

**Gravitationslinsen
Global Positioning System
Gravitationswellen**

Allgemeine Relativitätstheorie

Relativistisches Äquivalenzprinzip



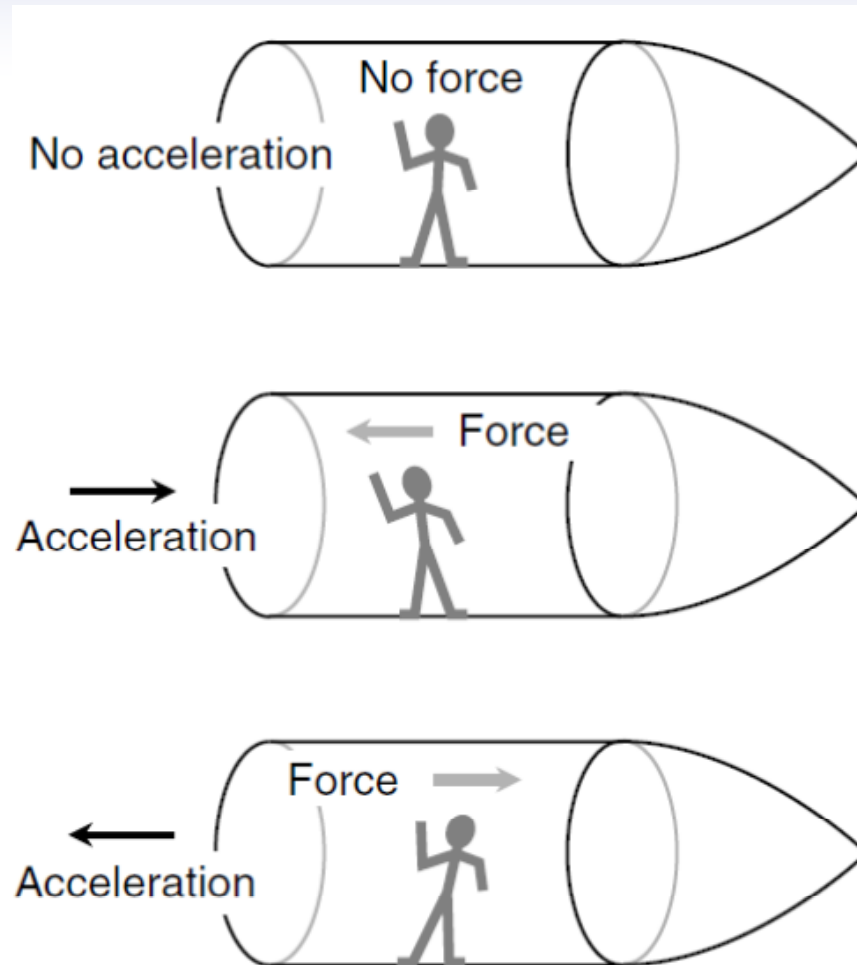
seen from outside



seen from merry-go-round

Newton 2

Raketenphysik

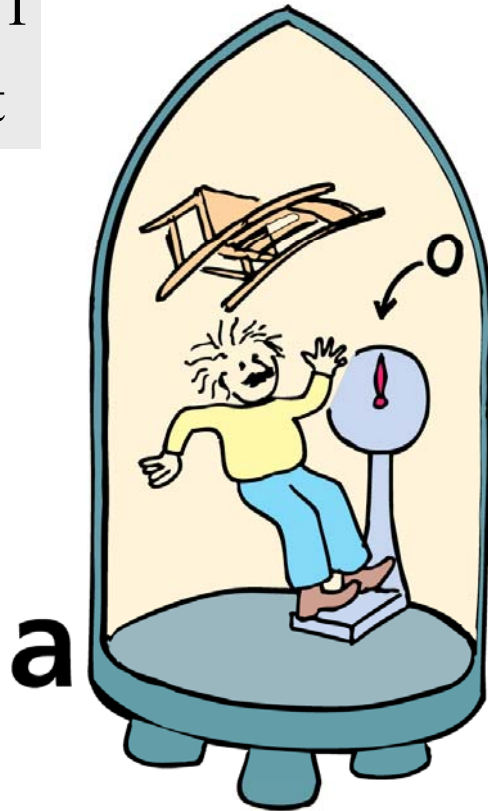


Symptome

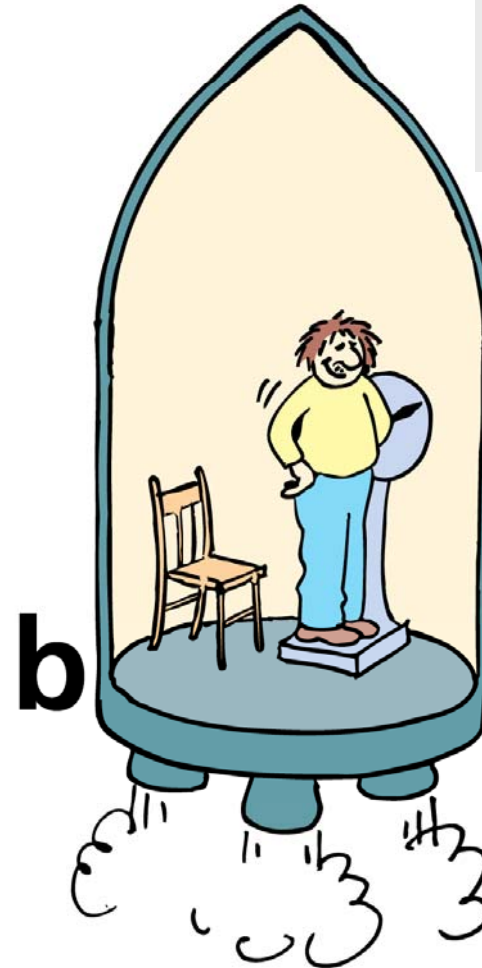
- auf einen Körper in einem Raumschiff wirkt **KEINE** Kraft, wenn die Rakete **NICHT** beschleunigt
- beschleunigt die Rakete **WIRKT** auf den Körper eine Kraft

Einsteinsches Äquivalenzprinzip

Newton 1
Trägheit



Newton 2
Beschleunigung

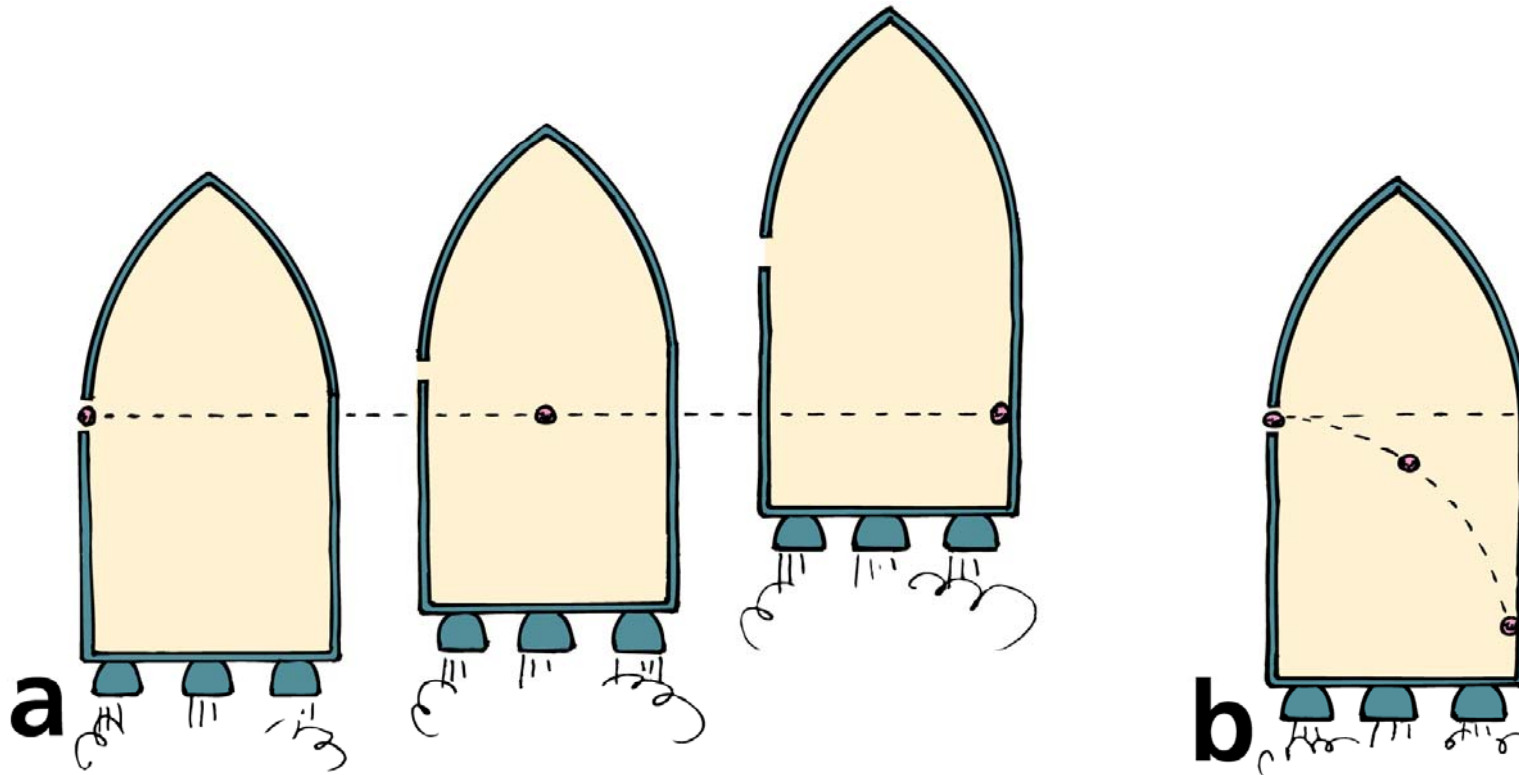


Diagnose

Beobachter in abgeschlossenem Labor kann durch kein Experiment feststellen, ob er sich in Schwerelosigkeit fernab von Massen befindet oder im freien Fall

Stein-ART

Ruhender Beobachter beobachtet Vorgang und kommt zu dem Schluss
Beschleunigung der Rakete ist Ursache

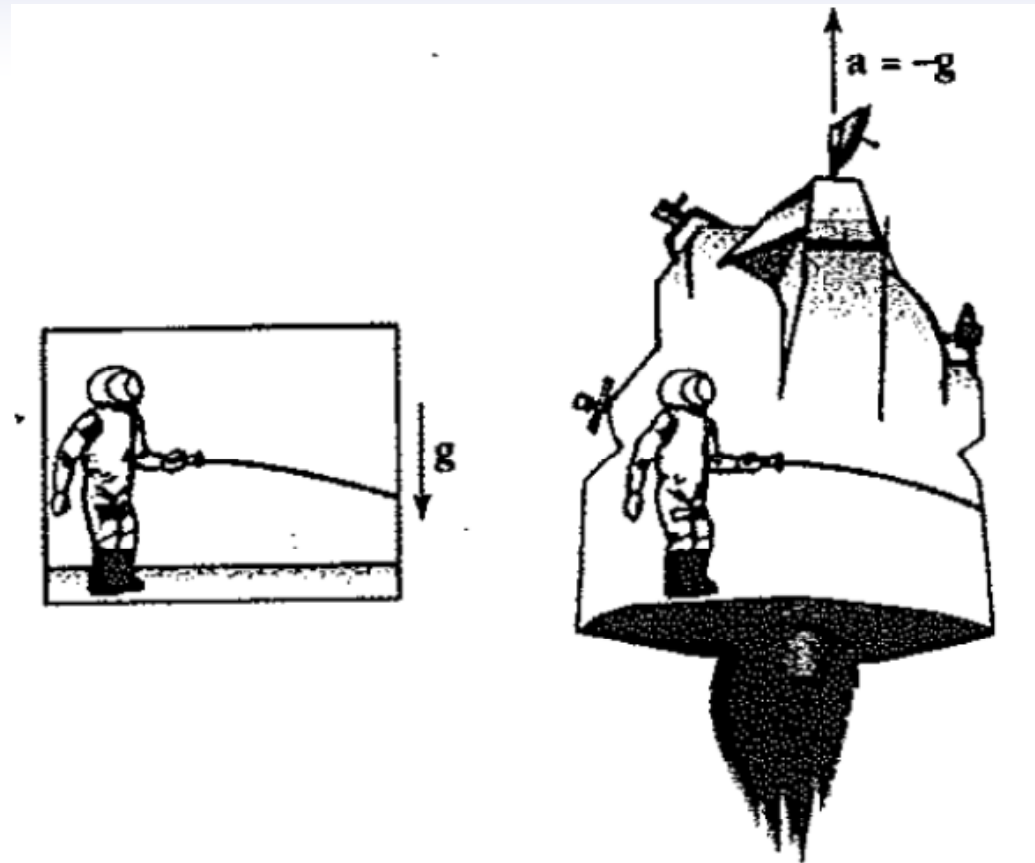


Beobachter in Rakete beobachtet Vorgang und kommt zu dem Schluss
Gravitation ist die Ursache für die Ablenkung des Steins

Diagnose

Für Beobachter im bewegten Bezugssystem fällt Stein aufgrund der Gravitation

Photon-ART



Diagnose

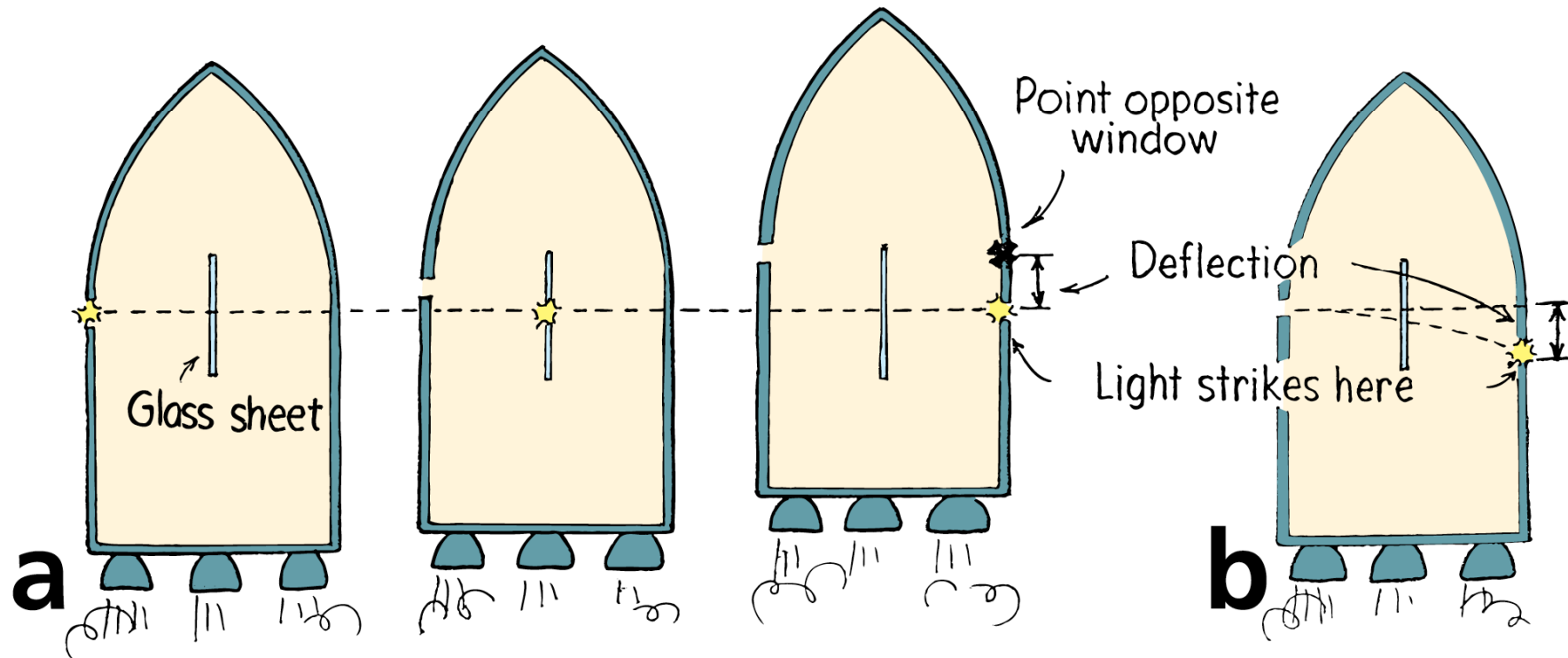
- Beobachter in optisch isoliertem Bereich beobachtet Ablenkung eines Lichtstrahl
- Vermutung, dass Effekt durch eine Beschleunigung zustande kommt
- tatsächlich ist Phänomen Gravitation für Verhalten Lichtstrahl verantwortlich
- Beobachter kann in Experiment nicht zwischen Beschleunigung und Gravitation unterscheiden

Photon-ART

Licht in Rakete

Symptome

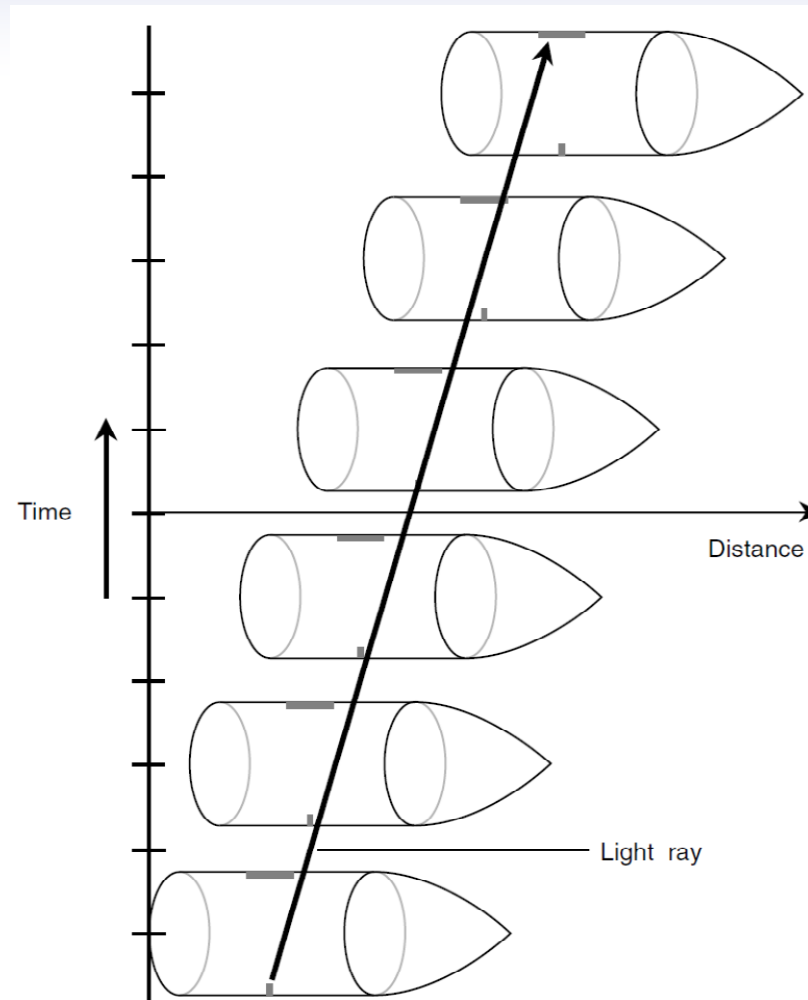
- die Lichtgeschwindigkeit ist **ENDLICH**
- für Beobachter im bewegten Bezugssystem wird der Lichtstrahl durch **Gravitation** abgelenkt



Diagnose

Jede in einem Inertialsystem geradförmig und gradlinig verlaufende Bewegung (Lichtstrahl) verläuft in einem quer zu diesem beschleunigten System auf einer gekrümmten Bahnkurve

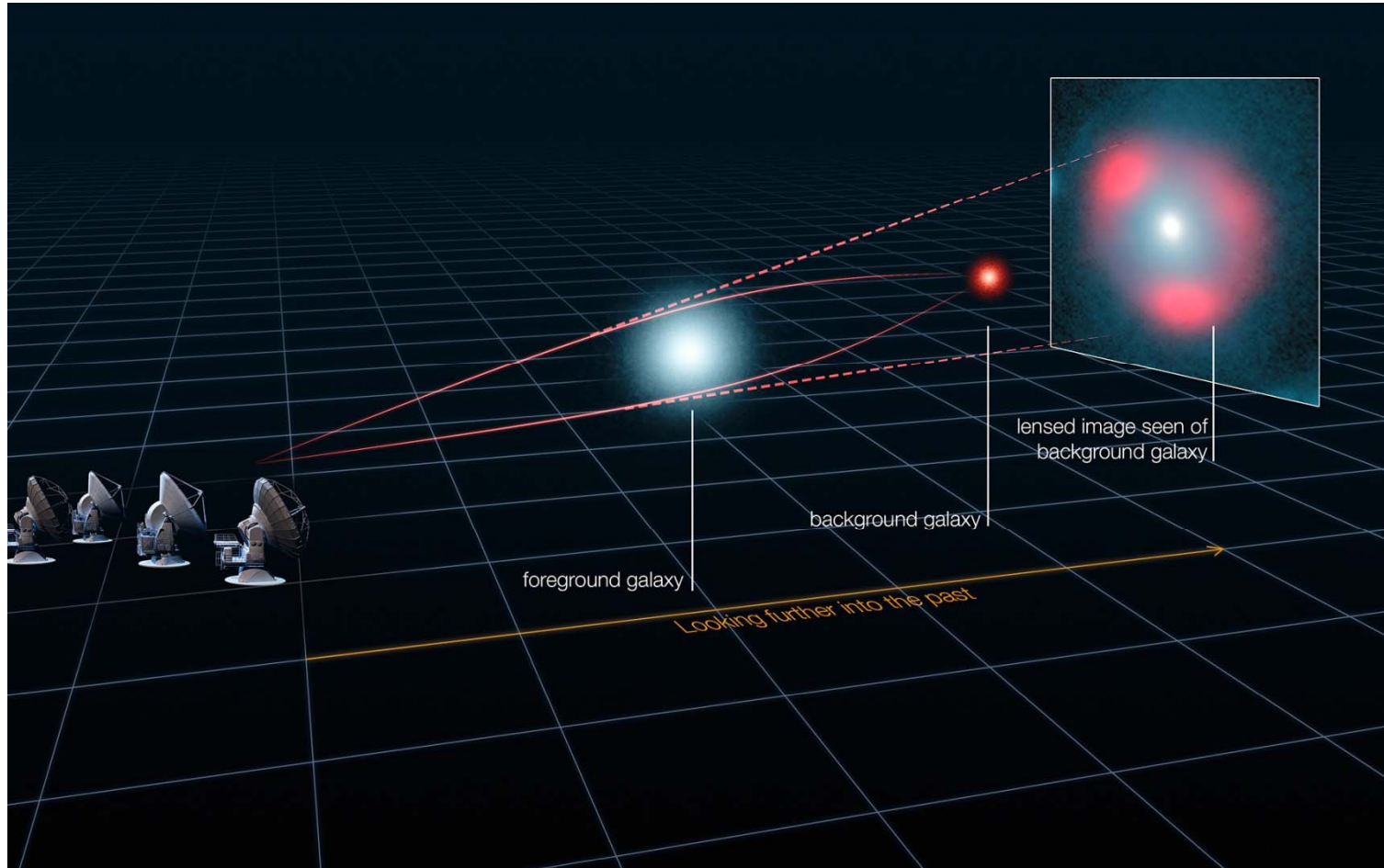
Photon-ART Licht in Rakete



Diagnose
Gerader Weg eines Lichtstrahls in beschleunigender Rakete aus Sicht ruhenden Beobachters

Thema ART

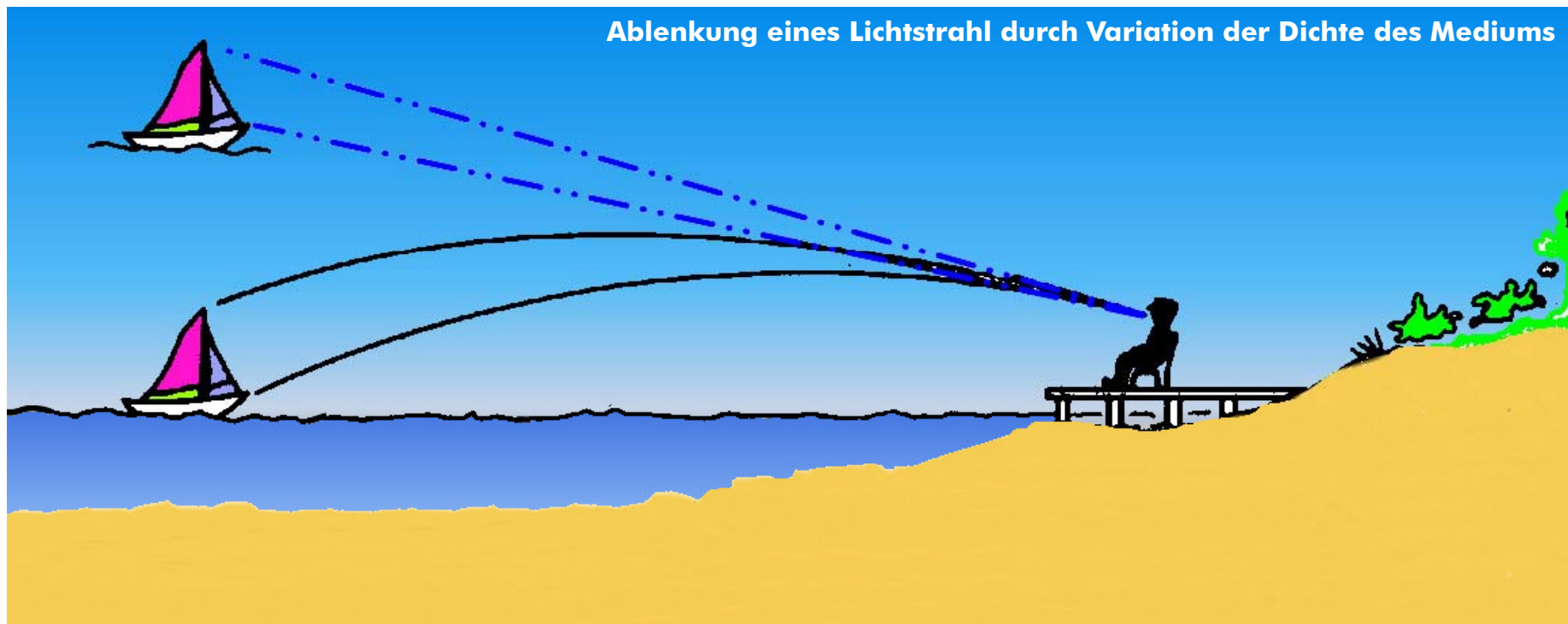
Gravitationslinsen





Klassische Optik

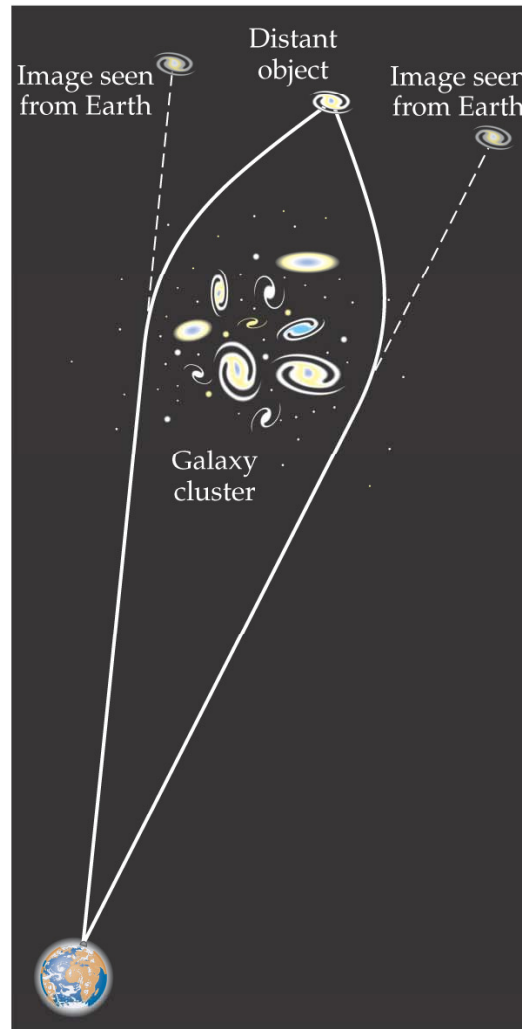
Fata Morgana



Diagnose

Lichtstrahl nimmt nach dem Huygenschem Prinzip stets kürzesten Weg

Gravitation Fata Morgana



Diagnose

Ablenkung eines Lichtstrahls durch Gravitation widerspricht den Erkenntnissen der Optik

Gravitationslinse

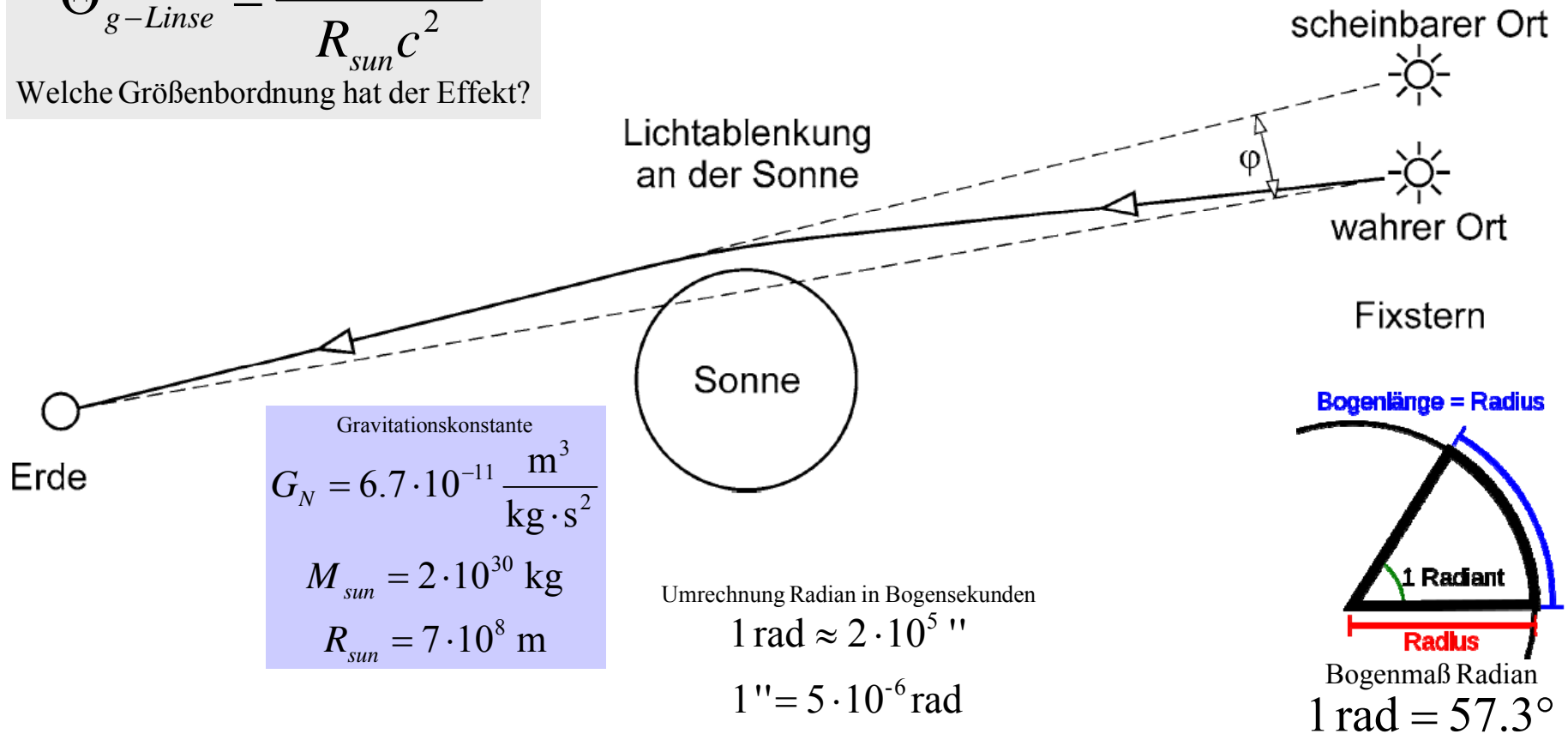
Symptome

Lichtstrahlen, die an massereichem Objekt vorbeilaufen, werden um 1 Bogensekunde abgelenkt

Maximaler Ablenkwinkel in Radian

$$\Theta_{g-Linse} = \frac{4G_N M_{sun}}{R_{sun} c^2}$$

Welche Größenordnung hat der Effekt?

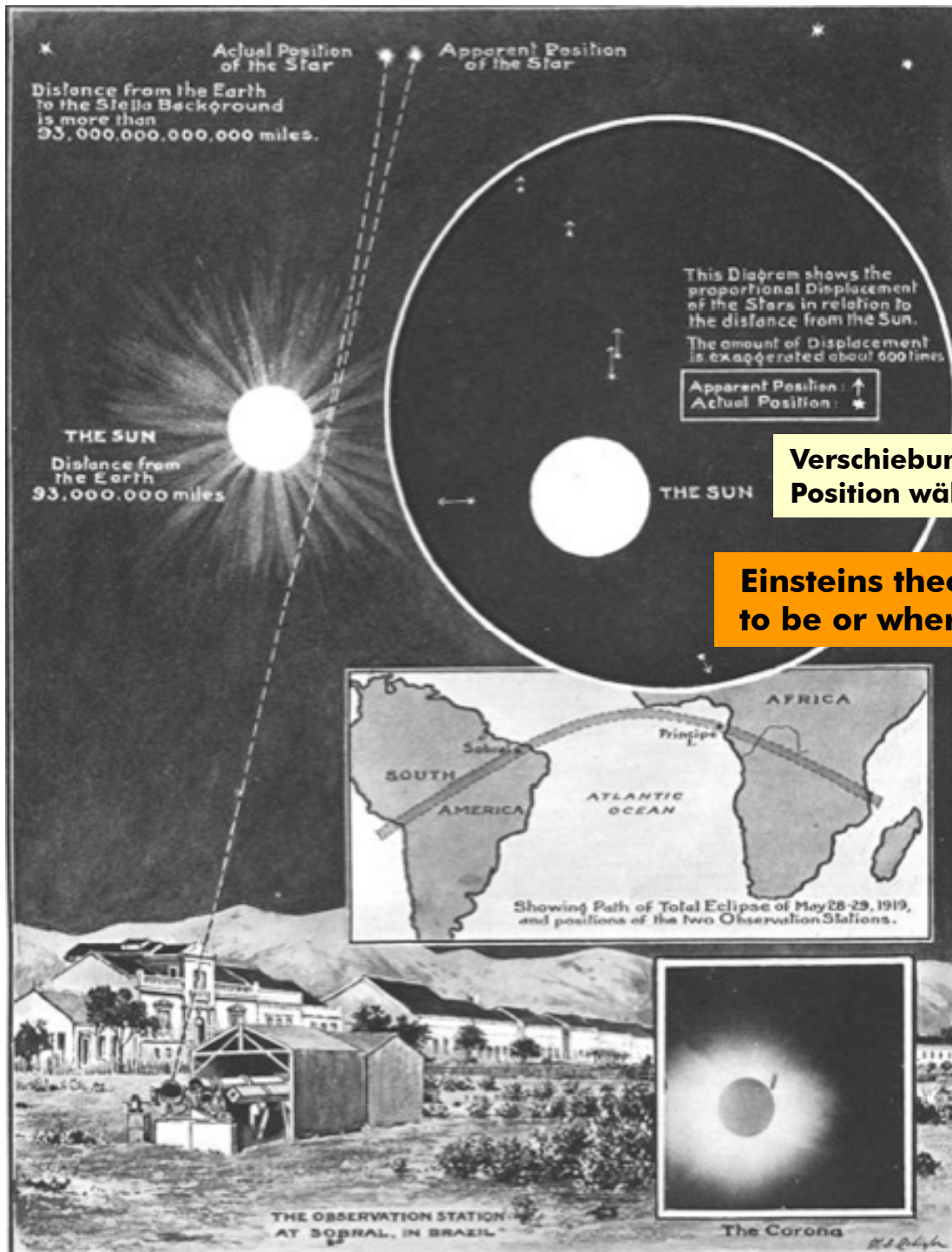


Solar eclipse

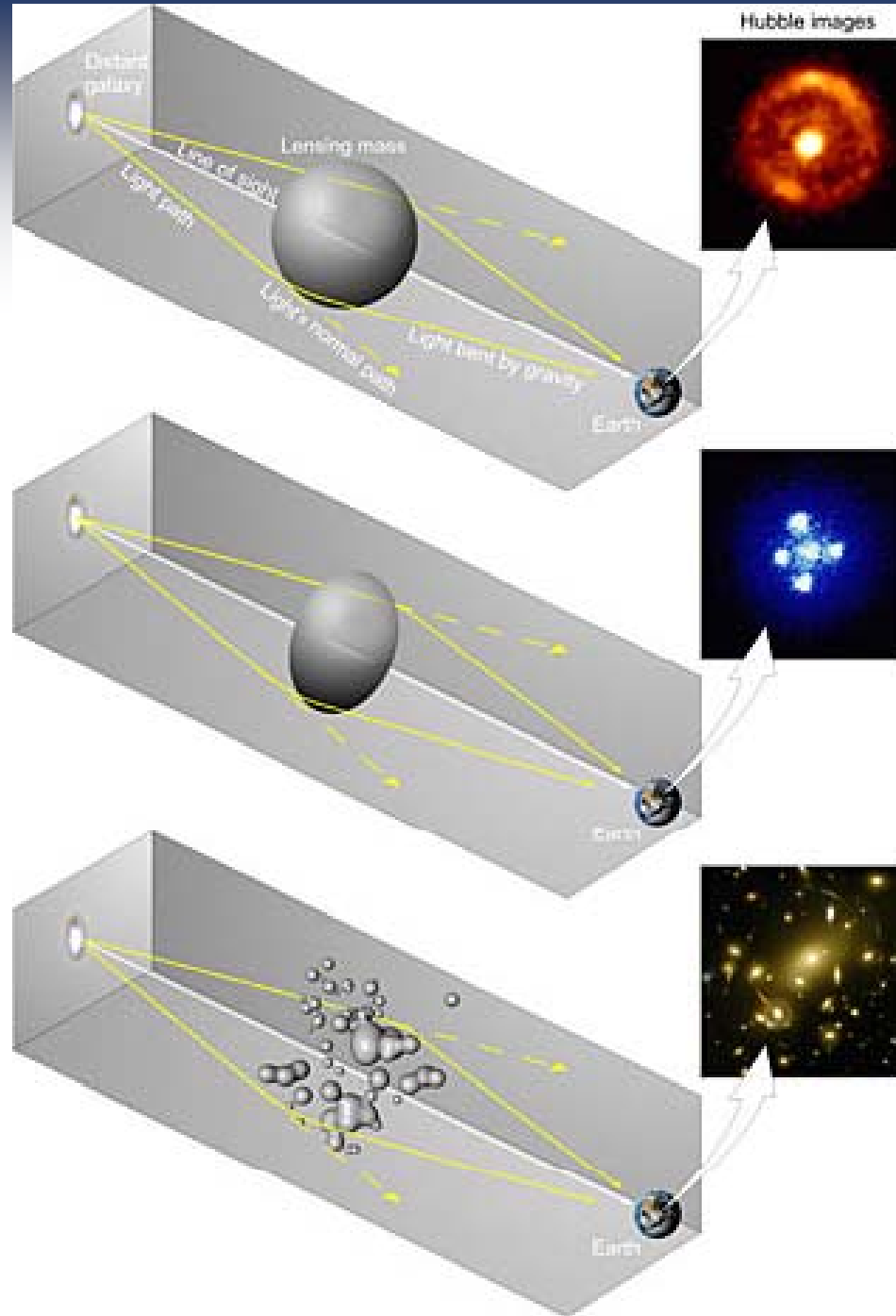
29 May 1919

Verschiebung der Sterne in Bezug auf ihre tatsächliche Position während der Sonnenfinsternis 1919

Einsteins theory triumphs. Stars not where they seemed to be or where calculated to be, but nobody need worry



Arthur Stanley Eddington
1882-1944



Gravitationslinsen Typen

Gravitationslinsen

Natürliche Teleskope

Symptome

- **Galaxienhaufen Abell (Sternbild Drache) etwa 2 Milliarden Lichtjahre entfernt**
- **Galaxien erscheinen auf Aufnahme gelblich, typisch für alte Sterne**
- **massereiche, elliptische Galaxien ballen sich im Haufenzentrum**
- **kleinere Haufenmitglieder im gesamten Blickfeld**



Galaxy Cluster Abell 2218
Hubble Space Telescope • WFPC2

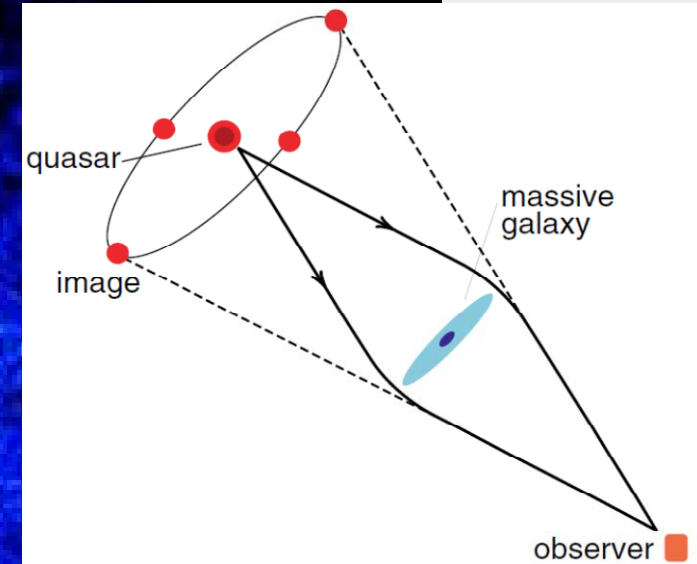
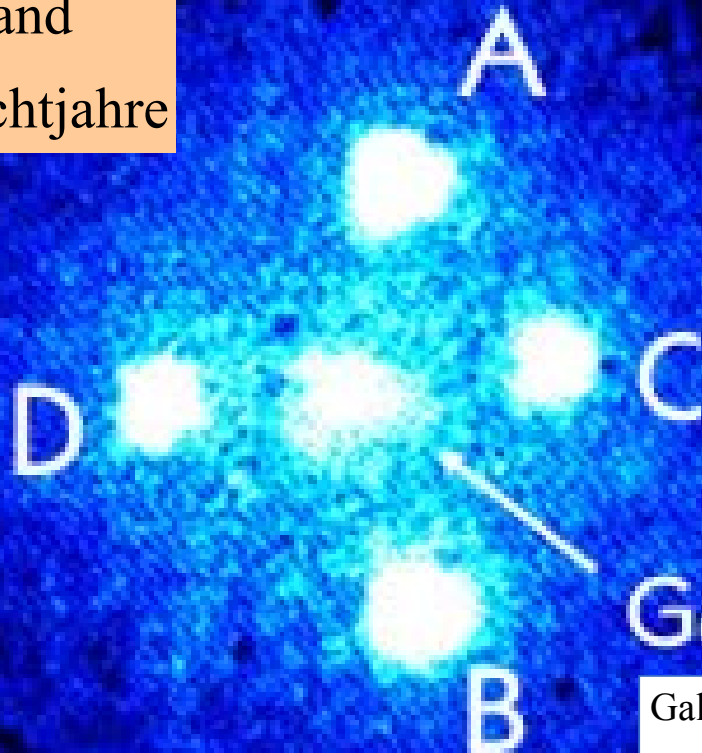
NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI, ST-ECF) • STScI-PRC00-08

Diagnose

Farbige Lichtbögen stammt von jungen Galaxien 6 Milliarden Lichtjahre hinter Abell 2218

Gravitationslinsen Einstein Kreuz

Abstand
 $4 \cdot 10^6$ Lichtjahre



Lensing
Galaxy

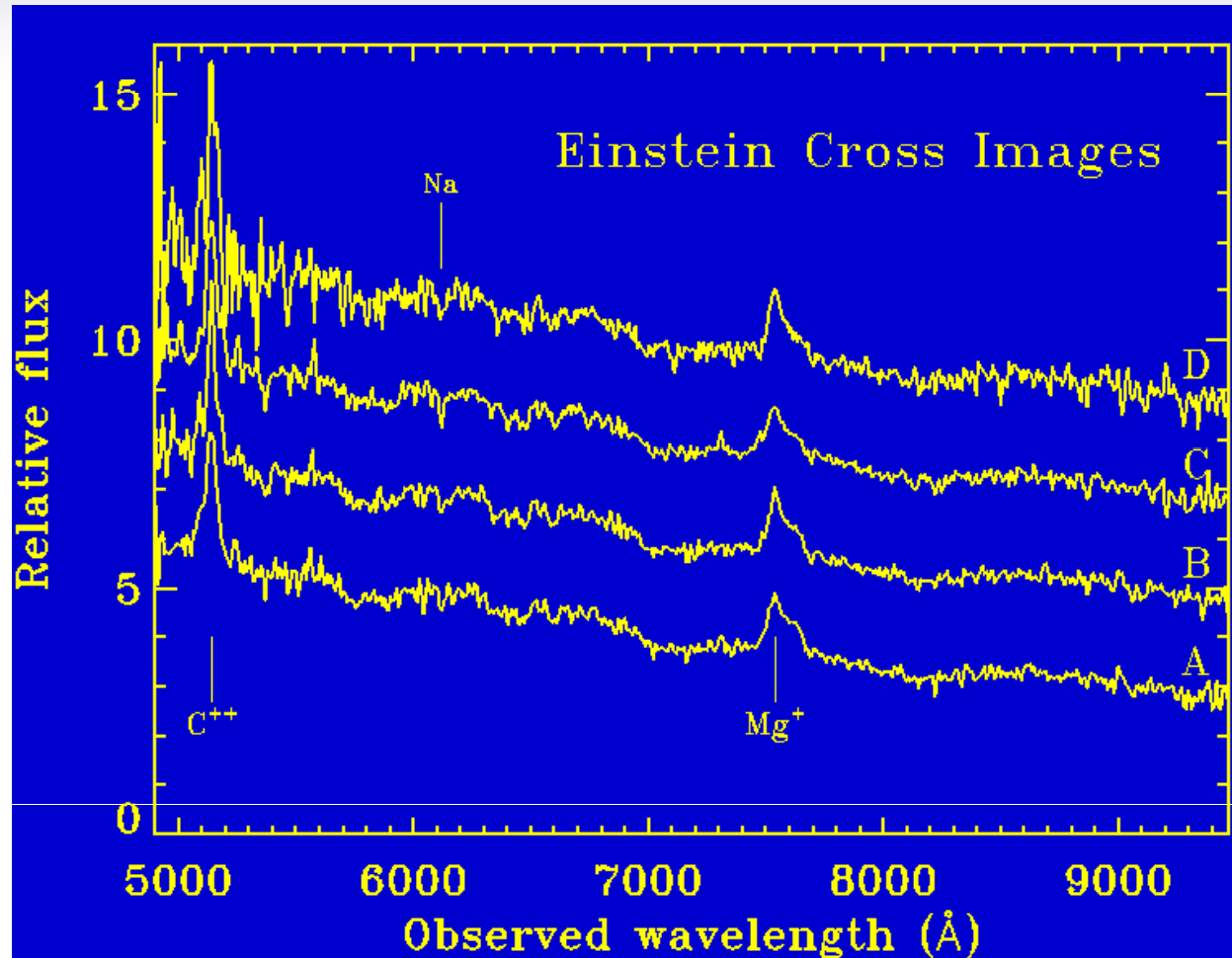
Galaxy Core

Galaxie, die Gravitationslinse verursacht
PGC 69457

Diagnose

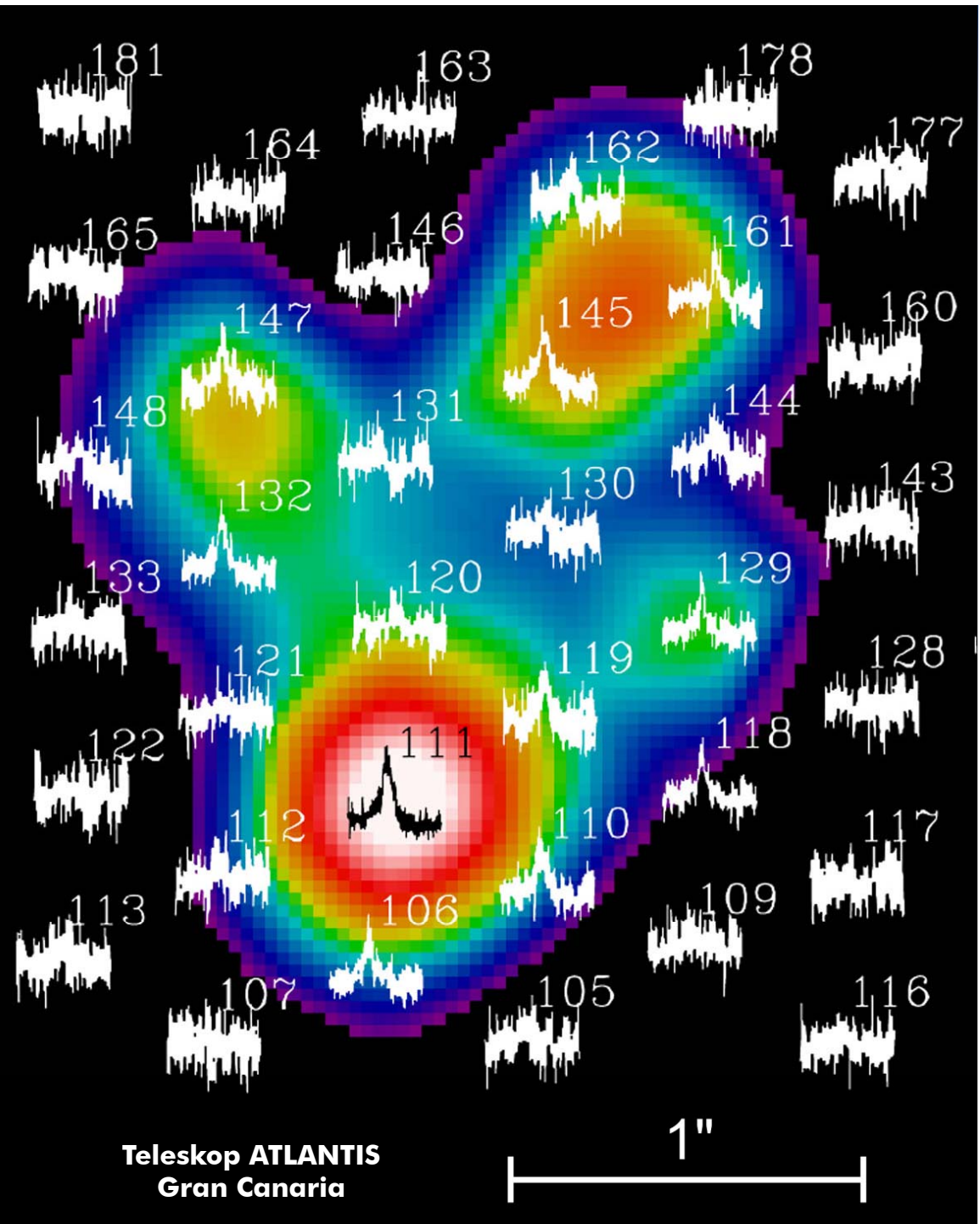
Lichtquelle ist ein weit entfernter Quasar, der durch Galaxie mehrfach abgebildet wird

Gravitationslinsen Einsteinkreuz



Diagnose
Spektrum der Lichtquellen zeigt, dass es sich um Abbilder ein und desselben Quasars handelt

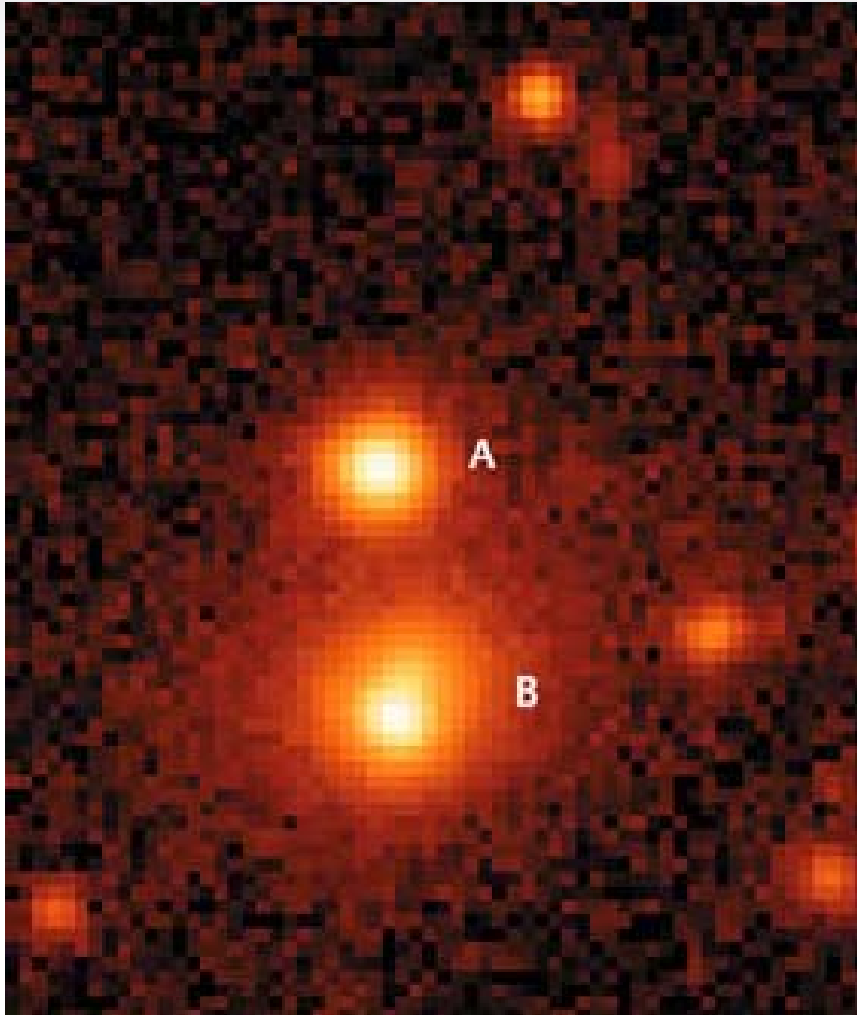
Gravitationslinsen
Extrablatt
Einsteinkreuz



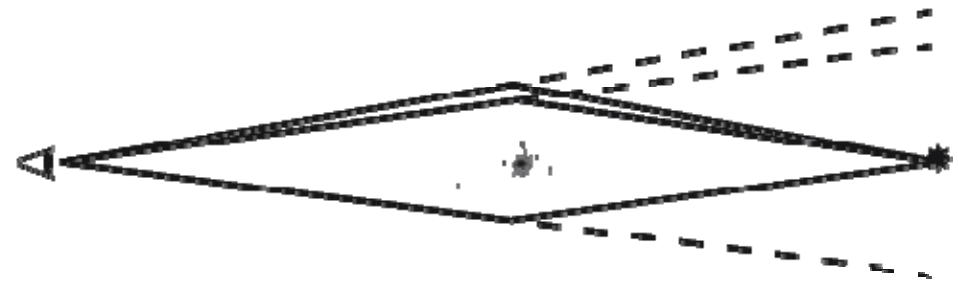
Diagnose
Spektrum des Quasars im Infraroten

Lichtstrahlen breiten sich gradlinig aus

Gravitationslinsen



Mehrfachbild weit entfernten Quasars

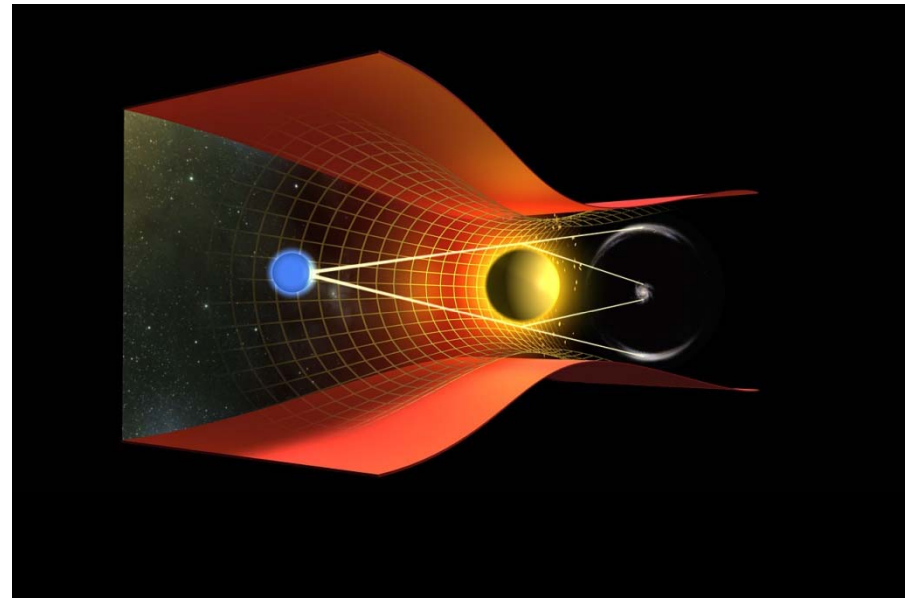
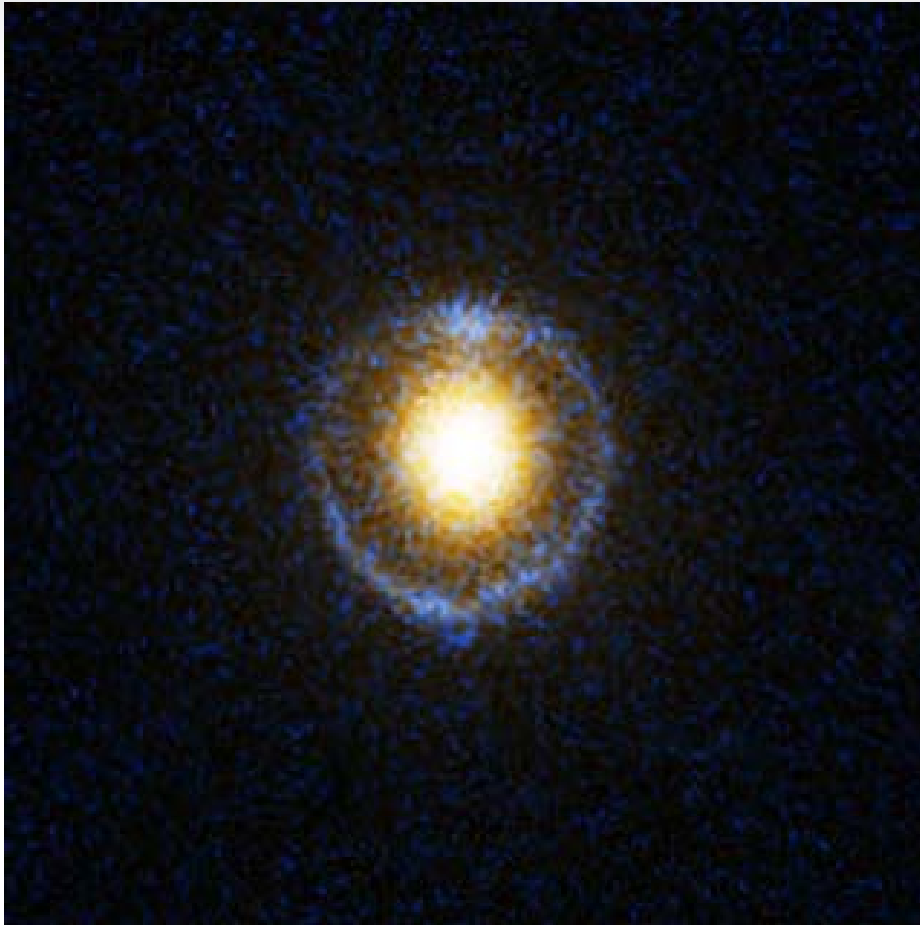


Diagnose

Lichtablenkung durch das starke Gravitationsfelder führt zu Linsenfehlern ähnlich Optik

Gravitationslinsen

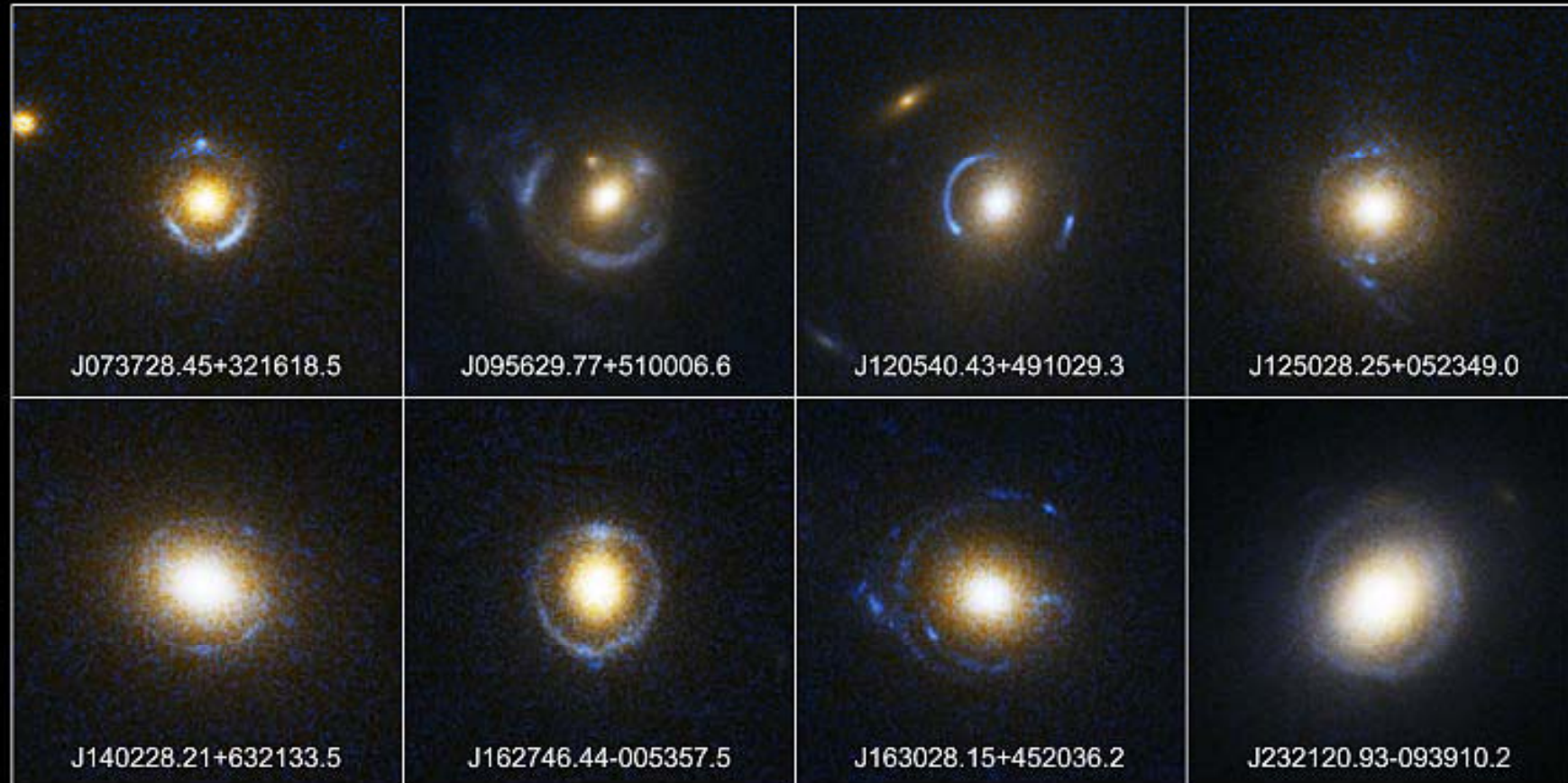
SDSS J162746.44-005357.5



Diagnose

- Einsteinring entsteht durch zwei Galaxien, die nahezu perfekt hintereinander stehen
- sichtbare vordere Galaxie rötlich-weiß im Vordergrund
- blauer Ring stammt von verdeckter doppelt so weit entfernter Galaxie

Gravitationslinsen



Einstein Ring Gravitational Lenses
Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

NASA, ESA, A. Bolton (Harvard-Smithsonian CfA), and the SLACS Team

STScI-PRC05-32

Diagnose

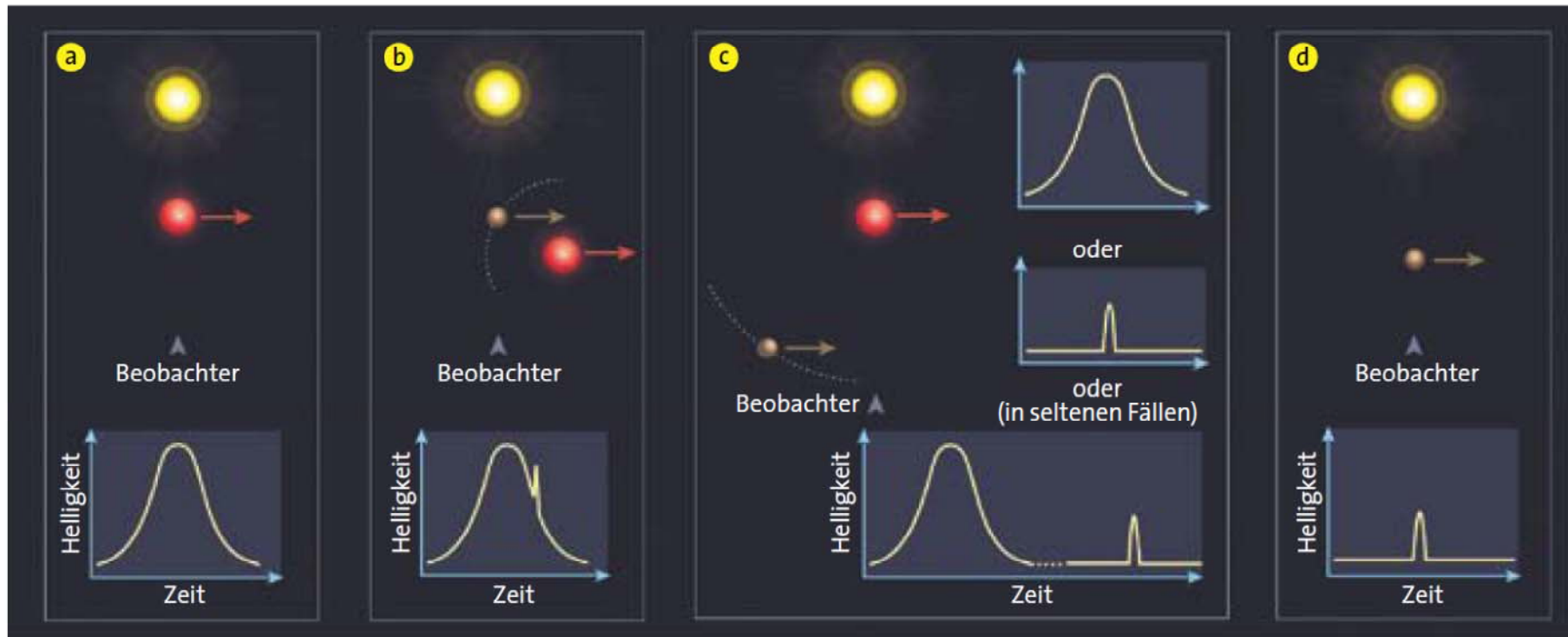
Gravitationslinsen am Sternenhimmel sind keine Ausnahme

Exoplaneten

Mikro-Gravitationslinse

Symptome

- Stern passiert entfernte Lichtquelle
- entfernter Stern erscheint durch Gravitationslinse kurzzeitig heller



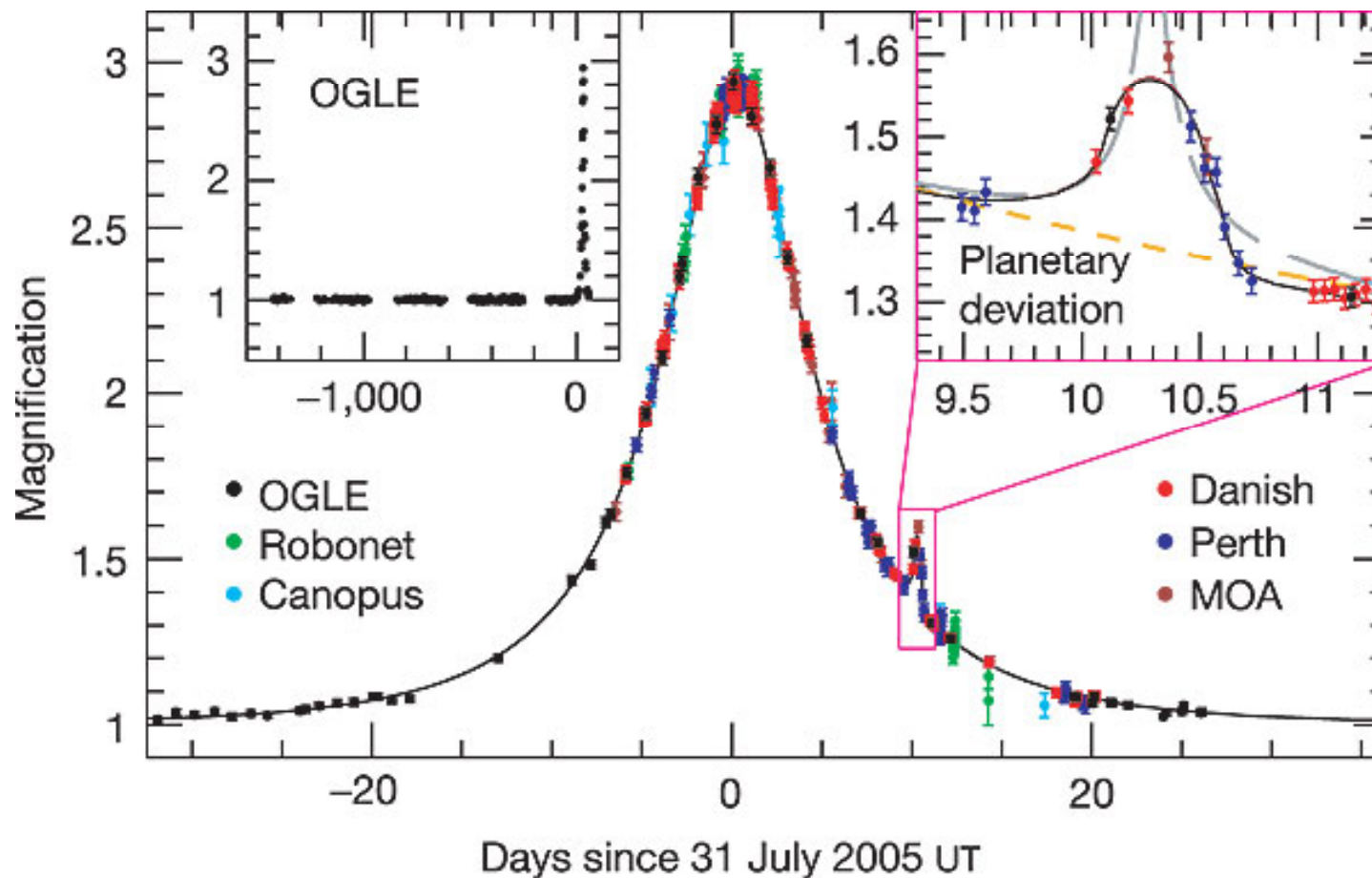
Diagnose

- Exoplanet um Stern erzeugt zusätzliche Helligkeitsveränderung
- Signal hängt vom Orbit um Sonne ab
- einzelner Exoplanet liefert ebenfalls Signal über Gravitationslinseneffekt

Exoplaneten Mikro-Gravitationslinse

Beaulieu et al. Nature 439, 437 (2006)

Discovery of a cool planet of 5.5 Earth masses through gravitational microlensing

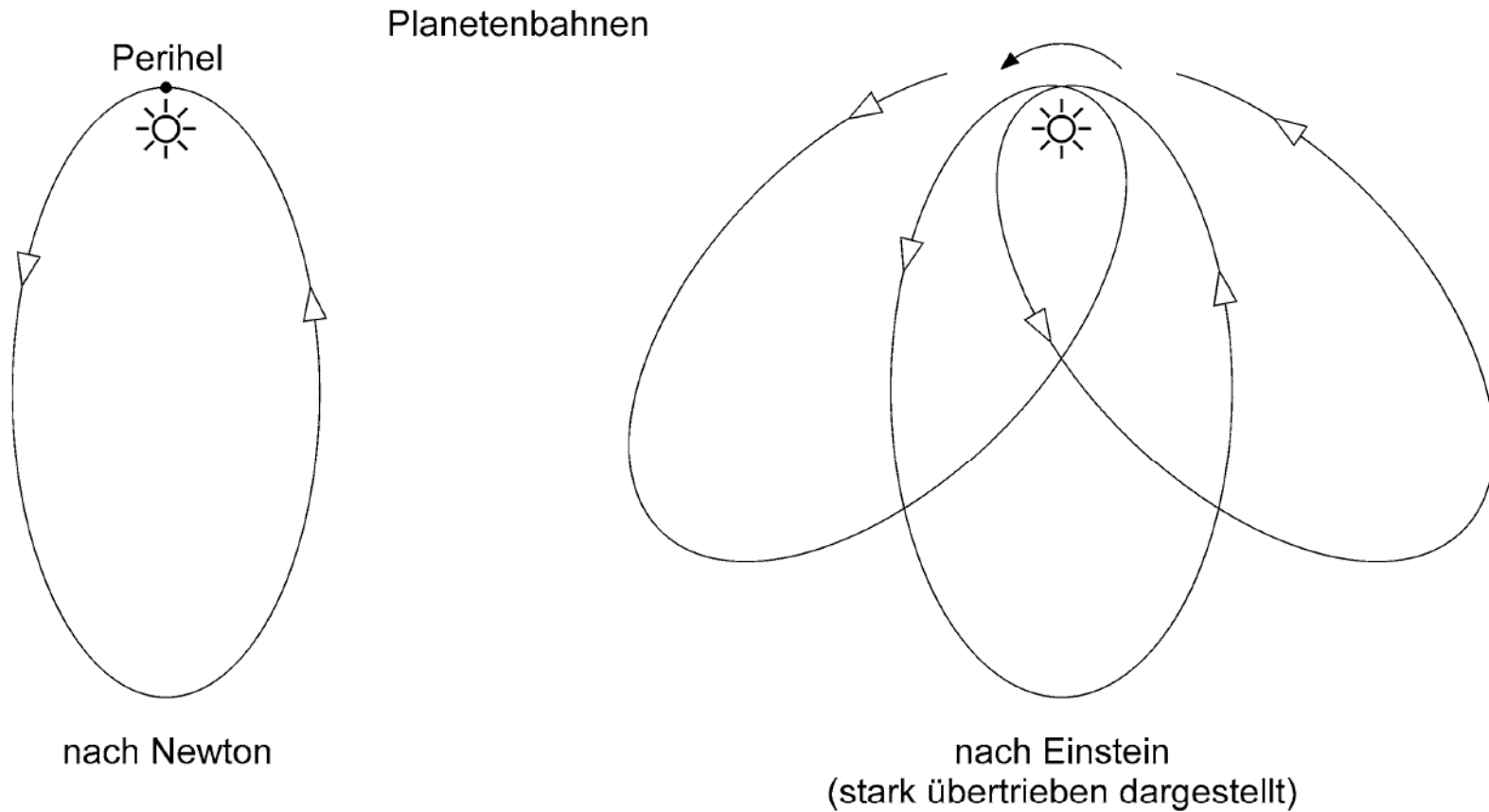


ART-Phänomene

Merkur

Symptome

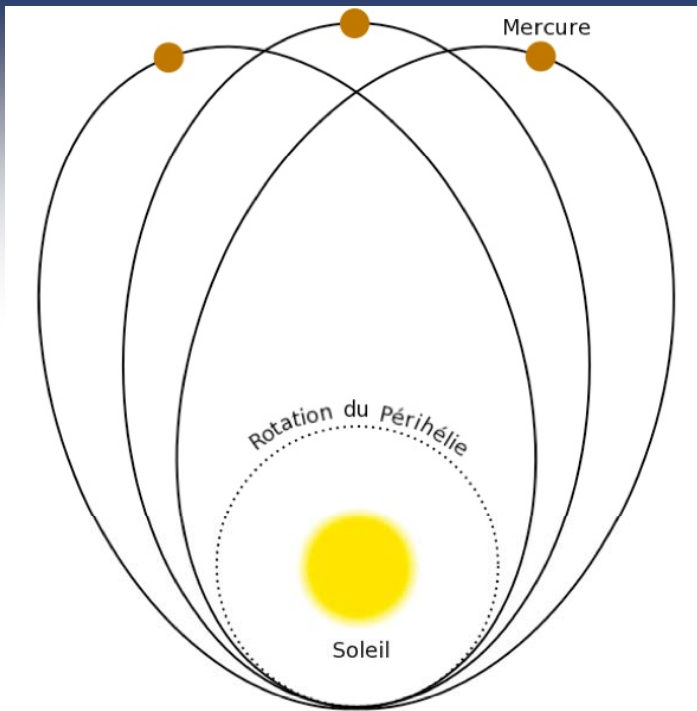
- nach Newton bewegen sich Planeten auf stabilen Orbits
- Bahnen der äußeren Planeten können über lange Zeiträume vorausgesagt werden
- innere Planeten zeigen Abweichungen vom Keplerschen Verhalten



Diagnose

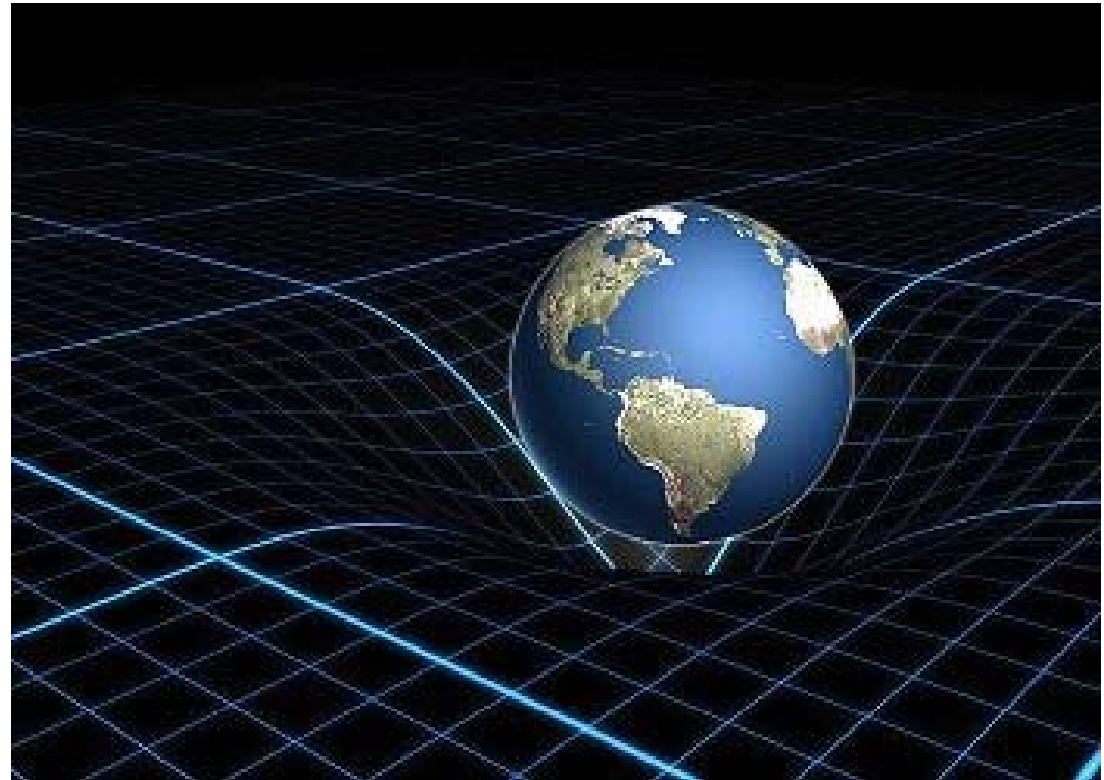
In der Nähe der Sonne wird Bahn der Planeten durch ART modifiziert

ART-Phänomene Gravitation



Korrekturfaktor zu Newtons Gravitation

$$\gamma_{gravitation}^{ART} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{2G_N M_{object}}{R_{distance} c^2}}}$$



Diagnose

- bei großem Abstand vom Himmelskörper ist Korrekturfaktor EINS (Newton gilt)
- in geringer Entfernung wird Faktor deutlich größer als EINS
- Gravitationsfeld kann als Verbiegung der Raum-Zeit verstanden werden
- selbstverstärkender Prozess da Energieform

Thema ART

Zeitrechnung





ART-Phänomene

Uhren gehen langsamer

Symptome

- Beobachter synchronisiert Uhren weitab von Himmelskörper
- Uhr in Richtung Himmelskörper fallen lassen
- Geschwindigkeit der Uhr $v(R)$ nimmt stetig zu

potenzielle in kinetische Energie

$$G_N \frac{M_{sun} m_{Uhr}}{R} = \frac{1}{2} m_{Uhr} v_{Uhr}^2$$

$$v_{Uhr}^2 = \frac{2G_N M_{sun}}{R}$$

Geschwindigkeit im Abstand zur Sonne



SRT-Zeitdilatation

$$t_{bewegt} = \gamma_{SRT} t_{ruhend}$$

$$t_{bewegt} = \frac{t_{ruhend}}{\sqrt{1 - \frac{v_{Uhr}^2}{c^2}}}$$

ART-Zeitdilatation aufgrund Gravitation

$$t_{bewegt} = \frac{t_{ruhend}}{\sqrt{1 - \frac{2G_N M_{sun}}{R \cdot c^2}}}$$

Diagnose

- Uhren im Gravitationsfeld gehen langsamer
- bewegte Uhr geht für ruhenden Beobachter durch relativistischen Dopplereffekt noch langsamer



ART auf Neutronenstern



Dichte der Materie in einem Neutronenstern

$$\rho_{NS} \approx 10^{17} \text{ kg/m}^3$$

Diagnose

In einem Hochhaus auf einem Neutronenstern würde im obersten Geschoss eines Hochhauses -statt einer Stunde im Eingangsbereich- viele Stunden vergehen



ART auf Neutronenstern



Dichte der Materie in einem Neutronenstern

$$\rho_{NS} \approx 10^{17} \text{ kg/ m}^3$$

Diagnose

Licht würde aufgrund der enormen Dichte im Gravitationsfeld eines Neutronenstern gefangen sein, sich um den Stern herumbewegen und man könnte deshalb seinen Hinterkopf sehen

Hafele und Keating 1971

Zeitdilatation REMIX

Symptome

- **Hafele und Keating fliegen 1971 mit einer Boing 747 zweimal um die Erde**
- **an Bord sind vier Atomuhren**
- **einmal in Ost- und einmal in Westrichtung**



Allgemeine Relativitätstheorie

$$T_{hoch} - T_{gering} = \frac{g \cdot h}{c^2} > 0.0 \text{ s}$$

Ostroute

$$\Delta T_{ART} = 144 \pm 14 \text{ ns}$$

$$\Delta T_{SRT} = -184 \pm 18 \text{ ns}$$

Flugzeit 41.4 Stunden bei 8900 m mittlerer Flughöhe

$$\Delta T_{ART+SRT} = 40 \pm 23 \text{ ns}$$

Westroute

$$\Delta T_{ART} = 179 \pm 18 \text{ ns}$$

$$\Delta T_{SRT} = 96 \pm 10 \text{ ns}$$

Flugzeit 48.6 Stunden bei 9400 m mittlerer Flughöhe

$$\Delta T_{ART+SRT} = 273 \pm 21 \text{ ns}$$

Diagnose

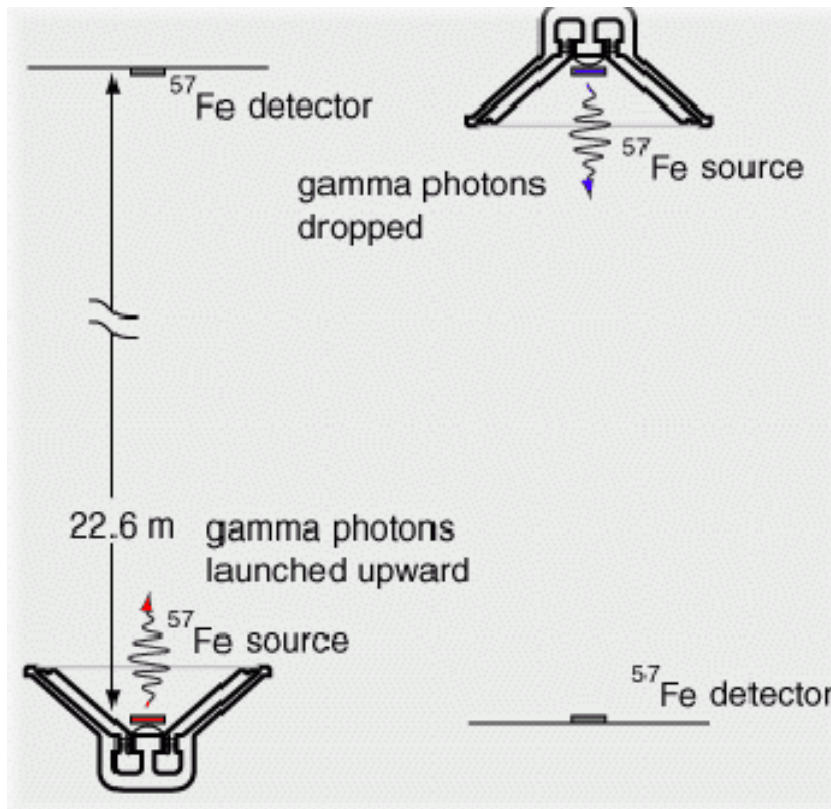
- **neben Effekten der SRT beeinflusst die Gravitation den Gang der Atomuhren**
- **berechnet wurde in Ostrichtung 59+/-10 ns und in Westrichtung 273+/-21**
- **erster Nachweis des Uhrenparadoxons in einem makroskopischen Experiment**

Harvard Tower Experiment

Gewicht des Photons

Symptome

- Photonen bewegen sich im Gravitationsfeld der Erde
- ^{57}Fe emittiert hochenergetische Gammaphotonen bei 14.4 keV (hypergenaue Uhr)
- Mössbauer-Effekt bietet höchste spektrale Auflösung, um Rotverschiebung nachzuweisen



$$\Delta E_{pot} = mgh = \frac{E}{c^2} gh = (14.4 \text{ keV} \cdot 22.6 \text{ m}) \frac{g}{c^2}$$

$$\Delta E_{pot} = 3.5 \cdot 10^{-11} \text{ eV}$$

$$\left(\frac{\Delta E_{\gamma}}{E_{\gamma}} \right)_{down} - \left(\frac{\Delta E_{\gamma}}{E_{\gamma}} \right)_{up} = \frac{2 \cdot 3.5 \cdot 10^{-11} \text{ eV}}{14400 \text{ eV}}$$

Vorhersage ART

$$\left(\frac{\Delta E_{\gamma}}{E_{\gamma}} \right)_{down} - \left(\frac{\Delta E_{\gamma}}{E_{\gamma}} \right)_{up} = 4.9 \cdot 10^{-15}$$

$$\left(\frac{\Delta E_{\gamma}}{E_{\gamma}} \right)_{down} - \left(\frac{\Delta E_{\gamma}}{E_{\gamma}} \right)_{up} = (5.1 \pm 0.5) \cdot 10^{-15}$$

Experimentelles Ergebnis

Diagnose

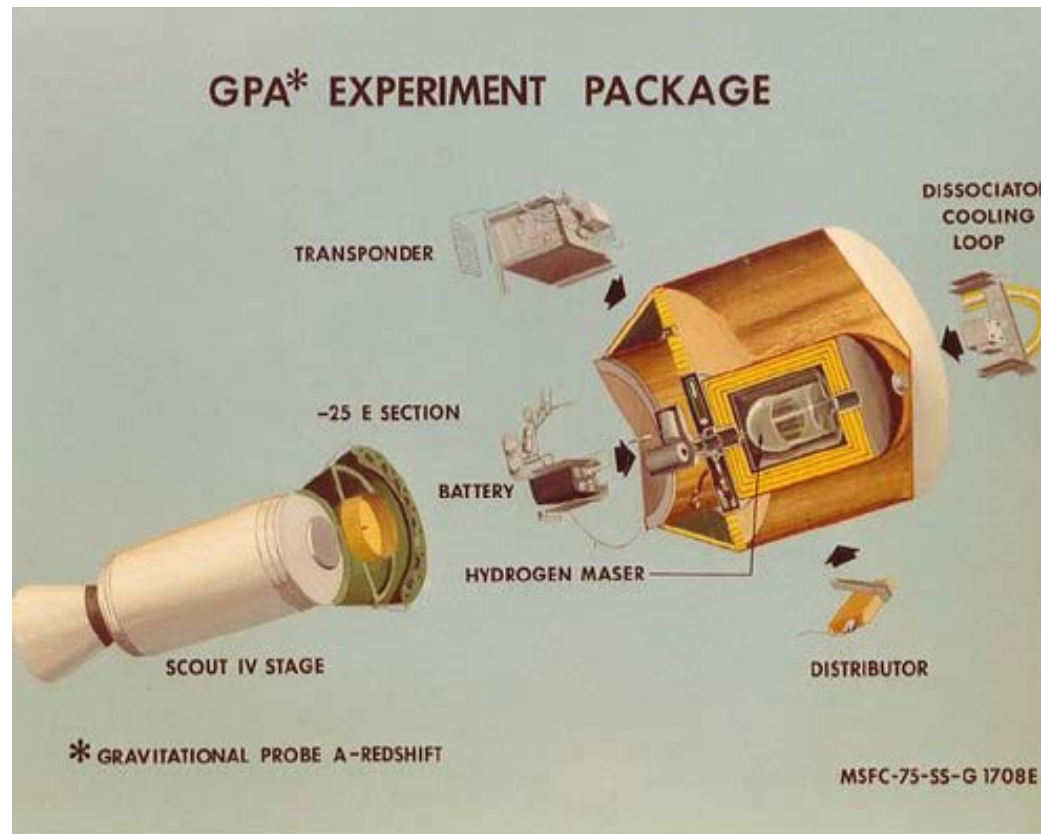
Photon erfährt im Gravitationsfeld eine Frequenzverschiebung

ART in space

Gravity Probe A

Symptome

- Satellit mit Atomuhr (atomic hydrogen maser) senkrecht ins All bis auf 10 000 km geschossen
- Abtastung des Einflusses Gravitationspotenzials auf Uhren
- Test der allgemeinen Relativitätstheorie, dass Uhren auf der Erde langsamer gehen



Diagnose

The agreement of the observed relativistic frequency shift with prediction is at the 70×10^{-6} level.

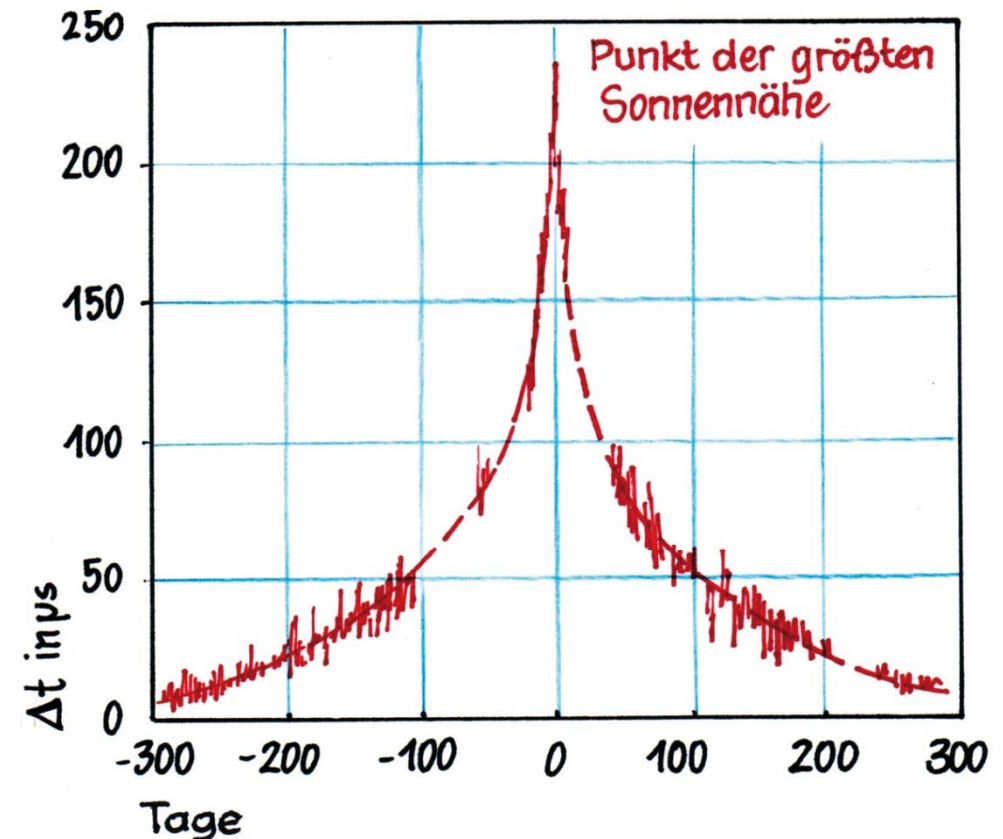
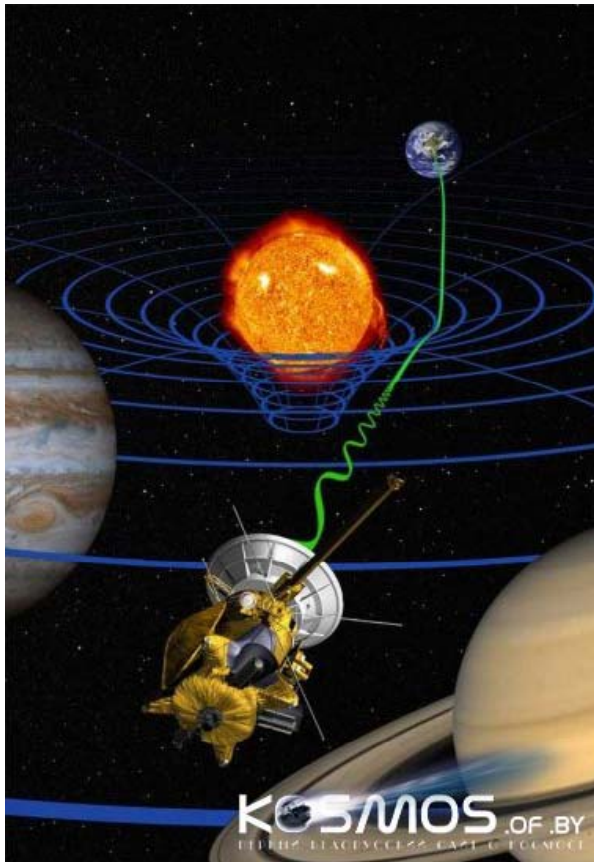
Vessot et al. Test of Relativistic Gravitation with a Space-Borne Hydrogen Maser, Phys. Rev. Lett. 45, 2081 (1980)

Viking Lander Spacecraft 1976

Shapiro-Effekt

Symptome

Gravitation der Sonne *verbiegt* Radiosignal der Raumsonde



Diagnose

- Beobachtetes Verhalten wird durch **ZWEI** Effekte verursacht
- Lichtausbreitung verlangsamt sich im Gravitationsfeld der Sonne
- Photonen legen im gekrümmten Raum größere Wegstrecke zurück

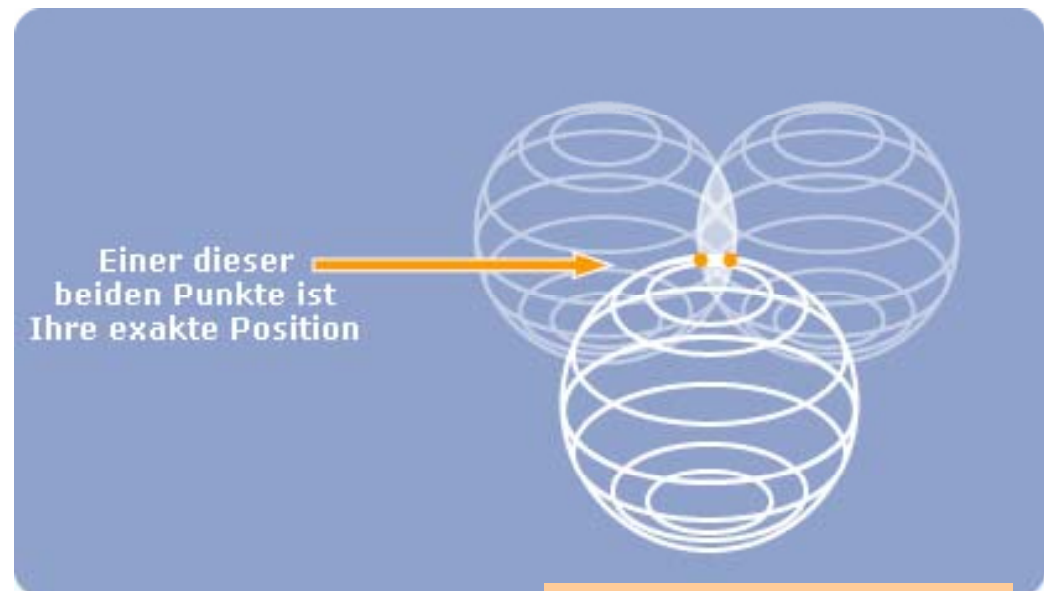
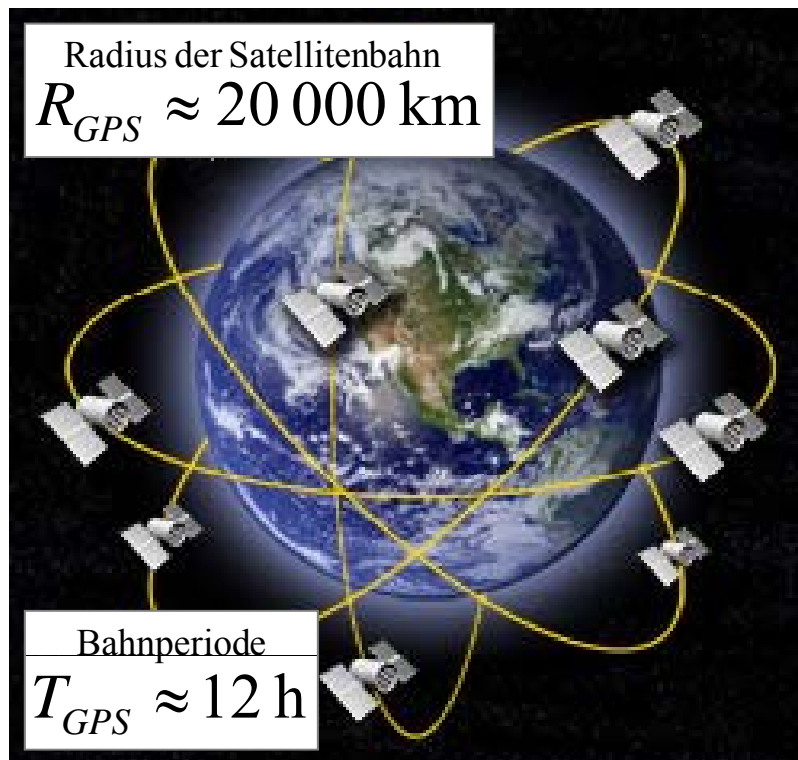
Global Positioning System GPS

Symptome

- insgesamt **24 Satelliten**
- je **VIERT** auf **SECHS** unterschiedlichen **Orbitalbahnen**
- **Atomuhren** auf **JEDEM** Satelliten

Genauigkeit der Atomuhren

$$\frac{t}{\Delta t} \approx 10^{13}$$



Entfernung zum Satelliten

$$x_{\text{Empfänger}} = ct_{\text{Laufzeit}}$$

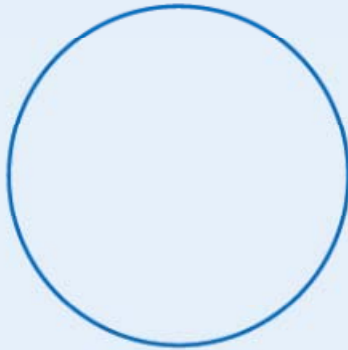
Diagnose

- mindestens **VIERT** Satelliten sind jederzeit **DIREKT** sichtbar auf jedem Punkt der Erde
- Bestimmung der Position des Empfängers durch **TRIANGULATION**
- Satellit überträgt **GENAUE ZEIT** und **POSITION**

Wo bin ich? Triangulation

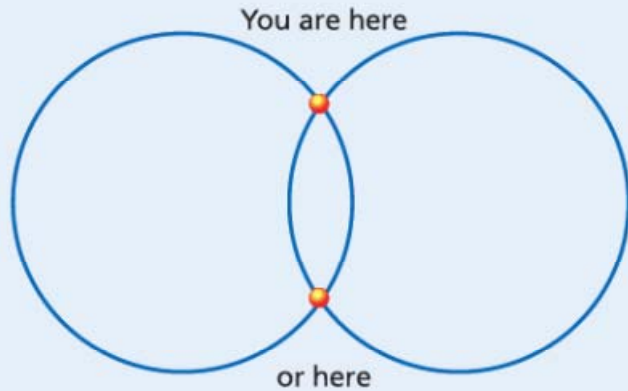
A GPS Signal from one satellite

Extrablatt



You are somewhere on the circumference of this circle

B Signals from two satellites



C Signals from three satellites



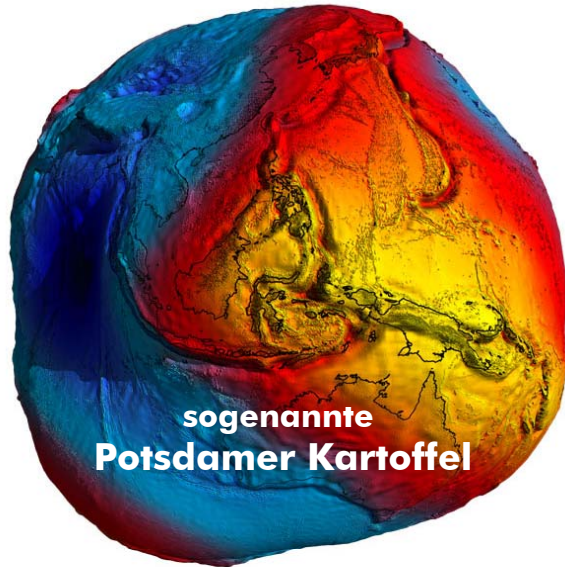
Global Positioning System

SRT-GPS

Symptome

Geforderte Genauigkeit von 15 m in Position auf Erde

$$t_{\text{Zeitauflösung}} = \frac{\text{Positionsgenauigkeit}}{c} = \frac{x_{\text{Empfänger}}}{c} = \frac{15\text{m}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 50 \cdot 10^{-9} \text{ s} = 50\text{ns}$$



$$\Delta t_{\text{Empfänger}} = \gamma_{\text{SRT}} \Delta t_{\text{orbit}}$$

$$\frac{\Delta t_{\text{orbit}}}{\Delta t_{\text{Empfänger}}} = \sqrt{1 - \frac{v_{\text{Satellit}}^2}{c^2}} \approx 1 - \frac{1}{2} \frac{v_{\text{Satellit}}^2}{c^2}$$

Zeitdilatation führt zu Frequenzverschiebung

$$\frac{\Delta v_{\text{GPS}}}{v_{\text{GPS}}} \approx 5 \cdot 10^{-11}$$

Bahngeschwindigkeit des Satelliten

$$v_{\text{Satellit}} = \omega_{\text{orbit}} r_{\text{orbit}}$$

$$v_{\text{Satellit}} \approx \frac{2\pi}{12 \cdot 3600 \text{ s}} 2 \cdot 10^7 \text{ m}$$

$$\frac{v_{\text{Satellit}}}{c} \approx \frac{3 \cdot 10^3 \text{ m/s}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} \approx 10^{-5}$$

$$24 \text{ h} \frac{\Delta v_{\text{GPS}}}{v_{\text{GPS}}} \approx 4.3 \cdot 10^{-6} = 4.3 \mu\text{s}$$

Diagnose

- Rotation der Erde muss berücksichtigt werden
- Keplerbahnen sind elliptisch
- Satellitenbahnen sind beeinflusst durch Gravitation von Mond und Sonne
- Erde ist nicht rund und hat keine gleichmäßige Dichte, wodurch Gravitation nicht konstant
- insgesamt ergibt sich aus SRT, das Uhren auf der Erde um 7 ms/ Tag schneller gehen

Global Positioning System ART-GPS

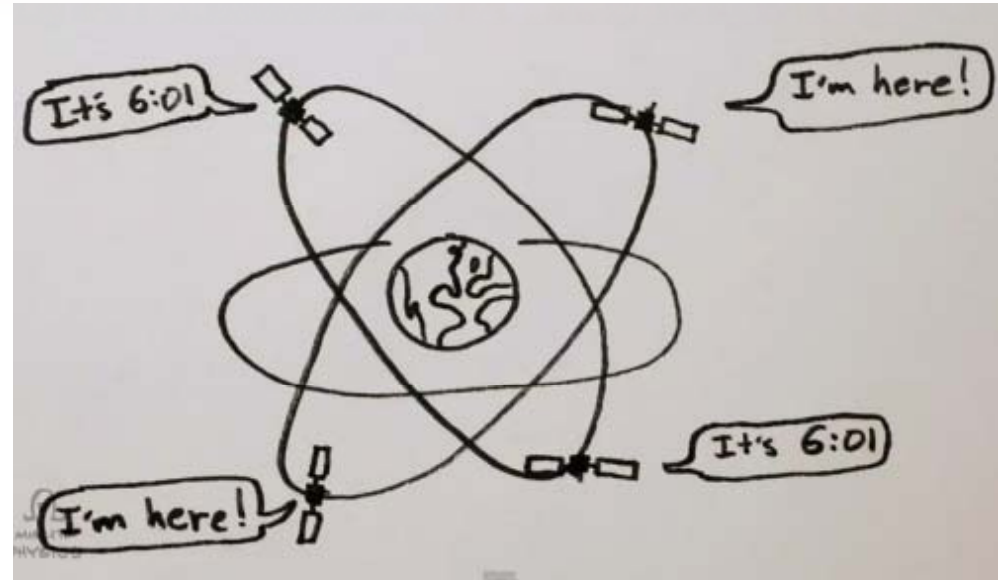
Symptome

Uhren gehen langsamer in einem stärkeren Gravitationsfeld (Erde vs Satellit)

Unterschied im Gravitationspotenzial

$$\frac{\Delta v}{v} \approx \frac{\Delta \varphi_g}{c^2} \Rightarrow 45 \mu\text{s/Tag}$$

ART – Beitrag



Summe der Einzeleffekte aus SRT und ART

$$\Delta t_{SRT} + \Delta t_{ART} = 45 \mu\text{s/Tag} - 7 \mu\text{s/Tag}$$

$$\Delta t_{SRT} + \Delta t_{ART} = 38 \mu\text{s/Tag}$$

Zeitfehler verursacht Ungenauigkeit

$$\Delta t_{error} = \frac{38 \cdot 10^{-6} \text{ s}}{\text{Tag}} \frac{\text{Tag}}{24 \text{ h} \cdot 3600 \text{ s}} = 4.4 \cdot 10^{-10} \text{ s}$$

Zeitfehler verursacht Positionsungenauigkeit größer 15 m

$$\Delta t_{15\text{m error}} \approx \Delta t_{error} \Rightarrow 114 \text{ s}$$

Diagnose

- SRT und ART Effekte haben unterschiedliches Vorzeichen
- netto ergibt sich ein Effekt von $38 \mu\text{s}$ pro Tag
- nach zwei Minuten ist Fehler größer als geforderte Ortsauflösung von 15 m
- innerhalb eines Tages akkumuliert sich dieser Fehler auf $\Delta t \times c = 11.4 \text{ km}$
- SRT und ART müssen bei GPS berücksichtigt werden um Position genau bestimmen zu können

Thema ART
Gravitationswellen



Jagd auf Gravitationswellen

Symptome

Beschleunigte Massen strahlen nach Elektrodynamik

Abgestrahlte Leistung eines Doppelsternsystems

$$P_{DS} = \frac{dE_{DS}}{dt} = \frac{32}{5} \frac{G_N^4}{c^5} \frac{(M_1 \cdot M_2)(M_1 + M_2)}{R_{DS}^5}$$

Neutronen - Doppelsternsystems

$$P_{DS} \approx 10^{45} \text{ W}$$

Diagnose

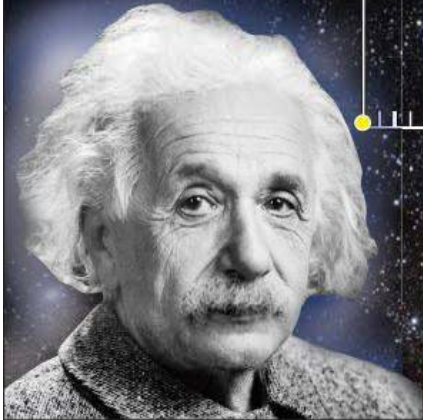
- GW äußern sich als Störung des Raumes und der Zeitabläufe (Raum-Zeit)
- GW sind transversale Wellen (Amplitude, Frequenz, Wellenlänge, Polarisation)
- GW breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus
- GW nehmen in der Amplitude mit $1/\text{Abstand}$ von der Quelle ab
- GW addieren sich nicht nach dem Superpositionsprinzip

Tesla
Dipolstrahlung
DAS EXPERIMENT



Gravitationswellenforschung Historie

THE SEARCH FOR RIPPLES



1916 | Einstein predicts ripples in space-time – gravitational waves moving at the speed of light



1969 | Joseph Weber of University of Maryland claims to have detected gravitational waves. Proved wrong



1974 | Joseph Taylor (right) and Russel Hulse of University of Massachusetts discover first indirect proof of gravitational waves in two neutron stars spiralling inwards at a rate exactly predicted by Einstein



1990 | Construction of LIGO by MIT and Caltech approved

2001 | LIGO data collection begins

2014 | South Pole based instrument claims to have detected gravitational waves from Big Bang. Later proved wrong

2010 | LIGO shut down for upgrade

2015 | Advanced LIGO reopens and starts collecting data again

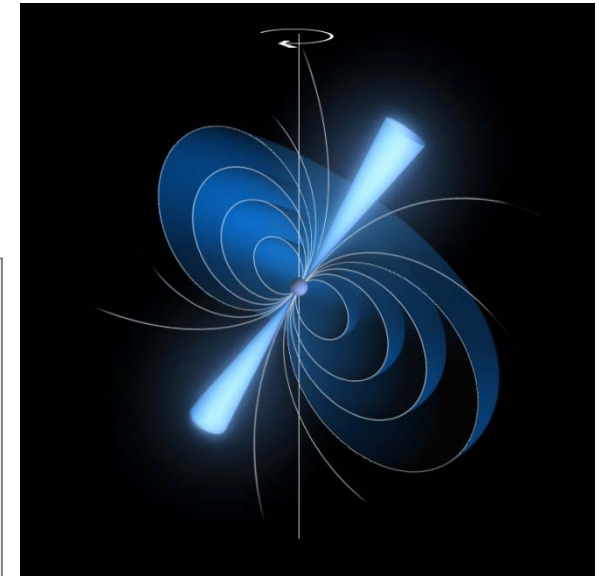
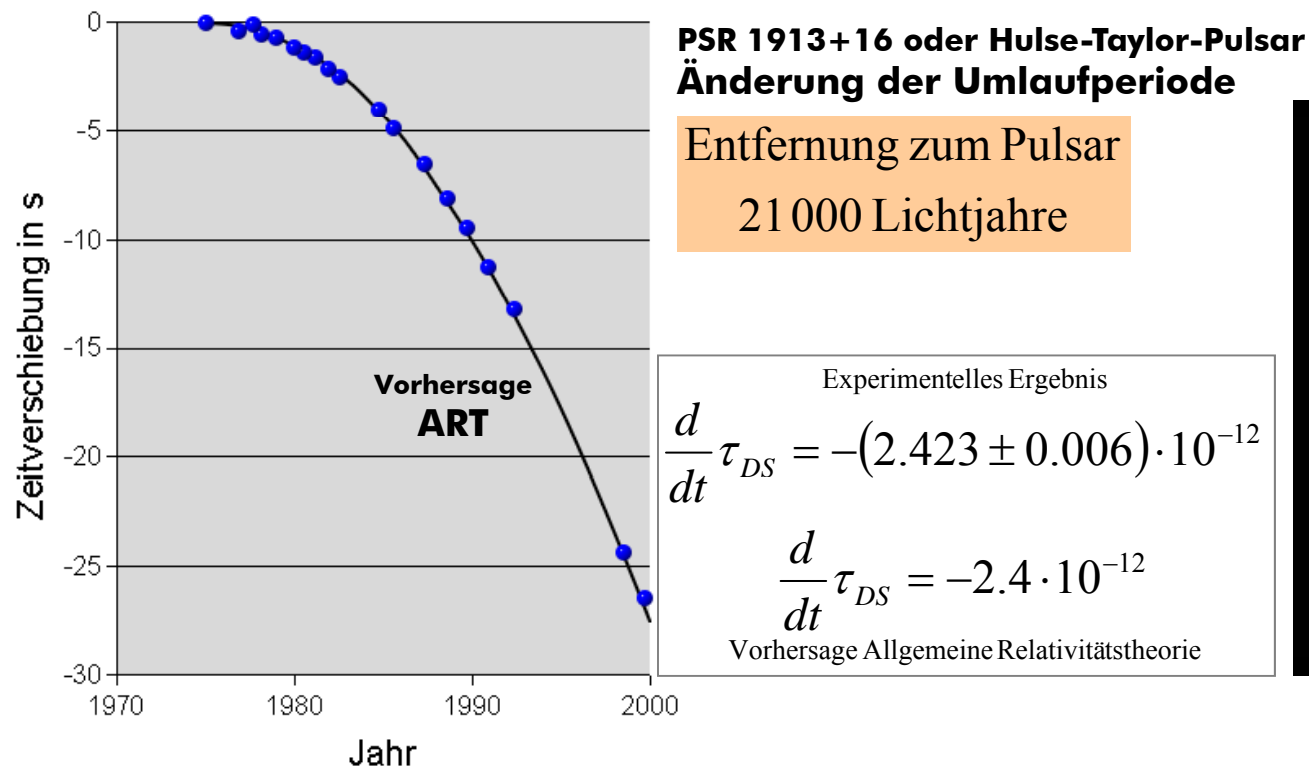
Taylor und Hulse 1976

Indirekter Nachweis

Symptome

- messbarer Frequenzbereich 10^{-7} - 10^{11} Hz
- Größenordnung der Auslenkung 10^{-20} m

Herausforderung auf Abstand 1 km Längenänderung in Größenordnung 1/100 Durchmesser Proton messen



Diagnose

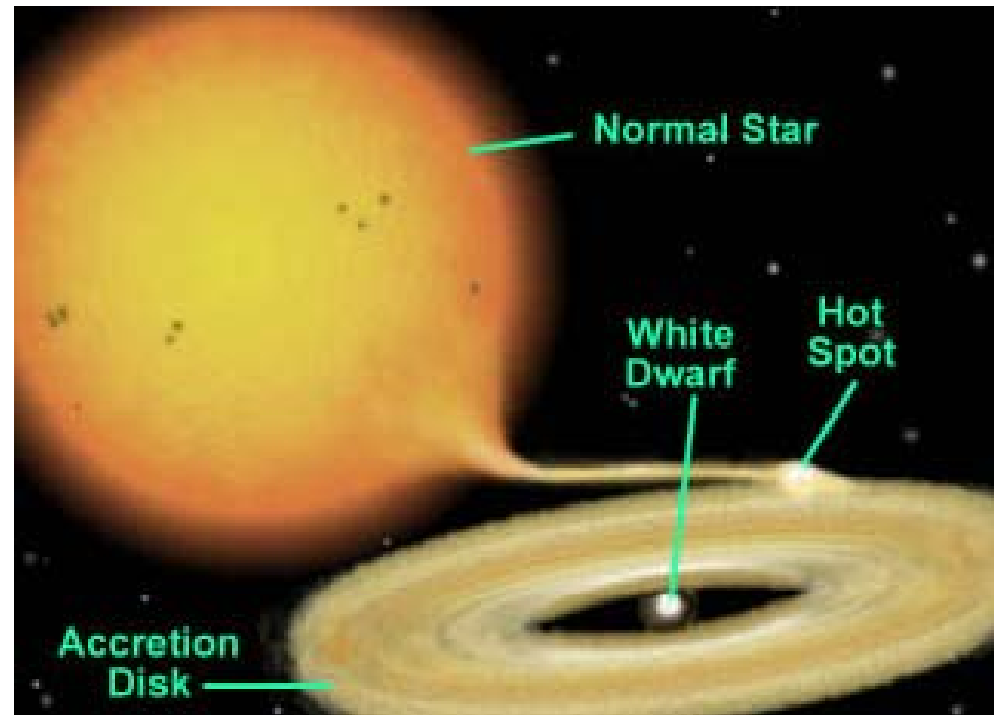
- durch Energieabstrahlung von Gravitationswellen verliert Doppelsternsystem Masse ($E=mc^2$)
- Drehimpulserhaltung erhöht die Rotationsgeschwindigkeit
- Messdaten stimmen gut mit Vorhersagen ART überein

Quellen für Gravitationslinsen

Kataklysmische Veränderliche

Symptome

- **Doppelsternsystem aus Weißen Zwerg und anderem Stern**
- **Verluste führen zu Annäherung der Sterne**
- **ab sogenannter Roche-Grenzfläche beginnt Massentransfer zum weißen Stern**
- **kataklysmische Aktivität führt zu astronomisch beobachtbaren Helligkeitsänderungen**
- **Masseverluste verkürzt im Laufe der Zeit die Umlaufdauer**



Diagnose

- **unterhalb Umlaufdauer von 3.18h erfolgt Massetransfer über Konvektion**
- **katalysmische Aktivität reißt ab und Gravitationswellen werden ausgesendet**
- **unterhalb 2.15h Umlaufdauer setzt katalysmische Aktivität wieder ein (Periodenlücke)**

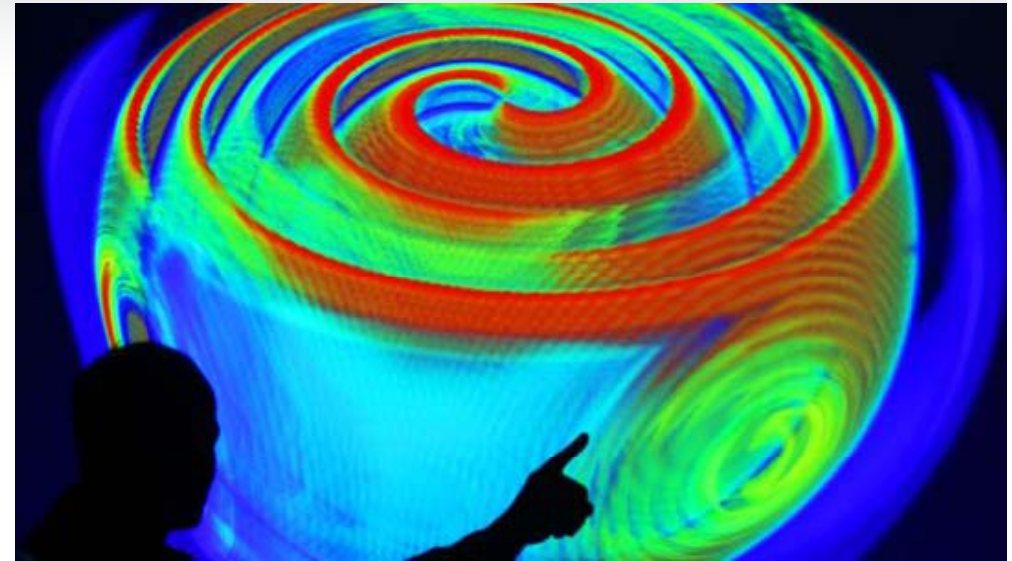
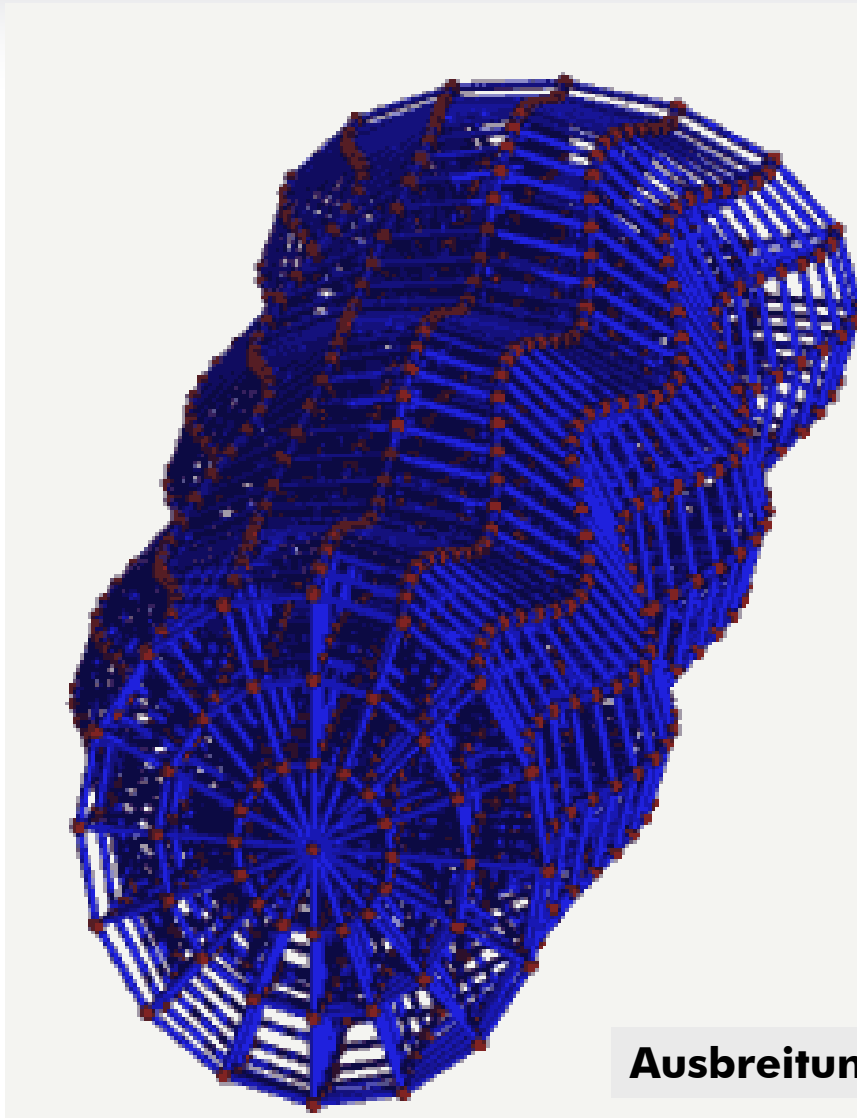
	Elektromagnetische Wellen	Gravitationswellen
Erzeugung	Beschleunigung elektrischer Ladungen, z.B. Elektronen in Sendeantenne	Beschleunigung von Massen
Rückstoß auf das die Wellen abstrahlende Objekt	ja	ja
Ausbreitungsgeschwindigkeit	c	c
Gültigkeit des quadratischen Abstandsgesetzes	ja	ja (angenähert)
Nachweis/Wirkung	Anstoß elektrischer Ladungen, z.B. Elektronen in Empfangsantenne	Verformung großer Körper, Anstoß kleiner Testmassen
Schwächung beim Auftreffen auf materielle Körper	stark, aber abhängig von der Frequenz der Welle und der Zusammensetzung des Körpers	vernachlässigbar (erschwert den Nachweis der Gravitationswellen!)
Wellenform (jeweils transversal) ⁷⁷	Dipolwellen	Quadrupolwellen (siehe Haupttext)
vermittelnde Teilchen (jeweils ohne Ruhemasse und elektrische Ladung)	Photonen	Gravitonen (noch nicht nachgewiesen) ⁷⁸
Beziehungen zur Raumzeit	bewegen sich durch den Raum und krümmen ihn merklich nur bei hohen Energien	sind Schwingungen des Raumes selbst

beschleunigte Objekte strahlen

Impulserhaltung

Austauschteilchen

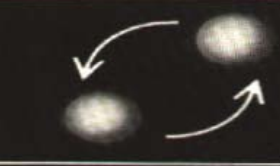


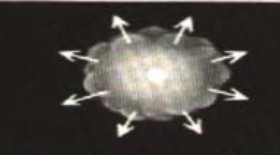

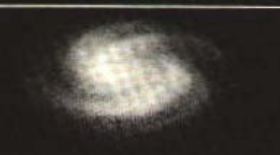
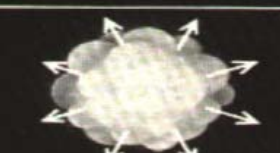
Gravitationswellen



Ausbreitung von Gravitationswellen

Gravitationswellen

Astrophysikalische Quellen

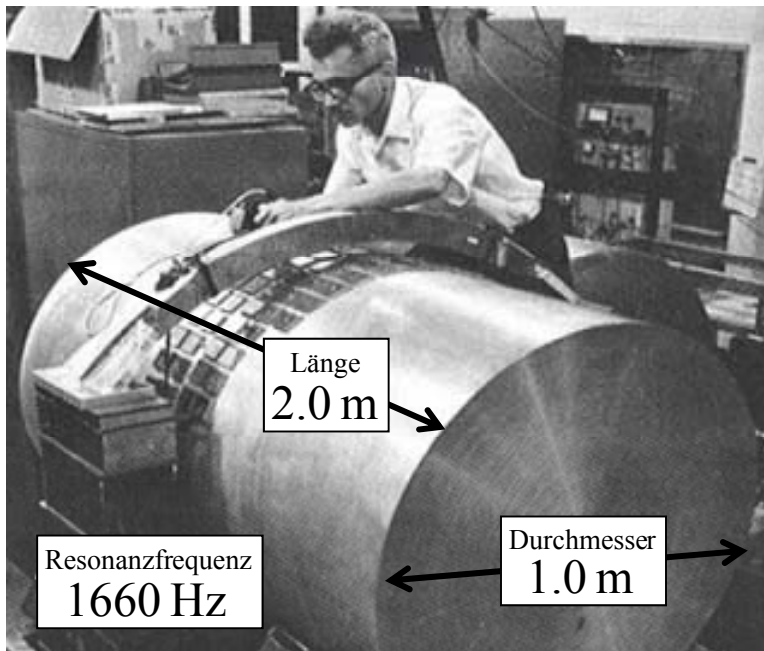
Quelle	Signaltyp	Frequenz	Stärke
 <p>Doppelsternsystem</p>	periodisch	1 Megahertz oder niedriger	10^{-21}
 <p>Neutronen-Doppelstern</p>	quasi-periodisch	bis zu 1 Kilohertz	10^{-22}
 <p>akkretierender Neutronenstern</p>	periodisch	200 bis 800 Hertz	3×10^{-27}
 <p>Typ II-Supernova</p>	impulsartig	1 Kilohertz	10^{-21}
 <p>schwingendes Schwarzes Loch</p>	gedämpfte Sinus- schwingung	10 Kilohertz für eine Sonnenmasse, 10 Hertz für 1000 Sonnenmassen	?
 <p>Galaxienbildung durch kosmische Strings</p>	Rauschen	breites Frequenzband; 1 Zyklus pro Jahr 300 Hertz	10^{-14} 10^{-24}
 <p>Urknall</p>	Rauschen	?	?

Nachweis durch Resonanzdetektoren

Weber Bars

Symptome

- Gravitationswelle durchläuft massiven Metallzylinder
- zeitabhängige gezeitenartige Kraft bewirkt Dehnung und Stauchung in eine Richtung
- Zylinder vollführt nach Anregung Gravitationswelle harmonische Schwingung



Diagnose

- empfindlich nur nahe Resonanzfrequenz
- nicht Gravitationswelle sondern Nachschwinger werden beobachtet
- bislang KEIN positives Ergebnis
- aktuell existieren fünf Weber-Detektoren (grün markiert)

Stimmgabeln
DAS EXPERIMENT



Michelson in Hannover
Geo 600



Diagnose

- zwei Instrumente im Abstand von 3000 km
- Länge der Interferometerarme 4 km
- Laufzeitunterschiede in Ankunft der Gravitationswelle werden für Analyse genutzt

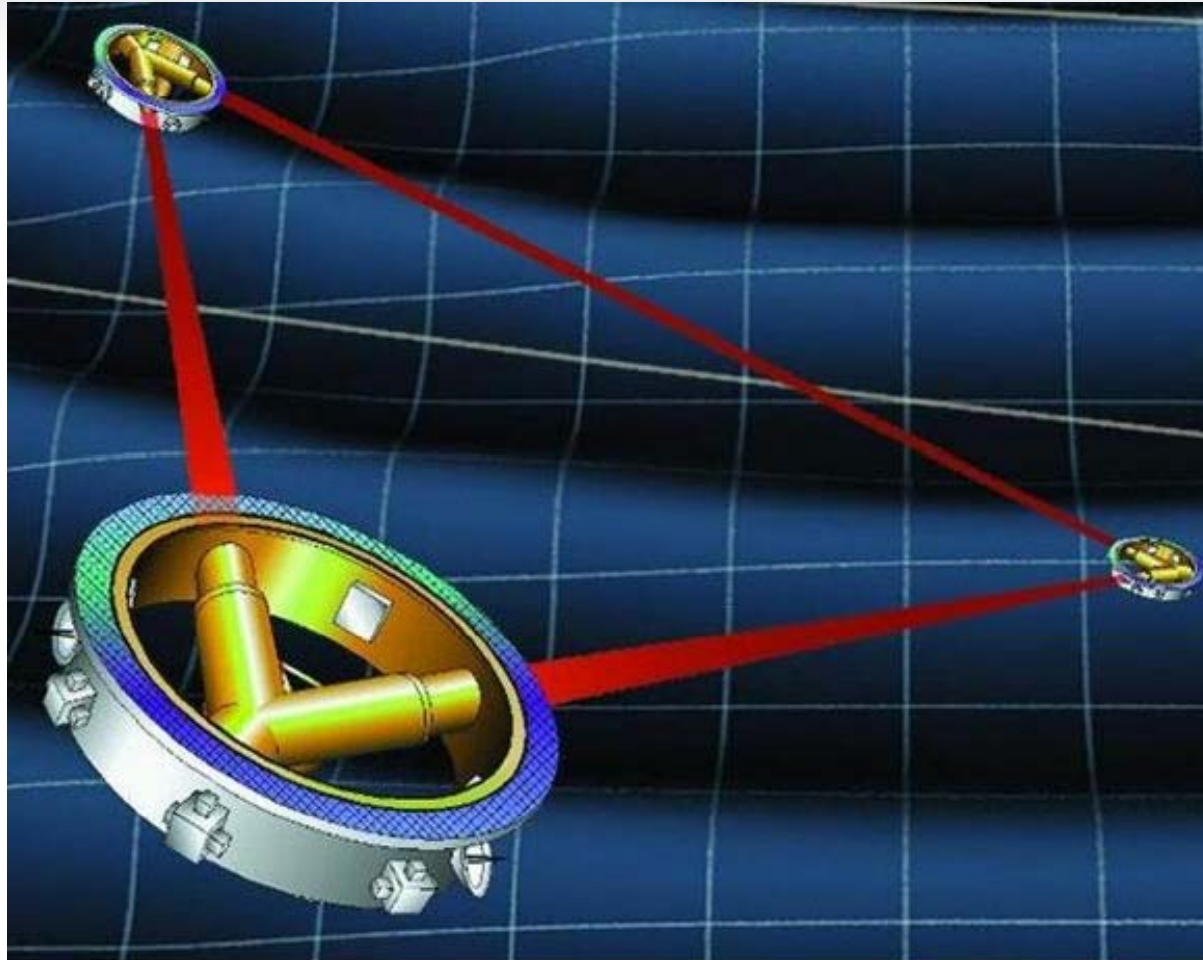
Extrablatt

$$\frac{\text{Längenänderung}}{\text{Länge}} < 10^{-18}$$

L I G O

LASER INTERFEROMETER GRAVITATIONAL-WAVE OBSERVATORY

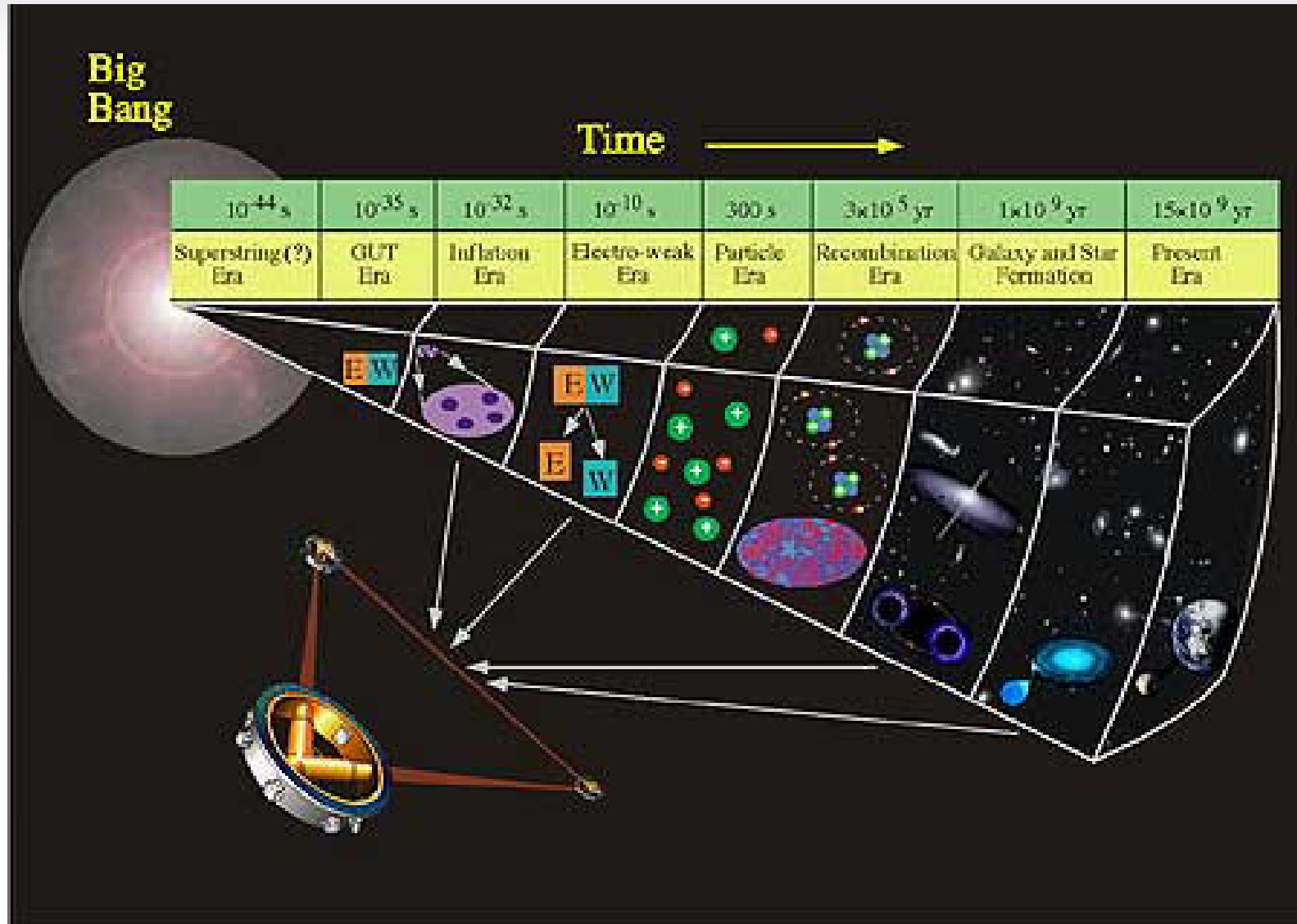
Gravitationswellen LISA



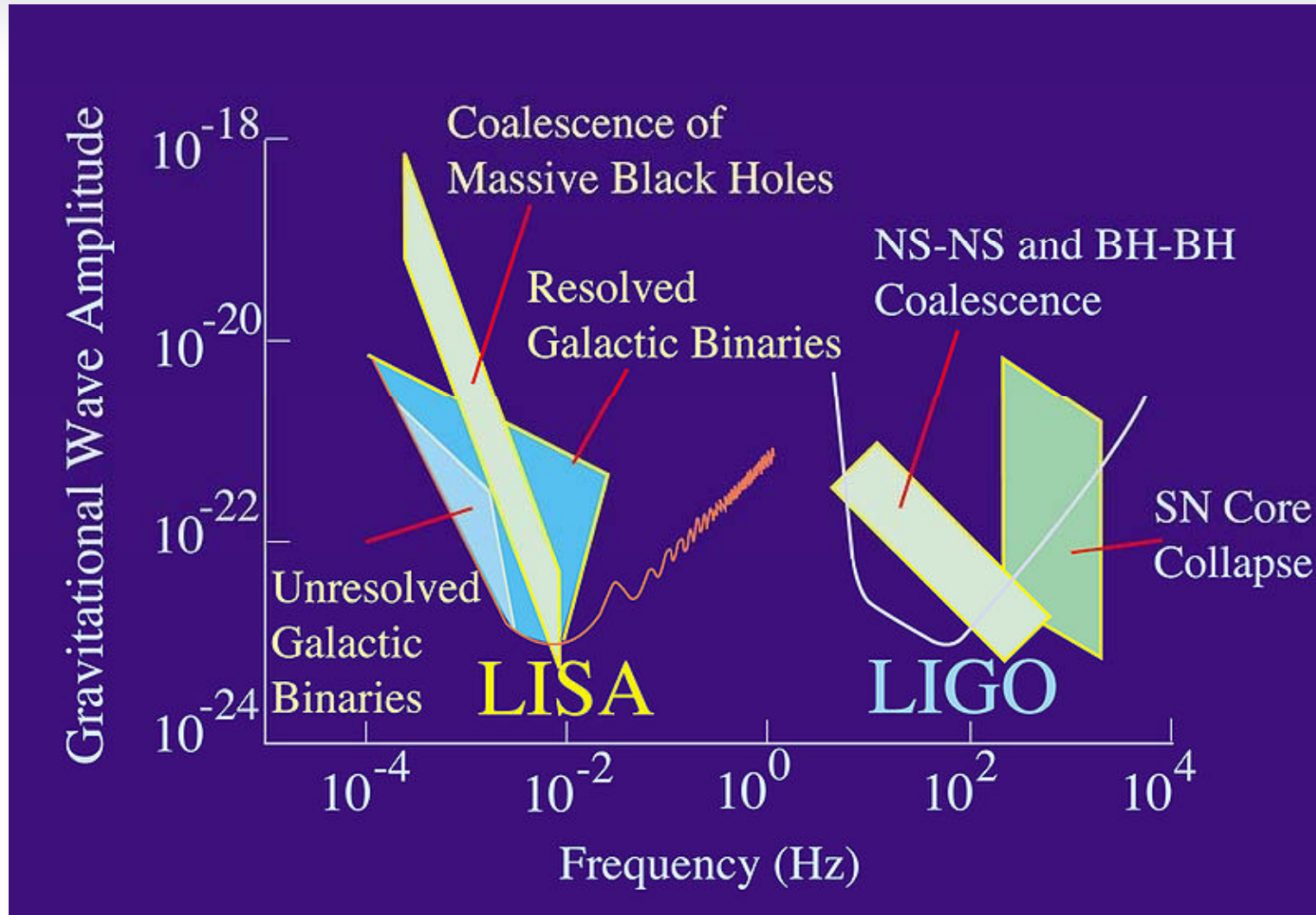
Diagnose

- interferometrischer Gravitationswellendetektor im All
- aufgrund von Haushaltskürzungen wurde Mission 2011 von der NASA aufgegeben

Signale, die aufgelöst werden sollten LISA



Gravitationswellen Detektoren



COSMIC CURL

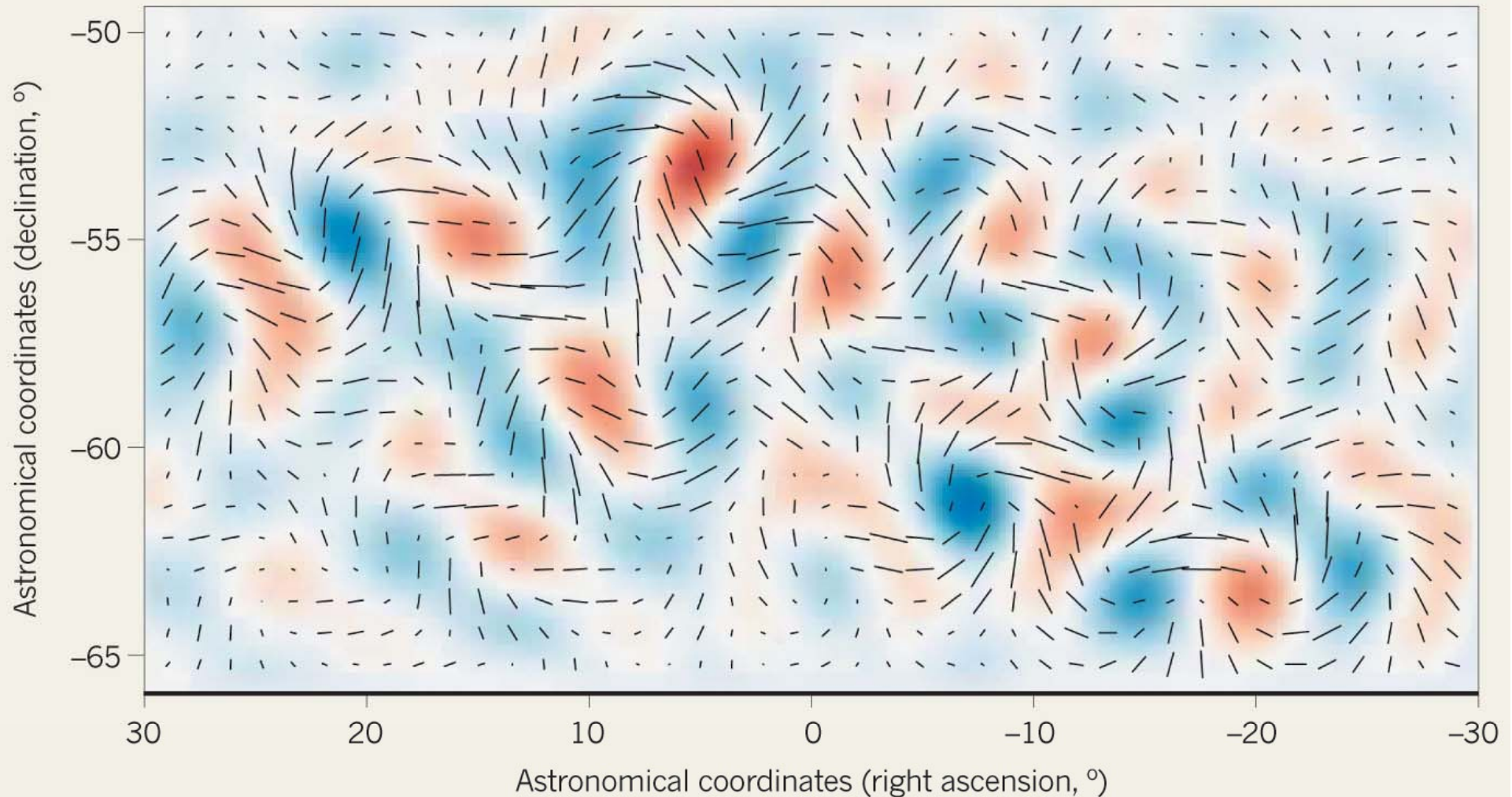
The BICEP2 instrument observed a faint but distinctive twisting pattern, or spin, known as a curl or B-mode, in the polarization of the cosmic microwave background. This is the first evidence for gravitational waves generated by rapid inflation of the Universe some 13.8 billion years ago.

Spin intensity

■ Clockwise ■ Anti-clockwise

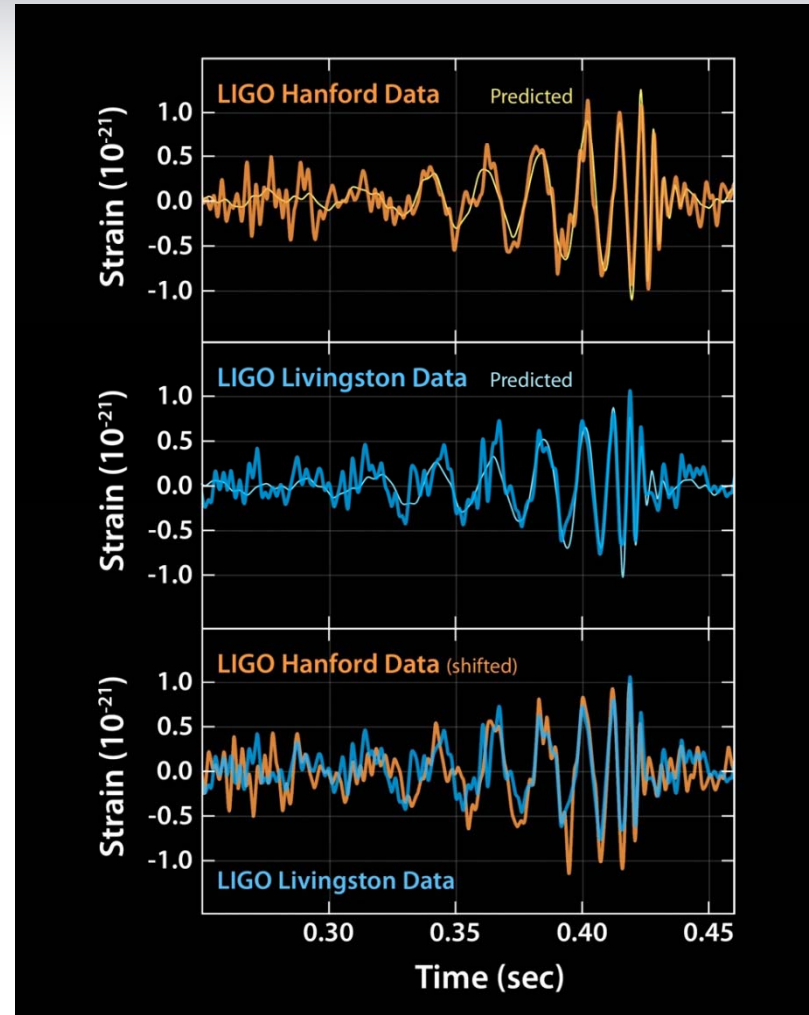
— Polarization strength and orientation at different spots on the sky.

Nature 507, 281 (2014)



Ging kürzlich kurzzeitig durch die Presse und hat sich inzwischen als Artefakt erwiesen

14. September 2015 09:59:45 universal time
Gravitationswellen detektiert



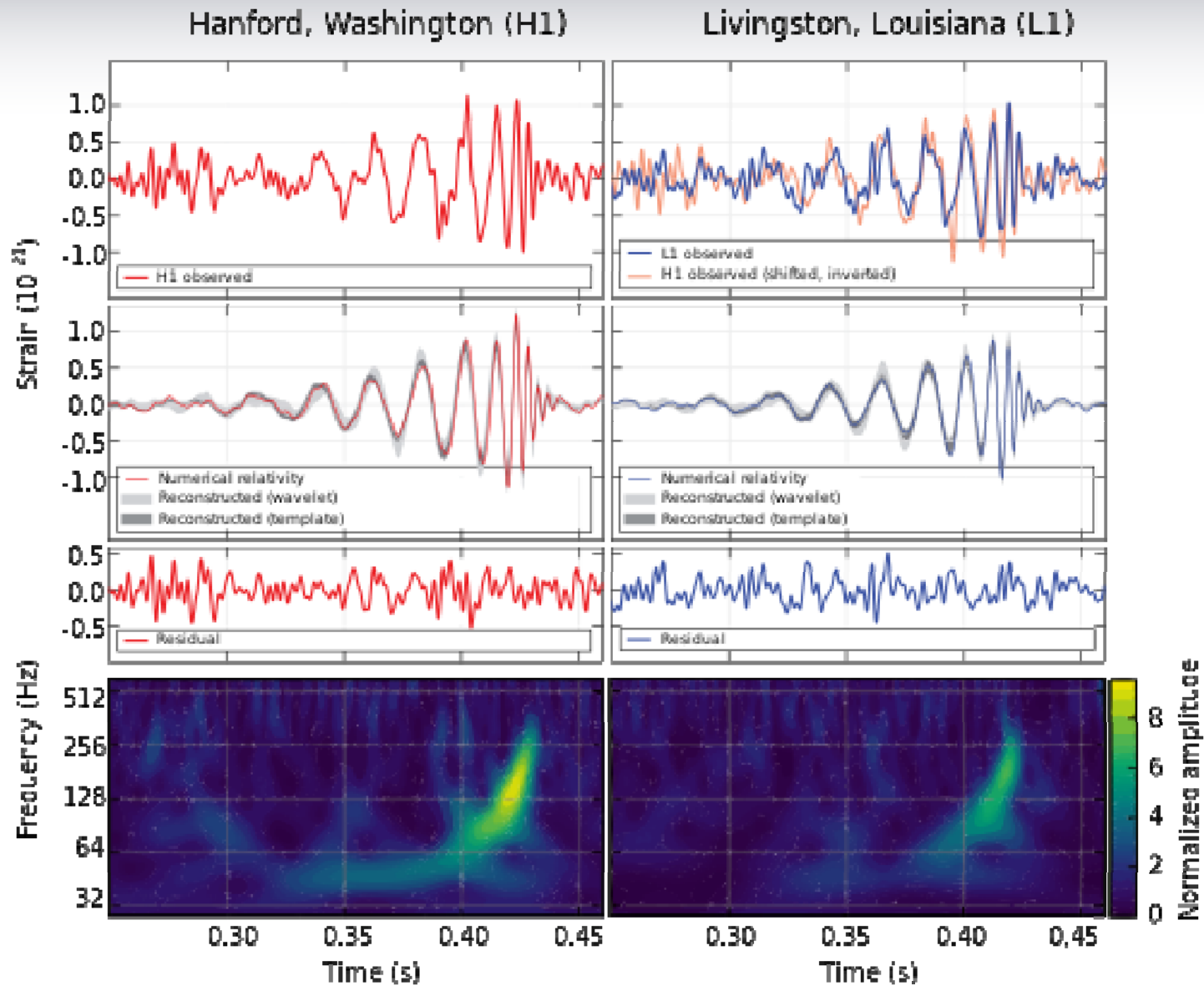
aufgefangene Signale der
beiden LIGO-Interferometer

Diagnose

- Kollision zweier Schwarzer Löcher mit Masse von 29 bzw. 36 Sonnenmassen
- Entfernung 1.3×10^6 Lj aus Richtung der Magellanschen Wolken am Südhimmel

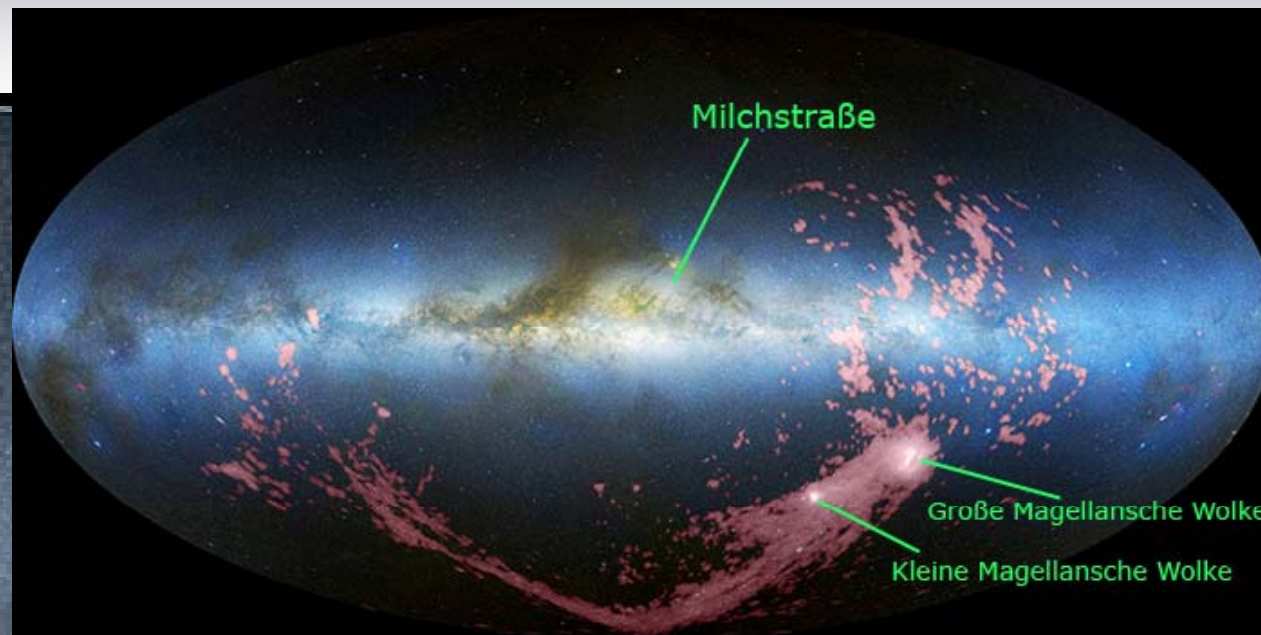
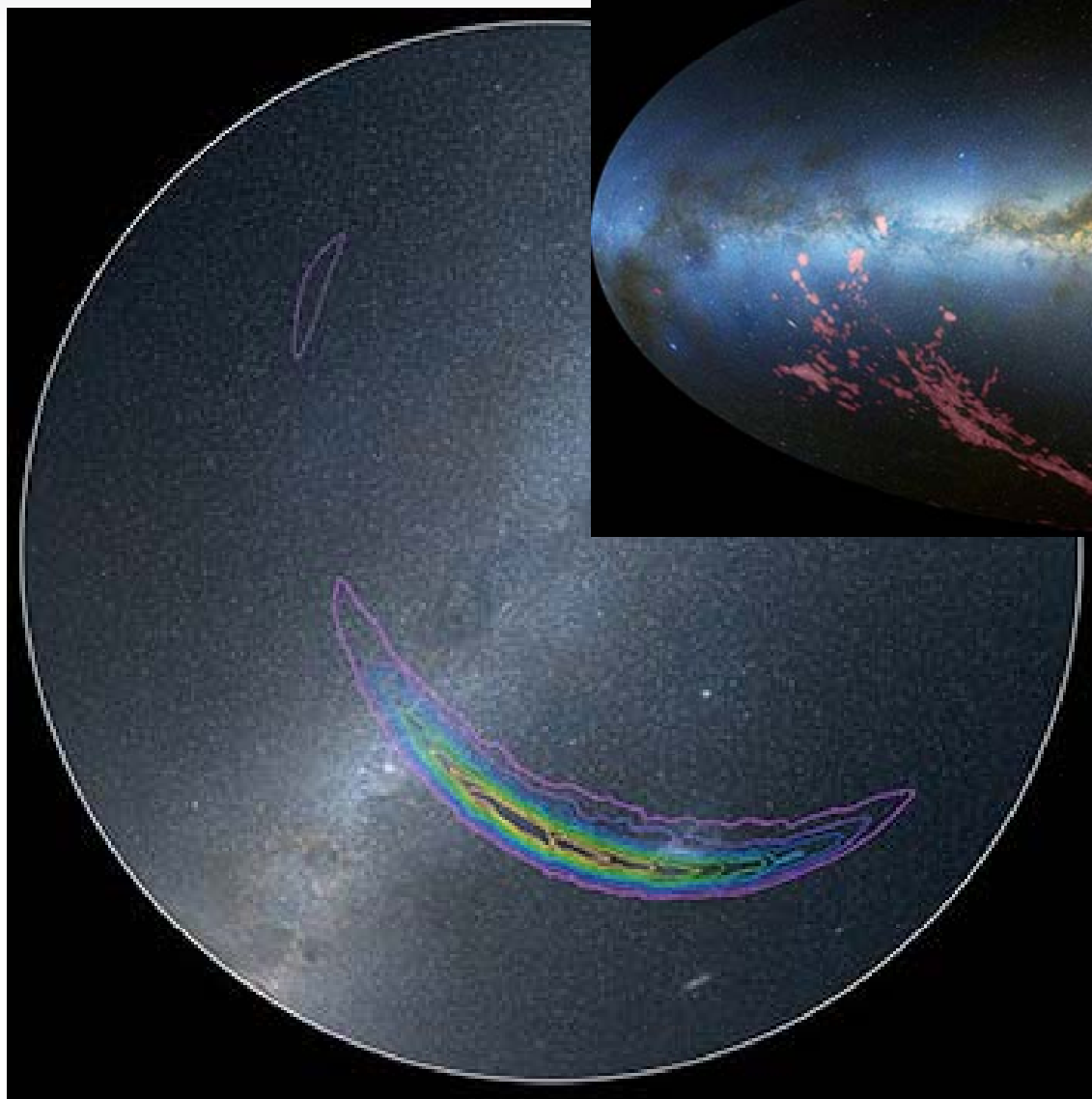
14. September 2015 09:59:45 universal time

Spektrogramm



14. September 2015 09:59:45 universal time

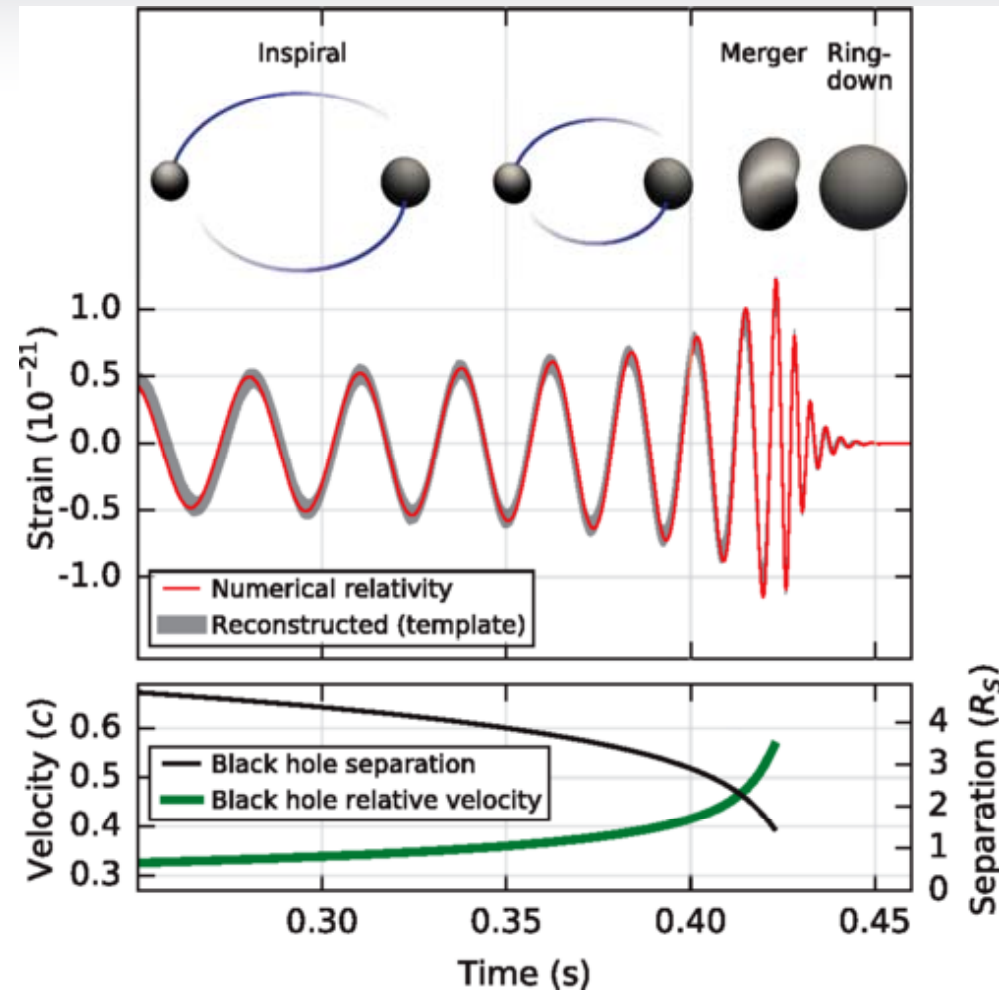
Magellansche Wolke



14. September 2015 09:59:45 universal time numerische Rekonstruktion

Raumkontraktion

$$\frac{x}{\Delta x} = 10^{21}$$



Diagnose

Verzerrungen der Raumzeit sind in Größenordnung 1/10 000 des Durchmessers des Atomkerns

Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger
Abbot et al. *Phys. Rev. Lett.* 116, 061102 (2016)



LIGO

#einsteinwasright

Entwicklung des Universums

Was bringt die Zukunft?

Symptome

- wenn mittlere Dichte des Universums geringer ist als kritische Dichte expandiert Universum neue Galaxien bilden sich und ältere Sterne werden z.B. zu weißen Zwergen
- wenn die mittlere Dichte höher ist als die kritische Dichte, dann ist das Universum geschlossen Universum kontrahiert und Universum vergeht in einem Big Crunch
- wenn mittlere Dichte kritischer Dichte entspricht, wird Universum mit geringerer Rate wachsen man spricht von einem flachen Universum

kritische Dichte des Universums berechnet analog zur Bestimmung der Fluchtgeschwindigkeit von der Erde

$$E_{ges} = E_{kin} + E_{pot}$$

$$E_{ges} = \frac{1}{2} m_{\text{Testmasse}} v_{\text{Expansion}}^2 - \frac{G_N m_{\text{Testmasse}} M_{\text{universe}}}{R_{\text{universe}}}$$

$$\frac{1}{2} v_{\text{Expansion}}^2 = \frac{G_N M_{\text{universe}}}{R_{\text{universe}}} = \frac{G_N}{R_{\text{universe}}} \left(\frac{4\pi}{3} \rho_{\text{kritisch}} R_{\text{universe}}^3 \right) \quad \Omega_0 < 1$$

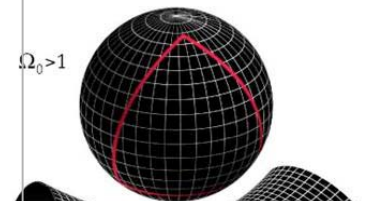
Volumen einer Kugel

$$\frac{1}{2} \left(\overset{\text{Hubbles Ergebnis}}{H \cdot R_{\text{universe}}} \right)^2 = \frac{4\pi}{3} G_N \rho_{\text{kritisch}} R_{\text{universe}}^2$$

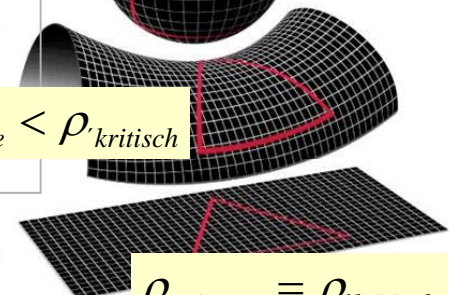
kritische Dichte des Universums

$$\rho_{\text{kritisch}} = \frac{3H^2}{8\pi G_N}$$

$$\rho_{\text{universe}} > \rho_{\text{kritisch}}$$



$$\rho_{\text{universe}} < \rho_{\text{kritisch}}$$



$$\Omega_0 = 1$$

$$\rho_{\text{universe}} = \rho_{\text{kritisch}}$$

MAP990006

Diagnose

- mit dem bekannten Wert der Hubblekonstanten ergibt sich ein Wert von $8.9 \times 10^{-27} \text{ kg/m}^3$
- dies entspricht eine Dichte von 5.3 Wasserstoffatomen pro Kubikmeter