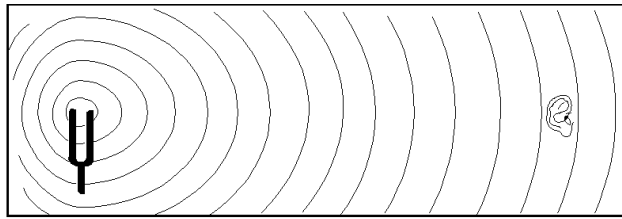
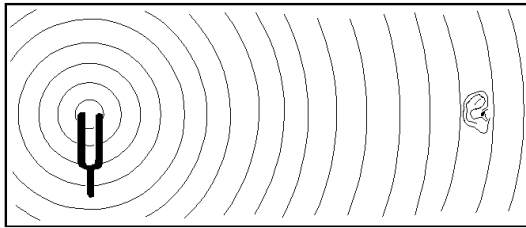


spezielle Relativitätstheorie

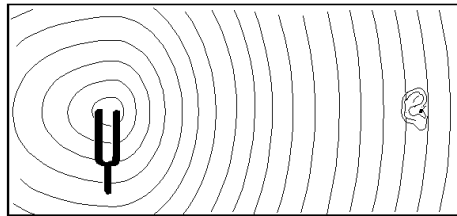
sich mit konstanter Geschwindigkeit gegeneinander bewegende Systeme



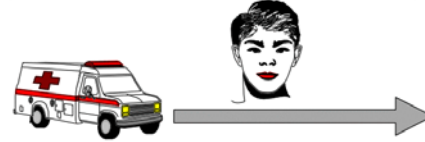
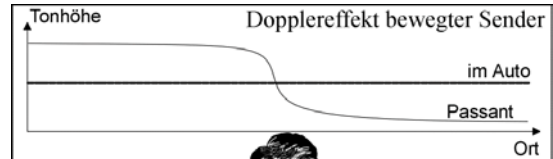
Bewegung der Quelle



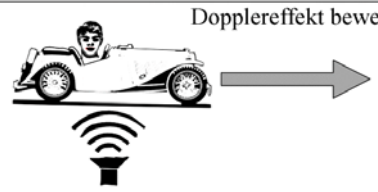
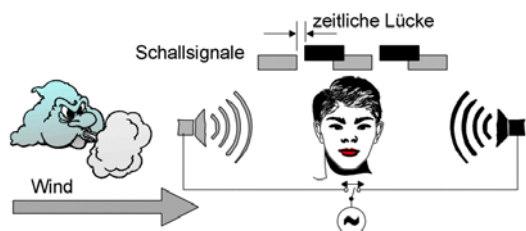
Ruhe



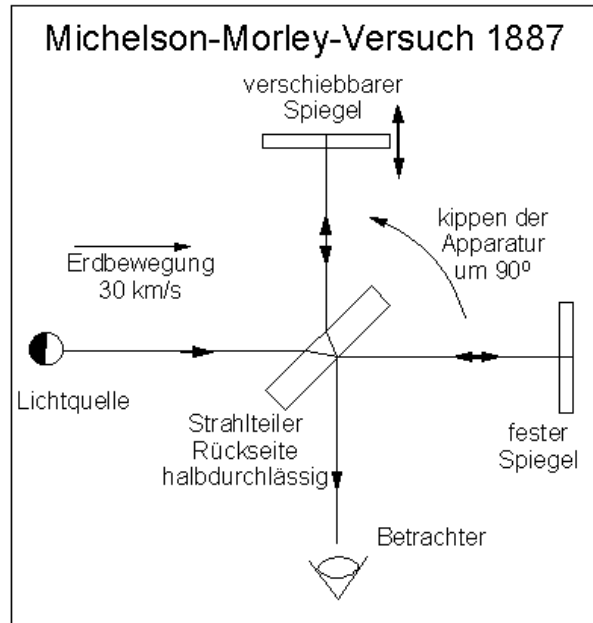
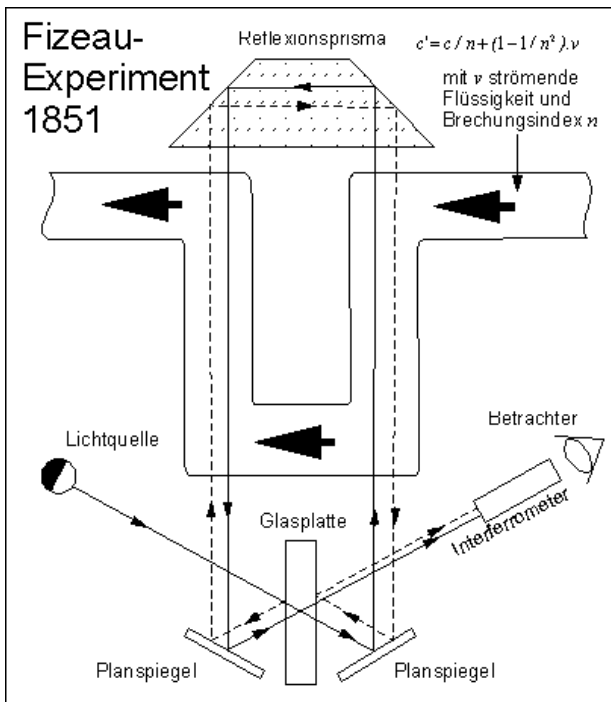
Bewegung der Quelle



Laufzeit durch bewegtes Ausbreitungsmedium



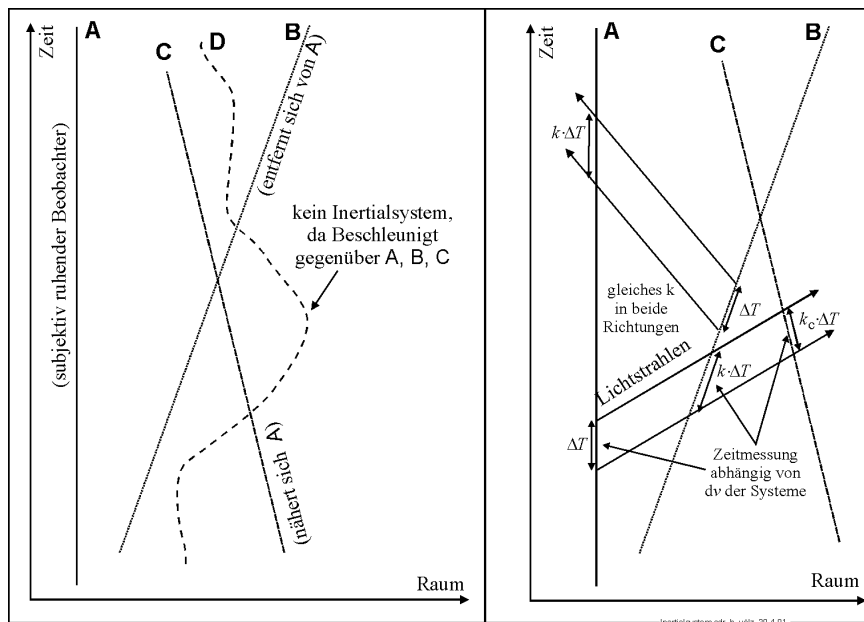
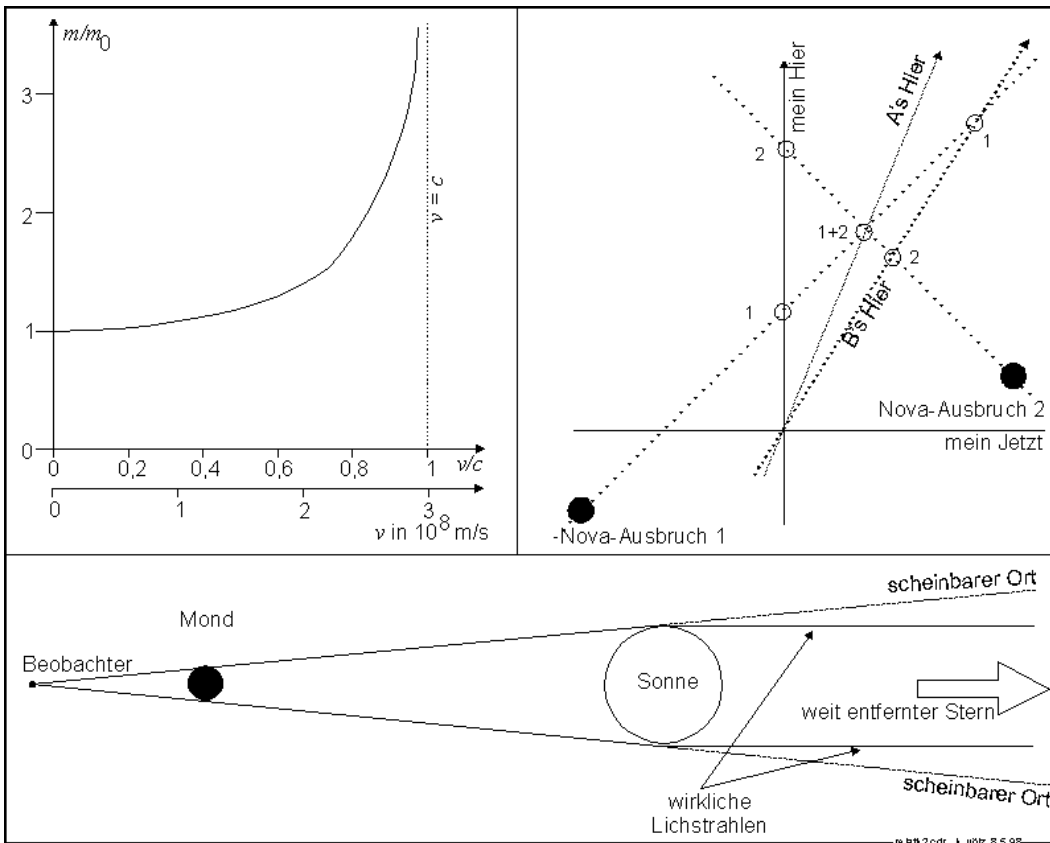
Dopplereffekt bewegter Hörer



- vor 1900 ruhender Äther in dem sich das Licht als Welle ausbreitet
- Fizeau 1851: nur teilweise in strömendem Wasser mitbewegtes Licht

$$c' = \frac{c}{n} - \frac{1}{n^2} \cdot v_{\text{Wasser}}$$

- Michelson und Morley 1887: Es gibt keinen ruhenden Äther.



Folgerungen:

- Für Licht gibt es unterschiedliche (individuelle) *Inertialsysteme*.
- Lichtgeschwindigkeit c ist eine absolute *Grenzeschwindigkeit*.
- *Lorentz-Transformation* von 1904 zur Umrechnung der Systeme
- **Einstein:** spezielle *Relativitätstheorie* 1905
jedes System besitzt seine eigene „Hier-“ und „Jetzt-Linie“
Entscheidend ist das Verhältnis $\beta = v/c$ (v Eigengeschwindigkeit)

Folgerungen aus Einstein-Theorie

- Gleichzeitigkeit ist unbestimmt
- Zeitdilatation: bewegte Uhren gehen langsamer
- Längenkontraktion: bewegte Gegenstände verkürzen sich
- Massenzunahme erzwingt Änderung des Energie-Erhaltungssatzes

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad d' = d \cdot \sqrt{1 - \beta^2} \quad m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$E = m \cdot c^2$$

Experiment: 1971; zwei gleiche, sehr genau Cs-Atomuhren. Eine fliegt mit Flugzeug 278 m/s, ($10^{-6} \cdot c$) 15 Stunden. Zurückgekehrt besteht die Zeitdifferenz = 47 ns, entspricht sehr dem theoretischen Wert.

Eindimensionale Vereinfachung: Jedes Objekt hat seine eigene „Welt-“ und „Jetzt-Linie“

Weltlinie: Alles was hier ist, war und sein wird

Jetztlinie: Alles sich jetzt hier und anderswo ist bzw. abspielt.

Ein *anderer Beobachter* hat eine andere Weltlinie, sie ist parallel zu meiner, wenn er sich mit mir bewegt, sonst um den Winkel $\tan(v/c)$ geneigt.

Sichtbarkeit durch $\pm 45^\circ$ begrenzt.

Allgemeine Relativitätstheorie 1913

Systeme bewegen sich **beschleunigt**

- Raum und Zeit verlieren Rest an Absolutheit
- Raum ist nicht mehr euklidisch, sondern gekrümmt
- Masse und Raumkrümmung bedingen sich gegenseitig
- Schwerkraft ist Folge der Krümmung
- Massen bewirken Lichtablenkung
- Möglichkeit von Gravitationswellen

Lösungen der Einsteingleichung sehr schwierig

Einstein selbst vereinfacht mit einer kosmologischen Konstanten für die er keine Begründung geben kann.

1917 Expansion des Weltraums wird vermutet

1919 Nachweis der Lichtablenkung durch Eddington u. a.

1922 Alexander Friedmann Theorie vom Urknall und Raumkrümmung

1924 de Broglie: bewegte Teilchen = Materiewellen

1925 Gravitationsrotverschiebung wird festgestellt

1929 Fluchtbewegung der Galaxien durch Hubble entdeckt (Zeitpfeil)

1964 2,73 K Reststrahlung gefunden, A. A. Penzias, R. W. Wilson

Entwicklung des Weltalls drei Fälle, je (kritischen) Masse des Weltalls

- geschlossenes Weltall mit endlicher Ausdehnung, Raum positiv gekrümmt. Analogon Oberfläche eines Luftballons, kann expandieren | sich verengen
 - flaches unendlich ausgedehntes Weltall
 - unendlich ausgedehntes Universum mit negativer Krümmung. Hyperboloid
- Heutige Kenntnis weniger als ein Prozent. Daher dauernd expandierendes, unendlich ausgedehntes Weltall mit negativer Krümmung

Probleme 1. Masse der Neutrinos, 2. dunklen Materie

Für Urknall nur 3 experimentelle Befunde

1. Reststrahlung; 2. Rotverschiebung der Galaxien, 3.) Häufigkeit von H, He, Li im Weltall

