

# Astronomie

## Präsentation

Robert Bröckling

University of Paderborn

9. Dezember 2010

# Teil I

## Einführung

# Inhalt

## 1 Allgemeines

# Inhalt

- 1 Allgemeines
- 2 Geschichte der Astronomie

# Inhalt

- 1 Allgemeines
- 2 Geschichte der Astronomie
- 3 Das Sonnensystem

# Allgemeines

# Was ist Astronomie?

Astronomie ist die Wissenschaft von den Gestirnen. Sie untersucht mit naturwissenschaftlichen Mitteln die Eigenschaften der Objekte (Himmelskörper) im Universum:

# Was ist Astronomie?

Astronomie ist die Wissenschaft von den **Gestirnen**. Sie untersucht mit naturwissenschaftlichen Mitteln die Eigenschaften der Objekte (Himmelskörper) im Universum:

# Was ist Astronomie?

Astronomie ist die Wissenschaft von den **Gestirnen**. Sie untersucht mit naturwissenschaftlichen Mitteln die **Eigenschaften der Objekte (Himmelskörper) im Universum**:

# Was ist Astronomie?

Astronomie ist die Wissenschaft von den **Gestirnen**. Sie untersucht mit naturwissenschaftlichen Mitteln die **Eigenschaften der Objekte (Himmelskörper) im Universum**:

- ▶ Planeten

# Was ist Astronomie?

Astronomie ist die Wissenschaft von den **Gestirnen**. Sie untersucht mit naturwissenschaftlichen Mitteln die **Eigenschaften der Objekte (Himmelskörper) im Universum**:

- ▶ Planeten
- ▶ Monde

# Was ist Astronomie?

Astronomie ist die Wissenschaft von den **Gestirnen**. Sie untersucht mit naturwissenschaftlichen Mitteln die **Eigenschaften der Objekte (Himmelskörper) im Universum**:

- ▶ Planeten
- ▶ Monde
- ▶ Sterne einschließlich der Sonne

# Was ist Astronomie?

Astronomie ist die Wissenschaft von den **Gestirnen**. Sie untersucht mit naturwissenschaftlichen Mitteln die **Eigenschaften der Objekte (Himmelskörper) im Universum**:

- ▶ Planeten
- ▶ Monde
- ▶ Sterne einschließlich der Sonne
- ▶ Sternenhaufen

# Was ist Astronomie?

Astronomie ist die Wissenschaft von den **Gestirnen**. Sie untersucht mit naturwissenschaftlichen Mitteln die **Eigenschaften der Objekte (Himmelskörper) im Universum**:

- ▶ Planeten
- ▶ Monde
- ▶ Sterne einschließlich der Sonne
- ▶ Sternenhaufen
- ▶ Galaxien und Galaxienhaufen

# Was ist Astronomie?

Ebenfalls untersucht die Astronomie

# Was ist Astronomie?

Ebenfalls untersucht die Astronomie

- ▶ die Eigenschaften der interstellaren Materie und der im Weltall auftretenden Strahlung

# Was ist Astronomie?

Ebenfalls untersucht die Astronomie

- ▶ die Eigenschaften der interstellaren Materie und der im Weltall auftretenden Strahlung

Darüber hinaus strebt sie nach einem Verständnis des Universums

# Was ist Astronomie?

Ebenfalls untersucht die Astronomie

- ▶ die Eigenschaften der interstellaren Materie und der im Weltall auftretenden Strahlung

Darüber hinaus strebt sie nach einem Verständnis des Universums

- ▶ als Ganzes,

# Was ist Astronomie?

Ebenfalls untersucht die Astronomie

- ▶ die Eigenschaften der interstellaren Materie und der im Weltall auftretenden Strahlung

Darüber hinaus strebt sie nach einem Verständnis des Universums

- ▶ als Ganzes,
- ▶ hinsichtlich seiner Entstehung,

# Was ist Astronomie?

Ebenfalls untersucht die Astronomie

- ▶ die Eigenschaften der interstellaren Materie und der im Weltall auftretenden Strahlung

Darüber hinaus strebt sie nach einem Verständnis des Universums

- ▶ als Ganzes,
- ▶ hinsichtlich seiner Entstehung,
- ▶ und bezüglich seines Aufbaus.

# Grundlegende und verwandte Disziplinen

# Grundlegende und verwandte Disziplinen

- ▶ Kosmologie

# Grundlegende und verwandte Disziplinen

- ▶ Kosmologie
- ▶ Spezielle und allgemeine Relativitätstheorie

# Grundlegende und verwandte Disziplinen

- ▶ Kosmologie
- ▶ Spezielle und allgemeine Relativitätstheorie
- ▶ klassische und relativistische Astrophysik

## Grundlegende und verwandte Disziplinen

- ▶ Kosmologie
- ▶ Spezielle und allgemeine Relativitätstheorie
- ▶ klassische und relativistische Astrophysik
- ▶ Exoplanetologie

# Grundlegende und verwandte Disziplinen

- ▶ Kosmologie
- ▶ Spezielle und allgemeine Relativitätstheorie
- ▶ klassische und relativistische Astrophysik
- ▶ Exoplanetologie
- ▶ Stellarastronomie

Astronomie ist  
**nicht**  
mit Astrologie zu verwechseln (griech. astrología, „Sternenkunde“), die in  
der Antike die gleiche Wortbedeutung wie Astronomie hatte.

# Das Teleskop

Das wichtigste Instrument in der Astronomie ist das Teleskop.

# Das Teleskop

Das wichtigste Instrument in der Astronomie ist das Teleskop.



# Hubble Weltraumteleskop

Das Hubble-Weltraumteleskop (engl. **Hubble Space Telescope**, kurz **HST**) ist ein Weltraumteleskop für sichtbares Licht, Ultraviolett- und Infrarotstrahlung, das die Erde in einer Höhe von 575 Kilometern innerhalb von 96 Minuten einmal umkreist. Das Teleskop entstand aus der Zusammenarbeit der NASA und der ESA.

Das HST wurde am 24. April 1990 mit der Space-Shuttle-Mission STS-31 gestartet und am nächsten Tag aus dem Frachtraum der Discovery ausgesetzt.

# Hubble Weltraumteleskop

Das Hubble-Weltraumteleskop (engl. **Hubble Space Telescope**, kurz **HST**) ist ein Weltraumteleskop für sichtbares Licht, Ultraviolett- und Infrarotstrahlung, das die Erde in einer Höhe von 575 Kilometern innerhalb von 96 Minuten einmal umkreist. Das Teleskop entstand aus der Zusammenarbeit der NASA und der ESA.

Das HST wurde am 24. April 1990 mit der Space-Shuttle-Mission STS-31 gestartet und am nächsten Tag aus dem Frachtraum der Discovery ausgesetzt.



Abbildung 2: Hubble Space Telescope

# HST-Aufnahmen



Abbildung 3: HST Aufnahmen von IC 2944 und NGC 2440

# Radioteleskope

Ein Radioteleskop ist ein Messgerät, mit dem astronomische Objekte beobachtet werden, die elektromagnetische Wellen im Spektralbereich der Radiowellen ausstrahlen, z.B. Quasare und Schwarze Löcher.

# Radioteleskope

Ein Radioteleskop ist ein Messgerät, mit dem astronomische Objekte beobachtet werden, die elektromagnetische Wellen im Spektralbereich der Radiowellen ausstrahlen, z.B. Quasare und Schwarze Löcher.



Abbildung 4: 100m-Radioteleskop Effelsberg

# Astronomie in der Vorzeit bis Heute

# Vorzeit

Die Astronomie ist eine der ältesten Wissenschaften der Menschheit.

# Vorzeit

Die Astronomie ist eine der ältesten Wissenschaften der Menschheit.

- ▶ In Europa zeugen davon u.a. die Himmelscheibe von Nebra.

# Vorzeit

Die Astronomie ist eine der ältesten Wissenschaften der Menschheit.

- ▶ In Europa zeugen davon u.a. die Himmelscheibe von Nebra.
- ▶ Andere Kulturen, z.B. die Babylonier, Ägypter und Chinesen konnten Ereignisse wie eine Sonnen- und Mondfinsternis berechnen und vorhersagen.

# Vorzeit

Die Astronomie ist eine der ältesten Wissenschaften der Menschheit.

- ▶ In Europa zeugen davon u.a. die Himmelscheibe von Nebra.
- ▶ Andere Kulturen, z.B. die Babylonier, Ägypter und Chinesen konnten Ereignisse wie eine Sonnen- und Mondfinsternis berechnen und vorhersagen.
- ▶ Überall auf der Welt finden sich weitere Zeugnisse dafür, dass sich die Menschen mit der Stellung und den Bewegungen der Gestirne beschäftigten.

# Antike

In der Antike wurde die Astronomie weiter ausgebaut:

# Antike

In der Antike wurde die Atronomie weiter ausgebaut:

- ▶ Vor allem ägyptische, griechische und römische Naturforscher konnten immer genauere Berechnungen anstellen.

# Antike

In der Antike wurde die Astronomie weiter ausgebaut:

- ▶ Vor allem ägyptische, griechische und römische Naturforscher konnten immer genauere Berechnungen anstellen.
- ▶ Der griechische Gelehrte Claudius Ptolemäus entwickelte 140 n.Chr. in Alexandria das erste Bild unseres Sonnensystems.

## Antike

In der Antike wurde die Astronomie weiter ausgebaut:

- ▶ Vor allem ägyptische, griechische und römische Naturforscher konnten immer genauere Berechnungen anstellen.
- ▶ Der griechische Gelehrte Claudius Ptolemäus entwickelte 140 n.Chr. in Alexandria das erste Bild unseres Sonnensystems. Die Erde steht dort im Mittelpunkt und wird auf Kreisbahnen von dem Mond und der Sonne umrundet. (Geozentrisches Weltbild)

## Antike

In der Antike wurde die Astronomie weiter ausgebaut:

- ▶ Vor allem ägyptische, griechische und römische Naturforscher konnten immer genauere Berechnungen anstellen.
- ▶ Der griechische Gelehrte Claudius Ptolemäus entwickelte 140 n.Chr. in Alexandria das erste Bild unseres Sonnensystems. Die Erde steht dort im Mittelpunkt und wird auf Kreisbahnen von dem Mond und der Sonne umrundet. (Geozentrisches Weltbild)  
Die weiteren, damals bekannten Planeten bewegten sich auf komplizierten Bahnen, sog. Epizyklen, weiter außen.

# Antike

- ▶ Die Wissenschaften waren damals sehr eng mit der Philosophie, bzw. Metaphysik verknüpft.

# Antike

- ▶ Die Wissenschaften waren damals sehr eng mit der Philosophie, bzw. Metaphysik verknüpft.
- ▶ Die Vorstellung, dass sich die Erde, als Krone der Schöpfung, im Mittelpunkt des Alls befindet war unumstößlich.

# Antike

- ▶ Die Wissenschaften waren damals sehr eng mit der Philosophie, bzw. Metaphysik verknüpft.
- ▶ Die Vorstellung, dass sich die Erde, als Krone der Schöpfung, im Mittelpunkt des Alls befindet war unumstößlich.
- ▶ Das Ptolemäische Weltbild wurde über einen Zeitraum von 1400 Jahren hinweg akzeptiert.

## 15. - 16. Jahrhundert

Nikolaus Kopernikus entwickelte zu Beginn des 16. Jahrhunderts ein wesentlich einfacheres und besseres Weltbild:

## 15. - 16. Jahrhundert

Nikolaus Kopernikus entwickelte zu Beginn des 16. Jahrhunderts ein wesentlich einfacheres und besseres Weltbild:

- ▶ Die Sonne steht im Mittelpunkt des Sonnensystems. Die anderen Planeten bewegen sich auf Kreisbahnen um die Sonne herum. (heliocentrisches Weltbild)

## 15. - 16. Jahrhundert

Nikolaus Kopernikus entwickelte zu Beginn des 16. Jahrhunderts ein wesentlich einfacheres und besseres Weltbild:

- ▶ Die Sonne steht im Mittelpunkt des Sonnensystems. Die anderen Planeten bewegen sich auf Kreisbahnen um die Sonne herum. (heliocentrisches Weltbild)
- ▶ Aus Angst vor der Verfolgung durch den Papst erschien sein Werk „De revolutionibus“ erst in seinem Todesjahr 1543.

## 15. - 16. Jahrhundert

Nikolaus Kopernikus entwickelte zu Beginn des 16. Jahrhunderts ein wesentlich einfacheres und besseres Weltbild:

- ▶ Die Sonne steht im Mittelpunkt des Sonnensystems. Die anderen Planeten bewegen sich auf Kreisbahnen um die Sonne herum. (heliocentrisches Weltbild)
- ▶ Aus Angst vor der Verfolgung durch den Papst erschien sein Werk „De revolutionibus“ erst in seinem Todesjahr 1543.
- ▶ Kurios: Das Buch war dem damaligen Papst Paul III. gewidmet. Dieser verbot das Buch; schließlich war, nach Ansicht der damaligen Theologen, der Mensch und damit auch die Erde Krone und Mittelpunkt der Schöpfung.

## 16. - 19. Jahrhundert

- ▶ Die Erfindung des Fernrohrs eröffnete Astronomen völlig neue Einblicke in das Universum.

## 16. - 19. Jahrhundert

- ▶ Die Erfindung des Fernrohrs eröffnete Astronomen völlig neue Einblicke in das Universum.
- ▶ Galileo Galilei entdeckt mit seinem Fernrohr Sonnenflecken, Mondgebirge, Saturnringe und einige Jupitermonde

## 16. - 19. Jahrhundert

- ▶ Die Erfindung des Fernrohrs eröffnete Astronomen völlig neue Einblicke in das Universum.
- ▶ Galileo Galilei entdeckt mit seinem Fernrohr Sonnenflecken, Mondgebirge, Saturnringe und einige Jupitermonde
- ▶ Galilei stützte mit seinen Beobachtungen und Berechnungen Kopernikus' Theorie eines heliozentrischen Weltbildes.

## 16. - 19. Jahrhundert

- ▶ 1633 wurde gegen Galilei das Inquisitionstribunal eröffnet. Dies endete am 22. Juni 1633 mit dem berühmten, gegen die eigene Überzeugung geleisteten Widerruf seiner Theorien.

## 16. - 19. Jahrhundert

- ▶ 1633 wurde gegen Galilei das Inquisitionstribunal eröffnet. Dies endete am 22. Juni 1633 mit dem berühmten, gegen die eigene Überzeugung geleisteten Widerruf seiner Theorien.
- ▶ Der Vatikan nahm erst 1993 offiziell seine Vorwürfe gegen Galilei zurück und Galilei wurde rehabilitiert.

## 16. - 19. Jahrhundert

- ▶ 1633 wurde gegen Galilei das Inquisitionstribunal eröffnet. Dies endete am 22. Juni 1633 mit dem berühmten, gegen die eigene Überzeugung geleisteten Widerruf seiner Theorien.
- ▶ Der Vatikan nahm erst 1993 offiziell seine Vorwürfe gegen Galilei zurück und Galilei wurde rehabilitiert.
- ▶ Der Astronom Tycho Brahe untersuchte gegen Ende des 16. Jahrhunderts die Planetenbewegungen erneut.

## 16. - 19. Jahrhundert

- ▶ 1633 wurde gegen Galilei das Inquisitionstribunal eröffnet. Dies endete am 22. Juni 1633 mit dem berühmten, gegen die eigene Überzeugung geleisteten Widerruf seiner Theorien.
- ▶ Der Vatikan nahm erst 1993 offiziell seine Vorwürfe gegen Galilei zurück und Galilei wurde rehabilitiert.
- ▶ Der Astronom Tycho Brahe untersuchte gegen Ende des 16. Jahrhunderts die Planetenbewegungen erneut.

## 16. - 19. Jahrhundert

- ▶ 1633 wurde gegen Galilei das Inquisitionstribunal eröffnet. Dies endete am 22. Juni 1633 mit dem berühmten, gegen die eigene Überzeugung geleisteten Widerruf seiner Theorien.
- ▶ Der Vatikan nahm erst 1993 offiziell seine Vorwürfe gegen Galilei zurück und Galilei wurde rehabilitiert.
- ▶ Der Astronom Tycho Brahe untersuchte gegen Ende des 16. Jahrhunderts die Planetenbewegungen erneut. Seine Beobachtungen waren wesentlich genauer als die bis dahin bekannten.

## 16. - 19. Jahrhundert

- ▶ Johannes Kepler fand unter Verwendung der Daten von Brahe, nach vielem Probieren heraus, dass die Planetenbahnen nicht Kreise sondern Ellipsen sind.

## 16. - 19. Jahrhundert

- ▶ Johannes Kepler fand unter Verwendung der Daten von Brahe, nach vielem Probieren heraus, dass die Planetenbahnen nicht Kreise sondern Ellipsen sind.
- ▶ Kepler stellte eine mathematische Beziehung zwischen Umlaufdauer und durchschnittlicher Entfernung zur Sonne her. Seine Ergebnisse drückte er in drei empirischen Gesetzen aus, den Keplerschen Gesetzen.

## 16. - 19. Jahrhundert

- ▶ Johannes Kepler fand unter Verwendung der Daten von Brahe, nach vielem Probieren heraus, dass die Planetenbahnen nicht Kreise sondern Ellipsen sind.
- ▶ Kepler stellte eine mathematische Beziehung zwischen Umlaufdauer und durchschnittlicher Entfernung zur Sonne her. Seine Ergebnisse drückte er in drei empirischen Gesetzen aus, den Keplerschen Gesetzen.
- ▶ Die Keplerschen Gesetze bildeten die Grundlage von Isaak Newtons Gravitationsgesetz.

## 16. - 19. Jahrhundert

- ▶ Johannes Kepler fand unter Verwendung der Daten von Brahe, nach vielem Probieren heraus, dass die Planetenbahnen nicht Kreise sondern Ellipsen sind.
- ▶ Kepler stellte eine mathematische Beziehung zwischen Umlaufdauer und durchschnittlicher Entfernung zur Sonne her. Seine Ergebnisse drückte er in drei empirischen Gesetzen aus, den Keplerschen Gesetzen.
- ▶ Die Keplerschen Gesetze bildeten die Grundlage von Isaak Newtons Gravitationsgesetz.
- ▶ Im Jahre 1687 veröffentlichte Isaak Newton einer der wichtigsten naturwissenschaftlichen Werke der Menschheitsgeschichte. Das Werk *Mathematical Principles of Natural Philosophy* besser bekannt unter dem lateinischen Titel *Philosophiae naturalis principia mathematica* (kurz: *Principia*)

## 16. - 19. Jahrhundert

- ▶ In der *Principia* begründet er die klassische Physik und stellt als erster Mensch, aufgrund des damaligen Wissens, den gesamten Zusammenhang der Physik, vor allem der Mechanik, dar.

## 16. - 19. Jahrhundert

- ▶ In der *Principia* begründet er die klassische Physik und stellt als erster Mensch, aufgrund des damaligen Wissens, den gesamten Zusammenhang der Physik, vor allem der Mechanik, dar.
- ▶ Seine Erkenntnisse haben heute noch in der klassischen, nichtrelativistischen Physik volle Geltung.

## 16. - 19. Jahrhundert

- ▶ In der *Principia* begründet er die klassische Physik und stellt als erster Mensch, aufgrund des damaligen Wissens, den gesamten Zusammenhang der Physik, vor allem der Mechanik, dar.
- ▶ Seine Erkenntnisse haben heute noch in der klassischen, nichtrelativistischen Physik volle Geltung.
- ▶ Friedrich Herschel beobachtet als erster Mensch ab 1780 Galaxien außerhalb der Milchstraße

# Neuzeit

## Neuzeit

- ▶ 1905 formulierte Albert Einstein die *Spezielle Relativitätstheorie*

## Neuzeit

- ▶ 1905 formulierte Albert Einstein die *Spezielle Relativitätstheorie*
- ▶ Darin wird u.a. die bekannteste Formel der Welt entwickelt, die Energie-Masse-Äquivalenz:

$$E_0 = m_0 c^2 \quad (1)$$

## Neuzeit

- ▶ 1905 formulierte Albert Einstein die *Spezielle Relativitätstheorie*
- ▶ Darin wird u.a. die bekannteste Formel der Welt entwickelt, die Energie-Masse-Äquivalenz:

$$E_0 = m_0 c^2 \quad (1)$$

- ▶ 1916 entwickelte Albert Einstein die *allgemeine Relativitätstheorie*

## Neuzeit

- ▶ 1905 formulierte Albert Einstein die *Spezielle Relativitätstheorie*
- ▶ Darin wird u.a. die bekannteste Formel der Welt entwickelt, die Energie-Masse-Äquivalenz:

$$E_0 = m_0 c^2 \quad (1)$$

- ▶ 1916 entwickelte Albert Einstein die *allgemeine Relativitätstheorie*
- ▶ Die allgemeine Relativitätstheorie verallgemeinert die spezielle Relativitätstheorie auf beschleunigte Bezugssysteme und Gravitation.

## Neuzeit

- ▶ 1905 formulierte Albert Einstein die *Spezielle Relativitätstheorie*
- ▶ Darin wird u.a. die bekannteste Formel der Welt entwickelt, die Energie-Masse-Äquivalenz:

$$E_0 = m_0 c^2 \quad (1)$$

- ▶ 1916 entwickelte Albert Einstein die *allgemeine Relativitätstheorie*
- ▶ Die allgemeine Relativitätstheorie verallgemeinert die spezielle Relativitätstheorie auf beschleunigte Bezugssysteme und Gravitation.
- ▶ Ergebnisse aus der allgemeinen Relativitätstheorie sind u.a. die Gravitationsrotverschiebung und die Vorhersage der Existenz von Schwarzen Löchern.

## Neuzeit

- ▶ In den 20er Jahren des 20. Jahrhunderts entdeckt Edwin Hubble die Rotverschiebung der meisten Galaxien.

## Neuzeit

- ▶ In den 20er Jahren des 20. Jahrhunderts entdeckt Edwin Hubble die Rotverschiebung der meisten Galaxien.
- ▶ Damit entdeckt er die Expansion des Universums

## Neuzeit

- ▶ In den 20er Jahren des 20. Jahrhunderts entdeckt Edwin Hubble die Rotverschiebung der meisten Galaxien.
- ▶ Damit entdeckt er die Expansion des Universums
- ▶ Die Quantenmechanik hält Einzug in die Astronomie

## Neuzeit

- ▶ In den 20er Jahren des 20. Jahrhunderts entdeckt Edwin Hubble die Rotverschiebung der meisten Galaxien.
- ▶ Damit entdeckt er die Expansion des Universums
- ▶ Die Quantenmechanik hält Einzug in die Astronomie
- ▶ Durch den enormen technischen Fortschritt können immer größere und bessere Beobachtungsinstrumente hergestellt werden.

## Neuzeit

- ▶ In den 20er Jahren des 20. Jahrhunderts entdeckt Edwin Hubble die Rotverschiebung der meisten Galaxien.
- ▶ Damit entdeckt er die Expansion des Universums
- ▶ Die Quantenmechanik hält Einzug in die Astronomie
- ▶ Durch den enormen technischen Fortschritt können immer größere und bessere Beobachtungsinstrumente hergestellt werden.
- ▶ Das Wissen um das Universum steigt täglich. Eine Fülle von neuen Theorien werden entwickelt und immer neue Entdeckungen verifizieren oder falsifizieren diese.

## Neuzeit

- ▶ In den 20er Jahren des 20. Jahrhunderts entdeckt Edwin Hubble die Rotverschiebung der meisten Galaxien.
- ▶ Damit entdeckt er die Expansion des Universums
- ▶ Die Quantenmechanik hält Einzug in die Astronomie
- ▶ Durch den enormen technischen Fortschritt können immer größere und bessere Beobachtungsinstrumente hergestellt werden.
- ▶ Das Wissen um das Universum steigt täglich. Eine Fülle von neuen Theorien werden entwickelt und immer neue Entdeckungen verifizieren oder falsifizieren diese.
- ▶ Aufgrund dieser Fülle an Wissen ist es heute schwierig den Überblick zu behalten.

# Das Sonnensystem

# Die Sonne

Die Sonne (lat. „Sol“; gr. „Helios“) ist der **Stern** im Zentrum unseres Planetensystems.

# Die Sonne

Die Sonne (lat. „Sol“; gr. „Helios“) ist der **Stern** im Zentrum unseres Planetensystems.

Innerhalb der Milchstraße ist die Sonne ein „durchschnittlicher“, zu den **Gelben Zwergen** gehörender Stern.

# Die Sonne

Die Sonne (lat. „Sol“; gr. „Helios“) ist der **Stern** im Zentrum unseres Planetensystems.

Innerhalb der Milchstraße ist die Sonne ein „durchschnittlicher“, zu den **Gelben Zwergen** gehörender Stern.



Abbildung 5: Größenvergleich zwischen Erde [links] und Sonne [rechts]

# Merkur

Der Merkur ist mit einem Durchmesser von knapp 4800 km der kleinste und mit einer durchschnittlichen Sonnenentfernung von etwa 58 Millionen km der gleichzeitig sonnennächste Planet unseres Sonnensystems.

# Merkur

Der Merkur ist mit einem Durchmesser von knapp 4800 km der kleinste und mit einer durchschnittlichen Sonnenentfernung von etwa 58 Millionen km der gleichzeitig sonnennächste Planet unseres Sonnensystems. Er hat keine Monde.

# Merkur

Der Merkur ist mit einem Durchmesser von knapp 4800 km der kleinste und mit einer durchschnittlichen Sonnenentfernung von etwa 58 Millionen km der gleichzeitig sonnennächste Planet unseres Sonnensystems. Er hat keine Monde.



Abbildung 6: Größenvergleich zwischen Merkur [links] und Erde [rechts]

# Venus

Die Venus ist mit 108 Millionen km Sonnenentfernung der zweite Planet im Sonnensystem.

# Venus

Die Venus ist mit 108 Millionen km Sonnenentfernung der zweite Planet im Sonnensystem. Die Venus hat ebenfalls keinen Mond.

# Venus

Die Venus ist mit 108 Millionen km Sonnenentfernung der zweite Planet im Sonnensystem. Die Venus hat ebenfalls keinen Mond. Die Venus ist der Erde sehr ähnlich.

# Venus

Die Venus ist mit 108 Millionen km Sonnenentfernung der zweite Planet im Sonnensystem. Die Venus hat ebenfalls keinen Mond. Die Venus ist der Erde sehr ähnlich. Die Oberfläche ist sehr heiß (ca. 464 °C)

# Venus

Die Venus ist mit 108 Millionen km Sonnenentfernung der zweite Planet im Sonnensystem. Die Venus hat ebenfalls keinen Mond. Die Venus ist der Erde sehr ähnlich. Die Oberfläche ist sehr heiß (ca. 464 °C)



Abbildung 7: Größenvergleich zwischen Venus [links] und Erde [rechts]

# Erde

Die Erde ist der dritte Planet im Sonnensystem.

# Erde

Die Erde ist der dritte Planet im Sonnensystem.  
Sie ist ca. 150 Millionen km von der Sonne entfernt.

# Erde

Die Erde ist der dritte Planet im Sonnensystem.  
Sie ist ca. 150 Millionen km von der Sonne entfernt.  
Die Durchschnittliche Temperatur beträgt 15°C.

# Erde

Die Erde ist der dritte Planet im Sonnensystem.  
Sie ist ca. 150 Millionen km von der Sonne entfernt.  
Die Durchschnittliche Temperatur beträgt 15°C.  
Die Erde hat einen Mond.

# Erde

Die Erde ist der dritte Planet im Sonnensystem.  
Sie ist ca. 150 Millionen km von der Sonne entfernt.  
Die Durchschnittliche Temperatur beträgt 15°C.  
Die Erde hat einen Mond.



Abbildung 8: Die Erde, aufgenommen von Apollo 17 am 7. Dezember 1972.

# Mars

Der Mars ist, von der Sonne aus gesehen, der vierte Planet in unserem Sonnensystem.

# Mars

Der Mars ist, von der Sonne aus gesehen, der vierte Planet in unserem Sonnensystem.

Er ist etwa halb so groß wie die Erde und rund 228 Millionen km von der Sonne entfernt.

# Mars

Der Mars ist, von der Sonne aus gesehen, der vierte Planet in unserem Sonnensystem.

Er ist etwa halb so groß wie die Erde und rund 228 Millionen km von der Sonne entfernt.

Der Mars hat zwei kleine Monde: Phobos und Deimos.

# Mars

Der Mars ist, von der Sonne aus gesehen, der vierte Planet in unserem Sonnensystem.

Er ist etwa halb so groß wie die Erde und rund 228 Millionen km von der Sonne entfernt.

Der Mars hat zwei kleine Monde: Phobos und Deimos.

Die Temperatur beträgt  $-133^{\circ}\text{C}$  bis  $+27^{\circ}\text{C}$ .

# Mars

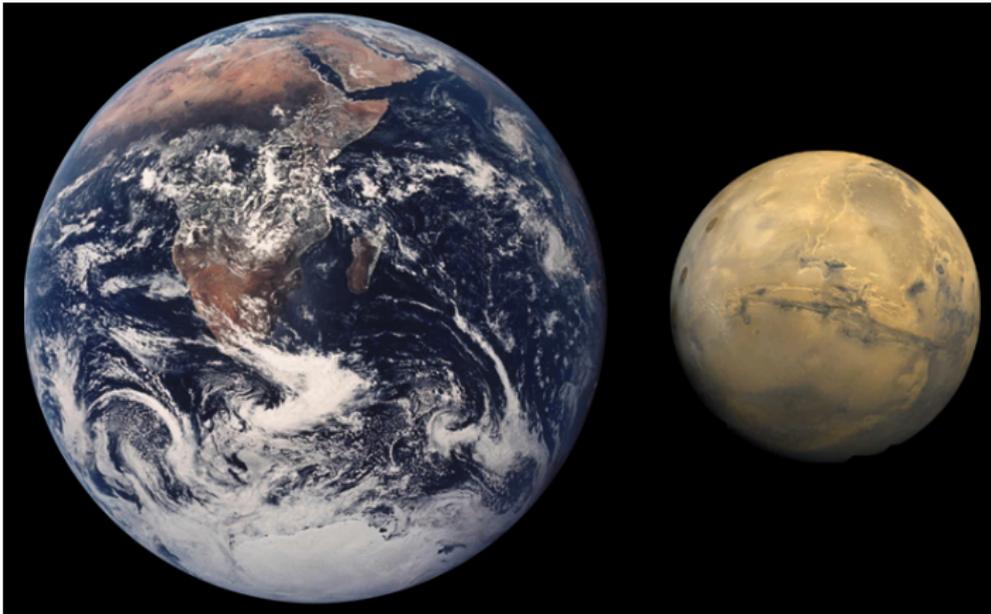


Abbildung 9: Größenvergleich zwischen Erde [links] und Mars [rechts]

# Jupiter

Jupiter ist mit einem Äquatordurchmesser von 142.800 km der größte Planet des Sonnensystems.

# Jupiter

Jupiter ist mit einem Äquatordurchmesser von 142.800 km der größte Planet des Sonnensystems.

Er ist mit einer durchschnittlichen Entfernung von 778 Millionen km von der Sonne aus gesehen der fünfte Planet.

# Jupiter

Jupiter ist mit einem Äquatordurchmesser von 142.800 km der größte Planet des Sonnensystems.

Er ist mit einer durchschnittlichen Entfernung von 778 Millionen km von der Sonne aus gesehen der fünfte Planet.

Aufgrund seiner chemischen Zusammensetzung zählt er zu den Gasplaneten („Gasriesen“) und hat keine sichtbare feste Oberfläche.

# Jupiter

Jupiter ist mit einem Äquatordurchmesser von 142.800 km der größte Planet des Sonnensystems.

Er ist mit einer durchschnittlichen Entfernung von 778 Millionen km von der Sonne aus gesehen der fünfte Planet.

Aufgrund seiner chemischen Zusammensetzung zählt er zu den Gasplaneten („Gasriesen“) und hat keine sichtbare feste Oberfläche. Seine Temperatur beträgt  $-108^{\circ}\text{C}$ .

# Jupiter

Jupiter ist mit einem Äquatordurchmesser von 142.800 km der größte Planet des Sonnensystems.

Er ist mit einer durchschnittlichen Entfernung von 778 Millionen km von der Sonne aus gesehen der fünfte Planet.

Aufgrund seiner chemischen Zusammensetzung zählt er zu den Gasplaneten („Gasriesen“) und hat keine sichtbare feste Oberfläche. Seine Temperatur beträgt  $-108^{\circ}\text{C}$ .

Der Jupiter hat vier große Monde: Ganymed, Kallisto, Europa und Io. Weiterhin umkreisen den Jupiter etwa 59 weitere kleinere Monde.

# Jupiter

Jupiter ist mit einem Äquatordurchmesser von 142.800 km der größte Planet des Sonnensystems.

Er ist mit einer durchschnittlichen Entfernung von 778 Millionen km von der Sonne aus gesehen der fünfte Planet.

Aufgrund seiner chemischen Zusammensetzung zählt er zu den Gasplaneten („Gasriesen“) und hat keine sichtbare feste Oberfläche. Seine Temperatur beträgt  $-108^{\circ}\text{C}$ .

Der Jupiter hat vier große Monde: Ganymed, Kallisto, Europa und Io. Weiterhin umkreisen den Jupiter etwa 59 weitere kleinere Monde.

Jupiter hat ein sehr dünnes Ringsystem, welches kaum erkennbar ist.

# Jupiter

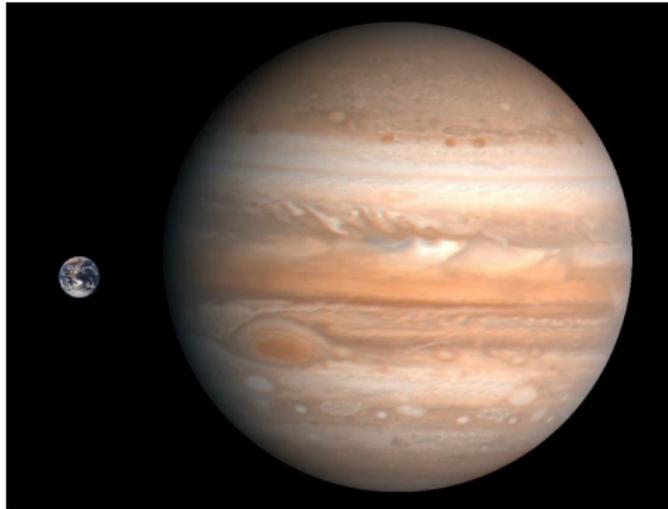


Abbildung 10: Größenvergleich zwischen Erde [links] und Jupiter [rechts]

# Saturn

Der Saturn ist mit einem Durchmesser von etwa 120.500 km der zweitgrößte Planet des Sonnensystems.

# Saturn

Der Saturn ist mit einem Durchmesser von etwa 120.500 km der zweitgrößte Planet des Sonnensystems.

Saturn ist mit einer durchschnittlichen Entfernung zur Sonne von knapp 1,43 Milliarden km der sechste Planet des Sonnensystems.

# Saturn

Der Saturn ist mit einem Durchmesser von etwa 120.500 km der zweitgrößte Planet des Sonnensystems.

Saturn ist mit einer durchschnittlichen Entfernung zur Sonne von knapp 1,43 Milliarden km der sechste Planet des Sonnensystems.

Er ist ein Gasplanet, der zu 97% aus Wasserstoff besteht und von allen Planeten des Sonnensystems die geringste Dichte (im Mittel 0,7 kg/Liter) aufweist.

# Saturn

Der Saturn ist mit einem Durchmesser von etwa 120.500 km der zweitgrößte Planet des Sonnensystems.

Saturn ist mit einer durchschnittlichen Entfernung zur Sonne von knapp 1,43 Milliarden km der sechste Planet des Sonnensystems.

Er ist ein Gasplanet, der zu 97% aus Wasserstoff besteht und von allen Planeten des Sonnensystems die geringste Dichte (im Mittel 0,7 kg/Liter) aufweist.

Von den anderen Planeten hebt sich der Saturn durch seinen besonders ausgeprägten und schon in kleinen Fernrohren sichtbaren Ring ab, der zu großen Teilen aus Wassereis und aus Gesteinsbrocken besteht.

# Saturn

Der Saturn ist mit einem Durchmesser von etwa 120.500 km der zweitgrößte Planet des Sonnensystems.

Saturn ist mit einer durchschnittlichen Entfernung zur Sonne von knapp 1,43 Milliarden km der sechste Planet des Sonnensystems.

Er ist ein Gasplanet, der zu 97% aus Wasserstoff besteht und von allen Planeten des Sonnensystems die geringste Dichte (im Mittel 0,7 kg/Liter) aufweist.

Von den anderen Planeten hebt sich der Saturn durch seinen besonders ausgeprägten und schon in kleinen Fernrohren sichtbaren Ring ab, der zu großen Teilen aus Wassereis und aus Gesteinsbrocken besteht.

Bis einschließlich 2007 wurden 60 Saturnmonde entdeckt, der größte davon ist Titan mit 5150 km Durchmesser.

# Saturn

Der Saturn ist mit einem Durchmesser von etwa 120.500 km der zweitgrößte Planet des Sonnensystems.

Saturn ist mit einer durchschnittlichen Entfernung zur Sonne von knapp 1,43 Milliarden km der sechste Planet des Sonnensystems.

Er ist ein Gasplanet, der zu 97% aus Wasserstoff besteht und von allen Planeten des Sonnensystems die geringste Dichte (im Mittel 0,7 kg/Liter) aufweist.

Von den anderen Planeten hebt sich der Saturn durch seinen besonders ausgeprägten und schon in kleinen Fernrohren sichtbaren Ring ab, der zu großen Teilen aus Wassereis und aus Gesteinsbrocken besteht.

Bis einschließlich 2007 wurden 60 Saturnmonde entdeckt, der größte davon ist Titan mit 5150 km Durchmesser.

Die Temperatur beträgt  $-139^{\circ}\text{C}$ .

# Saturn

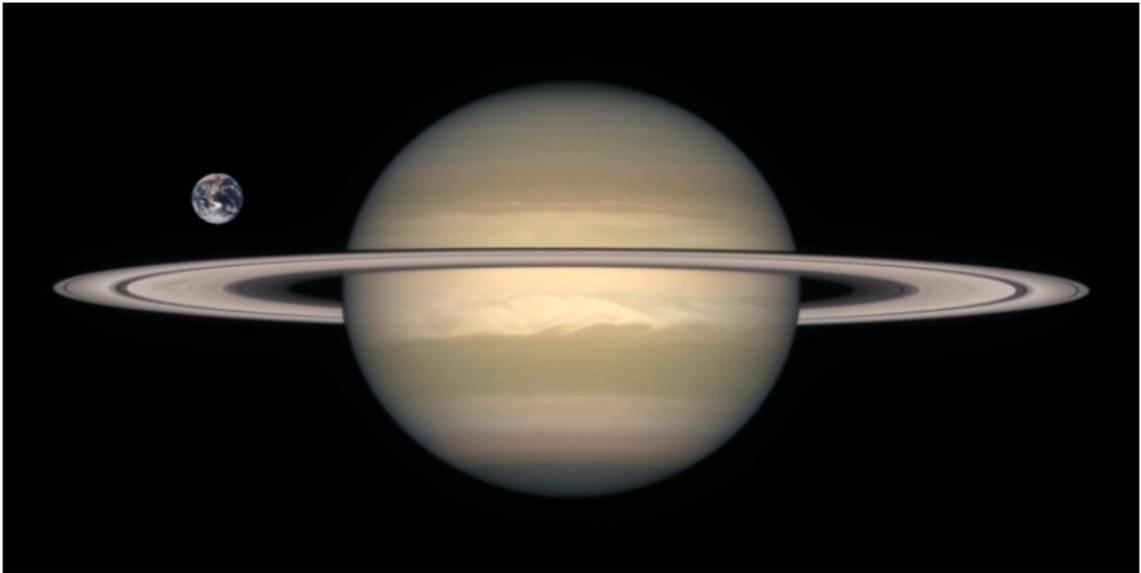


Abbildung 11: Größenvergleich zwischen Erde [links] und Saturn [rechts]

# Uranus

Uranus ist von der Sonne aus mit einer durchschnittlichen Sonnenentfernung von 2.9 Milliarden km der siebte Planet im Sonnensystem.

# Uranus

Uranus ist von der Sonne aus mit einer durchschnittlichen Sonnenentfernung von 2.9 Milliarden km der siebte Planet im Sonnensystem.

Der Gasplanet ist mit einem Durchmesser von über 51.000 km viermal größer als die Erde.

# Uranus

Uranus ist von der Sonne aus mit einer durchschnittlichen Sonnenentfernung von 2.9 Milliarden km der siebte Planet im Sonnensystem.

Der Gasplanet ist mit einem Durchmesser von über 51.000 km viermal größer als die Erde.

Der Uranus ist wie der Saturn von einem Ringsystem umgeben. Dieses ist aber nur mit hohem technischen Aufwand sichtbar.

# Uranus

Uranus ist von der Sonne aus mit einer durchschnittlichen Sonnenentfernung von 2.9 Milliarden km der siebte Planet im Sonnensystem.

Der Gasplanet ist mit einem Durchmesser von über 51.000 km viermal größer als die Erde.

Der Uranus ist wie der Saturn von einem Ringsystem umgeben. Dieses ist aber nur mit hohem technischen Aufwand sichtbar.

Der Uranus hat 27 Monde.

# Uranus

Uranus ist von der Sonne aus mit einer durchschnittlichen Sonnenentfernung von 2.9 Milliarden km der siebte Planet im Sonnensystem.

Der Gasplanet ist mit einem Durchmesser von über 51.000 km viermal größer als die Erde.

Der Uranus ist wie der Saturn von einem Ringsystem umgeben. Dieses ist aber nur mit hohem technischen Aufwand sichtbar.

Der Uranus hat 27 Monde.

Die Temperatur beträgt  $-197^{\circ}\text{C}$ .

# Uranus



Abbildung 12: Größenvergleich zwischen Erde [links] und Uranus [rechts]

# Neptun

Neptun ist von der Sonne aus gezählt mit einer Entfernung von durchschnittlich 4,5 Milliarden km der achte und äußerste Planet im Sonnensystem.

# Neptun

Neptun ist von der Sonne aus gezählt mit einer Entfernung von durchschnittlich 4,5 Milliarden km der achte und äußerste Planet im Sonnensystem.

Dennoch ist er mit einem Durchmesser von fast 50.000 km (4x Erde) nach Uranus der viertgrößte Planet des Sonnensystems.

# Neptun

Neptun ist von der Sonne aus gezählt mit einer Entfernung von durchschnittlich 4,5 Milliarden km der achte und äußerste Planet im Sonnensystem.

Dennoch ist er mit einem Durchmesser von fast 50.000 km (4x Erde) nach Uranus der viertgrößte Planet des Sonnensystems.

Von Neptun sind derzeit 13 Monde bekannt. Der mit Abstand größte unter ihnen ist Triton mit 2700 km Durchmesser.

# Neptun

Neptun ist von der Sonne aus gezählt mit einer Entfernung von durchschnittlich 4,5 Milliarden km der achte und äußerste Planet im Sonnensystem.

Dennoch ist er mit einem Durchmesser von fast 50.000 km (4x Erde) nach Uranus der viertgrößte Planet des Sonnensystems.

Von Neptun sind derzeit 13 Monde bekannt. Der mit Abstand größte unter ihnen ist Triton mit 2700 km Durchmesser.

Die Temperatur beträgt  $-201\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

# Neptun

Neptun ist von der Sonne aus gezählt mit einer Entfernung von durchschnittlich 4,5 Milliarden km der achte und äußerste Planet im Sonnensystem.

Dennoch ist er mit einem Durchmesser von fast 50.000 km (4x Erde) nach Uranus der viertgrößte Planet des Sonnensystems.

Von Neptun sind derzeit 13 Monde bekannt. Der mit Abstand größte unter ihnen ist Triton mit 2700 km Durchmesser.

Die Temperatur beträgt  $-201\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Wie Uranus hat auch Neptun ein, ohne weiteres, nicht sichtbares Ringsystem.

# Neptun



Abbildung 13: Größenvergleich zwischen Erde [links] und Neptun [rechts]

# Monde

Ein Mond ist ein kleiner Himmelskörper, der einen Planeten umkreist.

# Monde

Ein Mond ist ein kleiner Himmelskörper, der einen Planeten umkreist.  
Er sendet, wie die Planeten kein eigenes Licht aus.

# Monde

Ein Mond ist ein kleiner Himmelskörper, der einen Planeten umkreist.  
Er sendet, wie die Planeten kein eigenes Licht aus.  
Der bekannteste Mond ist der Mond der Erde.

# Monde

Ein Mond ist ein kleiner Himmelskörper, der einen Planeten umkreist.  
Er sendet, wie die Planeten kein eigenes Licht aus.  
Der bekannteste Mond ist der Mond der Erde.



Abbildung 14: Größenvergleich zwischen Erde [links] und Mond [rechts]

# Pluto

Pluto ist ein Plutoid, eine Unterklasse von Zwergplaneten, die unsere Sonne jenseits der Neptunbahn umrunden.

# Pluto

Pluto ist ein Plutoid, eine Unterklasse von Zwergplaneten, die unsere Sonne jenseits der Neptunbahn umrunden.

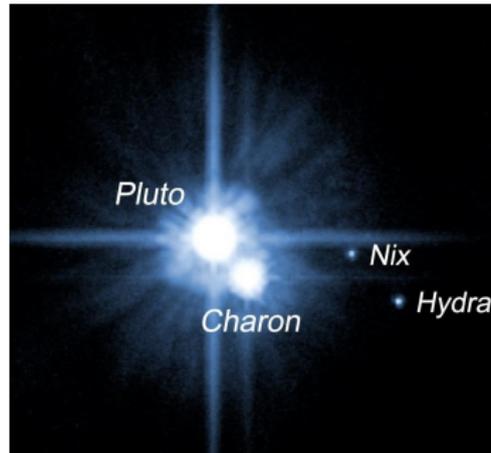


Abbildung 15: Pluto, sein Mond Charon und die beiden neu entdeckten Trabanten Nix und Hydra.

# Plutoide

Weitere bekannte Plutoide sind:

# Plutoide

Weitere bekannte Plutoide sind:

- ▶ Eris



Abbildung 16: Eris

# Plutoide

Weitere bekannte Plutoide sind:

- ▶ Eris
- ▶ Makemake

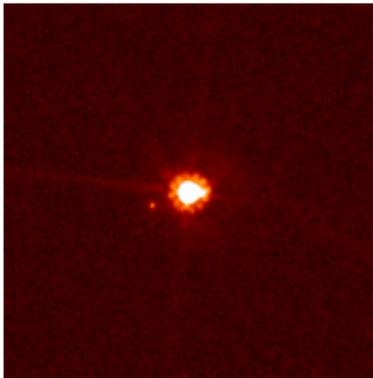


Abbildung 16: Eris

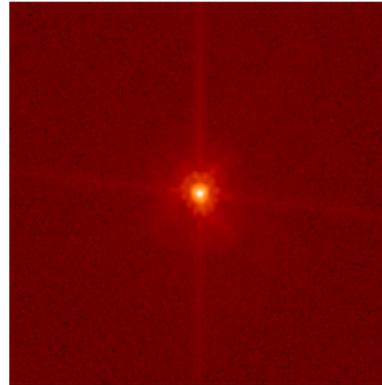


Abbildung 17: Makemake

# Plutoide

Weitere bekannte Plutoide sind:

- ▶ Eris
- ▶ Makemake
- ▶ Haumea

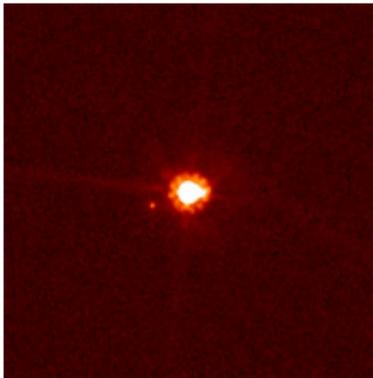


Abbildung 16: Eris

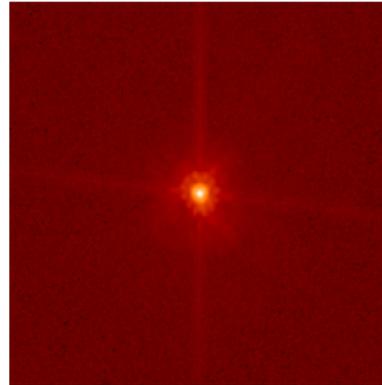


Abbildung 17: Makemake

# Plutoide

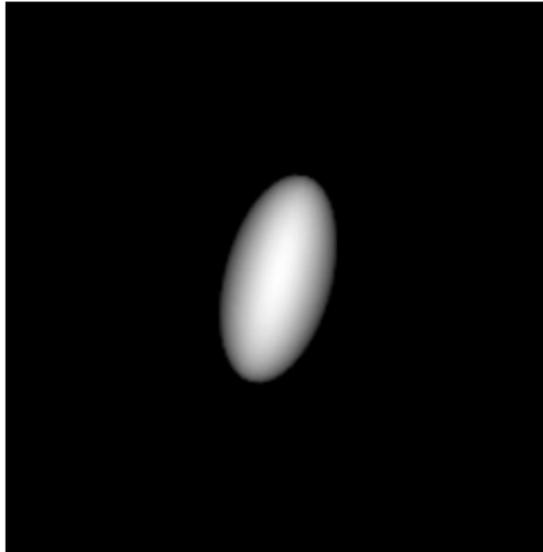


Abbildung 18: Haumea

# Anordnung der Planeten

Die Planeten werden im Sonnensystem in zwei Klassen unterteilt:

# Anordnung der Planeten

Die Planeten werden im Sonnensystem in zwei Klassen unterteilt:

- ▶ Innere Planeten:

# Anordnung der Planeten

Die Planeten werden im Sonnensystem in zwei Klassen unterteilt:

- ▶ Innere Planeten: Merkur, Venus, Erde, Mars

# Anordnung der Planeten

Die Planeten werden im Sonnensystem in zwei Klassen unterteilt:

- ▶ Innere Planeten: Merkur, Venus, Erde, Mars
- ▶ Äußere Planeten:

# Anordnung der Planeten

Die Planeten werden im Sonnensystem in zwei Klassen unterteilt:

- ▶ Innere Planeten: Merkur, Venus, Erde, Mars
- ▶ Äußere Planeten: (Gasriesen) Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun

# Anordnung der Planeten

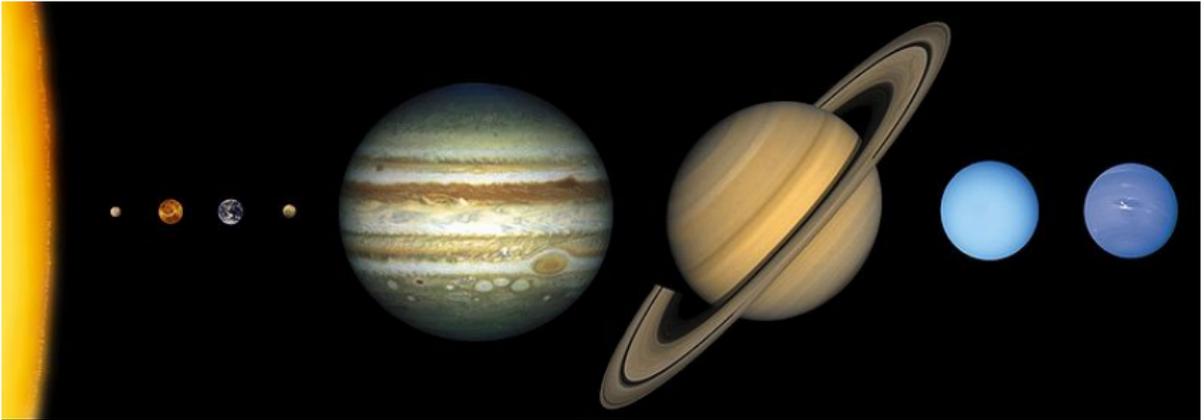


Abbildung 19: Reihenfolge der Planeten

# Die Keplerschen Gesetze

Die Planeten umrunden die Sonne auf festen Bahnen.

# Die Keplerschen Gesetze

Die Planeten umrunden die Sonne auf festen Bahnen.  
Diese Bahnen sind Ellipsen.

# Die Keplerschen Gesetze

Die Planeten umrunden die Sonne auf festen Bahnen.

Diese Bahnen sind Ellipsen.

Diese Anordnung und die Bewegung der Planeten werden durch die Keplerschen Gesetze beschrieben:

# Die Keplerschen Gesetze

Die Planeten umrunden die Sonne auf festen Bahnen.

Diese Bahnen sind Ellipsen.

Diese Anordnung und die Bewegung der Planeten werden durch die Keplerschen Gesetze beschrieben:

- ▶ 1. Alle Planeten bewegen sich auf elliptischen Bahnen um die Sonne, wobei die Sonne in einem der Brennpunkte der Ellipse steht.

# Die Keplerschen Gesetze

Die Planeten umrunden die Sonne auf festen Bahnen.

Diese Bahnen sind Ellipsen.

Diese Anordnung und die Bewegung der Planeten werden durch die Keplerschen Gesetze beschrieben:

- ▶ 1. Alle Planeten bewegen sich auf elliptischen Bahnen um die Sonne, wobei die Sonne in einem der Brennpunkte der Ellipse steht.
- ▶ 2. Die Verbindungslinie zwischen der Sonne und einem Planeten überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen.

# Die Keplerschen Gesetze

Die Planeten umrunden die Sonne auf festen Bahnen.

Diese Bahnen sind Ellipsen.

Diese Anordnung und die Bewegung der Planeten werden durch die Keplerschen Gesetze beschrieben:

- ▶ 1. Alle Planeten bewegen sich auf elliptischen Bahnen um die Sonne, wobei die Sonne in einem der Brennpunkte der Ellipse steht.
- ▶ 2. Die Verbindungslinie zwischen der Sonne und einem Planeten überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen.
- ▶ 3. Das Quadrat der Umlaufdauer eines Planeten ist proportional zur dritten Potenz seiner mittleren Entfernung zur Sonne.

$$T^2 = C r^3 \quad (2)$$

# Bahnen der inneren Planeten

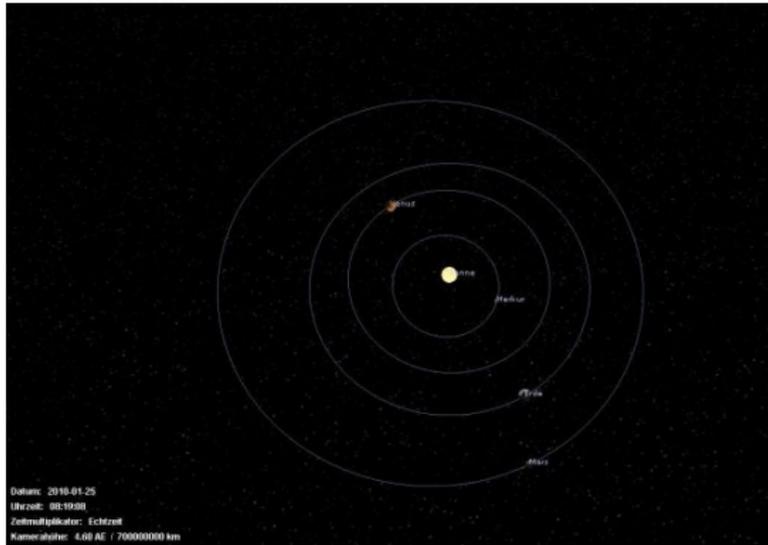


Abbildung 20: Bahnen der Planeten Merkur bis Mars[Sonne ist extrem verkleinert dargestellt]

## Bahnen der äußeren Planeten

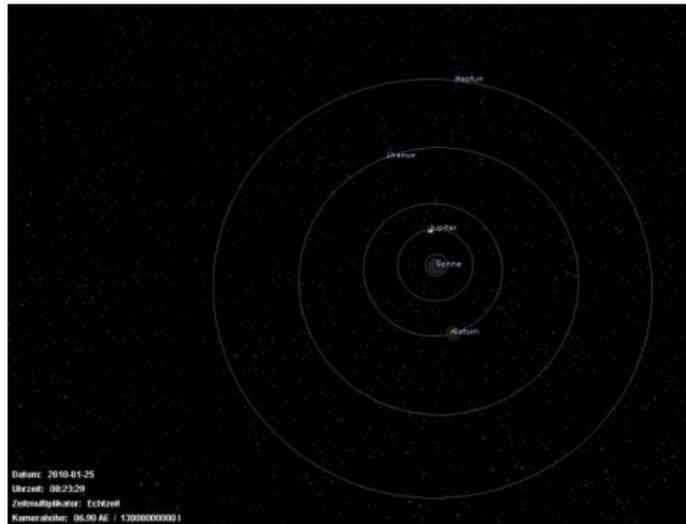


Abbildung 21: Bahnen der Planeten Jupiter bis Neptun [Sonne ist extrem verkleinert dargestellt]

# Zusammenfassung

# Zusammenfassung

- ▶ Die Sonne ist der Stern im Zentrum unseres Sonnensystems.

# Zusammenfassung

- ▶ Die Sonne ist der Stern im Zentrum unseres Sonnensystems.
- ▶ Es folgen die inneren Planeten: Merkur, Venus, Erde und Mars.

## Zusammenfassung

- ▶ Die Sonne ist der Stern im Zentrum unseres Sonnensystems.
- ▶ Es folgen die inneren Planeten: Merkur, Venus, Erde und Mars.
- ▶ Auf noch größeren Bahnen bewegen sich die Gasriesen: Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun.

# Zusammenfassung

- ▶ Die Sonne ist der Stern im Zentrum unseres Sonnensystems.
- ▶ Es folgen die inneren Planeten: Merkur, Venus, Erde und Mars.
- ▶ Auf noch größeren Bahnen bewegen sich die Gasriesen: Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun.
- ▶ Danach folgen die Plutoide: Pluto, Eris, Makemake und Haumea.

## Zusammenfassung

- ▶ Die Sonne ist der Stern im Zentrum unseres Sonnensystems.
- ▶ Es folgen die inneren Planeten: Merkur, Venus, Erde und Mars.
- ▶ Auf noch größeren Bahnen bewegen sich die Gasriesen: Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun.
- ▶ Danach folgen die Plutoide: Pluto, Eris, Makemake und Haumea.
- ▶ Die Planeten umrunden die Sonne auf festen elliptischen Bahnen.

## Zusammenfassung

- ▶ Die Sonne ist der Stern im Zentrum unseres Sonnensystems.
- ▶ Es folgen die inneren Planeten: Merkur, Venus, Erde und Mars.
- ▶ Auf noch größeren Bahnen bewegen sich die Gasriesen: Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun.
- ▶ Danach folgen die Plutoide: Pluto, Eris, Makemake und Haumea.
- ▶ Die Planeten umrunden die Sonne auf festen elliptischen Bahnen.
- ▶ Die Anordnung und die Bewegung der Planeten werden durch die Keplerschen Gesetze, bzw. das Newtonsche Gravitationsgesetz beschreiben

## Teil II

# Klassische Himmelsmechanik

# Inhalt

## 4 Die Keplerschen Gesetze

# Inhalt

- 4 Die Keplerschen Gesetze
- 5 Newtons Gravitationsgesetz

# Inhalt

- 4 Die Keplerschen Gesetze
- 5 Newtons Gravitationsgesetz
- 6 Rechenbeispiele

# Die Keplerschen Gesetze

# 1. Keplersches Gesetz

*„Alle Planeten bewegen sich auf elliptischen Bahnen um die Sonne, wobei die Sonne in einem der Brennpunkte der Ellipse steht.“*

# 1. Keplersches Gesetz

*„Alle Planeten bewegen sich auf elliptischen Bahnen um die Sonne, wobei die Sonne in einem der Brennpunkte der Ellipse steht.“*

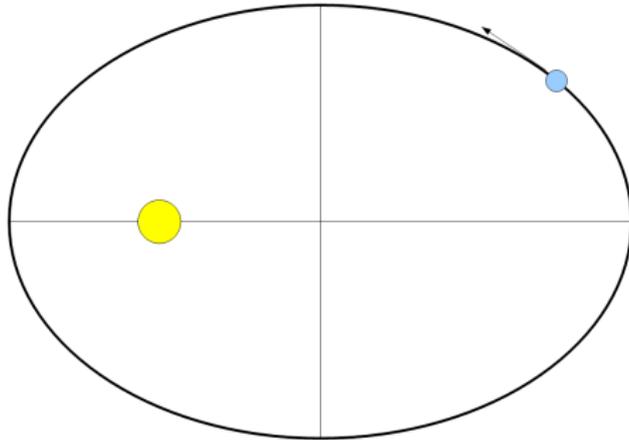


Abbildung 22: Die Sonne [gelb] befindet sich im Brennpunkt der elliptischen Umlaufbahn

## 2. Keplersches Gesetz

*„Die Verbindungslinie zwischen der Sonne und einem Planeten überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen.“*

## 2. Keplersches Gesetz

*„Die Verbindungslinie zwischen der Sonne und einem Planeten überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen.“*

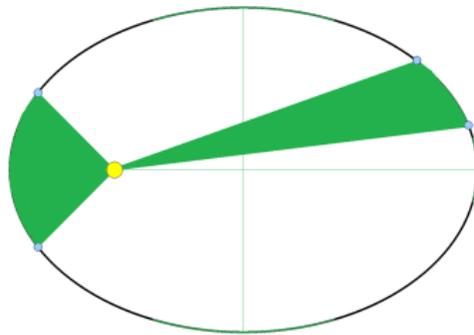


Abbildung 23: 2. Keplersches Gesetz

## 2. Keplersches Gesetz

*„Die Verbindungslinie zwischen der Sonne und einem Planeten überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen.“*

- ▶ Die bedeutet, dass sich der Planet, befindet er sich näher an der Sonne, schneller bewegt.

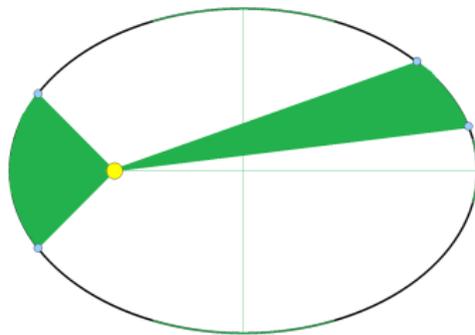


Abbildung 23: 2. Keplersches Gesetz

## 3. Keplersches Gesetz

*„Das Quadrat der Umlaufdauer eines Planeten ist proportional zur dritten Potenz seiner mittleren Entfernung zur Sonne.“*

## 3. Keplersches Gesetz

*„Das Quadrat der Umlaufdauer eines Planeten ist proportional zur dritten Potenz seiner mittleren Entfernung zur Sonne.“*

$$T^2 = C r^3 \quad (3)$$

## 3. Keplersches Gesetz

*„Das Quadrat der Umlaufdauer eines Planeten ist proportional zur dritten Potenz seiner mittleren Entfernung zur Sonne.“*

$$T^2 = C r^3 \quad (3)$$

Betrachtet man zwei Planeten, die den selben Stern umrunden so ergibt das 3. Keplersche Gesetz:

*„Die Quadrate der Umlaufzeiten  $T_1$  und  $T_2$  je zweier Trabanten um ein gemeinsames Zentrum sind proportional zu den dritten Potenzen der großen Halbachsen  $a_1$  und  $a_2$  ihrer Ellipsenbahnen.“*

## 3. Keplersches Gesetz

*„Das Quadrat der Umlaufdauer eines Planeten ist proportional zur dritten Potenz seiner mittleren Entfernung zur Sonne.“*

$$T^2 = C r^3 \quad (3)$$

Betrachtet man zwei Planeten, die den selben Stern umrunden so ergibt das 3. Keplersche Gesetz:

*„Die Quadrate der Umlaufzeiten  $T_1$  und  $T_2$  je zweier Trabanten um ein gemeinsames Zentrum sind proportional zu den dritten Potenzen der großen Halbachsen  $a_1$  und  $a_2$  ihrer Ellipsenbahnen.“*

### 3. Keplersches Gesetz

$$\left(\frac{T_1}{T_2}\right)^2 = \left(\frac{a_1}{a_2}\right)^3 \quad (4)$$

# Mathematische Erläuterungen

Dieses Kapitel dient zum tieferen Verständnis der Keplerschen Gesetze.

► Überspringen

# Die Ellipse

Eine Ellipse kann mathematisch auf verschiedene Weisen beschrieben werden.

# Die Ellipse

Eine Ellipse kann mathematisch auf verschiedene Weisen beschrieben werden.

Kartesische Koordinaten:

$$\frac{(x - x_0)^2}{a^2} + \frac{(y - y_0)^2}{b^2} = 1 \quad (5)$$

# Die Ellipse

# Die Ellipse

Polarkoordinaten (Hauptachse waagrecht, linker Brennpunkt als Pol, Polarachse längs Hauptachse nach rechts,  $p = \frac{b^2}{a}$ ):

$$r = \frac{p}{1 - \varepsilon \cos \varphi} \quad (6)$$

# Die Ellipse

Polarkoordinaten (Hauptachse waagrecht, linker Brennpunkt als Pol, Polarachse längs Hauptachse nach rechts,  $p = \frac{b^2}{a}$ ):

$$r = \frac{p}{1 - \varepsilon \cos \varphi} \quad (6)$$

Polarkoordinaten (Hauptachse waagrecht, Mittelpunkt als Pol, Polarachse längs Hauptachse nach rechts):

$$r = \frac{b}{\sqrt{1 - \varepsilon^2 \cos^2 \varphi}} \quad (7)$$

# Die Ellipse

Exzentrizität:

# Die Ellipse

## Exzentrizität:

Der Abstand der Brennpunkte vom Mittelpunkt heißt lineare Exzentrizität und wird mit  $e$  bezeichnet:

$$e = \sqrt{a^2 - b^2} \quad (8)$$

# Die Ellipse

## Exzentrizität:

Der Abstand der Brennpunkte vom Mittelpunkt heißt lineare Exzentrizität und wird mit  $e$  bezeichnet:

$$e = \sqrt{a^2 - b^2} \quad (8)$$

Neben der linearen Exzentrizität  $e$  wird oft auch die dimensionslose numerische Exzentrizität:

$$\varepsilon = \frac{e}{a} = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} \in [0, 1] \quad (9)$$

# Die Ellipse

## Exzentrizität:

Der Abstand der Brennpunkte vom Mittelpunkt heißt lineare Exzentrizität und wird mit  $e$  bezeichnet:

$$e = \sqrt{a^2 - b^2} \quad (8)$$

Neben der linearen Exzentrizität  $e$  wird oft auch die dimensionslose numerische Exzentrizität:

$$\varepsilon = \frac{e}{a} = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} \in [0, 1] \quad (9)$$

Ist  $\varepsilon = 0$ , so ist die Ellipse ein Kreis. Liegt sie nahe bei 1, so handelt es sich um eine langgestreckte, schmale Ellipse.

# Die Ellipse

Umfang:

# Die Ellipse

## Umfang:

Der Umfang einer Ellipse kann nicht exakt durch elementare Funktionen angegeben werden. Er kann nur als Integral dargestellt werden:

$$U = 4a \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - \varepsilon^2 (\sin t)^2} dt = 4a E(\varepsilon) \quad (10)$$

## Die Ellipse

Folgende Näherung ist für den Umfang einer Ellipse in einem weiten  $\varepsilon$ -Bereich von  $0 \leq \varepsilon \leq 0,9$  sehr genau. Der relative Fehler nimmt danach mit zunehmendem  $\varepsilon$  zu:

$$U \approx \pi(a+b) \left( 1 + \frac{3\lambda^2}{10 + \sqrt{4 - 3\lambda^2}} \right); \quad \lambda = \frac{a-b}{a+b}. \quad (11)$$

# Die Ellipse

## Flächeninhalt:

Mit den Halbachsen  $a$  und  $b$ :

$$A = \pi ab = \pi a^2 \sqrt{1 - \varepsilon^2}. \quad (12)$$

In Polarkoordinaten lässt sich auch der Flächeninhalt als Funktion des (Polar-)Winkels  $\varphi$  darstellen. (Polarkoordinaten: Hauptachse waagrecht, Mittelpunkt als Pol, Polarachse längs Hauptachse nach rechts):

Für einen Ellipsensektor (Winkel  $\varphi \in [0, 2\pi]$ ) erhält man:

$$A = \frac{ab\varphi}{2}. \quad (13)$$

# **Newton's Gravitationsgesetz**

# Newton's Gravitationsgesetz

Kepler stellte seine empirischen Gesetze durch Beobachtungen auf.

# Newton's Gravitationsgesetz

Kepler stellte seine empirischen Gesetze durch Beobachtungen auf.  
Newton schrieb die Beschleunigung eines Planeten einer Kraft zu, die zwischen Sonne und einem Planeten wirkt.

# Newton's Gravitationsgesetz

Kepler stellte seine empirischen Gesetze durch Beobachtungen auf.  
Newton schrieb die Beschleunigung eines Planeten einer Kraft zu, die zwischen Sonne und einem Planeten wirkt.  
Diese Kraft ist umgekehrt proportional zum Abstand der beiden Körper.

# Newton's Gravitationsgesetz

Kepler stellte seine empirischen Gesetze durch Beobachtungen auf.

Newton schrieb die Beschleunigung eines Planeten einer Kraft zu, die zwischen Sonne und einem Planeten wirkt.

Diese Kraft ist umgekehrt proportional zum Abstand der beiden Körper.

Schon vor Newton postulierten Wissenschaftler eine solche Kraft, aber erst Newton konnte zeigen, dass sie zu den elliptischen Bahnen Keplers führen.

# Newtons Gravitationsgesetz

Kepler stellte seine empirischen Gesetze durch Beobachtungen auf. Newton schrieb die Beschleunigung eines Planeten einer Kraft zu, die zwischen Sonne und einem Planeten wirkt.

Diese Kraft ist umgekehrt proportional zum Abstand der beiden Körper. Schon vor Newton postulierten Wissenschaftler eine solche Kraft, aber erst Newton konnte zeigen, dass sie zu den elliptischen Bahnen Keplers führen.

Newton beschäftigt sich im ersten Teil der *Principia* mit der Bewegung (Dynamik) von Körpern.

# Newton's Gravitationsgesetz

Er stellte 3 Axiome auf:

## Trägheitsprinzip

Ein Körper verharrt in Ruhe oder bewegt sich gleichförmig, wenn keine äußere Kraft auf ihn einwirkt.

$$\vec{F} = \sum_i \vec{F}_i = 0 \quad (14)$$

## Aktionsprinzip

Die Beschleunigung  $\vec{a}$  eines Körpers ist umgekehrt proportional zu seiner Masse und direkt proportional zur einwirkenden Kraft.

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} \quad (15)$$

# Newton's Gravitationsgesetz

## Reaktionsprinzip

Wirkt eine Kraft von Körper  $A$  auf einen anderen Körper  $B$ , so wirkt eine entgegengesetzte, gleich große Kraft von  $B$  auf  $A$

$$actio = reactio \quad (16)$$

## Newton's Gravitationsgesetz

Jeder Körper der Masse  $m_1$  übt auf einen anderen Körper der Masse  $m_2$  eine Kraft aus, die umgekehrt proportional zum Abstand  $r_{12}$  der beiden Körper ist.

$$\vec{F}_{12} = -\frac{Gm_1 m_2}{r_{12}^2} \cdot \frac{\vec{r}_{12}}{r_{12}} \quad (17)$$

$G$ =(universelle) Gravitationskonstante

# Newton's Gravitationsgesetz

Die Gravitationskonstante  $G$  wurde erstmals von Cavendish, etwa 100 Jahre später, recht genau bestimmt.

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{Nm^2}{kg^2} \quad (18)$$

# Newtons Gravitationsgesetz

Die Kraft  $\vec{F}_{21}$ , welche der Körper mit der Masse  $m_2$  auf den Körper der Masse  $m_1$  ausübt, ist nach Newtons drittem Gesetz (Gleichung 16) genau so groß wie  $\vec{F}_{12}$ .

## Newton's Gravitationsgesetz

Die Kraft  $\vec{F}_{21}$ , welche der Körper mit der Masse  $m_2$  auf den Körper der Masse  $m_1$  ausübt, ist nach Newtons drittem Gesetz (Gleichung 16) genau so groß wie  $\vec{F}_{12}$ .

Die Kraft zwischen den zwei Körpern insgesamt ergibt sich demnach zu:

### Gravitationskraft zwischen zwei Körpern

$$F = \frac{Gm_1 m_2}{r^2} \quad (19)$$

# Newton's Gravitationsgesetz

Dies können wir benutzen, um das 3. Keplersche Gesetz umzuschreiben.

## Newton's Gravitationsgesetz

Dies können wir benutzen, um das 3. Keplersche Gesetz umzuschreiben. Die Zentripetalkraft die ein Körper der Masse  $m_k$  erfährt, der einen anderen Körper der Masse  $M$ , mit der Geschwindigkeit  $v$  umrundet, beträgt:

$$F_Z = m_k \frac{v^2}{r} \quad (20)$$

## Newton's Gravitationsgesetz

Dies können wir benutzen, um das 3. Keplersche Gesetz umzuschreiben. Die Zentripetalkraft die ein Körper der Masse  $m_k$  erfährt, der einen anderen Körper der Masse  $M$ , mit der Geschwindigkeit  $v$  umrundet, beträgt:

$$F_Z = m_k \frac{v^2}{r} \quad (20)$$

Nach dem 2. Newtonschen Gesetz (Gleichung 15) gilt:

$$F = m_k a \quad (21)$$

# Newtons Gravitationsgesetz

Die Kräfte  $F$  und  $F_Z$  sind auf einer Bahn genau gleich groß, da sonst entweder der Körper nach außen getrieben oder auf den anderen Körper zufallen würde.

## Newton's Gravitationsgesetz

Die Kräfte  $F$  und  $F_Z$  sind auf einer Bahn genau gleich groß, da sonst entweder der Körper nach außen getrieben oder auf den anderen Körper zufallen würde.

Wir können also  $F = F_Z$  setzen.

$$\frac{GMm_k}{r^2} = m_k \frac{v^2}{r} \quad (22)$$

# Newtons Gravitationsgesetz

Formen wir diese Gleichung 22 um und drücken die Geschwindigkeit durch die Umlaufdauer  $T$  aus ( $v = \frac{2\pi r}{T}$ ), so erhalten wir

## Newton's Gravitationsgesetz

Formen wir diese Gleichung 22 um und drücken die Geschwindigkeit durch die Umlaufdauer  $T$  aus ( $v = \frac{2\pi r}{T}$ ), so erhalten wir

### Neuformulierung des 3. Keplerschen Gesetzes

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} r^3 \quad (23)$$

Dies ist genau das 3. Keplersche Gesetz (Gleichung 3:  $T^2 = Cr^3$ ), jedoch mathematisch und physikalisch begründet. Für  $C$  gilt demnach:  $C = \frac{4\pi^2}{GM}$

## Energiebetrachtungen

Die potentielle Energie (Lageenergie) eines Körpers der Masse  $m$  im Gravitationsfeld der Erde mit  $E_{pot} = 0$  auf der Erdoberfläche beträgt:

### Potentielle Energie im Gravitationsfeld der Erde

$$E_{pot}(r) = \frac{GM_E m}{R_E} - \frac{GM_E m}{r} \quad (24)$$

$E_{pot} = 0$  für  $r = R_E$ .

## Energiebetrachtungen

Die potentielle Energie (Lageenergie) eines Körpers der Masse  $m$  im Gravitationsfeld der Erde mit  $E_{pot} = 0$  auf der Erdoberfläche beträgt:

### Potentielle Energie im Gravitationsfeld der Erde

$$E_{pot}(r) = \frac{GM_E m}{R_E} - \frac{GM_E m}{r} \quad (24)$$

$E_{pot} = 0$  für  $r = R_E$ .

Der zweite Teil des Terms wird bei zunehmender „Höhe“  $r$  immer kleiner, bis er vernachlässigt werden kann.

## Energiebetrachtungen

Ferner gilt:

$$GM_E = gR_E^2 \quad (25)$$

Dies benutzen wir um einen **maximalen Wert der potentiellen Energie** zu bestimmen:

$$E_{pot,max} = \frac{GM_E m}{R_E} = mgR_E \quad (26)$$

# Energiebetrachtungen

Die potentielle Energie eines Körpers der Masse  $m$  im Gravitationsfeld der Erde nähert sich mit steigendem Abstand  $r$  der maximalen potentiellen Energie  $E_{pot,max}$  an.

# Energiebetrachtungen

Die potentielle Energie eines Körpers der Masse  $m$  im Gravitationsfeld der Erde nähert sich mit steigendem Abstand  $r$  der maximalen potentiellen Energie  $E_{pot,max}$  an.

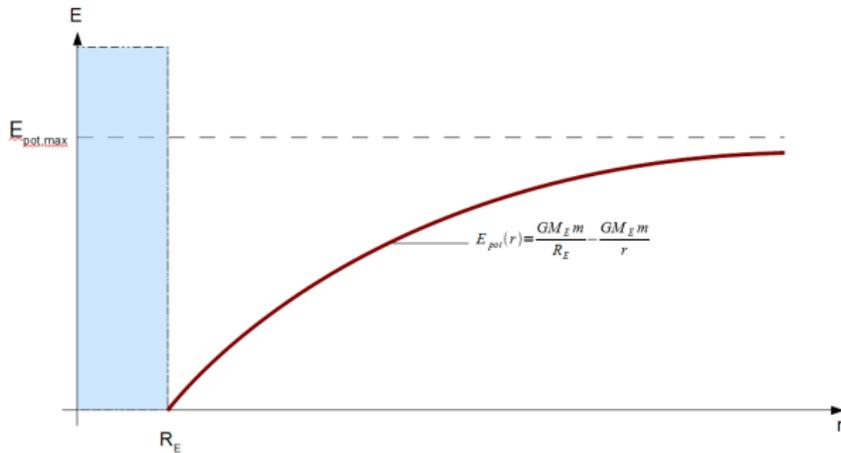


Abbildung 24: Potentielle Energie eines Körpers im Gravitationsfeld der Erde

# Fluchtgeschwindigkeit

Will man das Schwerefeld der Erde verlassen, so muss man sich mindestens mit einer bestimmten Geschwindigkeit  $v_F$  bewegen.

## Fluchtgeschwindigkeit

Will man das Schwerefeld der Erde verlassen, so muss man sich mindestens mit einer bestimmten Geschwindigkeit  $v_F$  bewegen. Die kinetische Energie  $E_{kin} = \frac{1}{2}mv_F^2$  muss mindestens gleich der maximalen Potentiellen Energie  $E_{pot,max}$  sein.

$$\frac{1}{2}mv_F^2 = \frac{GM_E m}{R_E} \quad (27)$$

Daraus folgt die sogenannte Fluchtgeschwindigkeit:

### Fluchtgeschwindigkeit

$$v_F = \sqrt{\frac{2GM_E}{R_E}} = \sqrt{2gR_E} \quad (28)$$

## Gesamtenergie und Umlaufbahnen

Wir setzen nun den Bezugspunkt für die potentielle Energie ins Unendliche ( $E_{pot} = 0$  für  $r = \infty$ ).

Potentielle Energie im Gravitationsfeld der Erde ( $E_{pot} = 0$  für  $r = \infty$ )

$$E_{pot}(r) = -\frac{GMm}{r} \quad (29)$$

## Gesamtenergie und Umlaufbahnen

Wir setzen nun den Bezugspunkt für die potentielle Energie ins Unendliche ( $E_{pot} = 0$  für  $r = \infty$ ).

Potentielle Energie im Gravitationsfeld der Erde ( $E_{pot} = 0$  für  $r = \infty$ )

$$E_{pot}(r) = -\frac{GMm}{r} \quad (29)$$

Die kinetische Energie eines Körpers (Satellit) auf einer Kreisbahn im Gravitationsfeld ist gegeben durch:

Kinetische Energie eines Körpers der Masse  $m$  im Gravitationsfeld

$$E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\frac{GMm}{r} \quad (30)$$

## Gesamtenergie und Umlaufbahnen

Die Gesamtenergie ist gegeben durch

Gesamtenergie eines Körpers der Masse  $m$  auf einer Kreisbahn im Gravitationsfeld

$$E_{ges} = E_{kin} + E_{pot} = \frac{1}{2} \frac{GMm}{r} - \frac{GMm}{r} = -\frac{1}{2} \frac{GMm}{r} = \frac{1}{2} E_{pot}(r) \quad (31)$$

# Gesamtenergie und Umlaufbahnen

Die Gesamtenergie ist gegeben durch

Gesamtenergie eines Körpers der Masse  $m$  auf einer Kreisbahn im Gravitationsfeld

$$E_{ges} = E_{kin} + E_{pot} = \frac{1}{2} \frac{GMm}{r} - \frac{GMm}{r} = -\frac{1}{2} \frac{GMm}{r} = \frac{1}{2} E_{pot}(r) \quad (31)$$

Folgerung

$E_{ges} > 0$ : ungebundenes System

$E_{ges} < 0$ : gebundenes System

# Rechenbeispiele

# Masse eines Planeten

Masse eines Planeten:

## Masse eines Planeten

### Masse eines Planeten:

Wir können die Masse eines Planeten bestimmen, indem wir aus Beobachtungen die Umlaufdauer  $T$  und den Bahnradius  $r$  eines Mondes kennen.

Wir beobachten einen Marsmond mit  $T = 460 \text{ min} = 27600 \text{ s}$  und  $r = 9,4 \cdot 10^6 \text{ m}$ .

Aus

$$M = \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2} \quad (32)$$

folgt:  $M = 6,45 \cdot 10^{23} \text{ kg}$

## Rechenbeispiele

Fluchtgeschwindigkeit auf der Erde:

Um das Gravitationsfeld der Erde zu verlassen ist eine Fluchtgeschwindigkeit  $v_F$  von

Fluchtgeschwindigkeit auf der Erde

$$\begin{aligned}v_F &= \sqrt{\frac{2GM_E}{R_E}} \\ &= \sqrt{\frac{2 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 / \text{kg s}^2 \cdot 5,97 \cdot 10^{24} \text{ kg}}{6,378 \cdot 10^6 \text{ m}}} \\ &= 11,1745 \text{ km/s}\end{aligned}$$

nötig.

## Rechenbeispiele

Ein Satellit der Masse  $450\text{kg}$  befindet sich in einer Höhe  $h$  von  $h = 6,83 \cdot 10^6\text{m} = 6830\text{km}$  über der Erdoberfläche auf einer Kreisbahn.

## Rechenbeispiele

Ein Satellit der Masse  $450\text{kg}$  befindet sich in einer Höhe  $h$  von  $h = 6,83 \cdot 10^6\text{m} = 6830\text{km}$  über der Erdoberfläche auf einer Kreisbahn. Seine Höhe über dem Erdmittelpunkt beträgt daher  $r = R_E + h = 13,2 \cdot 10^6\text{m}$ .

## Rechenbeispiele

Ein Satellit der Masse  $450\text{kg}$  befindet sich in einer Höhe  $h$  von  $h = 6,83 \cdot 10^6\text{m} = 6830\text{km}$  über der Erdoberfläche auf einer Kreisbahn. Seine Höhe über dem Erdmittelpunkt beträgt daher  $r = R_E + h = 13,2 \cdot 10^6\text{m}$ .

Seine potentielle Energie beträgt dann:  $E_{pot} = -\frac{GM_E m}{r} = -13,60\text{GJ}$

## Rechenbeispiele

Ein Satellit der Masse  $450\text{kg}$  befindet sich in einer Höhe  $h$  von  $h = 6,83 \cdot 10^6\text{m} = 6830\text{km}$  über der Erdoberfläche auf einer Kreisbahn. Seine Höhe über dem Erdmittelpunkt beträgt daher  $r = R_E + h = 13,2 \cdot 10^6\text{m}$ .

Seine potentielle Energie beträgt dann:  $E_{pot} = -\frac{GM_E m}{r} = -13,60\text{GJ}$

Seine kinetische Energie beträgt nach Gleichung 31 die Hälfte seiner potentiellen Energie:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} E_{pot} = 6,80\text{GJ}$$

## Rechenbeispiele

Ein Satellit der Masse  $450\text{kg}$  befindet sich in einer Höhe  $h$  von  $h = 6,83 \cdot 10^6\text{m} = 6830\text{km}$  über der Erdoberfläche auf einer Kreisbahn. Seine Höhe über dem Erdmittelpunkt beträgt daher  $r = R_E + h = 13,2 \cdot 10^6\text{m}$ .

Seine potentielle Energie beträgt dann:  $E_{pot} = -\frac{GM_E m}{r} = -13,60\text{GJ}$

Seine kinetische Energie beträgt nach Gleichung 31 die Hälfte seiner potentiellen Energie:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} E_{pot} = 6,80\text{GJ}$$

Die Gesamtenergie beträgt somit:

$$E_{ges} = E_{kin} + E_{pot} = 6,80\text{GJ} - 13,60\text{GJ} = -6,80\text{GJ} < 0$$

## Rechenbeispiele

Es handelt sich also um ein gebundenes System.

## Rechenbeispiele

Es handelt sich also um ein gebundenes System.  
Für die Geschwindigkeit des Satelliten gilt:

$$\begin{aligned} E_{kin} &= \frac{1}{2}mv^2 \\ \iff v &= \sqrt{\frac{2E_{kin}}{m}} \end{aligned}$$

$$v = 5497,47 \text{ m/s}$$

Er benötigt folglich  $15086,58 \text{ s} \approx 4,2 \text{ h}$  für eine Umrundung der Erde.

## Teil III

# Das All außerhalb unseres Sonnensystems

# Inhalt

## 7 Größenordnungen

# Inhalt

7 Größenordnungen

8 Die Milchstraße

# Inhalt

7 Größenordnungen

8 Die Milchstraße

9 Größere Strukturen

# Größenordnungen

## Astronomische Größen und Entfernungen

Die Entfernungen im Weltall sind riesig. Um nicht immer mit so großen Zahlen umgehen zu müssen, wurden neue Längen eingeführt.

### Astronomische Einheit

Die Astronomische Einheit (AE, international AU) entspricht in etwa dem Abstand Sonne-Erde. Seit 1976 durch die Internationale Astronomische Union (IAU) festgelegt auf

$$149\,597\,870\,691 \text{ m} \quad (33)$$

Also etwa 149,6 Millionen Kilometer

## Astronomische Größen und Entfernungen

### Lichtjahr

1 Lichtjahr ( $Lj$ ) ist die Entfernung, die das Licht in einem Jahr zurücklegt.

$$1 Lj = 9\,460\,730\,472\,580\,800 \text{ m} \approx 9,461 \cdot 10^{15} \text{ m} \quad (34)$$

Also etwa 9,46 Billionen Kilometer

## Astronomische Größen und Entfernungen

### Parsec

Ein Parsec ( $pc$ ) (kurz für: Parallaxensekunde) ist definiert als die Entfernung eines Sterns, der eine jährliche Parallaxe von genau einer Bogensekunde ( $1'' = 1^\circ/3600$ ) aufweist.

$$\begin{aligned} 1 \text{ pc} &= 1 \text{ AE} / \tan 1'' \\ &= 206\,264,806 \text{ AE} \\ &= 30,856\,776 \cdot 10^{15} \text{ m} \\ &= 3,261\,5668 \text{ Lj} \end{aligned} \tag{35}$$

# Die Milchstraße

Unser Sonnensystem befindet sich in einem Seitenarm unserer Galaxie:  
Der *Milchstraße*.

# Die Milchstraße

Unser Sonnensystem befindet sich in einem Seitenarm unserer Galaxie:  
Der *Milchstraße*.

- ▶ Die Milchstraße ist vermutlich eine Balkenspiralgalaxie.

# Die Milchstraße

Unser Sonnensystem befindet sich in einem Seitenarm unserer Galaxie:  
Der *Milchstraße*.

- ▶ Die Milchstraße ist vermutlich eine Balkenspiralgalaxie.
- ▶ Wie ein Hausbewohner im Inneren seines Hauses, können wir nur Vermutungen anstellen, wie unsere Galaxie von Außen betrachtet wirklich aussieht.

# Die Milchstraße

Unser Sonnensystem befindet sich in einem Seitenarm unserer Galaxie:  
Der *Milchstraße*.

- ▶ Die Milchstraße ist vermutlich eine Balkenspiralgalaxie.
- ▶ Wie ein Hausbewohner im Inneren seines Hauses, können wir nur Vermutungen anstellen, wie unsere Galaxie von Außen betrachtet wirklich aussieht.
- ▶ Von der Erde aus erscheint sie uns wie ein helles, milchiges Band am Himmel. Daher der Name Milchstraße

# Die Milchstraße

Unser Sonnensystem befindet sich in einem Seitenarm unserer Galaxie:  
Der *Milchstraße*.

- ▶ Die Milchstraße ist vermutlich eine Balkenspiralgalaxie.
- ▶ Wie ein Hausbewohner im Inneren seines Hauses, können wir nur Vermutungen anstellen, wie unsere Galaxie von Außen betrachtet wirklich aussieht.
- ▶ Von der Erde aus erscheint sie uns wie ein helles, milchiges Band am Himmel. Daher der Name Milchstraße
- ▶ Dass dieses weißliche Band sich in Wirklichkeit aus Milliarden von Sternen zusammensetzt, wurde erst 1609 von Galileo Galilei erkannt.

## Die Milchstraße

- ▶ Die Milchstraße hat einen Durchmesser von etwa 100.000 Lichtjahren (30 kpc). Also etwa 946,1 Billionen Kilometer.

# Die Milchstraße

- ▶ Die Milchstraße hat einen Durchmesser von etwa 100.000 Lichtjahren (30 kpc). Also etwa 946,1 Billionen Kilometer.
- ▶ Die Dicke der Scheibe beträgt etwa 3000 Lichtjahre (920 pc) und die der zentralen Ausbauchung (engl. Bulge) etwa 16.000 Lichtjahre (5 kpc).

## Die Milchstraße

- ▶ Die Milchstraße hat einen Durchmesser von etwa 100.000 Lichtjahren (30 kpc). Also etwa 946,1 Billionen Kilometer.
- ▶ Die Dicke der Scheibe beträgt etwa 3000 Lichtjahre (920 pc) und die der zentralen Ausbauchung (engl. Bulge) etwa 16.000 Lichtjahre (5 kpc).
- ▶ Sie besteht aus etwa 100 bis 300 Billionen Sternen und großen Mengen interstellarer Materie, die nochmals 600 Millionen bis einige Billionen Sonnenmassen ausmacht.

## Die Milchstraße

- ▶ Die Milchstraße hat einen Durchmesser von etwa 100.000 Lichtjahren (30 kpc). Also etwa 946,1 Billionen Kilometer.
- ▶ Die Dicke der Scheibe beträgt etwa 3000 Lichtjahre (920 pc) und die der zentralen Ausbauchung (engl. Bulge) etwa 16.000 Lichtjahre (5 kpc).
- ▶ Sie besteht aus etwa 100 bis 300 Billionen Sternen und großen Mengen interstellarer Materie, die nochmals 600 Millionen bis einige Billionen Sonnenmassen ausmacht.
- ▶ Die Masse des inneren Bereichs der Galaxis wird mit ungefähr  $3,6 \cdot 10^{41} \text{ kg}$  veranschlagt.

# Die Milchstraße

- ▶ Die Gesamtmasse des Milchstraßensystems wird auf etwa 1,0 bis 1,9 Billionen Sonnenmassen geschätzt.

# Die Milchstraße

- ▶ Die Gesamtmasse des Milchstraßensystems wird auf etwa 1,0 bis 1,9 Billionen Sonnenmassen geschätzt.
- ▶ Messungen aus dem Jahre 2004 zufolge ist das Milchstraßensystem etwa 13,6 Milliarden Jahre alt. Die Genauigkeit dieser Abschätzung, die das Alter anhand des Berylliumanteils einiger Kugelsternhaufen bestimmt, wird mit etwa 800 Millionen Jahren angegeben.

# Die Milchstraße

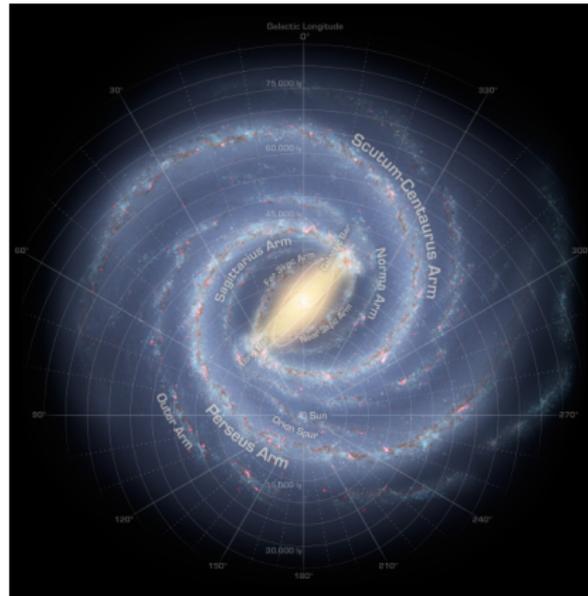
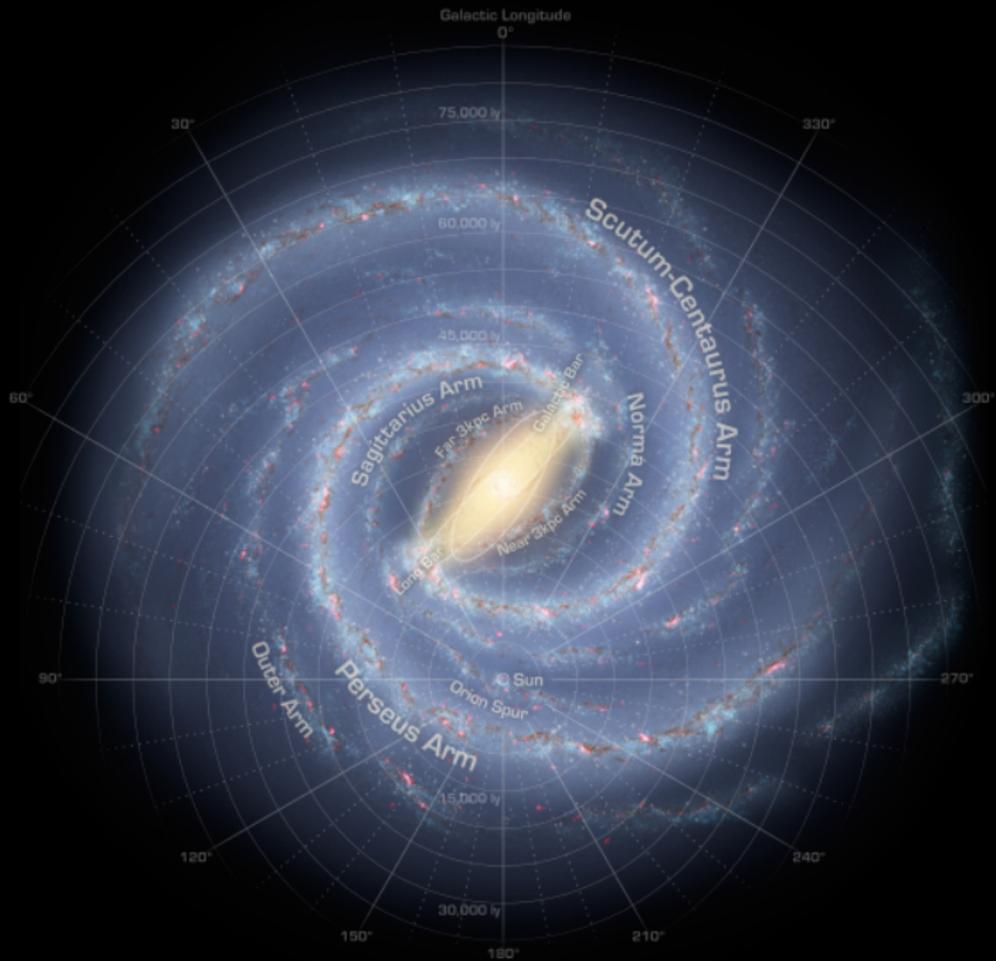


Abbildung 25: Vermutetes Erscheinungsbild der Milchstraßensystem [Quelle: NASA]



## Die Milchstraße

- ▶ Die Sonne umkreist das Zentrum des Milchstraßensystems in einem Abstand von 25.000 bis 28.000 Lichtjahren ( $7,94 \pm 0,42 \text{ kpc}$ ) und befindet sich nördlich der Mittelebene der galaktischen Scheibe innerhalb des Orion-Arms.

## Die Milchstraße

- ▶ Die Sonne umkreist das Zentrum des Milchstraßensystems in einem Abstand von 25.000 bis 28.000 Lichtjahren ( $7,94 \pm 0,42 \text{ kpc}$ ) und befindet sich nördlich der Mittelebene der galaktischen Scheibe innerhalb des Orion-Arms.
- ▶ Für einen Umlauf um das Zentrum der Galaxis, ein so genanntes galaktisches Jahr, benötigt sie 220 bis 240 Millionen Jahre, was einer Geschwindigkeit von ca.  $267 \text{ km/s}$  entspricht.

## Die Milchstraße

- ▶ Die Sonne umkreist das Zentrum des Milchstraßensystems in einem Abstand von 25.000 bis 28.000 Lichtjahren ( $7,94 \pm 0,42 \text{ kpc}$ ) und befindet sich nördlich der Mittelebene der galaktischen Scheibe innerhalb des Orion-Arms.
- ▶ Für einen Umlauf um das Zentrum der Galaxis, ein so genanntes galaktisches Jahr, benötigt sie 220 bis 240 Millionen Jahre, was einer Geschwindigkeit von ca.  $267 \text{ km/s}$  entspricht.
- ▶ Das Sonnensystem umläuft das galaktische Zentrum nicht auf einer ungestörten ebenen Keplerbahn. Die in der Scheibe des Milchstraßensystems verteilte Masse übt eine starke Störung aus, sodass die Sonne zusätzlich regelmäßig durch die Scheibe auf und ab oszilliert. Die Scheibe durchquert sie dabei alle  $42 \pm 2$  Millionen Jahre einmal.

## Die Milchstraße

### Galaktischer Halo:

Umgeben ist die Galaxis vom kugelförmigen galaktischen Halo mit einem Durchmesser von etwa 165.000 Lichtjahren ( $50\text{kpc}$ ). In ihm befinden sich neben den etwa 150 Kugelsternhaufen nur weitere alte Sterne und Gas sehr geringer Dichte. Ausnahme sind die heißen Blue Straggler-Sterne. Dazu kommen große Mengen Dunkle Materie mit etwa 1 Billion Sonnenmassen, darunter auch so genannte MACHOs. Anders als die galaktische Scheibe ist der Halo weitgehend staubfrei und enthält fast ausschließlich Sterne der älteren, metallarmen Population II, deren Orbit sehr stark gegen die galaktische Ebene geneigt ist.

# Die Milchstraße

Die Milchstraße wird von Zwerggalaxien begleitet, die langsam von der Milchstraße einverleibt werden.

Dies sind z.B.:

- ▶ Die kleine Magellansche Wolke

# Die Milchstraße

Die Milchstraße wird von Zwerggalaxien begleitet, die langsam von der Milchstraße einverleibt werden.

Dies sind z.B.:

- ▶ Die kleine Magellansche Wolke
- ▶ Die große Magellansche Wolke

# Die Milchstraße

Die Milchstraße wird von Zwerggalaxien begleitet, die langsam von der Milchstraße einverleibt werden.

Dies sind z.B.:

- ▶ Die kleine Magellansche Wolke
- ▶ Die große Magellansche Wolke
- ▶ Die Canis-Major-Zwerggalaxie: Ob es sich dabei allerdings tatsächlich um die Überreste einer Zwerggalaxie oder um eine zufällige, projektionsbedingte Häufung handelt, ist derzeit noch nicht sicher.

# Die Milchstraße

Die Milchstraße wird von Zwerggalaxien begleitet, die langsam von der Milchstraße einverleibt werden.

Dies sind z.B.:

- ▶ Die kleine Magellansche Wolke
- ▶ Die große Magellansche Wolke
- ▶ Die Canis-Major-Zwerggalaxie: Ob es sich dabei allerdings tatsächlich um die Überreste einer Zwerggalaxie oder um eine zufällige, projektionsbedingte Häufung handelt, ist derzeit noch nicht sicher.
- ▶ Sagittarius-Zwerggalaxie

## Die Lokale Gruppe

- ▶ Mit der Andromeda-Galaxie, dem Dreiecksnebel (M 33) und einigen anderen kleineren Galaxien bildet das Milchstraßensystem die *Lokale Gruppe*.

## Die Lokale Gruppe

- ▶ Mit der Andromeda-Galaxie, dem Dreiecksnebel (M 33) und einigen anderen kleineren Galaxien bildet das Milchstraßensystem die *Lokale Gruppe*.
- ▶ Die Andromeda-Galaxie ist eine der wenigen Galaxien im Universum, deren Spektrum eine Blauverschiebung aufweist: Die Andromeda-Galaxie und das Milchstraßensystem bewegen sich mit einer Geschwindigkeit von 120 km/s aufeinander zu.

## Die Lokale Gruppe

- ▶ Mit der Andromeda-Galaxie, dem Dreiecksnebel (M 33) und einigen anderen kleineren Galaxien bildet das Milchstraßensystem die *Lokale Gruppe*.
- ▶ Die Andromeda-Galaxie ist eine der wenigen Galaxien im Universum, deren Spektrum eine Blauverschiebung aufweist: Die Andromeda-Galaxie und das Milchstraßensystem bewegen sich mit einer Geschwindigkeit von 120 km/s aufeinander zu.
- ▶ Vermutlich werden die beiden Galaxien in etwa 3 Milliarden Jahren zusammenstoßen und zu einer größeren Galaxie verschmelzen.

# Superhaufen

- ▶ Die Lokale Gruppe ist Bestandteil des *Virgo-Superhaufens*.

# Superhaufen

- ▶ Die Lokale Gruppe ist Bestandteil des *Virgo-Superhaufens*.
- ▶ Der *Virgo-Superhaufens* bewegt sich nach neuesten Erkenntnissen mit weiteren Großstrukturen auf den *Shapley Supercluster* zu.

# Superhaufen

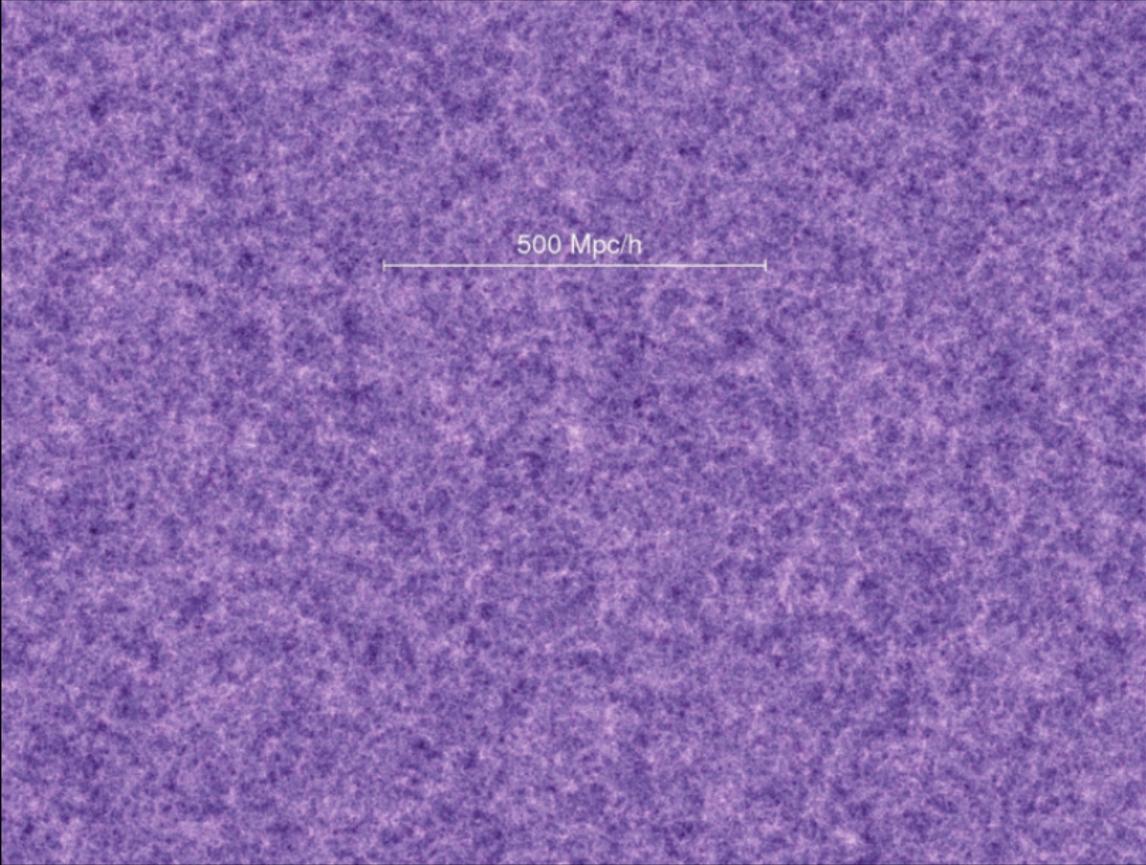
- ▶ Die Lokale Gruppe ist Bestandteil des *Virgo-Superhaufens*.
- ▶ Der *Virgo-Superhaufens* bewegt sich nach neuesten Erkenntnissen mit weiteren Großstrukturen auf den *Shapley Supercluster* zu.
- ▶ Der mit 500 Millionen Lichtjahren entfernte *Shapley Supercluster* dominiert, mit seinen zusammen fast 10.000 Milchstraßenmassen die gesamte Dynamik.

## Struktur des Weltalls

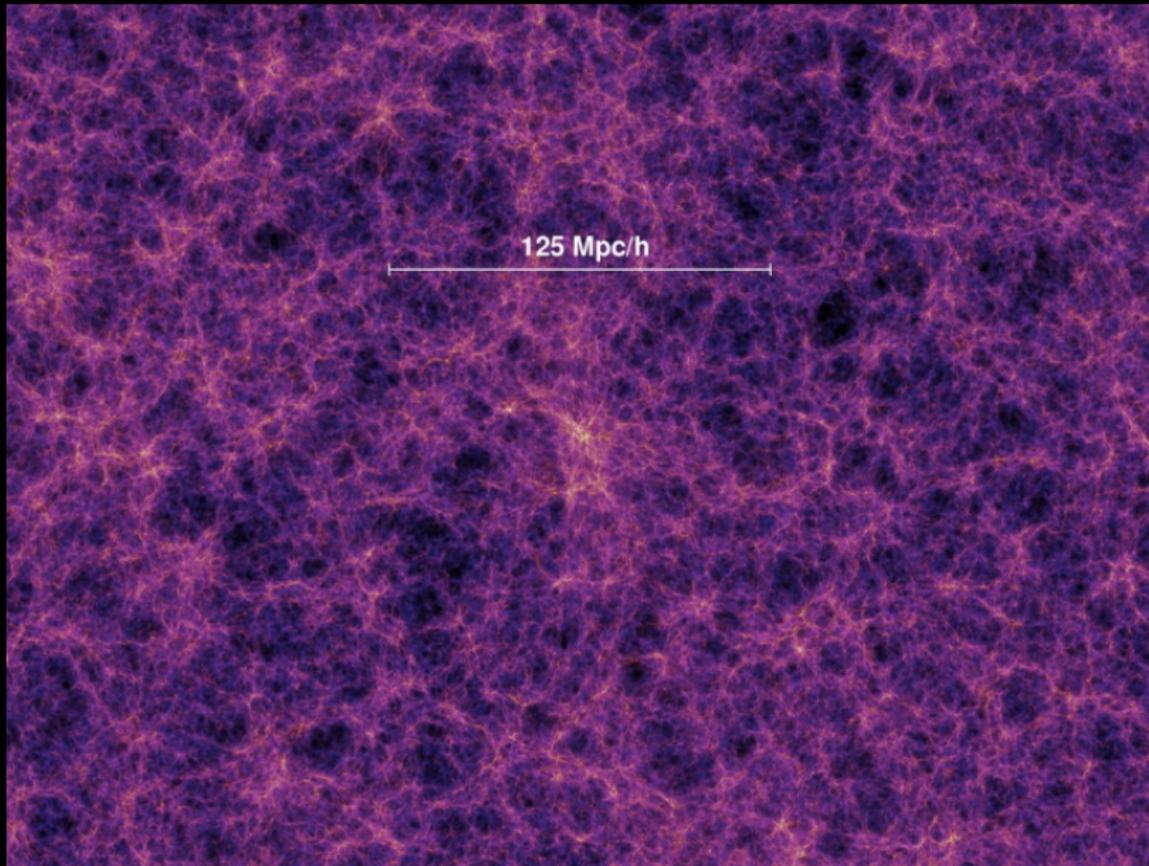
Das Universum besitzt vermutlich eine schaum- oder wabenartige Struktur. Das Innere der Waben entspricht dabei riesigen Leerräumen im Universum, den sog. *Voids*. Die Galaxien gruppieren sich - wegen ihrer gegenseitigen gravitativen Anziehung - zu Galaxienhaufen um diese Leerräume herum und bilden sozusagen die Wände der Waben.

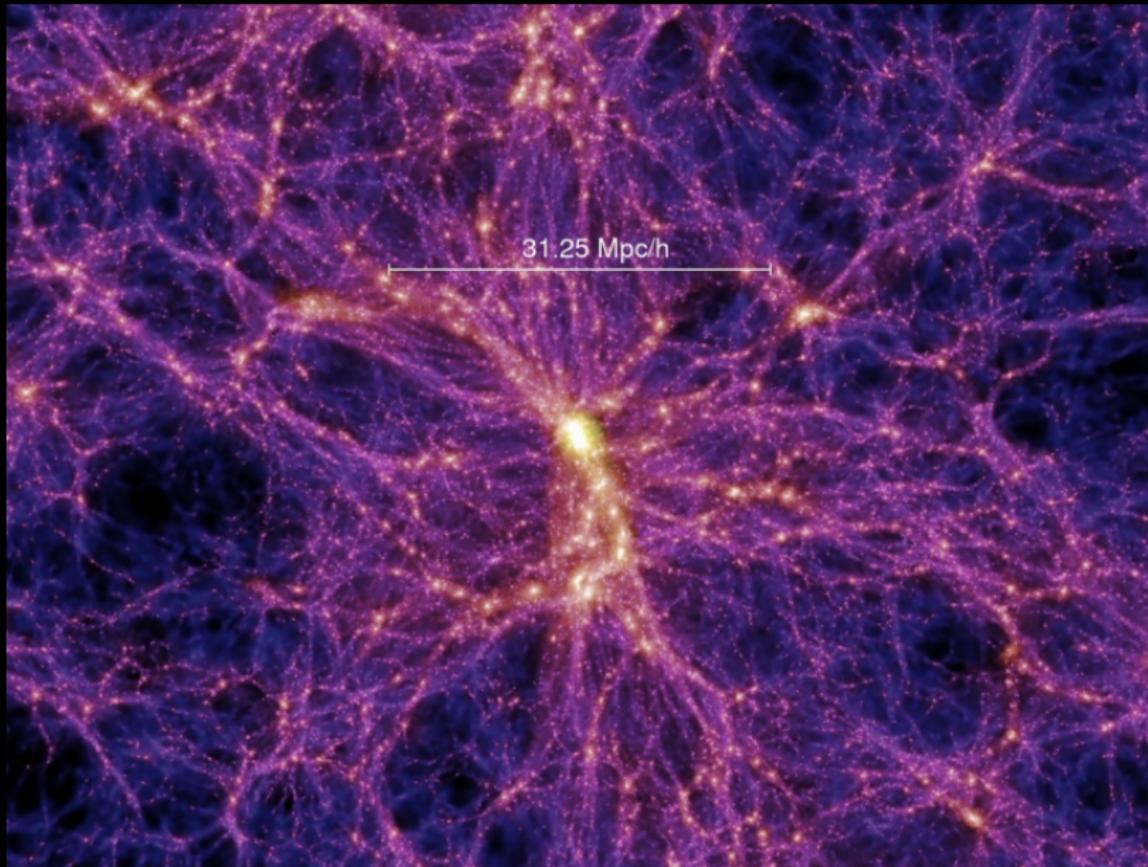
## Struktur des Weltalls

Die Millennium-Simulation ist ein Projekt des Virgo-Konsortiums, einer Gruppe von Kosmologen aus Deutschland, Großbritannien, Kanada, Japan und den USA unter der Leitung des Max-Planck-Instituts für Astrophysik in Garching bei München. Ziel ist die Herstellung einer Computersimulation zur Klärung der kosmologisch höchst interessanten Frage, wie sich aus dem direkt nach dem Urknall strukturlosen Universum die heutigen Galaxien und Sterne bilden konnten. Im Sommer 2005 konnten Ergebnisse vorgestellt werden, die die Entstehung von großen Unregelmäßigkeiten aus kleinen eingebrachten Manipulationen zeigen. Die folgenden Aufnahmen sind von diesem Projekt erstellt worden und zeigen die simulierte Verteilung der Galaxien als Screenshot der 3D-Simulation. (<http://www.mpa-garching.mpg.de/galform/>)



500 Mpc/h





## Teil IV

# Sterne

# Inhalt

## 10 Unser Stern - Die Sonne

# Unser Stern - Die Sonne

# Die Sonne

Die Sonne

## Teil V

# Weitere Objekte im All

# Inhalt

## 11 Schwarze Löcher

# Schwarze Löcher

## Schwarzschildradius

Die Fluchtgeschwindigkeit, also die Geschwindigkeit, die nötig ist um das Gravitationsfeld eines Körpers zu verlassen, ist gegeben durch:

Fluchtgeschwindigkeit

$$v_F = \sqrt{\frac{2GM}{R}} \quad (36)$$

## Schwarzschildradius

Die Fluchtgeschwindigkeit, also die Geschwindigkeit, die nötig ist um das Gravitationsfeld eines Körpers zu verlassen, ist gegeben durch:

Fluchtgeschwindigkeit

$$v_F = \sqrt{\frac{2GM}{R}} \quad (36)$$

Wir setzen nun für die Fluchtgeschwindigkeit die physikalisch maximalste Geschwindigkeit, die Lichtgeschwindigkeit  $c$ , ein.

$$c = \sqrt{\frac{2GM}{R}} \quad (37)$$

# Schwarzschildradius

Wir lösen nach R auf und erhalten:

Schwarzschildradius

$$R_S = \frac{2GM}{c^2} \quad (38)$$

# Schwarzschildradius

Wir lösen nach R auf und erhalten:

## Schwarzschildradius

$$R_S = \frac{2GM}{c^2} \quad (38)$$

Von der Oberfläche eines Körpers, der kleiner wie der Schwarzschildradius ist, kann *nichts* das Gravitationsfeld nach außen verlassen; nicht einmal Licht vermag dies.

# Schwarzes Loch

## Definition: Schwarzes Loch

Objekte mit

$$R < R_S \quad (39)$$

nennt man Schwarzes Loch.