



Einstein und die Entdeckung der

Gravitationswellen:

Ein neues Fenster der Astronomie

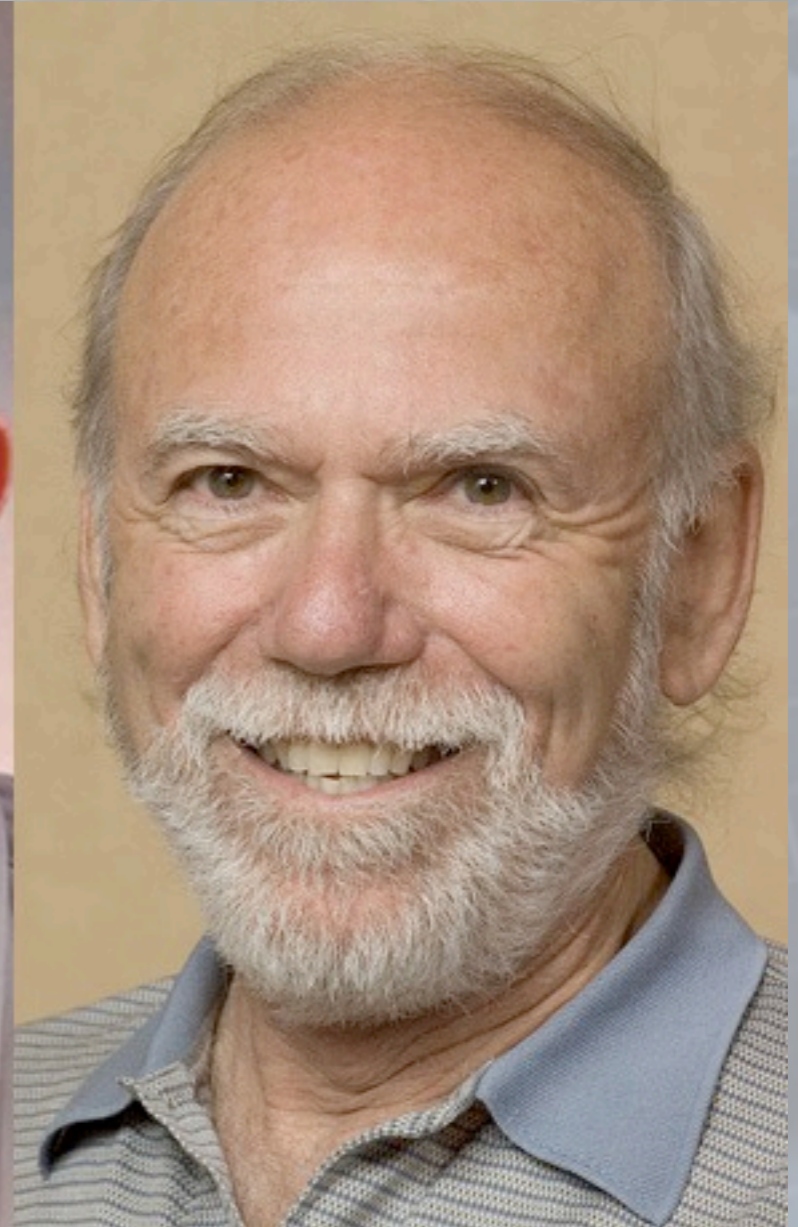
Nobelpreis 2017



Rainer Weiss
*1932 Berlin



Kip Thorne
*1940 USA



Barry Barish
*1936 USA



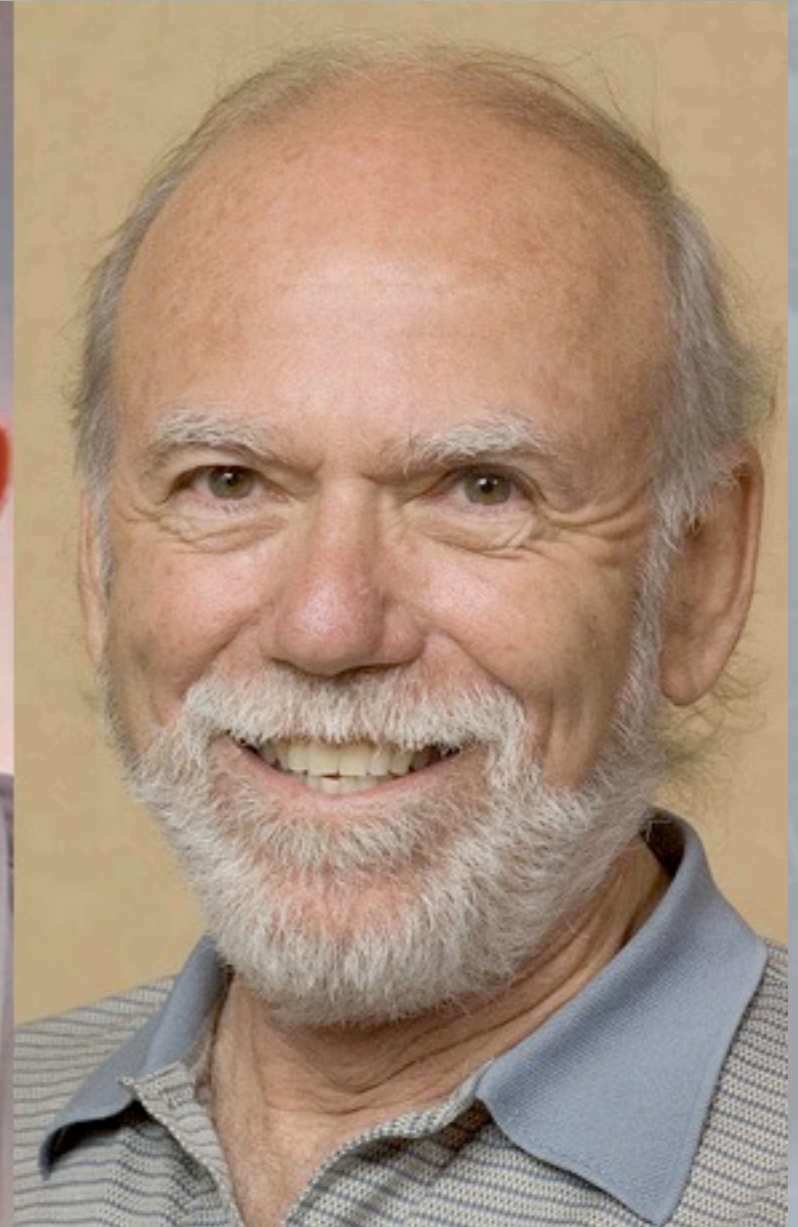
Nobelpreis 2017



Rainer Weiss
*1932 Berlin



Kip Thorne
*1940 USA



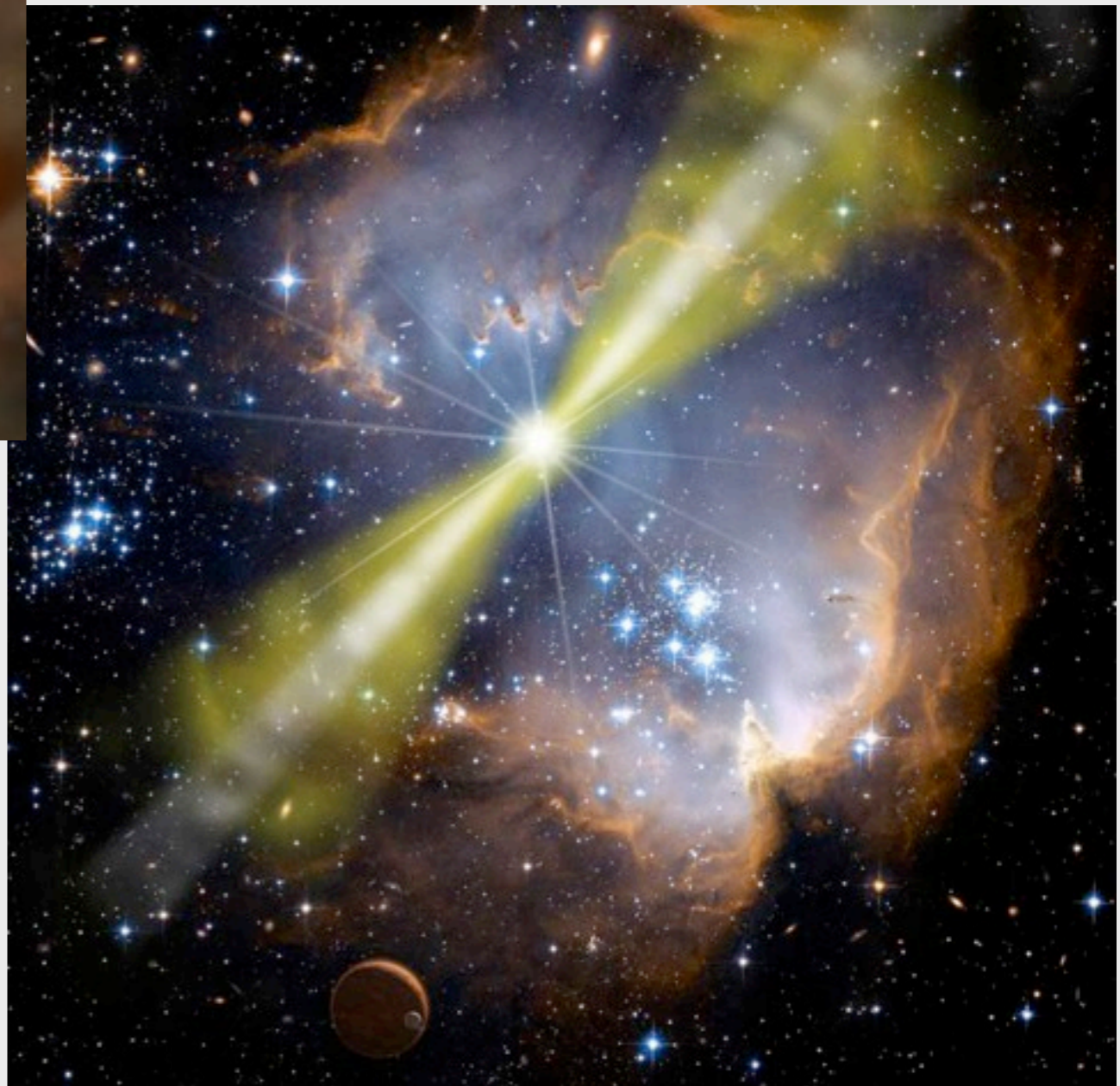
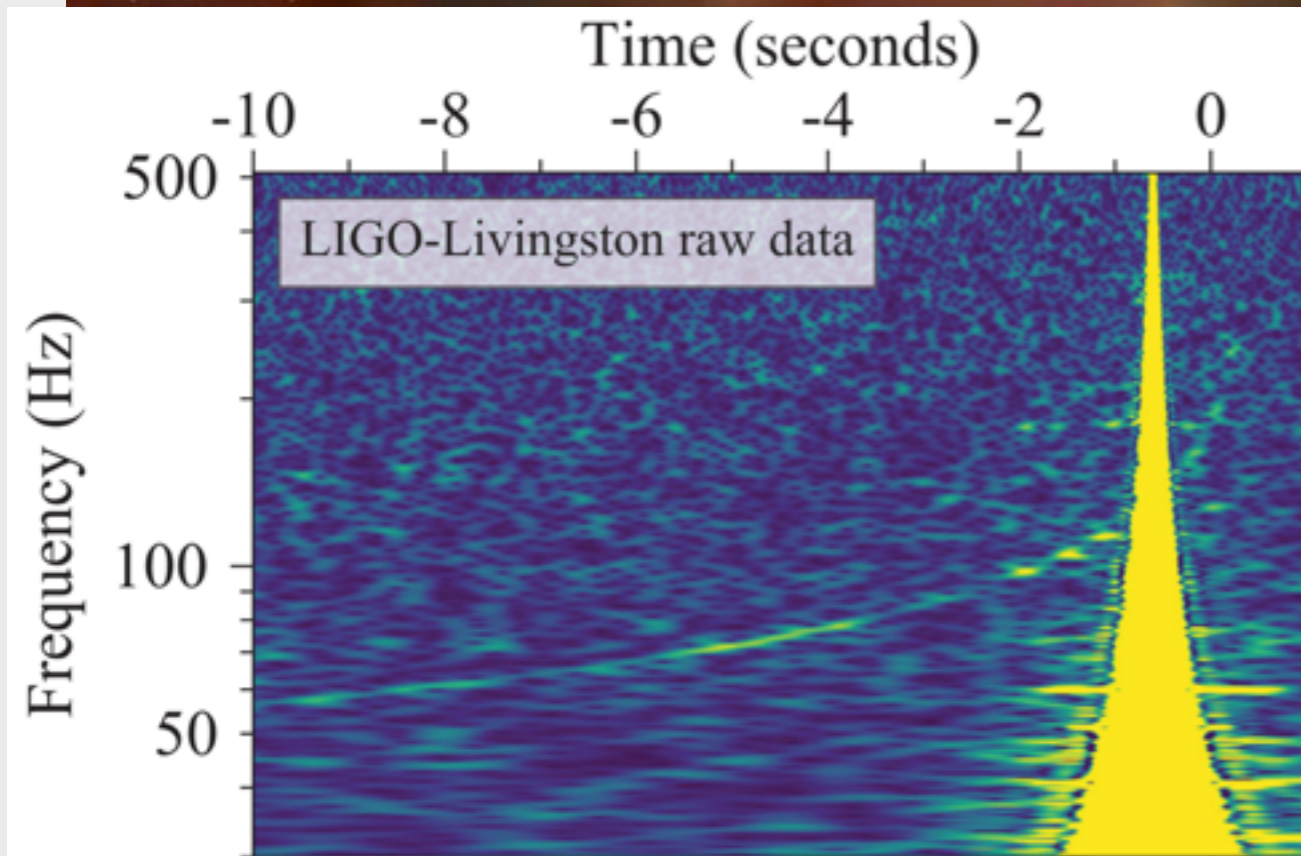
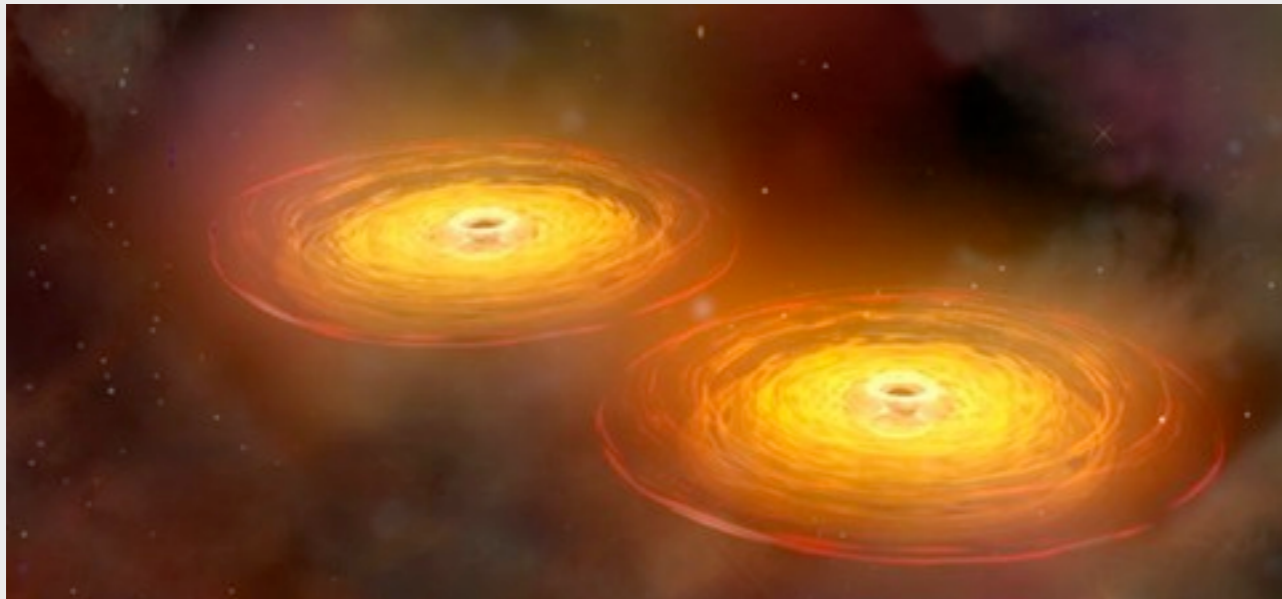
Barry Barish
*1936 USA

Verleihung: Sonntag, 10.12.2017 Stockholm



GW 170817

Gravitationswellen
durch Verschmelzung
von Neutronensternen am 17. August 2017



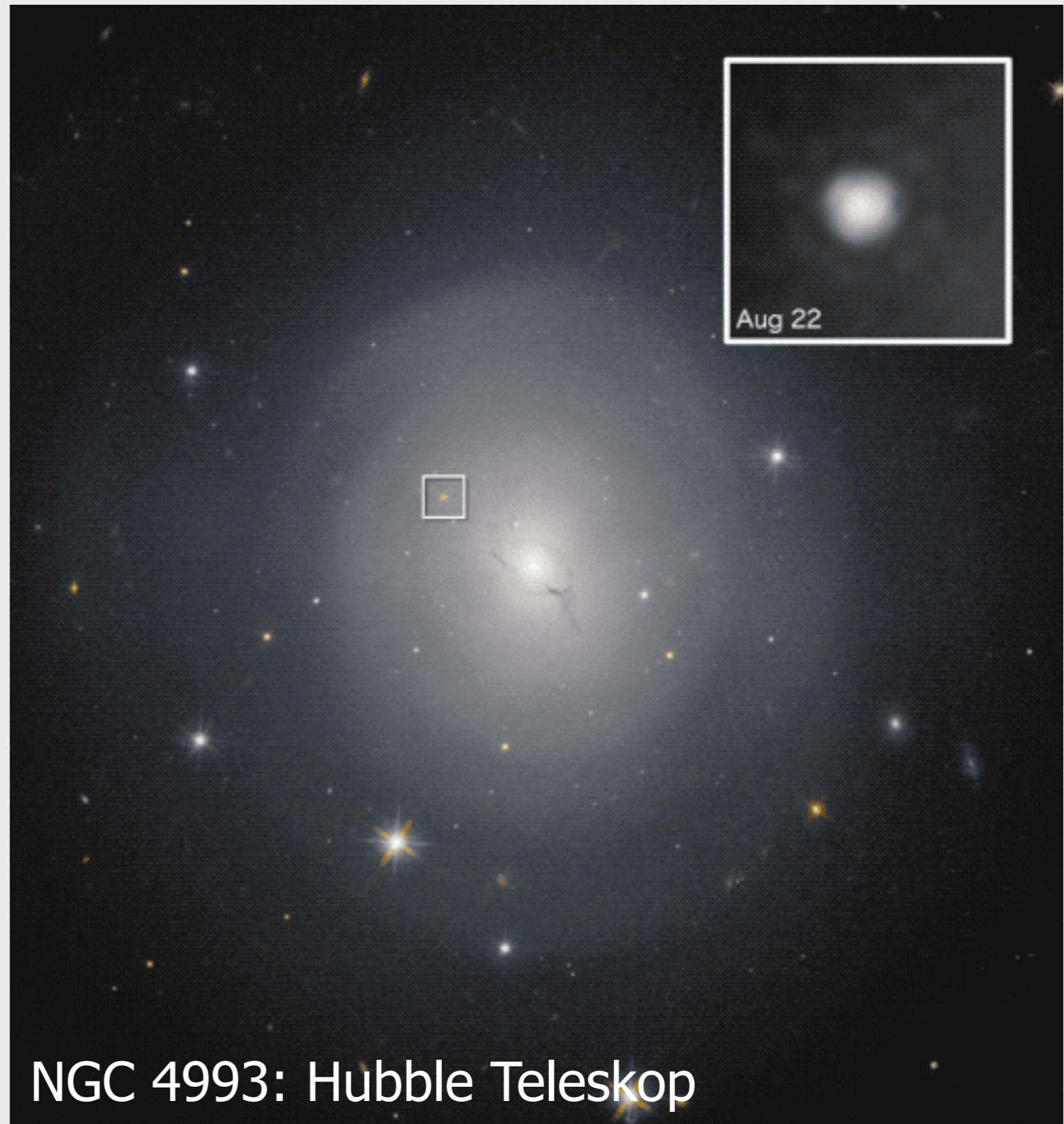
Gravitationswellen durch Verschmelzung von Neutronensternen:

Entdeckung am
17. August 2017

GW 170817

Nachmessung:

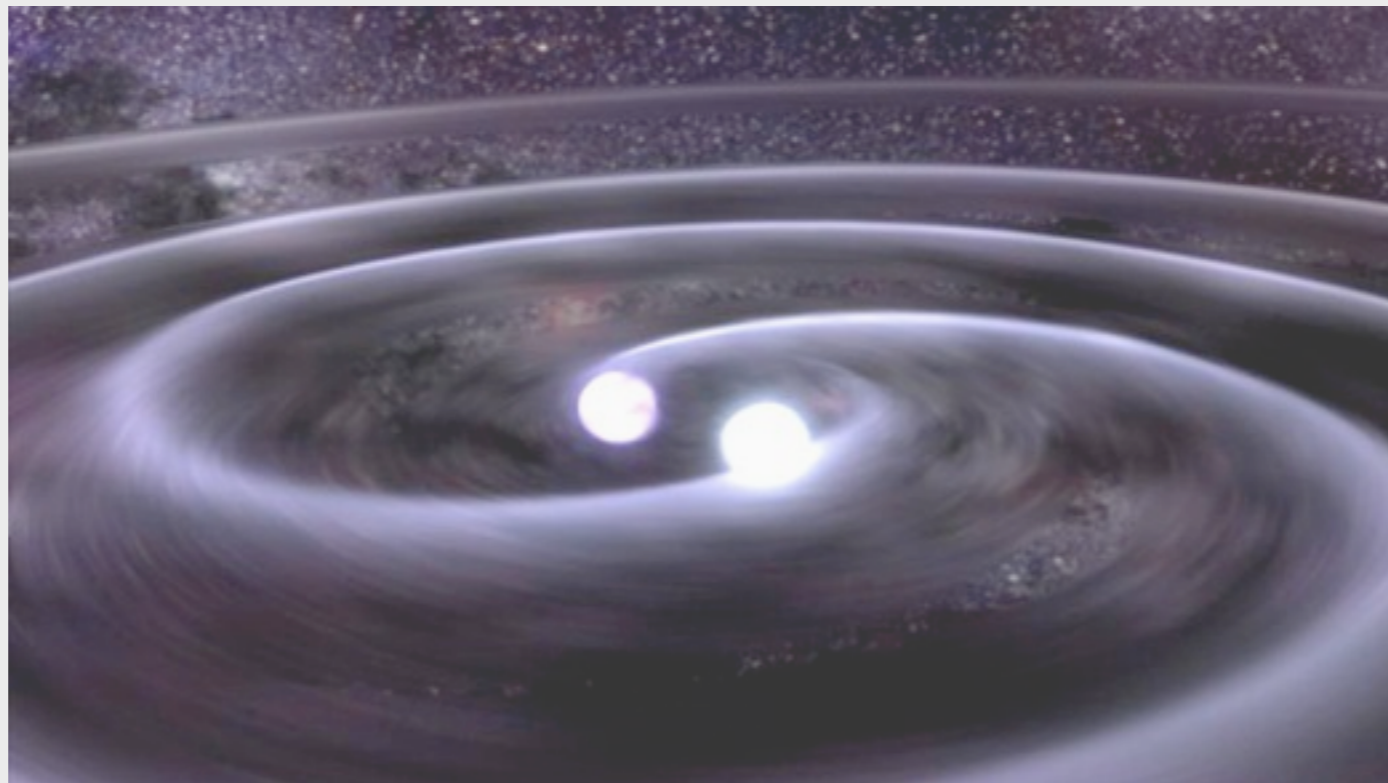
- 70 Teleskope weltweit
- Gamma-Ray-Burst
GRB 170817A
- Kilonova



NGC 4993: Hubble Teleskop

Was sind Gravitationswellen?

- zeitlich veränderliche Störungen der **RAUMZEIT**

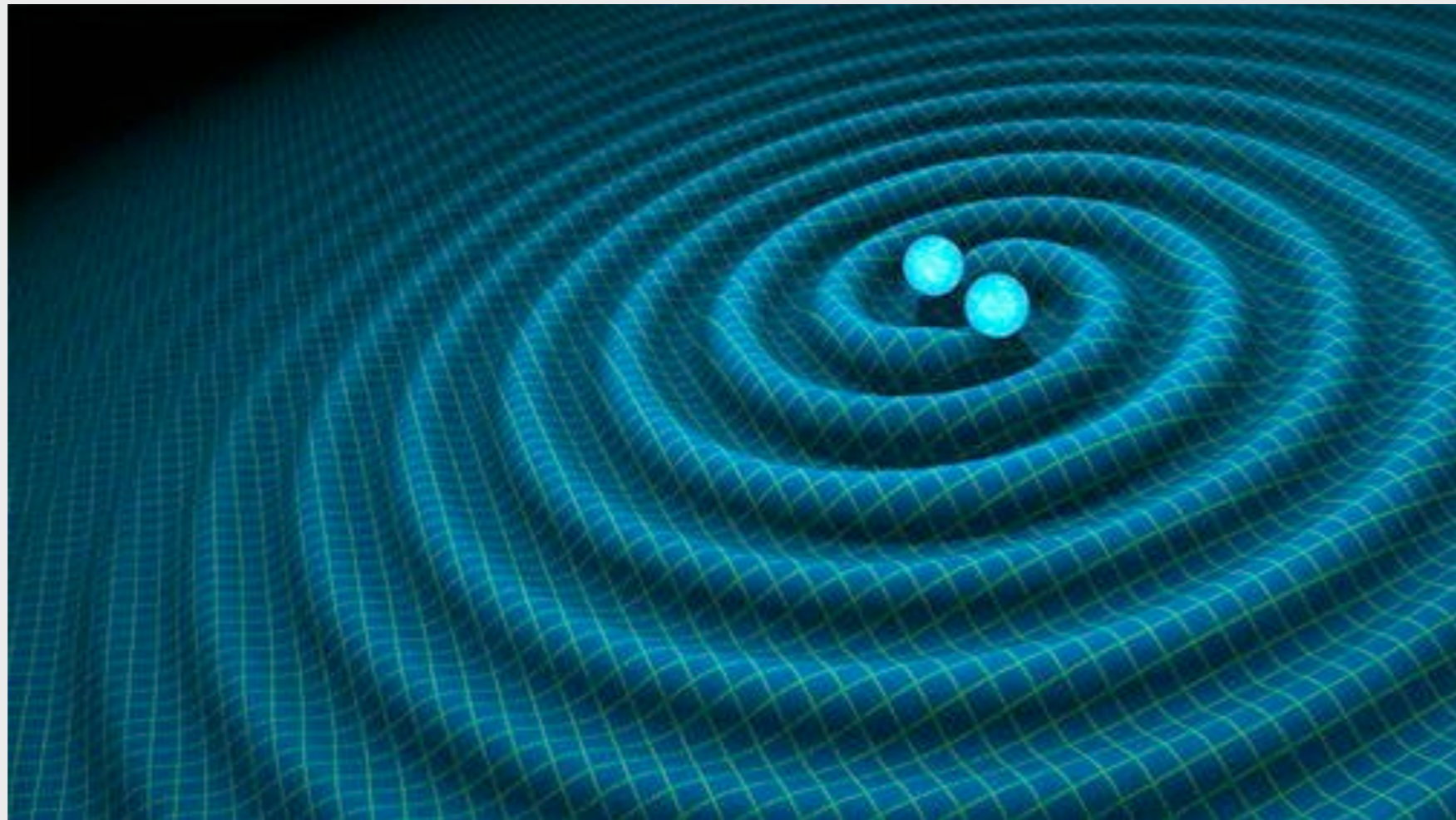


- breiten sich als **Wellen** mit Lichtgeschwindigkeit aus

Störung der RAUMZEIT?

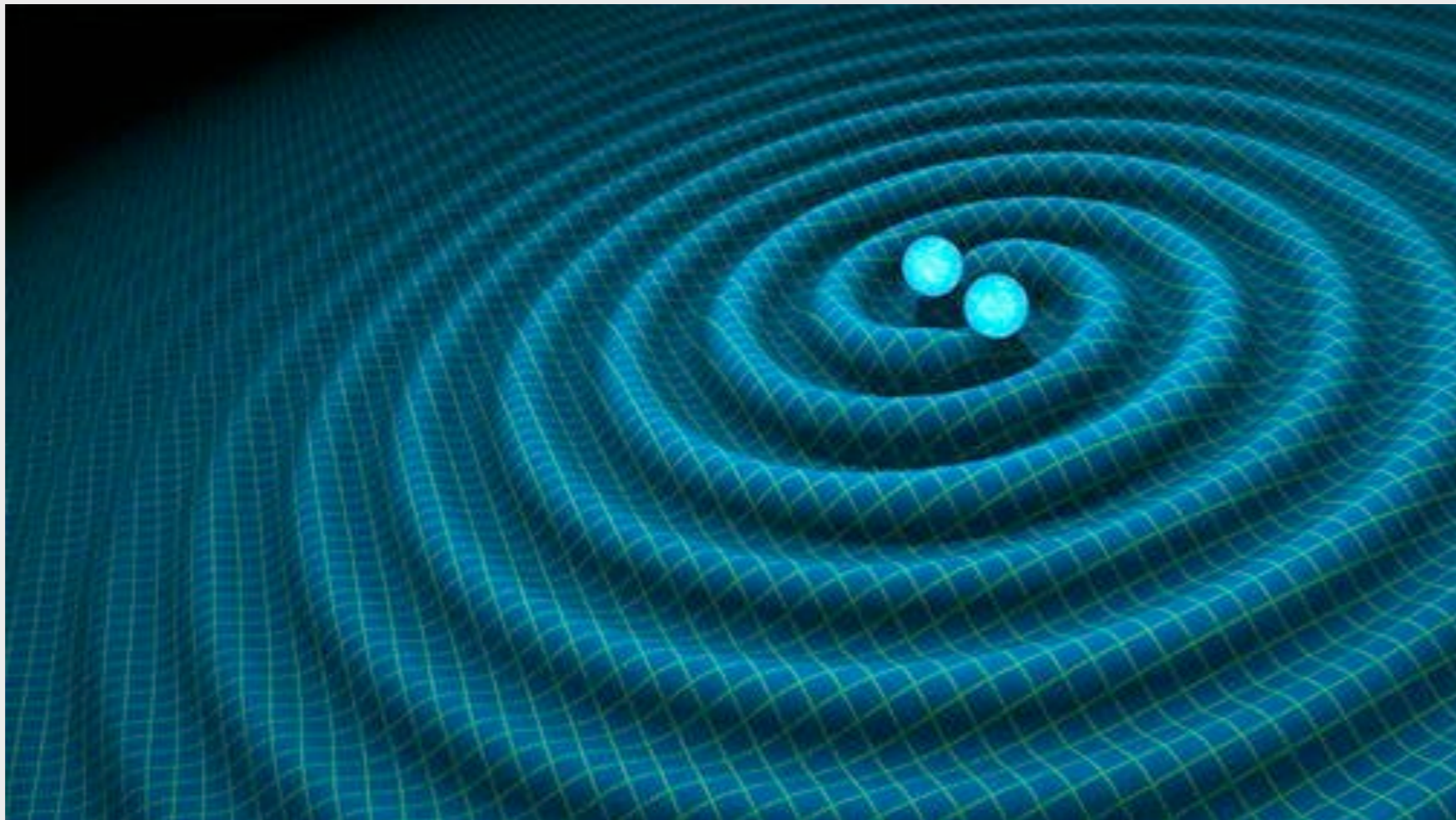
Störung der RAUMZEIT?

- Störung der Raumzeit = Krümmung der **Raumzeit**



Störung der RAUMZEIT?

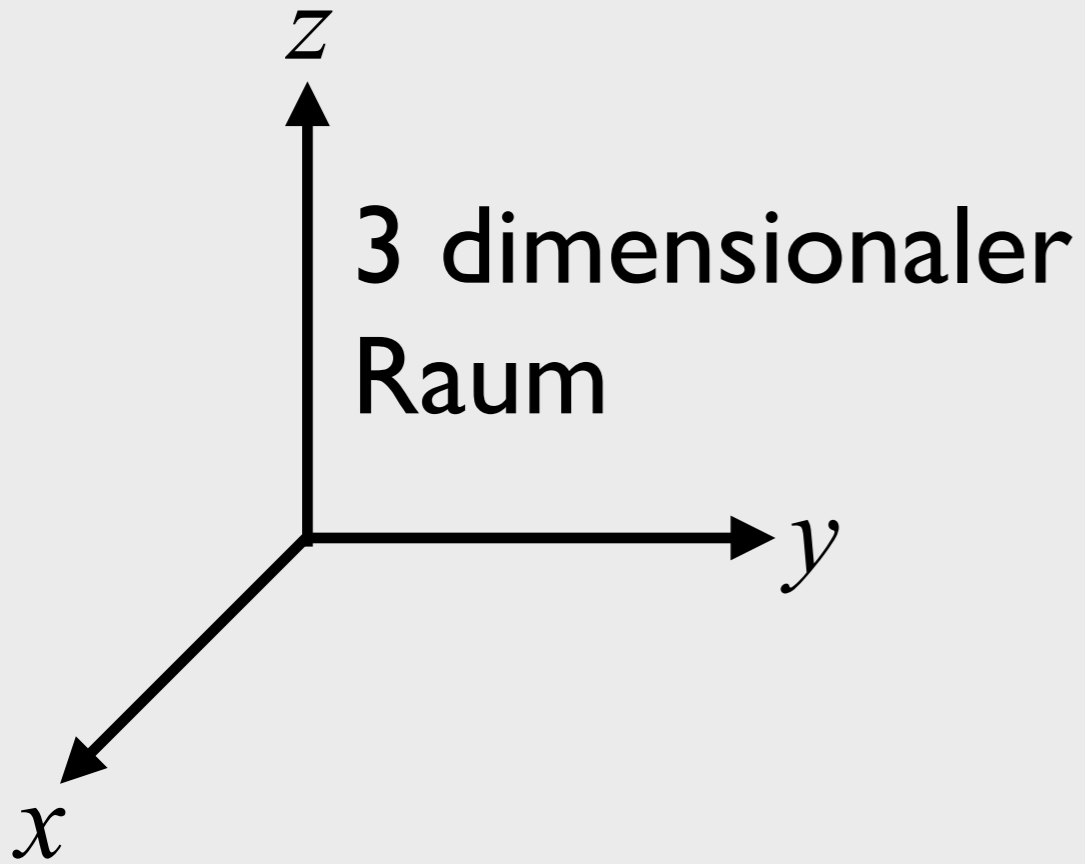
- Störung der Raumzeit = Krümmung der **Raumzeit**



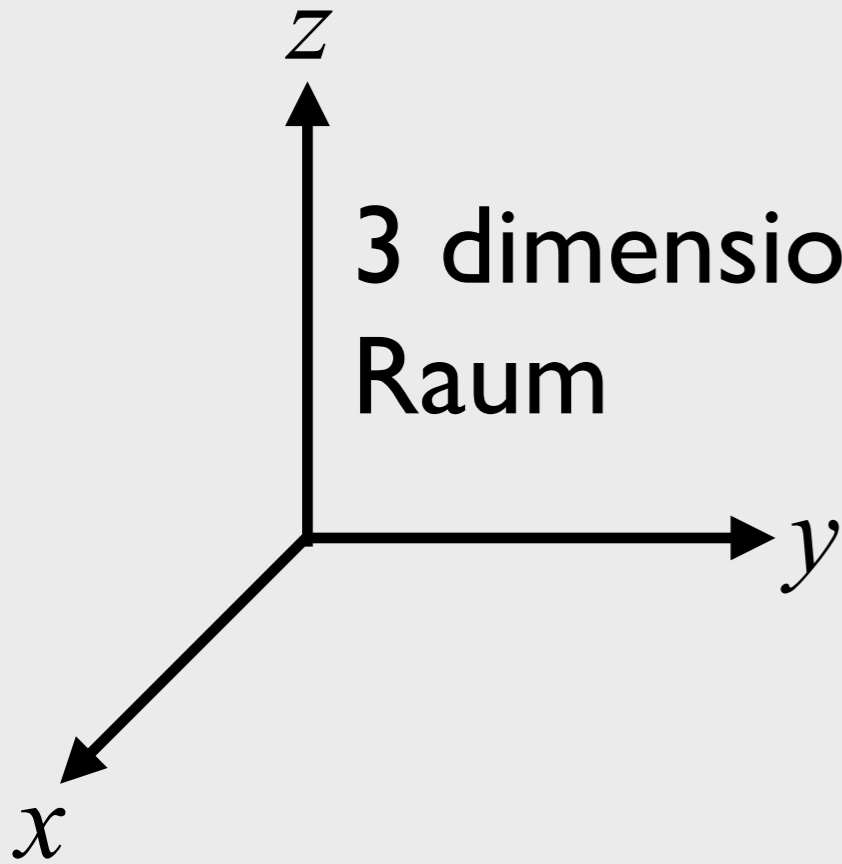
was ist **RAUMZEIT** ?

Was ist **RAUMZEIT**?

Was ist **RAUMZEIT**?



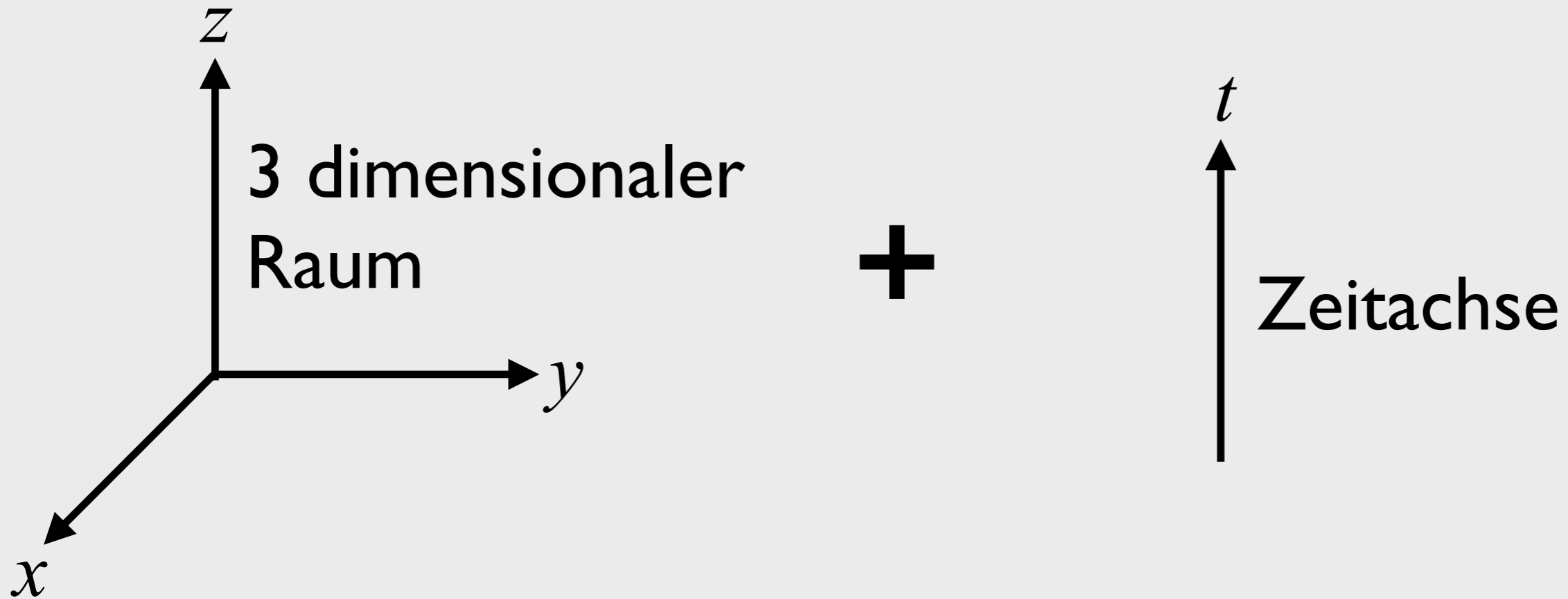
Was ist **RAUMZEIT**?



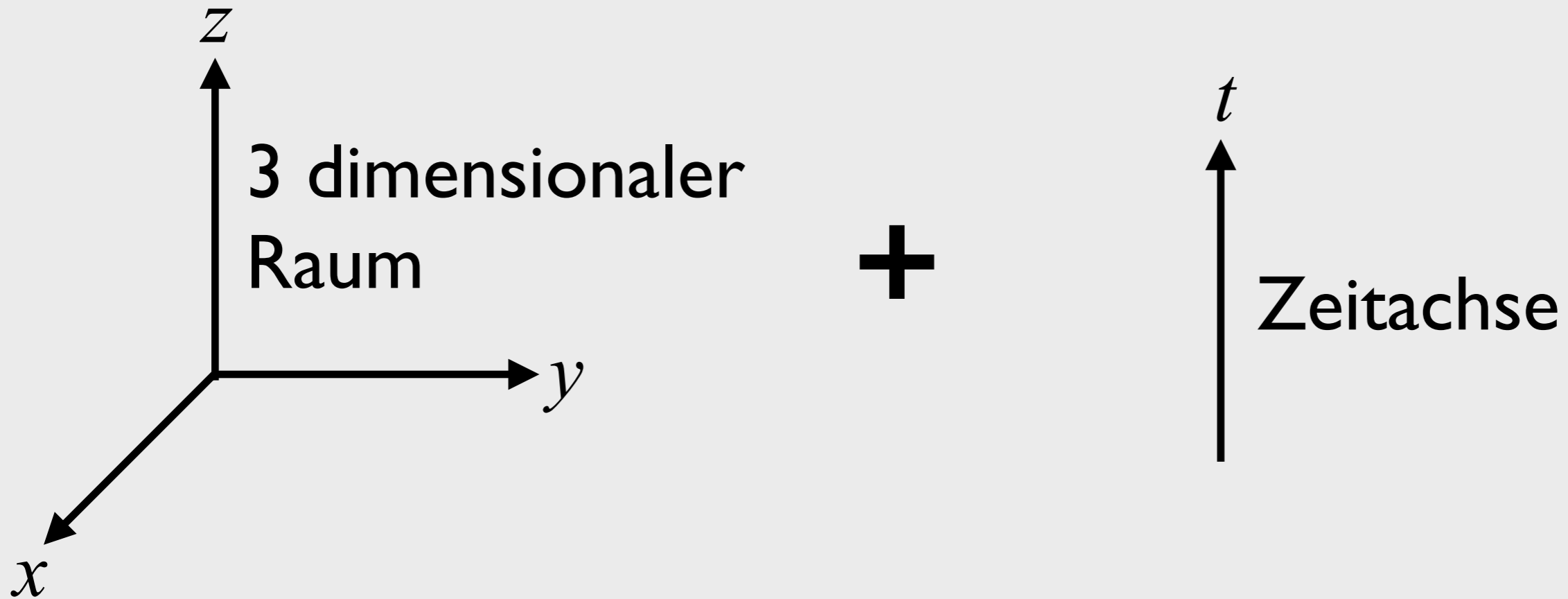
3 dimensionaler
Raum

+

Was ist **RAUMZEIT**?

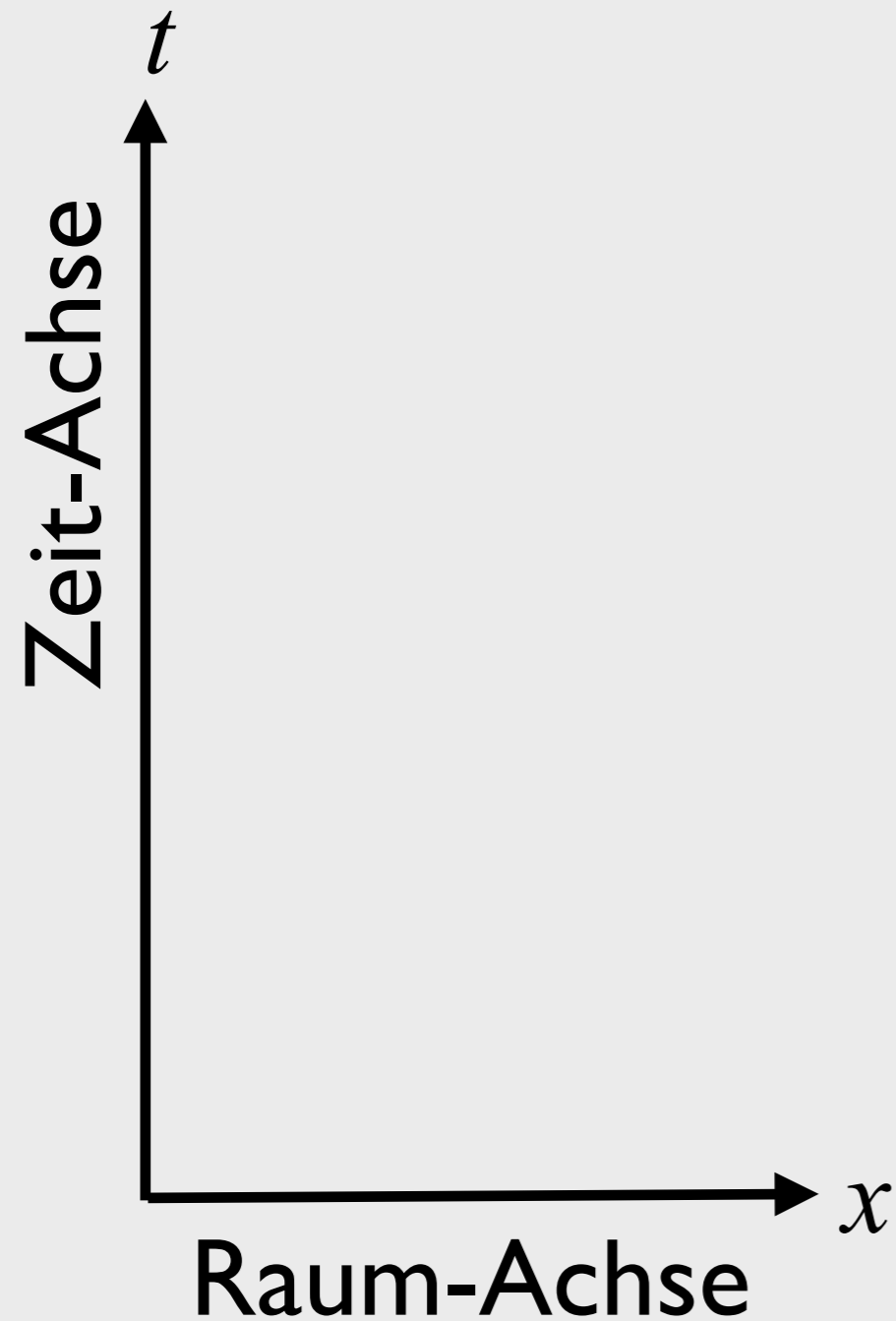


Was ist **RAUMZEIT**?



= 4 dimensionale **RAUMZEIT**

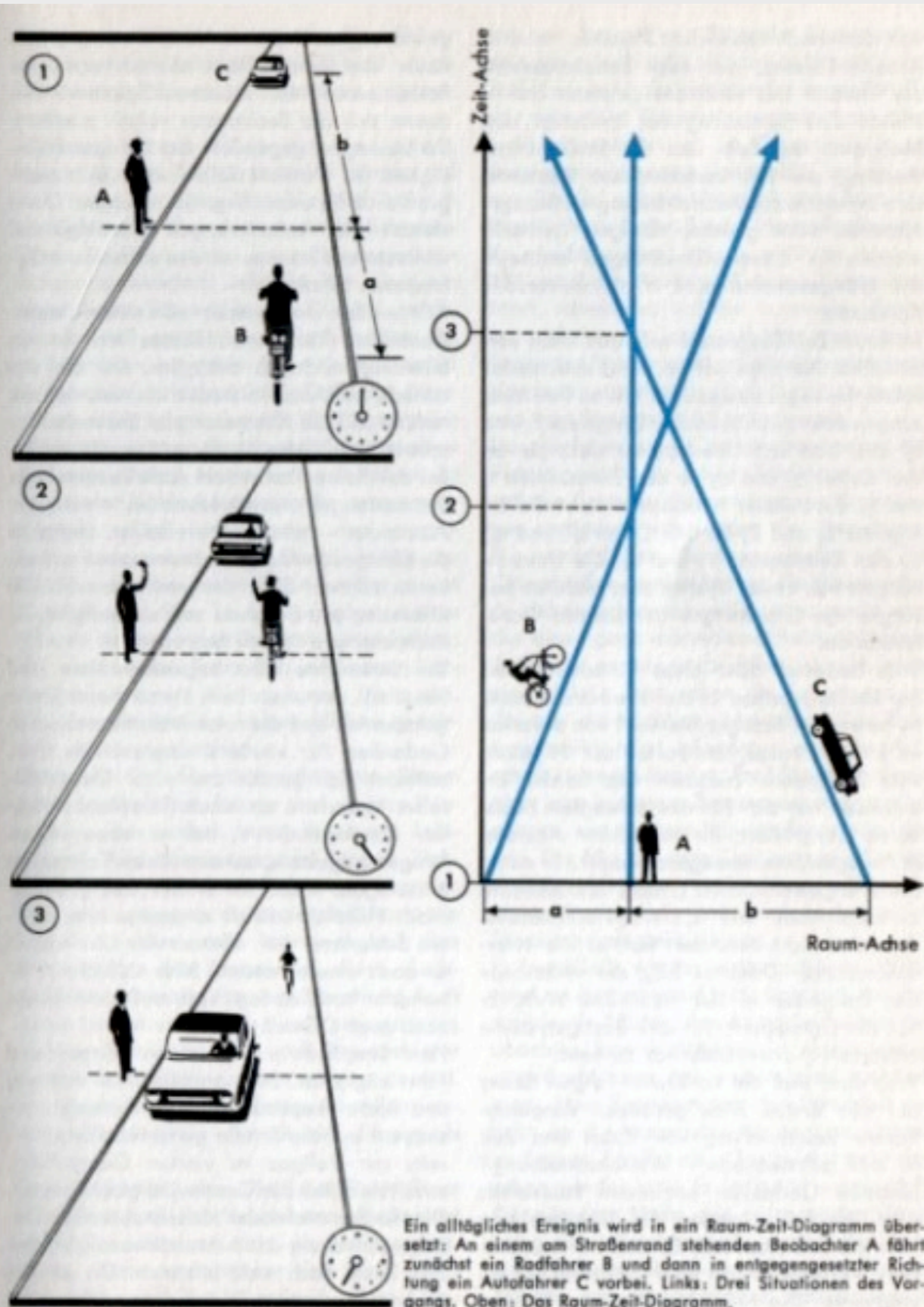
Was ist **RAUMZEIT**?



- Ein **Ereignis** (z.B. Treffen) bestimmt durch Angabe von Raum + Zeit

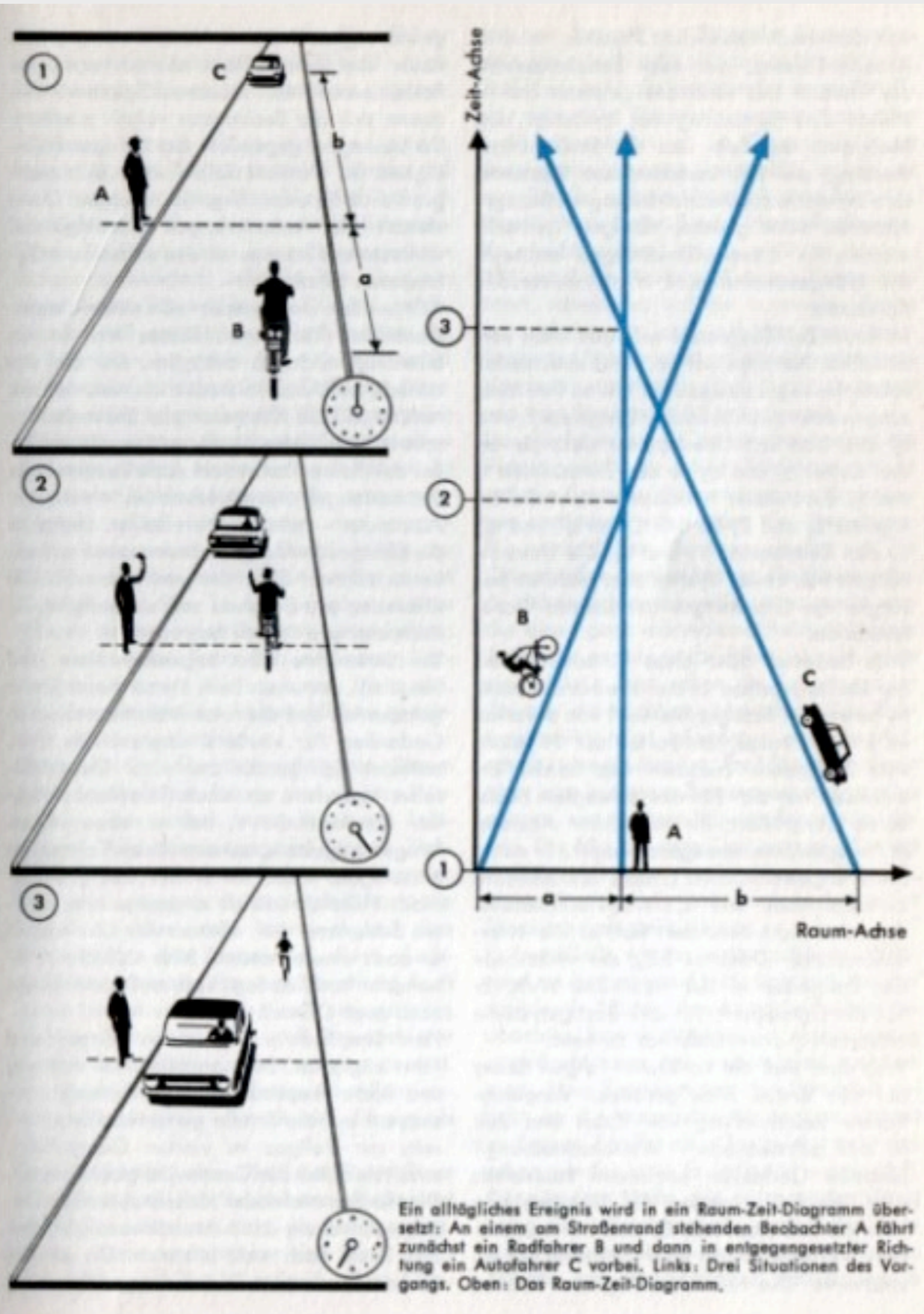
Raum-Zeit-Diagramm

Was ist RAUMZEIT?



- Ein **Ereignis** (z.B. Treffen) bestimmt durch Angabe von Raum + Zeit

Was ist RAUMZEIT?



- Ein **Ereignis** (z.B. Treffen) bestimmt durch Angabe von Raum + Zeit

- Vereinheitlichung von Raum + Zeit = RAUMZEIT:

Fundament Einstein's **Relativitätstheorien**

Spezielle Relativitätstheorie

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

Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhaften scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß der eine oder der andere dieser Körper der bewegte sei, streng voneinander zu trennen sind. Bewegt sich nämlich der Magnet und ruht der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten ein elektrisches Feld von gewissem Energiewerte, welches an den Orten, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom erzeugt. Ruht aber der Magnet und bewegt sich der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten kein elektrisches Feld, dagegen im Leiter eine elektromotorische Kraft, welcher an sich keine Energie entspricht, die aber — Gleichheit der Relativbewegung bei den beiden ins Auge gefaßten Fällen vorausgesetzt — zu elektrischen Strömen von derselben Größe und demselben Verlaufe Veranlassung gibt, wie im ersten Falle die elektrischen Kräfte.



Albert Einstein
Annalen der Physik (1905)

Spezielle Relativitätstheorie

Spezielle Relativitätstheorie

- Postulat: Konstanz der Lichtgeschwindigkeit*

$$c = 299.792.458 \text{ m/sec}$$

* im
Vakuum

Spezielle Relativitätstheorie

- Postulat: Konstanz der Lichtgeschwindigkeit*

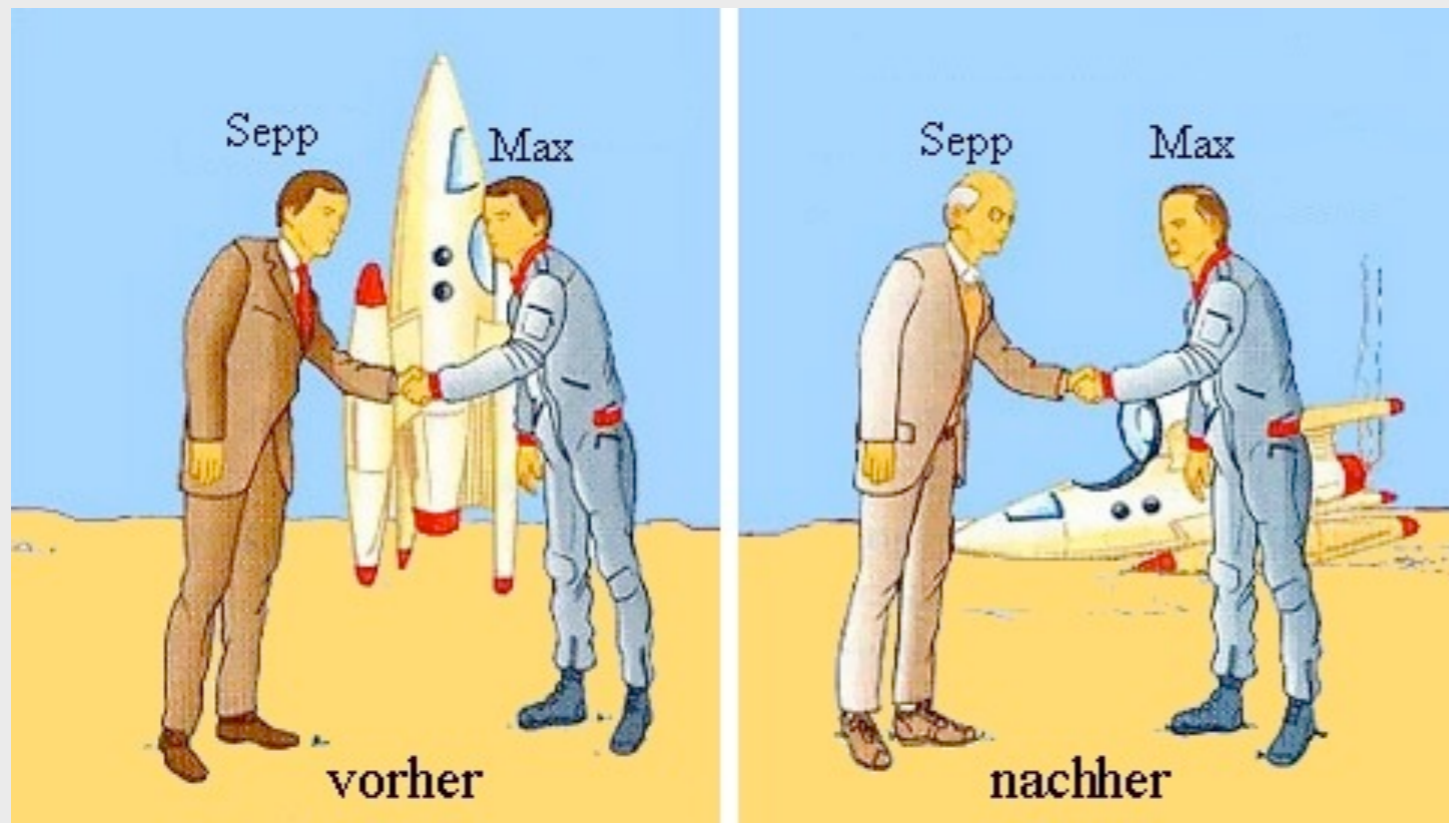
$$c = 299.792.458 \text{ m/sec}$$



Aufbau Michelson Experiment 1881 in Potsdam

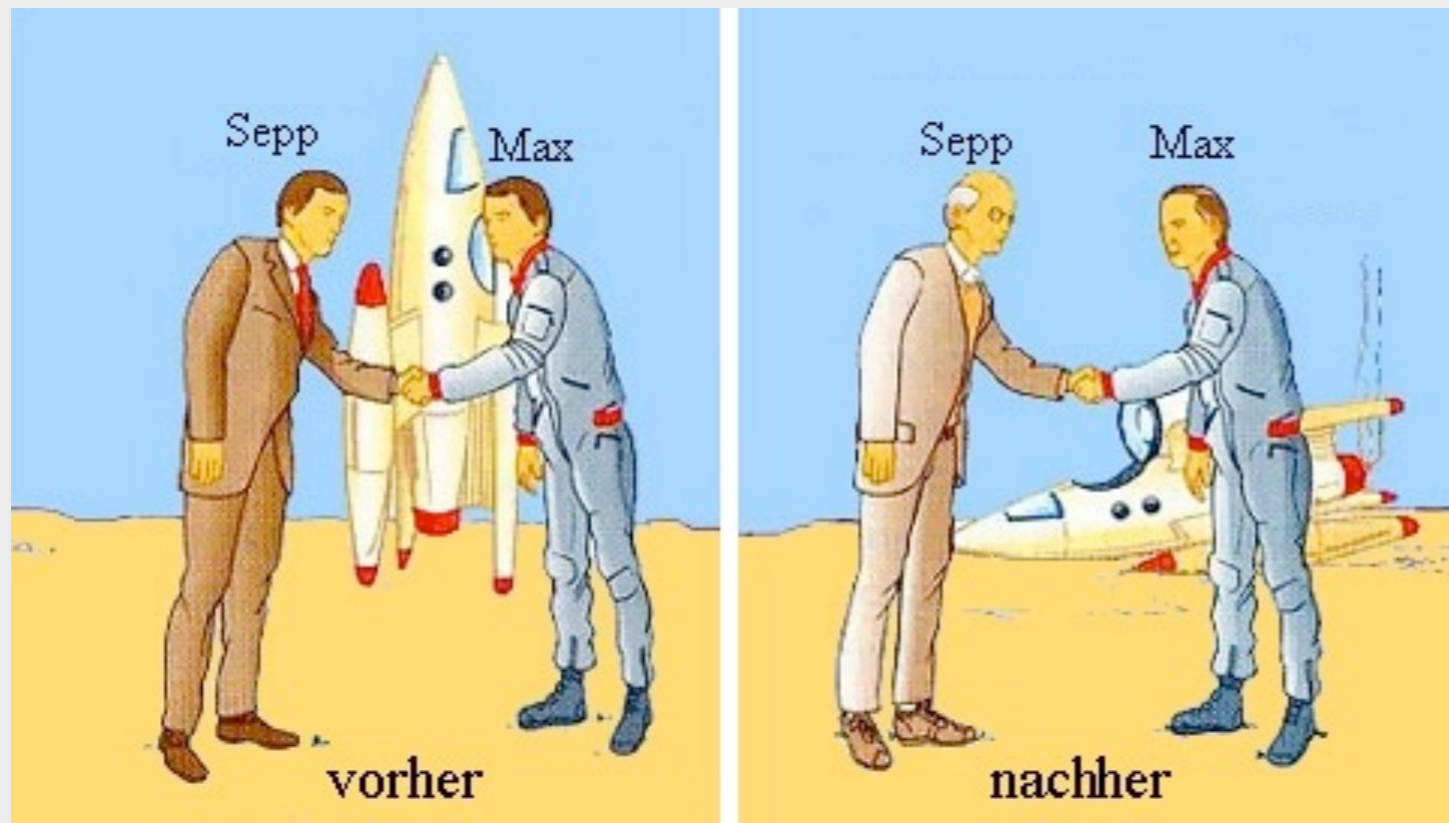
* im
Vakuum

Spezielle Relativitätstheorie



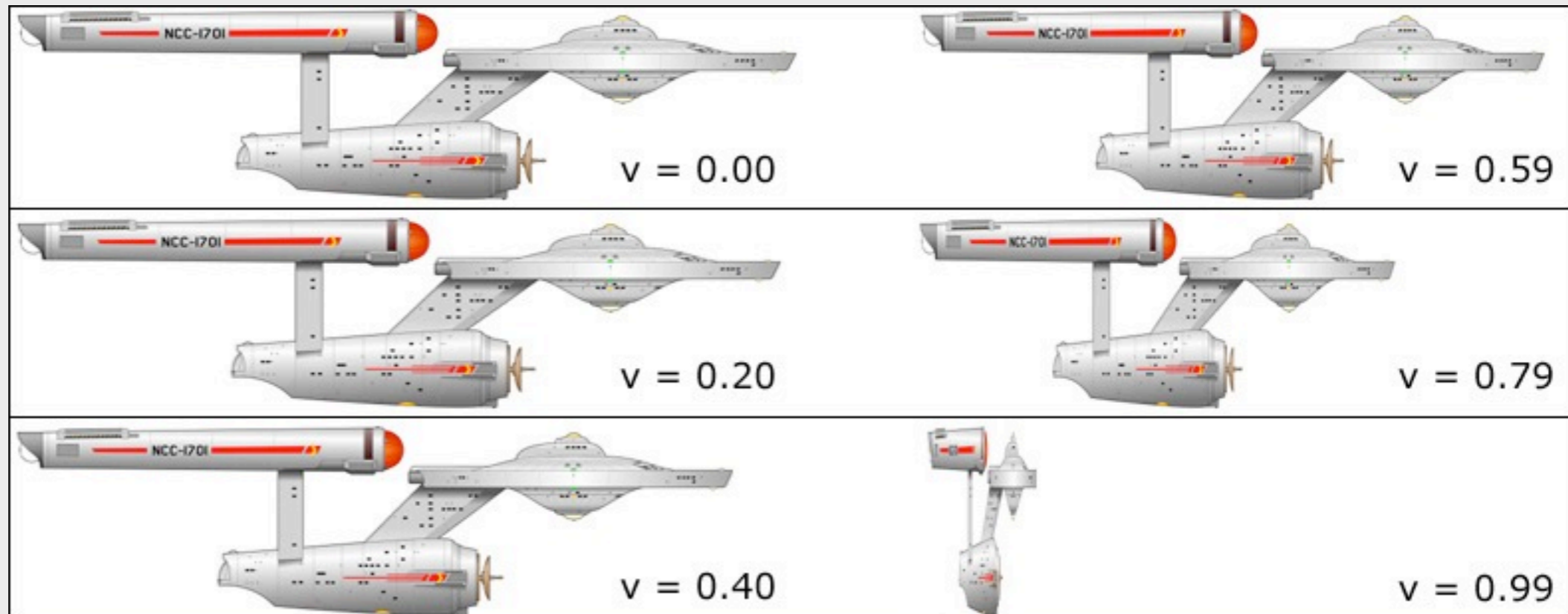
- bewegte Uhren gehen langsamer (Zeitdilatation)

Spezielle Relativitätstheorie



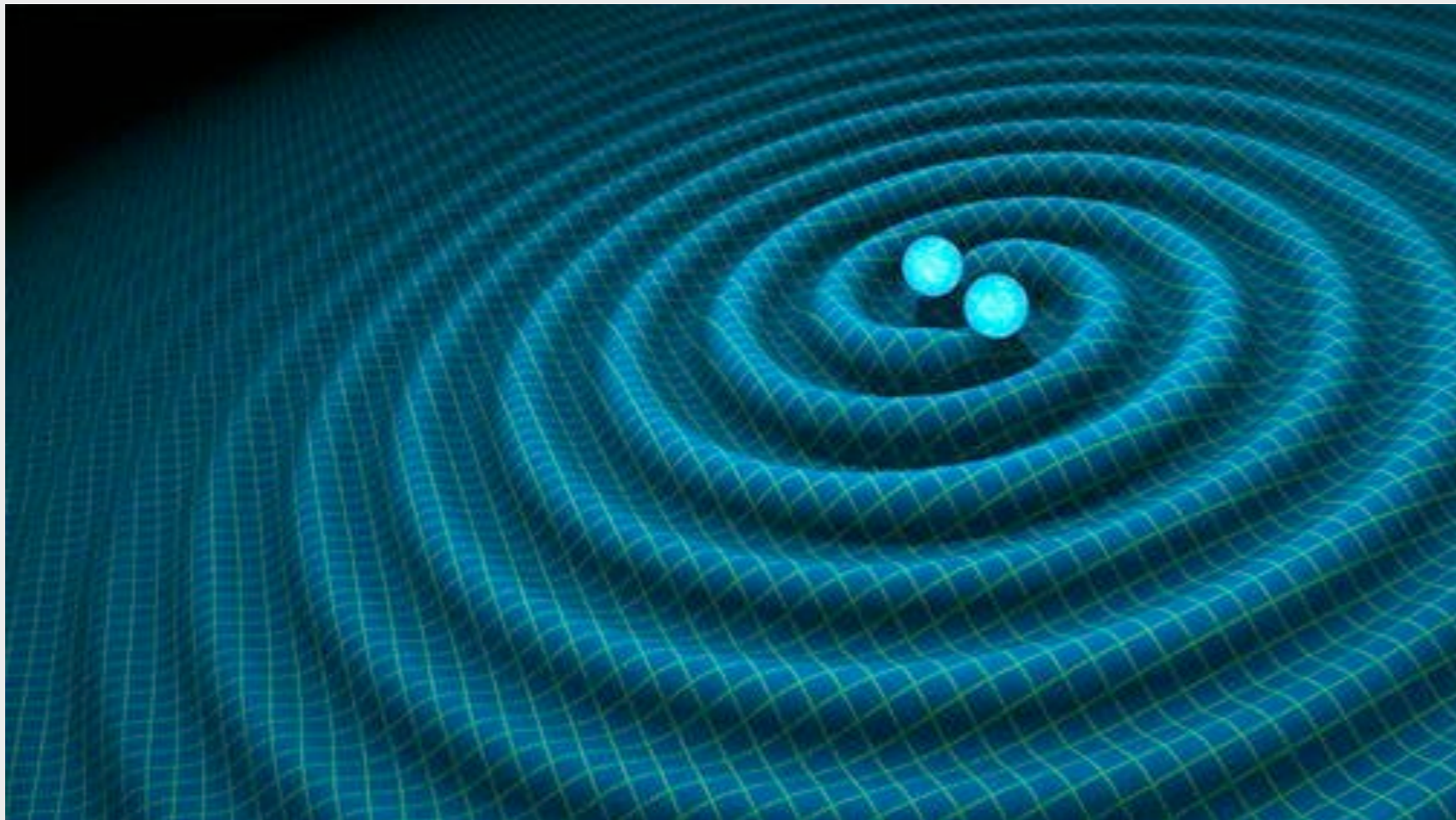
- bewegte Uhren gehen langsamer (Zeitdilatation)

- bewegte Objekte sind kürzer (Längenkontraktion)



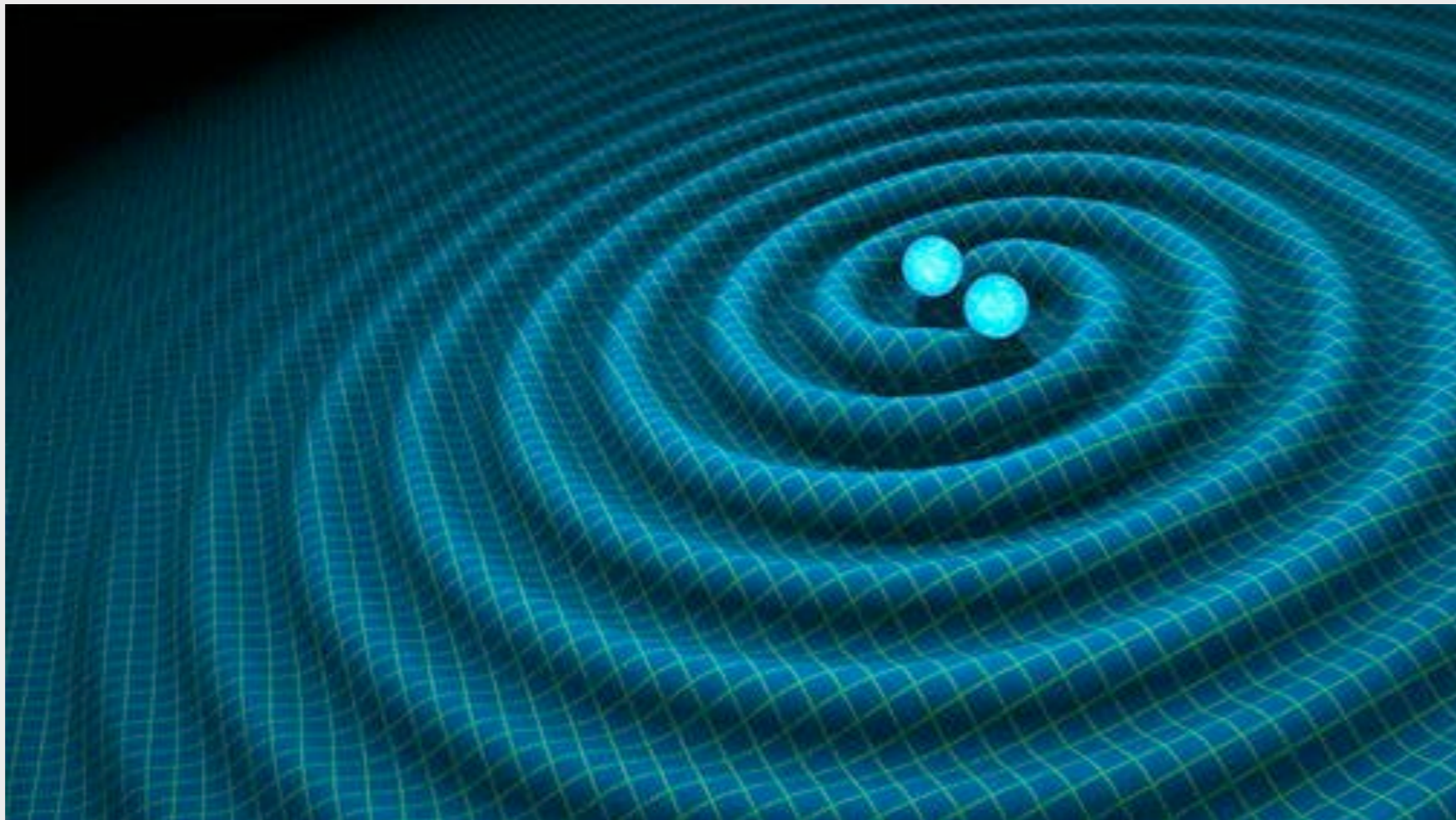
Störung der RAUMZEIT?

- Störung der Raumzeit = **Krümmung** der Raumzeit



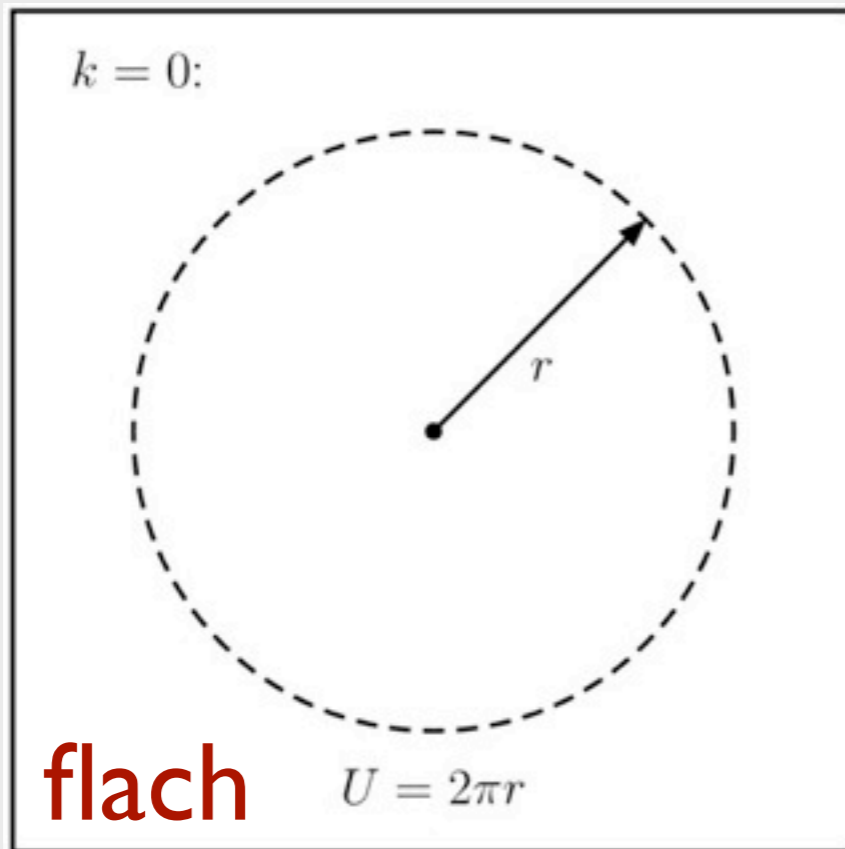
Störung der RAUMZEIT?

- Störung der Raumzeit = **Krümmung** der Raumzeit

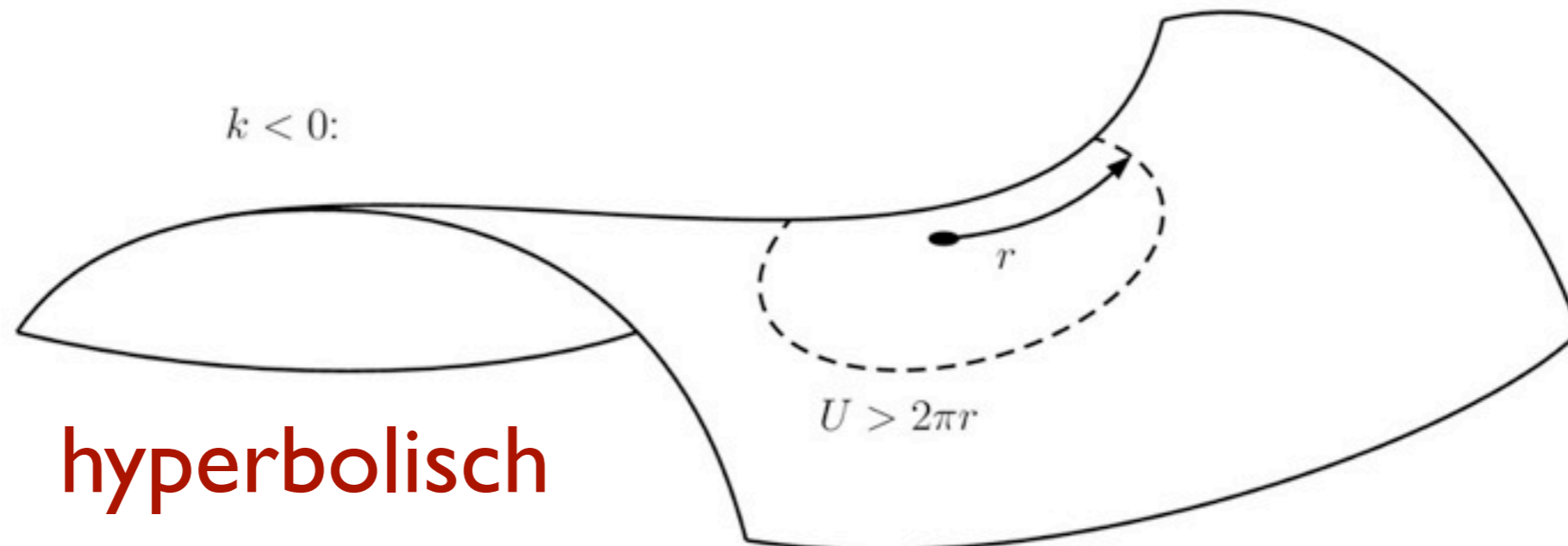
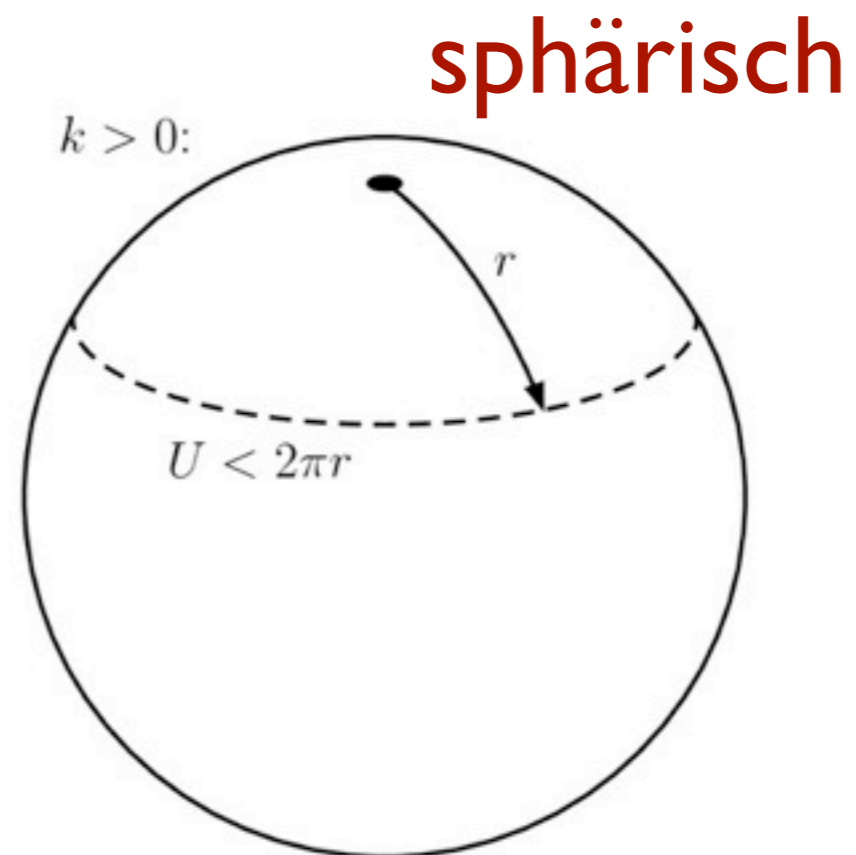


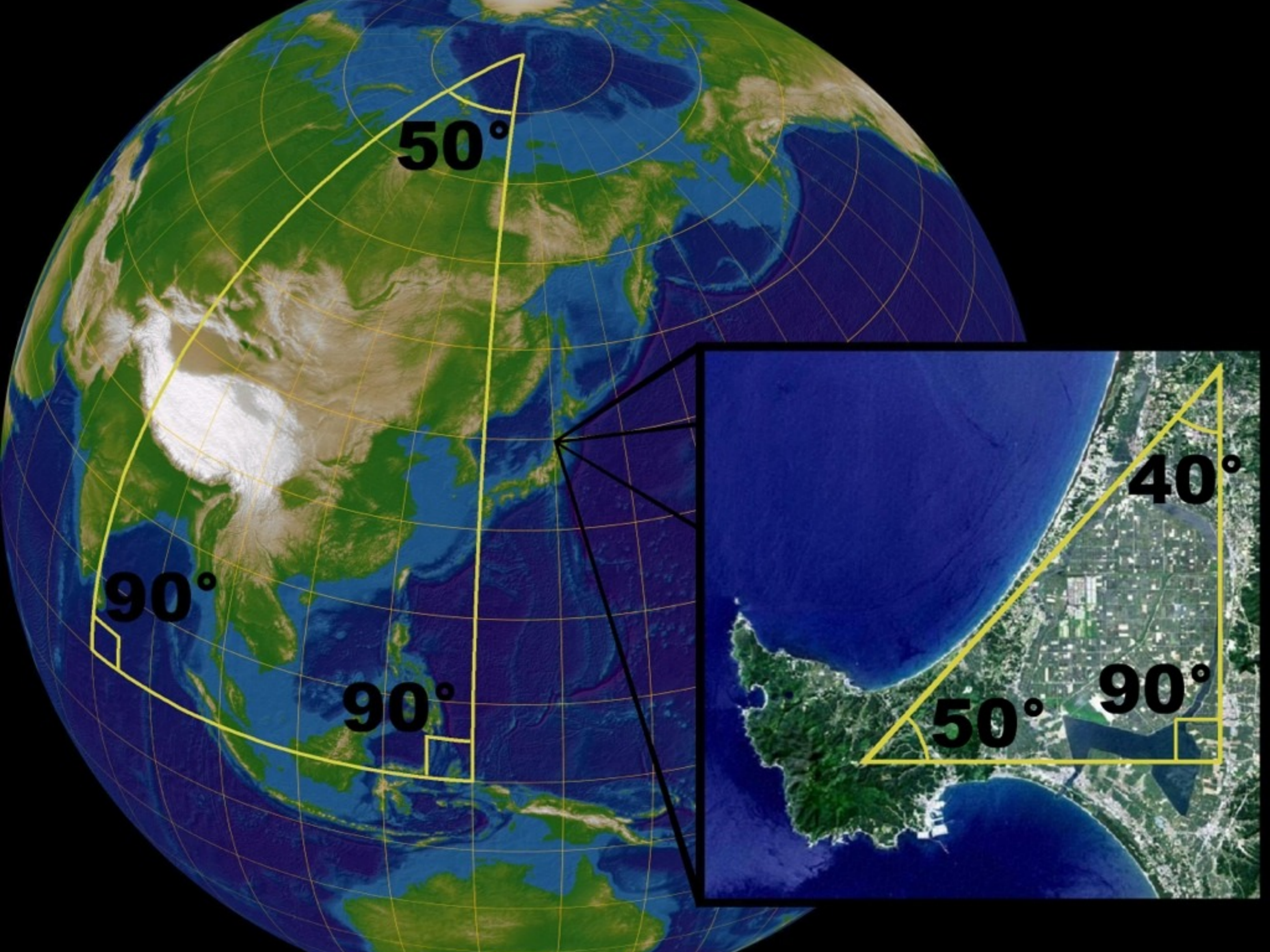
was heißt **gekrümmte** RAUMZEIT ?

Gekrümmter Raum



= euklidischer Raum





Allgemeine Relativitätstheorie

778

Gesamtsitzung vom 4. November 1915

Zur allgemeinen Relativitätstheorie.

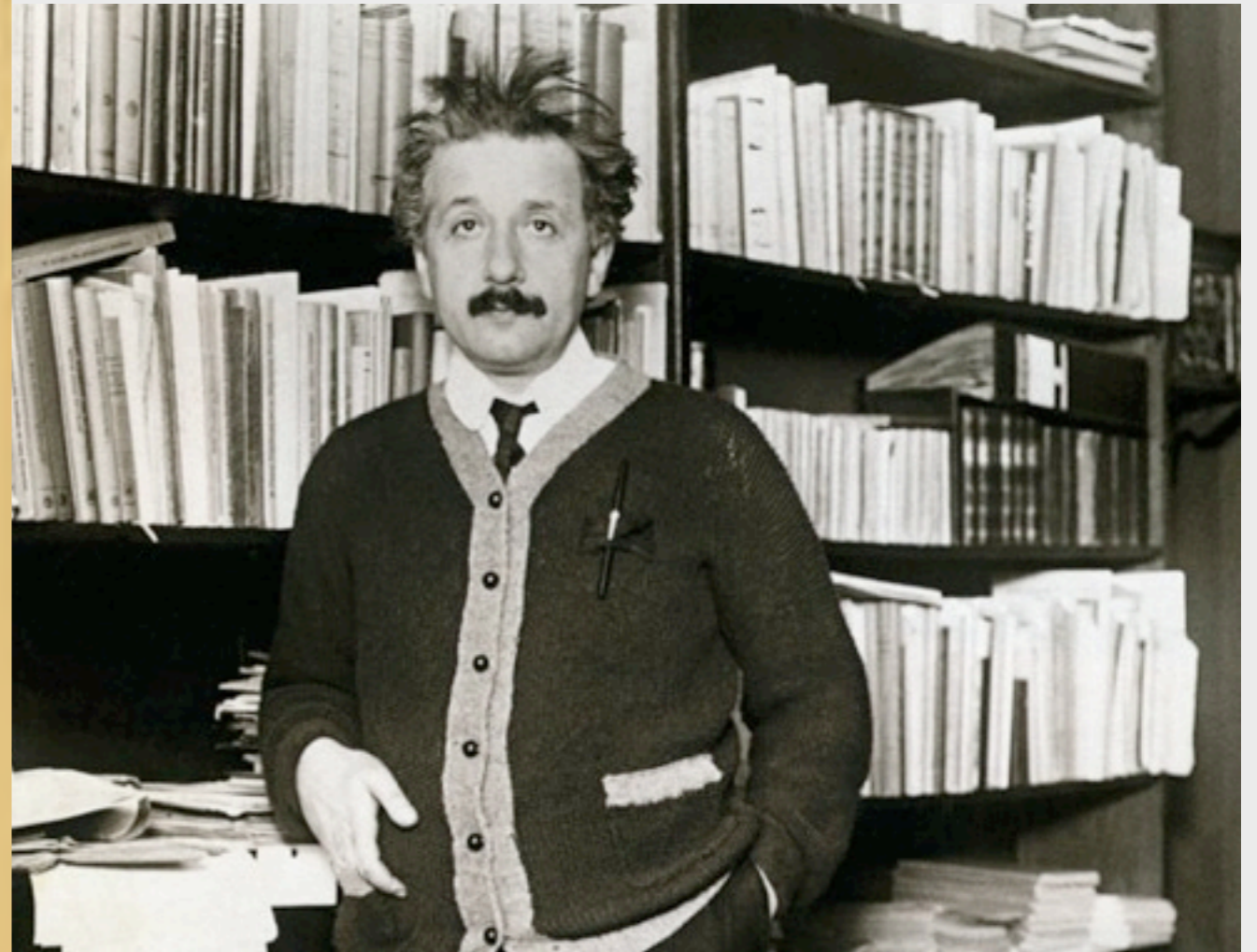
VON A. EINSTEIN.

In den letzten Jahren war ich bemüht, auf die Voraussetzung der Relativität auch nicht gleichförmiger Bewegungen eine allgemeine Relativitätstheorie zu gründen. Ich glaubte in der Tat, das einzige Gravitationsgesetz gefunden zu haben, das dem sinngemäß gefaßten, allgemeinen Relativitätspostulate entspricht, und suchte die Notwendigkeit gerade dieser Lösung in einer im vorigen Jahre in diesen Sitzungsberichten erschienenen Arbeit¹ darzutun.

Eine erneute Kritik zeigte mir, daß sich jene Notwendigkeit auf dem dort eingeschlagenen Wege absolut nicht erweisen läßt; daß dies doch der Fall zu sein schien, beruhte auf Irrtum. Das Postulat der Relativität, soweit ich es dort gefordert habe, ist stets erfüllt, wenn man das HAMILTONSche Prinzip zugrunde legt; es liefert aber in Wahrheit keine Handhabe für eine Ermittlung der HAMILTONSchen Funktion H des Gravitationsfeldes. In der Tat drückt die die Wahl von H einschränkende Gleichung (77) a. a. O. nichts anderes aus, als daß H eine Invariante bezüglich linearer Transformationen sein soll, welche Forderung mit der der Relativität der Beschleunigung nichts zu schaffen hat. Ferner wird die durch Gleichung (78) a. a. O. getroffene Wahl durch Gleichung (77) keineswegs festgelegt.

Aus diesen Gründen verlor ich das Vertrauen zu den von mir aufgestellten Feldgleichungen vollständig und suchte nach einem Wege, der die Möglichkeiten in einer natürlichen Weise einschränkte. So gelangte ich zu der Forderung einer allgemeineren Kovarianz der Feldgleichungen zurück, von der ich vor drei Jahren, als ich zusammen mit meinem Freunde GROSSMANN arbeitete, nur mit schwerem Herzen abgegangen war. In der Tat waren wir damals der im nachfolgenden gegebenen Lösung des Problems bereits ganz nahe gekommen.

Wie die spezielle Relativitätstheorie auf das Postulat gegründet ist, daß ihre Gleichungen bezüglich linearer, orthogonaler Transfor-

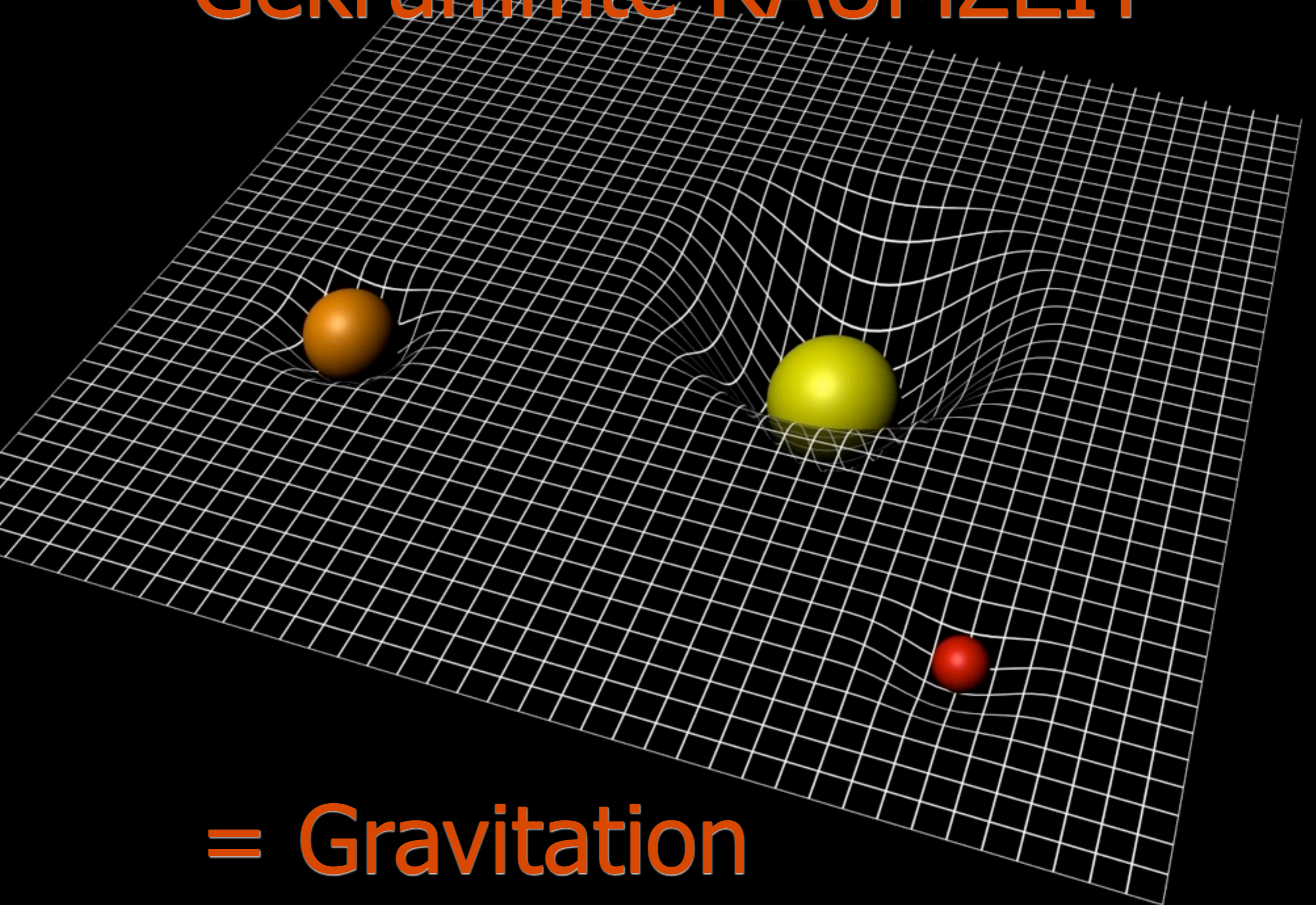


Albert Einstein 1915 in Berlin

Einstein's Originalartikel

Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften (Berlin, 1915) Seite 778-786.

Gekrümmte RAUMZEIT



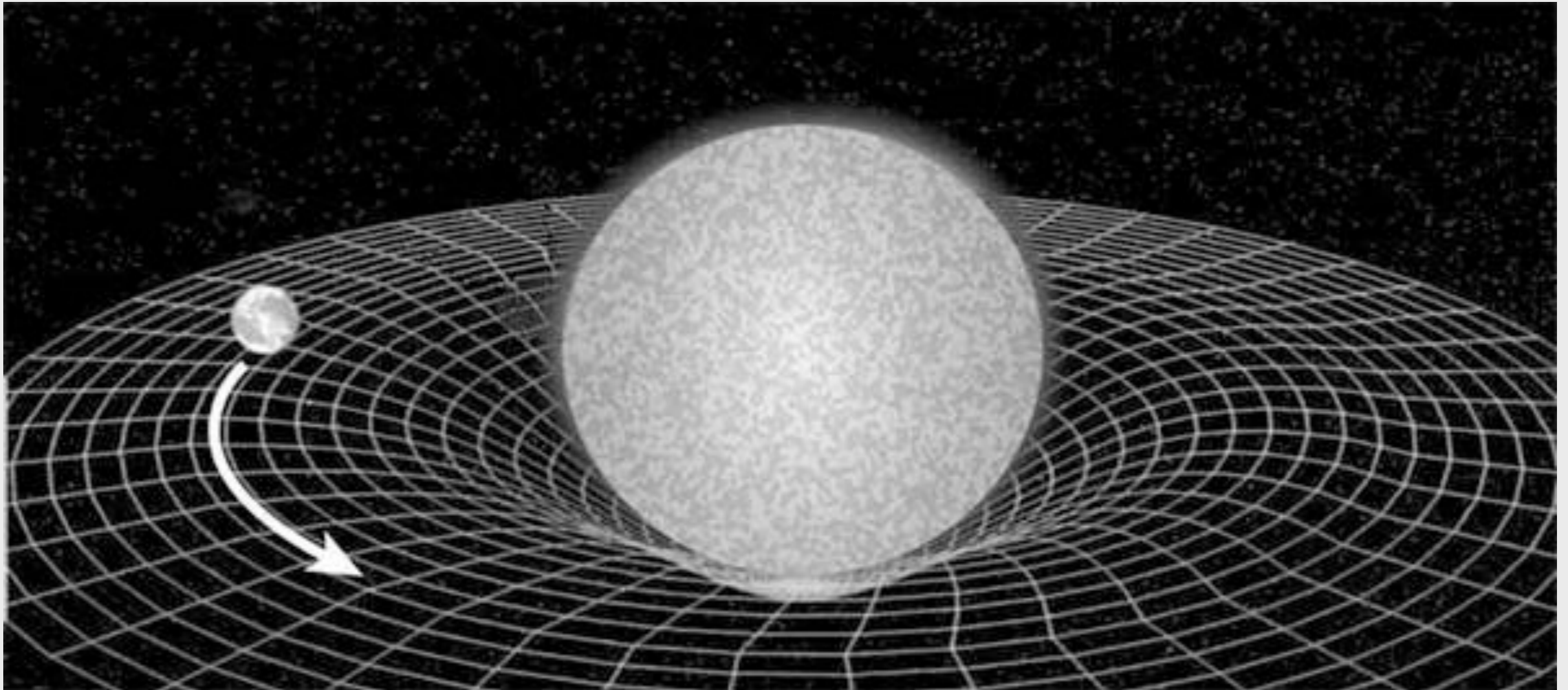
= Gravitation

Gekrümmte RAUMZEIT



- **RAUMZEIT** kann durch Planeten, Sterne, Galaxien, ... **gekrümmt** werden
- Allgemein: RZ-Krümmung durch Massen, Energie
- je größer die Masse desto stärker die RZ-Krümmung
- Konsequenz:
Alle Objekte, einschl. Licht, bewegen sich auf "**Geraden**" in der gekrümmten RAUMZEIT

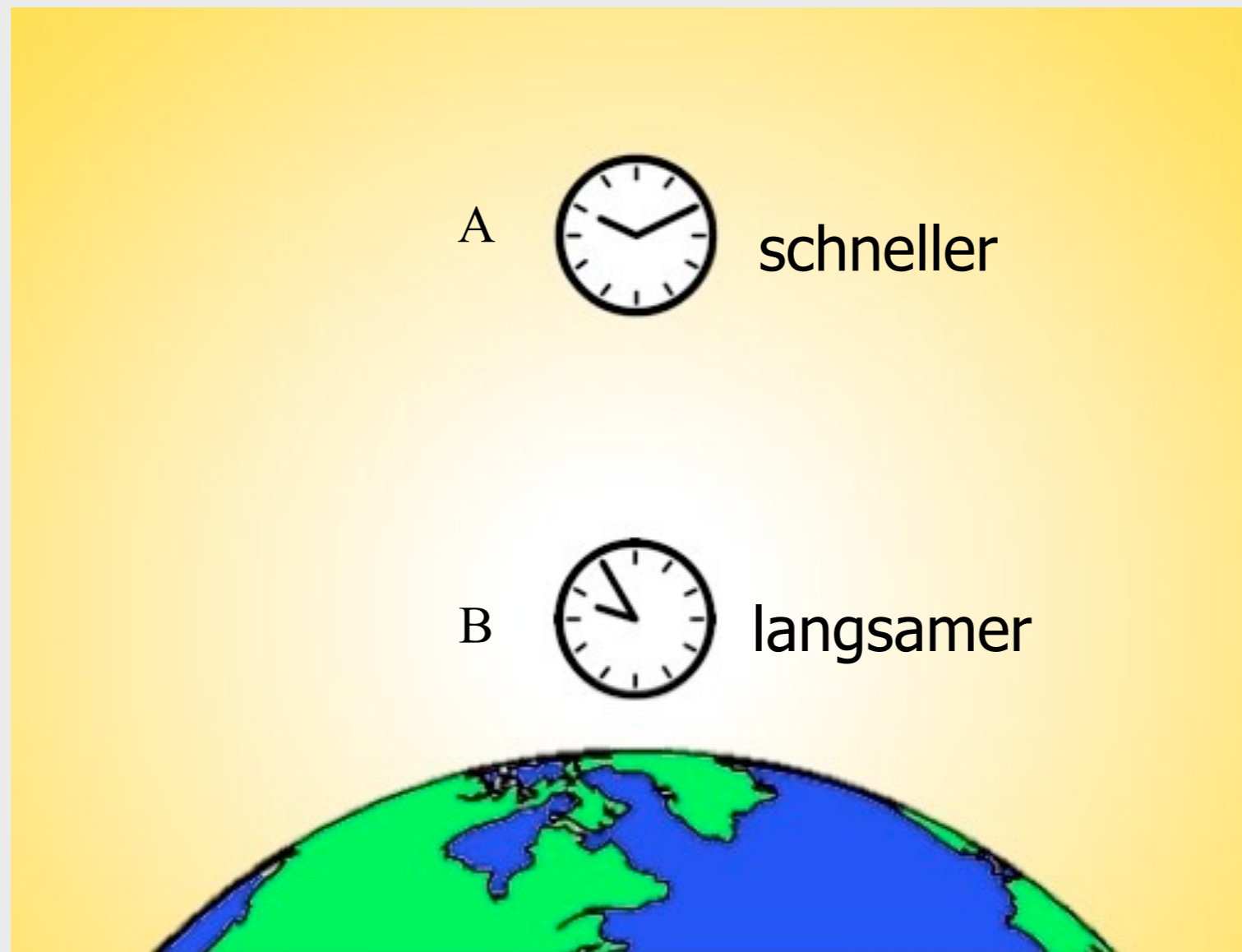
Gekrümmte RAUMZEIT



Gekrümmte Raumzeit in der Nähe der Sonne

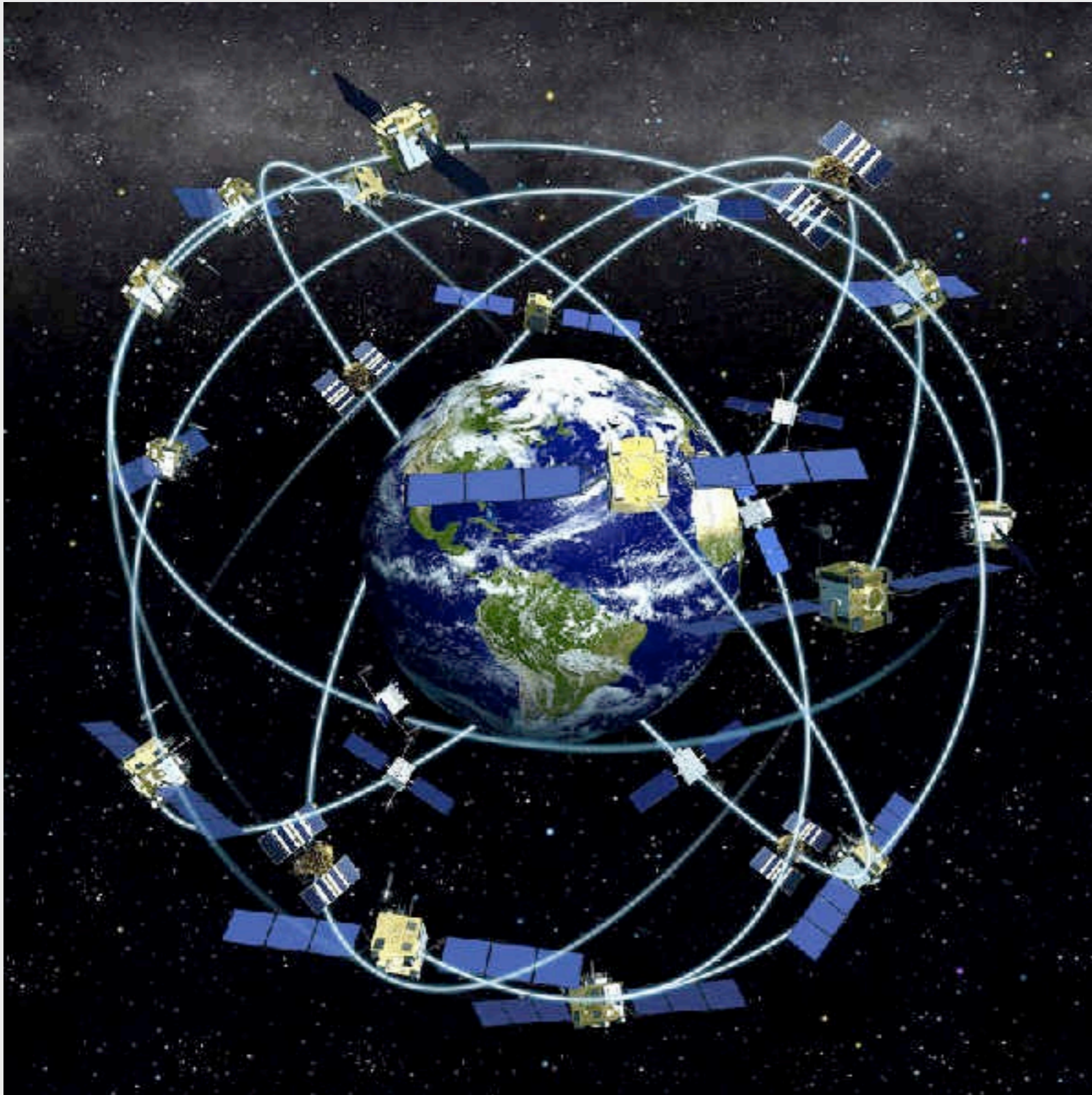
- Erde bewegt sich auf einer "**Geraden**" = kürzester Weg in der gekrümmten RAUMZEIT um die Sonne

Gekrümmte RAUMZEIT



- auch Zeitachse wird gekrümmt:
Uhren werden beeinflusst:
z.B. Uhren in GPS-Satelliten

Gekrümmte RAUMZEIT



Uhren auf GPS
Satelliten:
relativer Zeit-
unterschied:

$$10^{-9}$$

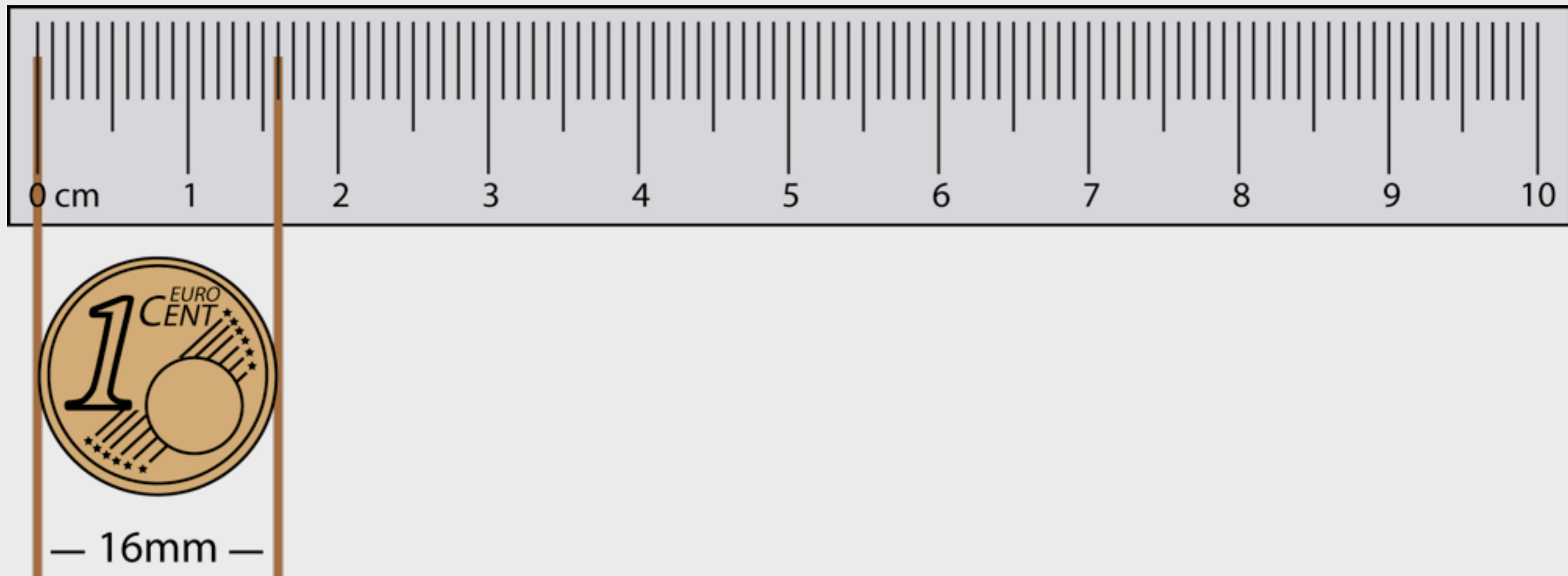
Gekrümmte RAUMZEIT



- Lichtablenkung durch Gravitationslinse

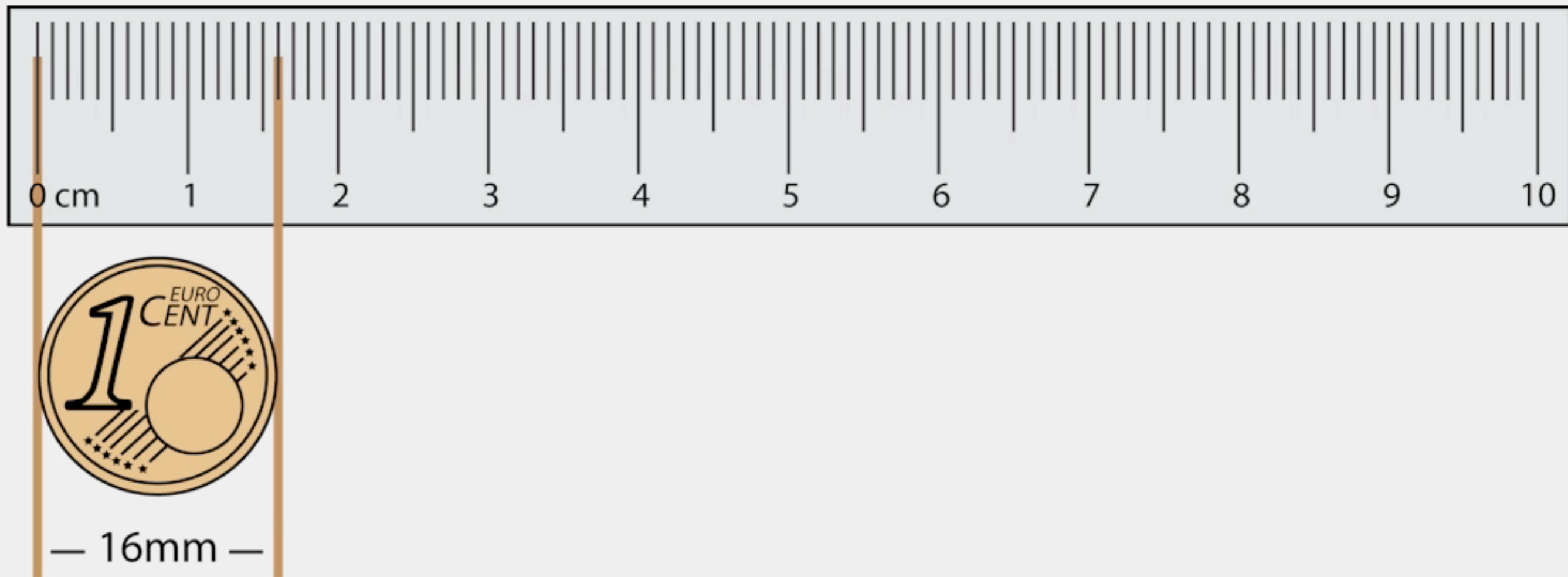
Was sind Gravitationswellen?

- zeitlich veränderliche Störungen der **RAUMZEIT**



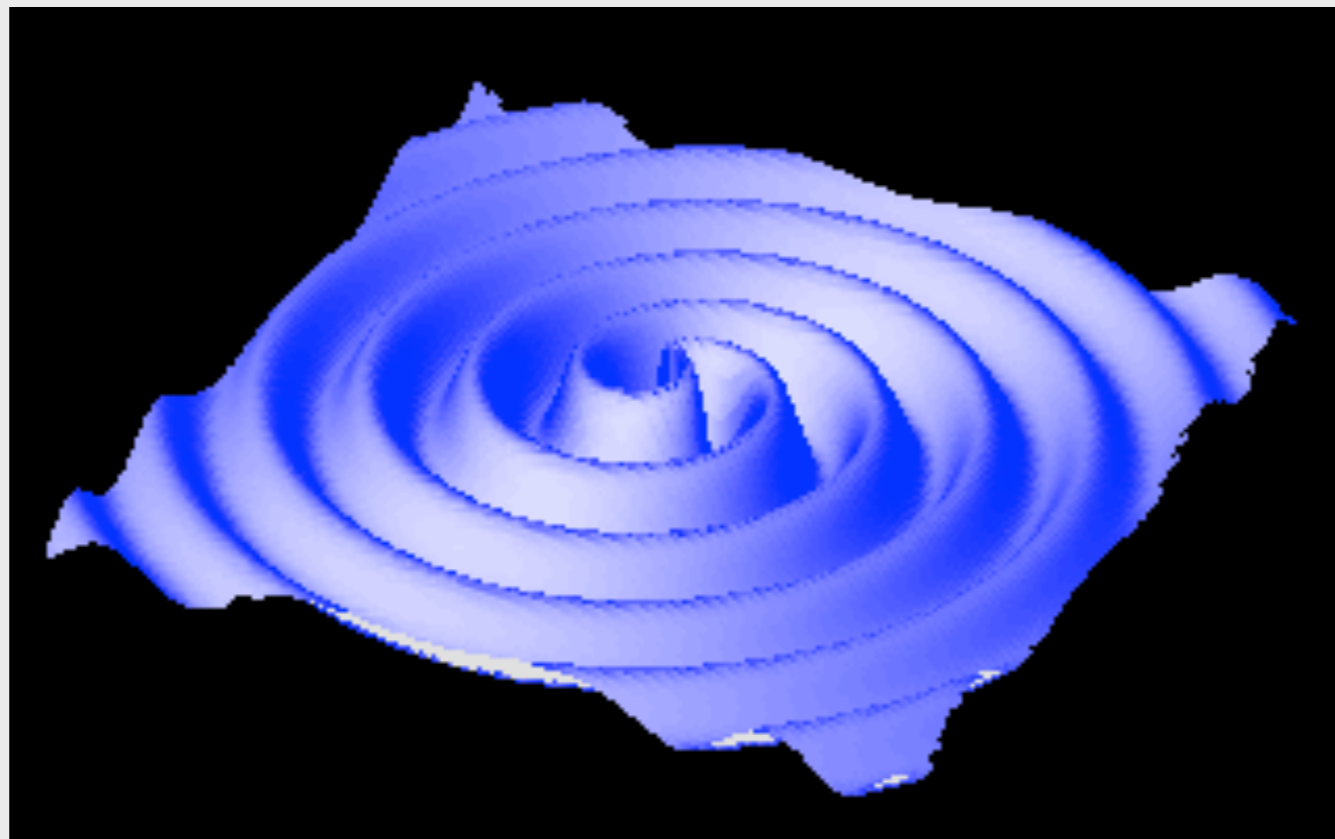
Was sind Gravitationswellen?

- zeitlich veränderliche Störungen der **RAUMZEIT**



Was sind Gravitationswellen?

- zeitlich veränderliche Störungen der **RAUMZEIT**



- z.B. durch zwei Neutronensternen
oder Verschmelzung von Schwarzen Löchern

Gravitationswellen

154 Gesamtsitzung vom 14. Februar 1918. — Mitteilung vom 31. Januar

Über Gravitationswellen.

Von A. EINSTEIN.

(Vorgelegt am 31. Januar 1918 [s. oben S. 79].)

Die wichtige Frage, wie die Ausbreitung der Gravitationsfelder erfolgt, ist schon vor anderthalb Jahren in einer Akademiearbeit von mir behandelt worden¹. Da aber meine damalige Darstellung des Gegenstandes nicht genügend durchsichtig und außerdem durch einen bedauerlichen Rechenfehler verunstaltet ist, muß ich hier nochmals auf die Angelegenheit zurückkommen.

Wie damals beschränke ich mich auch hier auf den Fall, daß das betrachtete zeiträumliche Kontinuum sich von einem »galileischen« nur sehr wenig unterscheidet. Um für alle Indizes

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

setzen zu können, wählen wir, wie es in der speziellen Relativitätstheorie üblich ist, die Zeitvariable x_4 rein imaginär, indem wir

$$x_4 = it$$

setzen, wobei t die »Lichtzeit« bedeutet. In (1) ist $\delta_{\mu\nu} = 1$ bzw. $\delta_{\mu\nu} = 0$,

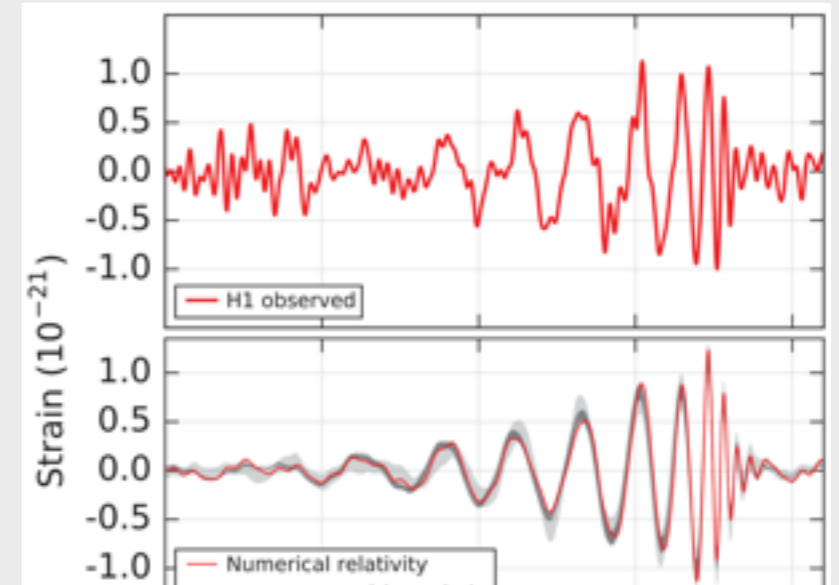


Albert Einstein

Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften (Berlin, 1918)

Gravitationswellen

- winzigste Kräuselungen der Raumzeit, relative Amplitude: **10^{-21}**



- Ausbreitung mit Lichtgeschwindigkeit:
Durchlaufen das Universum **ungehindert**

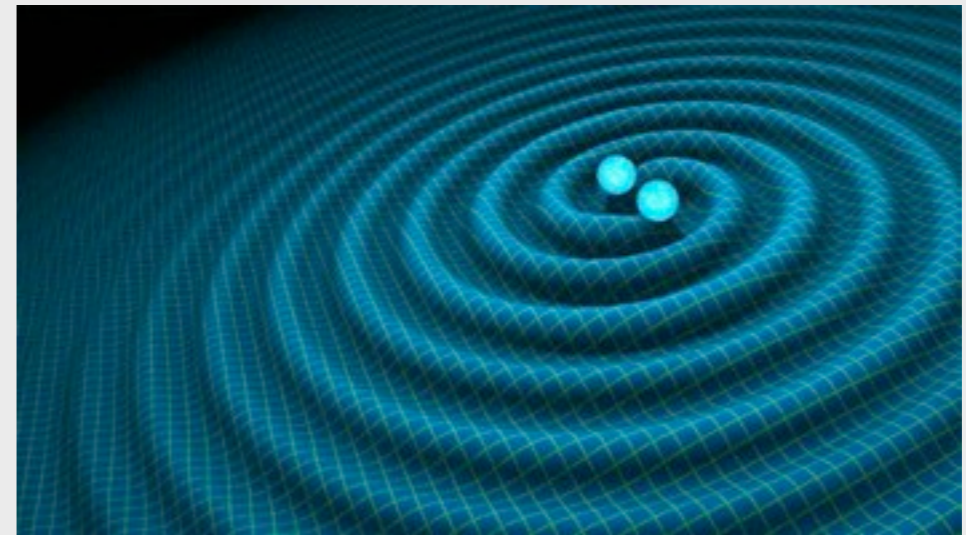
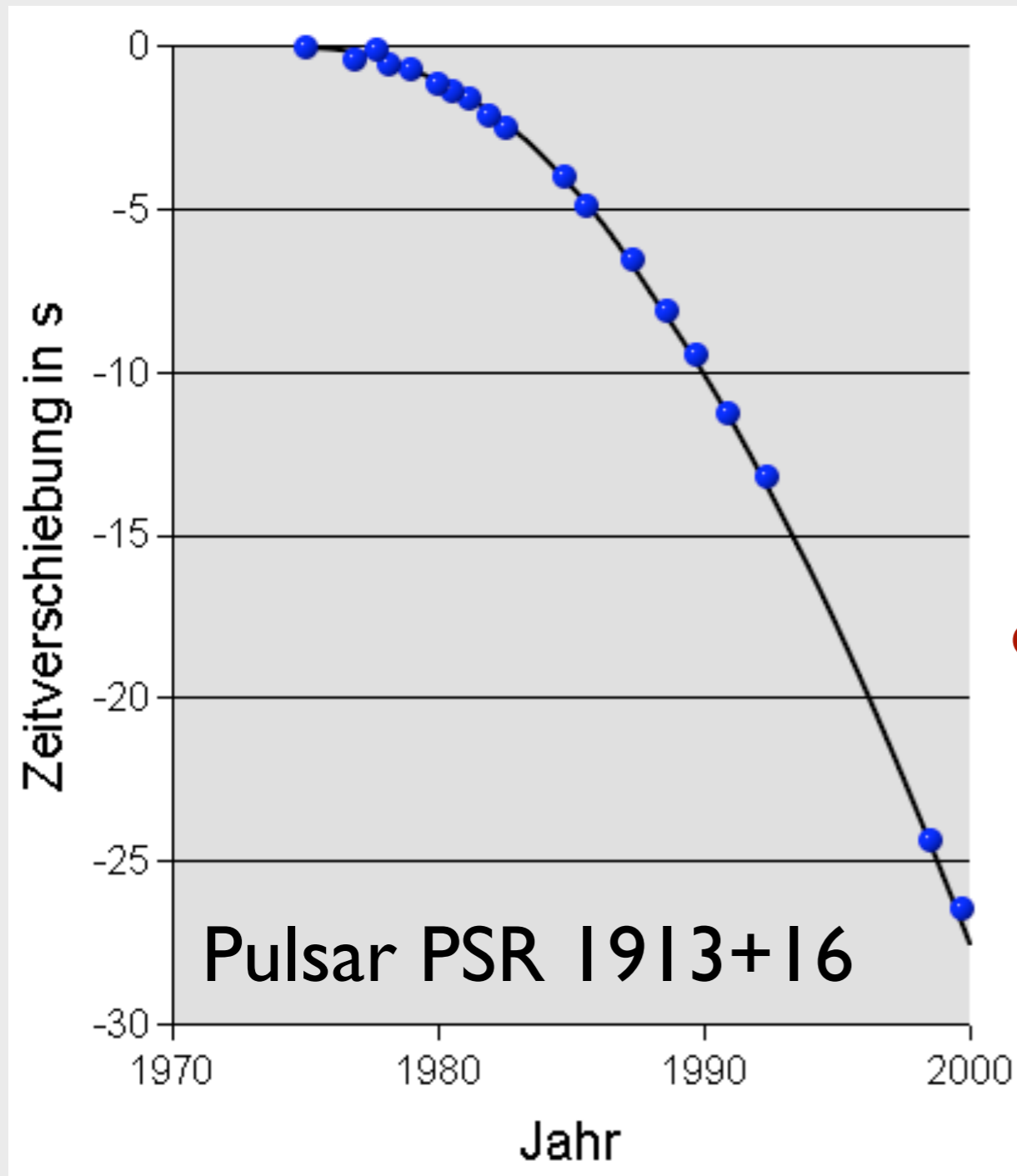


- typische Frequenz: 0.001 - 10 kHz

- transportieren Energie



Wie kann man Gravitationswellen nachweisen?

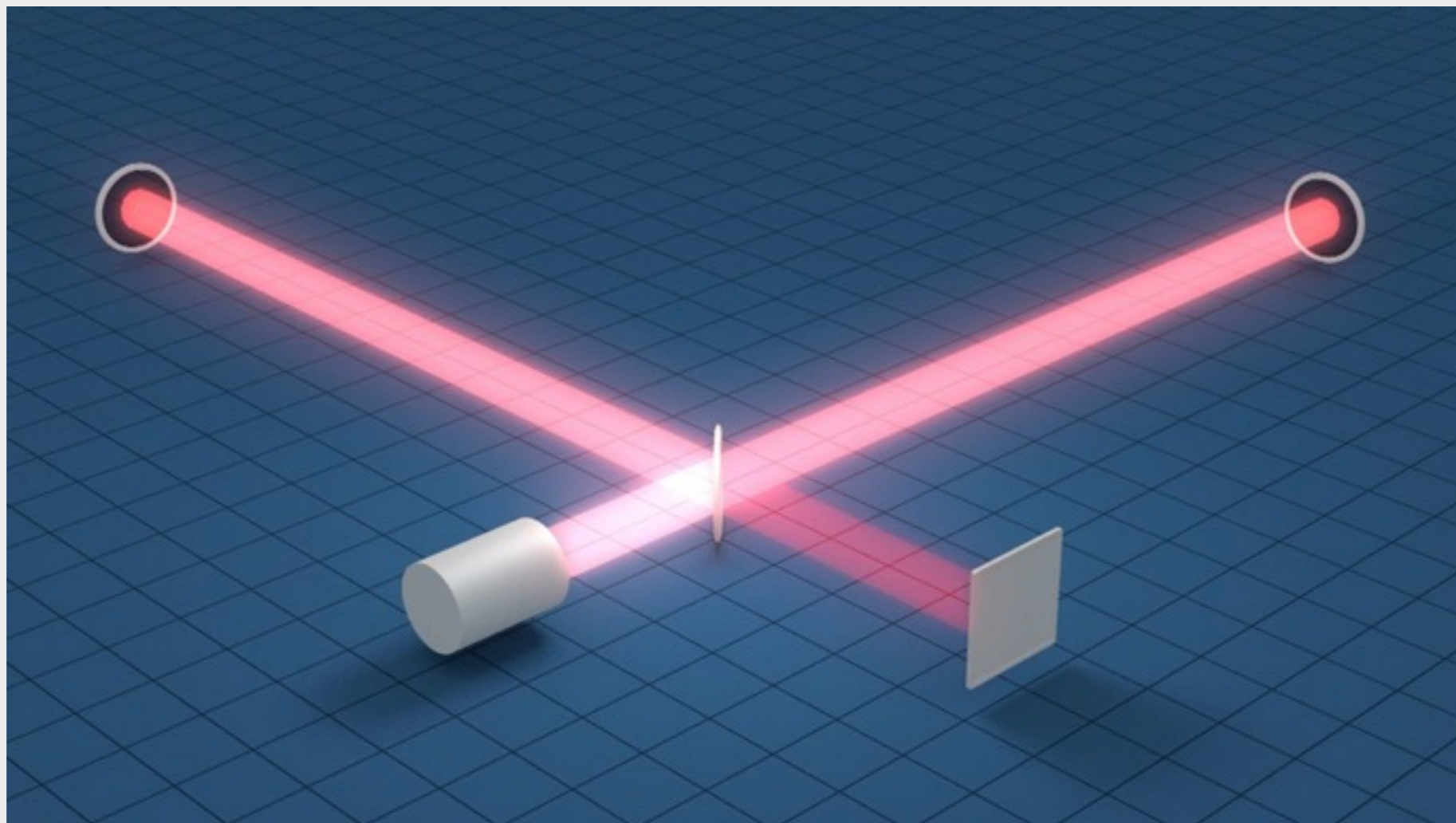


- bisher: **indirekter** Nachweis:
Veränderung der Rotationsperiode

Wie kann man Gravitationswellen nachweisen?

- seit 14. September 2015, 9:50 Uhr (UTC):

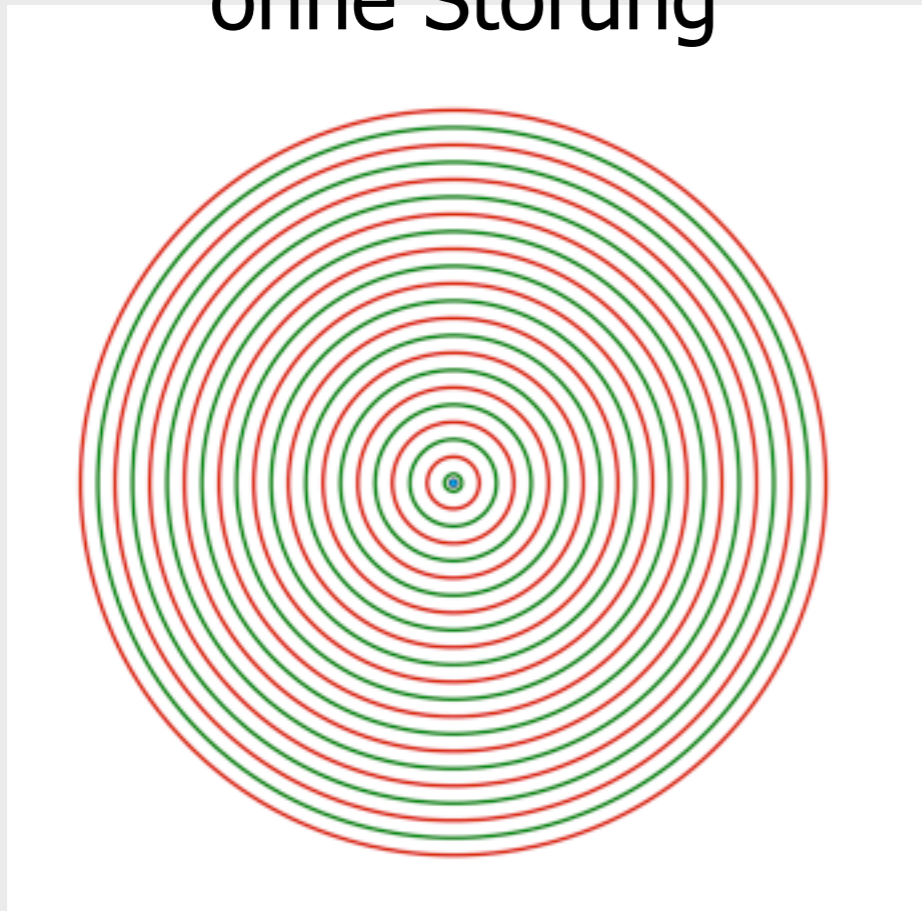
direkter Nachweis mit **LASER-Interferometer**



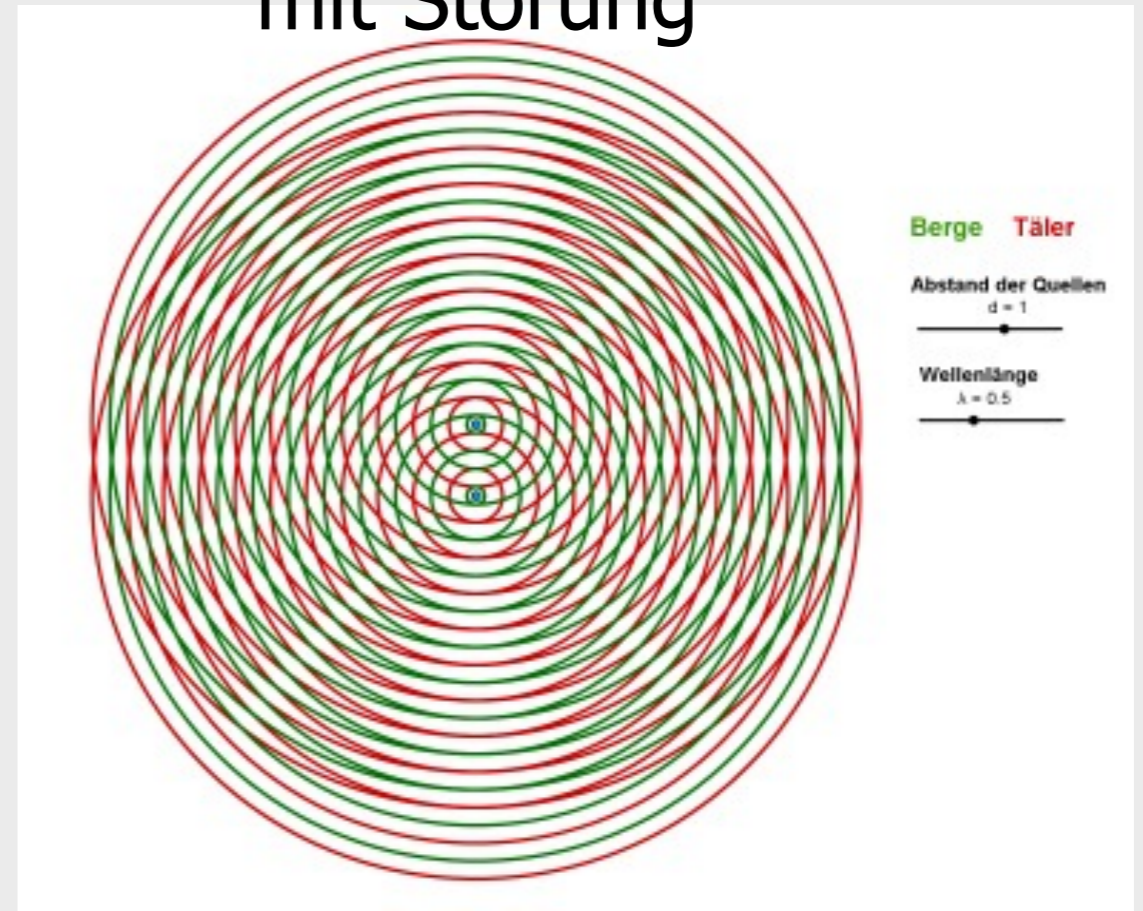
Nachweis von Gravitationswellen

- Interferenz: Überlagerung von Wellen

ohne Störung



mit Störung



Interferenzen von LASER Licht

LIGO*



LIGO Station Hanford, Washington State

* Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory



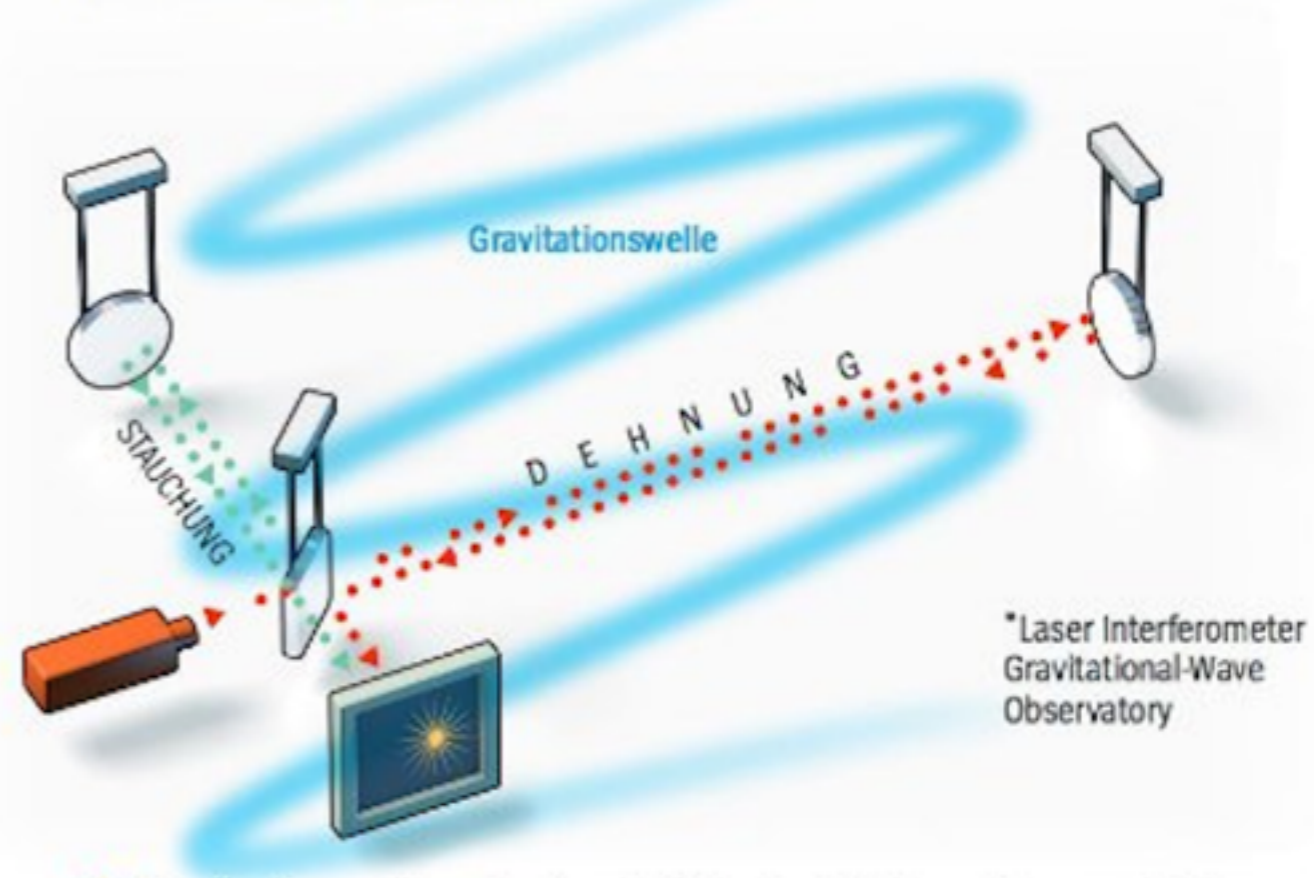
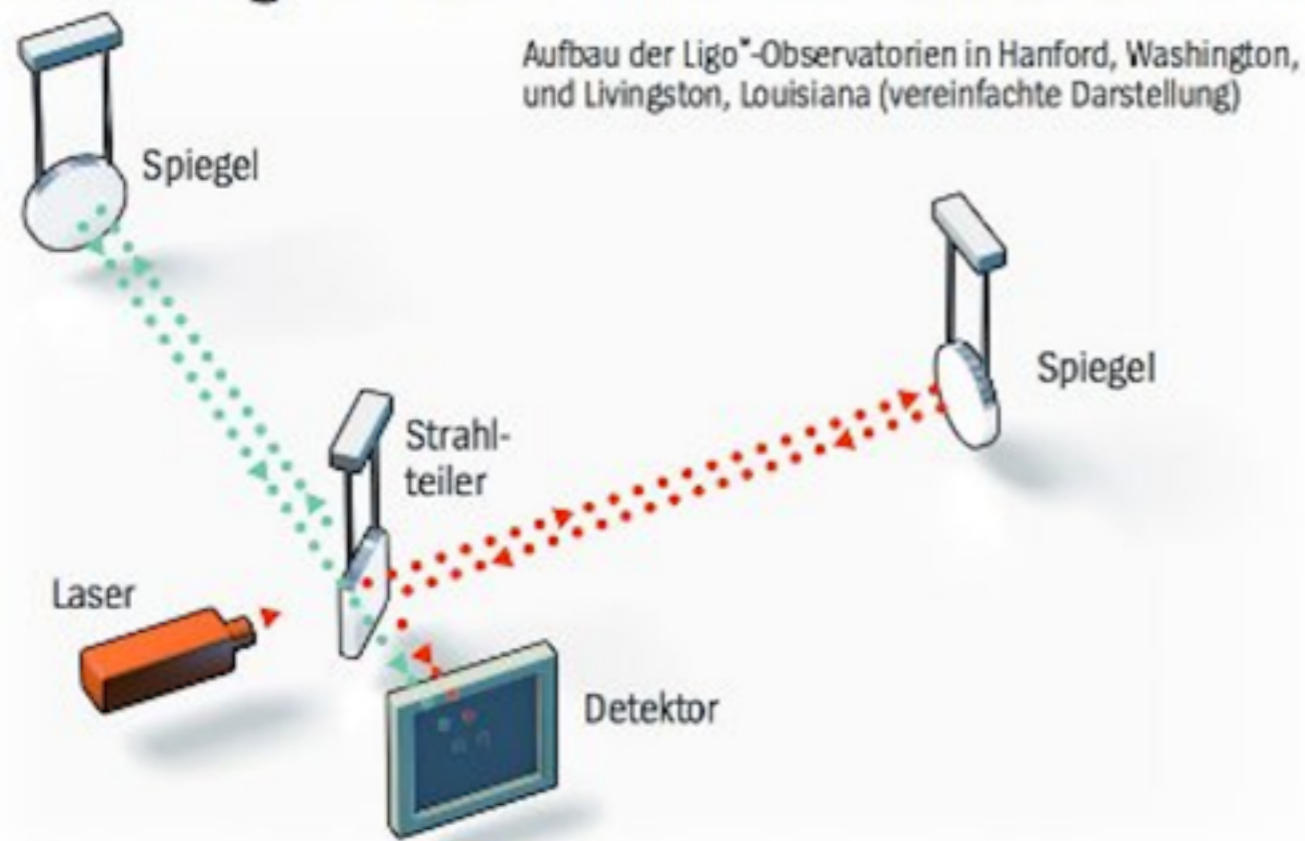
LIGO USA



LIGO Station Livingston, Louisiana

LIGO:

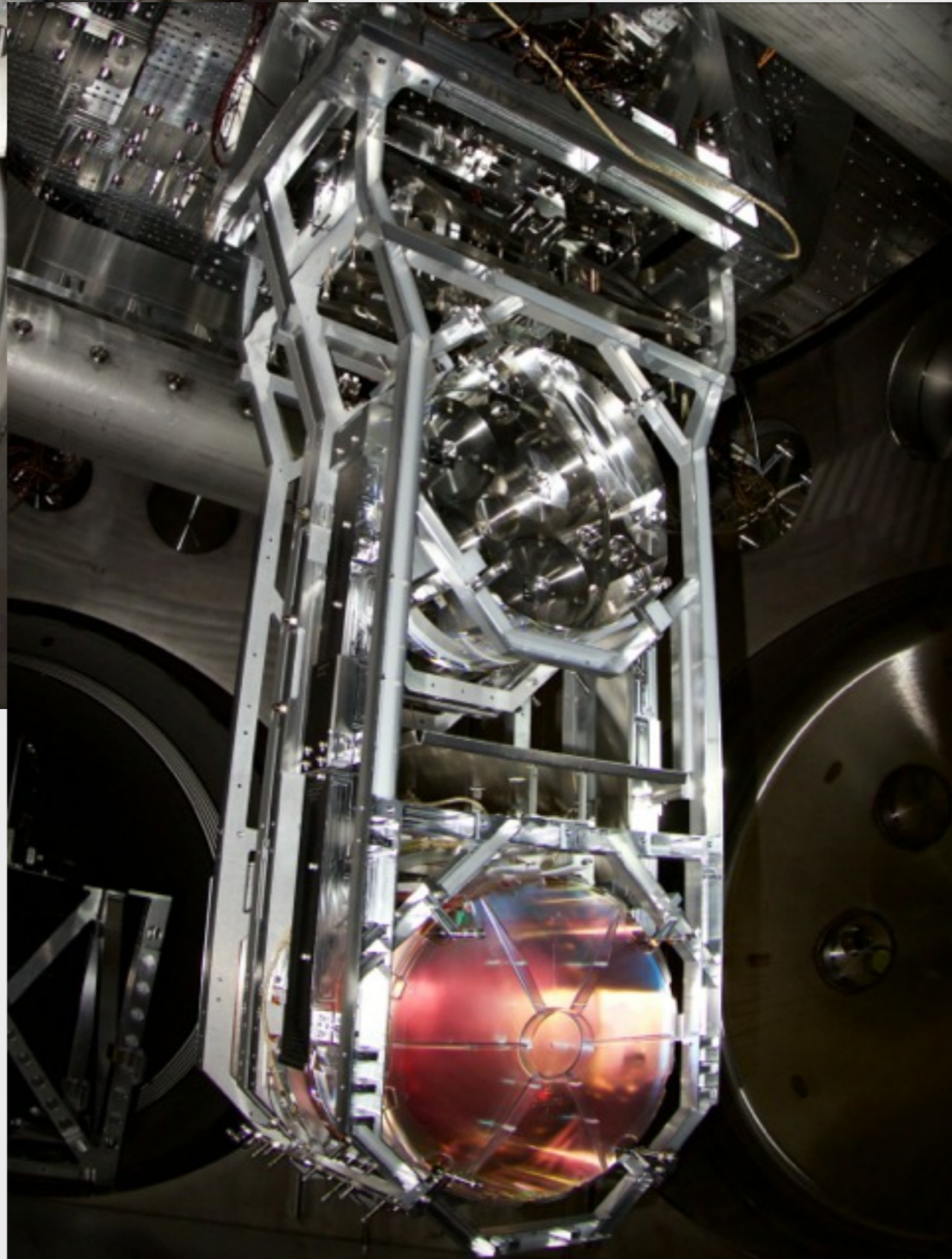
Direkter Nachweis von Gravitationswellen



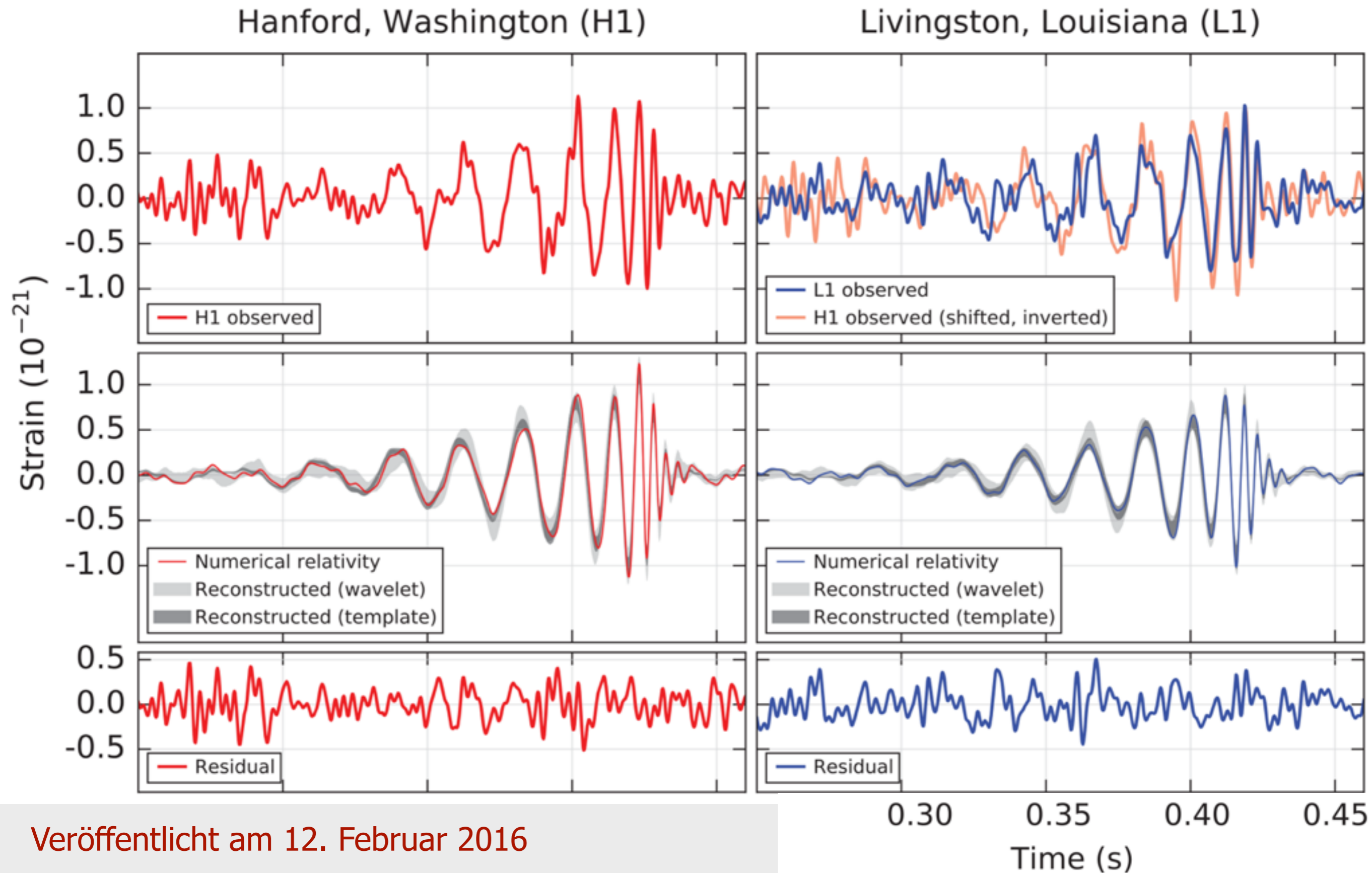


LIGO
Testmassen und
Spiegel: ca. 40 kg

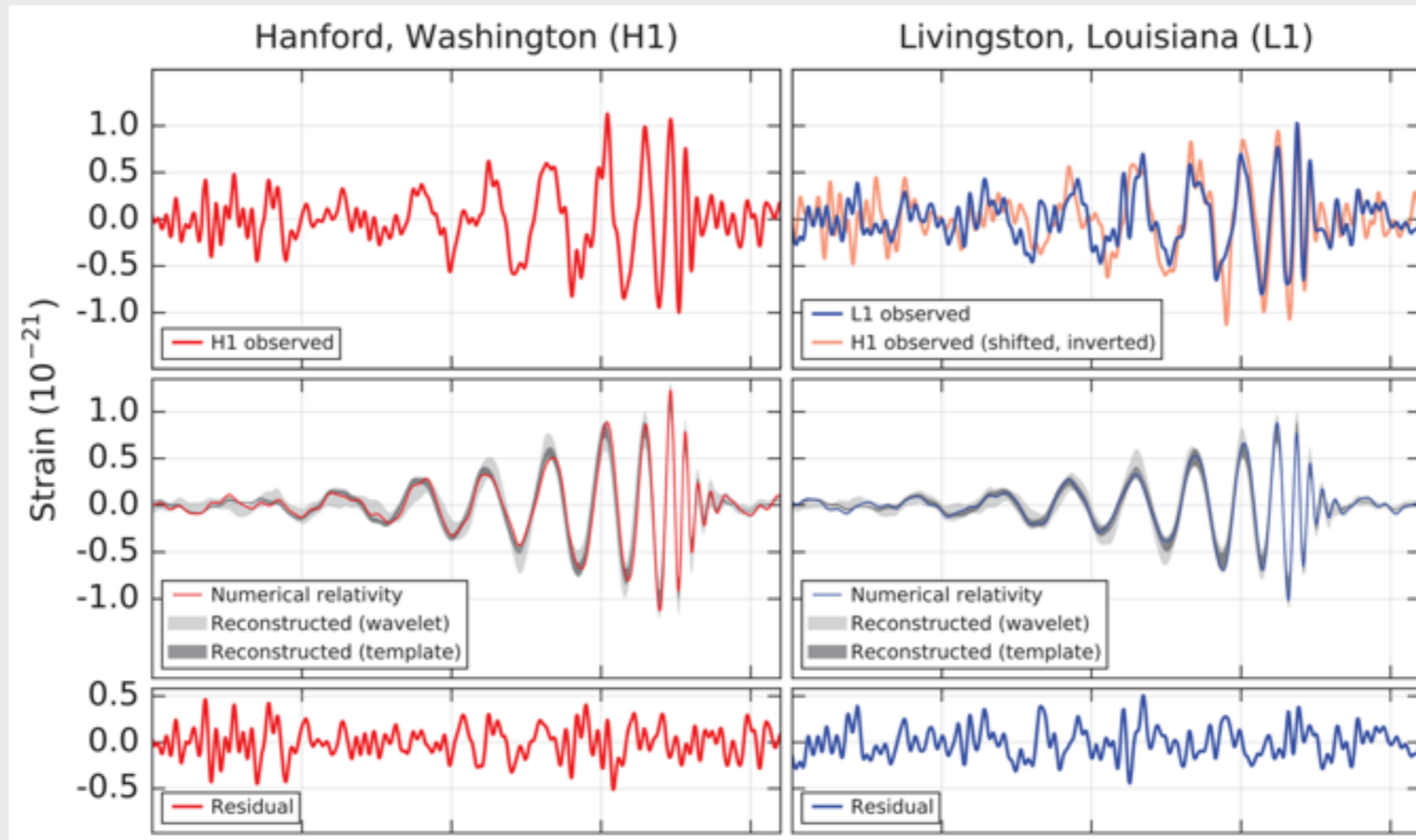
Auslenkung: 10^{-18} m



Direkter Nachweis von GW

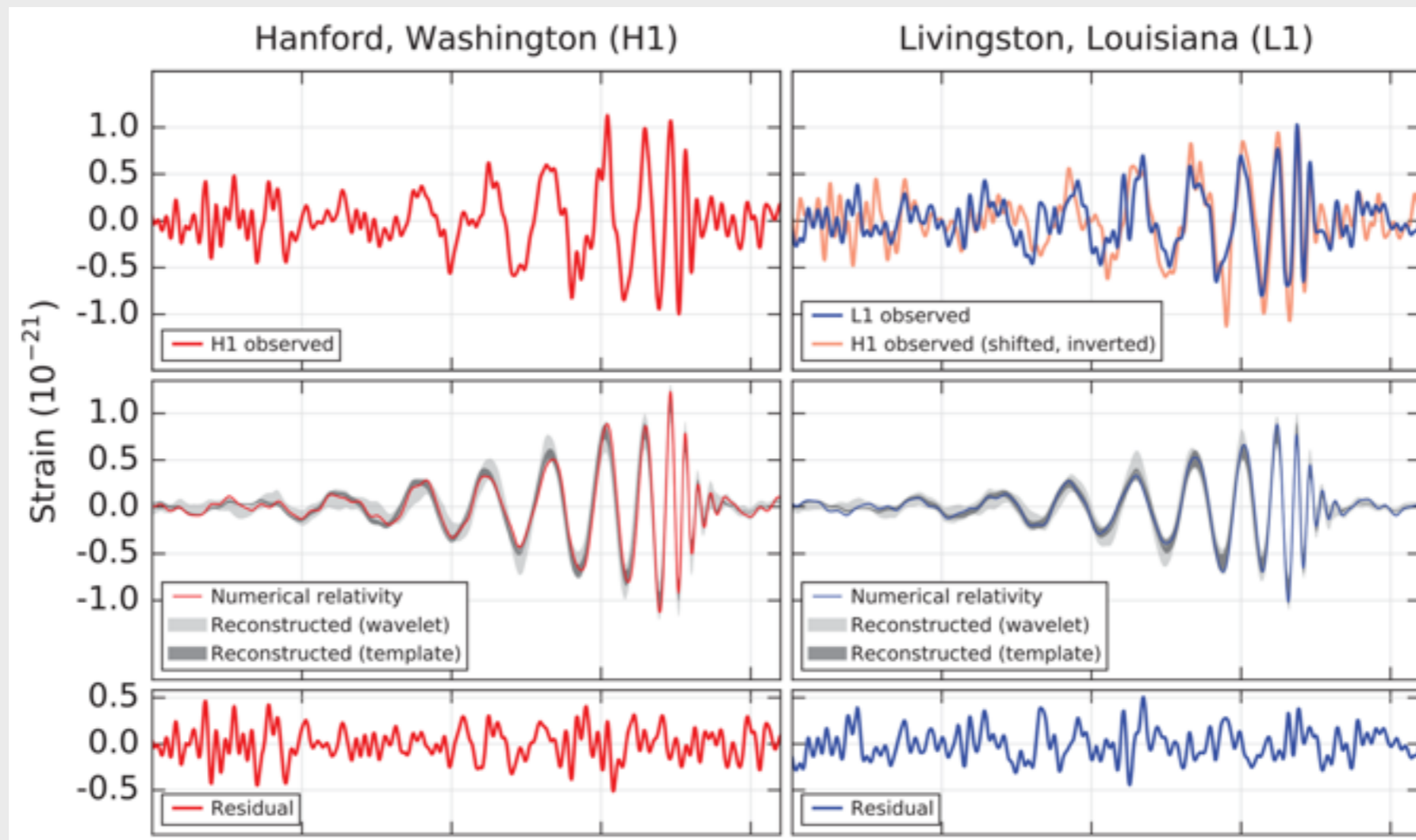


Direkter Nachweis von GW



- Was hat die Gravitationswelle ausgelöst?

Direkter Nachweis von GW

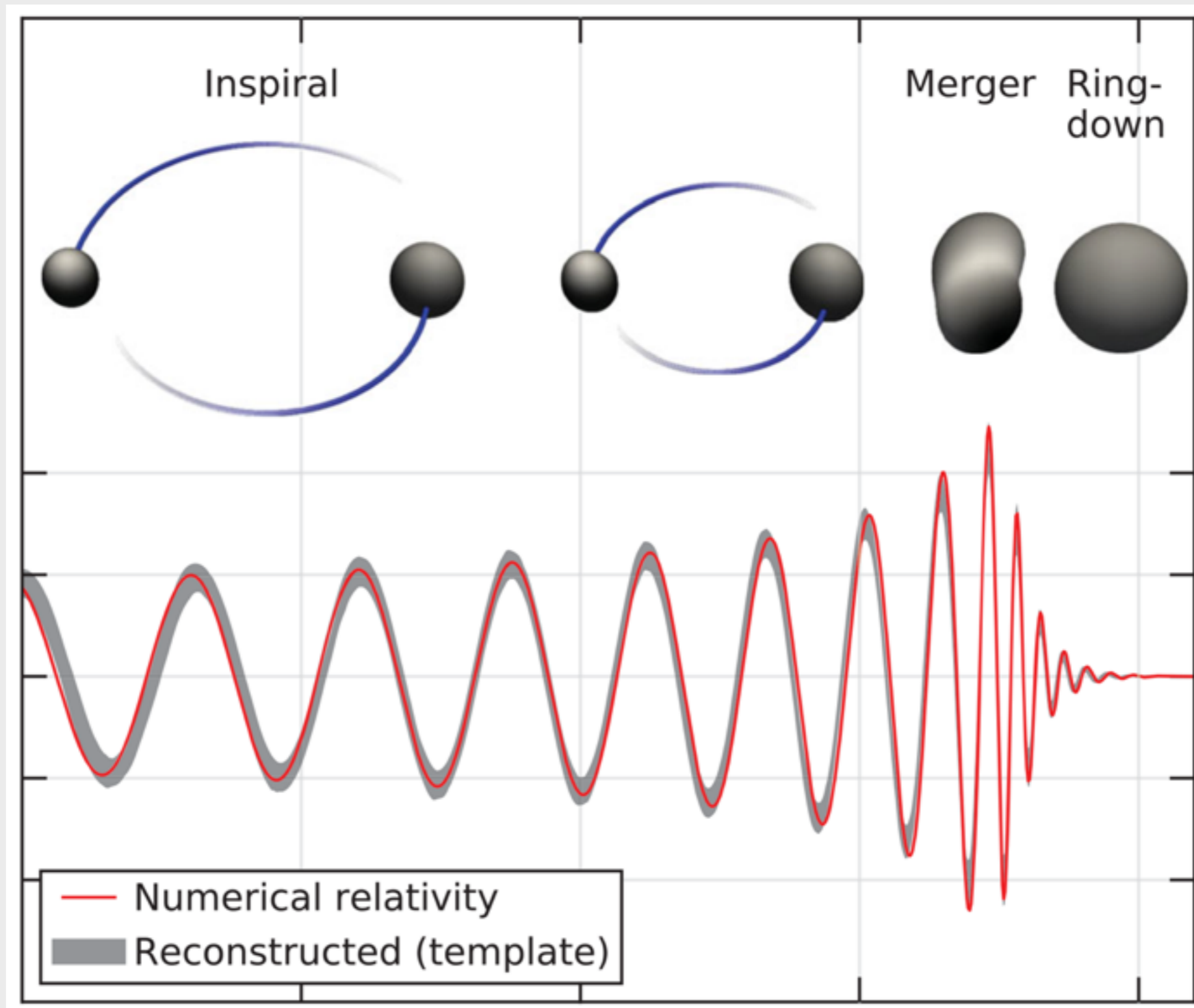


- Was hat die Gravitationswelle ausgelöst?

Verschmelzung von zwei Schwarzen Löchern:

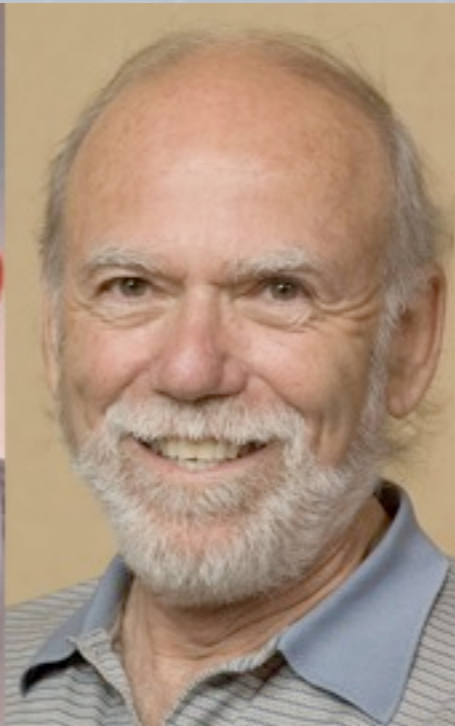
$$M_{\text{BHs}} = 36 M_{\odot} + 29 M_{\odot}$$

Direkter Nachweis von GW



Verschmelzung von zwei Schwarzen Löchern

Nobelpreis 2017



Rainer Weiss
*1939 Berlin

Kip Thorne
*1940 USA

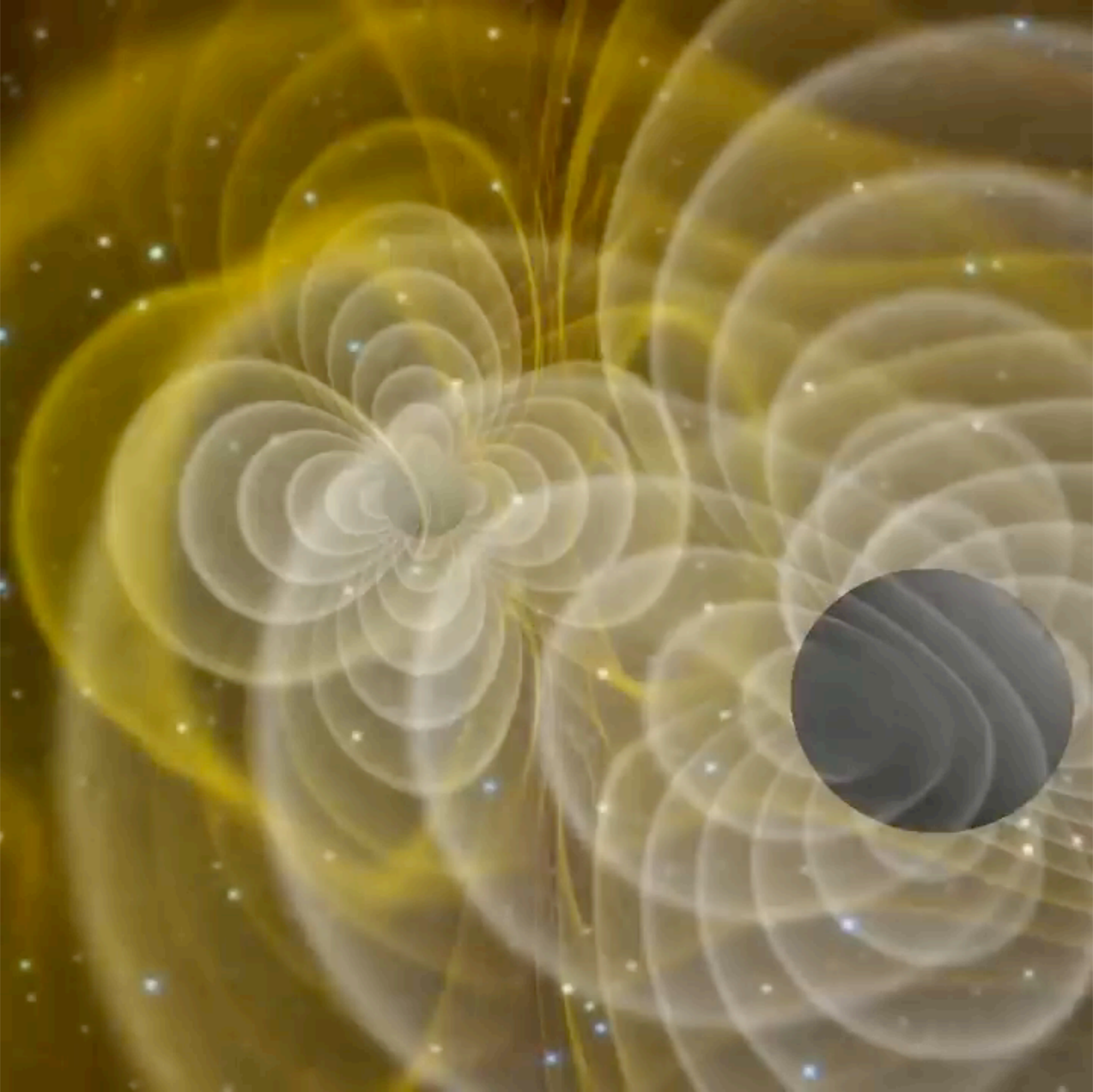
Barry Barish
*1936 USA

Rainer Weiss:

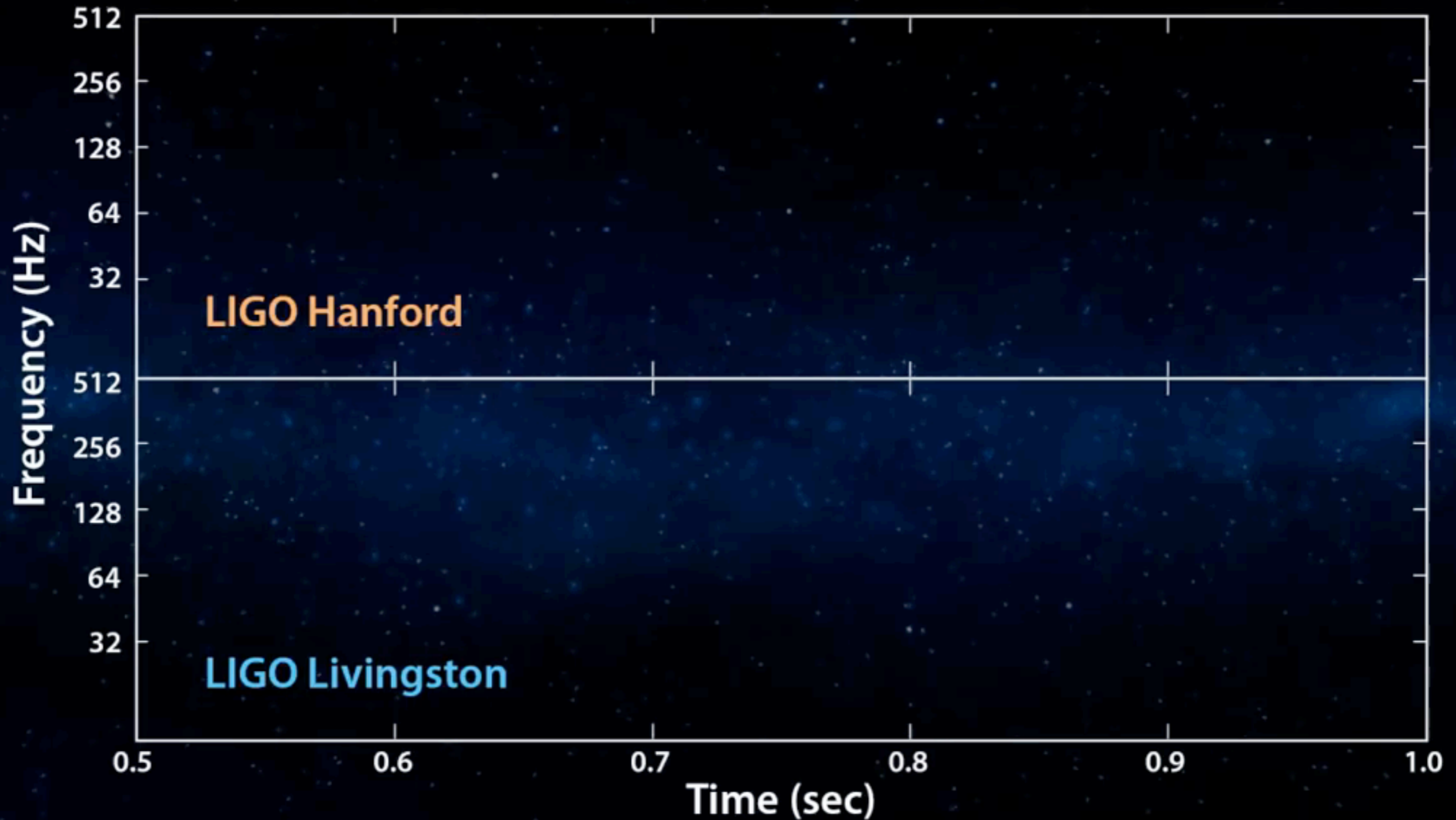
"Space is enormously stiff. You can't squish it."

Kip Thorne:

"Huge discoveries are really the result of giant collaborations"



Der Klang der Gravitationswellen



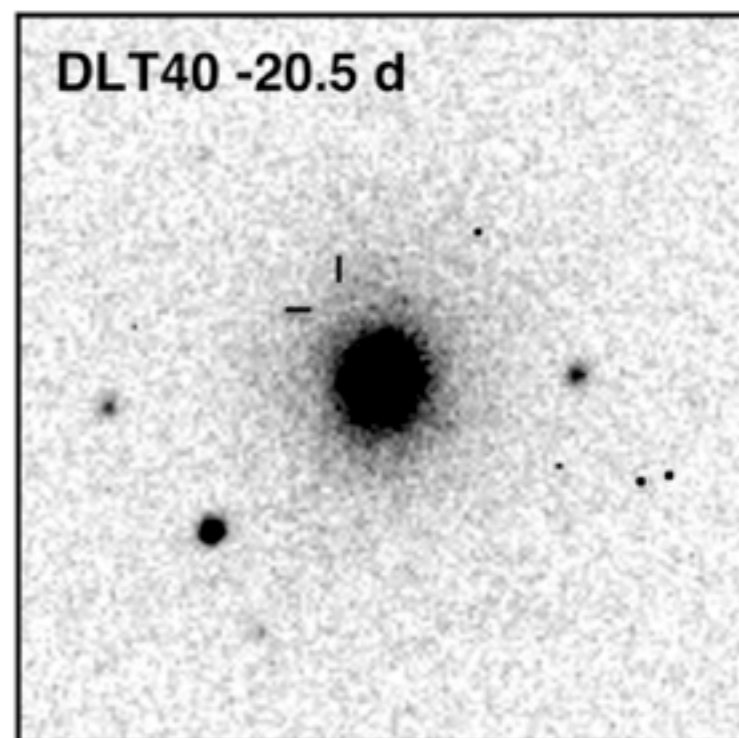
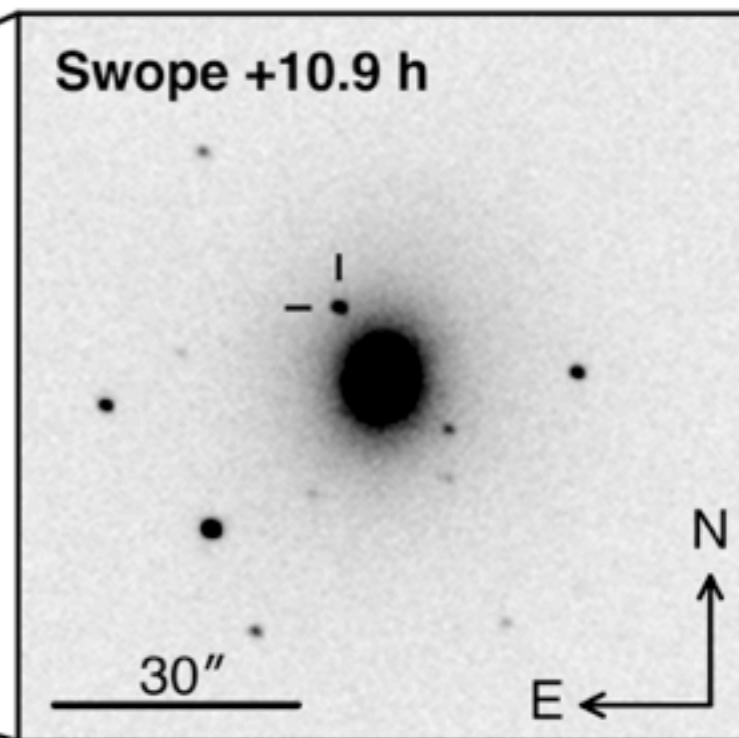
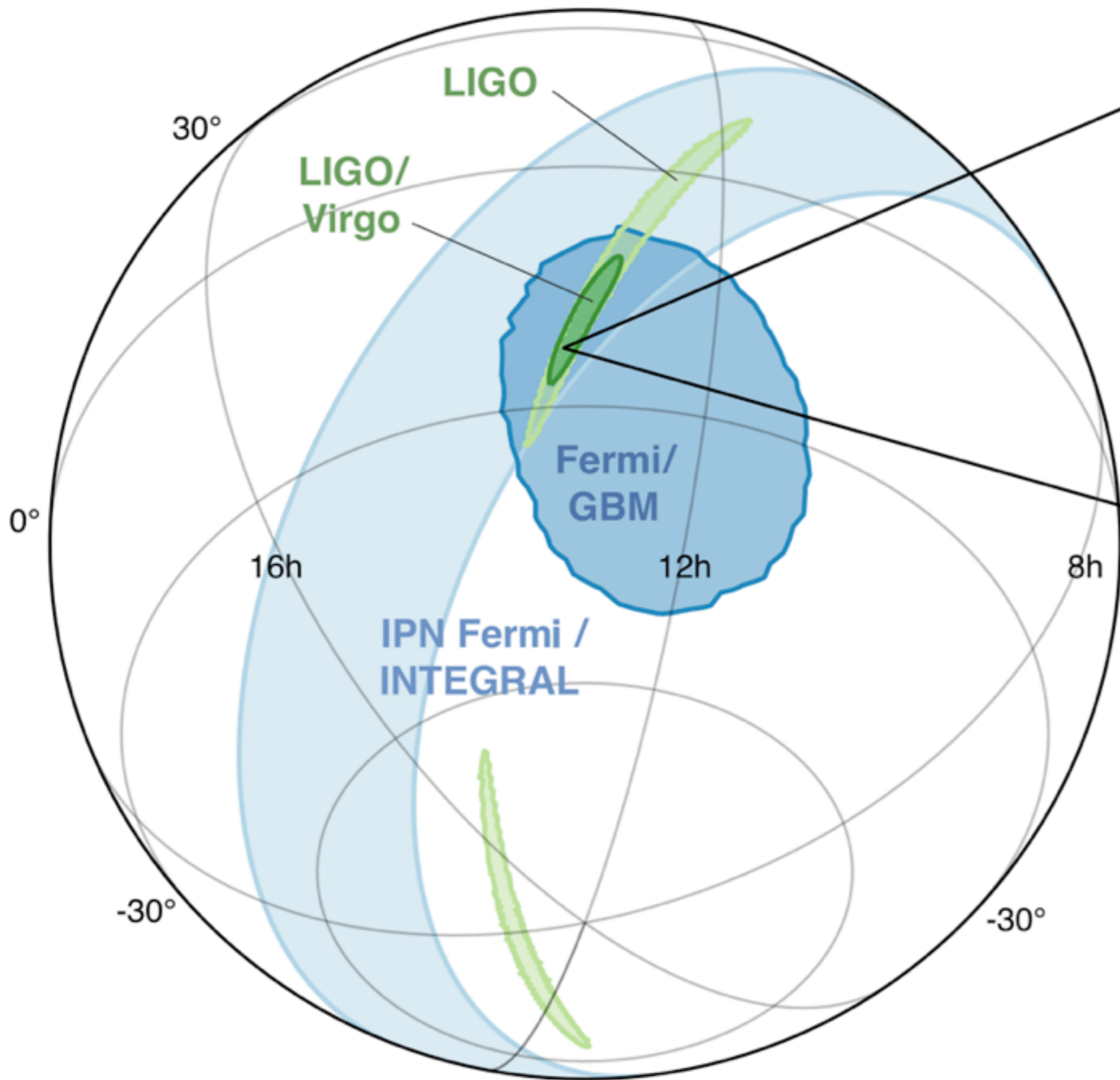
GW 170817



**Gravitationswellen
durch Verschmelzung
von Neutronen-
sternen:**

am 17. August 2017





GW 170817 + GRB 170817A

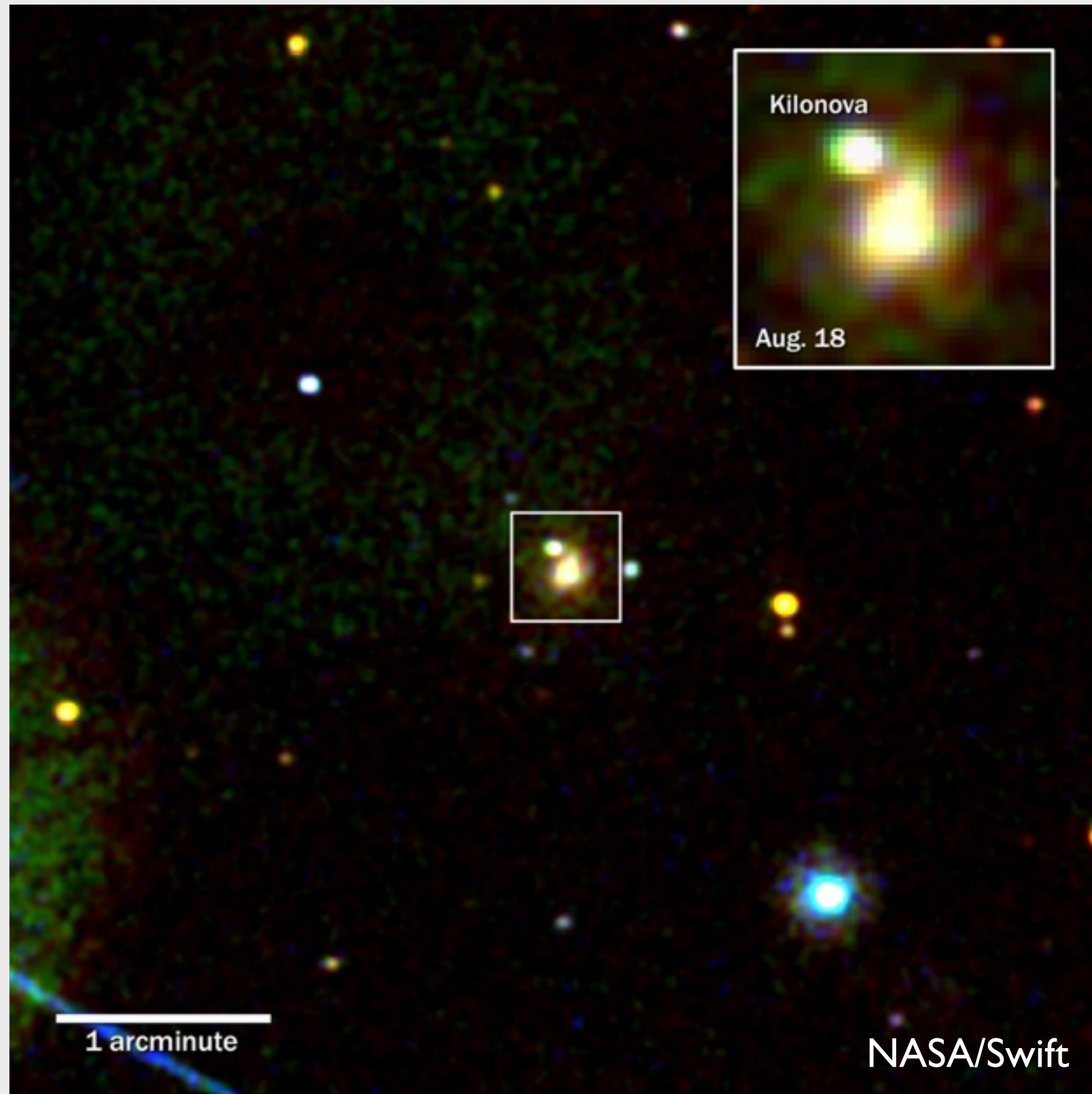
Gravitationswellen
durch Verschmelzung
von Neutronen-
sternen:

$$M_{\text{NS}} = 1.2 - 1.4 M_{\odot}$$

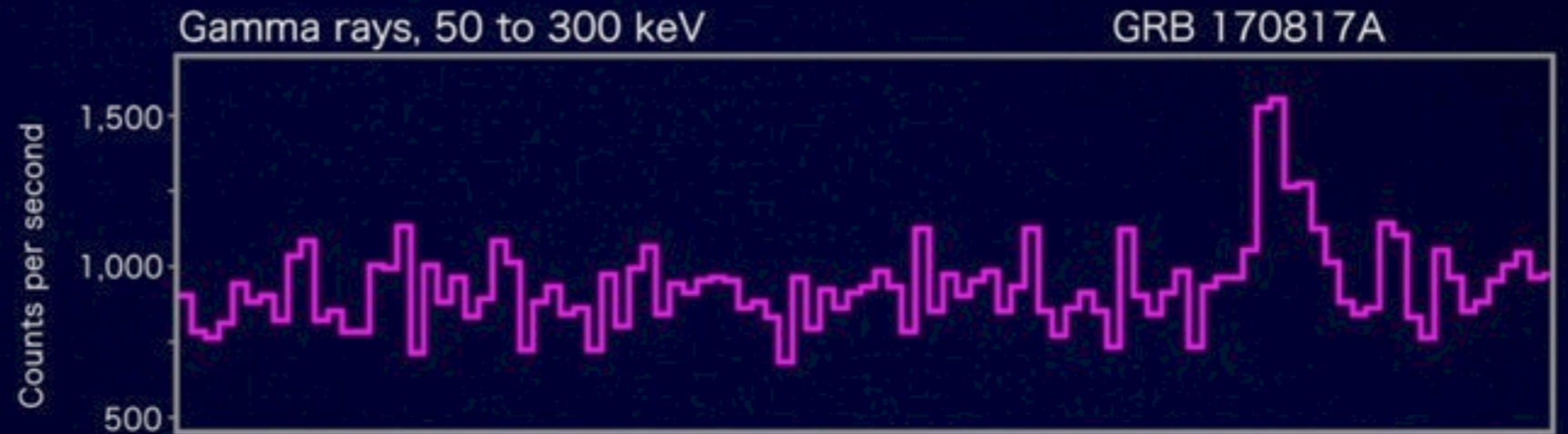
Gamma-Ray-Burst

Nachmessung:

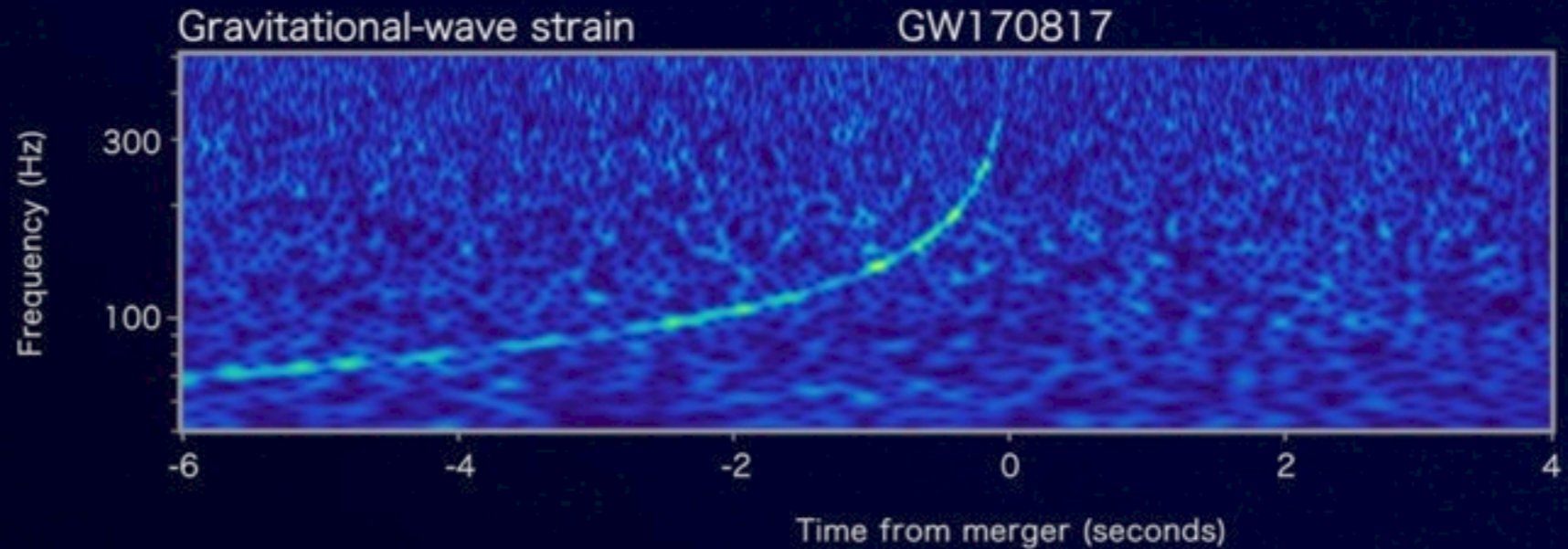
- 70 Teleskope weltweit
- Gamma - IR



GW 170817

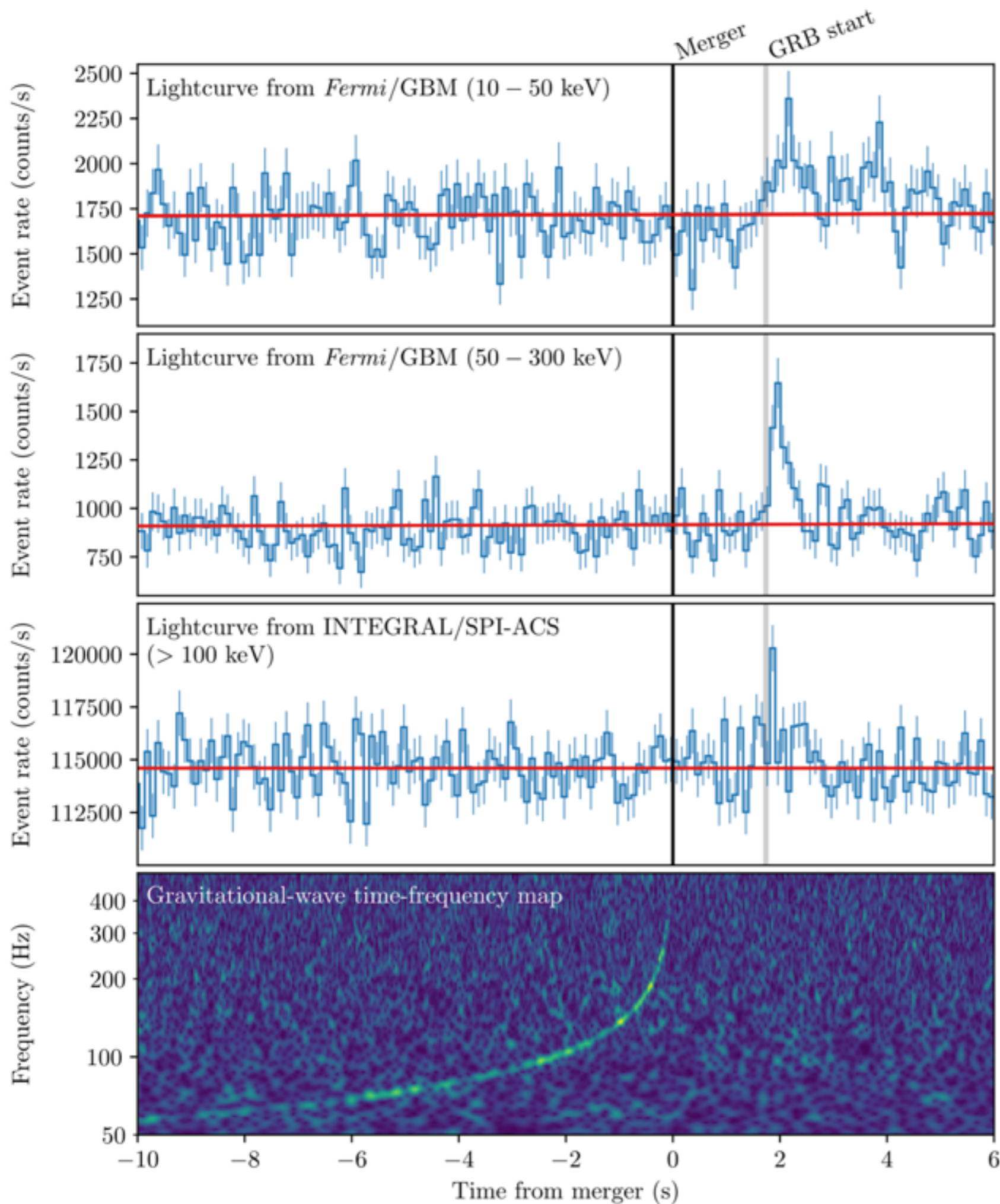


LIGO



NASA

short GRBs: Bestätigung durch NS-Verschmelzung



GW 170817 + GRB 170817A

aus Original-
veröffentlichung:

Astrophysical Journal
Letters, Vol 848 (2017)
LIGO-, FERMI-
und INTEGRAL-Team



Gravitationswellen:

ein neues Fenster für die Astronomie

Gravitationswellen:

Sinnesorgan



ein neues Fenster für die Astronomie

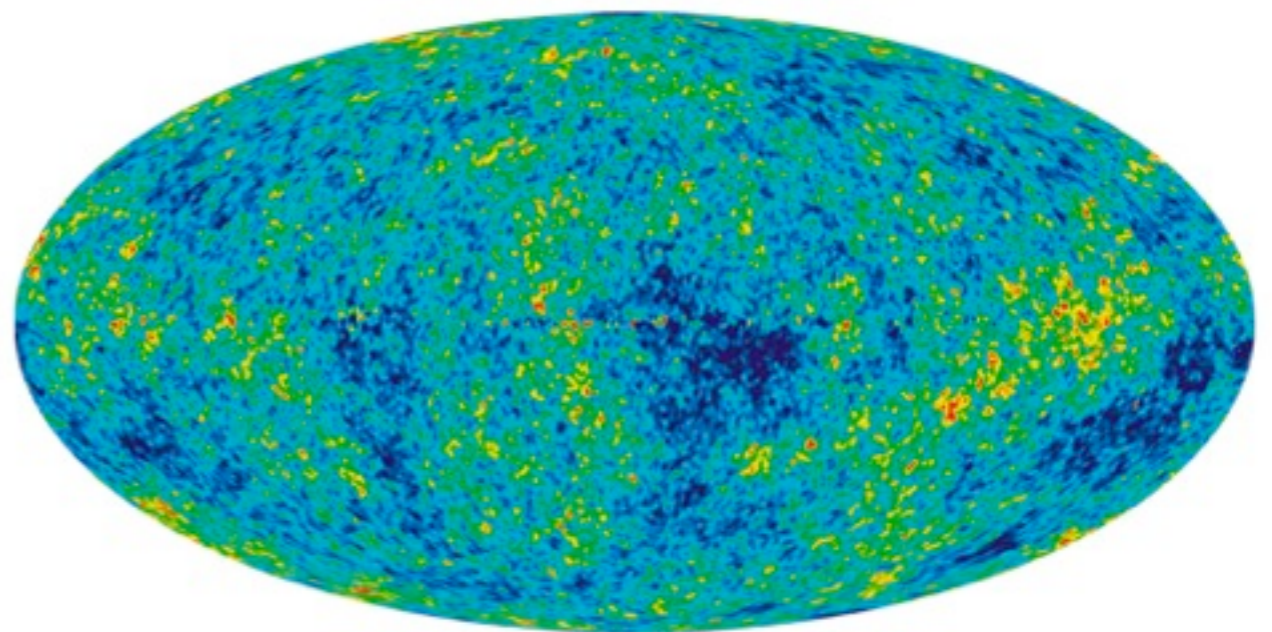
Gravitationswellen:

Sinnesorgan

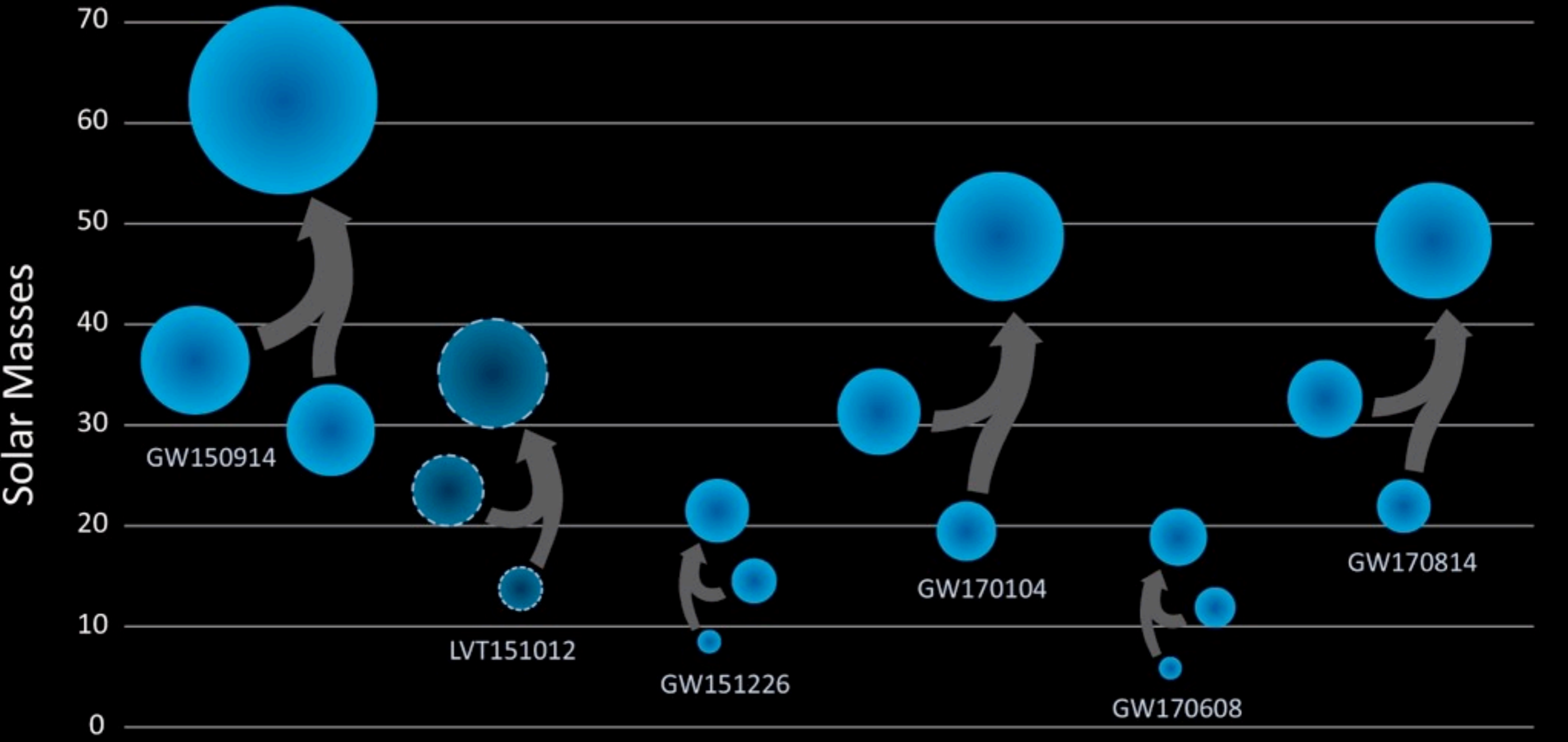


ein neues Fenster für die Astronomie

- Verschmelzung von Neutronen Sterne (GRB) und Schwarzen Löchern
- Supernova Explosion
- Erste Sterne
- Suche nach Dunkler Materie
- Vermessung des Urknalls

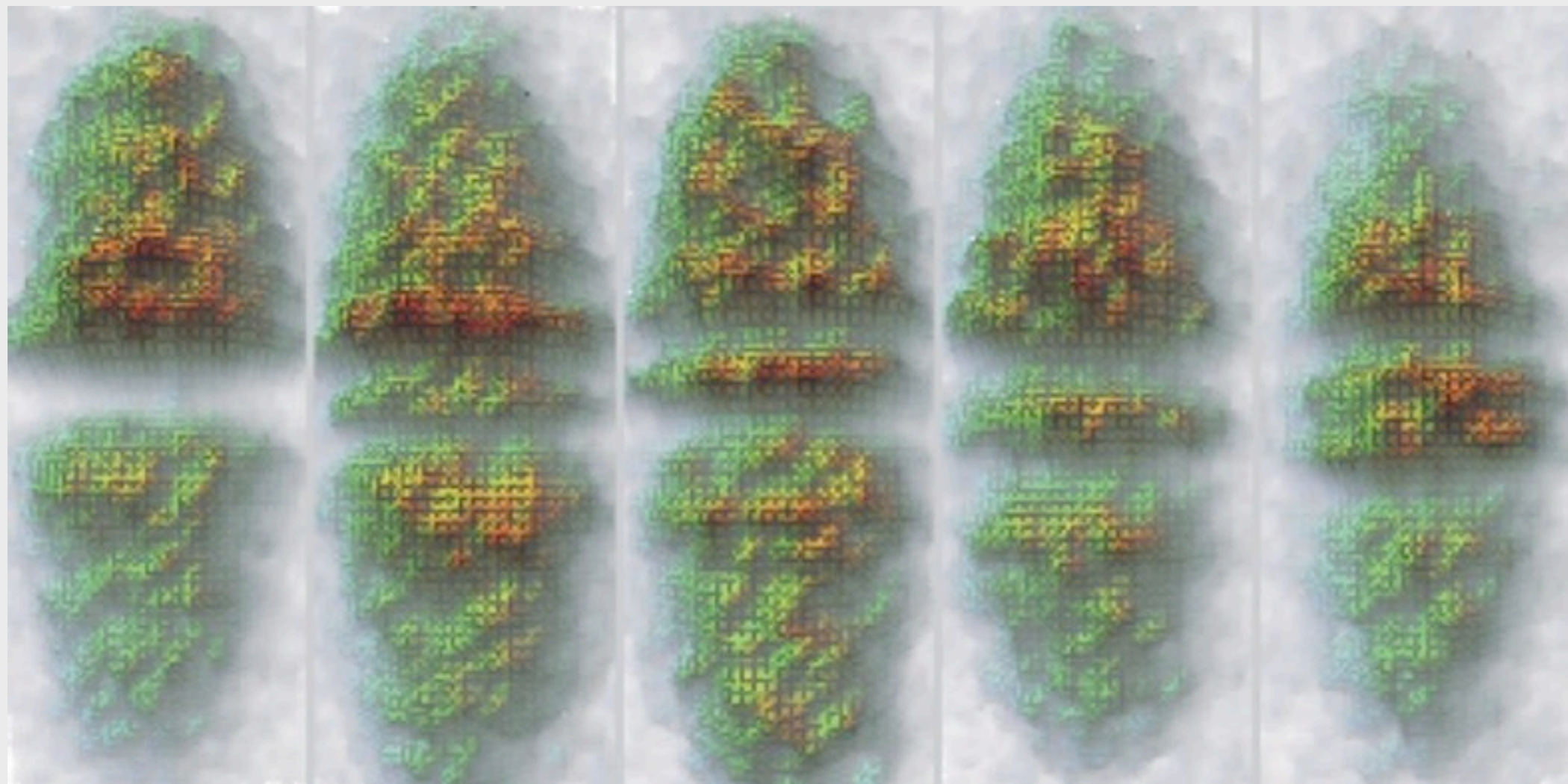


Suche nach Dunkler Materie



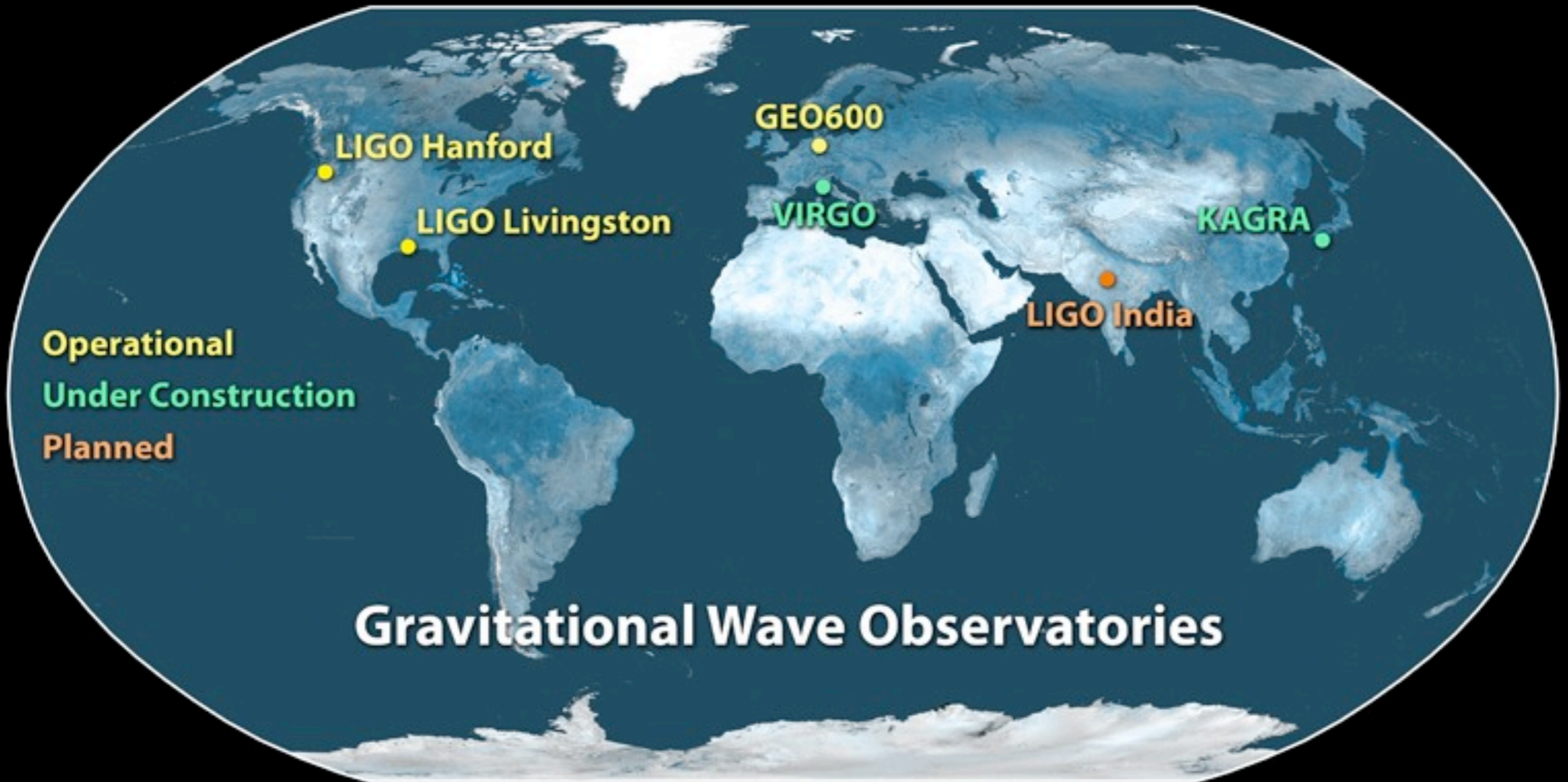
Suche nach Dunkler Materie

- Dunkle Materie in Form von exotischer Materie:
Verlangsamung von GW durch Bose-Einstein-Kondensat

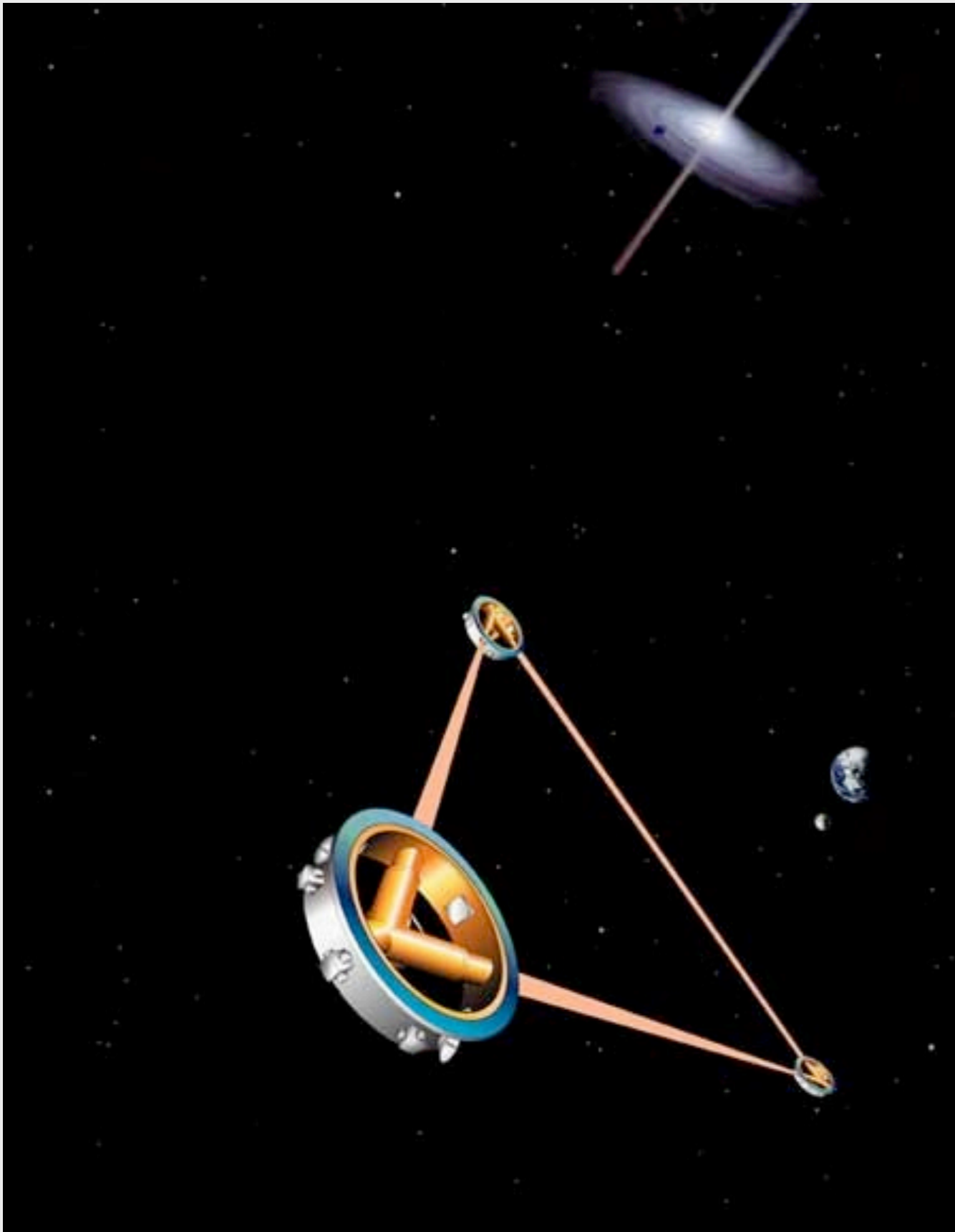


Schwingungsanregung in einem
Bose-Einstein-Kondensat
@Physik UHH

Zukunft



Zukunft



- **LISA/NGO:**
Laser **I**nterferometer
Space **A**ntenna/
New **G**ravitationalwave
Observatory

Armlänge: \sim 2.5 Mio km

geplanter Start: 2034

LISA Pathfinder

LISA-Pathfinder (LPF): Launch 3. Dezember 2015

