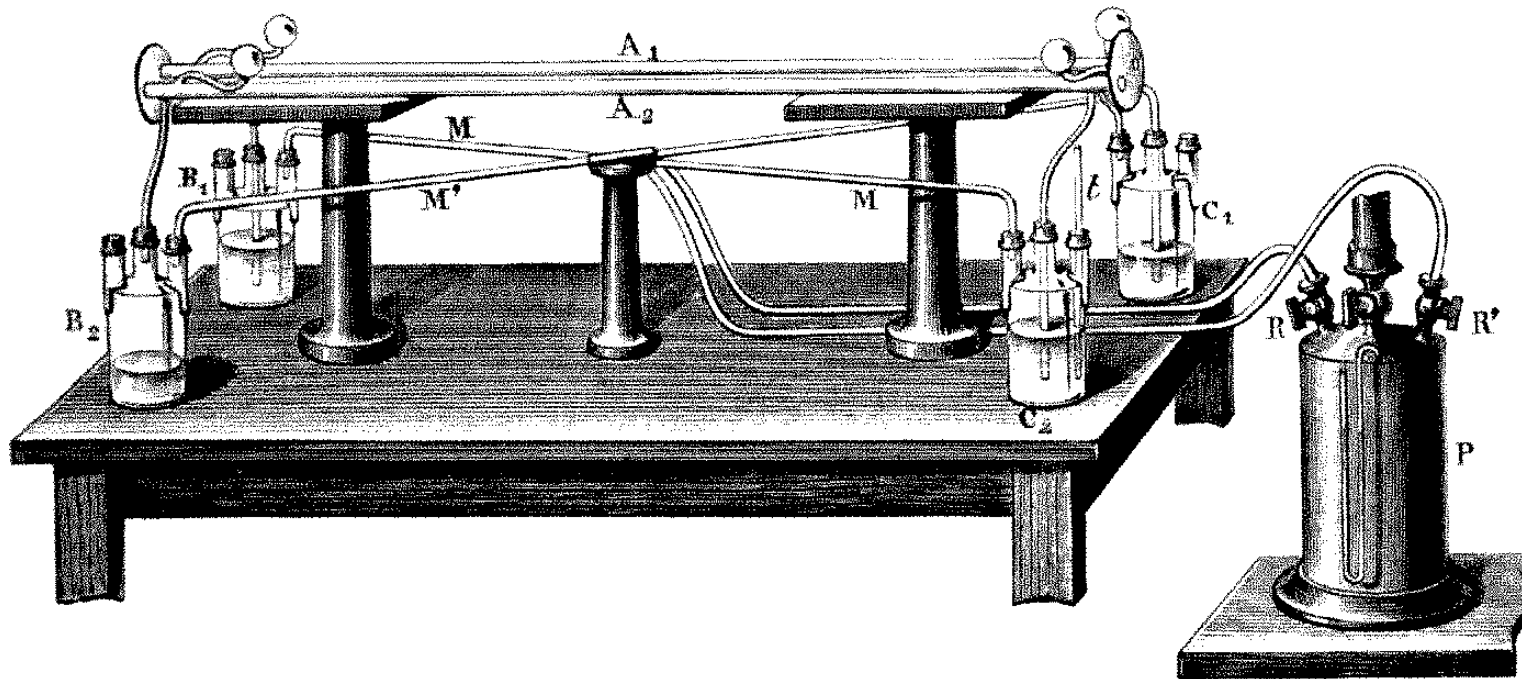
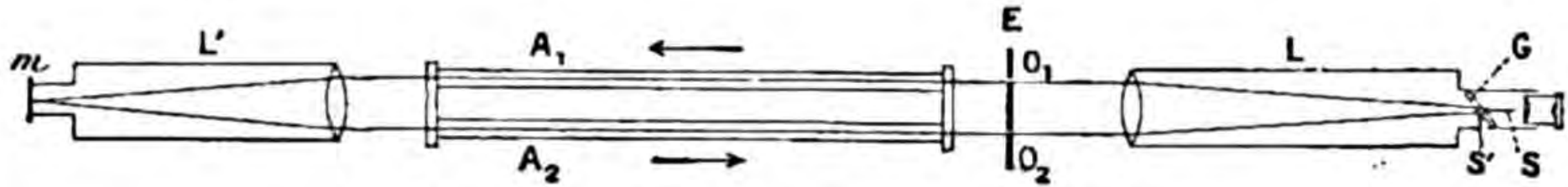


# Experiment von Hippolyte Fizeau 1851

Einstein: eines der für ihn wesentlichen Experimente  
Lichtgeschwindigkeit in bewegtem Wasser  
bestätigte fresnelschen Mitführungskoeffizienten



Strahl von Quelle  $S$  durch Glasplatte  $G$ , durch Linse  $L$  parallel weitergeführt  
durch Schlitze  $O_1$ ,  $O_2$  in Kanäle  $A_1$ ,  $A_2$ , die entgegengesetzt von Wasser mit  $v$  durchströmt  
Spiegel  $m$  im Fokus von Linse  $L'$  dreht Strahlen so, dass je einer nur mit/gegen  $v$  läuft  
Strahlen interferieren bei  $S'$

Streifenverschiebung sobald Strömung -> Fresnels Mitführungskoeffizient; Äther vom Wasser mitbewegt:  $c' = c/n + v(1-1/n^2)$

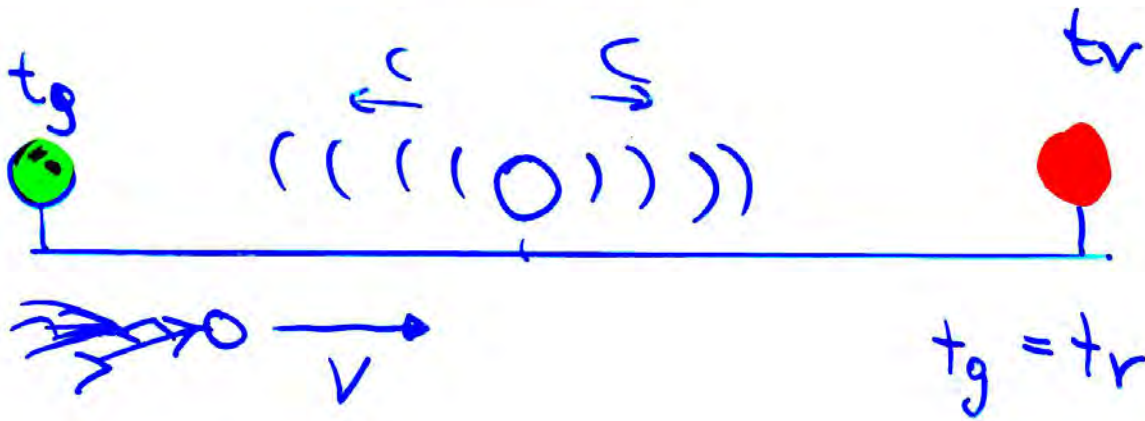
Fresnel'sche Mitführung:

$$u \approx \frac{c}{n} + v \left( 1 - \frac{1}{n^2} \right)$$

"The amount of the shift is less than would correspond to the full velocity of the water and also agrees numerically with a coefficient  $1/\mu^2$ , if the uncertainty of the observations is taken into account." (Pieter Zeeman, Proc. Kon. Acad. Van Wetenschappen, Amsterdam)

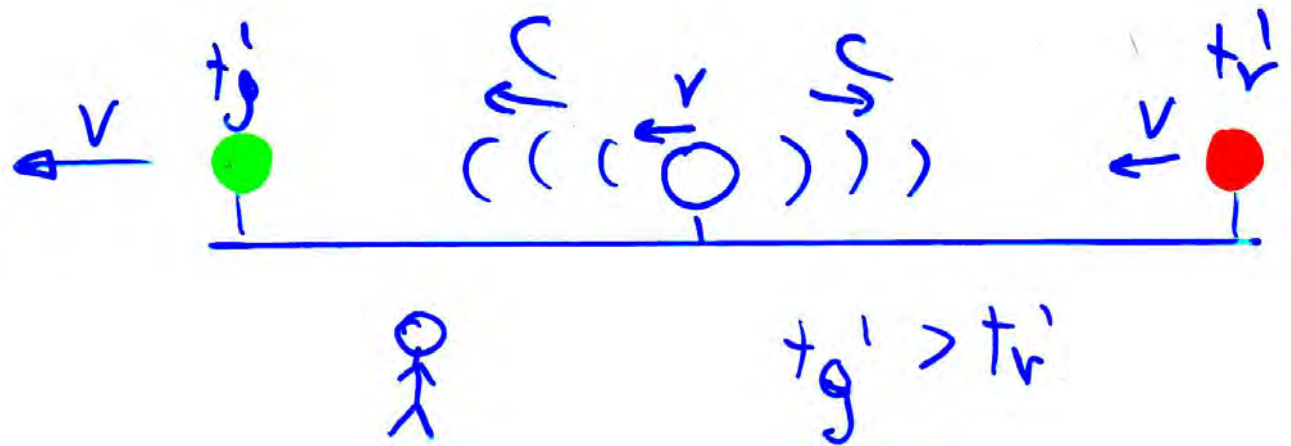


LABOR



Relativität der  
Gleichzeitigkeit

ASTRONAUT



# Adding Relativistic Velocities

OBSERVE  $v$  FROM VARIOUS  
 $\Sigma', \Sigma'', \dots$

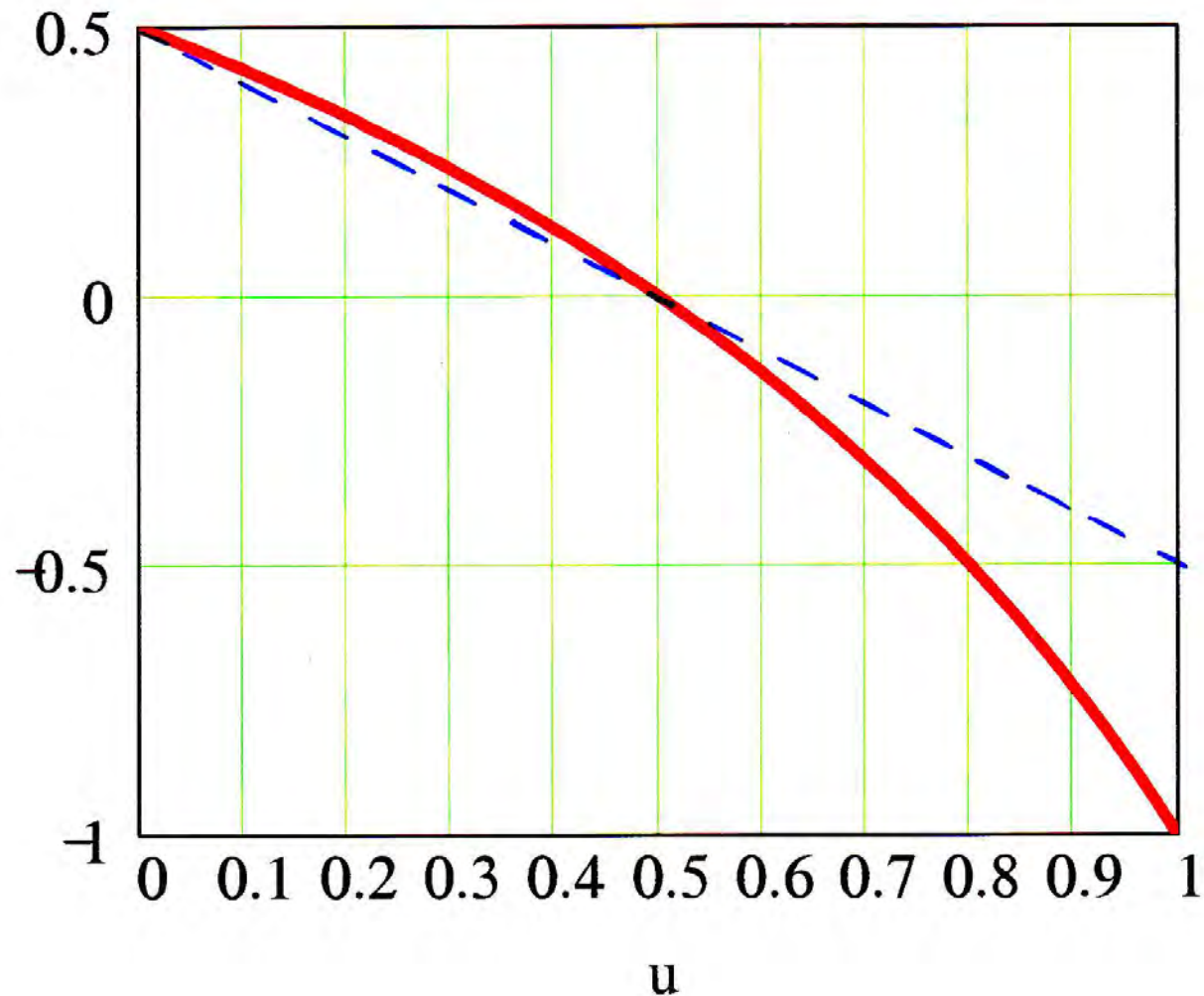
$c := 1$  unit is  $c$

$u := 0, 0.01 \dots 1$  velocity of  $\Sigma'$  in  $\Sigma$  in units of  $c$

$v := 0.5$  velocity of a particle

$$vv(v, u) := \frac{(v - u)}{\left[1 - \frac{(u \cdot v)}{c^2}\right]}$$

$vv(v, u)$



Einstein-c

Relativistische Geschwindigkeitsaddition

$$v_x = \frac{v'_x + u}{1 + \frac{v'_x u}{c^2}}$$

Lichtgeschwindigkeit im Medium  $v'_x = c / n$

Geschwindigkeit des Mediums  $u$

Geschwindigkeit  $u$  im Laborsystem:

$$v_x = \frac{\frac{c}{n} + u}{1 + \frac{u}{nc}} = \frac{c}{n} \frac{1 + \frac{un}{c}}{1 + \frac{u}{nc}}$$

Taylorentwicklung nach  $u$  in 1. Ordnung (weil  $u \ll c / n$ ):

$$v_x = \frac{c}{n} + u \left( 1 - \frac{1}{n^2} \right)$$

passt zu Fizeau!

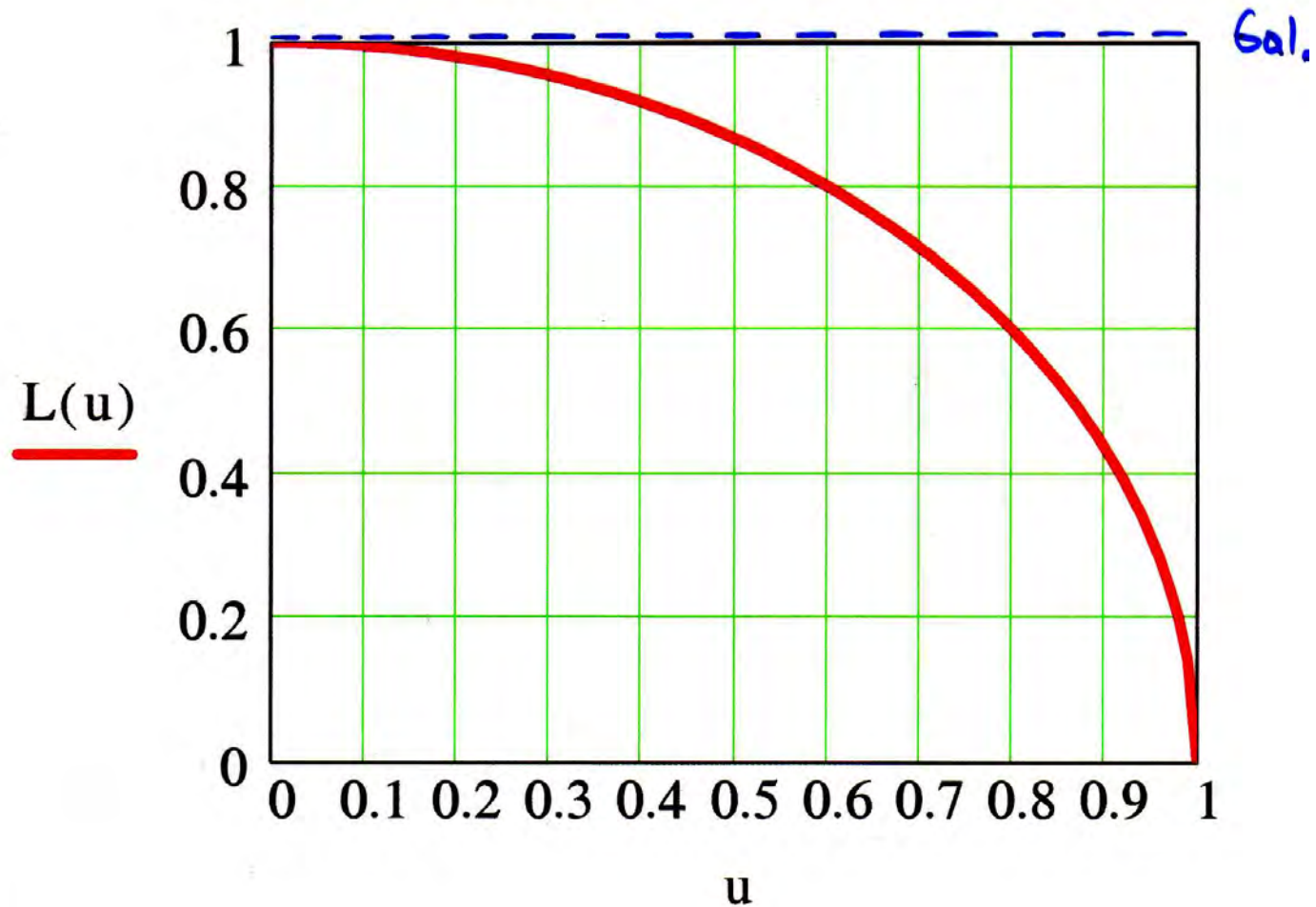
# Length contraction

$c := 1$                       unit is  $c$

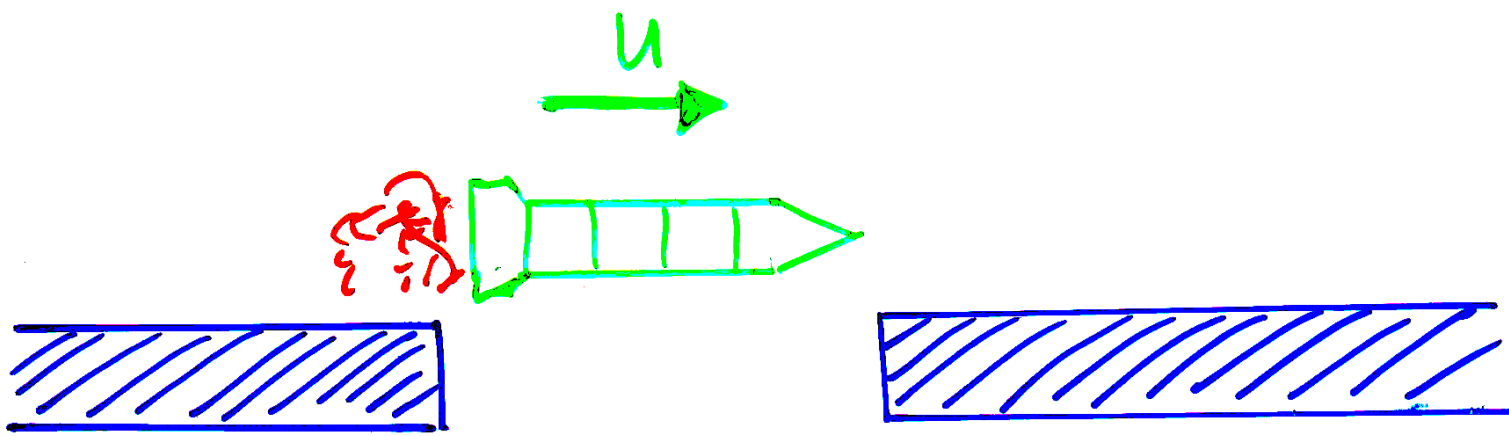
$u := 0, 0.01 .. 1$         velocity of  $\Sigma'$  in  $\Sigma$  in units of  $c$

$L_0 := 1$                       Length of an object in rest frame  $\Sigma'$

$$L(u) := \sqrt{\left[ 1 - \left( \frac{u}{c} \right)^2 \right]} L_0$$



Einstein-d



$\Sigma_{TOR}$  : Rakete (von 30m) auf 15m  
kontrahiert

Tor 20m  $\rightarrow$  seitlich reinschieben

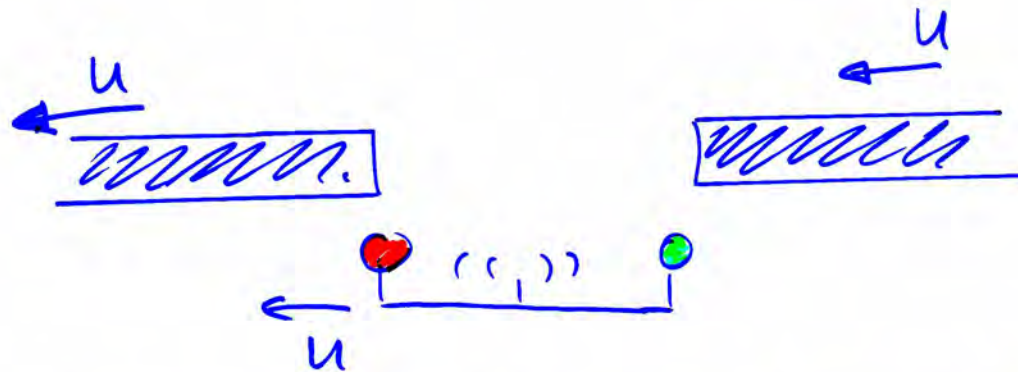
$\Sigma_{Rakete}$  : Rakete 30m

Tor auf 10m kontrahiert

Wie paßt die Rakete ins Tor?



$\Sigma$ : Bauer hat Anfang und Ende gepackt und einfach gezogen.



$\Sigma_{\text{Rakete}}$ : • läuft auf Trigger zu  
Spitze bei • bevor Ende bei •



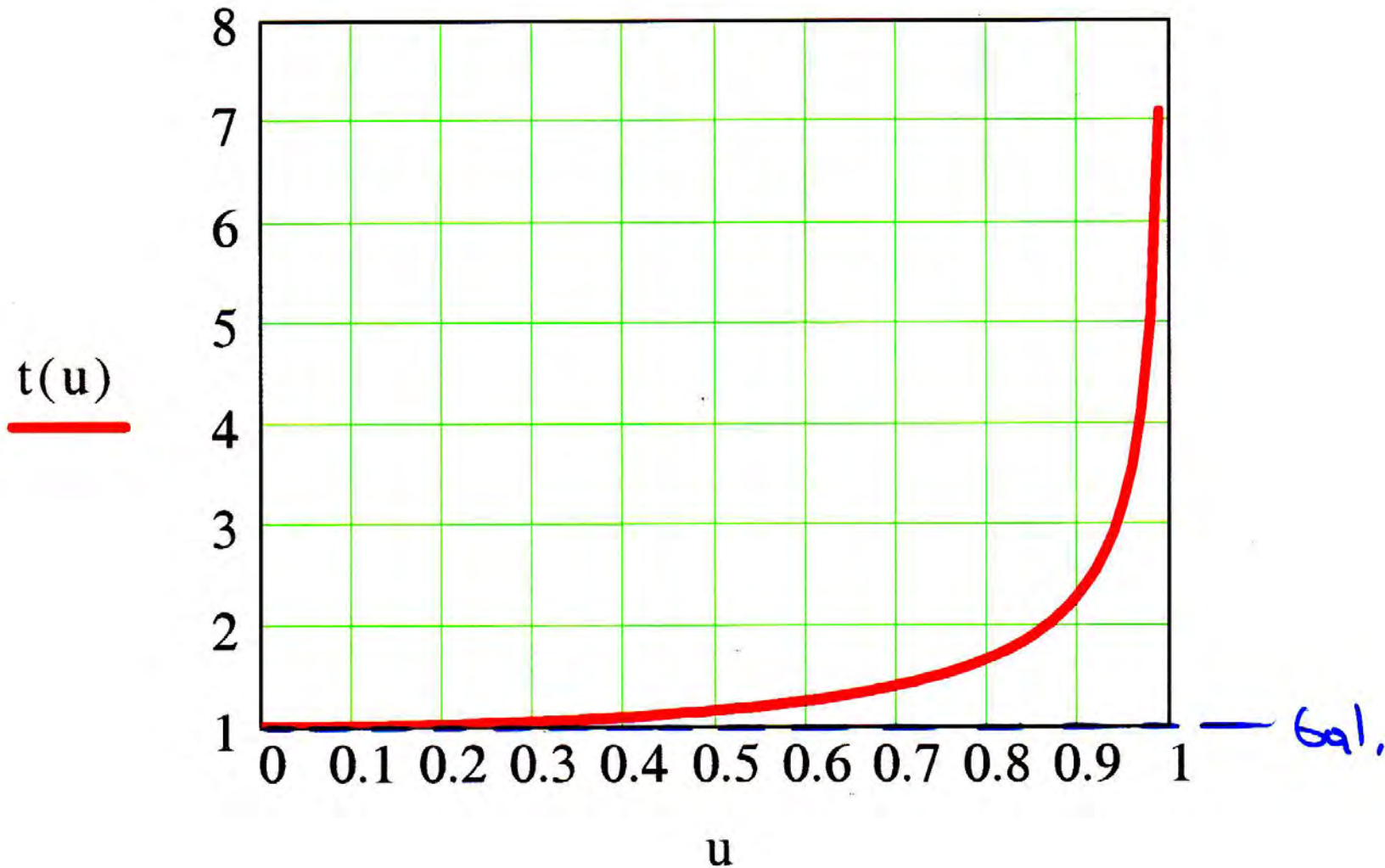
Astronaut sieht den Bauern zunächst die Spitze fassen, später das Heck.

# Time dilation

$$t_0 := 1$$

interval in rest frame

$$t(u) := \frac{t_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}}$$



There was a young lady named Bright  
Whose speed was far faster than light.  
She went out one day  
in a relative way  
and returned on the previous night.

Closed timelike curves produced by pairs of moving cosmic strings: Exact solutions

J. Richard Gott, III

Phys. Rev. Lett. **66**, 1126 (1991) - Published 4 March 1991

Can the Universe create itself?

J. Richard Gott, III and Li-Xin Li

Phys. Rev. D **58**, 023501 - Published 29 May 1998

Eternal time machine in (2+1)-dimensional anti-de Sitter space

Simon DeDeo and J. Richard Gott, III

Phys. Rev. D **66**, 084020 - Published 29 October 2002;  
Erratum Phys. Rev. D **67**, 069902 (2003)

Robert Laughlin, Physiknobelpreisträger 1998

«Abschied von der Weltformel» - für eine neue Ära der Physik

**Laughlin:** Die akademische Physik hat postmoderne Züge angenommen. Das drückt sich in der Stringtheorie und in einigen Ideen über das frühe Universum aus. Das sind in Mode gekommene, spekulative Theorien, die auch in Jahrzehnten experimentell nicht nachgeprüft werden können – falls überhaupt jemals.

**Interviewer:** Spekulieren ist doch ein legitimes Arbeitsmittel der Naturwissenschaften.

**Laughlin:** Das stimmt. Aber man muss trennen zwischen Wahrheit und Ideologie. **Die Physik ist eine experimentelle Wissenschaft.** Ihre moralische Autorität gründet auf der Falsifikation, also der Überprüfbarkeit ihrer Aussagen, und nicht allein auf grossartigen Ideen.

$$t' = \gamma \left( t - \frac{ux}{c^2} \right)$$

$$x' = \gamma (x - ut)$$

$$x' = y$$

$$z' = z$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

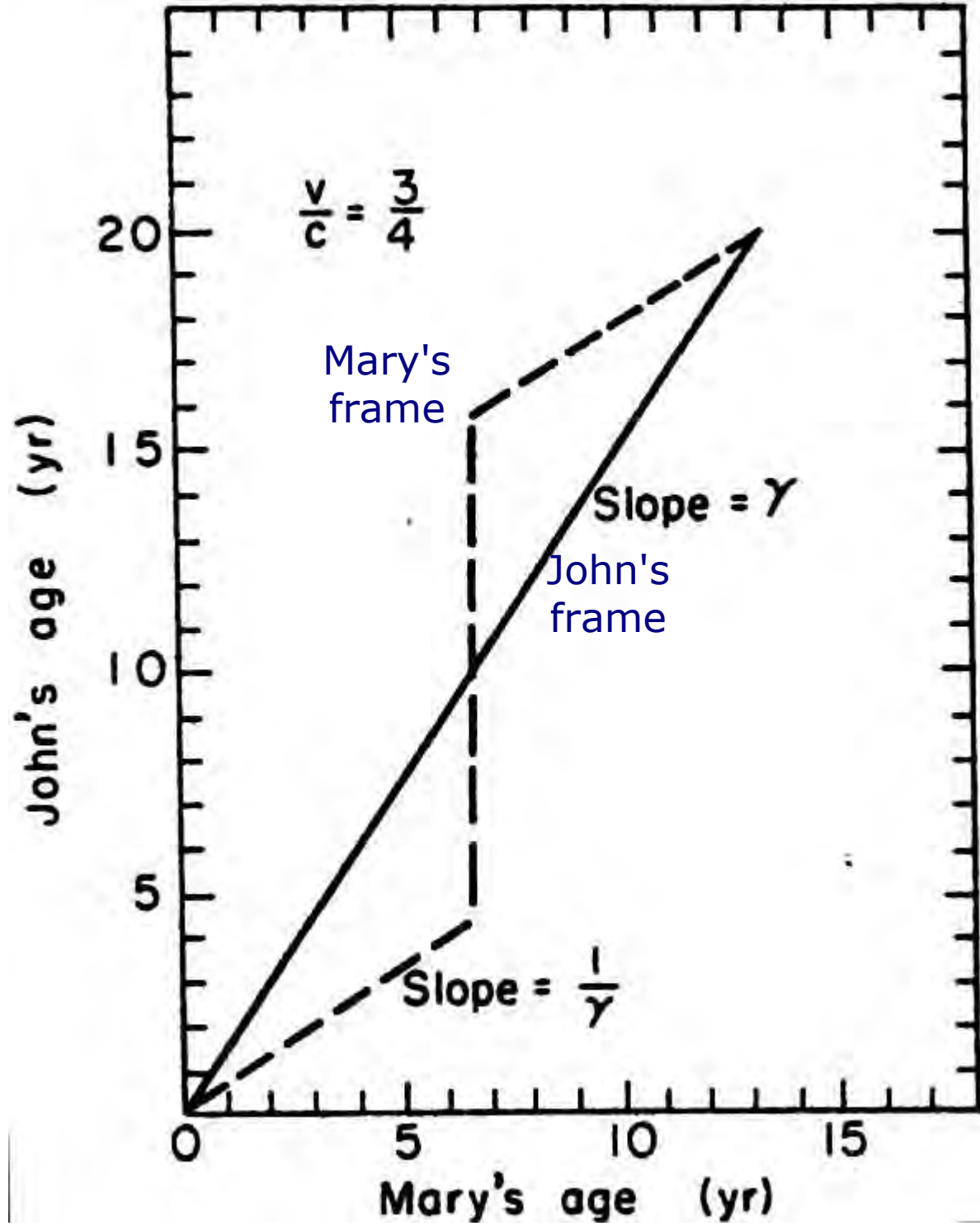
$$\beta = \frac{u}{c}$$

$$ct' = \gamma (ct - \beta x)$$

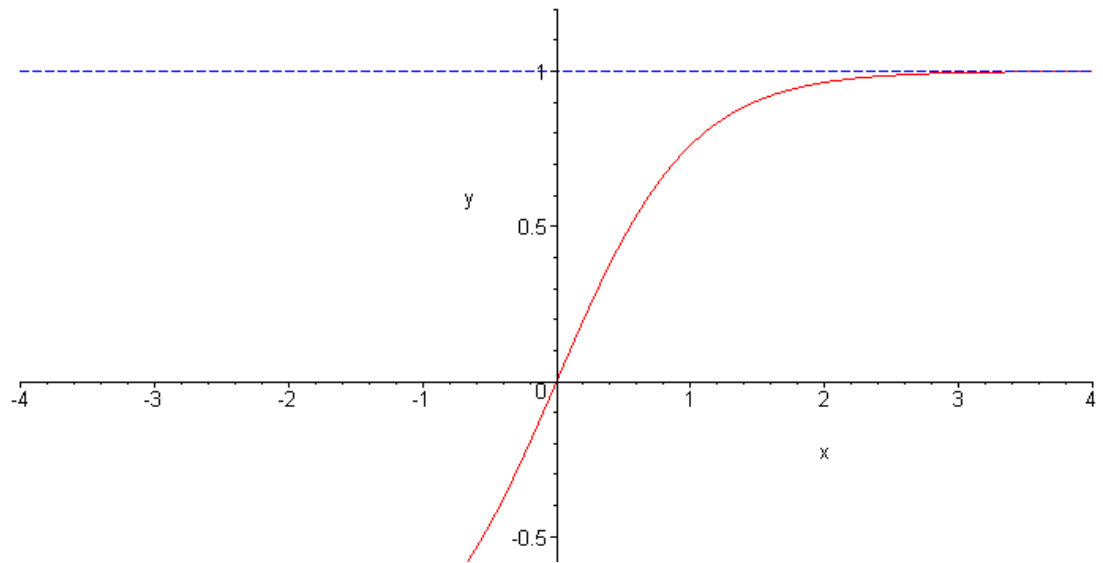
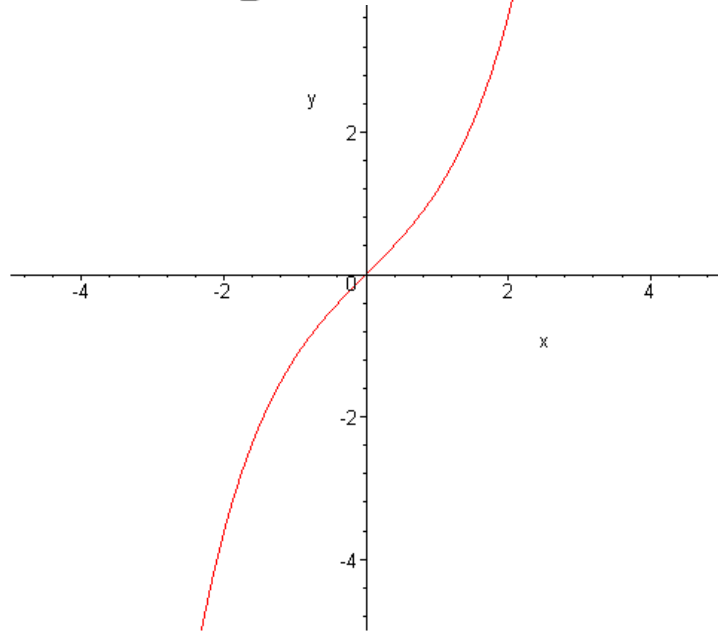
$$x' = \gamma (x - \beta ct)$$

$u$ : Geschwindigkeit von  $\Sigma'$  in  $\Sigma$

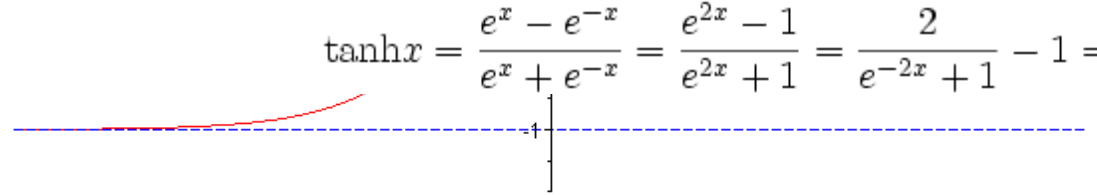
# Twin Paradox



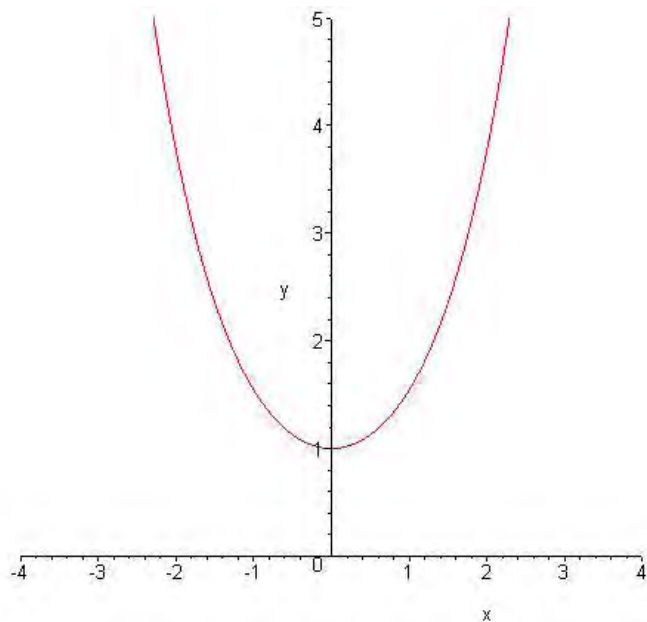
$$\sinh(x) := \frac{1}{2} (e^x - e^{-x})$$



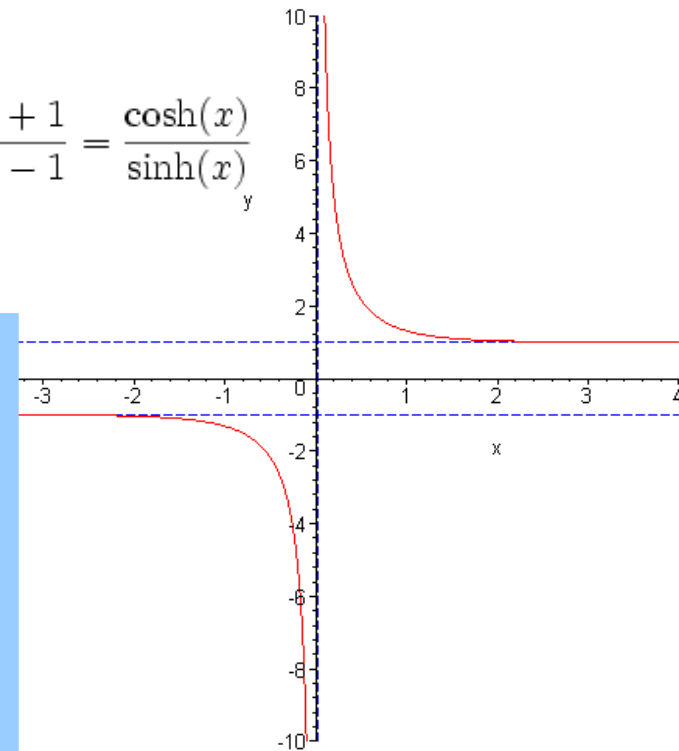
$$\tanh x = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} = \frac{e^{2x} - 1}{e^{2x} + 1} = \frac{2}{e^{-2x} + 1} - 1 = \frac{\sinh x}{\cosh x}$$



$$\cosh(x) := \frac{1}{2} (e^x + e^{-x})$$



$$\coth x = \frac{e^x + e^{-x}}{e^x - e^{-x}} = \frac{e^{2x} + 1}{e^{2x} - 1} = \frac{\cosh(x)}{\sinh(x)}$$



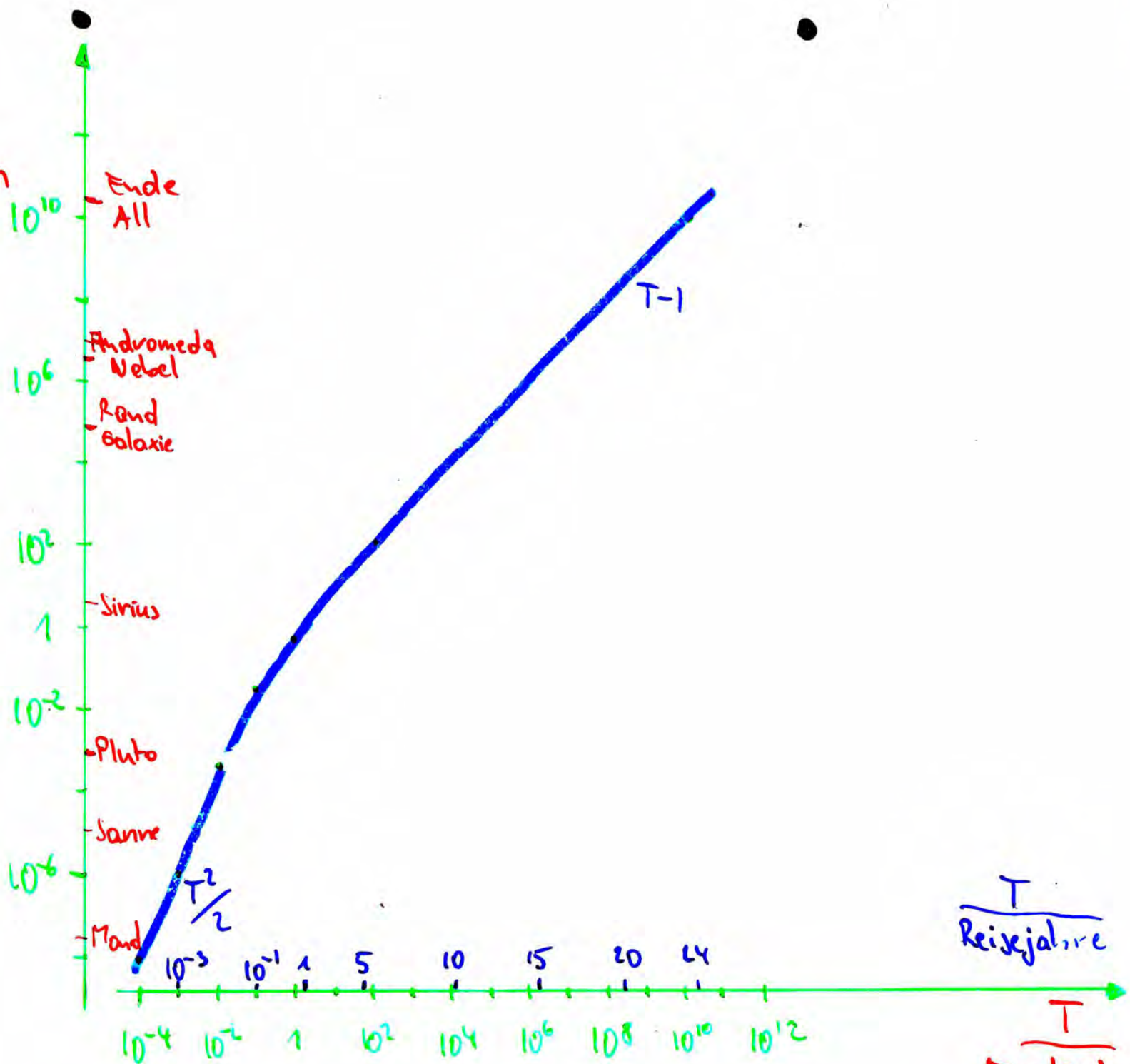
$$\frac{d}{dx} \cosh(x) = \sinh(x)$$

$$\frac{d}{dx} \sinh(x) = \cosh(x)$$

$$\operatorname{arsinh}(x) := \ln(x + \sqrt{1 + x^2})$$



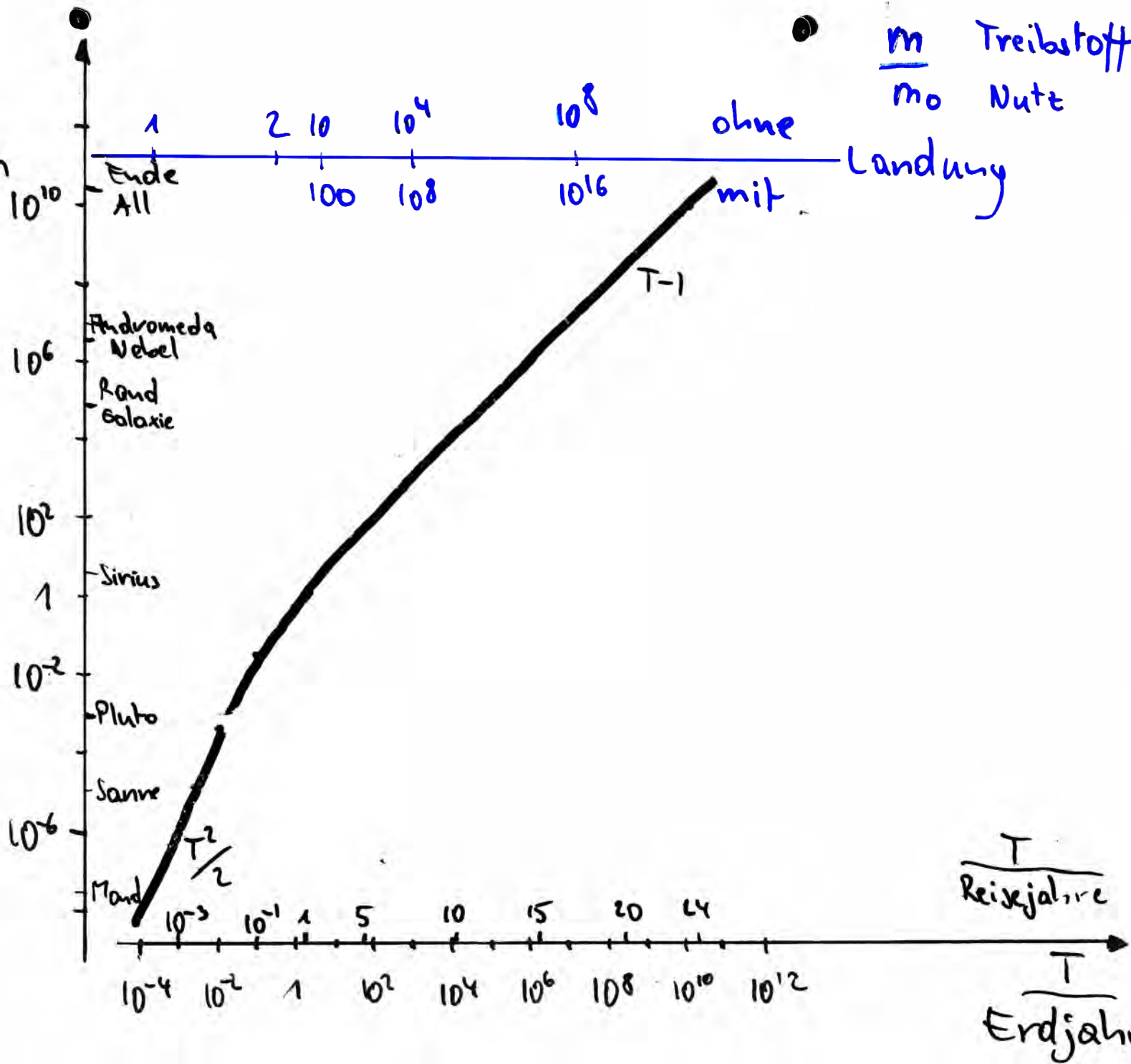
Abstand  
in  
Lichtjahren



SKALEN

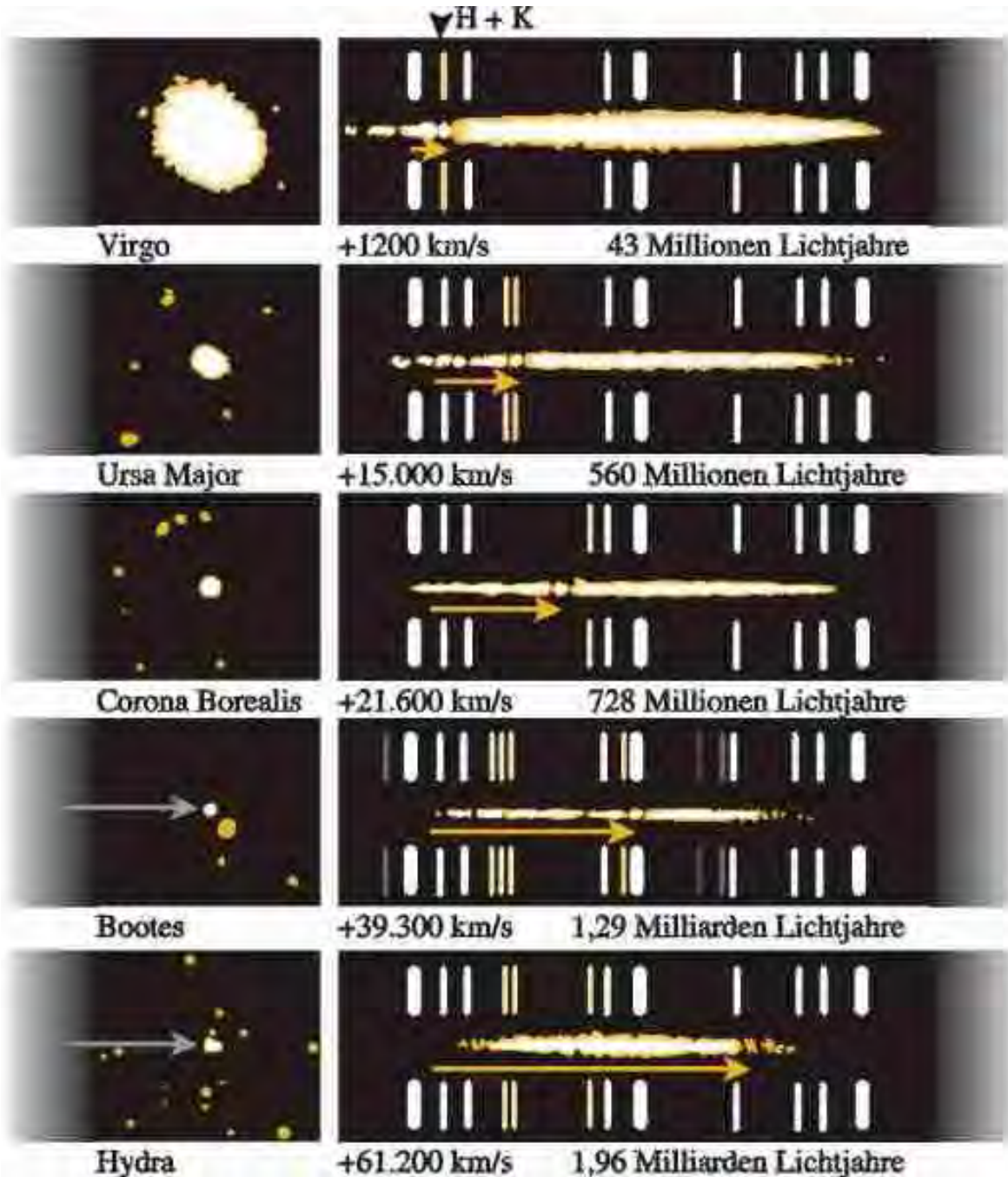
Abstand in Lichtjahren

$\frac{m}{m_0}$  Treibstoff  
Nutz  
ohne Landung  
mit



△ SKALEN

# Der relativistische Dopplereffekt



Spektren von Galaxien in Galaxienhaufen (Namen Virgo etc. beziehen sich auf die Haufen), die immer kleiner aussehen, je weiter sie weg sind. Rechts Spektren (mit Vergleichsspektren). Spektren zeigen die verschobenen Linien, insbesondere CaII K+H. Angegeben aus dem Dopplereffekt abgeleiteten Geschwindigkeiten und die Entfernungen. Letztere erfordert Kenntnis der Hubblekonstanten  $H$  (für nicht zu grosse Rotverschiebungen:  $V = H D$ ), fuer die hier offenbar  $100 \text{ km/s/Mpc}$  benutzt wurde. Der heutige Wert ist etwa  $70$  in diesen Einheiten, also die Entfernungen dann ca.  $30\%$  größer.

Achtung:

- Gravitationsrotverschiebung
- kosmologische Raumexpansion

# Der relativistische Dopplereffekt

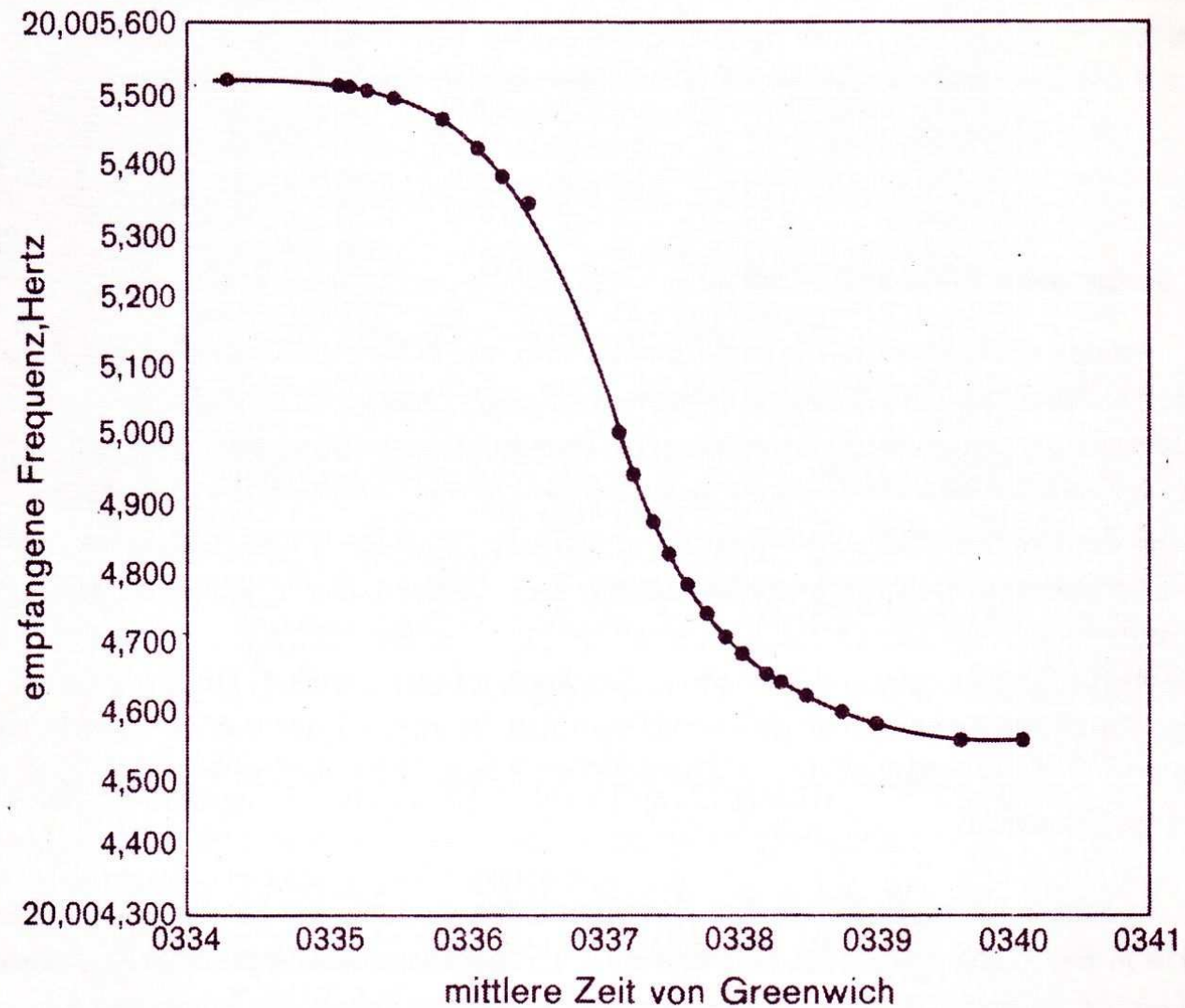


Bild 5.12. Dopplereffekt bei Sputnik I, nach Beobachtungen am M. I. T. Lincoln Laboratory vom 7. Oktober 1957 (nach Daten von R. R. Brown et al.).

# ART

## Relativitätsprinzip

Gesetze der Physik haben in "allen" Koordinatensystemen die gleiche Form  
(nicht nur in Inertialsystemen; aber mathematische Anforderungen an Systeme, )

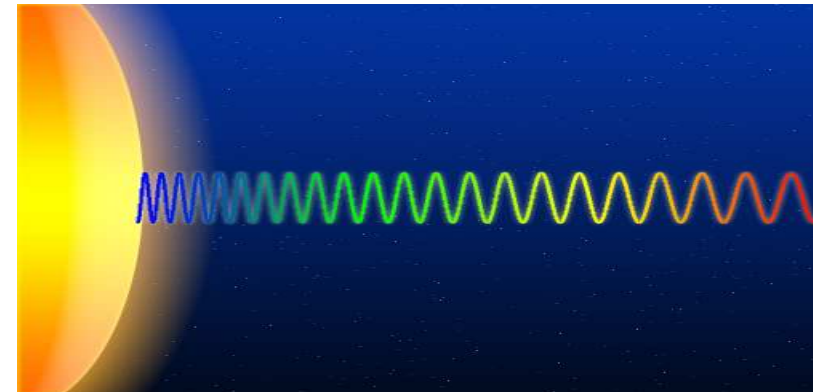
## Machsches Prinzip

Trägheitskräfte hängen von Bewegung relativ zu anderen Massen im Universum ab  
(nicht relativ zu einem absoluten Raum)

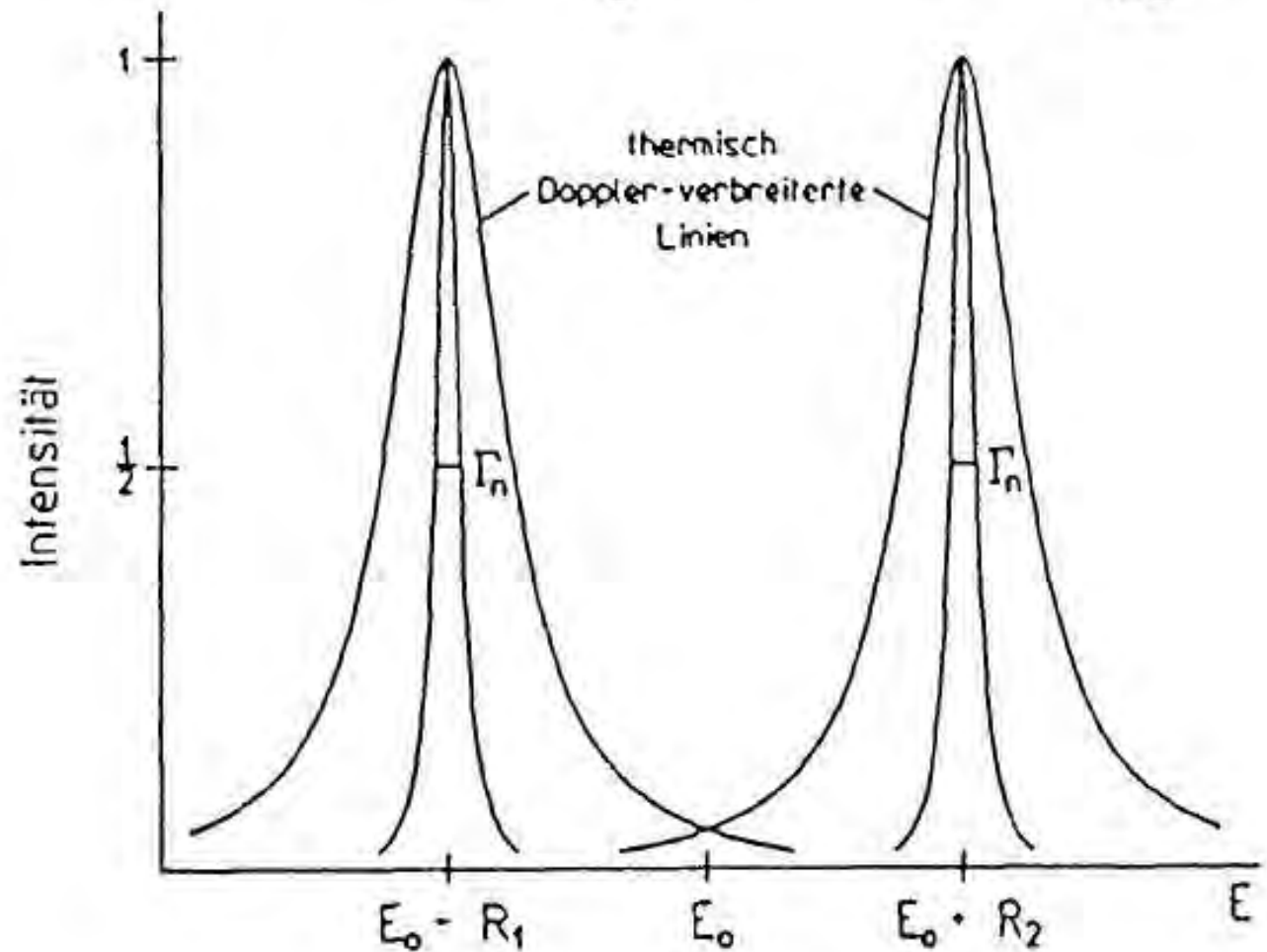
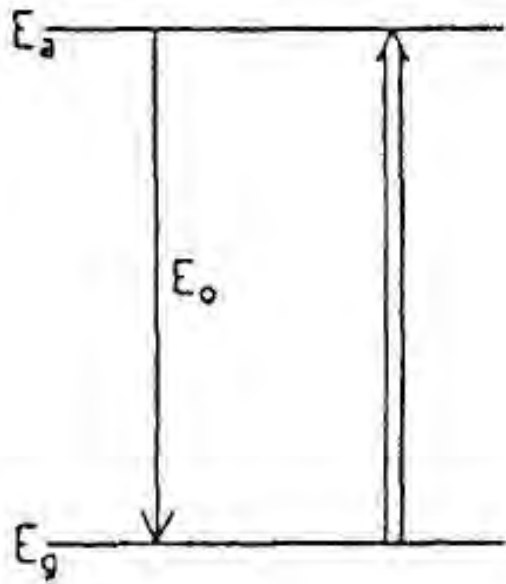
## (starkes) Äquivalenzprinzip

Beobachter in geschlossenen Labor ohne Wechselwirkung nach außen kann durch kein Experiment zwischen Schwerelosigkeit (weit weg von Massen) und freiem Fall (nahe einer Masse) unterscheiden

Ein Ergebnis: *gravitative Rotverschiebung*  
Pound-Rebka-Experiment 1960



# Der Mößbauereffekt



Erfahrung mit Gasspektroskopie führt zur Erwartung für  $T \rightarrow 0$ : Resonanzabsorption verschwindet

# Der Mößbauereffekt

14.4 keV-Linie von  $^{57}\text{Fe}$

Breite:

$5 \cdot 10^{-9}$  eV absolut

$3 \cdot 10^{-13}$  relativ.

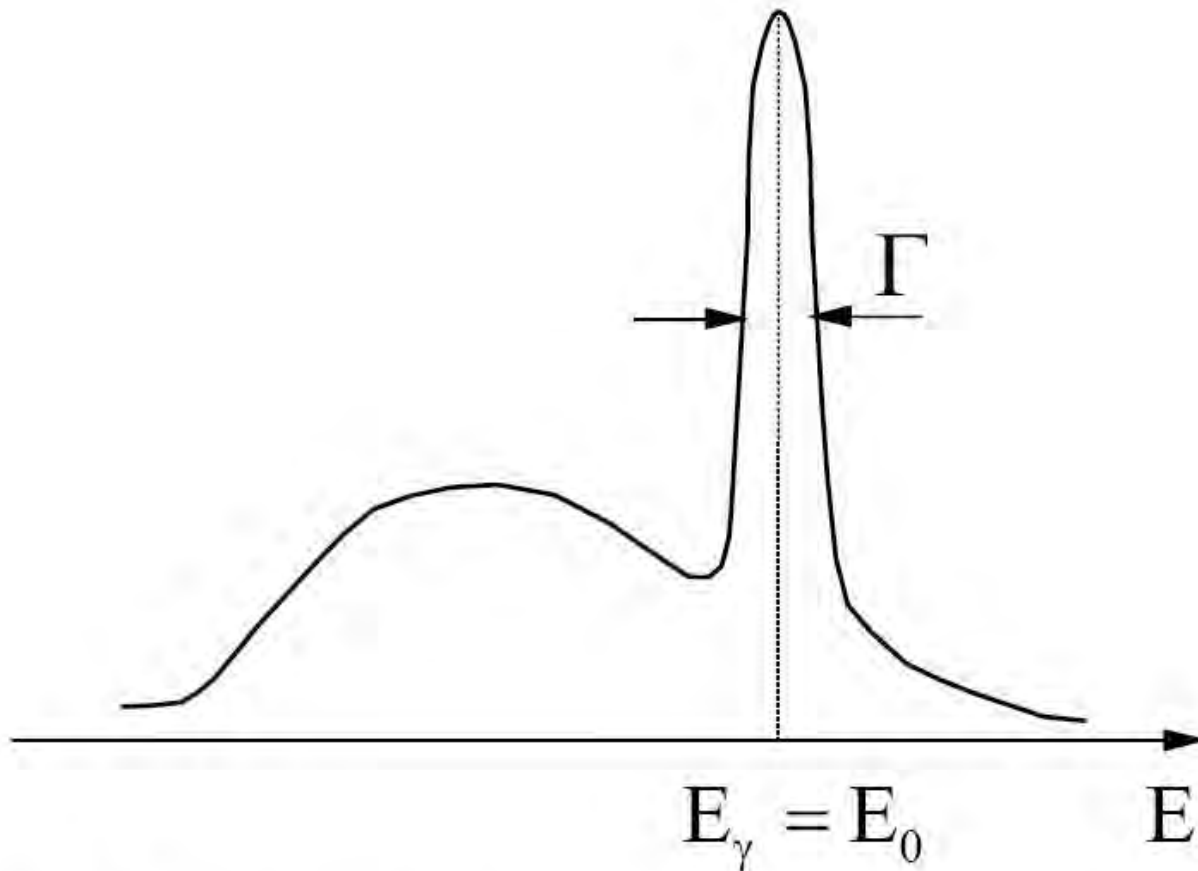
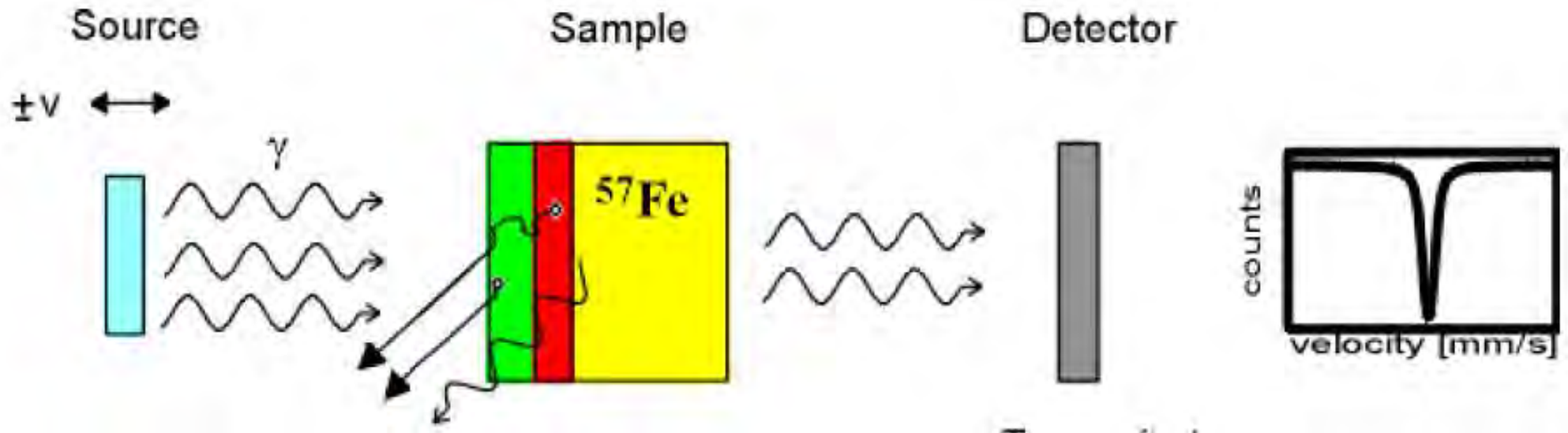


Fig.7-14.  $\gamma$ -Emissionsspektrum eines Kristalls mit Mößbauerlinie

# Der Mößbauereffekt





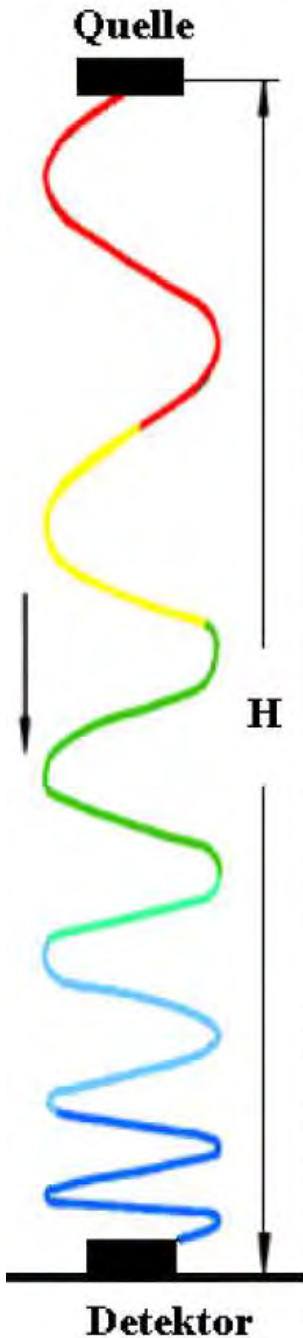
# Rebka & Pound Experiment

Phys. Rev. Lett. **4**, 337 (1960)  
doi:10.1103/PhysRevLett.4.337

$$\begin{aligned}\Delta f/f &= g H / c^2 \\ &= 2,46 \cdot 10^{-15} \\ &\text{(mit } H = 22,56 \text{ m)}\end{aligned}$$

Einmal Quelle unten, Det. oben;  
dann umgedreht.  
Differenz = doppelter Effekt  
(& Festkörpereffekte entfernt)  
Messung wich um 10% ab.

aktueller: H = 1cm ist genug!  
[pro-physik.de/details/news/...  
1111521/Relativistische\\_Zeitdehnung\\_auf\\_dem\\_Kuechentisch.html](http://pro-physik.de/details/news/...1111521/Relativistische_Zeitdehnung_auf_dem_Kuechentisch.html)



G. Rebka am Detektor

