

# Einstein og relativitetsteorien – et hundreårsjubileum

Øyvind G. Grøn

Bergen astronomiforening 16. april 2015



Einsteins far, Herman Einstein



Einsteins mor, Pauline Einstein

Albert Einstein var født 14. mars 1879 i Ulm i Sydtyskland.



Albert Einstein og hans søster Maja

# 1884

- **Einstein fikk et kompass da han var 5 år gammel.**
- **At nålen pekte mot nord styrte av en usynlig kraft forundret ham.**
- **Einstein skrev i sin selvbiografi at kompasset fikk ham til å tenke at det måtte eksistere noe som var dypt skjult bak tingene."**





Einstein sammen med søsteren Maja 14 år gammel



Einstein 14 år gammel

IN DIESEM HAUSE WOHNTE  
1895/96 ALS KANTONSSCHÜLER  
ALBERT EINSTEIN  
1879 — 1955  
DER BERÜHMTE PHYSIKER

Da Einstein var 16 år gammel frasa han seg sitt tyske borgerskap, og gikk på skole i Sveits.



*Konrad Habicht, Maurice Solovine og Albert Einstein.*

*Sammen med Michel Besso dannet de en diskusjonsgruppe som de kalte  
Det olympiske akademi.*





Einstein giftet seg i 1902 med serbiske Mileva Maric.

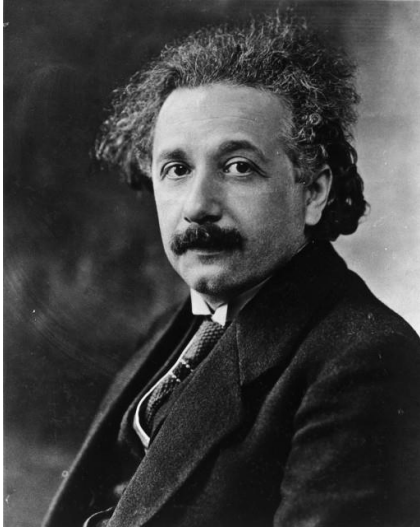


Einstein's første kone, Mileva Maric, og deres sønner Eduard (til venstre) and Hans Albert (til højre) i 1914 - det året Einstein og Mileva skilte seg.



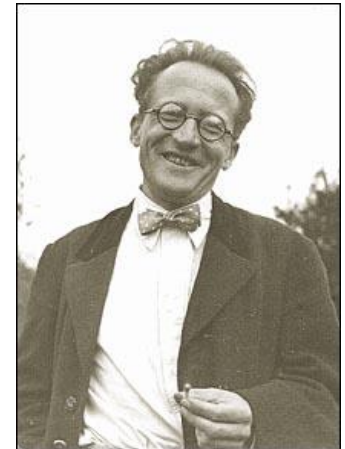
Einstein i patentkontoret i Bern 1905, 28 år gammel

# Grunnlaget for det 20. århundrets fysikk



- ***Den spesielle relativitetsteorien (1905)*** gir en gyldig bevegelseslære for alle hastigheter opp til lyshastigheten.
- ***Den generelle relativitetsteorien (1915)*** er den generelle teorien for tid, rom og gravitasjon.

- ***Kvantemekanikken (1925)*** er teorien for fenomener på atomært nivå



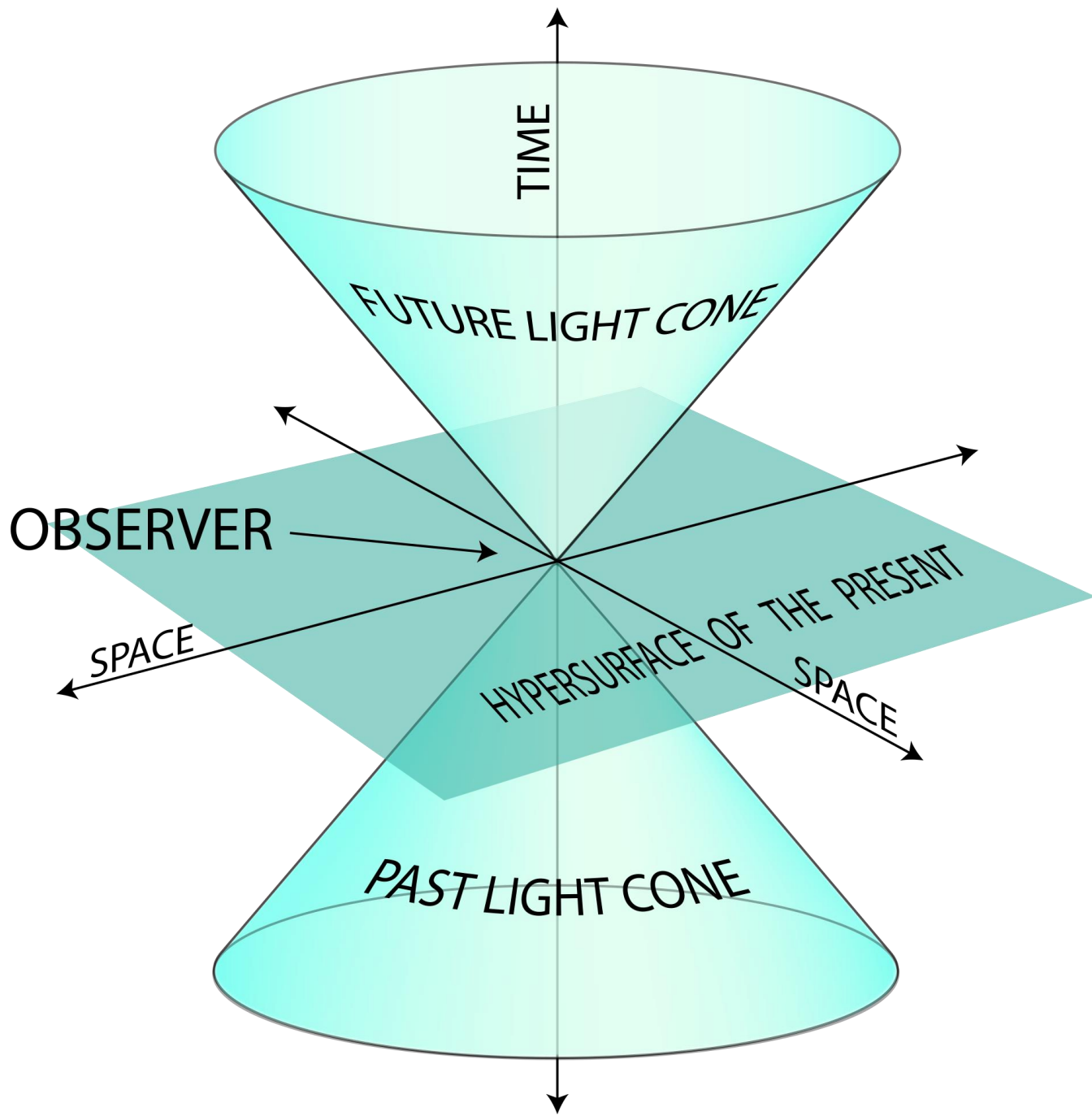
Vi mangler en kvantegravitasjonsteori!

# Den Spesielle Relativitetsteorien

bygger på to postulater

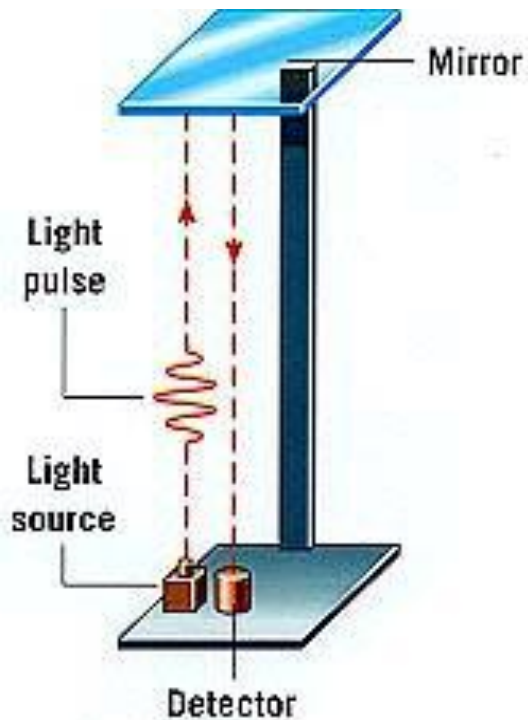
Fysikkens lover er de samme i alle inertialsystemer.

Lyshastigheten er uavhengig av lyskildens hastighet.



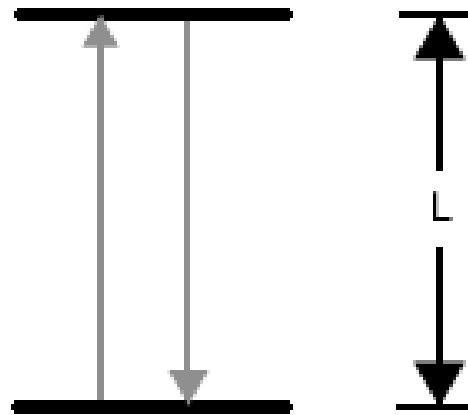
Vi observerer langs den fortidige lyskjeglen. Vi ser et objekt slik det var da det sendte ut lyset vi mottar. Når vi observerer utover i universet, observerer vi bakover i tiden.

En av relativitetsteoriens konsekvenser er at legemer (klokker) som beveger seg, eldes langsommere enn legemer som er i ro.



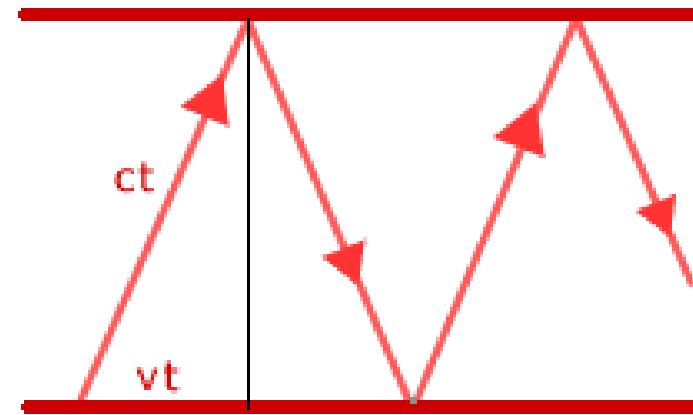
Lysklokke i tog

### PATHWAY OF LIGHT ON TRANSVERSE CLOCK



At absolute rest

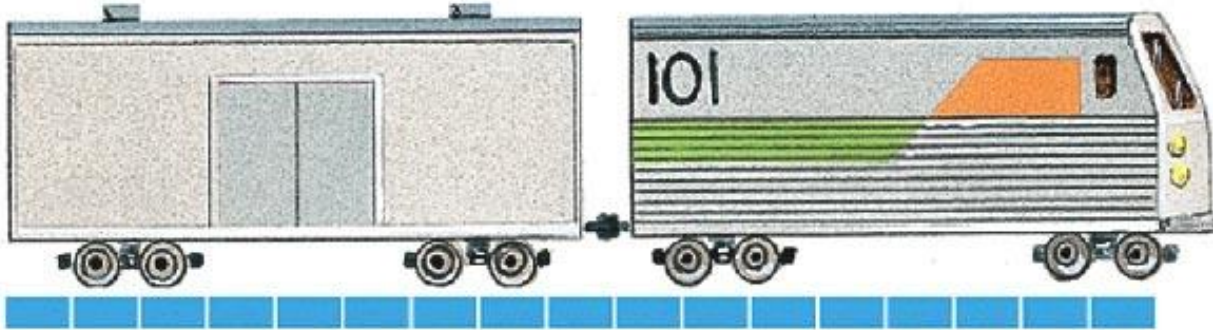
observert fra toget



On a moving inertial frame

observert fra perrongen

# Lengdekontraksjon



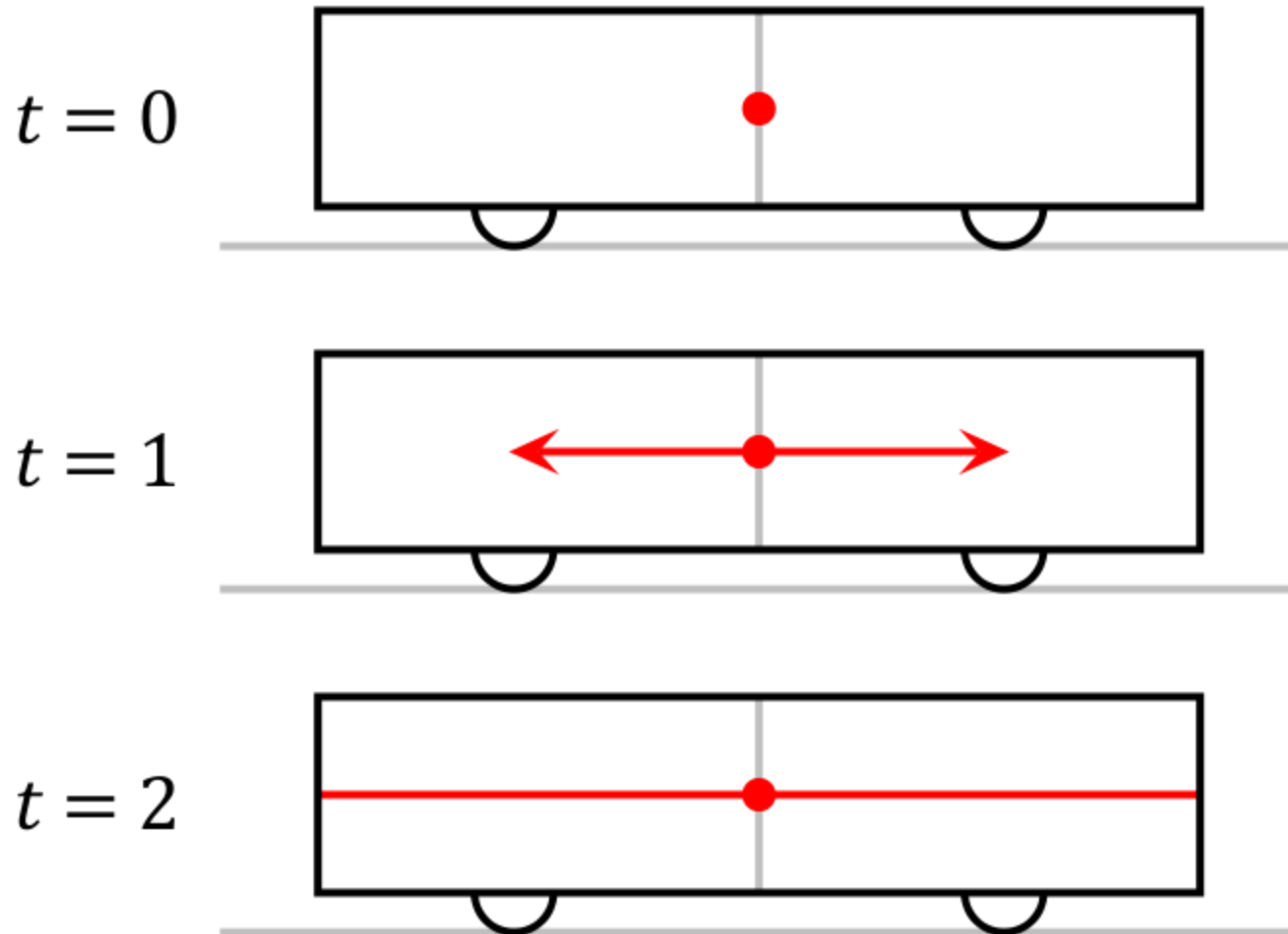
At rest



In motion

Målt ved samtidighet er avstanden mellom forreste og bakerste ende av en gjenstand kortere jo raskere gjenstanden beveger seg.





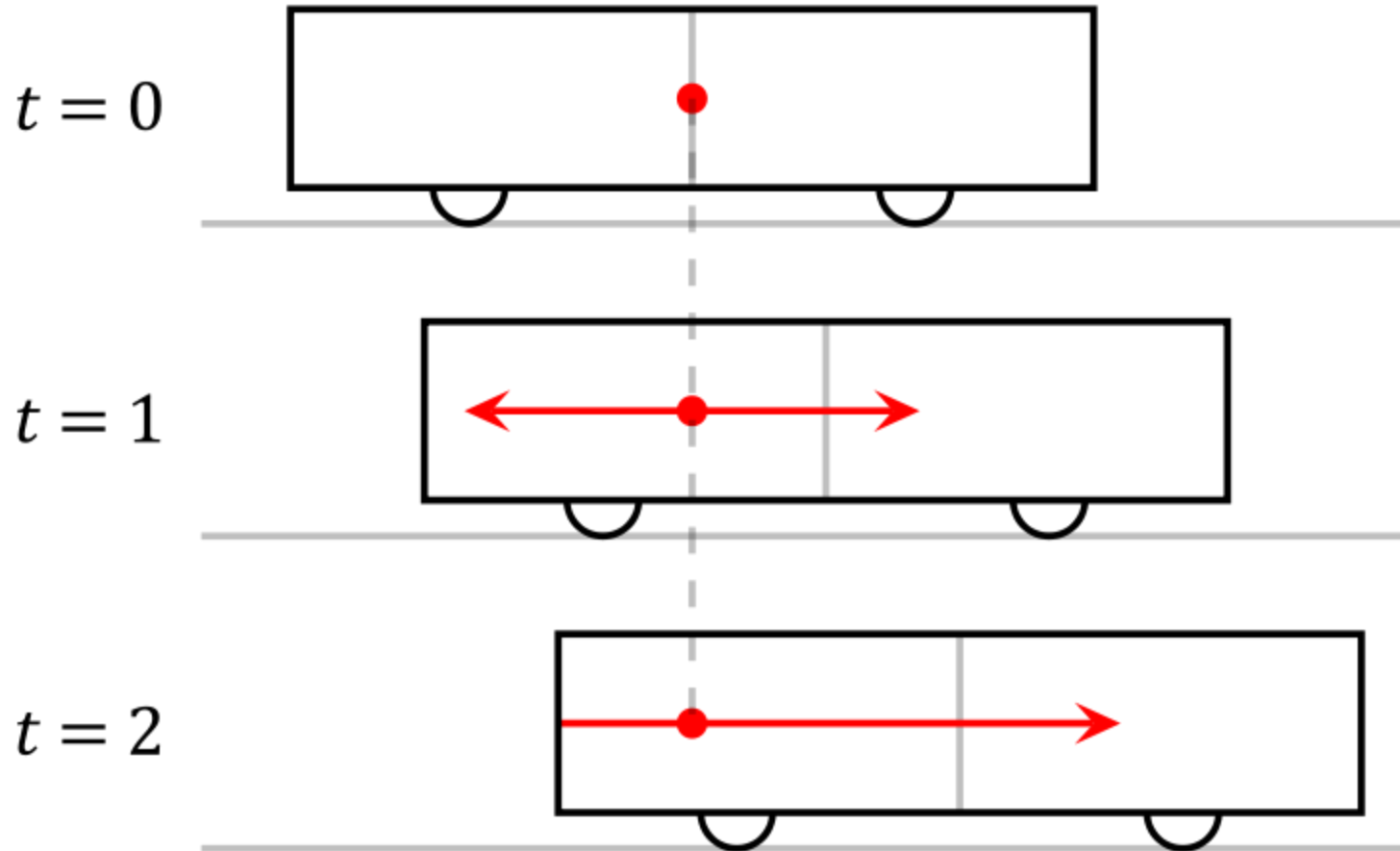
### Einsteinsynkronisering av klokker:

En laborant i vognen oppfatter vognen som i ro.

Han synkroniserer to klokker – en bakerst og en forrest i vognen – ved et bestemt øyeblikk å sende et lyssignal mot hver av dem fra en sender midt i vognen.

Klokkene stilles likt når lyssignalene treffer dem.

Lyssignalene treffer de to klokkene **samtidig observert i vognen**.



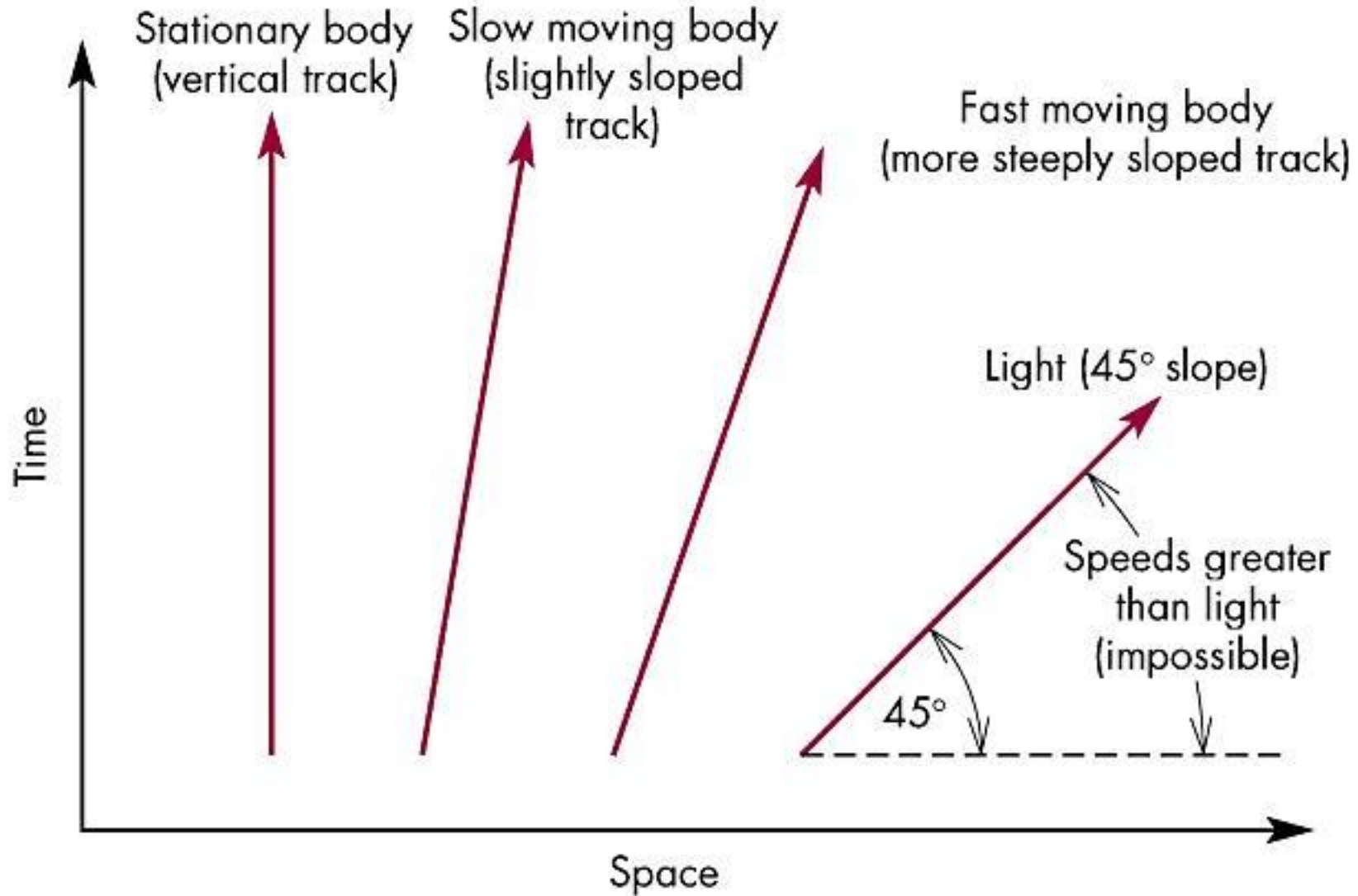
### Samtidighetens relativitet:

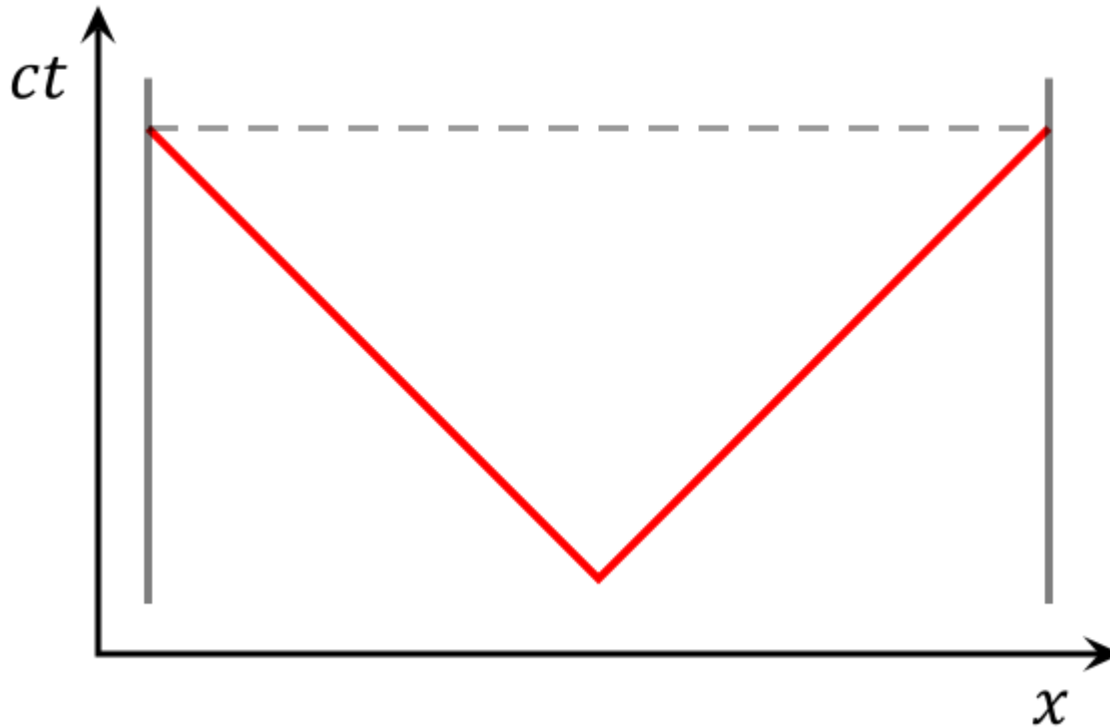
Observert fra perrongen beveger vognen seg mot høyre.

Observert fra perrongen treffer lyssignalet den bakerte klokken før den forreste.

Hendelsene som er samtidige observert fra toget, er **ikke samtidige observert fra perrongen**.

# Tidromdiagram også kalt Minkowskidiagram



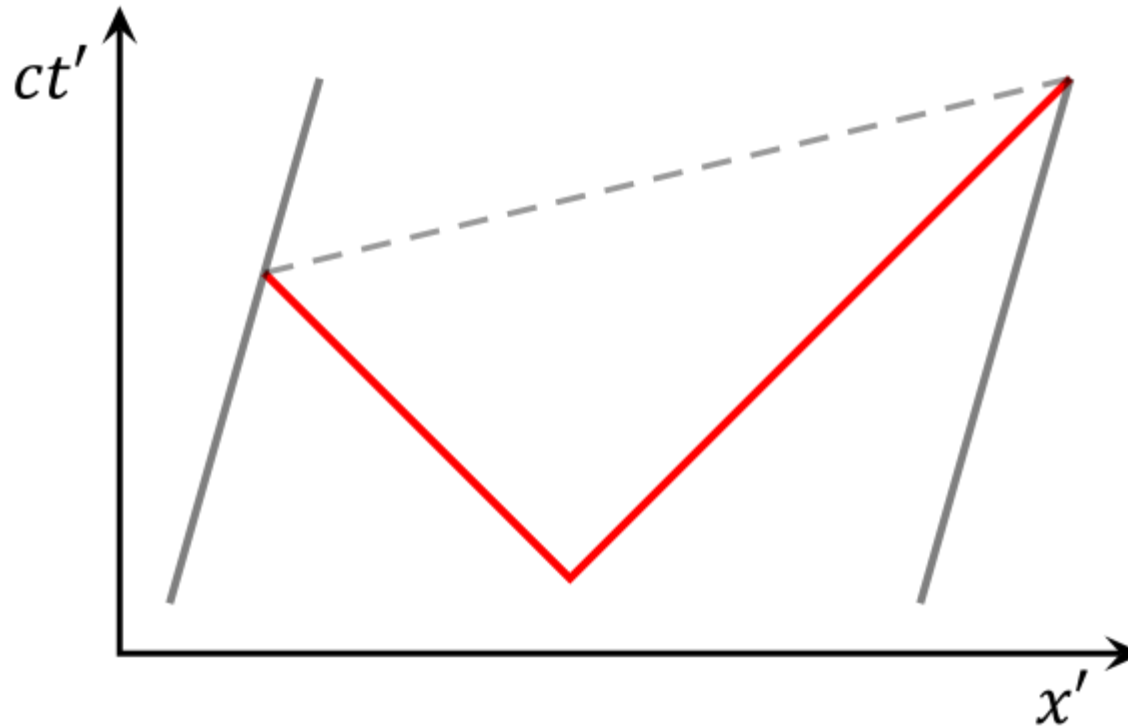


Minkowskidiagram av synkroniseringsprosessen **observert fra vognen**.  
De røde linjene er verdenslinjene til lys som sendes fra midten av vognen og henholdsvis mot venstre og høyre.

De loddrette grå linjene er verdenslinjene til klokkene.

Siden klokkene er i ro, beveger de seg bare i tidretningen.

Den horisontale stiplede linjen representerer samtidighet i vognen.



Minkowskidiagram av synkroniseringsprosessen **observert fra perrongen**.

De røde linjene er verdenslinjene til lys som sendes fra midten av vognen og henholdsvis mot den bakerste og den forreste klokken.

De skrå, grå linjene er verdenslinjene til klokkene.

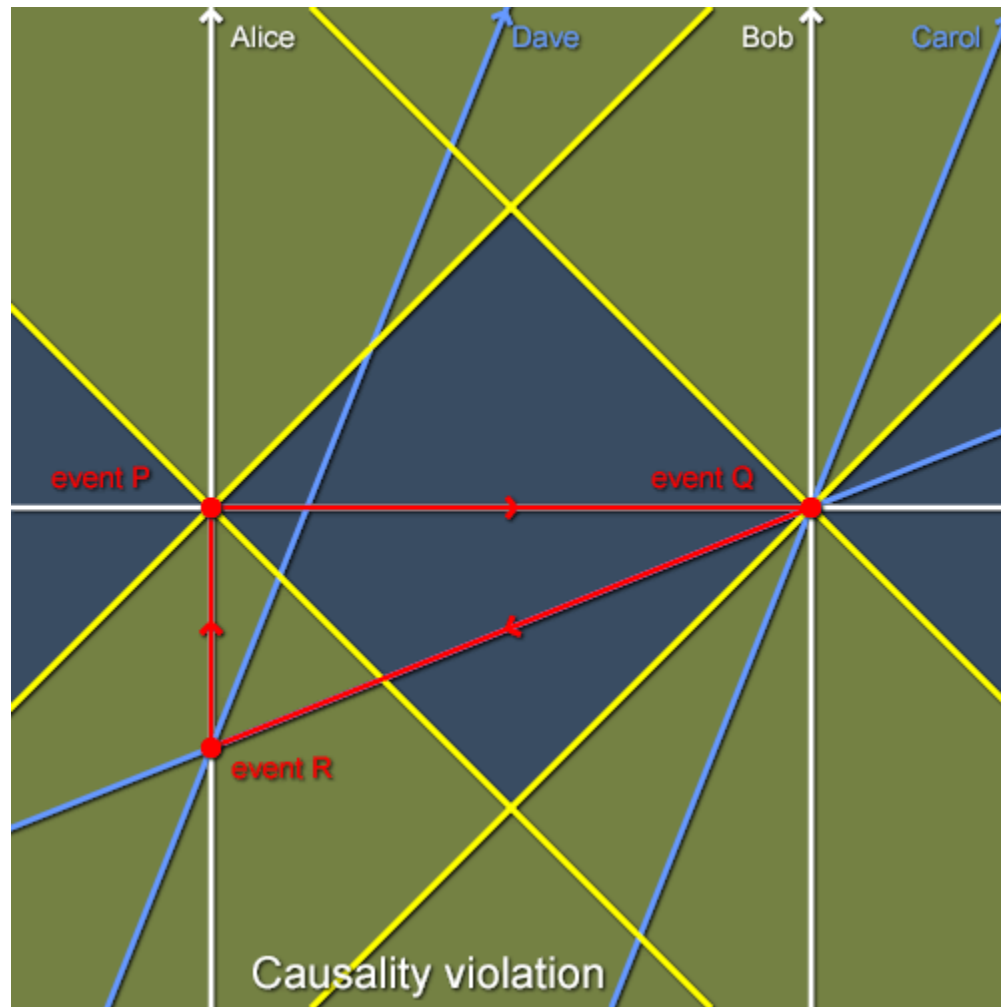
Klokkene ble truffet samtidig observert i vognen.

Den skrå stiplede linjen representerer følgelig samtidighet i vognen.

Lyset treffer den bakerste klokken før den forreste, observert fra perrongen.

Det at den stiplede linjen er skrå, betyr at hendelser som er samtidige observert i vognen, ikke er samtidige observert fra perrongen.

# Tachyontelefonparadokset



Anta informasjon kan overføres uendelig raskt. Hendelsen P er at man ringer fra Oslo til Bodø. Hendelsen Q er at signalet kommer frem til Bodø. Det overføres umiddelbart til en tachyonlinje om bord på et tog som kjører fra Oslo til Bodø. Samtidighet på toget er skrålinjen fra Q til R. Signalet kommer frem til Oslo ved hendelsen R som er før hendelsen P da det ble sendt.

# Et legeme med masse $m$ inneholder en energi

$$E = mc^2$$

En sukkerbit med masse et gram inneholder energien

$$E = 0,001\text{kg} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 9 \cdot 10^{13} \text{J} = 2,5 \cdot 10^7 \text{kWh}$$

Energien i en sukkerbit er 25 millioner kilowatt timer.

Dette betyr at hvis man kunne gjøre om all massen i en sukkerbit til energi, ville man kunne dekke energiforbruket til 700 boliger i et år ved å bruke energien til en sukkerbit.

# Einsteins inspirasjon til ekvivalensprinsippet

Einstein fortalte i 1920 at da han satt på patentkontoret i Bern og jobbet med en oversiktsartikkel om relativitetsteorien i 1907, fikk han: ``the happiest thought of my life'':

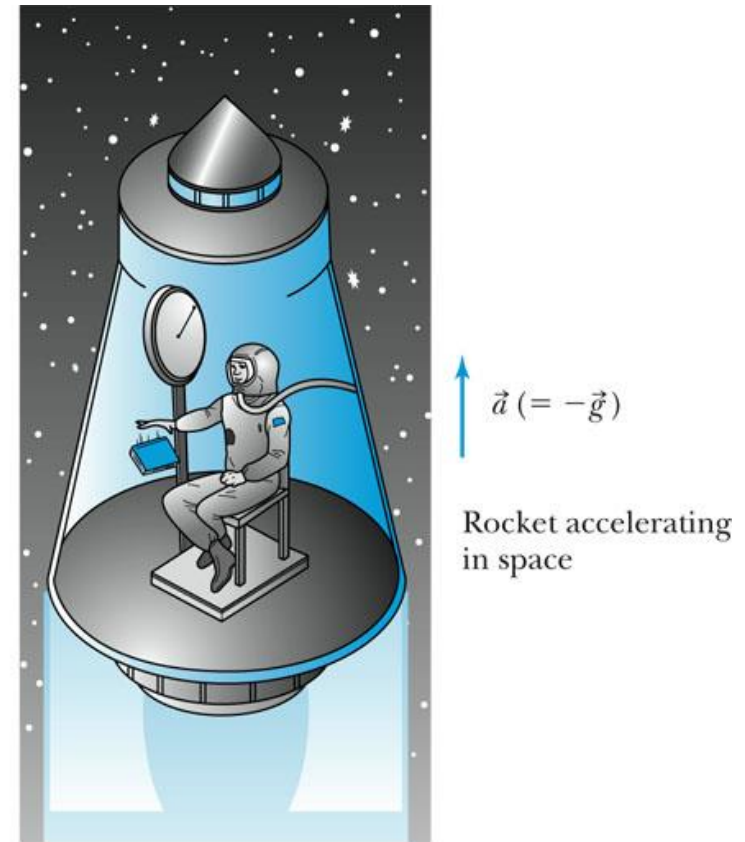
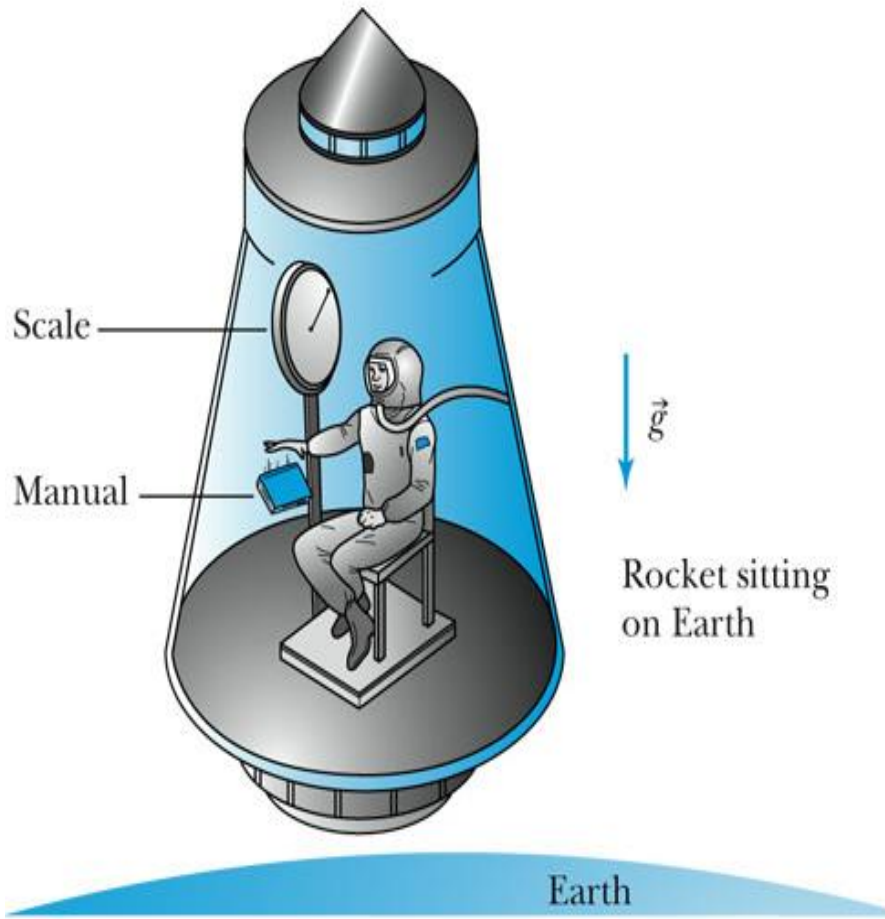
*The gravitational field has only a relative existence...*

Because for an observer freely falling from the roof of a house –  
*at least in his immediate surroundings* –  
there exists no gravitational field.



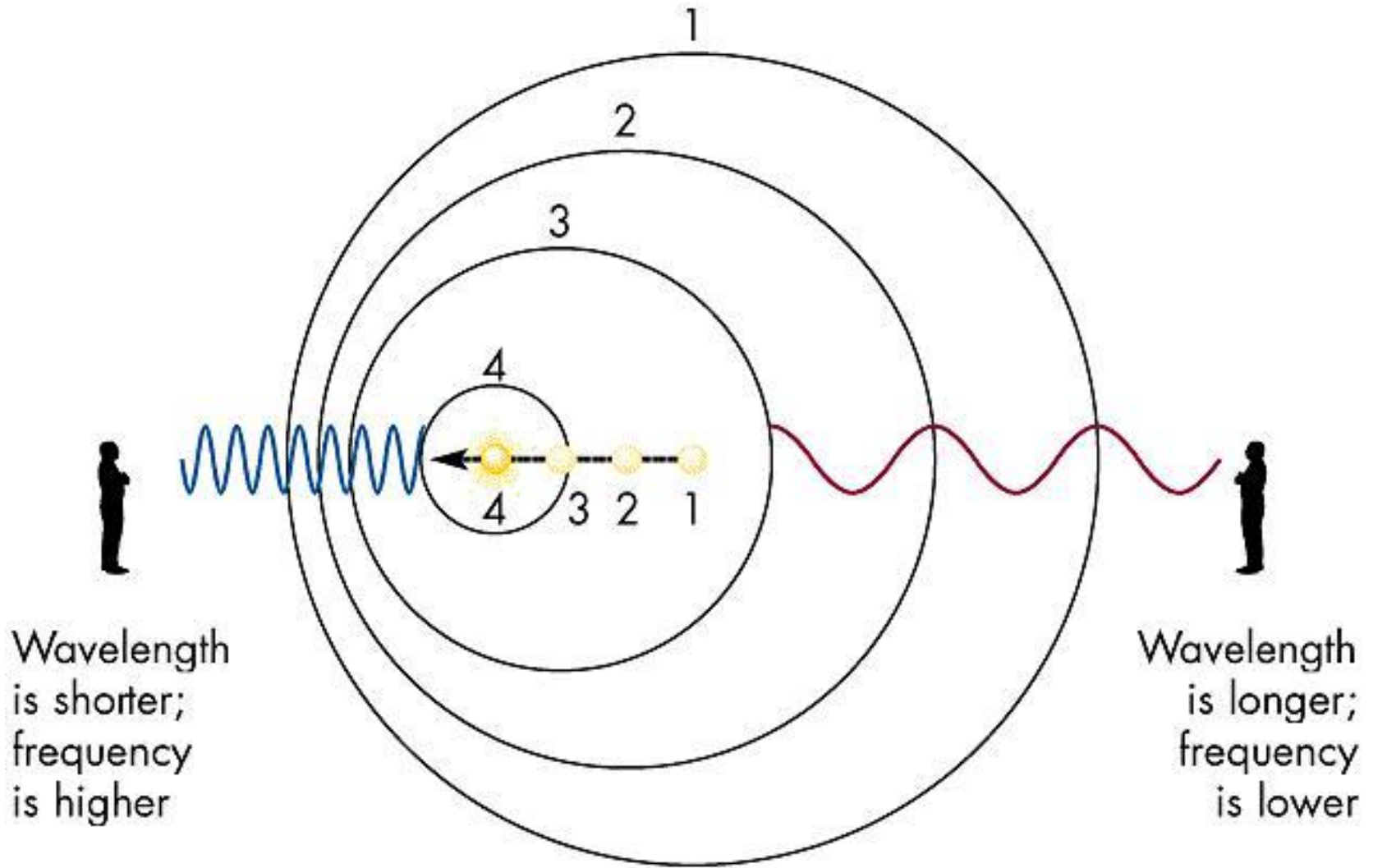


# Ekvivalensprinsippet

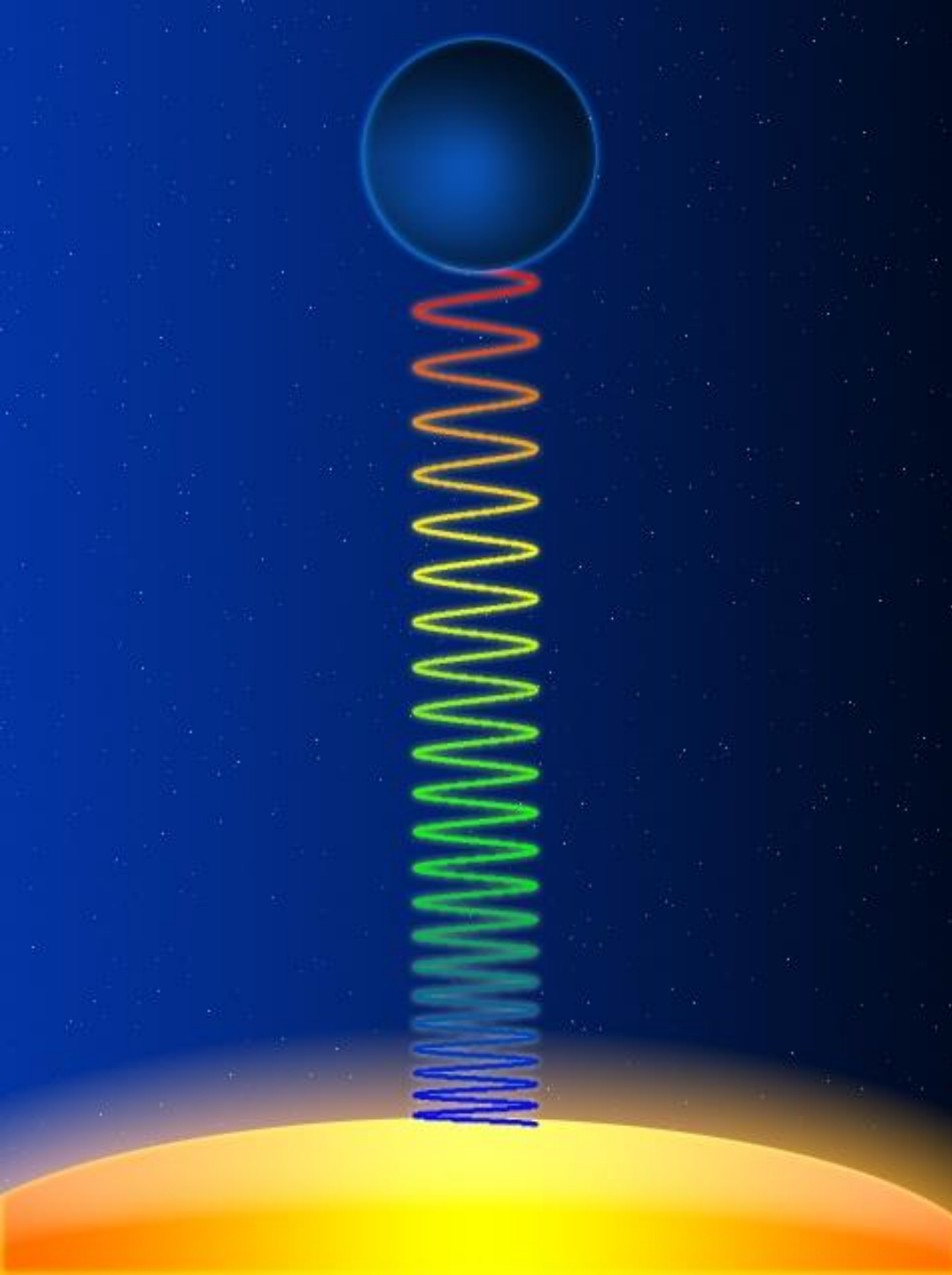


De fysiske virkningene av et "kunstig tyngdefelt" i et akselerert eller roterende referansesystem er ekvivalente med de fysiske virkningene i et permanent tyngdefelt laget av en massefordeling. Boken faller på samme måte i begge tilfellene.

# Dopplereffekten



Numrene på sirklene viser bølgefronter sendt ut fra posisjonene 1, 2, 3, 4



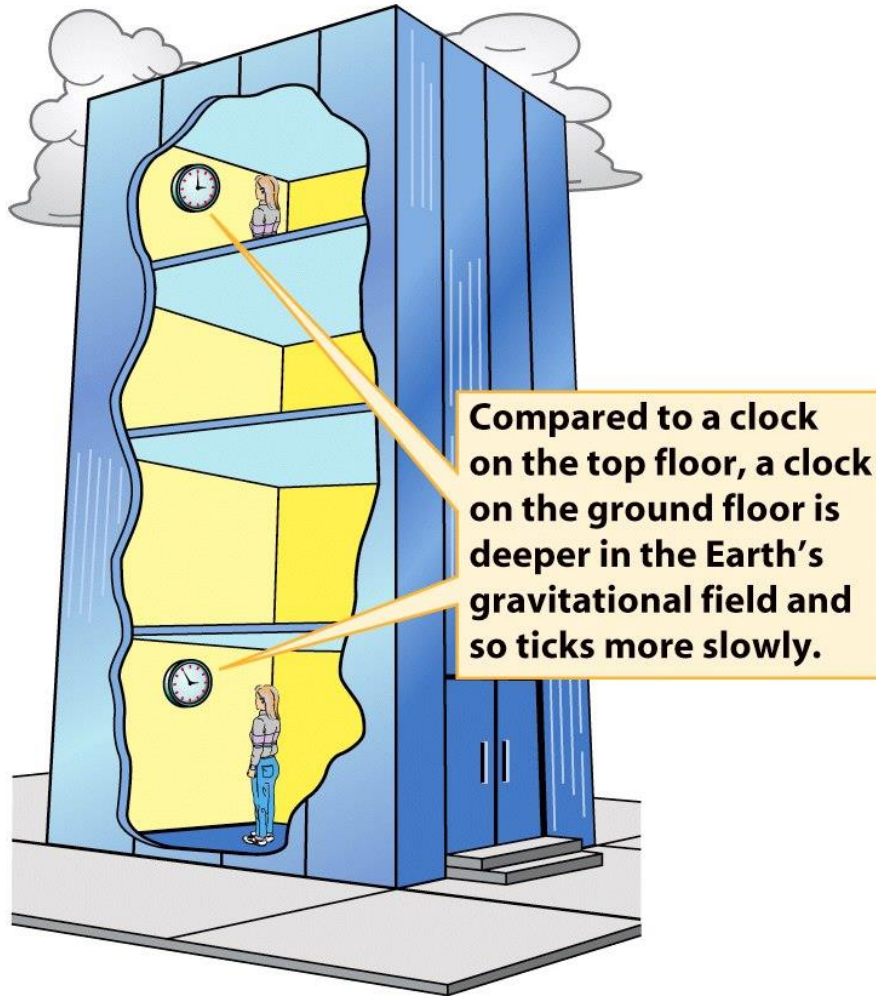
## gravitasjonell frekvensforskyvning

Lys sendes mot en observatør som er i ro i senderøyeblikket, men akselererer oppover. Da får observatøren en hastighet mot senderen når lyset mottas. Dermed blåforskyves lyset på grunn av dopplereffekten.

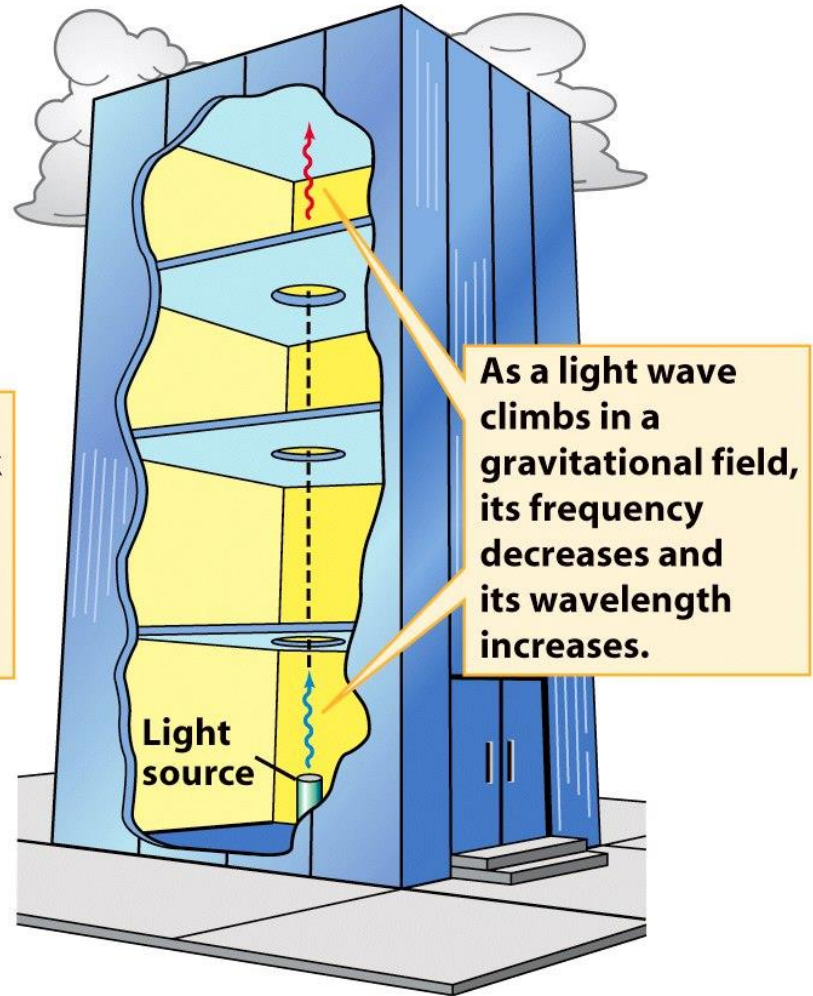
Men ifølge ekvivalensprinsippet kan observatøren oppfatte situasjonen slik at han er i ro i et tyngdefelt, og at lyset beveger seg nedover tyngdefeltet.

Følgelig blåforskyves lys som sendes nedover i et tyngdefelt.

# Gravitasjonell tidforlengelse



**(a)** The gravitational slowing of time



**(b)** The gravitational redshift

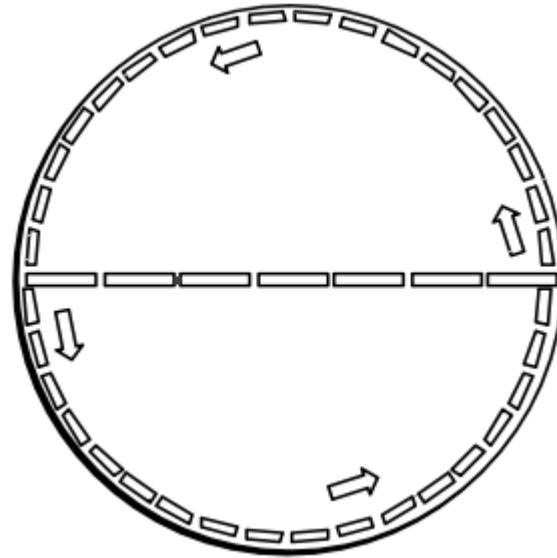
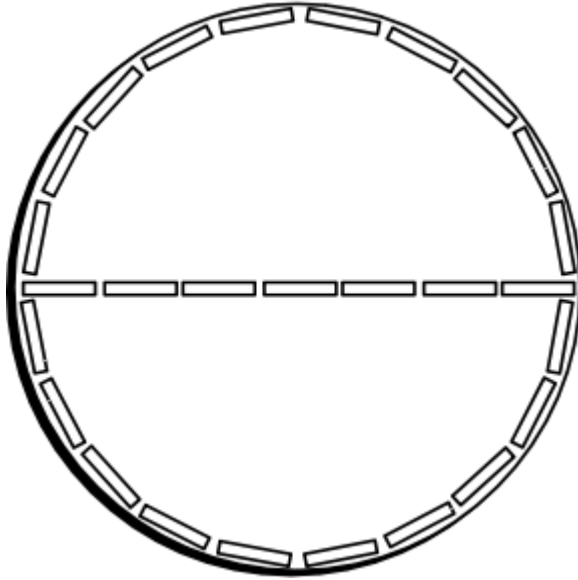
V TUHOU DŮMĚ, U JEDHOUDŮŽCE, V SALONU  
BERTY FARTOVÉ, V LETECH 1911 AŽ 1912  
HRÁVAL NA KLASICKÉ A SETNÁVAL SE ZDE  
S PŘÁTELI, SPISOVATELI MAXEM BRODEM  
A FRANZEM KAFKOU, PROFESOR TEORETICKÉ  
FYZIKY NA PRAŽSKÉ UNIVERZITĚ, TVŮRCE  
TEORIE RELATIVITY, HOSTITEL NOBELOVY CENY.  
**ALBERT EINSTEIN**



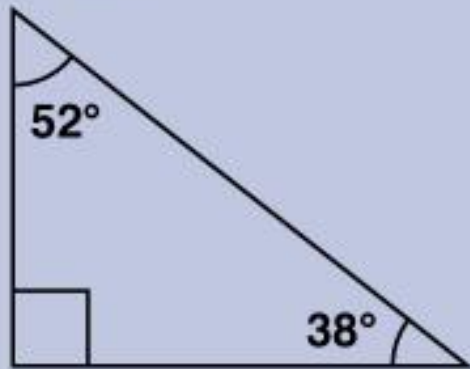
HERE, IN THE SALON OF MRS. BERTA FARTÁ,  
ALBERT EINSTEIN, PROFESSOR  
AT PRAGUE UNIVERSITY IN 1911 TO 1912,  
FOUNDER OF THE THEORY OF RELATIVITY,  
NOBEL PRIZE WINNER, PLAYED THE VIOLIN  
AND MET HIS FRIENDS, FAMOUS WRITERS  
MAX BROD AND FRANZ KAFKA.

I perioden 1911-12 var Einstein professor ved Universitetet i Praha.

# Romlig geometri på en roterende skive

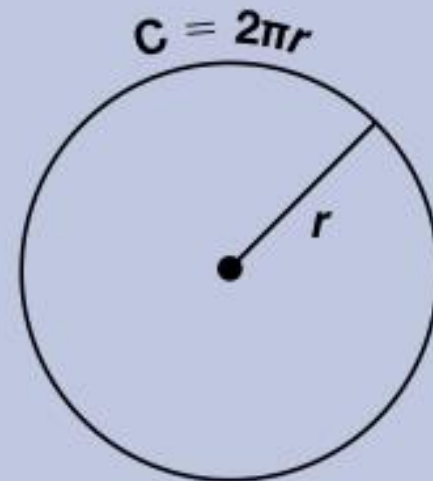
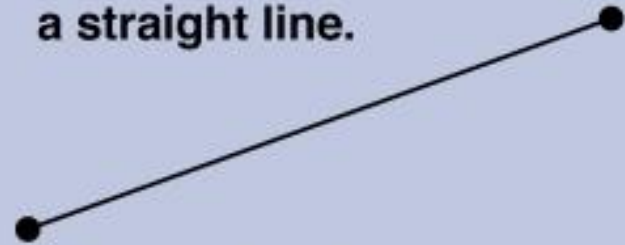


The sum of the angles in a triangle is equal to  $180^\circ$ .



Lines that are parallel somewhere are parallel everywhere.

The shortest distance between two points is a straight line.



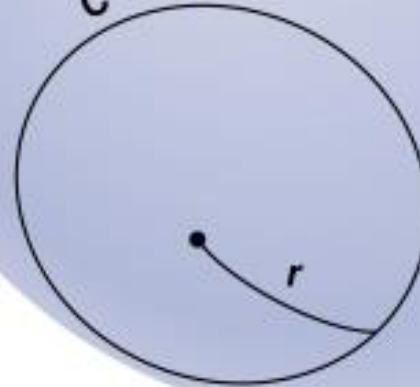
**“Lines” parallel at one place eventually cross.**

**The shortest distance is a curve that is a segment of a great circle.**

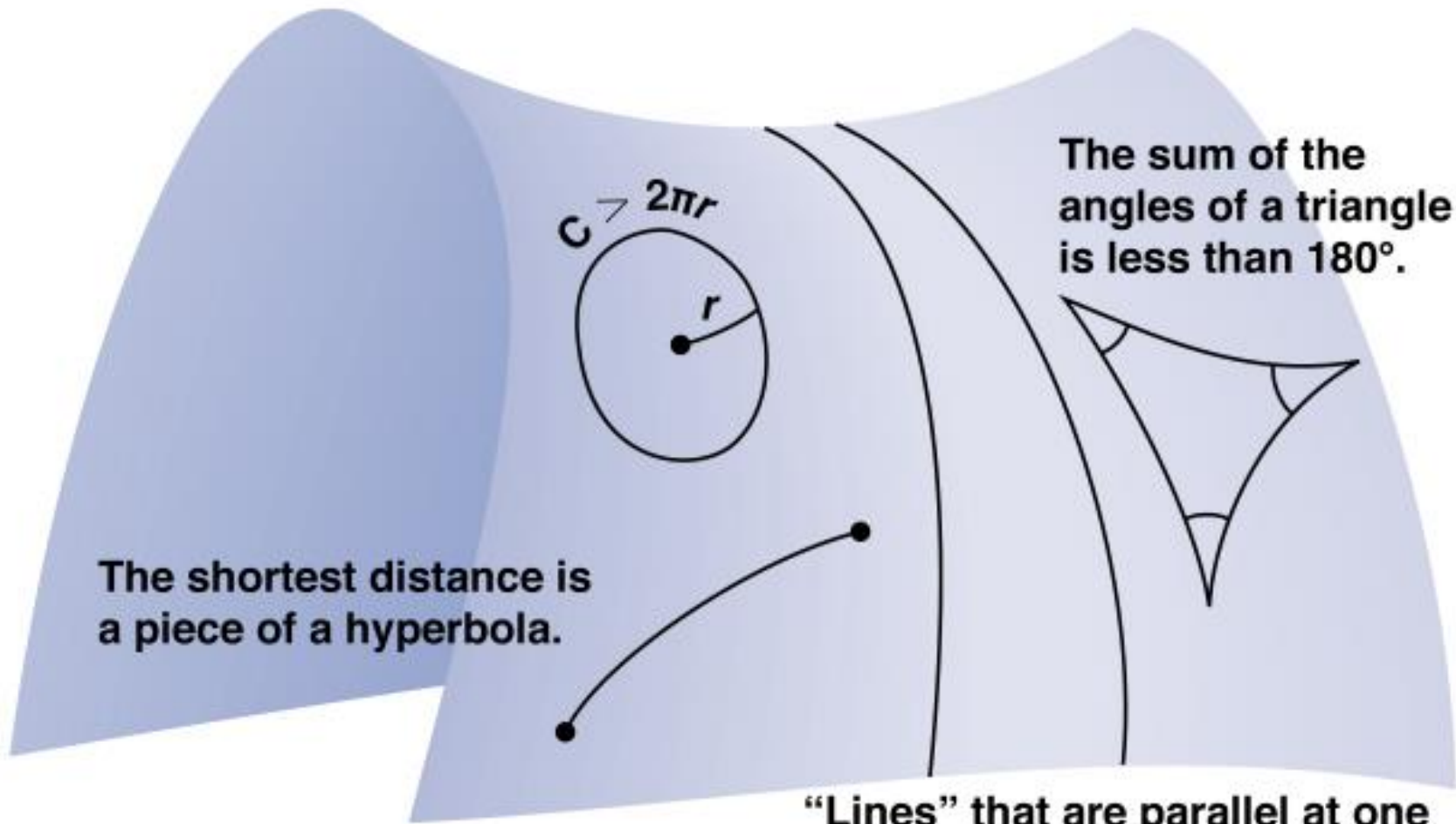


**The sum of the angles of a triangle is greater than 180°.**

$$C < 2\pi r$$







The shortest distance is a piece of a hyperbola.

The sum of the angles of a triangle is less than 180°.

“Lines” that are parallel at one place eventually diverge.



Marcel Grossman og Albert Einstein 1912.

# BERLINER GEDENKTAFFEL

In diesem Haus arbeitete von April bis November 1914

**ALBERT EINSTEIN**

14.3.1879 – 18.4.1955

Physiker

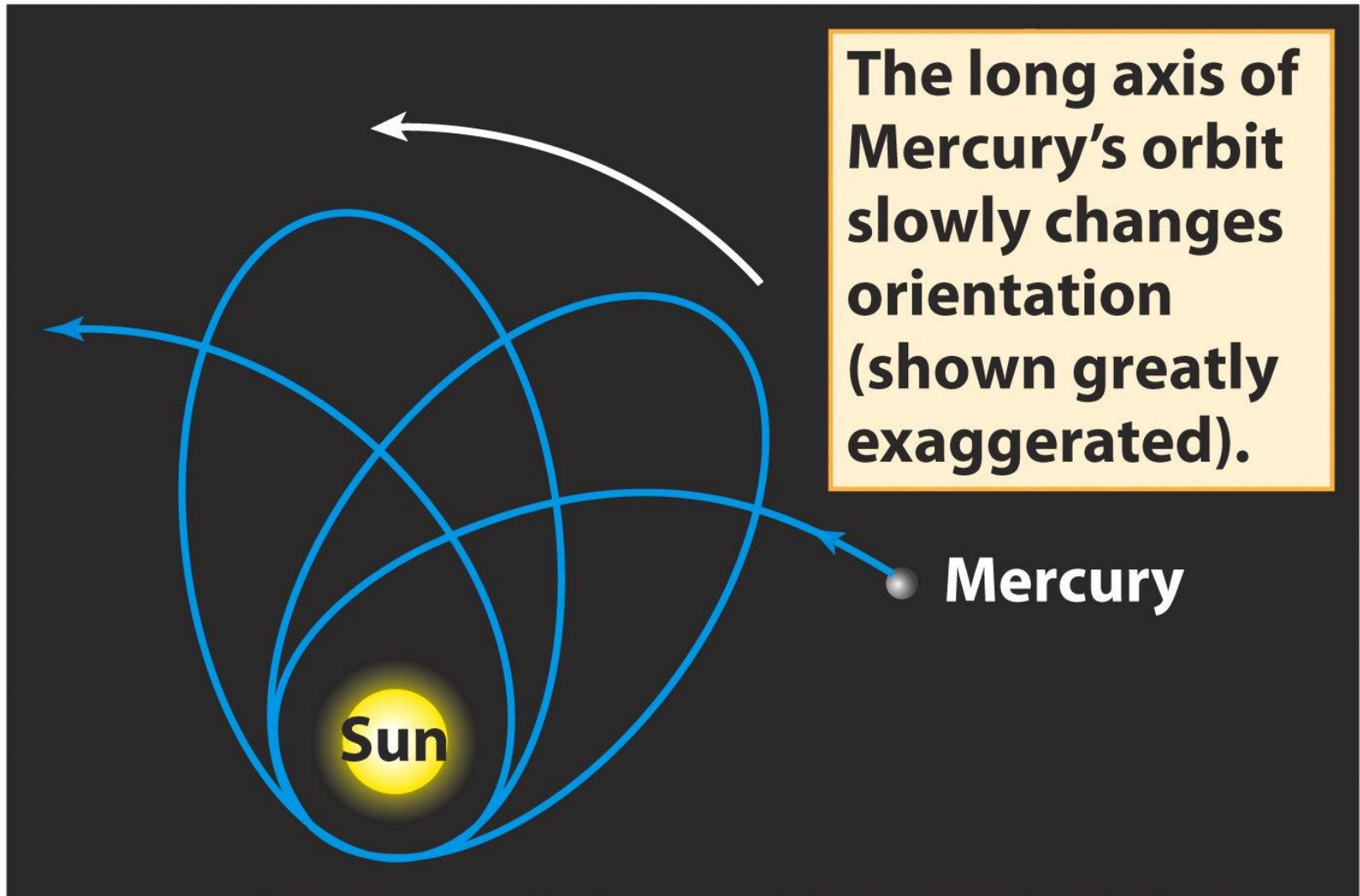
an der Entwicklung seiner »Relativitätstheorie«  
1921 erhielt er den Nobelpreis für Physik

Nach der Machtübernahme durch die Nationalsozialisten  
kehrte Albert Einstein von einer Reise in die USA nicht mehr  
nach Deutschland zurück



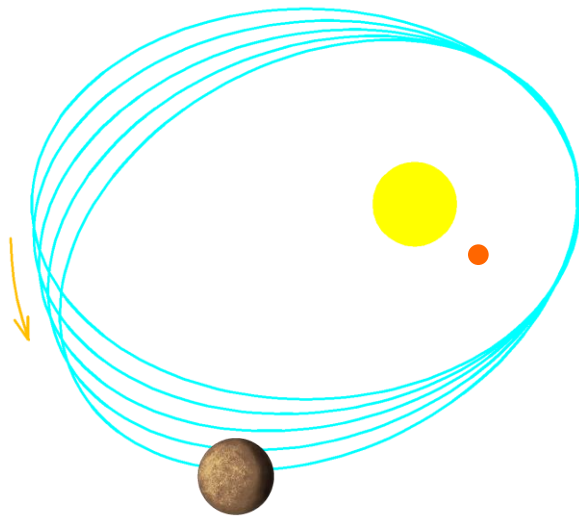
Gefördert durch die GASAG Berliner Gaswerke Aktiengesellschaft

# Merkurs periheljespresesjon



# Merkurs perihelionpresesjon

Le Verrier, og flere etter ham, beregnet gravitasjonsvirkningene fra de andre planetene i solsystemet på Merkurs bevegelse rundt Sola.



Dermed begynte man å lete etter en planet, Vulcan, som kunne forklare de ekstra 42'' per år for Merkurs perihelionpresesjon!

I 1859 fant Le Verrier en uoverensstemmelse på 1/10,000 av en grad per år!

## Gravitasjonsvirkningene fra de andre planete på Merkurs perihelionpresesjon

Venus	280.6''
Jorda	83.6''
Mars	2.6''
Jupiter	152.6''
Saturn	7.2''
Uranus	0.1''
Totalt per 100 år:	527''
Observervert:	527''+42''

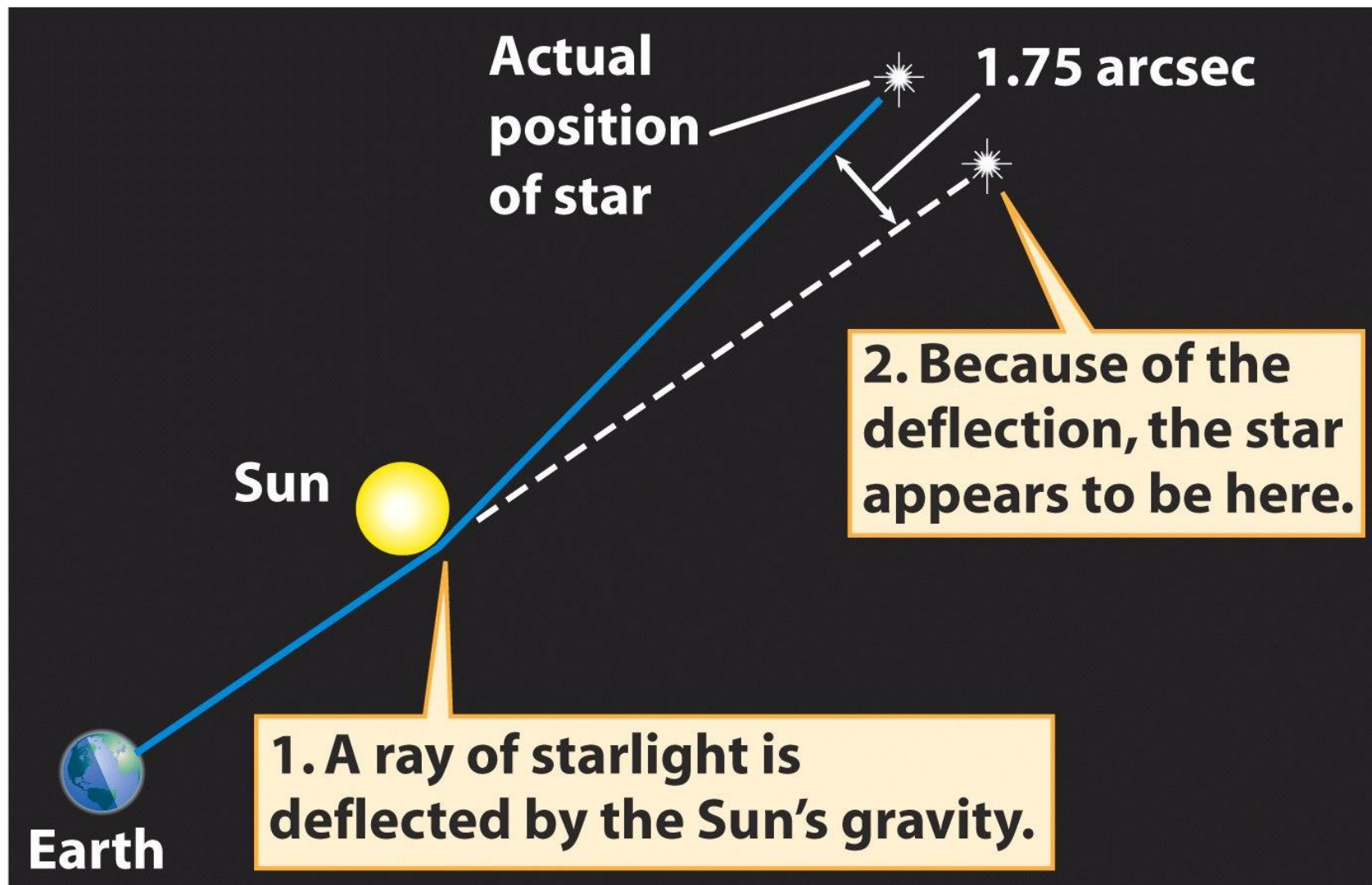
L'immense difficulté de Mercure à présence aux anciens astronomes, venait surtout de ce que cette planète, plongée durant le jour dans les rayons du Soleil, ne pouvait être vue que le soir ou le matin dans les vapeurs de l'horizon; en sorte que l'invention et le perfectionnement des lunettes, il était impossible de mesurer ses elongations. Copernic, empêché par les brouillards de la longue durée des crépuscules en été, ne put jamais parvenir à

, II, III et IV.

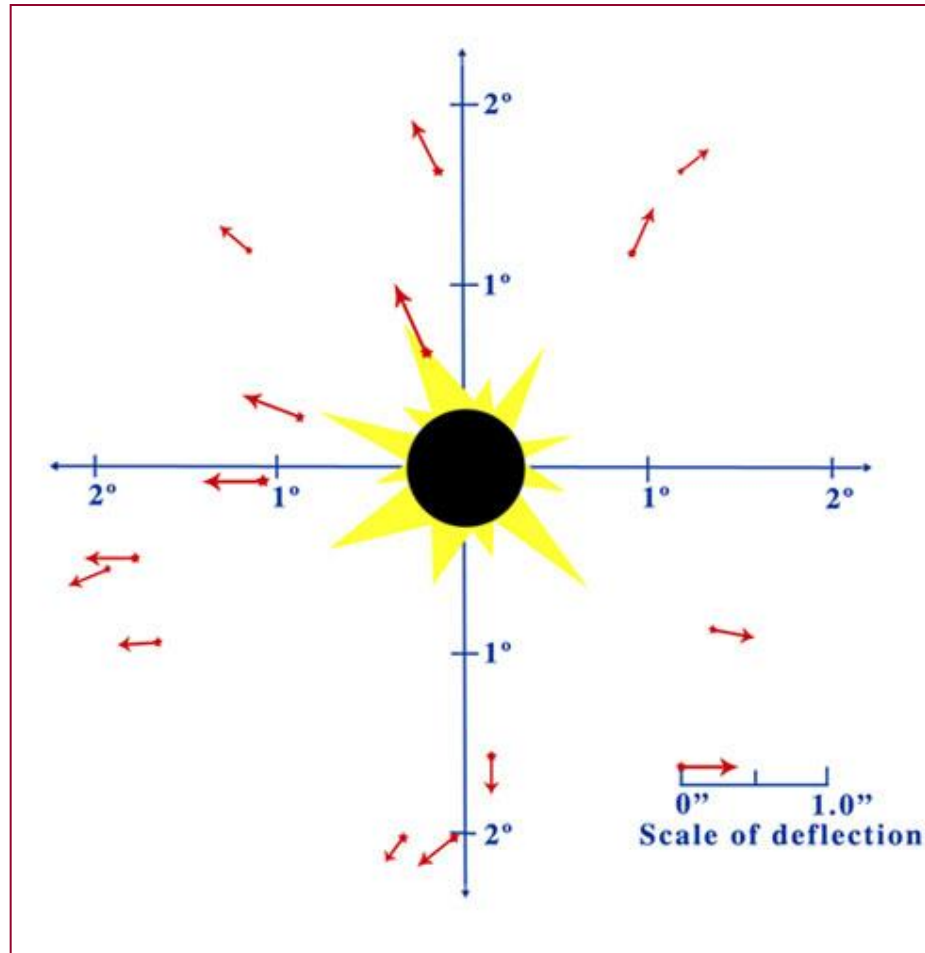
# Jakten på Vulcan

- Vulcan ble observert mange ganger, men observasjonene ble aldri bekreftet.
- “Skjult materie” nær Sola ble foreslått som en løsning.
- En modifikasjon av Newtons gravitasjonslov var et annet forslag:  $1/r^{2.00000016}$
- Problemet var fortsatt uløst ved inngangen til det 20. århundret.

# Gravitasjonell lysavbøyning



På grunn av lysavbøyningen ser det ut som om stjernene er lengre vekk fra sola når lysstrålene passerer nær sola, enn på en annen årstid når de kan fotograferes om natten. Observasjonene stemte med forutsigelsen fra den generelle relativitetsteorien.

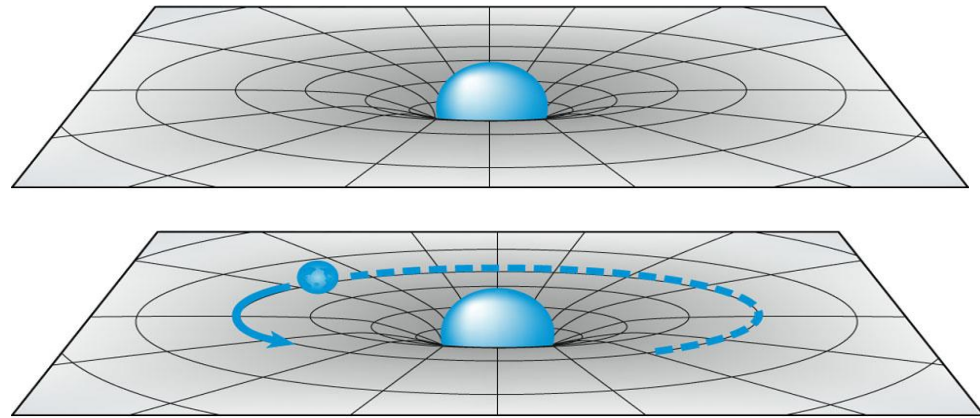




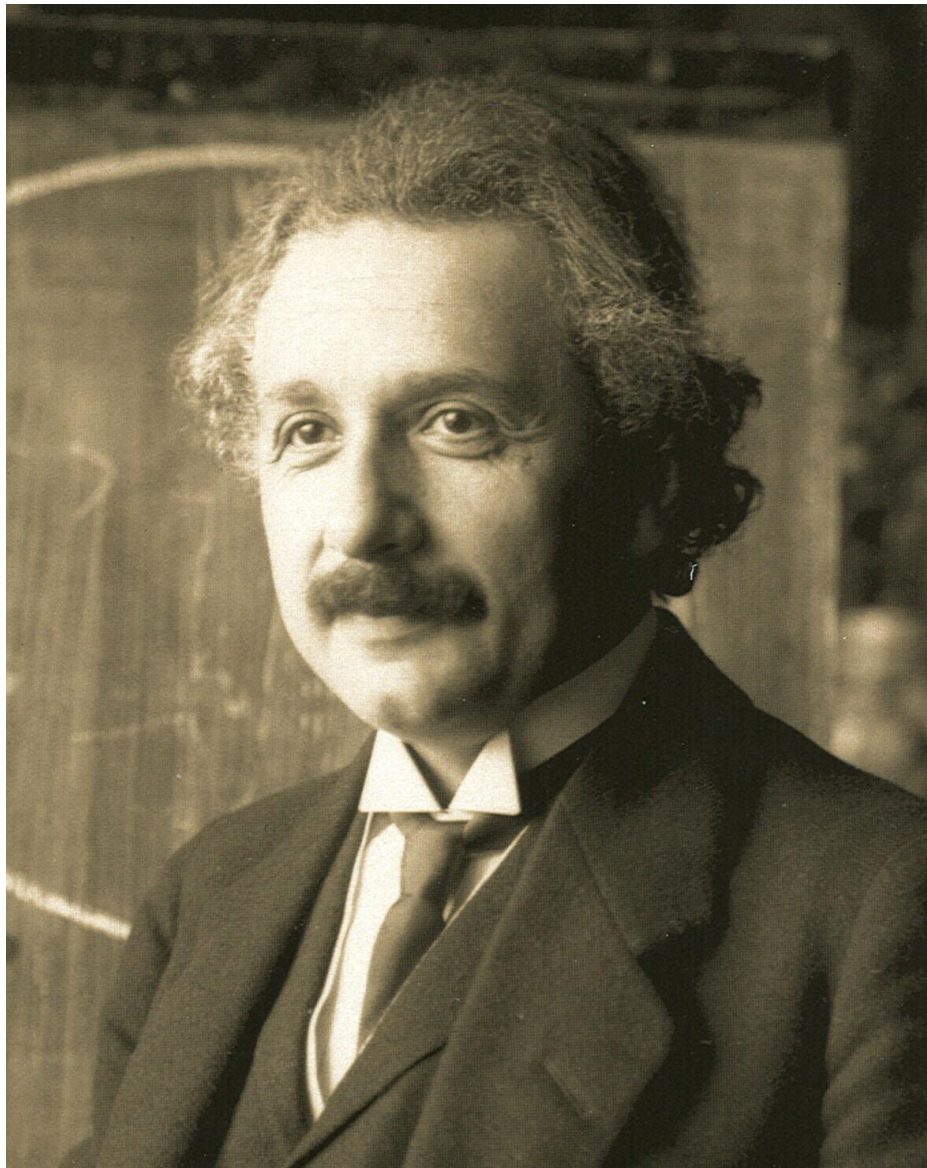
# Relativitetsteoriens dynamikk kan summeres på følgende måte

*Masse forteller tidrommet hvordan det skal krumme.*

*Tidrommet forteller massen hvordan den skal bevege seg.*



John Archibald Wheeler (1911 – 2008)

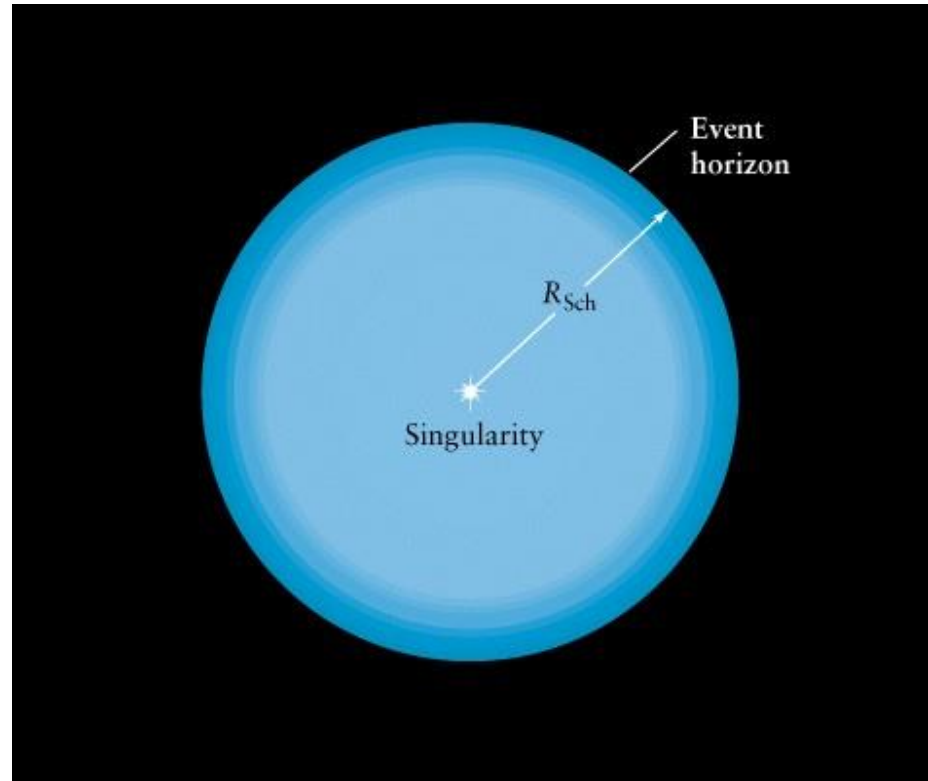


Einstein fikk nobelprisen i fysikk i 1921 for sin teori for den fotoelektriske effekten

Ikke-roterende  
(Schwarzschild)

**svart hull:**

Hendelser innenfor  
*Schwarzschild- radien*  $R_S$   
kan ikke observeres av  
en observatør utenfor.

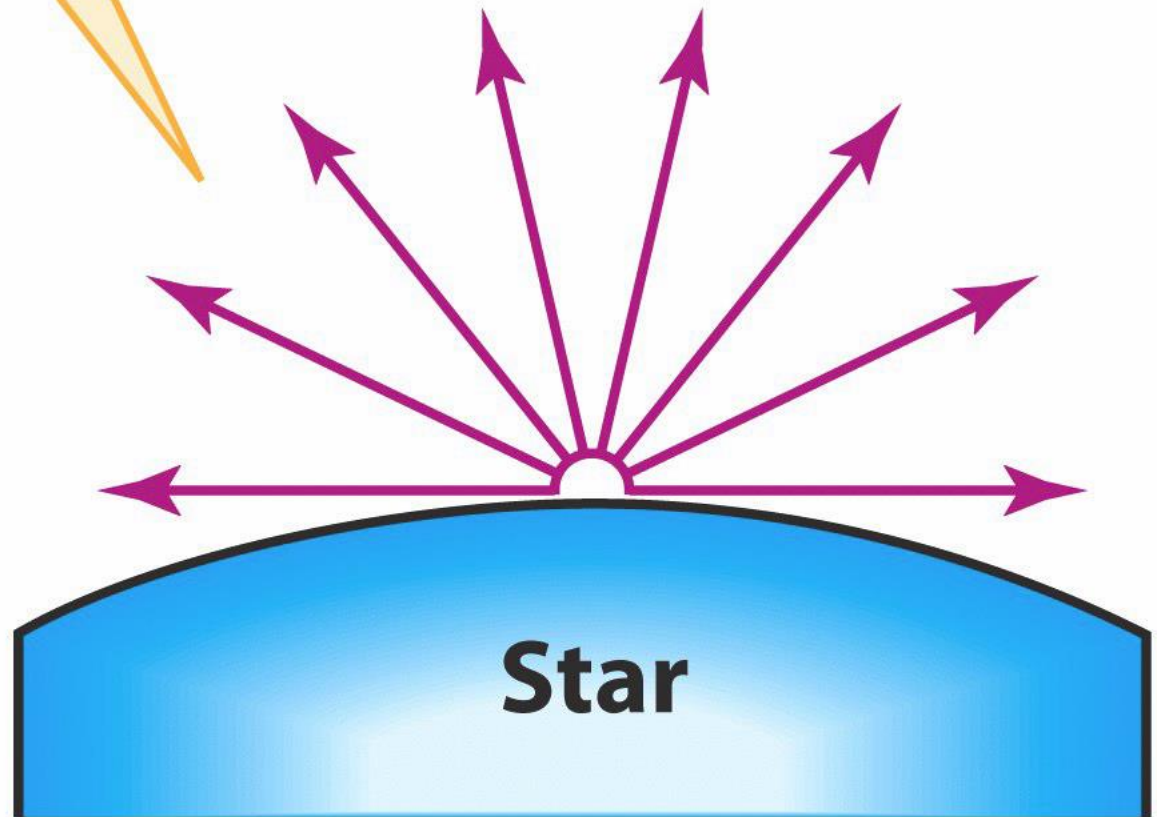


$$R_s = \frac{2GM}{c^2} \quad \text{eller} \quad R_s = 3 \left( \frac{M}{M_{Sol}} \right) km$$

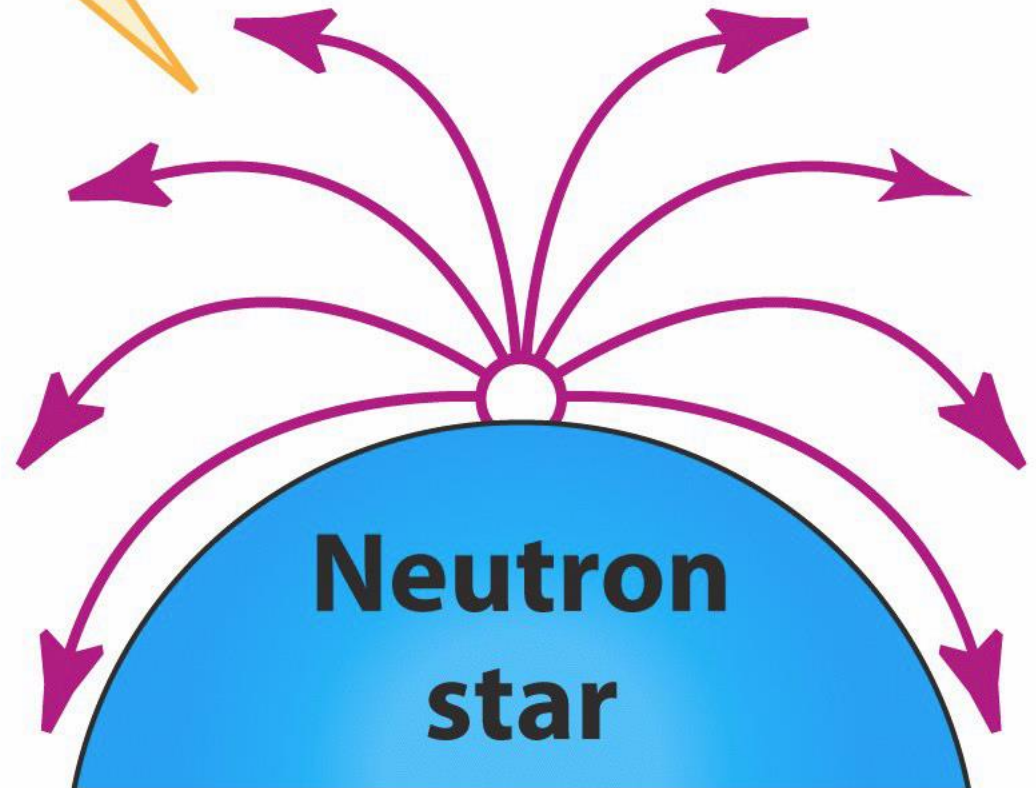
*Et hvert legeme har en Schwarzschild radius.*

Men bare hvis massen befinner seg innenfor Schwarzschildradien, gir den opphav til et svart hull.

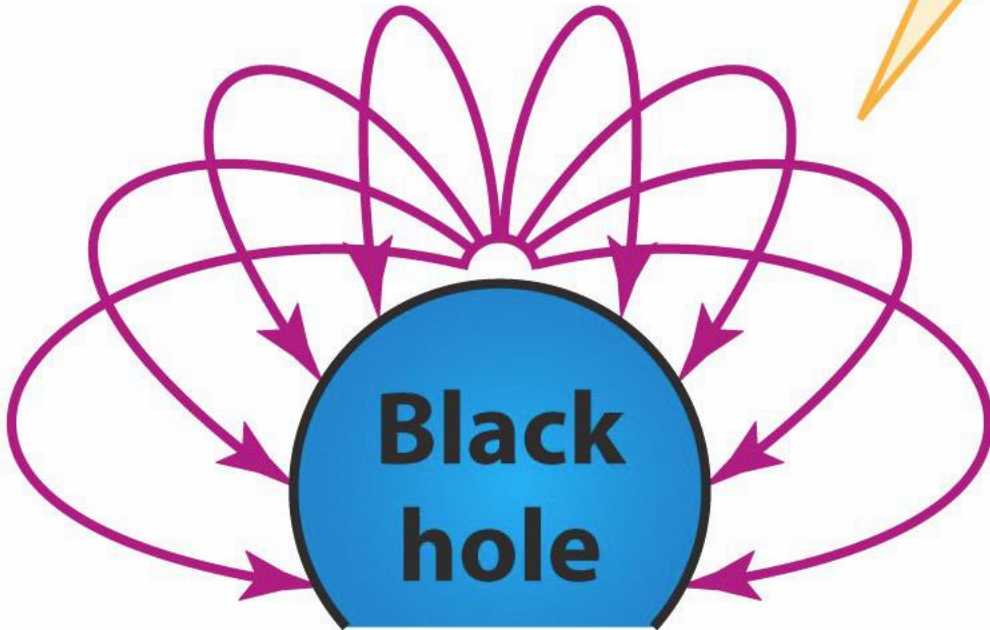
**1. A supergiant star has relatively weak gravity, so emitted photons travel in essentially straight lines.**



**3. Continued collapse intensifies the surface gravity, and so photons follow paths more sharply curved.**



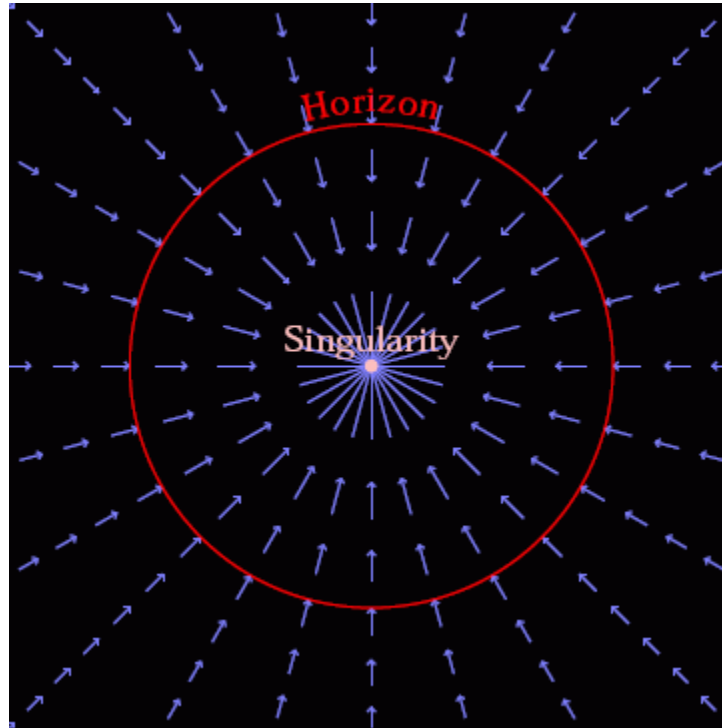
**4. When the star shrinks past a critical size, it becomes a black hole: Photons follow paths that curve back into the black hole so no light escapes.**



# A river model of space

Simen Braeck and Øyvind Grøn

inspirert av en artikkel av Andrew J. S. Hamilton and Jason P. Lisle



Romelven renner inn i et svart hull.

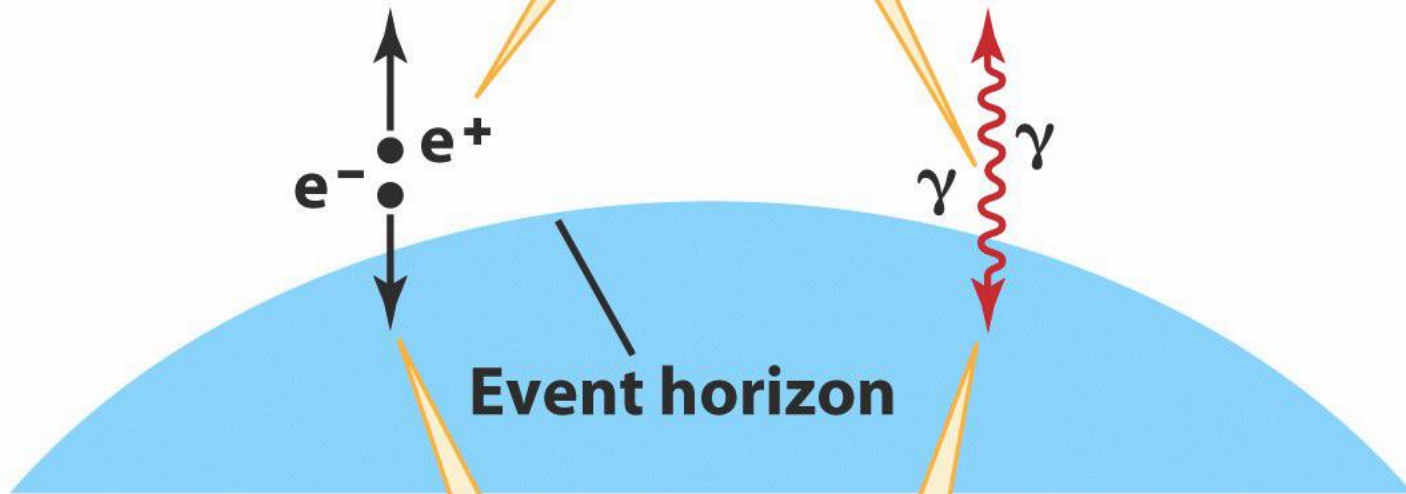
Ved horisonten renner romelven med lyshastigheten.

Innenfor horisonten renner romelven med overlyshastighet.

Derfor kan ikke noe komme ut fra et svart hull.

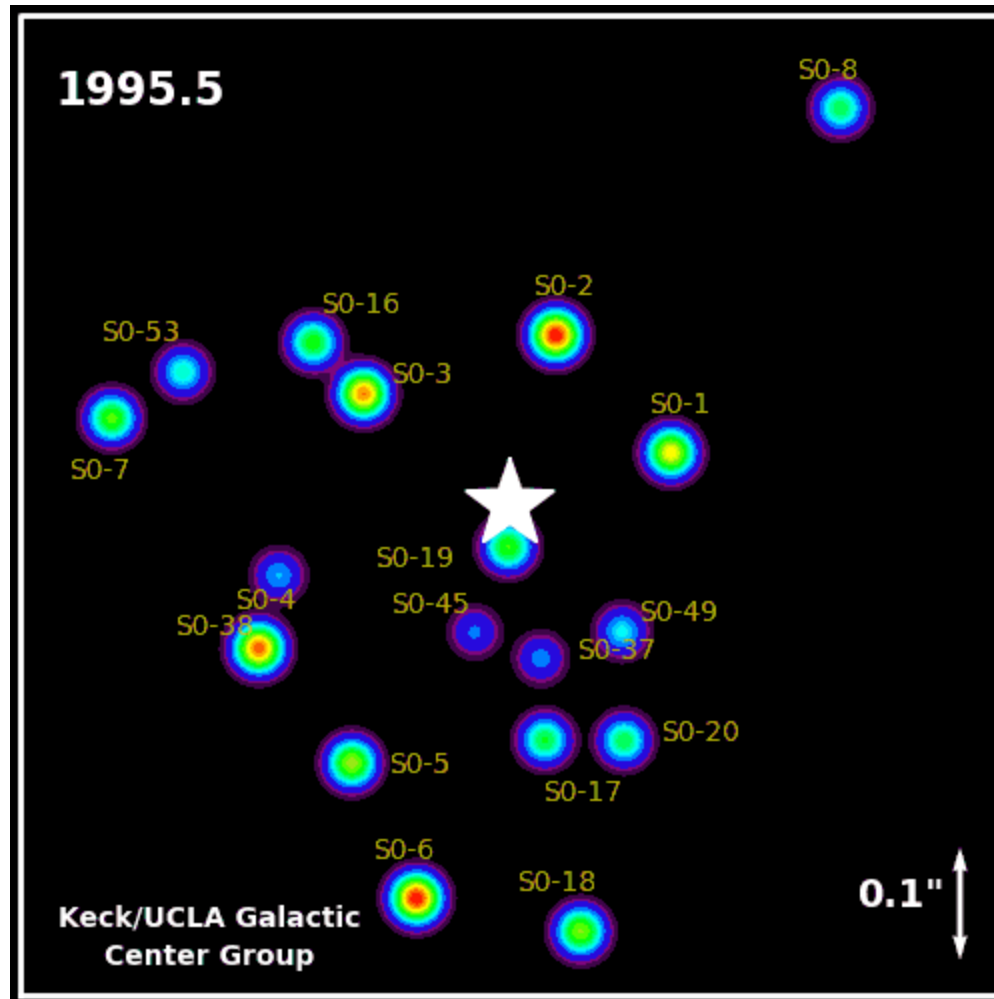
**1. Pairs of virtual particles spontaneously appear and annihilate everywhere in the universe.**

**2. If a pair appears just outside a black hole's event horizon, tidal forces can pull the pair apart, preventing them from annihilating each other.**

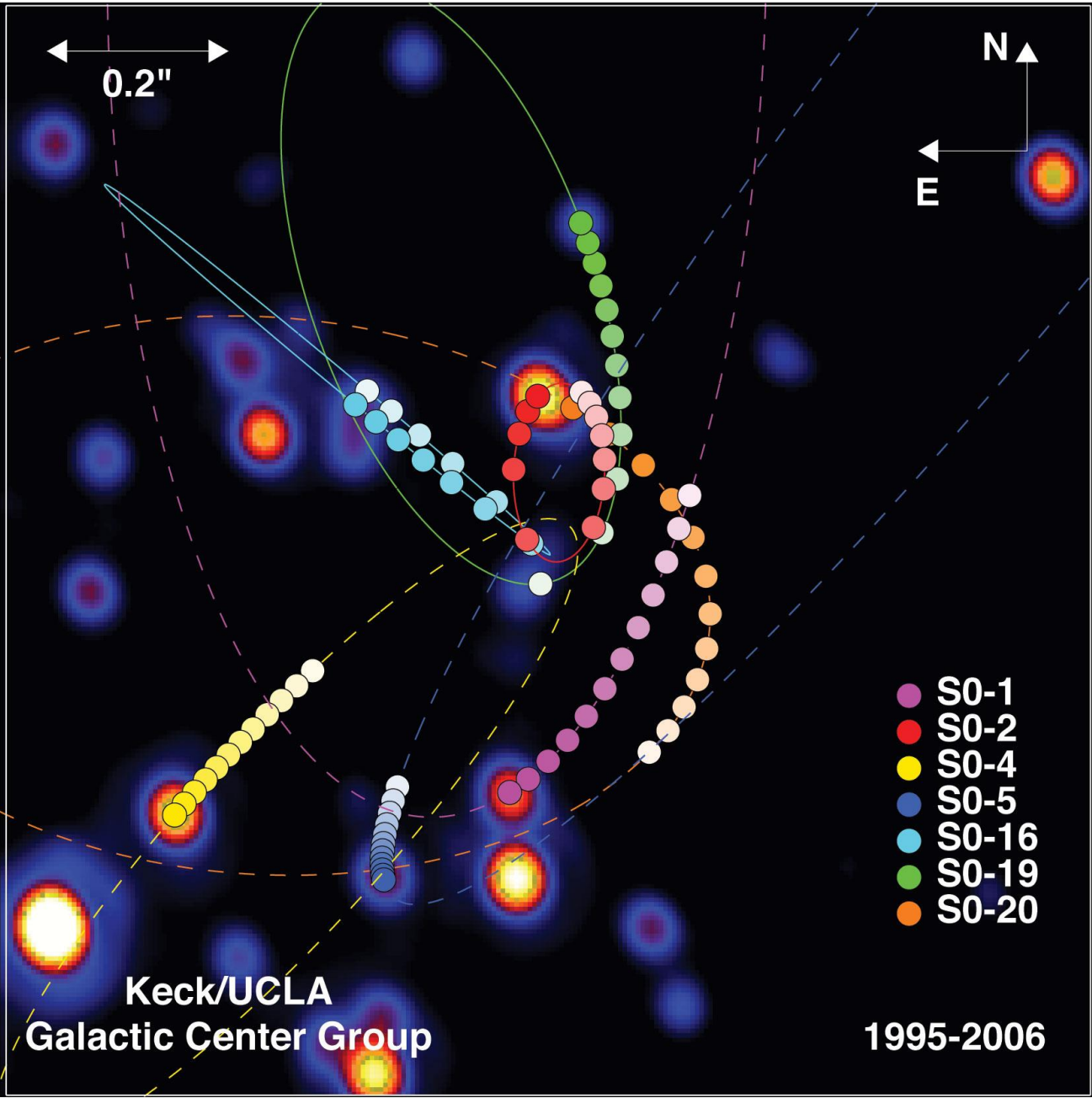


**3. If one member of the pair crosses the event horizon, the other can escape into space, carrying energy away from the black hole.**



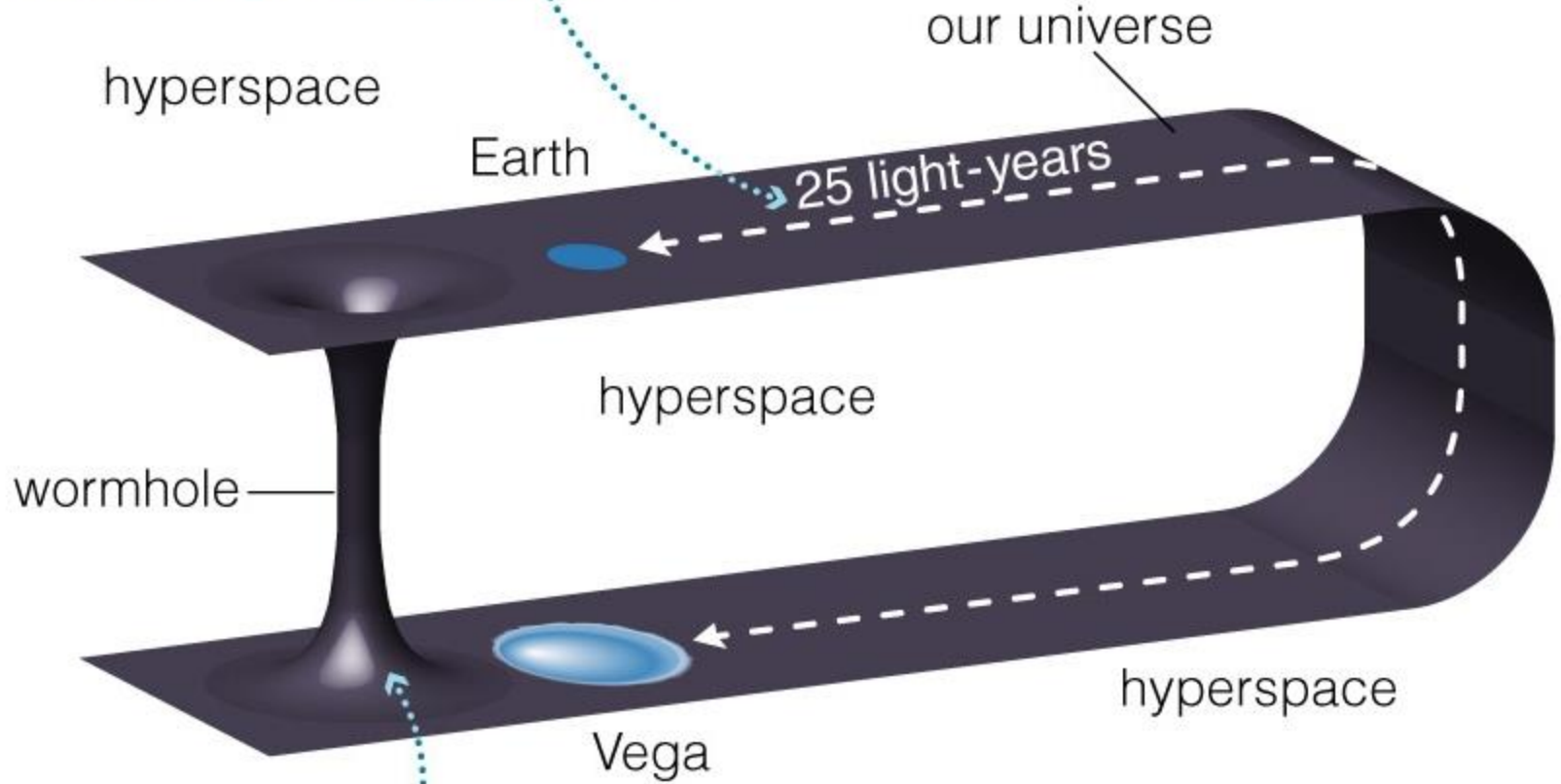


Observerte bevegelse av stjerner ved Melkeveiens sentrum. Bevegelsene viser at det er et supermassivt svart hull med masse på 4 millioner solmasser i sentrum av Melkeveien.

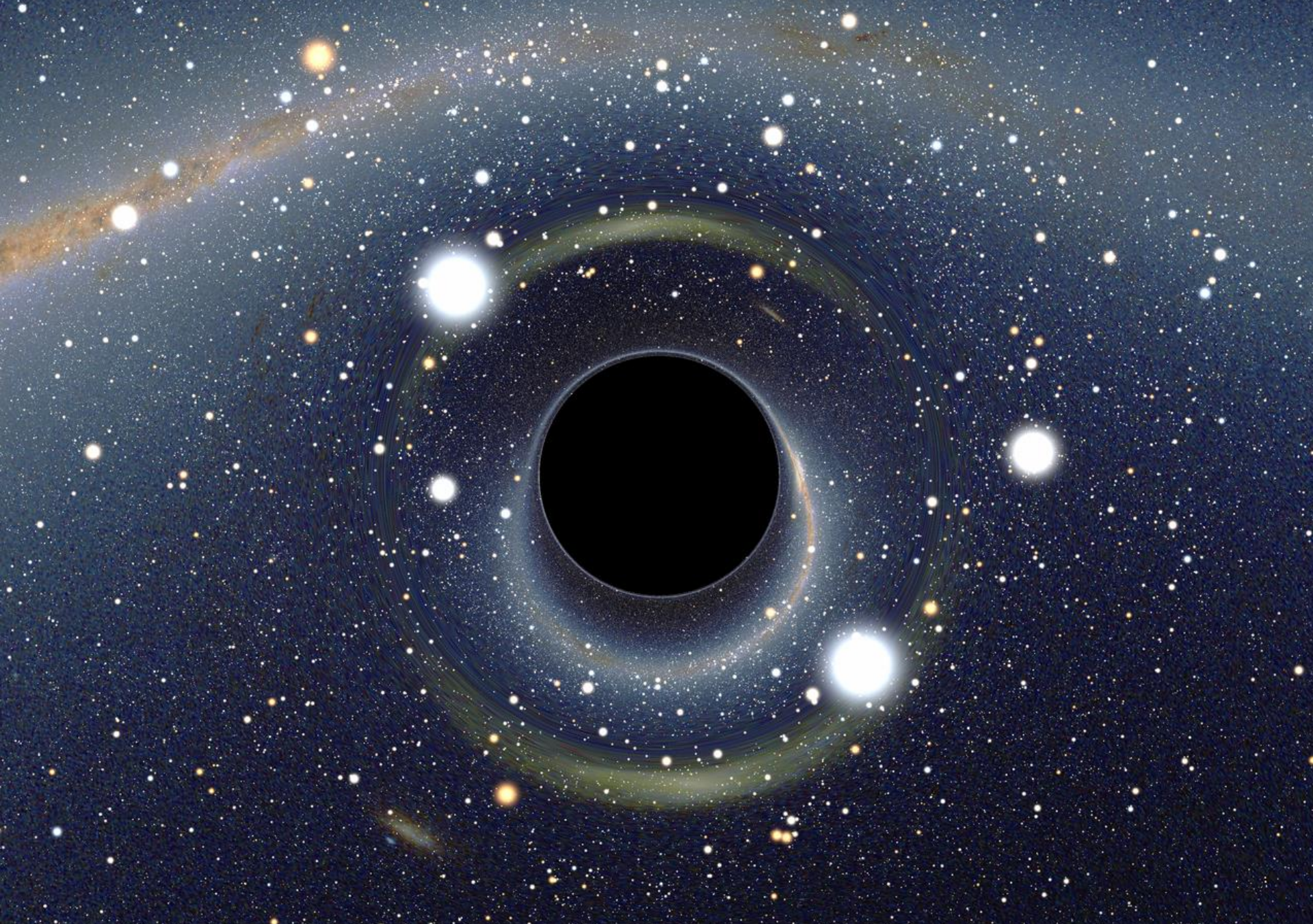


I sentrum av Melkeveien, i posisjonen til objektet Sagittarius A, er det et supermassivt svart hull. Observasjoner av bevegelsene til stjernene nær sentrum av Melkeveien har vist at det har en masse på omtrent 4 millioner solmasser.

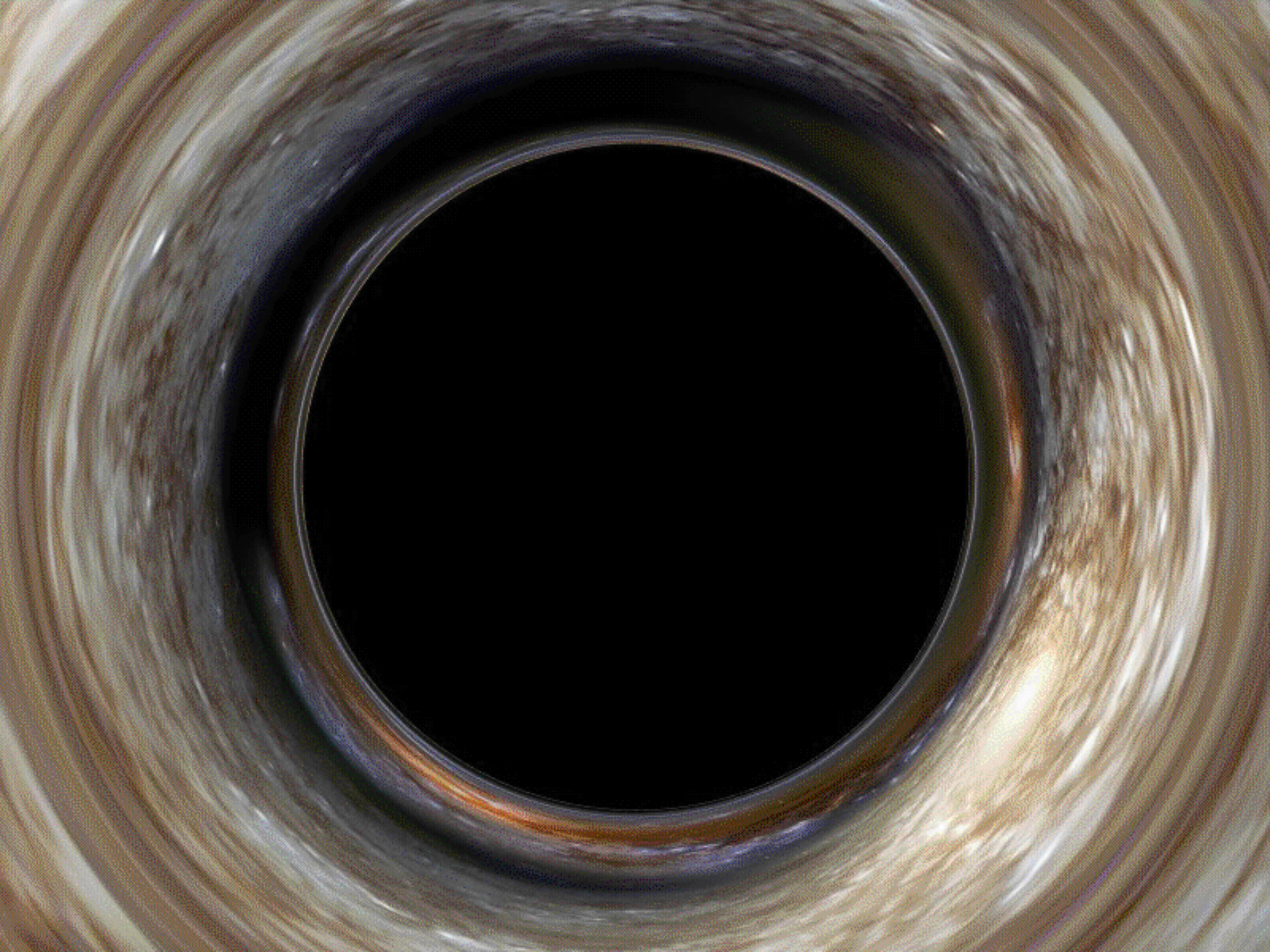
*The distance through our universe between Earth and Vega is 25 light-years . . .*

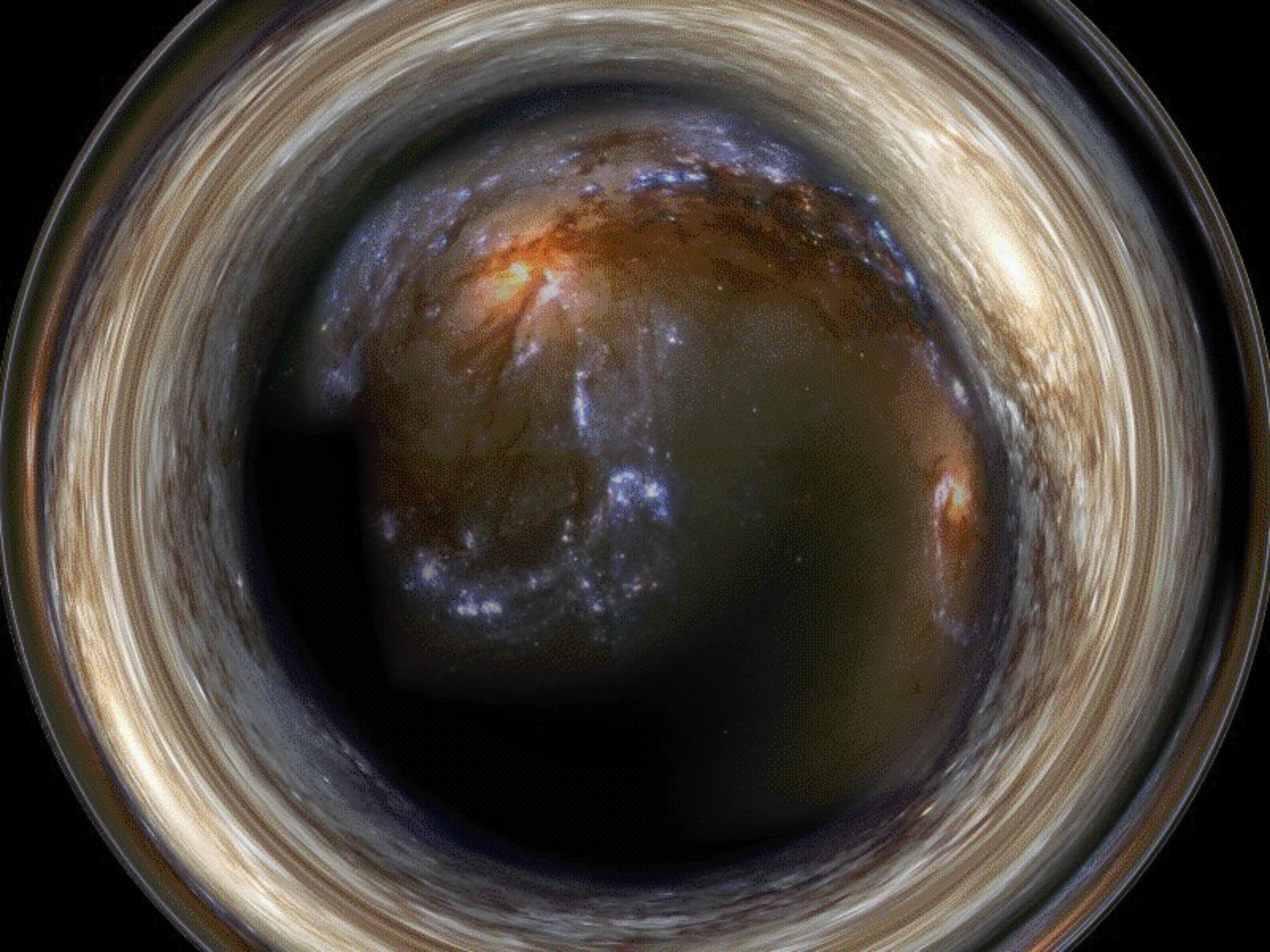


*. . . but the distance would be much shorter if we could travel through a wormhole.*



Computergenerert illustrasjon av svart hull







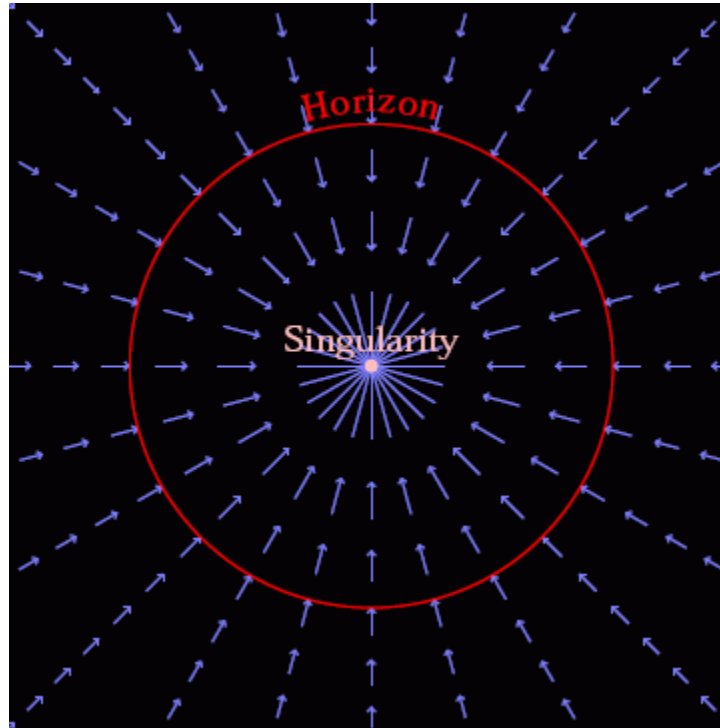
Sidewalks  
of New York

AS SERIOUS  
AS YOU CAN  
GET

# A river model of space

Simen Braeck and Øyvind Grøn

inspirert av en artikkel av Andrew J. S. Hamilton and Jason P. Lisle



Romelven renner inn i et svart hull.

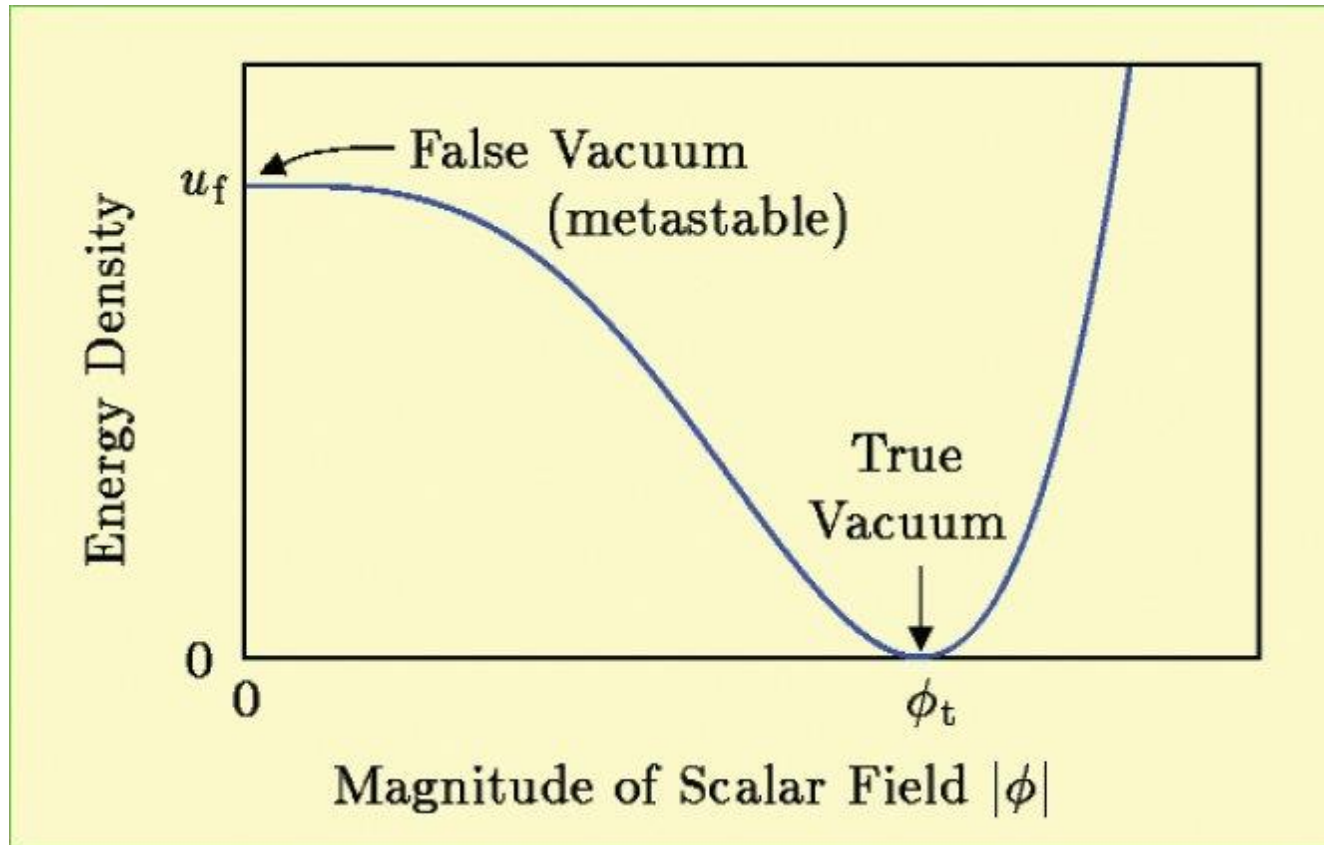
Ved horisonten renner romelven med lyshastigheten.

Innenfor horisonten renner romelven med overlyshastighet.

Derfor kan ikke noe komme ut fra et svart hull.

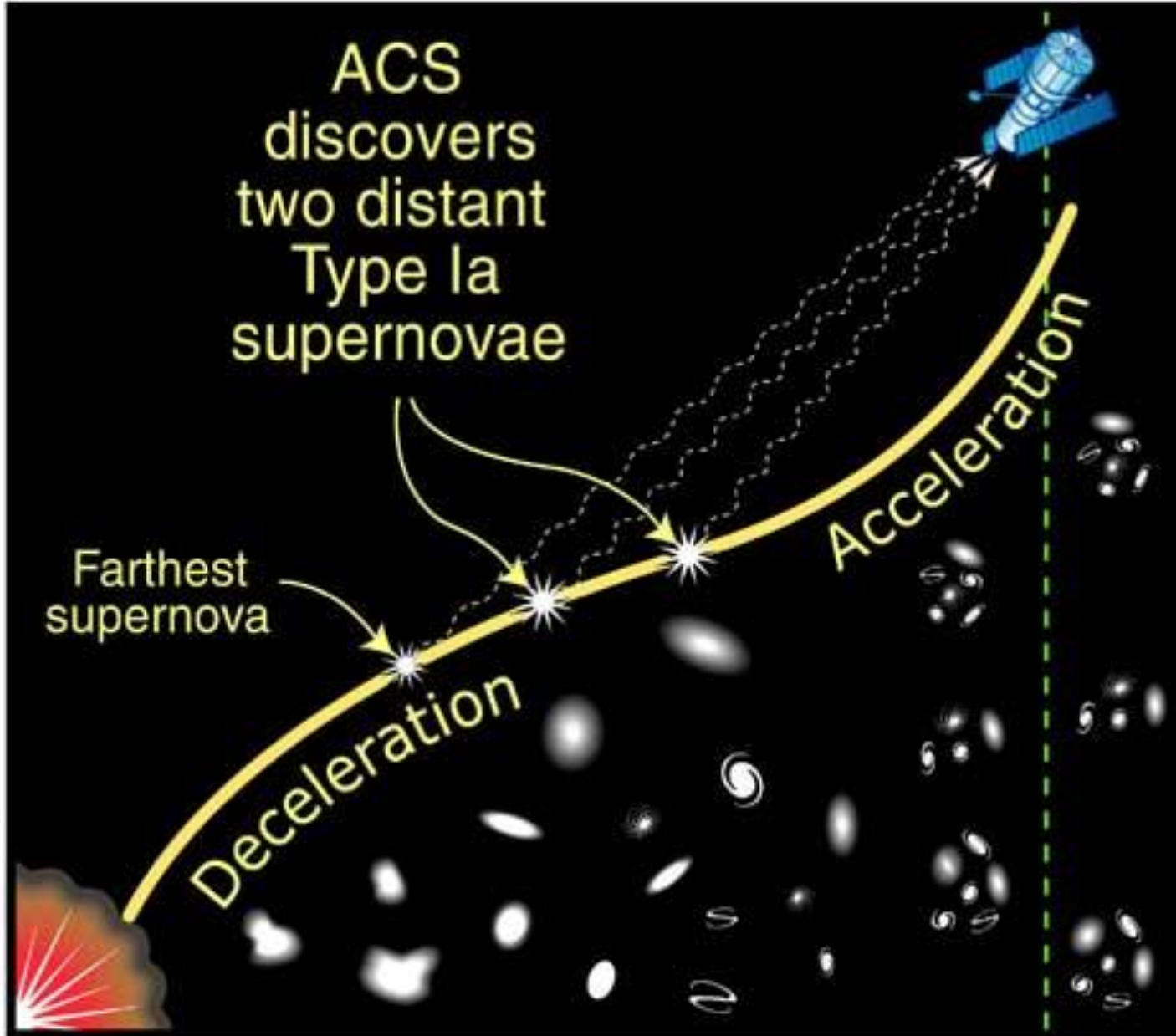


Universet kan ha oppstått som en kvantefluktuasjon allerede ved Plancktiden  $t_p=10^{-43}s$  dominert av mørk energi som forårsaket frastøtende gravitasjon og en eksplosiv ekspansjon. Denne fasen varte i bare  $10^{-33}s$  og er muligens selve Big Bang eksplosjonen.



Vakuumentensitet beskrives ved hjelp av et skalarfelt. Vakuum kan eksistere i ulike tilstander kalt falskt og ekte vakuum.

Expansion of universe



ACS  
discovers  
two distant  
Type Ia  
supernovae

Farthest  
supernova

Acceleration

Deceleration

Big  
Bang

10 billion  
years  
ago

5 billion  
years  
ago

Today



Det mest uforståelige med universet er at det er forståelig

*"The most beautiful experience we can have is the mysterious. It is the fundamental emotion that stands at the cradle of true art and true science."*



*Einstein døde våren 1955.*

*Men hans relativitetsteori lever videre.*

*Den kunne ha vært falsifisert over et dusin ganger,*

*Men så langt har naturen oppført seg i overensstemmelse med teorien.*