

Albert Einstein (1879 – 1955)
Nobelpreis 1921

$$-dx^2 - dy^2 - dz^2$$
$$\frac{1}{\sqrt{1-u^2}} \left(\frac{m u_i}{\sqrt{1-u^2}}, m u_i \right) \quad \left| \begin{array}{l} \frac{m u_i}{\sqrt{1-u^2}} \text{ Impuls} \\ m \left(\frac{1}{\sqrt{1-u^2}} - 1 \right) \text{ kin. Energy} \end{array} \right.$$
$$\sum \frac{1}{\sqrt{1-u^2}} = \frac{2}{\sqrt{1-u^2} \sqrt{1-v^2}}$$
$$\sum \frac{u_i}{\sqrt{1-u^2}} = \frac{2v}{\sqrt{1-u^2} \sqrt{1-v^2}}$$
$$\text{Hyp. } \sum \vec{p}_i = \sum \vec{p}_i \quad \sum \mathcal{E}_i = \sum \mathcal{E}_i$$
$$\vec{p}_i = m \vec{u}_i \gamma(u_i)$$
$$\mathcal{E}_i = \mathcal{E}_0 + m \mathcal{E}_i(u_i)$$
$$= \frac{t + vx'}{\sqrt{1-v^2}} \quad x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1-v^2}} \quad y = y' \quad z = z'$$

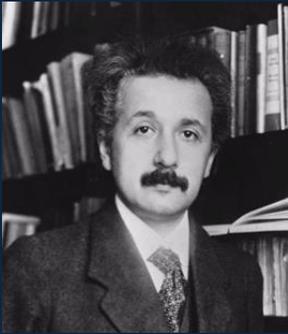


Allgemeine Relativitätstheorie

ART

Die Kunst, Gravitation
zu erklären

- Grundlegende Ideen
- Physikalische Folgerungen
- „Beweise“



Spezielle Relativitätstheorie - 1905

Die beiden **Postulate** der Theorie

1. Relativitätsprinzip:
Bezugssysteme, die sich mit konstanter Geschwindigkeit gegeneinander bewegen, sind physikalisch gleichwertig.
2. Konstanz der Lichtgeschwindigkeit:
Die Geschwindigkeit des Lichts ist unabhängig von dem Bewegungszustand des Senders oder des Empfängers.

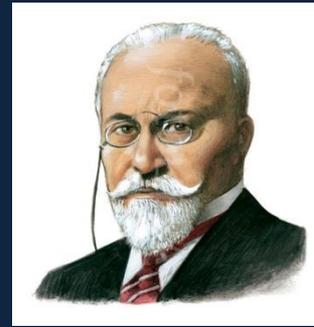
3. *Zur Elektrodynamik bewegter Körper;* *von A. Einstein.*

Bern, Juni 1905.

(Eingegangen 30. Juni 1905.)

..... Wir wollen diese Vermutung (deren Inhalt im folgenden „Prinzip der Relativität“ genannt werden wird) zur Voraussetzung erheben und außerdem die mit ihm nur scheinbar unverträgliche Voraussetzung einführen, daß sich das Licht im leeren Raume stets mit einer bestimmten, vom Bewegungszustande des emittierenden Körpers unabhängigen Geschwindigkeit V fortpflanze. Diese beiden Voraussetzungen genügen, um zu einer einfachen und widerspruchsfreien Elektrodynamik bewegter Körper zu gelangen

Hermann Minkowski
(Mathematikprofessor und früherer
Universitätslehrer Einsteins):

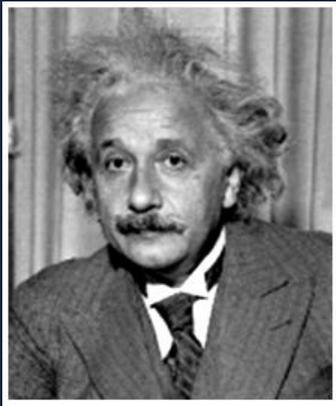


als er von der Speziellen Relativitätstheorie hörte:

„Ach der Einstein, der schwänzte immer die Vorlesungen – dem hätte ich das gar nicht zugetraut.“

und später, als begeisterter Anhänger der Relativitätstheorie:

„Meine Herren! Die Anschauungen über Raum und Zeit, die ich Ihnen entwickeln möchte, sind auf experimentell-physikalischem Boden erwachsen. Darin liegt ihre Stärke. Ihre Tendenz ist eine radikale. Von Stund an sollen Raum für sich und Zeit für sich völlig zu Schatten herabsinken und nur noch eine Art Union der beiden soll Selbständigkeit bewahren.“



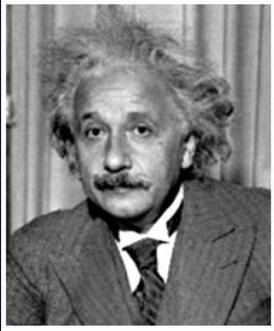
Allgemeine Relativitätstheorie - 1915

*Aus der Originalarbeit von
Albert Einstein - 1916*

Die Gesetze der Physik müssen so beschaffen sein, daß sie in Bezug auf beliebig bewegte Bezugssysteme gelten. Wir gelangen also auf diesem Wege zu einer Erweiterung des Relativitätspostulates.

Außer diesem schwerwiegenden erkenntnistheoretischen Argument spricht aber auch eine wohlbekannte physikalische Tatsache für eine Erweiterung der Relativitätstheorie.

Es sei K ein Galileisches Bezugssystem, d.h. ein solches, relativ zu welchem eine von anderen hinlänglich entfernte Masse sich geradlinig und gleichförmig bewegt. Es sei K' ein zweites Koordinatensystem, welches relativ zu K in gleichförmig beschleunigter Translationsbewegung sei. Relativ zu K' führte dann eine von anderen hinreichend getrennte Masse eine beschleunigte Bewegung aus, derart, daß deren Beschleunigung und Beschleunigungsrichtung von ihrer stofflichen Zusammensetzung und ihrem physikalischen Zustande unabhängig ist.



Allgemeine Relativitätstheorie - 1915

Auszüge aus der Originalarbeit
von Albert Einstein - 1916

Aus diesen Erwägungen sieht man, daß die Durchführung der allgemeinen Relativitätstheorie zugleich zu einer Theorie der Gravitation führen muß; denn man kann ein Gravitationsfeld durch bloße Änderung des Koordinatensystems erzeugen.

*Diese Auffassung wird dadurch ermöglicht, daß uns die Erfahrung die Existenz eines Kraftfeldes (nämlich des Gravitationsfeldes) gelehrt hat, welches die merkwürdige Eigenschaft hat, **allen Körpern dieselbe Beschleunigung zu erteilen.***

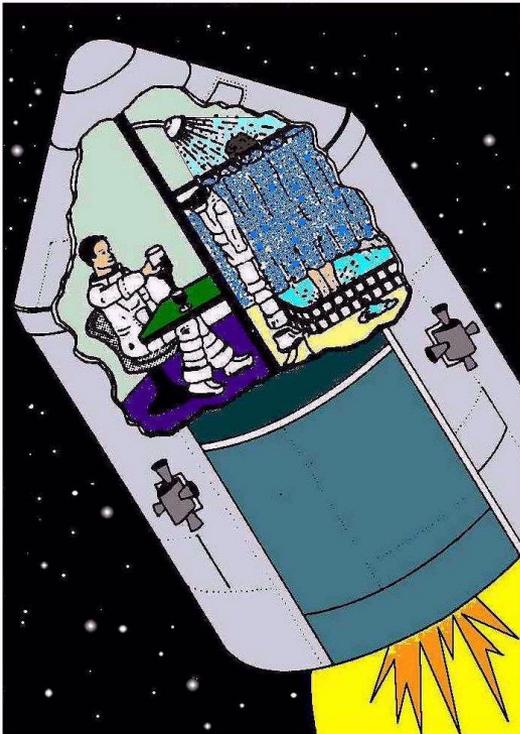
Äquivalenzprinzip

Beschleunigung erzeugt
Gravitation

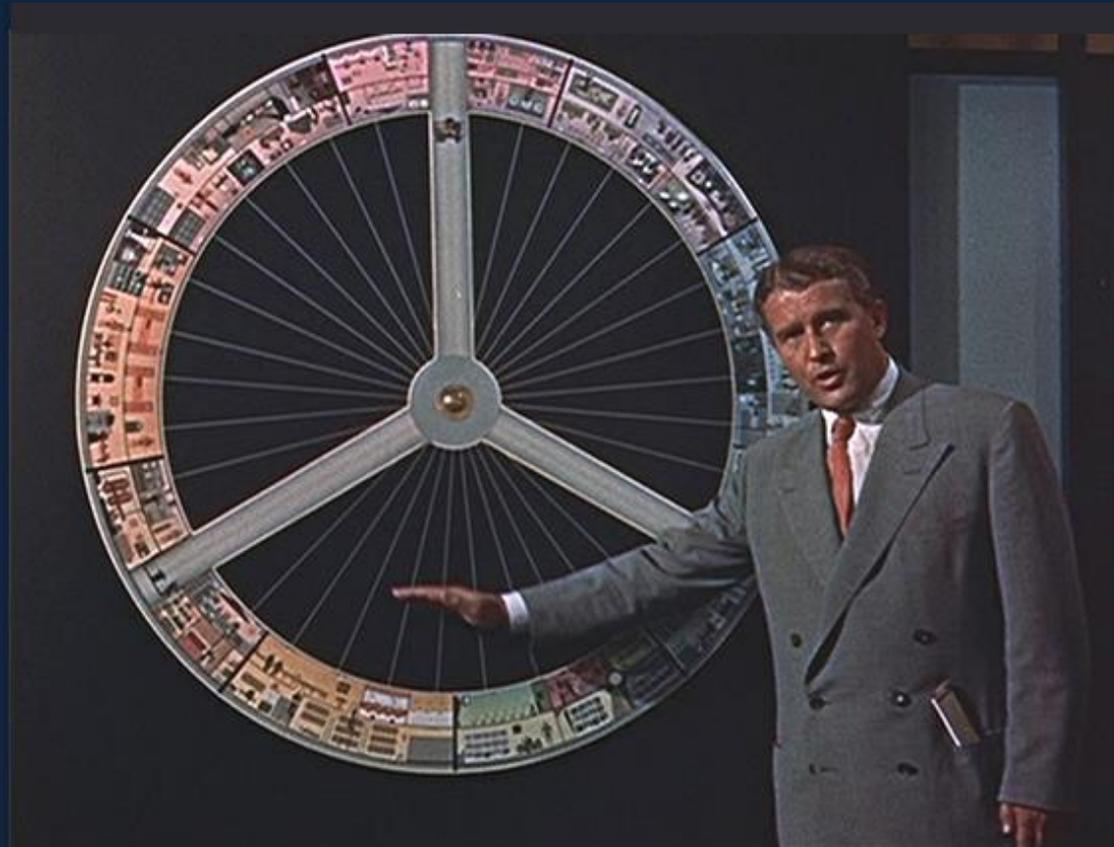
Fallbewegungen erzeugen
Schwerelosigkeit

Das Äquivalenzprinzip

1. Beschleunigung „erzeugt“ Gravitation



In einem mit $g \approx 10 \text{ m/s}^2$ beschleunigten Raumschiff leben die Astronauten wie auf der Erde.



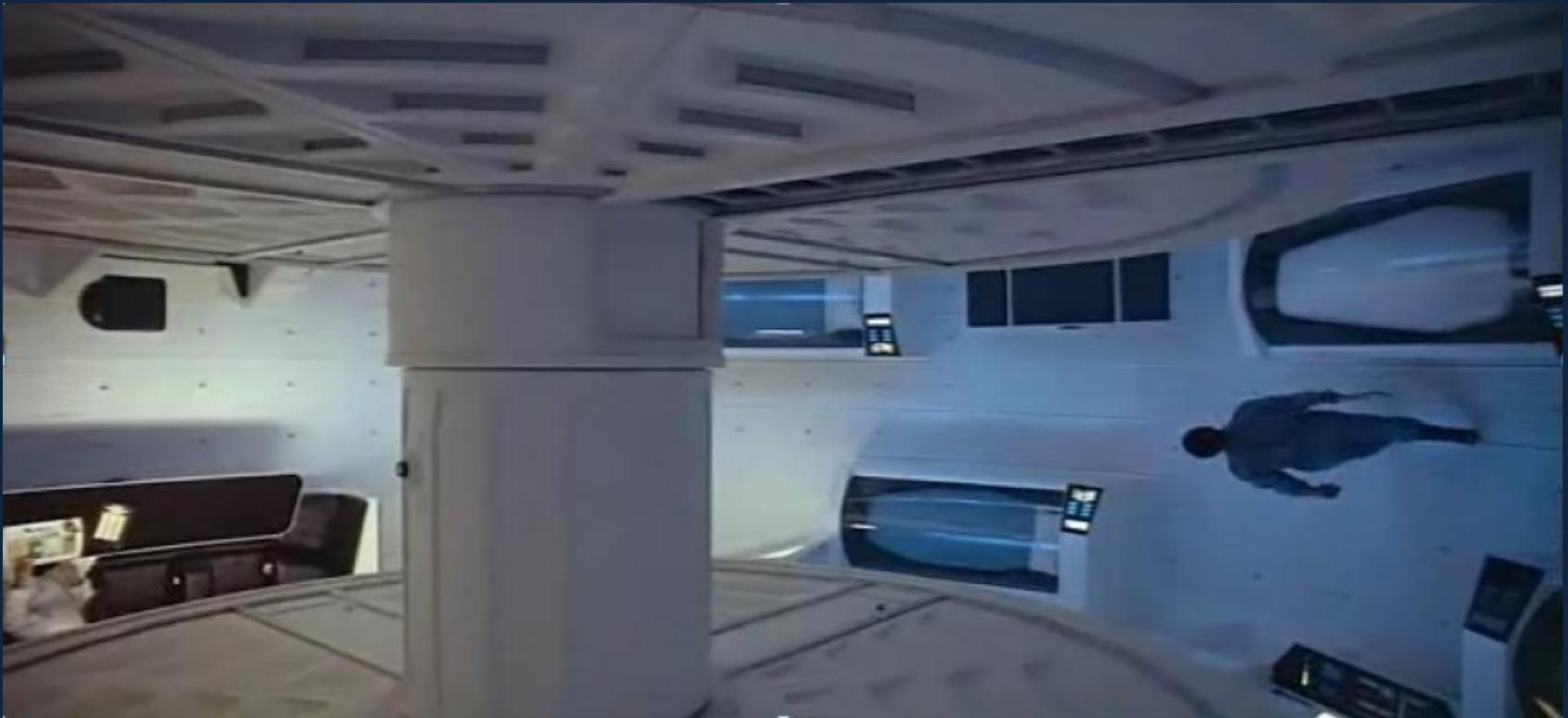
Wernher von Braun discusses his idea for a spinning space station in Disney's "Man and the Moon." Photo Credit: Walt Disney Productions

2001 – Odyssee im Weltraum (Stanley Kubrick 1968)

Das Äquivalenzprinzip

1. Beschleunigung „erzeugt“ Gravitation

2001 – Odyssee im Weltraum (Stanley Kubrick 1968)

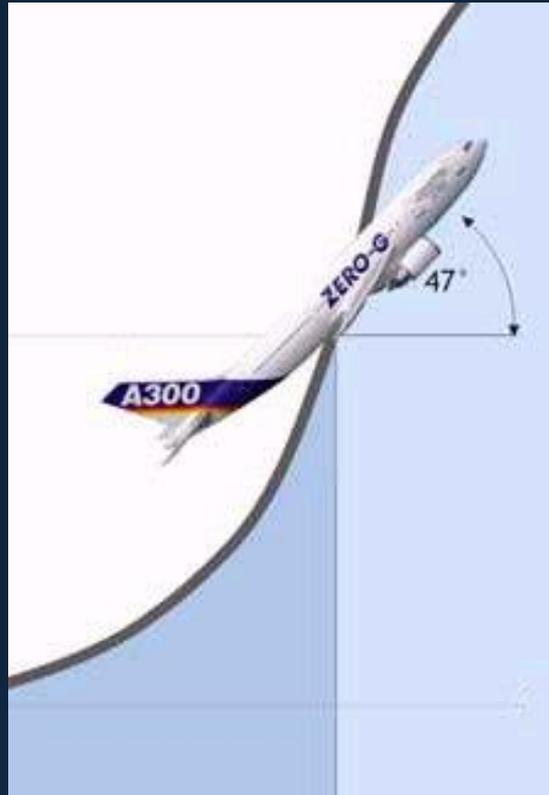


Das Äquivalenzprinzip

2. Fall- und Wurfbewegungen „erzeugen“ Schwerelosigkeit



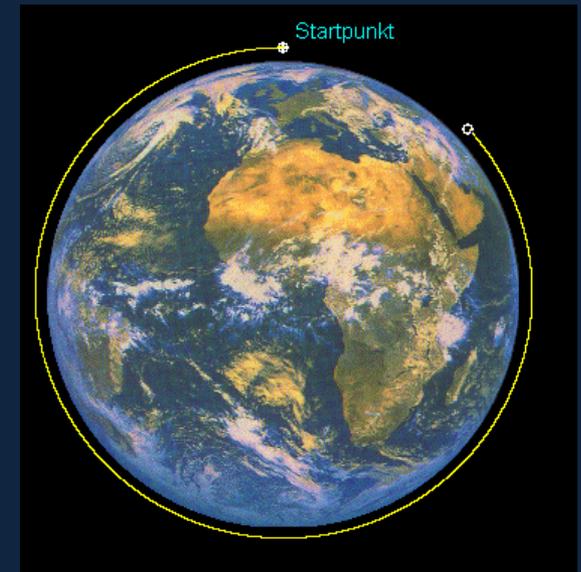
Fallturm in Bremen



Parabelflüge

[Parabel_Clip_1](#)

[Parabel_Clip_2](#)



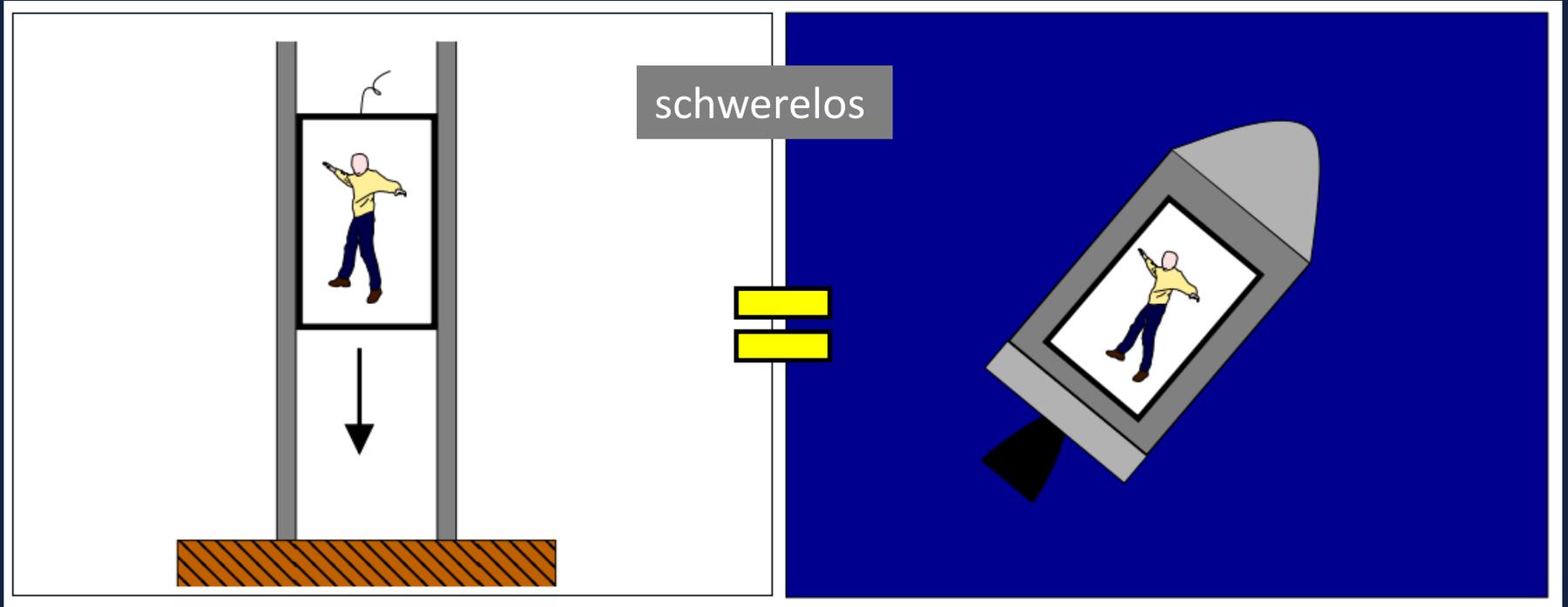
Erdumlaufbahn :
unendliches Fallen um die Erde

[Simulation Erdumlaufbahn](#)

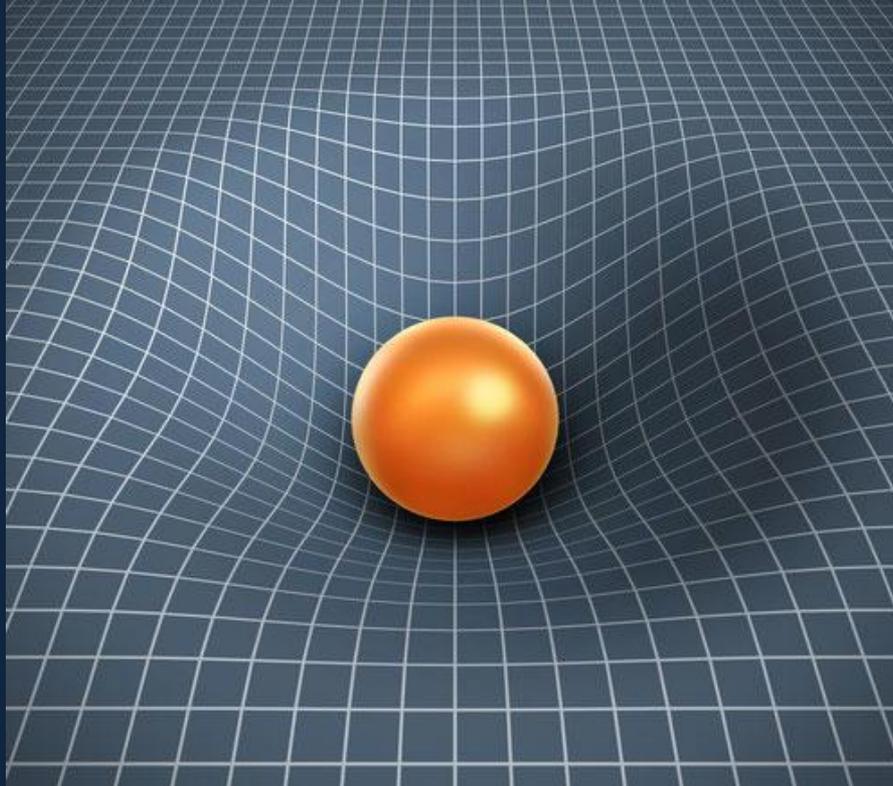
<http://www.mabo-physik.de/erdumlaufbahn.html>

<http://www.mabo-physik.de/erdumlaufbahn.html>

Ausgangspunkt: Das Äquivalenzprinzip



Das Äquivalenzprinzip ist der Sockel der Allgemeinen Relativitätstheorie,
aber was hat dies alles mit der Idee der Raumkrümmung zu tun?



Äquivalenzprinzip



Krümmung der RaumZeit

Animation:

Einstein versus Newton

Didaktisch gute Darstellung der Raumzeit-Krümmung

<https://www.youtube.com/watch?v=DdC0QN6f3G4>

Äquivalenzprinzip

Krümmung der RaumZeit

Die Bewegung auf krummen
Linien durch die RaumZeit
erzeugt Trägheitskräfte
(Beschleunigungen)

Gravitation

Interpretation:

Massen haben die Eigenschaft, die RaumZeit in ihrer Umgebung geometrisch zu verzerren. Dadurch entsteht das, was wir **Gravitation** nennen.

Hat das Gravitationsgesetz von Newton ausgedient oder ist es gar falsch?

Nein!

Die klassische Theorie von Newton erscheint als Näherung der Relativitätstheorie, falls die Massen nicht zu groß oder die Abstände nicht zu klein sind.

Bei der Erklärung von Schwarzen Löchern, Gravitationslinsen und Gravitationswellen reicht Newtons Theorie aber **nicht** mehr aus.

Zur allgemeinen Relativitätstheorie.

VON A. EINSTEIN.

In den letzten Jahren

Dem Zauber dieser Theorie wird sich kaum jemand entziehen können, der sie wirklich erfaßt hat: sie bedeutet einen wahren Triumph der durch GAUSS, RIEMANN, CHRISTOFFEL, RICCI und LEVI-CIVITER begründeten Methode des allgemeinen Differentialkalküls. Gerade diese Lösung in einer im vorigen Jahre in diesen Sitzungsberichten erschienenen Arbeit¹ darzutun.

Folgerungen und Vorhersagen: *Gravitation dehnt die Zeit*

Es werde ferner die auf die Zeitkoordinate untersuchte Ganggeschwindigkeit einer Einheitsuhr untersucht, welche in einem statischen Gravitationsfelde ruhend angeordnet ist. Hier gilt für eine Uhrperiode

$$d s = 1; \quad d x_1 = d x_2 = d x_3 = 0 .$$

Also ist

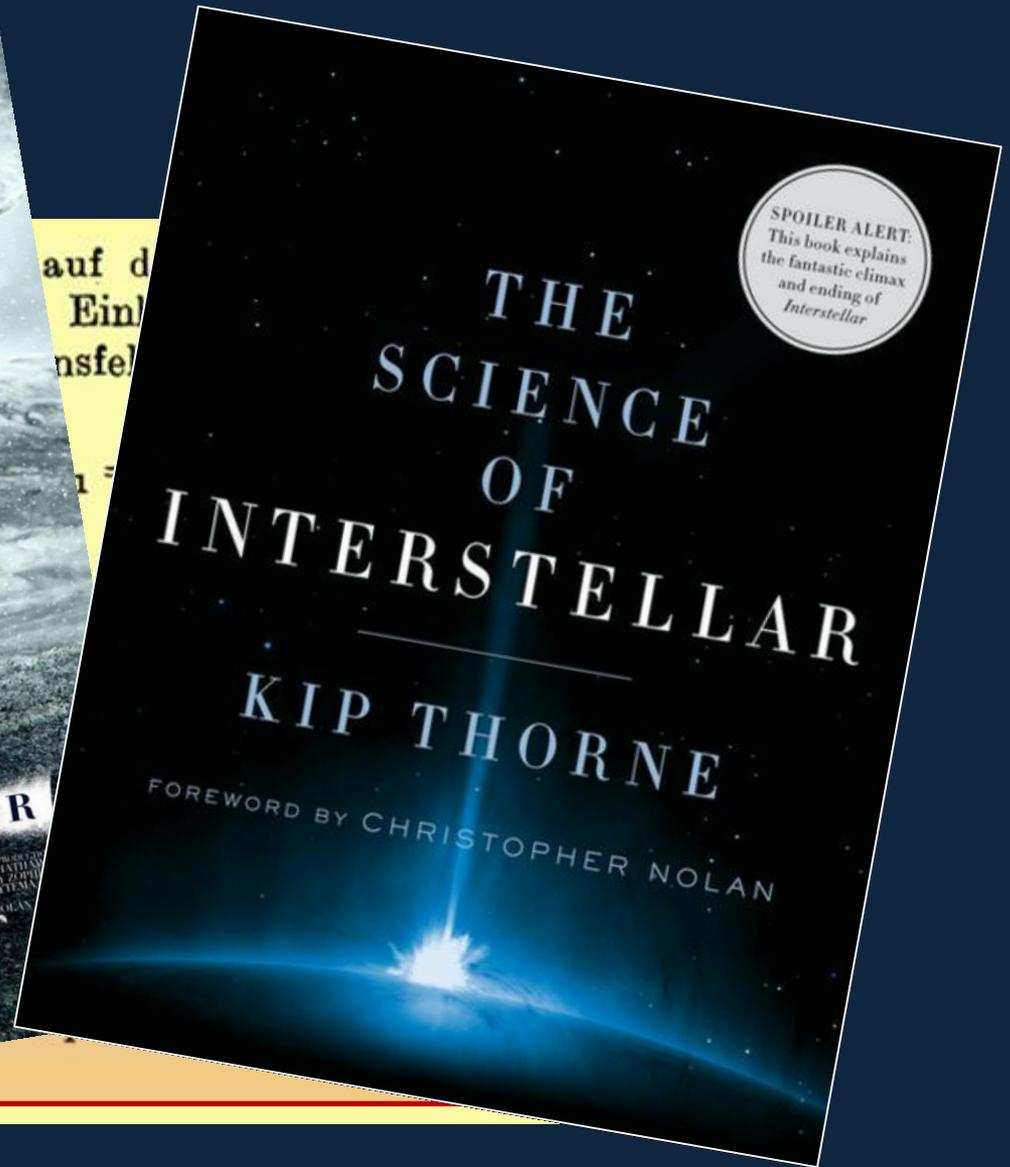
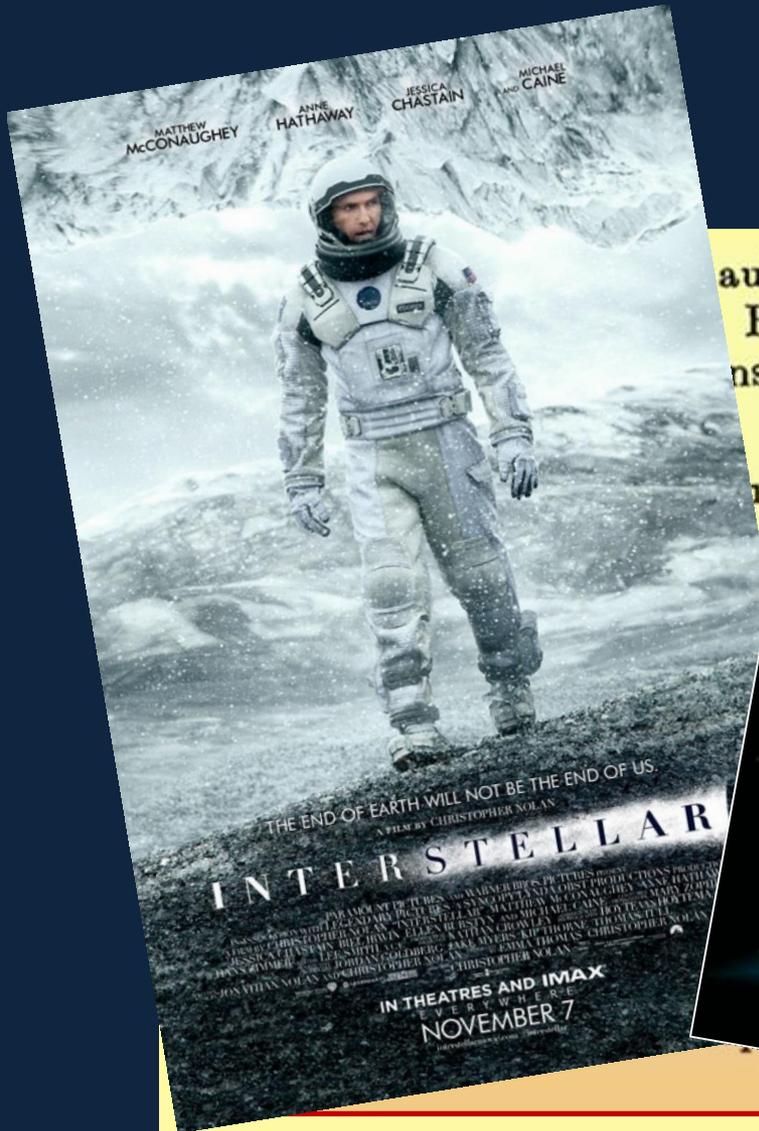
$$1 = g_{44} d x_4^2;$$
$$d x_4 = \frac{1}{\sqrt{g_{44}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (g_{44} - 1)}} = 1 - \frac{g_{44} - 1}{2}$$

oder

$$(72) \quad d x_4 = 1 + \frac{x}{8 \pi} \int \frac{\rho d \tau}{r} .$$

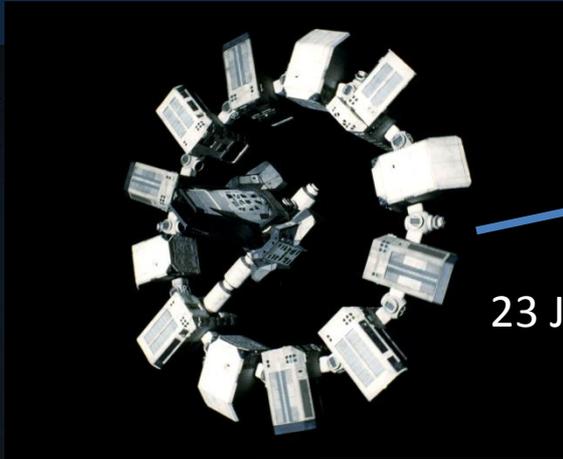
Die Uhr läuft also langsamer, wenn sie in der Nähe ponderabler Massen aufgestellt ist. Es folgt daraus, daß die Spektrallinien von der Oberfläche großer Sterne zu uns gelangenden Lichtes nach dem roten Spektralende verschoben erscheinen müssen.

Folgerungen und Vorhersagen: **Gravitation dehnt die Zeit**

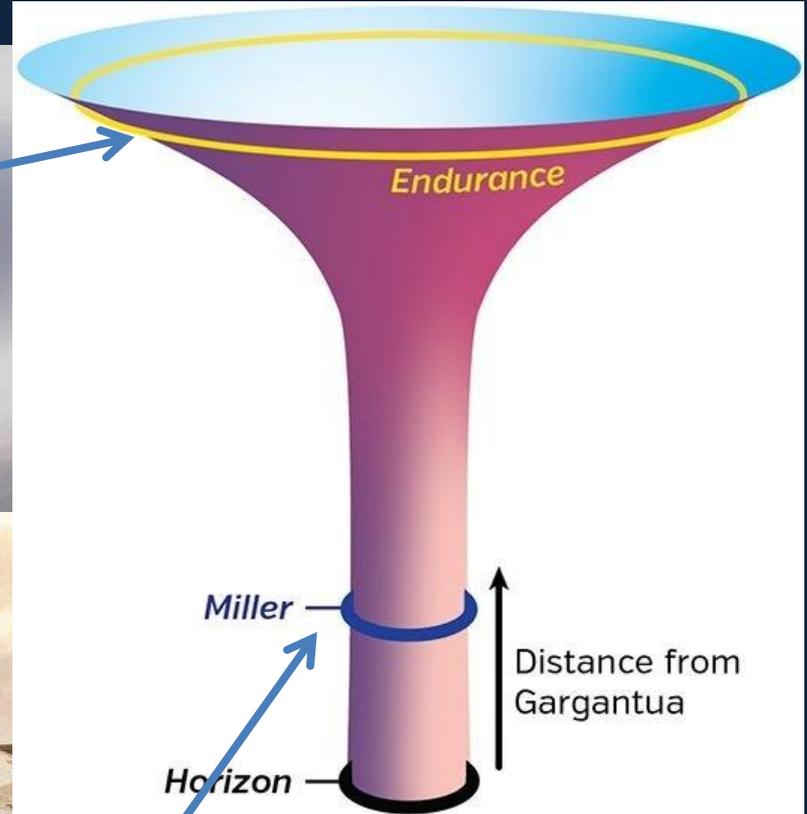


Folgerungen und Vorhersagen:

Gravitation dehnt die Zeit



23 Jahre



3,3 Stunden

Folgerungen und Vorhersagen: **Gravitation krümmt Lichtstrahlen**

$$\gamma = \sqrt{-\frac{g_{44}}{g_{22}}} = 1 + \frac{\alpha}{2r} \left(1 + \frac{x_2^2}{r^2}\right).$$

Die Ausrechnung ergibt

$$(74) \quad B = \frac{2\alpha}{\Delta} = \frac{\kappa M}{4\pi \Delta}.$$

Ein an der Sonne vorbeigehender Lichtstrahl erfährt demnach eine Biegung von $1,7''$, ein am Planeten Jupiter vorbeigehender eine solche von etwa $0,02''$.

Folgerungen und Vorhersagen: *Periheldrehung der Merkurbahn*

Berechnet man das Gravitationsfeld um eine Größenordnung genauer, und ebenso mit entsprechender Genauigkeit die Bahnbewegung eines materiellen Punktes von relativ unendlich kleiner Masse, so erhält man gegenüber den Kepler-Newton'schen Gesetzen der Planetenbewegung eine Abweichung von folgender Art. Die Bahnellipse eines Planeten erfährt in Richtung der Bahnbewegung eine langsame Drehung vom Betrage

$$(75) \quad \varepsilon = 24 \pi^3 \frac{a^2}{T^2 c^3 (1 - e^2)}$$

pro Umlauf. In dieser Formel bedeutet a die große Halbachse, c die Lichtgeschwindigkeit in üblichem Maße, e die Exzentrizität, T die Umlaufszeit in Sekunden.¹⁾

Die Rechnung ergibt für den Planeten Merkur eine Drehung der Bahn um 43'' pro Jahrhundert, genau entsprechend der Konstatierung der Astronomen (Leverrier); diese fanden nämlich einen durch Störungen der übrigen Planeten nicht erklärbaren Rest der Perihelbewegung dieses Planeten von der angegebenen Größe.

Folgerungen und Vorhersagen:

GravitationswellenNäherungsweise Integration der Feldgleichungen
der Gravitation.

VON A. EINSTEIN.

Bei der Behandlung der meisten speziellen (nicht prinzipiellen) Probleme auf dem Gebiete der Gravitationstheorie kann man sich damit begnügen, die $g_{\mu\nu}$ in erster Näherung zu berechnen. Dabei bedient man sich mit Vorteil der imaginären Zeitvariable $x_4 = it$ aus denselben Gründen wie in der speziellen Relativitätstheorie. Unter »erster Näherung« ist dabei verstanden, daß die durch die Gleichung

$$g_{\mu\nu} = -\delta_{\mu\nu} + \gamma_{\mu\nu} \quad (1)$$

definierten Größen $\gamma_{\mu\nu}$, welche linearen orthogonalen Transformationen gegenüber Tensorcharakter besitzen, gegen 1 als kleine Größen behandelt werden können, deren Quadrate und Produkte gegen die ersten Potenzen vernachlässigt werden dürfen. Dabei ist $\delta_{\mu\nu} = 1$ bzw. $\delta_{\mu\nu} = 0$, je nachdem $\mu = \nu$ oder $\mu \neq \nu$.

Wir werden zeigen, daß diese $\gamma_{\mu\nu}$ in analoger Weise berechnet werden können wie die retardierten Potentiale der Elektrodynamik.

Daraus folgt dann zunächst, daß sich die Gravitationsfelder mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Wir werden im Anschluß an diese allgemeine Lösung die Gravitationswellen und deren Entstehungsweise untersuchen.



Karl Schwarzschild (1873 – 1916)

Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der EINSTEINSchen Theorie.

Von K. SCHWARZSCHILD.

(Vorgelegt am 13. Januar 1916 [s. oben S. 42].)

§ 1. Hr. EINSTEIN hat in seiner Arbeit über die Physik des Merkur (1915) ...

Wichtiger ist, daß die Rechnung zugleich die eindeutige Bestimmtheit der Lösung ergibt, über die Hr. EINSTEINS Behandlung noch Zweifel ließ, und die nach der Art, wie sie sich unten einstellt, wohl auch nur schwer durch ein solches Annäherungsverfahren erwiesen werden könnte. Die folgenden Zeilen führen also dazu, Hr. EINSTEINS Resultat in vermehrter Reinheit erstrahlen zu lassen.

Setzt man diese Werte der Funktionen f im Ausdruck (9) des Linienelements ein und kehrt zugleich zu gewöhnlichen Polarkoordinaten zurück, so ergibt sich das Linienelement, welches die strenge Lösung des EINSTEINSchen Problems bildet:

$$ds^2 = (1 - \alpha/R)dt^2 - \frac{dR^2}{1 - \alpha/R} - R^2(d\vartheta^2 + \sin^2 \vartheta d\phi^2), \quad R = (r^3 + \alpha^3)^{1/3}. \quad (14)$$

Folgerungen
und Vorhersagen:

Schwarze Löcher



Karl Schwarzschild (1873 – 1916)

Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der EINSTEINSchen Theorie.

Von K. SCHWARZSCHILD.

(Vorgelegt am 13. Januar 1916 [s. oben S. 42].)

§ 1. Hr. EINSTEIN hat in seiner Arbeit über die Physik des Merkur (1915) gezeigt, dass die Rechnung zugleich die eindeutige Bestimmtheit der Lösung ergibt, über die Hr. EINSTEINS Bestimmung (1915) und die nach der Art, wie sie sich unten

Für einen außen messenden Beobachter folgt gemäß (40), daß eine Kugel von gegebener Gravitationsmasse $\alpha, 2k^2$ keinen kleineren außen gemessenen Radius haben kann, als:

$$P_a = \alpha.$$

Für eine Kugel aus inkompressibler Flüssigkeit wird die Grenze $9/8\alpha$. Für die Sonne wird α gleich 3 km für eine Masse von 1 g gleich $1.5 \cdot 10^{-28}$ cm.)

Schwarzschildradius

$$ds^2 = (1 - \alpha/R)dt^2 - \frac{dR^2}{1 - \alpha/R} - R^2(d\vartheta^2 + \sin^2\vartheta d\phi^2), R = (r^3 + \alpha^3)^{1/3}. \quad (14)$$

Folgerungen
und Vorhersagen:

Schwarze Löcher

Beweise für die Richtigkeit der Allgemeinen Relativitätstheorie

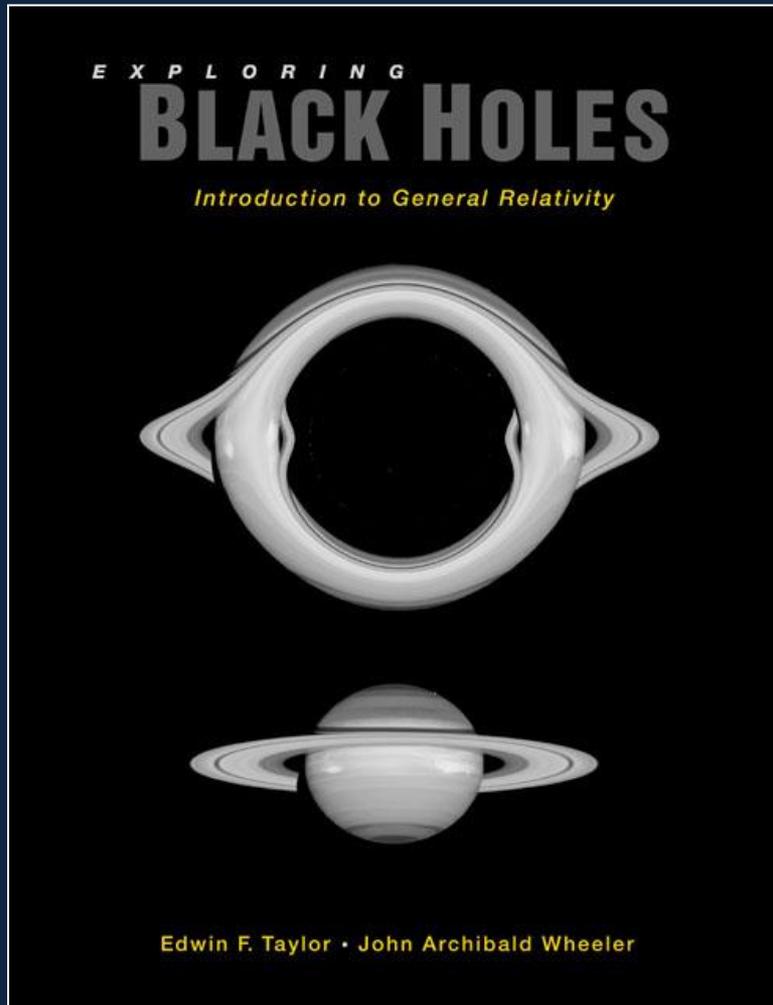
Historisch:

- Periheldrehung der Merkurellipse
- Lichtablenkung am Sonnenrand
- Shapiro-Experiment

Aktuell:

- Schwarze Löcher
- Nachweis von Gravitationswellen
- GPS

Eine eigene Computersimulation zur ART



Basis:

Taylor und Wheeler entwickeln ihre Einführung in die ART auf Grundlage der Schwarzschildmetrik ohne Tensoren.

Sämtliche Formeln erscheinen in differentieller Darstellung.

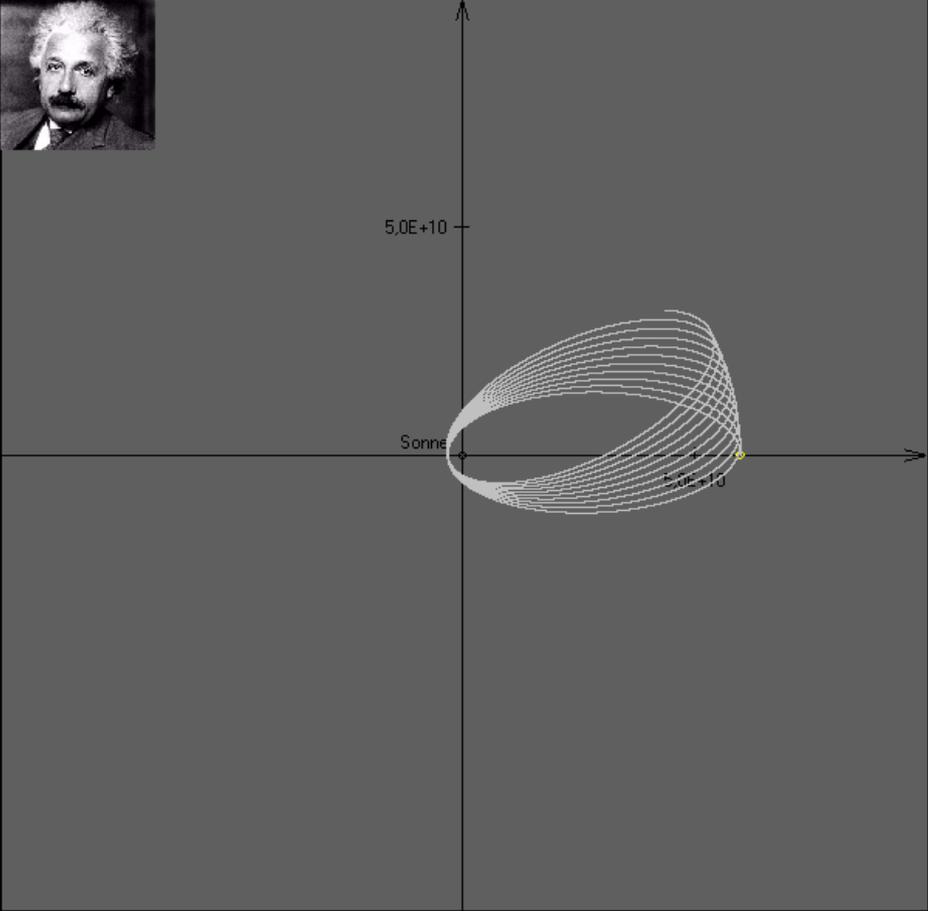
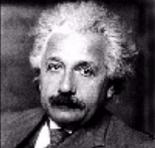
ART-Simulation

Computersimulation Periheldrehung Matthias Borchardt

http://www.mabo-physik.de/phaenomene_der_art.html

Szenarien

Periheldrehung **i** **Lichtablenkung** **i** **Shapiro-Effekt** **i** **Schwarzes Loch** **i** **Neutronenstern** **i**



Startdaten für Ellipse

Startposition in m
x = 6,000E+10
y = 0 m

Geschwindigkeit m/s
v = 1,500E+06

Info

große Halbachse (m)	Exzentrizität
3,1598895E+10	0,8988006

Werte übernehmen

Physik

Bahnkurve nach Newton

Bahnkurve nach Einstein

Steuerung

Pause Informationen zum Programm

Abbrechen Löschen **Ende**

Simulationsgeschwindigkeit
schnell langsam

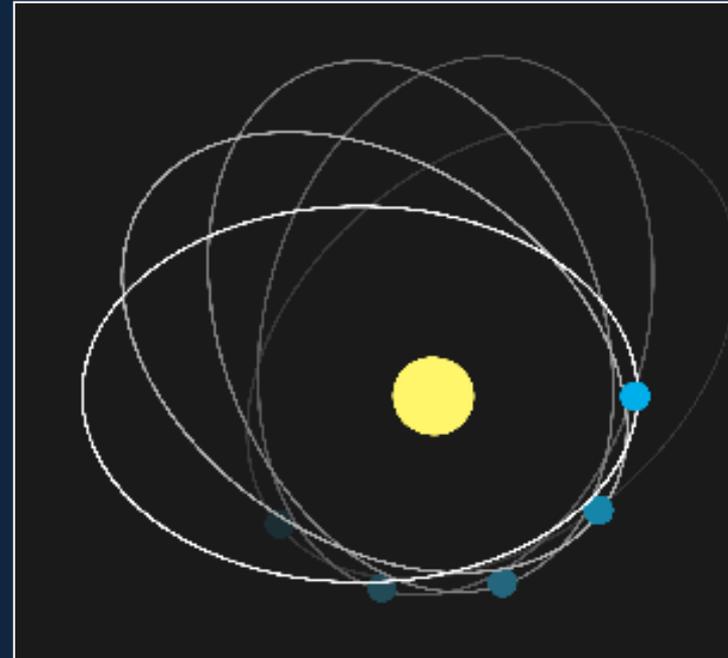
Periheldrehung der Merkurbahn

Ein astronomisches Rätsel:

Die Bahn des Merkur wird durch die übrigen Planeten so gestört, dass die Ellipse sich nach klassischer Rechnung (Newton) im Jahrhundert um 531 Bogensekunde verschieben sollte.

Gemessen werden aber 574'' - also 43'' zu viel.

Woher stammen die 43 Bogensekunden ?



1916.

ANNALEN DER PHYSIK.

VIERTE FOLGE. BAND 49.

№ 7.

1. Die Grundlage
der allgemeinen Relativitätstheorie;
von A. Einstein.

...vitationsfeld um eine Größen-
mit entsprechender Genauig-
...des materiellen Punktes von relativ
...Masse, so erhält man gegenüber den Kepler-
...wonschen Gesetzen der Planetenbewegung eine Abwei-
chung von folgender Art. Die Bahnellipse eines Planeten er-
fährt in Richtung der Bahnbewegung eine langsame Drehung
vom Betrage

$$(75) \quad \varepsilon = 24 \pi^3 \frac{a^2}{T^2 c^2 (1 - e^2)}$$

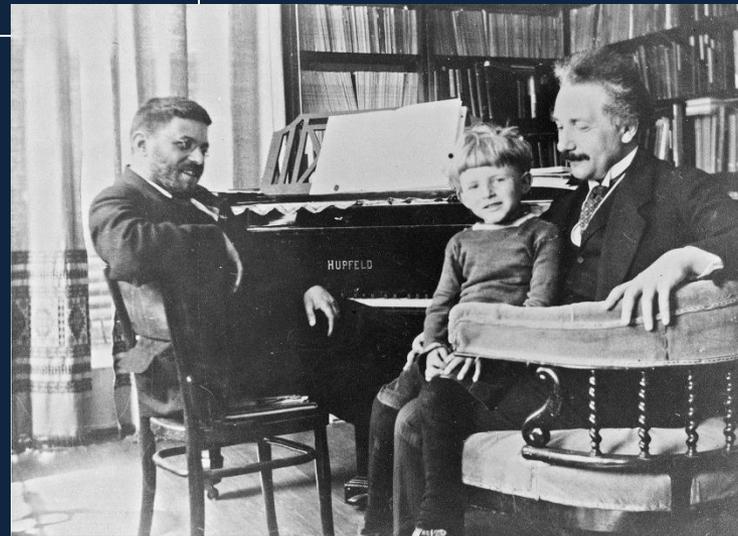
pro Umlauf. In dieser Formel bedeutet a die große Halbachse,
 c die Lichtgeschwindigkeit in üblichem Maße, e die Exzentrizität,
 T die Umlaufszeit in Sekunden.¹⁾

Die Rechnung ergibt für den Planeten Merkur eine Drehung
der Bahn um 43'' pro Jahrhundert, genau entsprechend der
Konstatierung der Astronomen (Leverrier); diese fanden
nämlich einen durch Störungen der übrigen Planeten nicht
erklärbaren Rest der Perihelbewegung dieses Planeten von
der angegebenen Größe.

Periheldrehung der Merkurbahn

Zu diesem Erfolg schrieb EINSTEIN am 17. Januar 1916 an seinen Freund und Kollegen PAUL EHRENFEST:

«... Denk dir meine Freude beim Resultat, dass die Gleichungen die Perihelbewegungen Merkurs richtig liefern! Ich war einige Tage fassungslos vor freudiger Erregung.»



Albert Einstein zu Besuch bei Paul Ehrenfest in Leiden im Jahr 1920. Auf Einsteins Schoß der älteste Sohn Paul Ehrenfest (Jr.).

Lichtablenkung am Sonnenrand

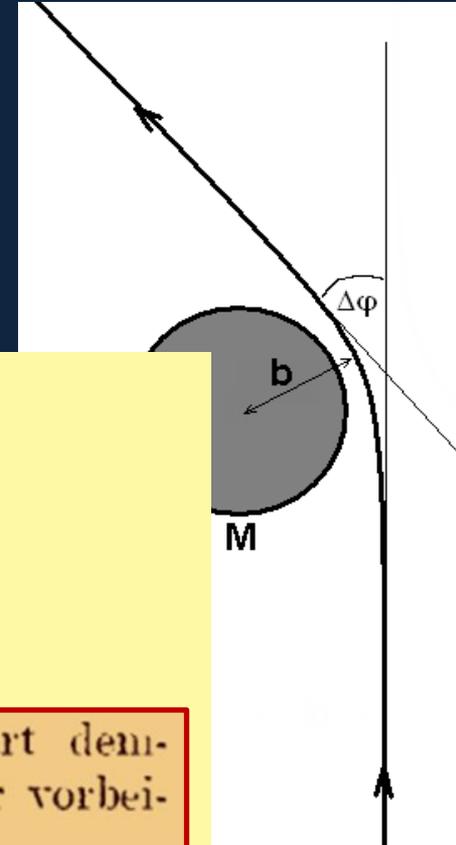
$$\Delta\phi_{\text{Newton}} = 2 \cdot \frac{G \cdot M}{b \cdot c^2} = 0,875 \text{ Bogensekunden}$$

$$\gamma = \sqrt{-\frac{g_{44}}{g_{22}}} = 1 + \frac{\alpha}{2r} \left(1 + \frac{x_2^2}{r^2}\right).$$

Die Ausrechnung ergibt

$$(74) \quad B = \frac{2\alpha}{\Delta} = \frac{\kappa M}{4\pi\Delta}.$$

Ein an der Sonne vorbeigehender Lichtstrahl erfährt demnach eine Biegung von $1,7''$, ein am Planeten Jupiter vorbeigehender eine solche von etwa $0,02''$.



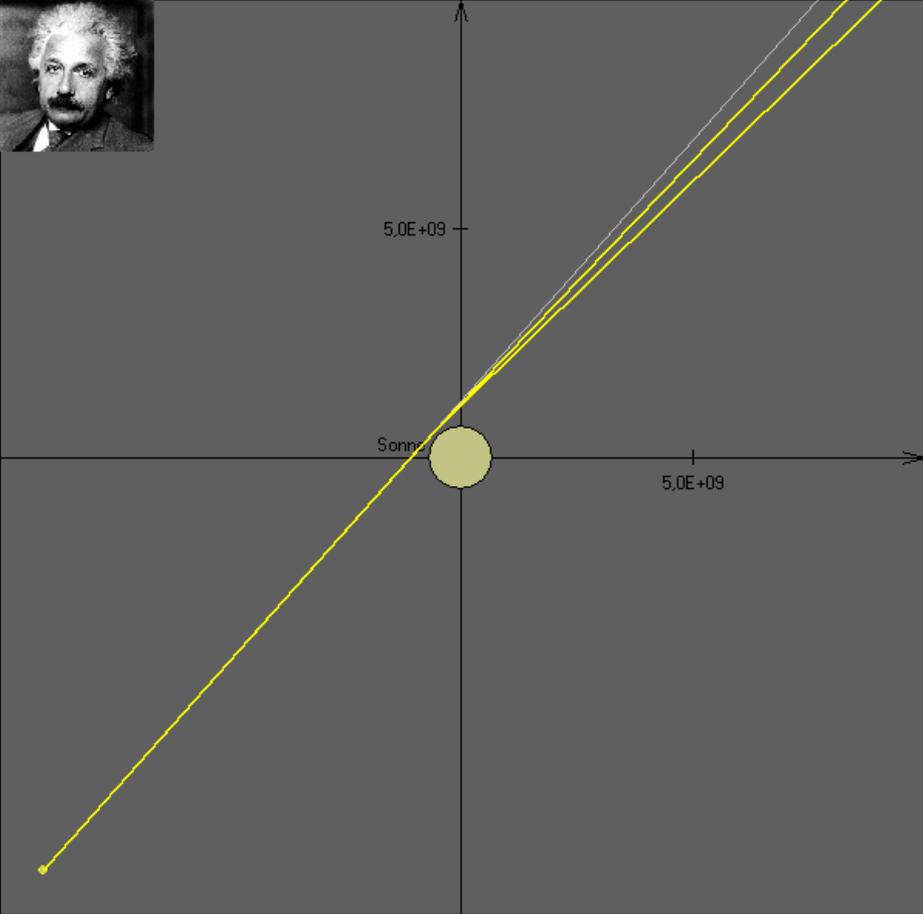
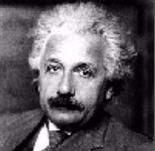
Computersimulation Lichtablenkung am Sonnenrand

Matthias Borchardt

http://www.mabo-physik.de/phaenomene_der_art.html

Szenarien

Periheldrehung **i** **Lichtablenkung** **i** Shapiro-Effekt **i** Schwarzes Loch **i** Neutronenstern **i**



Startdaten für Licht

Startposition in m
x = -9,000E+09
y = -9,000E+09

Radius der Sonne
7,0E+08 m

Geschwindigkeit m/s
V = 300 000 000

Richtung in Grad
41,3

Werte übernehmen

Physik

Bahnkurve nach Newton

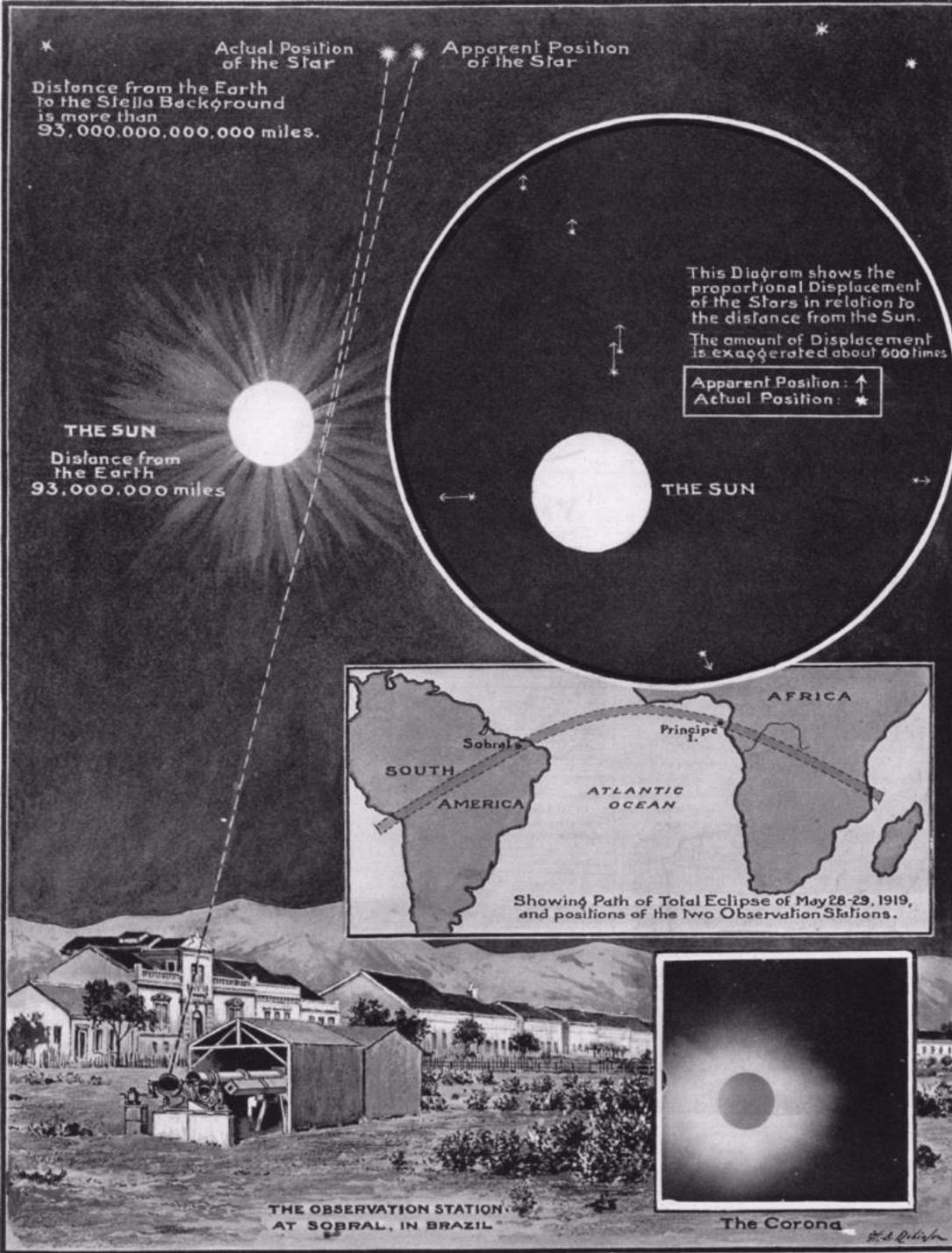
Bahnkurve nach Einstein

Steuerung

Pause Informationen zum Programm

Abbrechen Löschen Ende

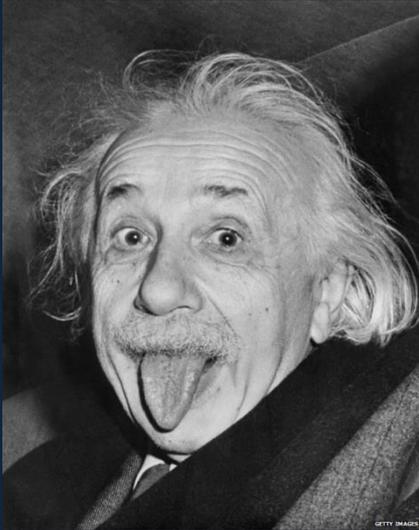
Simulationsgeschwindigkeit
schnell langsam



Experimentum Crucis: 0,87'' oder 1,75''

Darstellung der beiden
Sonnenfinsternis-Expedition
1919 nach *Principe* vor der
westafrikanischen Küste und
nach *Sobral* in Nordbrasilien
aus der Zeitschrift
„*Illustrated London News*“ vom
22 November 1919

Einstein wird zum Medienstar



Schlagzeile New York Times vom 10. November 1919

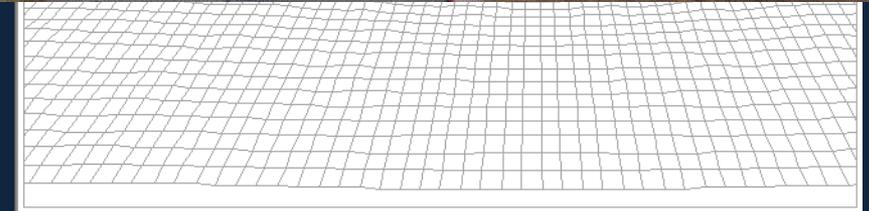
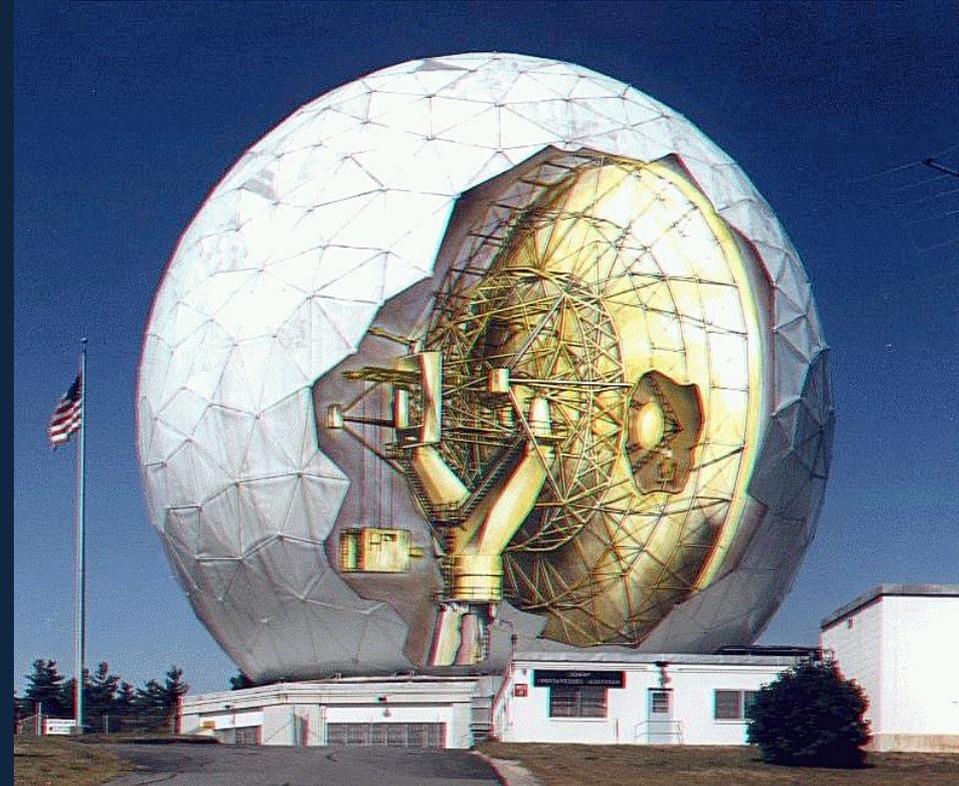
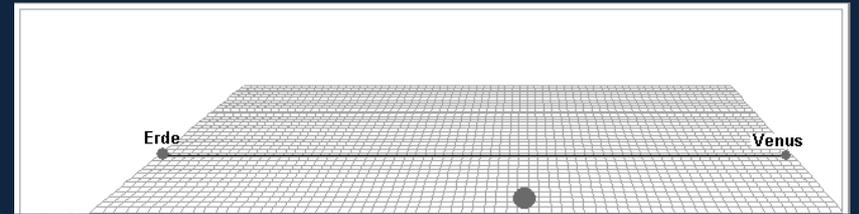
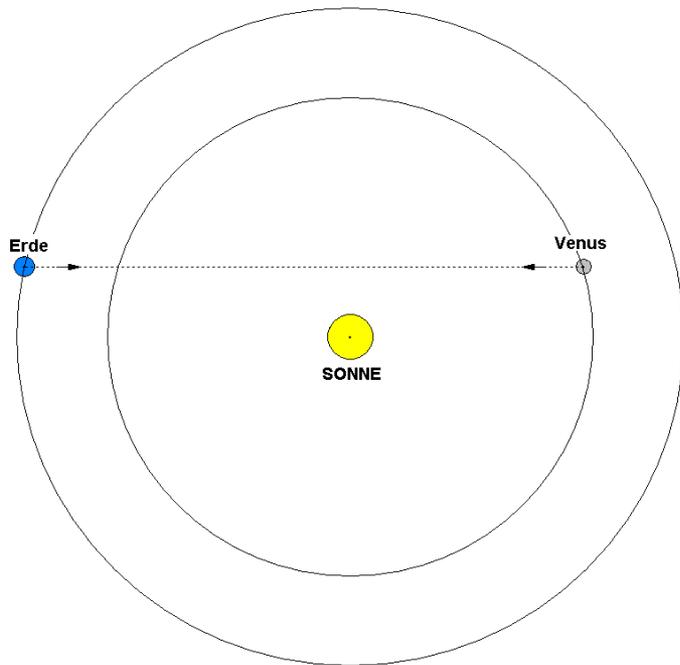
LIGHTS ALL ASKEW IN THE HEAVENS

Men of Science More or Less
Agog Over Results of Eclipse
Observations.

EINSTEIN THEORY TRIUMPHS

Stars Not Where They Seemed
or Were Calculated to be,
but Nobody Need Worry.

Das Shapiro-Experiment von 1971



[Simulation-Shapiro](#)

Computersimulation: Shapiro-Verzögerung

Matthias Borchardt

http://www.mabo-physik.de/phaenomene_der_art.html

Szenarien

Periheldrehung **i** Lichtablenkung **i** **Shapiro-Effekt **i**** Schwarzes Loch **i** Neutronenstern **i**

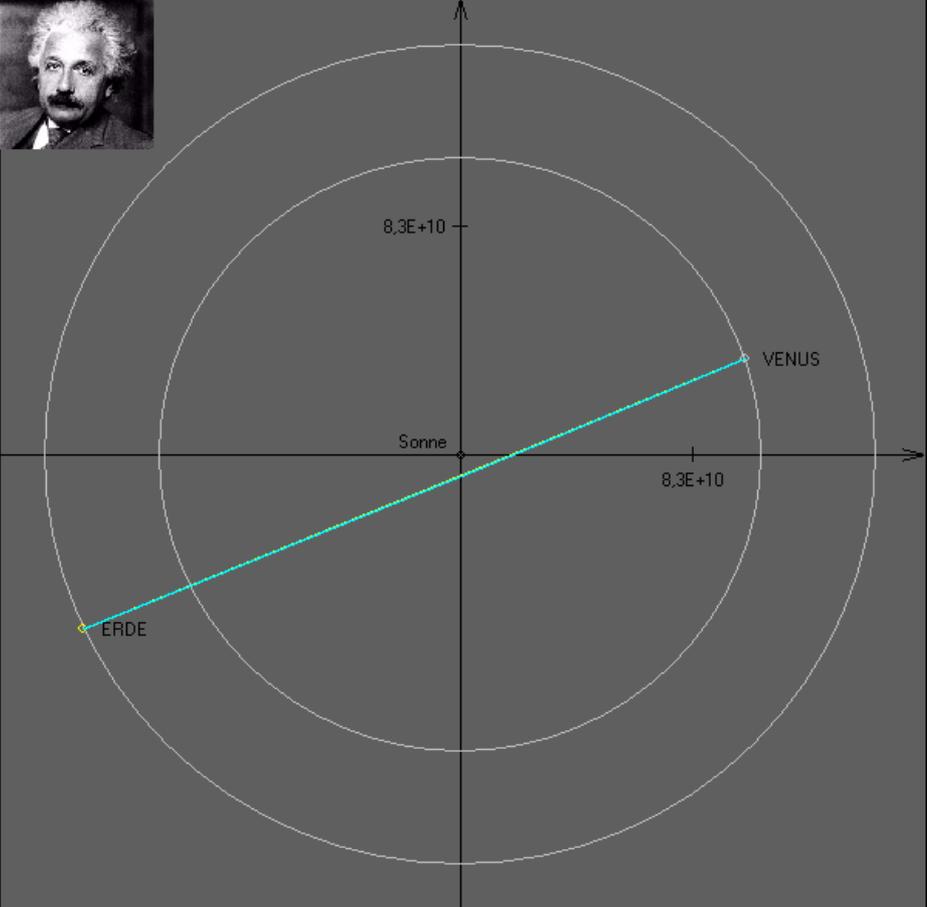


Diagram showing the orbits of Earth (ERDE) and Venus (VENUS) around the Sun (Sonne). The Sun is at the center. The Earth's orbit has a radius of $8,3E+10$ m. The Venus orbit has a radius of $8,3E+10$ m. A red line indicates the radar signal path from Earth to Venus and back.

Daten für Radarecho-Experiment

-10 Tage von bzw. bis zur oberen Konjunktion

Abstand Erde - Sonne (m) $1,49600000E+11$

Abstand Venus - Sonne (m) $1,08160000E+11$

Abstand Erde - Venus (m) $2,57396692E+11$

Laufzeit (Hin-Rückweg)	Laufzeit (Hin-Rückweg)
Newton	Einstein
1715.398 s	1717.158 s

Differenz Einstein - Newton

1.76 s

Physik

Bahnkurve nach Newton

Bahnkurve nach Einstein

Steuerung

Pause Informationen zum Programm

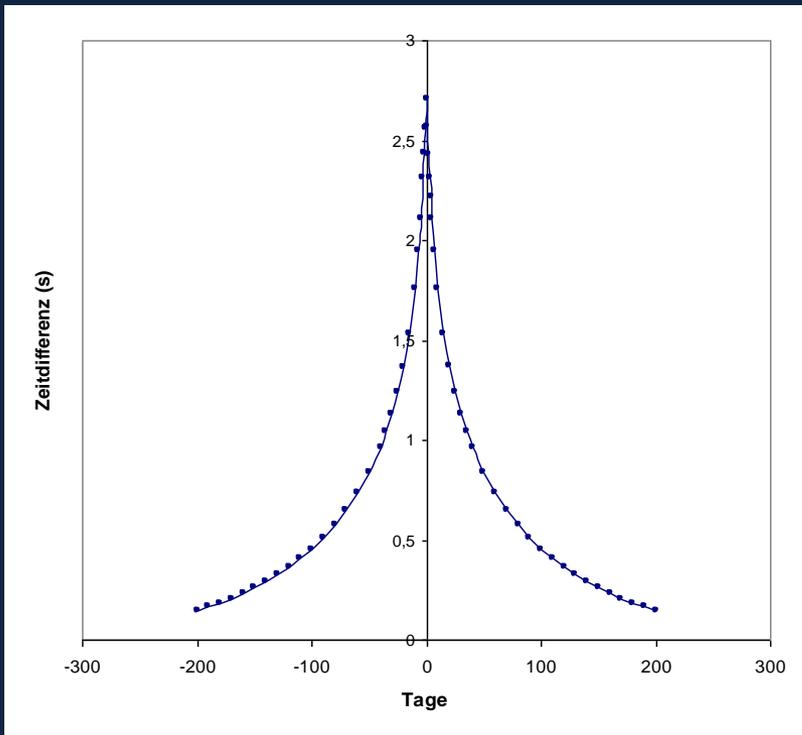
Abbrechen Löschen **Ende**

Simulationsgeschwindigkeit

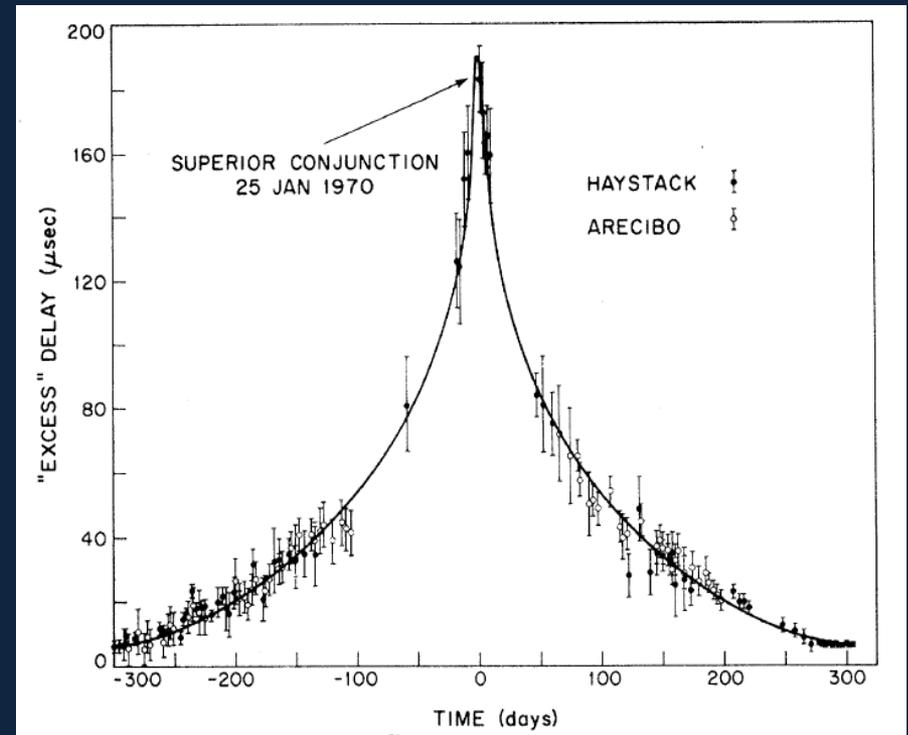
schnell langsam

Graphische Darstellung der Ergebnisse

der Computersimulation



des Shapiro-Experiments



*Fourth Test of General Relativity:
New Radar Result, 1971*

Wie entstehen schwarze Löcher?

Endstadien der Sternentwicklung (nicht maßstabsgetreu)

Stern kleiner 0.3
Sonnenmassen



leichter Weißer
Zwerg

Stern mit 0.3 bis 2.3
Sonnenmassen



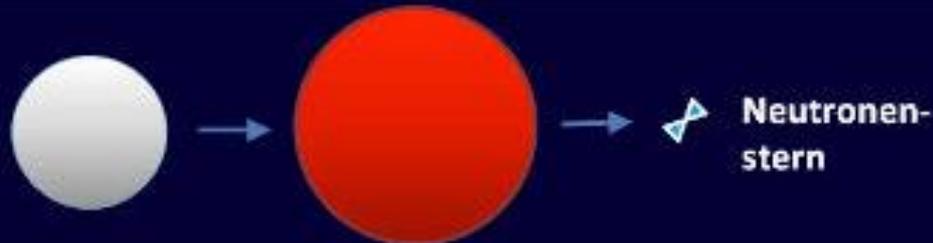
mittelschwerer
Weißer Zwerg

Stern mit 2.3 bis 10.5
Sonnenmassen



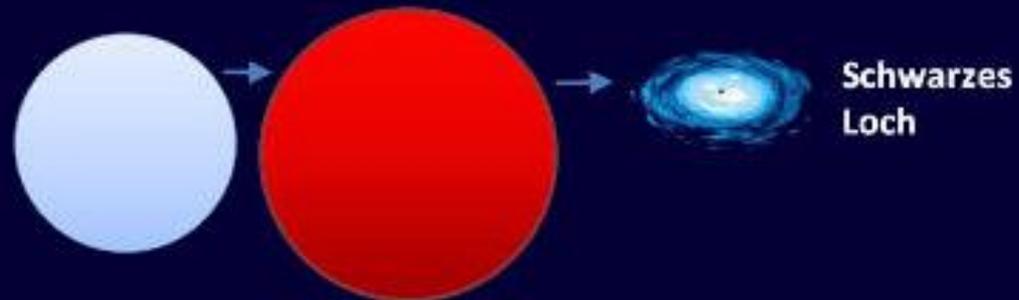
schwerer
Weißer Zwerg

Stern über 10.5
Sonnenmassen



Neutronen-
stern

Stern sehr viel über 10
Sonnenmassen



Schwarzes
Loch

Lichtablenkung in der Nähe eines Schwarzen Loches

[Simulation – Black Hole](#)

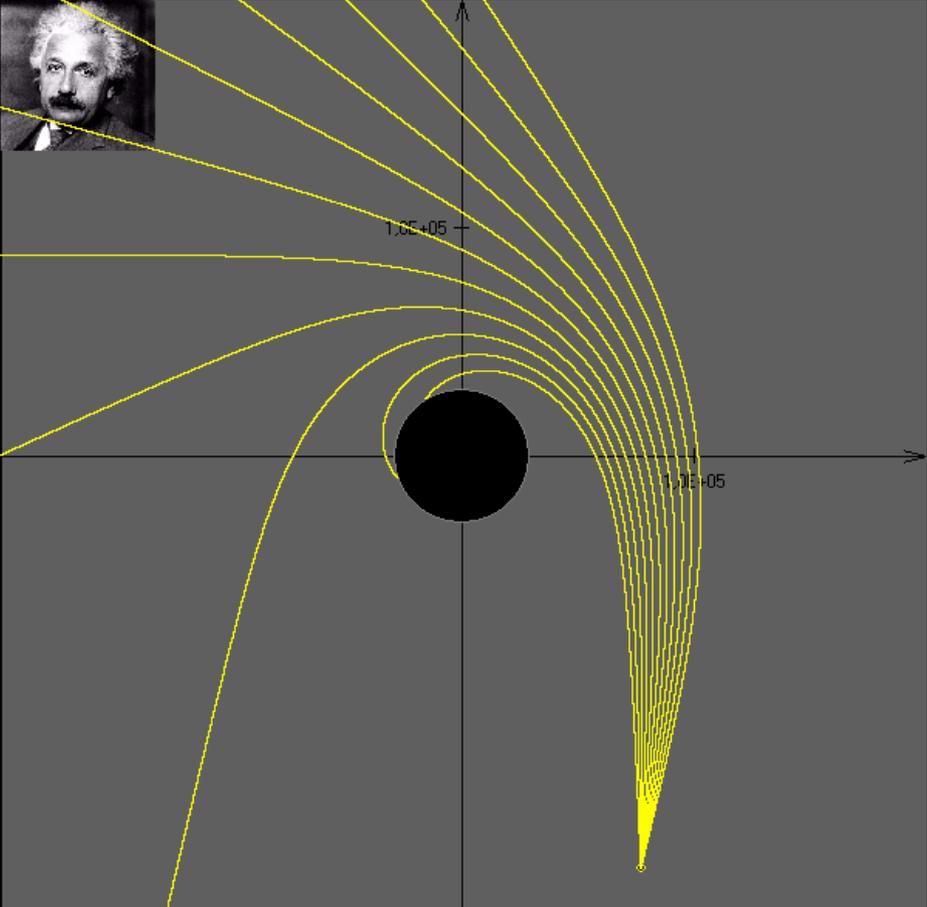
Computersimulation: Lichtablenkung in der Nähe eines Schwarzen Loches

Matthias Borchardt

http://www.mabo-physik.de/phaenomene_der_art.html

Szenarien

Periheldrehung **i** Lichtablenkung **i** Shapiro-Effekt **i** **Schwarzes Loch **i**** Neutronenstern **i**



Startdaten für Licht

Startposition in m
x = 7,7000000000E+4
y = -1,8000000000E+5

Geschwindigkeit m/s
V = 300 000 000

Stoßparameter b [in 10 hoch 3 Meter]
+ 1 2 0 0 0 0 0 knife-edge orbit

Werte übernehmen

Physik

Bahnkurve nach Newton
Bahnkurve nach Einstein

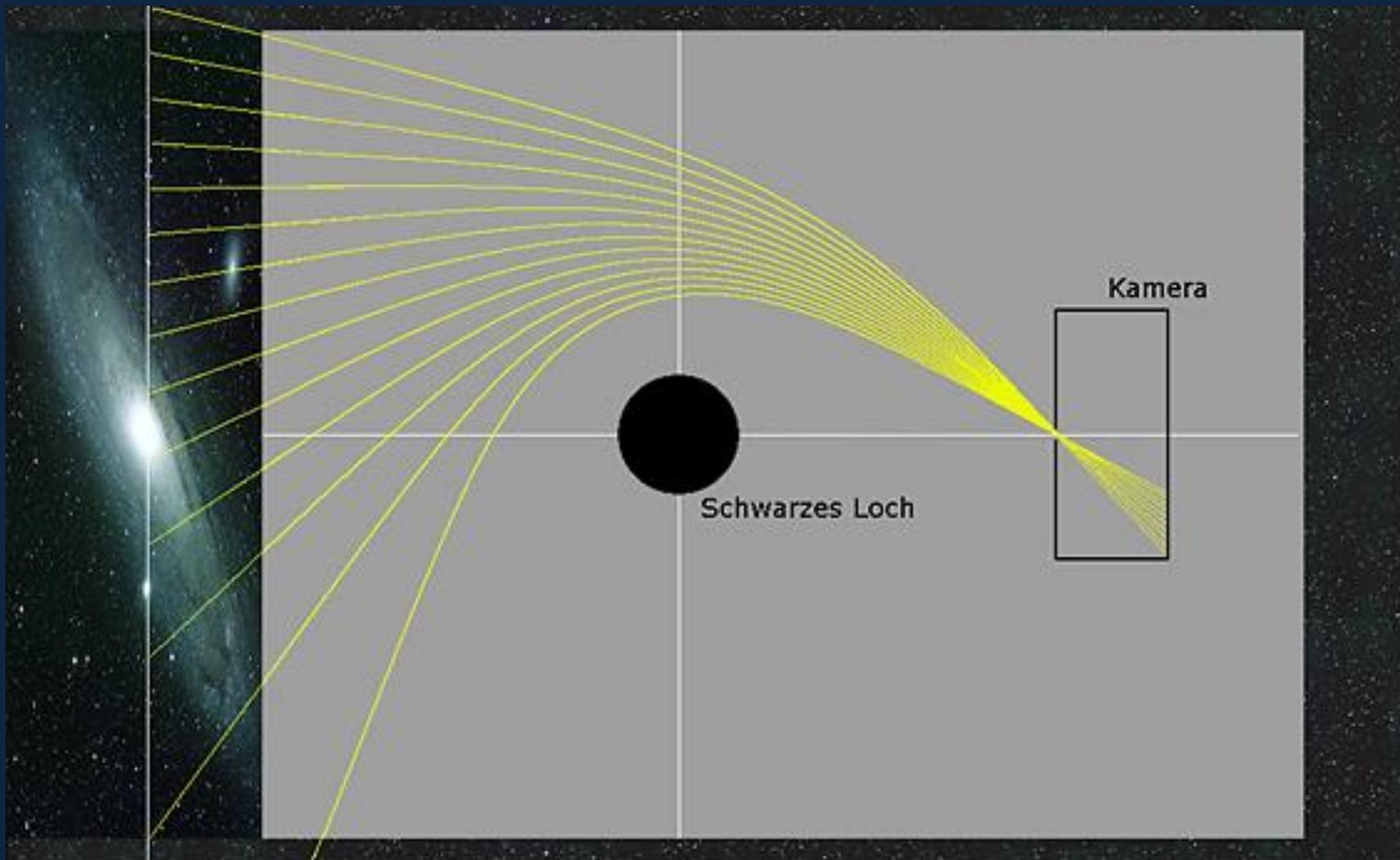
Steuerung

Pause Informationen zum Programm

Abbrechen Löschen Ende

Simulationsgeschwindigkeit
schnell langsam

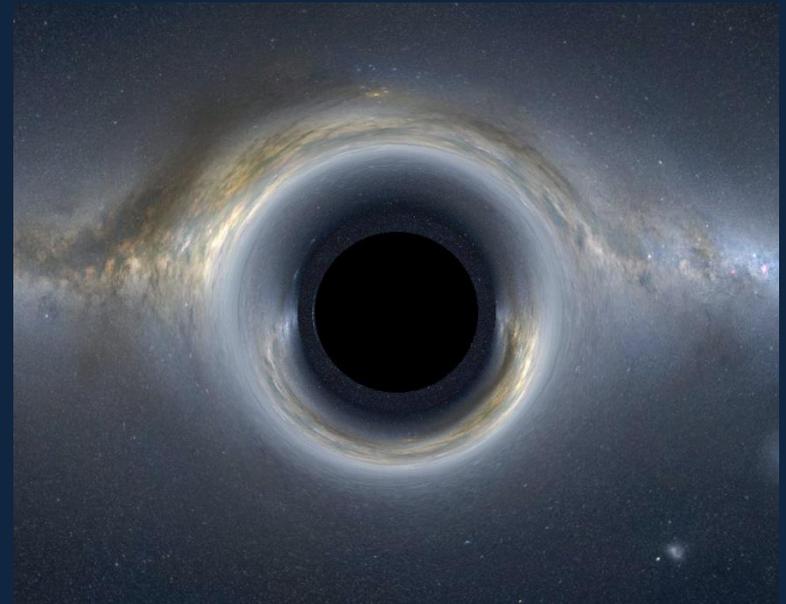
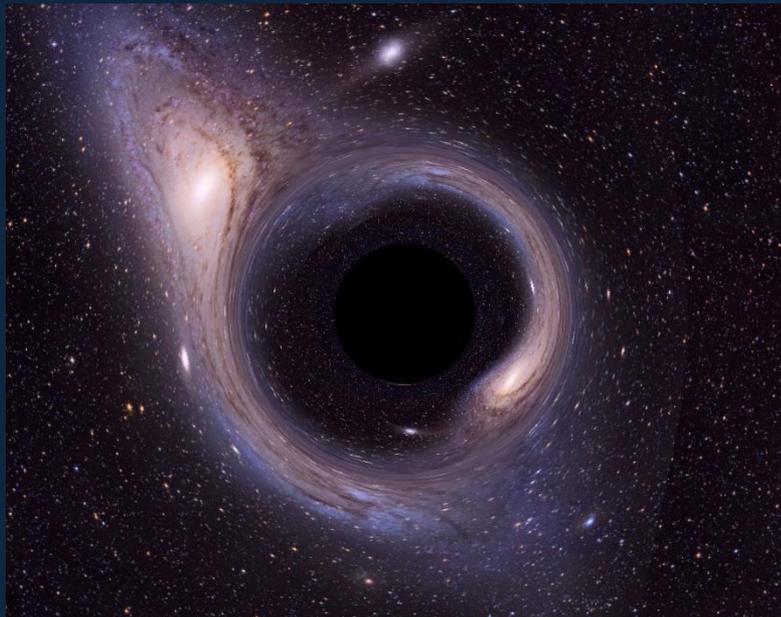
Bildkonstruktion mit einer virtuellen Lochkamera





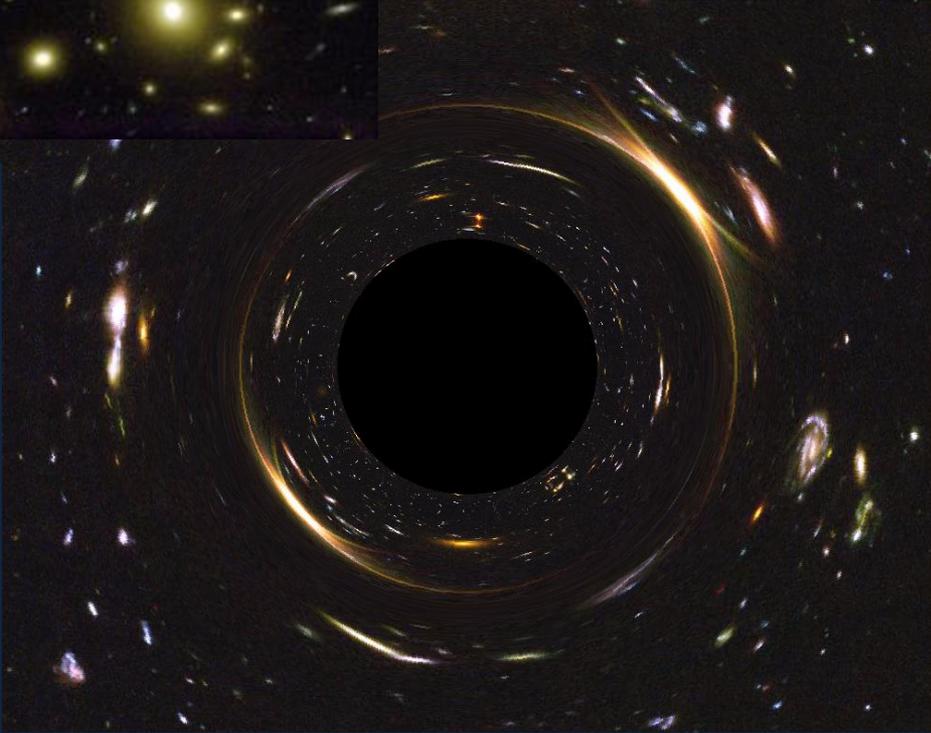
Bildanimationen von Matthias Borchardt

http://www.mabo-physik.de/animationen_zu_schwarzen_loechern.html





Aufnahme des
Hubble-Weltraumteleskops
Ein Galaxienhaufen wirkt als Gravitationslinse



Simulation
Matthias Borchardt

Animationen von Matthias Borchardt

http://www.mabo-physik.de/animationen_zu_schwarzen_loechern.html

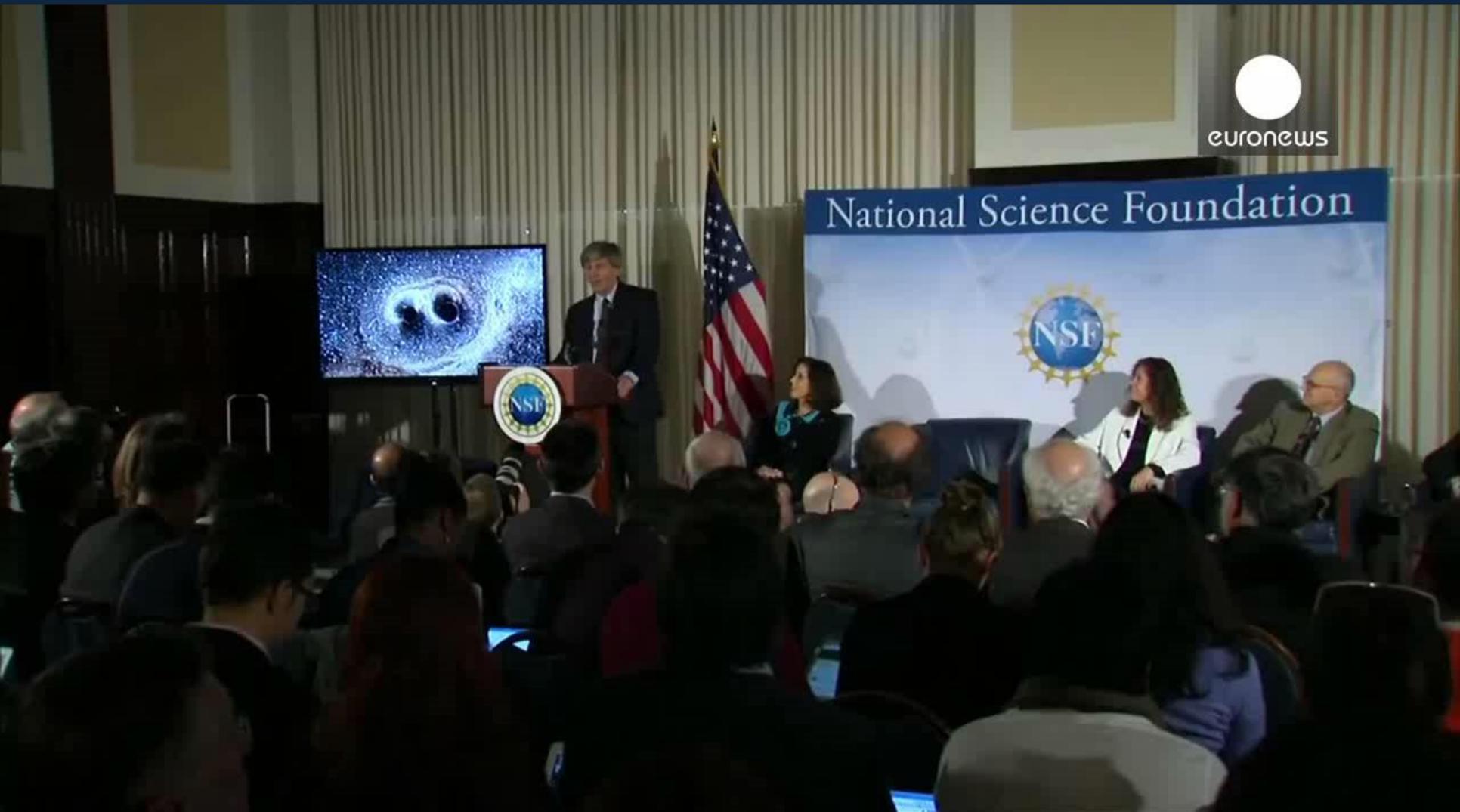


Animationen von Matthias Borchardt

http://www.mabo-physik.de/animationen_zu_schwarzen_loechern.html

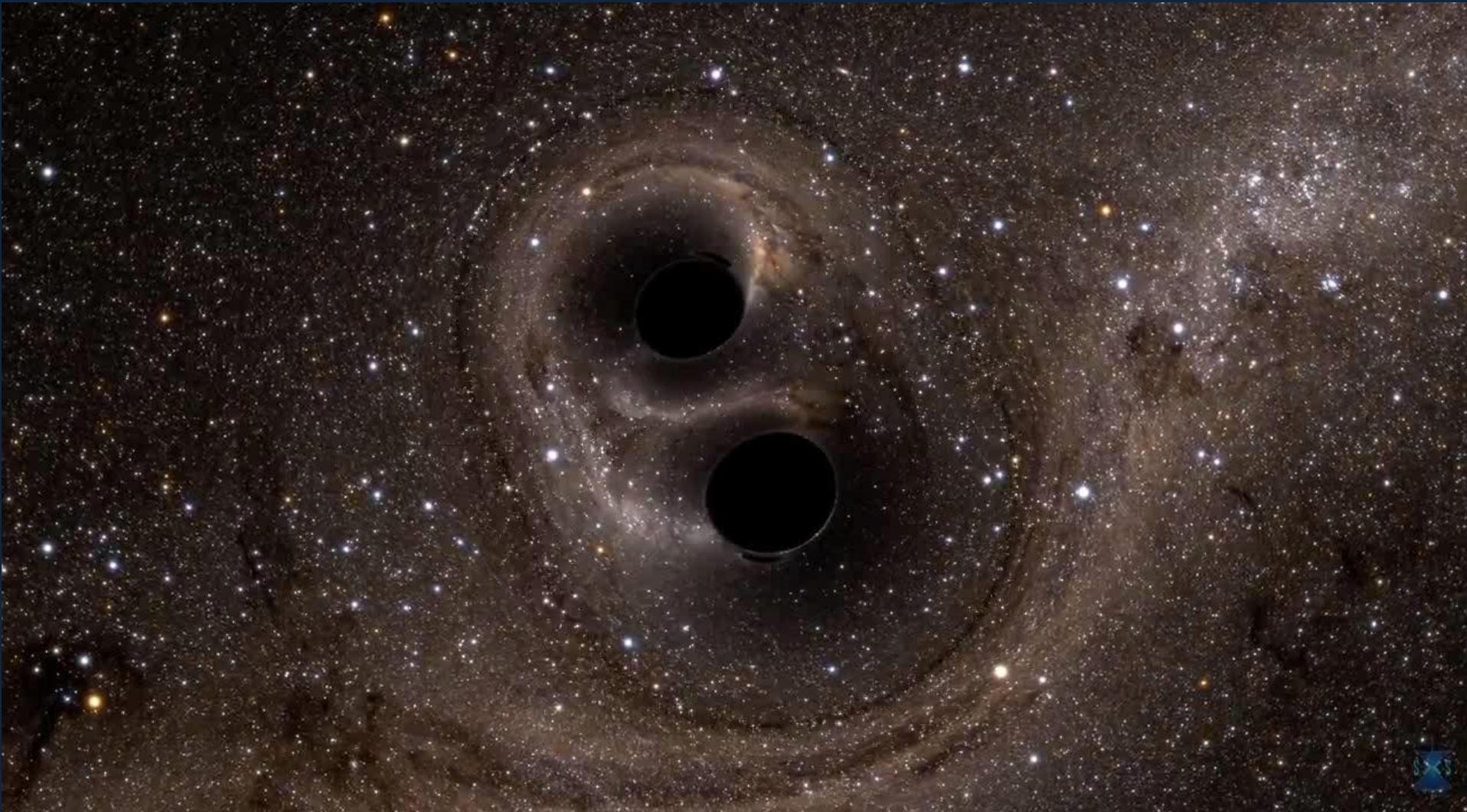


11. Februar 2016 „We did it“



Animation:

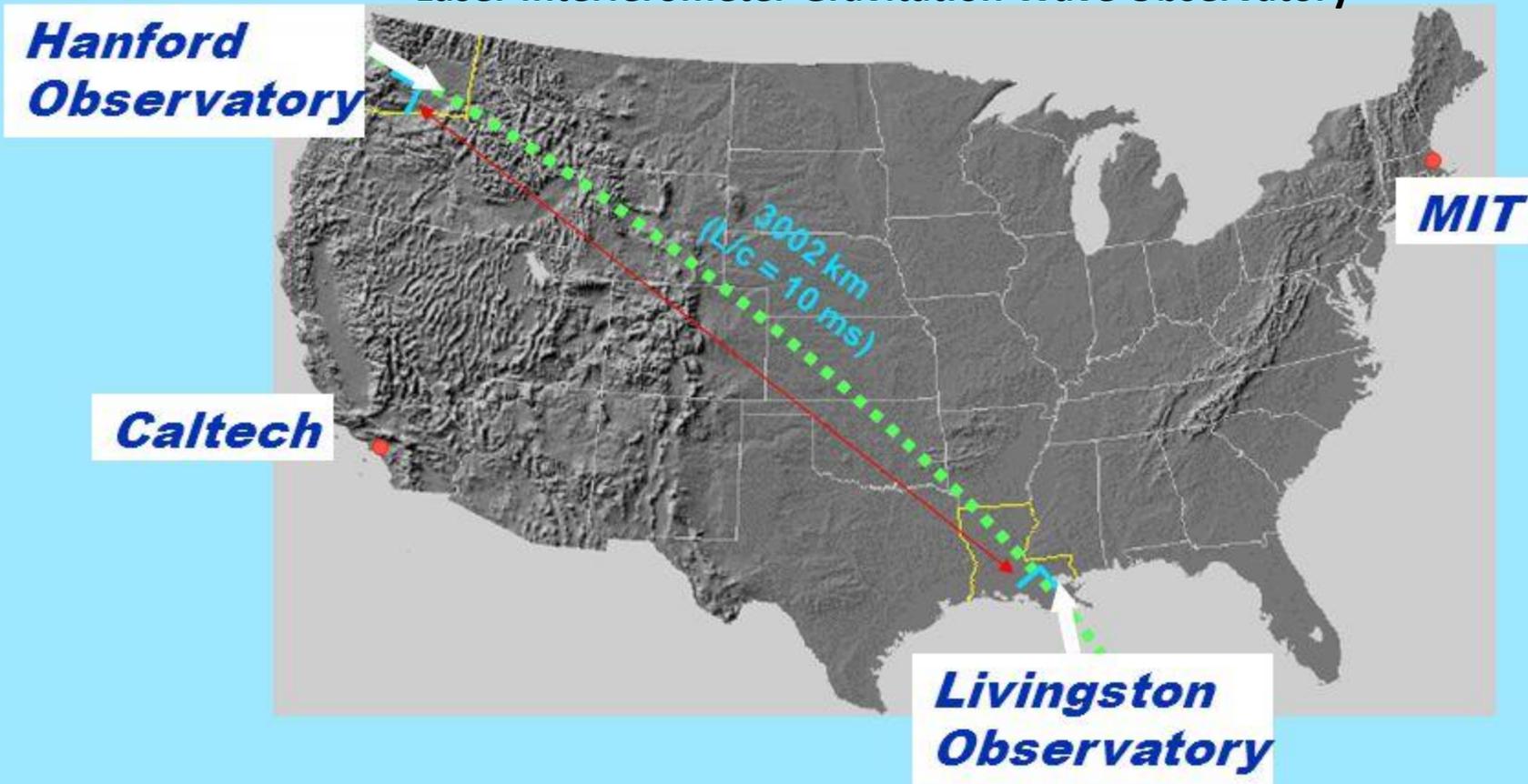
https://www.youtube.com/watch?v=I_88S8DWbcU



Simultaneous Detection

LIGO

Laser Interferometer Gravitation Wave Observatory



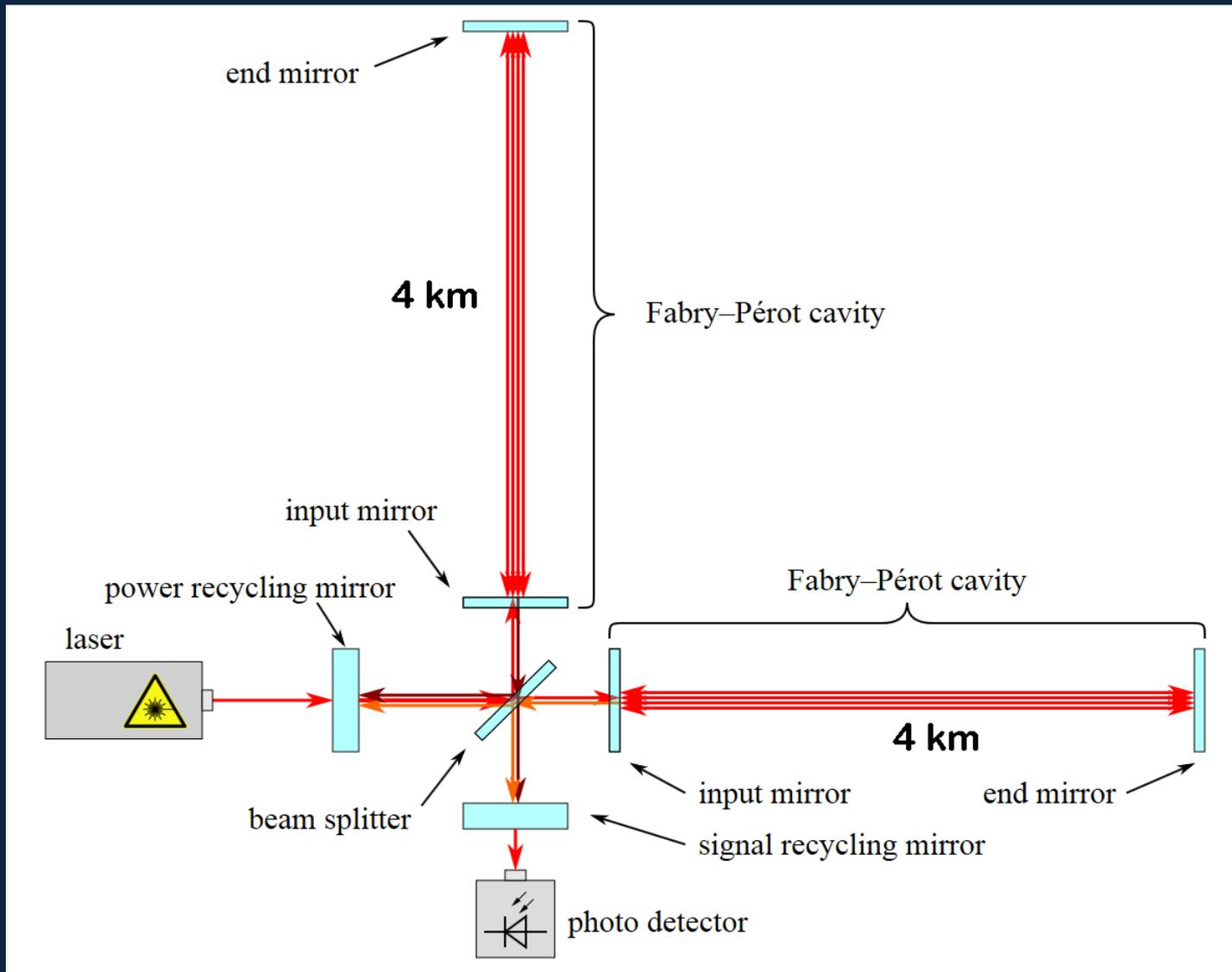
Hanford Observatory



Livingston Observatory

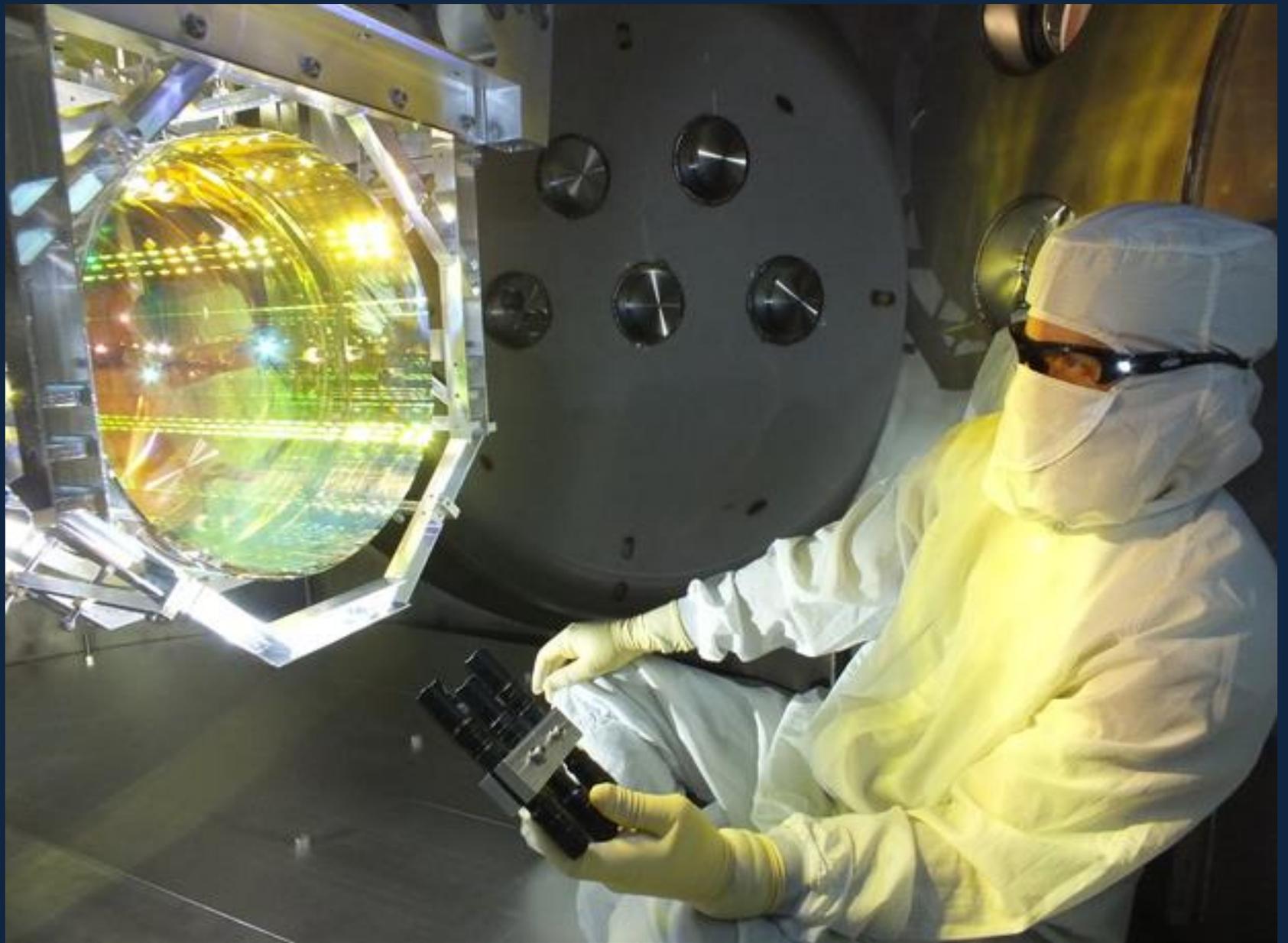


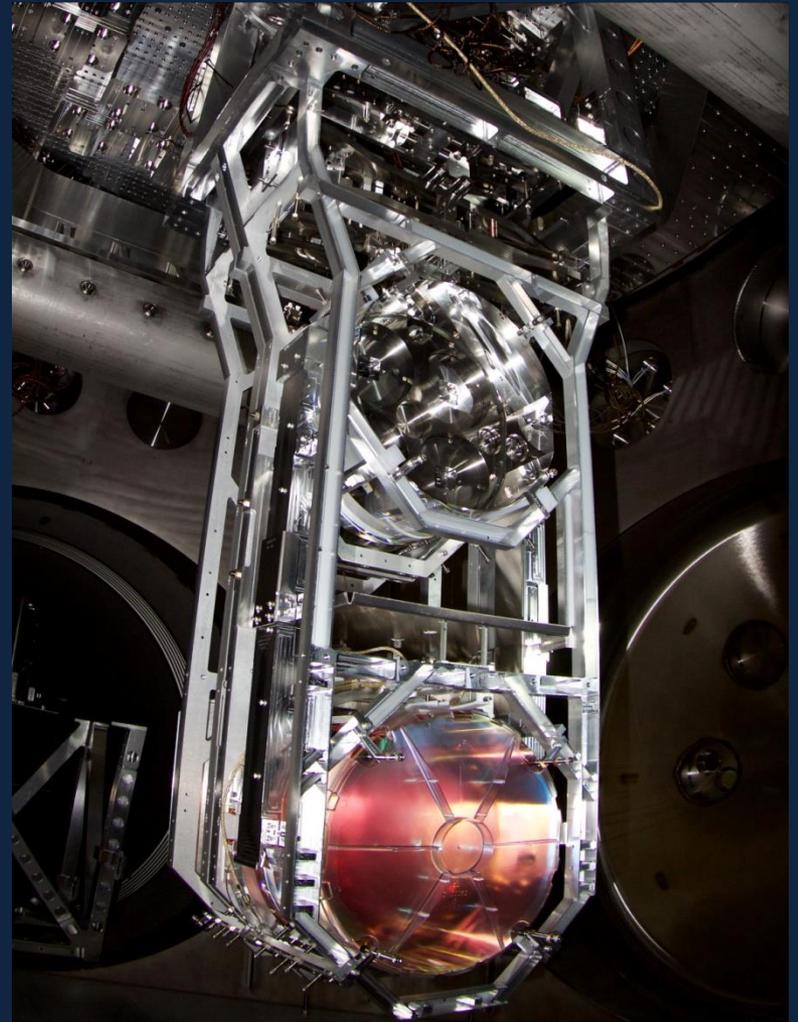
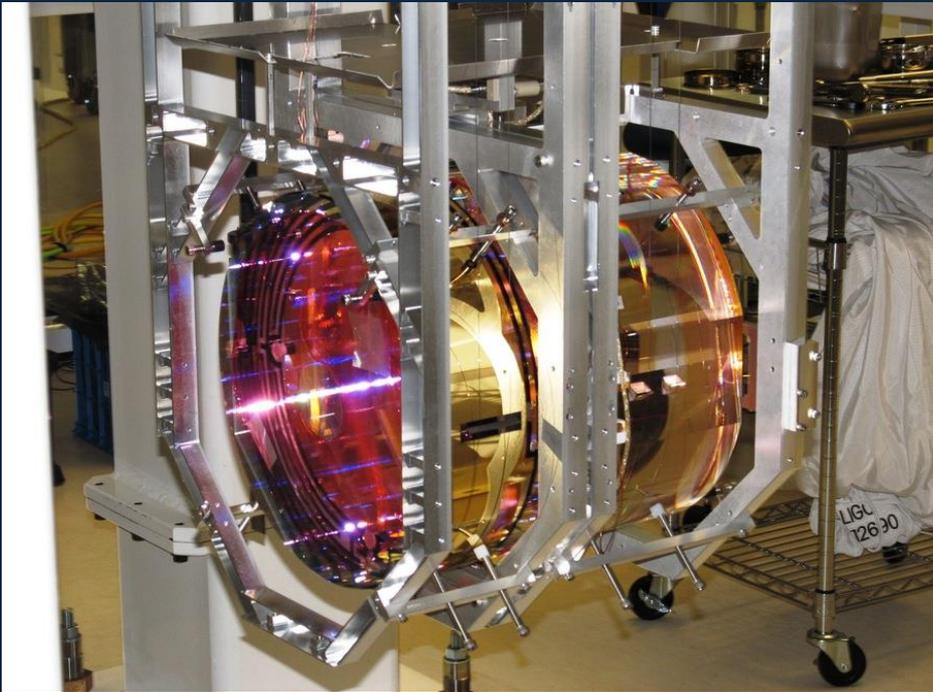
Aufbau des Interferometers



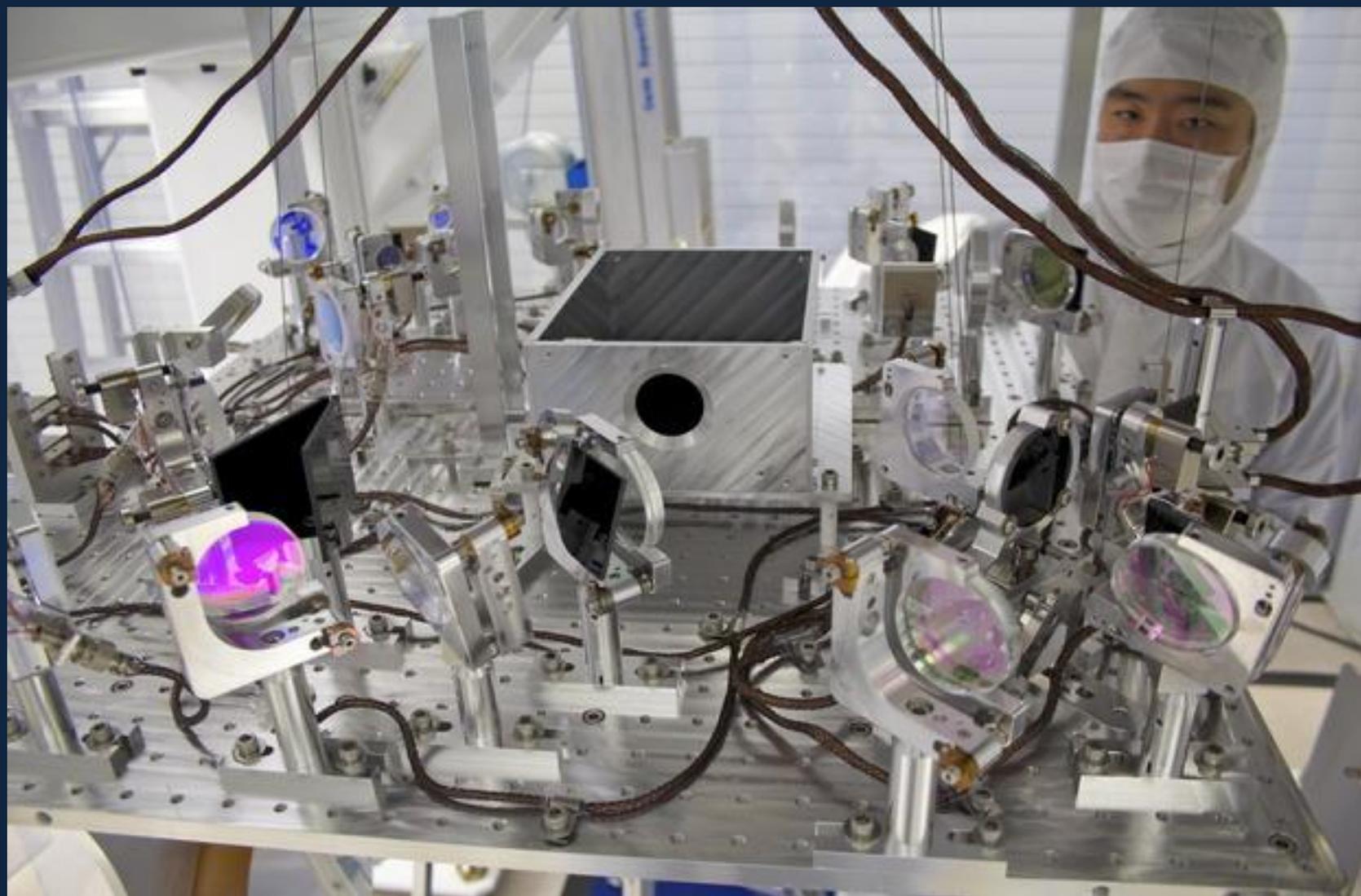
Vakuumsystem



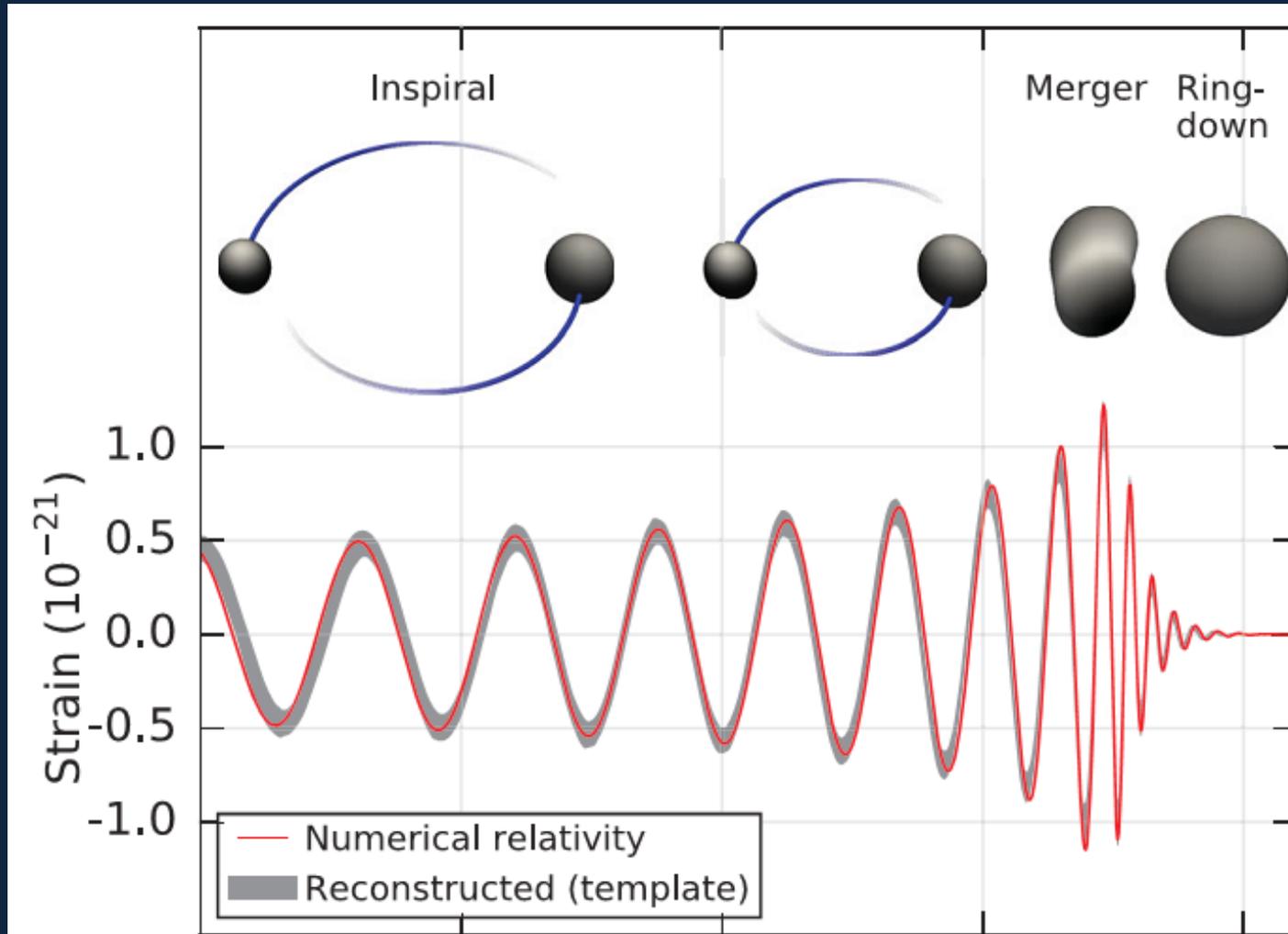








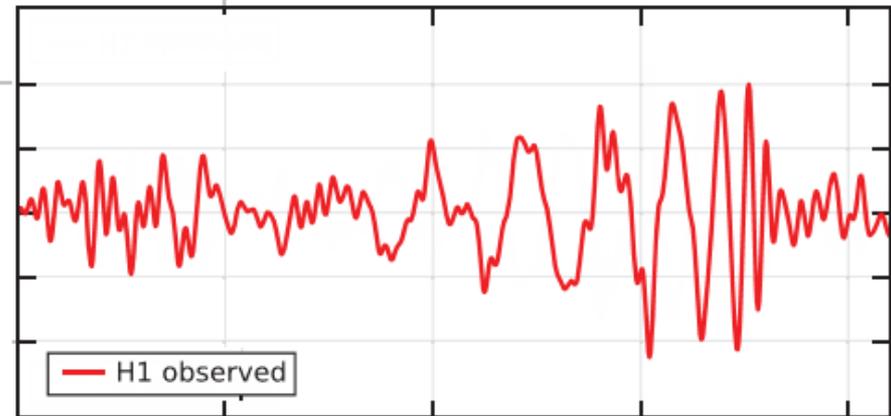
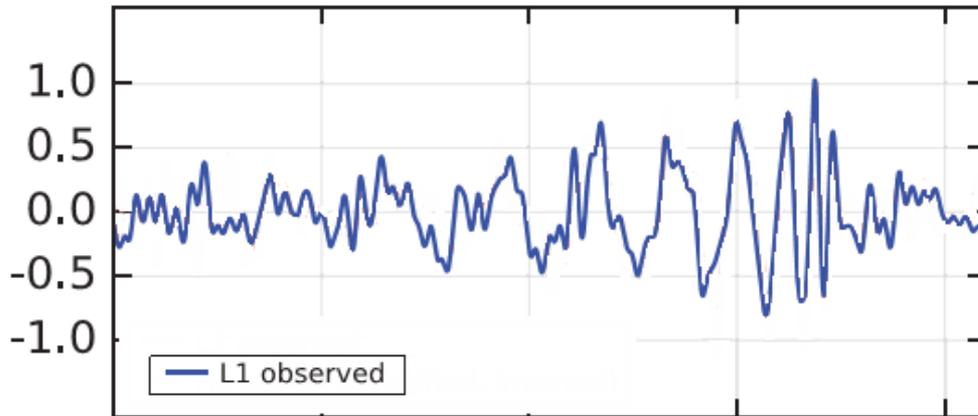
Was man erwartet:



Was man beobachtet hat:

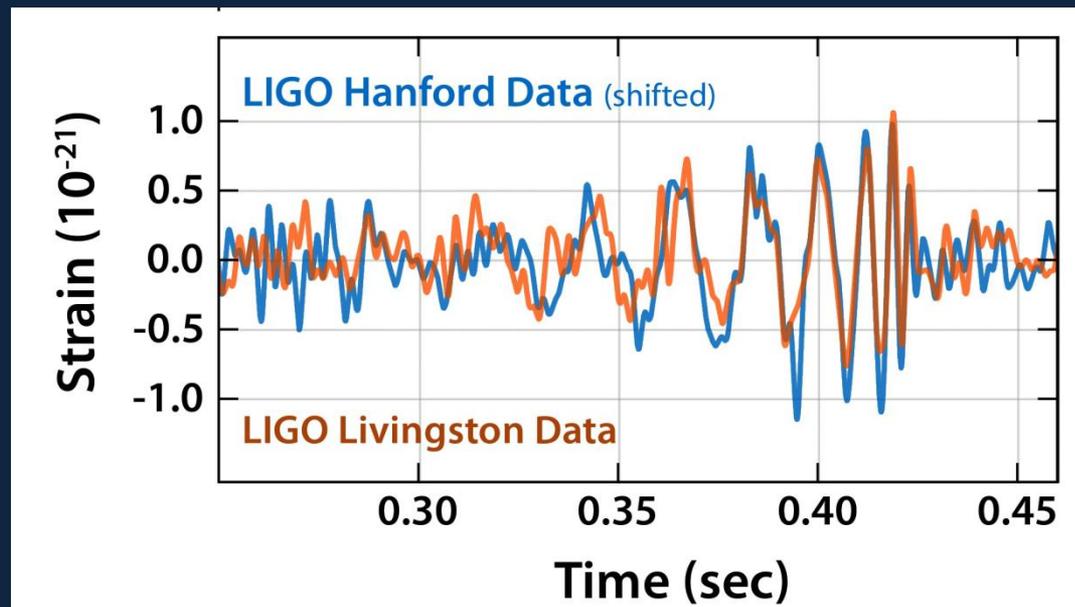
Livingston, Louisiana (L1)

Hanford, Washington (H1)

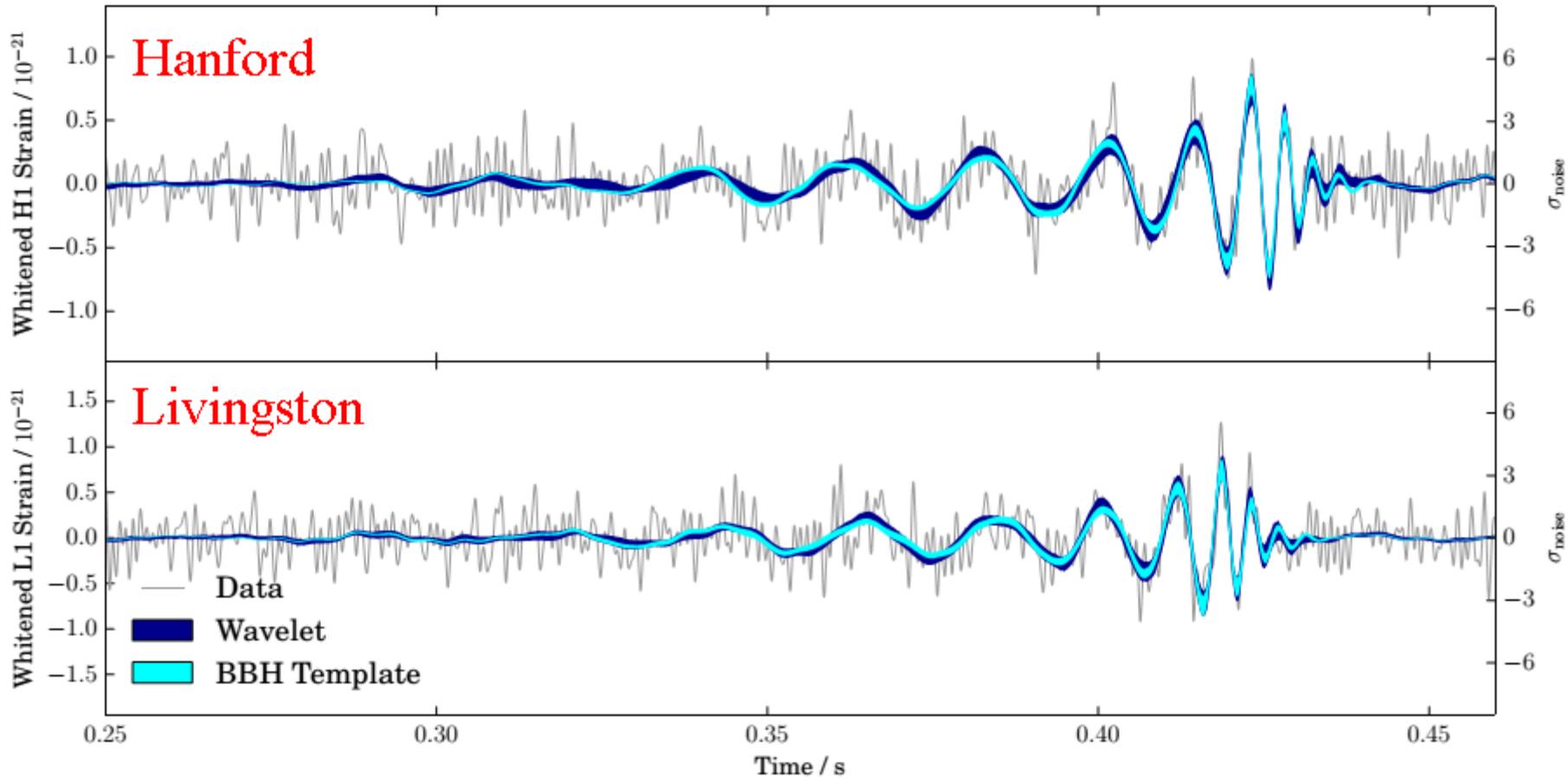


0.3 sec

0.4 sec



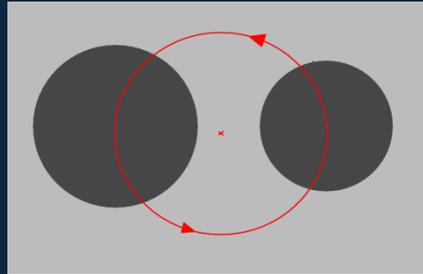
Vergleich: Messergebnisse und Relativitätstheorie



Modell-Parameter

Entfernung von der Erde: **1,3 Milliarden Lichtjahre**

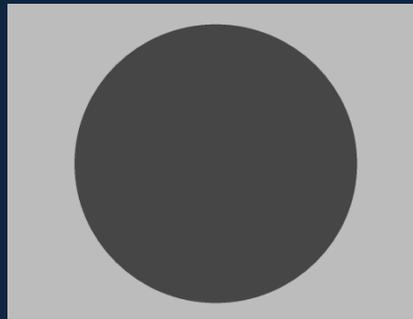
Primäres Schwarzes Loch:
36 Sonnenmassen,
Durchmesser 214 km



Sekundäres Schwarzes Loch:
29 Sonnenmassen,
Durchmesser 172 km

Kurz vor der Verschmelzung umkreisen sich die beiden Schwarzen Löcher etwa 80 Mal pro Sekunde – mit rund 60% der Lichtgeschwindigkeit.

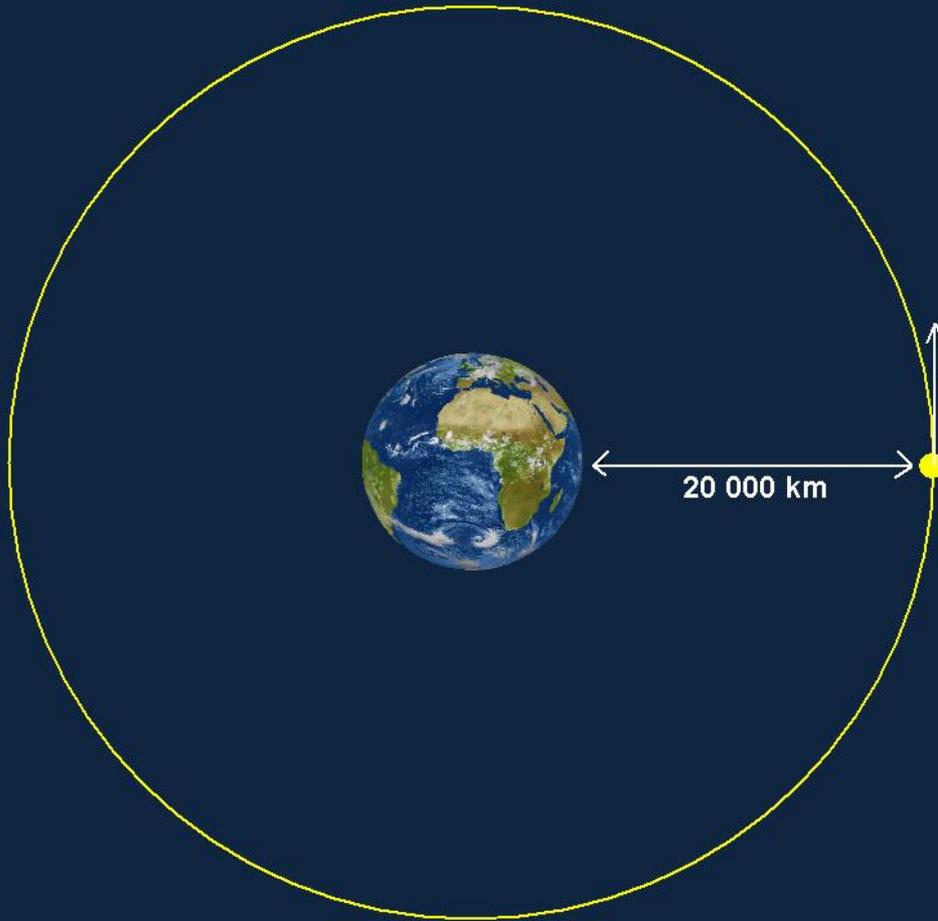
Finales Schwarzes Loch:
62 Sonnenmassen,
Durchmesser 368 km



36 Sonnenmassen + 29 Sonnenmassen ergeben allerdings 65 Sonnenmassen.
Es fehlen **3 Sonnenmassen!**

Diese wurden mit den Gravitationswellen als Energie ($E = mc^2$) abgestrahlt -
und das innerhalb von 0,2 Sekunden !!!

Unzertrennlich – GPS und Relativitätstheorie



SRT

Die Satellitenuhr geht aufgrund der Geschwindigkeit um 7 Millionstel Sekunden pro Tag zu langsam

Die Satellitenuhr geht aufgrund der geringeren Gravitation um 46 Millionstel Sekunden pro Tag zu schnell

ART

Insgesamt geht also die Satellitenuhr gegenüber der Erduhr um 39 Millionstel Sekunden pro Tag zu schnell → Das entspricht einer Laufstrecke der Funkwellen von fast **12 km**. Die Frequenz der Uhr wird daher von 10,23 MHz auf 10,229 999 995 448 MHz verstellt. Dies gleicht die relativistischen Effekte aus.

Zusammenfassung

ART

Äquivalenzprinzip

Krümmung der RaumZeit

Die Bewegung auf krummen
Linien durch die RaumZeit
erzeugt Trägheitskräfte
(Beschleunigungen)

Gravitation

Folgerungen:

- Gravitation lässt Uhren langsamer laufen
- Gravitation verbiegt Lichtstrahlen stärker als die klassische Physik angibt
- Planetenbahnen folgen nicht exakt der klassischen Physik
- Licht ist länger unterwegs, wenn es an großen Massen vorbei muss
- Schwarze Löcher lassen sich exakt berechnen
- Es gibt Gravitationswellen

- Die **Allgemeine Relativitätstheorie** ist die beste Theorie über Gravitation, die wir kennen.
- Die klassische Physik ist als Näherung in ihr enthalten.
- Ihre Richtigkeit wurde durch eine Vielzahl von experimentellen Ergebnissen bestätigt.
- Sie ist das „Arbeitspferd“ der modernen Kosmologie

Homepage Matthias Borchardt:
<http://www.mabo-physik.de/>

Vielen Dank für Ihr Interesse