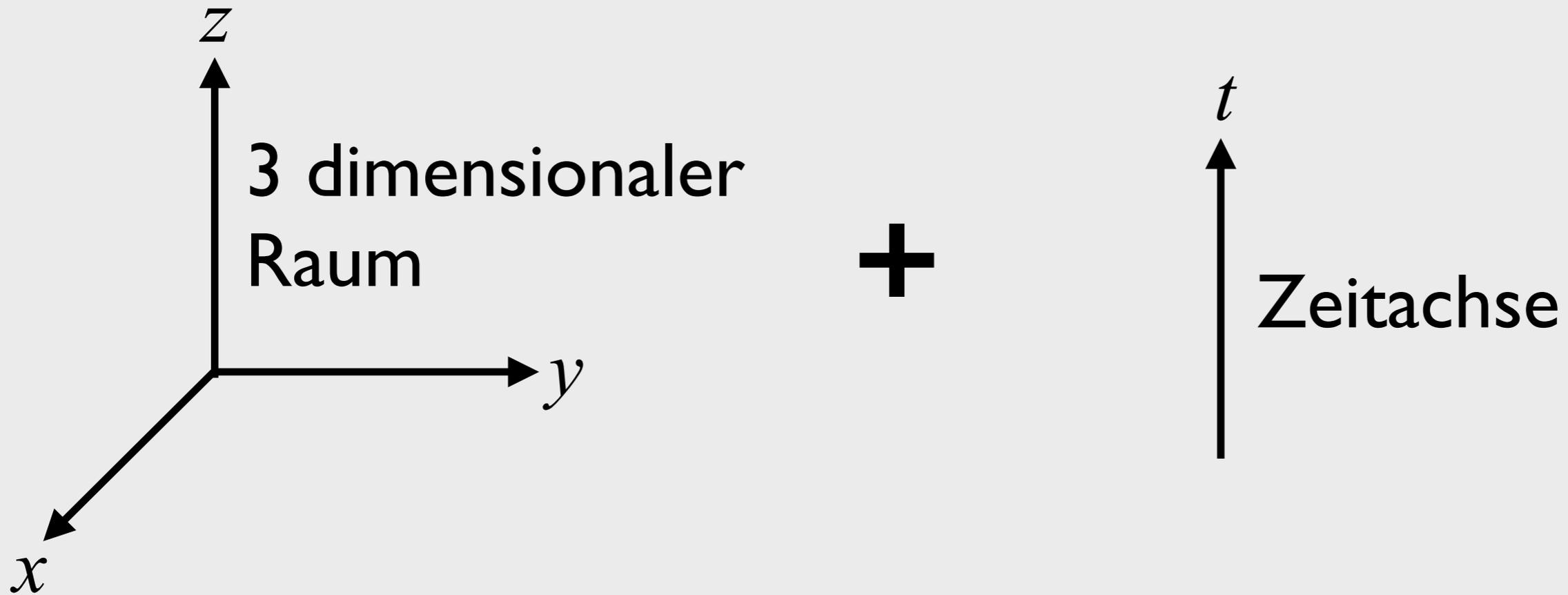


**Warum ist die
RAUMZEIT
gekrümmt?**

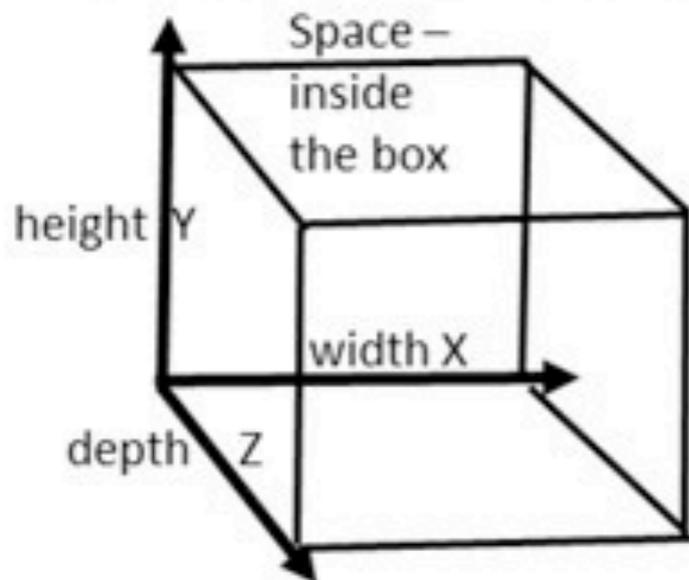
Was ist eigentlich Gravitation?

Was ist **RAUMZEIT**?

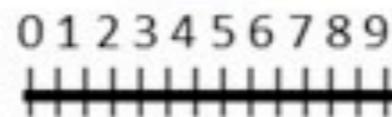


= 4 dimensionale **RAUMZEIT**

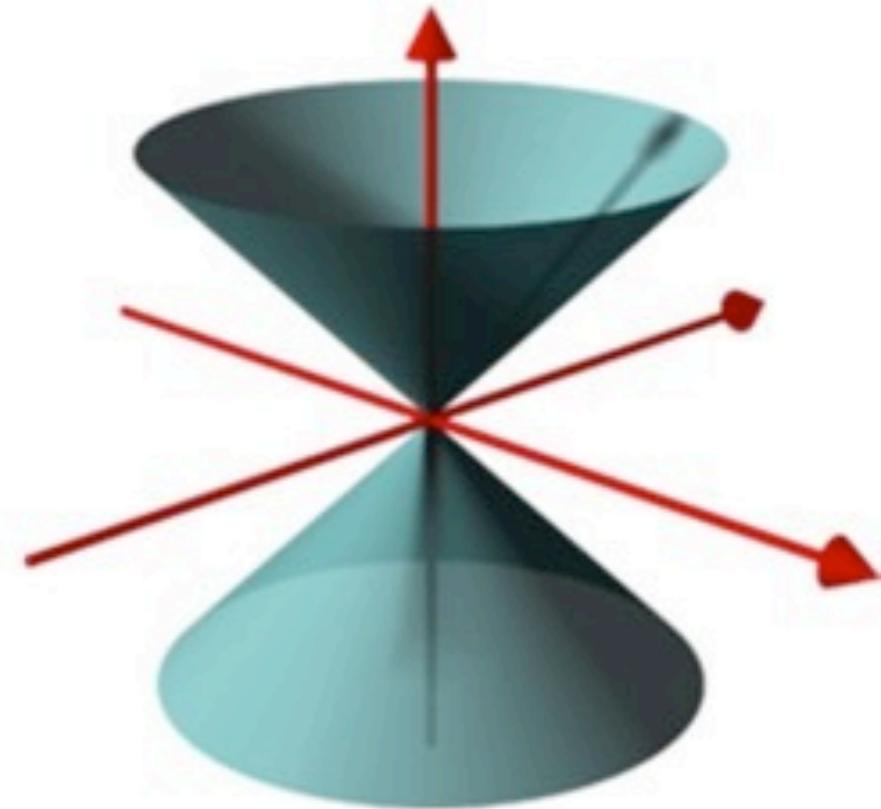
Was ist RAUMZEIT?



+



=

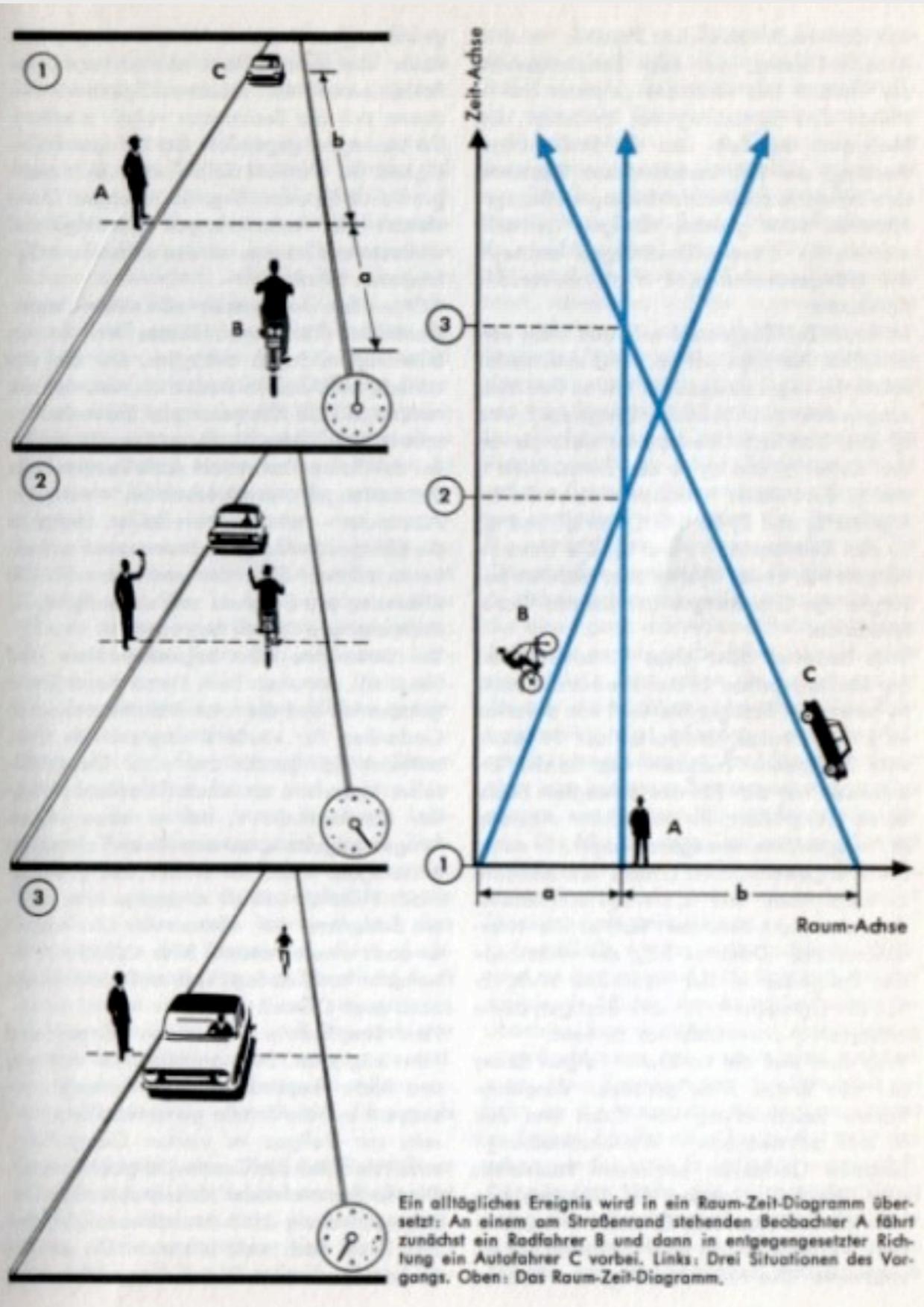


Zeitachse = $t \cdot c$

<http://www.ws5.com/spacetime>

= 4 dimensionale
RAUMZEIT

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

- Postulat:

die Lichtgeschwindigkeit* ist in allen Bezugssystemen identisch

- Konsequenz:

⇒ Zeit und Raum sind **nicht** unabhängig

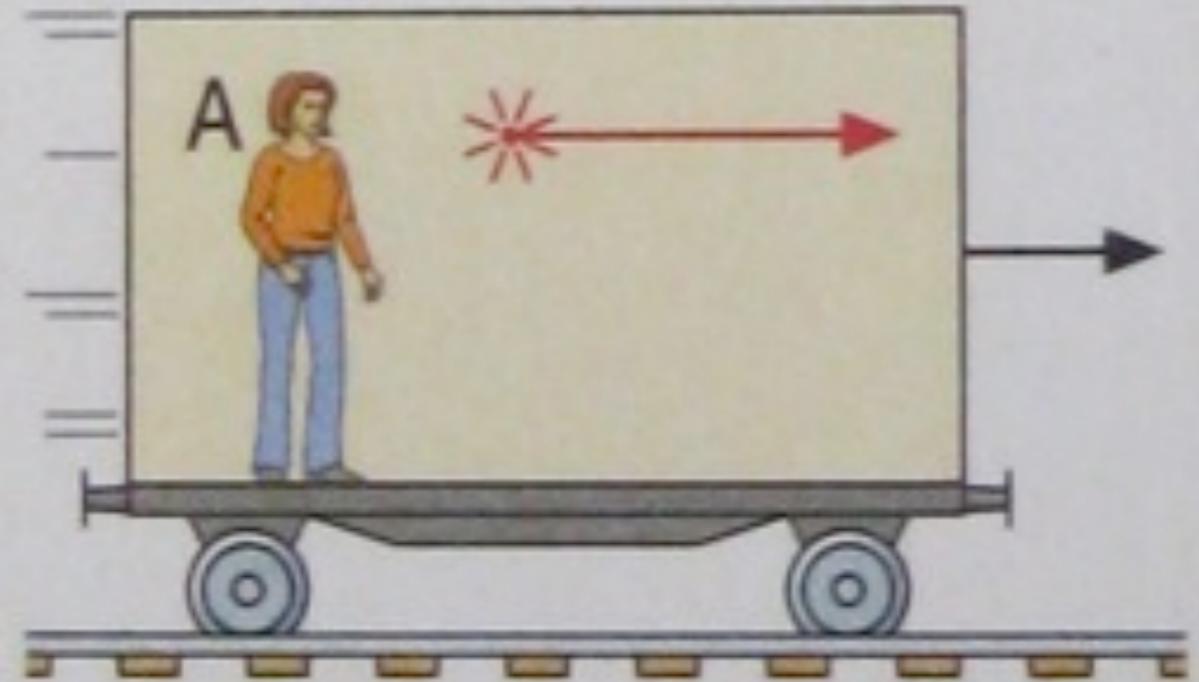
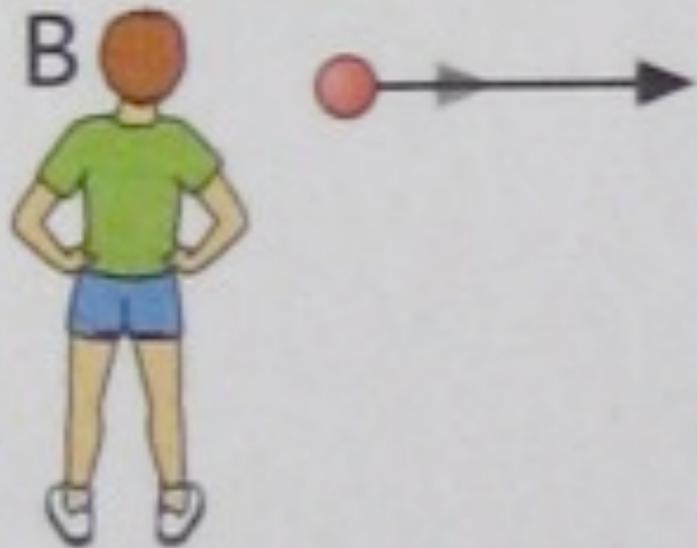
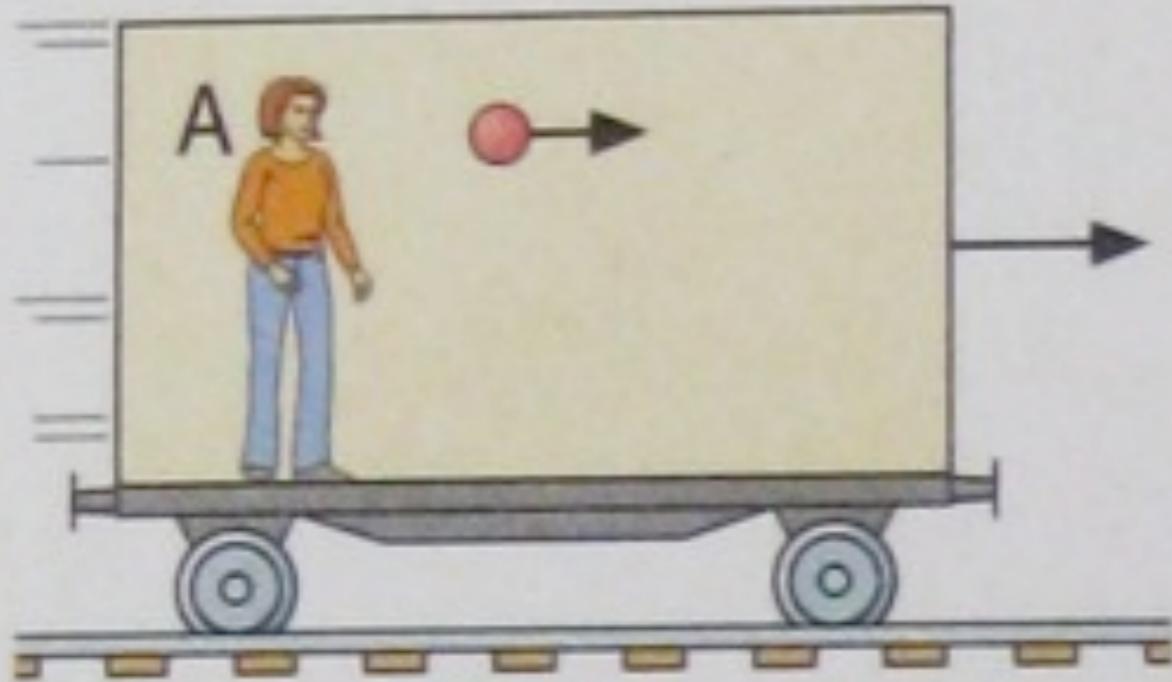
⇒ 4 dimensionale RAUMZEIT



Albert Einstein
Annalen der Physik (1905)

* im Vakuum

Spezielle Relativitätstheorie



unterschiedliche Bezugssysteme

Spezielle Relativitätstheorie



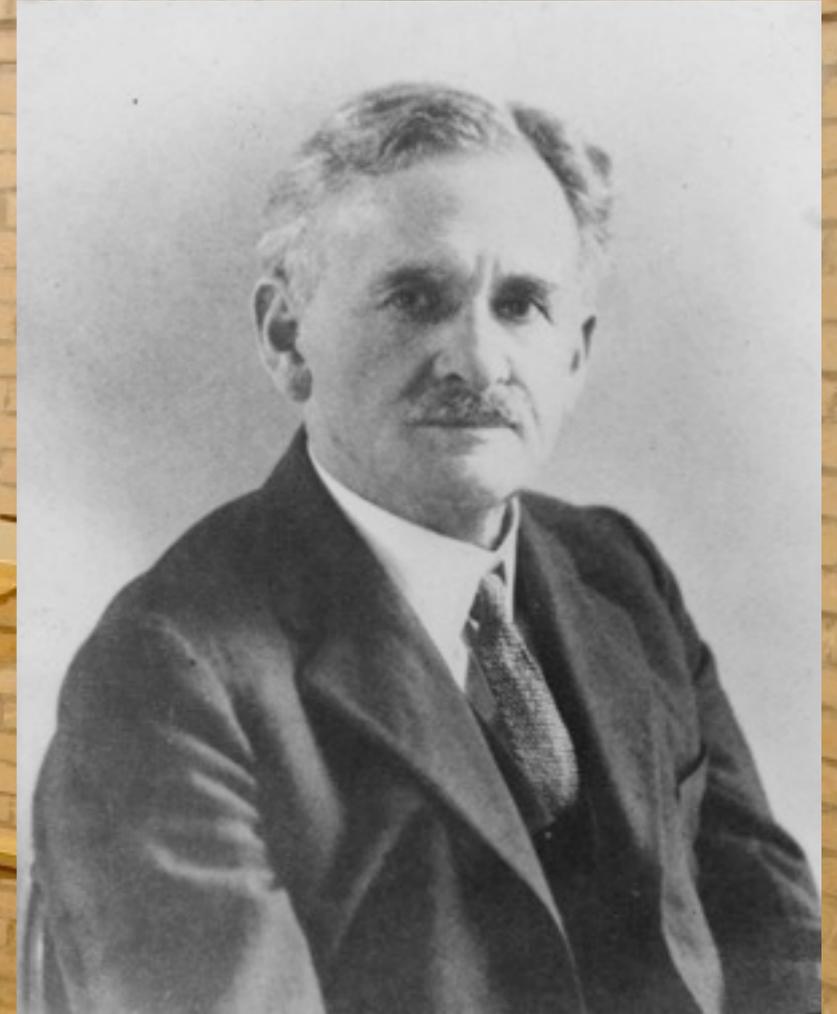
 aus Sicht des **mitbewegten** Beobachters



 aus Sicht des **externen** Beobachters

⇒ Konzept der *Gleichzeitigkeit* **abhängig** von Beobachter

Spezielle Relativitätstheorie

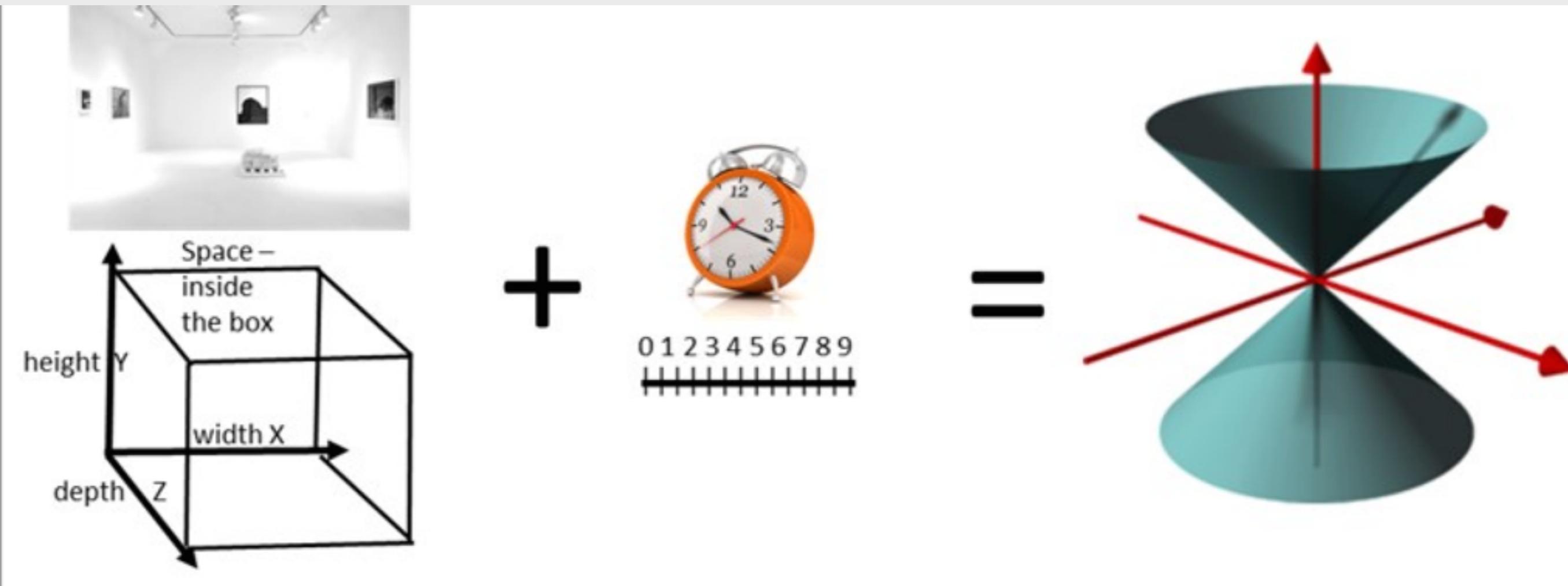


Albert Abraham Michelson
(1852-1931)

Aufbau Michelson Experiment 1881 in Potsdam © 2005 MAZ Potsdam

Spezielle Relativitätstheorie

- Konsequenzen:



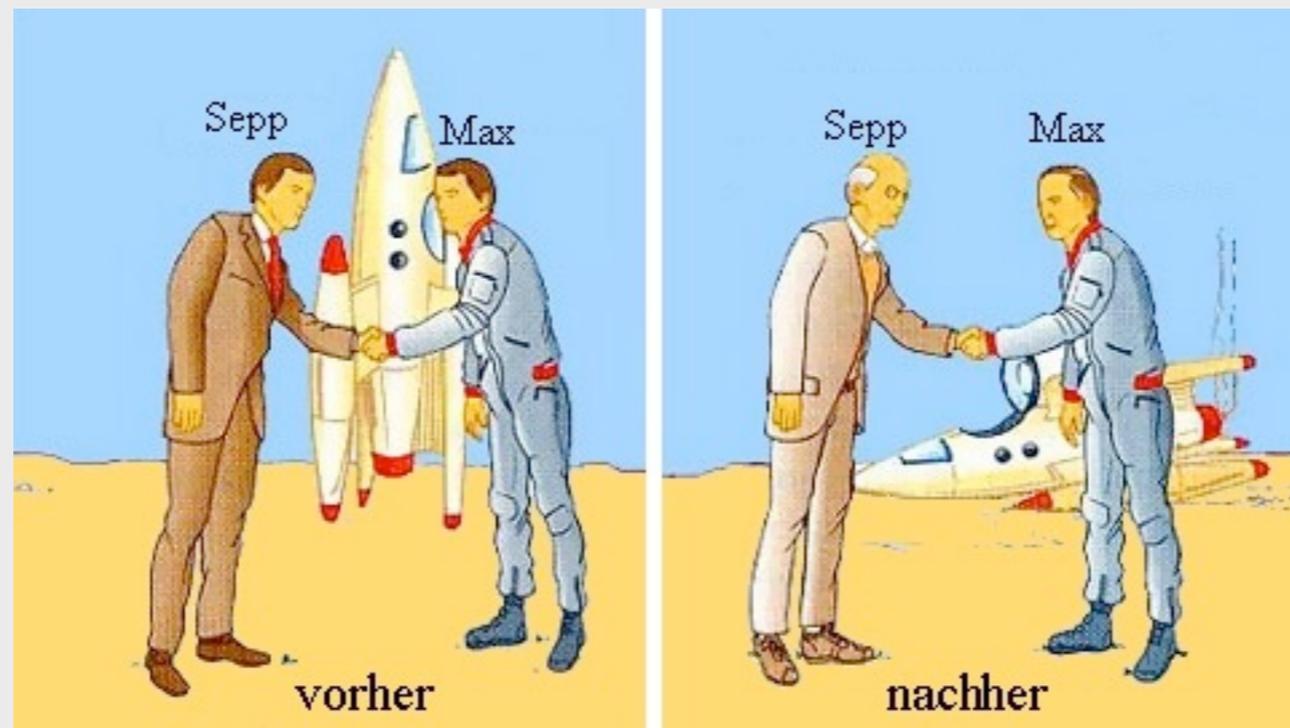
- Raum und Zeit sind **nicht unabhängig**

= 4 dimensionale
RAUMZEIT

Spezielle Relativitätstheorie

- Konsequenzen:

- bewegte Uhren gehen langsamer (z.B. GPS-Satelliten)



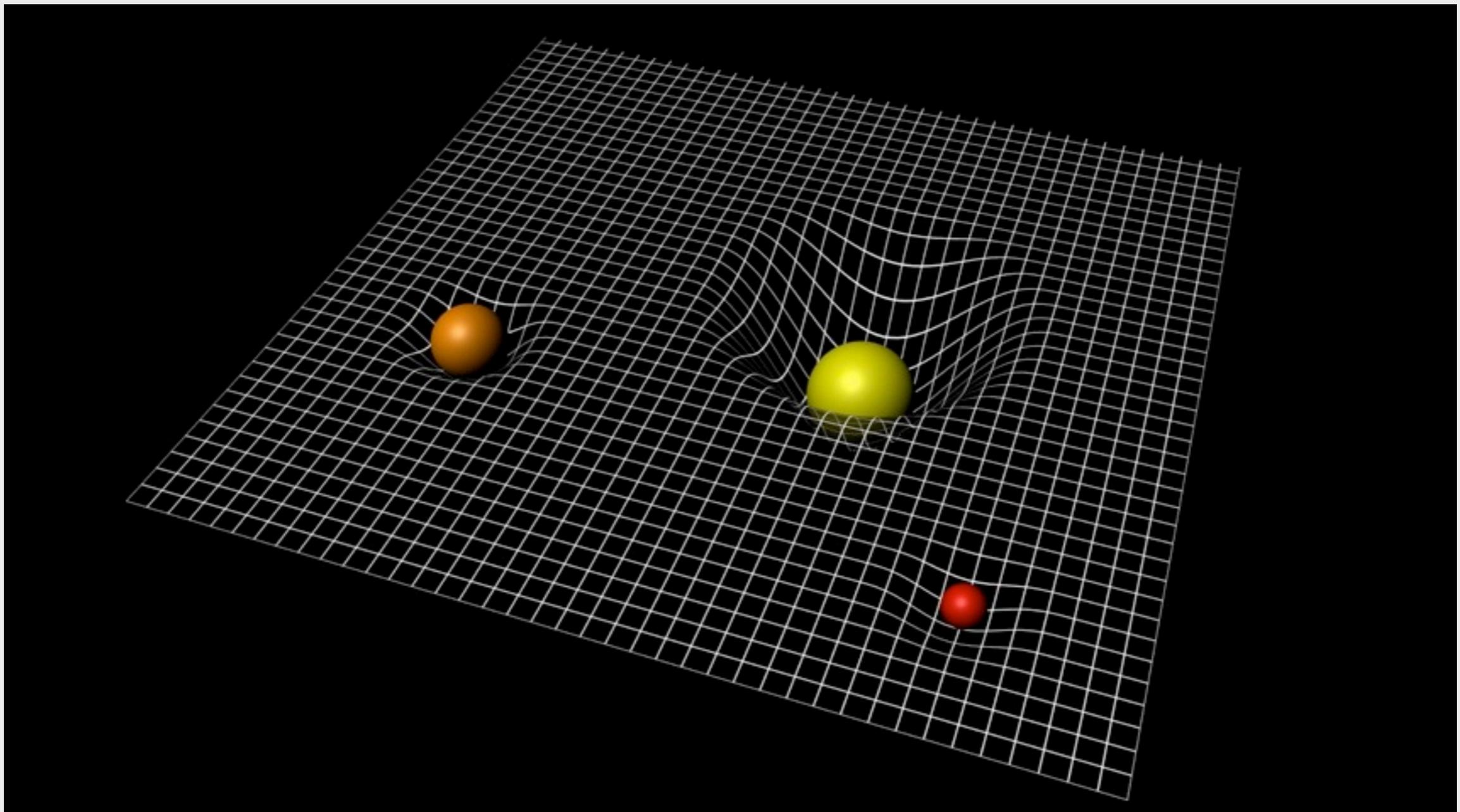
- **Längenkontraktion:** bewegte Objekte sind kürzer

- $E = m \cdot c^2$:

Masse = Energie, z.B. Kernspaltung, Kernfusion

Gekrümmte RAUMZEIT?

- Warum ist die RAUMZEIT gekrümmt?
- Was krümmt die RAUMZEIT?



Allgemeine Relativitätstheorie

778

Gesamtsitzung vom 4. November 1915

Zur allgemeinen Relativitätstheorie.

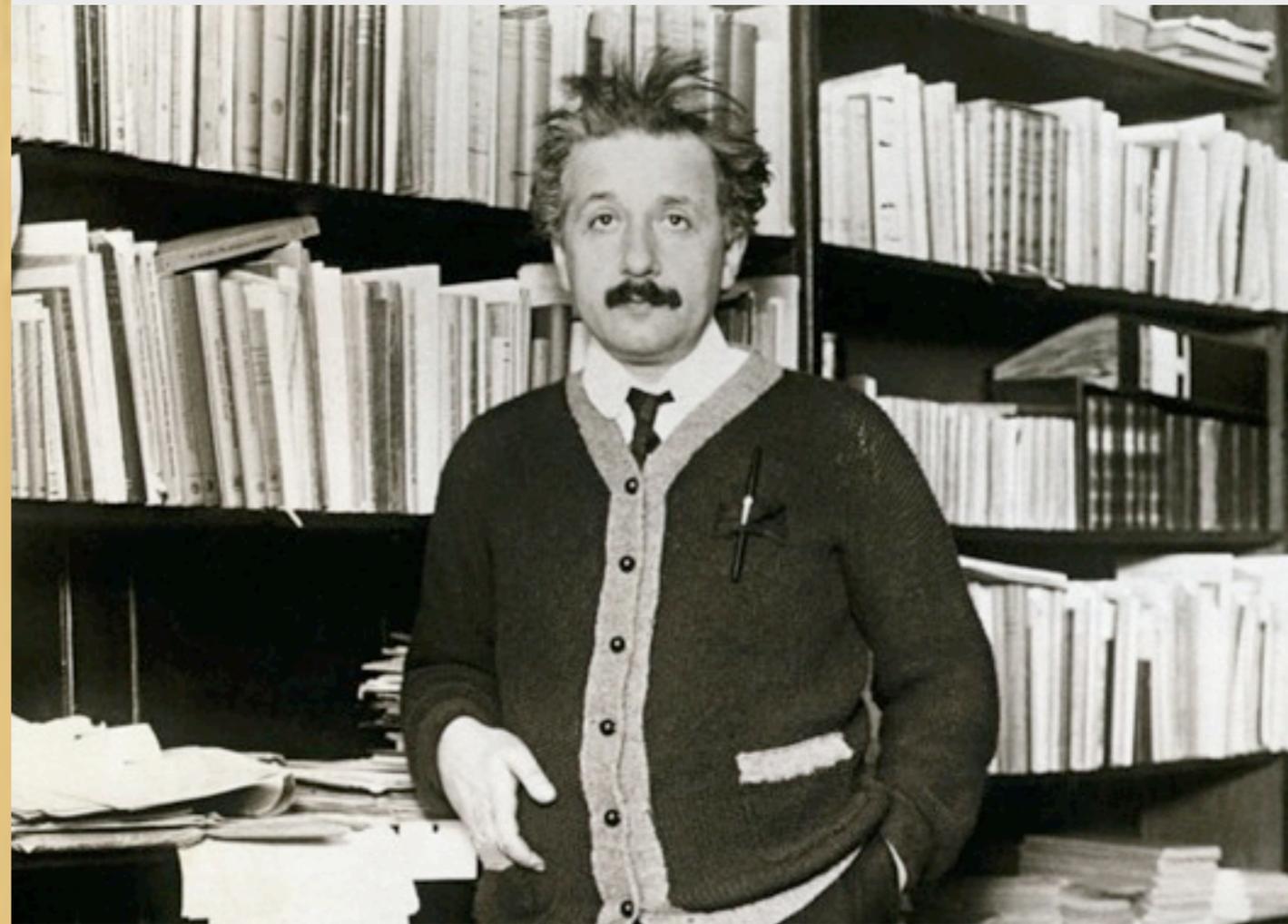
VON A. EINSTEIN.

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

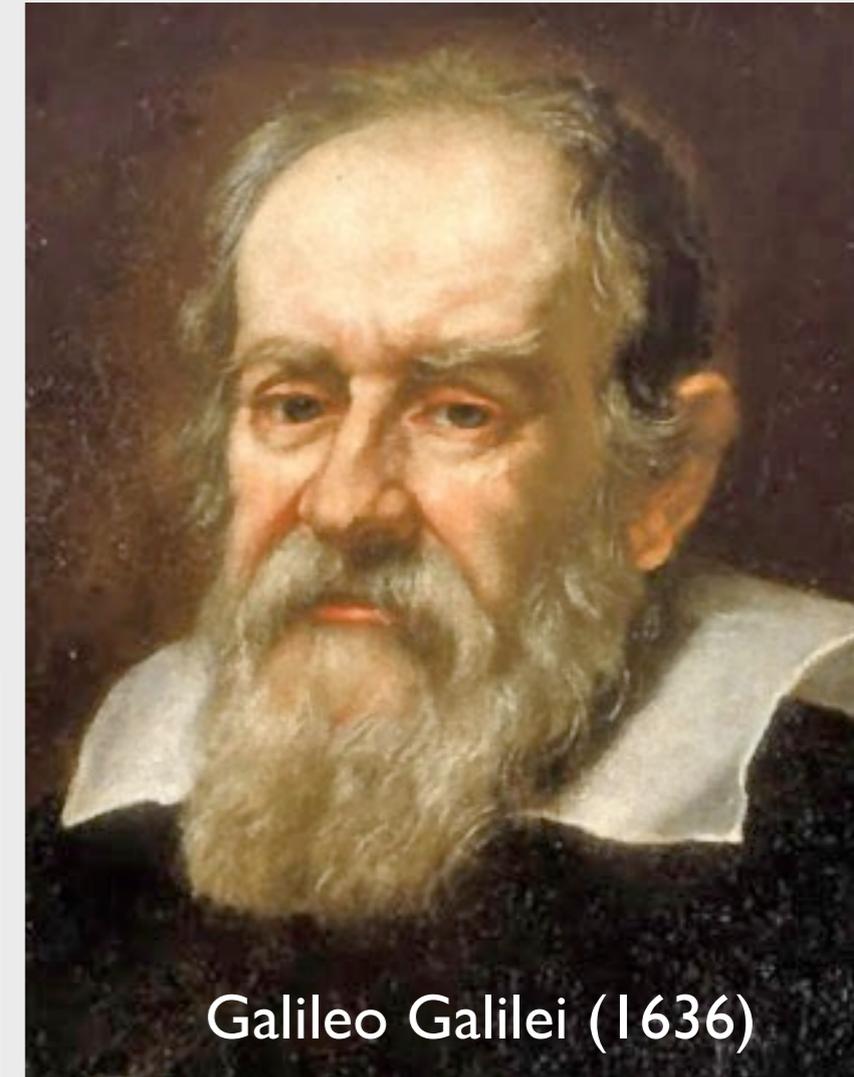
Einstein's Originalartikel

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

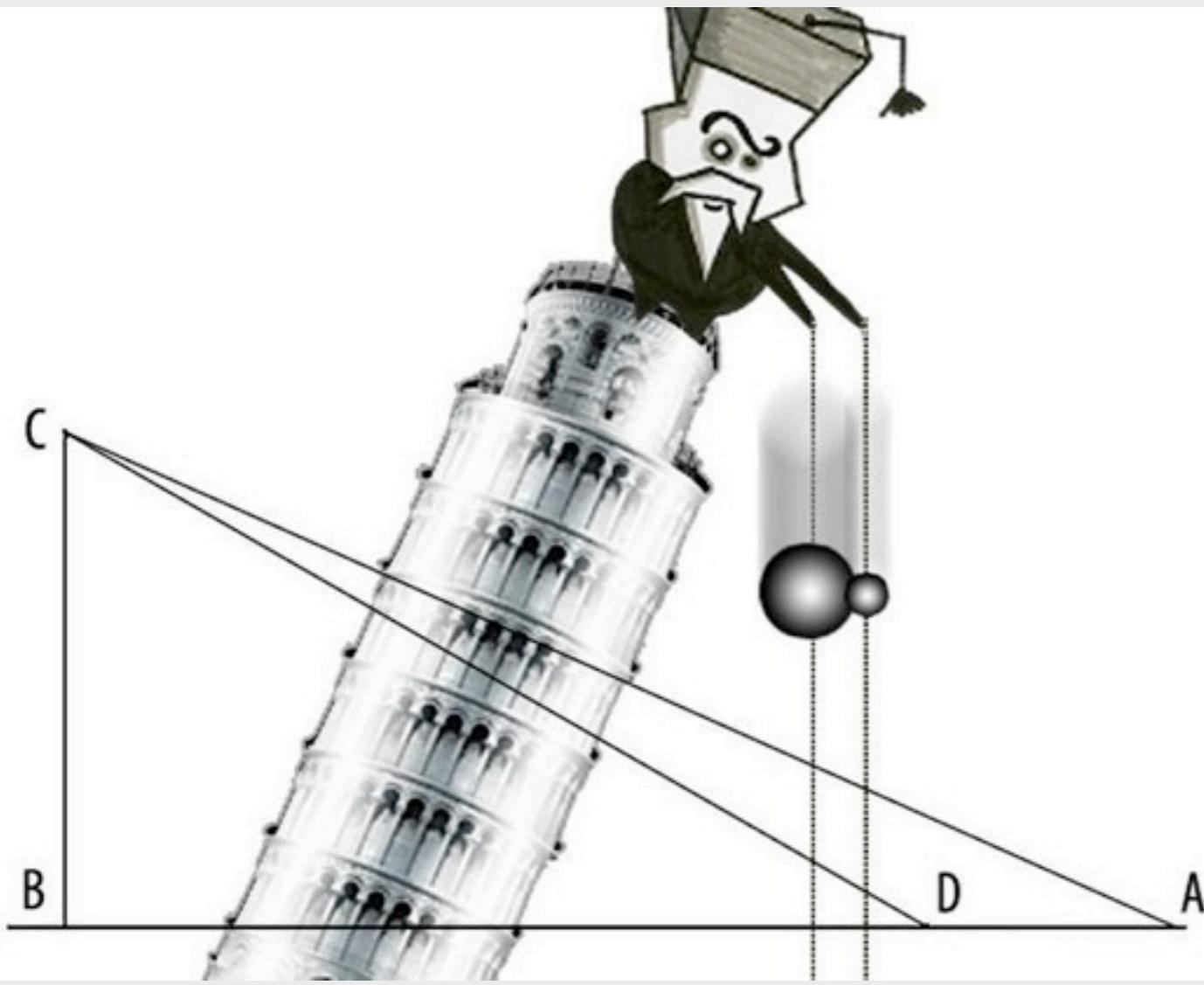
Allgemeine Relativitätstheorie

Galileo Galilei (1564 – 1642):

- **alle** Gegenstände fallen **gleich** schnell
- **gleiche** Beschleunigung für **alle** Objekte
- gravitative Masse = träge Masse



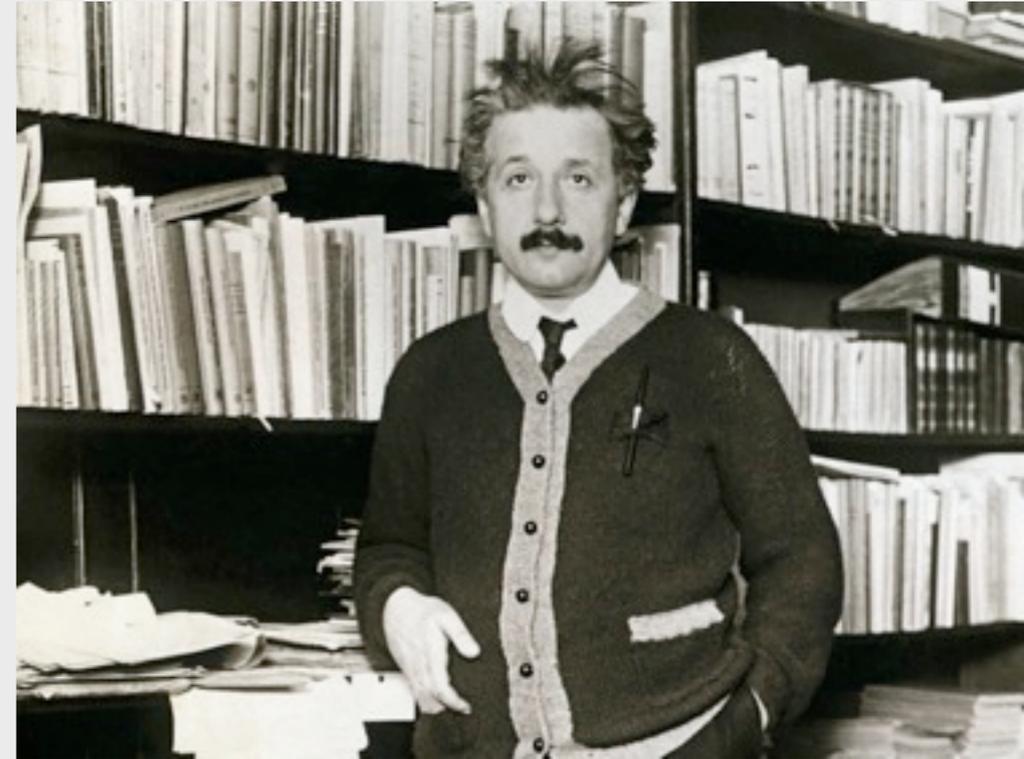
Galileo Galilei (1636)



Allgemeine Relativitätstheorie

⇒ Postulat des **Äquivalenzprinzips**:

⇒ **Einstein**: "glücklichster Gedanke
in meinem Leben":



ein frei-fallender Beobachter befindet sich in Ruhe
relativ zu allen (auch frei-fallenden) Objekten in seiner
Nähe

„Es war 1907, als mir der glücklichste Gedanke meines Lebens kam ... Das Gravitationsfeld hat nur eine relative Existenz, weil für einen Beobachter, der frei vom Dach eines Hauses fällt – zumindest in seiner Umgebung – kein Gravitationsfeld existiert. Tatsächlich bleiben alle von diesem Beobachter fallen gelassenen Gegenstände im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen Bewegung, unabhängig von ihrer chemischen oder physikalischen Natur.“

Allgemeine Relativitätstheorie

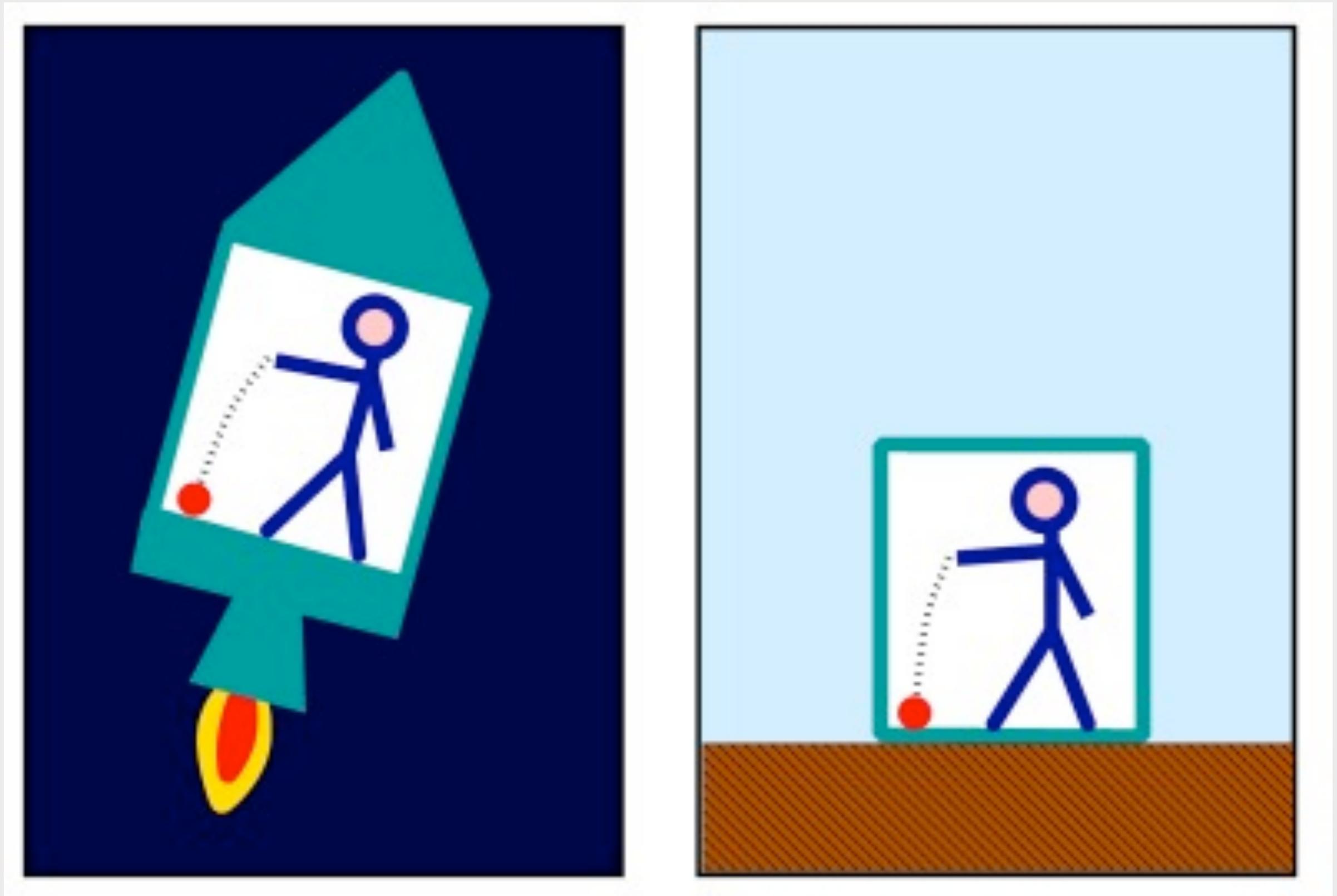
⇒ Postulat des **Äquivalenzprinzips**:



ein frei-fallender
Beobachter befindet sich
in Ruhe relativ zu allen
(auch frei-fallenden)
Objekten in seiner Nähe

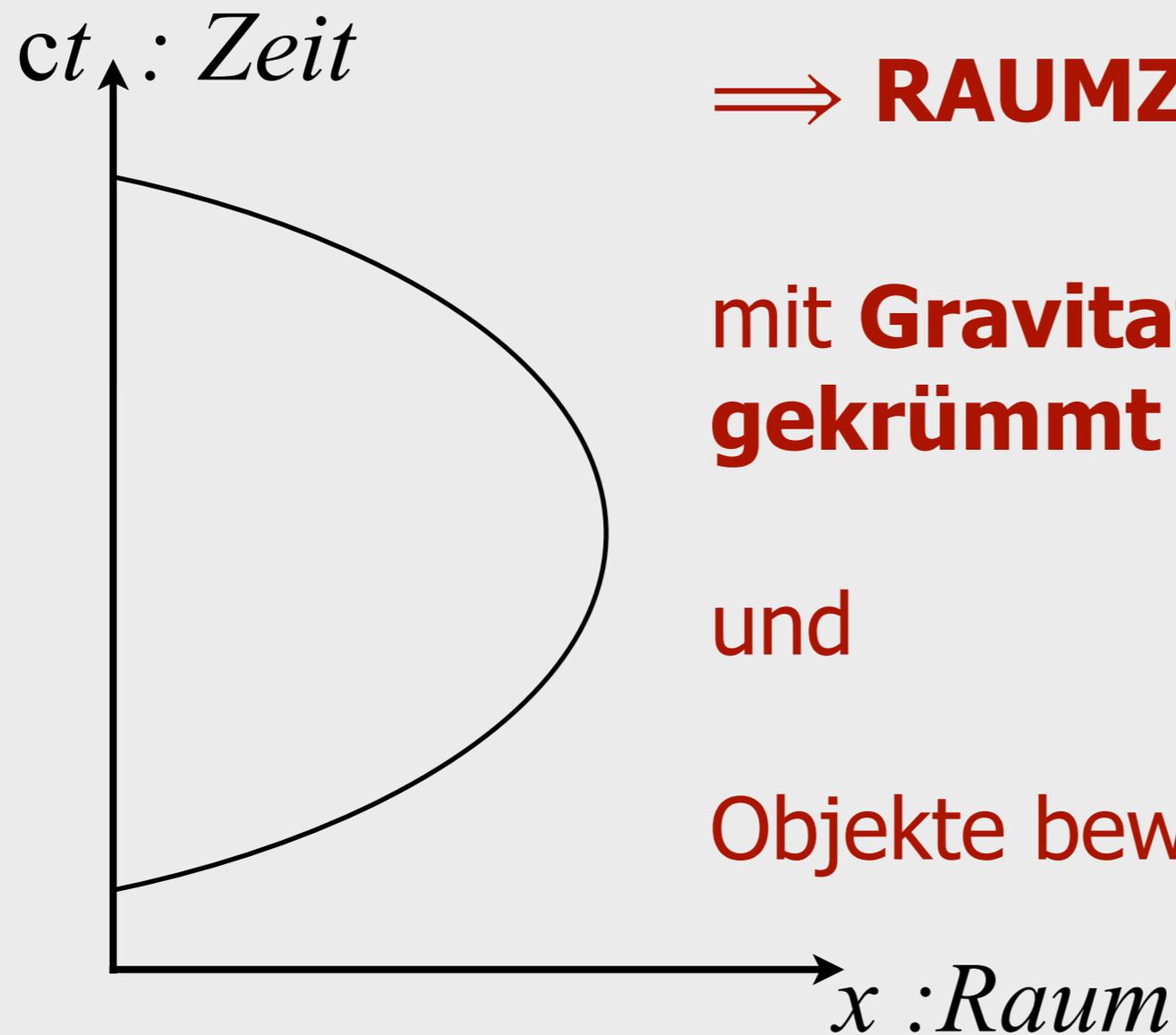
Allgemeine Relativitätstheorie

Äquivalenzprinzip:



Allgemeine Relativitätstheorie

⇒ im RAUMZEIT-Diagramm bewegen sich **alle** Objekte*
durch Gravitation auf der **gleichen** Bahn



⇒ **RAUMZEIT**

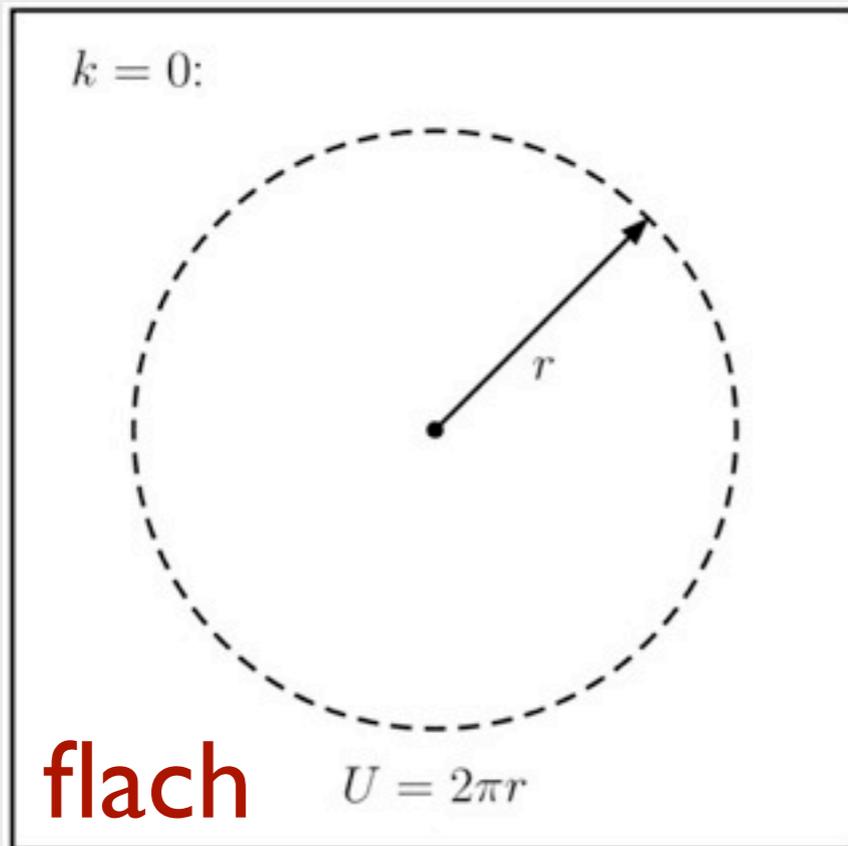
mit **Gravitation muss**
gekrümmt sein

und

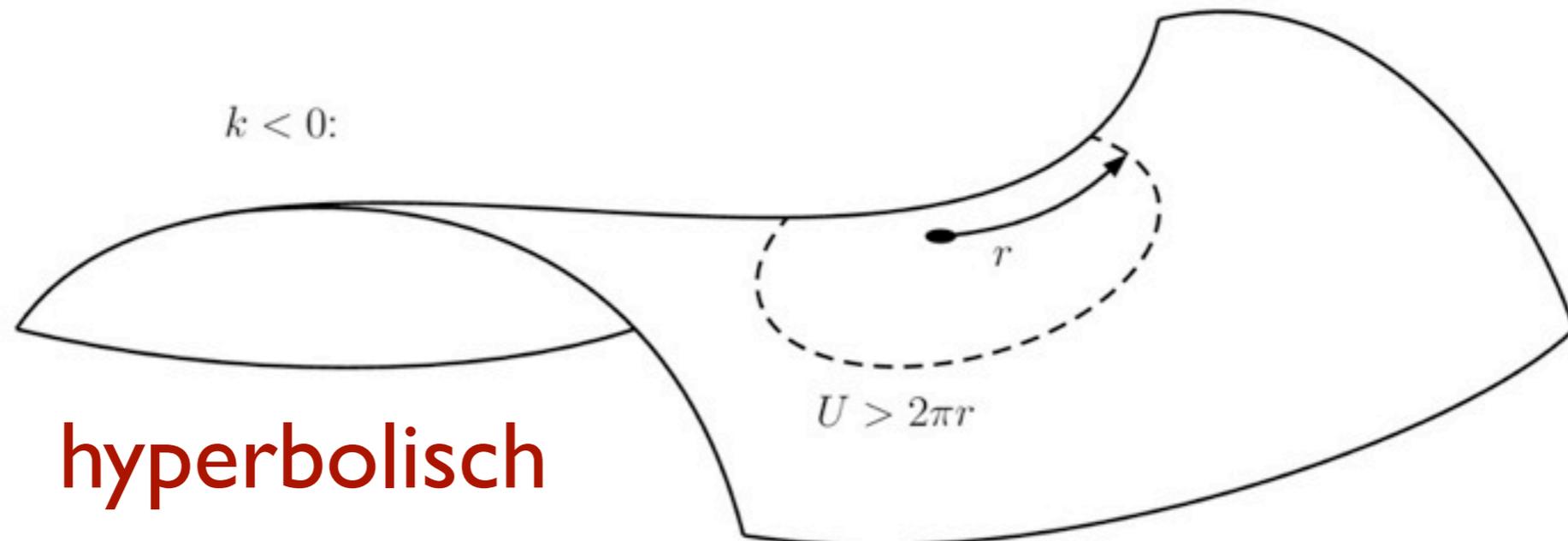
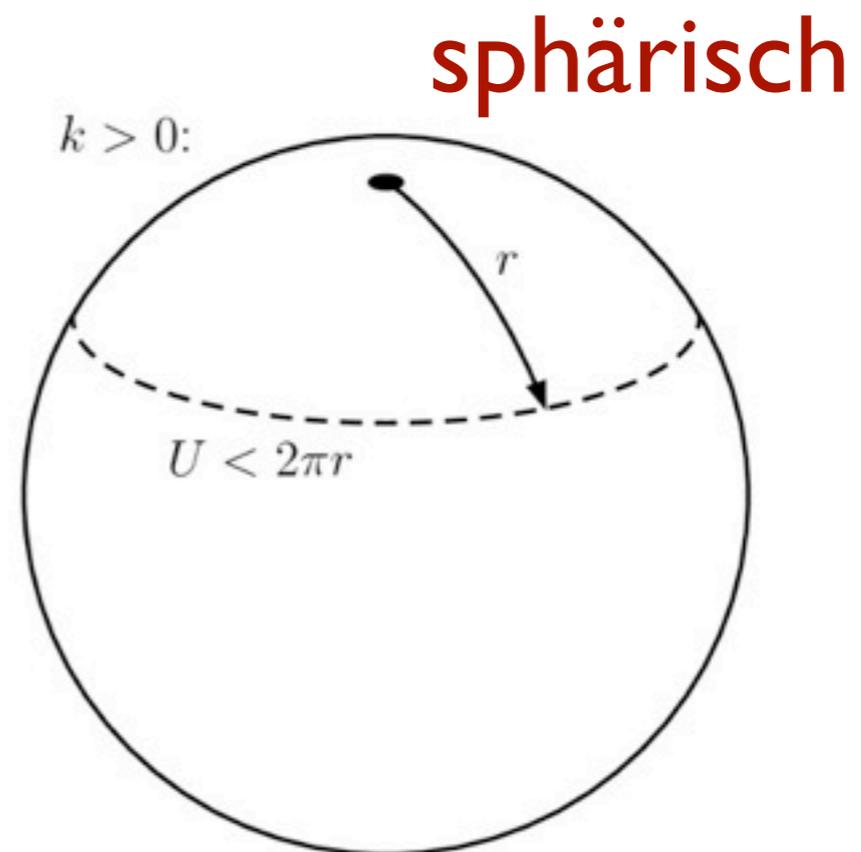
Objekte bewegen sich auf "**Geraden**"

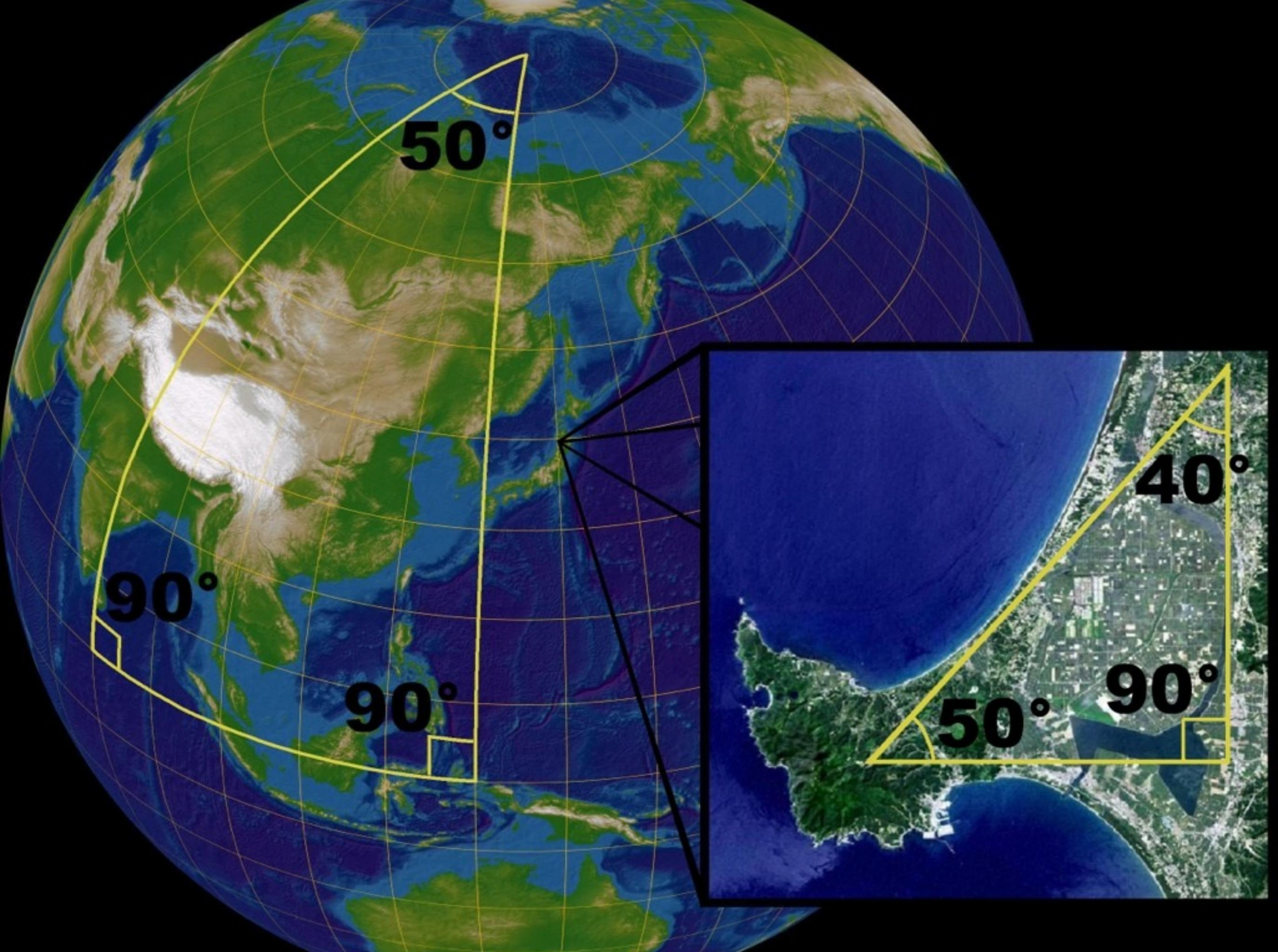
*mit gleicher Anfangsgeschwindigkeit

Gekrümmter Raum

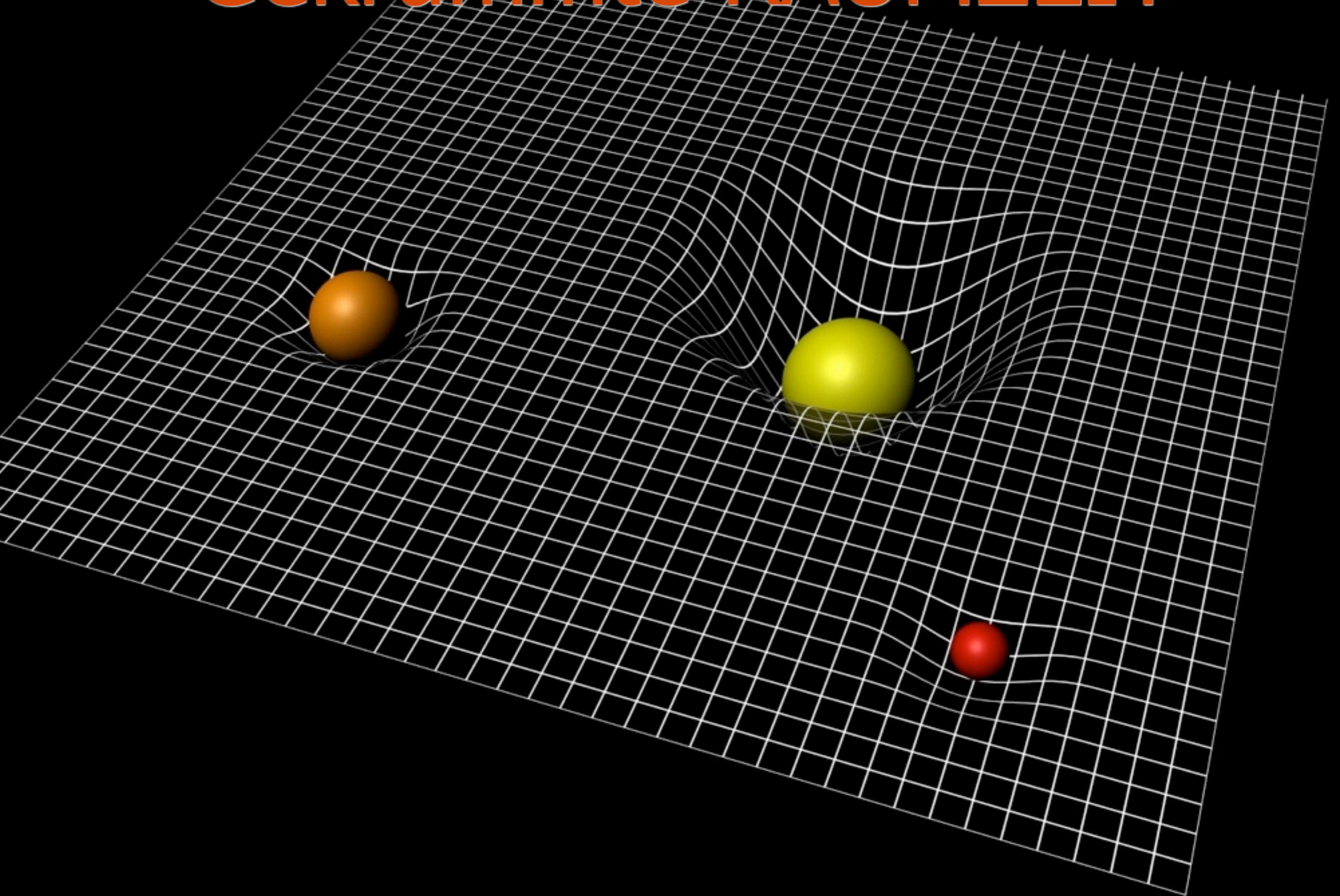


= euklidischer Raum

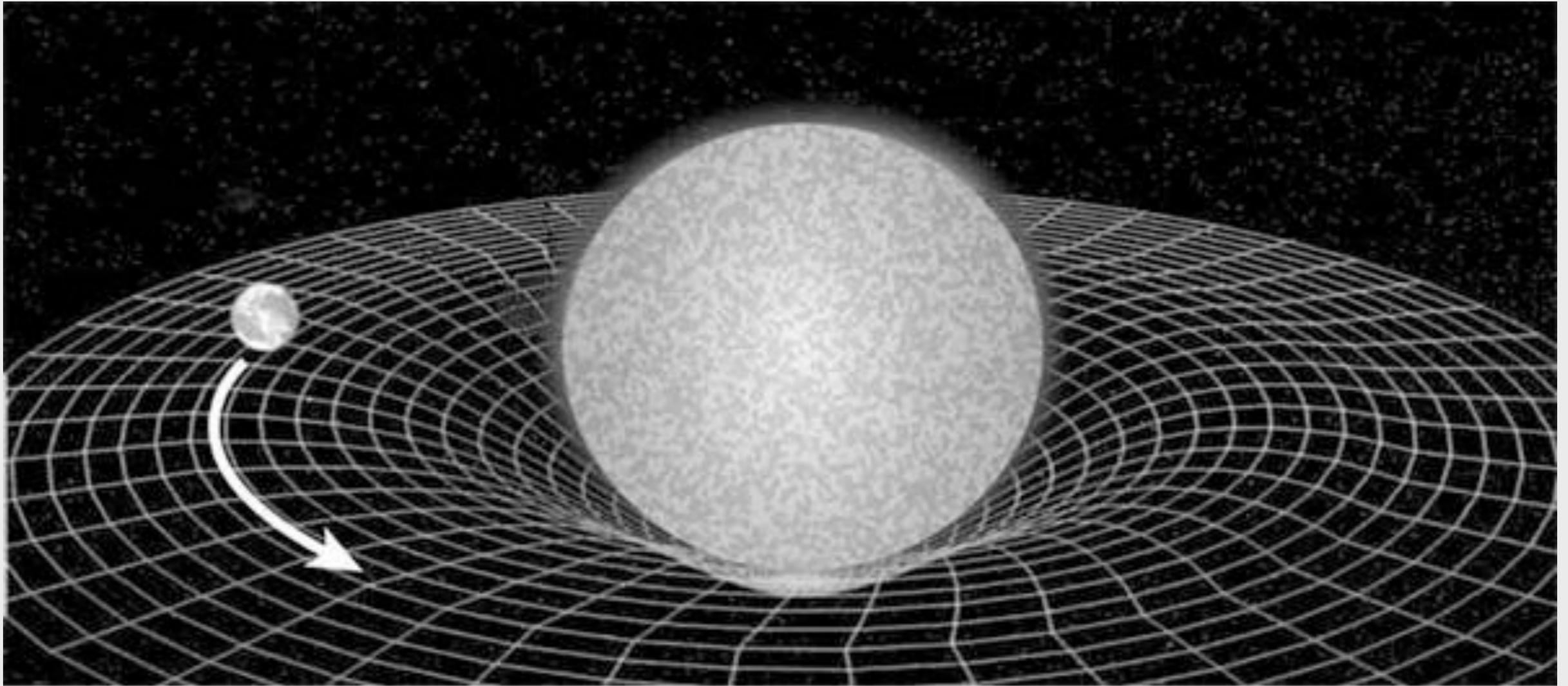




Gekrümmte RAUMZEIT



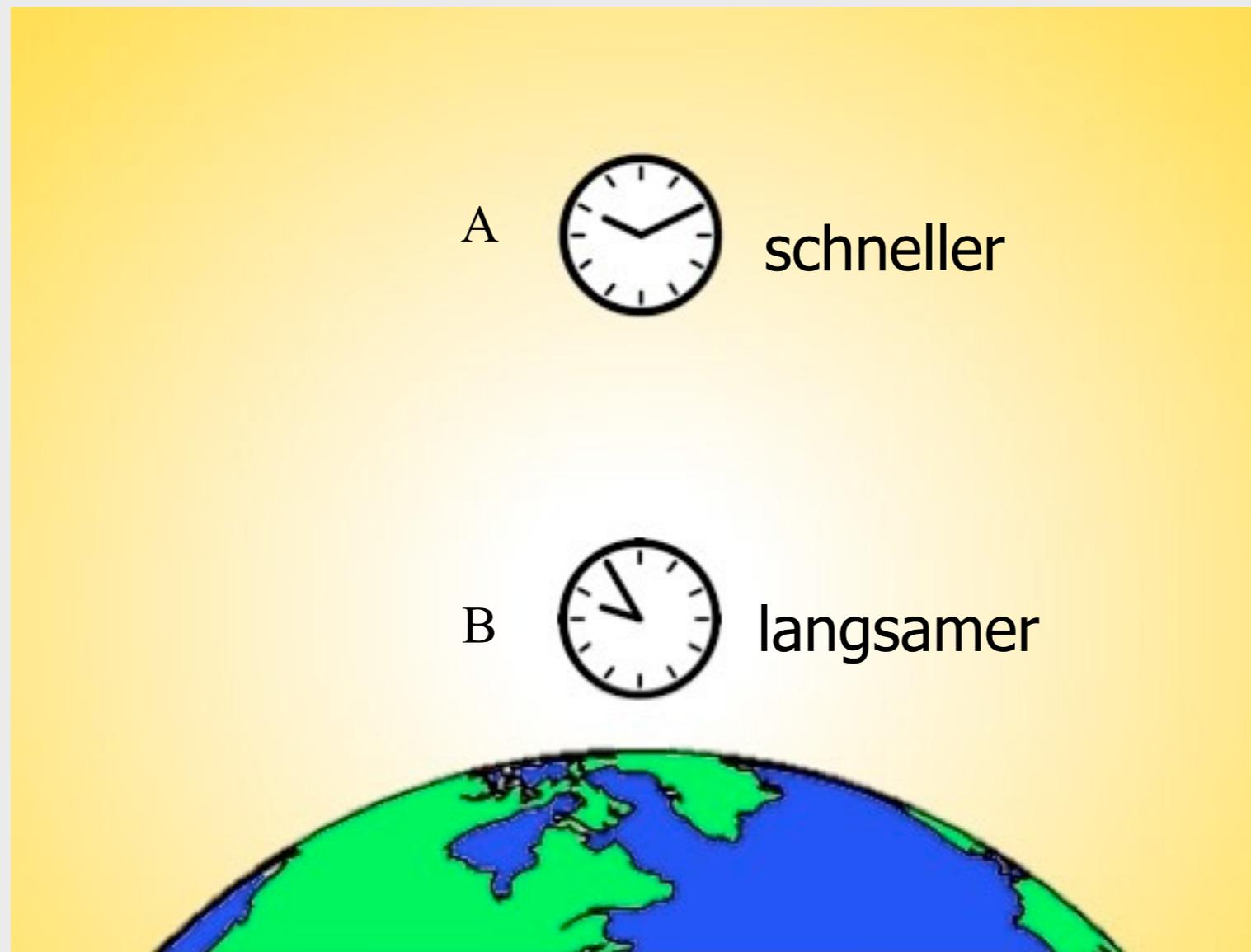
Gekrümmte RAUMZEIT



Gekrümmte Raumzeit in der Nähe der Sonne

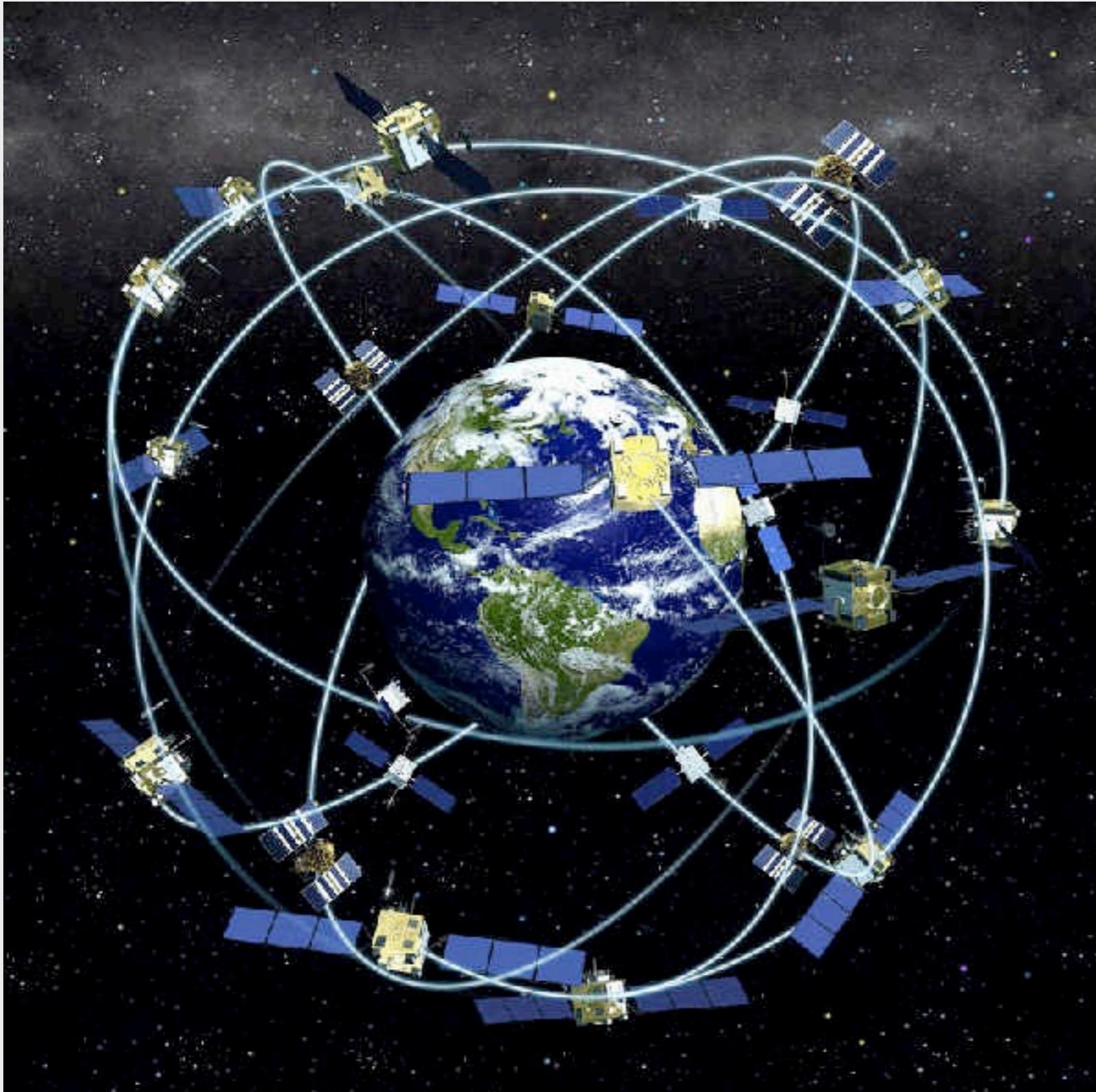
- Erde bewegt sich auf einer "**Geraden**" = kürzester Weg in der gekrümmten RAUMZEIT um die Sonne

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

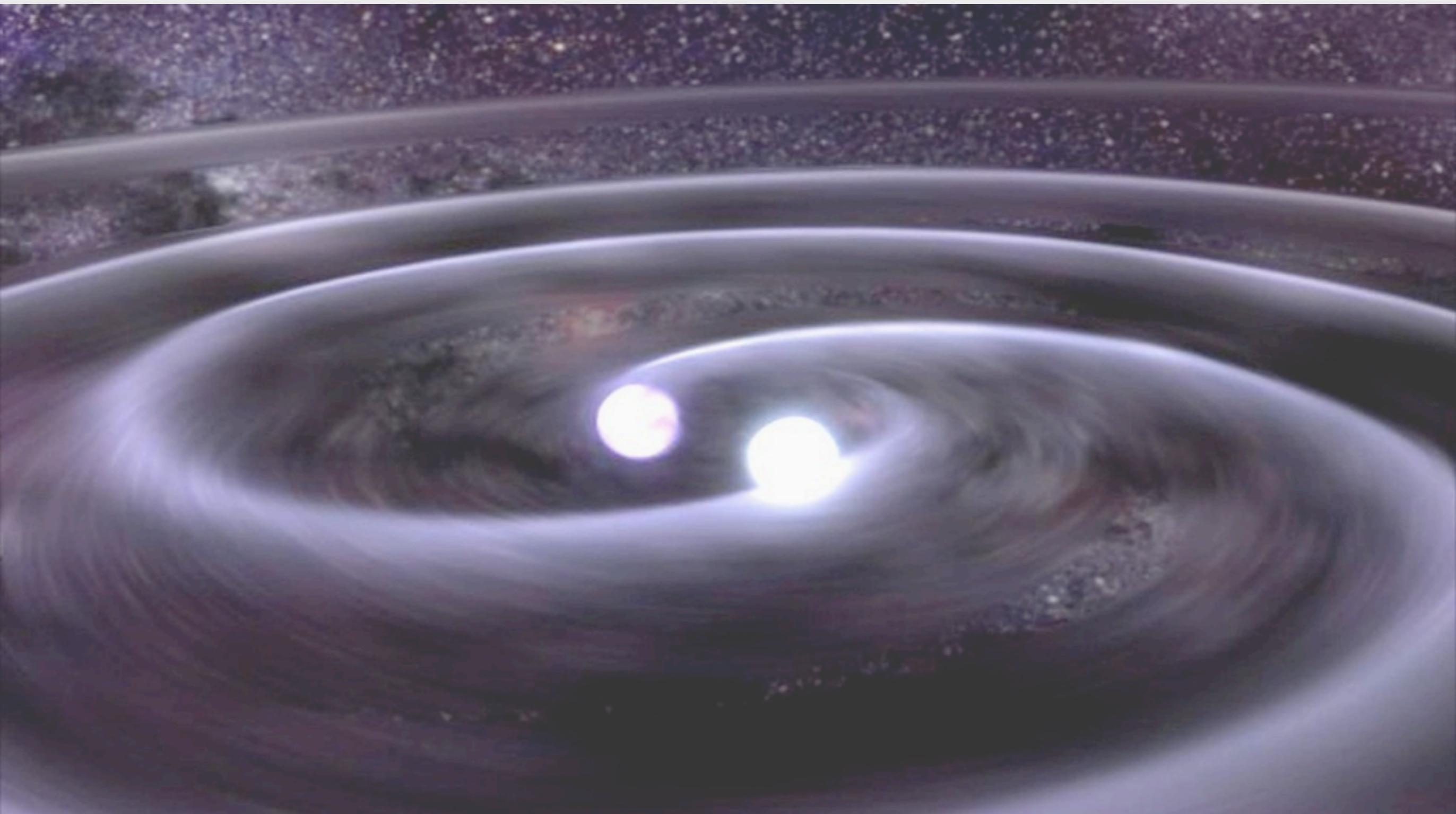


- Lichtablenkung durch Gravitationslinse

Gekrümmte RAUMZEIT

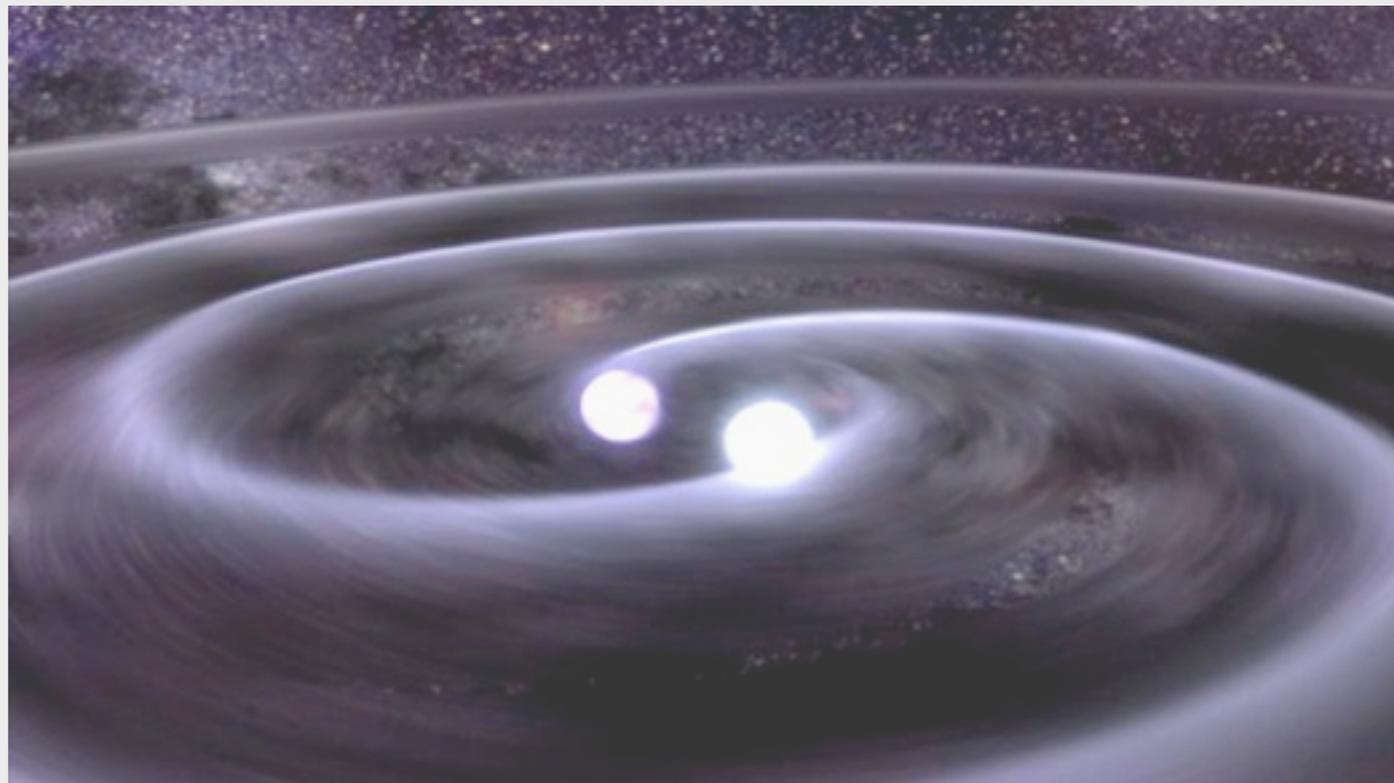
- **GRAVITATION = gekrümmte RAUMZEIT**
- **RAUMZEIT** wird durch Planeten, Sterne, Galaxien, ... **gekrümmte**
- Allgemein: RZ-Krümmung durch Massen, Energie
- je größer die Masse desto stärker die RZ-Krümmung
- Konsequenz:
Alle Objekte, einschl. Licht, bewegen sich auf **„Geraden“** in der gekrümmten RAUMZEIT

Gravitationswellen



Gravitationswellen

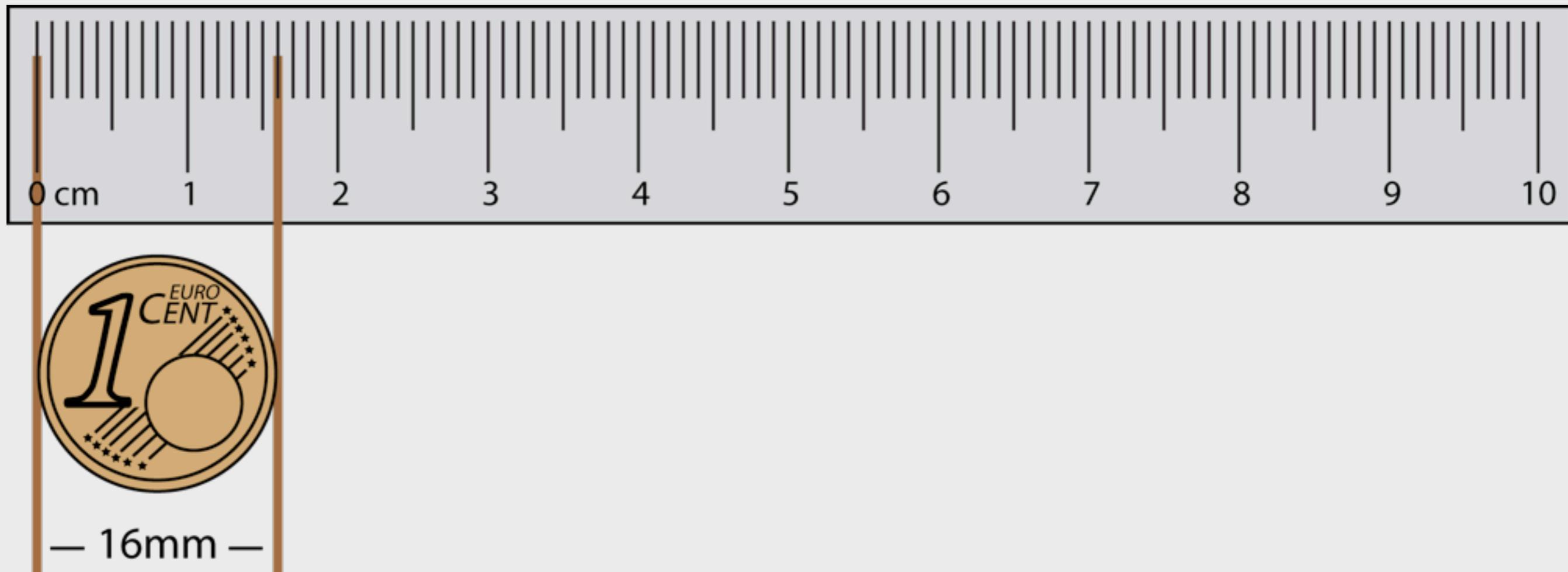
- zeitlich **veränderliche** Störungen der **RAUMZEIT**



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

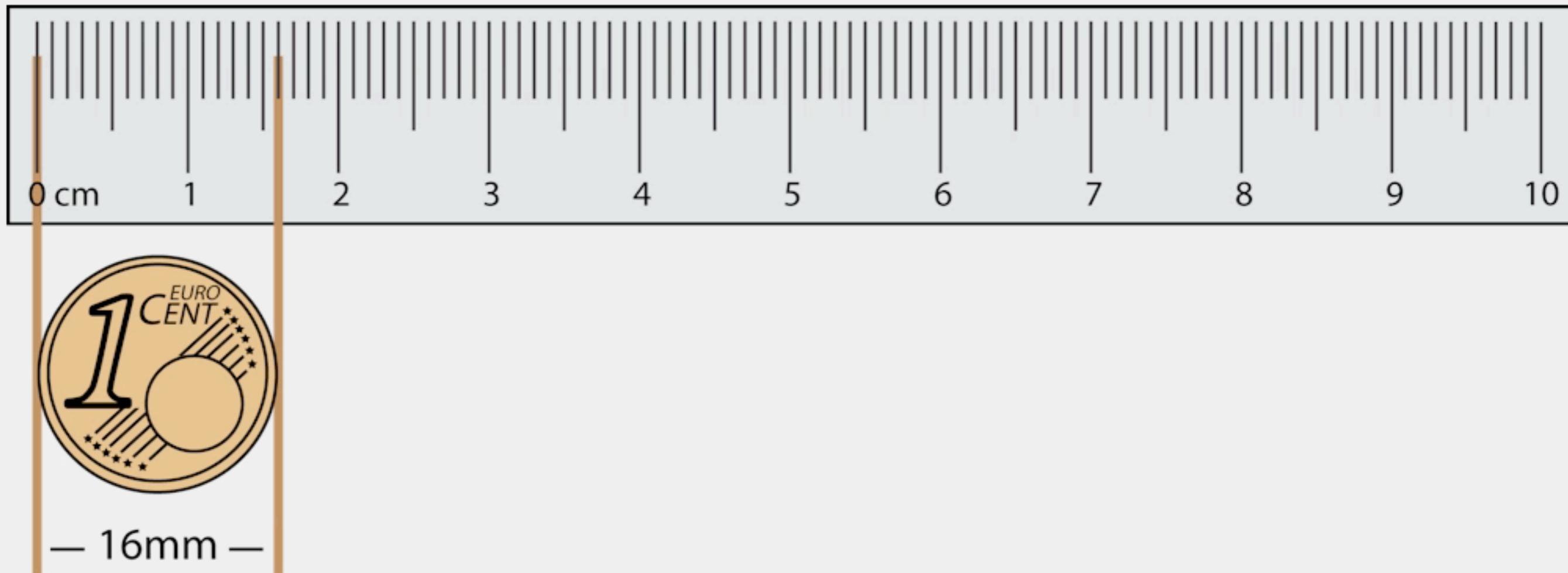
Was sind Gravitationswellen?

- zeitlich veränderliche Störungen der **RAUMZEIT**



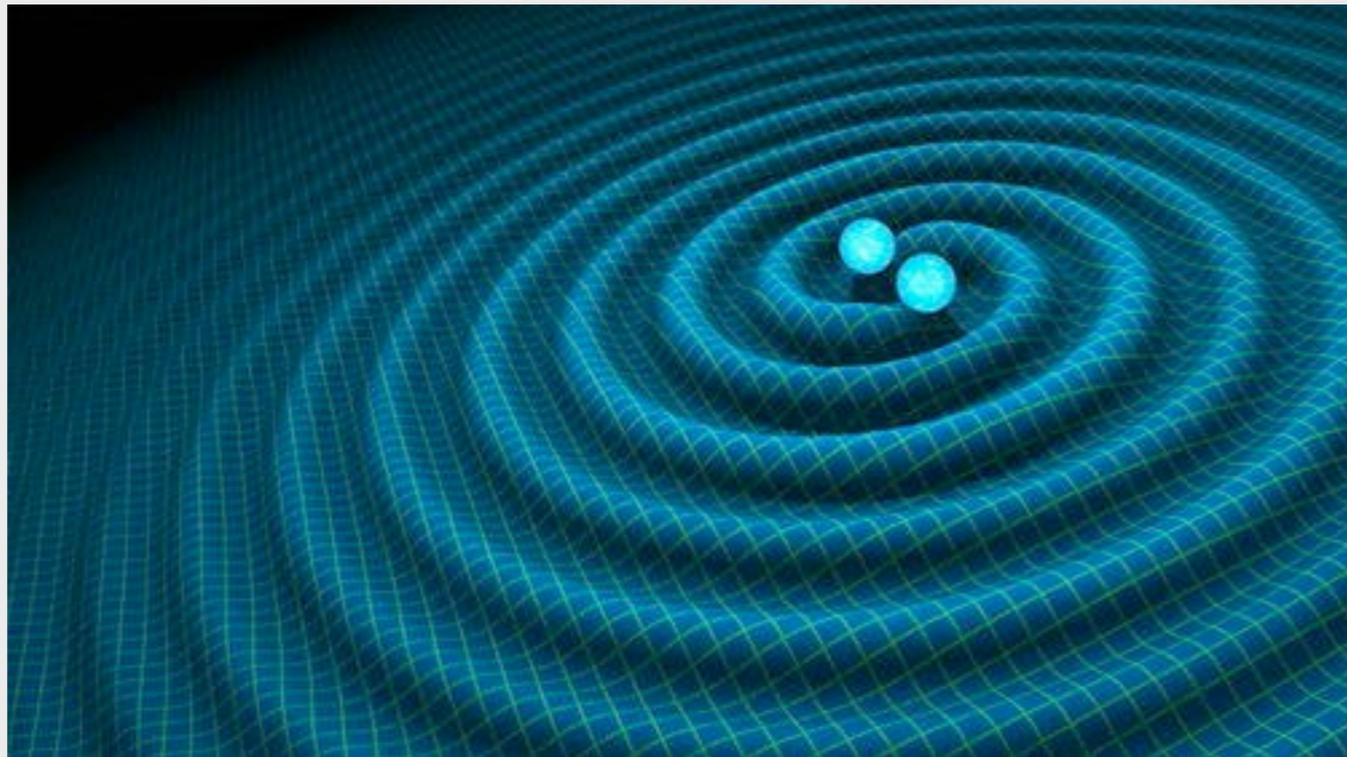
Was sind Gravitationswellen?

- zeitlich veränderliche Störungen der **RAUMZEIT**



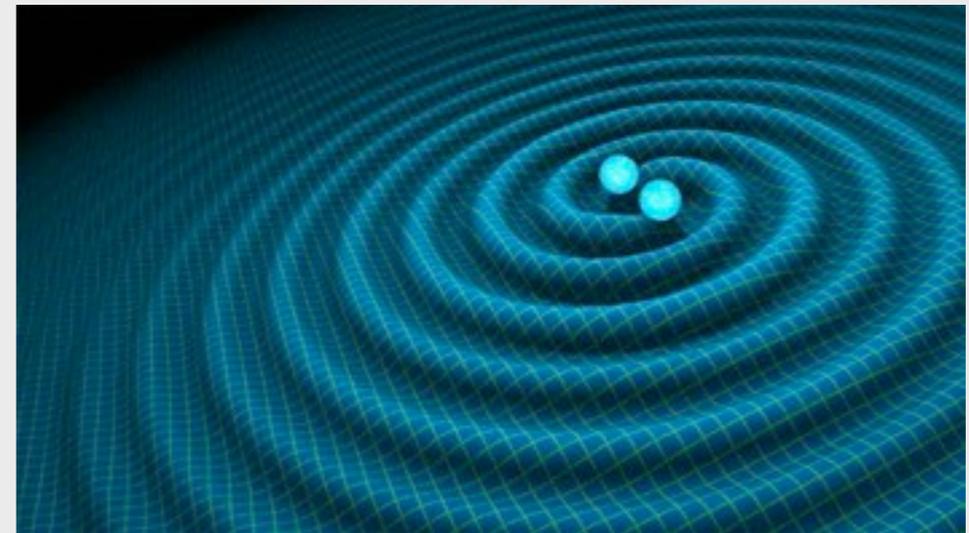
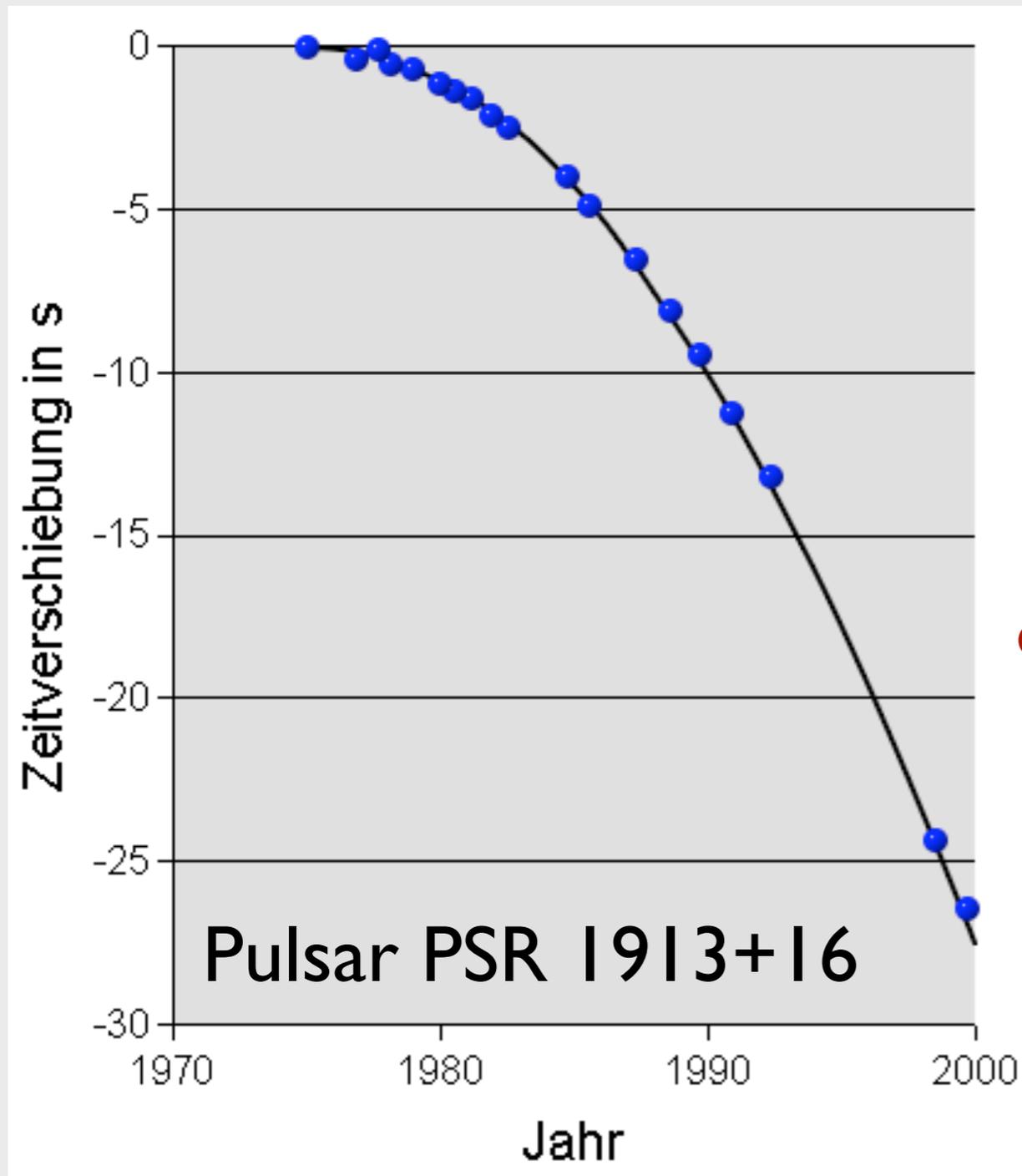
Was sind Gravitationswellen?

- zeitlich veränderliche Störungen der **RAUMZEIT**



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

Wie kann man Gravitationswellen nachweisen?

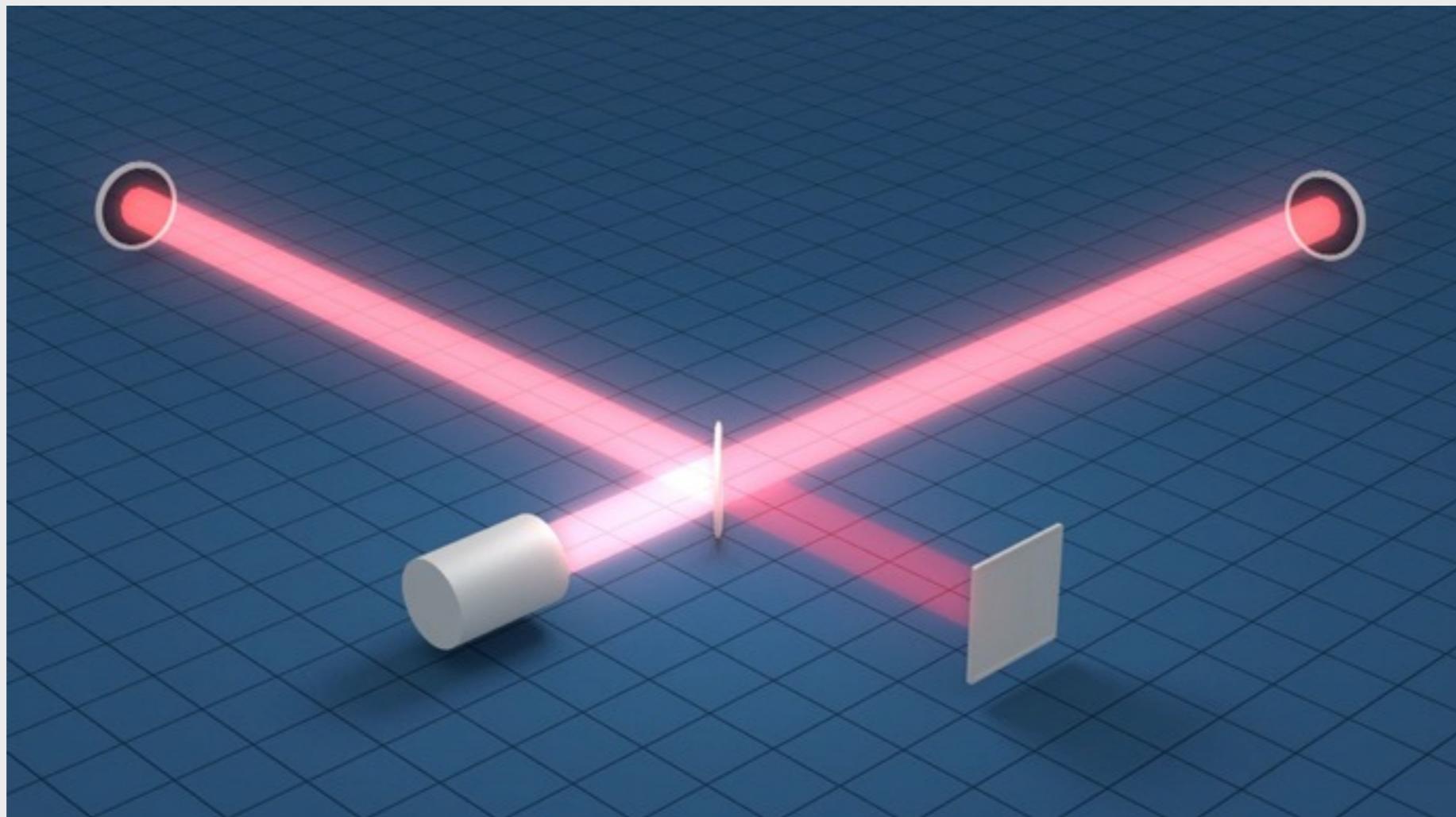


- bisher: **indirekter** Nachweis:
Veränderung der Rotationsperiode

Wie kann man Gravitationswellen nachweisen?

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

direkter Nachweis mit **LASER-Interferometer**



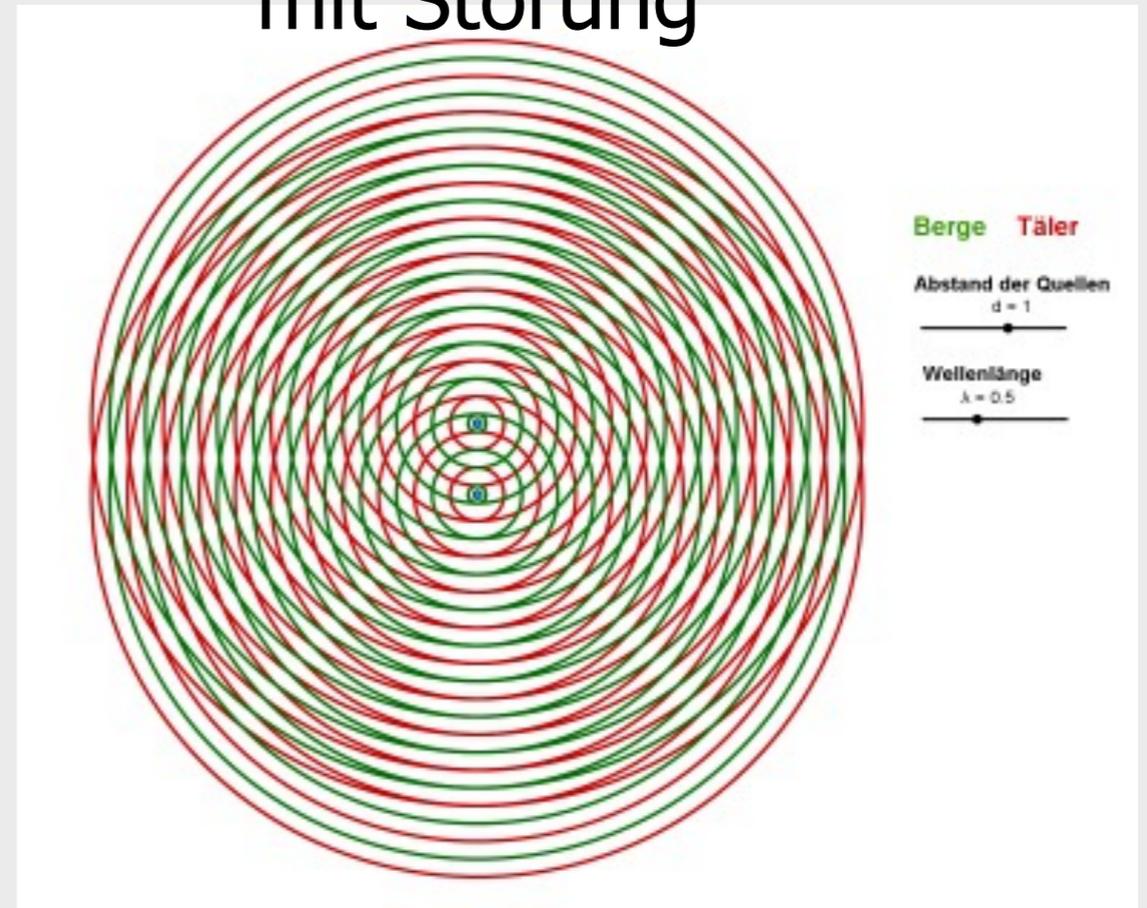
Nachweis von Gravitationswellen

- Interferenz: Überlagerung von Wellen

ohne Störung



mit Störung



Interferenzen von LASER Licht

LIGO*



LIGO Station Hanford, Washington State

* Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory

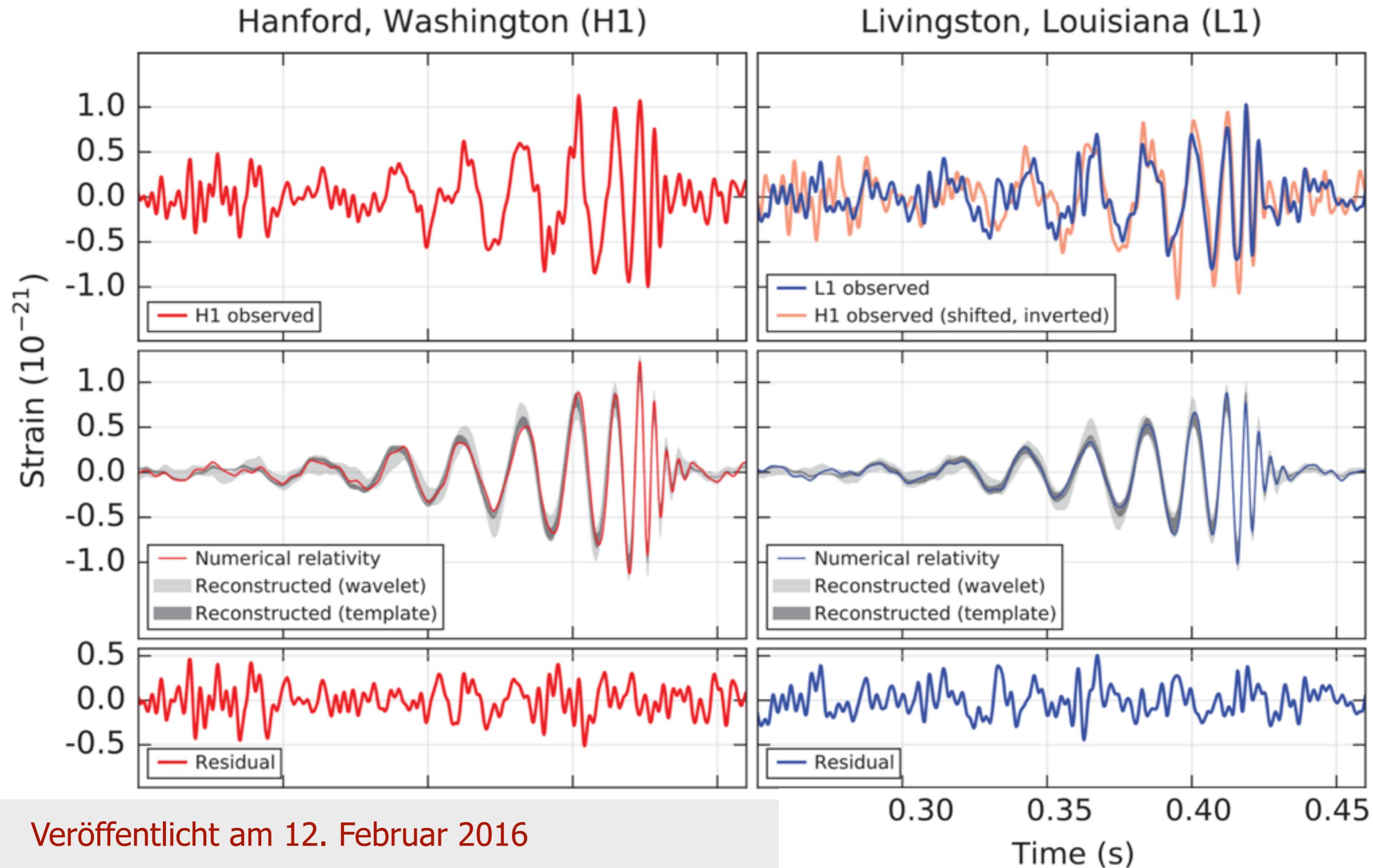
LIGO*



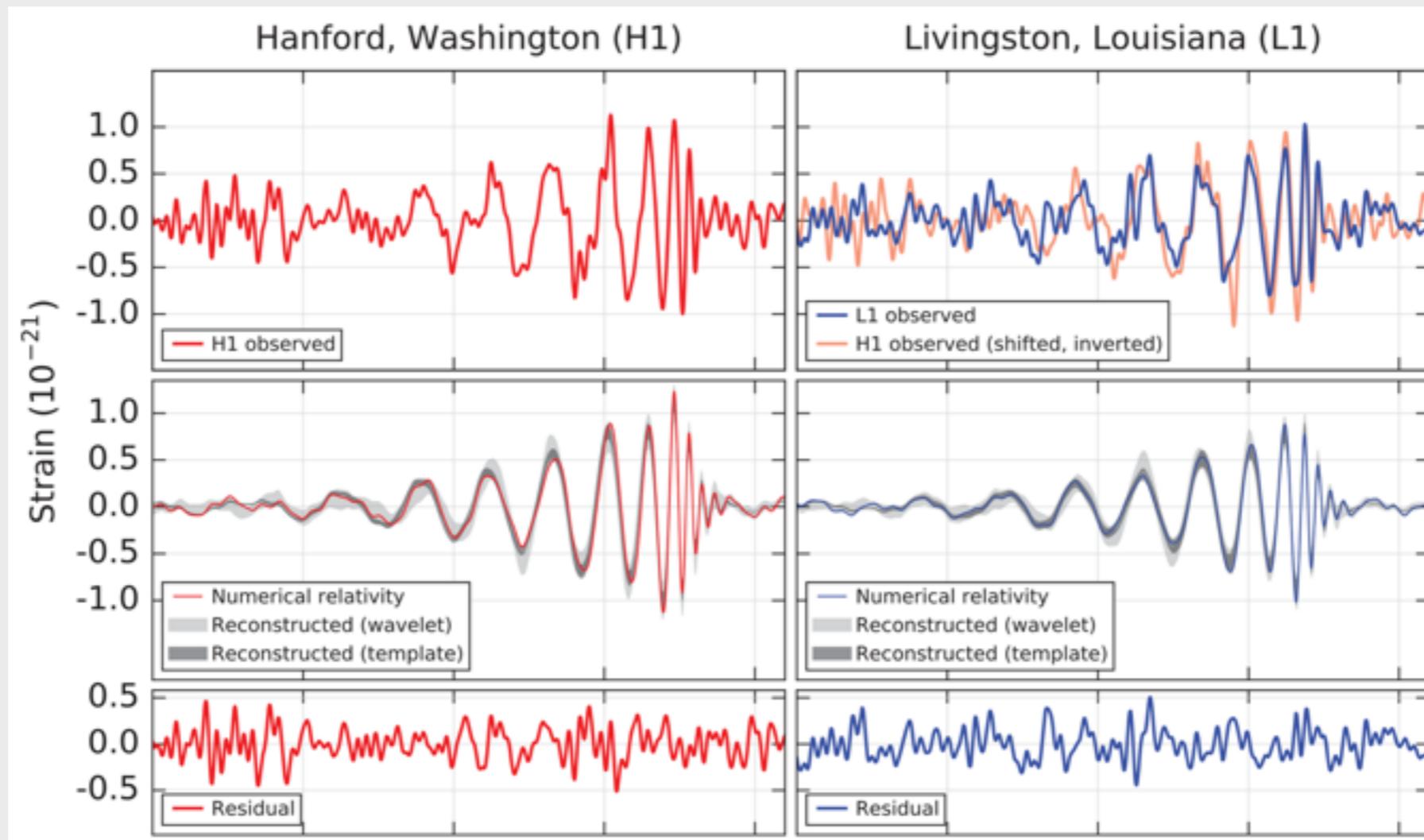
LIGO Station Livingston, Louisiana

* Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory

Direkter Nachweis von GW



Direkter Nachweis von GW

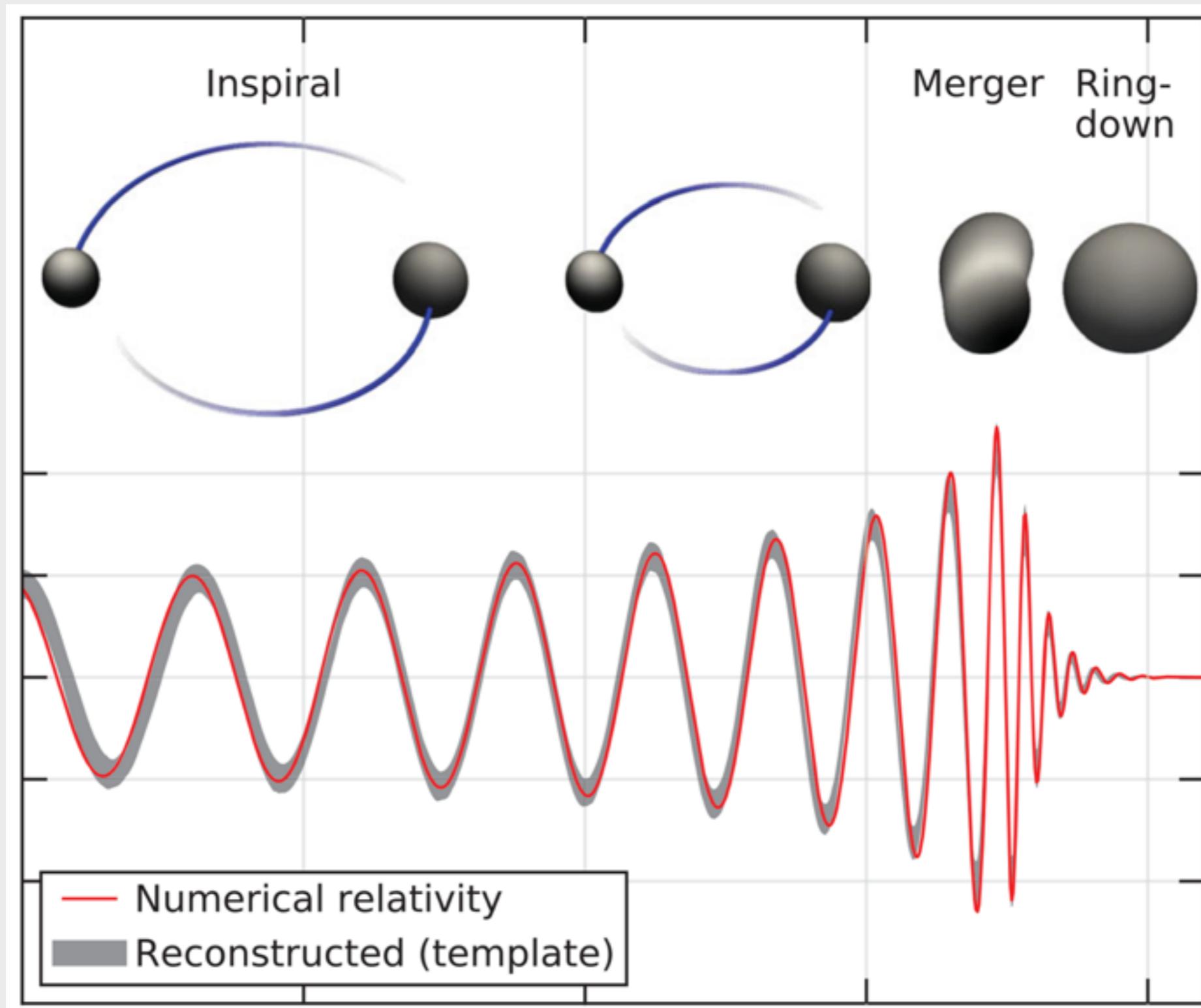


- Was hat die Gravitationswelle ausgelöst?

Verschmelzung von zwei **Schwarzen Löchern**:

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

Direkter Nachweis von GW

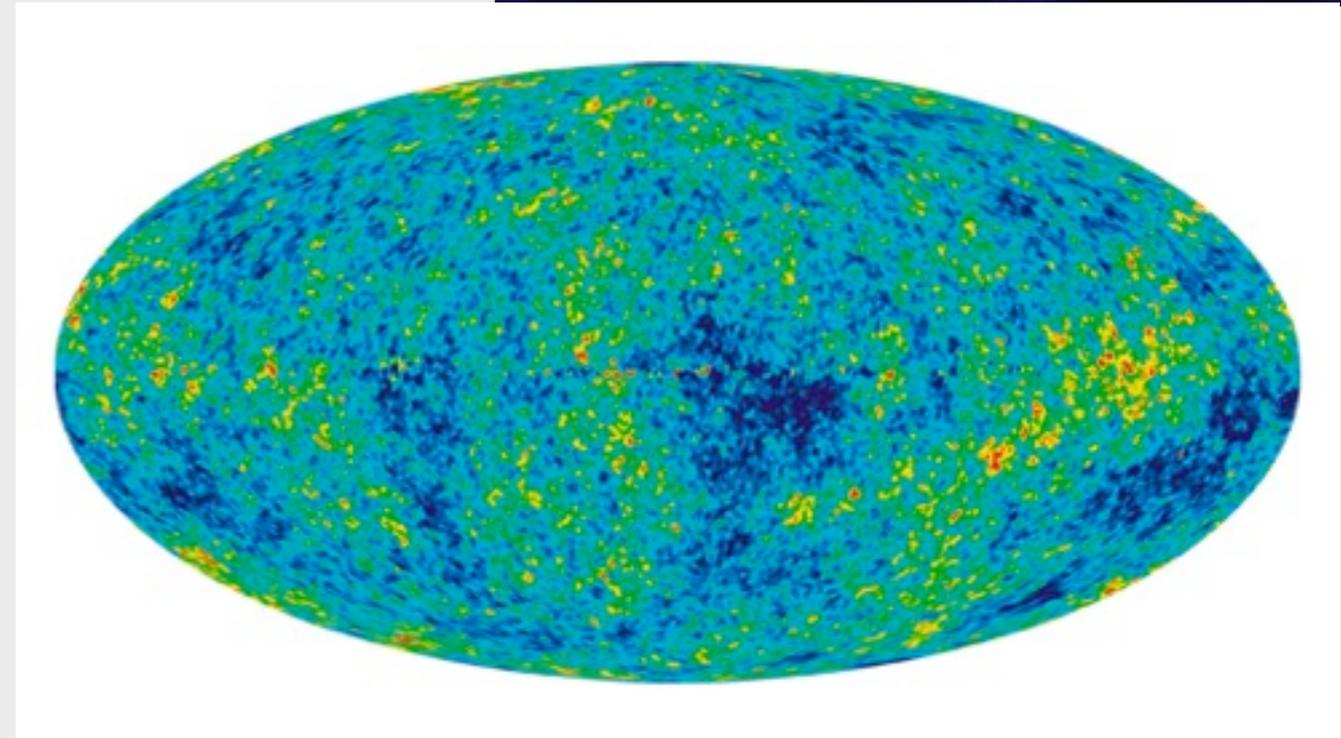
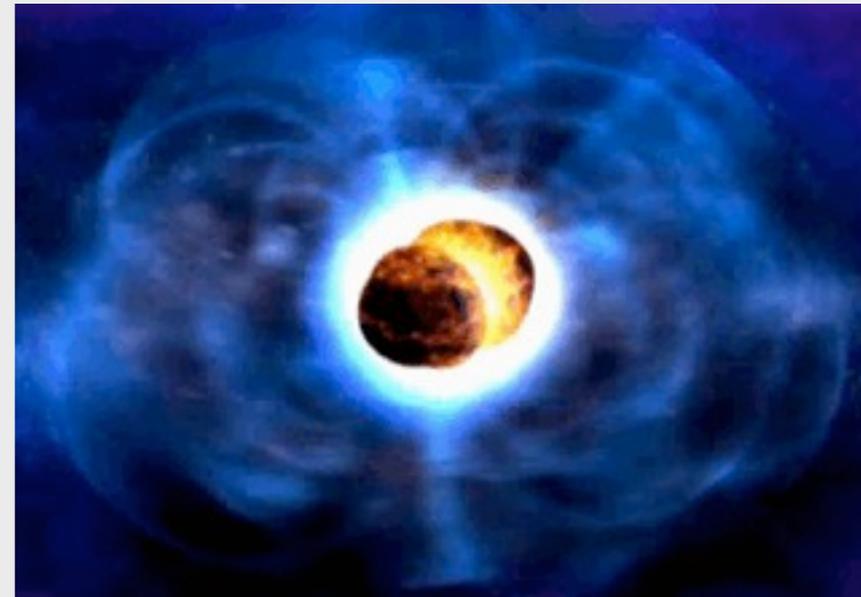


Verschmelzung von zwei Schwarzen Löchern

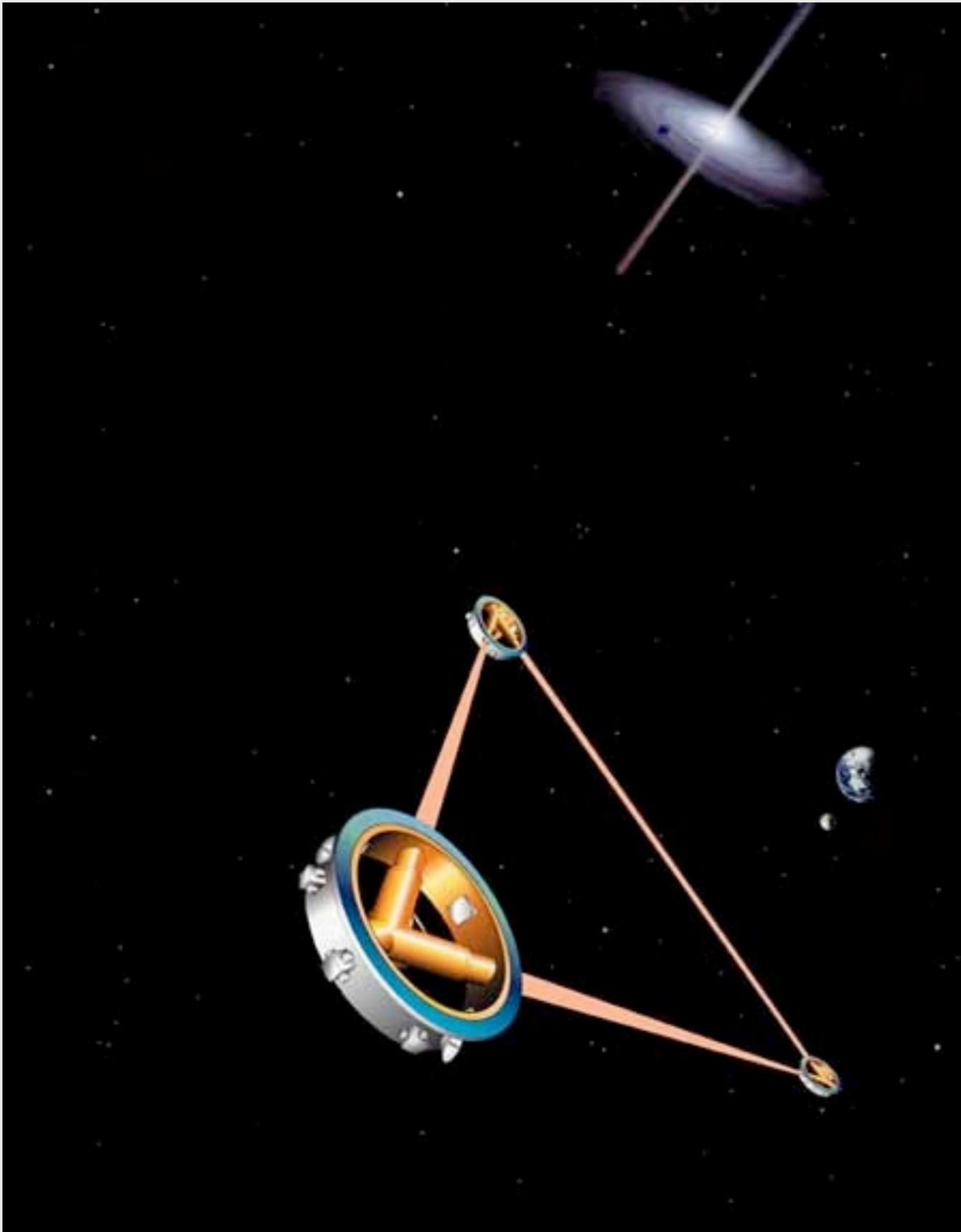
Gravitationswellen:

ein neues Fenster für die Astronomie

- Verschmelzung von Neutronen Sterne und Schwarzen Löchern
- Supernova Explosion
- Vermessung des Urknalls



Zukunft



- eLISA:
european/**e**volved
Laser **I**nterferometer
Space **A**ntenna

Armlänge: \sim 1 Mio km

geplanter Start: 2034