

Tests der Allgemeinen Relativitätstheorie

Vom Schwarzen Loch bis zum Urknall: Einsteins
Astrophysik für Nicht-Physiker

Markus Pössel & Björn Malte Schäfer

Haus der Astronomie/Institut für Theoretische Astrophysik

26.11. & 3.12.2015

Inhalt

- 1 Äquivalenzprinzip und Universalität des freien Falls**
- 2 Gravitations-Rotverschiebung und -Zeitdilatation**
- 3 Relativistische Effekte in der Satellitennavigation**
- 4 Lichtablenkung und -laufzeitverzögerung**
- 5 Bahneffekte: Periheldrehung, Präzession, Lense/Thirring**
- 6 Tests mit Pulsaren**

Relativistische Effekte und Tests

Letztes Mal (Björn Malte Schäfer): Gravitationslinsen als ein spezieller Test der Vorhersagen der ART.

Was gibt es insgesamt an allgemeinen Vorhersagen und Tests?

Beste Überblicksartikel:

Clifford M. Will: Theory and experiment in gravitational physics. Cambridge Univ. Press 1992.

Clifford M. Will: „The Confrontation between General Relativity and Experiment“ in Living Rev. Relativity 17, (2014), 4. URL (Stand 11/2015): <http://www.livingreviews.org/lrr-2014-4>

Tests des Äquivalenzprinzips

Verschiedene Versionen des Äquivalenzprinzips:

- **Schwaches Äquivalenzprinzip:** Beitrag von allen Energien (elektromagnetisch etc.) außer Gravitation
- **Starkes Äquivalenzprinzip:** Auch Gravitations-Eigenenergien mit einbezogen
- **Allgemeine Lorentz-Invarianz:** SRT-Tests

Äquivalenzprinzip mit Spezialfall Universalität des freien Falls (schwaches Äquivalenzprinzip: alle Testkörper verspüren dieselbe Beschleunigung) ist Grundlage der geometrischen Beschreibung Einsteins.

Daher: Tests sind wichtig! Abweichungen: Entweder Probleme mit geometrischer Beschreibung oder aber zusätzlich wirkende Kräfte („fünfte Kraft“)

Tests des Äquivalenzprinzips

Einfachste Situation: Pendel,
Rückstellkraft

$$m_I l \cdot \ddot{\alpha} = -m_g g \sin(\alpha) \approx -m_g g \alpha$$

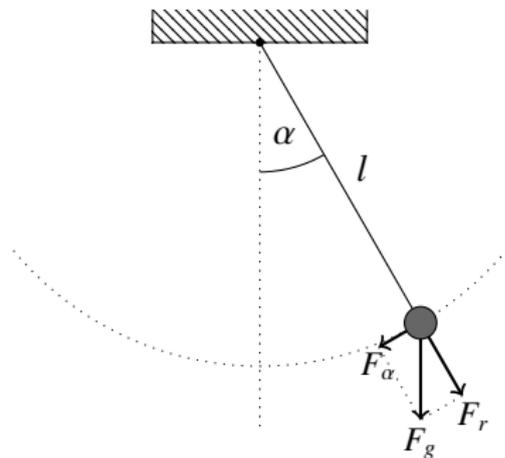
⇒ Oszillator-Lösung:

$$\alpha = A \cdot \sin(2\pi t/T)$$

mit

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \cdot \sqrt{\frac{m_I}{m_g}}$$

Damit $m_I \approx m_g$ auf Promillebruchteile
(Bessel 1828, vorher Newton < 1686).



Eötvös-Torsionswaage

Vergleich Zentrifugalkraft und Gewichtskraft – unterschiedliche Netto-Beschleunigungen würde Torsionswaage in Rotation versetzen. Praktisch: Auslenkung von Torsionswaage in unterschiedlichen Stellungen.

Loránd von Eötvös (1885 und 1906-1909), János Renner 1930s

Rechts: Nachbildung der Torsionswaage von Eötvös (Einsteinausstellung in Berlin, 2005)



Übersicht Tests Äquivalenzprinzip

Robert H. Dicke et al. 1960s
Re-Analyse Eötvös et al.

1980er Jahre: Fünfte
Fundamentalkraft?

Free-fall Galileo in Colorado:
Niebauer et al. 1987

Lunar Laser Ranging
(Merkowitz 2010)

Derzeit größte Genauigkeit:
Eric Adelberger:
Eöt-Wash-Gruppe

TESTS OF THE WEAK EQUIVALENCE PRINCIPLE

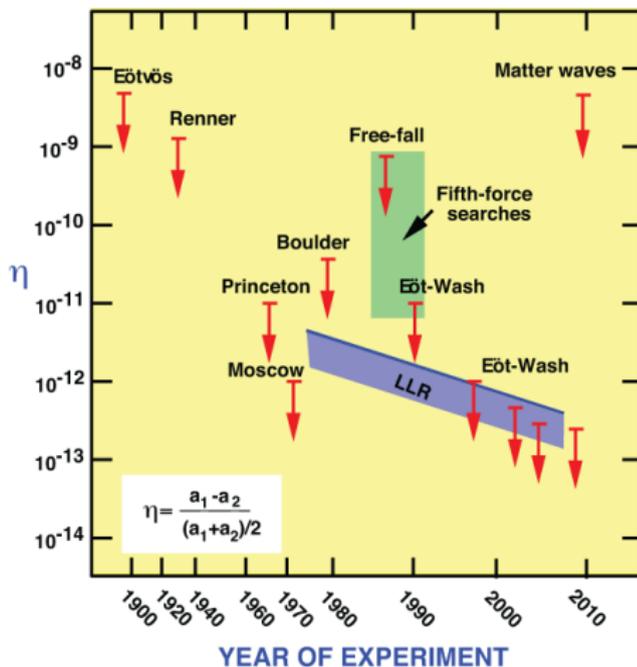


Abb. 1 in Will 2014

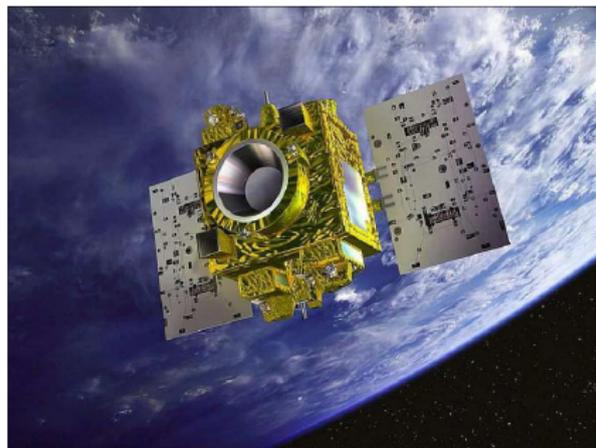
MICROSCOPE

MICROSCOPE: Frz. Satellit
(CNES), Start April 2016

Relativbeschleunigung von
Testmassen Platin-Rhodium
vs. Titan, elektrostatisch
überwacht

Ziel: Zeigen, dass $\eta < 10^{-15}$

Weitere Informationen:
CNES-Webseiten



CNES

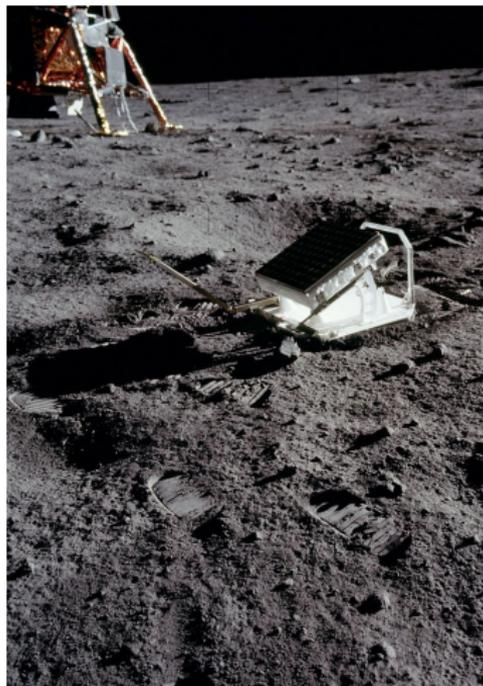
Bild:

Starkes Äquivalenzprinzip

Trägt Gravitations-Bindungsenergie zur schweren Masse bei?

Nordvedt-Effekt (Nordvedt 1968):
Allgemeinere metrische Gravitationstheorien sagen Gravitationsbeschleunigung voraus abhängig von der Gravitations-Bindungsenergie (frei werdende pot. Energie, wenn man den Körper aus Einzelteilen zusammensetzt).

⇒ Tests mit Lunar Laser Ranging



LLR-Reflektor von Apollo 11. Bild: NASA

Lorentz-Invarianz

Standardmodell-Erweiterungen (SME): In kontrollierter Form von der speziell-relativistischen Form der Kraftgleichungen für Elementarteilchen abweichen.

Konsequenz: Andere Quellterme für Gravitation, Äquivalenzprinzip verletzt

Tests mithilfe genauer Planetenbahnen: Hees et al. 2015

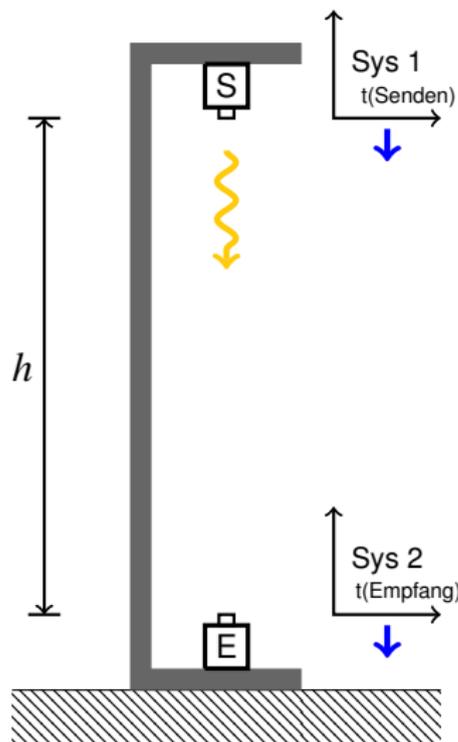
Gravitations-Rotverschiebung und Gang von Uhren

Gravitations-Rotverschiebung: Wellenlänge wird länger, wenn Licht aus der Nähe einer Masse radial nach außen läuft; kürzer, wenn nach innen.

Wie am 12.11. gezeigt: Daraus und aus Betrachtungen zu statischen Gravitationsfeldern folgt: Uhren gehen umso langsamer, je näher an einer Masse sie sich befinden.

Ableitung beruhte auf Äquivalenzprinzip, nicht auf den Einstein-Gleichungen: noch ein Test der Voraussetzungen der ART.

Gravitations-Rotverschiebung: Rechnungsskizze



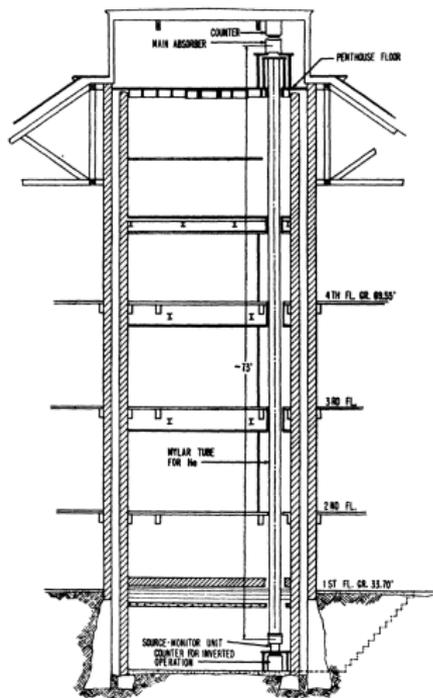
Im konstanten Gravitationsfeld:
Gravitations-Rotverschiebung

$$z = -\frac{gh}{c^2}$$

bei $g \sim 9,81 \text{ m/s}^2$:

$$z = 1,1 \cdot 10^{-16} \left(\frac{h}{1 \text{ m}} \right).$$

Pound und Rebka

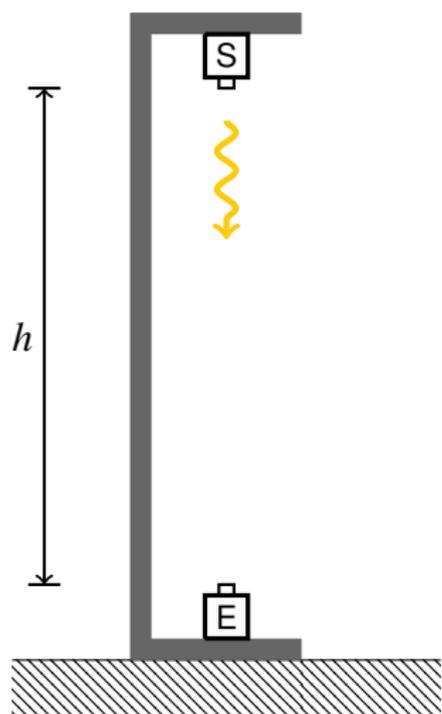


„Turm“ des Jefferson Physics Lab,
Harvard – Gebäude im Gebäude, aber
Baumaßnahmen notwendig

Röntgenstrahlung von ^{57}Fe bei 14,4 keV
(1. angeregter Zustand, mittl.
Lebensdauer $0,1 \mu\text{s}$) läuft über $h = 24$
m durch Helium

Bild aus Pound & Snider 1965

Pound-Rebka-Experiment



Wie die winzige Verschiebung von $z \sim 10^{-15}$ nachweisen?

Kernresonanz sollte
Gamma-/Röntgenstrahlung in sehr
scharf begrenztem Frequenzband
aussenden und empfangen.

Problem: Rückstoß bei der Aussendung
des Quants führt zu Emissionsenergie
 \neq Absorptionsenergie!

Lösung Mößbauer-Effekt (MPIMF
1955-1958): rückstoßfreie Aussendung
von Atomen im Kristallgitter

Pound-Rebka-Experiment



Bild aus Pound 2000, Harvard News Office

Messung: Detektoren hinter einer Absorberfolie (hoher ^{57}Fe -Gehalt) weisen Gammastrahlung nach. Quelle mit „Lautsprecher-Kern“ periodische auf- und abbewegt \Rightarrow Dopplereffekt kompensiert Rotverschiebung

Messung des Effekts auf 10% (Pound & Rebka 1960) bzw. 1% (Pound & Snider 1964) genau.

Rotverschiebung an Sternoberflächen



Bild: Astrophysikalisches Institut Potsdam

Einsteinturm für Nachweis auf der Sonne – schwerer als gedacht!

Beste derzeitige Nachweise:
Weiße Zwergsterne: Erstmals
Trimble & Greenstein (1972),
deutlich genauer Barstow et al.
2005 mit dem HST

Rotverschiebung und Gang von Uhren

Äquivalent zu Rotverschiebung: Zeitdilatation für Uhren



Direkte Messmöglichkeit: (a) Uhrentransport an unterschiedliche Orte im Gravitationspotenzial, später Vergleich, oder (b) Uhrenvergleich durch Lichtsignale

Auswertung: Kombination von speziell-relativistischer Zeitdilatation und Gravitations-Rotverschiebung

Hafele-Keating



Bild: Nutzer Binarysequence via Wikimedia Commons unter Lizenz CC BY-SA 3.0

Hafele-Keating: Atomuhren in Linienflugzeugen Ost- und West-Umrandung im Oktober 1971 (Hafele & Keating 1972a, 1972b).

	Ostflug	Westflug
Vorhersage Gravitation	$144 \pm 14 \text{ ns}$	$179 \pm 18 \text{ ns}$
Vorhersage SRT	$-184 \pm 18 \text{ ns}$	$96 \pm 10 \text{ ns}$
Vorhersage Netto	$-40 \pm 23 \text{ ns}$	$275 \pm 21 \text{ ns}$
Messung Netto	$-50 \pm 10 \text{ ns}$	$273 \pm 7 \text{ ns}$

Vessot-Levine (Gravity Probe A)

Vessot et al. 1980: Wasserstoff-Maser-Uhr an Bord von Scout-Rakete bis knapp 10.000 Kilometer Höhe – Vergleich Zweiwege-Signal (hinauf und hinunter) mit Einwege-Signal (runter).

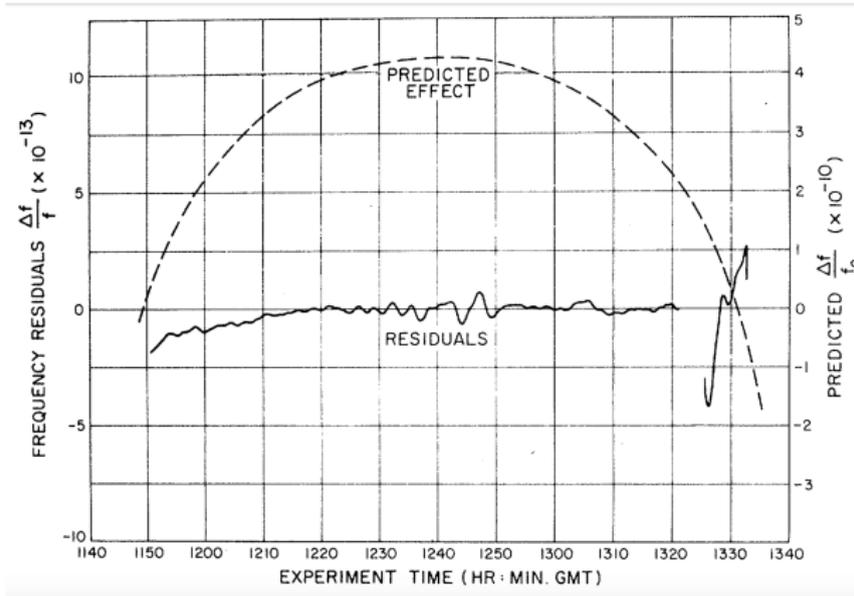


Abbildung 3 aus Vessot et al. 1980

Atomuhren im Labor

Experimente mit hochgenauen Atomuhren (Frequenzkonstanz $\sim 10^{-17}$, Chou et al. 2010): Höhendifferenz 33 cm

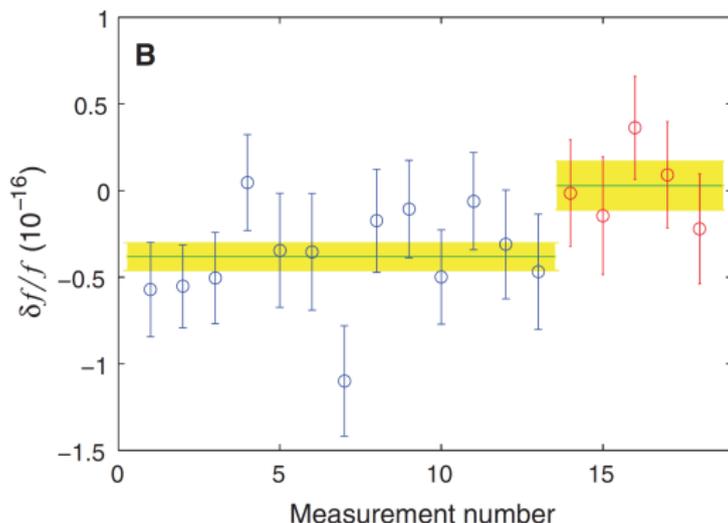


Abbildung 3 aus Chou et al. 2010

Längst im internationalen Zeitsystem berücksichtigt! e.g. Guinot 2011

Relativität und Satellitennavigation (z.B. GPS)

GPS-Satelliten: Bahnradius

$$a = (20,2 + 6,4) \cdot 10^3 \text{ km; nutze 3.}$$

Kepler'sches Gesetz:

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} \cdot a^3 = (11,97 \text{ Stunden})^2$$

Bahngeschwindigkeit ist

$$v = \sqrt{\frac{GM}{a}} = \sqrt{|\Phi(a)|} \approx 3,9 \text{ km/s} \quad \text{mit Gravitationspotential } \Phi(r).$$

SRT-Zeitdilatation alleine (bei erdfester Uhr durch Geoid berücksichtigt):

$$\tau_{Sat} = \tau_{Erde} \sqrt{1 - (v/c)^2} = \tau_{Erde} \sqrt{1 - \frac{GM}{c^2 a}} \approx \tau_{Erde} \cdot 0,9999999999916$$



Bild: NASA

Relativität und GPS

Gravitations-Rotverschiebung alleine: Satellitenuhr läuft schneller,

$$\tau_{Sat} = \tau_{Erde} \left[1 + \frac{GM}{c^2} \left(\frac{1}{r_E} - \frac{1}{a} \right) \right] \approx \tau_{Erde} \cdot 1,000000000053$$

(mit r_E dem Erdradius).

Umstellen auf Frequenzen $\nu \sim 1/T$, beide Effekte berücksichtigen:
Für Satellitenuhr gilt

$$\nu_{Erde} = \nu_{Sat} \left[1 + \frac{GM}{c^2} \left(\frac{1}{r_E} - \frac{1}{a} \right) \right] \cdot \sqrt{1 - \frac{GM}{c^2 a}} \approx \nu_{Sat} \cdot \left(1 + 4,5 \cdot 10^{-10} \right)$$

Lösung der GPS-Konstrukteure: irdische Uhren auf Grundfrequenz 10,23 MHz; Satellitenuhren auf 10,229999995453 MHz.

Relativität und GPS

Häufige falsche Rechnung:

Tag hat 86400 Sekunden, in dieser Zeit würden unkorrigierte Satellitenuhren um $\Delta t = 3,8 \cdot 10^{-5}$ Sekunden vorgehen.

Satelliten bestimmen Entfernungen über Lichtlaufzeiten; typischer Abstandsfehler bei diesem Zeitfehler ist beim Vergleich von Satellitenuhren mit „GPS-Empfängeruhren“ auf der Erde:

$$c \Delta t \sim 10 \text{ Kilometer}$$

pro Tag!

Findet man nicht selten so auch in der populärwissenschaftlichen Literatur (leider auch bei mir in Texten Jahrgang 2005) und z.B. auch auf <http://schule-gps.de/>

Relativität und GPS

In Wirklichkeit: GPS-Empfänger haben keine Atomuhr eingebaut — Zeit und Ort werden aus direktem Vergleich von mindestens vier Satellitensignalen bestimmt!

Für Abstandsfehler durch Lichtsignallaufzeit ist die charakteristische Zeitskala $a/c < 0,1$ s und über diesen Zeitraum hinweg gehen Satellitenuhren höchstens um $\Delta t = 4 \cdot 10^{-11}$ s falsch, entsprechend

$$c \Delta t \sim 1 \text{ cm}$$

und damit weit unterhalb der Genauigkeit von GPS!

Relativität und GPS

Größerer Effekt: Ephemeridenbestimmungsfehler, maximal: Nach $7 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60$ Sekunden gehen die Satellitenuhren um $2,7 \cdot 10^{-4} \text{ s}$ vor (danach wird neu kalibriert)

Charakteristische Geschwindigkeit ist die Bahngeschwindigkeit der Satelliten (vereinfacht! vernachlässigt Durcheinanderlaufen!), also Satelliten-Positionsfehler

$$\Delta s_{Sat} \sim (3,9 \text{ km/s}) \cdot (2,7 \cdot 10^{-4} \text{ s}) \sim 1 \text{ m.}$$

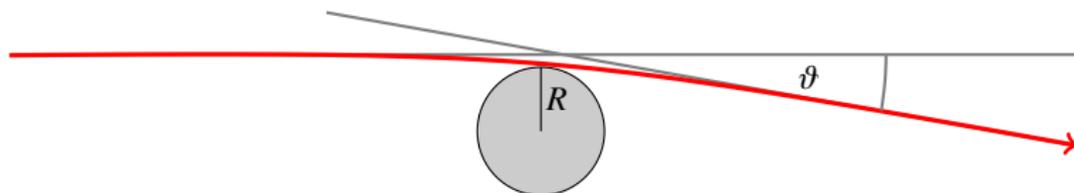
In Wirklichkeit werden Länge und Breite auf der Erde berechnet; Positionsfehler dabei ergibt sich auf der Erdoberfläche zu

$$\Delta s_{Erde} = \Delta s_{Sat} \cdot \frac{r_E}{a} \sim 25 \text{ cm.}$$

Genauere Rechnung ergibt ~ 1 Meter – gleiche Größenordnung wie andere GPS-Fehler.

Lichtablenkung und -laufzeitverzögerung

Lichtablenkung: Vgl. Vorlesung vom 19.11., Björn Malte Schäfer



Zur Richtungsänderung kommt eine Laufzeitverzögerung hinzu („4. Test“, Shapiro-Effekt; Shapiro 1964)

Parametrisierter Post-Newton'scher Formalismus

Kenneth Nordtvedt (1968), Clifford Will (1971), Will/Nordtvedt (1972): Newton'sche Raumzeit mit systematischer Näherungsentwicklung in $1/c^2$ ($[\Phi] = [c^2]$)

Bestimmte Koeffizienten der Entwicklungsterme sind ART, andere sind (metrische!) Alternativtheorien. PPN-Parameter:

Symbol(e)	Bedeutung	ART-Wert(t)
γ	Raumkrümmung pro Masseneinheit	1
β	Nichtlinearität der Gravitation	1
ξ	Bevorzugte Orte?	0
$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$	Bevorzugte Bezugssysteme?	0
$\alpha_3, \zeta_1, \zeta_2, \zeta_3$	Impulserhaltung?	0

PPN Lichtablenkung/-verzögerung

(kleiner) Ablenkungswinkel

$$\phi \sim (1 + \gamma)$$

Newton'sche Rechnung

(Cavendish 1784, von Soldner

1803) bzw. Äquivalenzprinzip

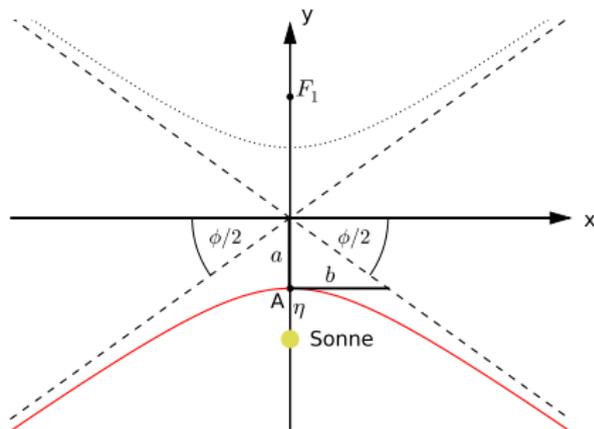
(Einstein 1911):

$$\phi = \frac{2GM}{c^2 R}.$$

entsprechend $\gamma = 0$. ART-Wert

doppelt so groß: Beitrag der

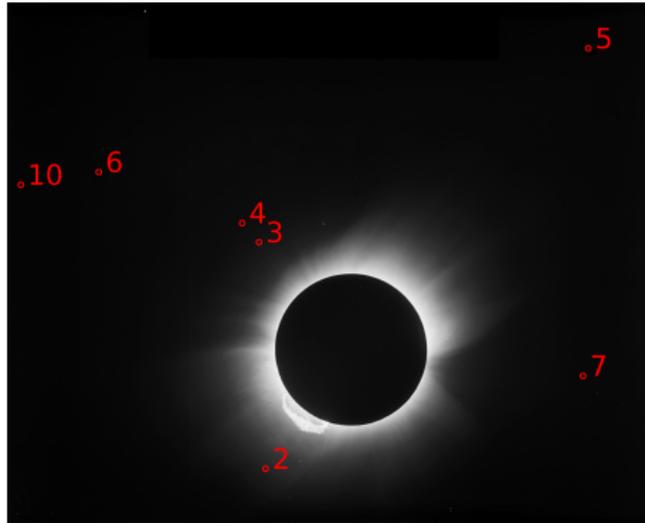
Raumkrümmung!



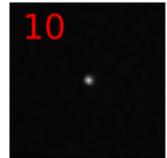
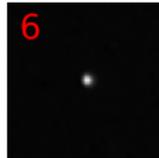
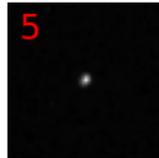
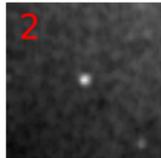
Systematische Tests: Lichtablenkung 1919



Systematische Tests: Lichtablenkung 1919



Dyson et al. 1920, vgl. die Beschreibung in Kennefick 2007, 2009



Bilder: Heidelberger Kopie der Sobral-Platte Nr. 3

VLBI-Messungen an Quasaren

VLBI = Very Long Baseline
Interferometry: Radioteleskope
zusammenschalten

Geologischer Nutzen:
Kontinentaldrift, Erdvermessung

Lichtablenkung: Beobachtung von
Quasarpaares, Genauigkeit bis

$$\gamma - 1 < 10^{-4}$$

möglich (Lambert 2011)



Bild: user:Hajor via Wikimedia Commons unter Lizenz CC BY-SA 2.0

Astrometrie

Entfernungs- und Positionsbestimmungen von Sternen: ESA-Mission Hipparcos bestätigt Lichtablenkung auf 0,3% genau (Froeschlé et al. 1997)

Gaia-Parallaxenmessung: Für genaueste Messungen der Sternpositionen muss Lichtablenkung berücksichtigt werden! (Nicht nur in Sonnennähe; Hobbs et al. 2010)

Anders ist die angestrebte Genauigkeit nicht zu erreichen.

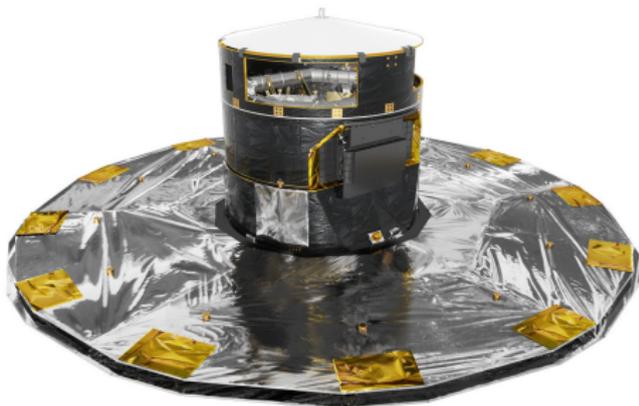
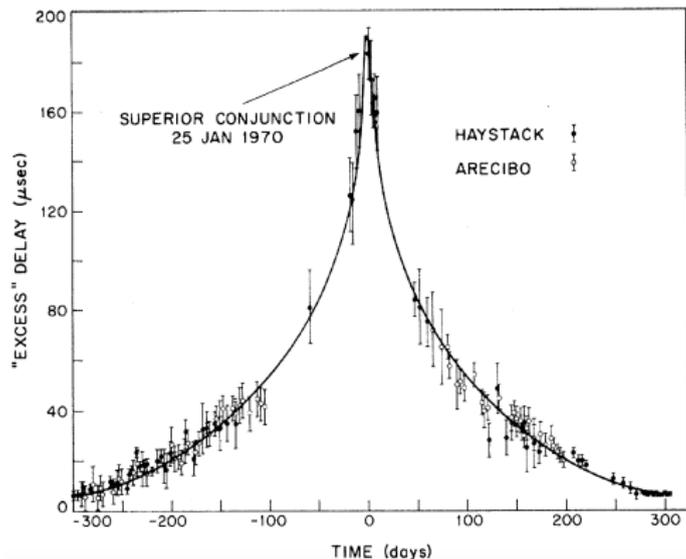


Bild: ESA/ATG medialab

Shapiro-Effekt

Als Effekt vorhergesagt von Shapiro 1964.

Erstmals gemessen von Shapiro et al. 1968, 1971 mit Radarechos von Merkur/Venus während oberer Konjunktion mit der Sonne, z.B.

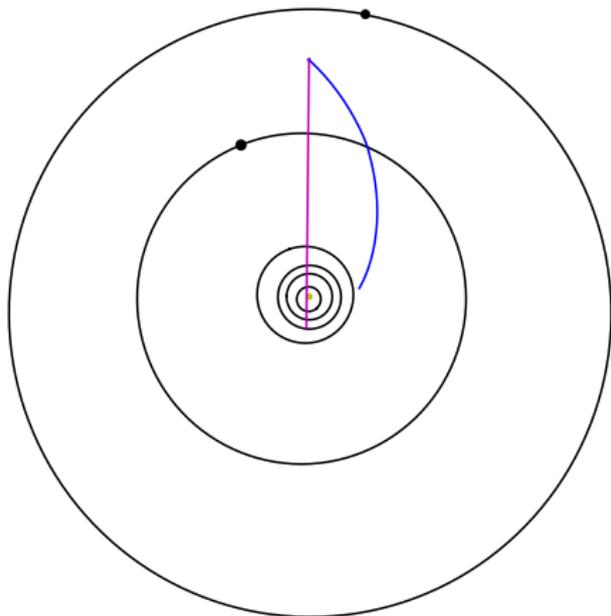


Shapiro-Effekt mit Transpondern

Genaueste Messungen:
Radiotransponder von Raumsonden

1976 Viking bis 0,1% genau
(Reasenberg et al. 1979)

Cassini-Sonde (Bertotti et al. 2003):
Ergebnis: $\gamma - 1 = (2.1 \pm 2.3) \cdot 10^{-5}$.



Planeten und Cassini am 16.6.2002

Überblick

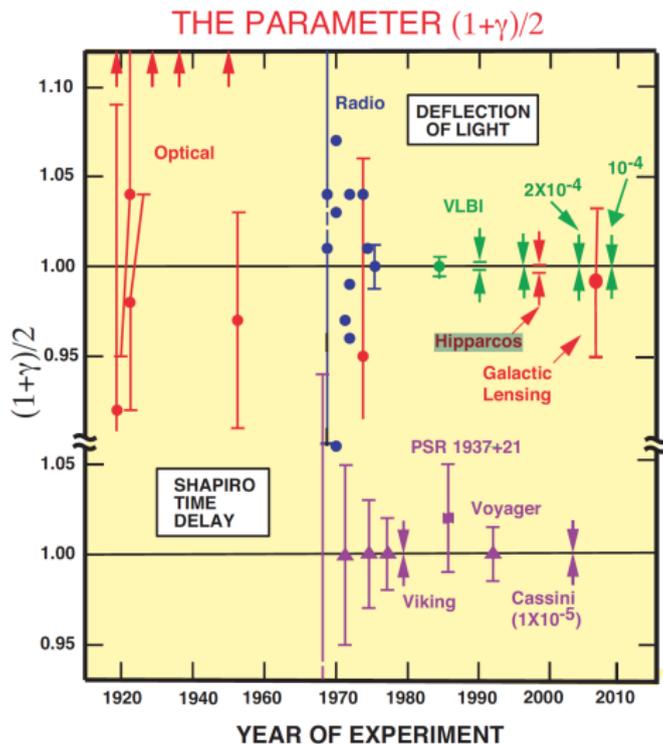


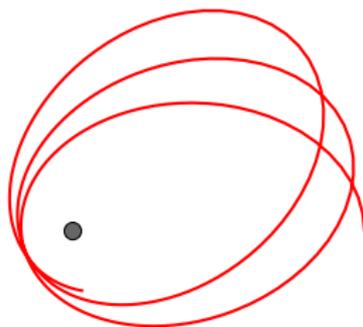
Abb. 5 in Will 2014

Bahneffekte

Einflüsse auf die Bahnen frei fallender (materieller) Objekte:

- Bahnform: Periheldrehung und verwandte Effekte
- Orientierungseffekte:
 - Geodätische Präzession (Umlaufbahn um Masse)
 - Lense-Thirring-Effekte (frame dragging)

Periheldrehung des Merkur



Ellipsenbahn (Kepler!) wird zur Rosette – sonnennächster Punkt (Perihel) wandert.

Periheldrehung des Merkur

Bekannt deutlich vor Einstein: Messungen Urbain Le Verrier 1859: Gesamt-Periheldrehung $530''$ pro Jahrhundert (Venus $280''$, Jupiter $150''$, andere Planeten $100''$) davon $43''$ pro Jahrhundert unverstanden.

Le Verrier postuliert Planeten innerhalb der Merkurbahn (analoges Vorgehen wie bei Neptun)

Einstein erkennt (intuitiv!) anomale Periheldrehung als fundamental, nutzt sie bei der Ausformulierung der Allgemeinen Relativitätstheorie, insbes. Akademiepapier vom 18. November 1915.

Periheldrehung des Merkur

Winkelverschiebung pro Umlauf

$$\Delta\phi = \frac{6G\pi(m + M)}{c^2 a(1 - \epsilon^2)} \left[\frac{1}{3}(2(\gamma + 1) - \beta) + \frac{J_2 R^2}{2(m + M)a^2(1 - \epsilon^2)^2} \right]$$

wobei m Masse des umlaufenden, M des Zentralkörpers, a große Halbachse, ϵ Exzentrizität, J_2 Quadrupolmoment der Zentralmasse („Abplattung“) und R ihr mittlerer Radius.

Beiträge von: Raumkrümmung, Nichtlinearität, Quadrupolmoment

Dass das Quadrupolmoment hinreichend klein ist, ist abschätzbar, aber nicht selbstverständlich – erst neuere Messungen incl.

Helioseismologie

Merkur-Messungen

Neuere Messungen: Wieder mit Raumsonden!

MESSENGER (NASA-Merkursonde 2004-2015) für Merkur
(Verma et al. 2014):

$$\beta - 1 = (-4.1 \pm 7.8) \cdot 10^{-5}$$

Mars Reconnaissance Orbiter (NASA, 2005-2010+, Konopliv et al. 2011):

$$\beta - 1 = (4.0 \pm 22.4) \cdot 10^{-5}$$

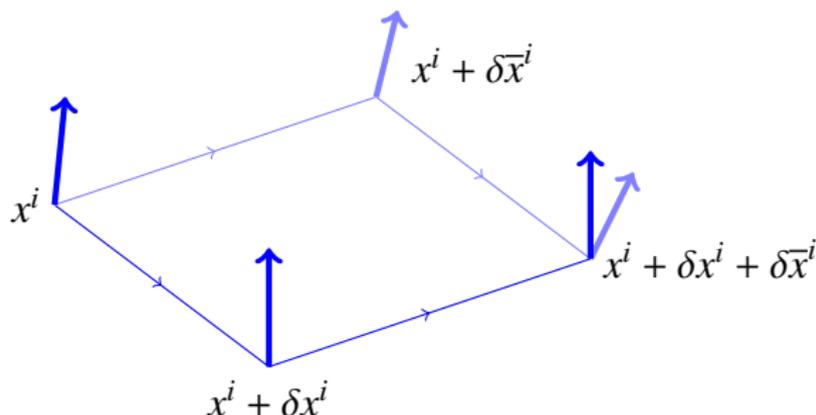
Jeweils $\gamma = 1$ (z.B. von Cassini) vorausgesetzt, signifikant beeinflusst durch Messunsicherheit für das Quadrupolmoment J_2 .

Hier Ende Vorlesung 26.11.2015

Geodätische Präzession und Lense-Thirring-Effekt

Bezugsobjekt: Kreisel, entsprechend einer frei fallenden Richtung im Raum

Geodätische Präzession (= de Sitter-Effekt): Paralleltransport einer Raumrichtung!



Lense-Thirring-Effekt: Rotierende Masse „reißt den Raum mit“

LAGEOS und LARES

Verhältnismäßig einfache Reflektorkugeln für Lasersignale von der Erde (Ciufolini et al. 2013). Durchmesser 60 cm (LAGEOS), 36 cm (LARES), Umlaufbahn knapp 6000 km (LAGEOS) bzw. 1500 km (LARES) über Erdboden.

Lense-Thirring mit 20% bzw. 10% Genauigkeit? Umstritten!



Bild: NASA

Gravity Probe B

Gravity Probe B: Äußerst aufwändiges Satellitenexperiment 2004–2006 (Everitt et al. 2011). Vergleich Rotationsachse extrem glatter Kugeln mit Anpeilen eines fernen Referenzsterns.

Große Schwierigkeiten bei der Auswertung, da elektrische Rest-Effekte bei den Kugeln vernachlässigt!

Geodätische Präzession auf 0,5% genau.

Lense-Thirring auf 15% genau.

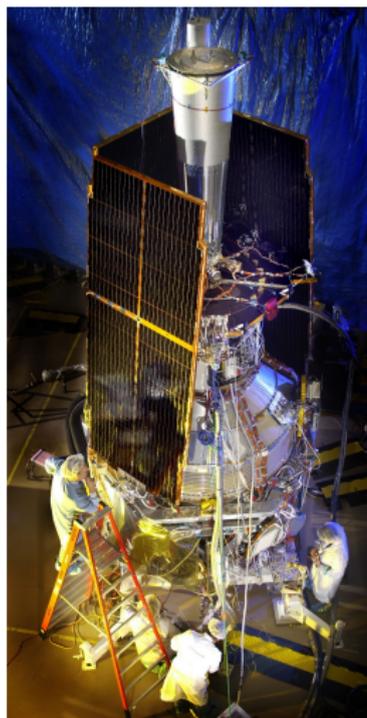


Bild: NASA

Tests mit Pulsaren

Stärke allgemein-relativistischer Effekte typischerweise proportional zu

$$\frac{\mathcal{R}}{\text{typische Längenskala}}$$

wobei

$$\mathcal{R} = \frac{2GM}{c^2}$$

die Gravitationslängenskala der zugehörigen Masse ist (anderer Name: Schwarzschild-Radius; Faktor 2 rein konventionell).

Beispiele:

$$\text{Lichtablenkung } \theta \sim \frac{\mathcal{R}}{R}, \quad \text{Periheldrehung } \Delta\phi \sim \frac{\mathcal{R}}{a(1 - \epsilon^2)}.$$

Tests mit Pulsaren

Neutronensterne (Entstehung: vgl. dann Vorlesung am 9.12.) sind sehr kompakt: 1 bis 3 Sonnenmassen bei Durchmesser ~ 20 km.

Mit der Definition Kompaktheit

$$k \equiv \frac{\mathcal{R}}{\text{Längenskala}}$$

Lichtablenkung Sonnenrand: $k \sim 10^{-6}$

Lichtablenkung Neutronensternrand: $k \sim 10^{-1}$

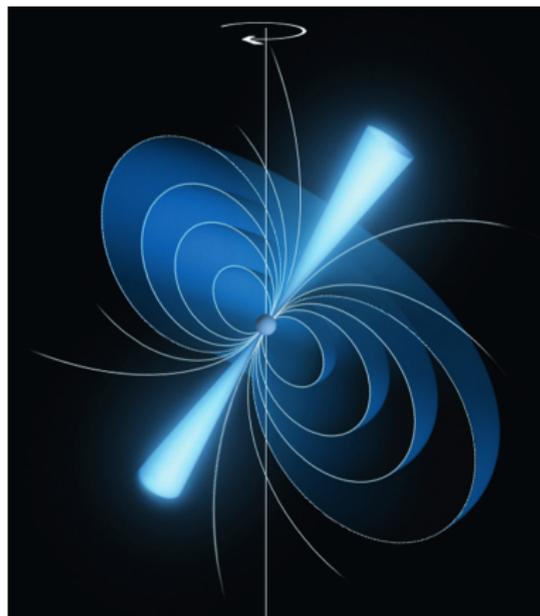
Tests mit Pulsaren

Binärpulsar PSR B1913+16
(1974) und Doppelpulsar PSR
J0737-3039 (2003)

Doppelpulsar: je 1,3
Sonnenmassen, Perioden 22 ms
(A) und 2,8 s (B)

Kombination starkes
Gravitationsfeld mit sehr exakter
Rotations-Uhr

Erstmals vorgeschlagen: Counselman &
Shapiro 1968, schöne Übersicht Kramer
& Wex 2015 in Physik in unserer Zeit



http://www.mpg.de/mpf.2013_3

Binärpulsar und Doppelpulsar

Größe	PSR B1913+16	PSR J0737-3039A/B
Umlaufzeit	7,75 h	2,45 h
Große Bahnachse	$\sim 10^6$ km	$\sim 10^5$ km
Exzentrizität	0,6	0,09
Inklination	$\sim 45^\circ$	$\sim 87^\circ$
Entfernung v. Erde	~ 20000 Lj	~ 3000 Lj
Periode A	59 ms	22,7 ms
Masse A	$1,44M_\odot$	$1,34M_\odot$
Periode B	–	2,77 s
Masse B	$1,387M_\odot$	$1,25M_\odot$
Originalartikel	Hulse & Taylor 1975	Burgay et al. 2003

Größte verbleibende Unsicherheit bei PSR B1913+16: Beschleunigung (galaktisches Gravitationsfeld) relativ zur Erde!

Namen = Epoche (B = 1950, J = 2000) und Koordinaten (Rektaszension und Deklination)

Tests mit Pulsaren

Merkur: Perihel-Kompaktheit

$$k = \mathcal{R}/a(1 - \epsilon^2) \sim 10^{-8} \Leftrightarrow 43''/\text{Jahrhundert}$$

vs. PSR J0737-3039A/B: Periapsis-Kompaktheit

$$k = \mathcal{R}/a(1 - \epsilon^2) \sim 10^{-4} \Leftrightarrow 1^\circ/\text{Jahr}$$

Tatsächlich gemessen statt Überschlagsrechnung: knapp $17^\circ/\text{Jahr}$.

Lichtablenkung/Shapiro-Verzögerung und weitere relativistische Vorhersagen testbar — so genau, dass alternative Gravitationstheorien wie MOND, TeVeS mit einiger Sicherheit ausgeschlossen werden können!

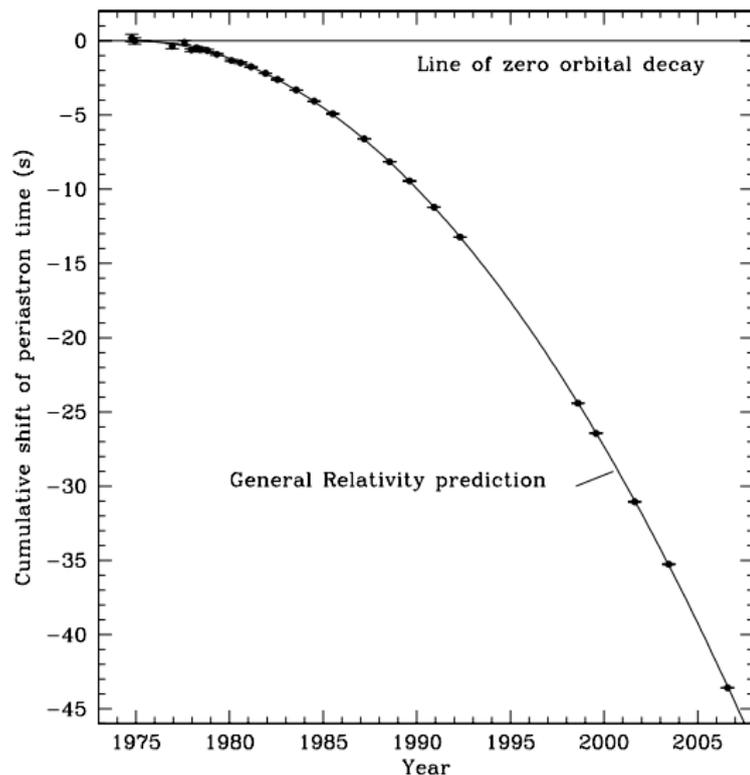
Planeten-Massenbestimmung Pulsaren

Verzögerungseffekte durch Planeten-Masseneffekte für vier Pulsare (PSRs J0437-4715, J1744-1134, J1857+0943, J1909-3744): Massen der Planeten des Sonnensystems bestimmen!

Planet	M/M_{\odot} (Sonden etc.)	M/M_{\odot} (Pulsare)	δ_i/σ_i
Merkur	$1.66013(7) \cdot 10^{-7}$	$1.6584(17) \cdot 10^{-7}$	1.02
Venus	$2.44783824(4) \cdot 10^{-6}$	$2.44783(17) \cdot 10^{-6}$	0.05
Mars	$3.2271560(2) \cdot 10^{-7}$	$3.226(2) \cdot 10^{-6}$	0.58
Jupiter	$9.54791898(16) \cdot 10^{-4}$	$9.547921(2) \cdot 10^{-4}$	1.01
Saturn	$2.85885670 \cdot 10^{-4}$	$2.858872(8) \cdot 10^{-4}$	1.91

Massenbestimmung mit Pulsaren: Champion et al. 2010

Tests mit Pulsaren



Gravitationswellen
→ nächster Teil

Bild: Weisberg et al.
2010

Tests mit Pulsaren

Gravitationswellen → mehr dazu in der nächsten Vorlesung!