

*Versuche Sie mal einem Polizisten zu erklären,
dass eine Geschwindigkeitsbeschränkung ohne Hinweis auf das zugehörige Bezugssystem sinnlos sei!*

Roman Sexl



**Ereignisse und Eigenzeit
Zeitdilatation
Längenkontraktion**

Gleichzeitigkeit

My Watch

Mark Twain (1835-1910)



When your watch gets out of order you have a choice of two things to do: throw it in the fire or take it to the watch-tinker. The former is the quickest.

My beautiful new watch had run eighteen months without losing or gaining, and without breaking any part of its machinery or stopping. I had come to believe it infallible in its judgments about the time of day, and to consider its constitution and its anatomy imperishable. But at last, one night, I let it run down. I grieved about it as if it were a recognized messenger and forerunner of calamity.

...

It gained faster and faster day by day. Within the week it sickened to a raging fever, and its pulse went up to a hundred and fifty in the shade. At the end of two months it had left all the timepieces of the town far in the rear, and was a fraction over thirteen days ahead of the almanac. It was away into November enjoying the snow, while the October leaves were still turning. It hurried up house rent, bills payable, and such things, in such a ruinous way that I could not abide it.

...

I began to be left by trains, I failed all appointments, I got to missing my dinner; my watch strung out three days' grace to four and let me go to protest; I gradually drifted back into yesterday, then day before, then into last week, and by and by the comprehension came upon me that all solitary and alone I was lingering along in week before last, and the world was out of sight.



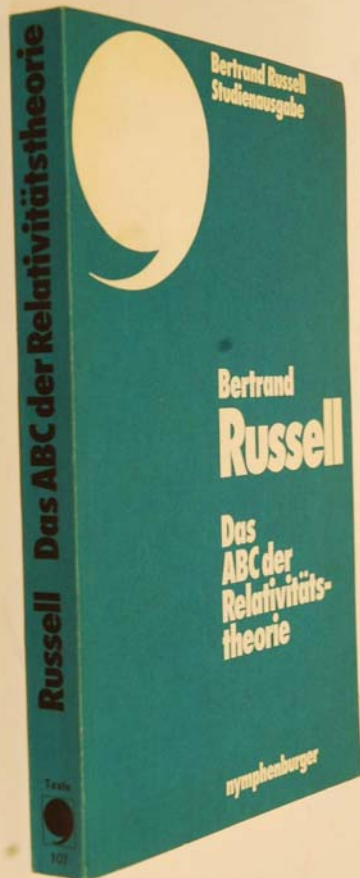
Albert Einstein

In classical physics it was always assumed that clocks in motion and at rest have the same rhythm, that rods in motion and at rest have the same length. If the velocity of light is the same in all coordinate systems, if the relativity theory is valid, then we must sacrifice this assumption. It is difficult to get rid of deep-rooted prejudices, but there is no other way.

Leopold Infeld, The evolution of physics, New York, 1938

Kleines ABC der Relativitätstheorie

Gleichzeitigkeit



Die Relativitätstheorie hängt weitgehend davon ab, daß man Vorstellungen los wird, die im normalen Leben nützlich sind. Aus verschiedenen, mehr oder weniger zufälligen Gründen legen die Verhältnisse auf der Erdoberfläche Vorstellungen nahe, die sich als ungenau herausstellen, obwohl sie uns nun schon als Denknötenwendigkeiten erscheinen. Der wichtigste dieser Umstände besteht darin, daß die meisten Gegenstände auf der Erdoberfläche, von einem irdischen Standpunkt aus betrachtet, ziemlich dauerhaft und fast ortsfest sind. Wenn das nicht so wäre, erschiene uns der Begriff der Bewegung nicht so eindeutig. Wenn jemand von King's Cross Station nach Edinburgh fahren will, weiß er, daß er King's Cross dort finden wird, wo es immer war, daß die Schienen in dieselbe Richtung führen werden wie beim letzten Mal, als er diese Reise machte, und daß Waverley Station in Edinburgh nicht zum Schloß hinaufgewandert sein wird. Er sagt und denkt deshalb, daß er nach Edinburgh gefahren ist, nicht, daß Edinburgh zu ihm gefahren ist, obwohl diese Behauptung genauso richtig wäre.

Thema Gleichzeitigkeit

Ereignis



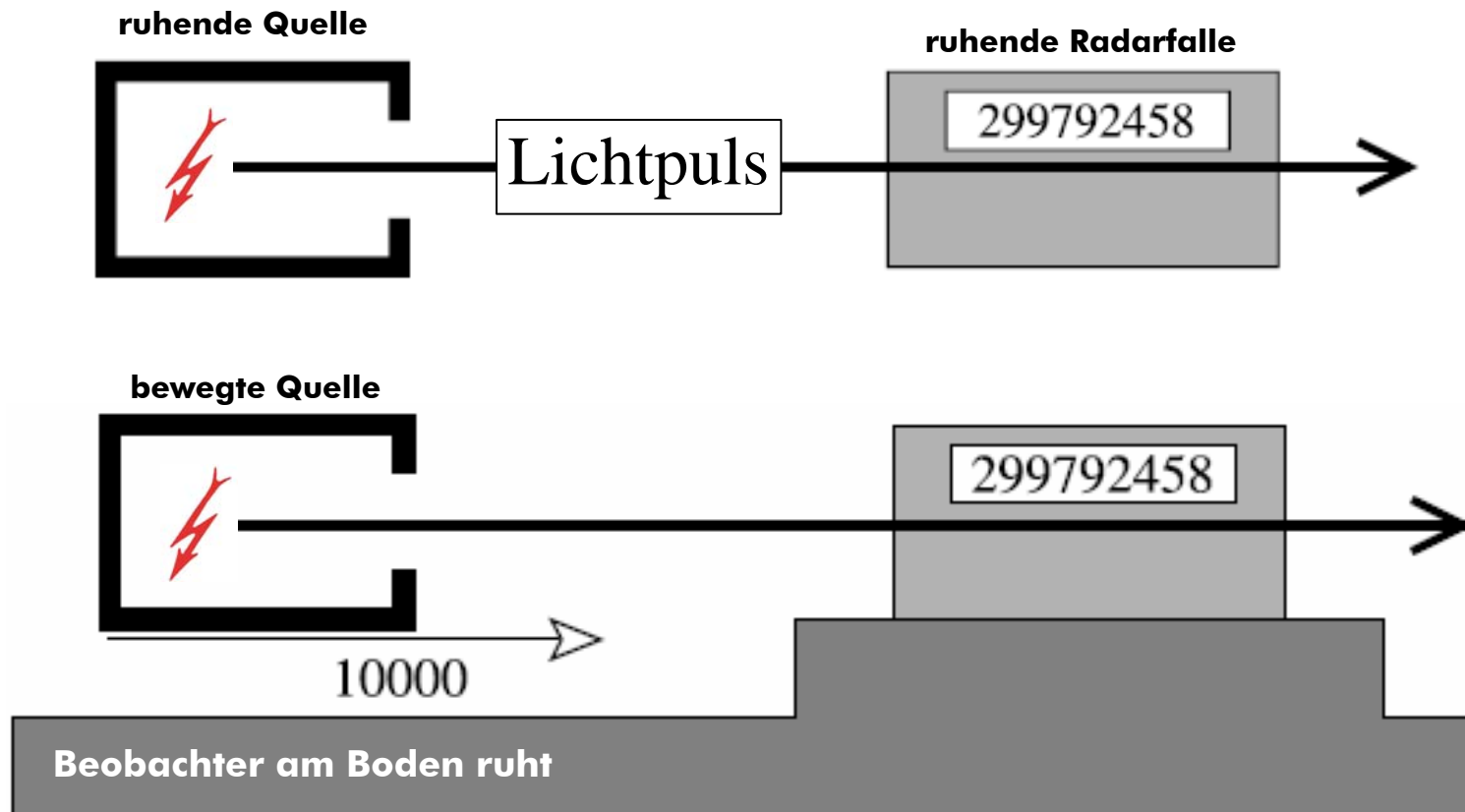
Komet Shoemaker-Levy 9 schlägt auf 1994 Jupiter ein



Einsteins Postulat *light speedometer*

Symptome

Wenn ruhende Quelle Licht aussendet, bestimmt Geschwindigkeitsmesser $c=3 \times 10^8$ m/s



Diagnose

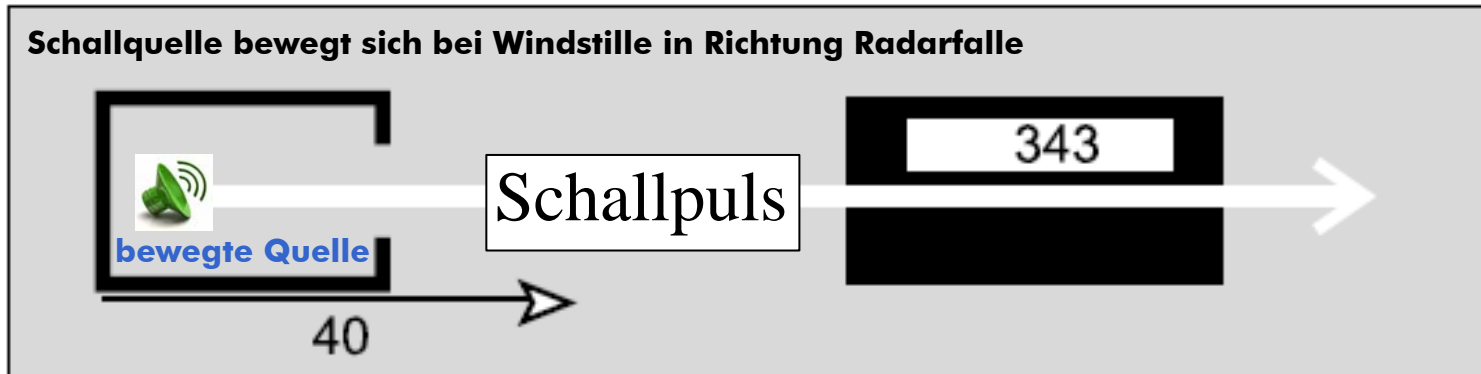
Auch wenn sich Lichtquelle sich bewegt, bestimmt die Radarfalle eine Geschwindigkeit c



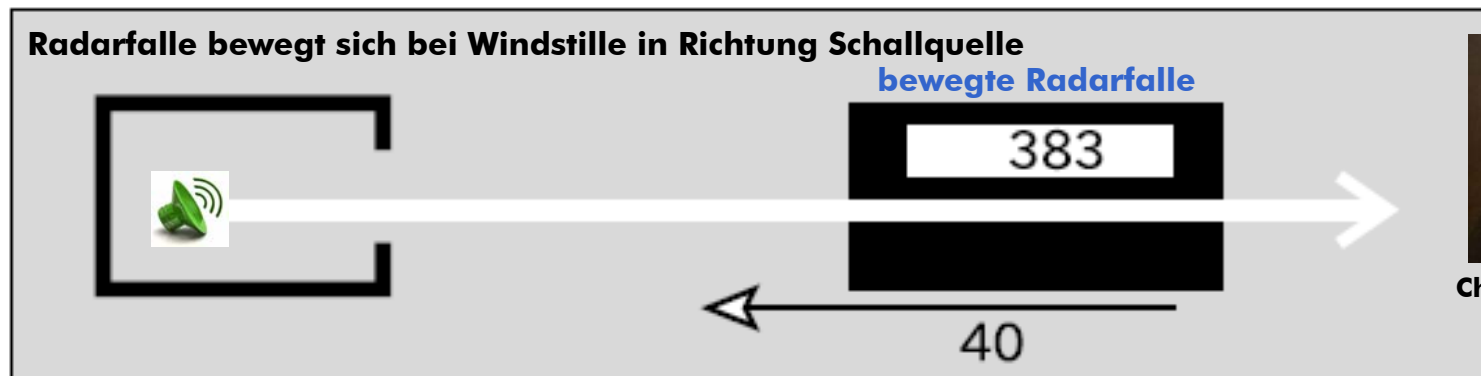
Dopplereffekt *sound speedometer*

Symptome

Messung Ausbreitungsgeschwindigkeit ruhende/ bewegte Quelle durch ruhenden Beobachter



In Bezug auf **RELATIVE BEWEGUNG** gesehen ändert sich an der Situation nichts



Christian Doppler
1803-1853

Diagnose

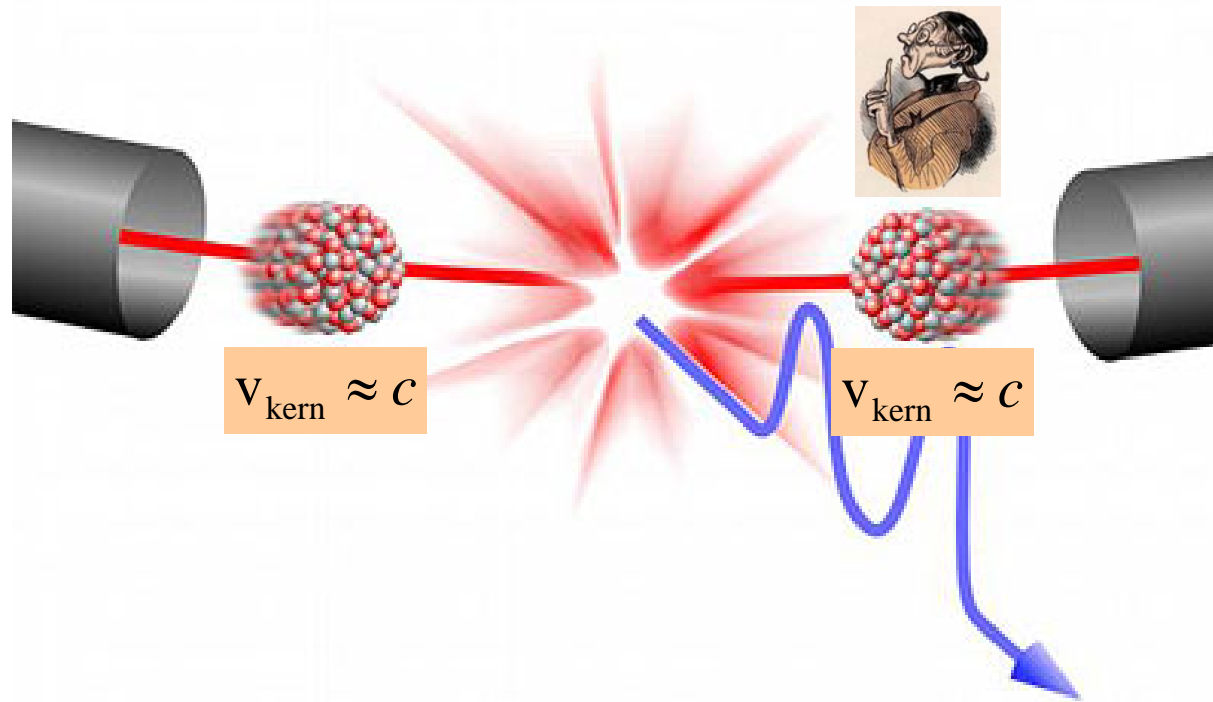
- wenn sich Radarfalle bewegt, stellt man Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit fest
- **RELATIVE BEWEGUNG** bedeutet nicht, dass man Beobachter einfach austauschen kann



Was ist das? Ein Ereignis!

Symptome

- Schwerionen mit nahe Lichtgeschwindigkeit stoßen aufeinander
- was würde Lehrer Lämpel als Mitreisender auf einem der Kernen beobachten?



Diagnose

- An- und abschalten einer Lichtquelle
- Stoß eines Teilchens
- Lichtpuls erreicht ausgezeichneten Punkt
- Explosion
- Zeiger einer Uhr passiert eine bestimmte Zeitmarke

Was ist das? Ein Ereignis!

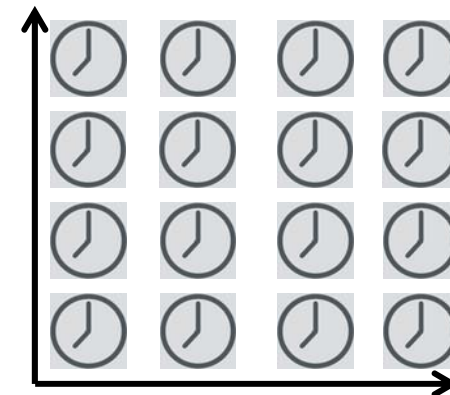
Symptome

Obwohl Explosionen **GLEICHZEITIG** um 7 Uhr zünden, misst Beobachter Zeitunterschied, aufgrund der endlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit der Information



Messmethode

- Raum einteilen in dichtes dreidimensionales Gitternetz
- Messinstrumente zur Bestimmung der **Raumkoordinaten**
- am Ort synchronisierte Uhren zur Bestimmung der **Zeit**
- Lichtpuls an entfernte Uhr liefert Synchronisation
- Zeitdifferenz wird dabei berücksichtigt



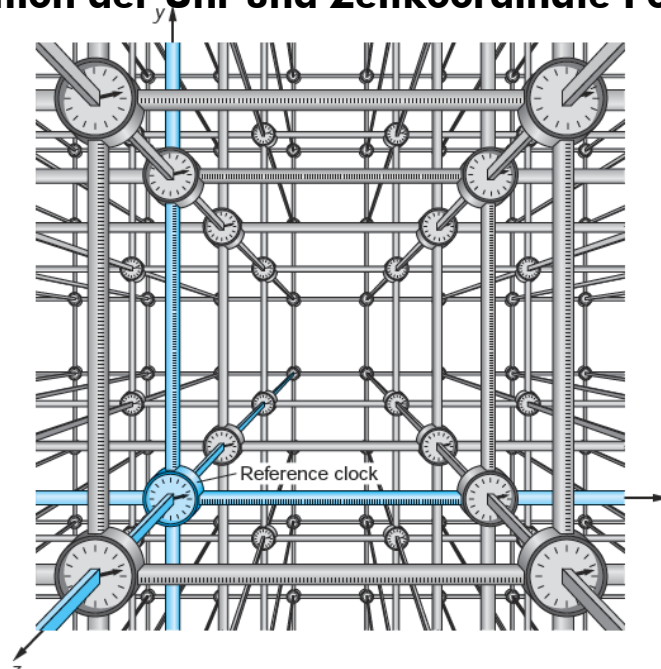
Diagnose

Uhren können **NICHT** an einem **EINEM** Ort synchronisieren werden und dann zu den anderen Raumkoordinaten gebracht werden, da der Transport möglicherweise einen Einfluss hat

Gesucht Referenzuhr

Symptome

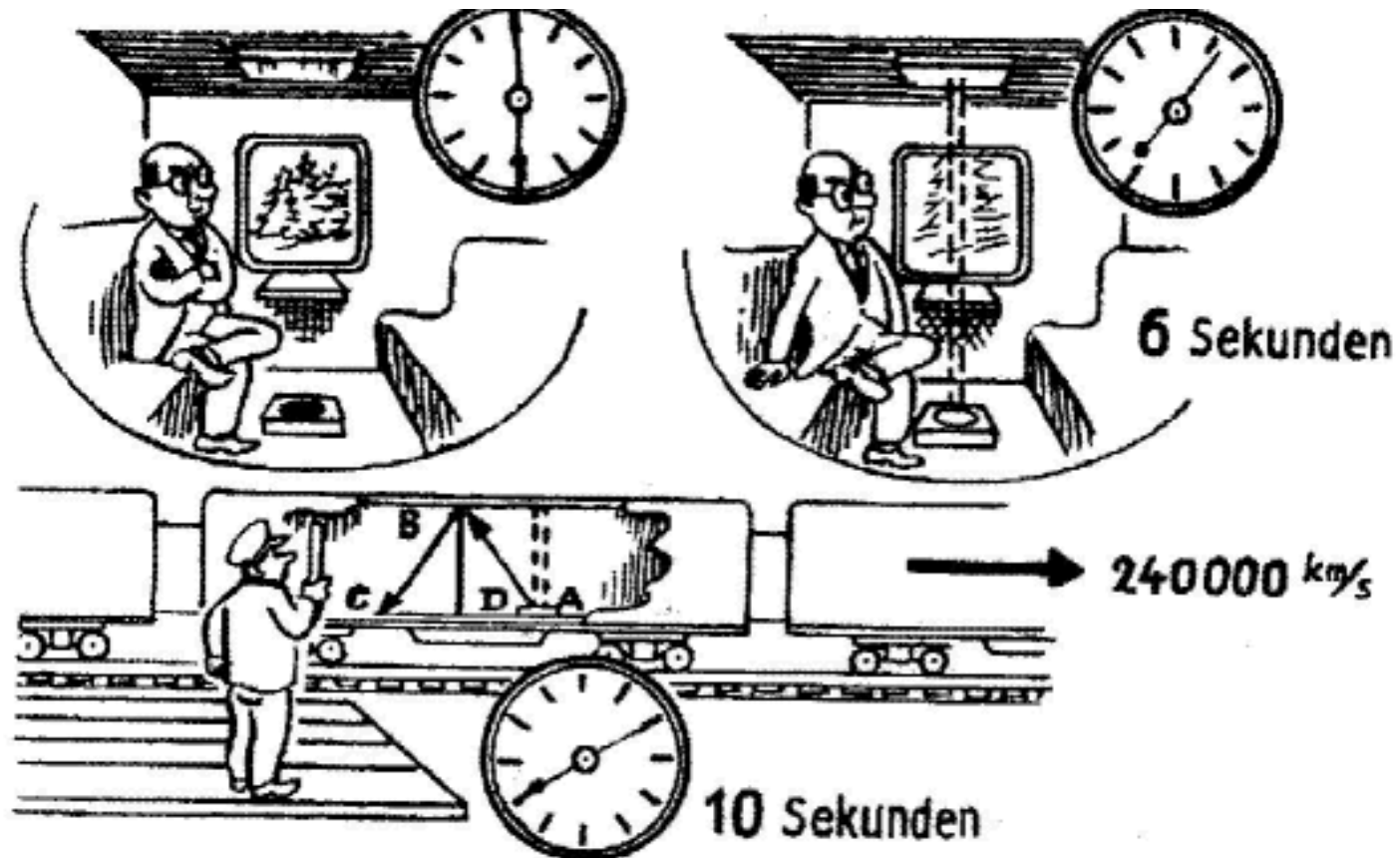
- Inertialsystem gebildet aus einem Gitter mit festen räumlichen Abständen
- an jeder Kreuzung befindet sich eine Uhr
- alle Uhren werden anhand EINER Referenzuhr synchronisiert
- Abstand der Uhren (Millimeter oder Kilometer) kann frei gewählt werden
- Ortskoordinate ist Raumposition der Uhr und Zeitkoordinate Position des Zeigers der Uhr



Diagnose

- Trajektorie eines Teilchen durch Ablesen der Zeit, wenn Körper Raumkoordinate passiert
- aus bekannten Abständen kann Geschwindigkeit bestimmt werden
- für jedes Inertialsystem kann vergleichbarer Aufbau verwendet werden
- bei Vergleich zwischen Inertialsystemen muss Prinzip der Gleichzeitigkeit beachtet werden
- in anderen Inertialsystemen sind gleichzeitige Ereignisse möglicherweise NICHT gleichzeitig

Thema Gleichzeitigkeit Zeitdilatation

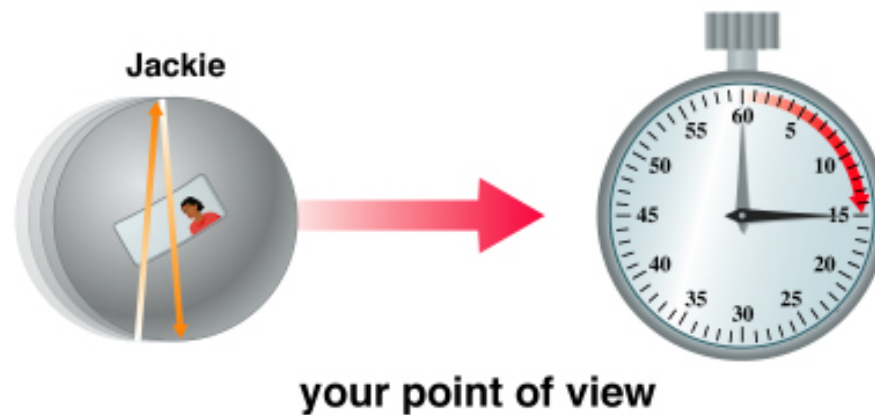
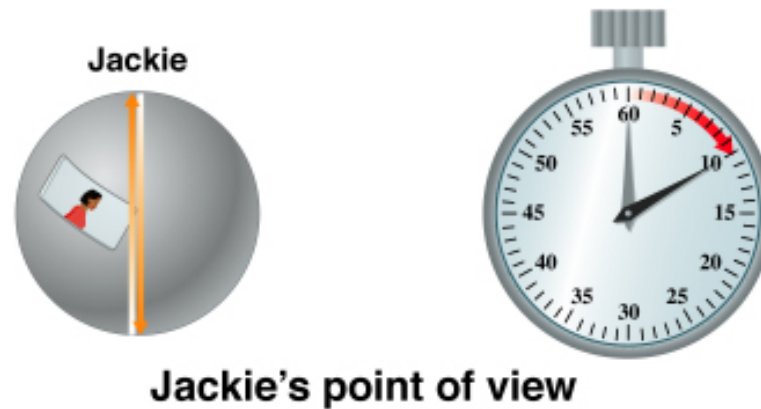


Uhrenvergleich

Die eigene Zeit vergeht

Definition

Eigenzeit ist die Zeit, die für einen Körper in seinem Ruhesystem vergeht

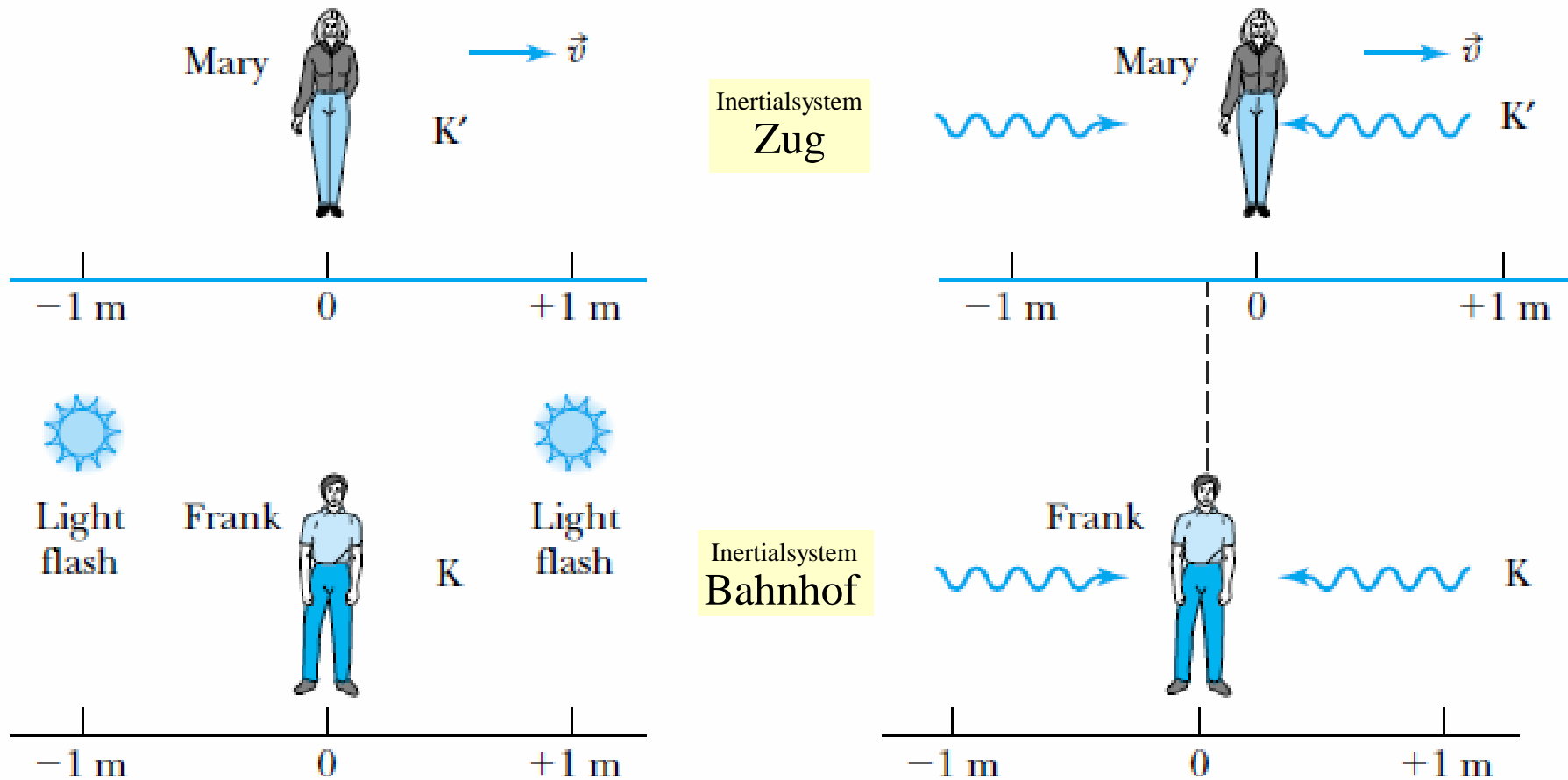


Phillip Rössler zur Landtagswahl in Bayern 2013: In Bayern gehen die Uhren anders!



relativistisch betrachtet Gleichzeitigkeit

Beobachter in Ruhe in Inertialsystem **Zug** beobachtet **KEINE** Gleichzeitigkeit der Ereignisse



Beobachter in Inertialsystem **Bahnhof** beobachtet **Gleichzeitigkeit** der Ereignisse

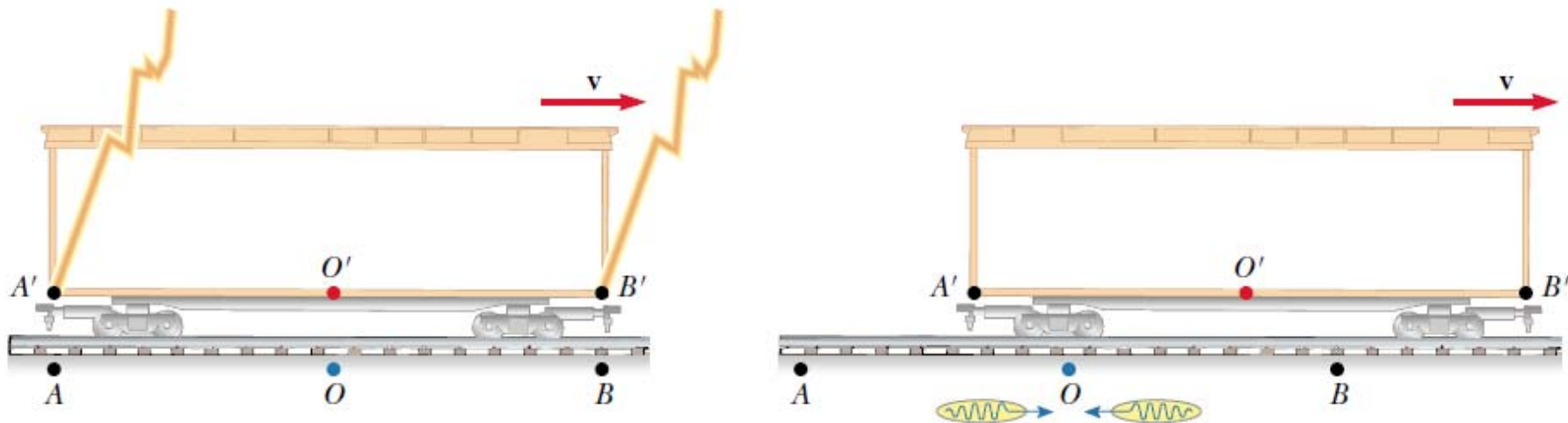
entanglement gleichzeitig ist relativ

Symptome

- zwei Beobachter, die sich relativ zueinander bewegen, werden nicht generell darin übereinstimmen, dass zwei Ereignisse gleichzeitig erfolgt sind
- **GLEICHZEITIGKEIT ist RELATIVES** und kein absolutes Konzept
- **GLEICHZEITIGKEIT** hängt von Bewegungszustand der Beobachter ab



Dopplereffekt



Diagnose

- gleichzeitig für externen Beobachter, aber zu unterschiedlichen Zeiten für Mitfahrer
- obwohl Aussagen unterschiedlich, haben beide Beobachter recht
- Zeitintervall zwischen Ereignissen hängt von Distanz in RAUM und ZEIT ab
- ZEIT und RAUM sind können nicht unabhängig voneinander betrachtet werden

Vom Standpunkt des Beobachters Bewegte Uhren gehen langsamer

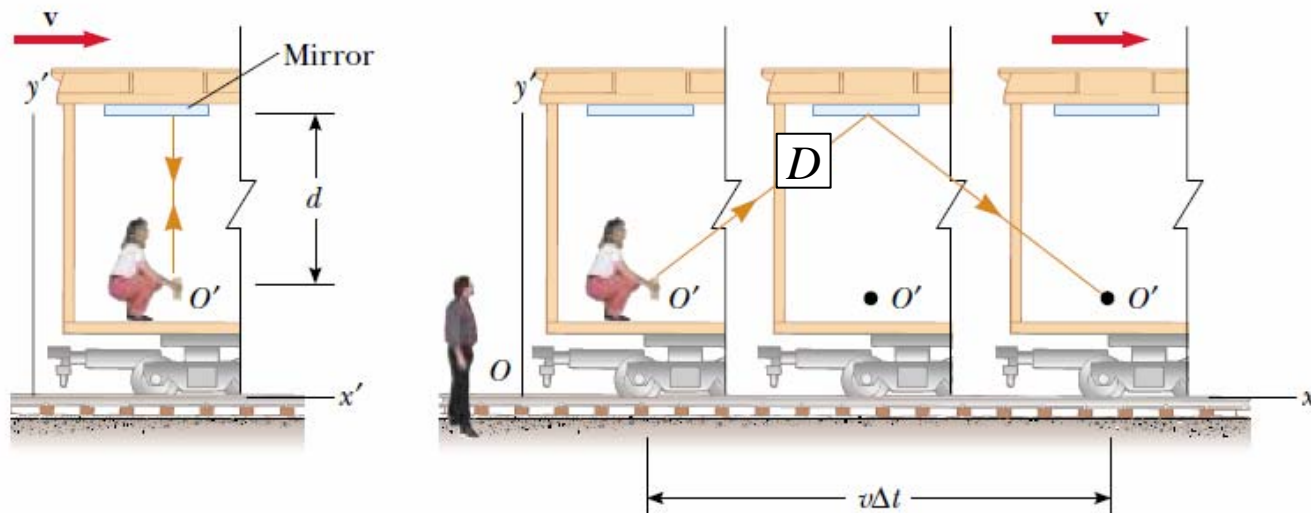


Beobachter Alice

$$\Delta t_{Alice} = \frac{2d}{c}$$

$$d = \frac{1}{2} c \Delta t_{Alice}$$

Was sieht ALICE?



Beobachter Bob

$$\Delta t_{Bob} = \frac{2D}{c}$$

Was beobachtet BOB?

Diagnose

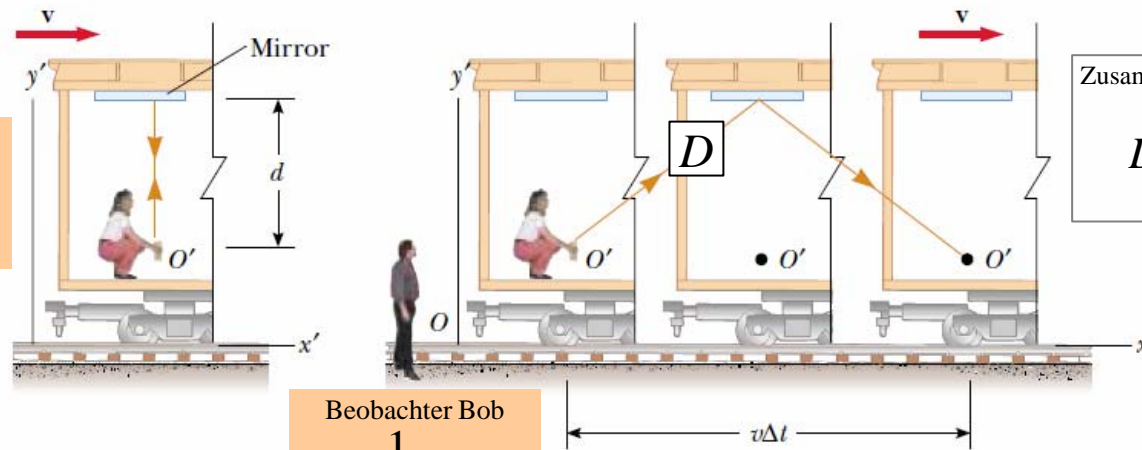
- Alice und Bob nehmen unterschiedliche Zeiten aufgrund relativer Bewegung wahr
- für Alice erreicht der Lichtstrahl nach der richtigen Zeit (Lichtgeschwindigkeit) den Boden
- für ruhenden Bob dauert es länger, bis der Lichtstrahl wieder auf Boden eintrifft



Vom Standpunkt des Beobachters Bewegte Uhren gehen langsamer

Beobachter Alice

$$d = \frac{1}{2} c \Delta t_{Alice}$$

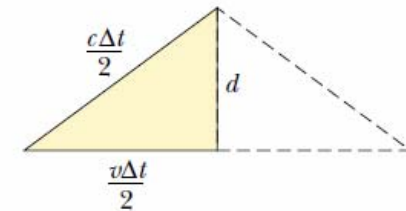


Beobachter Bob

$$D = \frac{1}{2} c \Delta t_{Bob}$$

Zusammenhang herstellen über Satz von Pythagoras

$$D^2 = \left(\frac{1}{2} v_{train} \Delta t_{bob} \right)^2 + d^2$$



$$\left(\frac{1}{2} c \Delta t_{Bob} \right)^2 = \left(\frac{1}{2} v_{train} \Delta t_{Bob} \right)^2 + \left(\frac{1}{2} c \Delta t_{Alice} \right)^2$$

$$c^2 \Delta t_{Bob}^2 = v_{train}^2 \Delta t_{Bob}^2 + c^2 \Delta t_{Alice}^2$$

$$\Delta t_{Bob}^2 (c^2 - v_{train}^2) = c^2 \Delta t_{Alice}^2$$

$$\frac{c^2 - v_{train}^2}{c^2} = 1 - \frac{v_{train}^2}{c^2} = \frac{\Delta t_{Alice}^2}{\Delta t_{Bob}^2}$$

Zeitdilatation

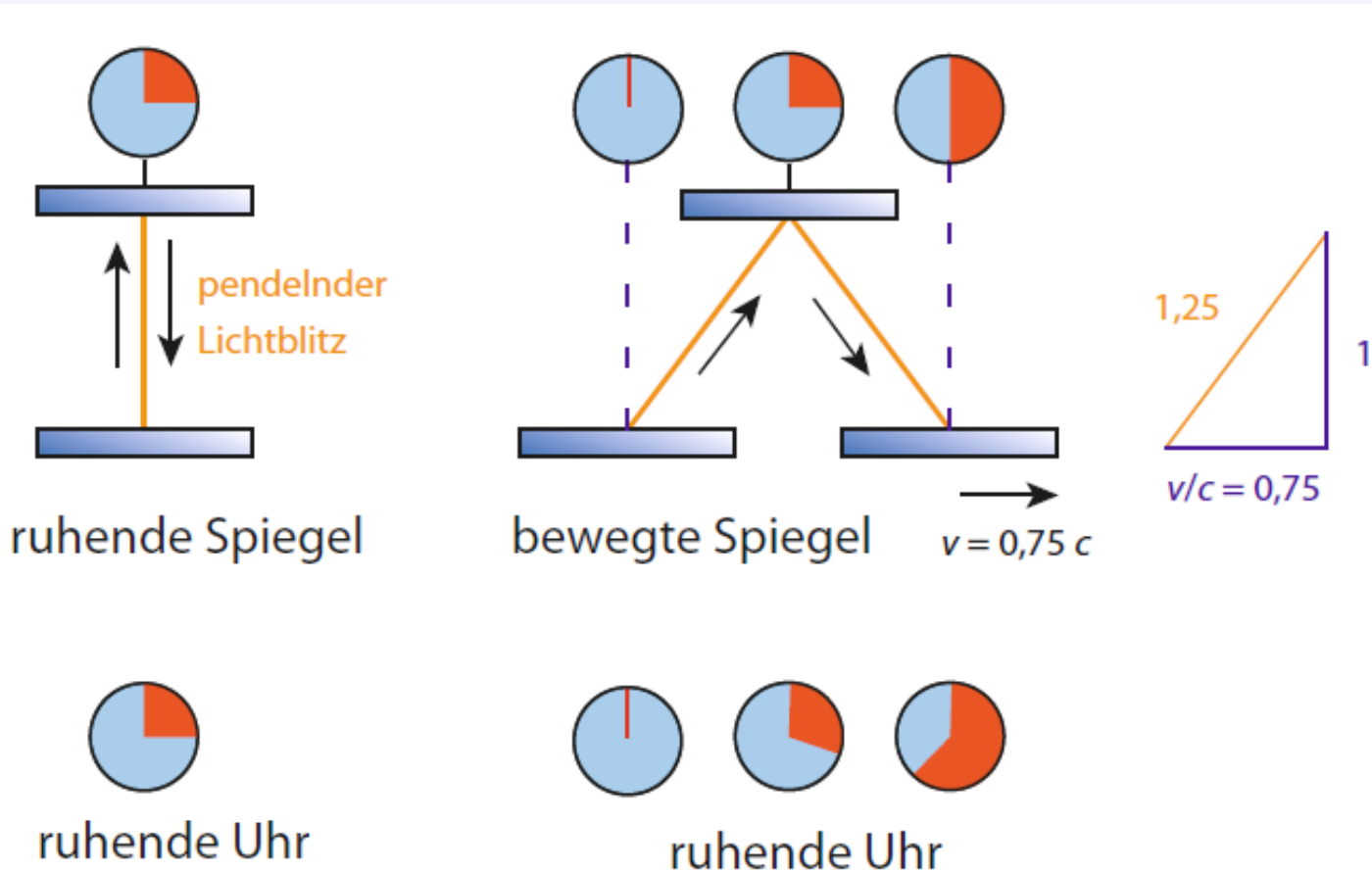
$$\Delta t_{Bob} = \frac{\Delta t_{Alice}}{\sqrt{1 - \frac{v_{train}^2}{c^2}}}$$

Eine bewegte Uhr geht um diesen Faktor langsamer als in ihrem Ruhesystem

Diagnose

Relative Bewegung verändert Rate mit der Ereignisse für unterschiedliche Beobachter stattfinden

relativistisch betrachtet Der Gang einer Uhr

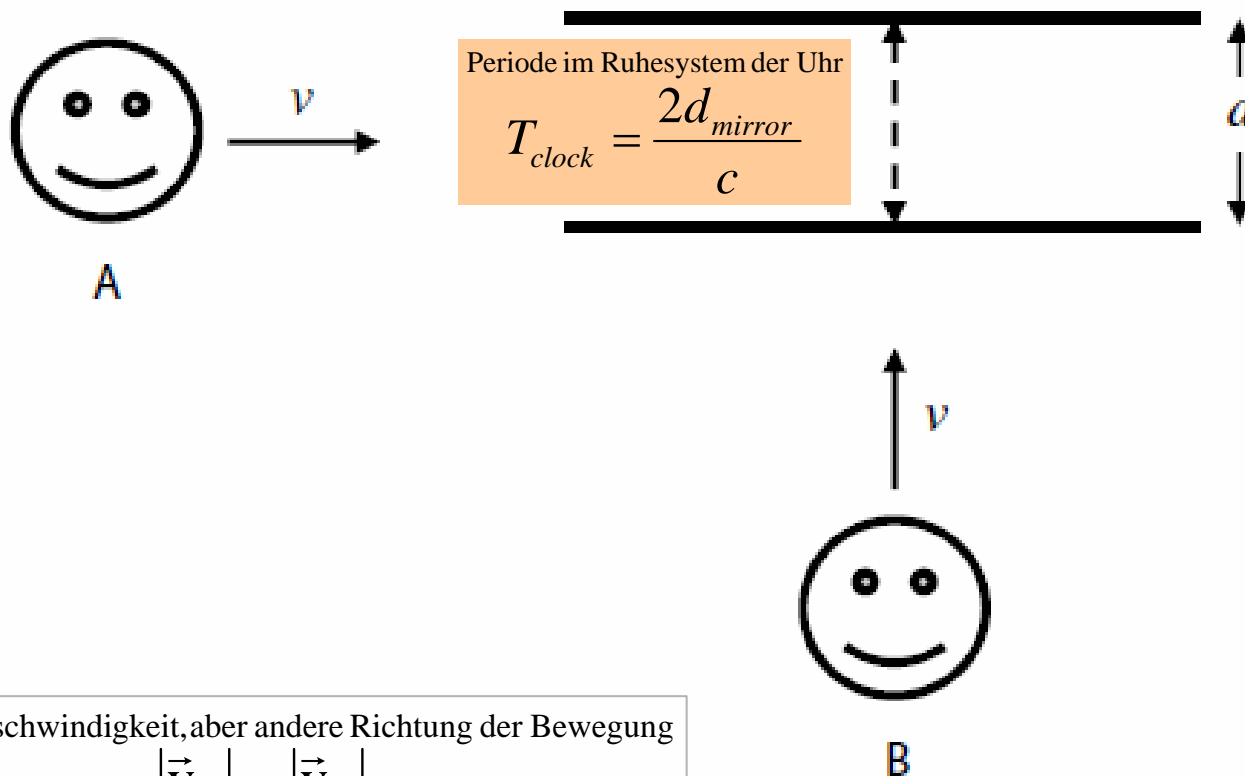


Diagnose
In bewegten Inertialsystemen gehen Uhren in Bezug auf einen ruhenden Beobachter langsamer

Zwei relativistische Sichtweisen Photonclock

Symptome

- Photonuhr lässt Lichtquant zwischen zwei Spiegeln hin und her laufen
- beide haben im Ruhesystem Uhr dieselbe Geschwindigkeit nur andere Richtung



gleiche Geschwindigkeit, aber andere Richtung der Bewegung

$$|\vec{v}_A| = |\vec{v}_B|$$

Diagnose

Wie sehen die sich bewegenden Beobachter A und B den Mechanismus der Uhr arbeiten?

Photonclock, die erste Herleitung Beobachter A

Periode im Ruhesystem Beobachter A

$$D_A^2 = d^2 + x_A^2 = d^2 + \left(\frac{v_A T_A}{2}\right)^2$$

Berechnung Weg nachPythagoras

$$T_A = \frac{2D_A}{c} = \frac{2}{c} \sqrt{d^2 + \left(\frac{v_A T_A}{2}\right)^2}$$

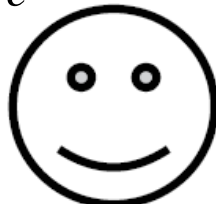
Berechnung nach Ausbreitungsgeschwindigkeit

$$T_A^2 = \frac{4}{c^2} \left(d^2 + \left(\frac{v_A T_A}{2}\right)^2 \right)$$

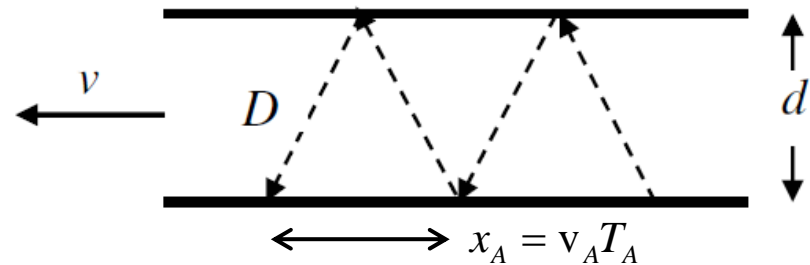
$$T_A^2 - T_A^2 \frac{v_A^2}{c^2} = T_A^2 \left(1 - \frac{v_A^2}{c^2} \right) = \frac{4d^2}{c^2} = T_{clock}^2$$

$$T_A = \frac{T_{clock}}{\sqrt{1 - \frac{v_A^2}{c^2}}}$$

Zeitdilatation



A



Diagnose

Photonuhr geht im Bezugssystem von Beobachter A langsamer

Relativität der Zeit

γ -Faktor

Zeitdilatation

$$\Delta t_{Bob} = \frac{\Delta t_{Alice}}{\sqrt{1 - \frac{v_{train}^2}{c^2}}}$$

bewegte Uhr geht um diesen Faktor langsamer als in ihrem Ruhesystem

Lorentzfaktor

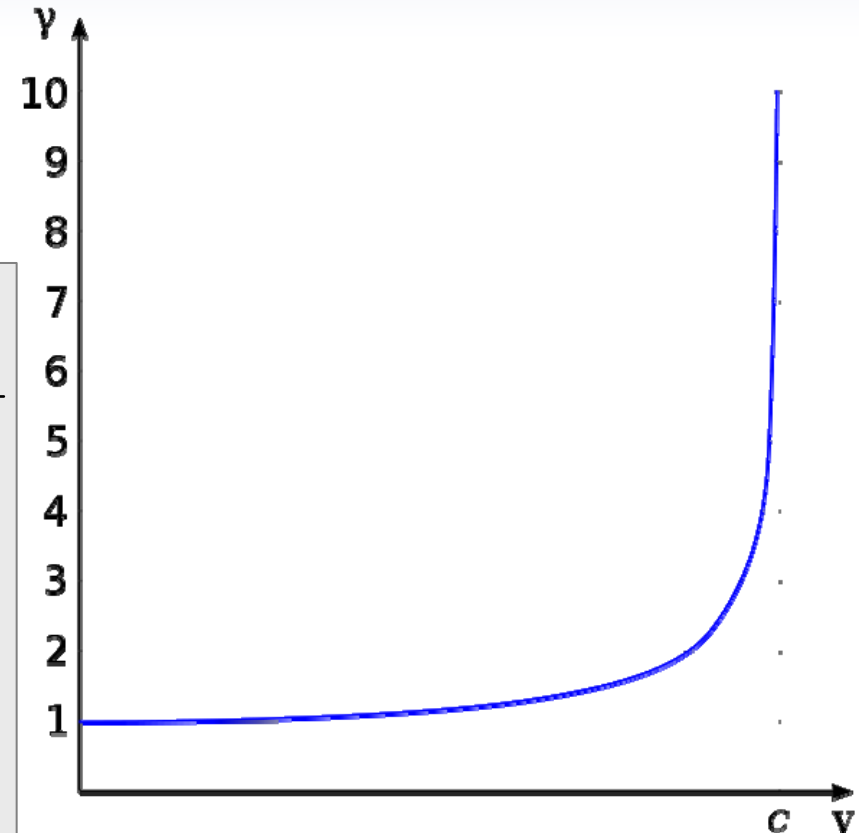
$$\beta_{SRT} = \frac{v_{objekt}}{c}$$

γ_{SRT} -Faktor

$$\gamma_{SRT} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v_{objekt}^2}{c^2}}}$$

$$\gamma_{SRT} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta_{SRT}^2}}$$

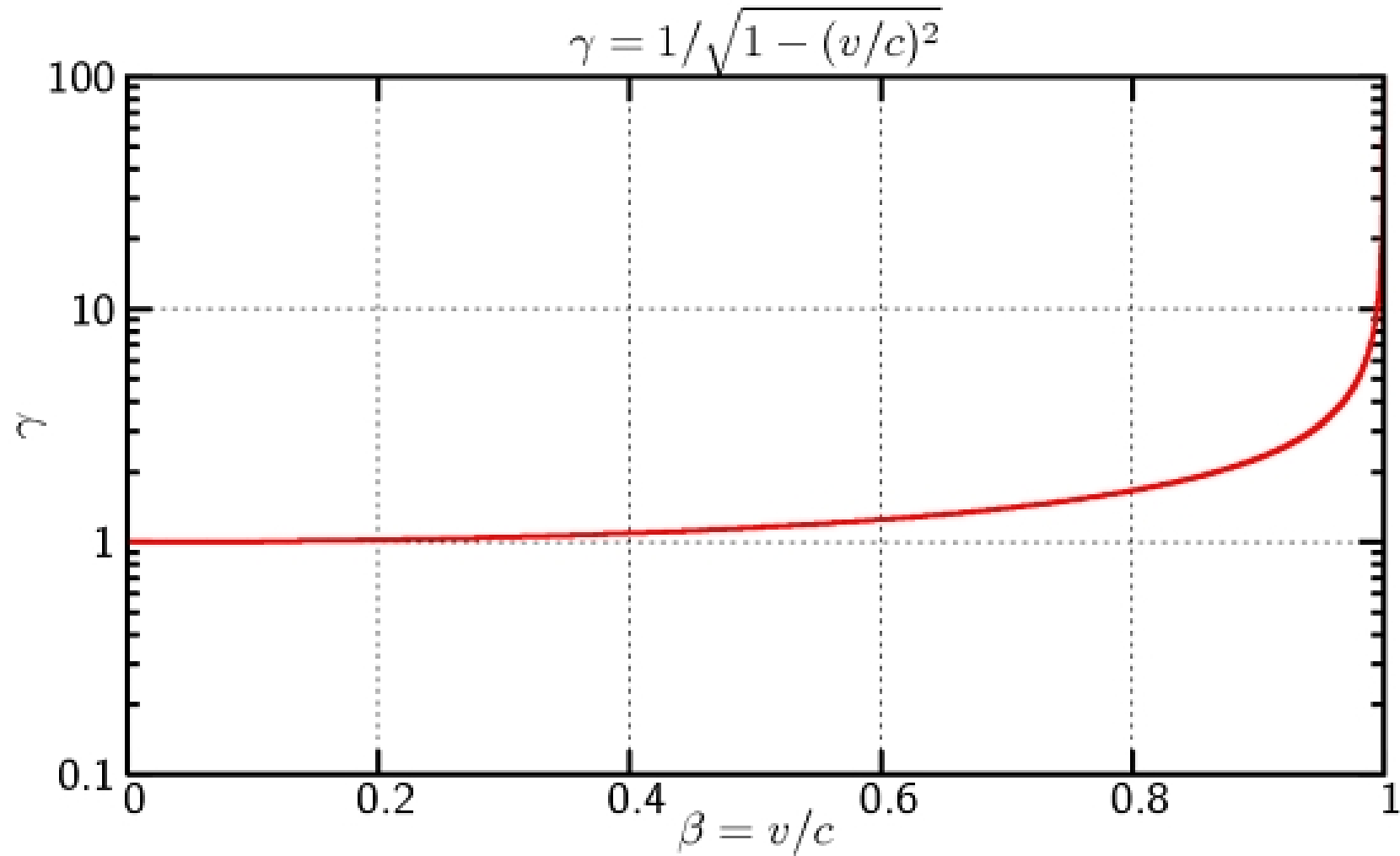
größer als EINS



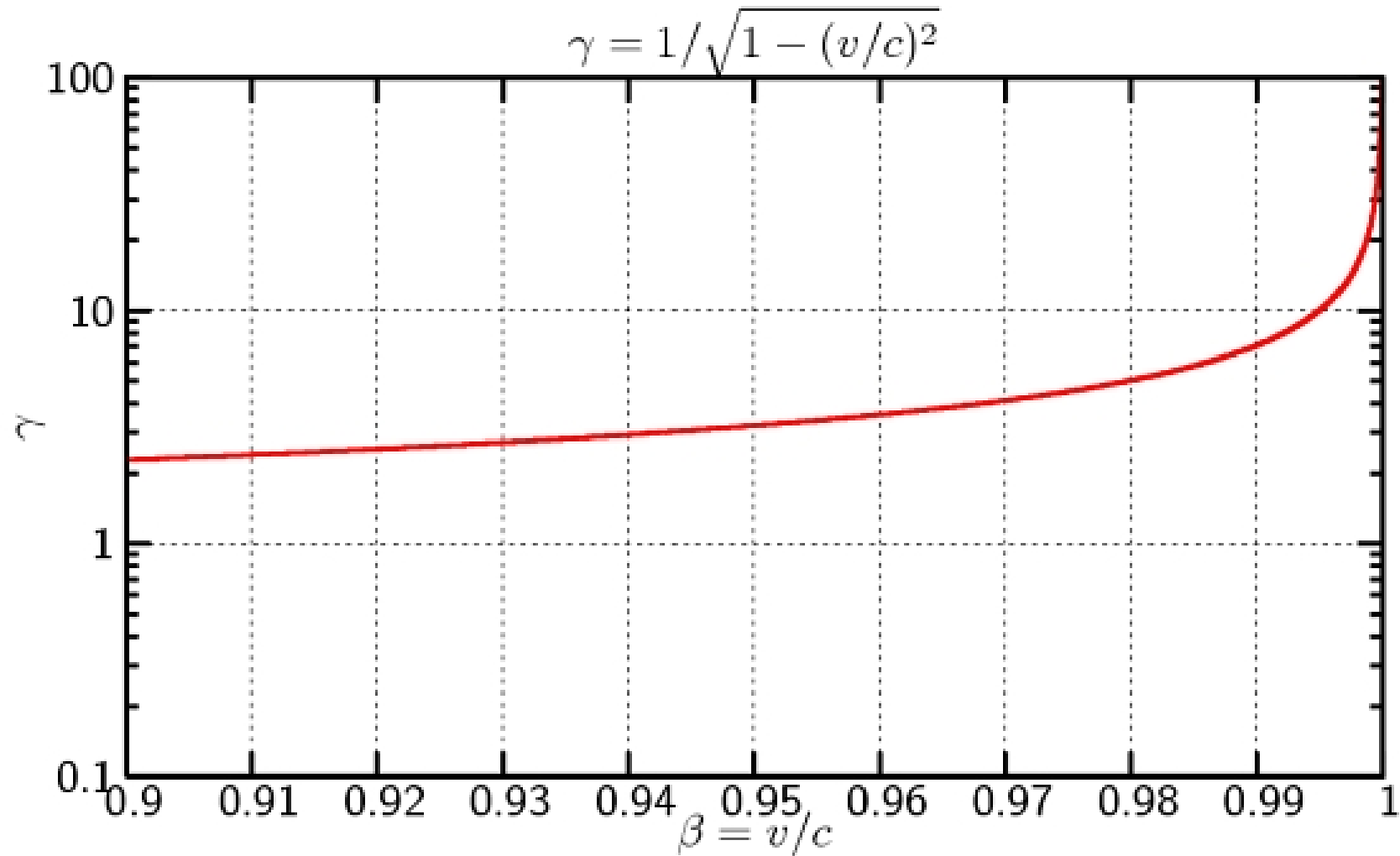
Diagnose

- Bewegung verändert Rate mit der Ereignisse für Beobachter stattfinden
- Lorentzfaktor vergleicht Geschwindigkeit Körper mit Lichtgeschwindigkeit
- Gammafaktor ist Maß für Zeitdilatation
- γ_{SRT} ist für bewegte Systeme stets größer als EINS

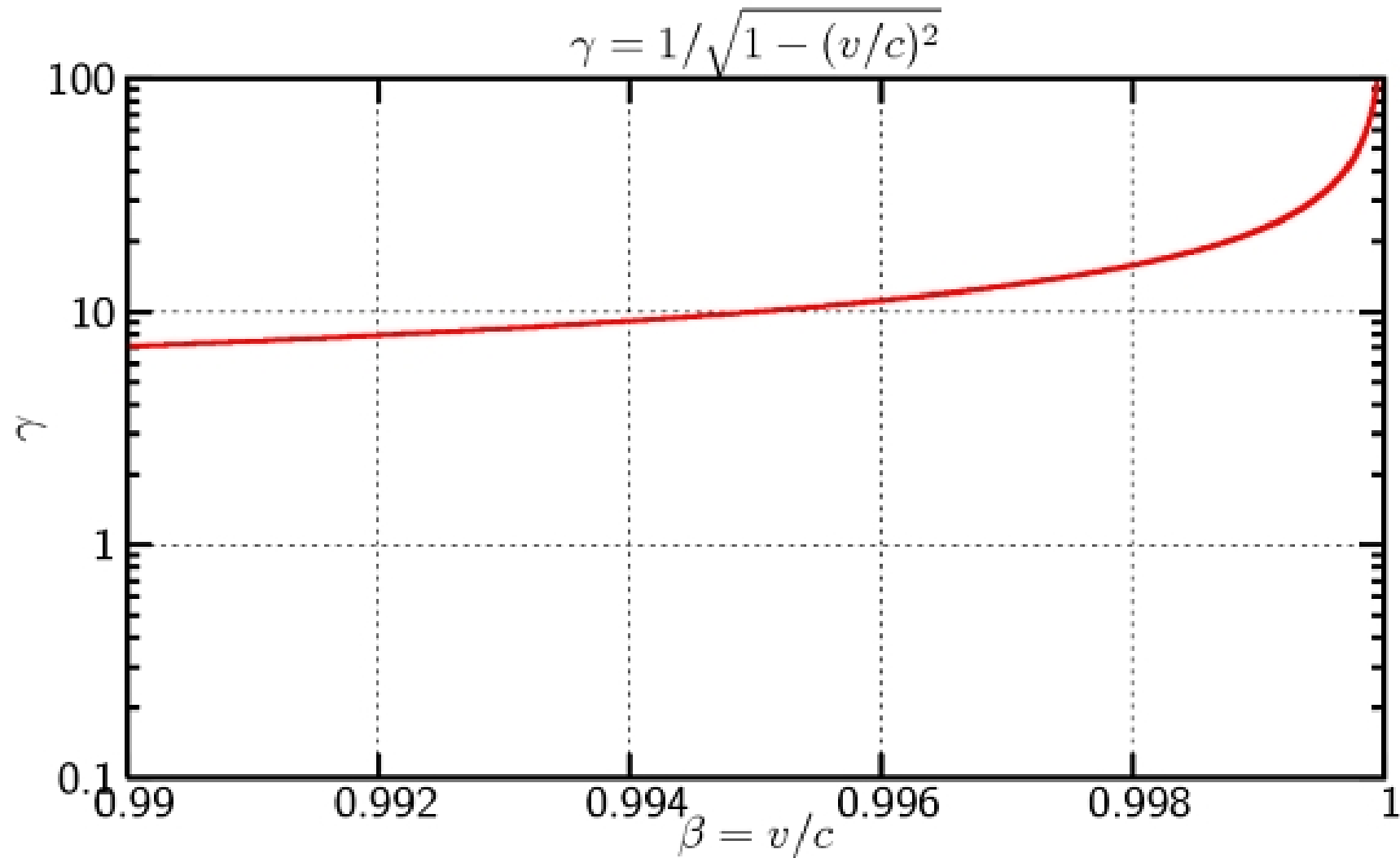
γ -Faktor zwischen 0.0 und 1.0



γ -Faktor zwischen 0.9 und 1.0



γ -Faktor zwischen 0.99 und 1.0



Symptome

- Berechnung γ -Faktor vereinfacht sich, wenn man Geschwindigkeit im Vergleich zu c angibt
- Faktor c^2 kürzt sich dabei heraus

example

Lorentzfaktor

$$\beta_{SRT} = \frac{v_{object}}{c} = 0.8$$

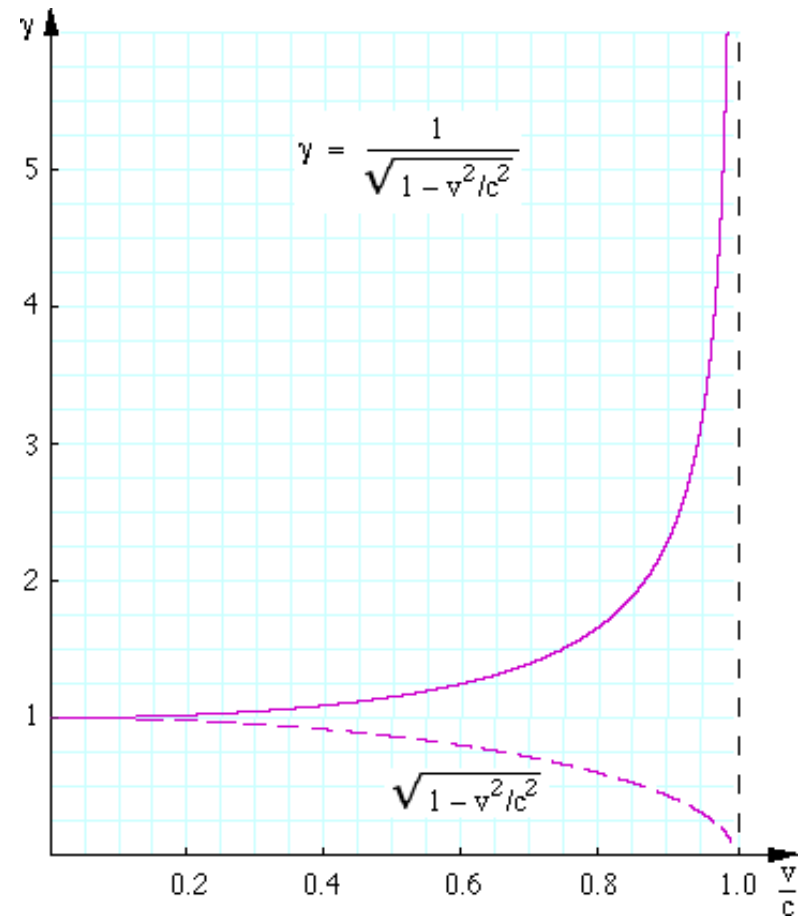
Lorentzfaktor

$$\frac{v_{object}^2}{c^2} = \frac{(0.8c)^2}{c^2} = (0.8)^2 \frac{c^2}{c^2} = 0.64$$

γ -Faktor

$$\gamma_{SRT} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v_{object}^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - 0.64}} = \frac{1}{\sqrt{0.36}} = \frac{1}{0.6}$$

$$\gamma_{SRT} = 1.67$$

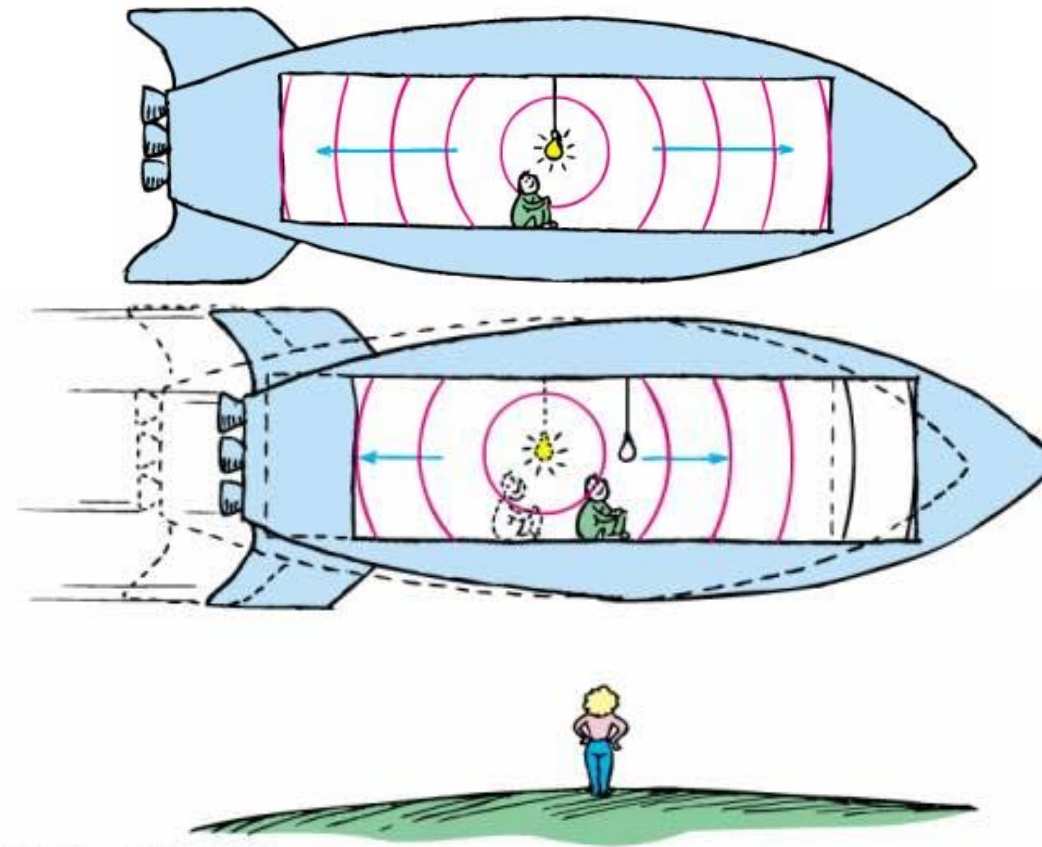


Bewegte Uhren gehen langsamer

Symptome

Relativ zu einem Beobachter bewegte Uhren

gehen für den Beobachter langsamer im Vergleich zu Uhren im Ruhesystem des Beobachters



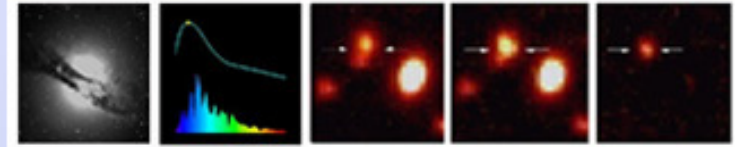
$$\Delta t_{\text{ruhend}} = \gamma_{\text{SRT}} \Delta t_{\text{bewegt}}$$
$$\Delta t_{\text{bewegt}} = \frac{\Delta t_{\text{ruhend}}}{\gamma_{\text{SRT}}}$$

Diagnose

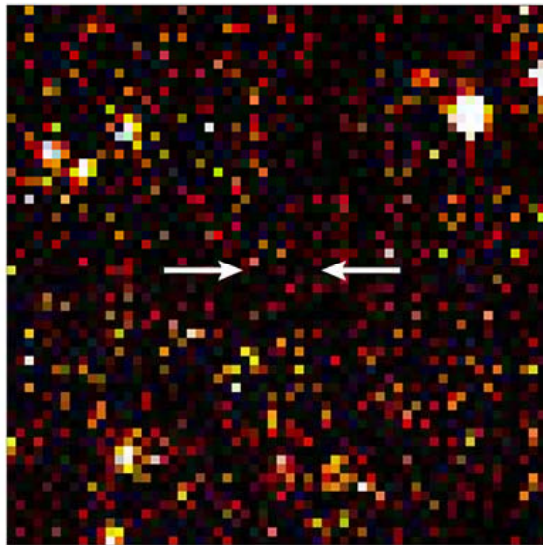
- Zeitdilatation ist vernachlässigbar, solange Geschwindigkeiten gering (einige Prozent Licht)
- im ganz normalen Leben wird man solche Phänomene nicht beobachten



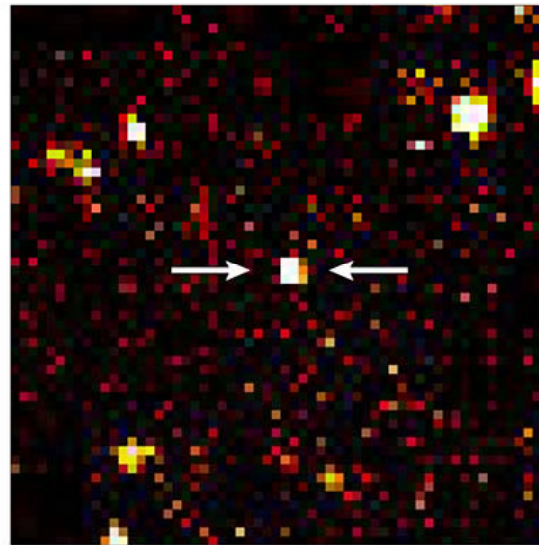
Supernova
Cosmology Project



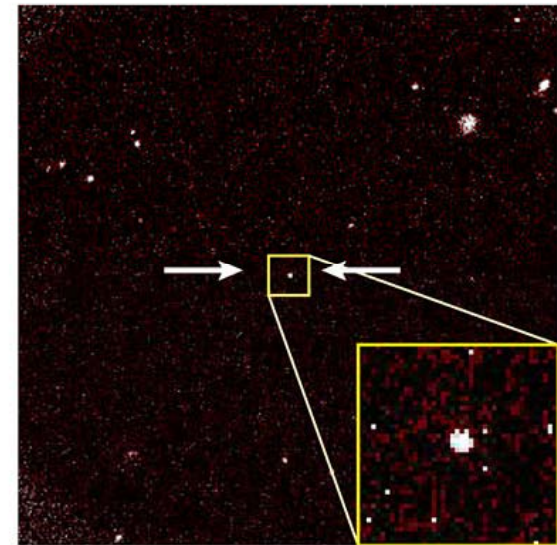
Cerro Tololo
Interamerican Observatory
4-meter Telescope
February 1997



Cerro Tololo
Interamerican Observatory
4-meter Telescope
March 1997



Hubble Space Telescope
April/May 1997

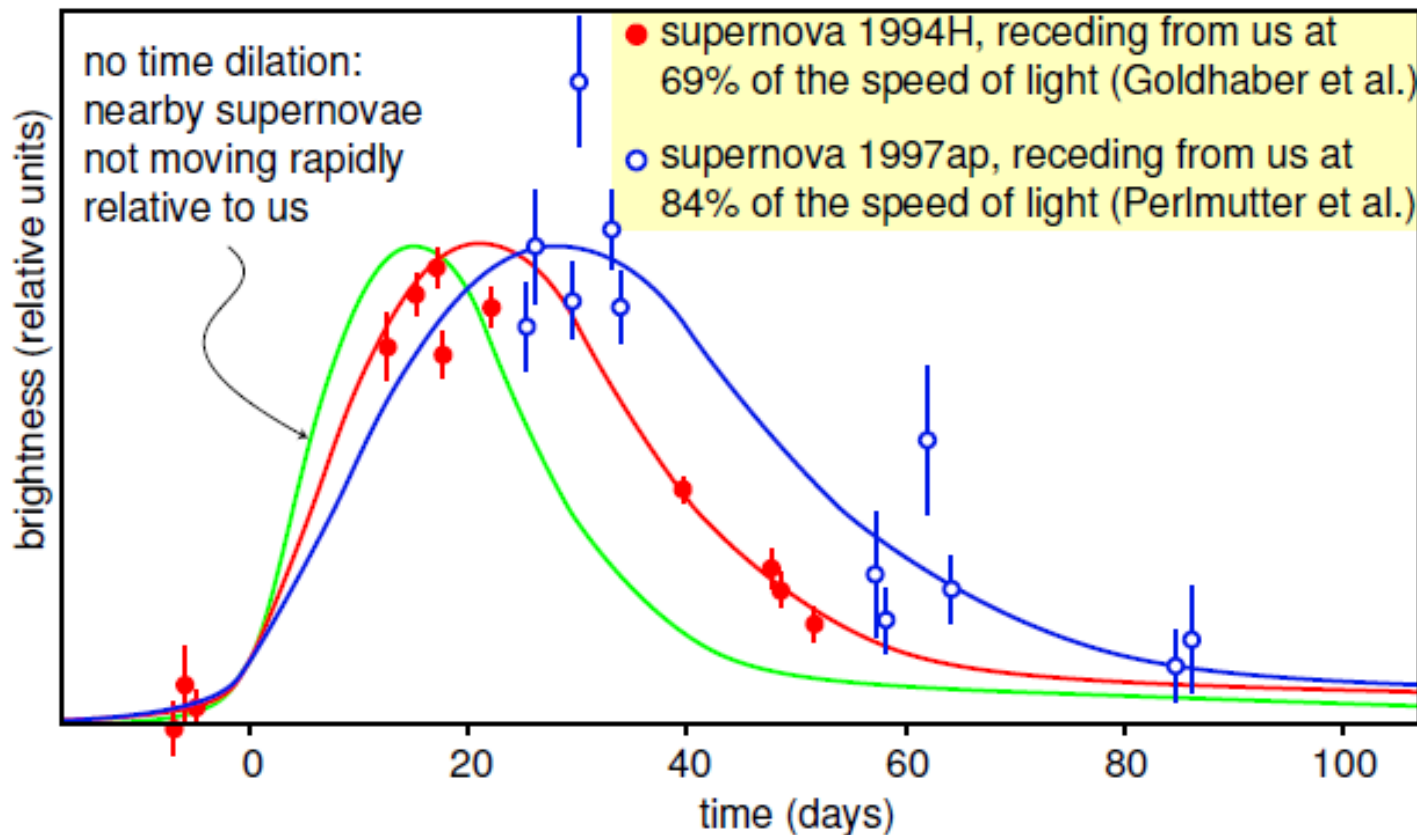


Diagnose
Astronomische Beobachtung der Supernova 1997ap

Zeitdilatation Supernova-Clocks

Symptome

- Supernovaexplosion von Typ Ia laufen stets nach selbem Muster ab
- Intensitätskurven zeigen typisches Zeitverhalten im Anstieg und Abfall der Leuchtkurve
- Abweichungen können durch Relativitätstheorie erklärt werden



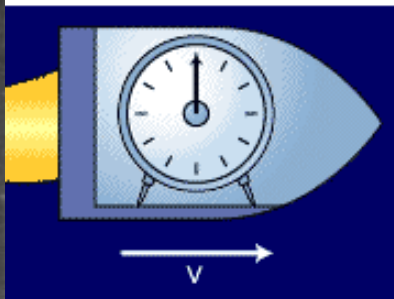
Entfernung
 $5 \cdot 10^7$ Lj

Diagnose

Astronomische Beobachtung von Supernovaexplosionen gibt Hinweise auf Zeitdilatation

Hafele and Keating Experiment

Uhrenvergleich



	flying east	flying west
Vorhersage	$(-40 \pm 23) \text{ ns}$	$(+275 \pm 21) \text{ ns}$
Experiment	$(-59 \pm 10) \text{ ns}$	$(+273 \pm 7) \text{ ns}$

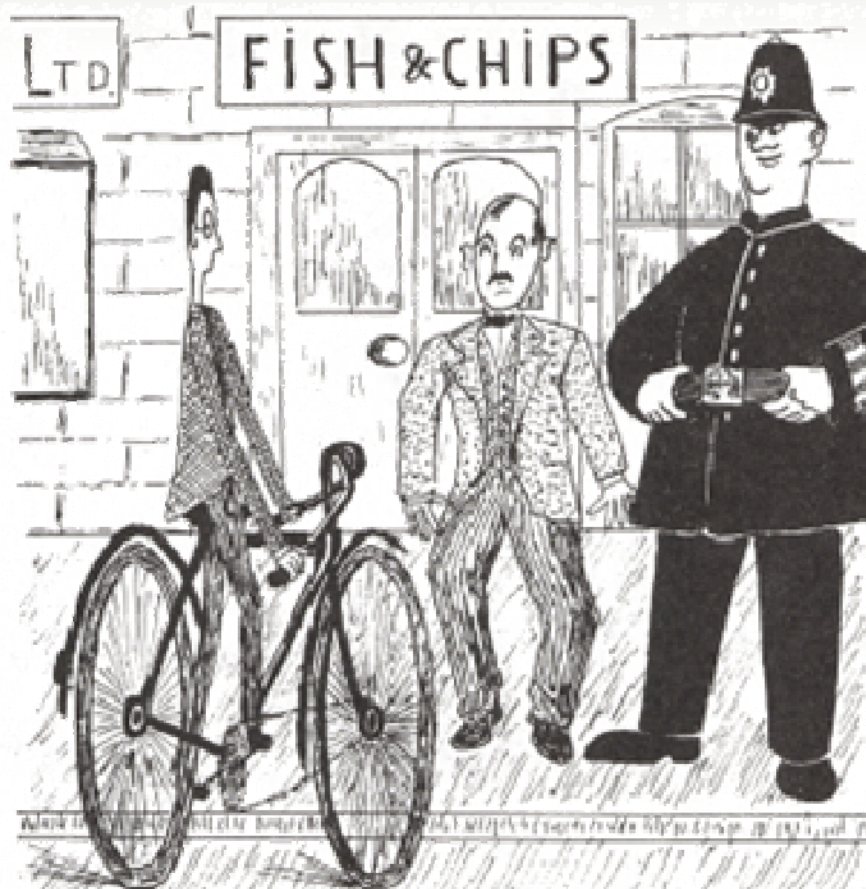
During October, 1971, four cesium atomic beam clocks were flown on regularly scheduled commercial jet flights around the world twice, once eastward and once westward, to test Einstein's theory of relativity with macroscopic clocks. ... Relative to the atomic time scale of the U.S. Naval Observatory, the flying clocks lost 59 ± 10 nanoseconds during the eastward trip and gained 273 ± 7 nanosecond during the westward trip, where the errors are the corresponding standard deviations. These results provide an unambiguous empirical resolution of the famous clock "paradox" with macroscopic clocks

Diagnose

Experimenteller Test der Zeitdilatation mit makroskopischen Uhren

Thema Gleichzeitigkeit

Längenkontraktion



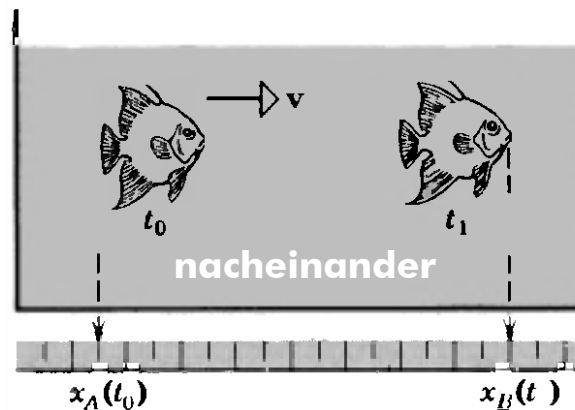
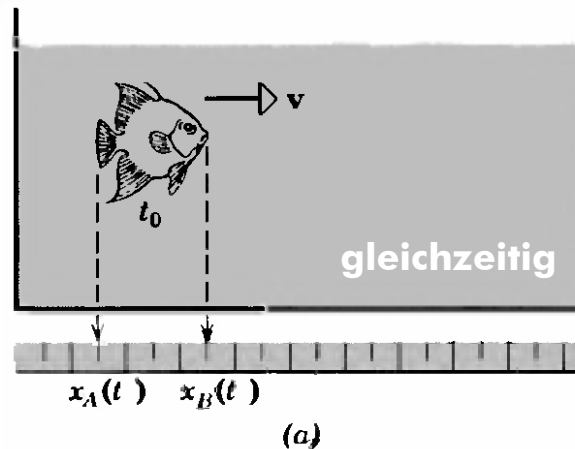
Unglaublich verkürzt



relativistisch betrachtet Abmessungen

Symptome

Wie bestimmt man die Länge eines sich bewegenden Objektes?



Diagnose

- um Länge zu bestimmen, muss man **GLEICHZEITIG** Anfang und Ende auf Maßstab ablesen
- man könnte vielleicht zuerst Position Schwanzflosse und später Position Fischmaul bestimmen
- in dieser Zeitspanne hat sich Fisch allerdings bewegt und Längenmessung ist damit falsch



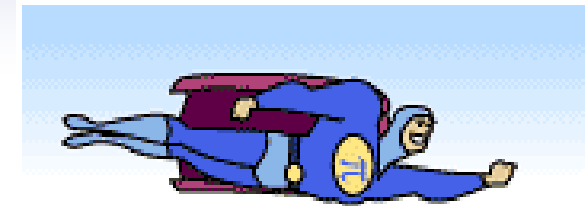
Längenkontraktion

Symptome

Superman fliegt mit hoher Geschwindigkeit zum Planeten Neptun

Zeitspanne, die Superman benötigt, um zum Neptun zu gelangen

$$\Delta t_{\text{Erde}} = \frac{D_{\text{Neptun}}}{V_{\text{Superman}}}$$



Wie Superman die Welt sieht

Zeitdilatation

$$\Delta t_{\text{bewegt}} = \frac{\Delta t_{\text{ruhend}}}{\gamma_{SRT}}$$

Für ruhenden Beobachter auf Erde verkürzt sich Reisezeit für Superman

$$\Delta t_{\text{Superman}} = \frac{\Delta t_{\text{Erde}}}{\gamma_{SRT}} = \Delta t_{\text{Erde}} \sqrt{1 - \frac{V_{\text{Superman}}^2}{c^2}}$$

Diagnose

- im **RUHESYSTEM** von Superman bewegen sich Erde/ Neptun mit **SEINER** Reisegeschwindigkeit
- aufgrund der Zeitdilatation vergeht im bewegten System die Zeit langsamer
- Beobachter messen dieselbe Geschwindigkeit, aber unterschiedliche Zeitabläufe



**Konsequenz ist, dass sich für bewegten Beobachter die Abstände ändern müssen
Im Vergleich zu ruhendem Beobachter verkürzt sich Länge Objekt für bewegten Beobachter**



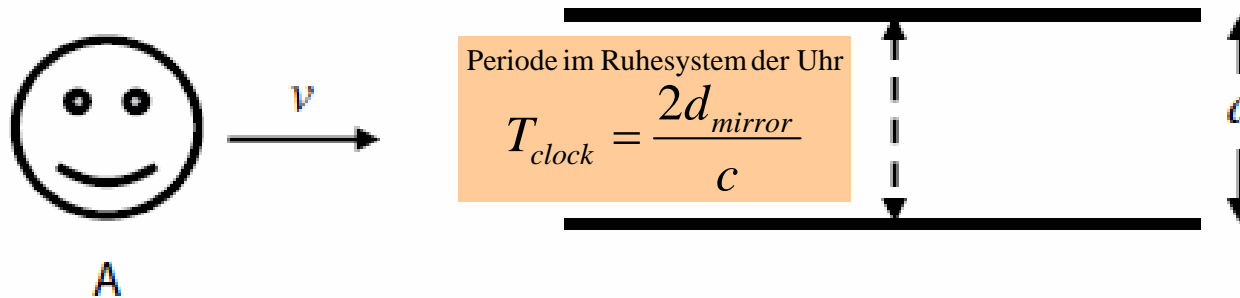
Zwei relativistische Sichtweisen

Photonclock



Symptome

- Photonuhr lässt Lichtquant zwischen zwei Spiegeln hin und her laufen
- beide haben im Ruhesystem Uhr dieselbe Geschwindigkeit NUR aus anderer Richtung



Periode im Ruhesystem Beobachter A

$$T_A = \frac{T_{clock}}{\sqrt{1 - \frac{v_A^2}{c^2}}}$$

Zeitdilatation

gleiche Geschwindigkeit, aber andere Richtung der Bewegung

$$|\vec{v}_A| = |\vec{v}_B|$$



Diagnose

- wie sehen die sich bewegenden Beobachter A und B den Mechanismus der Uhr arbeiten?
- Gedankenexperiment wiederholt Michelson-Morley Experiment
- Beobachter A sieht das Lichtweg sich geometrisch verlängert
- für Beobachter B scheint sich allerdings keine Zeitdilatation zu ergeben



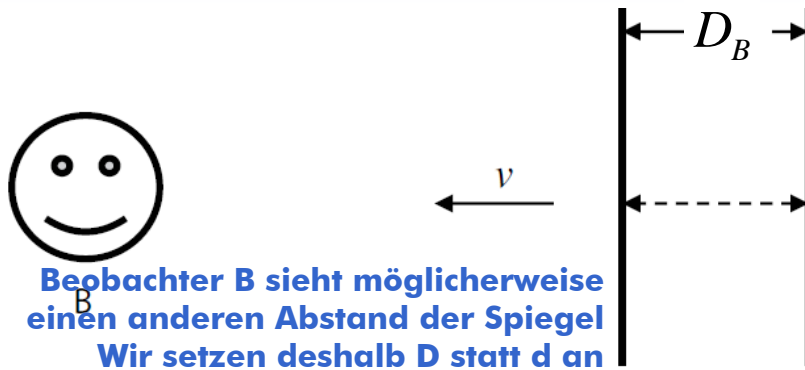
Photonclock, die zweite Herleitung Beobachter B

Periode im Ruhesystem der Uhr

$$T_{clock} = \frac{2d_{mirror}}{c}$$

Symptome

Für **BEIDE** Beobachter bewegt sich Photonuhr mit **EINER** Geschwindigkeit auf sie zu



Beide Beobachter erwarten aufgrund gleicher Geschwindigkeit gleiche Zeitdilation

$$T_A = T_B = \frac{T_{clock}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{2cD_B}{c^2 - v^2}$$

$v_A = v_B = v$

$$\frac{2d_{clock}}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{2cD_B}{c^2 - v^2}$$

$$\frac{d_{clock}}{D_B} = \frac{c^2 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{c^2 - v^2} = \frac{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$D_B = d_{clock} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = d_{clock} \sqrt{1 - \beta_{SRT}^2}$$

Längenkontraktion

Periode der Uhr beobachtet im Ruhesystem des Beobachters B

Photon bewegt sich in Richtung Beobachter B

Photon bewegt sich weg von Beobachter B

$$T_B = \frac{D_B}{c + v_B} + \frac{D_B}{c - v_B}$$

$$T_B = D_B \left(\frac{c - v_B}{c^2 - v_B^2} + \frac{c + v_B}{c^2 - v_B^2} \right)$$

$$T_B = \frac{2cD_B}{c^2 - v_B^2}$$

Diagnose

Uhr geht im Bezugssystem von Beobachter B langsamer und Längen sind zusätzlich kontrahiert

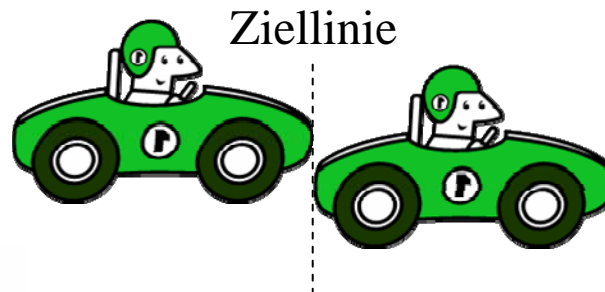
Längenkontraktion

$$\Delta t_{\text{ruhend}} = \frac{\Delta t_{\text{bewegt}}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma_{\text{SRT}} \Delta t_{\text{bewegt}} \Leftrightarrow \Delta t_{\text{bewegt}} = \frac{\Delta t_{\text{ruhend}}}{\gamma_{\text{SRT}}}$$

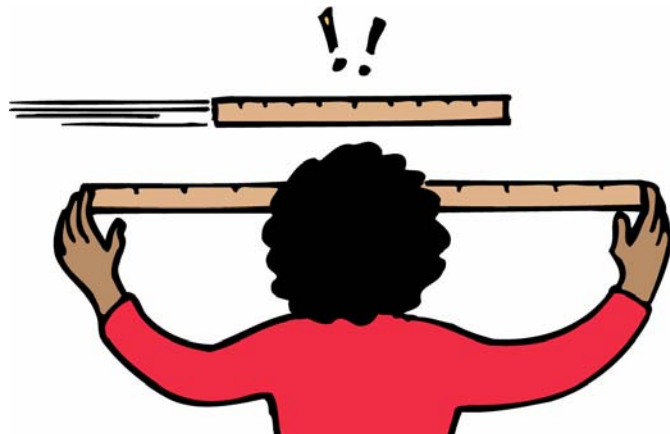
Symptome

Um Länge eines bewegten Objektes zu messen, müssen Endpunkte **SIMULTAN** bestimmt werden

Wie lange braucht Wagen
um über Ziellinie zu kommen?
 $L_{\text{ruhend}} = v_{\text{Auto}} \Delta t_{\text{ruhend}}$



Wie lange braucht Wagen
um über Ziellinie zu kommen?
 $L_{\text{bewegt}} = v_{\text{Auto}} \Delta t_{\text{bewegt}}$
 $L_{\text{bewegt}} = \frac{v_{\text{Auto}} \Delta t_{\text{ruhend}}}{\gamma_{\text{SRT}}}$



Längenkontraktion

$$L_{\text{bewegt}} = \frac{L_{\text{ruhend}}}{\gamma_{\text{SRT}}} = L_{\text{ruhend}} \sqrt{1 - \beta_{\text{SRT}}^2}$$

- Diagnose**
- Längenkontraktion ist direkte Auswirkung der Zeitdilatation
 - bewegte Maßstäbe sind **NUR** in Bewegungsrichtung verkürzt
 - Abstände, wie die zwischen Sternen, sind ebenfalls betroffen
 - Länge eines Objektes ist im Ruhesystem des Beobachters stets am größten

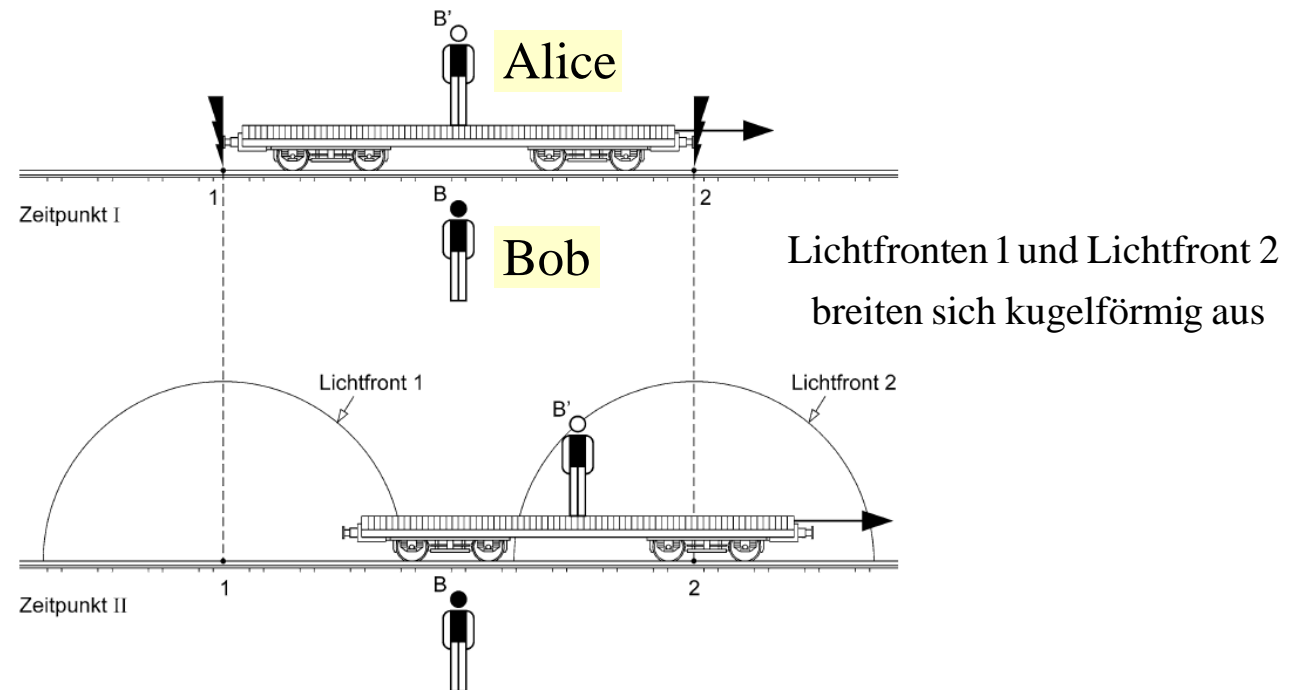
Staucht sich das Objekt tatsächlich? Ja, der Messprozess verändert die Realität
Längenkontraktion ist aber **KEINE** optische Täuschung

Längenmessung nach Einstein

Ruhesystem bewegten Beobachters

Symptome

- für ruhenden Beobachter Bob schlägt **GLEICHZEITIG** Blitz ins vordere und hintere Ende Zug ein
- Russmarken beweisen **UNSTRITTIG**, an welcher Position sich der Zug befunden haben muss

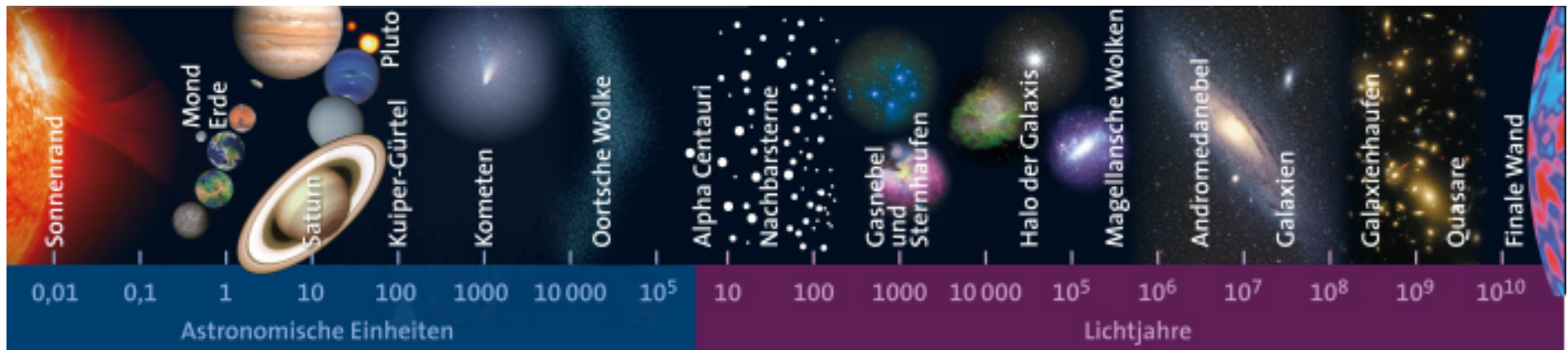


Diagnose

- Bob stellt fest, dass Zug Länge hat, die Abstand Marken 1 und 2 entspricht
- Alice sieht zuerst Lichtblitz von Marke 2 und kurze Zeit später den von Marke 1
- Folgerung von Alice ist, dass Blitzeinschlag zuerst in Marke 2 und später in Marke 1
- Alice deutet das so, dass Zug Marke 2 schon passiert hat, als Blitzeinschlag 1 erfolgte
- im Vergleich zu Bob erscheint Alice der Zug länger als Abstand der Marken
- oder umgekehrt: im Vergleich zu Alice erscheint Bob der Zug kürzer

Astronomische Einheit Lichtjahr

Ein Lichtjahr ist die Strecke, die eine elektromagnetische Welle in einem julianischen Jahr (365,25 Tage) im Vakuum zurücklegt



Ein Lichtjahr (1 Lj) sind $9.461 \cdot 10^{15}$ m

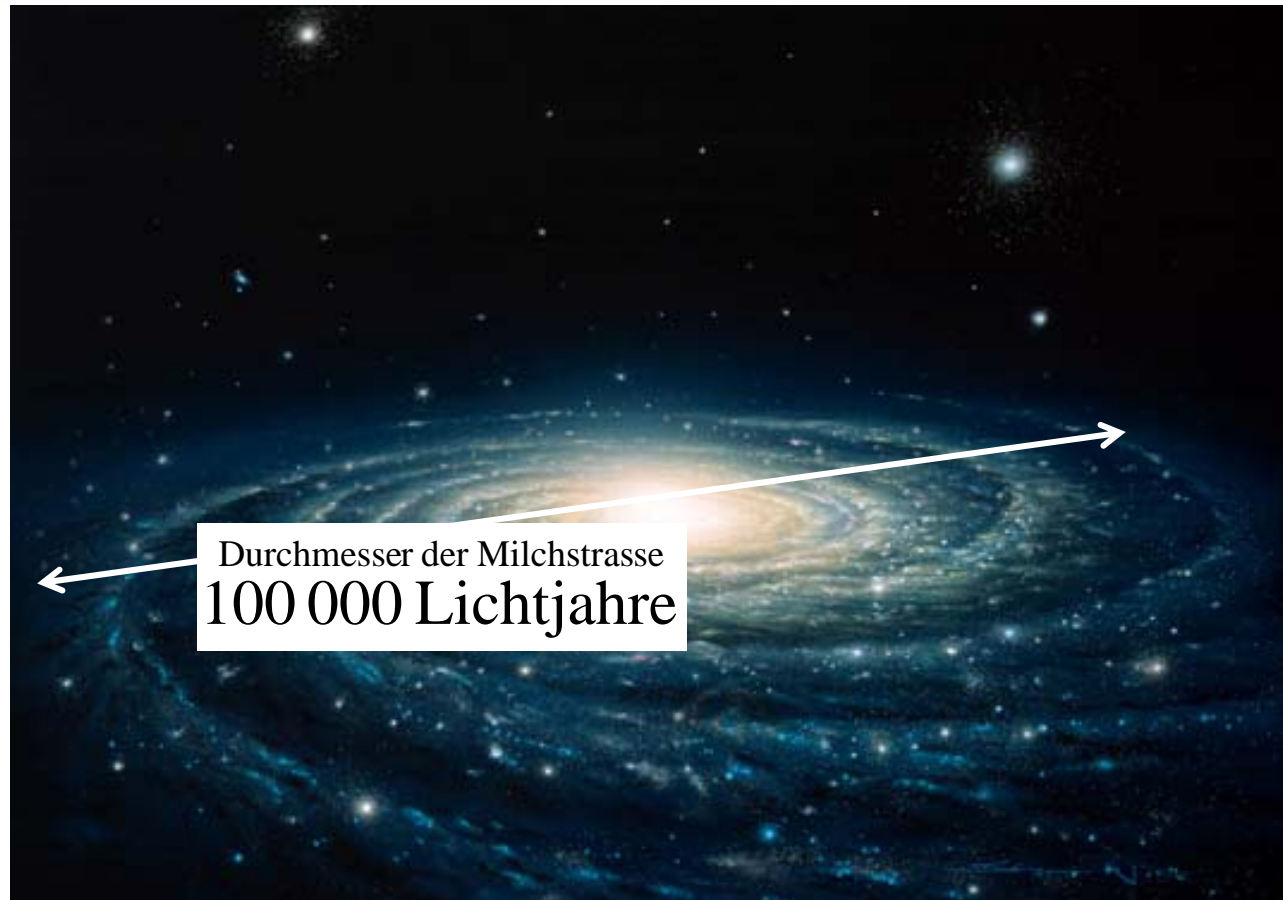
Ein Lichtjahr entspricht 63 241 AE (Astronomischen Einheiten)

Ein Lichtjahr entspricht 0.30660111 pc (Parsec)

0.999 999 999 999 999 999 999 95c
Flug durch die Galaxis

Symptome

Höchste je gemessene Geschwindigkeiten kosmischer Teilchen erreicht ein γ_{SRT} von 10^{11}



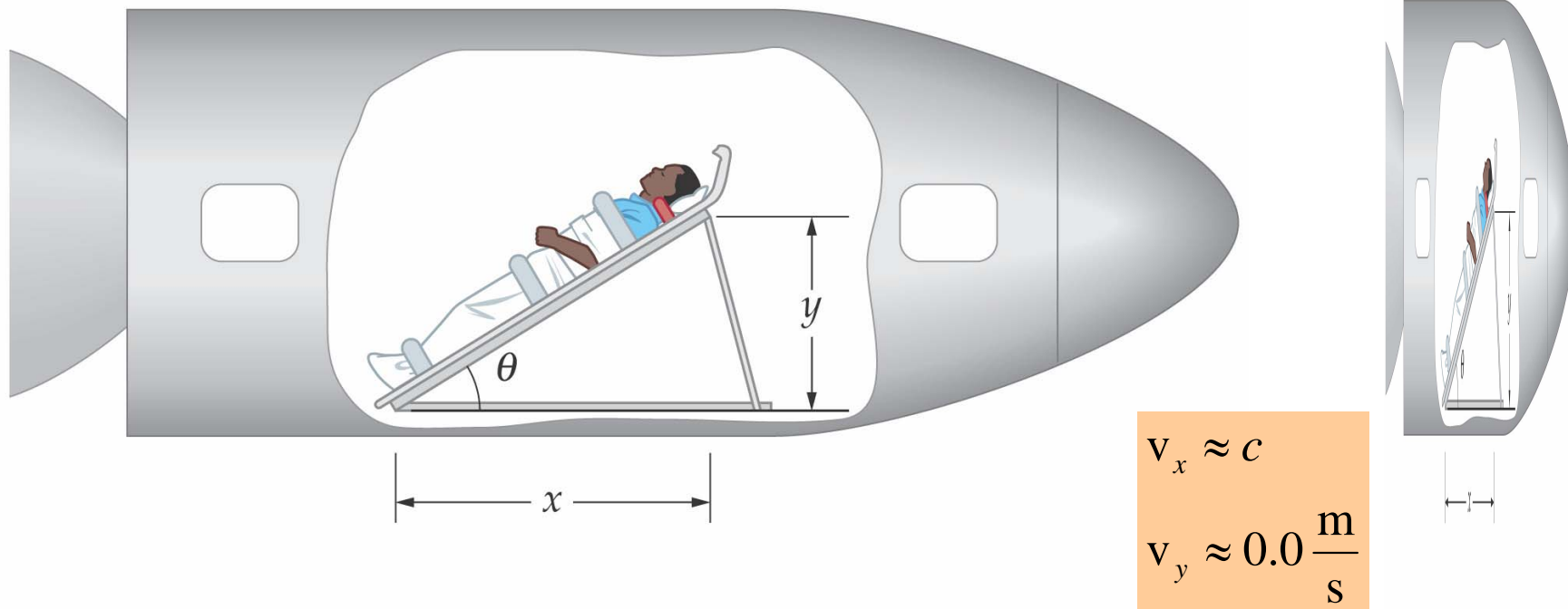
Diagnose

- Längenkontraktion verkürzt Durchmesser Milchstrasse auf 10^{-6} LJ oder 10^7 km
- Durchquerung der Galaxis dauert für relativistisches Teilchen nur 31 Sekunden

Längenkontraktion makroskopisch Raumflug

Symptome

Rakete fliegt mit hoher Geschwindigkeit an Beobachter vorbei



Diagnose

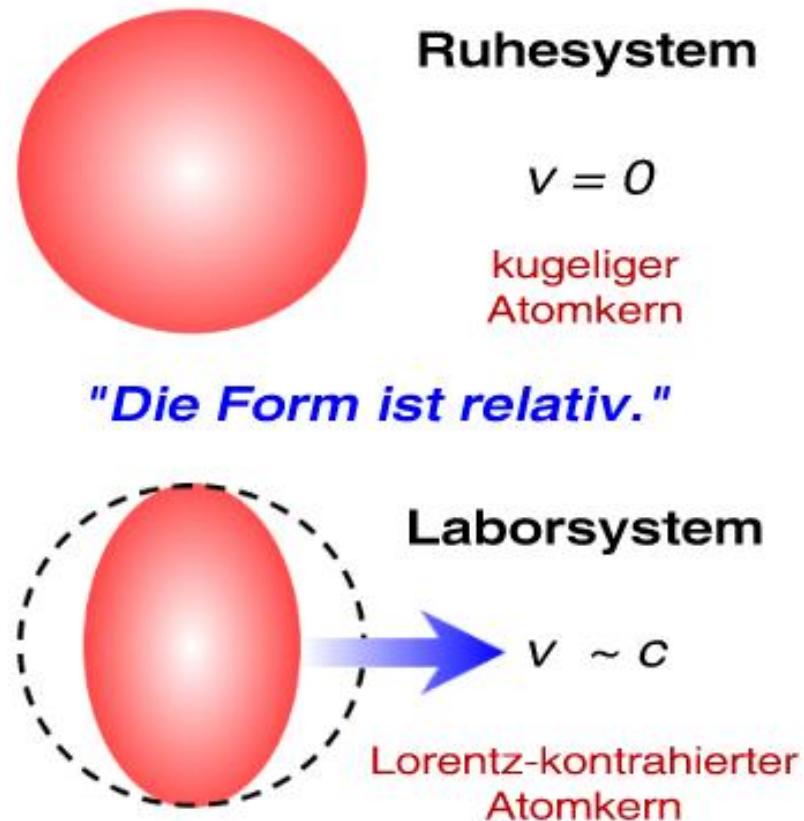
- Längenkontraktion erfolgt **NUR** in Bewegungsrichtung
- Längen senkrecht zur Bewegung werden **NICHT** beeinflusst

Längenkontraktion mikroskopisch

Atomkern

Symptome

- Teilchen fliegt mit hoher Geschwindigkeit an Kern vorbei
- im Ruhesystem kugelförmige schwere Ionen werden in Bewegungsrichtung gestaucht



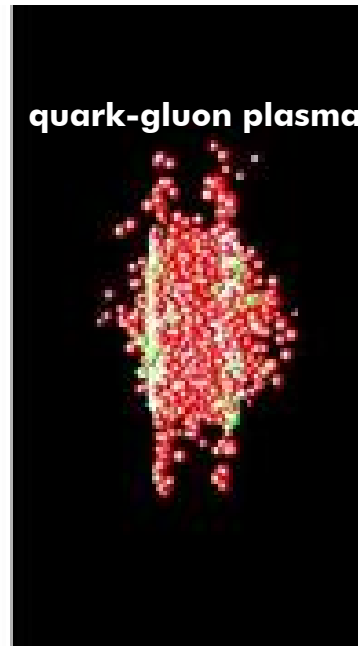
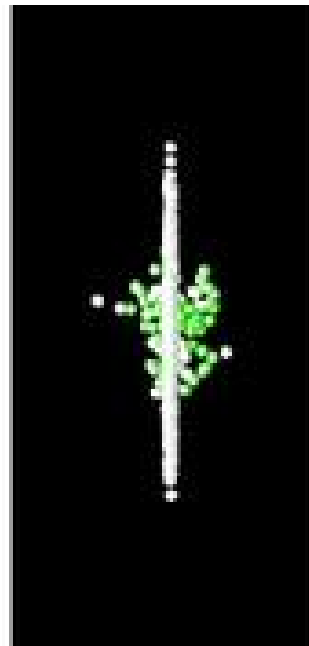
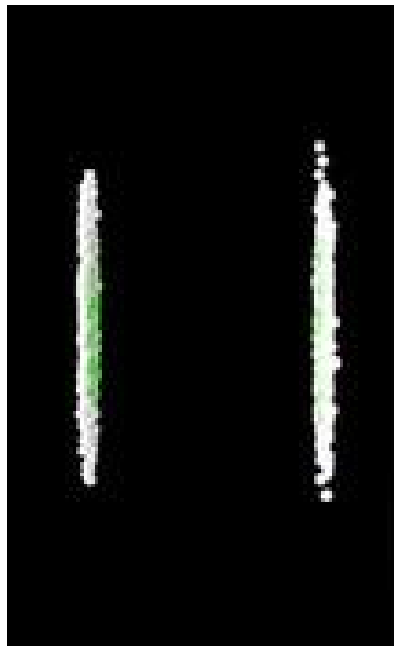
Diagnose

- Ionen haben im Laborsystem abgeflachte Gestalt und ähneln Pfannkuchen
- Einstein hat Sachverhalt in *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* berechnet

Stoßphysik

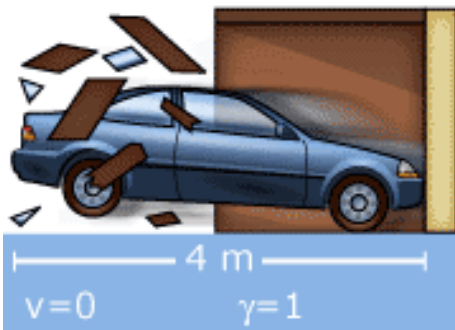
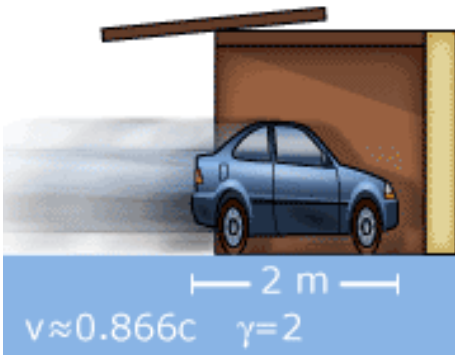
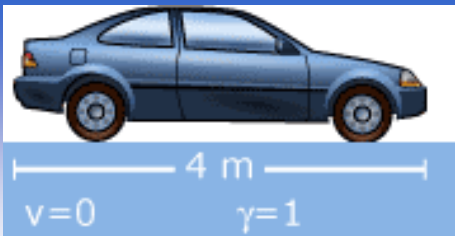
Längenkontraktion

Stoß eines relativistischen Teilchens mit ruhenden Goldatom



Diagnose

- hochenergetische Proton-Atom Stöße können zu neuen Materiezuständen führen
- Ausbildung eines sogenannten quark-gluon plasma



relativistisches einparken

Car-in-the-garage Paradox

Symptome

- Herr Schmitz tauscht seinen Trabi gegen einen Golf ein
- leider ist seine Garage zu kurz für das neue Auto
- kann Relativitätstheorie einen Beitrag zur Wiedervereinigung liefern?

Längenkontraktion

$$v_{car} = c \sqrt{1 - \left(\frac{l}{l_0}\right)^2}$$

$$\beta_{SRT} = \frac{v_{car}}{c} = \sqrt{1 - \left(\frac{3.7 \text{ m}}{4.5 \text{ m}}\right)^2}$$

$$\frac{v_{car}}{c} = \sqrt{1 - 0.68}$$

$$\frac{v_{car}}{c} = \sqrt{0.32} = 0.57$$



Diagnose

- Längenkontraktion ist für ruhenden Beobachter ein realer Effekt
- ruhender Beobachter sieht Enden Auto GLEICHZEITIG in Garage
- Auto mit relativistischer Geschwindigkeit passt in kürzere Garage
- Änderung der relativen Geschwindigkeit hat Auswirkung auf Länge
- ruhender Wagen hat wieder ursprüngliche Länge
- PKW passt nicht in Garage

A science fantasy book called *Mr Tompkins in Wonderland* (1940), by physicist George Gamow, imagined a world in which the speed of light was only 10 m/s (20 mi/h). Mr Tompkins had studied relativity and when he began “speeding” on a bicycle, he “expected that he would be immediately shortened, and was very happy about it as his increasing figure had lately caused him some anxiety. To his great surprise, however, nothing happened to him or to his cycle. On the other hand, the picture around him completely changed. The streets grew shorter, the windows of the shops began to look like narrow slits, and the policeman on the corner became the thinnest man he had ever seen. ‘By Jove!’ exclaimed Mr Tompkins excitedly, ‘I see the trick now. This is where the word *relativity* comes in.’”

Relativity does indeed predict that objects moving relative to us at high speed, close to the speed of light c , are shortened in length. We don't notice it as Mr Tompkins did, because $c = 3 \times 10^8$ m/s is incredibly fast. We will study length contraction, time dilation, simultaneity non-agreement, and how energy and mass are equivalent ($E = mc^2$).

