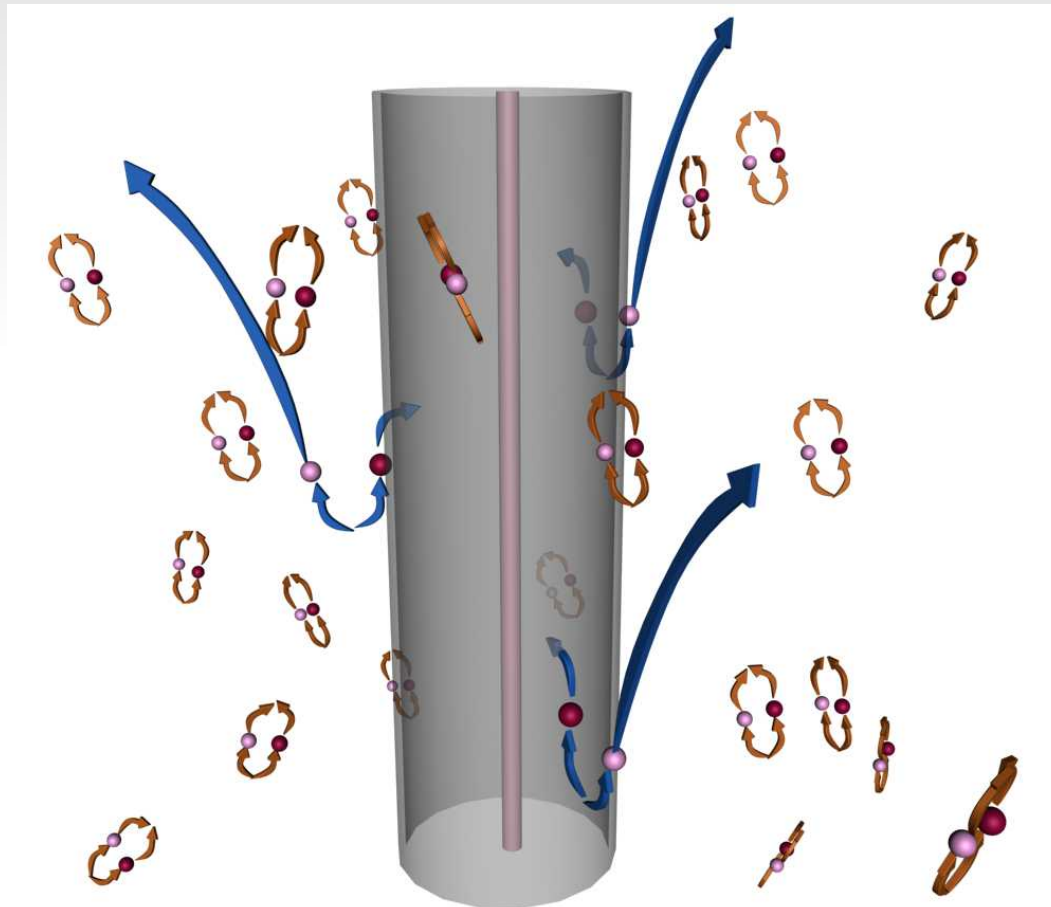


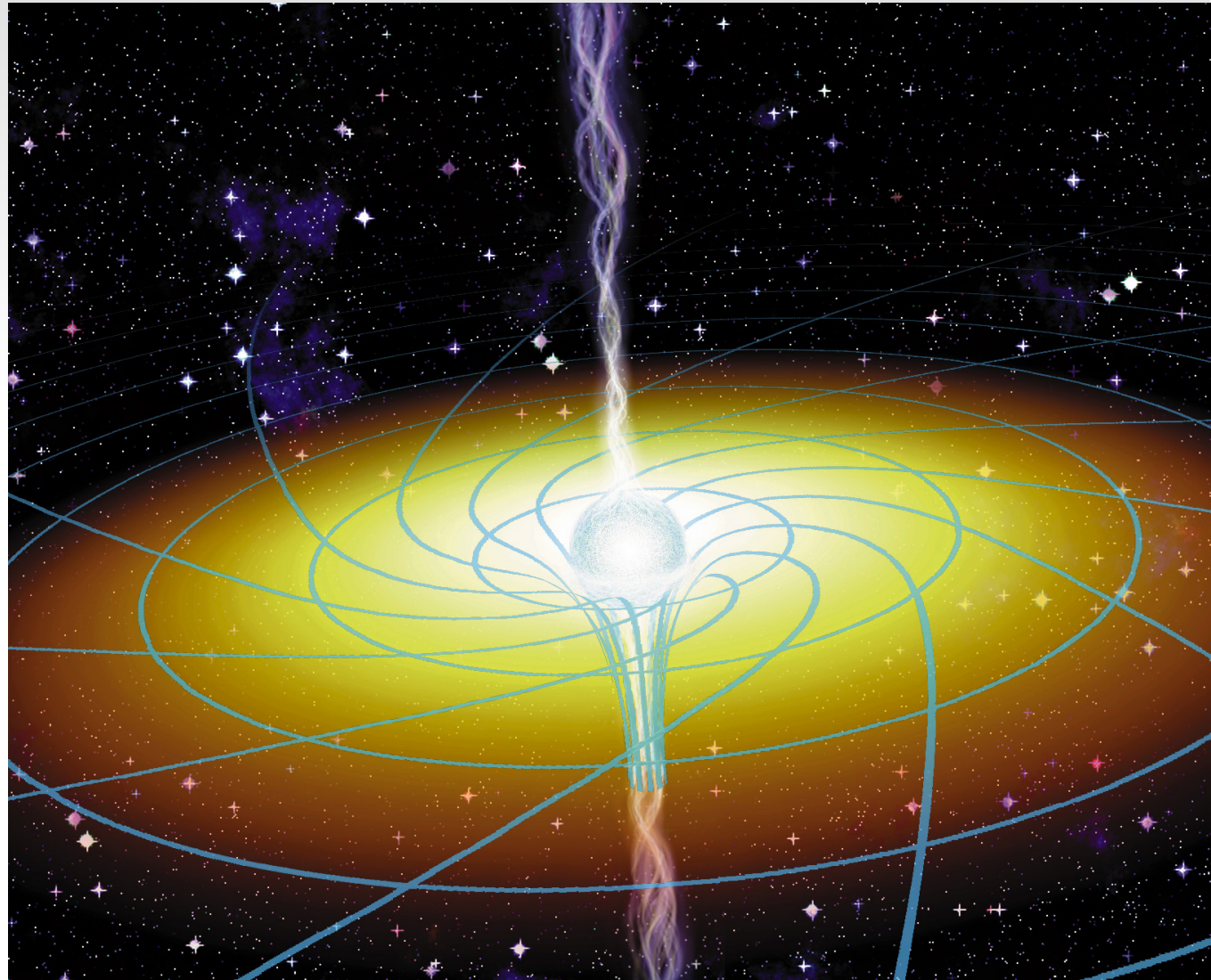
# L10 : Svarta hål : Exotiska egenskaper

Boken : Kap. 10 sid 232  
Kap. 11 sid 259 och framåt



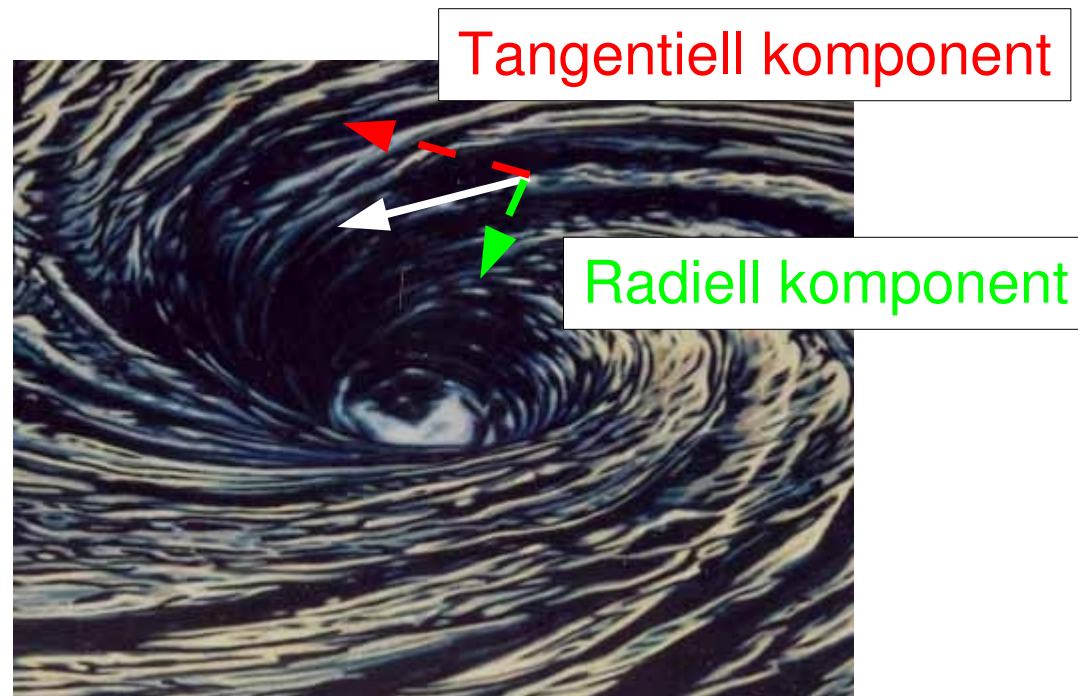
# Roterande hål

- Roterande svarta hål 'drar med sig' själva rummet i så kallad **frame dragging** eller **Lens-Thirring** effekten.



# Roterande hål

- För att förstå denna effekt studerar vi en **malström**. Denna vortex karakteriseras av att vattnet rör sig snabbare både radiellt och tangentiellt ju längre in mot centrum man kommer.



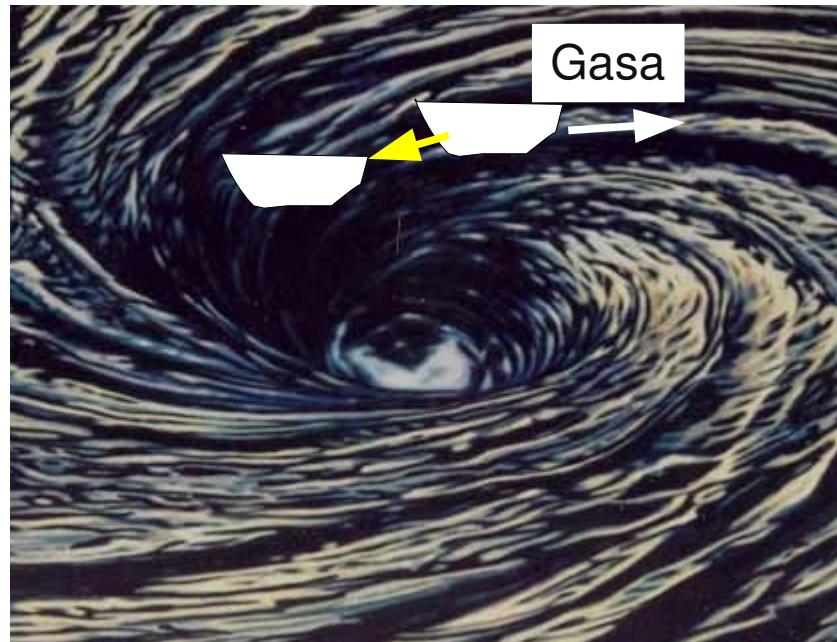
# Roterande hål

- Antag att vi är i en motorbåt som kan åka med en maximalt hastighet  $v_{\max}$  relativt vattnet.
- Långt ifrån centrum är strömmarna små och vi kan åka motströms om vi vill.



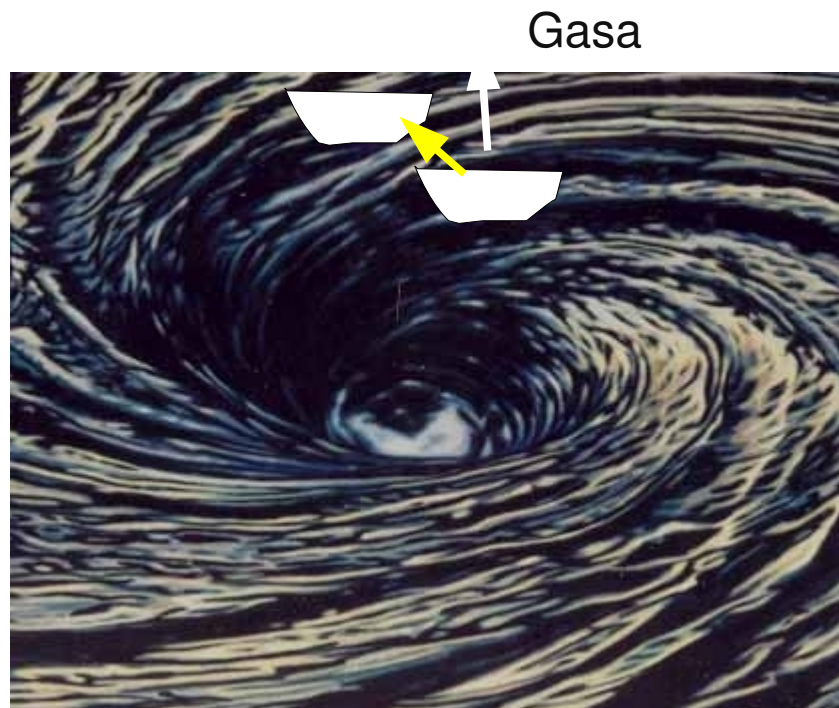
# Roterande hål

- Men innanför ett visst avstånd får strömmen en tangentiell hastighet som är större än  $v_{\max}$ . Det är då inte längre möjligt att röra sig motströms: båten kommer börja åka med i virvelns riktning.



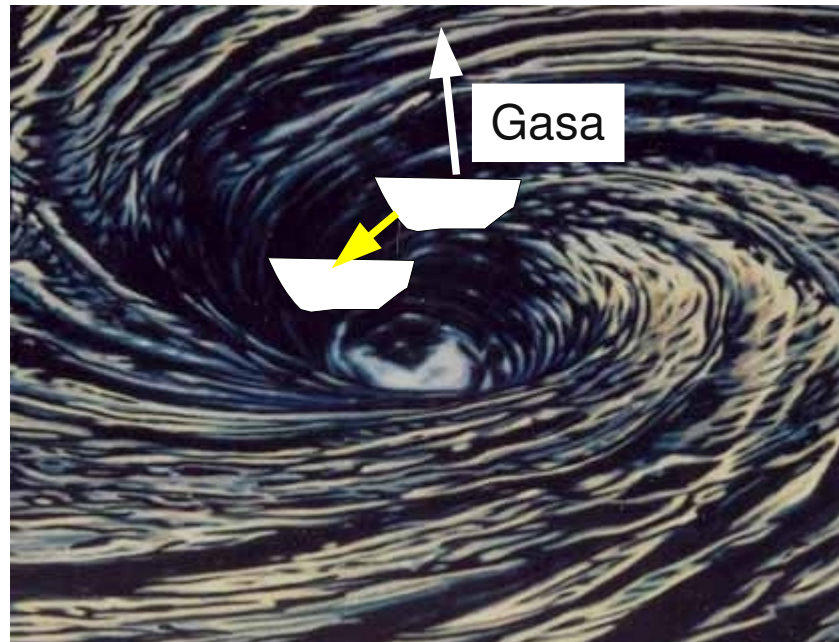
# Roterande hål

- Är båten dömd att åka ner i virveln? Nej! Den *radiella* hastigheten är fortfarande mindre än  $v_{\max}$ , så om vi gasar på rakt utåt så kan vi undkomma.



# Roterande hål

- Men ytterligare en bit in är även den radiella strömkomponenten större än  $v_{\max}$ . Passerar vi den gränsen är vi sannerligen förlorade.



# Roterande hål

- Det finns alltså två viktiga gränser:

## Statiska gränsen

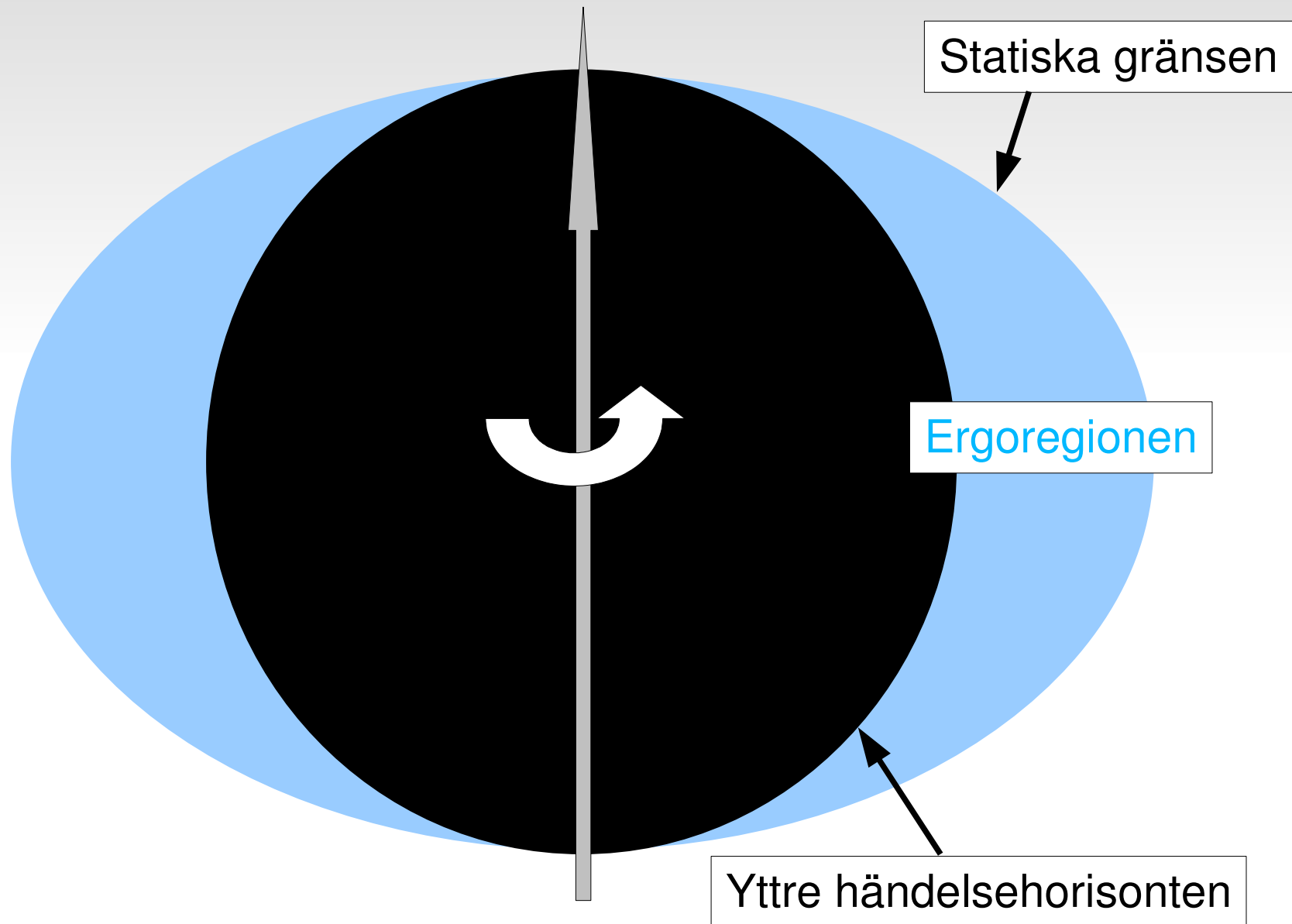
- Innanför denna kan man inte stå still utan måste röra sig i samma riktning som virveln.

## Flyktgränsen

- Innanför denna kan man inte ta sig ut igen.
- Ett roterande svart hål har två precis motsvarande gränser : statiska gränsen och flyktgränsen (=yttre händelsehorisonten).
- Området mellan gränserna kallas **ergoregionen**.

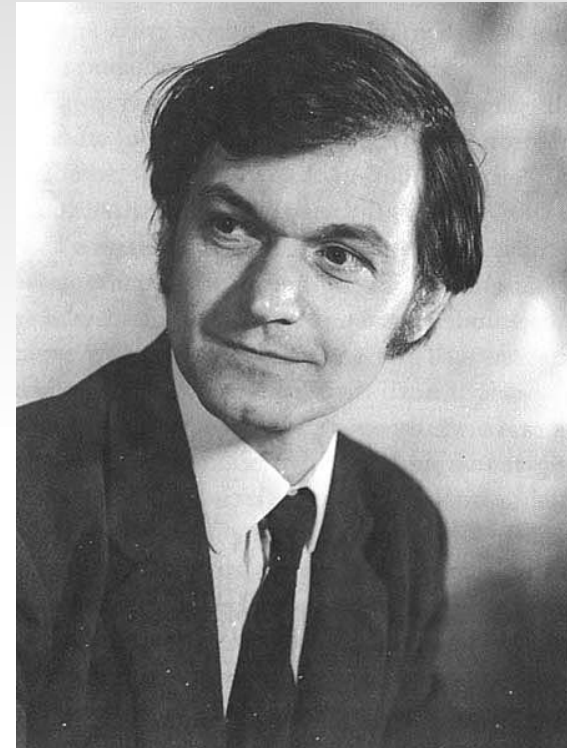


# Roterande hål



# Penroseprocessen

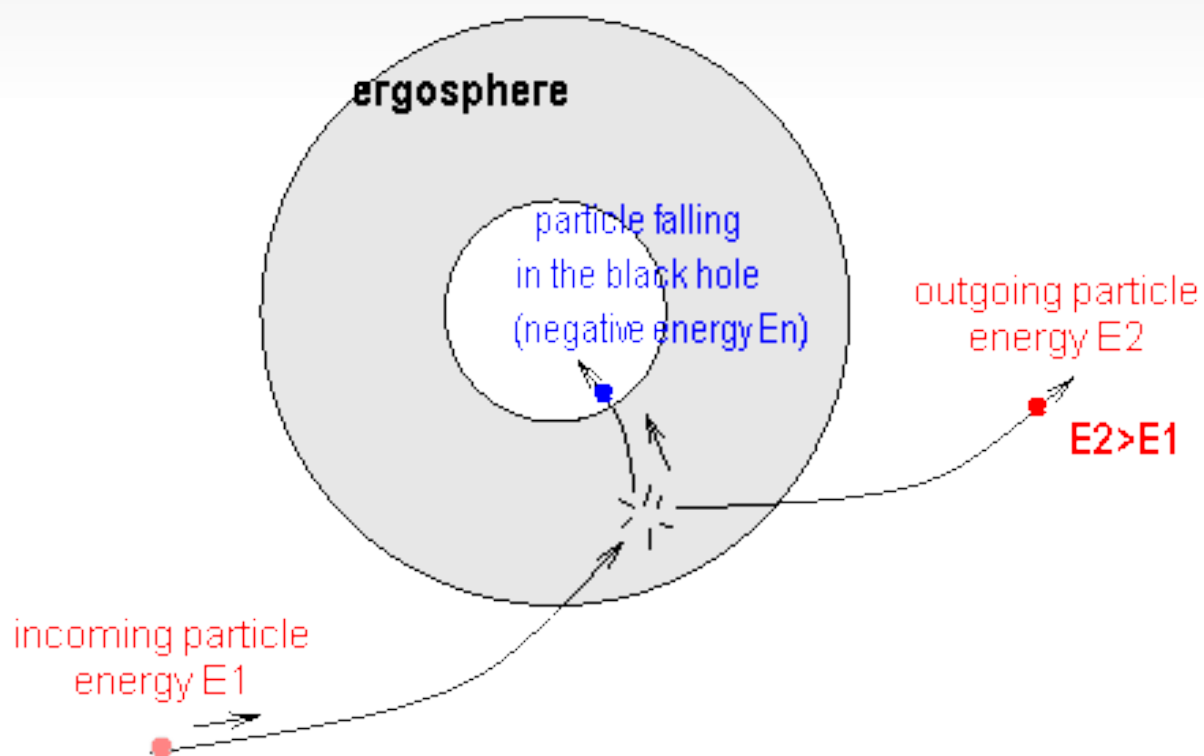
- Det visar sig att energi kan överföras från det svarta hålets rotation (och laddning) till material i ergoregionen.
- Denna process kallas **Penroseprocessen** efter dess upptäckare Roger Penrose.



*Roger Penrose är en av 1900-talets skickligaste matematiker.*

# Penroseprocessen

- Man kan visa att 29% av rotationsenergin och 50% av den elektriska energin kan utvinnas.

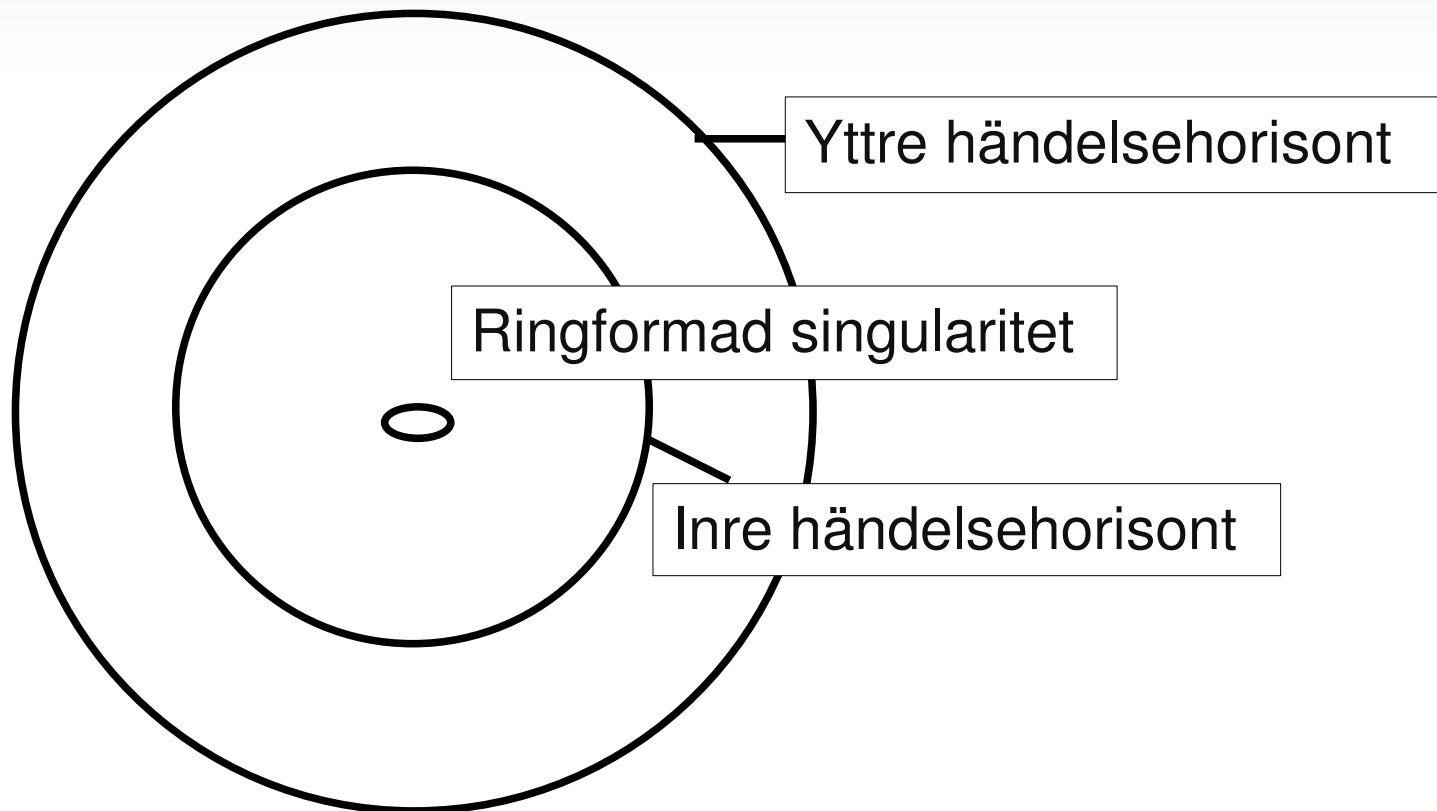


# Omloppsbanor

- Den sista stabila omloppsbanan (SSO) ligger längre in ju snabbare det svarta hålet roterar.
- För ett Schwarzschild-hål kan  $0.06mc^2$  energi utvinnas, medan ett roterande SH kan ge  $0.42mc^2$ .
- Med Newtonska approximationer :
  - Icke-roterande :  $R_{SSO} = 3R_S \rightarrow E_g \sim 1/3 * 0.5mc^2$  varav  $\sim$  hälften utvinns.
  - Maximalt roterande :  $R_{SSO} = R_{yttre\ hh} = 1/2R_S \rightarrow E_g$  en faktor 6 större.

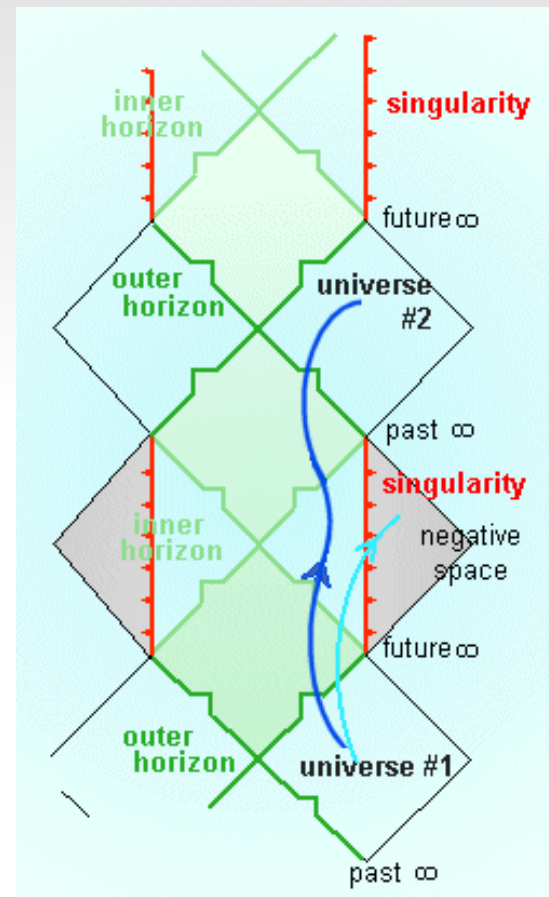
# Roterande hål : inuti

- Som vi nämnde i L8 har ett roterande hål två händelsehorisonter och en ringformad singularitet.



# Roterande hål : inuti

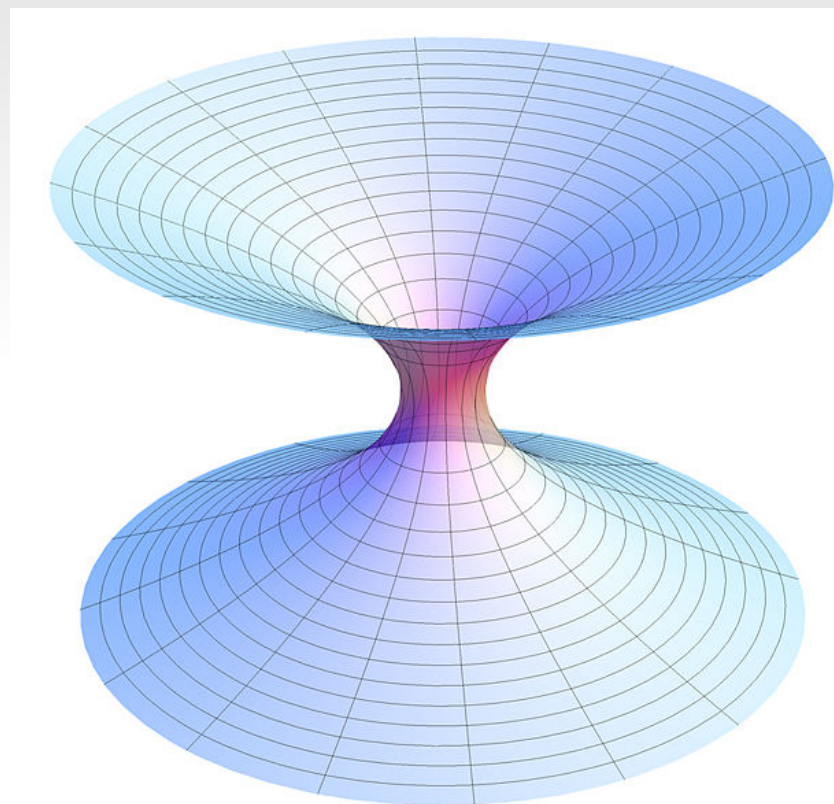
- Regionen innanför den inre horisonten tillåter godtycklig rörelse, vilket gör att
  - Singulariteten kan undvikas.
  - Singulariteten kan observeras.
  - Man kan färdas tillbaka till den inre horisonten. Med sk **Penrosediagram** (som vi ej går in på) kan man då se att man rent teoretiskt kan komma till ett annan region i rumtiden.



*Ett Penrose-diagram för roterande svarta hål.*

# Maskhål

- En geometri där rummet 'fortsätter' någon annanstans beskrevs av Einstein och Rosen 1935 och kallas en **Einstein-Rosen brygga** eller ett **maskhål**.
- Situationer där regionerna tillhör samma eller olika universa är båda tänkbara.



# Maskhål

- **Wheeler** och **Fuller** visade 1962 att sådana maskhål är instabila och skulle kollapsa så fort någonting tog sin in i dem.
- Idag är de flesta astrofysiker därför skeptiska till existensen av maskhål.



*John Wheeler är kanske den fysiker som utvecklat teorierna om svarta hål mest : han ackrediteras för att ha myntat deras namn på 60-talet.*



# Primordiala hål

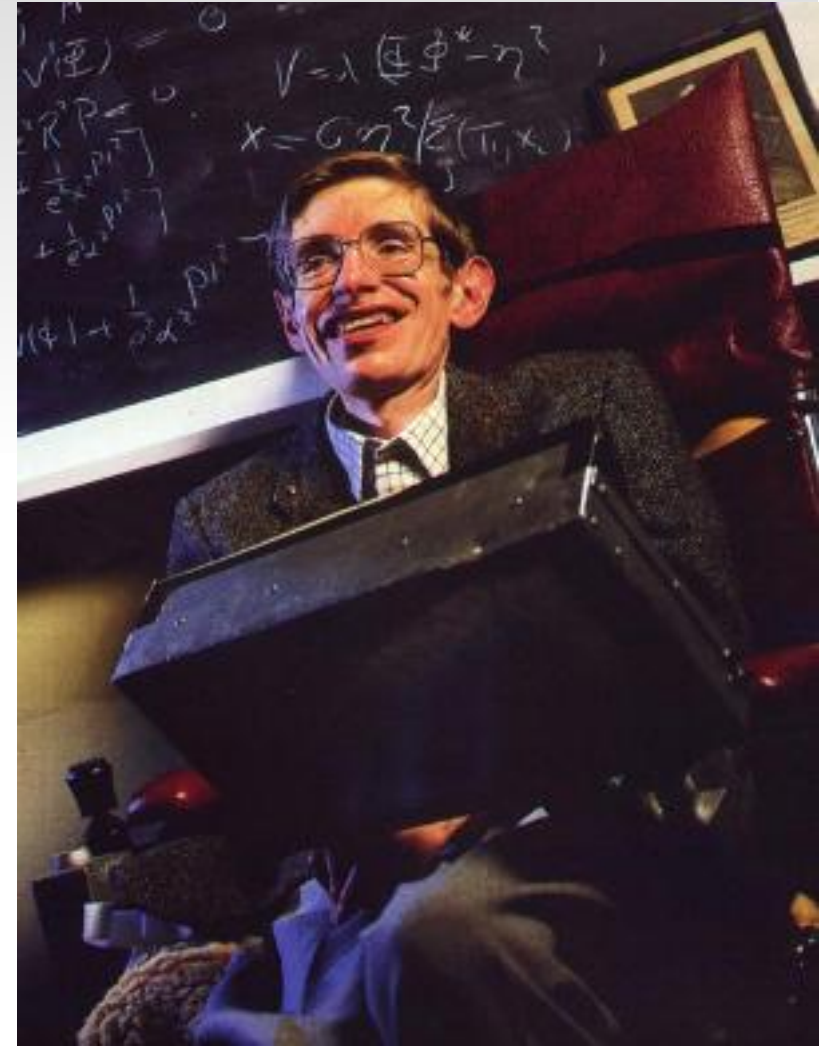
- Universum startade själv i en singularitet, **Big Bang**, för 13.7 miljarder år sedan.
- Men hela universums massa inom en liten volym måste betyda att universum självt är ett svart hål?
- Nej! Expansionen av själva rumtiden gör situationen annorlunda; alla svarta-hål-lösningar (Schwarzschild, Kerr, etc) görs för *lokala*, icke-expanderande rumtider.
- Tar man med den snabba expansionen blir kraven på SH-formation annorlunda.

# Primordiala hål

- Beräkningar visar dock att svarta hål kan ha bildats under den första sekunden av Big Bang.
- Bildning kan ej ha skett efter  $\sim 1$  sekund : i så fall skulle nukleosyntesen ha störts.
- Ju senare hålen bildades desto mer massiva :  $M=1 M_{\text{sol}}$  kunde bildas vid  $t=10^{-5}$  s,  $M=100,000 M_{\text{sol}}$  vid 1 sekund.
- Dessa hypotetiska hål kallas **primordiala hål**. De som har massa  $\ll M_{\text{TOV}}$  kallas **minihål**.

# Svarta hål är inte svarta!

- 1974 kom ett stort genombrott i förståelsen av svarta hål, när **Stephen Hawking** visade att de faktiskt inte är helt svarta!
- Kvantmekaniska effekter gör att alla svarta hål ger ifrån sig en svag strålning och efter tillräckligt lång tid kommer de ha strålat bort.



# Heisenbergs osäkerhetsrelation

- För att förstå detta måste vi känna till en **variant av Heisenbergs osäkerhetsrelation:**

$$\Delta E \Delta t \sim \hbar/2$$

- Relationen säger att man kan 'bryta' mot lagen om energikonservering med energimängden  $\Delta E$  under en tid

$$\Delta t = \frac{\hbar}{2 \Delta E}$$

# Heisenbergs osäkerhetsrelation

- En elektron har viloenergin:

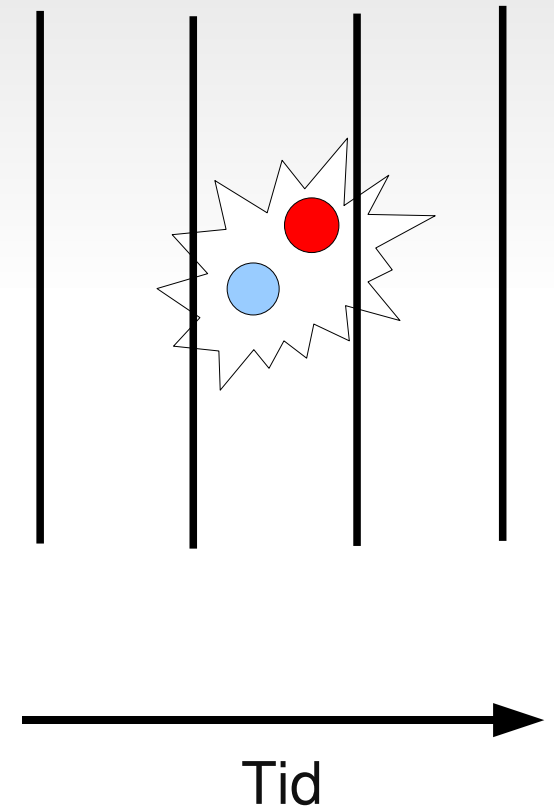
$$E = mc^2 = 9.1 \cdot 10^{-31} (3 \cdot 10^8)^2 = 8 \cdot 10^{-14} \text{ J}$$

- Enligt Heisenbergrelationen kan den skapas ur ingenting så länge den försvinner igen inom en tid:

$$\Delta t = \frac{\hbar}{2 \Delta E} = \frac{1.05 \cdot 10^{-34}}{2 \cdot 8 \cdot 10^{-14}} = 10^{-21} \text{ s}$$

# Virtuella partiklar

- Andra kvantmekaniska lagar gör att en sådan kreation alltid sker i **par** där en antipartikel också hänger med. Dessa partikelpar kallas **virtuella partiklar**.
- Virtuella partiklar dyker upp och försvinner överallt i rummet, hela tiden : detta är inte bara en teoretisk ide utan deras påverkan på permanenta atomer har uppmätts.

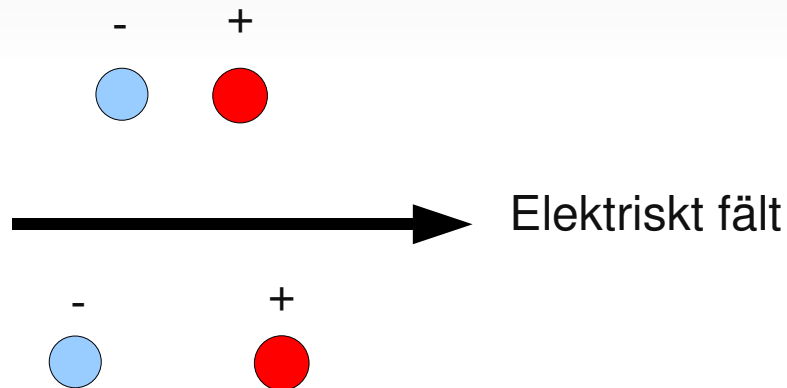


# Virtuella partiklar

- Partiklarna har 'lånat' energin till sin existens och måste betala tillbaka den inom Heisenbergtiden.
- Men de har en chans att bli permanenta : om de lyckas skaffa sig den lånade energin under den korta tid de har på sig.
- De kan då betala tillbaka energiskulden utan att behöva förrinta sig själva.
- Detta skulle tex kunna ske om de tex acceleras av ett starkt elektriskt fält.

# Virtuella partiklar

- Det elektriska fältet accelererar partiklarna åt varsitt håll och ökar därmed den potentiella elektromagnetisk energin mellan dem.

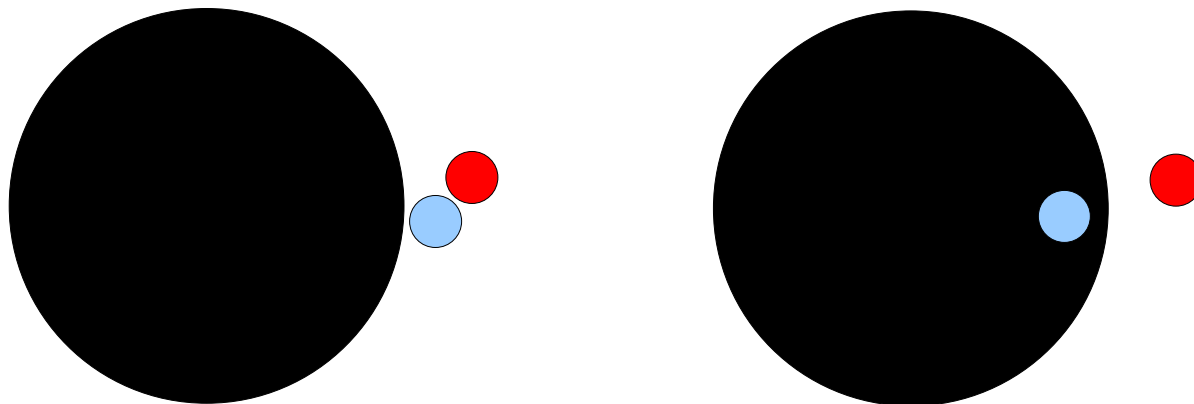


- Partiklarna kan vara både massiva partiklar (elektroner, positroner, protoner, osv.) eller fotoner.<sup>24</sup>



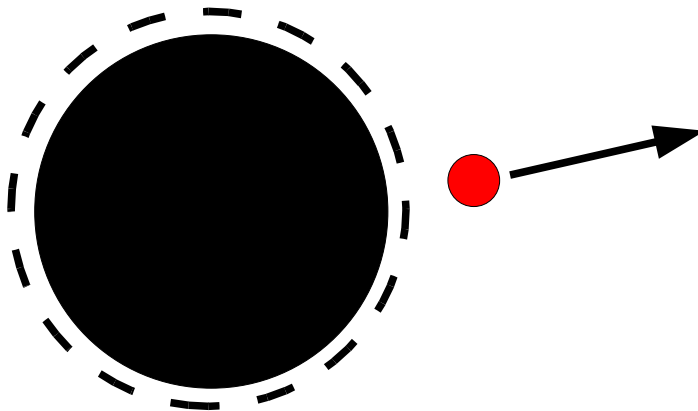
# Hawkingstrålning

- Antag nu att ett sådant partikelpar skapas precis på kanten till ett svart hål.
- Det svarta hålets tidvatteneffekt gör att partiklarna dras isär vilket innebär tillförsel av energi.
- Den ena partiklen försvinner in i det svarta hålet, medan den andra klarar sig.



# Hawkingstrålning

- Energi måste fortfarande konserveras (på sikt), och den enda möjligheten för detta att ske är att energi tas från det svarta hålet och ges till partikeln. I och med detta krymper det svarta hålet (det förlorar massa/energi).
- Partikeln (vanligtvis en foton) åker iväg och uppfattas som emission från hålet.



# Hawkingstrålning

- Hawking visade det svarta hålet på detta sätt strålar bort. Takten *minskar* kvadratisk med hålets massa :

$$L = \frac{\textit{konstant}}{M^2}$$

- Man kan tillskriva emissionen en **strålningstemperatur:**

$$T = 10^{-7} \left( \frac{M_{sol}}{M} \right) \textit{Kelvin}$$

# Hawkingstrålning

- Tiden det tar för hålet att helt stråla bort:

$$t_{evap} = 10^{67} \left( \frac{M}{M_{sol}} \right)^3 \text{ år}$$

- För stellära eller större svarta hål är detta en enorm tid : Universums nuvarande ålder är bara  $\sim 10^{10}$  år!
- Hawkingstrålningen är alltså, för stellära eller större hål, *extremt svag*.
- Dessa hål får dessutom in mer energi via den kosmiska bakgrundstrålningen än de förlorar via Hawkingeffekten.

# Strålningens beståndsdelar

- Det visar sig att bara partiklar som är **minst lika stora som hålet själv** kan skapas →

*Stellära (och större) hål kan bara skapa radiofotoner, men mikrohål kan också skapa kortvågig strålning och partiklar.*

# Hawkingstrålning

- Eftersom det saknas en teori för singulariteten vet man inte om hela hålet verkligen försvinner eller om någonting blir kvar.
- I vilket fall skulle den mesta av energin lösgöras i en sista explosiv fas (eftersom  $L \sim 1/M^2$ ) där **röntgen** och **gammastrålning** skulle vara de dominerande komponenterna.
- Hål som har  $t_{\text{evap}} = t_{\text{univ}}$  skulle just nu befinna sig i sin sista, explosiva fas.
- Hur stora skulle sådana hål vara?

# Hawkingstrålning – minihål

- Svaret blir  $\sim 10^{11}$  kg, vilket ungefär motsvarar **massan hos ett berg**. Dessa hål skulle vara stora som en atomkärna.
- $E = mc^2 = 10^{28}$  J  $\sim$  1/2 minuts solenergi.
- Med dagens röntgen och gammateleskop bör de vara detekterbara på ett avstånd inom några ljusår.
- Ingen detektion av en sådan explosion har gjorts.  
(Gammastrålningsutbrotten är av en annan karaktär)

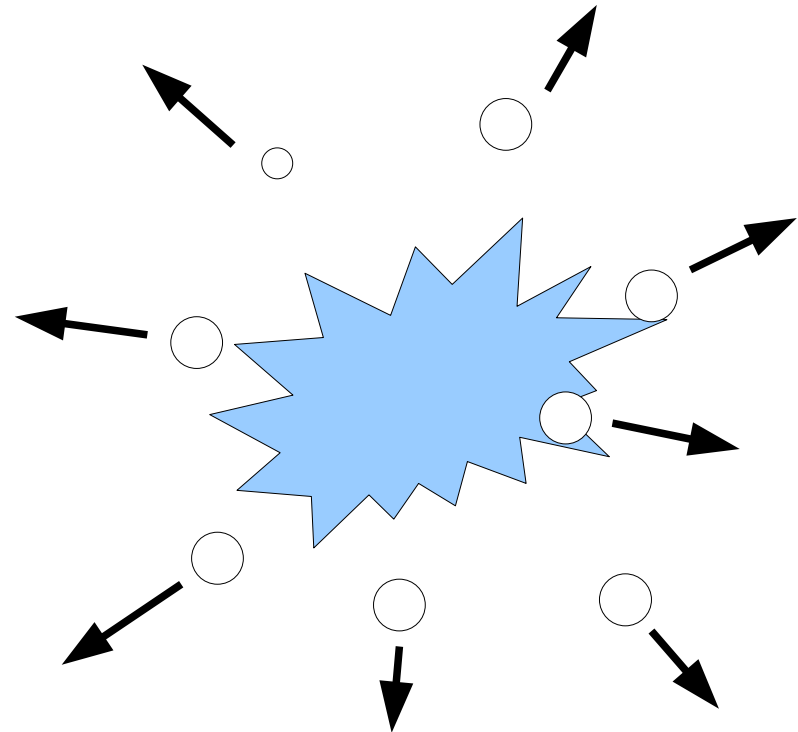
# Hawkingstrålning

- Man kan också tänka sig att en distribution av hål som evaporerar vid olika tidpunkter i det förflutna skulle ge en bakgrund av röntgen och gammastrålning.
- Man detekterar ingen sådan bakgrund ned till nivåer som kan säga att mikrohål inte kan utgöra den baryonska delen av den mörka materian (L11).



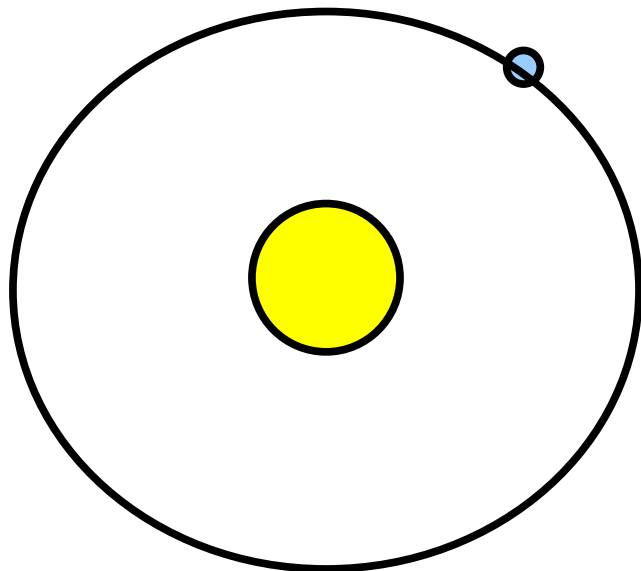
# Informationsförlust

- Antag att du har ett kakrecept som du spränger i luften. Är informationen förstörd? I princip inte : om du mäter alla partiklars läge och hastighet och räknar bakåt så kan du återskapa papperslappen i sin ursprungliga form.



# Informationsförlust

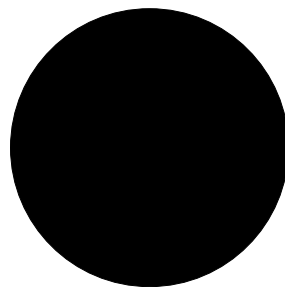
- Detta beror på att fysikens lagar är **mikroreversibla** vilket betyder att man *i princip* alltid kan räkna bakåt och se vilket tillstånd som rådde tidigare : den informationen förstörs aldrig.



*Från observation av jordens position runt solen är det lätt att räkna ut både var den var tidigare och var den kommer vara i framtiden. Sådan tidssymmetri kännetecknar alla fysikens lagar.*

# Informationsförlust

- Men enligt Inget hår-teoremet karakteriseras ett svart hål av bara tre tal.
- Uppenbarligen saknas här all information om vad som en gång har funnits tidigare : denna information har alltså förstörts?



*Är vårt kakrecept för alltid förlorat om det åker in i ett svart hål?*

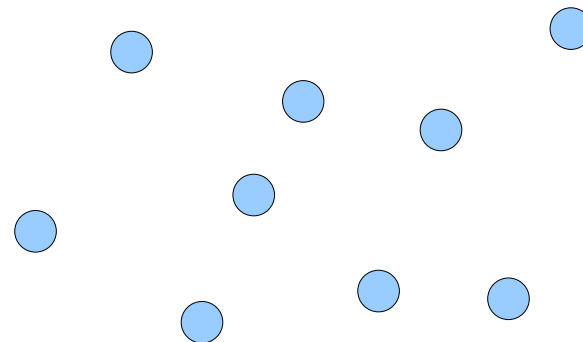
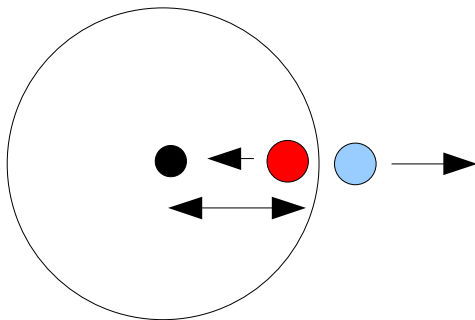
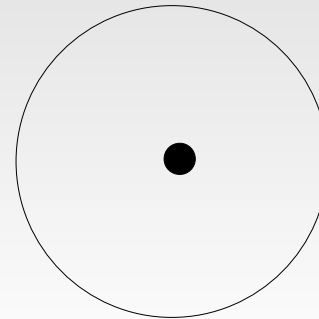
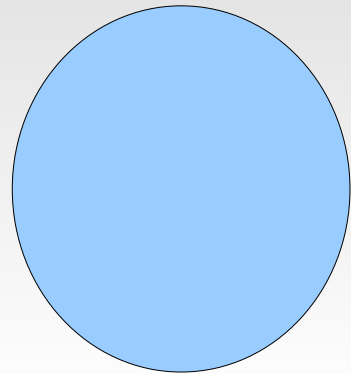
# Informationsförlust

- Om det svarta hålet inte hade strålat bort så skulle detta kunna lösas genom att säga att informationen finns kvar i singulariteten.
- Men pga Hawkingstrålningen så strålar ju hålet så småningom bort.
- Dessutom är strålningen enligt Hawking termisk och innehåller ingen information.
- Vart tog informationen vägen då?

# Informationsförlust

- I alla vanliga "evaporationsprocesser" har fotonerna kontakt med materian som försvinner och tar med sig informationen om denna.
- Men Hawkingstrålningen skapas vid händelsehorisonten som inte har någon kontakt med singulariteten.

# Informationsförlust



$R_s \gg R_{qg \rightarrow}$  Hawkingstrålningen har ingen kontakt med singulariteten

# Informationsparadoxen

- Att svarta hål verkar bryta mot informationsbevarande är ett problem som kallas **informationsparadoxen**.
- Tänkbara lösningar inkluderar
  - Singulariteten strålas aldrig bort utan blir kvar.
  - Svarta hål är sk **fuzzballs** som innehåller strängar och inte vakuum.
  - Informationen kodas på något sätt ändå in i Hawkingstrålningen.
    - Nyligen har Hawking själv framlagt ett bevis för denna tes, som dock inte är allmänt accepterat.

# Två hål kolliderar

- Frånsett Hawkingstrålningen kan man visa att *summan av areorna hos en grupp svarta hål aldrig kan minska.*
- Antag att två hål med  $M = 1/3 M_{\text{sol}}$ ,  $R_S = 1 \text{ km}$  dvs  $A=4*\pi$  kolliderar och bildar ett större svart hål. Arean på det nya hålet måste vara minst  $2A = 8*\pi$  dvs  $R_{\text{nya}} > \sqrt{2} = 1.41 \text{ km} \rightarrow M_{\text{nya}} > 0.47 M$ .
- Det är då möjligt att  $(2/3-0.47) / 2/3 = 29 \%$  av massan frisläpps som **gravitationsvågor**.
- SH kan alltså 'avdunsta' även på detta sätt.

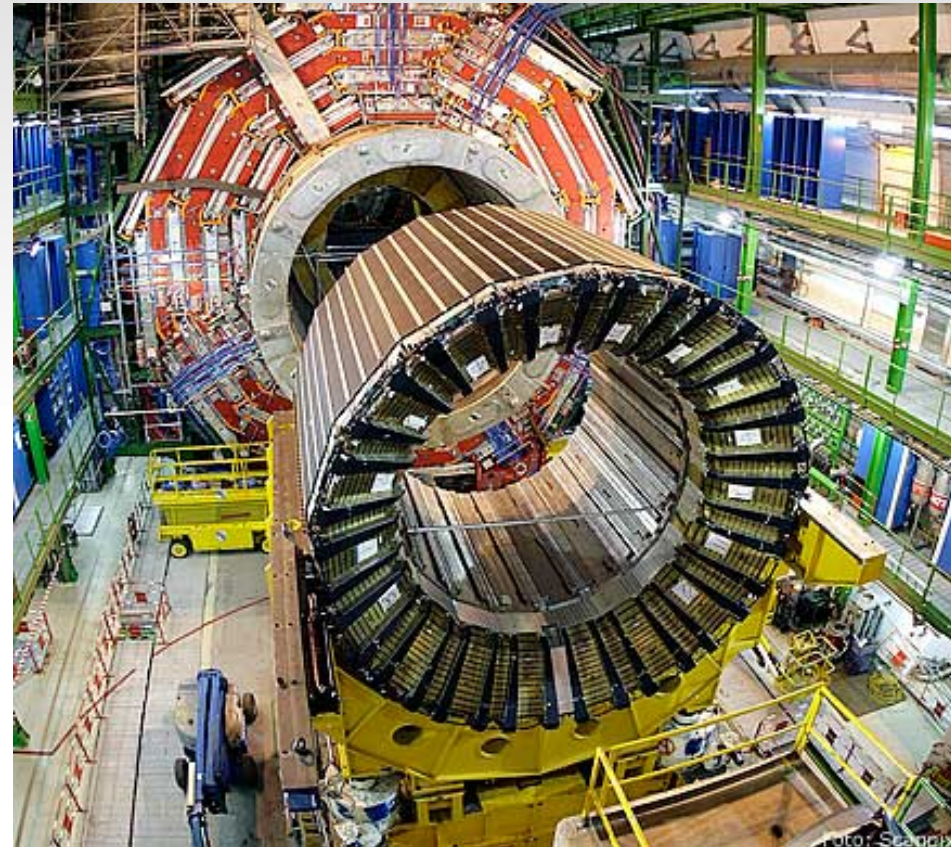


# Svarta håls entropi

- Bekenstein föreslog av likheten med termodynamikens andra lag (entropi kan aldrig minska) kunde tolkas som att *ett svart hål har entropi som är proportionerlig mot deras area.*
- Detta var också baserat på att man annars kunde bryta mot TD 2:a lag genom att slänga materia in i ett svart hål.
- Hur går detta ihop med Inget-hår-teoremet, som säger att svarta hål bara har tre egenskaper? Detta är för en *yttre* observatör : inne i det svarta hålet måste<sub>41</sub> det finnas många mikrotillstånd → hög entropi.

# Kan vi skapa ett svart hål?

- CERN'S senaste accelerator **LHC** skapar energier uppåt  $14 \text{ TeV} = 10^{-6} \text{ J}$ . Kan en sådan partikelkollision skapa ett minihål?



# Kan vi skapa ett svart hål?

- Massan är i så fall  $m=E/c^2 = 10^{-23}$  kg.
- Faktum är att ett sådant litet svart hål inte kan beskrivas av allmän relativitetsteori eftersom det skulle ha en Schwarzschildradie på  $10^{-50}$  m, medan allmän relativitetsteori bryter ihop vid massor mindre än  $\sim 10^{-35}$  m.

# Kan vi skapa ett svart hål?

- Men för  $M < 10^{-8}$  kg är ett svart håls kvantmekaniska våglängd större än Schwarzschildradien, och detta kan därför vara den minsta möjliga massan för ett svart hål.
- Detta är dock osäkert, då gravitationen mycket väl kan börja bete sig helt annorlunda på kvantskala : följer den de andra krafternas beteenden på liten skala så blir den mycket starkare än G och svarta hål kan ha mycket mindre massa än  $10^{-8}$  kg.

# Kan vi skapa ett svart hål?

- *Om* små svarta hål verkligen kan skapas och *om* de inte snabbt förintas av Hawkingstrålning så skulle de ändå vara ofarliga.
- De skulle kunna svälja partiklar som kom inom deras yta på  $\sim R_s^2 \sim 10^{-100} \text{ m}^2$ , vilket är  $\sim 10^{70}$  gånger mindre än en atomkärna.
- Hålet skulle åka rakt genom jorden utan att suga upp eller påverka en enda partikel.

# Kan vi skapa ett svart hål?

- Det bästa argumentet för att inget farligt skulle kunna hända är att jorden hela tiden träffas av partiklar från rymden med energi som är mycket större än LHC-energin (men dock mindre än  $m_{\text{Planck}}c^2$ ).
- Eftersom dessa kollisioner inte har skapat några svarta hål som gjort sig märkbara under flera miljarder år kommer LHC rimligtvis inte heller att göra det.

