

Die experimentellen Grundlagen der Allgemeinen Relativitätstheorie

Claus Lämmerzahl

12. März 2015

WE-Heraeus-Seminar 100 Jahre ART – Status und Ausblick
Potsdam, 11 - 14 März 2015



***EXZELLENT.**
Gewinnerin in der
Exzellenzinitiative

CENTER OF
APPLIED SPACE TECHNOLOGY
AND MICROGRAVITY



Outline

Bremen and ZARM

Outline

Bremen and ZARM

Einleitung

Outline

Bremen and ZARM

Einleitung

Einleitung

Outline

Bremen and ZARM

Einleitung

Einleitung

Die Eigenschaften der Gravitation

Outline

Bremen and ZARM

Einleitung

Einleitung

Die Eigenschaften der Gravitation

Die Grundlage der Gravitationsphysik: das Einsteinsche Äquivalenzprinzip

▶ Resultate

Outline

Bremen and ZARM

Einleitung

Einleitung

Die Eigenschaften der Gravitation

Die Grundlage der Gravitationsphysik: das Einsteinsche Äquivalenzprinzip

▶ Resultate

Konsequenzen der Speziellen Relativitätstheorie

Outline

Bremen and ZARM

Einleitung

Einleitung

Die Eigenschaften der Gravitation

Die Grundlage der Gravitationsphysik: das Einsteinsche Äquivalenzprinzip

▶ Resultate

Konsequenzen der Speziellen Relativitätstheorie

Konsequenzen der Allgemeinen Relativitätstheorie

▶ Formale Konsequenzen

▶ Wie misst man Gravitation?

▶ Effekte der Allgemeinen Relativitätstheorie

Outline

Bremen and ZARM

Einleitung

Einleitung

Die Eigenschaften der Gravitation

Die Grundlage der Gravitationsphysik: das Einsteinsche Äquivalenzprinzip

▶ Resultate

Konsequenzen der Speziellen Relativitätstheorie

Konsequenzen der Allgemeinen Relativitätstheorie

▶ Formale Konsequenzen

▶ Wie misst man Gravitation?

▶ Effekte der Allgemeinen Relativitätstheorie

Praktische Anwendungen der Allgemeinen Relativitätstheorie

▶ Anwendungen in der Metrologie

▶ Anwendung in der Positionierung

▶ Anwendung Geodäsie

▶ Heutige Technologien

▶ Neue Methoden

Outline

Bremen and ZARM

Einleitung

Einleitung

Die Eigenschaften der Gravitation

Die Grundlage der Gravitationsphysik: das Einsteinsche Äquivalenzprinzip

- ▶ Resultate

Konsequenzen der Speziellen Relativitätstheorie

Konsequenzen der Allgemeinen Relativitätstheorie

- ▶ Formale Konsequenzen
- ▶ Wie misst man Gravitation?
- ▶ Effekte der Allgemeinen Relativitätstheorie

Praktische Anwendungen der Allgemeinen Relativitätstheorie

- ▶ Anwendungen in der Metrologie
- ▶ Anwendung in der Positionierung
- ▶ Anwendung Geodäsie
- ▶ Heutige Technologien
- ▶ Neue Methoden

Zusammenfassung

Outline

Bremen and ZARM

Einleitung

Einleitung

Die Eigenschaften der Gravitation

Die Grundlage der Gravitationsphysik: das Einsteinsche Äquivalenzprinzip

▶ Resultate

Konsequenzen der Speziellen Relativitätstheorie

Konsequenzen der Allgemeinen Relativitätstheorie

▶ Formale Konsequenzen

▶ Wie misst man Gravitation?

▶ Effekte der Allgemeinen Relativitätstheorie

Praktische Anwendungen der Allgemeinen Relativitätstheorie

▶ Anwendungen in der Metrologie

▶ Anwendung in der Positionierung

▶ Anwendung Geodäsie

▶ Heutige Technologien

▶ Neue Methoden

Zusammenfassung

Where we are



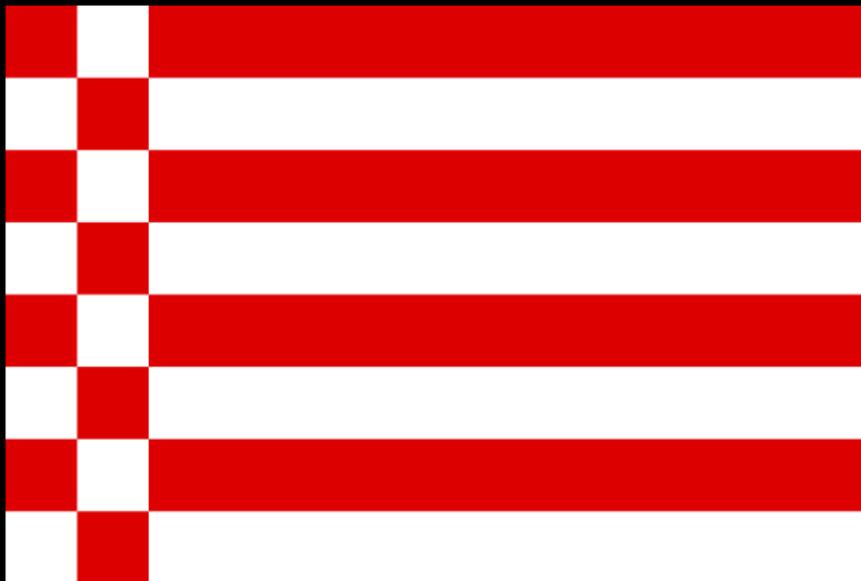
Where we are



Where we are



Where we are



Where we are



Bremen science history related to gravity research



Johann Hieronymus
Schröter 1745 — 1816

- ▶ largest observatory in Europe
- ▶ founded Astronomical Society



Wilhelm Heinrich Olbers
1758 — 1840

- ▶ founder of modern cosmology



Friedrich Wilhelm
Bessel 1784 — 1846

- ▶ Bessel ellipsoid
- ▶ flattening of Earth
- ▶ test of Equivalence Principle

Largest telescope on continent

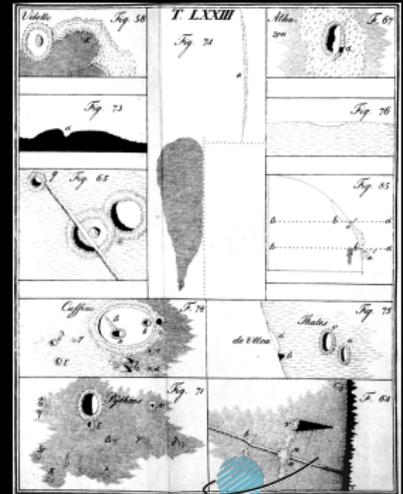


Impact of Schroeter: "Sky Police"

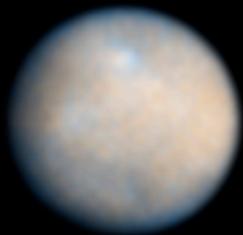
- ▶ Schroeter: first **international coordinated science project**: definition of sections of the ecliptic plane and distribution of these sections among observatories in order to find asteroids
- ▶ foundation of the **astronomical society** in 1800 by Hieronymus Schroeter and Baron von Zach
- ▶ for that **international meeting** of all European astronomers in Bremen (we still organize big conferences in Bremen – IAC, Q2Cn, COSPAR, ...)

Schroeter was a

- ▶ ingenious project leader
 - ▶ modern science manager
 - ▶ industrial spin off: optical factory founded by Harm Gerfken
 - ▶ ... innovative financial manager
- from education he was a chief magistrate and district governor



Result of "Sky Police"



Asteroid 1: Ceres
found at
1.1.1801 by
chance by
Giuseppe Piazzi
in Palermo,
refound again at
7.12.1801 by C.F.
Gauß/von Zach



Asteroid 2: Pallas
found in 1802 by
Heinrich Wilhelm
Olbers in Bremen



Asteroid 3: Juno
found in 1804 by
Karl Ludwig
Harding in
Bremen



Asteroid 4: Vesta
found in 1807 by
Heinrich Wilhelm
Olbers in Bremen

Impact

based on all that: new developments

- ▶ in Bremen there was always big public interest in science ("Physikalische Gesellschaft")
- ▶ airplane construction before WW 1: Focke
- ▶ after WW 2 aeroplane and space industries:
 - ▶ Focke-Wulf + HFB → ERNO (Entwicklungsring Nord), built first German satellite, development of Ariane, ...
 - ▶ MBB + ERNO → DASA (Deutsche Aerospace Aktiengesellschaft), merger with Daimler Benz (Daimler Benz Aerospace Aktiengesellschaft)
 - ▶ → Astrium
 - ▶ Astrium + Cassidian → Airbus DS
- ▶ space research at universities and institutes

Bremen



Bremen is the largest aerospace location in Germany

▶ Companies

- ▶ Airbus DS (Columbus module, ATV, thruster of Ariane, cryogenic upper stage of Ariane 5 ME, MPCV)
- ▶ OHB – Fuchs Group (Galileo, Earth observation, MPCV, ...)
- ▶ Airbus

▶ new DLR institute for Space Systems

▶ University: ZARM, IUP, ZeTeM

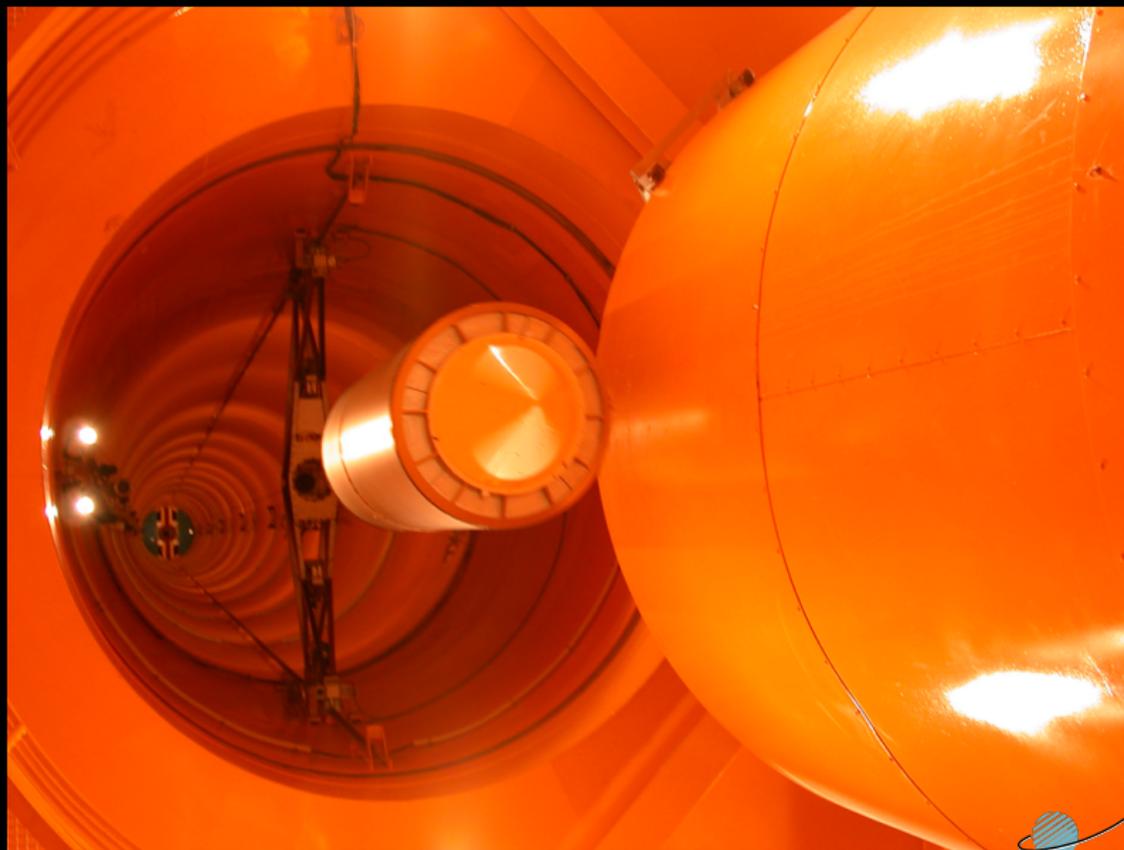
▶ ZARM

- ▶ participation in many space projects (MICROSCOPE, LPT, LISA, geodesy, GRACE-FO, ...)
- ▶ participation in many microgravity activities (ESA TT, cold atoms, inertial sensors, astrophysics, fluid mechanics, combustion, ...)
- ▶ cooperation with DLR, PTB, CNES, ONERA, NASA, JPL, ...
- ▶ Research Training Group “Models of Gravity”, chair of COSPAR Commission H, ...
- ▶ education

The Bremen drop tower



The Bremen drop tower



Drop tower projects

- ▶ **fluid dynamics** in weightlessness: fluid management in satellites
- ▶ **cryogenic fluids** in weightlessness: development of cryogenic upper stage of Ariane 5 ME
- ▶ **combustion**: measurements of process parameters for software development
- ▶ **cold atoms** in free fall: atom interferometry for inertial sensors and fundamental physics tests like WEP
- ▶ **astrophysics**: adhesion properties of dust for better estimates of timescales of planetary system formation
- ▶ **material sciences**: foams, ...
- ▶ **biological experiments**: fishes, plant growth phenomena, ...
- ▶ **technological tests**
 - ▶ heat pipes
 - ▶ accelerometers for MICROSCOPE, GRACE-FO
 - ▶ HAYABUSA II

Outline

Bremen and ZARM

Einleitung

Einleitung

Die Eigenschaften der Gravitation

Die Grundlage der Gravitationsphysik: das Einsteinsche Äquivalenzprinzip

▶ Resultate

Konsequenzen der Speziellen Relativitätstheorie

Konsequenzen der Allgemeinen Relativitätstheorie

▶ Formale Konsequenzen

▶ Wie misst man Gravitation?

▶ Effekte der Allgemeinen Relativitätstheorie

Praktische Anwendungen der Allgemeinen Relativitätstheorie

▶ Anwendungen in der Metrologie

▶ Anwendung in der Positionierung

▶ Anwendung Geodäsie

▶ Heutige Technologien

▶ Neue Methoden

Zusammenfassung

Outline

Bremen and ZARM

Einleitung

Einleitung

Die Eigenschaften der Gravitation

Die Grundlage der Gravitationsphysik: das Einsteinsche Äquivalenzprinzip

▶ Resultate

Konsequenzen der Speziellen Relativitätstheorie

Konsequenzen der Allgemeinen Relativitätstheorie

▶ Formale Konsequenzen

▶ Wie misst man Gravitation?

▶ Effekte der Allgemeinen Relativitätstheorie

Praktische Anwendungen der Allgemeinen Relativitätstheorie

▶ Anwendungen in der Metrologie

▶ Anwendung in der Positionierung

▶ Anwendung Geodäsie

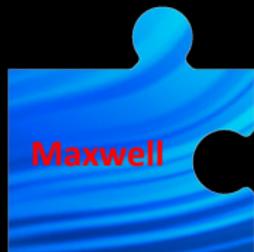
▶ Heutige Technologien

▶ Neue Methoden

Zusammenfassung

Der Status der Gravitation

- ▶ Gravitation ist besonders, besitzt Eigenschaften, die andere Kräfte/ Wechselwirkungen nicht haben: gilt Äquivalenzprinzip, Gravitation ist Geometrie.



- ▶ Standardmodell der Teilchenphysik: Eichtheorie $U(1)$

Der Status der Gravitation

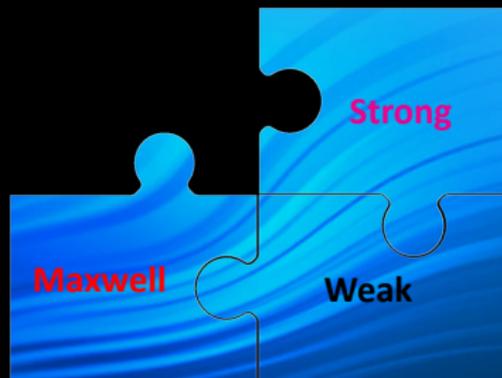
- ▶ Gravitation ist besonders, besitzt Eigenschaften, die andere Kräfte/ Wechselwirkungen nicht haben: gilt Äquivalenzprinzip, Gravitation ist Geometrie.



- ▶ Standardmodell der Teilchenphysik: Eichtheorie $SU(2) \times U(1)$

Der Status der Gravitation

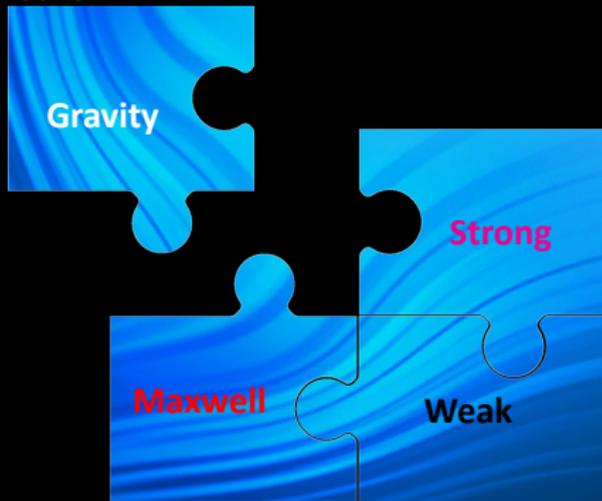
- ▶ Gravitation ist besonders, besitzt Eigenschaften, die andere Kräfte/ Wechselwirkungen nicht haben: gilt Äquivalenzprinzip, Gravitation ist Geometrie.



- ▶ Standardmodell der Teilchenphysik: Eichtheorie $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$

Der Status der Gravitation

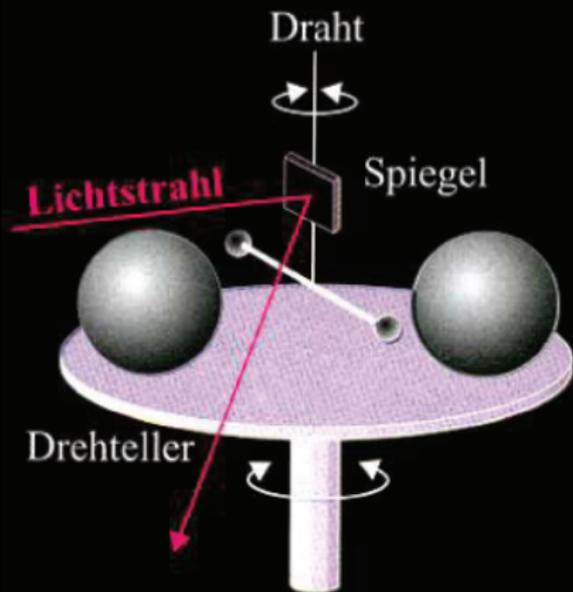
- ▶ Gravitation ist besonders, besitzt Eigenschaften, die andere Kräfte/ Wechselwirkungen nicht haben: gilt Äquivalenzprinzip, Gravitation ist Geometrie.



- ▶ Standardmodell der Teilchenphysik: Eichtheorie $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$
- ▶ Standardmodell der Teilchenphysik bisher ohne Gravitation
- ▶ Gravitation auch nicht quantisierbar

Die Newtonsche Gravitationskraft

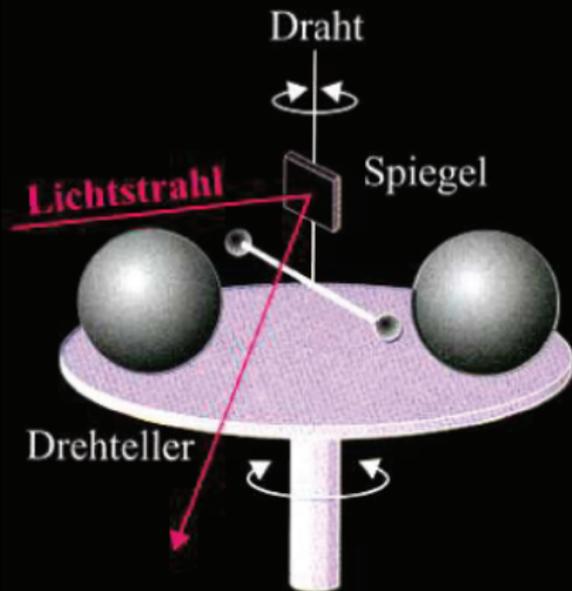
Torsionspendel: sehr empfindliches Kraftmeßgerät



Henry Cavendish 1731 — 1810

Die Newtonsche Gravitationskraft

Torsionspendel: sehr empfindliches Kraftmeßgerät



Die Newtonsche Gravitationskraft

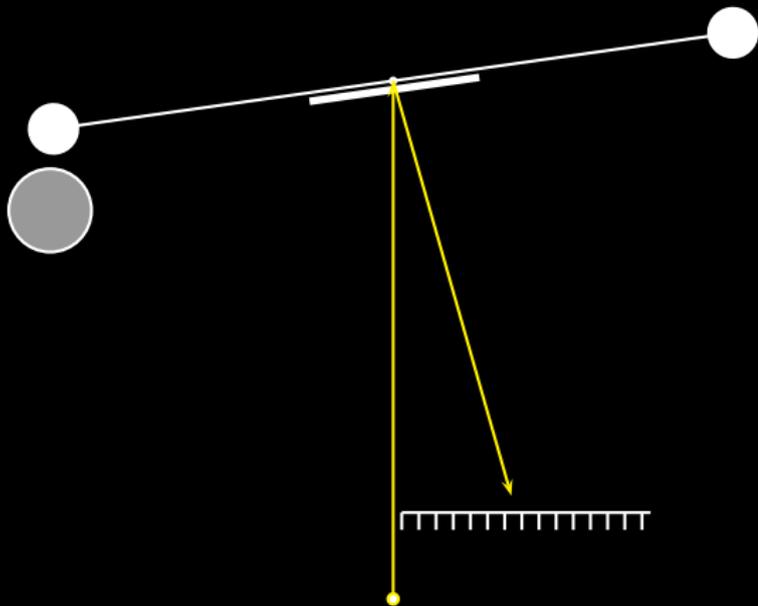
Aufsicht auf Torsionspendel



Nullstellung

Die Newtonsche Gravitationskraft

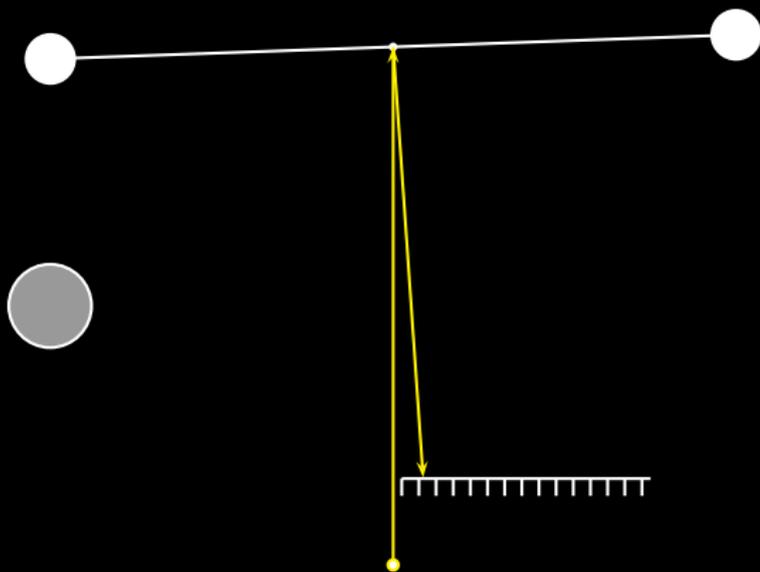
Aufsicht auf Torsionspendel



Masse zieht an dem Pendel \Rightarrow Auslenkung = Gravitationskraft

Die Newtonsche Gravitationskraft

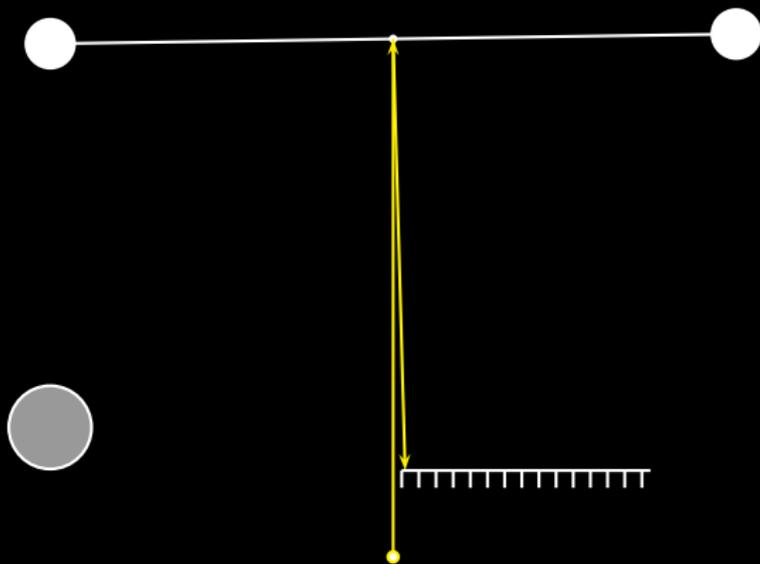
Aufsicht auf Torsionspendel



Doppelter Abstand \Rightarrow viertel Auslenkung = viertel Gravitationskraft

Die Newtonsche Gravitationskraft

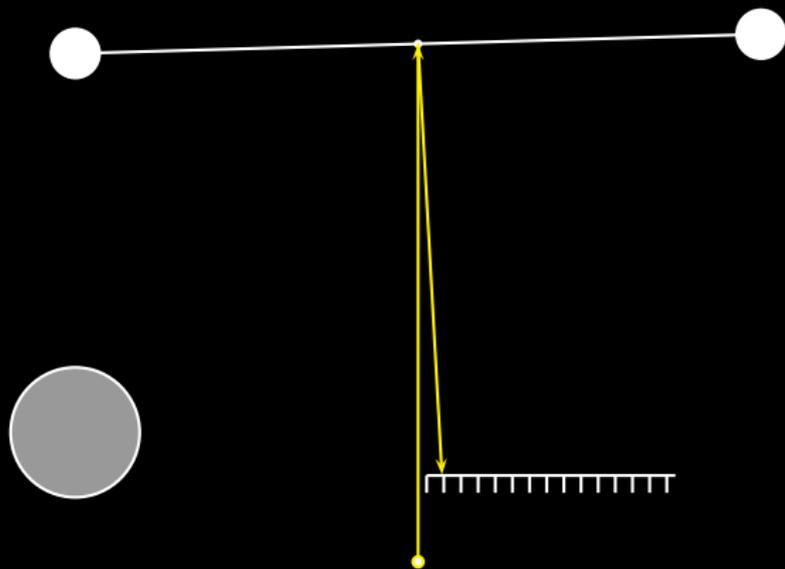
Aufsicht auf Torsionspendel



Dreifacher Abstand \Rightarrow neuntel Auslenkung = neuntel Gravitationskraft

Die Newtonsche Gravitationskraft

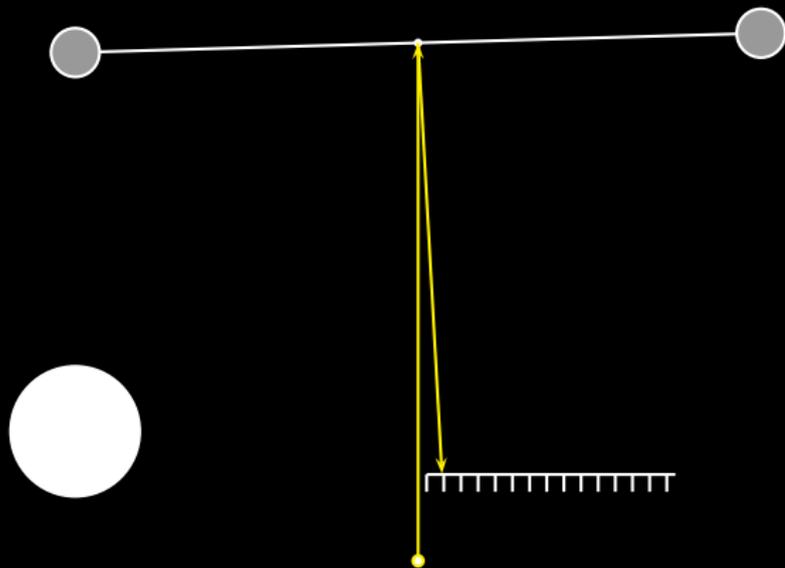
Aufsicht auf Torsionspendel



Doppelte Masse \Rightarrow doppelte Auslenkung = doppelte Gravitationskraft

Die Newtonsche Gravitationskraft

Aufsicht auf Torsionspendel



Es ändert sich nichts, wenn man verschiedene Substanzen hat und diese vertauscht (Nachweis von $\text{actio} = \text{reactio}$)

Resultat: Gravitationskraft

Die Gravitationskraft hat die Form

$$F = \text{Konstante} \frac{\text{Masse}_1 \text{ Masse}_2}{\text{Abstand}^2} = G \frac{mM}{r^2}$$

Kraft von Masse₁ auf Masse₂ ist gleich der Kraft, die Masse₂ auf Masse₁ ausübt: **actio = reactio**

Dieses Gravitationsgesetz bestimmt

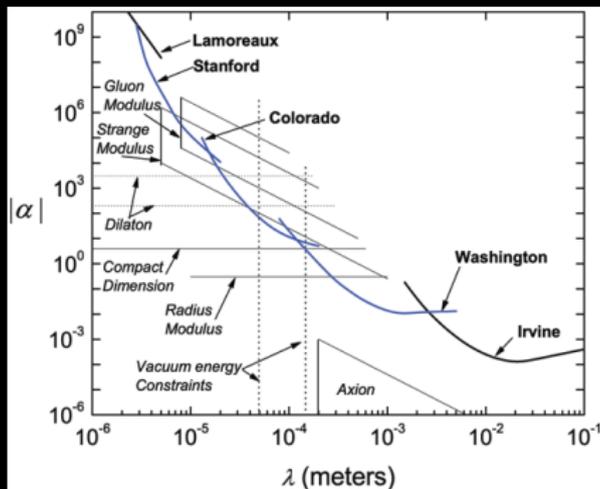
- ▶ den Fall eines Apfels
- ▶ Wurf eines Steins
- ▶ Bahn der Planeten
- ▶ Bahn der Sterne in Galaxien
- ▶ Bahn von Galaxien in Galaxienhaufen
- ▶ Bahn von Galaxienhaufen in Galaxiensuperhaufen

Modifikationen im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie ...

Zuerst präzise experimentelle Überprüfung der Newtonschen Gravitation ...

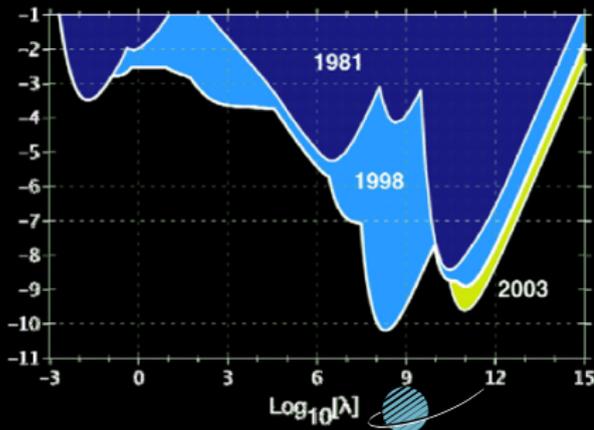
Test des Newton-Potentials

$$U = \frac{GM}{r} (1 + \alpha e^{-r/\lambda})$$



kurzreichweitige Limits

langreichweitige Limits (LLR, Ephemeriden, ...)



Test des Newtonschen Potentials

SME (Kostelecky, PRD 2005): anisotropes Newtonsches Potential

$$U = \frac{MG}{r} \left(1 + \frac{r^i c_{ij} r^j}{r^2} \right)$$

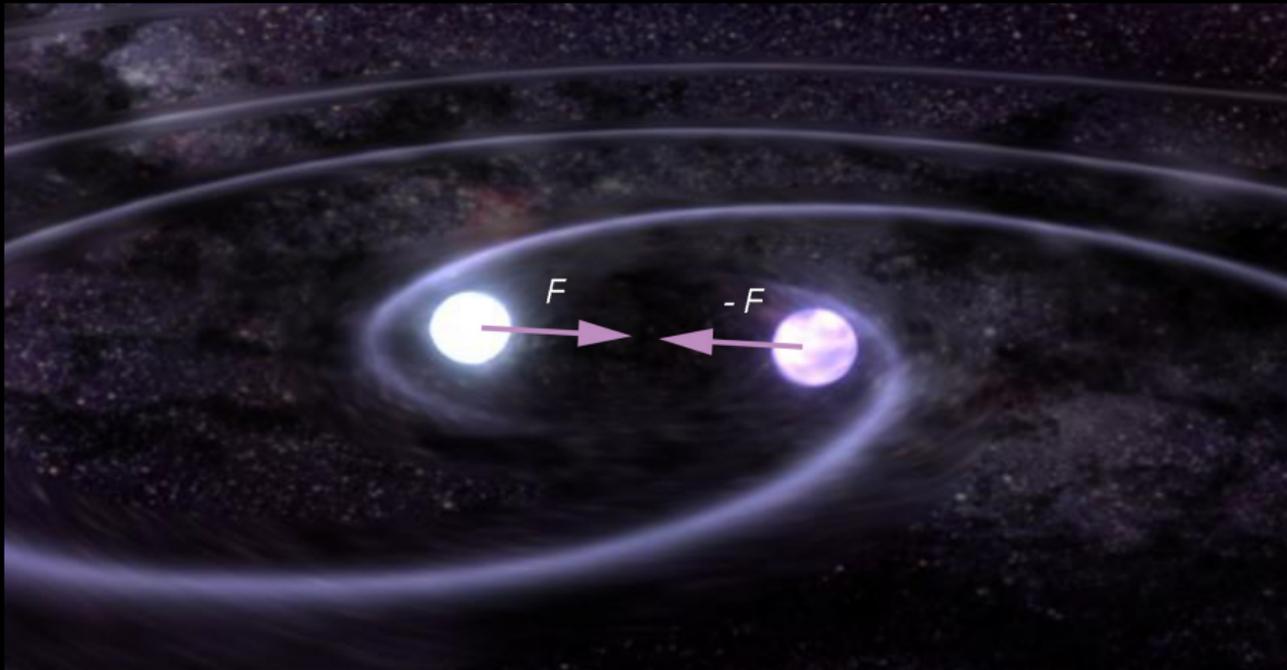
Experimente

- ▶ Atominterferometrie (Müller et al, PRL 2007)
- ▶ LLR (Battat, Chandler & Stubbs, PRL 2007)

Resultat

$$|c_{ij}| \leq 10^{-5} \dots 10^{-9}$$

actio = reactio ?



Aktive und passive Masse

Gravitativ gebundenes Zwei-
Körper-System (Bondi, RMP 1957)

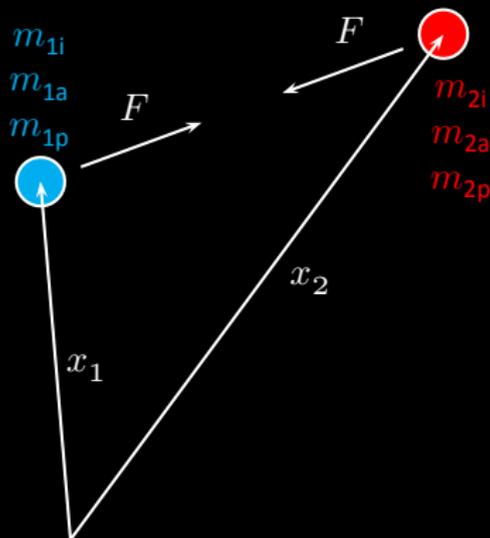
$$m_{1i}\ddot{x}_1 = m_{1p}m_{2a} \frac{x_2 - x_1}{|x_2 - x_1|^3}$$

$$m_{2i}\ddot{x}_2 = m_{2p}m_{1a} \frac{x_1 - x_2}{|x_1 - x_2|^3}$$

⇒ Selbstbeschleunigung des
Schwerpunktes, falls

$$C_{21} = \frac{m_{2a}}{m_{2p}} - \frac{m_{1a}}{m_{1p}} \neq 0$$

- ▶ Verletzung von *actio = reactio* für Gravitation
- ▶ $C_{12} = 0 \Rightarrow$ gleiche Gewichte erzeugen gleiches Gravitationsfeld, unabhängig von Substanz. **Hat Status eines Äquivalenzprinzips**



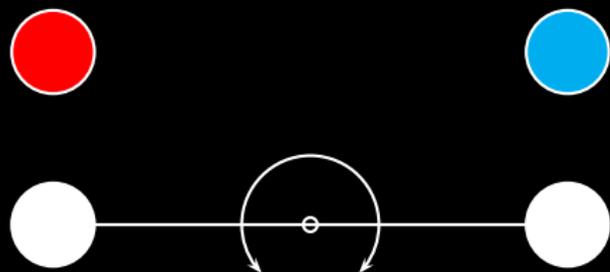
Experiment zum Test von $m_{ga} = m_{gp}$

Messung der Anziehungskraft

Step 1: Zwei Massen mit gleichem Gewicht $m_{pg1} = m_{pg2}$

Step 2: Test der Gleichheit der aktiven Massen mittels Torsionswaage

Experimenteller Aufbau: Torsionswaage mit identischen Massen reagiert auf m_{ag1} und m_{ag2}



Kein Effekt beobachtet: $C_{12} \leq 5 \cdot 10^{-5}$ (Kreuzer, PR 1868)

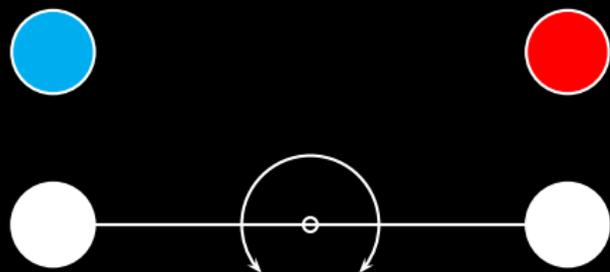
Experiment zum Test von $m_{ga} = m_{gp}$

Messung der Anziehungskraft

Step 1: Zwei Massen mit gleichem Gewicht $m_{pg1} = m_{pg2}$

Step 2: Test der Gleichheit der aktiven Massen mittels Torsionswaage

Experimenteller Aufbau: Torsionswaage mit identischen Massen reagiert auf m_{ag1} und m_{ag2}



Kein Effekt beobachtet: $C_{12} \leq 5 \cdot 10^{-5}$ (Kreuzer, PR 1868)

Experiment zum Test von $m_{ga} = m_{gp}$

Messung der
Schwerpunktsbeschleunigung

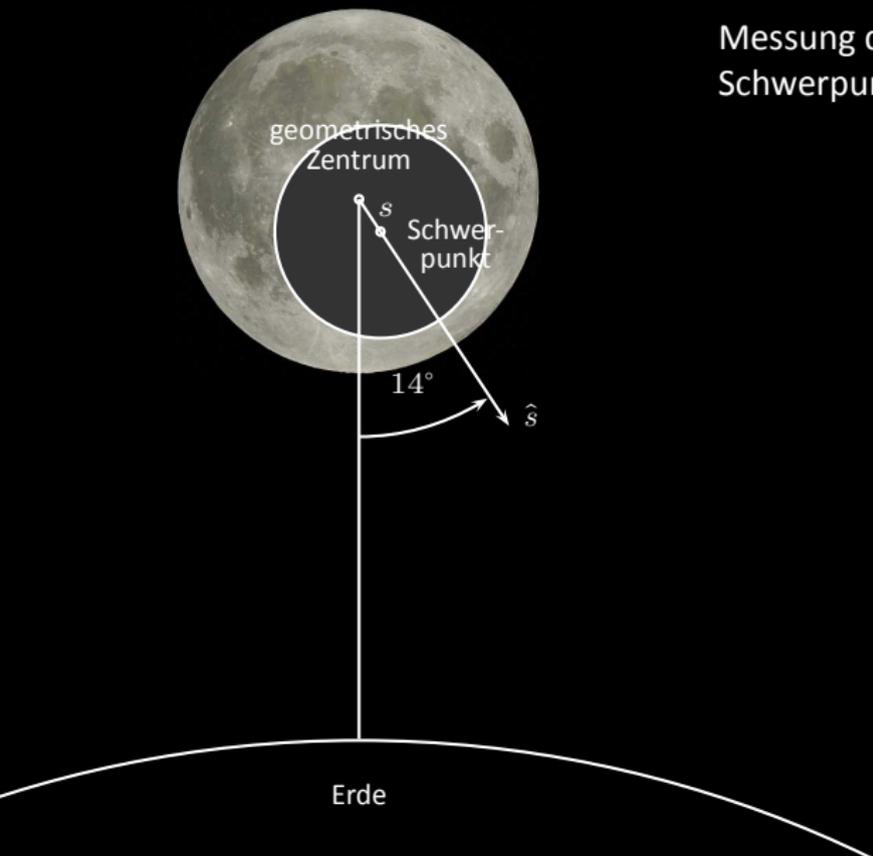


geometrisches
Zentrum

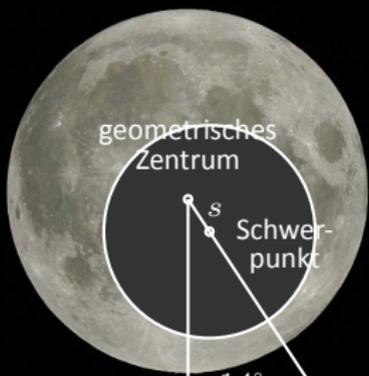
Erde

Experiment zum Test von $m_{ga} = m_{gp}$

Messung der
Schwerpunktsbeschleunigung



Experiment zum Test von $m_{ga} = m_{gp}$



Messung der
Schwerpunktsbeschleunigung

$$\frac{F_{\text{self}}}{F_{EM}} = C_{\text{Al-Fe}} \frac{M_M}{M_{\oplus}} \frac{r_{EM}^2}{r_M^2} \frac{s}{r_M} \frac{\rho}{\Delta\rho} \hat{s}$$

Effect of tangential part: increase of
orbital angular velocity

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = 6\pi \frac{F_{\text{self}}}{F_{EM}} \sin 14^\circ \text{ per month}$$

From LLR $\frac{\Delta\omega}{\omega} \leq 10^{-12}$ per month

$$\Rightarrow C_{\text{Al-Fe}} \leq 7 \cdot 10^{-13}$$

Bartlett & van Buren, PRL 1986
significant improvement with new LLR
data and moon orbiter data possible

Newton

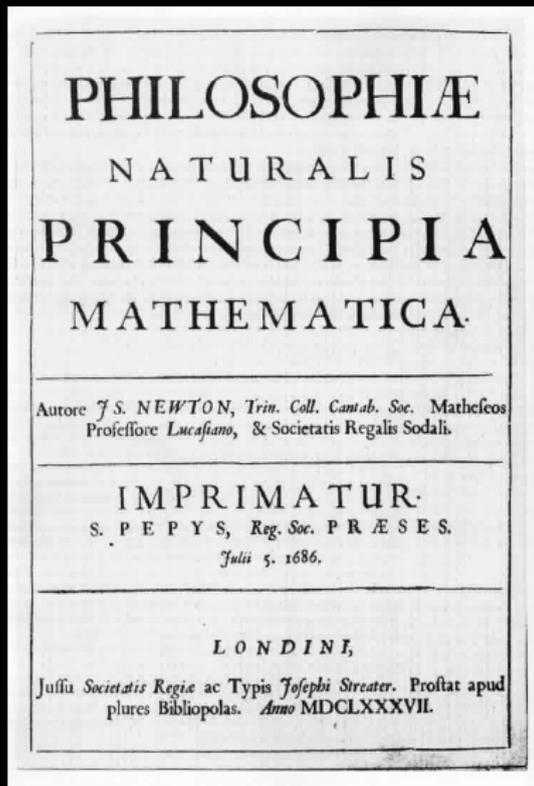


Isaac Newton 1642 — 1726

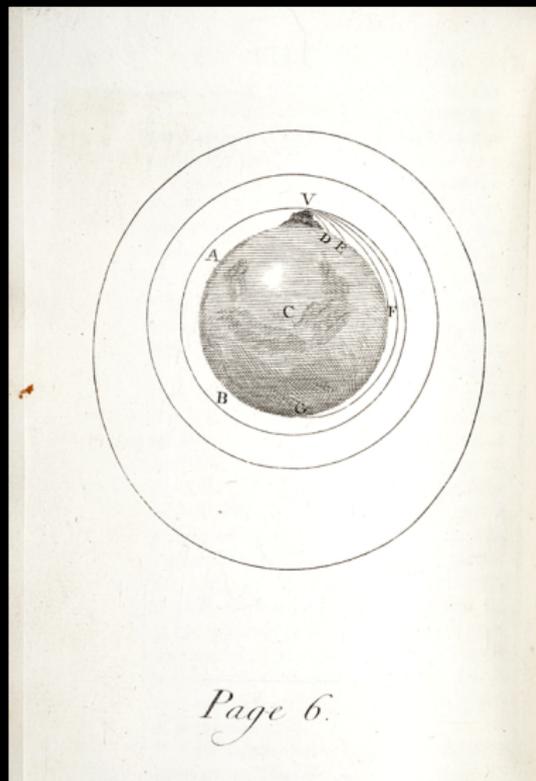
Newton

Newtonsches Axiom

$$m\ddot{x} = F$$



Newton



Newtonsches Axiom

$$m\ddot{x} = F$$

Newtonsches Gravitationsfeld

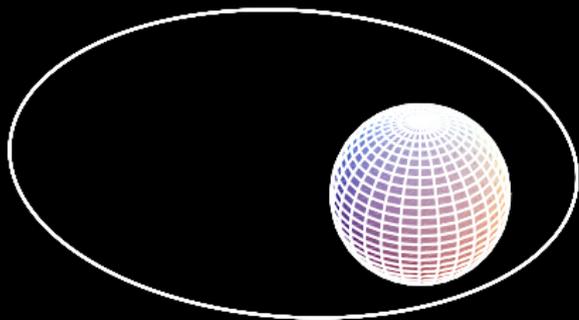
$$F = -m\nabla U, \quad \Delta U = 4\pi G\rho$$

Bewegungsgleichung

$$\ddot{r} = -\nabla U(r)$$

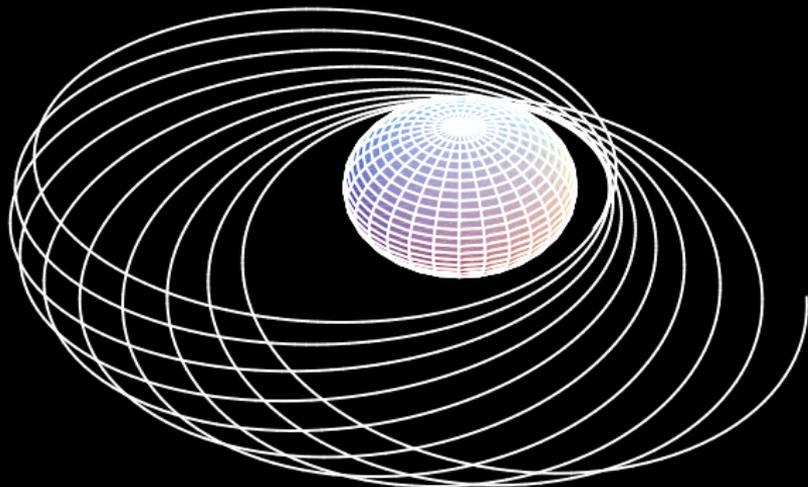
Kepler-Problem: Kreisbahn,
elliptische, parabolische,
hyperbolische Orbits

Bahn bei runder Erde/Sonne



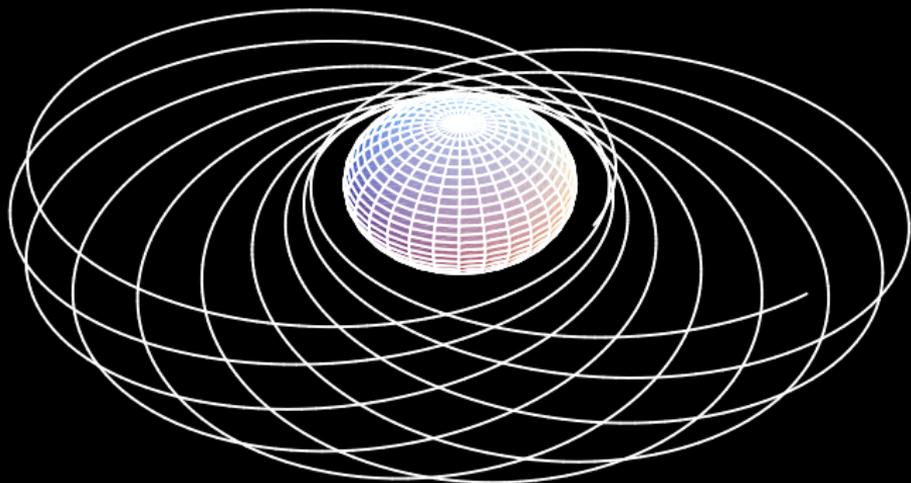
Bei Kugel: Ellipse oder andere Keplersche Bahn

Bahn bei abgeplatteter Erde bzw. Sonne



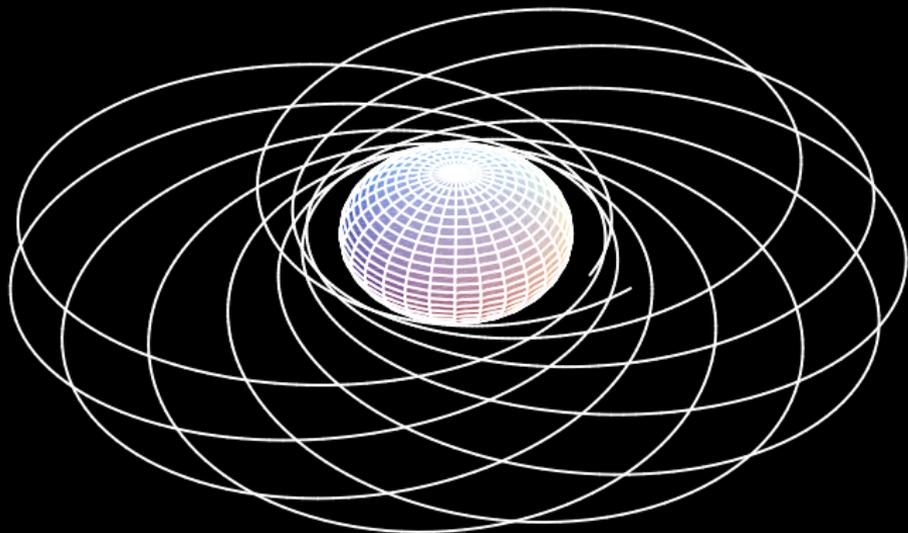
Bei abgeplatteter Sonne ist etwas mehr Masse näher am Merkur dran → stärkeres Ablenken in der Nähe der Sonne

Bahnen im Sonnensystem



Die anderen Planeten ziehen den Merkur etwas nach draußen → Merkur bleibt etwas länger im Aphel

Beobachtete Bahnen



... und wirklich beobachtet wird noch mehr Periheldrehung ...

Problem: Periheldrehung des Merkur

Urbain Jean Joseph Le Verrier:

- ▶ Vorhersage des Neptun aufgrund von Bahnbeobachtungen
- ▶ Erfinder der Wetterkarte

Beobachtung einer anomalen Periheldrehung des Merkur 1859:

- ▶ Beobachtungsfehler?
- ▶ Dunkle Materie: weiterer Planet?
- ▶ Andere Multipolmomente der Sonne?
- ▶ Anderer Einfluss der Planeten?
- ▶ Falsche Gravitationstheorie?



Urbain Jean Joseph Le Verrier 1811 — 1877

Problem: Periheldrehung des Merkur

Urbain Jean Joseph Le Verrier:

- ▶ Vorhersage des Neptun aufgrund von Bahnbeobachtungen
- ▶ Erfinder der Wetterkarte

Beobachtung einer anomalen Periheldrehung des Merkur 1859:

- ▶ Beobachtungsfehler?
- ▶ Dunkle Materie: weiterer Planet?
- ▶ Andere Multipolmomente der Sonne?
- ▶ Anderer Einfluss der Planeten?
- ▶ **Falsche Gravitationstheorie?**



Urbain Jean Joseph Le Verrier 1811 — 1877

Problem: Periheldrehung des Merkur

Urbain Jean Joseph Le Verrier:

- ▶ Vorhersage des Neptun aufgrund von Bahnbeobachtungen
- ▶ Erfinder der Wetterkarte

Beobachtung einer anomalen Periheldrehung des Merkur 1859:

- ▶ Beobachtungsfehler?
- ▶ Dunkle Materie: weiterer Planet?
- ▶ Andere Multipolmomente der Sonne?
- ▶ Anderer Einfluss der Planeten?
- ▶ **Falsche Gravitationstheorie?**



Problem: Periheldrehung des Merkur

Urbain Jean Joseph Le Verrier:

- ▶ Vorhersage des Neptun aufgrund von Bahnbeobachtungen
- ▶ Erfinder der Wetterkarte

Beobachtung einer anomalen Periheldrehung des Merkur 1859:

- ▶ Beobachtungsfehler?
- ▶ Dunkle Materie: weiterer Planet?
- ▶ Andere Multipolmomente der Sonne?
- ▶ Anderer Einfluss der Planeten?
- ▶ **Falsche Gravitationstheorie?**

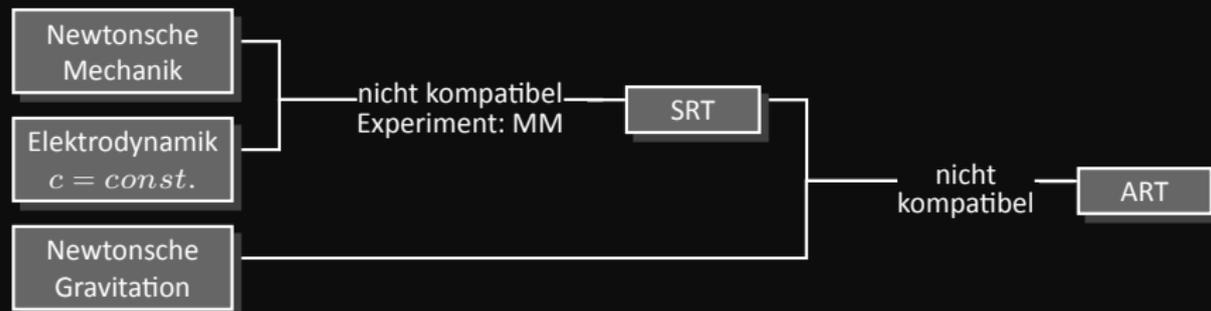


Urbain Jean Joseph Le Verrier 1811 — 1877



Warum Allgemeine Relativitätstheorie?

Geschichtliche Einordnung / Entstehung der ART



Bedeutung ART

- ▶ kleinste Effekte im Sonnensystem: erklärte Periheldrehung, sagte voraus Lichtablenkung, Rotverschiebung, Zeitverzögerung, Schiff-Effekt, Lense-Thirring-Effekt, ...
- ▶ wenn man die Gleichungen der ART ernst nimmt: Schwarze Löcher – weist alles darauf hin, dass es diese wirklich gibt → **Triumph der Theorie !!!**
- ▶ Dann auch Zeitreisen, Wurmlöcher, ... ? aber schwierig mit QM ...

Outline

Bremen and ZARM

Einleitung

Einleitung

Die Eigenschaften der Gravitation

Die Grundlage der Gravitationsphysik: das Einsteinsche Äquivalenzprinzip

▶ Resultate

Konsequenzen der Speziellen Relativitätstheorie

Konsequenzen der Allgemeinen Relativitätstheorie

▶ Formale Konsequenzen

▶ Wie misst man Gravitation?

▶ Effekte der Allgemeinen Relativitätstheorie

Praktische Anwendungen der Allgemeinen Relativitätstheorie

▶ Anwendungen in der Metrologie

▶ Anwendung in der Positionierung

▶ Anwendung Geodäsie

▶ Heutige Technologien

▶ Neue Methoden

Zusammenfassung

Die Charakteristika der Gravitation

- ▶ Gravitation wirkt immer und überall
- ▶ Gravitation kann wegtransformiert werden
- ▶ Gravitation wirkt auf alle Materie
- ▶ Gravitation wirkt auf alle Materie in der gleichen Weise
- ▶ Gravitation wirkt auf alle Uhren
- ▶ Gravitation wirkt auf alle Uhren in der gleichen Weise
- ▶ Gravitation wird von allen Materiearten erzeugt
- ▶ Gravitation wird von allen Materiearten in gleicher Weise erzeugt

Die Charakteristika der Gravitation

- ▶ Gravitation wirkt **immer und überall**
- ▶ Gravitation kann wegtransformiert werden
- ▶ Gravitation wirkt auf alle Materie
- ▶ Gravitation wirkt auf alle Materie in der gleichen Weise
- ▶ Gravitation wirkt auf alle Uhren
- ▶ Gravitation wirkt auf alle Uhren in der gleichen Weise
- ▶ Gravitation wird von allen Materiearten erzeugt
- ▶ Gravitation wird von allen Materiearten in gleicher Weise erzeugt

Die Charakteristika der Gravitation

- ▶ Gravitation wirkt **immer und überall**
- ▶ Gravitation kann **wegtransformiert werden**
- ▶ Gravitation wirkt auf alle Materie
- ▶ Gravitation wirkt auf alle Materie in der gleichen Weise
- ▶ Gravitation wirkt auf alle Uhren
- ▶ Gravitation wirkt auf alle Uhren in der gleichen Weise
- ▶ Gravitation wird von allen Materiearten erzeugt
- ▶ Gravitation wird von allen Materiearten in gleicher Weise erzeugt

Die Charakteristika der Gravitation

- ▶ Gravitation wirkt **immer und überall**
- ▶ Gravitation kann **wegtransformiert werden**
- ▶ Gravitation wirkt auf **alle Materie**
- ▶ Gravitation wirkt auf alle Materie in der gleichen Weise
- ▶ Gravitation wirkt auf alle Uhren
- ▶ Gravitation wirkt auf alle Uhren in der gleichen Weise
- ▶ Gravitation wird von allen Materiearten erzeugt
- ▶ Gravitation wird von allen Materiearten in gleicher Weise erzeugt

Die Charakteristika der Gravitation

- ▶ Gravitation wirkt **immer und überall**
- ▶ Gravitation kann **wegtransformiert werden**
- ▶ Gravitation wirkt auf **alle Materie**
- ▶ Gravitation wirkt auf alle Materie **in der gleichen Weise**
- ▶ Gravitation wirkt auf alle Uhren
- ▶ Gravitation wirkt auf alle Uhren in der gleichen Weise
- ▶ Gravitation wird von allen Materiearten erzeugt
- ▶ Gravitation wird von allen Materiearten in gleicher Weise erzeugt

Die Charakteristika der Gravitation

- ▶ Gravitation wirkt immer und überall
- ▶ Gravitation kann wegtransformiert werden
- ▶ Gravitation wirkt auf alle Materie
- ▶ Gravitation wirkt auf alle Materie in der gleichen Weise
- ▶ Gravitation wirkt auf alle Uhren
- ▶ Gravitation wirkt auf alle Uhren in der gleichen Weise
- ▶ Gravitation wird von allen Materiearten erzeugt
- ▶ Gravitation wird von allen Materiearten in gleicher Weise erzeugt

Die Charakteristika der Gravitation

- ▶ Gravitation wirkt immer und überall
- ▶ Gravitation kann wegtransformiert werden
- ▶ Gravitation wirkt auf alle Materie
- ▶ Gravitation wirkt auf alle Materie in der gleichen Weise
- ▶ Gravitation wirkt auf alle Uhren
- ▶ Gravitation wirkt auf alle Uhren in der gleichen Weise
- ▶ Gravitation wird von allen Materiearten erzeugt
- ▶ Gravitation wird von allen Materiearten in gleicher Weise erzeugt

Die Charakteristika der Gravitation

- ▶ Gravitation wirkt immer und überall
- ▶ Gravitation kann wegtransformiert werden
- ▶ Gravitation wirkt auf alle Materie
- ▶ Gravitation wirkt auf alle Materie in der gleichen Weise
- ▶ Gravitation wirkt auf alle Uhren
- ▶ Gravitation wirkt auf alle Uhren in der gleichen Weise
- ▶ Gravitation wird von allen Materiearten erzeugt
- ▶ Gravitation wird von allen Materiearten in gleicher Weise erzeugt

Die Charakteristika der Gravitation

- ▶ Gravitation wirkt immer und überall
- ▶ Gravitation kann wegtransformiert werden
- ▶ Gravitation wirkt auf alle Materie
- ▶ Gravitation wirkt auf alle Materie in der gleichen Weise
- ▶ Gravitation wirkt auf alle Uhren
- ▶ Gravitation wirkt auf alle Uhren in der gleichen Weise
- ▶ Gravitation wird von allen Materiearten erzeugt
- ▶ Gravitation wird von allen Materiearten in gleicher Weise erzeugt

Die Charakteristika der Gravitation

- ▶ Gravitation wirkt immer und überall
- ▶ Gravitation kann wegtransformiert werden
- ▶ Gravitation wirkt auf alle Materie
- ▶ Gravitation wirkt auf alle Materie in der gleichen Weise
- ▶ Gravitation wirkt auf alle Uhren
- ▶ Gravitation wirkt auf alle Uhren in der gleichen Weise
- ▶ Gravitation wird von allen Materiearten erzeugt
- ▶ Gravitation wird von allen Materiearten in gleicher Weise erzeugt

Gravitation \Leftrightarrow Universalitätsprinzipien \Leftrightarrow Geometrie

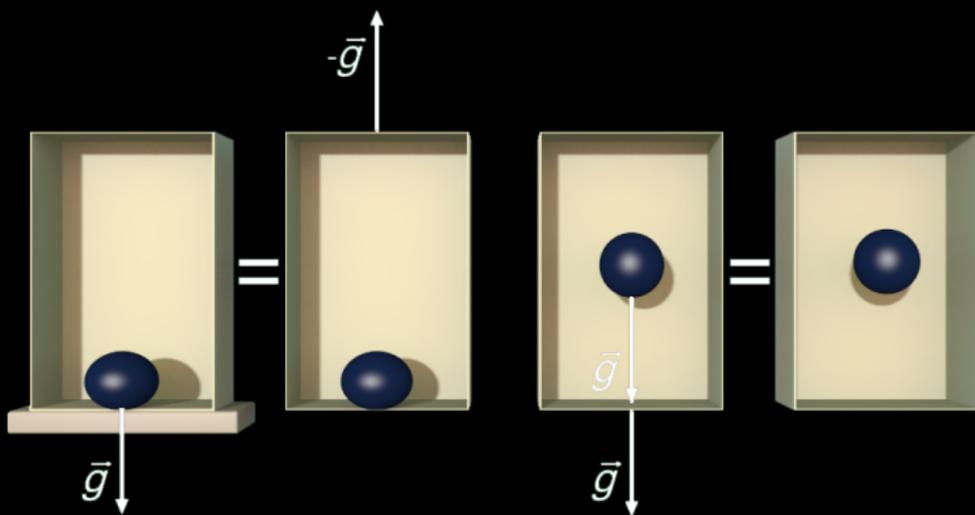
Gravitation kann wegtransformiert werden

Einsteinscher Fahrstuhl [Fahrstuhl.wmv](#)

Gravitation kann wegtransformiert werden

Wegtransformierbarkeit im Weltraum: [onbclip08.mpg](#)

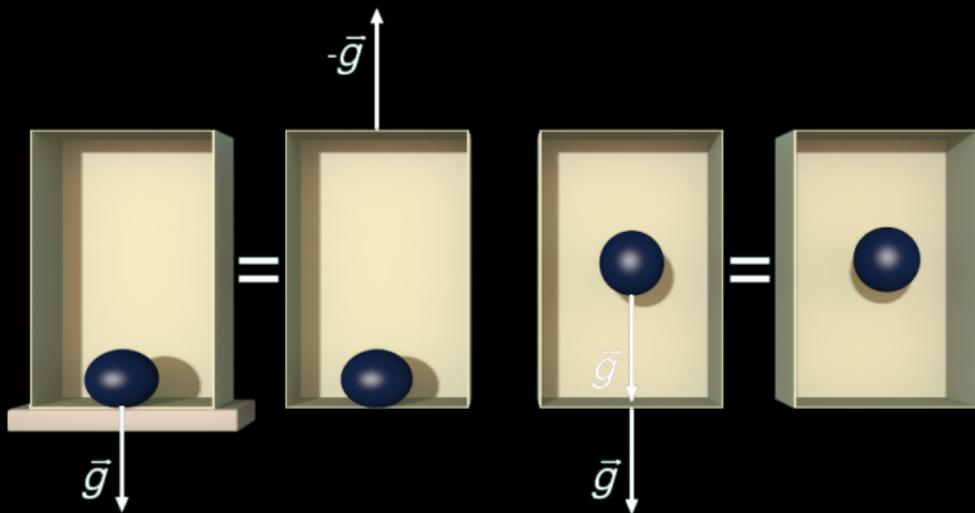
Gravitation kann simuliert werden



Links: Gravitation kann simuliert werden

Rechts: Gravitation kann wegtransformiert werden

Gravitation kann simuliert werden



Links: Gravitation kann simuliert werden

Rechts: Gravitation kann wegtransformiert werden

Frage: Was aber ist dann Gravitation ?? Ist Gravitation Beschleunigung ??

Outline

Bremen and ZARM

Einleitung

Einleitung

Die Eigenschaften der Gravitation

Die Grundlage der Gravitationsphysik: das Einsteinsche Äquivalenzprinzip

▶ Resultate

Konsequenzen der Speziellen Relativitätstheorie

Konsequenzen der Allgemeinen Relativitätstheorie

▶ Formale Konsequenzen

▶ Wie misst man Gravitation?

▶ Effekte der Allgemeinen Relativitätstheorie

Praktische Anwendungen der Allgemeinen Relativitätstheorie

▶ Anwendungen in der Metrologie

▶ Anwendung in der Positionierung

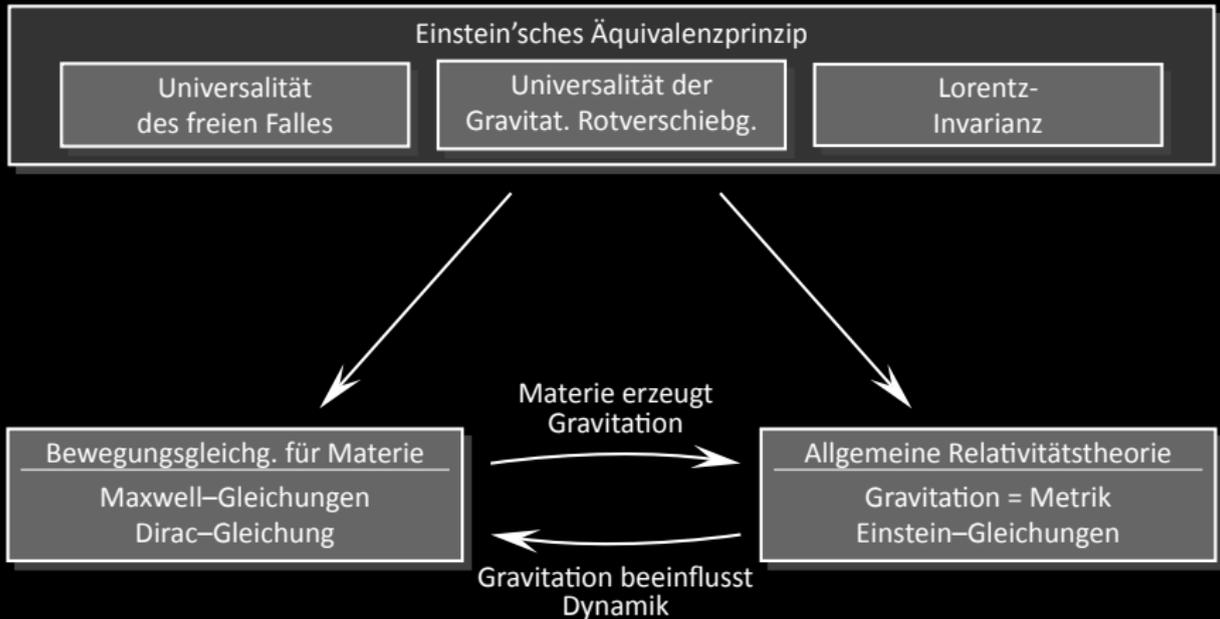
▶ Anwendung Geodäsie

▶ Heutige Technologien

▶ Neue Methoden

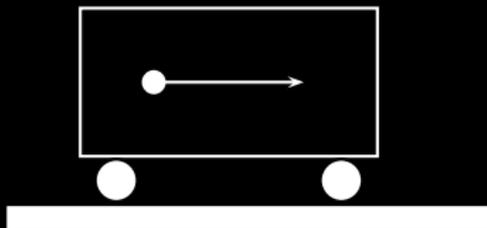
Zusammenfassung

Die Struktur der Standardphysik



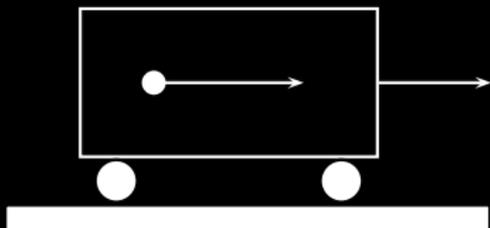
Galilei'sche Erfahrung

Galilei'sche Addition der Geschwindigkeiten



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

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

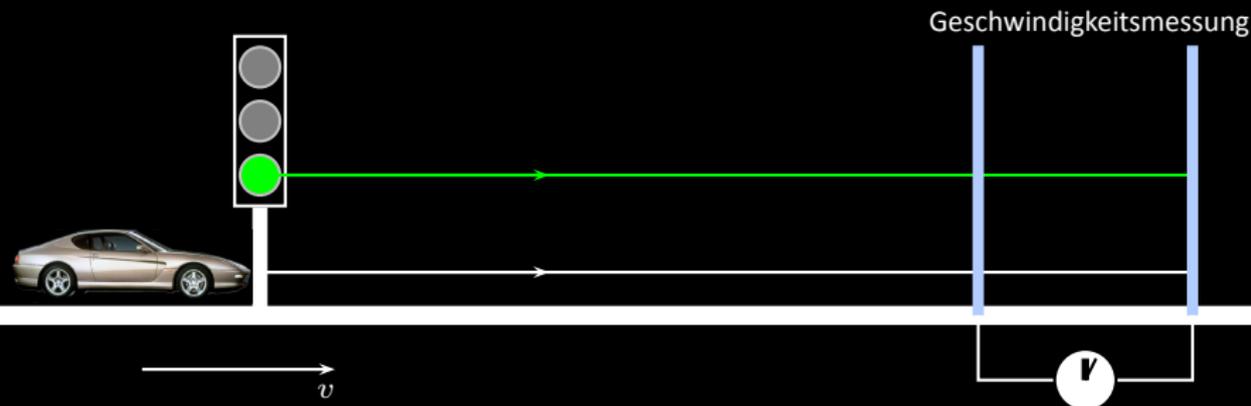


- ▶ Geschwindigkeit des Wagens = 20 m/s
- ▶ Geschwindigkeit des Balls bzgl. des Wagens = 10 m/s

⇒ Geschwindigkeit des Balls bzgl. Boden = 30 m/s

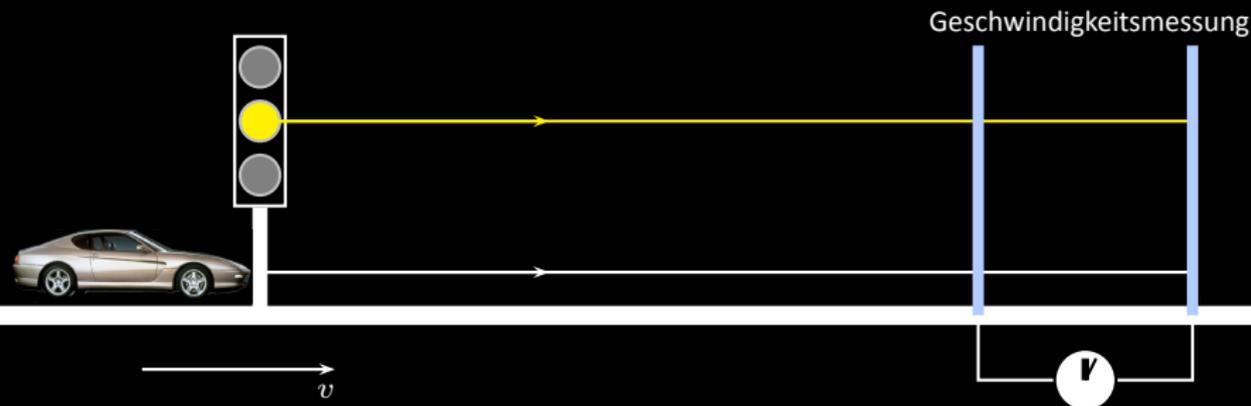
Prinzip der Messung

- ▶ Auto mit Licht (weiß) fährt über Ampel: c
- ▶ Grünes Licht: c
- ▶ Messung von c und c mit demselben Messgerät
- ▶ Ergebnis: $c = c$!!!!! Widerspricht der täglichen Erfahrung, ist kontraintuitiv, aber: das wird mit höchster Genauigkeit gemessen.



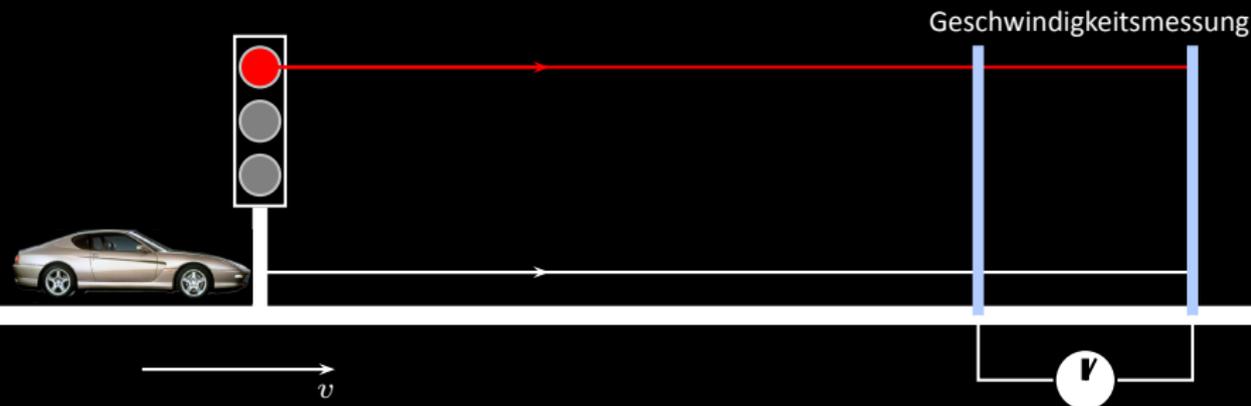
Prinzip der Messung

- ▶ Auto mit Licht (weiß) fährt über Ampel: c
- ▶ Gelbes Licht: c
- ▶ Messung von c und c mit demselben Messgerät
- ▶ Ergebnis: $c = c$!!!!! Widerspricht der täglichen Erfahrung, ist kontraintuitiv, aber: das wird mit höchster Genauigkeit gemessen.



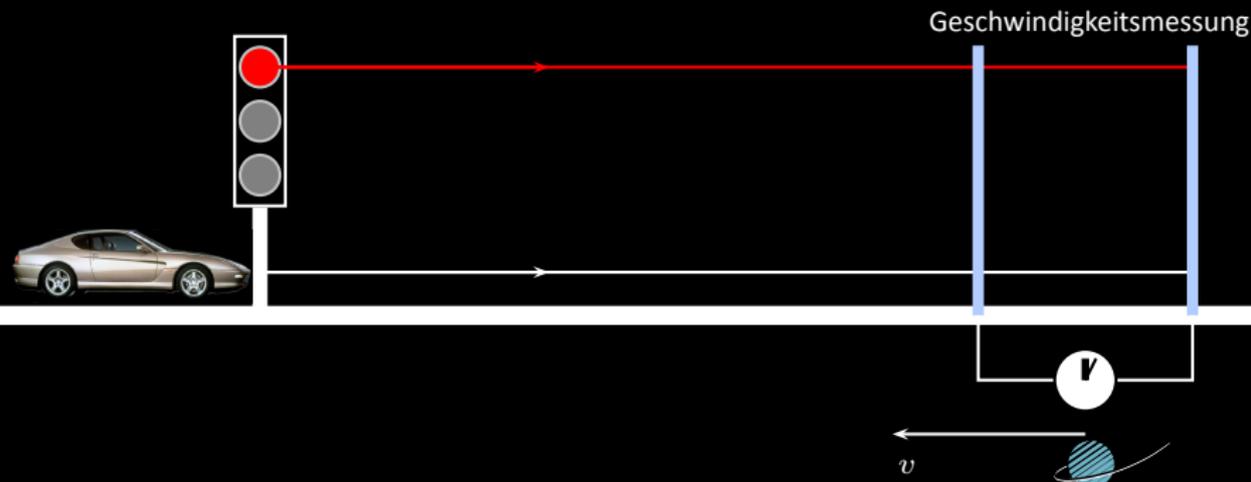
Prinzip der Messung

- ▶ Auto mit Licht (weiß) fährt über Ampel: c
- ▶ Rotes Licht: c
- ▶ Messung von c und c mit demselben Messgerät
- ▶ Ergebnis: $c = c$!!!!! Widerspricht der täglichen Erfahrung, ist kontraintuitiv, aber: das wird mit höchster Genauigkeit gemessen.



Prinzip der Messung

- ▶ Auto mit Licht (weiß) steht an Ampel: c
- ▶ Rotes Licht: c
- ▶ Messung von c und c mit bewegtem Messgerät
- ▶ Ergebnis: $c = c$!!!!! Widerspricht der täglichen Erfahrung, ist kontraintuitiv, aber: das wird mit höchster Genauigkeit gemessen.



Bemerkung

- ▶ alle Messungen werden mit **demselben** Messgerät gemacht
- ▶ es gibt nur Vergleiche: es wird nur ermittelt, ob zwei Geschwindigkeiten gleich oder unterschiedlich sind
- ▶ das ist unabhängig von der Synchronisierung

Wirklich gemachte Messungen

alles in der Physik muss durch Experimente verifiziert werden (im Rahmen der Messgenauigkeit)

Ziel: hochgenaue Messungen zur Frage, ob die Lichtgeschwindigkeit von der Geschwindigkeit der Quelle abhängt

Modellierung einer möglichen Abhängigkeit

$$c' = c + \kappa v$$

ist ein generische Modell, man könnte auch Abhängigkeit von v^2 annehmen, was aber die Fragestellung und Diskussion nicht ändert

$$\implies \kappa = \frac{c' - c}{v}$$

c und c' werden gemessen, v ist Teil der Präparation

Erwartung

Im Rahmen der nichtrelativistischen galileischen Kinematik erwarten wir $\kappa = 1$. Wird das bestätigt?

Wirklich gemachte Messungen

experimentelle Strategie, um κ gut abzuschätzen

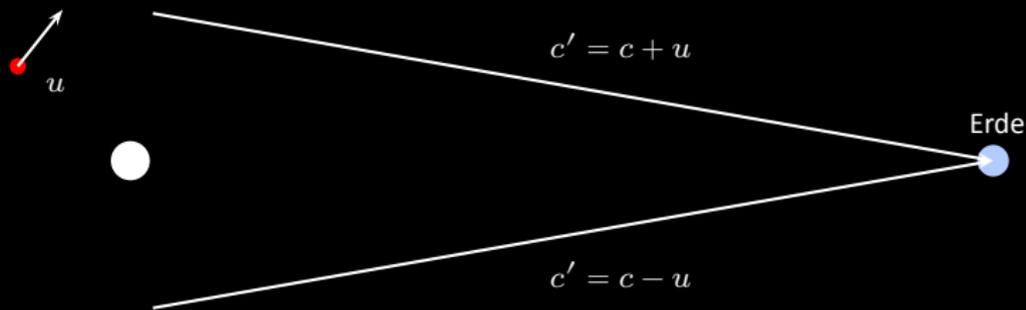
- ▶ **lange Laufzeit** der Lichtsignale: dann kann nach langer Zeit selbst ein kleinster Unterschied in der Lichtgeschwindigkeit detektiert werden
- ▶ **größte Geschwindigkeiten**: was passiert, wenn die Geschwindigkeit des Mercedes fast selbst Lichtgeschwindigkeit ist?

Durchgeführte Messungen

- ▶ Astrophysik: Messung an Doppelsternsystemen (stehen lange Distanzen zur Verfügung, damit lange Laufzeit)
- ▶ Elementarteilchenphysik: Messung schnellster Teilchen (höchste Geschwindigkeit)

Doppelsternsysteme

Beobachtung von Licht entfernter Doppelsternsysteme: einfachste Anordnung

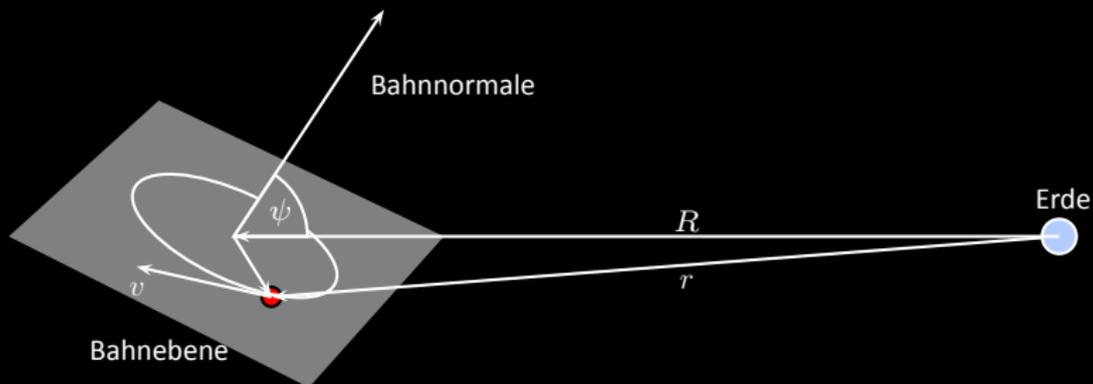


später ausgesandtes Licht kann früher ankommen

- ▶ Umkehrung der chronologischen Reihenfolge
- ▶ Mehrfachbilder

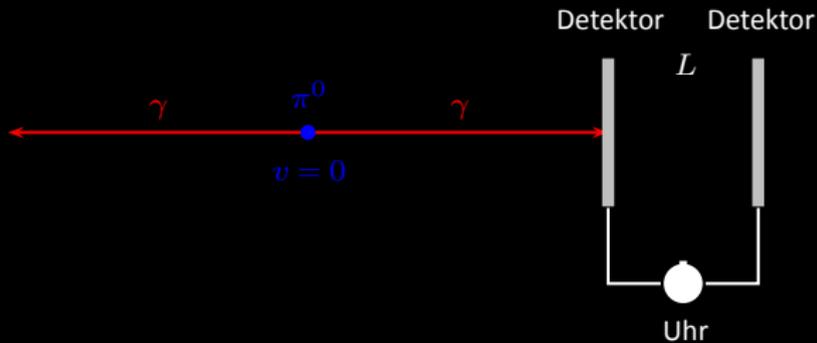
Doppelsternsysteme

Beobachtung von Licht entfernter Doppelsternsysteme: realistische Anordnung



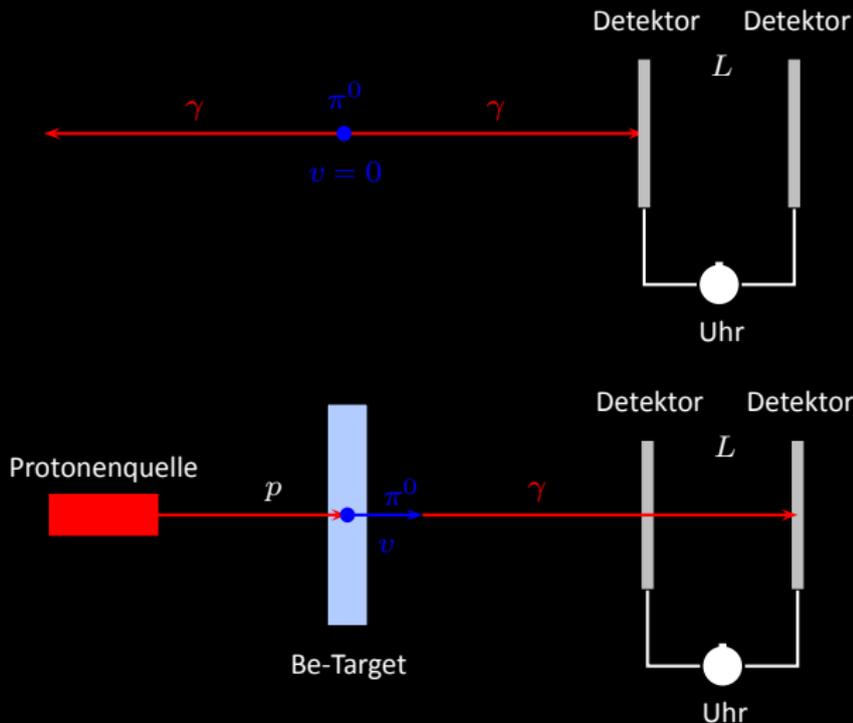
Schnellste Elementarteilchen

Beobachtung von Licht schneller Elementarteilchen



Schnellste Elementarteilchen

Beobachtung von Licht schneller Elementarteilchen



Outline

Bremen and ZARM

Einleitung

Einleitung

Die Eigenschaften der Gravitation

Die Grundlage der Gravitationsphysik: das Einsteinsche Äquivalenzprinzip

▶ Resultate

Konsequenzen der Speziellen Relativitätstheorie

Konsequenzen der Allgemeinen Relativitätstheorie

▶ Formale Konsequenzen

▶ Wie misst man Gravitation?

▶ Effekte der Allgemeinen Relativitätstheorie

Praktische Anwendungen der Allgemeinen Relativitätstheorie

▶ Anwendungen in der Metrologie

▶ Anwendung in der Positionierung

▶ Anwendung Geodäsie

▶ Heutige Technologien

▶ Neue Methoden

Zusammenfassung

Resultate

Modell $c' = c + \kappa v$

Beschreibung und Ergebnis (Brecher 1977)

- ▶ Es wurden keine Umkehrung der chronologischen Reihenfolge oder Vielfachbilder beobachtet
- ▶ Resultat $|\kappa| \leq 10^{-11}$

Beschreibung und Ergebnis (Alväger et al 1964)

- ▶ Beide Geschwindigkeiten waren im Bereich der Messgenauigkeit gleich
- ▶ Resultat $|\kappa| \leq 10^{-6}$ bei Teilchengeschwindigkeit von $v = 0.99975 c$
- ▶ Vorhersage Galileo: $c' \approx 2c$

Wie kann man nach Alväger noch an der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit zweifeln?

Resultate

Modell $c' = c + \kappa v$

Beschreibung und Ergebnis (Brecher 1977)

- ▶ Es wurden keine Umkehrung der chronologischen Reihenfolge oder Vielfachbilder beobachtet
- ▶ Resultat $|\kappa| \leq 10^{-11}$

Beschreibung und Ergebnis (Alväger et al 1964)

- ▶ Beide Geschwindigkeiten waren im Bereich der Messgenauigkeit gleich
- ▶ Resultat $|\kappa| \leq 10^{-6}$ bei Teilchengeschwindigkeit von $v = 0.99975 c$
- ▶ Vorhersage Galileo: $c' \approx 2c$

Wie kann man nach Alväger noch an der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit zweifeln?

Physikalische Interpretation

- ▶ Die Lichtgeschwindigkeit hängt nicht von der Geschwindigkeit der Quelle ab
⇒ **Es gibt nur eine (!) Lichtgeschwindigkeit**
zu einem Zeitpunkt kann von einem Ort in eine Richtung nur **ein** Lichtstrahl ausgehen
- ▶ Die Lichtgeschwindigkeit hängt auch nicht vom Bewegungszustand des Messgerätes ab
- ▶ Da nur verglichen wird, ist diese Aussage **theorie-unabhängig** und damit auch unabhängig von jeglicher Interpretation.
- ▶ Diese Aussagen haben nichts mit Galileischer Kinematik oder mit einem Geschwindigkeitsadditionsgesetz zu tun.
- ⇒ Die Lichtausbreitung ist damit eine Eigenschaft, die unabhängig von den Eigenschaften des Lichts sind
- ⇒ Die Lichtausbreitung kann daher als Eigenschaft von Raum und Zeit, als Eigenschaft der Geometrie von Raum und Zeit, angesehen werden.

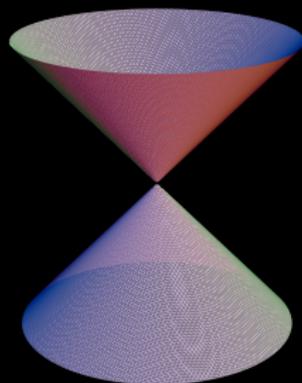
Die aktuelle Situation

Alle Aspekte der Lorentz–Invarianz sind experimentell sehr gut bestätigt

Grundlagen

Postulate

- ▶ $c = \text{const}$
- ▶ Relativitätsprinzip



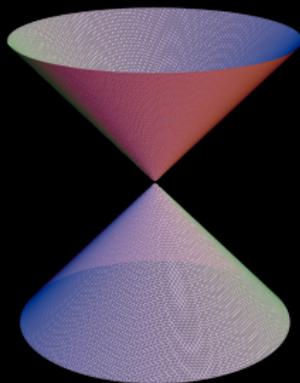
Die aktuelle Situation

Alle Aspekte der Lorentz–Invarianz sind experimentell sehr gut bestätigt

Grundlagen

Postulate

- ▶ $c = \text{const}$
- ▶ Relativitätsprinzip



Tests

- ▶ Unabhängigkeit von c von der Geschwindigkeit der Quelle
- ▶ Universalität von c
- ▶ Isotropie von c
- ▶ Unabhängigkeit von c von der Geschwindigkeit des Labors
- ▶ Zeitdilatation (für alle Arten von Uhren)
- ▶ Isotropie der Physik (Hughes–Drever Experimente)
- ▶ Unabhängigkeit der Physik von der Geschwindigkeit des Labors

Konsequenz: Zeitdilatation

zeitdilatation.avi

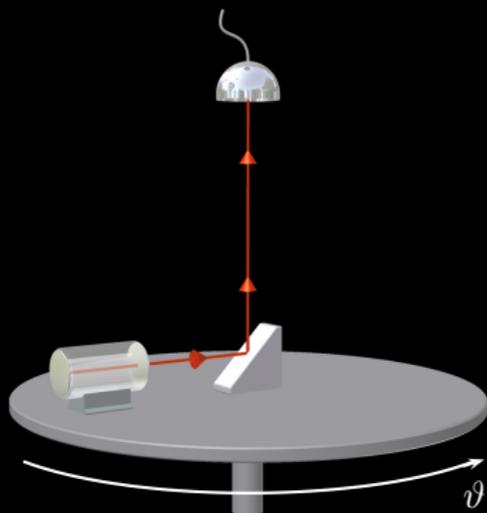
$$T_0 = \frac{L}{c} \quad \wedge \quad c = \text{const.} \quad \Rightarrow \quad T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Tests der SRT

- ▶ Isotropie von c
- ▶ Unabhängigkeit von c von der Geschwindigkeit v des Labors
- ▶ Zeitdilatation, Doppler-Effekt

Test der Isotropie von c

- ▶ Interferenzexperiment – Michelson–Morley
- ▶ Messung der Frequenz in einem sich drehenden Resonator



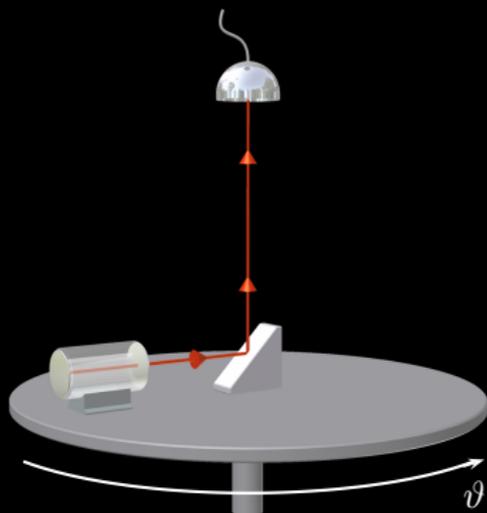
Modellunabhängige Beschreibung

- ▶ Randbedingungen
- ▶ Beobachtbare Frequenz
$$\nu = \frac{m}{2L}c$$
- ▶ Kryogene Resonatoren, einer rotiert, einer fest
- ▶ **Herrmann et al, PRD 2010**
- ▶ Resultat

$$\left| \frac{\Delta_{\vartheta} c}{c} \right| \leq 10^{-17}$$

Test der Isotropie von c

- ▶ Interferenzexperiment – Michelson–Morley
- ▶ Messung der Frequenz in einem sich drehenden Resonator



Modellunabhängige Beschreibung

- ▶ Randbedingungen
- ▶ Beobachtbare Frequenz
$$\nu(\vartheta) = \frac{m}{2L} c(\vartheta)$$
- ▶ Kryogene Resonatoren, einer rotiert, einer fest
- ▶ **Herrmann et al, PRD 2010**
- ▶ Resultat

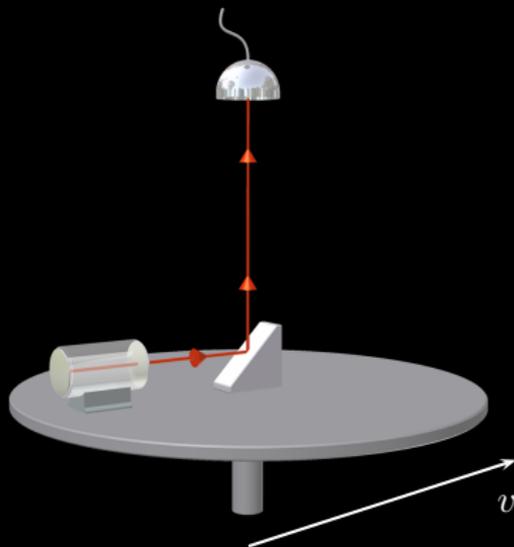
$$\left| \frac{\Delta_{\vartheta} c}{c} \right| \leq 10^{-17}$$

Finsler violation of Lorentz invariance



Test der Unabhängigkeit von c von v

- ▶ Interference experiment – Kennedy–Thorndike
- ▶ Frequenzmessung bei bewegtem Resonator = Vergleich Resonator – Uhr



Modellunabhängige Beschreibung

- ▶ Beschreibung wie oben
- ▶ Beobachtbare Frequenz

$$\nu = \frac{m}{2L}c$$

- ▶ Wolf et al, PRL 2004
- ▶ Vergleich mit H-maser
- ▶ Result

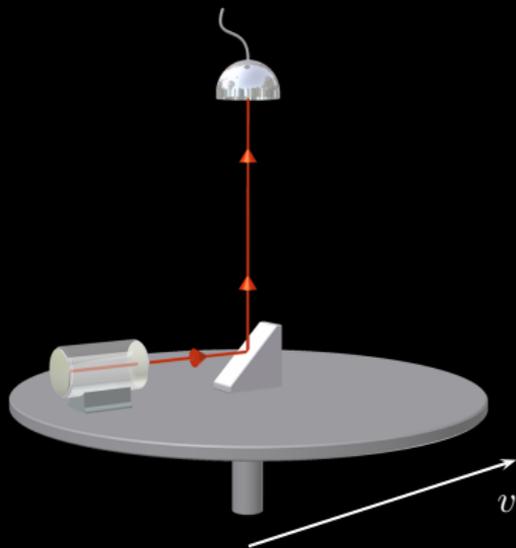
$$\left| \frac{\Delta_{\nu} c}{c} \right| \leq (4.5 \pm 4.5) \cdot 10^{-16}$$

- ▶ $\delta\nu \leftrightarrow$ Erdrotation



Test der Unabhängigkeit von c von v

- ▶ Interference experiment – Kennedy–Thorndike
- ▶ Frequenzmessung bei bewegtem Resonator = Vergleich Resonator – Uhr



Modellunabhängige Beschreibung

- ▶ Beschreibung wie oben
- ▶ Beobachtbare Frequenz

$$\nu(v) = \frac{m}{2L} c(v)$$

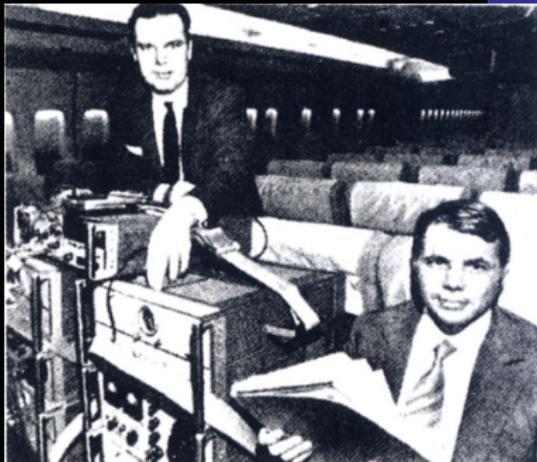
- ▶ **Wolf et al, PRL 2004**
- ▶ Vergleich mit H-maser
- ▶ Result

$$\left| \frac{\Delta_{\nu} c}{c} \right| \leq (4.5 \pm 4.5) \cdot 10^{-16}$$

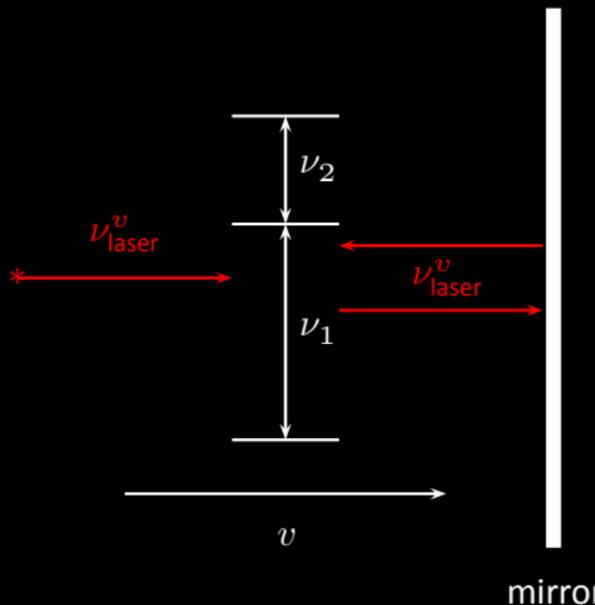
- ▶ $\delta\nu \leftrightarrow$ Erdrotation

Test of time–dilation: Transport of clocks

The Experiment by Hafele and Keating 1968



Test der Zeitdilatation: 2-Photon-Absorption



Beschreibung

- ▶ Resonance condition for $v = 0$

$$2\nu_{\text{laser}}^{v=0} = \nu_1 + \nu_2$$

- ▶ Resonance condition for $v \neq 0$

$$\nu_1 + \nu_2 = \nu_+ + \nu_-$$

$$\nu_{\pm} = \nu_{\text{laser}}^v (1 \pm v) \sqrt{1 - v^2}$$

- ▶ Consequence

$$\nu_{\text{laser}}^{v=0} = \nu_{\text{laser}}^v \sqrt{1 - v^2}$$

with

$$v = \frac{\nu_+ - \nu_-}{\nu_+ + \nu_-}$$

- ▶ No need of synchronization



Hughes–Drever–Experimente

Das Modell

Modifizierte Schrödinger-Gleichung

$$i\hbar\partial_t\psi = -\frac{\hbar^2}{2m}(\delta^{ij} + \alpha^{ij})\partial_i\partial_j\psi$$

Leads to a splitting of the Zeeman-Singlett

Hughes–Drever–Experimente

Das Modell

Modifizierte Schrödinger-Gleichung

$$i\hbar\partial_t\psi = -\frac{\hbar^2}{2m}(\delta^{ij} + \alpha^{ij})\partial_i\partial_j\psi$$

Leads to a splitting of the Zeeman-Singlett

Experimente

experiment	method	estimate
Hughes et al 1960	NMR with ${}^7\text{Li}$	$ \alpha^{ij} \leq 10^{-20}$
Drever 1961	NMR with ${}^7\text{Li}$	$ \alpha^{ij} \leq 2 \times 10^{-23}$
Prestage et al. 1985	NMR with ${}^9\text{Be}^+$	$ \alpha^{ij} \leq$
Lamoreaux et al. 1986, 1989, 1990	NMR with ${}^{201}\text{Hg}$	$ \alpha^{ij} \leq 2 \times 10^{-28}$
Chupp et al 1989	NMR with ${}^{21}\text{Ne}$	$ \alpha^{ij} \leq 5 \times 10^{-30}$

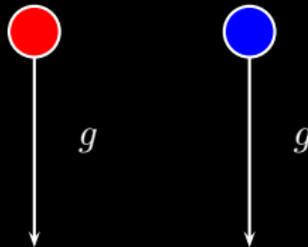
Further tests

- ▶ Sagnac effect
- ▶ Experiments testing $E = mc^2$
- ▶ Test of dispersion (mass of photon, QG induced anomalous dispersion)
- ▶ ...

Universalität des freien Falls

Ist eine Konsequenz von

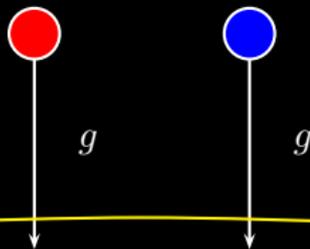
- ▶ Alle Teilchen fallen gleich schnell (ohne Störkräfte)
- ▶



Universalität des freien Falls

Ist eine Konsequenz von

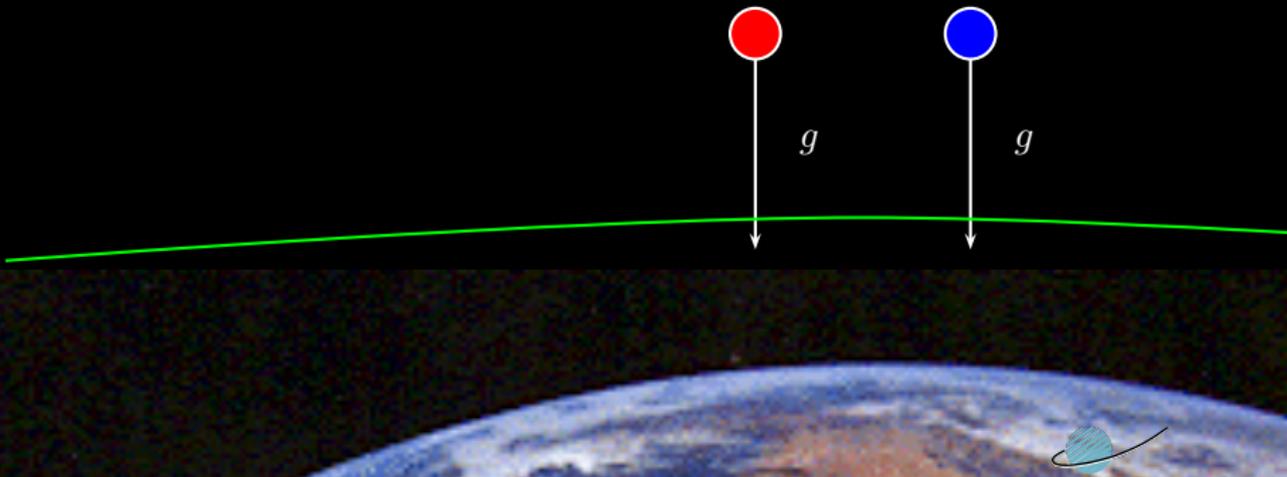
- ▶ Alle Teilchen fallen gleich schnell (ohne Störkräfte)
- ▶ Auch Licht wird von der Schwerkraft der Erde angezogen



Universalität des freien Falls

Ist eine Konsequenz von

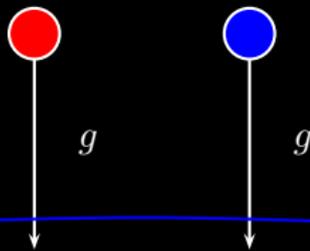
- ▶ Alle Teilchen fallen gleich schnell (ohne Störkräfte)
- ▶ Auch Licht wird von der Schwerkraft der Erde angezogen und zwar unabhängig von dessen Frequenz



Universalität des freien Falls

Ist eine Konsequenz von

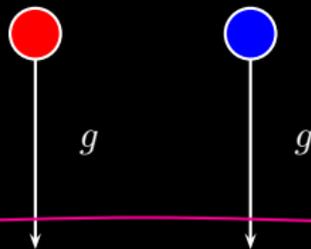
- ▶ Alle Teilchen fallen gleich schnell (ohne Störkräfte)
- ▶ Auch Licht wird von der Schwerkraft der Erde angezogen und zwar unabhängig von dessen Frequenz



Universalität des freien Falls

Ist eine Konsequenz von

- ▶ Alle Teilchen fallen gleich schnell (ohne Störkräfte)
- ▶ Auch Licht wird von der Schwerkraft der Erde angezogen und zwar unabhängig von dessen Frequenz



Universalität des freien Falls

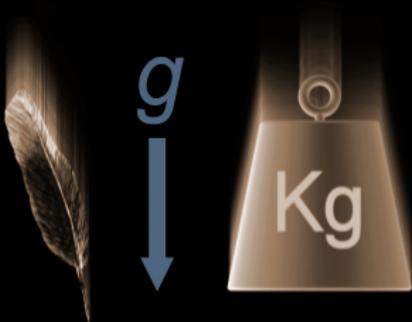
erster Weltraumtest: [hammer feather.avi](#)

Die aktuelle Situation

Viele Aspekte der Universalität des freien Falles sind experimentell gut getestet und bestätigt

Postulat

Alle strukturlosen Testteilchen fallen in einem Gravitationsfeld gleich.

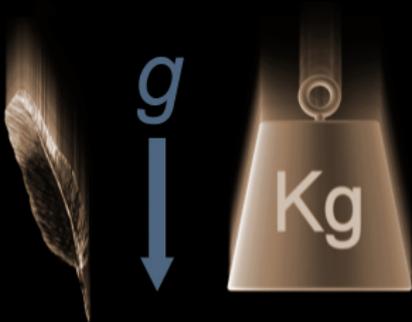


Die aktuelle Situation

Viele Aspekte der Universalität des freien Falles sind experimentell gut getestet und bestätigt

Postulat

Alle strukturlosen Testteilchen fallen in einem Gravitationsfeld gleich.



Tests

UFF für

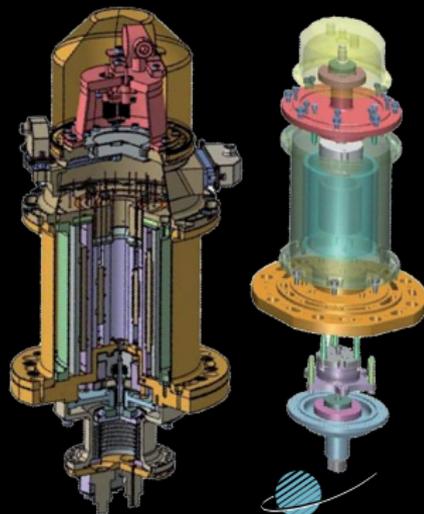
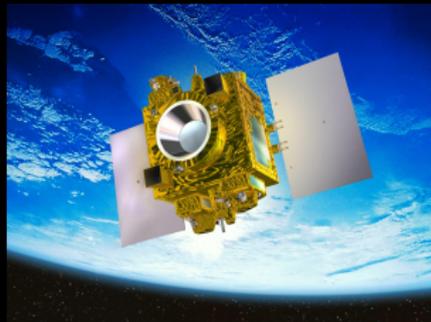
- ▶ Neutrale makroskopische Materie
- ▶ Geladene Teilchen
- ▶ Teilchen mit Spin

Bisher kein Tests für

- ▶ Antiteilchen

Die Mission MICROSCOPE

- ▶ French space mission with participation of CNES, ESA, ZARM and PTB
- ▶ Mission goal: Test of Equivalence Principle with an accuracy of $\eta = 10^{-15}$
- ▶ Mission overview:
 - ▶ Micro-satellite of CNES Myriade series
 - ▶ Drag-free satellite
 - ▶ Sun-synchronous orbit
 - ▶ Altitude about 800 km
 - ▶ Mission lifetime of 1 year
- ▶ Payload:
 - ▶ Two high-precision capacitive differential accelerometers
 - ▶ Science sensor: Ti and Pt test mass
 - ▶ Reference sensor: two Pt test masses
- ▶ Test of accelerometers at ZARM drop tower

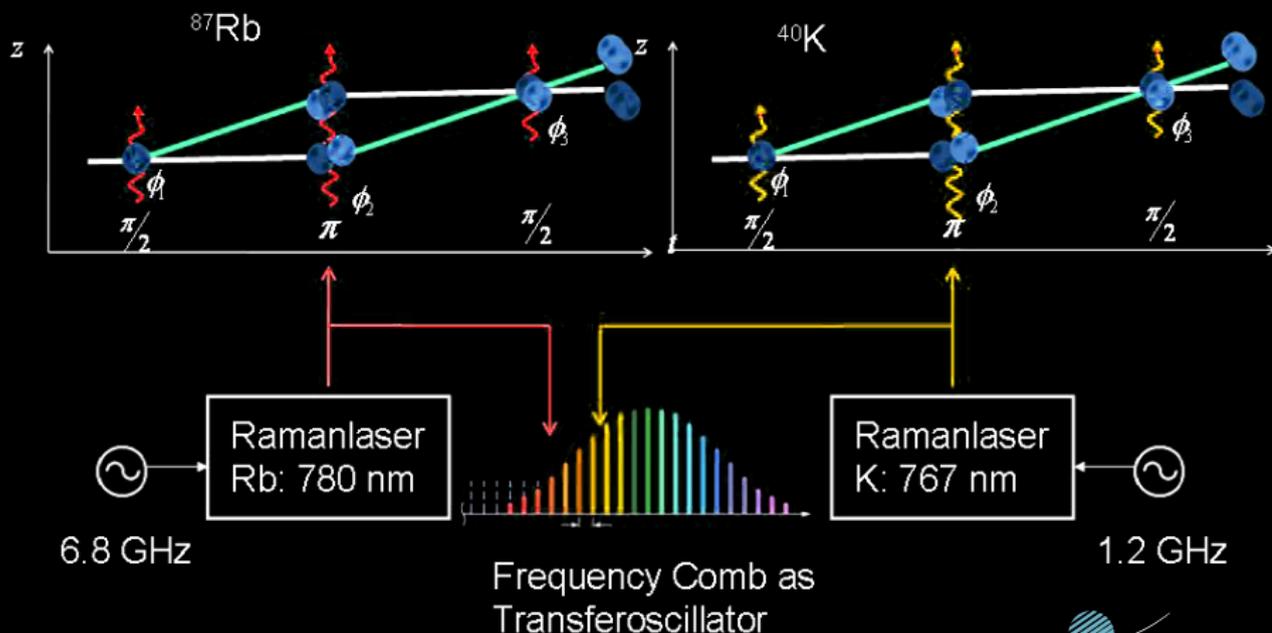


Das Projekt PRIMUS

Test des Äquivalenzprinzips mit Atominterferometrie

Phasenlink zwischen Laser

2-Spezies Atominterferometer



Der freie Fall im Newtonschen Rahmen

Newton: Mechanik

Kräftefreie = inertielle Bewegung $\ddot{x} = 0$
Newtonsche Kraftgleichung

$$m_t \ddot{x} = F$$

F = auf den Körper wirkende Kraft

Newton: Gravitation

Agierende gravitative Kraft

$$F = F_{\text{grav}} = -m_s \nabla U(x)$$

Bewegungsgleichung

$$m_t \ddot{x} = m_s \nabla U(x) \quad \Leftrightarrow \quad \ddot{x} = -\frac{m_s}{m_t} \nabla U(x)$$

freier Fall universell $\Leftrightarrow m_t = m_s$

Der freie Fall im Newtonschen Rahmen

Charakterisierung der Güte der Gültigkeit der Universalität des Freien Falles

$$\eta_{AB} = \frac{a_B - a_A}{\frac{1}{2}(a_A + a_B)} = 2 \frac{\left(\frac{m_s}{m_t}\right)_B - \left(\frac{m_s}{m_t}\right)_A}{\left(\frac{m_s}{m_t}\right)_B + \left(\frac{m_s}{m_t}\right)_A}$$

Eötvös-Koeffizient: misst den relativen Unterschied von Beschleunigungen

- ▶ ist keine relativistische Begriffsbildung
- ▶ beste Messung mit Torsionswaage: $\eta < 10^{-13}$ (Schlamminger et al, PRL 2007)
- ▶ bester Freifall-Versuch $\eta < 10^{-10}$ (Kuroda und Mio, PRD 1997)

Universalität der gravitativen Rotverschiebung

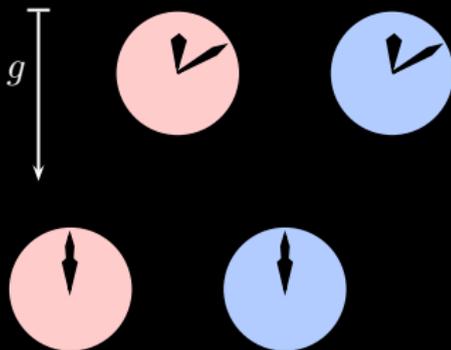
RotverschiebungFallturm.wmv

Die aktuelle Situation

Viele Aspekte der Universalität der gravitativen Rotverschiebung sind experimentell gut getestet und bestätigt

Postulat

Alle Uhren verhalten sich in einem Gravitationsfeld gleich.

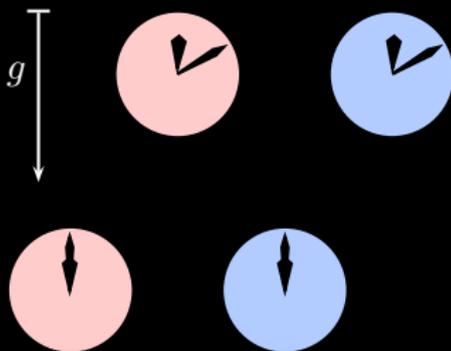


Die aktuelle Situation

Viele Aspekte der Universalität der gravitativen Rotverschiebung sind experimentell gut getestet und bestätigt

Postulat

Alle Uhren verhalten sich in einem Gravitationsfeld gleich.



Tests

UGR für

- ▶ Atomuhr: elektronisch
- ▶ Atomuhr: hyperfein
- ▶ Moleküluhr: Vibration
- ▶ Moleküluhr: Rotation
- ▶ Resonatoren
- ▶ Kernübergänge (Mössbauer-Effekt)
- ▶ quantenmechan. Zerfall

Bisher kein Tests mit

- ▶ "Anti-Uhren"

Der gegenwärtige Stand der Physik

Alle Vorhersagen der Allgemeinen Relativitätstheorie sind experimentell gut getestet und bestätigt

Prinzipien

Einstein'sches Äquivalenzprinzip

- ▶ Universalität des freien Falles
- ▶ Universalität der gravitativen Rotverschiebung
- ▶ Lokale Lorentz-Invarianz

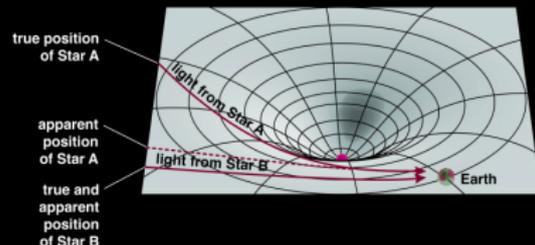
Der gegenwärtige Stand der Physik

Alle Vorhersagen der Allgemeinen Relativitätstheorie sind experimentell gut getestet und bestätigt

Prinzipien

Einstein'sches Äquivalenzprinzip

- ▶ Universalität des freien Falles
- ▶ Universalität der gravitativen Rotverschiebung
- ▶ Lokale Lorentz-Invarianz



Vorhersagen der ART

- ▶ Effekte im Sonnensystem
 - ▶ Periheldrehung
 - ▶ Gravitative Rotverschiebung
 - ▶ Lichtablenkung
 - ▶ Gravitative Zeitverzögerung
 - ▶ Lense-Thirring-Effekt
 - ▶ Schiff-Effekt
- ▶ Starke Gravitationsfelder
 - ▶ Binärsysteme
 - ▶ Schwarze Löcher
- ▶ Gravitationswellen
- ▶ Kosmologie

Outline

Bremen and ZARM

Einleitung

Einleitung

Die Eigenschaften der Gravitation

Die Grundlage der Gravitationsphysik: das Einsteinsche Äquivalenzprinzip

▶ Resultate

Konsequenzen der Speziellen Relativitätstheorie

Konsequenzen der Allgemeinen Relativitätstheorie

▶ Formale Konsequenzen

▶ Wie misst man Gravitation?

▶ Effekte der Allgemeinen Relativitätstheorie

Praktische Anwendungen der Allgemeinen Relativitätstheorie

▶ Anwendungen in der Metrologie

▶ Anwendung in der Positionierung

▶ Anwendung Geodäsie

▶ Heutige Technologien

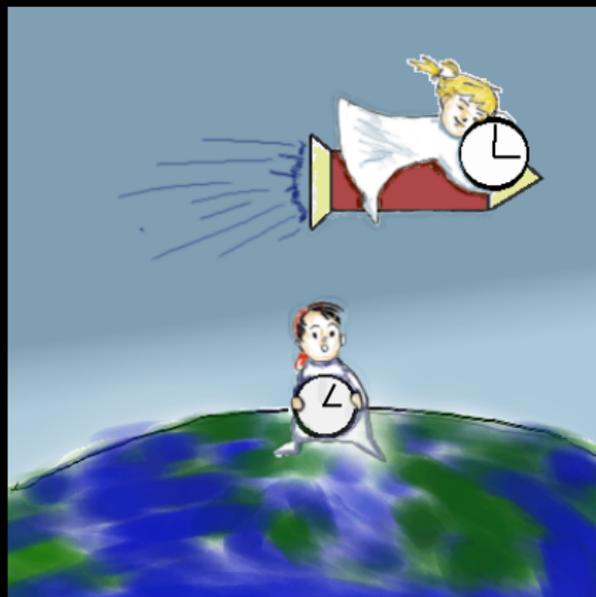
▶ Neue Methoden

Zusammenfassung

Spezielle Relativitätstheorie

Konsequenzen

- ▶ Zeitdilatation
- ▶ Zwillingsparadoxon
- ▶ Doppler-Effekt
- ▶ $E = mc^2$
- ▶ Längenkontraktion
- ▶ Thomas-Präzession
- ▶ Sagnac-Effekt
- ▶ ...



(Kris Schroven 2013)

Outline

Bremen and ZARM

Einleitung

Einleitung

Die Eigenschaften der Gravitation

Die Grundlage der Gravitationsphysik: das Einsteinsche Äquivalenzprinzip

▶ Resultate

Konsequenzen der Speziellen Relativitätstheorie

Konsequenzen der Allgemeinen Relativitätstheorie

▶ Formale Konsequenzen

▶ Wie misst man Gravitation?

▶ Effekte der Allgemeinen Relativitätstheorie

Praktische Anwendungen der Allgemeinen Relativitätstheorie

▶ Anwendungen in der Metrologie

▶ Anwendung in der Positionierung

▶ Anwendung Geodäsie

▶ Heutige Technologien

▶ Neue Methoden

Zusammenfassung

Outline

Bremen and ZARM

Einleitung

Einleitung

Die Eigenschaften der Gravitation

Die Grundlage der Gravitationsphysik: das Einsteinsche Äquivalenzprinzip

▶ Resultate

Konsequenzen der Speziellen Relativitätstheorie

Konsequenzen der Allgemeinen Relativitätstheorie

▶ Formale Konsequenzen

▶ Wie misst man Gravitation?

▶ Effekte der Allgemeinen Relativitätstheorie

Praktische Anwendungen der Allgemeinen Relativitätstheorie

▶ Anwendungen in der Metrologie

▶ Anwendung in der Positionierung

▶ Anwendung Geodäsie

▶ Heutige Technologien

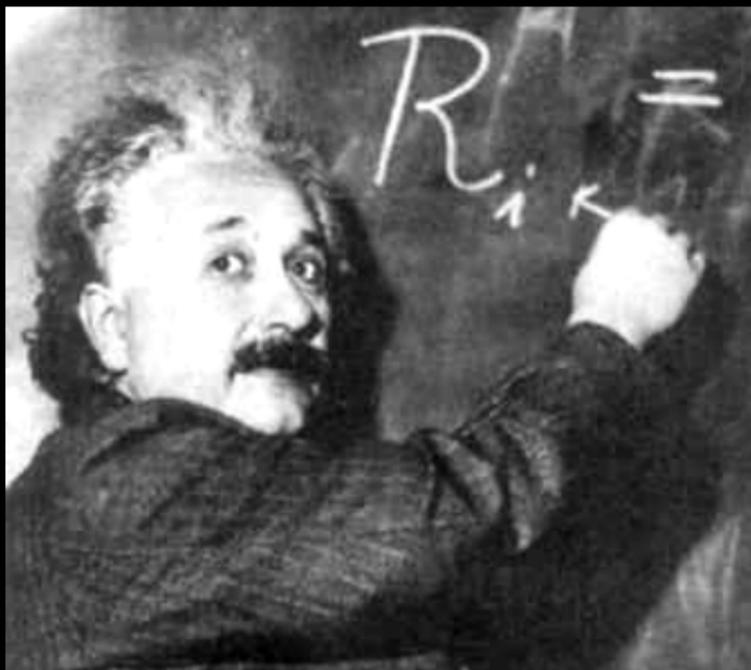
▶ Neue Methoden

Zusammenfassung

Resultat: ART

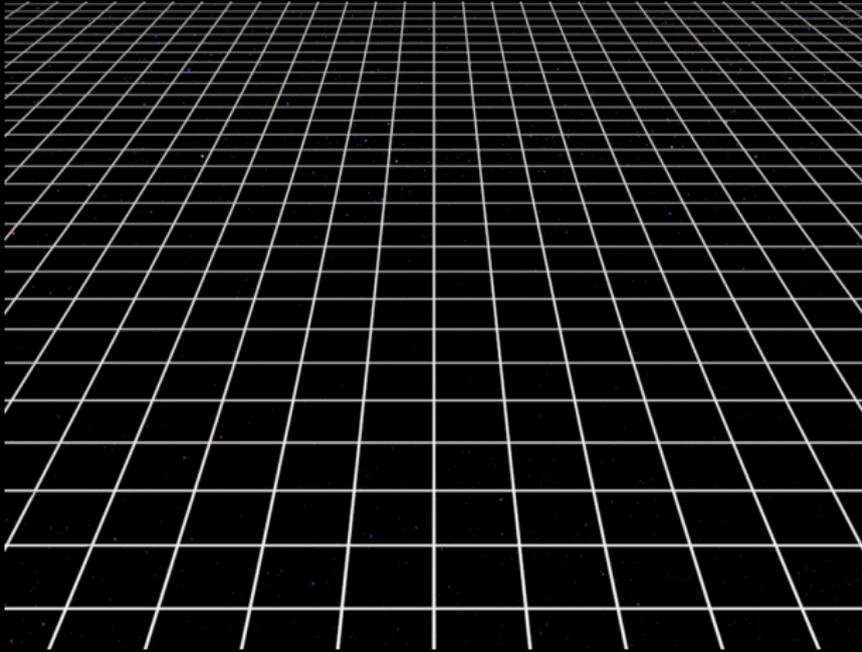


Resultat: ART



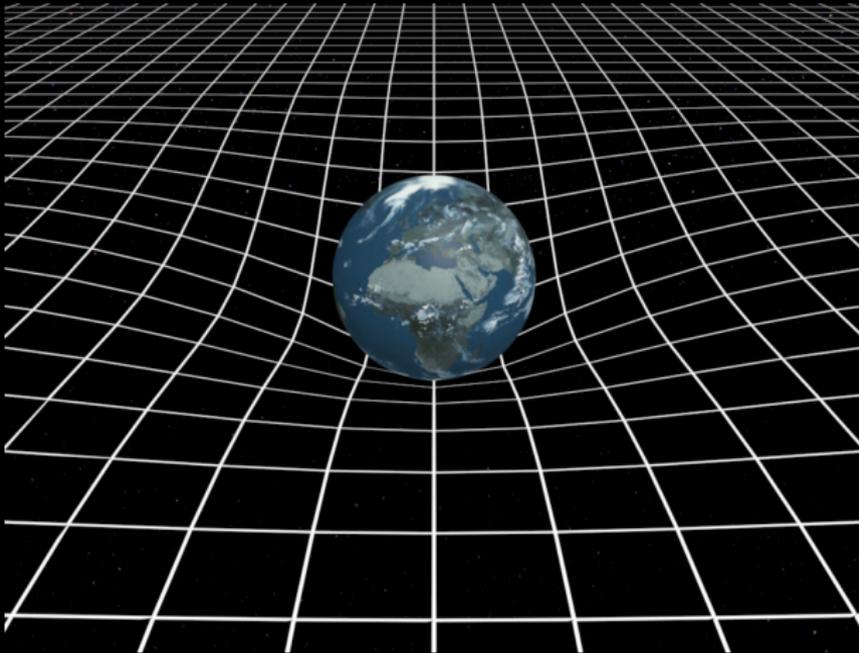
Albert Einstein 1879 – 1955

Flache Raum-Zeit



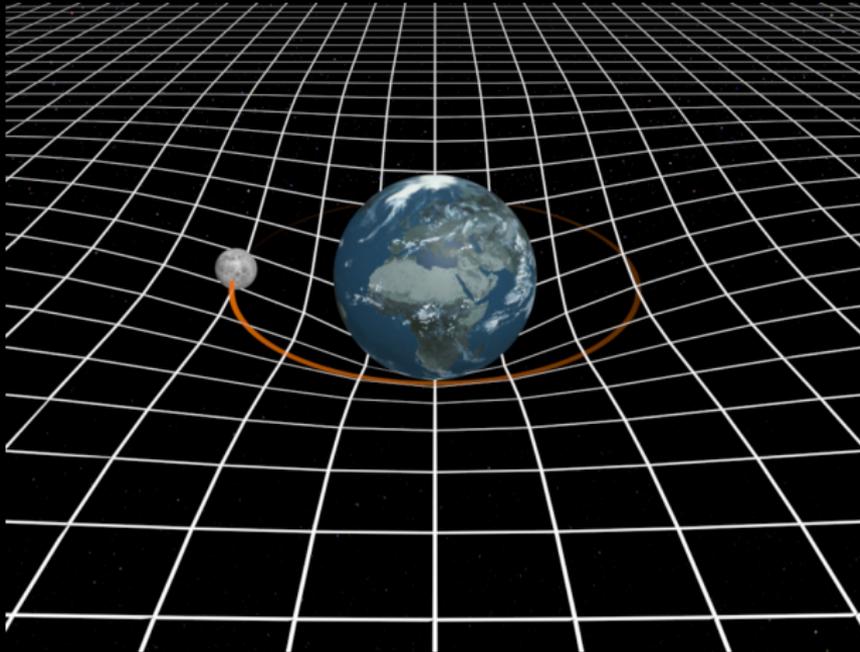
Keine Materie: flache Raum-Zeit

Gekrümmte Raum–Zeit



Die Materie bestimmt die Geometrie von Raum und Zeit: **Gravitation ist Geometrie**

Bewegung in der gekrümmten Raum-Zeit



Die Geometrie der Raum-Zeit bestimmt die Bewegung von Körpern

Outline

Bremen and ZARM

Einleitung

Einleitung

Die Eigenschaften der Gravitation

Die Grundlage der Gravitationsphysik: das Einsteinsche Äquivalenzprinzip

▶ Resultate

Konsequenzen der Speziellen Relativitätstheorie

Konsequenzen der Allgemeinen Relativitätstheorie

▶ Formale Konsequenzen

▶ Wie misst man Gravitation?

▶ Effekte der Allgemeinen Relativitätstheorie

Praktische Anwendungen der Allgemeinen Relativitätstheorie

▶ Anwendungen in der Metrologie

▶ Anwendung in der Positionierung

▶ Anwendung Geodäsie

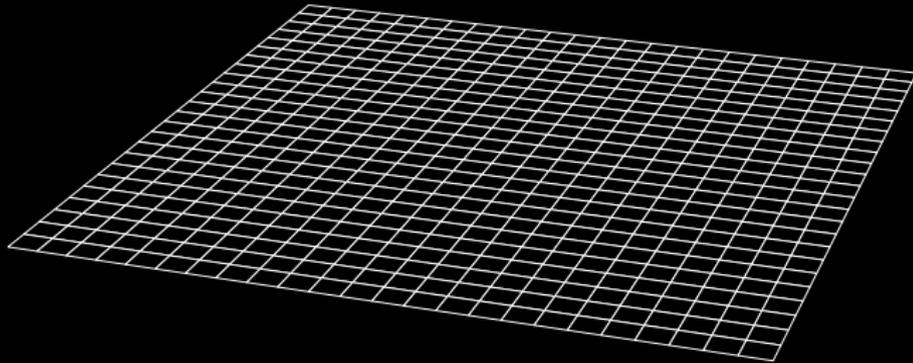
▶ Heutige Technologien

▶ Neue Methoden

Zusammenfassung

Universelle Gezeitenkraft als Krümmung

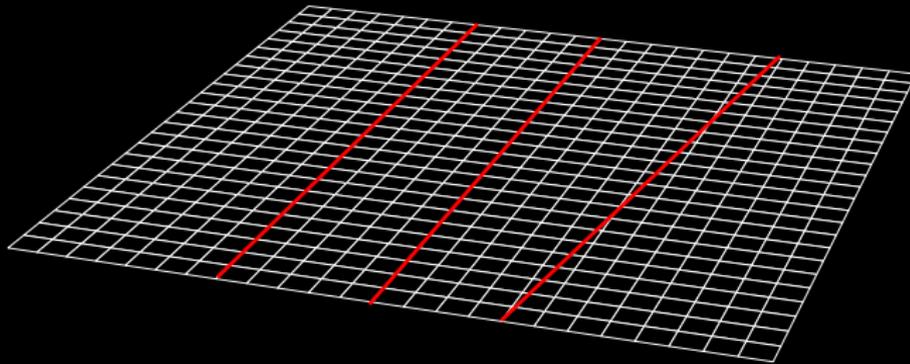
Geometrie der Ebene



- ▶ Kürzeste sind Geraden
- ▶ Abstand zwischen Geraden kann sich nur linear ändern

Universelle Gezeitenkraft als Krümmung

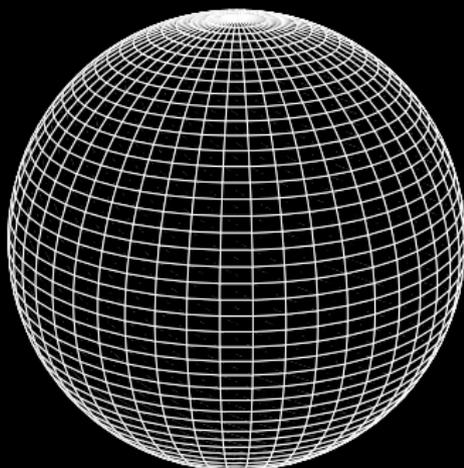
Geometrie der Ebene



- ▶ Kürzeste sind Geraden
- ▶ Abstand zwischen Geraden kann sich nur linear ändern

Universelle Gezeitenkraft als Krümmung

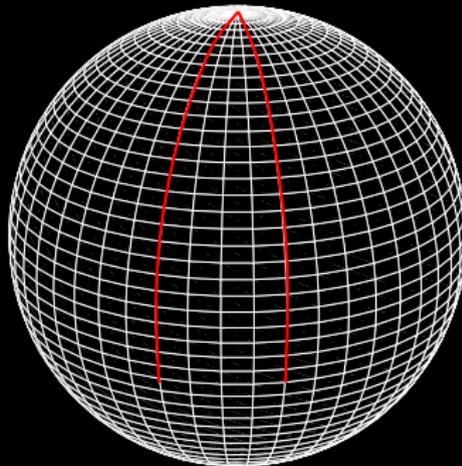
Geometrie der Kugel



- ▶ Kürzeste sind Großkreise
- ▶ Abstand zwischen Großkreisen ändert sich nichtlinear \Rightarrow Beschleunigung

Universelle Gezeitenkraft als Krümmung

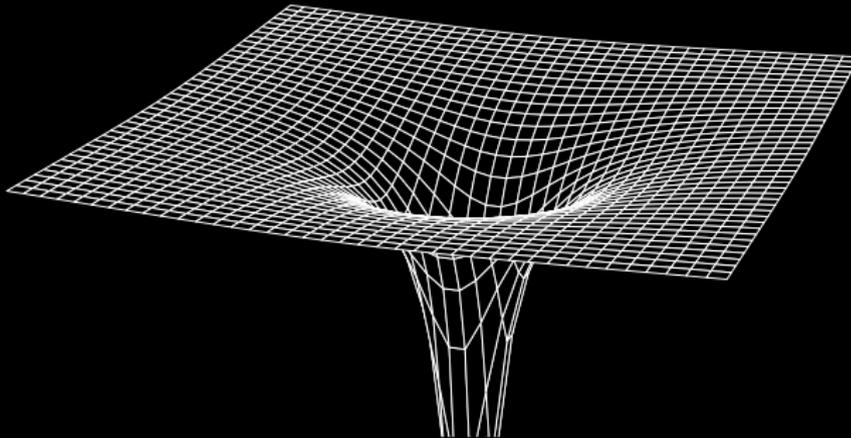
Geometrie der Kugel



- ▶ Kürzeste sind Großkreise
- ▶ Abstand zwischen Großkreisen ändert sich nichtlinear \Rightarrow Beschleunigung

Universelle Gezeitenkraft als Krümmung

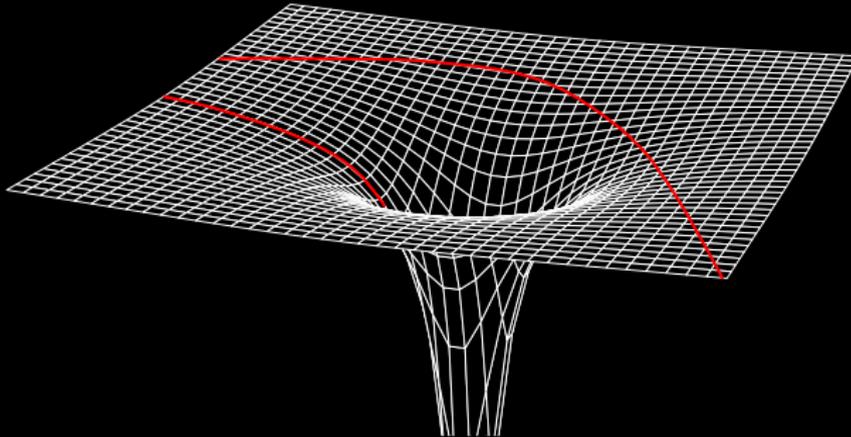
Geometrie des Schwarzen Loches



- ▶ Kürzeste
- ▶ Abstand zwischen Kürzesten ändert sich nichtlinear

Universelle Gezeitenkraft als Krümmung

Geometrie des Schwarzen Loches



- ▶ Kürzeste
- ▶ Abstand zwischen Kürzesten ändert sich nichtlinear

Gravitation = Gezeitenkraft = Krümmung

Geometrisch bedeutet Krümmung:

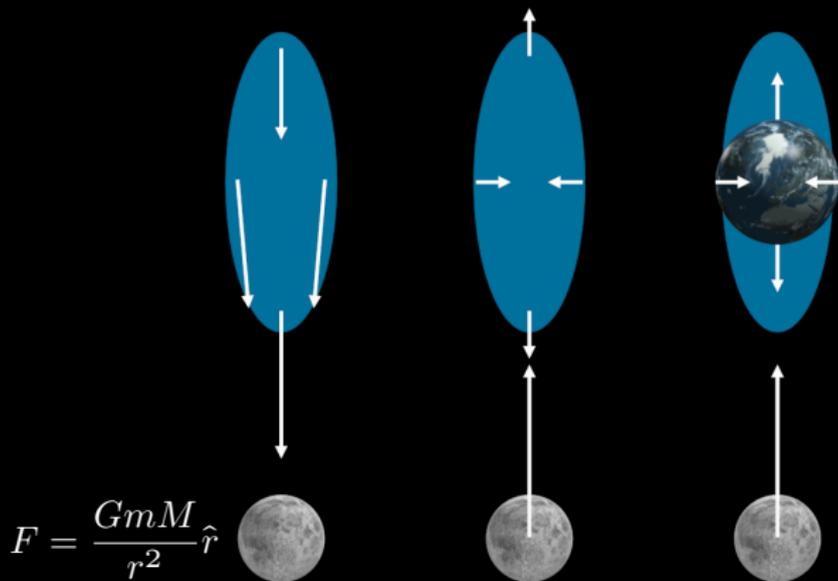
- ▶ Es gibt keine Parallelen
- ▶ Die Winkelsumme im Dreieck ist nicht mehr π bzw 180°
- ▶ Der Umfang eines Kreises mit dem Radius r ist nicht mehr $2\pi r$
- ▶ Zwei benachbarte Geodäten zeigen Relativbeschleunigung

Ist wichtig bei

- ▶ Geodäsie
- ▶ Gravitationswellen

Die Geometrie der Allgemeinen Relativitätstheorie zeigt sich im Auftreten und in der Größe bestimmter Effekte

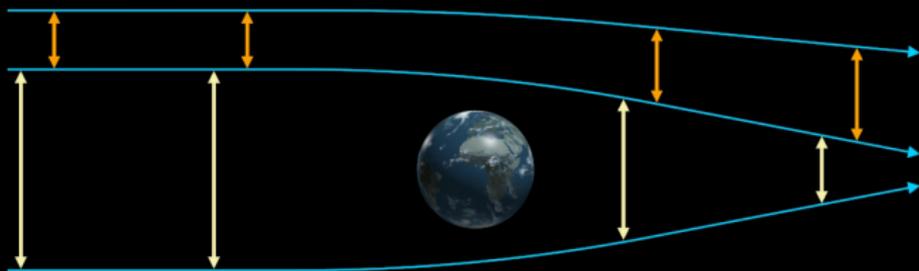
Messung: Gravitation ist Krümmung



Die vom Mond ausgehende Gravitation wirkt im System der Erde radial streckend und tangential stauchend \Rightarrow Ebbe und Flut = Gezeitenkräfte = Tiden

Die Krümmung

Frei fallende Körper im Gravitationsfeld



Gravitation =

- ▶ relative Kraft an zwei benachbarten Orten
- ▶ Gezeitenkraft

Da Gravitation auf alle Körper gleich wirkt: Alle Körper spüren dieselben Gezeitenkräfte bzw. Relativbeschleunigungen \Rightarrow Krümmung einer Geometrie

Outline

Bremen and ZARM

Einleitung

Einleitung

Die Eigenschaften der Gravitation

Die Grundlage der Gravitationsphysik: das Einsteinsche Äquivalenzprinzip

▶ Resultate

Konsequenzen der Speziellen Relativitätstheorie

Konsequenzen der Allgemeinen Relativitätstheorie

▶ Formale Konsequenzen

▶ Wie misst man Gravitation?

▶ Effekte der Allgemeinen Relativitätstheorie

Praktische Anwendungen der Allgemeinen Relativitätstheorie

▶ Anwendungen in der Metrologie

▶ Anwendung in der Positionierung

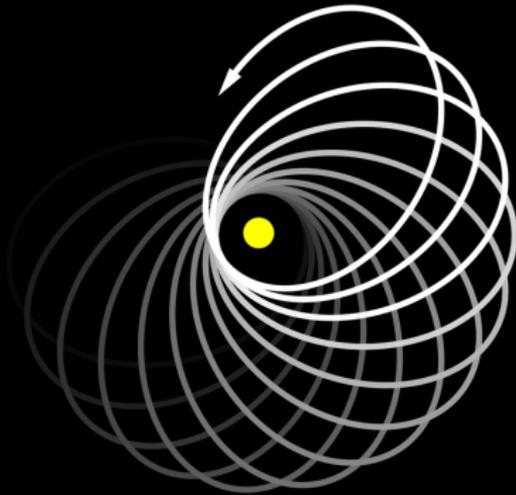
▶ Anwendung Geodäsie

▶ Heutige Technologien

▶ Neue Methoden

Zusammenfassung

Konsequenz: Periheldrehung



Beschreibung

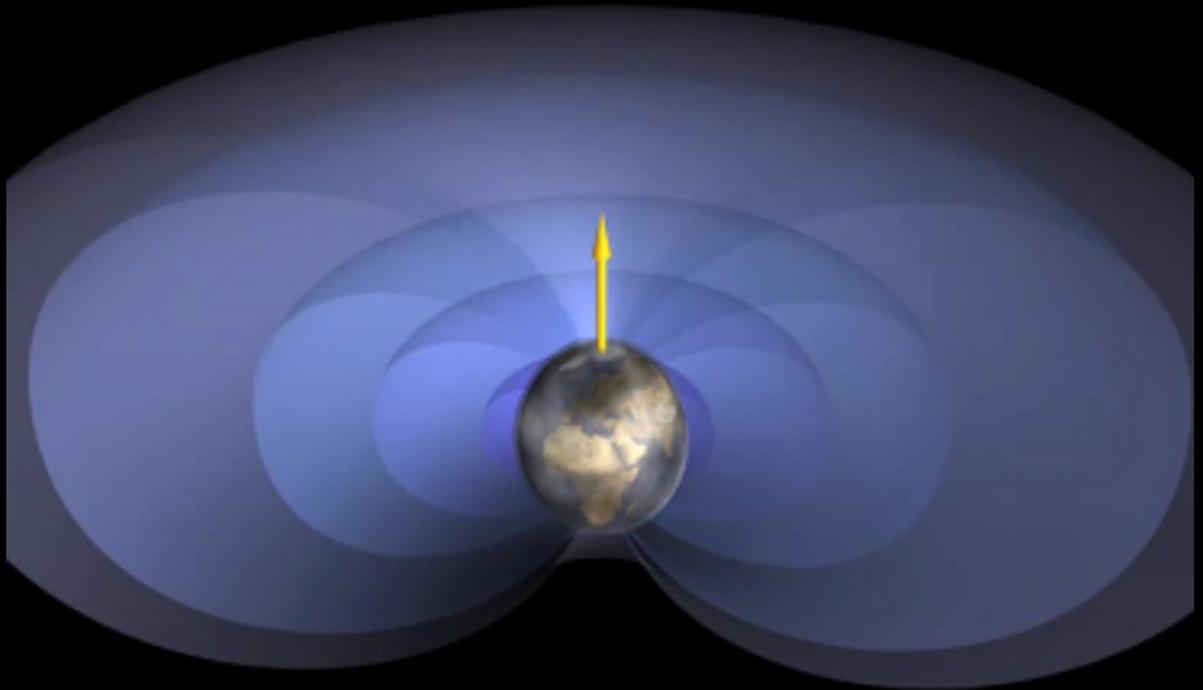
- ▶ Geodätengleichung in Schwarzschild-Geometrie
- ▶ Die Periheldrehung

$$\delta\varphi = \frac{2(\alpha + \gamma) - \beta}{3} \frac{6\pi GM}{c^2 a^2 (1 - e^2)}$$

- ▶ Competing effects: other planets
- ▶ Messung:

$$\left| \frac{2(\alpha + \gamma) - \beta}{3} - 1 \right| \leq 10^{-4}$$

Das gravitomagnetische Feld



Der Lense–Thirring–Effekt

LenseThirring.wmv

Präzession der Bahnebene (Spin–Bahn–Kopplung, gibt es nur bei Einstein)

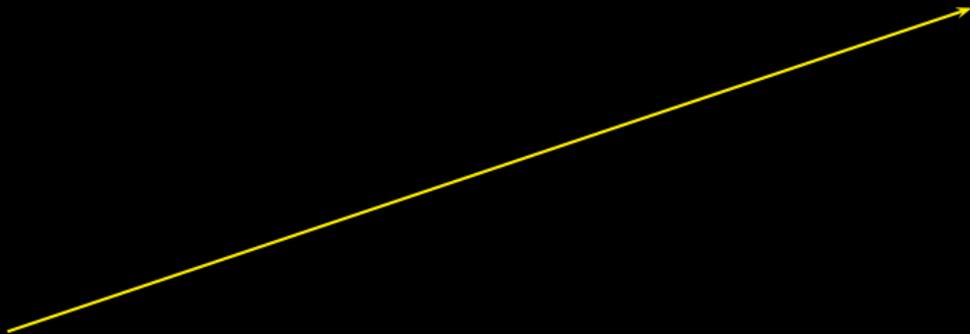
Der LAGEOS Satellit

Geodäsieemission
Satellite mit Laserreflektoren

- ▶ **LAGEOS** Bestätigung ca. 10%
- ▶ mit **LARES** in ca. 10 Jahren
Bestätigung mit ca. 1%



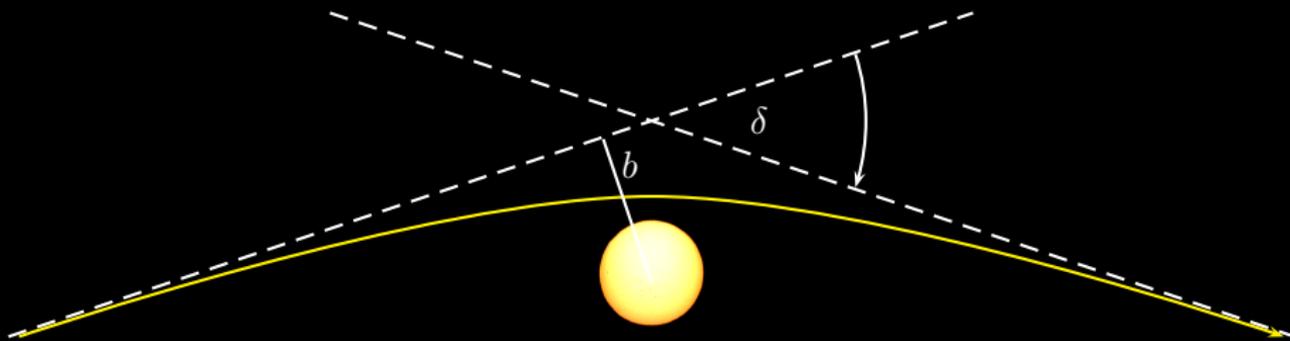
Lichtablenkung



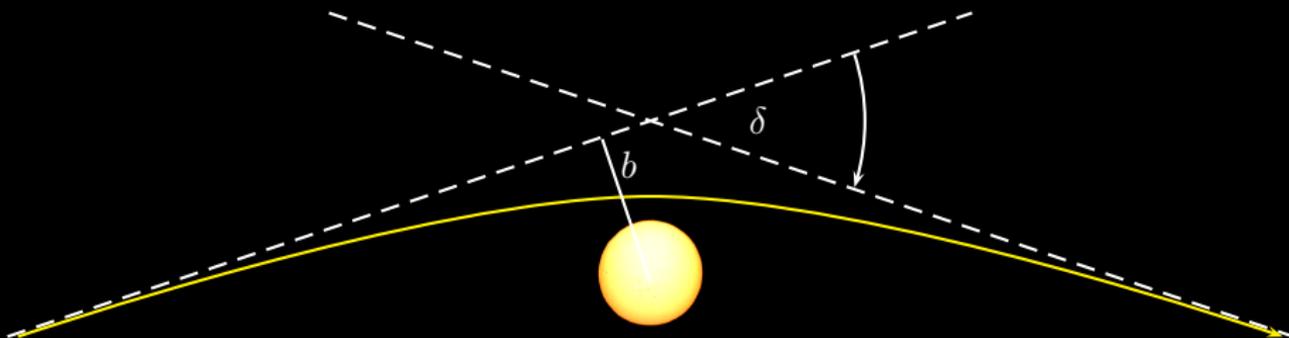
Lichtablenkung



Lichtablenkung



Lichtablenkung



Resultat

- ▶ VLBI (Eubanks et al 2001) $|\gamma - 1| \leq 10^{-4}$
- ▶ Messungen mit Gaia bis zu 3 Größenordnungen besser

Die Lichtablenkung ist Grundlage des Gravitationslinseneffektes

Universalität der gravitativen Rotverschiebung

RotverschiebungFallturm.wmv

Der Wert der gravitativen Rotverschiebung

Gravitative Rotverschiebung aus Energieerhaltung
Gesamtenergie eines Teilchens im Gravitationsfeld

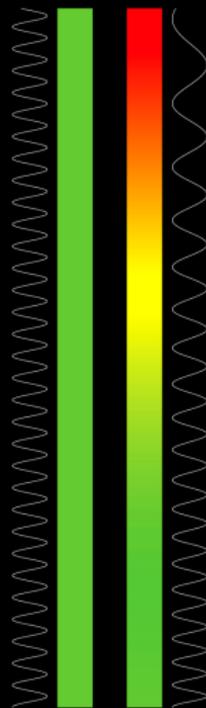
$$\begin{aligned} E &= mc^2 - \frac{1}{2}mv^2(x) + mU(x) \\ &= mc^2 \left(1 - \frac{1}{2} \frac{v^2(x)}{c^2} + \frac{U(x)}{c^2} \right) \end{aligned}$$

deBroglie

$$E \leftrightarrow h\nu \quad mc^2 \leftrightarrow h\nu_0$$

Frequenzverschiebung

$$\nu(x) = \left(1 - \frac{1}{2} \frac{v^2(x)}{c^2} + \frac{U(x)}{c^2} \right) \nu_0$$



Newton ART

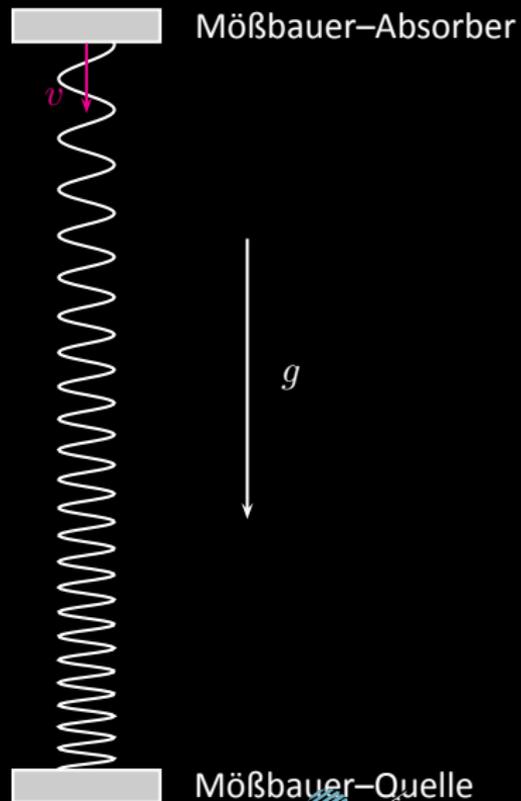
Pound–Rebka–Versuch

- ▶ Rotverschiebung über ca 50 m
- ▶ genaue Frequenzmessung mittels Mößbauer–Effekt an der Fe 144 keV–Linie

(Pound & Rebka, PRL 1960)

Mittels Doppler–Effekt wird Resonanzbedingung wieder erfüllt und somit Rotverschiebung gemessen

$$\delta\nu = \frac{v}{c}\nu_0 = \frac{\Delta U}{c^2}\nu_0$$



Atomuhren

- ▶ heutige Genauigkeit $\sim 10^{-18}$: kann Höhendifferenz von ca. 1 cm auflösen

Anwendungen

- ▶ Navigation, Positionierung
- ▶ relativistische Geodäsie
- ▶ Uhrennetzwerke

Tests parametrisiert durch

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = (1 + \alpha) \frac{\Delta U}{c^2}$$

Die Mission Gravity Probe A

- ▶ Genauer Messung der gravitativen Rotverschiebung

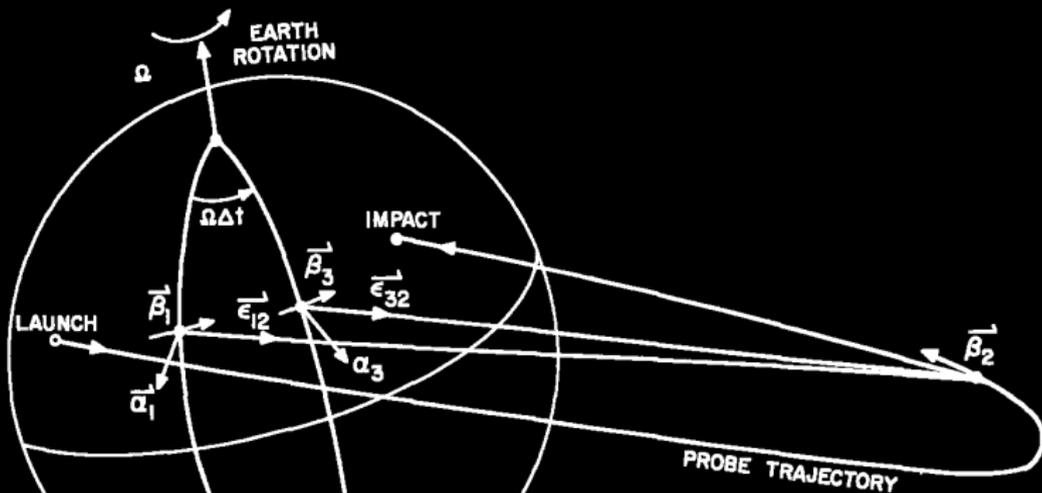
$$|\alpha| \leq 2 \cdot 10^{-4}$$

- ▶ Genauer Test des Doppler-Effekts



GP A H-Maser

Die Mission Gravity Probe A



$$\begin{aligned}
 |\vec{\beta}_1| &= |\vec{\beta}_3| \\
 \vec{\alpha}_1 &\doteq \vec{\alpha}_3 \\
 \vec{\epsilon}_{12} &= -\vec{\epsilon}_{21} \\
 \vec{\epsilon}_{23} &= -\vec{\epsilon}_{32}
 \end{aligned}$$

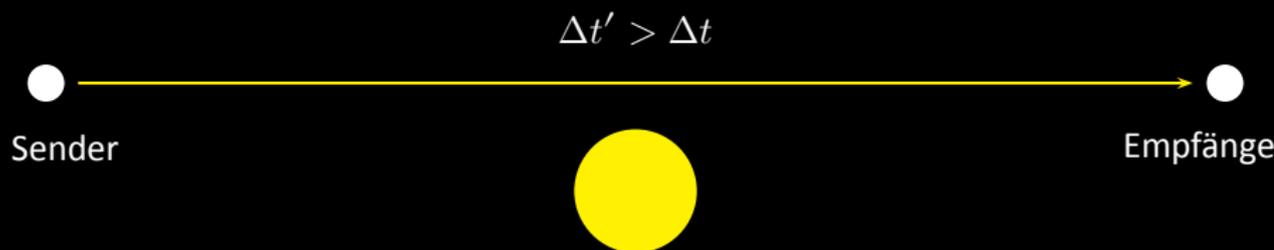
Gravitative Zeitverzögerung

Da Uhren im stärkeren Gravitationsfeld langsamer laufen, kann Licht auch nur langsamer propagieren, daher gibt es die gravitative Zeitverzögerung



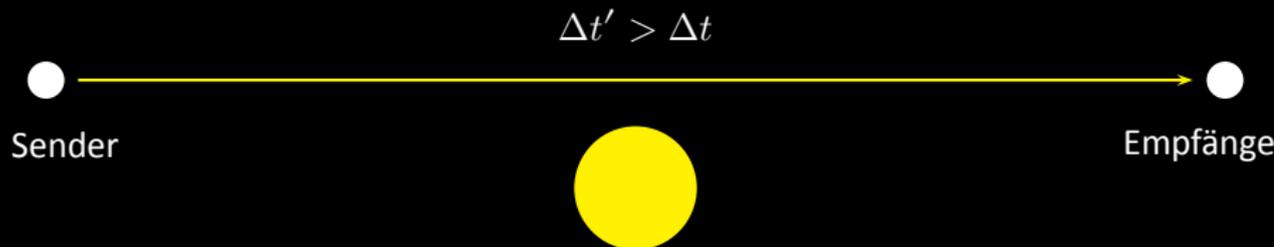
Gravitative Zeitverzögerung

Da Uhren im stärkeren Gravitationsfeld langsamer laufen, kann Licht auch nur langsamer propagieren, daher gibt es die gravitative Zeitverzögerung



Gravitative Zeitverzögerung

Da Uhren im stärkeren Gravitationsfeld langsamer laufen, kann Licht auch nur langsamer propagieren, daher gibt es die gravitative Zeitverzögerung



Direkte Messung

▶ Zeitverzögerung

$$\delta t = 2(\alpha + \gamma) \frac{GM_{\odot}}{c^3} \ln \frac{4x_{\text{Sat}}x_{\text{Erde}}}{b^2} \sim 10^{-4} \text{ s}$$

- ▶ Reflection of radar signals on surface of Venus (Shapiro 1968)
- ▶ Mars-Ranging, **Viking** Marsmission (Reasenberg 1979)
- ▶ Resultat: $|\gamma - 1| \leq 10^{-4}$

Gravitative Zeitverzögerung

Messung der Frequenzänderung

- ▶ Change in signal time \Rightarrow change in frequency
- ▶ Emission of first wave crest at t_{s1}
Reception of first wave crest at $t_{r1} = t_{s1} + \Delta t(t_{s1})$
- ▶ Emission of second wave crest at $t_{s2} = t_{s1} + \frac{1}{\nu_0}$
Reception of second wave crest at $t_{r2} = t_{s1} + \Delta t(t_{s2})$
- ▶ Measured frequency

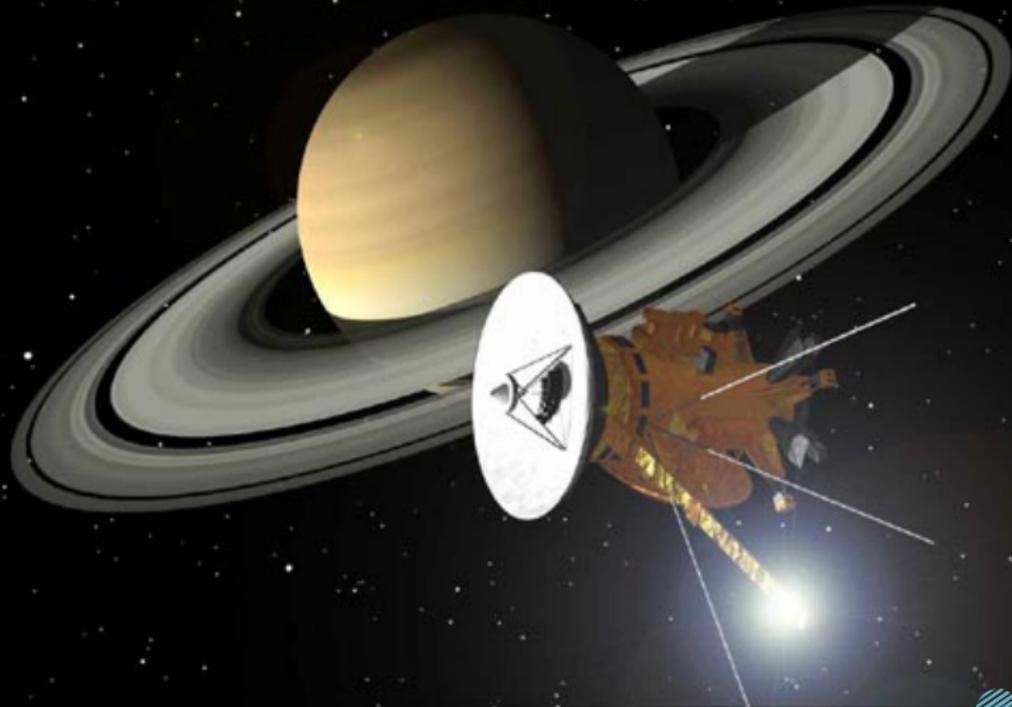
$$\nu = \frac{1}{t_{r2} - t_{r1}}$$

- ▶ Frequency shift

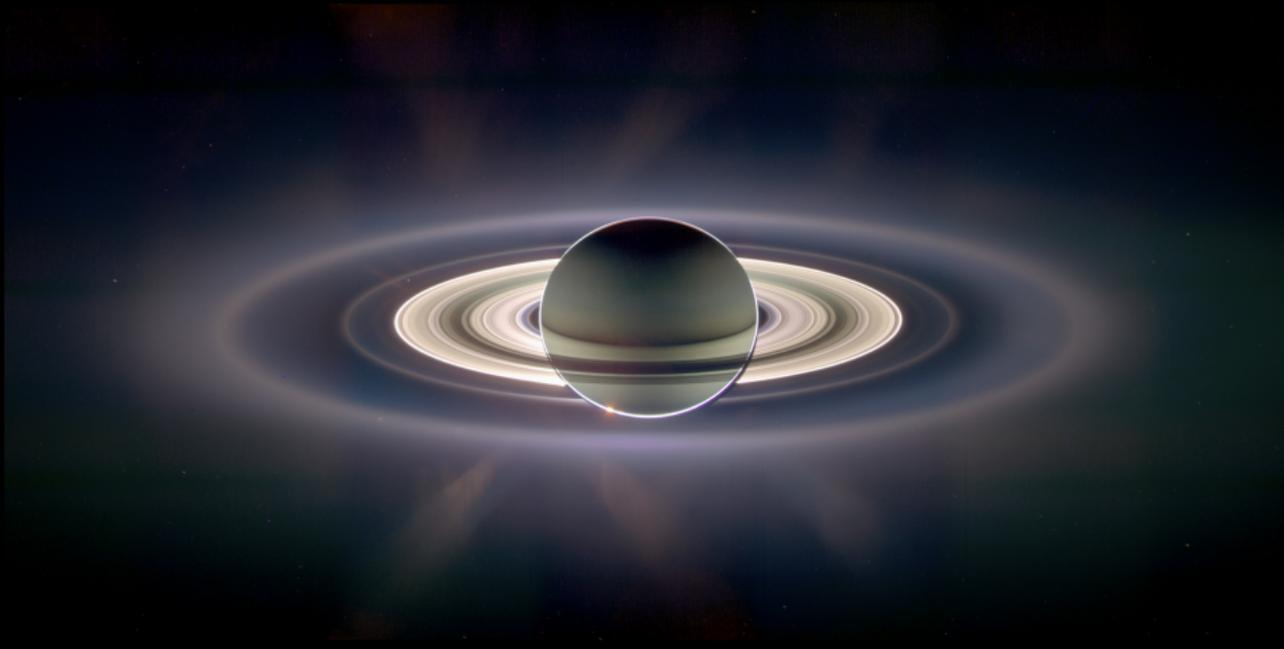
$$y(t) = \frac{\nu - \nu_0}{\nu_0} = 2(\alpha + \gamma) \frac{GM_{\odot}}{c^3} \frac{1}{b(t)} \frac{db(t)}{dt}$$

Use of three microwave bands in order to eliminate dispersion in Solar environment

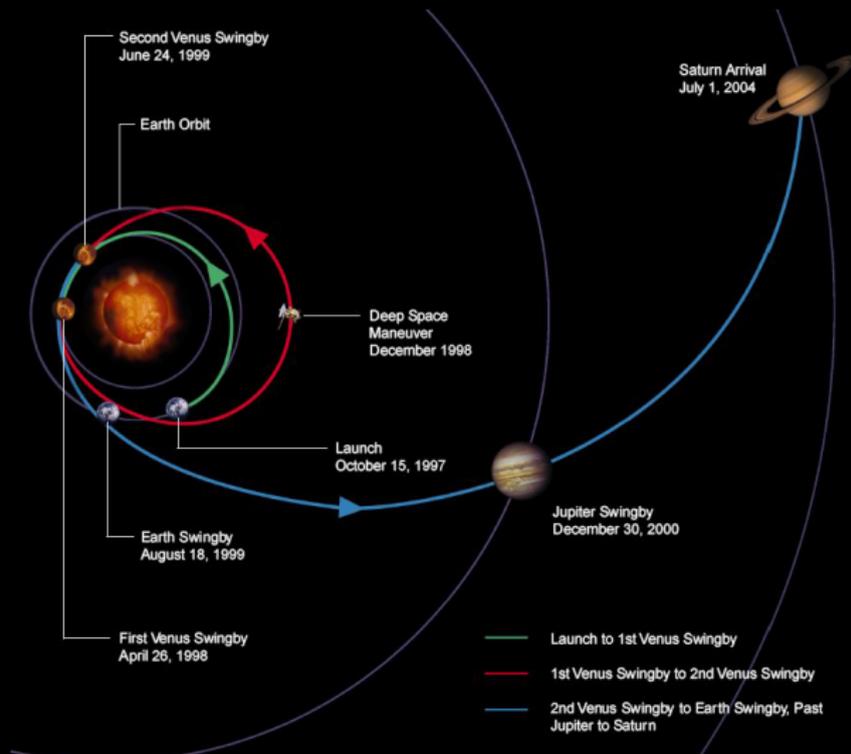
Die Cassini-Mission



Der Saturn

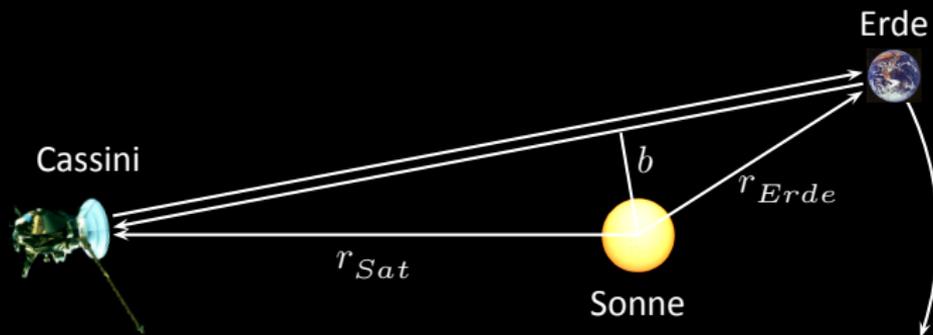


Die Cassini–Mission

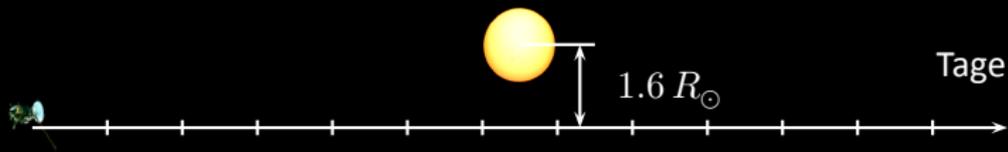


Die Cassini–Mission

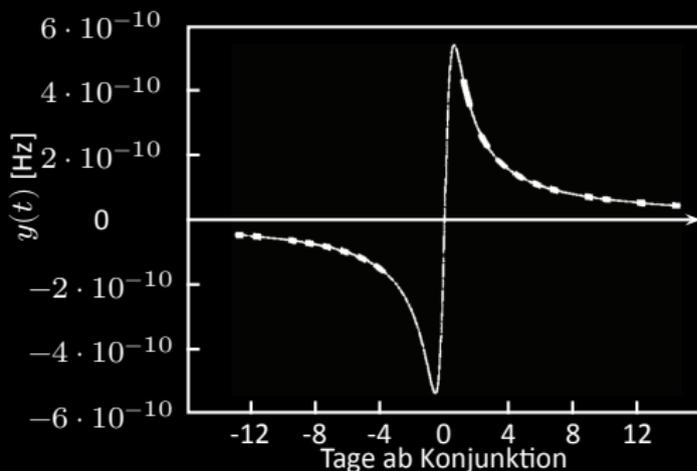
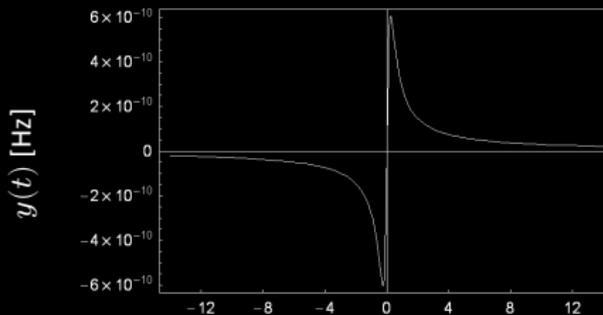
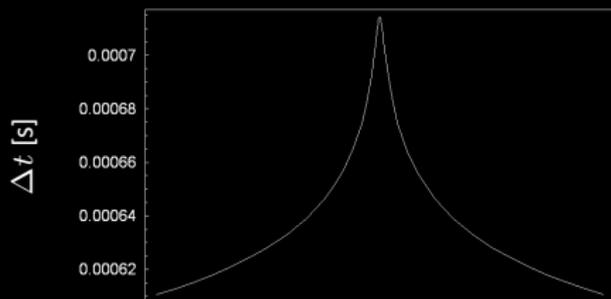
Missionsszenario



Sicht von Erde aus



Gravitative Zeitverzögerung: Cassini



Resultat:

$$|\gamma - 1| \leq 2 \cdot 10^{-5}$$

Der gravitomagnetische Uhreneffekt

- ▶ rotierende gravitierende Masse \Rightarrow gravitomagnetisches Feld

$$ds^2 = \dots + \frac{2Mr}{r^2 + a^2 \cos^2 \vartheta} a \sin^2 \vartheta d\varphi dt + \dots$$

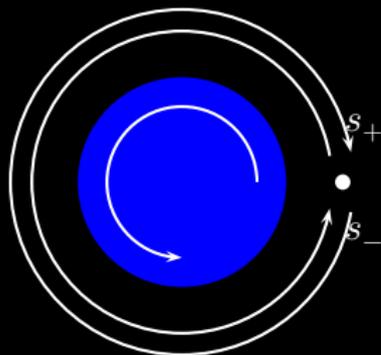
- ▶ aus Bewegungsgleichung für Kreisbahnen in Äquatorebene

$$\frac{d\varphi}{dt} = \pm\Omega_0 + \Omega_{\text{Lense-Thirring}}$$

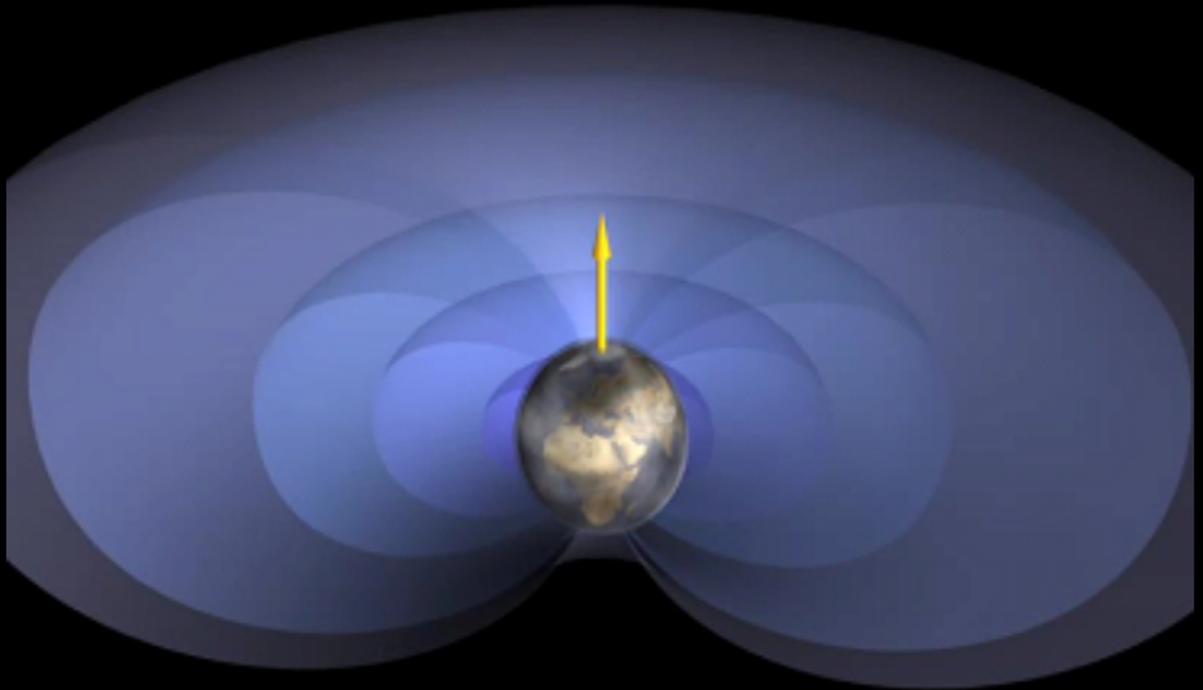
- ▶ Eigenzeitdifferenz zweier gegenläufiger Uhren

$$s_+ - s_- = 4\pi \frac{J}{M} \sim 10^{-7} \text{ s}$$

hängt nicht von G und r ab
wird kleiner für wachsende Inklination,
verschwindet für polaren Orbit



Das gravitomagnetische Feld



Der Schiff-Effekt

gravity probe b.wmv

Die Mission GP-B



Die Mission GP-B



Die Mission GP-B



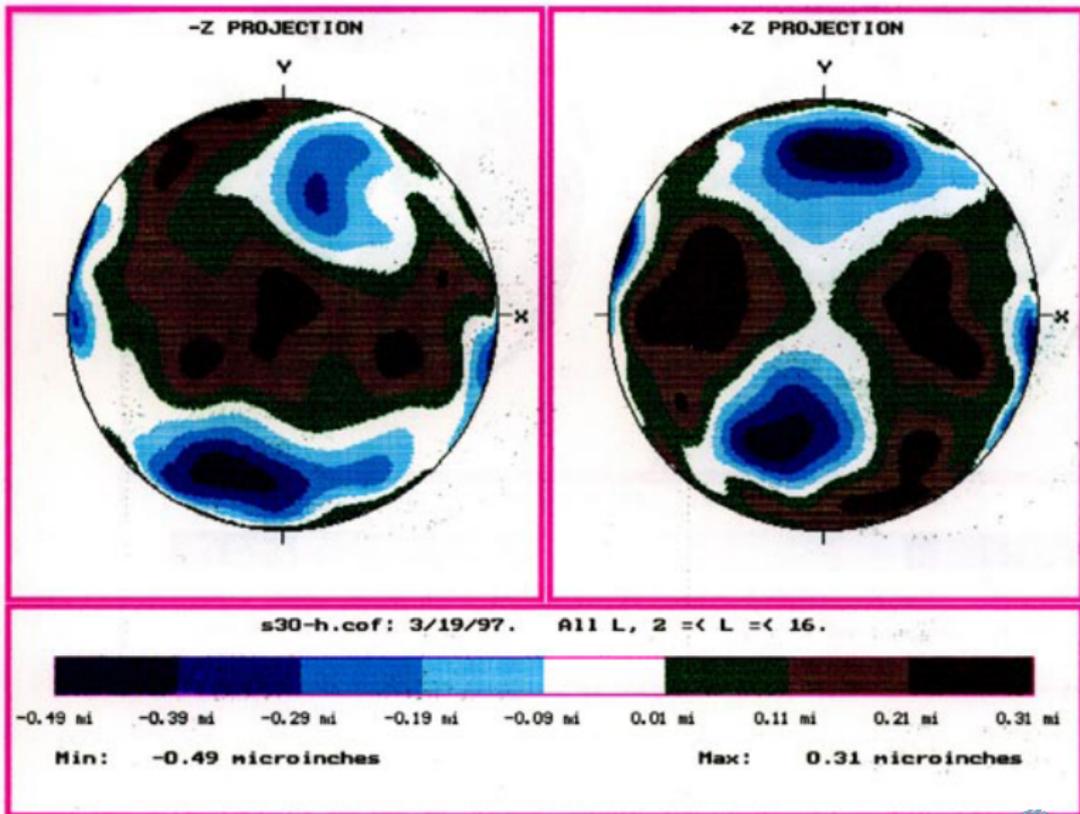
Die Mission GP-B



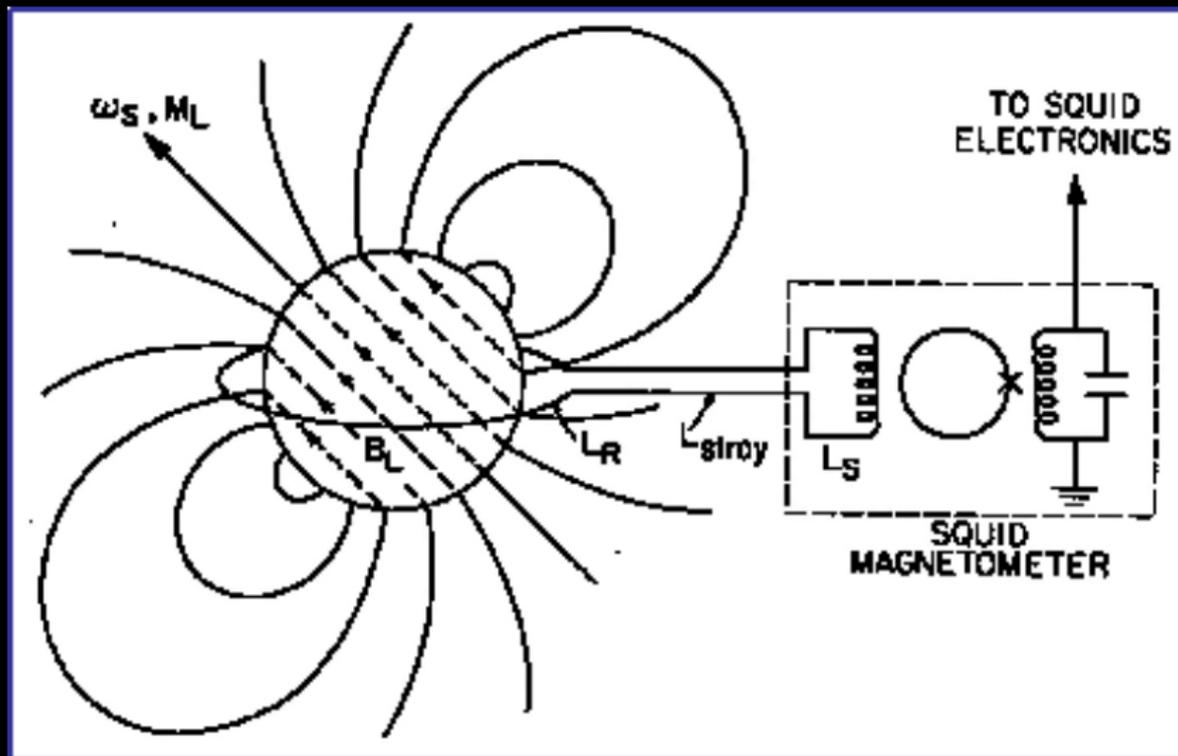
GP-B Nutzlast



GP-B Nutzlast



GP-B Nutzlast



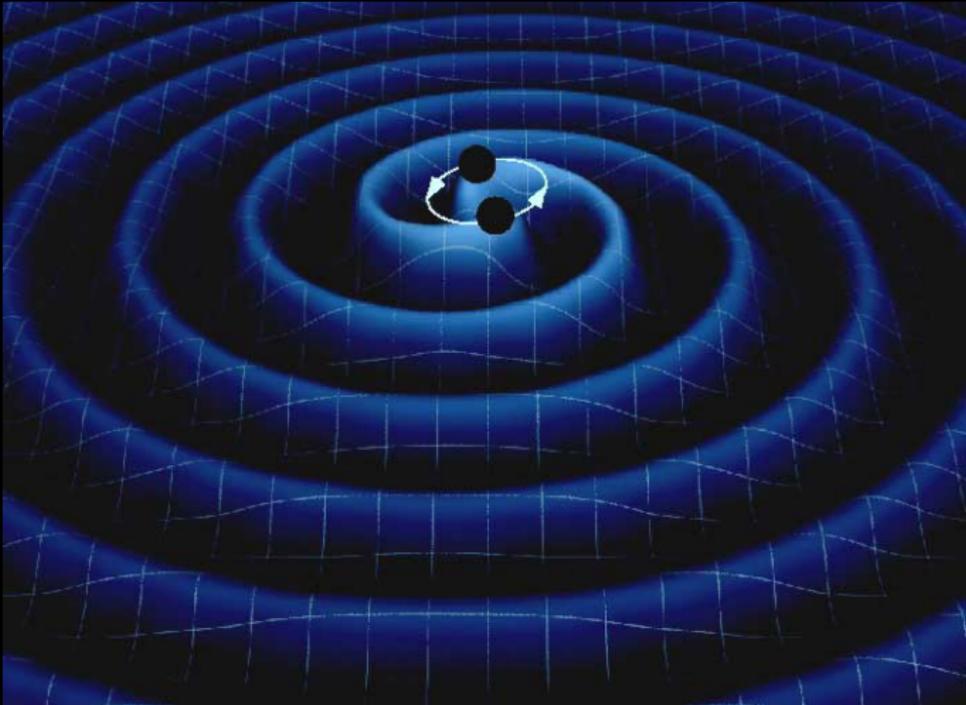
GP-B Nutzlast



Was sind Gravitationswellen?

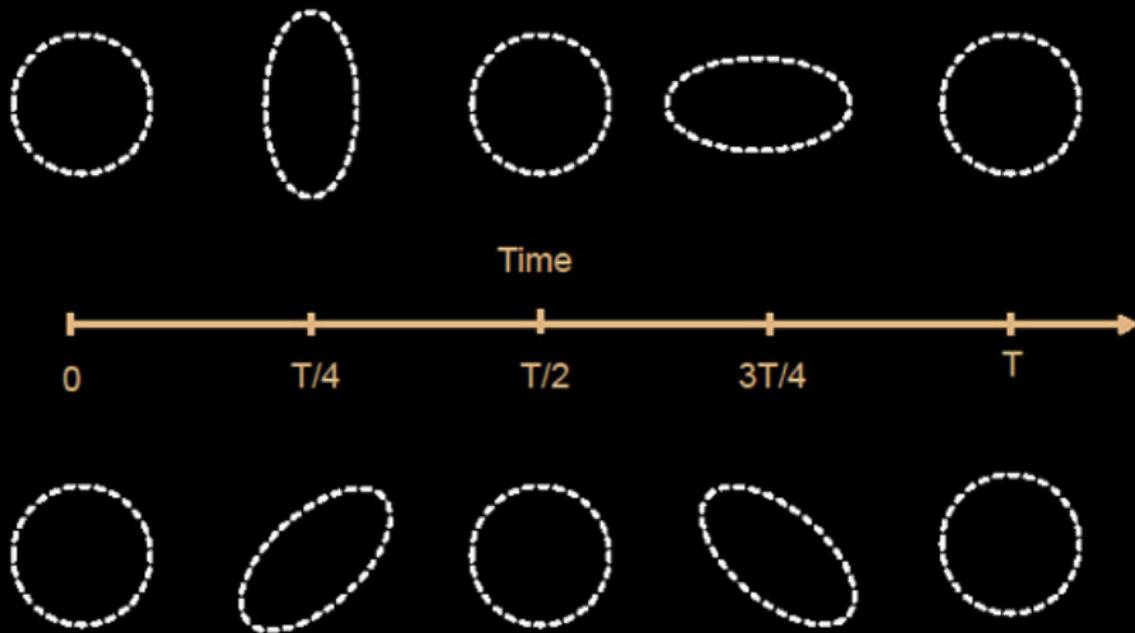
Gravitationswellen sind eine periodische Verzerrung von Raum und Zeit

Wie entstehen Gravitationswellen?



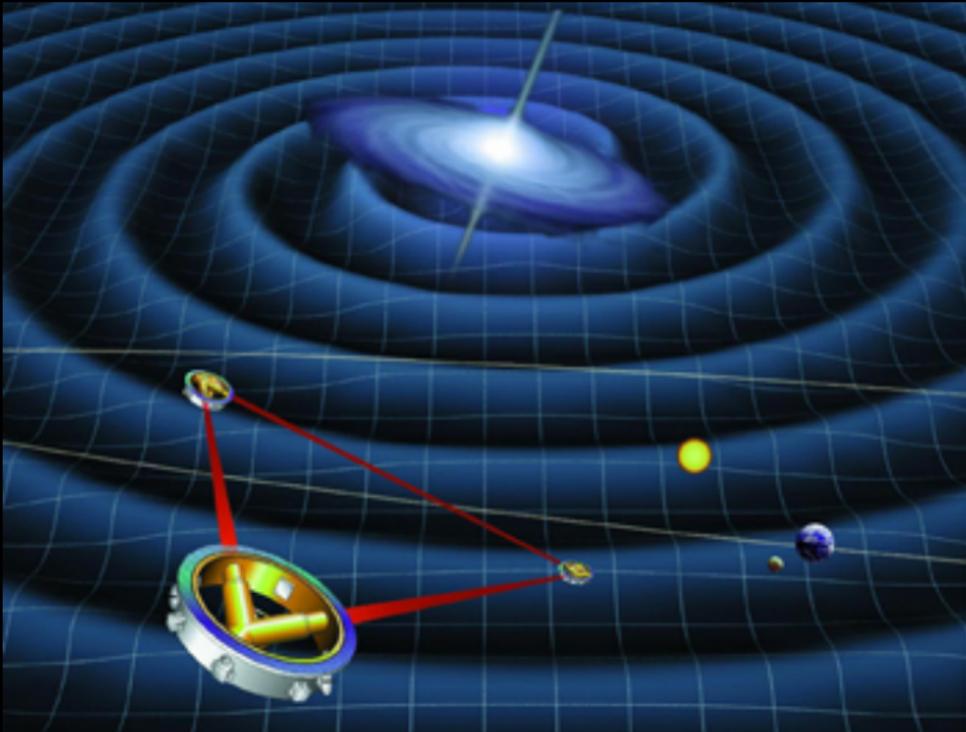
Binärsysteme erzeugen Gravitationswellen

Wie detektiert man Gravitationswellen?



Gravitationswellen verzerren periodisch die Abstände zwischen freien Teilchen

Gravitationswellendetektion im Weltraum: Mission LISA



Allgemeine Relativitätstheorie

... nicht nur notwendig für Verständnis Schwarzer Löcher etc. oder zur Erklärung der Sonnensystemeffekte, sondern auch für das praktische Leben

.....

- ▶ Metrologie
- ▶ Zeitsysteme
- ▶ Positioning, GPS, Galileo
- ▶ Geodäsie, Erdbeobachtung

Outline

Bremen and ZARM

Einleitung

Einleitung

Die Eigenschaften der Gravitation

Die Grundlage der Gravitationsphysik: das Einsteinsche Äquivalenzprinzip

▶ Resultate

Konsequenzen der Speziellen Relativitätstheorie

Konsequenzen der Allgemeinen Relativitätstheorie

▶ Formale Konsequenzen

▶ Wie misst man Gravitation?

▶ Effekte der Allgemeinen Relativitätstheorie

Praktische Anwendungen der Allgemeinen Relativitätstheorie

▶ Anwendungen in der Metrologie

▶ Anwendung in der Positionierung

▶ Anwendung Geodäsie

▶ Heutige Technologien

▶ Neue Methoden

Zusammenfassung

Outline

Bremen and ZARM

Einleitung

Einleitung

Die Eigenschaften der Gravitation

Die Grundlage der Gravitationsphysik: das Einsteinsche Äquivalenzprinzip

▶ Resultate

Konsequenzen der Speziellen Relativitätstheorie

Konsequenzen der Allgemeinen Relativitätstheorie

▶ Formale Konsequenzen

▶ Wie misst man Gravitation?

▶ Effekte der Allgemeinen Relativitätstheorie

Praktische Anwendungen der Allgemeinen Relativitätstheorie

▶ Anwendungen in der Metrologie

▶ Anwendung in der Positionierung

▶ Anwendung Geodäsie

▶ Heutige Technologien

▶ Neue Methoden

Zusammenfassung

Definition der Sekunde

Alte Definition der Sekunde

Eine Sekunde (s) ist der 31.556.925,9747te Teil des tropischen Jahres am 31. Dez. 1899 um 12 Uhr UT.

Heutige Definition der Sekunde

Eine Sekunde (s) ist das 9.192.631.770-fache der Periodendauer der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustandes von ^{133}Cs Atomen entsprechenden Strahlung.



Cs-Atomuhr in der PTB

Genauigkeit $\sim 10^{-16}$

Voraussetzung: Gültigkeit der SRT and ART

Weiterentwicklung: optische Uhren mit Genauigkeit von $\sim 10^{-18}$

Anwendung: Internationale Atomzeit TAI

TAI = Temps International Atomique = weltweites System von hochpräzisen Uhren, die gemeinsam eine Weltzeit definieren

Für die **Konsistenz** aller Zeitmessungen muss beim Vergleich berücksichtigt werden

- ▶ relativistische Zeitdilatation wegen Relativbewegung (z.B. Braunschweig – München, ...)

$$t' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} t \quad \rightarrow \quad \frac{\nu_{\text{Pol}} - \nu_{\text{Äquator}}}{\nu_{\text{Pol}}} \sim 1.5 \cdot 10^{-12}$$

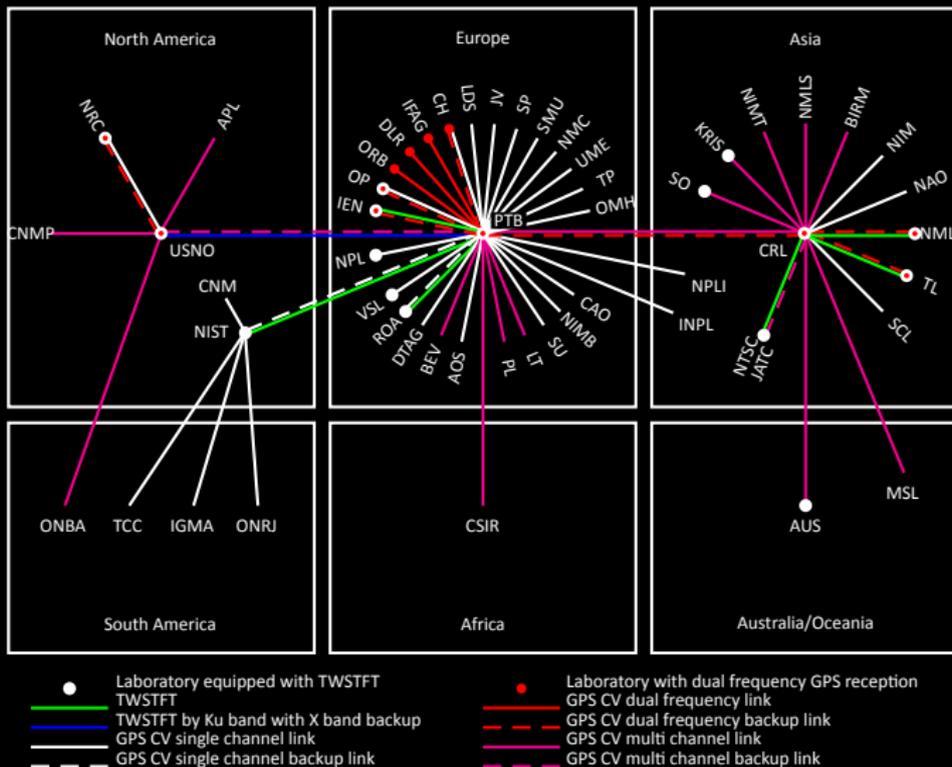
- ▶ gravitative Rotverschiebung wegen unterschiedlicher Höhe (z.B. Braunschweig 100 m – München 800 m)

$$\nu' = \left(1 + \frac{gh}{c^2}\right) \nu \quad \rightarrow \quad \frac{\Delta\nu}{\nu} \sim 7 \cdot 10^{-14}$$

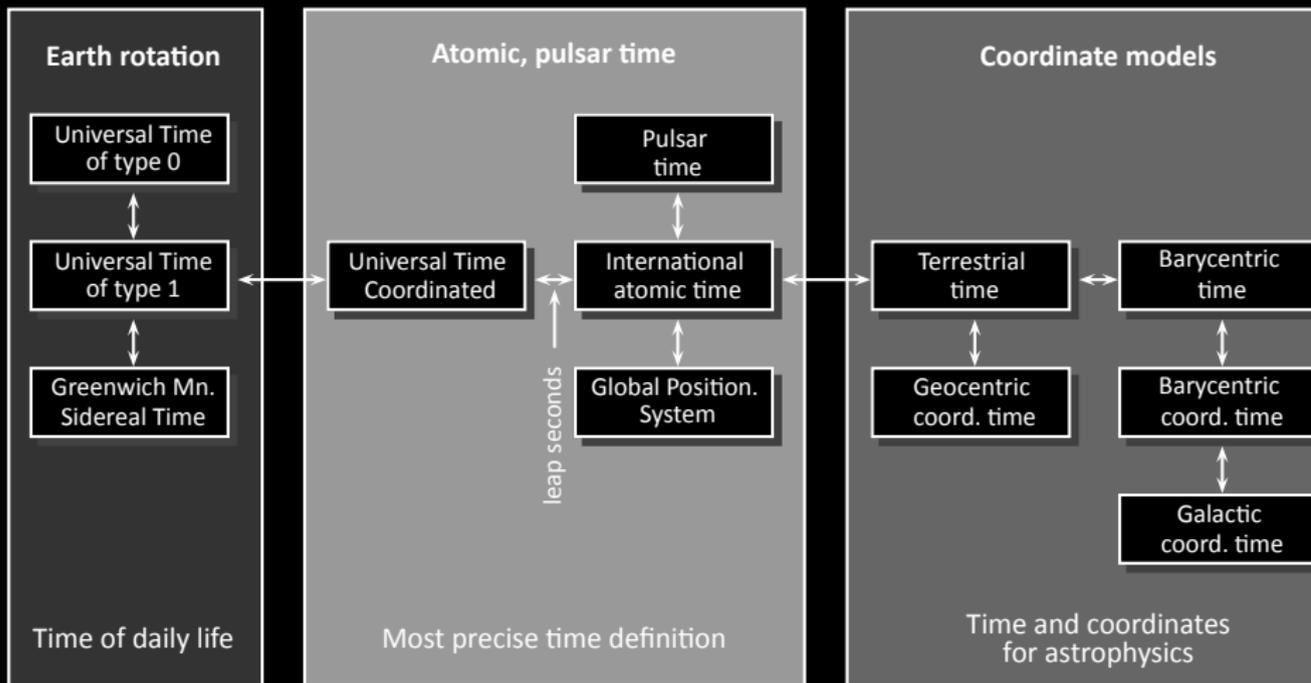
- ▶ Sagnac-Effekt wegen Rotation der Erde

$$\Delta t = 2 \frac{\omega A}{c^2}$$

Anwendung: Internationale Atomzeit TAI



Anwendung: Zeitskalen



Time scales and relations between them. For all relations between the various time scales but the astrophysical ones, one needs SR and GR. In order to account for the variability of the Earth rotation with respect to the atomic time, sometimes additional leap seconds have to be inserted.

Definition des Meters 1799

Alte Definition des Meters

Ein Meter (m) ist der 10-millionste Teil der Entfernung vom Nordpol über Paris zum Äquator.

Dies wurde in einen Prototypen gegossen.

Ältere Definition Meter 1960

Ein Meter (m) ist das 1.650.763,73-fache der Wellenlänge der von Atomen des Nuklids ^{86}Kr beim Übergang vom Zustand $5d_5$ zum Zustand $2p_{10}$ ausgesandten, sich im Vakuum ausbreitenden Strahlung.

Neue Definition Meter 1983

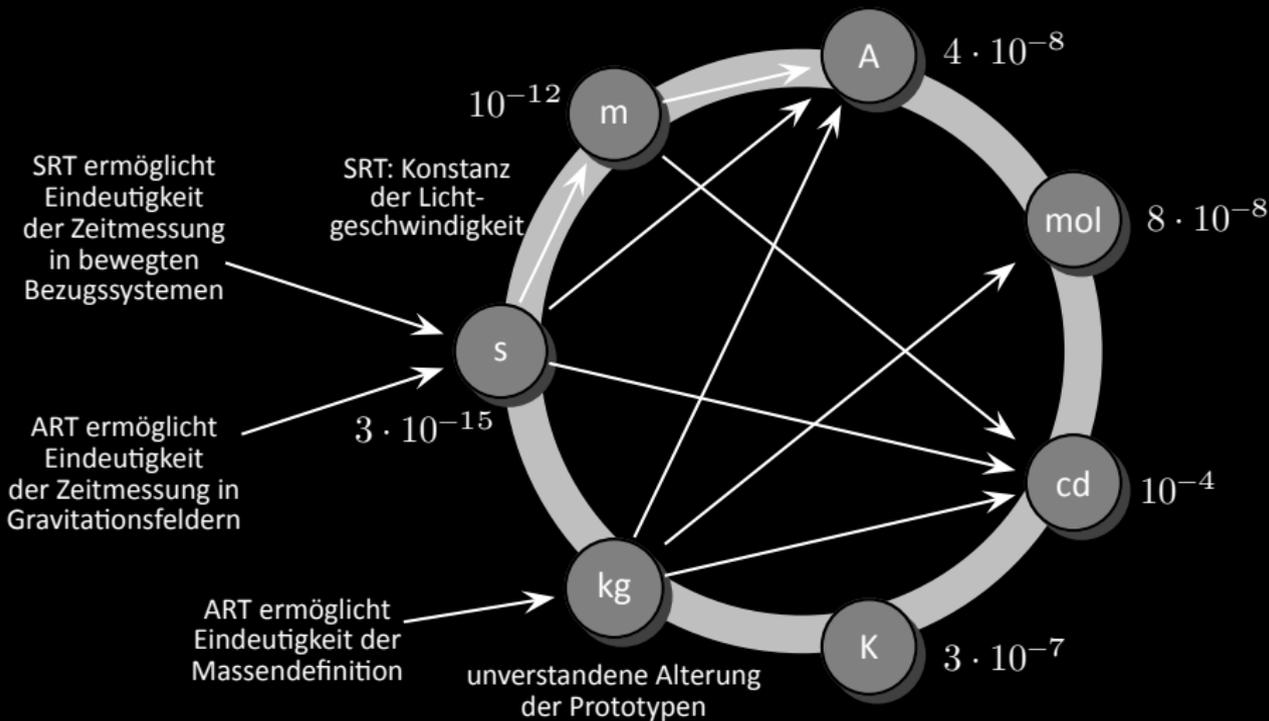
Ein Meter (m) ist diejenige Strecke, die Licht im Vakuum innerhalb des Zeitintervalls von $1/299.792.458$ Sekunden durchläuft.

Voraussetzung: Konstanz von c , d.h. **Gültigkeit der SRT**



Das Urmeter

Anwendung: Die Einheiten



SRT & ART = Physik von Raum und Zeit \equiv fundamentale Metrologie

Outline

Bremen and ZARM

Einleitung

Einleitung

Die Eigenschaften der Gravitation

Die Grundlage der Gravitationsphysik: das Einsteinsche Äquivalenzprinzip

▶ Resultate

Konsequenzen der Speziellen Relativitätstheorie

Konsequenzen der Allgemeinen Relativitätstheorie

▶ Formale Konsequenzen

▶ Wie misst man Gravitation?

▶ Effekte der Allgemeinen Relativitätstheorie

Praktische Anwendungen der Allgemeinen Relativitätstheorie

▶ Anwendungen in der Metrologie

▶ Anwendung in der Positionierung

▶ Anwendung Geodäsie

▶ Heutige Technologien

▶ Neue Methoden

Zusammenfassung

Anwendung: Positionierung

$$\Delta x = c \Delta t$$

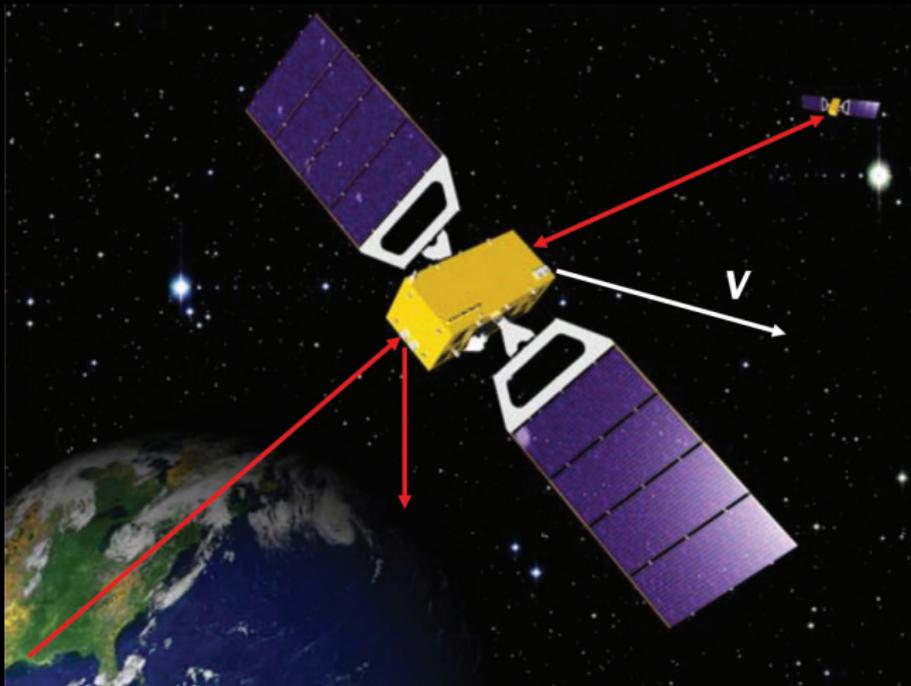
Fehler pro Tag:

SRT:

$$\Delta x \sim 2.2 \text{ km,}$$

ART:

$$\Delta x \sim 10 \text{ km}$$



Outline

Bremen and ZARM

Einleitung

Einleitung

Die Eigenschaften der Gravitation

Die Grundlage der Gravitationsphysik: das Einsteinsche Äquivalenzprinzip

▶ Resultate

Konsequenzen der Speziellen Relativitätstheorie

Konsequenzen der Allgemeinen Relativitätstheorie

▶ Formale Konsequenzen

▶ Wie misst man Gravitation?

▶ Effekte der Allgemeinen Relativitätstheorie

Praktische Anwendungen der Allgemeinen Relativitätstheorie

▶ Anwendungen in der Metrologie

▶ Anwendung in der Positionierung

▶ **Anwendung Geodäsie**

▶ Heutige Technologien

▶ Neue Methoden

Zusammenfassung

Geodäsie: Die Gestalt der Erde

Infos aus Bessels Leben

- ▶ arbeitete als Buchhalter in Bremen
- ▶ Interesse für Navigation and Astronomie
- ▶ traf Olbers, der ihn stark unterstützte
- ▶ kooperierte mit dem Lilienthaler Observatorium (Schröter)
- ▶ traf sich mit Gauß

Bessels wissenschaftliche Arbeiten

- ▶ Berechnung von Bahnen und deren Störungen
- ▶ Geodesie
 - ▶ Erstmalige Bestimmung der Abplattung der Erde
 - ▶ Definition des Besselschen Ellipsoiden
- ▶ Test des Äquivalenzprinzips



Friedrich Wilhelm Bessel
1784 — 1846

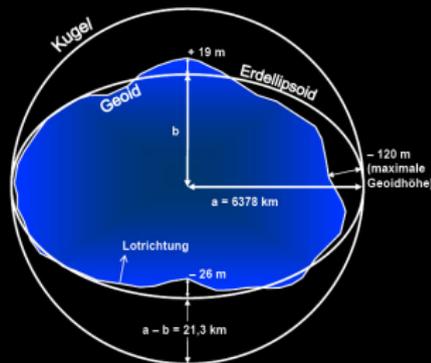
Geodäsie: Die Gestalt der Erde

Infos aus Bessels Leben

- ▶ arbeitete als Buchhalter in Bremen
- ▶ Interesse für Navigation and Astronomie
- ▶ traf Olbers, der ihn stark unterstützte
- ▶ kooperierte mit dem Lilienthaler Observatorium (Schröter)
- ▶ traf sich mit Gauß

Bessels wissenschaftliche Arbeiten

- ▶ Berechnung von Bahnen und deren Störungen
- ▶ Geodesie
 - ▶ Erstmalige Bestimmung der Abplattung der Erde
 - ▶ Definition des Besselschen Ellipsoiden
- ▶ Test des Äquivalenzprinzips



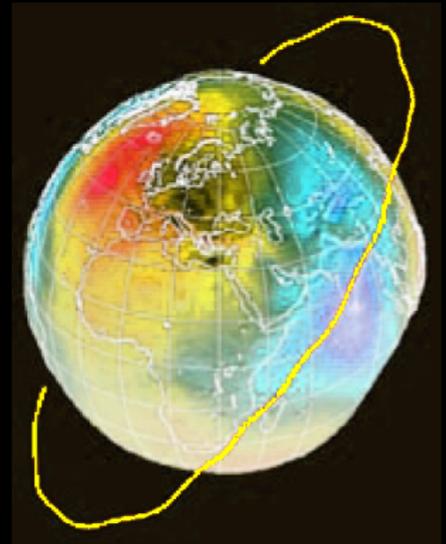
Geodäsie: Die Gestalt der Erde

Infos aus Bessels Leben

- ▶ arbeitete als Buchhalter in Bremen
- ▶ Interesse für Navigation and Astronomie
- ▶ traf Olbers, der ihn stark unterstützte
- ▶ kooperierte mit dem Lilienthaler Observatorium (Schröter)
- ▶ traf sich mit Gauß

Bessels wissenschaftliche Arbeiten

- ▶ Berechnung von Bahnen und deren Störungen
- ▶ Geodesie
 - ▶ Erstmalige Bestimmung der Abplattung der Erde
 - ▶ Definition des Besselschen Ellipsoiden
- ▶ Test des Äquivalenzprinzips



Outline

Bremen and ZARM

Einleitung

Einleitung

Die Eigenschaften der Gravitation

Die Grundlage der Gravitationsphysik: das Einsteinsche Äquivalenzprinzip

▶ Resultate

Konsequenzen der Speziellen Relativitätstheorie

Konsequenzen der Allgemeinen Relativitätstheorie

▶ Formale Konsequenzen

▶ Wie misst man Gravitation?

▶ Effekte der Allgemeinen Relativitätstheorie

Praktische Anwendungen der Allgemeinen Relativitätstheorie

▶ Anwendungen in der Metrologie

▶ Anwendung in der Positionierung

▶ Anwendung Geodäsie

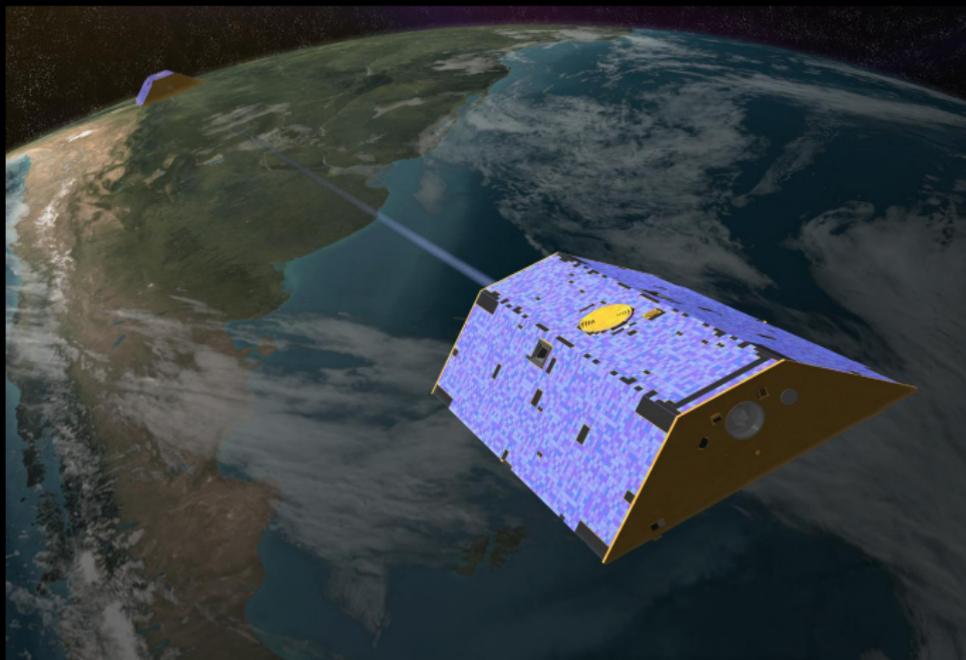
▶ **Heutige Technologien**

▶ Neue Methoden

Zusammenfassung

GRACE

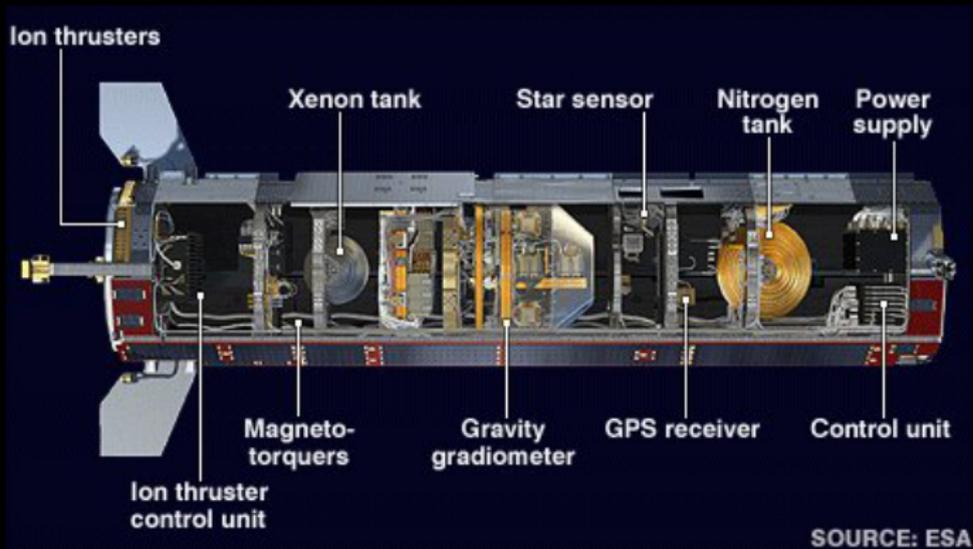
GRACE = Gravity Recovery and Climate Experiment
Geodäsie–Mission seit 2002



gute Genauigkeit für große Skalen

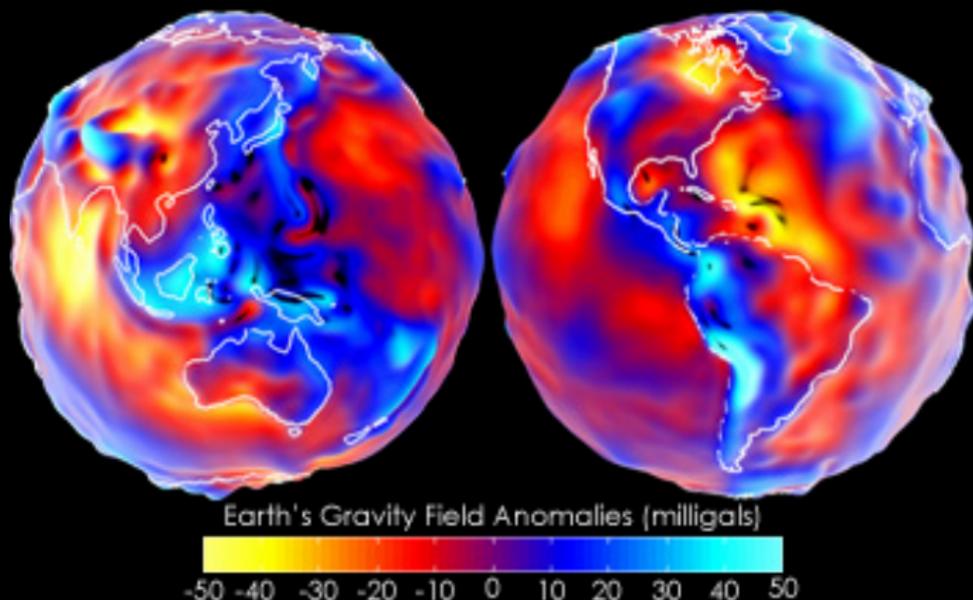
GOCE

GOCE = Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer
Geodäsie-Mission seit 2009



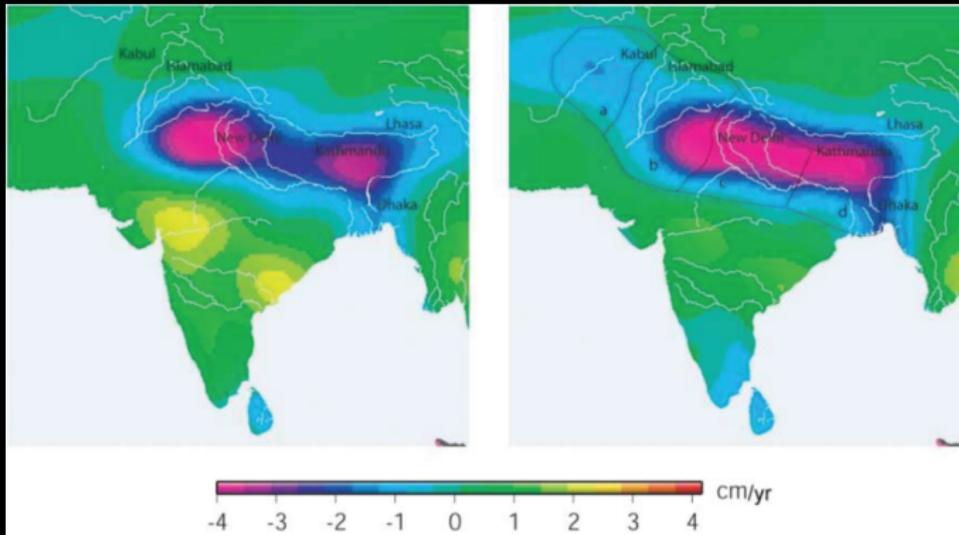
gute Genauigkeit für kleinere Skalen

Das Gravitationsfeld der Erde



Die Erde ist eine "Kartoffel"

Hydrologie



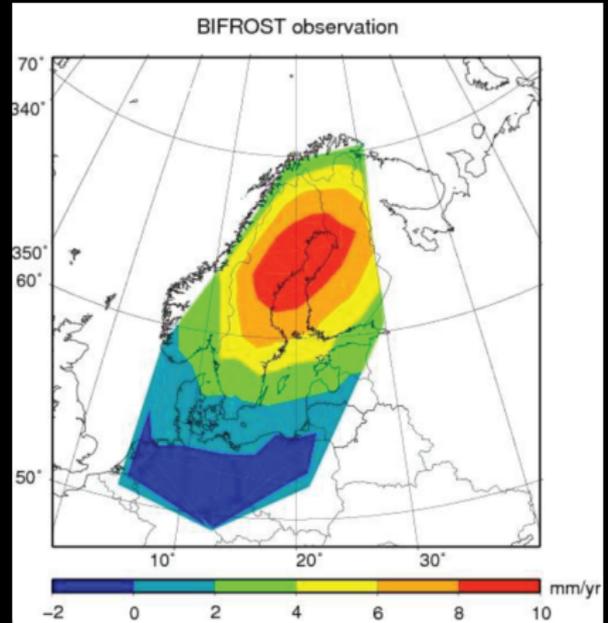
Grundwasserabnahme aufgrund von Bewässerung
Messmethode: GRACE

Nacheiszeitliche Landhebung

Nacheiszeitliche Landhebung ~ 1 cm/y

Messmethoden:

- ▶ GRACE
- ▶ GPS
- ▶ terrestrische Gravimetrie



Outline

Bremen and ZARM

Einleitung

Einleitung

Die Eigenschaften der Gravitation

Die Grundlage der Gravitationsphysik: das Einsteinsche Äquivalenzprinzip

▶ Resultate

Konsequenzen der Speziellen Relativitätstheorie

Konsequenzen der Allgemeinen Relativitätstheorie

▶ Formale Konsequenzen

▶ Wie misst man Gravitation?

▶ Effekte der Allgemeinen Relativitätstheorie

Praktische Anwendungen der Allgemeinen Relativitätstheorie

▶ Anwendungen in der Metrologie

▶ Anwendung in der Positionierung

▶ Anwendung Geodäsie

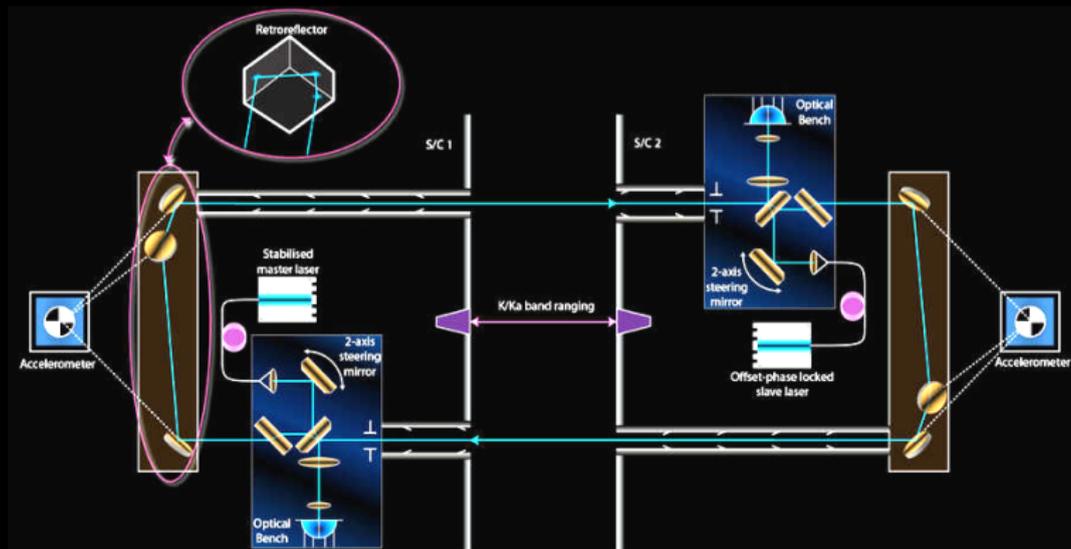
▶ Heutige Technologien

▶ Neue Methoden

Zusammenfassung

Neue Methoden: Laserinterferometrie

GRACE-FO: Laserinterferometrie (AEI Hannover)

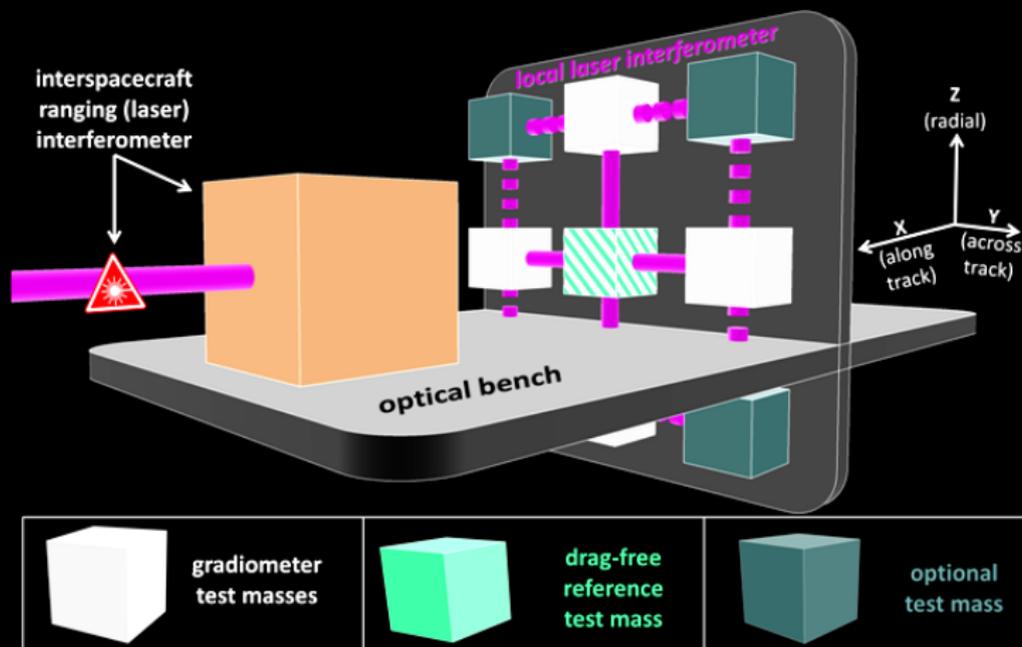


Genauigkeit ~ 10 nm

relativistische Effekte in der Größenordnung von $100 \mu\text{m}$

Neue Methoden: Laserinterferometrie

GOCE-FO: Laserinterferometrie (AEI Hannover)



Neue Methoden: Uhren auf der Erde und im Weltraum

Positionierung

- ▶ Zeitdilatation wegen Bewegung der Satelliten
~ 4 km/Tag
- ▶ Gravitative Rotverschiebung ~ 10 km/Tag

Uhren sind heute so genau, dass sie 30 cm Höhenunterschied "sehen". Optische Uhren sehen bald

- ▶ 1 cm Höhenunterschied und
- ▶ Relativgeschwindigkeiten in der Größenordnung des Kontinentaldrifts.

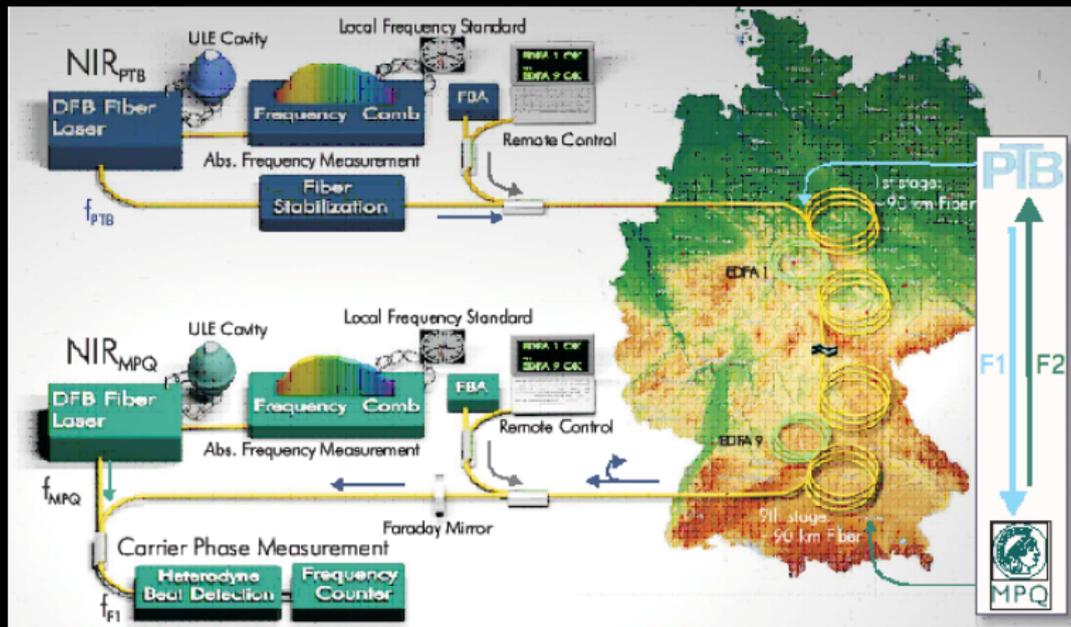
Aufgabe: Berechnung aller relativistischen Bahn- und Uhreneffekte, wie können diese am besten gemessen werden (gemeinsame Aufgabe von Gravitationstheorie, Uhren (Quantenoptik), Satellitentechnologie)



Neue Methoden: Uhrengedäsie

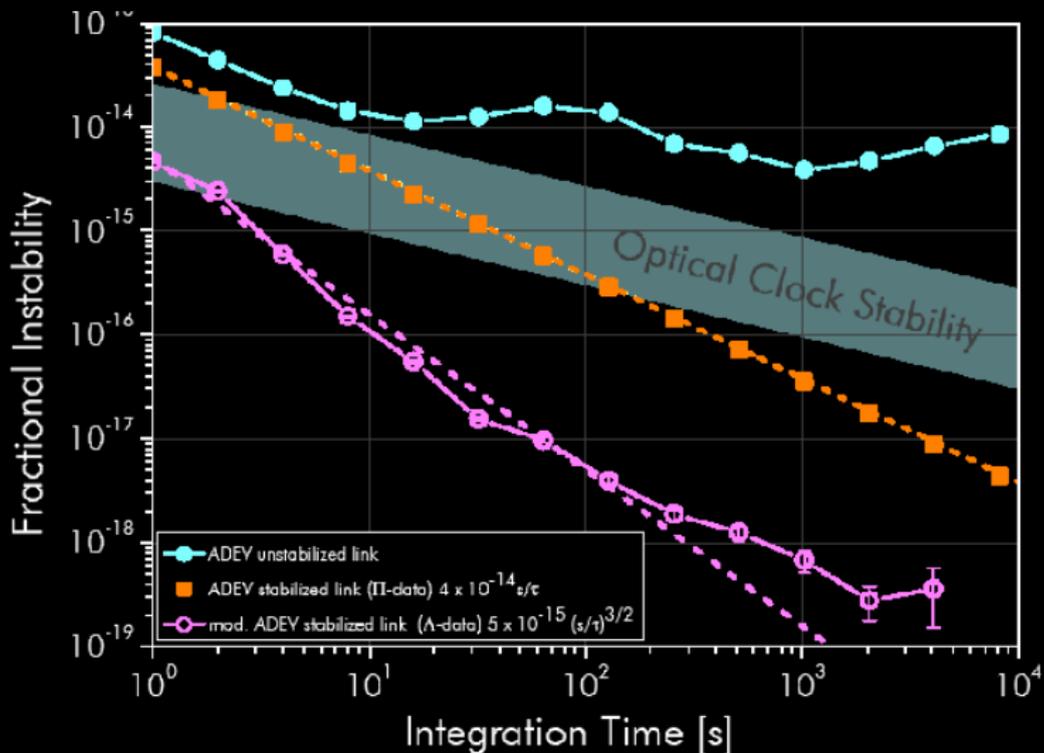
- ▶ Bestimmung von Äquipotentialflächen (Geoid)
- ▶ Zusammen mit Satelliten: Verknüpfung von lokalen Geoiden: Europa – England, Alpen, Kontinente, ..., heutiger Fehler ~ 30 cm
- ▶ Schnell sehr genau: Uhren haben nach wenigen Sekunden die Genauigkeit von 10^{-17}
- ▶ in Kürze (~ 10 Jahren): Genauigkeit 10^{-18} — Uhr würde ab dem Urknall gerechnet nur um wenige Sekunden falsch gehen

Uhrengedösie



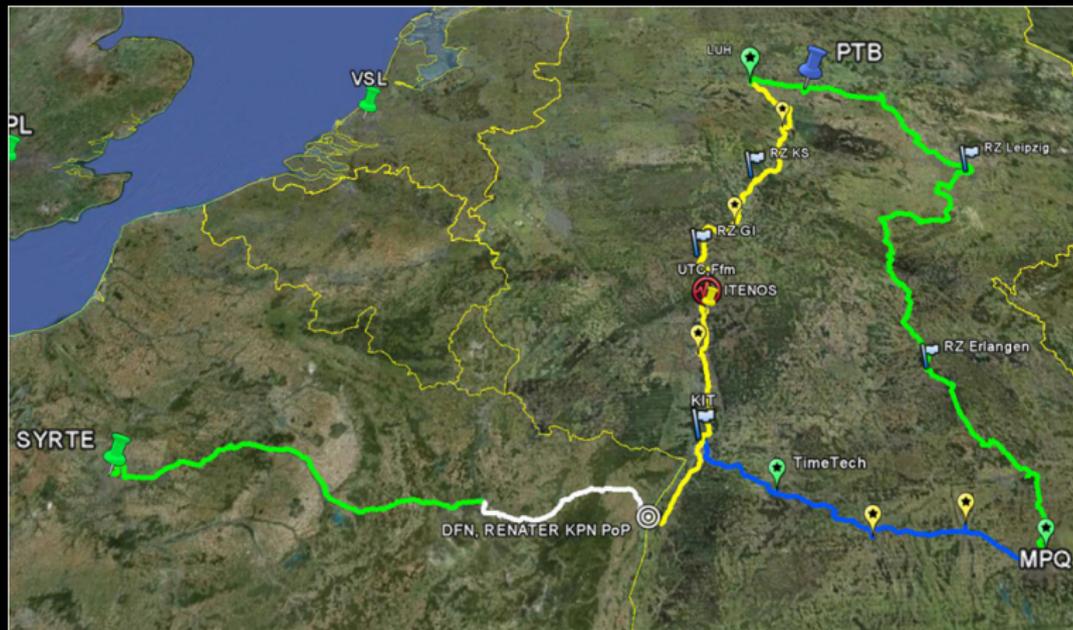
Predehl et al., Science 2012

Uhrengedäsie



Predehl et al., Science 2012

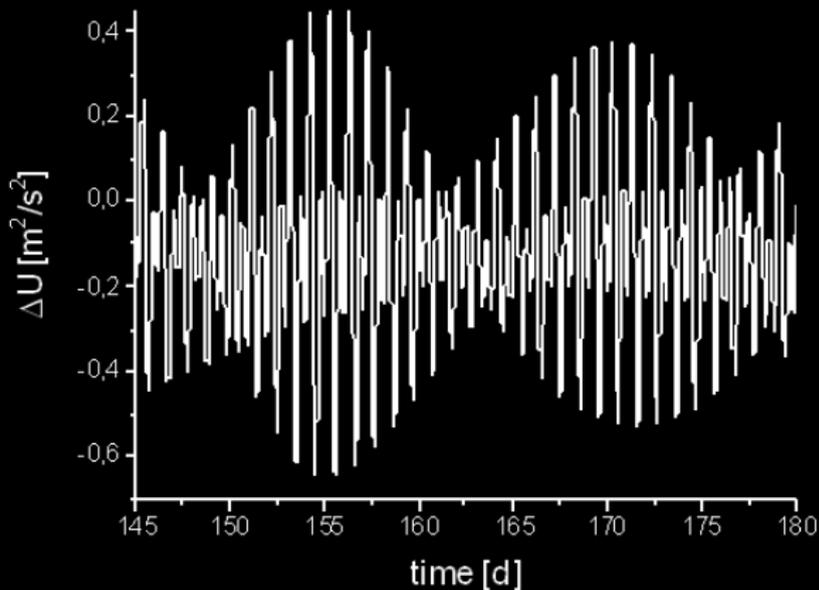
Uhrengedäsie



courtesy G. Grosche, H. Schnatz, PTB

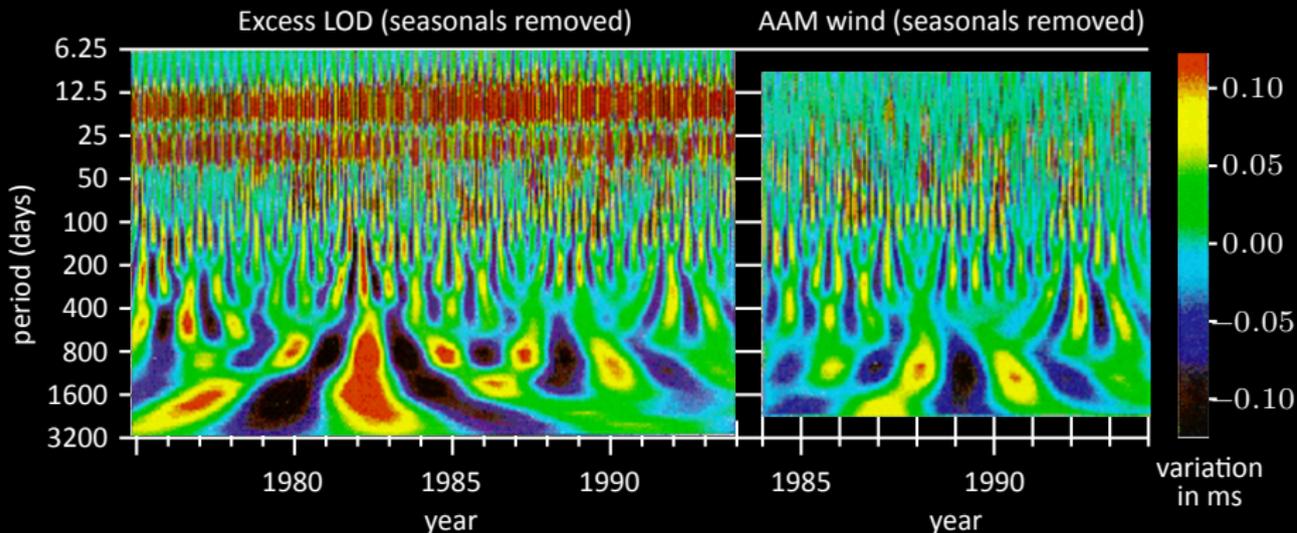
Uhrengedäsie

Tiden-Effekte zwischen Braunschweig und Paris



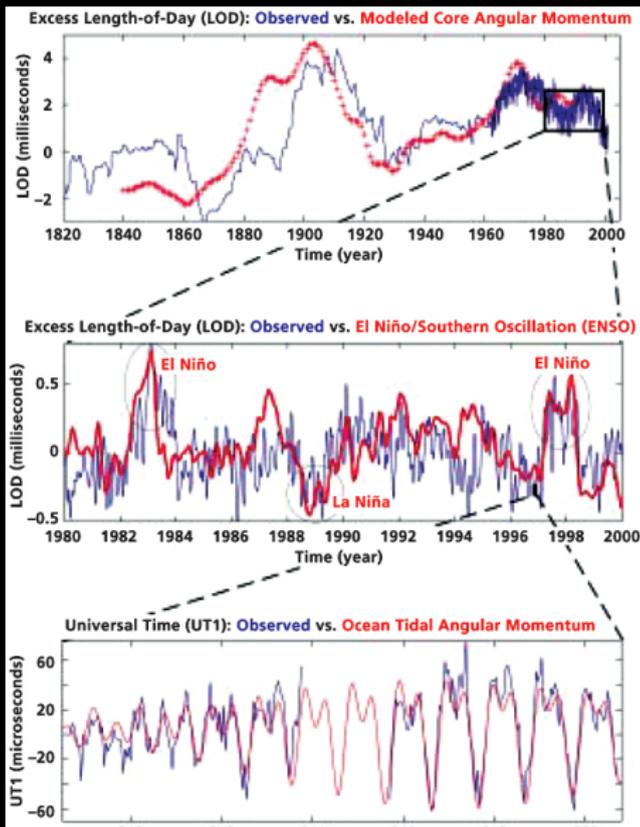
courtesy L. Timmen, IFE Hanover

Anwendung der genauen Zeitmessung: Klimaforschung



The FFT of the variations of the Earth rotation. From the variation of the LOD one can obtain information about the atmospheric state of the Earth. LOD = Length Of Day, AAM = Atmospheric Angular Momentum.

Anwendung der genauen Zeitmessung: Klimaforschung



Outline

Bremen and ZARM

Einleitung

Einleitung

Die Eigenschaften der Gravitation

Die Grundlage der Gravitationsphysik: das Einsteinsche Äquivalenzprinzip

▶ Resultate

Konsequenzen der Speziellen Relativitätstheorie

Konsequenzen der Allgemeinen Relativitätstheorie

▶ Formale Konsequenzen

▶ Wie misst man Gravitation?

▶ Effekte der Allgemeinen Relativitätstheorie

Praktische Anwendungen der Allgemeinen Relativitätstheorie

▶ Anwendungen in der Metrologie

▶ Anwendung in der Positionierung

▶ Anwendung Geodäsie

▶ Heutige Technologien

▶ Neue Methoden

Zusammenfassung

Zusammenfassung

- ▶ kein einziges Experiment widerspricht der SRT oder ART
- ▶ neue Experimente sind in der Vorbereitung (MICROSCOPE, Quantentests, Uhrentests)

Ausblick: Aktuelle Grundlagenforschung

- ▶ Binärsysteme, Binärpulsare: Tests der ART im *strong gravity regime*
- ▶ Gravitationswellen
- ▶ Neutronensterne: Materie unter Extrembedingungen
- ▶ Schwarze Löcher
- ▶ Gravitation und Quantenmechanik
 - ▶ Quantensensoren: praktische Anwendungen
 - ▶ Quantentests allgemein (z.B. Äquivalenzprinzip mit Quantenmaterie, Lorentz-Invarianz, Linearität, ...)
 - ▶ Verschränkung im Gravitationsfeld (Erde, Schwarze Löcher)
 - ▶ Meßproblem: Dekohärenz, selbstgravitierende Qantensysteme
- ▶ Quantengravitation
 - ▶ Suche nach Quantengravitation (Stringtheorie, Schleifenquantengravitation, nichtkommutative Geometrie, dynamische Triangulation, ...)
 - ▶ Suche nach Effekten der Quantengravitation

Gravitation ist noch nicht verstanden
Gravitation ist die spannendste aller Wechselwirkungen

Ausblick: Aktuelle Grundlagenforschung

- ▶ Binärsysteme, Binärpulsare: Tests der ART im *strong gravity regime*
- ▶ Gravitationswellen
- ▶ Neutronensterne: Materie unter Extrembedingungen
- ▶ Schwarze Löcher
- ▶ Gravitation und Quantenmechanik
 - ▶ Quantensensoren: praktische Anwendungen
 - ▶ Quantentests allgemein (z.B. Äquivalenzprinzip mit Quantenmaterie, Lorentz-Invarianz, Linearität, ...)
 - ▶ Verschränkung im Gravitationsfeld (Erde, Schwarze Löcher)
 - ▶ Meßproblem: Dekohärenz, selbstgravitierende Quantensysteme
- ▶ Quantengravitation
 - ▶ Suche nach Quantengravitation (Stringtheorie, Schleifenquantengravitation, nichtkommutative Geometrie, dynamische Triangulation, ...)
 - ▶ Suche nach Effekten der Quantengravitation

Gravitation ist noch nicht verstanden
Gravitation ist die spannendste aller Wechselwirkungen

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !

Dank an

- ▶ DFG Graduiertenkolleg 1620 “Models of Gravity”
- ▶ Exzellenzzentrum QUEST
- ▶ SFB 1128 Relativistische Geodäsie (geo-Q)
- ▶ Deutsche Forschungsgemeinschaft DFG
- ▶ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR
- ▶ DAAD, GIF, ...

www.zarm.uni-bremen.de