



Hvad er tid?

Tidens rolle i fysikken

Mogens Dam
Niels Bohr Institutet
dam@nbi.dk
www.nbi.dk/~dam

Folkeuniversitetet,
Århus, Kolding, Odense
maj, 2017



Time is nature's way of preventing everything happening at once

John Wheeler

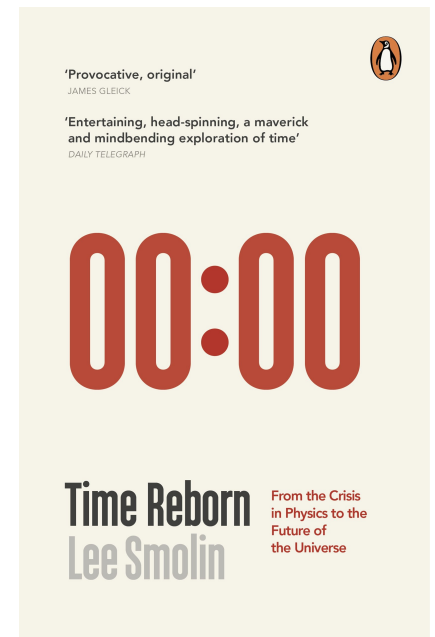
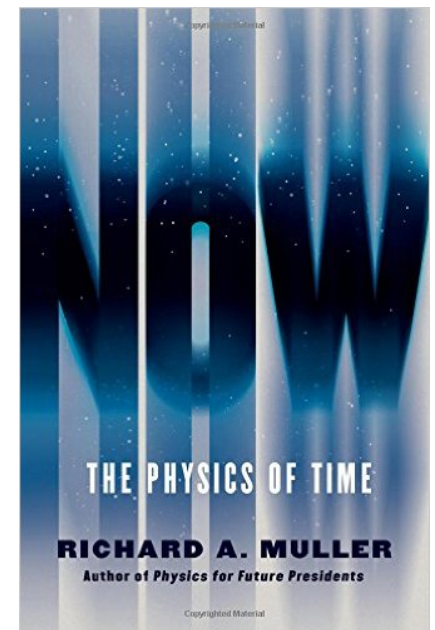
Hvad er tid så? Hvis ingen spørger mig, ved jeg det; hvis jeg søger at forklare det til den, der spørger, ved jeg det ikke.

Augustin, cirka 400 AD:



Baggrund

- Som eksperimentalist (partikelfysik) er tiden som begreb ikke mit kerneområde, men mere at regne som en hobby;
- I forbindelse med dette foredrag har jeg benyttet lejligheden til at komme lidt up-to-date;
- Jeg fik tirsdag i sidste uge fat i to fascinerende bøger, som jeg netop har nået at sluge:
 - Richard Muller: *Now, the physics of time*
 - Lee Smolin: *Time Reborn*
- På trods af den komprimerede tidsplan forsøger jeg i dag efter bedste evne at referere lidt af hvad jeg har lært



Program

- Tiden i den klassiske mekanik
- Einsteins teorier
- Den specielle relativitetsteori
 - Tiden relativiseres
 - “Nuet” relativiseres
- Den generel relativitetsteori
 - Krumning af rumtiden
- Relativitetsteorien og **Nuet**
- Tidens retning i Naturen
- Genfødsel af tidsbegrebet?
- Afslutning

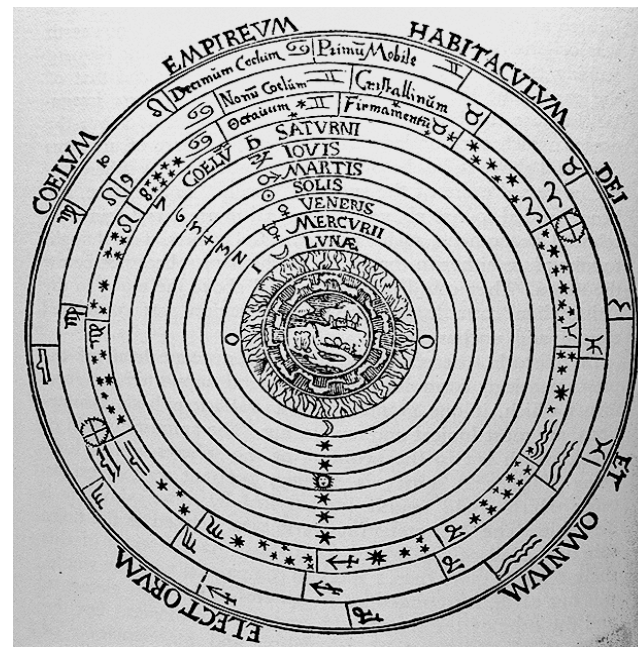
Program

- Tiden i den klassiske mekanik
- Einsteins teorier
- Den specielle relativitetsteori
 - Tiden relativiseres
 - “Nuet” relativiseres
- Den generel relativitetsteori
 - Krumning af rumtiden
- Relativitetsteorien og **Nuet**
- Tidens retning i Naturen
- Genfødsel af tidsbegrebet?
- Afslutning

Grækernes verdensbillede

To sfærer – to tidsopfattelser

- Det himmelske:
 - Evig, tidsløs, perfektion
 - Himmellegerne er evige og ophøjede; må bevæge sig på perfekte baner - cirkler
 - Matematisk beskrivelse
 - Matematik: udspring af ren tankevirksomhed, tidsløs, ophøjede sandheder
- Det jordiske:
 - Fødsel, død, forandring, forfald
 - Ikke perfekt: Ingen (søgning efter) matematisk beskrivelse.



Der skulle gå 2000 år før Galileo som den første beskrev banen af faldende legeme ved jordoverfladen. Grækerne kunne have gjort det.

Himlen og jorden forenes

Galileo (omkring 1630):

- Ved brug af kiggert: Himlen ikke perfekt: pletter på solen, bjerge på månen, Jupiter har måner, mange stjerner
- Studie af fald ved jordoverfladen:
 - Ethvert legeme falder på samme måde: *parabelbane*.
 - Første gang matematikken finder indpas i beskrivelse af bevægelse i den jordiske verden.
 - *Naturlov*: relation mellem den tidsbundne verden og tidsløs, evig sandhed og skønhed

Copernicus:

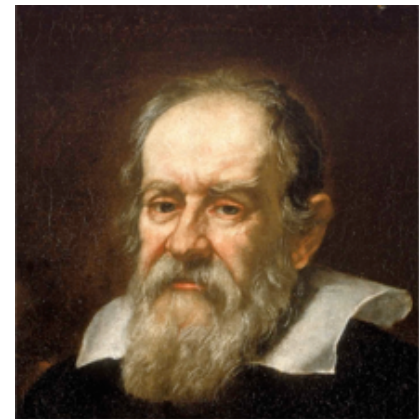
- Solen i centrum

Kepler:

- Med Solen i centrum bliver planerernes baner lukkede – harmoni
- Mars' bane er elliptisk
 - Hvorfor? Foreslår kraft fra Solen

Jorden og himlen "forenet": Kun én tidsopfattelse nødvendig.
Men hvilken skal man vælge?

- a) Jordisk: Tidens gang, fortid, **nutid**, fremtid
- b) Himmelsk: Tidsløs, *tidens gang er en illusion*



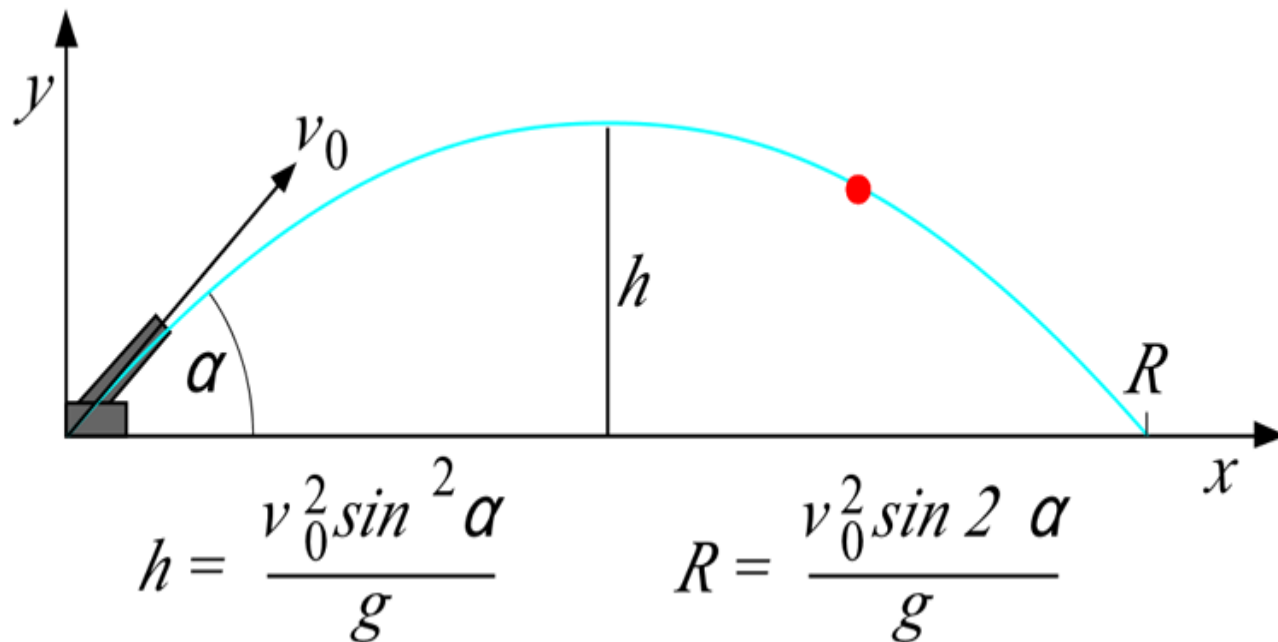
Klassisk mekanik

Newton (1687): Forening af himmelsk og jordisk mekanik

- Månens bevægelse er parallel til et faldende æbles
 - Månen falder stedse i Jordens tyngdefelt
- Opfinder (i parallel med Leibniz) *calculus* til beskrivelse af bevægelse
- Newtons love: Grundlaget for den klassiske mekanik
 1. Ingen kraft \Rightarrow jævn retlinjet bevægelse
 2. Kraft = masse x acceleration
 3. Aktion = reaktion
- Forudsigelse af fysisk systems bevægelse baseret på:
 - a. Begyndelsesposition(er)
 - b. Begyndelseshastighed(er)
 - c. Kraft (kræfter)
- Matematisk beskrivelse leder til matematisk opfattelse af naturen

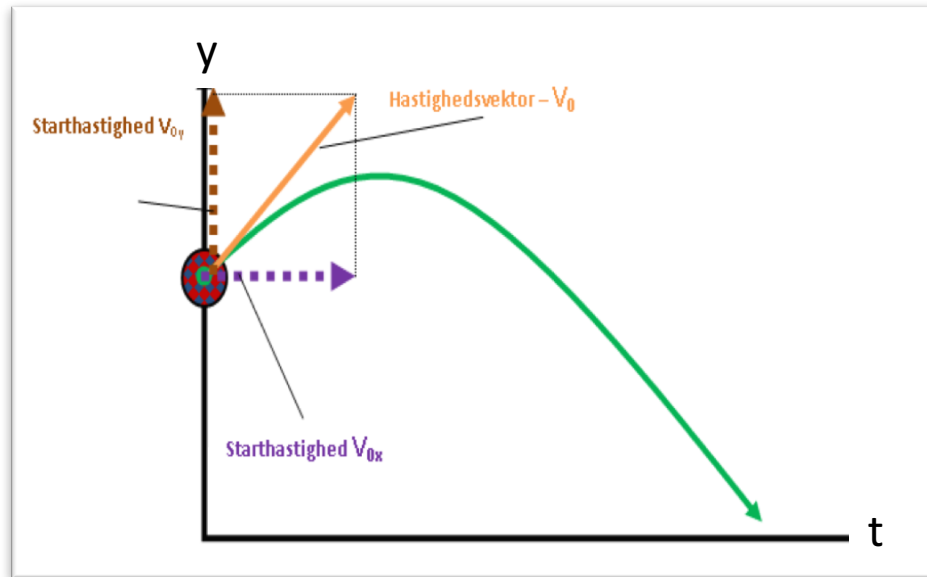
Klassisk mekanik og tiden (i)

- Kaste parabellen har ingen tidskoordinat
 - Tiden er integreret ud
- Vi kan besvare mange spørgsmål helt uden at refereret til tiden
- Og begrebet **nu** optræder aldrig



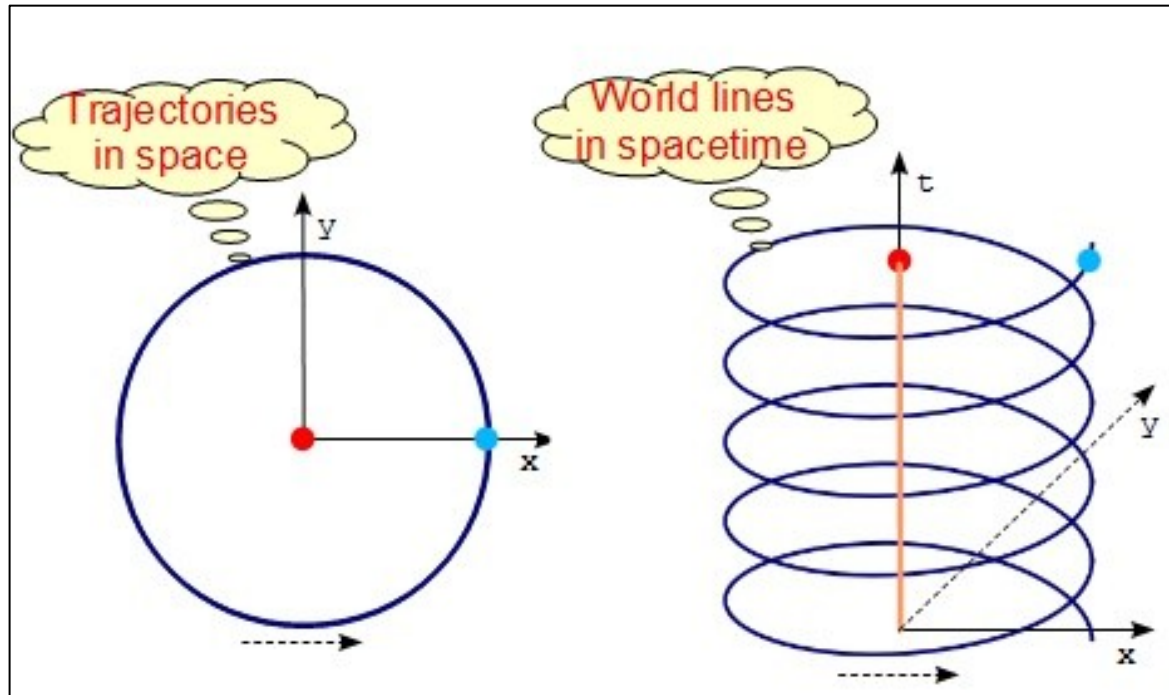
Klassisk mekanik og tiden (ii)

- Vi kan dog også vælge at afbilde koordinater som funktion af tiden
 - her højden, y ,
- “rumliggørelse” af tiden
 - Besnærende at opfatte tiden som endnu en rum-koordinat



Klassisk mekanik og tiden (iii)

Eksempel: Månens bane omkring Jorden



Bane i rum

Bane i rum og tid

Bemærk: Dette giver nu et *statisk* billede

Klassisk mekanik og determinisme

Tidens rolle bliver efterhånden vigende i den fysiske beskrivelse:

Laplace (1820):

En intelligens, der kender alle kræfter, der virker i Naturen, såvel som de øjeblikkelige positioner og hastigheder af samtlige objekter i Naturen ville være i stand til i én formel at forklare bevægelsen af de største legemer såvel som de letteste atomer i verden, givet at intelligensen var tilstrækkelig kraftig til at behandle al data. For denne intelligens ville intet være usikkert, fremtiden såvel som fortiden ville være tilstede for dens øjne.

Program

- Tiden i den klassiske mekanik
- Einsteins teorier
- Den specielle relativitetsteori
 - Tiden relativiseres
 - “Nuet” relativiseres
- Den generel relativitetsteori
 - Krumning af rumtiden
- Relativitetsteorien og **Nuet**
- Tidens retning i Naturen
- Genfødsel af tidsbegrebet?
- Afslutning

Relativitetsteorien og tid



To teorier:

Den specielle relativitetsteori (1905)

Teori for beskaffenheden at rum og tid (uden gravitation)

- Et ur i bevægelse i forhold til iagttageren går langsomt
- Samtidighed er et relativt begreb!

Den almene relativitetsteori (1916)

Moderne teori for gravitation

- Tiden går langsommere i tyngdefelter

Begge teorier har som basis, at lyshastigheden er den samme for enhver iagttager uanset dennes bevægelse



Program

- Tiden i den klassiske mekanik
- Einsteins teorier
- **Den specielle relativitetsteori**
 - Tiden relativiseres
 - “Nuet” relativiseres
- Den generel relativitetsteori
 - Krumning af rumtiden
- Relativitetsteorien og **Nuet**
- Tidens retning i Naturen
- Genfødsel af tidsbegrebet?
- Afslutning

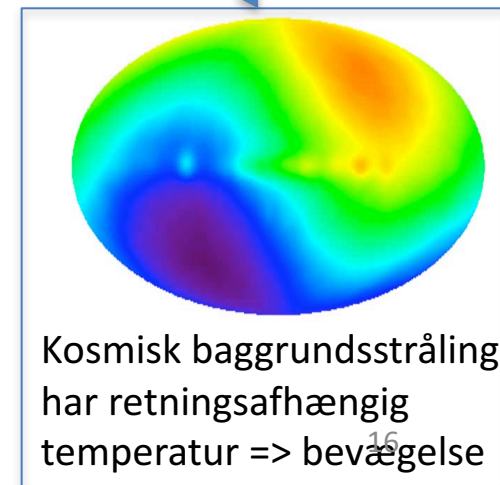
Hvor hurtigt bevæger du dig netop nu?

- 0 m/s i forhold til din stol
- 400 m/s i forhold til Jordens centrum (rotation)
- 30.000 m/s i forhold til Solen (banebevægelse)
- 220.000 m/s i forhold til Mælkevejens centrum
- 630.000 m/s i forhold til den kosmiske baggrundsstråling



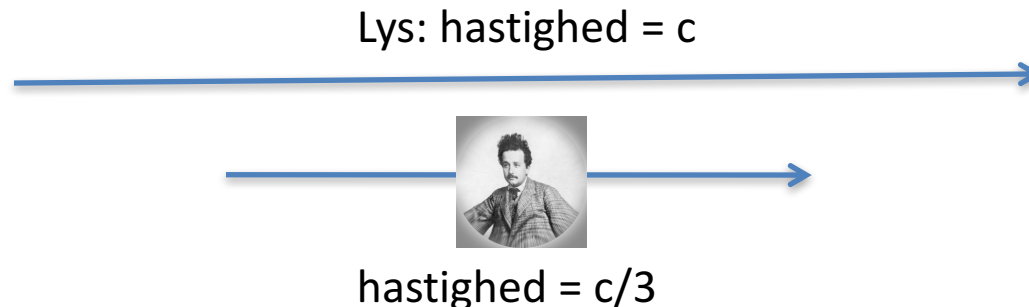
I forhold til hvad??

- Dette er hoved-essensen i relativitetsteorien:
 - kun **relative** hastigheder har betydning
 - der findes **intet absolut referencesystem**
 - meningsløst at hævde, man er i (absolut) hvile



Einstein spekulerer over lys

- Einstein: Hvis lys udbreder sig med hastigheden $c=300.000.000$ m/s, så må det *i princippet* være muligt at bevæge sig ved siden af en lysbølge, lige så hurtigt som denne, og betragte lysbølgen i hvile **i forhold til** sig selv.
 - Hvordan vil en sådan lysbølge “se ud”?
- Einstein undersøger Maxwells ligninger: Nej, disse har kun og alene løsninger for lys, der udbreder sig med hastigheden c .
 - Jamen, det dur jo ikke. Fx.:



- lagttager skulle *i princippet* kunne have *enhver* hastighed **i forhold til** lysstrålen
 - Så, er der ikke noget galt med med det teoretiske grundlag for beskrivelsen af elektromagnetiske bølger, altså Maxwells teori ?
 - Nej, viser det sig. Det er ikke Maxwell, der er noget i vejen med. Men noget langt mere fundamentalt!

Einsteins relativitetsprincip (1905)



Einstein postulerer i 1905 (26 år gammel) :

1. Alle inertialsystemer er ligeværdige for udførelse af samtlige fysiske forsøg:

- meningsløst at spørge, hvem der er i hvile, og hvem, der bevæger sig;
al bevægelse er relativ

2. I det tomme rum har lys samme konstante hastighed, c , for enhver iagttager

Set med traditionelle briller, er dette ret vanvittigt!

- Lige meget hvor hurtigt man forsøger at indhente en lysstråle, vil denne altid fjerne sig fra én med samme hastighed, c

Einsteins postulater fører til en ny opfattelse af rum + tid

Samme lyshastighed for enhver iagttager

Q: Hvad er så specielt ved lys, at vi ikke kan benytte “normale” regler for sammensætning af hastigheder?

A: Hastigheden er høj!

– Faktisk den højeste opnåelige hastighed overhoved

• Hvordan/hvorfor?

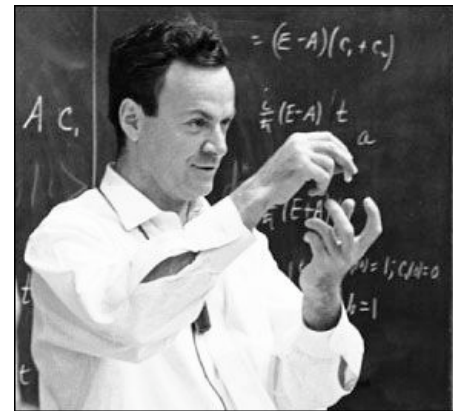
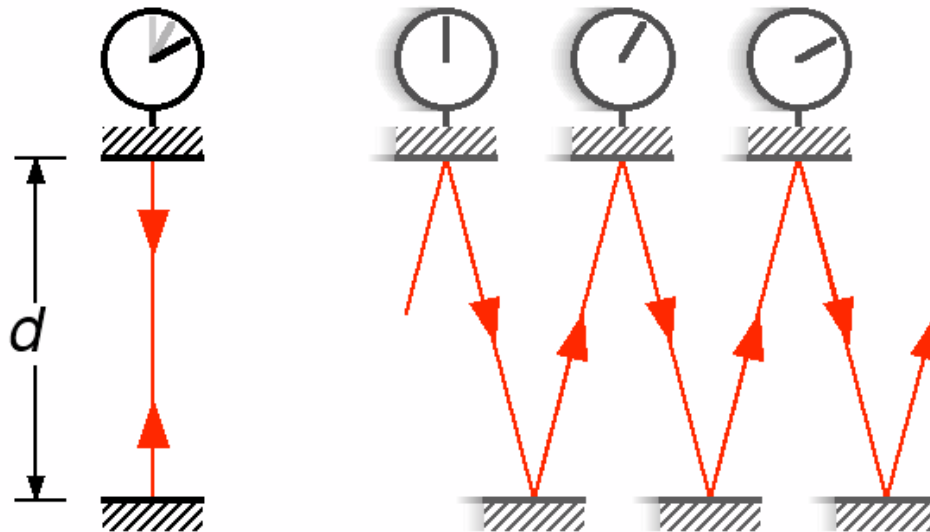
hastighed = afstand i **rum** / afstand i **tid** (fx. 50 km / time)

Sammenbrud af hastighedsadditionsreglen:

Strukturen af rum + tid er anderledes end, hvad vores hverdagserfaring fortæller os

Revision af fundamentale begreber: Tid

- Et ur, der bevæger sig, tikker langsommere.
- Dette kan anskueliggøres direkte v.h.j.a. et såkaldt lysur.
- Lysvejen i det bevægede ur er længere; det bevægede ur tikker altså langsommere



Argument efter R.Feynman

Hver gang lyset rammer det øvre spejl, tikker uret én gang

- Ethvert ur må gå langsommere, hvis det er i bevægelse i forhold til iagttageren => **Tidsforlængelse**
- Hvor meget tikker uret langsommere? Simpel matematik: Pythagoras!

De relativistiske effekter

- **Længdeforkortning**

- Længde af legeme i system, hvor legemet er i hvile: **Hvilelængden**: L_0
- I ethvert andet system er legemet kortere:

$$L = L_0/\gamma = L_0\sqrt{1 - v^2/c^2}.$$

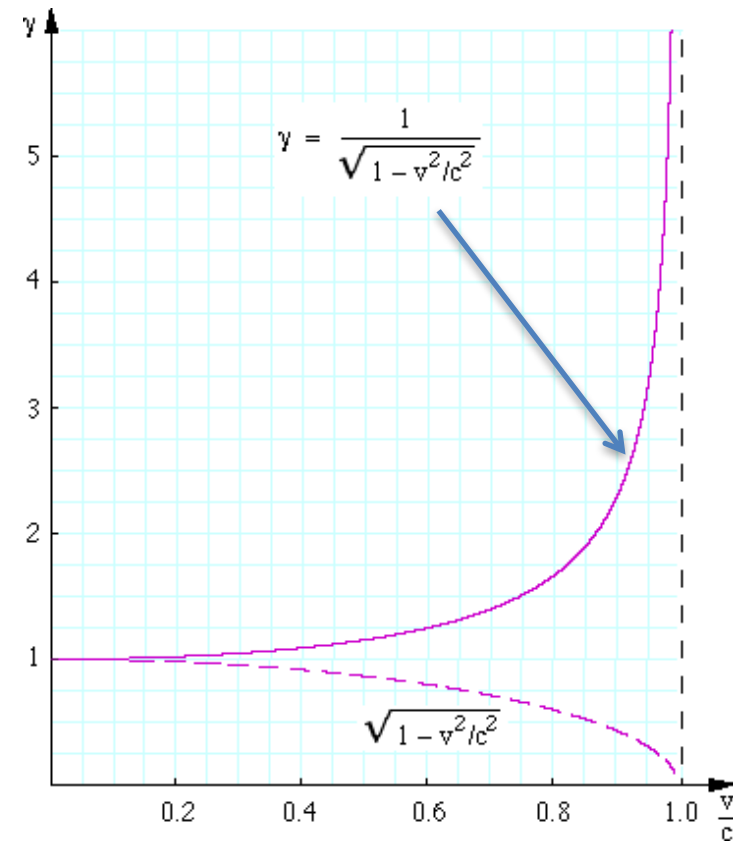
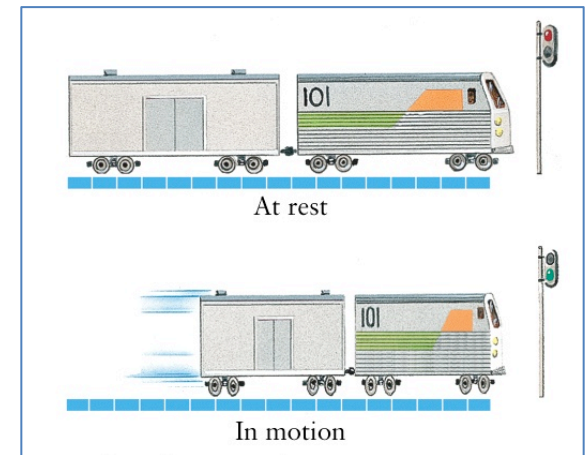
- **Tidsforlængelse**

- Varighed af process i system, hvor start og slut sker i samme punkt: **Egentiden**: T_0
- I ethvert andet system er varigheden større:

$$T = \gamma T_0 = \frac{T_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

γ -funktionen
(mål for hvor relativistisk
problemstillingen er)

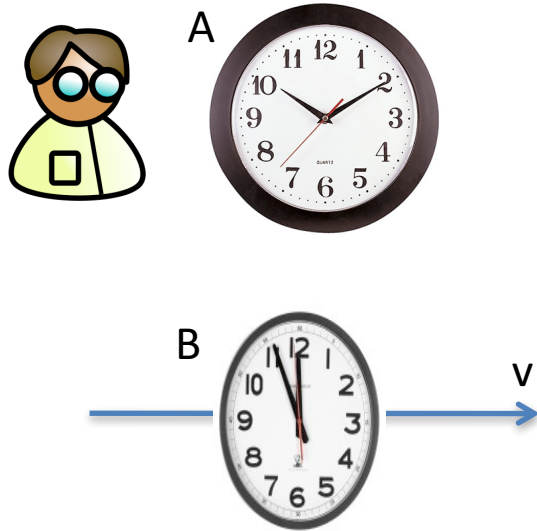
$$\gamma \equiv \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$



Hastighed i enheder af lyshastigheder

Relativistiske effekter går (selvfølgelig!) begge veje

Set fra A-systemet

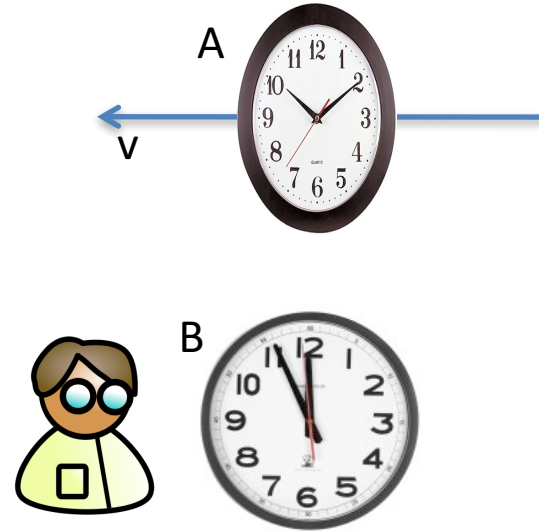


- A stationært
- B mod højre med farten v

$$T_A = T_B * \gamma$$

1 sek på B ta'r γ sek målt på A

Set fra B-systemet



- B stationært
- A mod venstre med farten v

$$T'_B = T'_A * \gamma$$

1 sek på A ta'r γ sek målt på B

De to systemer er ligeberettigede => tidsforlængelse og længdeforkortning går begge veje

Hold dig ung; rejs!

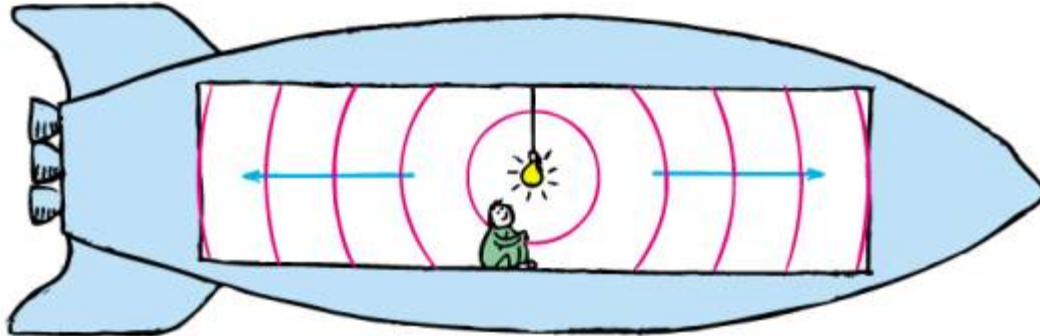
- Et ur i bevægelse tikker langsommere.
 - Gælder (selvfølgelig) også biologiske ure
- Rejs tur/retur til vores nærmeste stjerne med 80% af lyshastigheden:
 - Afstand tur/retur: $2 * 4 \text{ lysår} = 8 \text{ lysår}$.
 - Altså tager rejsen ($8 \text{ år} / 0.80 =$) 10 år set fra Jorden.
 - Set fra raketsystemet tager det $2 * 3 \text{ år}$, altså 6 år.
 - Når pigen kommer hjem, er hun 4 år yngre end sin tvillingebror
- Men hov, skulle tidsforlængelsen ikke gå begge veje? Kunne man ikke med lige god ret argumentere, at søsteren er ældst?
 - Nej, de to bevægelser er ikke ligeberettigede:
 - Bror: konstant i ikke-accelereret bevægelse
 - Søster: acceleration i del af bevægelsen (start/vend/stop)
 - Men det er ikke accelerationen i sig selv, der er årsag til aldersforskellen...

Vi har alle vores helt personlige tid, hvis gang i forhold til andres afhænger af vores relative bevægelse.

Ingen "global" tid!

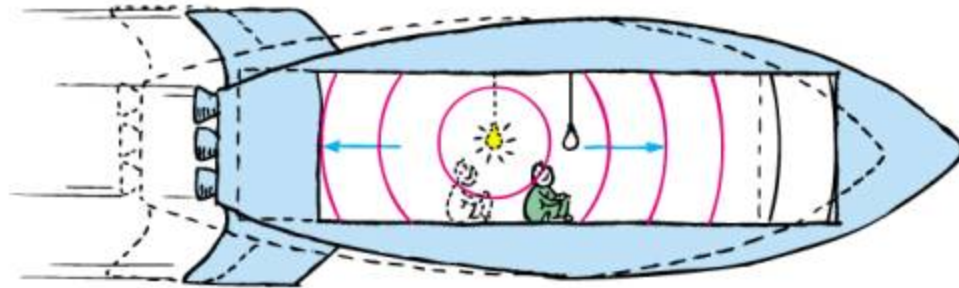


Revision af fundamentale begreber: Samtidighed



Hewlett, *Conceptual Physics*, Ninth Edition.
Copyright © 2002 Pearson Education, Inc., publishing as Addison Wesley. All rights reserved.

En iagttager i rumskibet ser, at et lysglimt udsendt fra midten af rumskibet rammer kabinens to ender til samme tid.



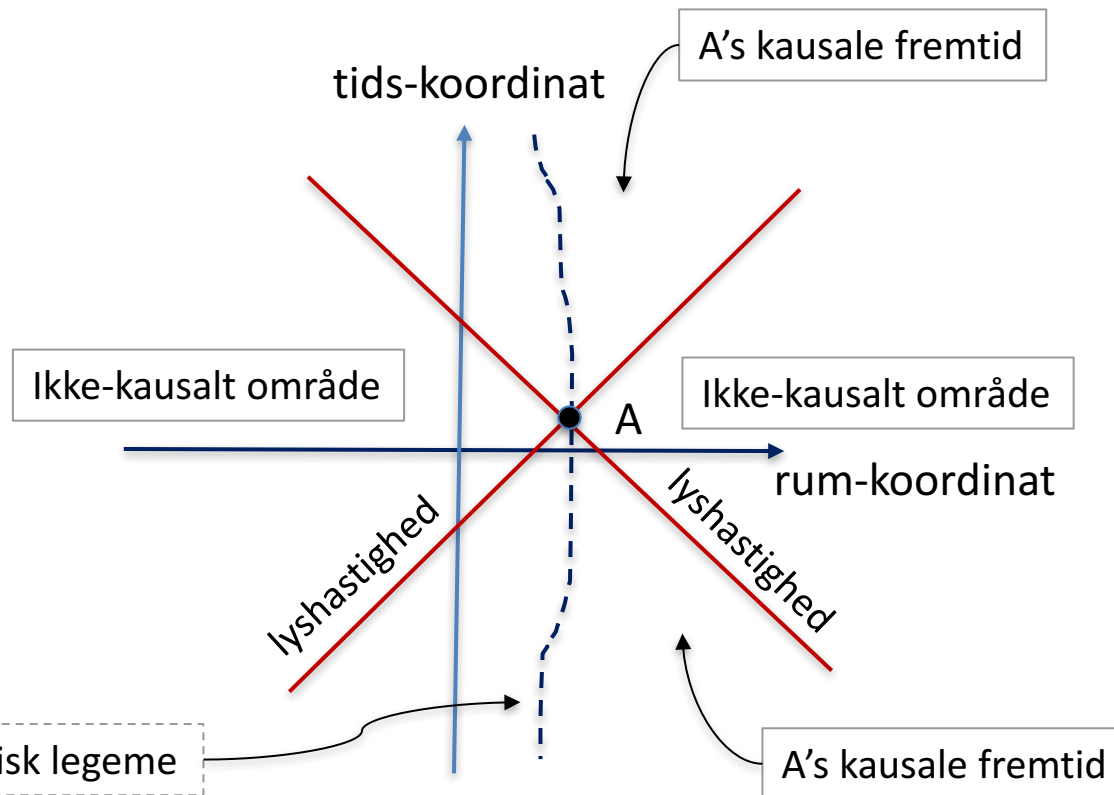
For en iagttager, der ser rumskibet passere forbi, medfører betingelsen om den samme lyshastighed i alle retninger *i sit eget system*, at de to begivenheder ikke vil være samtidige. Lysglimt vil først ramme bagvæggen, dernæst forvæggen.



Hewlett, *Conceptual Physics*, Ninth Edition.
Copyright © 2002 Pearson Education, Inc., publishing as Addison Wesley. All rights reserved.

Samtidighed er relativ, ikke absolut !

Rumtiden

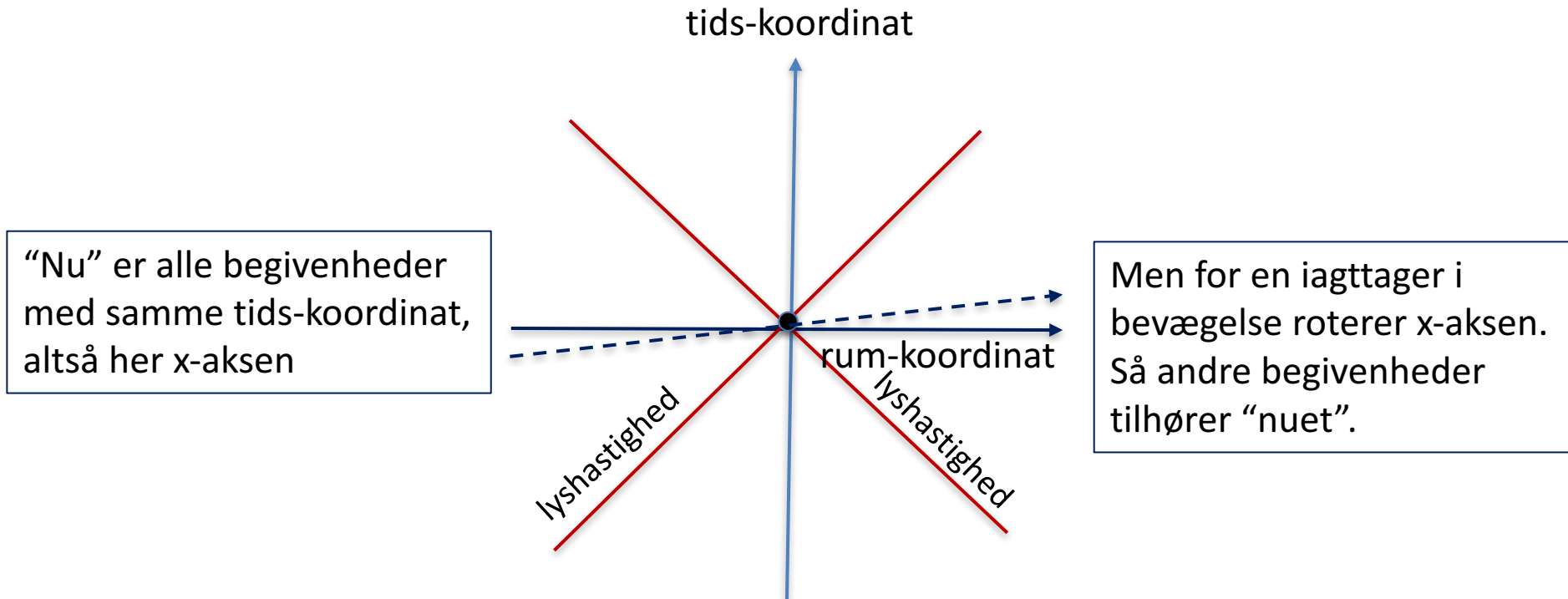


Intet informationsholdigt signal kan udbrede sig hurtigere end lyshastigheden.

Dette leder til opdeling af rumtiden i tre disjunkte områder

- Kausal fremtid: A kan have indflydelse på begivenheder her.
- Kausal fortid: Begivenheder her kan have indflydelse på A.
- Ikke-kausalt område. Ingen mulig årsags/virkningsrelation. Ville kræve overlyshastighed.

Relativitetsteorien og Nuet



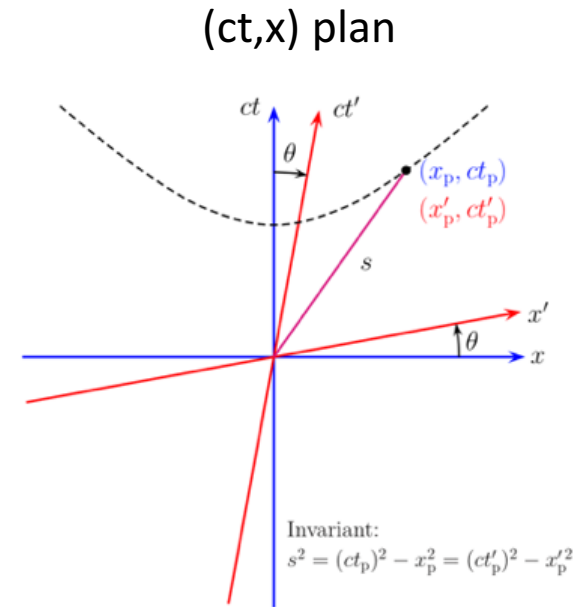
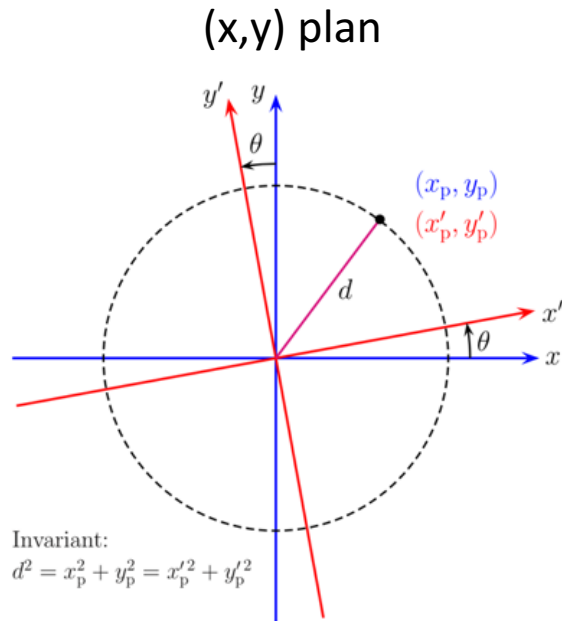
Dette er selvsagt det samme som “relativitet af samtidighed”

- “Nu” = alle samtidige begivenheder.
- “Nu” er et relativt begreb

Et hårdt angreb på tiden som et reelt fysisk størrelse:

- Hvilke begivenheder, der sker i **nuet** afhænger af iagttagerens bevægelse

Rotation versus Lorentz-transformation



Invariant afstandsmål: $d^2 = x^2 + y^2$

Punkter i samme afstand fra origo ligger på cirkel

Ved rotation sammenblandes x- og y-koordinaterne

De to **røde akser (S')** roterer i samme retning relativt til **blå (S)**

Invariant afstandsmål: $s^2 = (ct)^2 - x^2$

Rumtids-punkter (begivenheder) i samme afstand fra origo ligger på hyperbel

Ved Lorentz-transformation (relativ bevægelse) sammenblandes ct- og x-koordinaterne

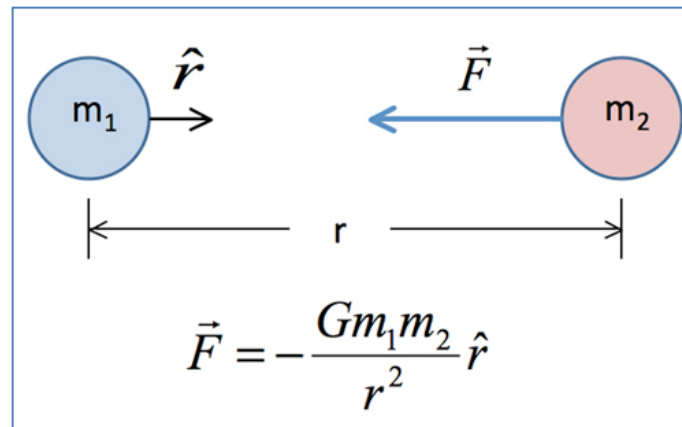
De to **røde akser (S')** roterer i modsat retning relativt til **blå (S)**

Program

- Tiden i den klassiske mekanik
- Einsteins teorier
- Den specielle relativitetsteori
 - Tiden relativiseres
 - “Nuet” relativiseres
- Den generel relativitetsteori
 - Krumning af rumtiden
 - Kosmologien: En teori for Universet
- Relativitetsteorien og **Nuet**
- Tidens retning i Naturen
- Genfødsel af tidsbegrebet?
- Afslutning

Den Specielle Relativitetsteori og tyngdekraften

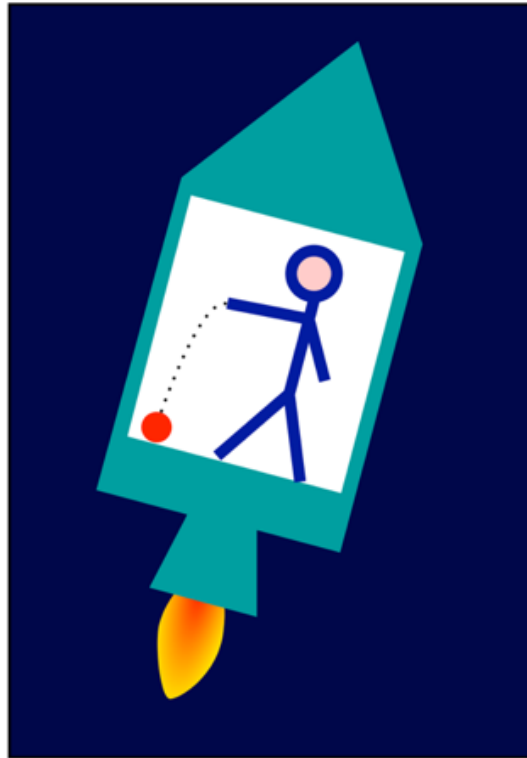
- Ifølge Newton har tyngdekraften formen



- Tiden optræder ikke i udtrykket for kraften
 - Kraften udbredes momentant mellem de to legemer
- Modstrid med Einsteins øvre grænse for signalhastigheder!
- Hvordan forene Newton og Einstein?

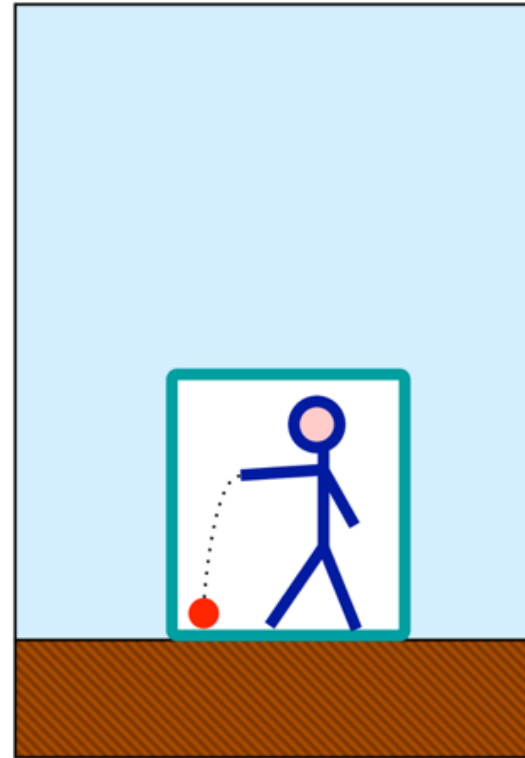
Einsteins ækvivalensprincip

Einstein (1907):
"The happiest
thought of my life"



Acceleration

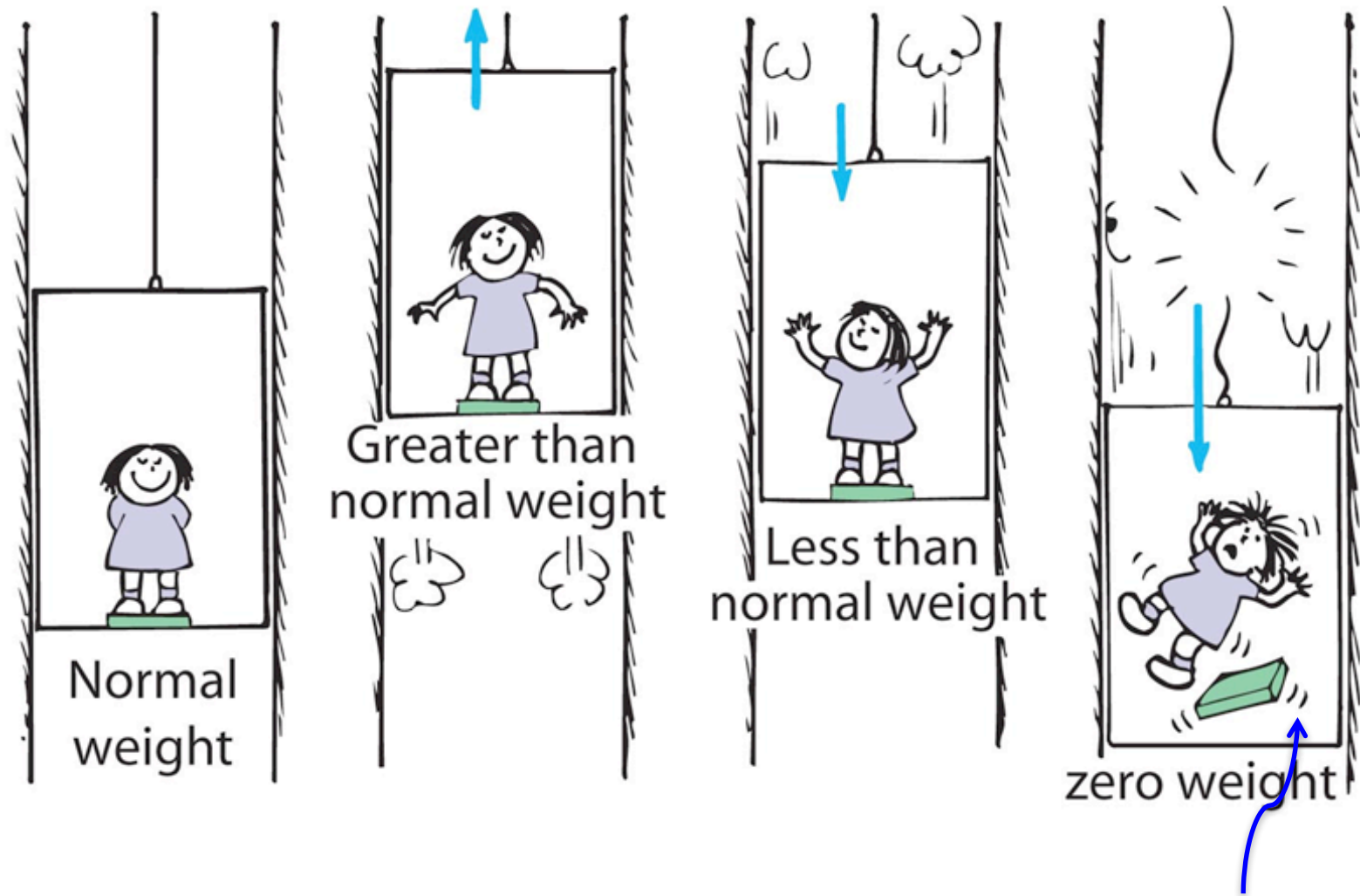
=



Gravitation

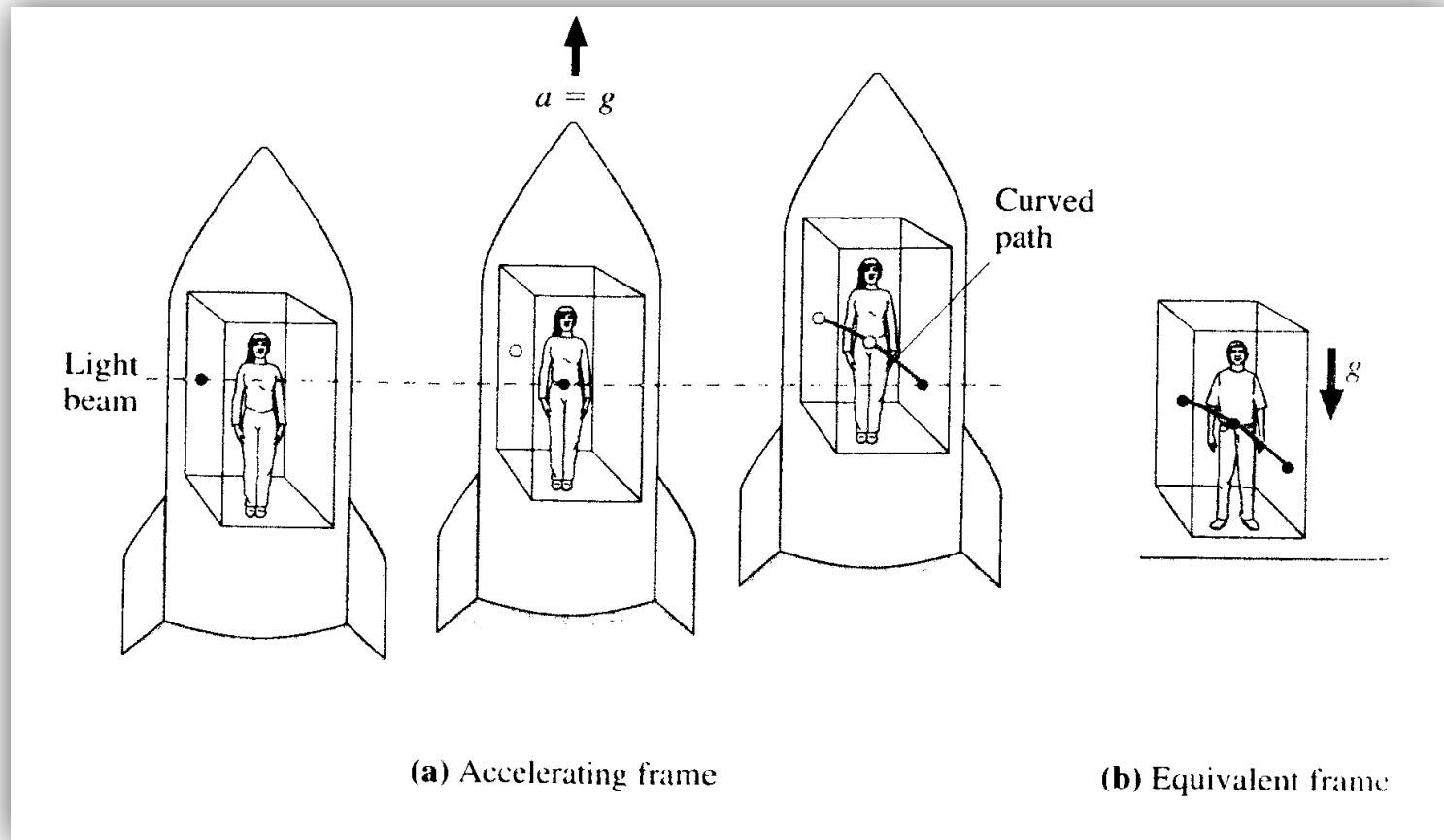
- lagttageren vil ikke kunne skelne mellem de to situationer
 - Gravitation kan anses som et resultat af valg af referencesystem

Vi kan nu skaffe os af med tyngdekraften...



Speciel relativitetsteori gælder i systemer uden tyngde: **Frit-fald-systemer**

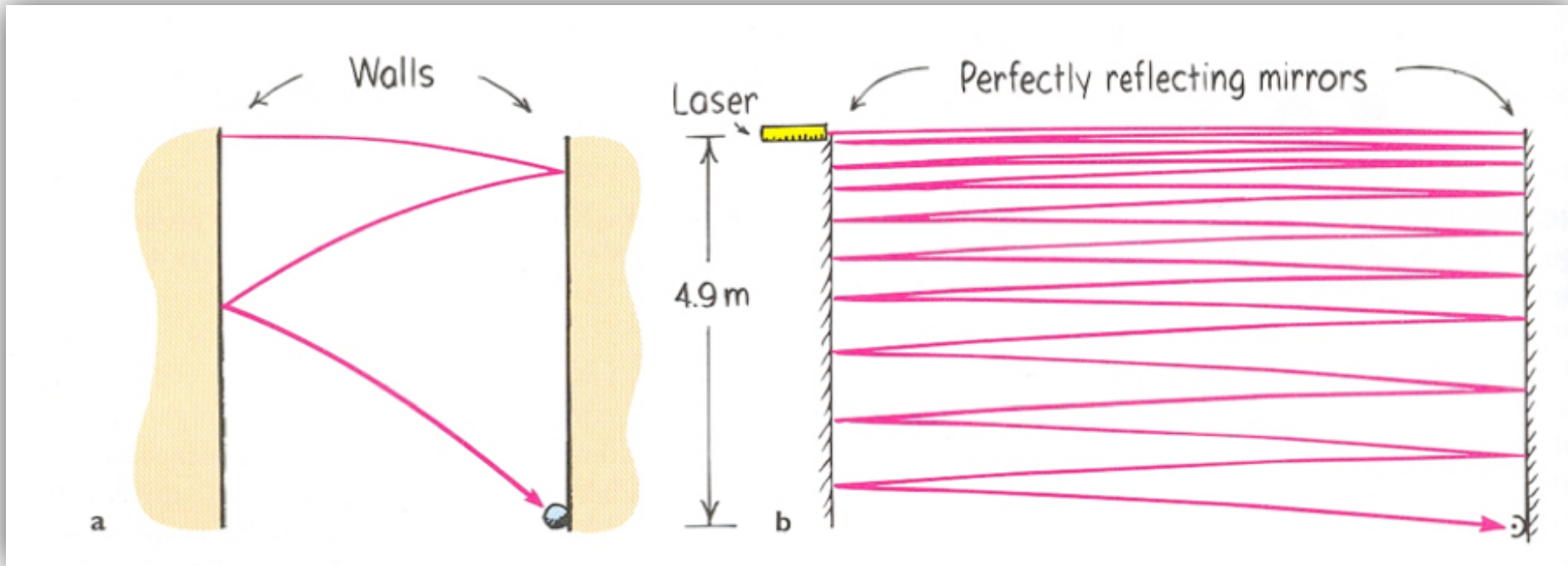
Ækvivalensprincippet: Lys afbøjes i et tyngdefelt



Lys bevæger sig på en krum bane i accelereret system.

Ækvivalensprincippet (acceleration = gravitation): **Lys vil afbøjes i et tyngdefelt**

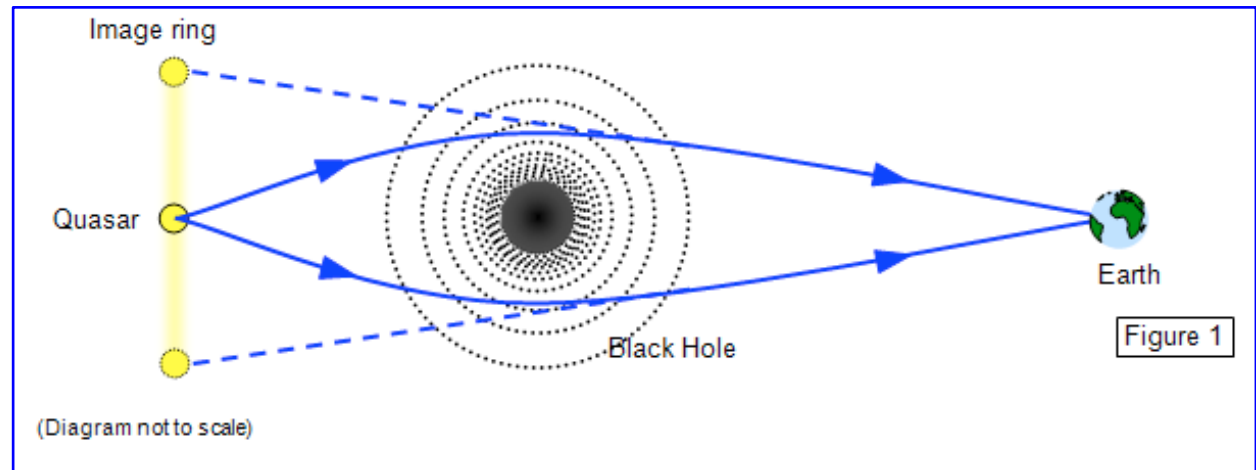
Galilei++: Alt falder ens



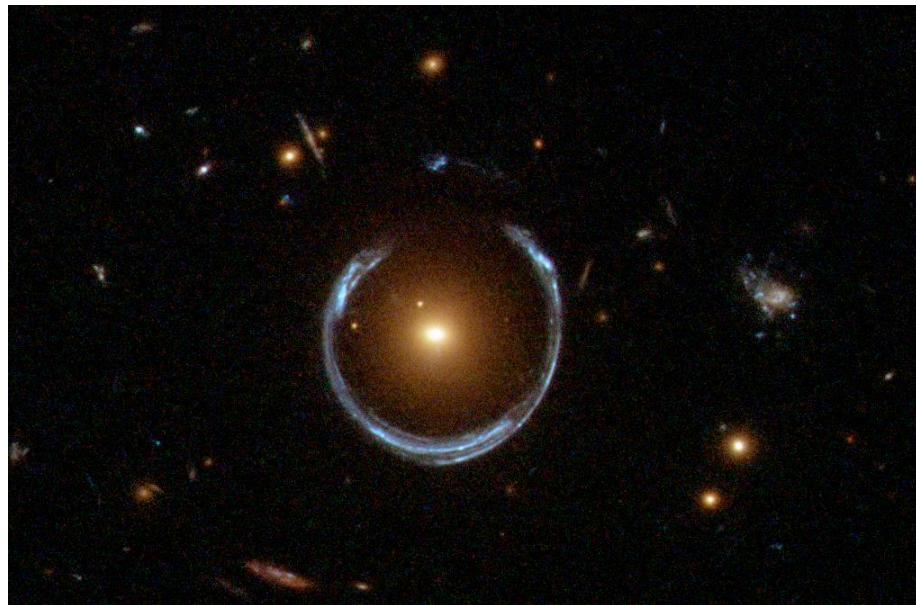
- Referencesystem på jordoverfladen er ækvivalent med system, der accelereres opad med 9.8 m/s^2
- I faldende inertialsystem (frit-fald-system) bevæger alt sig retlinjet
- Det, at ting falder, skyldes vort referencesystems opadrettede acceleration
- Dermed falder alt (inklusive lys!) med samme tyngdeacceleration

Gravitationel linseeffekt

Ser tiltider flere billeder af samme stjerne på himlen



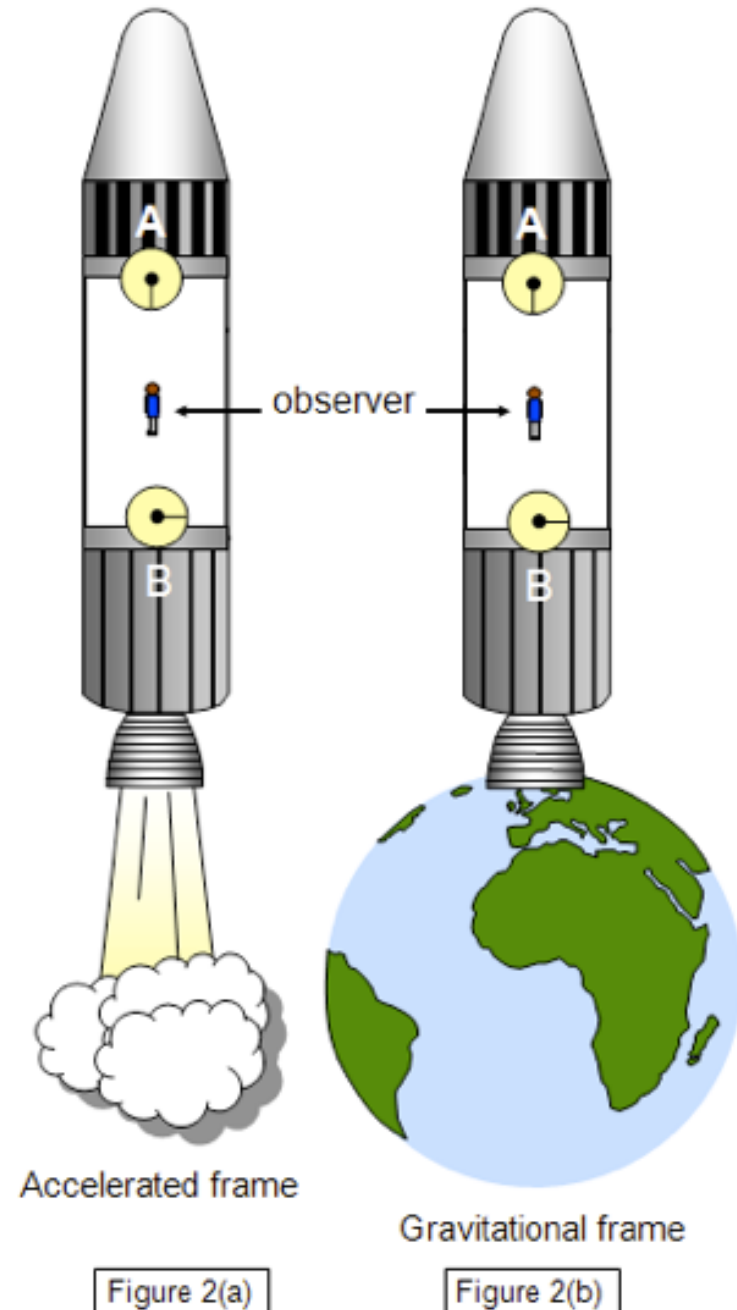
Billede af bagvedliggende blå gallakse fuldstændig forvrænget af foranliggende tung, gul gallakse



Gravitationel tidsforlængelse

Iagttager midt mellem to **identiske** lamper, A og B, der blinker med samme frekvens:

- **Jævn hastighed:** Iagttager ser A og B blinke med samme frekvens;
- **Accelereret bevægelse:** Iagttager accelererer væk fra signalerne fra B, men hen mod signalerne fra A: Vil se **B blinke langsommere end A**.
- **Ækvivalensprincippet:** Ved jordoverfladen vil iagttager se B blinke langsommere end A.
- **Tiden går langsommere i B end i A!**



Gravitationel tidsforlængelse

- Betragter proces med varighed
 - T_0 set fra Jorden
 - T set fra et gravitationsfrit område (uendelig langt væk fra Jorden)

$$T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \frac{2GM}{Rc^2}}}$$

- Vi ser umiddelbart, at $T > T_0$:
 - ✓ Størst varighed set fra det gravitationsfrie område.
 - ✓ Tiden går hurtigere i det gravitationsfrie område.
 - ✓ Tiden går langsommere på jordoverfladen end hvor ingen gravitation
- For Jorden:
 - Radius: $R = 6371$ km
 - Masse: $M = 5.97 \times 10^{24}$ kg
 - Newtons Gravitationskonstant: $G = 6.67 \times 10^{-11}$ N m² kg⁻²
- Ved jordoverfladen: $T/T_0 = 1.0000000007$
 - Jordbaseret ur går langsomt med 22 msec pr år.

Gravitationel tidsforlængelse – en singularitet

- Vi betragter udtrykket

$$T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \frac{2GM}{Rc^2}}}$$

- For $\frac{2GM}{Rc^2} = 1$ dividerer vi med nul.
 - For at T kan være endelig, må T_0 være nul:
 - Tiden i gravitationsfeltet står stille [set udefra](#)
 - For Jorden sker dette for $R_0 = 8.8 \text{ mm}$
 - For Solen: $R_0 = 3 \text{ km}$
 - For det **sorte hul** i centrum af Mælkevejen: $R_0 = 7.6 \times 10^6 \text{ km}$

Multi-fingered time

Gravitationel tidsforlængelse leder til begrebet *multi-fingered time*:

- Forskellige ure i Universet viser forskellige tider alt efter hvor stærkt et tyngdefelt (eller ækvivalent hvor kraftig en acceleration) de har oplevet
- Ure går langsommere i tyngdefelt/ved acceleration



Einsteins ligninger

$$G_{\alpha\beta} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\alpha\beta}$$

Geomteri:
Rumtidens krumning

Nogle konstanter

Energi-impuls
tæthed

$\alpha, \beta = 1, 2, 3, 4$; $16 - 6 = 10$ koblede differentiallyigninger

Einsteins ligninger løses

- Einstein mente ikke ligningerne kunne løses eksakt
 - Og undervurderede groft styrken af sin egen teori
- MEN... få måneder senere, brev fra Schwartzschild
 - Første **eksakte løsning** af Einsteins ligninger
 - Løsninger uden for en kugleformet massefordeling



Klassisk undvigelseshastighed:

- Bevægelsesenergi præcis lig med bindingsenergi
 - Legeme vil fortsætte ud til udendelig

$$v_{\text{esc}} = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

- Vend problemet rundt: Hvor lille skal r være for at $v_{\text{esc}} = c$

Schwartzschild radius

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

Genopstår i relativitetsteorien
Magisk radius...

Jorden: 8 mm; Solen 3 km

Schwartzschildradius af et sort hul

- Schwartzschildradius:

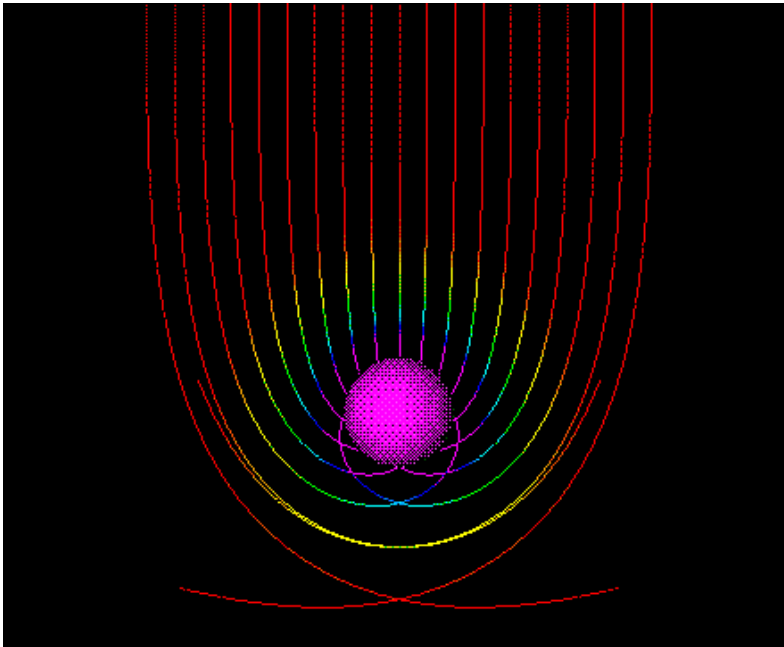
$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

- Husk gravitationel tidsforkortning:

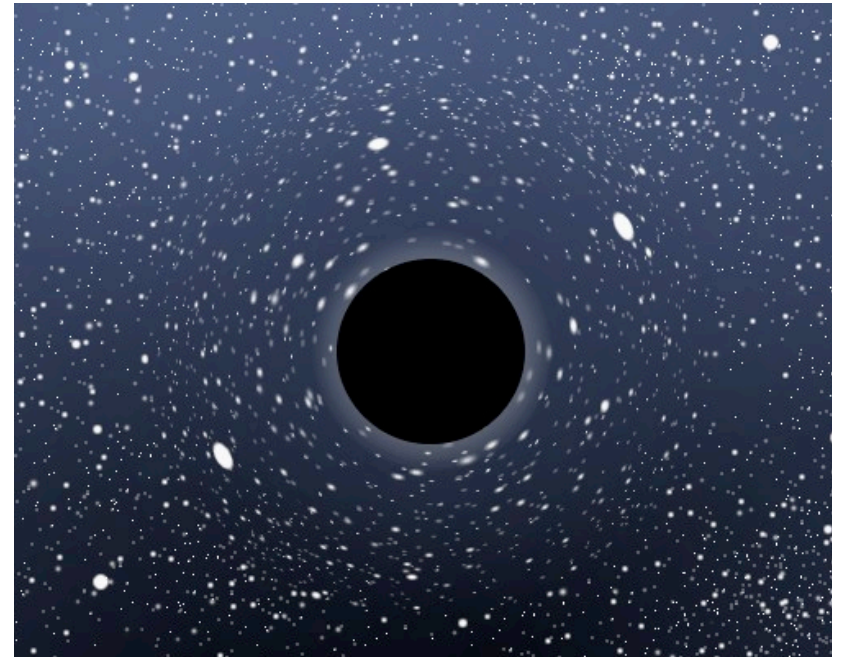
$$T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \frac{2GM}{Rc^2}}}$$

- Set udefra står tiden stille ved R_s
 - Faktisk kan derved intet falde ind i et sort hul set udenfra
- Schwartzschild radius = begivenhedshorisont
 1. Intet signal kan krydse indefra ud forbi begivenhedshorisonten
 2. Man kan ikke opholde sig stationært inden for horisonten
 3. Man drages ind mod singulariteten i midten
 - Rummet “falder” hurtigere end lyshastigheden
 - Man må følge med...
 - Tiden stopper når man når singulariteten

Sorte huller



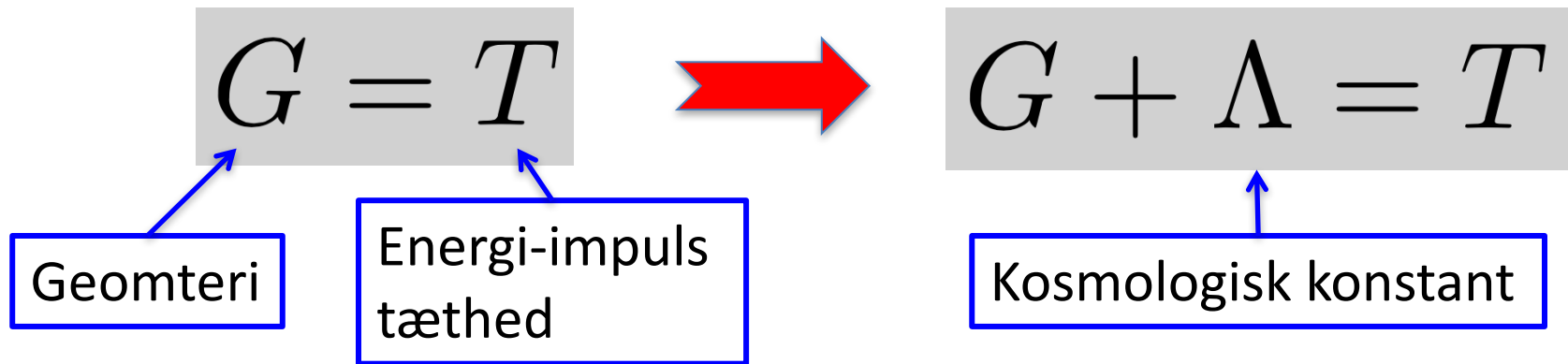
Gravitationel afbøjning af lys omkring et sort hul



Computersimulering

Einsteins ligninger og Universet

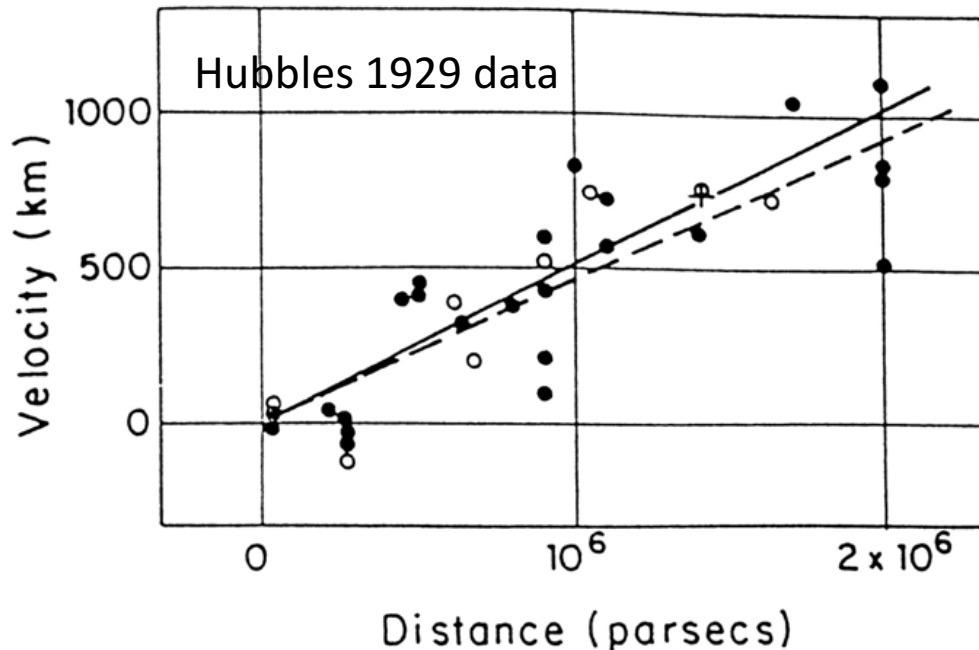
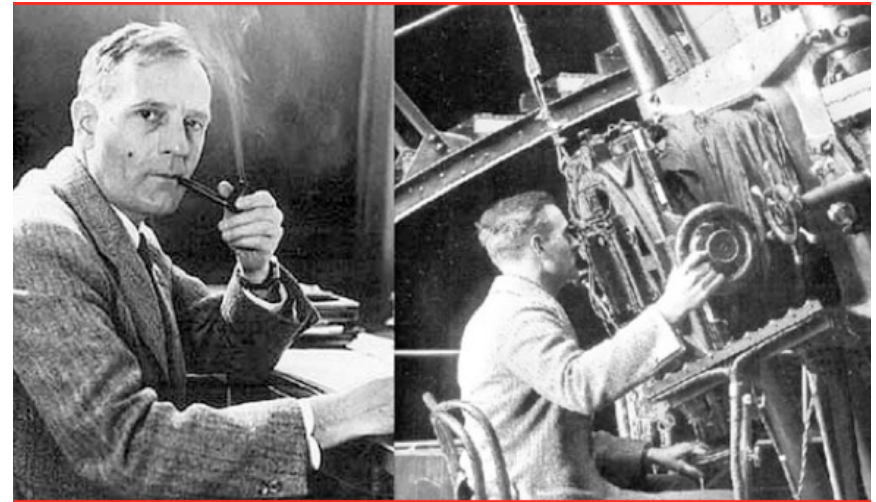
- Schwartzschilds løsninger af Einsteins ligninger anvendt på Universet
 - Universet antages ligeledes at være en kugleformet massefordeling
 - Problem: Universet forudsiges at være ustabil; Udvikler sig i tiden.
 - Men i 1917 mente man at universitet var et fredeligt sted: **Statisk!**
 - Einstein modificerer sine ligninger



- Λ kan justeres så universet er statisk (men metastabil). Freden genoprettet.
- Einstein senere: *"Den største brøler i mit liv"*

Hubble: Universet udvider sig

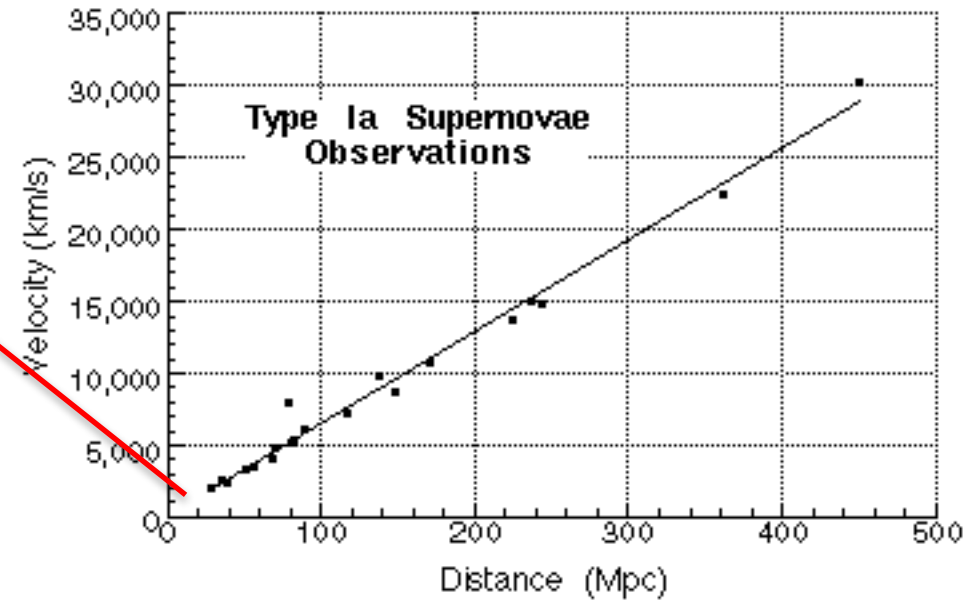
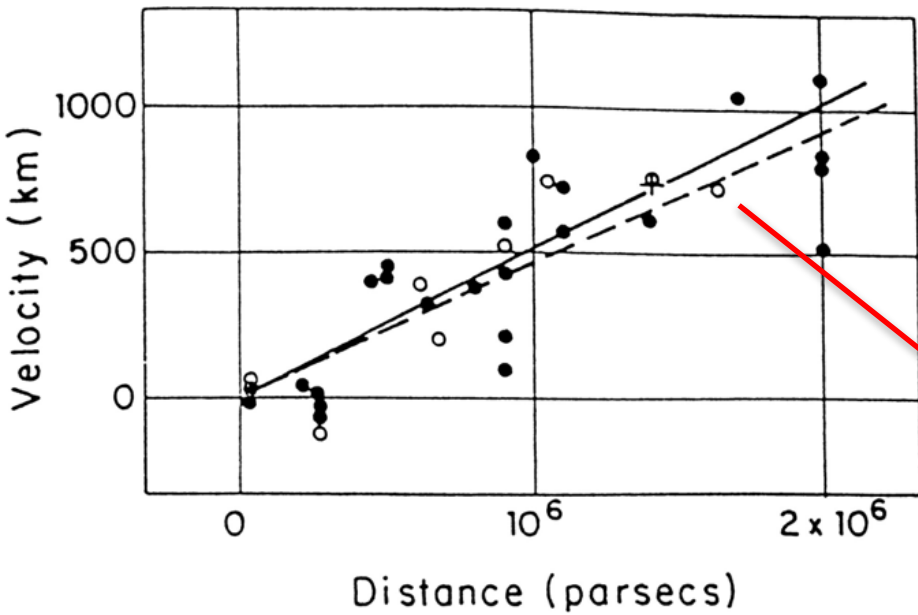
- **Afstand:** Lysstyrke af himmelobjekt med kendt lysstyrke
- **Hastighed:** Doppler-forskydning



Lineær sammenhæng mellem afstand og hastighed

Einstein: "Ups, Universet ikke statisk; ingen brug for kosmologisk konstant..."

Hubble-udvidelse -- moderne data



Hubble-udvidelse

Samtlige afstande vokser (lineært) med tiden:
Hele Universet udvider sig!!!

$$v = r H$$

hastighed

afstand

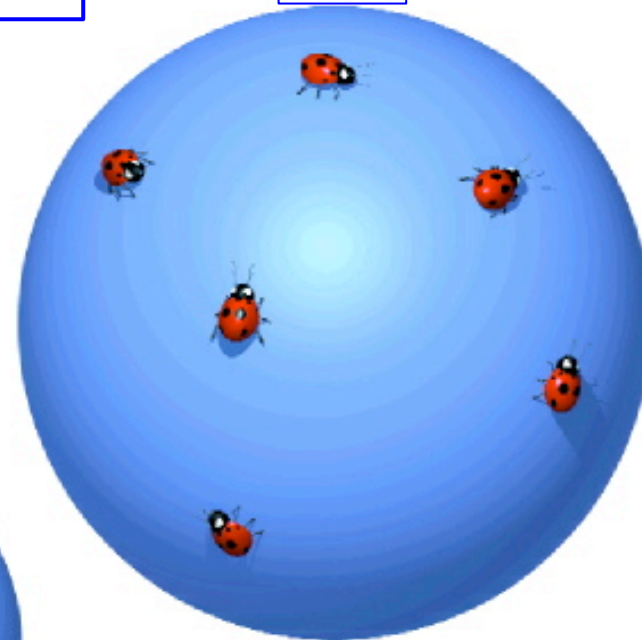
Hubbles konstant



tid 1



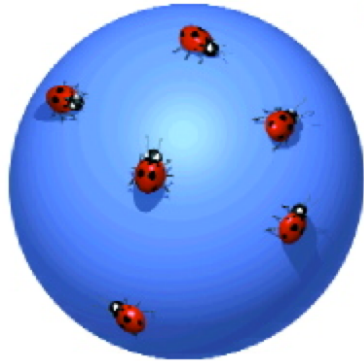
tid 2



tid 4

Åh jo, så var Hubble jo også den første til at påvise, at der var galakser andre end Mælkevejen.
Universet er større end vores galakse!

Universets historie - Big Bang



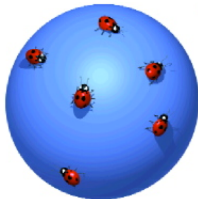
Men hvis Universet stedse udvider sig, så har det engang været meget lille...

- Måske endda uendelig lille => **Big Bang**
- Rummet og tiden blev født i Big Bang(?)

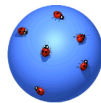
George Lemaître:

- ✓ 1927: Forudsagde med basis i Einsteins, at rummet udvider sig
 - før Hubbles eftervisning
- ✓ Faderen til Big Bang teorien
- ✓ Forøvrigt også belgisk katolsk præst
 - “skabelsesberetning”

mindre



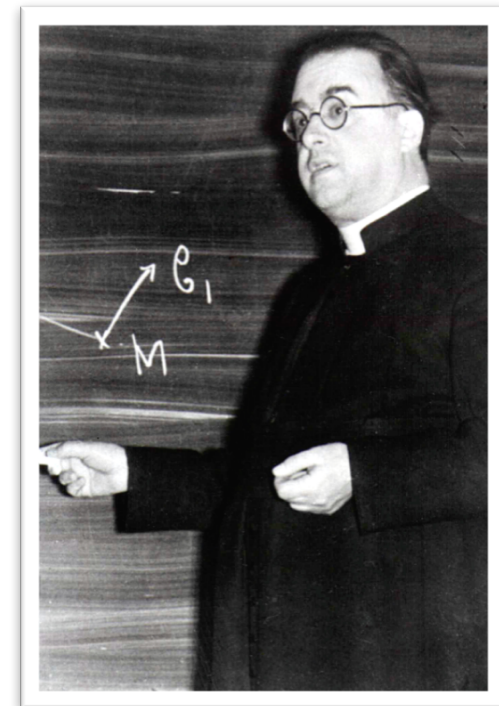
mindre



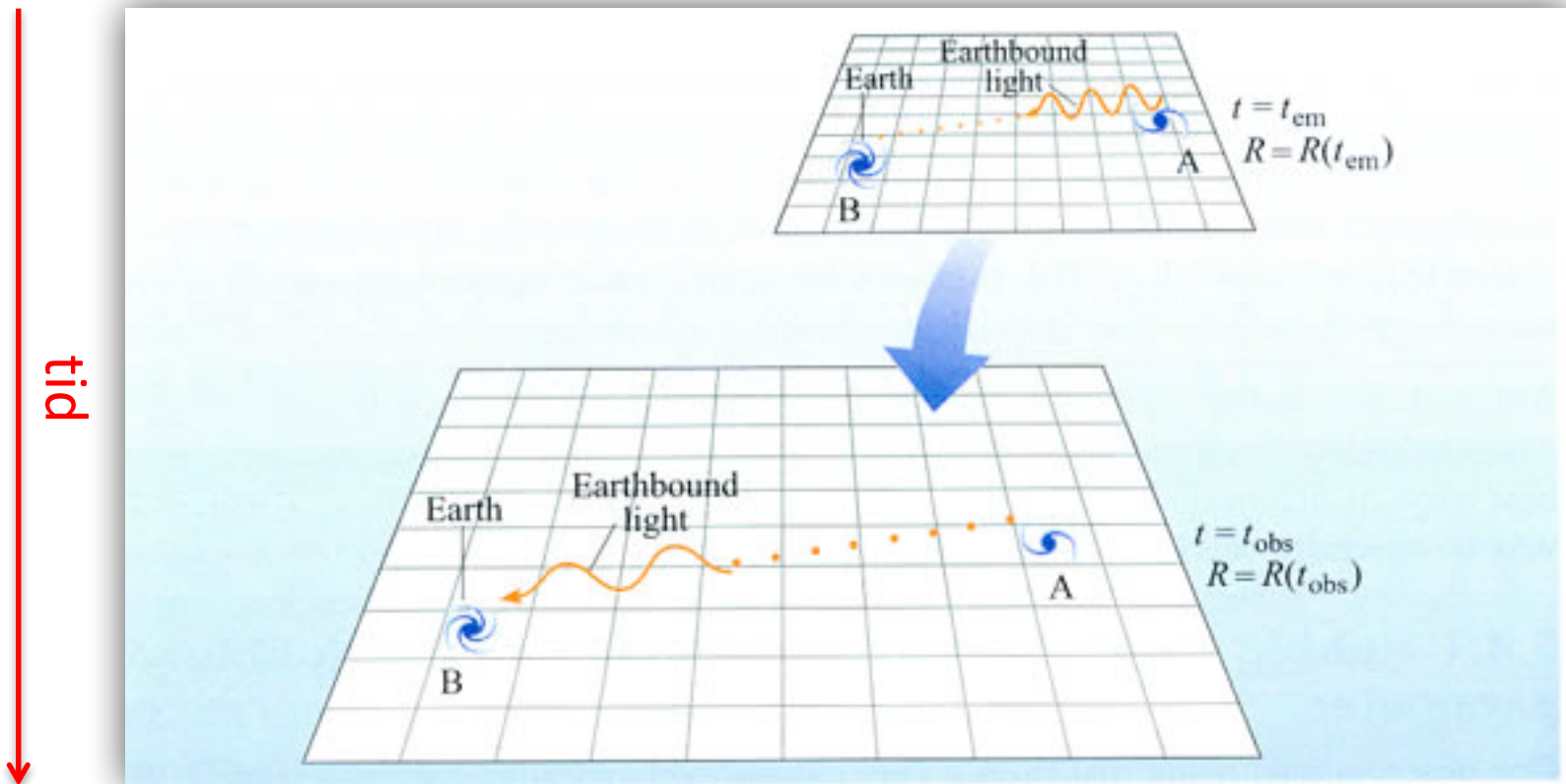
mindre



indtil...



Universets udvidelse



Universets længdeskala, $R(t)$, varierer (vokser) som funktion af tiden

FLRW catalogue of Universes

$$\Lambda > 0$$

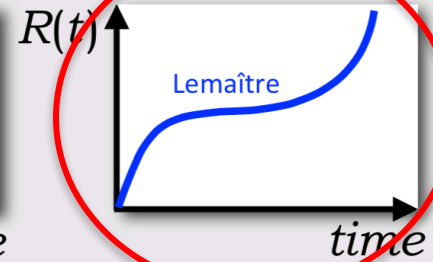
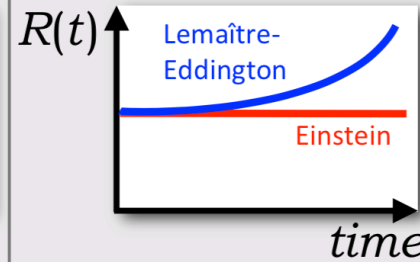
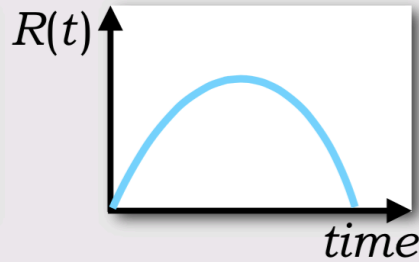
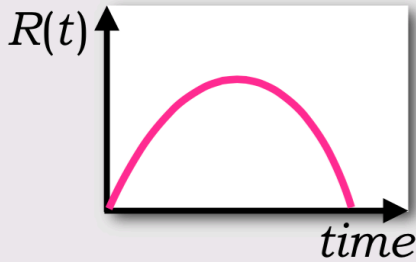
$$\Lambda < 0$$

$$\Lambda = 0$$

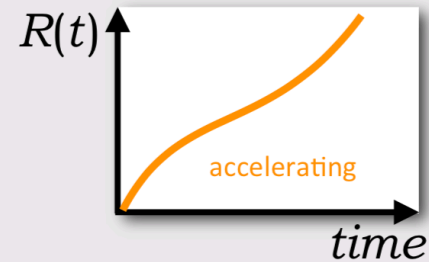
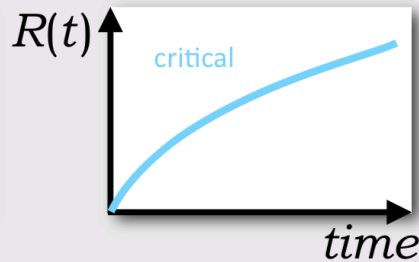
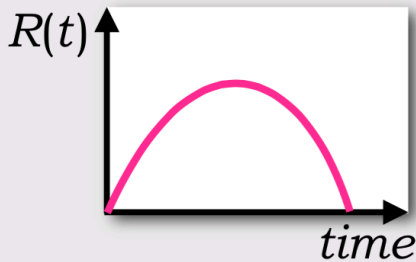
$$\Lambda = \Lambda_E$$

$$\Lambda > \Lambda_E$$

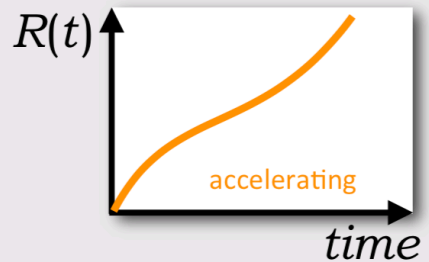
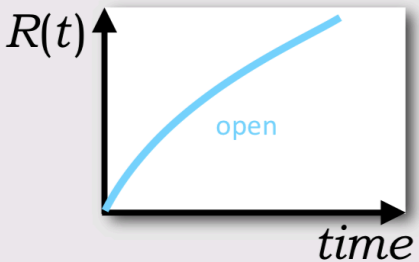
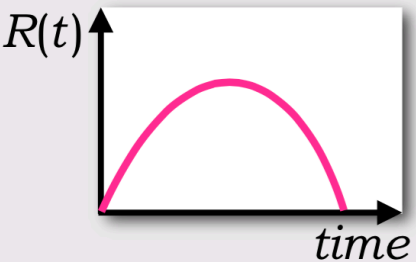
$$k = +1$$



$$k = 0$$

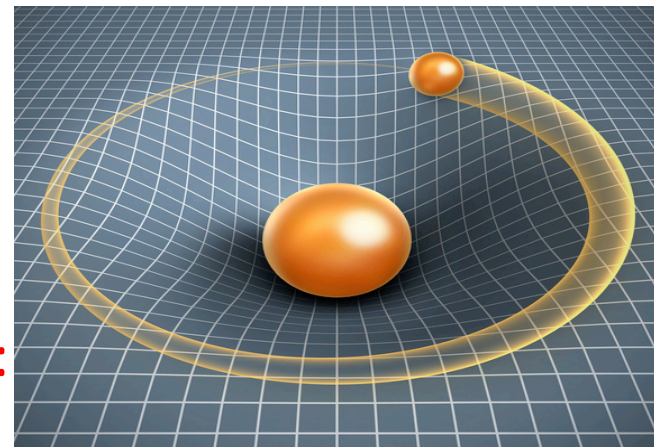


$$k = -1$$



Vort

Einstein og gravitation



Einstein skaffede sig af med **tyngde-kraften**:

- Massive legemer krummer rumtiden
- Den korteste vej mellem to punkter i rummet er den vej lyset tager
- Massive legemer bevæger sig ligeledes på såkaldte geodætiske baner

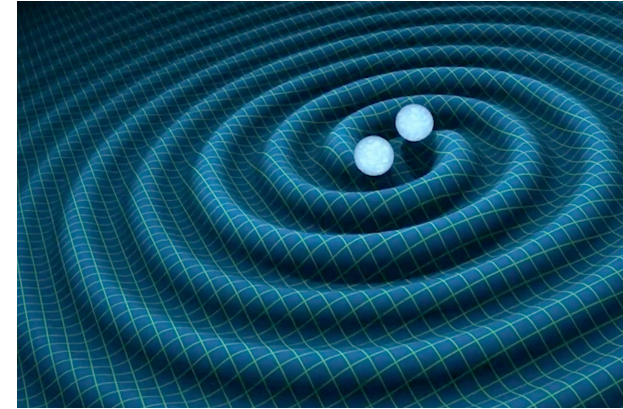
I den almene relativitetsteori er gravitation ikke en kraft, men en “topografi” af legemer, der tager den korteste vej i en krum rumtid

“Matter tells spacetime how to bend and spacetime returns the compliment by telling matter how to move”

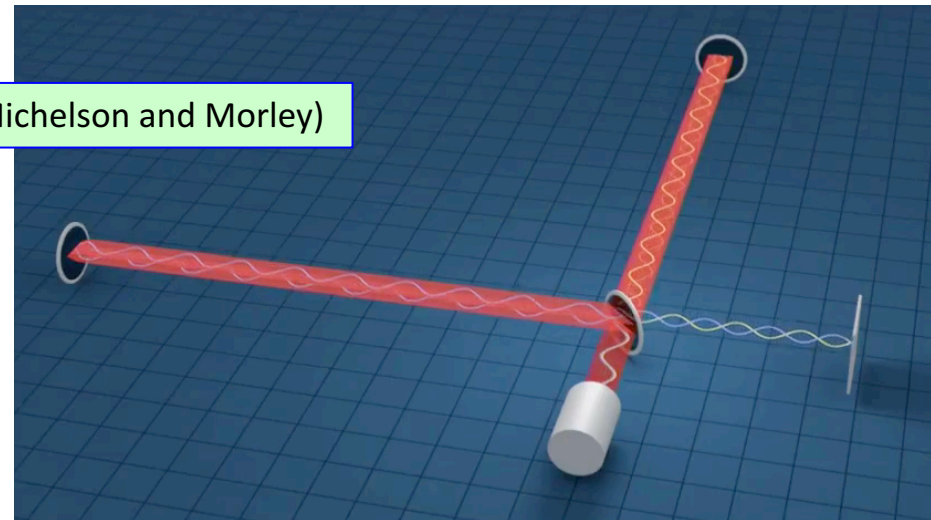
John Wheeler

Gravitationsbølger

- Forudsigelse: Hvis rumtiden kan **krumme**, kan den også **bølge**
 - Meget svagt fænomen; kun målelig effekt fra meget dramatiske hændelser i Universet. Fx. to sorte huller der “spiser hinanden”
- LIGO eksperimenter observerede for første gang et signal fra gravitationsbølger 14. september 2015



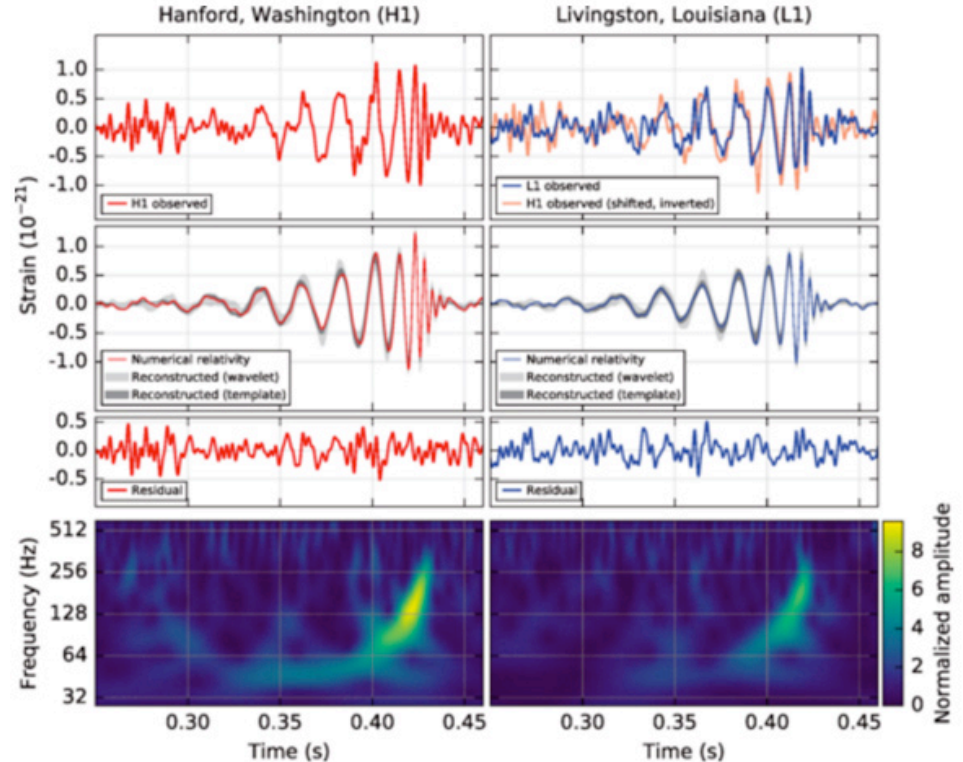
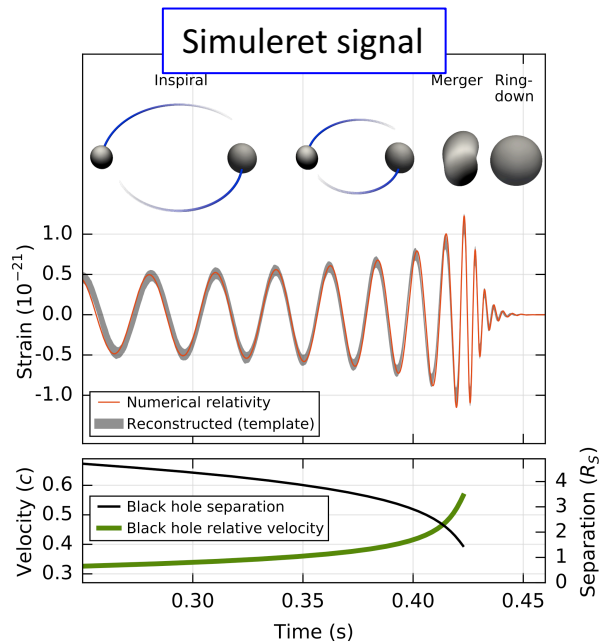
Interferometer (à la Michelson and Morley)



Extrem lille effekt observeret: Over 3 km en strækning af rummet på 10^{-18} m

Gravitationsbølger

To "identiske" interferometre 4000 km fra hinanden observere samme signal.



Hvad man har regnet sig frem til:

- Begivenheden skete mere end en milliard lysår væk
- To sorte huller spiste hinanden: 36 + 29 solmasser → 62 solmasser
- Energi tilsvarende 3 solmasser udstråledes som gravitationsbølger på brøkdelen af et sekund
- I det korte tidsrum større udstrålt effekt end summen af samtlige stjerner i synligt univers

GPS-systemet og relativitet

Et GPS-modul beregner sin position via modtagne signaler fra meget præcise ure i et sæt af 24 satelliter.

Speciel relativitet

Lyshastigheden er den samme i enhver retning

Speciel relativitet

Idet satellitterne bevæger sig i forhold til jordoverfladen (14.000 km/t), taber satellit-urene 7.1 mikro-sekunder pr. døgn

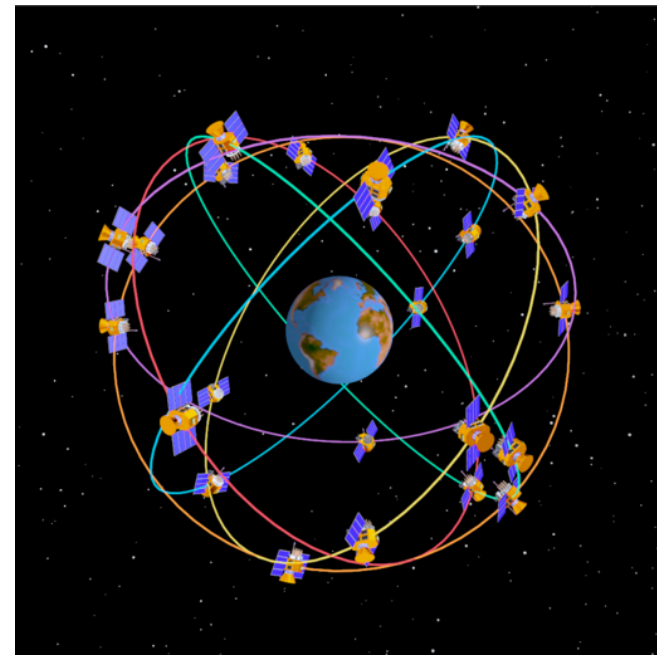
Generel relativitet

Idet satellitterne flyver i 20.000 km højde, er tyngdekraften kun omkring 1/17 af den ved jordoverfladen. Satellit-urene vinder dermed 45.7 mikro-sekunder pr. døgn.

Relativitet - totalt

Sammenfattende vinder satellit-urene $45.7 - 7.1 = 38.6$ mikro-sekunder pr. døgn.

Hvis man ikke korrigerede for dette, ville man få en stadigt voksende fejlvisning på omkring 10 km pr døgn.

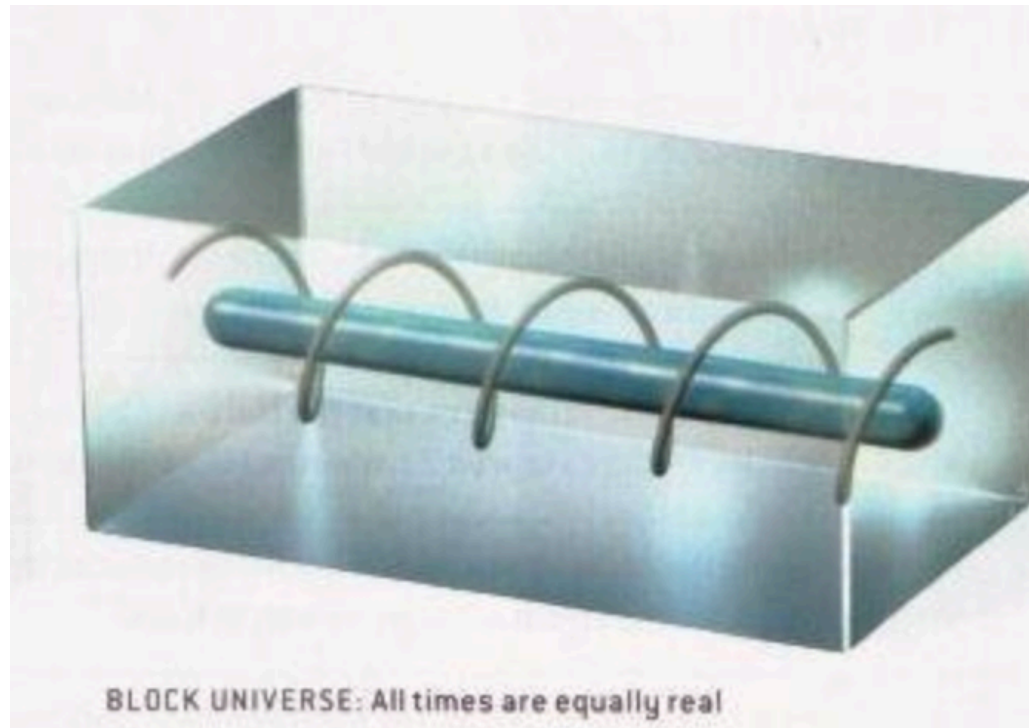


Program

- Tiden i den klassiske mekanik
- Einsteins teorier
- Den specielle relativitetsteori
 - Tiden relativiseres
 - “Nuet” relativiseres
- Den generel relativitetsteori
 - Krumning af rumtiden
- **Relativitetsteorien og Nuet**
- Tidens retning i Naturen
- Genfødsel af tidsbegrebet?
- Afslutning

Block Universe

- Problemet med at definere "nuet" har ledt til at introduktionen begrebet "block Universe", hvor alle tider opfattes som reelle og ligeværdige.
- Begrebet fortid, nutid og fremtid opfattes som en illusion.



Einstein om tidens realisme

I kondolancebrev til hustruen ved sin vens, Michele Bessos, død

“Now he has departed from this strange world a little ahead of me. This means nothing. People like us, who believe in physics, know that the distinction between past, present, and future is only a stubbornly persistent illusion”

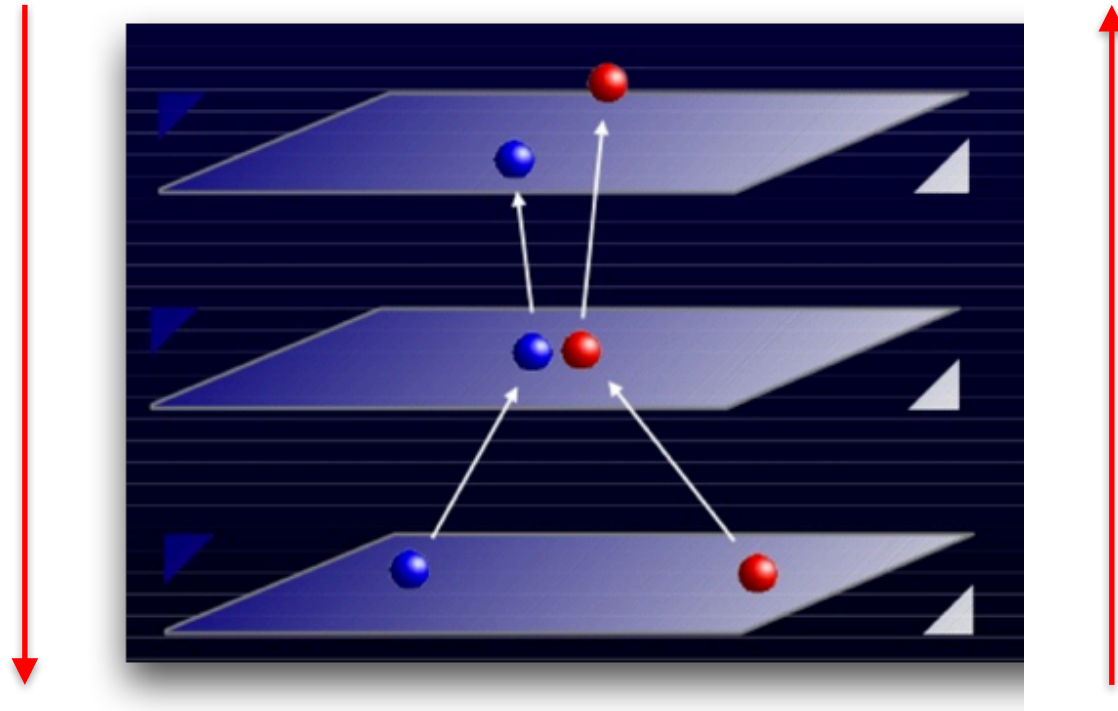
Men efter samtale med østrisk filosof, Rudolf Carnap:

“Once Einstein said that the problem of Now worried him seriously. He explained that the experience of the Now means something special to man, something essentially different from the past and the future, but that this important difference does not and cannot occur within physics. That this experience cannot be grasped by science seemed to him a matter of painful but inevitable resignation”

Program

- Tiden i den klassiske mekanik
- Einsteins teorier
- Den specielle relativitetsteori
 - Tiden relativiseres
 - “Nuet” relativiseres
- Den generel relativitetsteori
 - Krumning af rumtiden
- Relativitetsteorien og **Nuet**
- Tidens retning i Naturen
- Genfødsel af tidsbegrebet?
- Afslutning

De kendte naturlove har ingen tidsretning



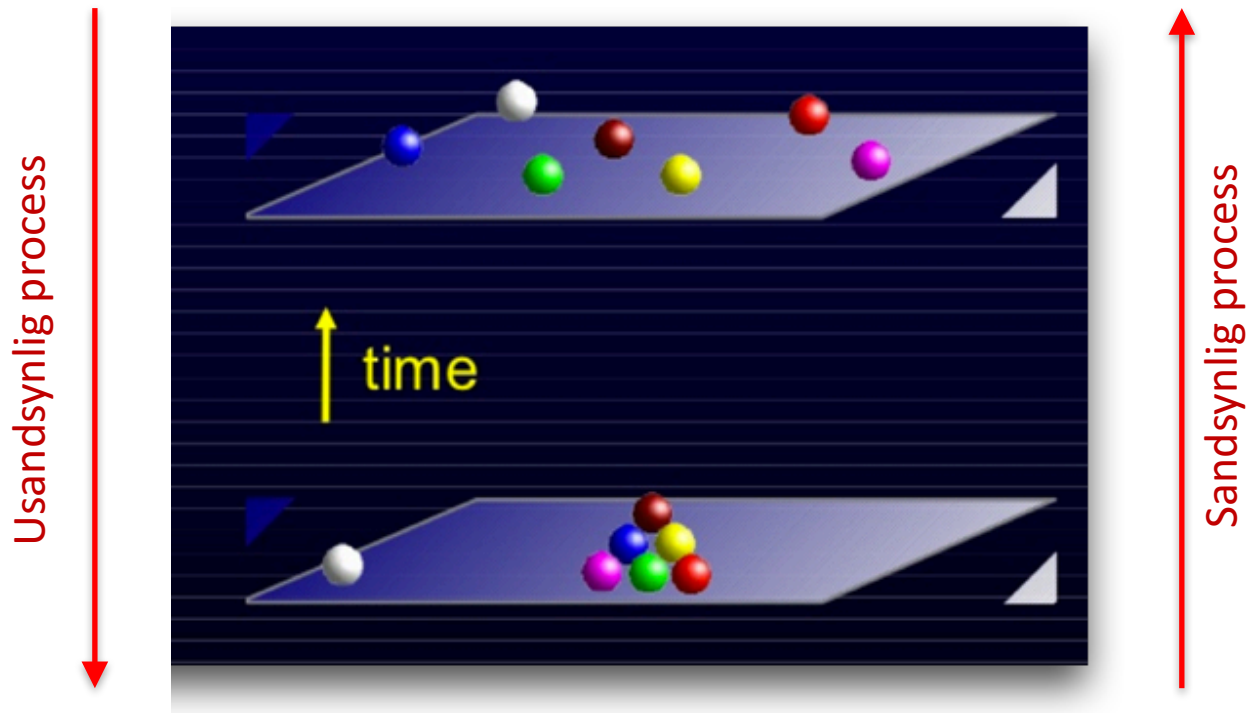
Figuren beskriver med lige stor ret begge tidsretninger

Samme *tidsretningsinvarians* er tilfældet for kendte alle fysiske lovmæssigheder:

- Klassisk mekanik
- Kvantemekanik
- Standardmodellen for elementarpartikler (med en lille undtagelse)

Tidsretningen i naturen (i)

Tidsretningen i naturen opstår, når man har en “usandsynlig” begyndelsestilstand



Begge retninger er tilladte af de fysiske lovmæssigheder.

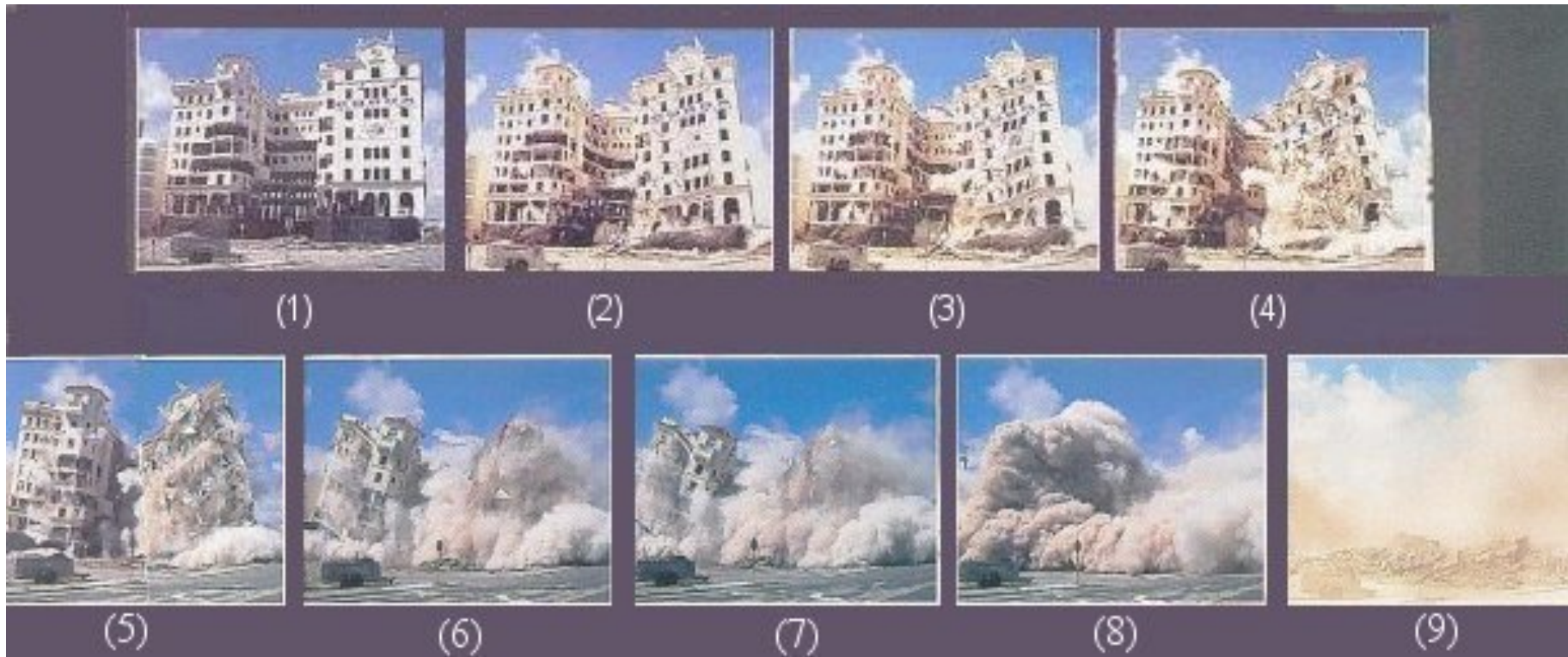
Men processen fra høj orden til lav orden er langt mere sandsynlig.

Statistisk lov:

Termodynamikkens 2. hovedsætning:

Graden af uorden tenderer til at stige i et isoleret system

Tidsretningen i naturen (ii)



Newtons love siger intet om, i hvilken retning denne “film” kører.

- Begge retninger tilfredsstiller Newtons love.

Men vi ved alle, at filmen skal læses fra høj grad af orden til lav grad af orden

Universet synes at udvikle sig mod mere og mere struktur

Flow af energi gennem et åbent system skaber struktur og kompleksitet

- I Universet observeres struktur og kompleksitet på mange niveauer lige fra galaksehobe til biologiske molekyler;
- Ved observation af Universet ses ikke direkte den stigende uorden dikteret af 2. hovedsætning. Uordenen optræder fortrinsvis i form af varmestråling
- Fra Solen modtager Jorden energi, som efter omdannelse til lavere temperatur sendes ud i universet. Uordenen eksporteres væk fra Jorden. Energi-flowet skaber betingelser for liv. Udvikling over 4 milliarder år.
- Drivende kraft for kompleksitet: Temperaturforskelle altså stjerner;



Program

- Tiden i den klassiske mekanik
- Einsteins teorier
- Den specielle relativitetsteori
 - Tiden relativiseres
 - “Nuet” relativiseres
- Den generel relativitetsteori
 - Krumning af rumtiden
- Relativitetsteorien og **Nuet**
- Tidens retning i Naturen
- **Genfødsel af tidsbegrebet?**
- Afslutning

“Time Reborn”

I sin bog, *Time Reborn*, argumenterer **Lee Smolin** for, at en genfødsel af *tiden* er nødvendig for at opnå en dybere forståelse af Universet.

- Kort sagt mener han, at den ledende trend indenfor kosmologien er på afveje
- Den største “misforståelse” er at benytte lovmæssigheder, vi har udledt fra observation af isolerede dele af Universet, på hele universet.
 - Eksempel: Universets fødsel som skabelsen af et sort hul, blot baglæns.
 - Herved opstår tiden ved universets fødsel.
 - Meningsløst at spørge, hvad der var før Universets fødsel.
 - Men hvad igangsatte Universets fødsel?
 - Nogle mener, at algebra er mere fundamental end tid og rum, og at algebraen fødte disse. Men hvor residerede algebraen før Universet? Udenfor Universet? Er der noget “udenfor Universet”. Er ikke Universet **alt** vi har?
 - Hvor kommer naturlovene fra? Fra algebraen?
- Nuværende ledende trend i kosmologien: **Multivers:**
 - Efter Big Bang fulgte en kort periode med inflation – dramatisk udvidelse af rummet
 - Uendelig mange universer blev skabt som bobler
 - Forskellige universer har forskellige, *tilfældige* naturkonstanter og love.
 - Hvorfor har konstanterne de værdier vi observerer? Det antropiske princip: Fordi vi, menneskene er her. Videnskabelig fallit!

Smolins program for en ny kosmologi

Program for/krav til en ny kosmologisk teori:

- Må indeholder alt vi allerede ved om naturen
- Må være videnskabelig: Må kunne falsificeres, altså levere målbare forudsigelser
- Skal kunne besvare spørgsålet “Hvorfor disse naturlove”
- Skal kunne besvare spørgsmålet “Hvorfor disse begyndelsestilstande”

Smolin konkluderer, at den eneste måde hvorpå man kan formulere en videnskabelig kosmologi med målbare forudsigelser er, at naturlovene udvikler sig over tid(!)

- Mange (uendelig mange?) universer, der følger i tidslig sekvens.
 - *Kosmologisk naturlig selektion*. Lidt a la biologi (Darwin)
- En hypotese (blandt flere):
 - Hvert sort hul giver ophav til et nyt univers.
 - Universer med mange sorte huller har flest arvtagere.
 - Universers egenskaber “arves” på en eller anden måde.
 - Størst sandsynlighed for at vi befinder os i et univers med mange sorte huller.
 - Sorte huller opstår af kollapsende stjerner (omkring 10^{18} i vort univers)
 - Altså mange stjerner. Stjerner er nødvendige for liv.
 - Så optimering for sorte huller betyder sandsynligvis også optimering for liv.

Tidens genfødsel og kvantemekanikken

- Kvantemekanikken leverer en ekstrem succesrig beskrivelse af mikroskopiske systemer
 - Næsten halvdelen af den vestlige verdens økonomi baseret på kvantemekanik
- Kvantemekanikken leverer ingen beskrivelse af, hvad der sker “i virkeligheden”, men giver udelukkende (statistiske) forudsigelser om udfaldet af en **måling**.
 - Teorien forudsætter målinger: Uden måling ingen information. Men hvad udgør en måling? Kan fx en kat måle? Kan Schrödingers kat måle?
 - Measurement problem!
- Findes der en deterministisk kvantemekanik (som altså giver en reel beskrivelse og ikke udelukkende sandsynligheder ved målinger)?
 - John Bell (1964): Bells ulighed: Nej, ikke med *lokale* skjulte variable.
 - *Lokale*: Kommunikation med mindre end lyshastighed
 - Kun mulig ved brud på relativitetsteorien
 - Der skal findes en foretrukket iagttagelse: Absolut hvile skal findes.

Tidens genfødsel og relativitetsteorien

- Argumentet for blok-universet baserer sig på *relativiteten af samtidighed*.
- Hvis tiden er reel, således at der findes et **nu**, som for alle iagttagere separerer fortiden fra fremtiden, så må der findes en *foretrukket global tid*.
 - *Global*: Denne tid strækker sig ud gennem hele universet.
 - Direkte modstrid med relativitetsteorien
- Der findes et foretrukket inertialsystem: Systemet i forhold til hvilket universet er i hvile.
Big-Bang-systemet
 - Fra CMB-målinger: Vi (solsystemet) bevæger os 630 km/s i forhold til Big-Bang-systemet
- Hvad med den gravitationelle tidsforlængelse?
 - *Shape dynamics*: Den almene relativitetsteori kan reformuleres, så man i stedet for gravitationel tidsforlængelse får ændring i længdeskalaen.
 - Samme globale tid for alle mulig.



“Now, The Physics of Time”

Richard Muller argumenterer i sin bog ligeledes for en genfødsel af tiden og for at begrebet **Nu** er noget af det mest reelle mennesker oplever

Han fremfører en hypotese om, hvor tiden kommer fra:

- Vi ved, at universet hele tiden udvider sig. Der bliver stedse skabt mere rum
- Hypotesen er, at hvis universet skaber rum, så skaber det også tid.
- Tiden, der bliver skabt, er **nuet** vi lever i.
- Denne nye tid skabes i Universets hvilesystem – hvor ellers?
- Så Muller synes at gå i samme retning som Smolin: Universet har et globale **nu**, der bryder med relativitetsteorien.
- Muller fremfører målbare forudsigelser af sin teori:
 - Vi observerer, at Universet har en accelereret udvidelse. På samme måde vil tiden have accelereret. Tiden gik langsommere før end nu. Et ekstra bidrag til rødforskydningen af fjerne stjerner.
 - I forbindelse med sammensmeltningen af to sorte huller skabes nyt rum. Dermed også ny tid. Skulle kunne observeres ved kraftige tyngdebølgesignaler.

Program

- Tiden i den klassiske mekanik
- Einsteins teorier
- Den specielle relativitetsteori
 - Tiden relativiseres
 - “Nuet” relativiseres
- Den generel relativitetsteori
 - Krumning af rumtiden
- Relativitetsteorien og **Nuet**
- Tidens retning i Naturen
- Genfødsel af tidsbegrebet?
- **Afslutning**

Afslutning (i)

- Med Newtons matematiske beskrivelse af verden argumenteres der for, at verden – givet nok information – ville være fuldstændig deterministisk
 - Fra fuld information fra nuet kan man regne tilbage til al fortid og frem til al fremtid. Dette ville imidlertid kræve information om hele universet.
- Med relativitetsteorien mister begrebet tid sin globale karakter
 - Hver iagttager har sin egen personlige tid, som afhænger af ens bevægelse; samtidighed er relativ, hvilket betyder at, der ikke findes noget globalt **nu**, tiden går langsommere i tyngdefelter, og kan gå helt i stå set udefra
- Alt ialt har dette ledt mange store tænkere (tildels også Einstein) til at opgive tiden som et reelt fysisk fænomen
 - I blok-universet regnes alle tider for at være tilsvarende reelle, nuet er ikke mere reel end fortid og fremtid
 - Menneskets opfattelse af tidens gang er da en illusion
- Ifølge den konventionelle kosmologi opstår rum og tid ved Big Bang
 - En moderne trend antager, at der opstår et *multivers* (uendeligt mange kausalt adskilte universer, hver med egne naturkonstanter) via bobler under inflation
 - Multivers-teorien forudsiger ingen (eller få/svage) målbare konsekvenser
 - Naturkonstanternes værdier i vort univers “forklares” via det antropiske princip

Afslutning (ii)

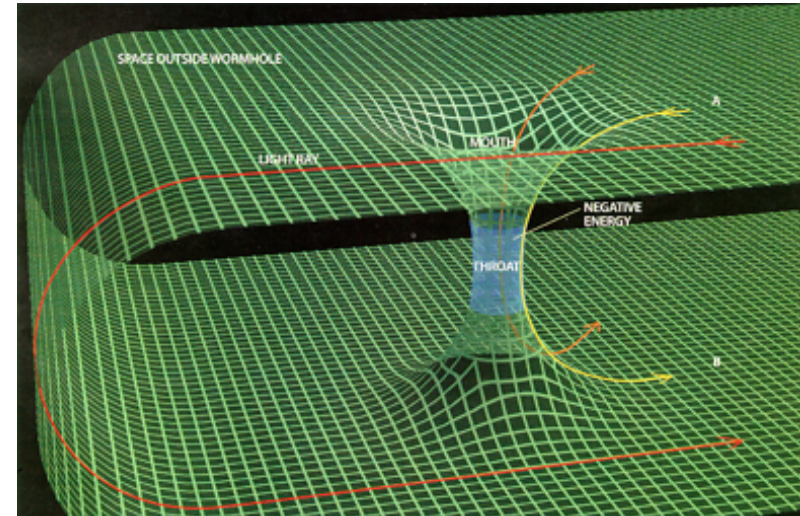
- Smolin argumenterer i “Time Reborn” mod den gængse kosmologi og foreslår ambitiøse regler for en ny kosmologisk teori;
 - Argumenterer for, at det kræver en genfødsel af tiden som en reel fysisk størrelse at forklare Universet og naturlovene
 - Interessante tanker omkring fastlæggelse af naturkonstanterne gennem naturlig udvælgelse
 - Argumenterer for, at et foretrukket referencesystem gives ved Big-Bang-systemet
 - Hvis et sådant system kan defineres, vil det kunne give en global tid for universet, og også tillade kvantemekanikken at blive en egentlig fysisk teori og ikke udelukkende en teori for målinger
 - Mig: Kausalitet?
- Muller argumenterer i “Now” ligeledes for, at vi har brug for at tage begrebet **nu** alvorligt, idet dette spiller en afgørende rolle i menneskers liv og i vores opfattelse af Naturen
 - Foreslår, at ny tid hele tiden skabes i Universet på samme måde som rum skabes ved Universets udvidelse. Den ny tid udgør nuet.

Tak for opmærksomheden!

Ekstramateriale

Rejse tilbage i tiden?

- Konstruér et ormehul
- Forhindr det i at lukke – kræver negativ energi
- Fæst én ende til Jorden, den anden til et rumskib
- Rejs langt væk med høj hastighed. Tager kort tid for dig, lang tid set fra Jorden.
- Rejs tilbage stadig med ormehullet forbundet med rumskibet.
- På Jorden har nu ormehullet to tragte, som er forbundet til forskellige tider. Hop igennem og rejs frem eller tilbage, som du lyster.
- Ingen vil kunne rejse tilbage til en tid før den første tidsmaskine bliver konstrueret.
- Alvorlige problemer med kausalitet: Ville synes at kunne forhindre fx. sin egen fødsel.



Science fiction:
Næppe nogensinde
muligt i praksis

Rum + tid = Rumtid

- I relativitetsteorien sker en *sammenblanding af tid og rum*.

- Transformationsligninger fra én iagttager til en anden i relativ bevægelse med hastighed v

To begivenheder 1 og 2:

Afstanden mellem dem: $\Delta x = x_2 - x_1$, etc....

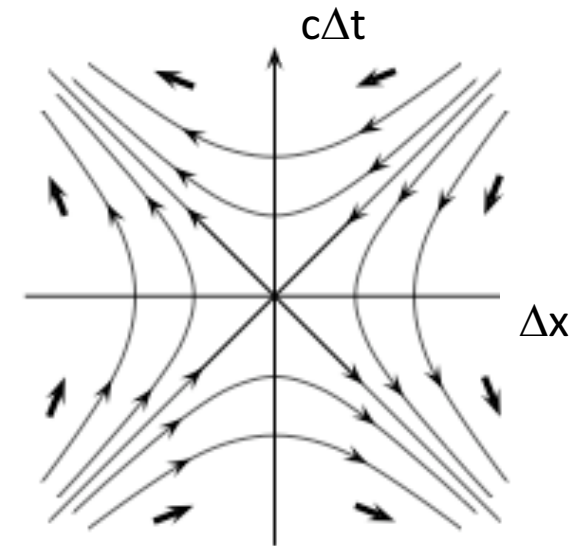
$$\begin{aligned}\Delta x' &= \Delta x \\ \Delta y' &= \Delta y \\ \Delta z' &= \Delta z \\ \Delta t' &= \Delta t\end{aligned}$$

Klassisk



$$\begin{aligned}\Delta x' &= \gamma (\Delta x - v\Delta t), \\ \Delta y' &= \Delta y, \\ \Delta z' &= \Delta z, \\ \Delta t' &= \gamma (\Delta t - v\Delta x/c^2).\end{aligned}$$

Relativistisk



- Rum og tid sammenblandes.
Rum og tid er sammenknyttede => **rum + tid = rumtid**

3 + 1 = 4 dimensionel verden

Invarians i det normale 3D rum

Vi kender begrebet invarians fra rummet.

Lad os betragte et 2D eksempel.

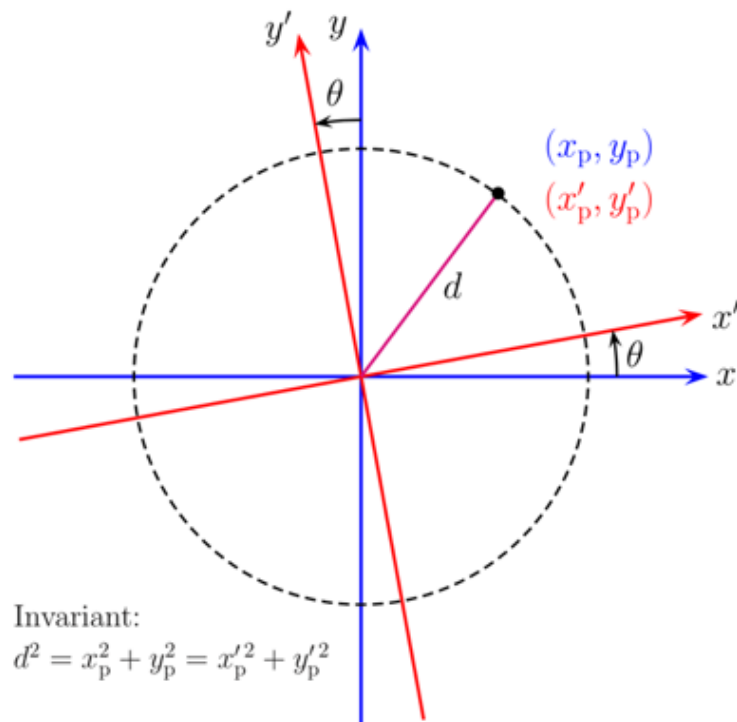
Her to orienteringer af koordinataksene.

Vi ved, at afstanden d af et punkt fra origo er invariant overfor rotation af koordinatsystemet (har samme værdi uanset orienteringen):

$$d^2 = x_p^2 + y_p^2 = x_p'^2 + y_p'^2$$

Ligningen $d^2 = x_p^2 + y_p^2$ beskriver en cirkel med radius d .

Samtlige punkter i samme afstand fra origo ligger altså generelt på en cirkel.



Invarians i rumtiden

Lad os betragte et 2D eksempel.

Her koordinaterne ct og x . [Vi tænker os fx., at $y=z=0$.]

Vi ved da, at størrelsen

$$s^2 = c^2 t_p^2 - x_p^2$$

er invariant: Samme værdi fra ethvert inertialsystem

Vigtig forskel m.h.t. rummet: Bemærk det **relative minustegn** mellem de to koordinater (tid og rum)

Begivenheder (punkter i rumtiden) med samme "afstand" fra origo ligger da ikke på en cirkel, men på en *hyperbel*.

Specielt, hvis $s^2 > 0$ er

$$s^2 = c^2 t_p^2 - x_p^2 = c^2 \tau^2$$

hvor τ er egentiden.

Målt på et ur der følger bevægelsen går der altså lige lang tid, hvis man rejser på en ret linje (jævn hastighed) fra origo til ethvert punkt på hyperblen

Man ældes altså lige meget ved rejse fra origo til ethvert punkt på hyperblen.

