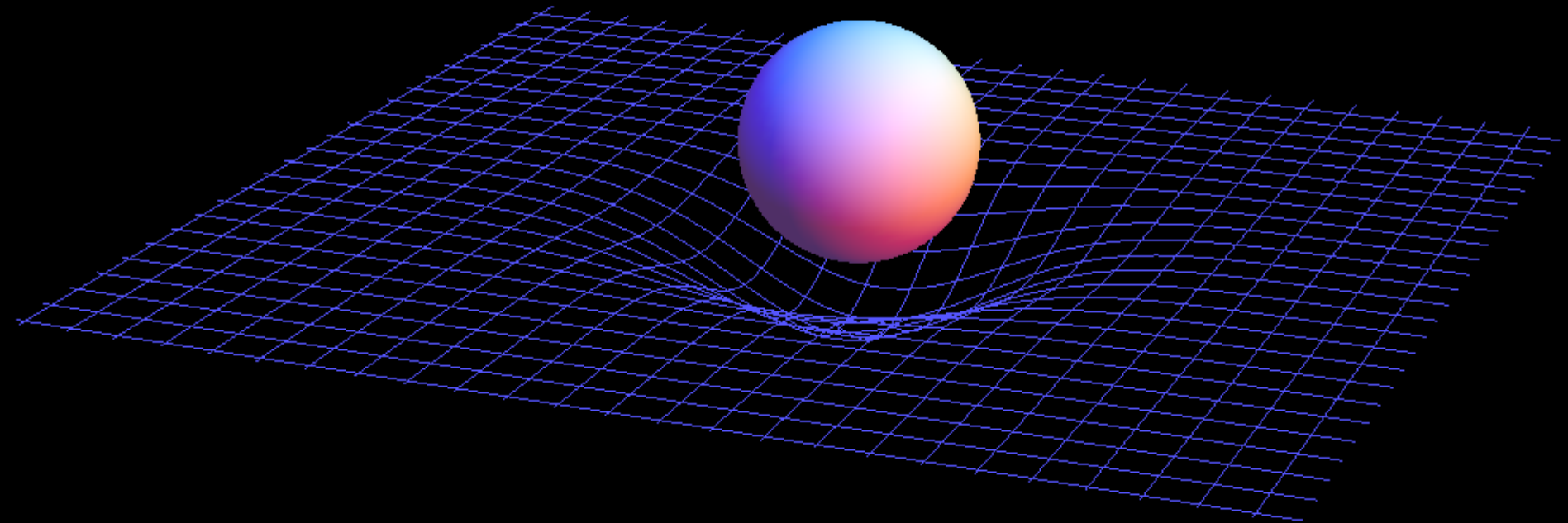


Gravitationstheorie: nach Newton und nach Einstein

Franz Embacher
Fakultät für Physik
der Universität Wien

Vortrag im Astronomischen Seminar
Kuffner Sternwarte, Wien, 13. April 2015

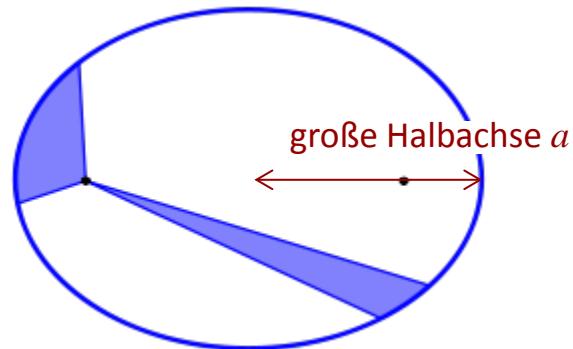


Inhalt

- Kepler: die Gesetze der Planetenbewegung
- Newton: das Gravitationsgesetz und was es alles kann
- Einstein: Spezielle Relativitätstheorie
- Einstein: Allgemeine Relativitätstheorie
- Das Weltbild der Kosmologie

Kepler: die Gesetze der Planetenbewegung

1. Gesetz (1609): Planetenbahn = Ellipse, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht



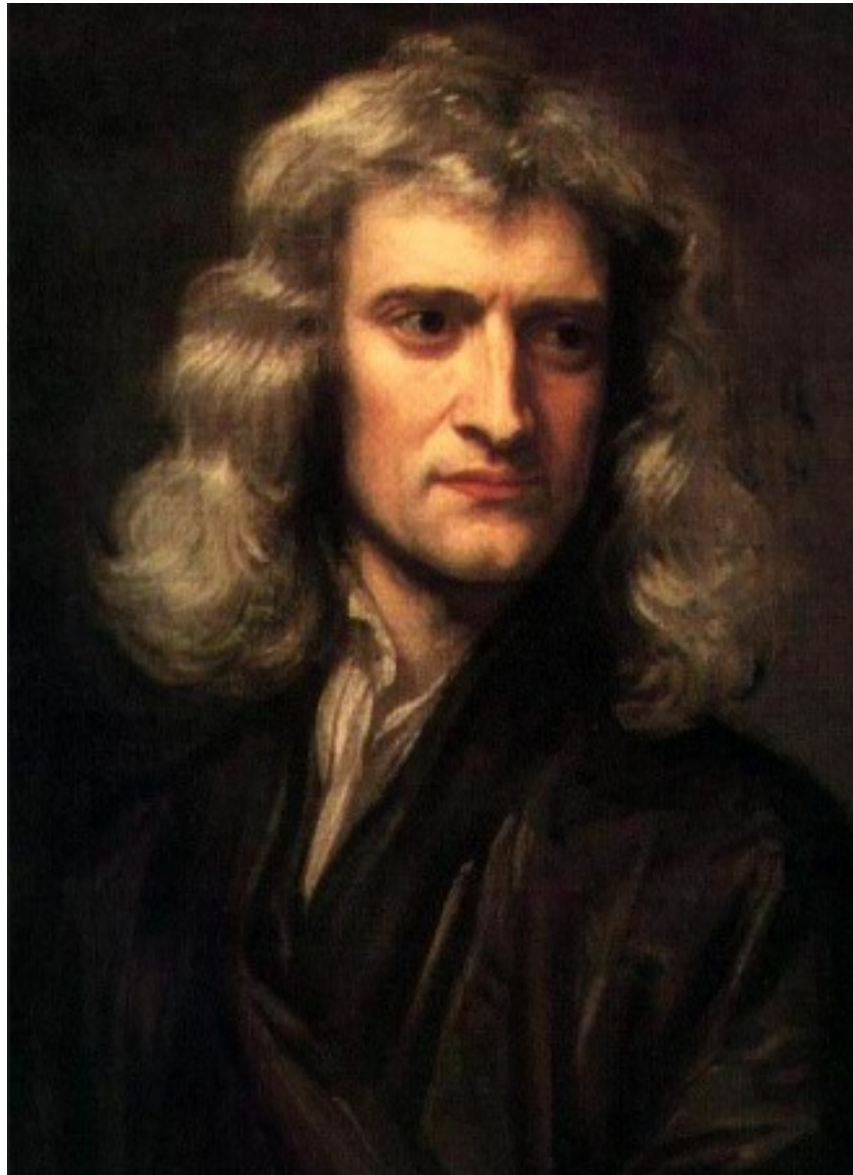
2. Gesetz (1609): Flächensatz

Kepler: die Gesetze der Planetenbewegung

3. Gesetz (1618):

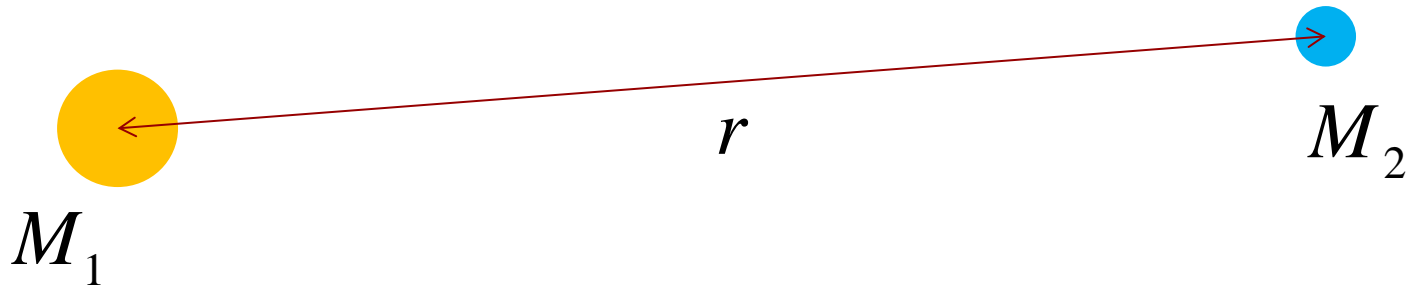
$$\frac{a^3}{T^2} = \text{für alle Planeten gleich!}$$

Newton



Newton

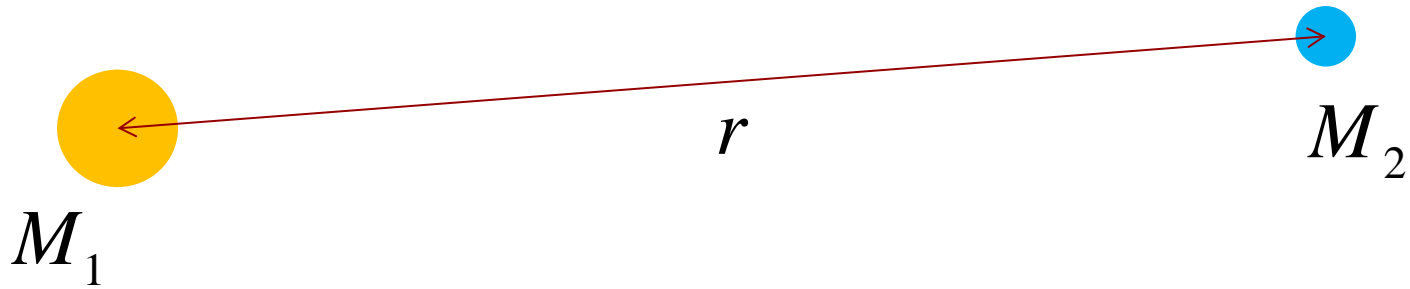
Das **Gravitationsgesetz** (1687):



$$F =$$

Newton

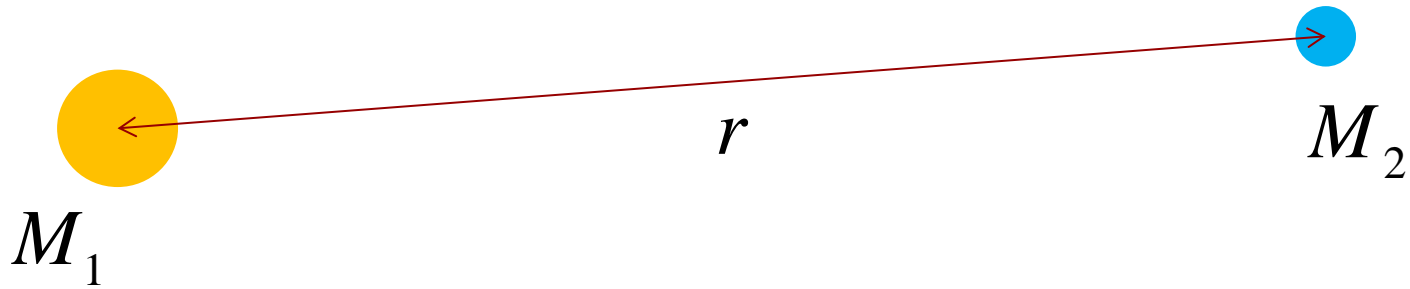
Das **Gravitationsgesetz** (1687):



$$F = \frac{\quad}{r^2}$$

Newton

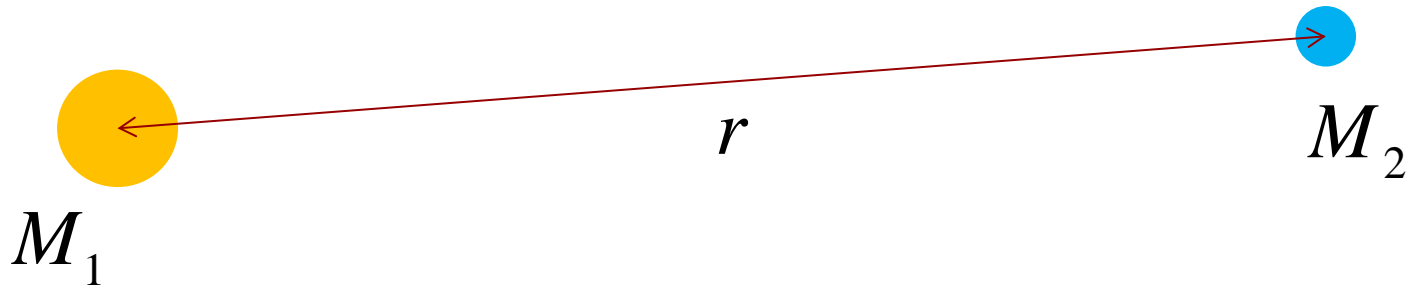
Das **Gravitationsgesetz** (1687):



$$F = \frac{M_1 M_2}{r^2}$$

Newton

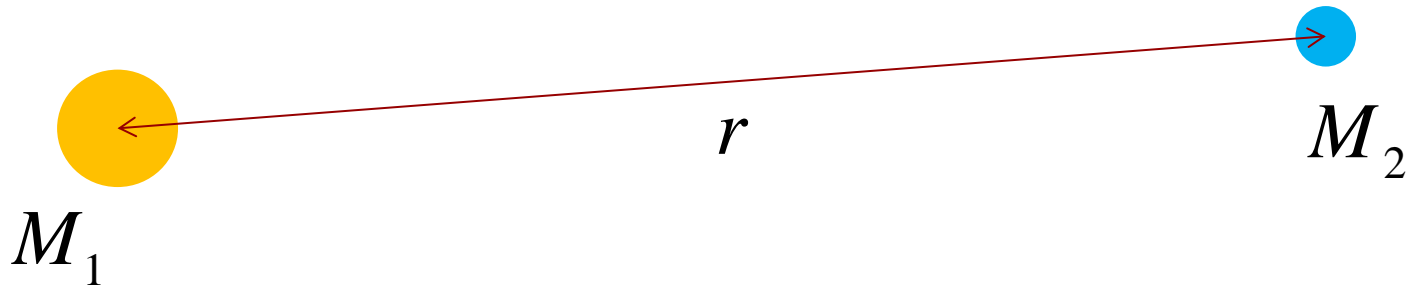
Das **Gravitationsgesetz** (1687):



$$F = - \frac{M_1 M_2}{r^2}$$

Newton

Das **Gravitationsgesetz** (1687):



$$F = -G \frac{M_1 M_2}{r^2}$$

Newton

Zusammenhang zwischen **Kraft** und **Bewegung**:

Aristoteles: **Kraft** = Ursache der **Bewegung**

Newton (1687): **Kraft** = Ursache der
Bewegungsänderung
(Beschleunigung)

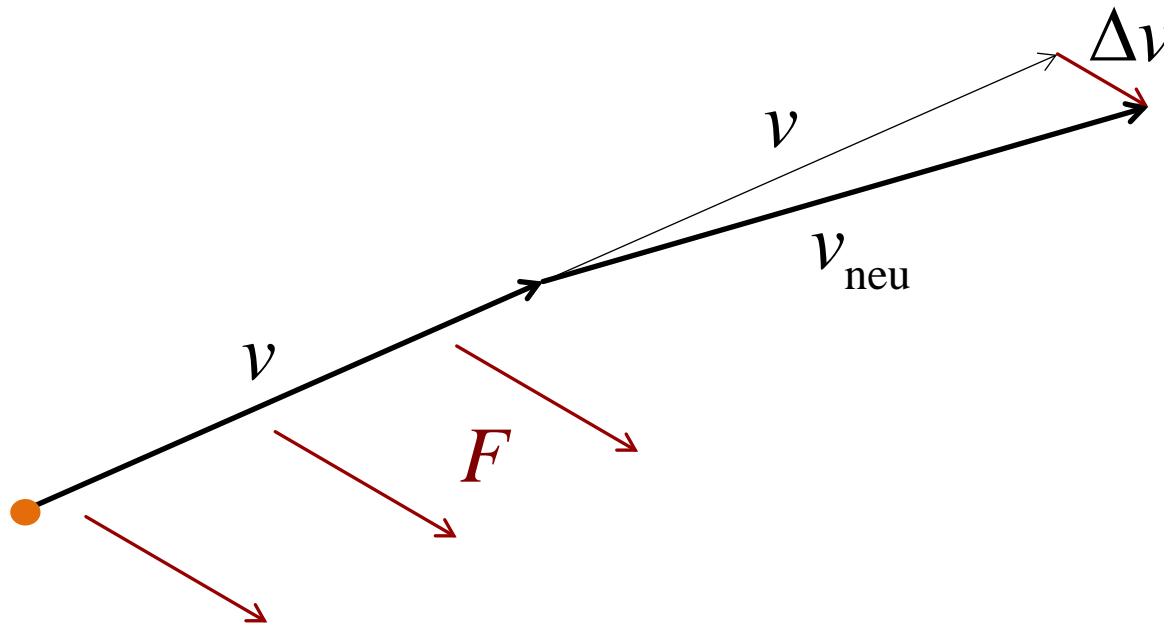
zuvor bereits Galilei (1605): Trägheitssatz
(falls $Kraft = 0 \rightarrow$ gleichförmige Bewegung)

Newton

Kraft = Ursache der Bewegungsänderung (Beschleunigung)

$$\Delta v = \frac{F}{M} \Delta t$$

Grundgesetz
der Mechanik



M beschreibt die Trägheit eines Körpers

Newton

→ Newtonsche Gravitationstheorie + Grundstruktur der „klassischen Mechanik“

Aus der Newtonschen Gravitationstheorie folgen

- Galileis Gesetz der Bewegung fallender oder geworfener Körper auf der Erde
- und die Keplerschen Gesetze!

Newton

→ Newtonsche Gravitationstheorie + Grundstruktur der „klassischen Mechanik“

Aus der Newtonschen Gravitationstheorie folgen

- Galileis Gesetz der Bewegung fallender oder geworfener Körper auf der Erde
- und die Keplerschen Gesetze!

→ Im Himmel und auf der Erde gelten die gleichen physikalischen Gesetze!

Newton

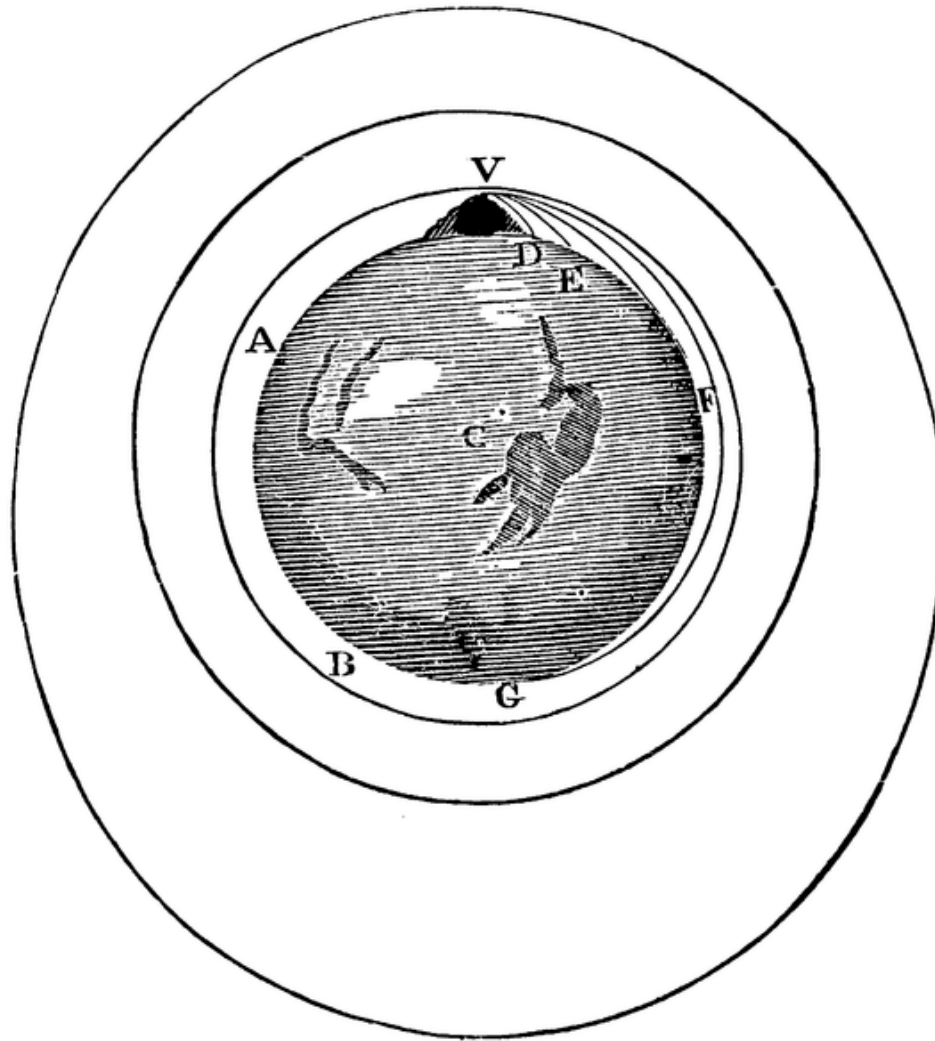


Illustration aus Newtons *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*

Newton

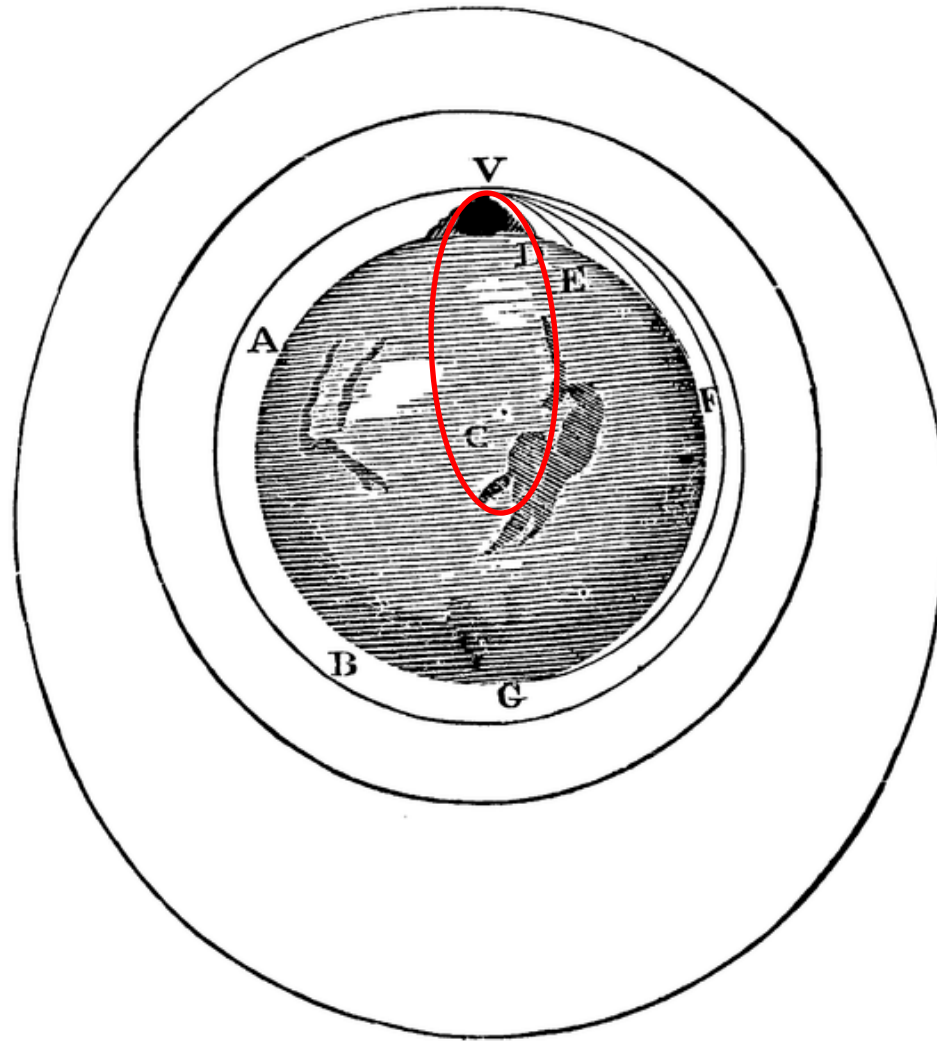


Illustration aus Newtons *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*

Newton

Das **dritte Keplersche Gesetz** wird durch die Newtonsche Theorie vervollständigt:

Kepler:

$$\frac{a^3}{T^2} = \text{für alle Planeten gleich}$$

Newton:

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{GM}{4\pi^2}$$

wobei

$$M = M_{\text{Sonne}} + M_{\text{Planet}} \approx M_{\text{Sonne}}$$

Einstein



Einstein

Einstein (1905): Spezielle Relativitätstheorie

- Ätherdriftexperimente (Michelson und Morley, ab 1881): Der „Äther“ kann nicht nachgewiesen werden. Die Lichtgeschwindigkeit c scheint von der Richtung der Lichtausbreitung und von der Jahreszeit unabhängig zu sein.
- Einstein, 2 Postulate:
 - **Relativitätsprinzip** :Alle („inertialen“) Bewegungszustände von Beobachtern sind gleichberechtigt.
 - Die **Lichtgeschwindigkeit** (im Vakuum) ist eine **universelle Konstante**.

Einstein

Folgerungen der Speziellen Relativitätstheorie:

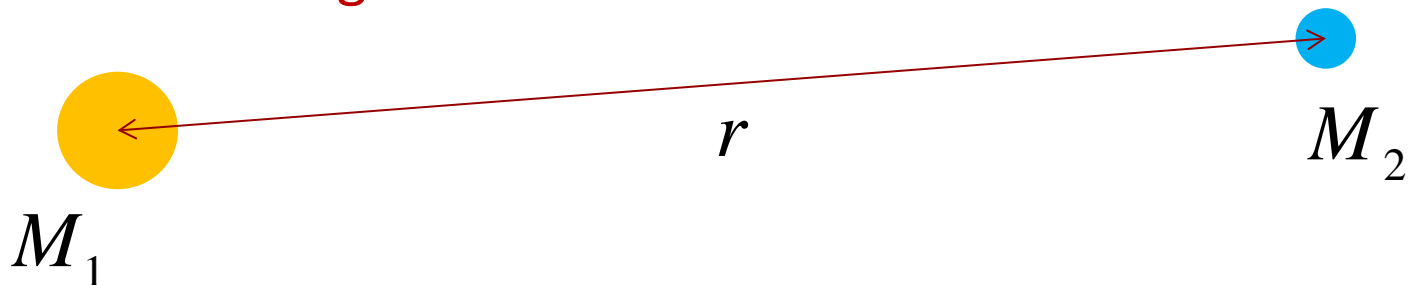
- Relativität der Gleichzeitigkeit, Raumzeit-Effekte („Bewegte Uhren gehen langsamer“, „bewegte Körper sind kürzer“, Zwillingsparadoxon,...).
- Konzept der Raumzeit (Minkowski, 1908)
- Lichtgeschwindigkeit als oberste Grenze für Bewegungen und Signale!

Einstein

Folgerungen der Speziellen Relativitätstheorie:

- Relativität der Gleichzeitigkeit, Raumzeit-Effekte („Bewegte Uhren gehen langsamer“, „bewegte Körper sind kürzer“, Zwillingsparadoxon,...).
- Konzept der Raumzeit (Minkowski, 1908)
- Lichtgeschwindigkeit als oberste Grenze für Bewegungen und Signale!

→ Die Newtonsche Gravitationstheorie ist mit der SRT nicht verträglich!



Einstein

Auf dem Weg zur Allgemeinen Relativitätstheorie:

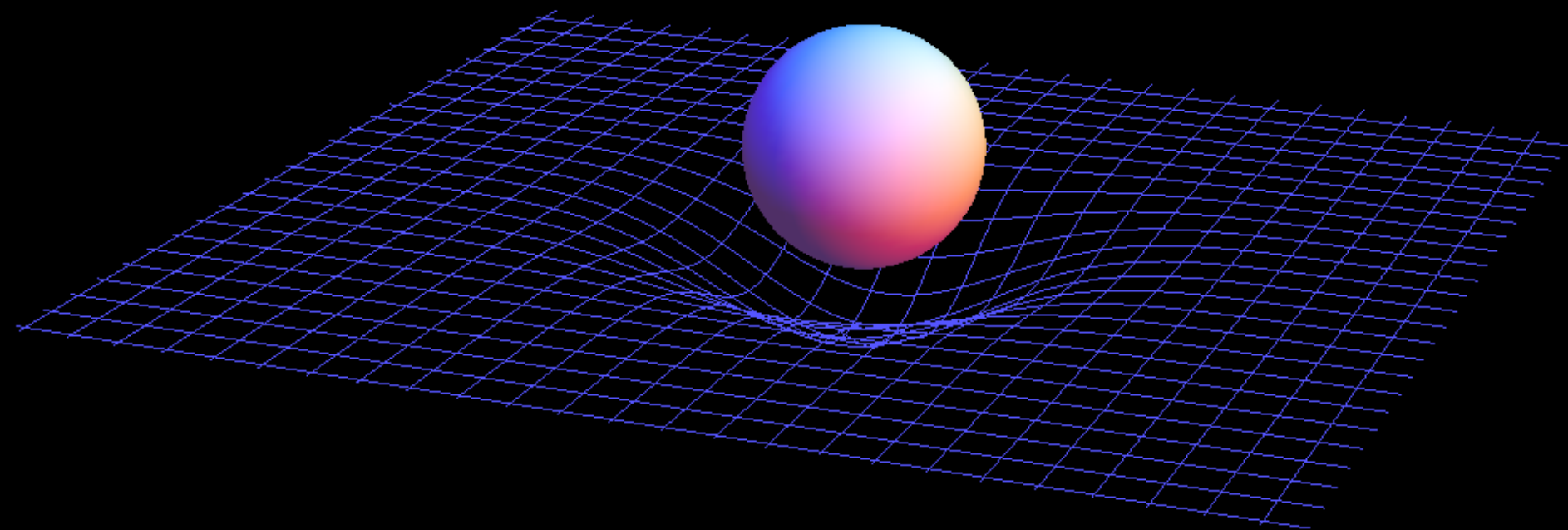
- Universalität der Gravitation: Alle Körper fallen gleich schnell („träge Masse“ = „schwere Masse“)
- Äquivalenzprinzip (1907) ★
 - Die Gravitation kann „lokal wegtransformiert“ werden!
- Idee der **gekrümmten Raumzeit!**

Einstein

Allgemeine Relativitätstheorie (1915):

- Gravitation als Ausdruck der Raumzeit-Krümmung!
 - „Lokal“ (für frei fallende Beobachter in kleinen Raumzeitbereichen) gilt die **SRT**.
 - Analogie: Eine gekrümmten Fläche sieht „lokal“ (in kleinen Raumbereichen) **flach** aus.
- **Feldgleichungen**: „Materie krümmt die Raumzeit“.
- **Bewegungsgleichungen**: Materie „spürt“ die Raumzeit-Krümmung (ähnlich wie eine rollende Kugel auf einer glatten Tischdecke eine Delle spürt).

Einstein



Einstein

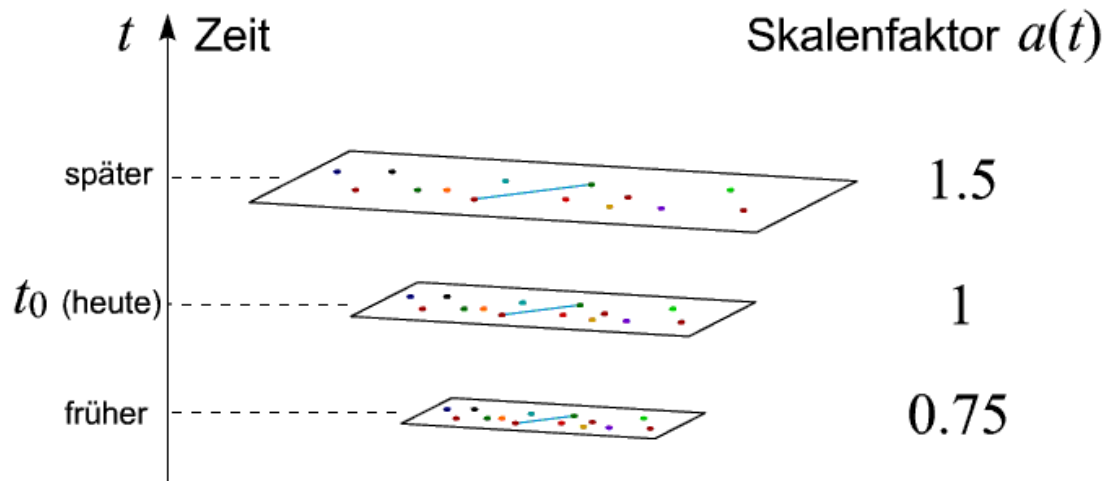
Effekte der Allgemeinen Relativitätstheorie:

- Rotverschiebung im Gravitationsfeld
- Lichtablenkung durch schwere Massen ★ , Einstein-Ring ★
- Korrektur der Planetenbewegungen (Periheldrehung)
- Korrektur der Lichtlaufzeiten
- Effekte in der Nähe schwerer (Himmels)Körper:
 - Uhren und Zeiten im Gravitationsfeld ★
 - Maßstäbe und Längen in Gravitationsfeld ★
 - Trichtermodell ★
- Schwarze Löcher:
 - inwiefern „schwarz“? ★ Konformes Diagramm ★
- Weiße Zwerge und Neutronensterne
- GPS
- Thirring-Lense-Effekt ★

Kosmologie

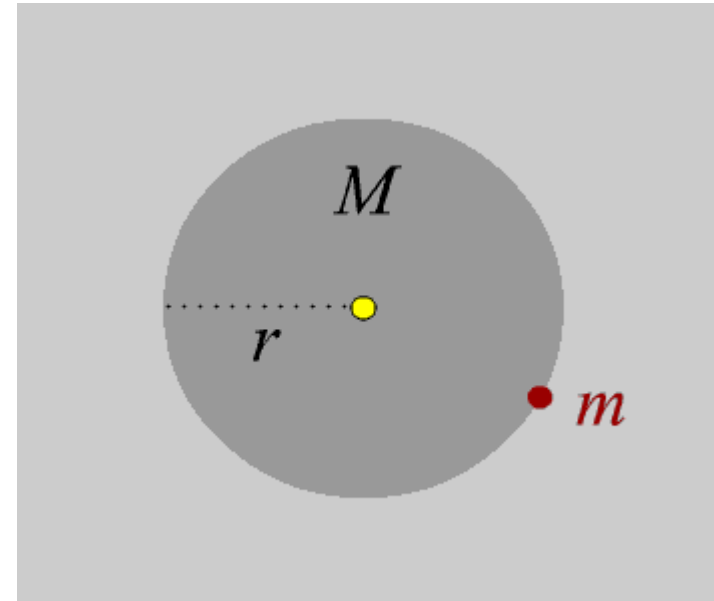
Gravitation ist über große Distanzen die stärkste Kraft → zuständig für eine Theorie des Universums „als Ganzes“ ist (u.a.) die ART!

- Kosmologisches Prinzip
- Expandierendes Universum ★, Gummimodell, Luftballonmodell, Urknall, Skalenfaktor, Hubble-Gesetz



Kosmologie

- Newtonsche „Herleitung“
der Expansion des
Universums



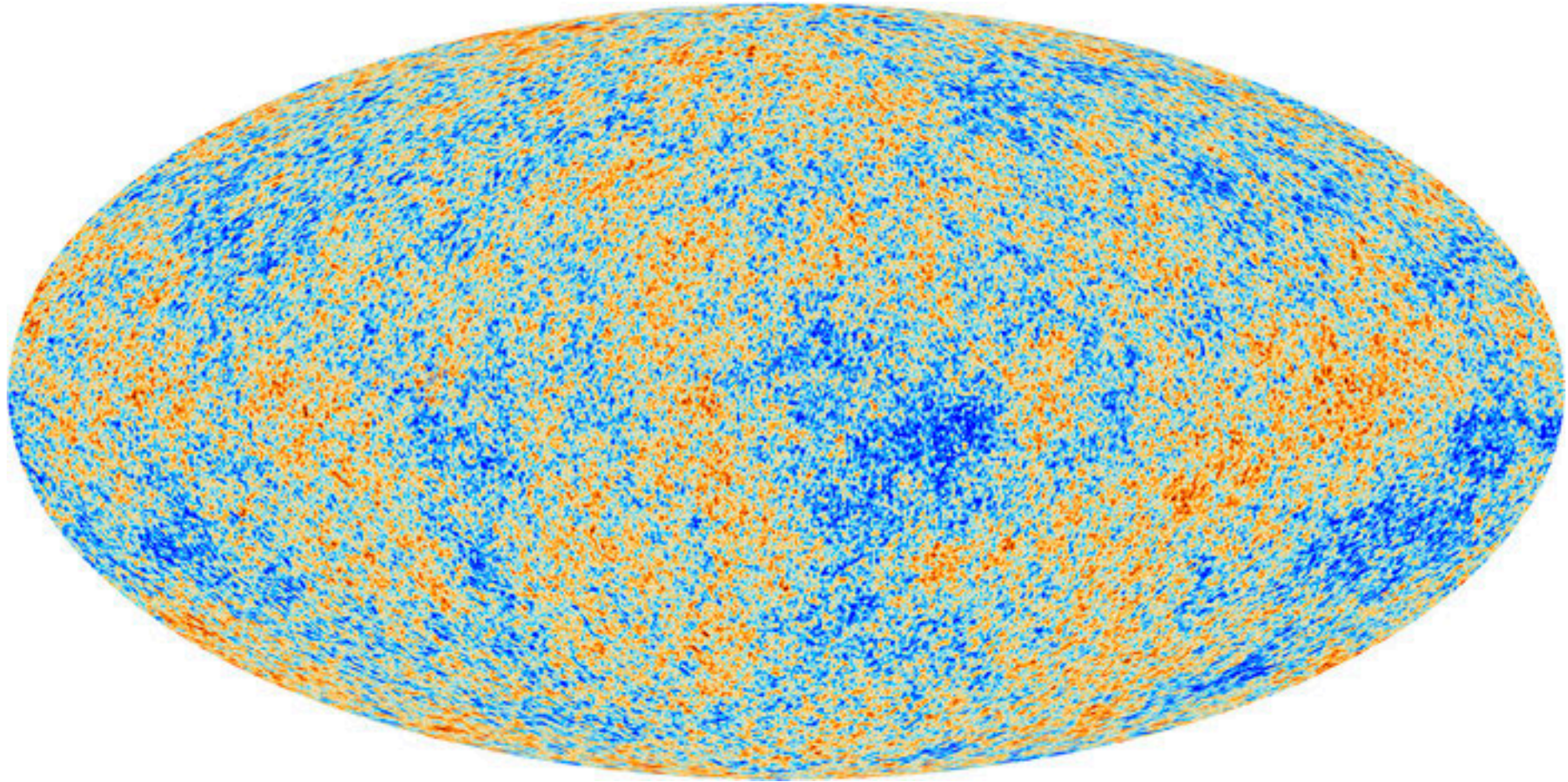
- Probleme des „alten“ Standardmodells:
 - Horizontenproblem ★
 - konformes Diagramm ★
 - Flachheitsproblem

Kosmologie

Das (heutige) **Weltbild der Kosmologie**:

- **Inflationäre Phase** im sehr frühen Universum zur Lösung des Flachheits- und Horizontenproblems? ★
- Thermische Geschichte des Universums und **kosmische Hintergrundstrahlung** (CMB, Penzias und Wilson, 1964)
- **Dunkle Materie** und Dichtefluktuationen (COBE, WMAP, Planck)
- **Dunkle Energie** (kosmologische Konstante), beschleunigte Expansion des Universums

Kosmologie

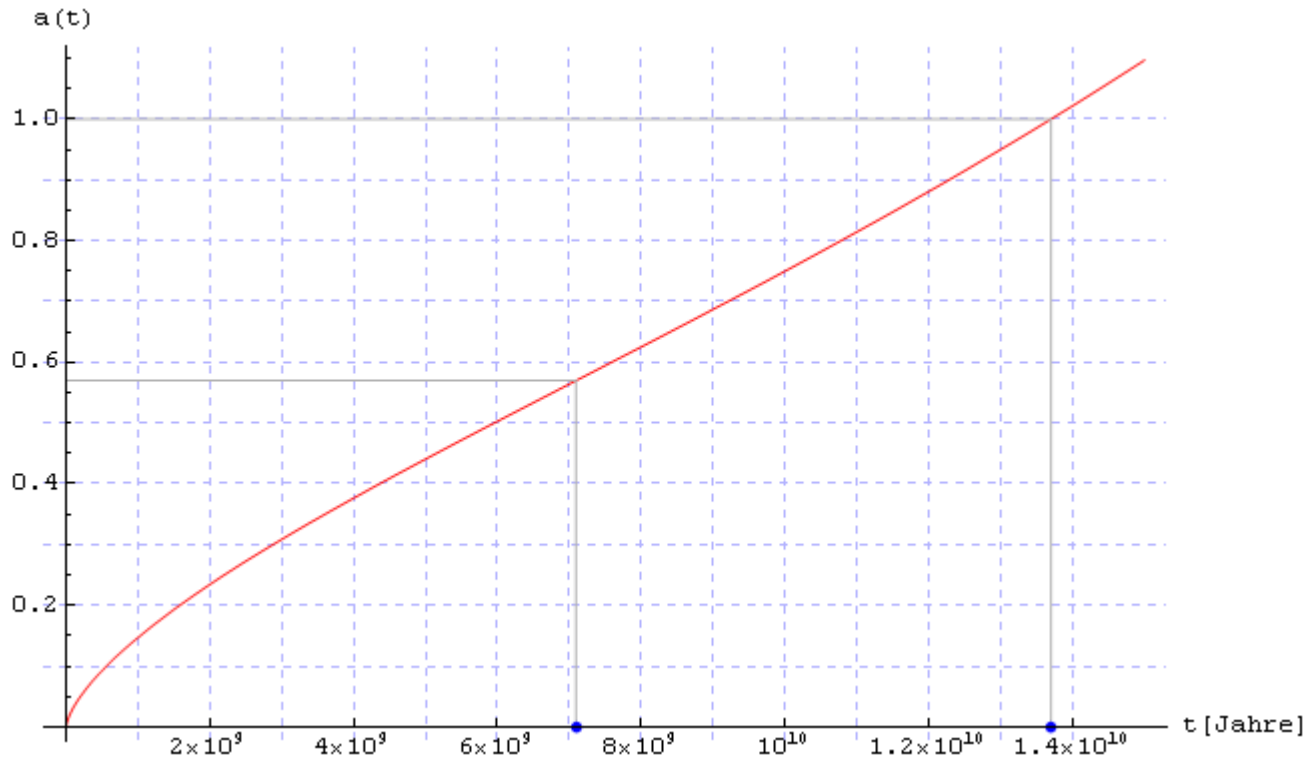


Planck CMB

Kosmologie

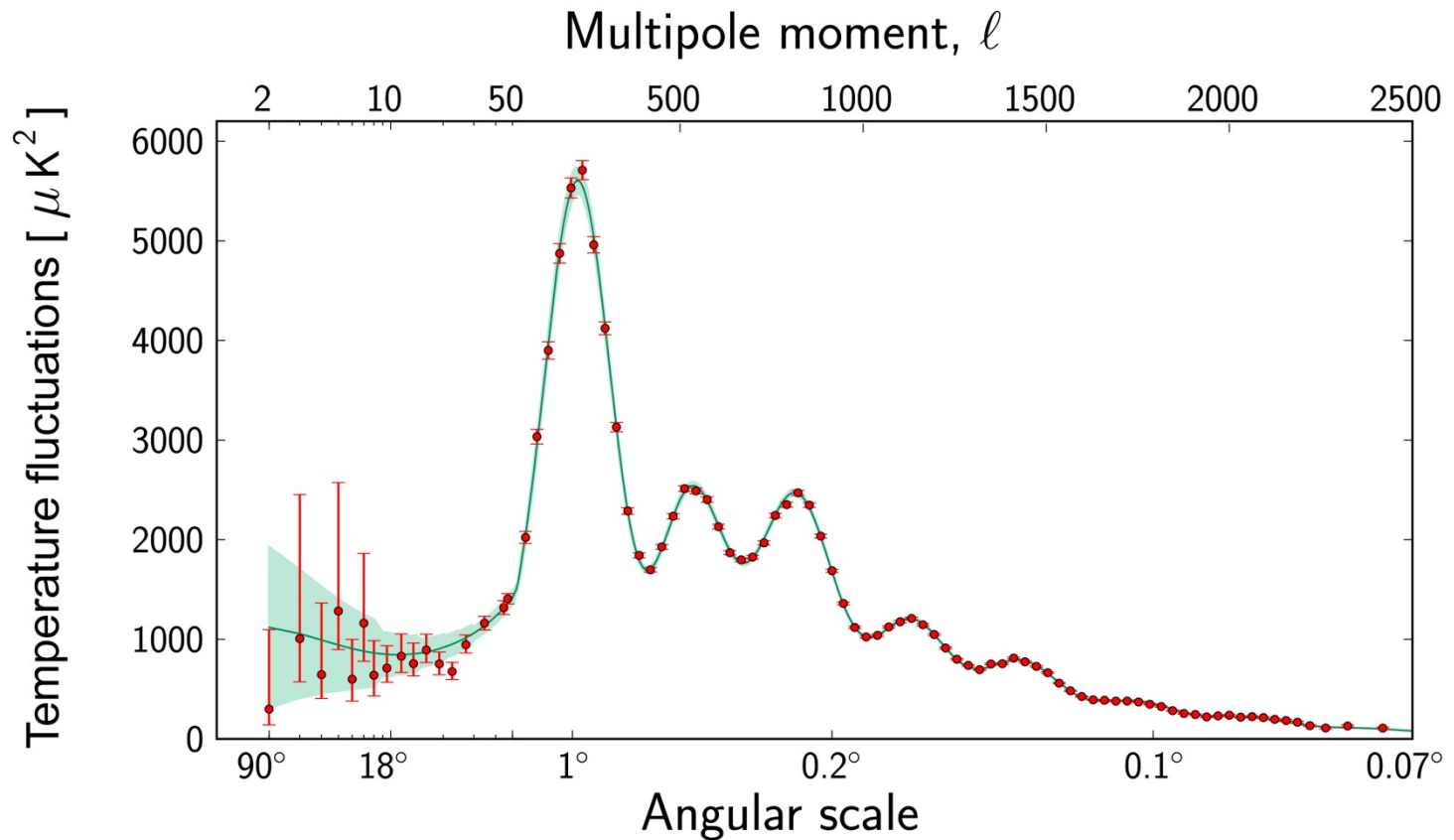
Das (heutige) Weltbild der Kosmologie:

- **Dunkle Energie (kosmologische Konstante)**, beschleunigte Expansion des Universums



Kosmologie

Zukunftsperspektive: genauere Auflösung des CMB



Planck Leistungsspektrum der CMB

Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

Diese Präsentation
finden Sie am Web unter

http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/Rel/Gravitationstheorie_Newton_Einstein/