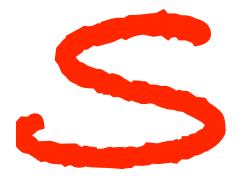
## Relativitätstheorie und Kosmologie Teil 2 Unterricht

F. Herrmann und M. Pohlig





www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de



## 10 KOSMOLOGIE



Raum und Zeit getrennt behandeln Beschreibung nach wie vor durch Gravitationsfeld

10 KOSMOLOGIE



- 9.1 Der Raum: mehr als ein leerer Behälter
- 9.2 Masse krümmt den Raum Geodäten
- 9.3 Die Raumkrümmung in der Umgebung von Himmelskörpern
- 9.4 Flugbahnen im Gravitationsfeld
- 9.5 Der Schwarzschildradius
- 9.6 Zeitliche und räumliche Abstände
- 9.7 Schwarze Löcher
- 9.8 Gravitationswellen



Was ist nun der Raum: Der Gegenstand oder der Behälter, in dem sich der Gegenstand befindet? Beide Begriffe passen nicht, denn der Raum ist beides in einem: Ein Gebilde mit Eigenschaften (so wie ein Gegenstand) und der Platz, an dem sich der Gegenstand befindet (so wie das Innere eines leeren Behälters).

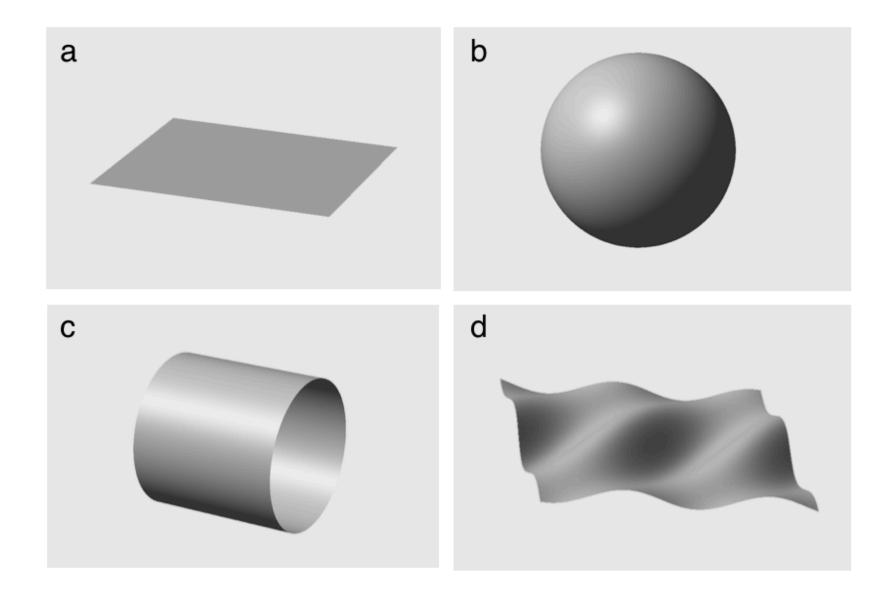
Die Theorie, mit der dieses Gebilde beschrieben wird, ist Einsteins Theorie der Gravitation, gewöhnlich bezeichnet als *Allgemeine Relativitätstheorie*.



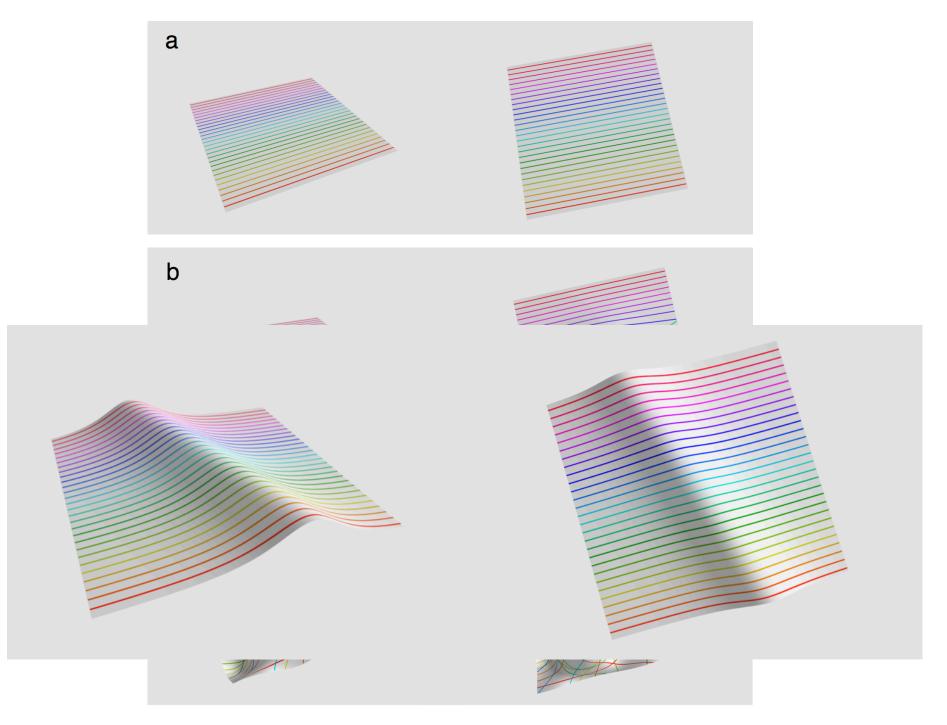
- 9.1 Der Raum: mehr als ein leerer Behälter
- 9.2 Masse krümmt den Raum Geodäten
- 9.3 Die Raumkrümmung in der Umgebung von Himmelskörpern
- 9.4 Flugbahnen im Gravitationsfeld
- 9.5 Der Schwarzschildradius
- 9.6 Zeitliche und räumliche Abstände
- 9.7 Schwarze Löcher
- 9.8 Gravitationswellen



#### 9.2 Masse krümmt den Raum – Geodäten

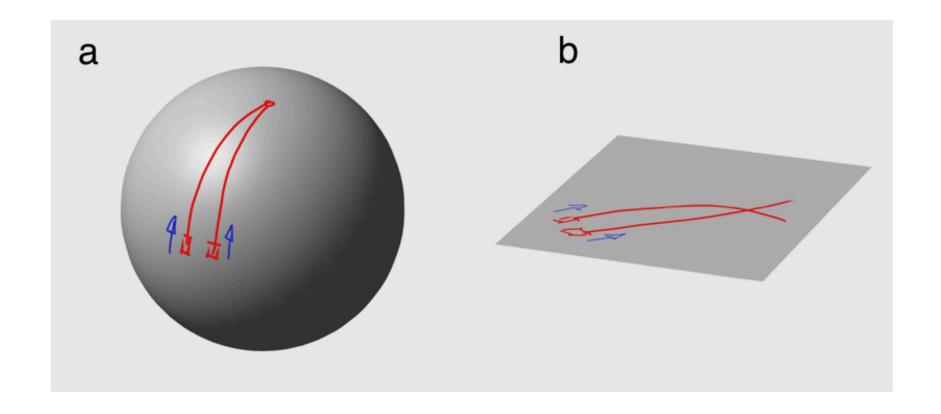


#### 9.2 Masse krümmt den Raum – Geodäten





#### 9.2 Masse krümmt den Raum – Geodäten



Zwei ursprünglich parallele Linien können sich kreuzen weil:

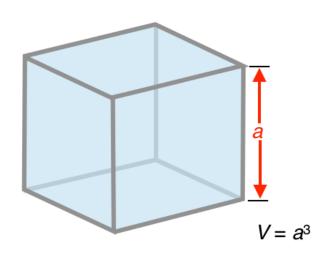
- die Linien gekrümmt sind;
- •der Raum gekrümmt ist.

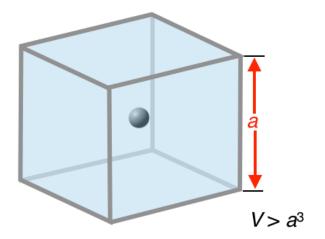


- 9.1 Der Raum: mehr als ein leerer Behälter
- 9.2 Masse krümmt den Raum Geodäten
- 9.3 Die Raumkrümmung in der Umgebung von Himmelskörpern
- 9.4 Flugbahnen im Gravitationsfeld
- 9.5 Der Schwarzschildradius
- 9.6 Zeitliche und räumliche Abstände
- 9.7 Schwarze Löcher
- 9.8 Gravitationswellen

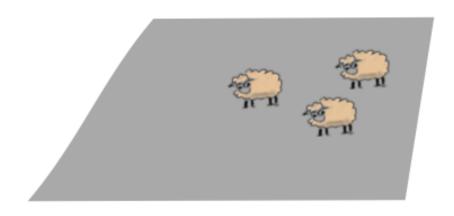


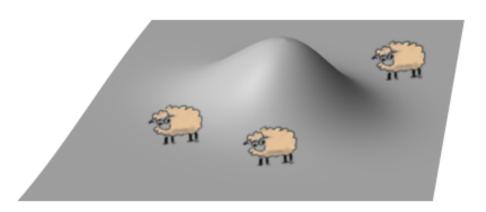
#### Der Raum wird durch Energie/Masse gekrümmt.





Das Volumen eines Raumbereichs wird durch Energie/Masse vergrößert.





- 9.1 Der Raum: mehr als ein leerer Behälter
- 9.2 Masse krümmt den Raum Geodäten
- 9.3 Die Raumkrümmung in der Umgebung von Himmelskörpern
- 9.4 Flugbahnen im Gravitationsfeld
- 9.5 Der Schwarzschildradius
- 9.6 Zeitliche und räumliche Abstände
- 9.7 Schwarze Löcher
- 9.8 Gravitationswellen



schwerer Körper S leichter Körper L

- Die Bahn von L wird wegen der Gravitation abgelenkt, denn über das Gravitationsfeld fließt Impuls von S nach L.
- Der Raum wird gekrümmt.



#### schnell vorbeifliegende Objekte

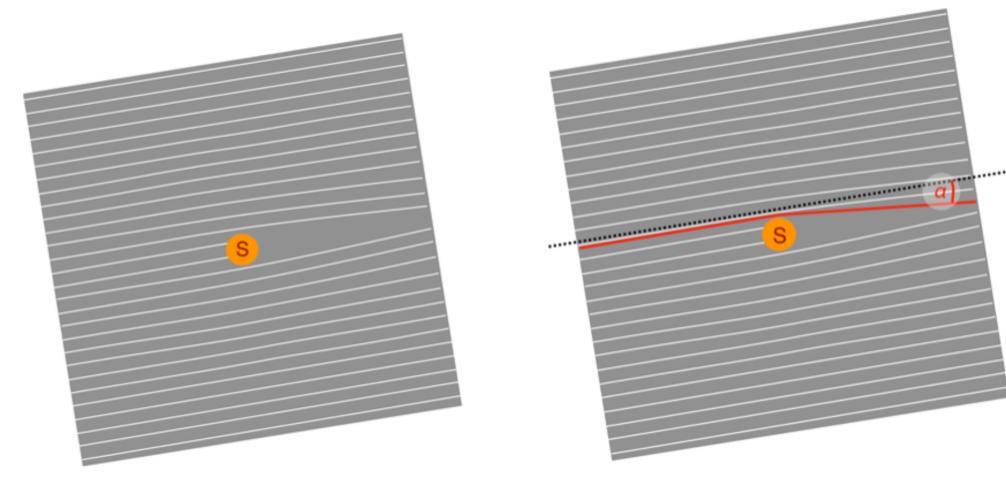
wenn der Raum flach wäre

 $\Rightarrow$ 

im gekrümmten Raum

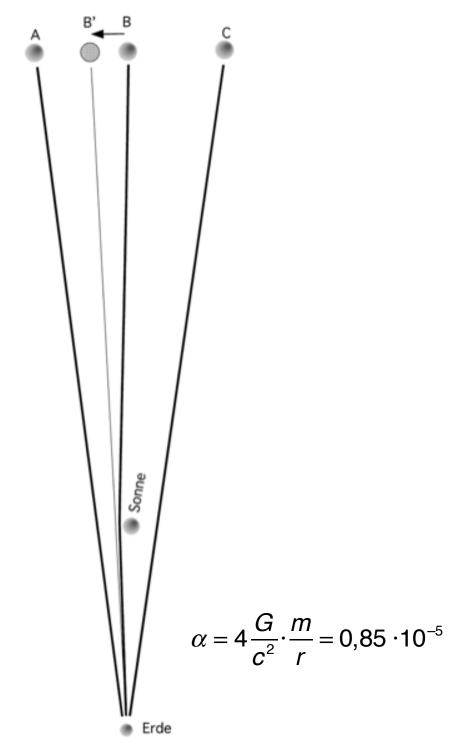
$$\alpha = 2\frac{G}{c^2} \cdot \frac{m}{r}$$

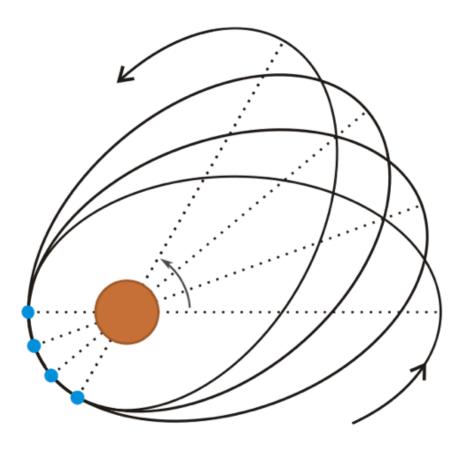
$$\alpha = 4 \frac{G}{c^2} \cdot \frac{m}{r}$$





### 9.4 Flugbahnen im Gravitationsfeld





- 9.1 Der Raum: mehr als ein leerer Behälter
- 9.2 Masse krümmt den Raum Geodäten
- 9.3 Die Raumkrümmung in der Umgebung von Himmelskörpern
- 9.4 Flugbahnen im Gravitationsfeld
- 9.5 Der Schwarzschildradius
- 9.6 Zeitliche und räumliche Abstände
- 9.7 Schwarze Löcher
- 9.8 Gravitationswellen



$$\alpha = 4 \frac{G}{c^2} \cdot \frac{m}{r}$$
  $r_S = 2 \frac{G}{c^2} \cdot m$   $\alpha = 2 \frac{r_S}{r}$ 

Schwarzschildradius = Masse  $\cdot$  1,48  $\cdot$  10<sup>-27</sup> m/kg

Körper	Masse	Schwarzschild- radius
Buch	0,5 kg	0,74 · 10 <sup>−27</sup> m
Mond	7,35 · 10 <sup>22</sup> kg	0,11 mm
Erde	5,97 · 10 <sup>24</sup> kg	9 mm
Sonne	1,99 · 10 <sup>30</sup> kg	3 km

- 9.1 Der Raum: mehr als ein leerer Behälter
- 9.2 Masse krümmt den Raum Geodäten
- 9.3 Die Raumkrümmung in der Umgebung von Himmelskörpern
- 9.4 Flugbahnen im Gravitationsfeld
- 9.5 Der Schwarzschildradius
- 9.6 Zeitliche und räumliche Abstände
- 9.7 Schwarze Löcher
- 9.8 Gravitationswellen



#### Die Zeit in der Umgebung eines schweren Himmelskörpers

Von außen gesehen, vergeht die Zeit in der Nähe eines schweren Körpers langsamer als in großer Entfernung:

$$\Delta t = \sqrt{1 - \frac{r_{\rm S}}{r}} \, \Delta t_{\rm 0}$$

#### Neutronenstern

r = 10 km

$$m = 3 \cdot 10^{30} \text{ kg}$$
.

Schwarzschildradius

$$r_{\rm S} = 4.5 \; {\rm km} \; .$$

In Gleichung (4) eingesetzt:

$$\Delta t \approx 0.75 \ \Delta t_0$$

#### Die Zeit in der Umgebung eines schweren Himmelskörpers

Von außen gesehen, vergeht die Zeit in der Nähe eines schweren Körpers langsamer als in großer Entfernung:

$$\Delta t = \sqrt{1 - \frac{r_{\rm S}}{r}} \, \Delta t_{\rm O}$$

Der Raum in der Umgebung eines schweren Himmelskörpers

Von außen gesehen erscheinen alle Gegenstände in der Nähe eines schweren Körpers in radialer Richtung verkürzt:

$$\Delta s = \sqrt{1 - \frac{r_{\rm S}}{r}} \, \Delta s_{\rm 0}$$

- 9.1 Der Raum: mehr als ein leerer Behälter
- 9.2 Masse krümmt den Raum Geodäten
- 9.3 Die Raumkrümmung in der Umgebung von Himmelskörpern
- 9.4 Flugbahnen im Gravitationsfeld
- 9.5 Der Schwarzschildradius
- 9.6 Zeitliche und räumliche Abstände
- 9.7 Schwarze Löcher
- 9.8 Gravitationswellen



Der Ereignishorizont

$$g(r) = G \cdot \frac{m}{r^2}$$

$$r = r_S$$

$$\Delta t = \sqrt{1 - \frac{r_S}{r}} \, \Delta t_0 \qquad \Delta s = \sqrt{1 - \frac{r_S}{r}} \, \Delta s_0$$

Kein Körper, kein Teilchen, kein Licht kann den Ereignishorizont verlassen oder von innen durchqueren.

Das schwarze Loch von außen gesehen

eingefrorener Stern

Der Ereignishorizont ist für uns das Ende der Welt.

Die Außenwelt vom schwarzen Loch aus gesehen

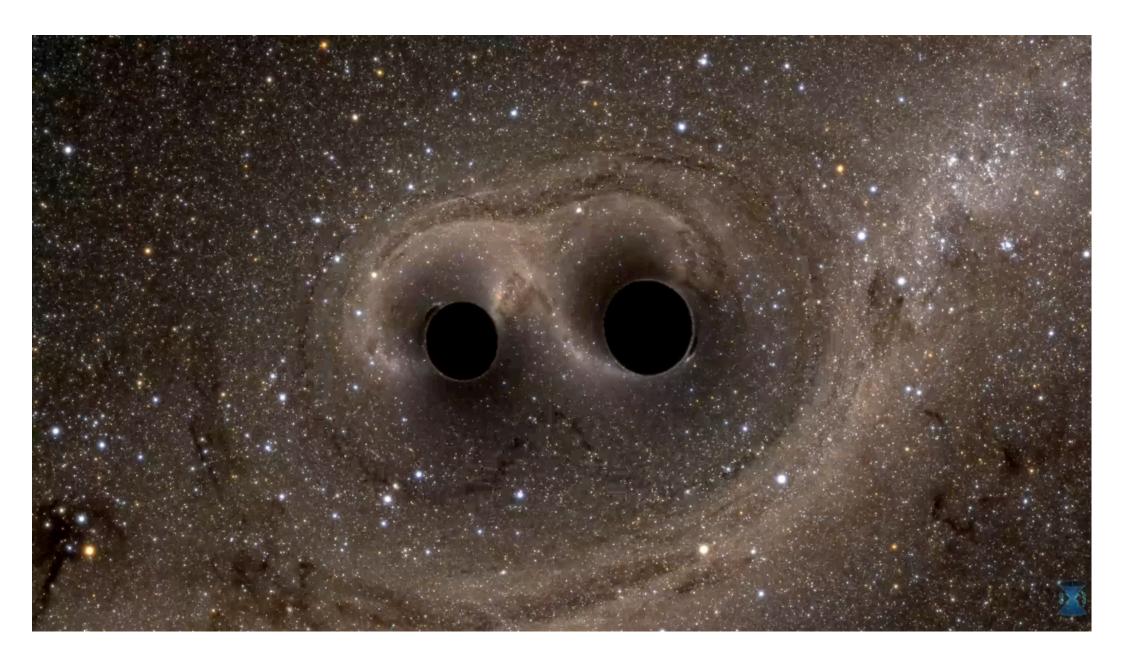
Man sieht die Zukunft der Außenwelt.



- 9.1 Der Raum: mehr als ein leerer Behälter
- 9.2 Masse krümmt den Raum Geodäten
- 9.3 Die Raumkrümmung in der Umgebung von Himmelskörpern
- 9.4 Flugbahnen im Gravitationsfeld
- 9.5 Der Schwarzschildradius
- 9.6 Zeitliche und räumliche Abstände
- 9.7 Schwarze Löcher
- 9.8 Gravitationswellen



#### 9.8 Gravitationswellen





# Simulating eXtreme Spacetimes (SXS) Project www.black-holes.org



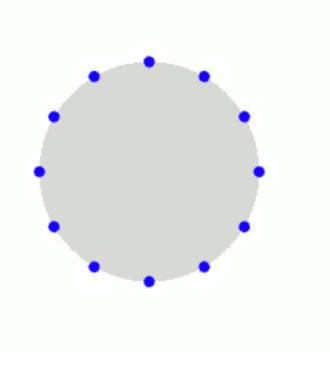
California Institute of Technology
California State University Fullerton
Canadian Institute for Theoretical Astrophysics
Cornell University
Max Planck Institute for Gravitational Physics
Oberlin College
Washington State University

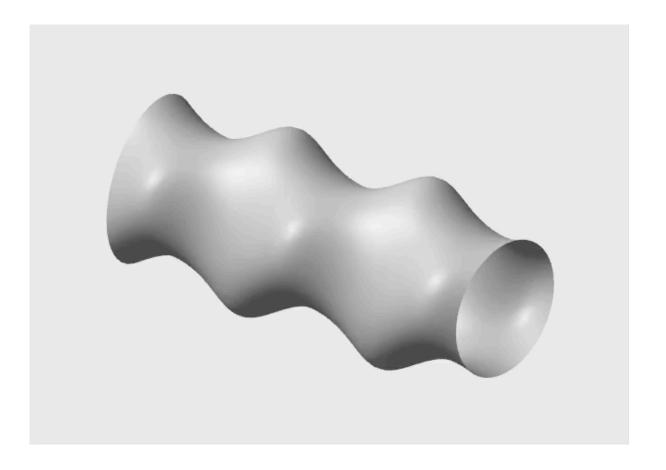
## We gratefully acknowledge support by

Canada Research Chairs, CFI, CIFAR, Compute Canada, Max Planck Society, NASA, NSERC, NSF, Ontario MEDI, Research Corporation for Science Advancement, Sherman Fairchild Foundation, XSEDE



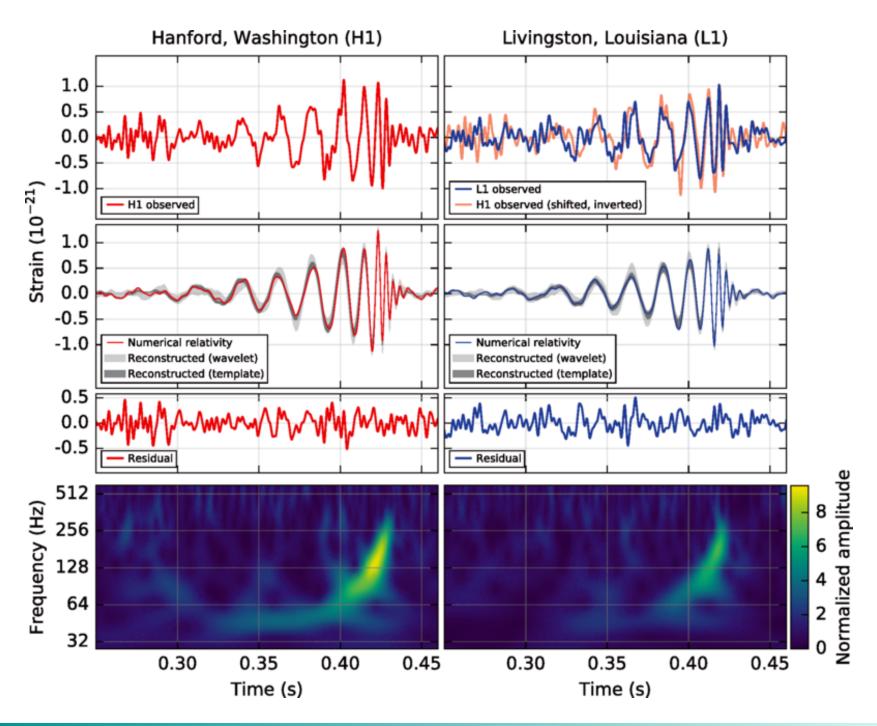
#### 9.8 Gravitationswellen





Gravitationswelle: Der Raum wird quer zur Laufrichtung der Welle periodisch gestreckt und gestaucht. Der Abstand zwischen zwei Körpern verändert sich entsprechend.

#### 9.8 Gravitationswellen





- 9.1 Der Raum: mehr als ein leerer Behälter
- 9.2 Masse krümmt den Raum Geodäten
- 9.3 Die Raumkrümmung in der Umgebung von Himmelskörpern
- 9.4 Flugbahnen im Gravitationsfeld
- 9.5 Der Schwarzschildradius
- 9.6 Zeitliche und räumliche Abstände
- 9.7 Schwarze Löcher
- 9.8 Gravitationswellen



## 10 KOSMOLOGIE



#### 10 KOSMOLOGIE

- 10.1 Die Sterne in Bewegung
- 10.2 Das kosmologische Prinzip
- 10.3 Gekrümmt oder nicht?
- 10.4 Die Expansion des Universums
- 10.5 Der Blick in die Vergangenheit
- 10.6 Was wir vom Universum sehen
- 10.7 Die Entwicklung des Universums die kosmische Hintergrundstrahlung



10.1 Die Sterne in Bewegung

$$\omega = \frac{V}{r}$$

$$1 \text{ Lj} = 9,461 \cdot 10^{15} \text{ m}$$

#### 10 KOSMOLOGIE

- 10.1 Die Sterne in Bewegung
- 10.2 Das kosmologische Prinzip
- 10.3 Gekrümmt oder nicht?
- 10.4 Die Expansion des Universums
- 10.5 Der Blick in die Vergangenheit
- 10.6 Was wir vom Universum sehen
- 10.7 Die Entwicklung des Universums die kosmische Hintergrundstrahlung



- Die Erde ist nicht der Mittelpunkt der Welt, wie man früher angenommen hatte.
   Vielmehr hat die Welt weder einen Rand, noch einen Mittelpunkt.
- Die Erde ist kein einzigartiger Planet, sondern einer von sehr vielen ähnlichen Planeten, die um andere Sterne kreisen.
- Die Sonne ist kein einzigartiger, sondern einer von unzähligen anderen gleichartigen Sternen.
- Unsere Milchstraße, ist keine besondere, sondern eine von unzähligen anderen gleichartigen Galaxien.
- Unser Galaxienhaufen ist kein besonderer, sondern einer von unzähligen anderen gleichartigen Galaxienhaufen.

Auf großen Längenskalen ist das Universum homogen.

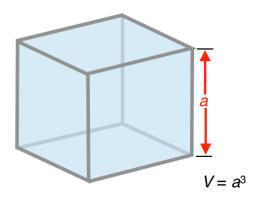


#### 10 KOSMOLOGIE

- 10.1 Die Sterne in Bewegung
- 10.2 Das kosmologische Prinzip
- 10.3 Gekrümmt oder nicht?
- 10.4 Die Expansion des Universums
- 10.5 Der Blick in die Vergangenheit
- 10.6 Was wir vom Universum sehen
- 10.7 Die Entwicklung des Universums die kosmische Hintergrundstrahlung



#### Der Raum wird durch Energie/Masse gekrümmt.



$$V = \frac{4}{3}\pi r^3$$

$$V > \frac{4}{3}\pi r^3$$

$$V < \frac{4}{3}\pi r^3$$

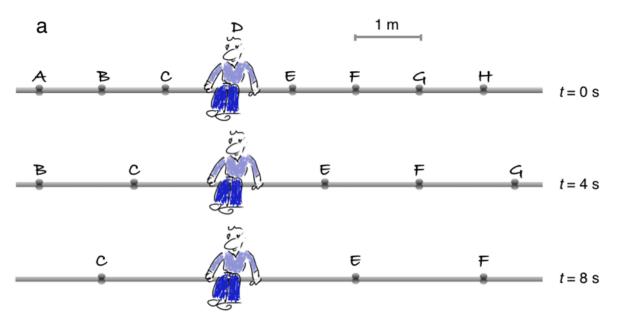
Auf großen Längenskalen ist das Universum flach.

#### 10 KOSMOLOGIE

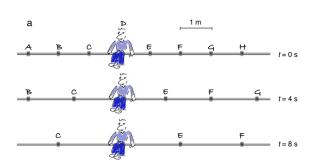
- 10.1 Die Sterne in Bewegung
- 10.2 Das kosmologische Prinzip
- 10.3 Gekrümmt oder nicht?
- 10.4 Die Expansion des Universums
- 10.5 Der Blick in die Vergangenheit
- 10.6 Was wir vom Universum sehen
- 10.7 Die Entwicklung des Universums die kosmische Hintergrundstrahlung

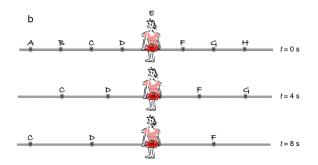


## 10.4 Die Expansion des Universums



#### 10.4 Die Expansion des Universums





Das Universum expandiert: Es entsteht neuer Raum.

$$v_{\rm e} = \frac{\Delta d}{\Delta t}$$

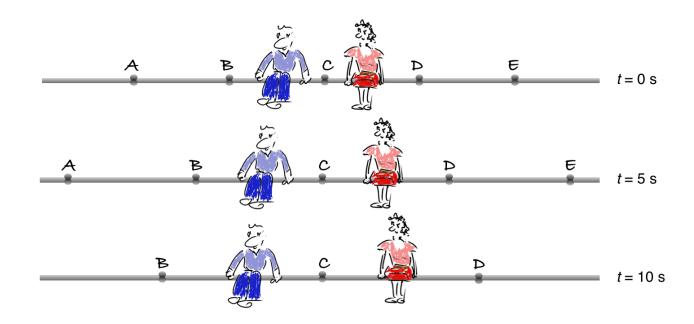
$$v_{\rm e}(d) = H \cdot d$$

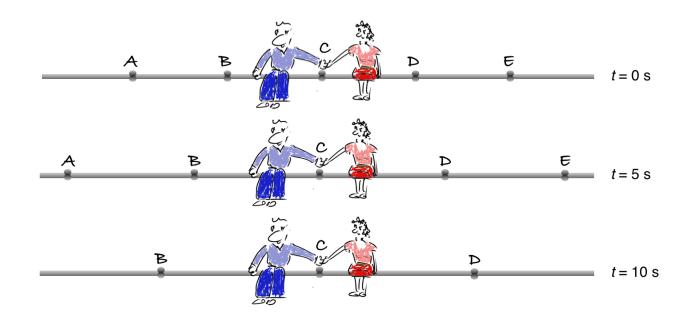
$$H = \frac{2.1 \text{ m/s}}{100 \text{ Lj}}$$



## 10.4 Die Expansion des Universums

$$v_{\rm e}(d) = H \cdot d$$

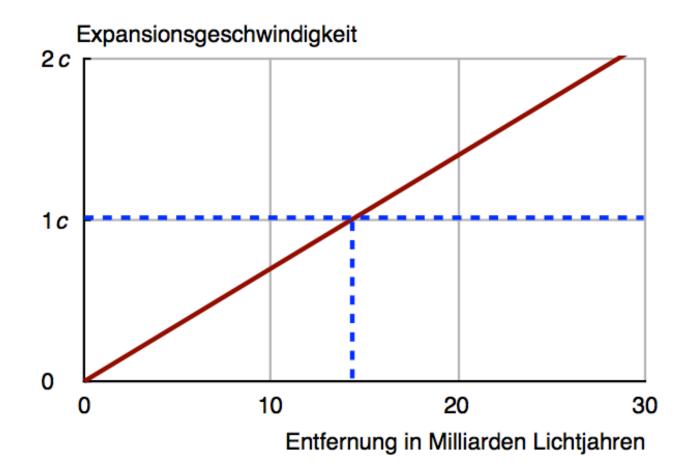






#### Expansionsgeschwindigkeit größer als Grenzgeschwindigkeit

$$v_{\rm e}(d) = H \cdot d$$



Der Urknall

Die Expansion des Universums begann vor 13,8 Milliarden Jahren mit dem Urknall.



#### 10 KOSMOLOGIE

- 10.1 Die Sterne in Bewegung
- 10.2 Das kosmologische Prinzip
- 10.3 Gekrümmt oder nicht?
- 10.4 Die Expansion des Universums
- 10.5 Der Blick in die Vergangenheit
- 10.6 Was wir vom Universum sehen
- 10.7 Die Entwicklung des Universums die kosmische Hintergrundstrahlung



10.5 Der Blick in die Vergangenheit

Je weiter man in die Ferne sieht, desto weiter sieht man in die Vergangenheit.

Da das Universum homogen ist, sieht man in der Ferne auch die eigene Vergangenheit.



#### 10 KOSMOLOGIE

- 10.1 Die Sterne in Bewegung
- 10.2 Das kosmologische Prinzip
- 10.3 Gekrümmt oder nicht?
- 10.4 Die Expansion des Universums
- 10.5 Der Blick in die Vergangenheit
- 10.6 Was wir vom Universum sehen
- 10.7 Die Entwicklung des Universums die kosmische Hintergrundstrahlung



- 1. Wie wir einen zeitlichen Verlauf sehen
- 2. Was wir sehen

Licht, das aus großer Entfernung kommt, ist "rotverschoben".

Vorgänge, die wir in großer Entfernung beobachten, erscheinen uns zeitlich gestreckt.



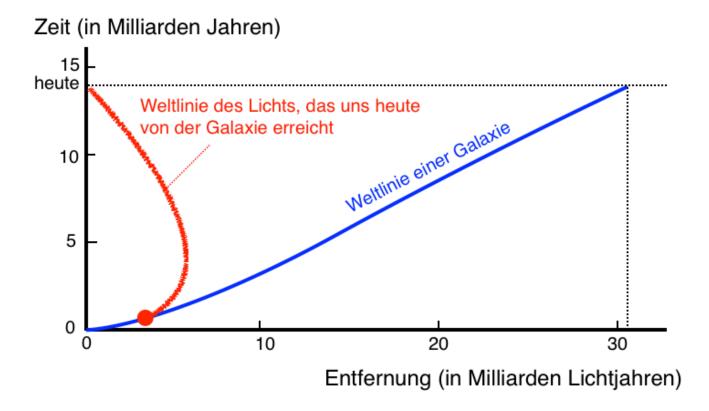
#### 1. Wie wir einen zeitlichen Verlauf sehen





- 1. Wie wir einen zeitlichen Verlauf sehen
- 2. Was wir sehen





An der *c*-Grenze (14,2 Milliarden Lichtjahre) ist die Abstandsänderung gleich der Grenzgeschwindigkeit *c*.

Was jenseits vom Ereignishorizont passiert kann man auch in der Zukunft nicht sehen.



#### 10 KOSMOLOGIE

- 10.1 Die Sterne in Bewegung
- 10.2 Das kosmologische Prinzip
- 10.3 Gekrümmt oder nicht?
- 10.4 Die Expansion des Universums
- 10.5 Der Blick in die Vergangenheit
- 10.6 Was wir vom Universum sehen
- 10.7 Die Entwicklung des Universums die kosmische Hintergrundstrahlung



# 10.7 Die Entwicklung des Universums – die kosmische Hintergrundstrahlung

Zeit nach dem Urknall	Temperatur	
10 <sup>-35</sup> s - 10 <sup>-33</sup> s	10 <sup>27</sup> K	Ausdehnung um einen Faktor 10 <sup>50</sup> (inflationäres Universum)
10 <sup>-33</sup> s	10 <sup>25</sup> K	Beginn der Entstehung von Quarks und Gluonen
10 <sup>-6</sup> s	10 <sup>13</sup> K	Beginn der Entstehung von Hadronen: Protonen, Antiprotonen, Neutronen, Antineutronen und andere

Hadronen sind die dominanten Materieteilchen.

10 <sup>-4</sup> s	10 <sup>12</sup> K	Protonen reagieren mit Antiprotonen, Neutronen mit Antineutronen. Es bleibt eine kleine Zahl von Protonen und Neutronen übrig. Der Überschuss von Materie gegenüber Antimaterie beträgt ein Milliardstel.
		, and the setting to the mineraction

Leptonen (Elektronen, Antielektronen und andere) sind die dominanten Materieteilchen.



10.7 Die Entwicklung des Universums – die kosmische Hintergrundstrahlung

Die kosmische Hintergrundstrahlung wurde etwa 400 000 Jahre nach dem Urknall emittiert.



# Ende

