

Was ist eigentlich Relativitätstheorie?

Claus Lämmerzahl und Volker Perlick

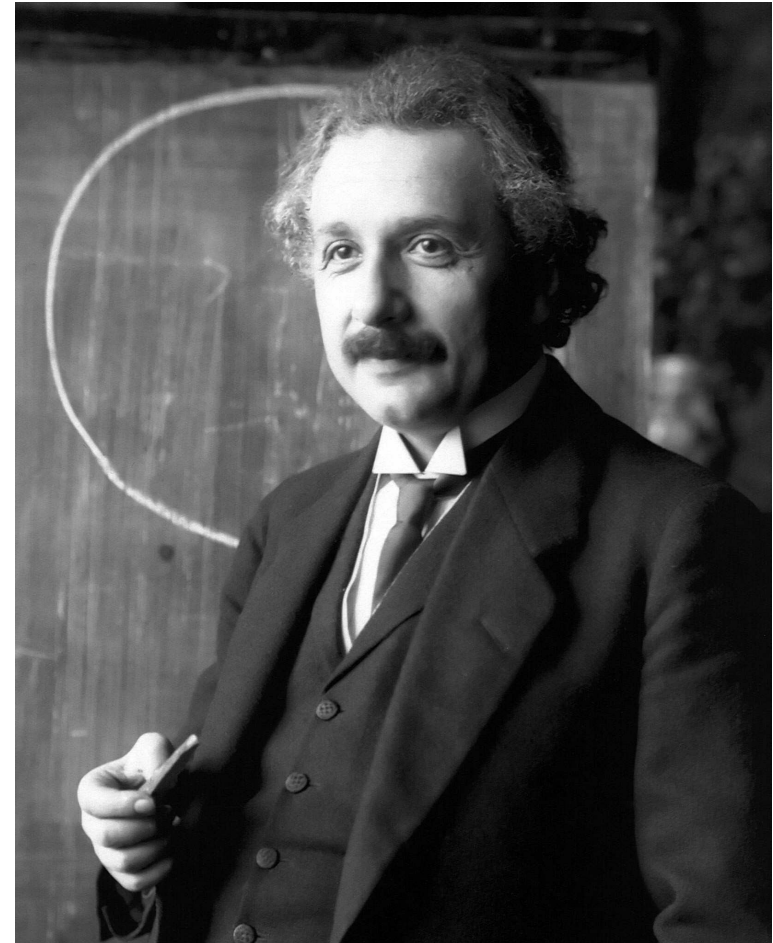
Zentrum für Angewandte Raumfahrttechnologie
und Mikrogravitation (ZARM), Universität Bremen



Oldenburg, Schlaues Haus, 6. Oktober 2015

Albert Einstein (14.3.1879 – 18.4.1955)

- geboren in Ulm
- aufgewachsen in München
- Studium am Polytechnikum in Zürich
- Arbeit am Patentamt in Bern
- **1905** Spezielle Relativitätstheorie (im selben Jahr bahnbrechende Arbeiten zum lichtelektrischen Effekt und zur Brownschen Bewegung)
- **1915** Allgemeine Relativitätstheorie
- 1922 Nobelpreis
- ab 1933 in Princeton, USA



Warum wurde die Spezielle Relativitätstheorie eingeführt?

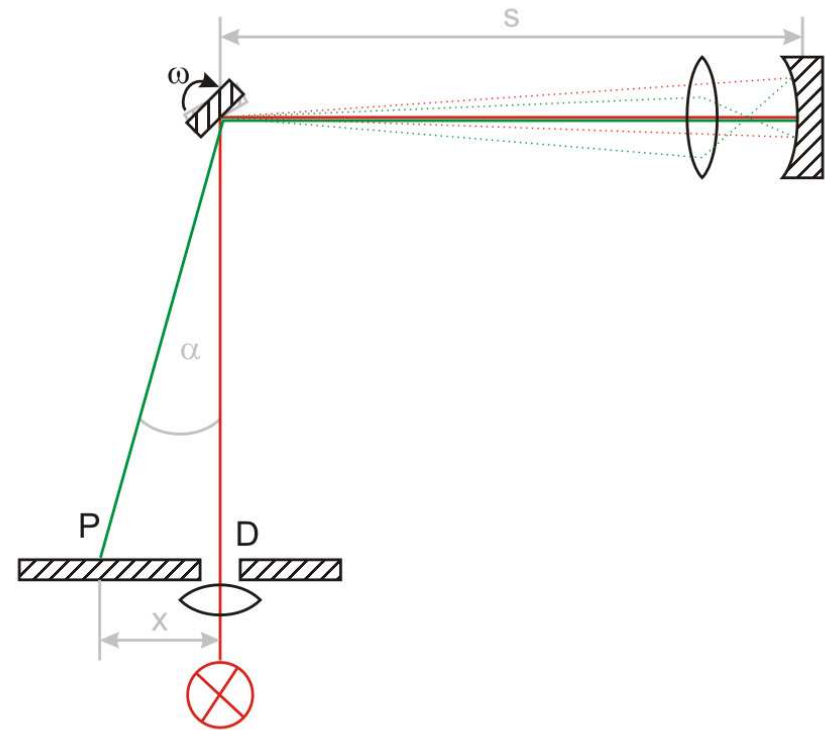
- Die Theorie elektromagnetischer Felder wies logische Unstimmigkeiten auf.
- Es gelang nicht, experimentell den theoretisch vorhergesagten Lichtäther nachzuweisen.

Postulate der Speziellen Relativitätstheorie

- P1 Gegeneinander geradlinig gleichförmig bewegte Bezugssysteme (“Inertialsysteme”) sind gleichberechtigt.
- P2 Die (Vakuum-)Lichtgeschwindigkeit hat in jedem Inertialsystem denselben Wert c .

Messung der Lichtgeschwindigkeit

- **Römer 1676:** Verschiebung der Zeitpunkte des Ein- bzw. Austritts von Jupitermonden aus dem Jupiter-schatten
- **Bradley 1728:** Aberration von Sternen
- **Fizeau 1849:** Zahnradmethode im Labor
- **Foucault 1850:** Drehspiegelmethode im Labor

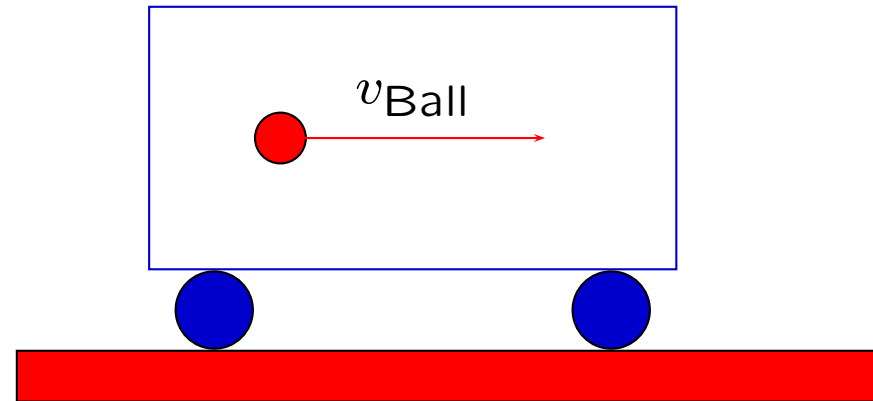


Heutiger Wert: $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$

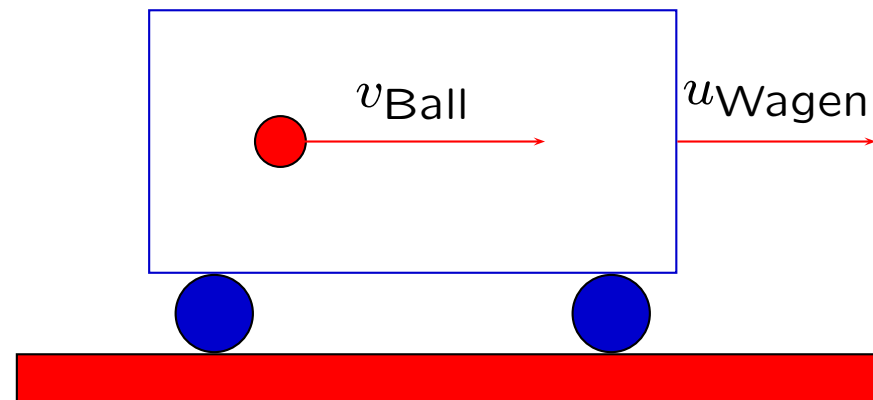
Alltagserfahrung

Was erwarten wir? Addition der Geschwindigkeiten (Galilei)

- Geschwindigkeit des Wagens = 0 m/s
 - Geschwindigkeit des Balls bzgl. des Wagens = 10 m/s
- ⇒ Geschwindigkeit des Balls bzgl. Boden = 10 m/s



- Geschwindigkeit des Wagens = 20 m/s
 - Geschwindigkeit des Balls bzgl. des Wagens = 10 m/s
- ⇒ Geschwindigkeit des Balls bzgl. Boden = 30 m/s



Konsequenz aus Alltagserfahrung

Galileische Geschwindigkeitsaddition

$$v'_{\text{Ball}} = v_{\text{Ball}} + u_{\text{Wagen}}$$

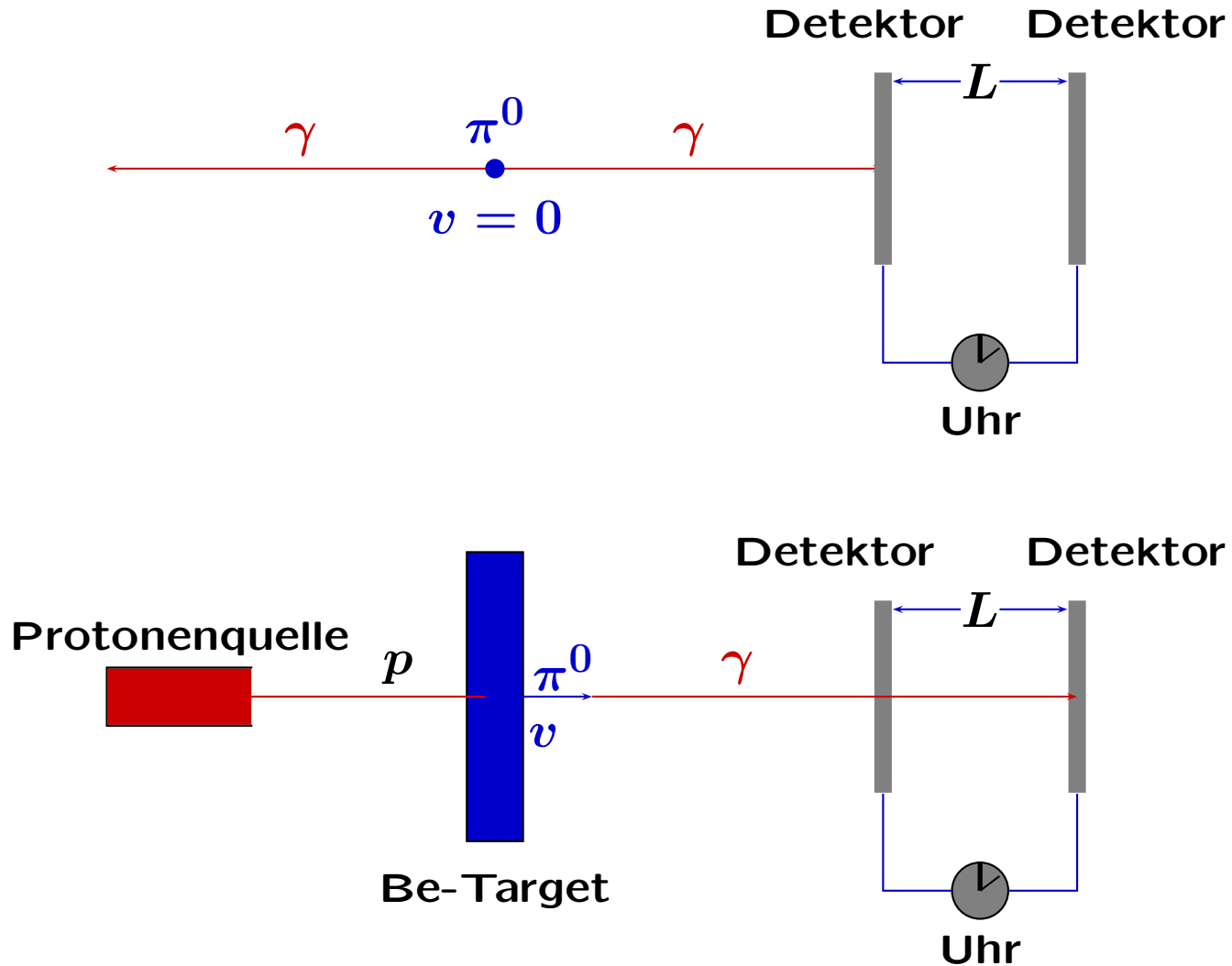
sollte auch für Licht gelten:

$$c' = c + u$$

Einstein postuliert, dass das nicht stimmt.

Das Experiment muss entscheiden, was richtig ist.

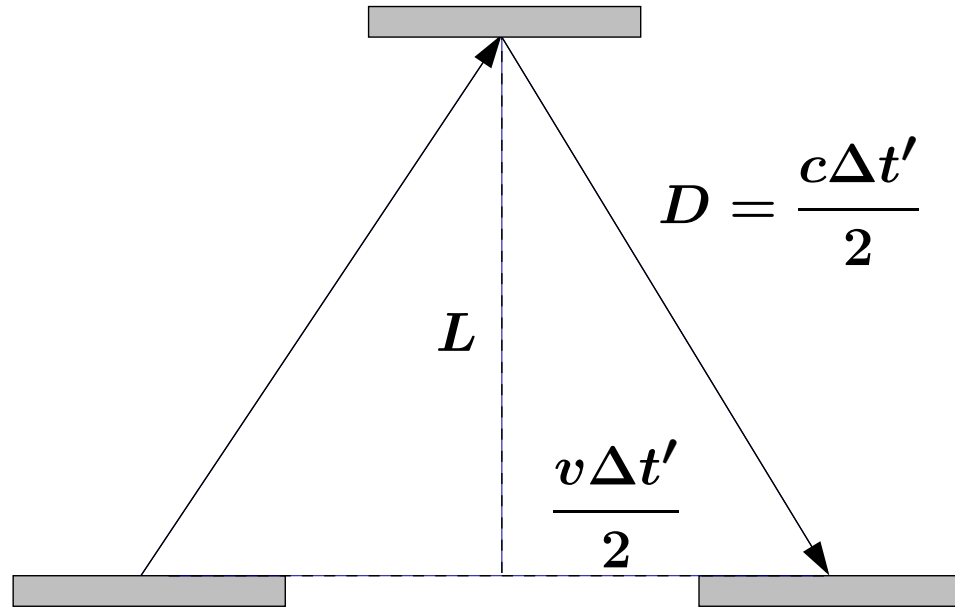
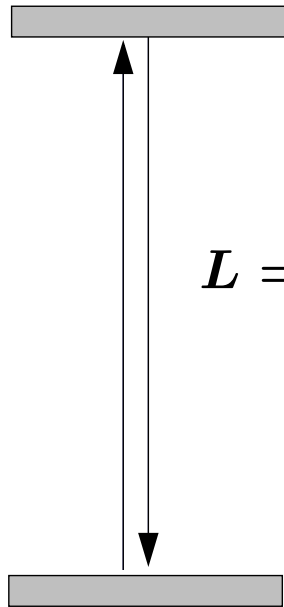
Experiment von Alväger (1964)



Licht bewegt sich mit c , auch wenn es von sehr schnell bewegten Elementarteilchen ausgesandt wird

Zeitdilatation

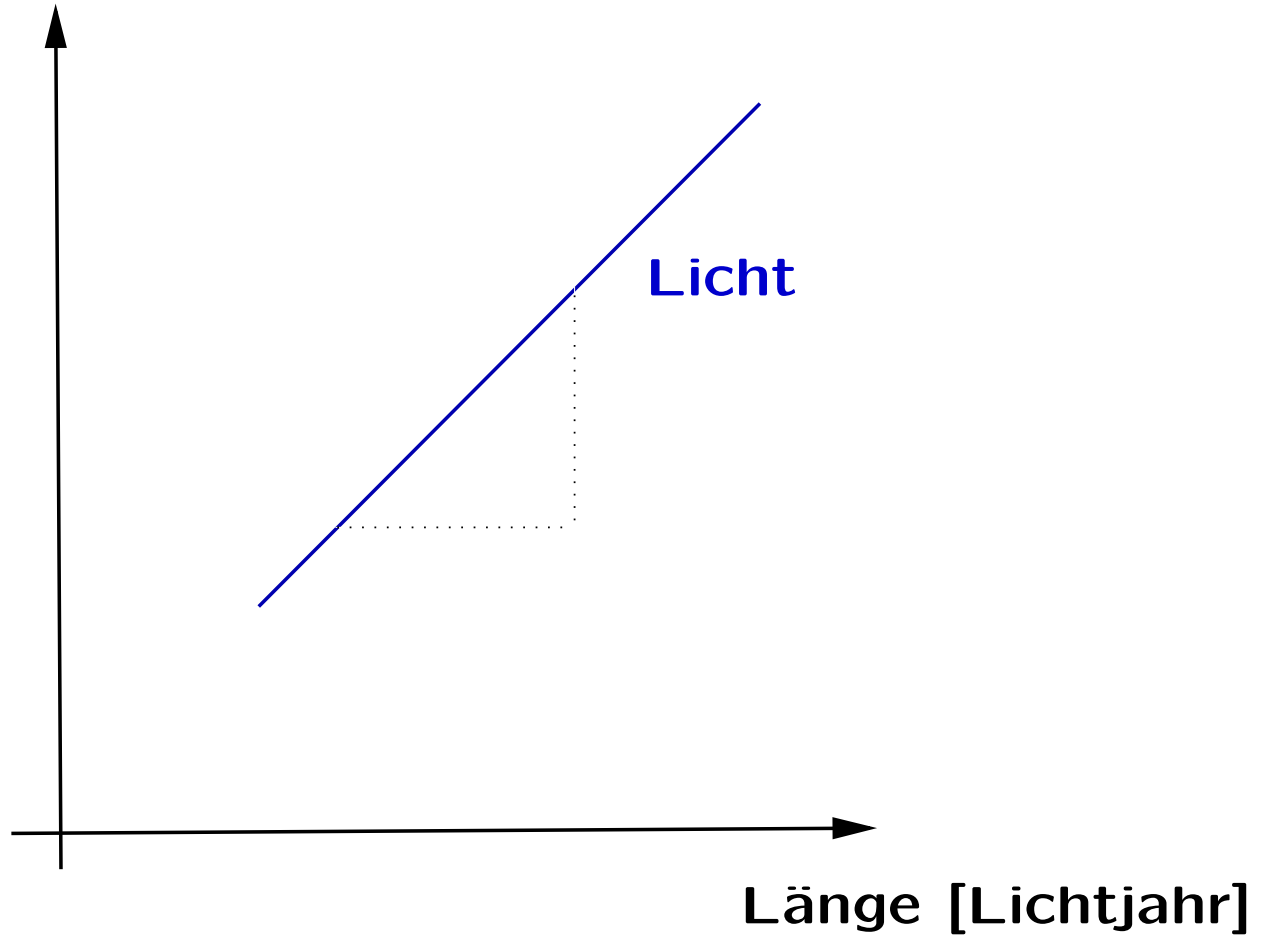
Aus der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit folgt die Zeitdehnungsformel der Speziellen Relativitätstheorie:



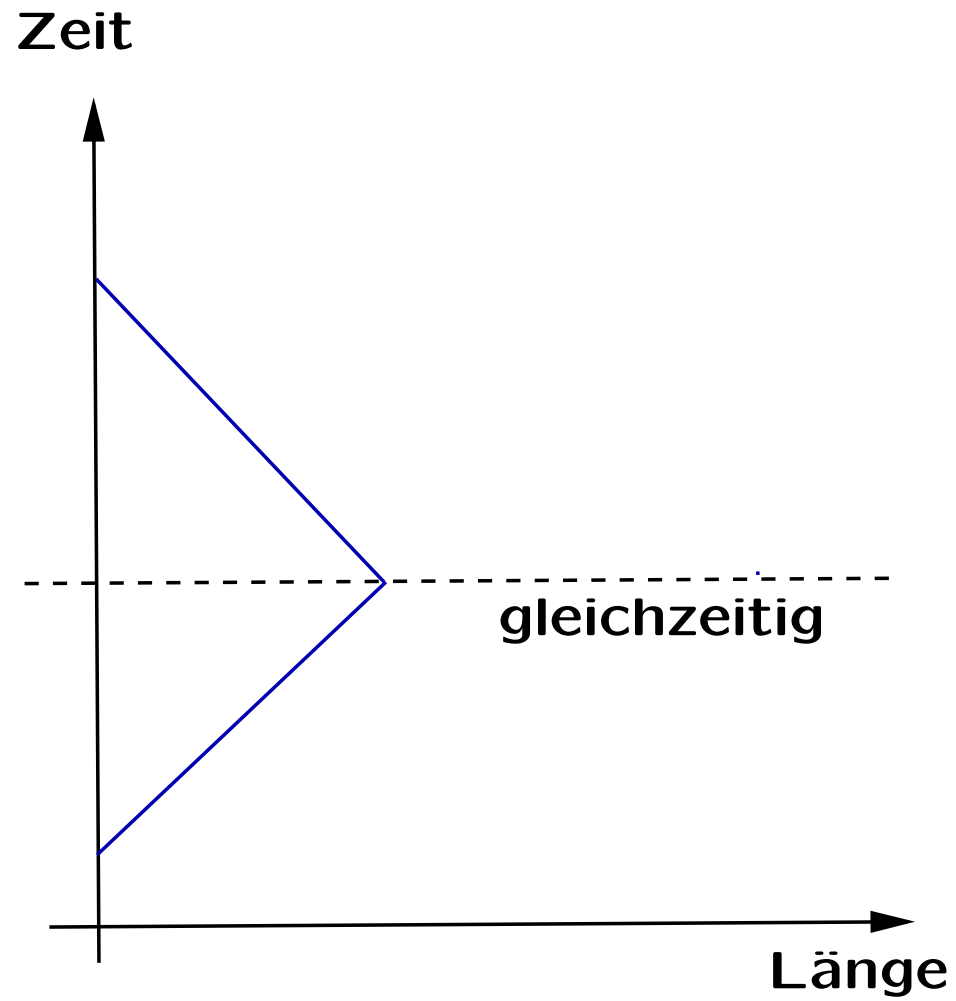
$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Raumzeit-Diagramme

Zeit [Jahr]

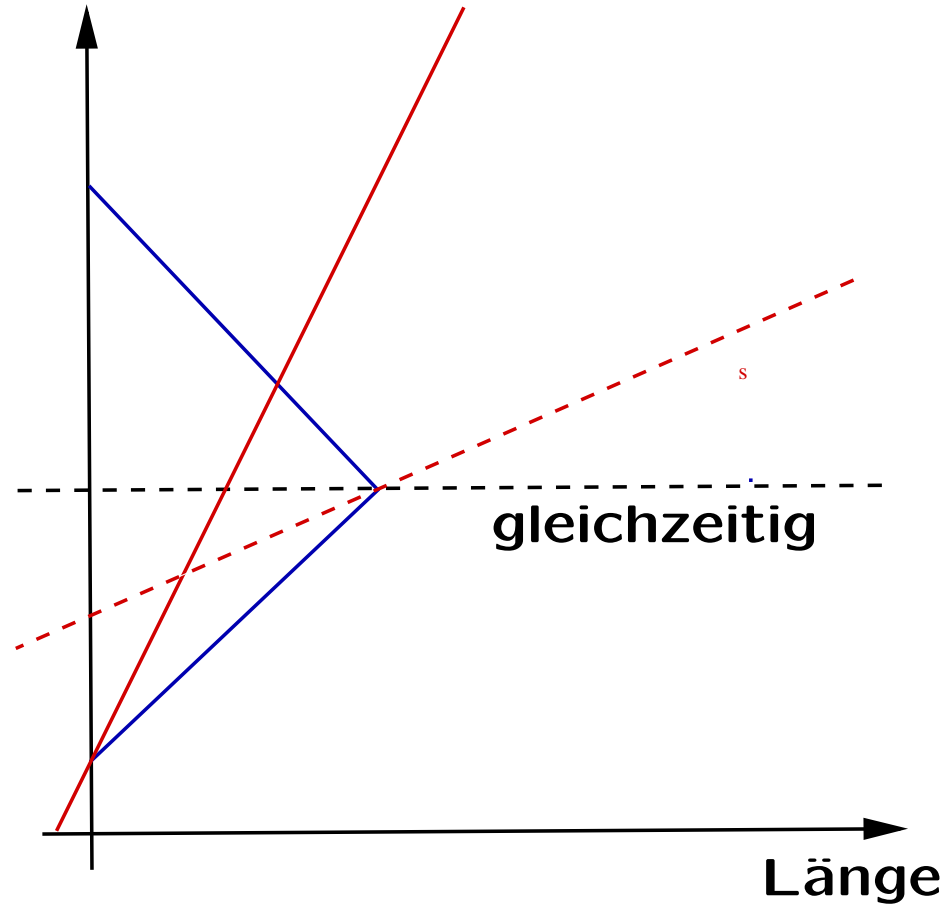


Einsteins Definition der Gleichzeitigkeit

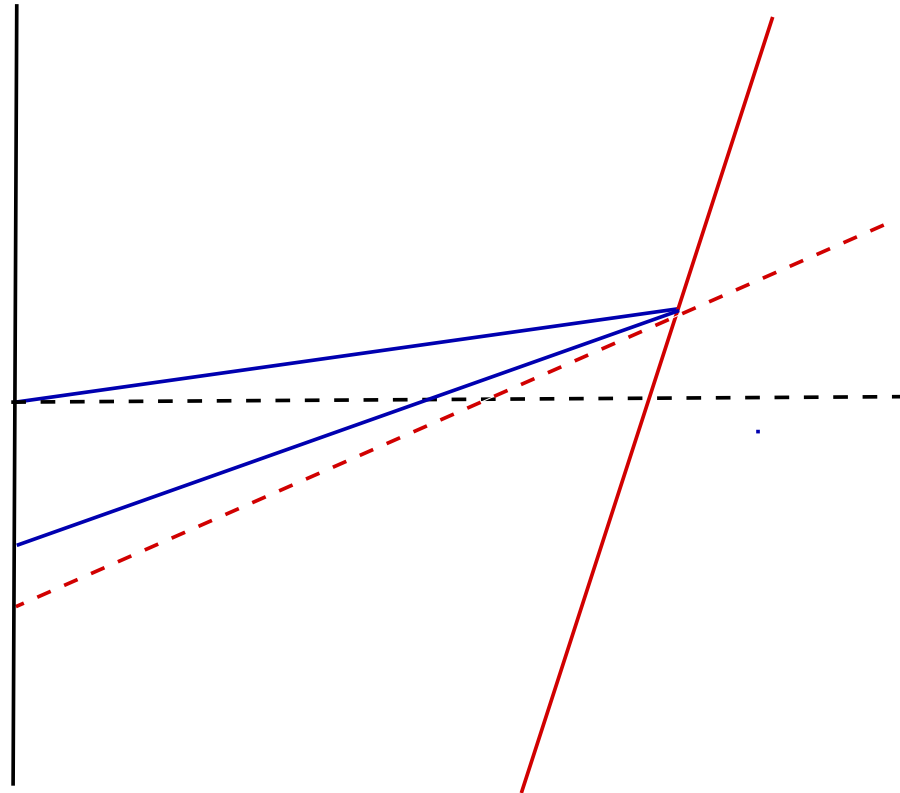


Gleichzeitigkeit ist relativ

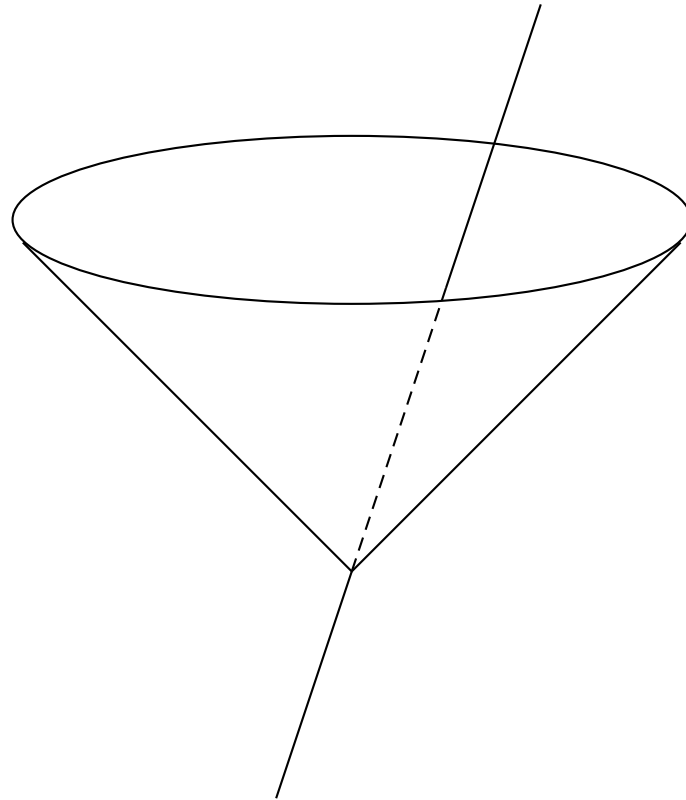
Zeit



Signale mit Überlichtgeschwindigkeit verletzen Kausalität



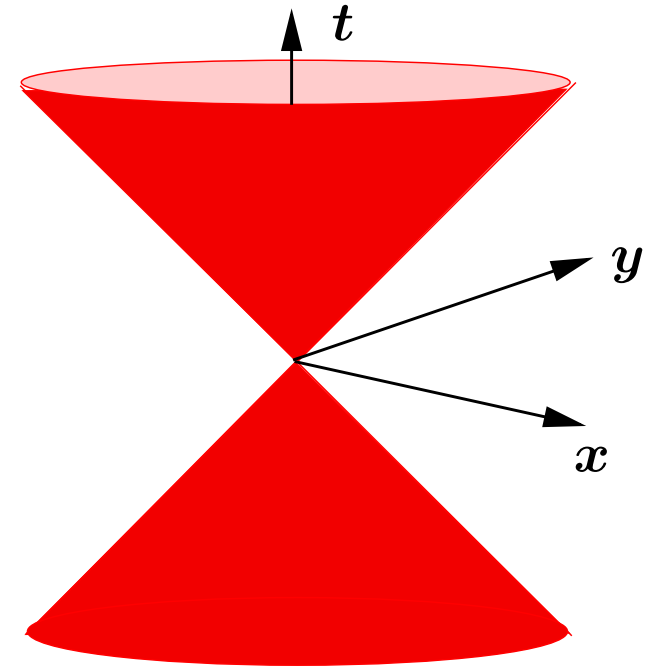
Signale dürfen den “Lichtkegel” nicht verlassen



Zusammenfassung der Speziellen Relativitätstheorie

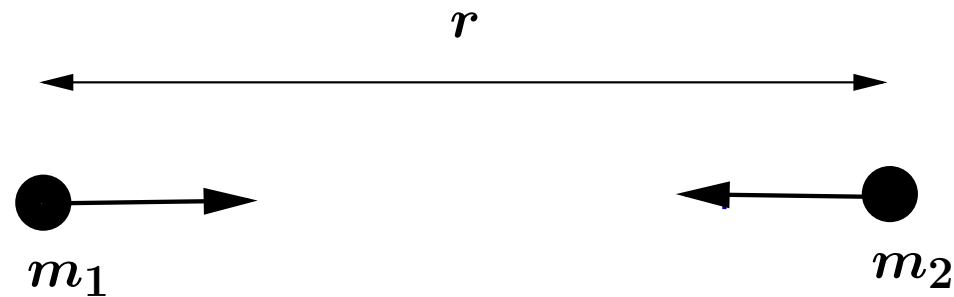
Aus den Postulaten folgt:

- Die Gleichzeitigkeit ist relativ.
- Bewegte Uhren gehen langsamer (Zeitdilatation).
- Signale können sich nicht mit Überlichtgeschwindigkeit ausbreiten.
- “Zwillingsparadoxon”
- Längenkontraktion
- Doppler-Effekt
- Aberration
- ...
- Teilchen können nicht auf Überlichtgeschwindigkeiten beschleunigt werden
- Masse ist eine Energieform, $E = mc^2$, und kann in andere Energieformen umgewandelt werden



Warum ist man mit der Speziellen Relativitätstheorie nicht zufrieden?

Newtonsche Gravitation passt nicht in die SRT



$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Instantane Fernwirkung (“action at a distance”)

Äquivalenzprinzip

Von entscheidender Bedeutung auf Einsteins Weg zur Allgemeinen Relativitätstheorie war die folgende Beobachtung:

“Alle Körper erfahren im Gravitationsfeld dieselbe Beschleunigung.” (Gleichheit von träger und schwerer Masse)

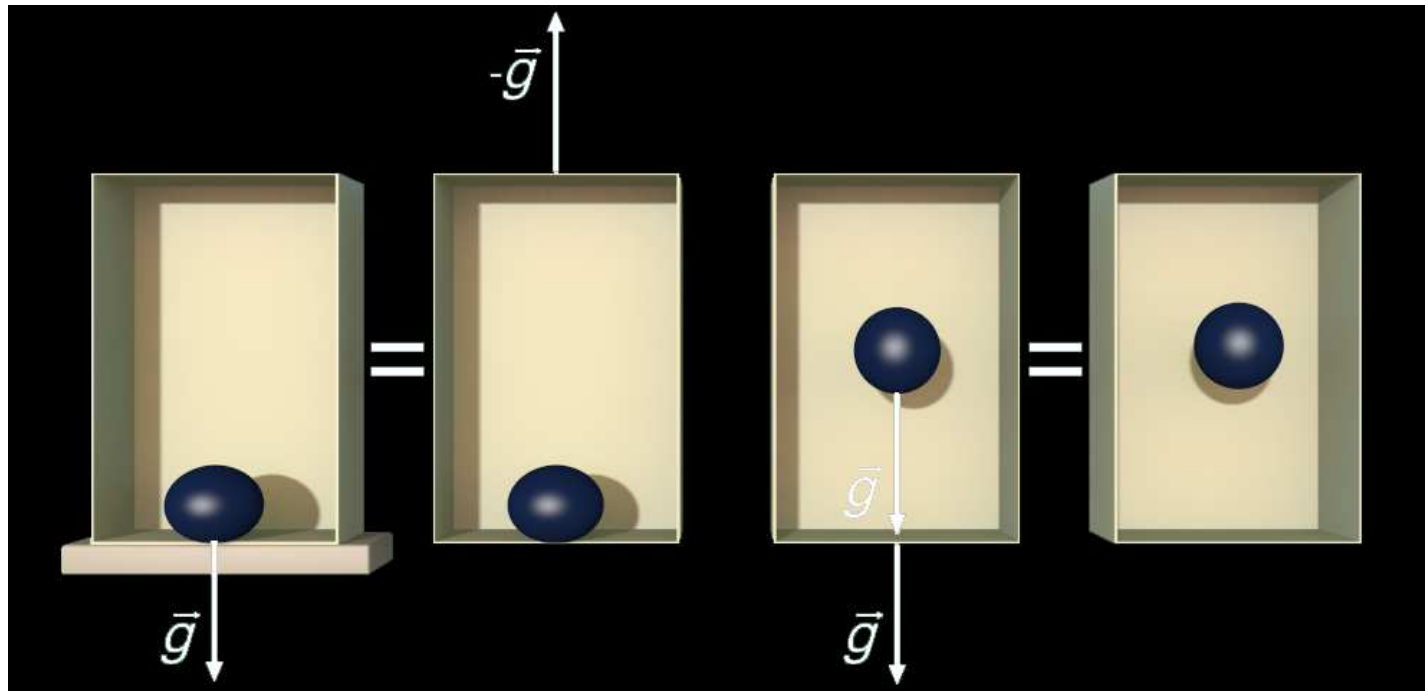
Experimentell sehr gut bestätigt:

- L. Eötvös, 1885-1909
relative Genauigkeit 10^{-7}
- Eöt-Wash-Experiment, 2001
relative Genauigkeit 10^{-13}



Loránd Eötvös
(1848-1919)

Folgerungen aus dem Äquivalenzprinzip

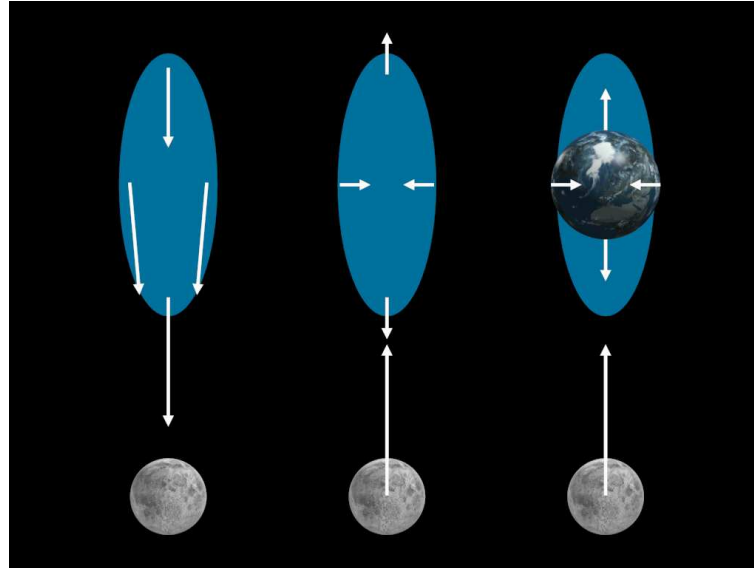


Gravitation kann simuliert werden

Gravitation kann wegtransformiert werden

Relativbeschleunigung frei fallender Körper lässt sich nicht wegtransformieren

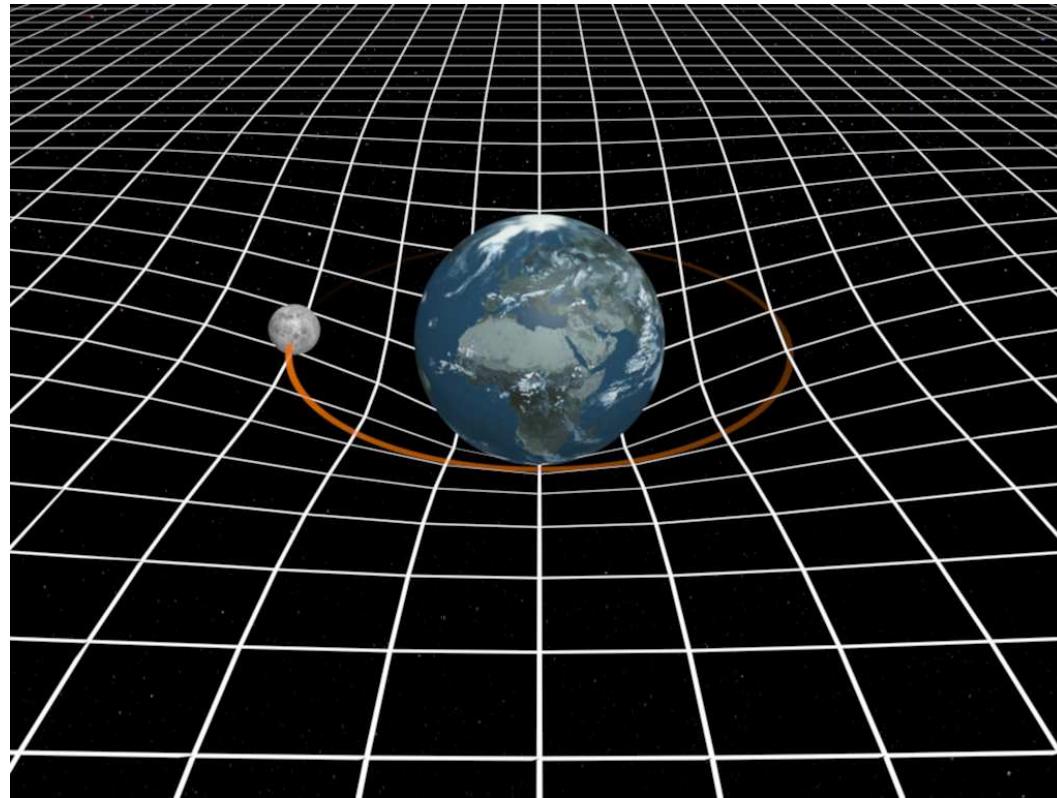
Gravitation lässt sich geometrisieren



In der Allgemeinen Relativitätstheorie ist die Raumzeit gekrümmt.

Das Gravitationsfeld wird durch die Krümmung beschrieben. Die Krümmung ist ein Maß für die Relativbeschleunigung frei fallender Körper, d.h., für die “Gezeitenkräfte”.

Membranmodell



Massive Teilchen und Lichtstrahlen bewegen sich auf “Geradesten” (Geodäten) in der Raumzeit-Geometrie

Warnung: Bei Membranmodellen fehlt eine Raumdimension und die Zeit.

Einsteinsche Feldgleichung (Nov. 1915)



Krümmung \leftrightarrow Materieinhalt

Einstein-Tensor \leftrightarrow Energie-Impuls-Tensor

Raumzeit und Materie

“Matter tells spacetime how to curve”

Einsteinsche Feldgleichung

“Spacetime tells matter how to move”

Geodätengleichung



**John Wheeler
(1911-2008)**

Keine Krümmung: Spezielle Relativitätstheorie

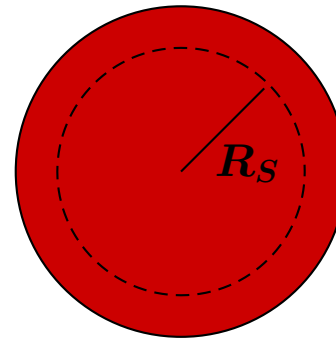
**Krümmung gering und alle Bewegungen langsam gegen die
Lichtgeschwindigkeit: Newtonsche Gravitationstheorie**

Die Schwarzschild-Lösung

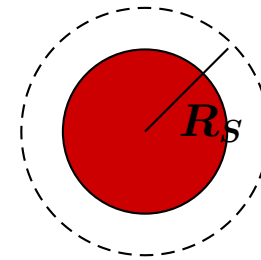
Schwarzschild-Lösung der Einsteinschen Feldgleichung (1916) =
Raumzeit im Außenraum einer kugelsymmetrischen Masse

$$\text{Schwarzschild-Radius } R_S = \frac{2G}{c^2}M$$

Radius $> R_S$: regulärer Stern



Radius $< R_S$: kollabierender Stern



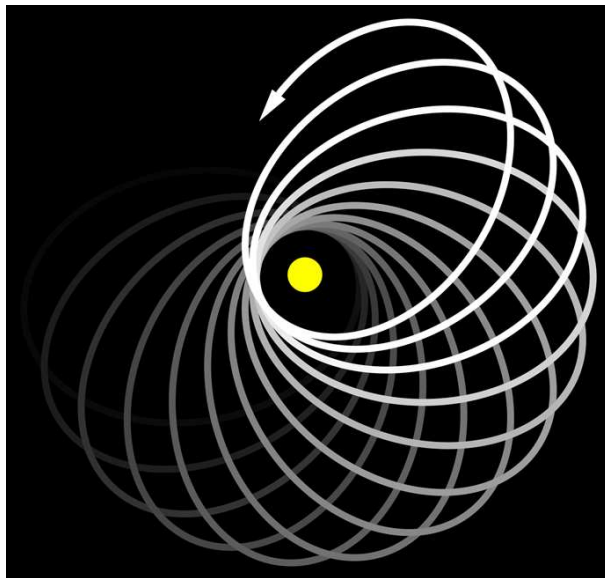
Ereignishorizont



Karl Schwarzschild
(1873 – 1916)

Die drei klassischen Tests der Allgemeinen Relativitätstheorie

1. Anomale Periheldrehung des Merkur

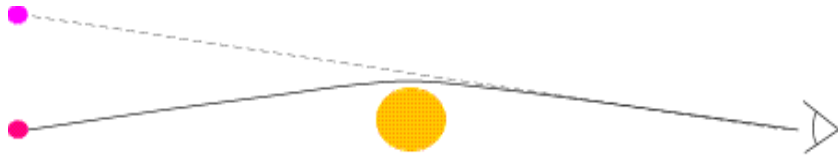


43 Bogensekunden pro Jahrhundert (bekannt aus Beobachtungen seit 1859, U. Le Verrier)



Urbain Le Verrier
(1811 – 1816)

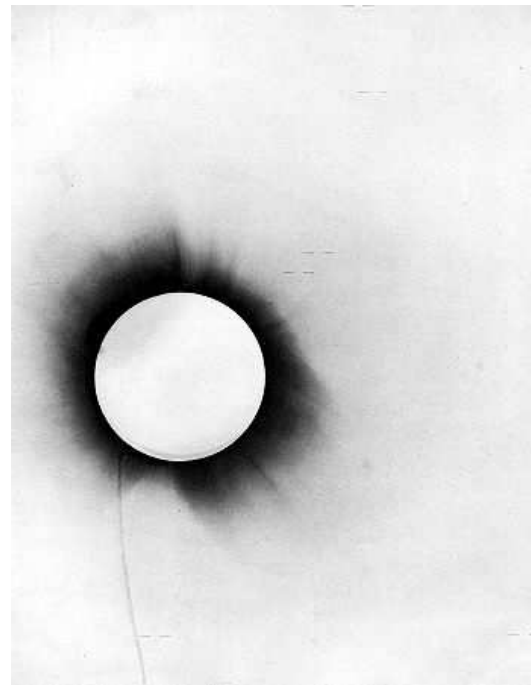
2. Lichtablenkung an der Sonne



$$\delta = \frac{4GM}{c^2 R}, \quad \delta_{\odot} = 1,73''$$



Arthur Eddington
(1882 – 1944)



3. Rotverschiebung im Gravitationsfeld



**Jefferson Laboratory,
Harvard University**



**Glen Rebka
(*1931)**

Pound und Rebka (1959)

Relative Frequenzänderung: 10^{-15}

Weitere Effekte und Konsequenzen

- gravitative Lichtlaufzeitverzögerung (Shapiro-Effekt)
- gravitomagnetische Effekte (Einfluss der Rotation eines Körpers auf sein Gravitationsfeld)
- Gravitationslinsen
- Schwarze Löcher
- Gravitationswellen
- Expansion des Universums, Urknall (Dunkle Materie, Dunkle Energie)
- Wurm Löcher und Zeitreisen (?)
- ...

Offene Fragen

- direkter Nachweis von Gravitationswellen
- Verständnis von Dunkler Materie und Dunkler Energie
- Vereinigung von ART und Quantentheorie

Vortragsreihe: 100 Jahre Allgemeine Relativitätstheorie

- 06.10. Prof Dr. Claus Lämmerzahl u. PD Dr. Volker Perlick (ZARM, U Bremen)
“Was ist eigentlich Relativitätstheorie?”
- 12.10. Prof. Dr. Jutta Kunz (U Oldenburg)
“Schwarze Löcher”
- 02.11. Dr. Saskia Grunau (U Oldenburg)
“Wurmlöcher und Zeitreisen”
- 09.11. Prof. Dr. Claus Lämmerzahl (ZARM, U Bremen)
“Hat Einstein wirklich Recht? Zur experimentellen Bestätigung der ART”
- 16.11. Prof. Dr. Ulrich Geppert (DLR Bremen/U Zielona Góra)
“Neutronensterne und ART”
- 30.11. Prof. Dr. Dominik Schwarz (U Bielefeld)
“Kosmologie”
- 07.12. PD Dr. Volker Perlick (ZARM, U Bremen)
“Gravitationslinsen”
- 11.01. Prof. Dr. Hansjörg Dittus (DLR Köln)
“Raumfahrt und Relativitätstheorie”
- 25.01. Prof. Dr. Heino Falcke (U Nijmegen)
“Das schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße”
- 08.02. Prof. Dr. Domenico Giulini (U Hannover/ZARM, U Bremen)
“Quanten und Gravitation”

Ausstellung: 100 Jahre Allgemeine Relativitätstheorie

30.11. – 22.02.