

Das dunkle Universum

Jutta Kunz

Institut für Physik
CvO Universität Oldenburg

<http://www.physik.uni-oldenburg.de/Docs/ftheorie/kunz.html>



Oldenburger Landesverein, Oldenburg, 22. März 2007



Beobachtungen zur Kosmologie

A rectangular box containing a Cosmic Microwave Background (CMB) fluctuation map. The map shows a complex pattern of blue and green colors against a dark background, representing temperature variations in the early universe.

Beobachtungen zur Kosmologie

Theorie der Kosmologie

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Beobachtungen zur Kosmologie

Theorie der Kosmologie

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Das frühe Universum

Beobachtungen zur Kosmologie

Theorie der Kosmologie

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Das frühe Universum

Dunkle Materie und Dunkle Energie

Beobachtungen zur Kosmologie

Theorie der Kosmologie $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$

Das frühe Universum



Dunkle Materie und Dunkle Energie

Die Zukunft des Universums

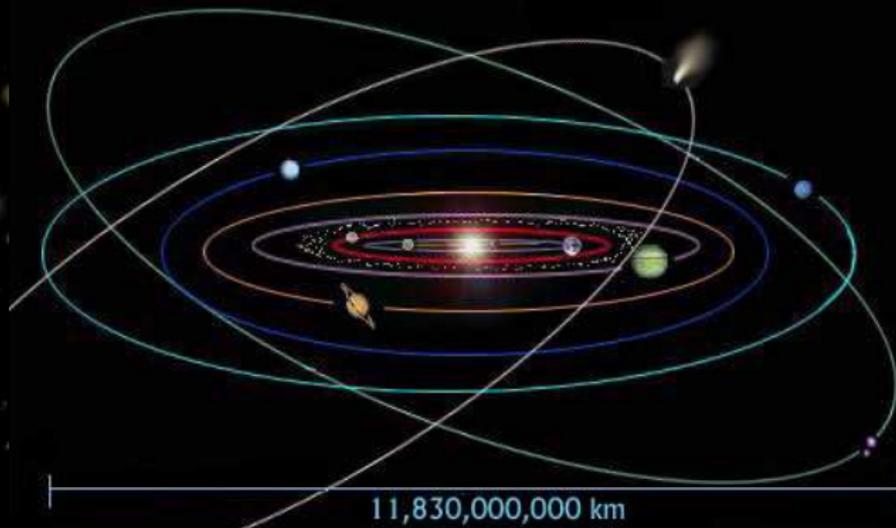
Größen und Distanzen in der Astronomie



12,756 km

Erde

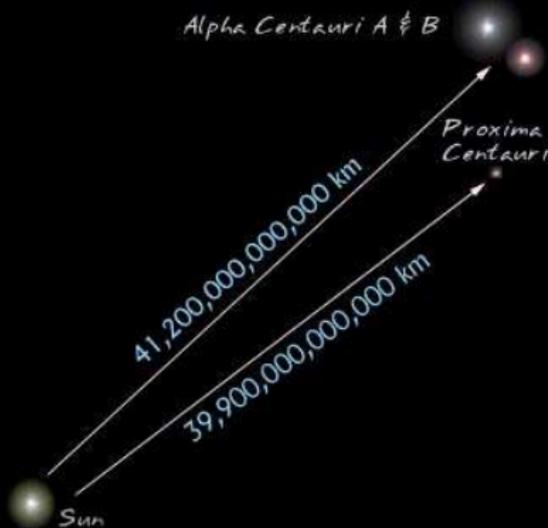
Größen und Distanzen in der Astronomie



Sonnensystem

Abstand Erde – Sonne: 150 Millionen km = 8 Lichtminuten

Größen und Distanzen in der Astronomie



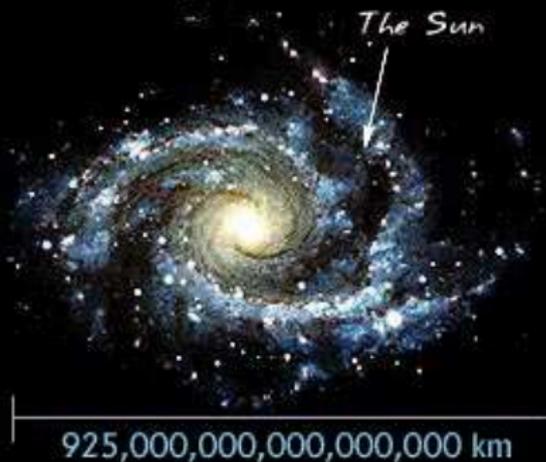
Die nächsten Sterne
Abstand Sonne – Proxima Centauri: 4 Lichtjahre

Größen und Distanzen in der Astronomie



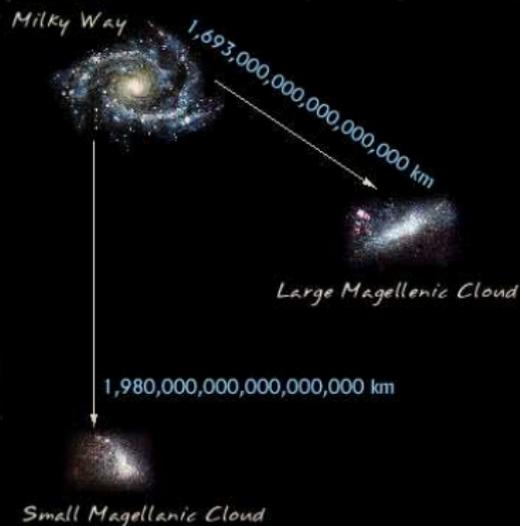
Die Umgebung der Sonne

Größen und Distanzen in der Astronomie



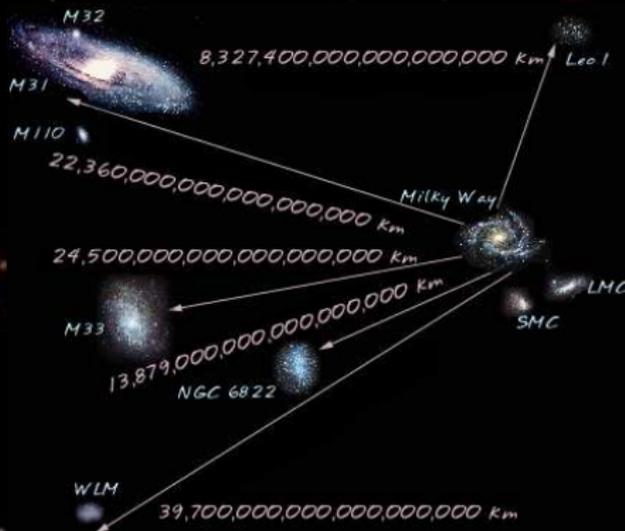
Die Milchstraße
Durchmesser etwa 100000 Lichtjahre

Größen und Distanzen in der Astronomie



Nächste Galaxien

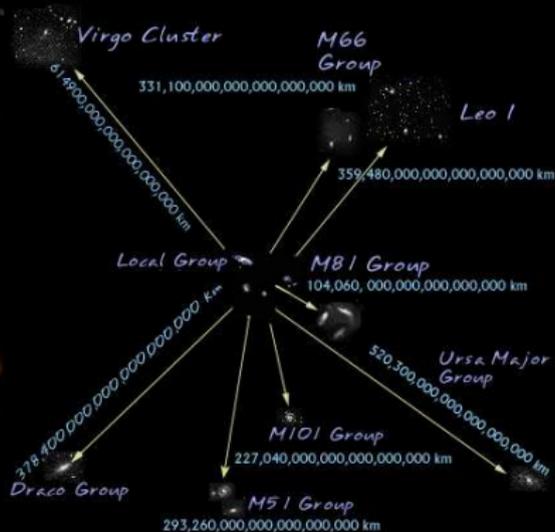
Größen und Distanzen in der Astronomie



Die lokale Gruppe

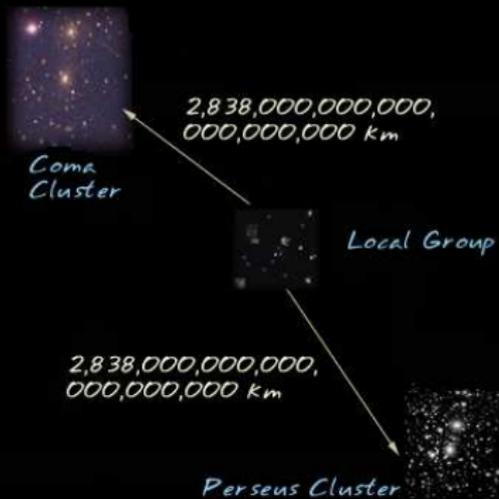
Abstand Milchstraße – Andromeda: ca. 2,5 Millionen Lichtjahre

Größen und Distanzen in der Astronomie



Das lokale Supercluster

Größen und Distanzen in der Astronomie



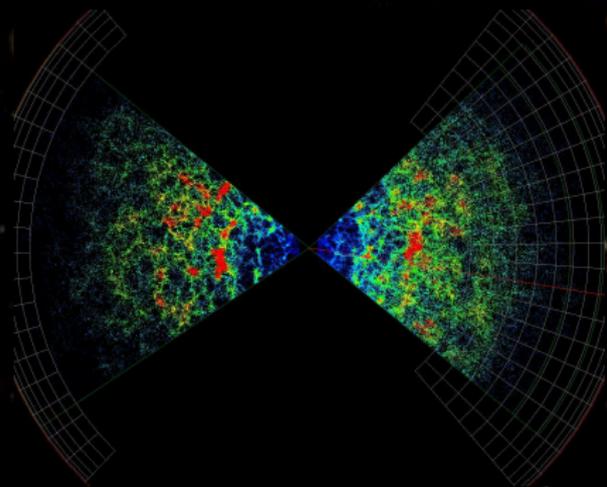
Die nächsten Supercluster

Größen und Distanzen in der Astronomie



Die entferntesten sichtbaren Strukturen – Hubble deep field

Das Universum auf großen Skalen



2dFGRS: Draufsicht

“Das Universum sieht für jeden überall gleich aus”

Symmetrieanahmen sind wesentlich

Auf großen Skalen ist das Universum glatt und gleichförmig (großräumige Glattheit)

Skala: Hunderte Mpc

Erläuterung Einheit:

1 Parsec = 1 Parallaxensekunde = Abstand, in dem der mittlere Erde-Sonne Abstand d.h. der mittlere Erdbahnradius (≈ 150 Millionen km) einer Bogensekunde entspricht = 3.261 Lichtjahre

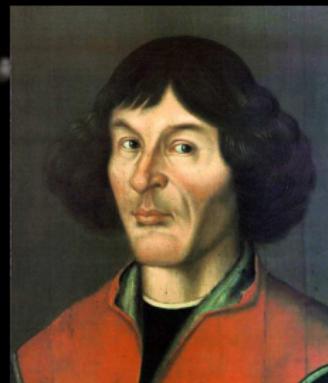
Das kosmologische Prinzip

Kopernikus:

- Die Erde steht nicht im Mittelpunkt des Sonnensystems
- Das Sonnensystem steht an keiner ausgezeichneten Stelle des Universums
- Kein Beobachter steht an einer ausgezeichneten Stelle des Universums

⇒

- Das Universum muß um jeden Punkt herum richtungsunabhängig sein
- Es darf keinen Mittelpunkt/ausgezeichneten Punkt geben



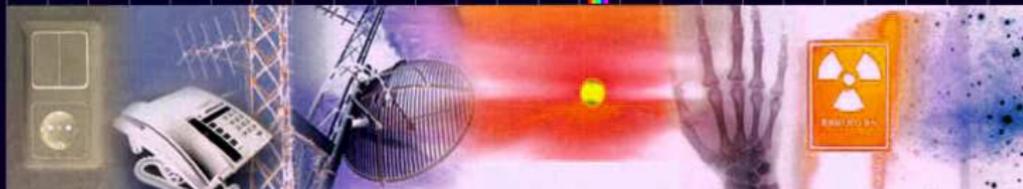
Das elektromagnetische Spektrum

Das elektromagnetische Spektrum

Energie in eV

 $1,24 \cdot 10^{13}$ $\cdot 10^{12}$ $\cdot 10^{11}$ $\cdot 10^{10}$ $\cdot 10^9$ $\cdot 10^8$ $\cdot 10^7$ $\cdot 10^6$ $\cdot 10^5$ $\cdot 10^4$ $\cdot 10^3$ $\cdot 10^2$ $\cdot 10^1$ $\cdot 10^0$ $\cdot 10^{-1}$ $\cdot 10^{-2}$ $\cdot 10^{-3}$ $\cdot 10^{-4}$ $\cdot 10^{-5}$ $\cdot 10^{-6}$ $\cdot 10^{-7}$ $\cdot 10^{-8}$ $\cdot 10^{-9}$ $\cdot 10^{-10}$

Wellenlänge in m

 10^7 10^6 10^5 10^4 10^3 10^2 10^1 10^0 10^{-1} 10^{-2} 10^{-3} 10^{-4} 10^{-5} 10^{-6} 10^{-7} 10^{-8} 10^{-9} 10^{-10} 10^{-11} 10^{-12} 10^{-13} 10^{-14} 10^{-15}
Beleuchtung,
KraftstromNachrichtenverkehr,
Rundfunk, FernsehenFunkmess-
technikSonnenstrahlen an
der ErdoberflächeRöntgen-
photografieStrahlung radio-
aktiver Stoffe

Die kosmische Hintergrundstrahlung

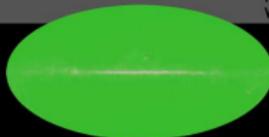
Jugendbilder des Universums

Zeit des Ursprungs der CMBR: ca. 380 000 Jahre nach dem Urknall

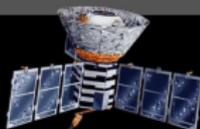
1965



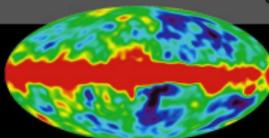
Penzias and
Wilson



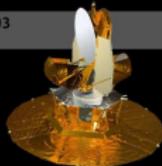
1992



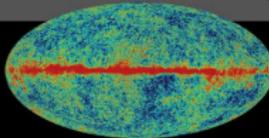
COBE



2003



WMAP

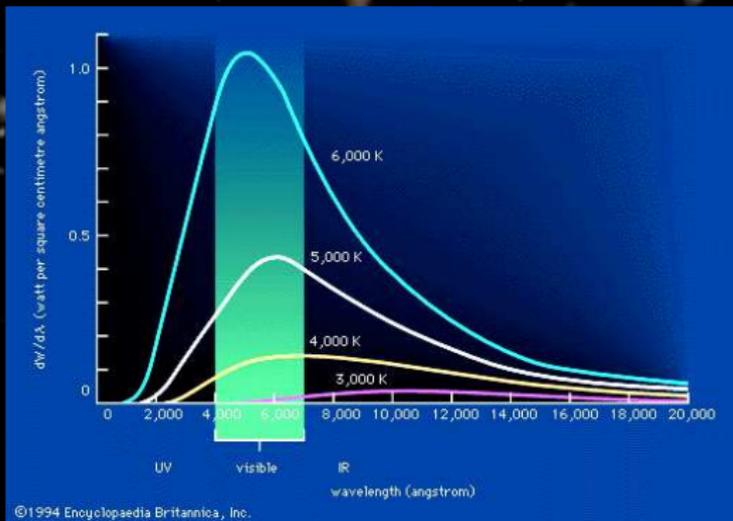


Die Hintergrundstrahlung ist sehr gleichförmig in allen Richtungen

Die kosmische Hintergrundstrahlung

Jugendbilder des Universums

Zeit des Ursprungs der CMBR: ca. 380 000 Jahre nach dem Urknall

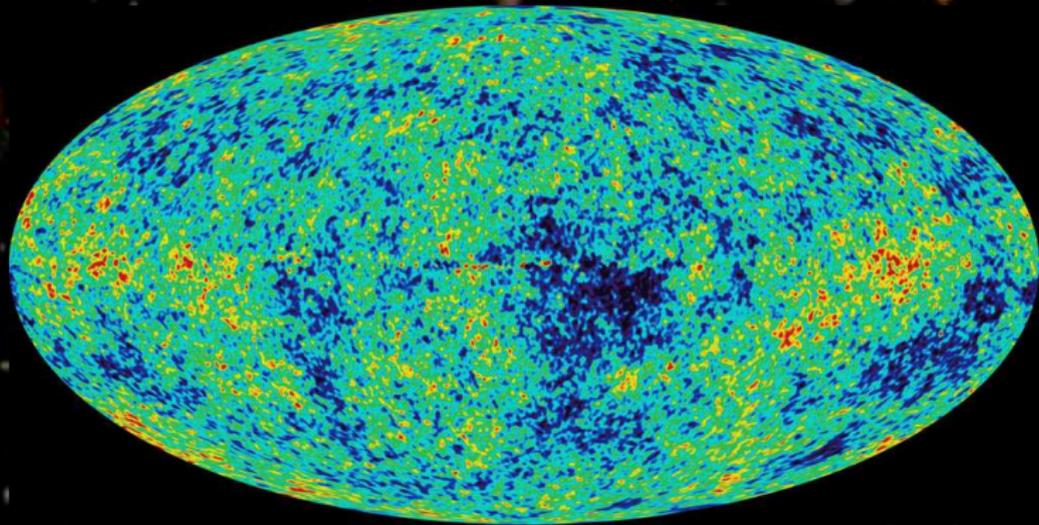


Die kosmische Hintergrundstrahlung hat die Form der Strahlung eines schwarzen Körpers

Die kosmische Hintergrundstrahlung

Jugendbilder des Universums

Zeit des Ursprungs der CMBR: ca. 380 000 Jahre nach dem Urknall



Temperatur $T = 2.73$ K, Temperaturschwankung $\frac{\Delta T}{T} \approx 10^{-5}$

Die kosmische Hintergrundstrahlung



The Nobel Prize in Physics 1978

"for his basic inventions and discoveries in the area of low-temperature physics"

"for their discovery of cosmic microwave background radiation"



**Pyotr Leonidovich
Kapitsa**



Arno Allan Penzias



**Robert Woodrow
Wilson**

Die kosmische Hintergrundstrahlung



The Nobel Prize in Physics 2006

"for their discovery of the blackbody form and anisotropy of the cosmic microwave background radiation"



Photo: NASA

John C. Mather

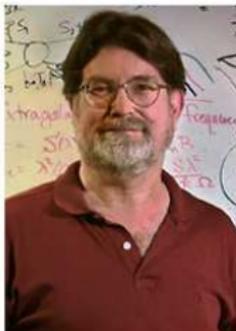


Photo: R. Kaltschmidt/LBNL

George F. Smoot

Die Expansion des Universums

Das Hubble–Gesetz

$$v_i = H r_i$$

In einem expandierenden Universum ist zu jeder beliebigen Zeit die radiale Fluchtgeschwindigkeit einer Galaxis von einem gegebenen Punkt proportional zum Abstand von diesem Punkt.



Edwin P. Hubble 1889 – 1953

Die Expansion des Universums

Das Hubble–Gesetz

$$v_i = H r_i$$

In einem expandierenden Universum ist zu jeder beliebigen Zeit die radiale Fluchtgeschwindigkeit einer Galaxis von einem gegebenen Punkt proportional zum Abstand von diesem Punkt.

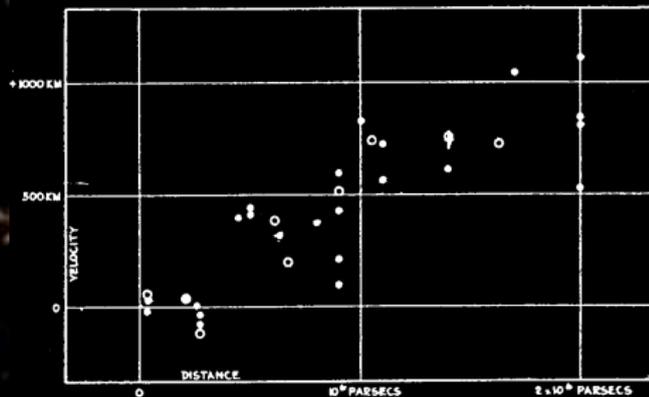


FIGURE 1

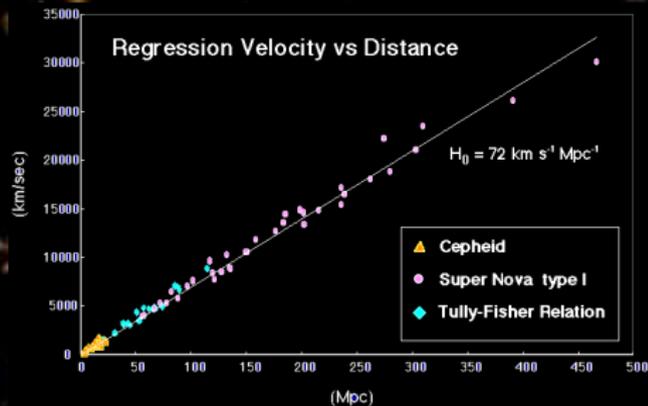
Originaldaten von Hubble 1929

Die Expansion des Universums

Das Hubble–Gesetz

$$v_i = H r_i$$

In einem expandierenden Universum ist zu jeder beliebigen Zeit die radiale Fluchtgeschwindigkeit einer Galaxis von einem gegebenen Punkt proportional zum Abstand von diesem Punkt.



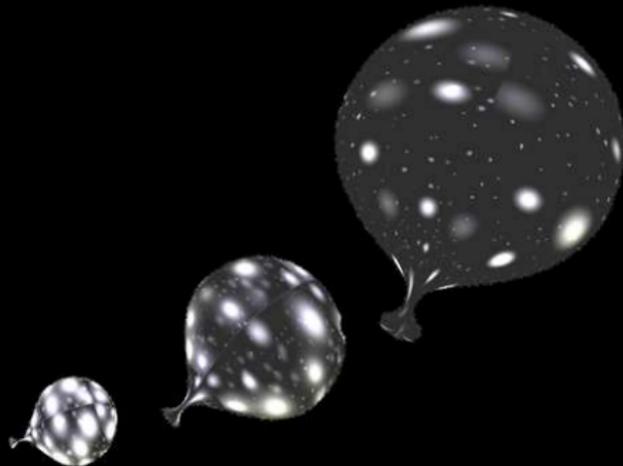
heutige Kurve

Die Expansion des Universums

Das Hubble–Gesetz

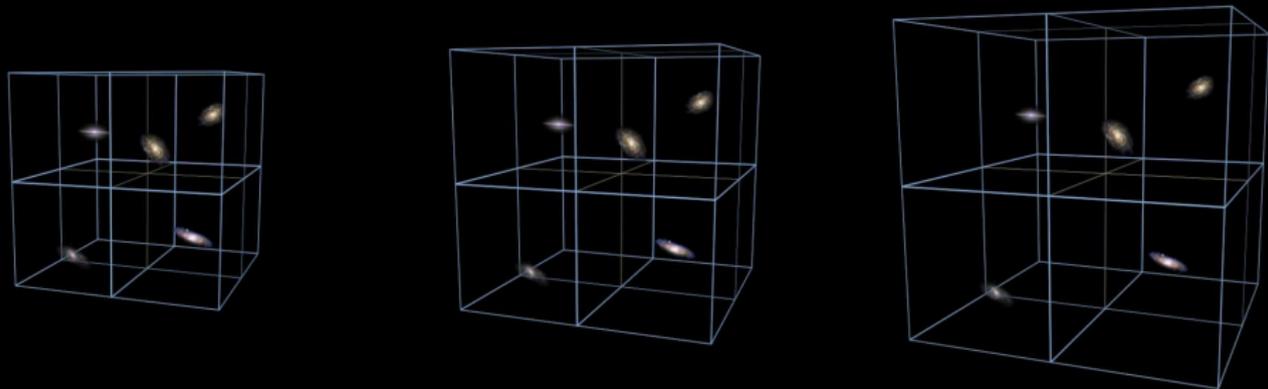
$$v_i = H r_i$$

In einem expandierenden Universum ist zu jeder beliebigen Zeit die radiale Fluchtgeschwindigkeit einer Galaxis von einem gegebenen Punkt proportional zum Abstand von diesem Punkt.



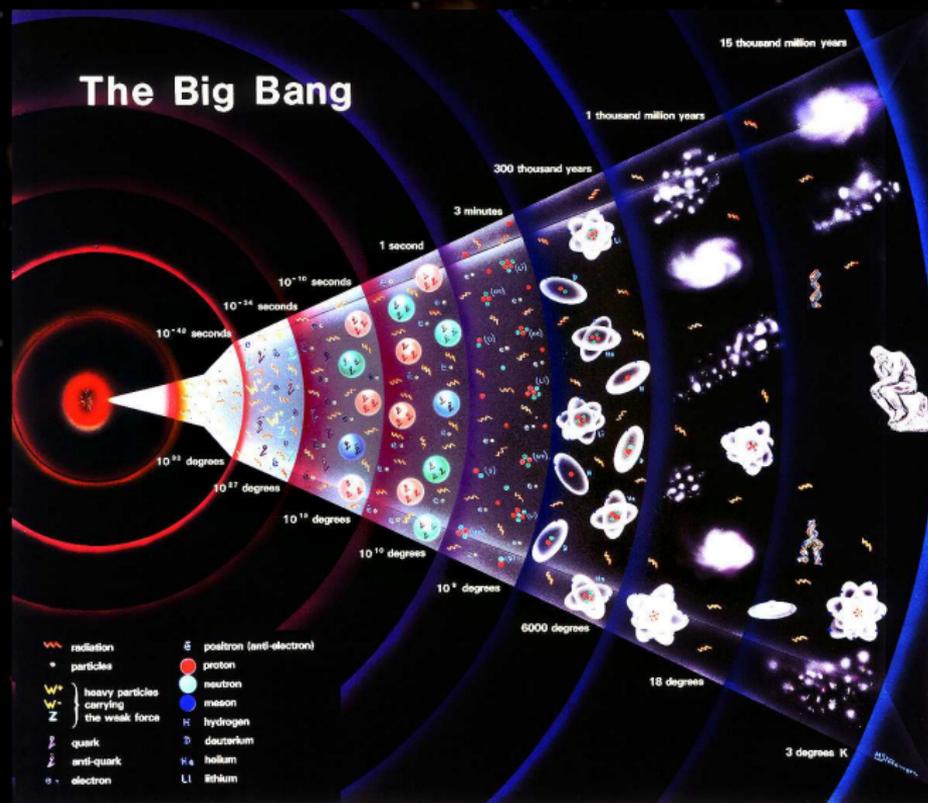
Luftballon-Analogie

Die Expansion des Universums



Die Ausdehnung eines flachen Universums

Das dynamische Universum



Das Universum ist dynamisch und nicht statisch

Inhalt

Beobachtungen zur Kosmologie

Theorie der Kosmologie

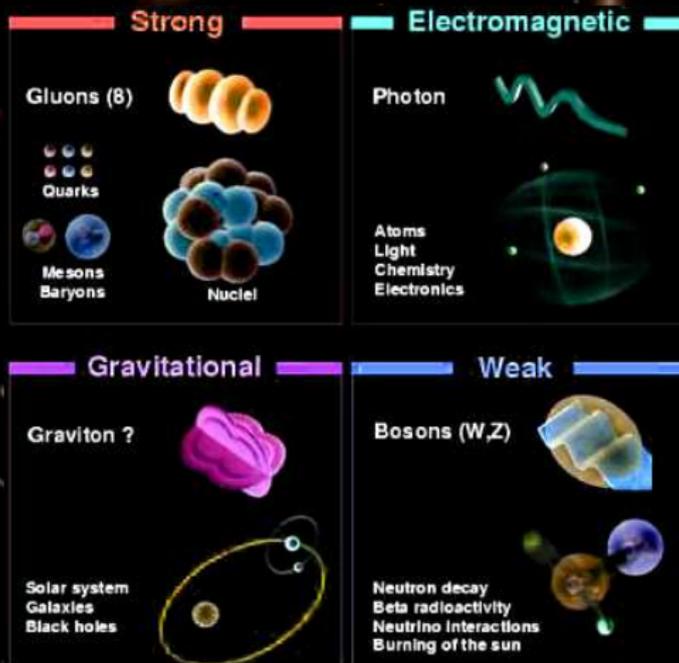
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Das frühe Universum

Dunkle Materie und Dunkle Energie

Die Zukunft des Universums

Grundlegende Annahmen: Gesetze der Physik

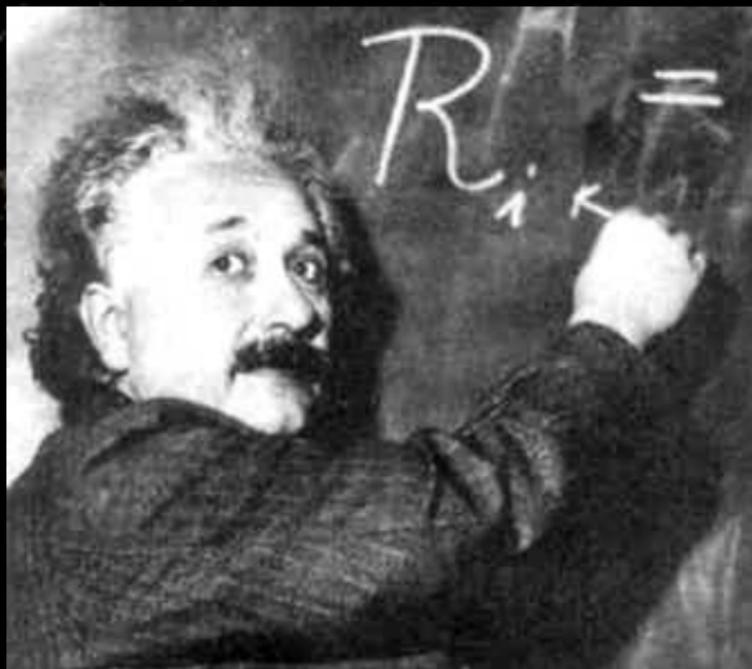


- Die physikalischen Gesetze, wie sie hier und heute gelten, gelten **überall** und **zu allen Zeiten**.

Resultat: ART

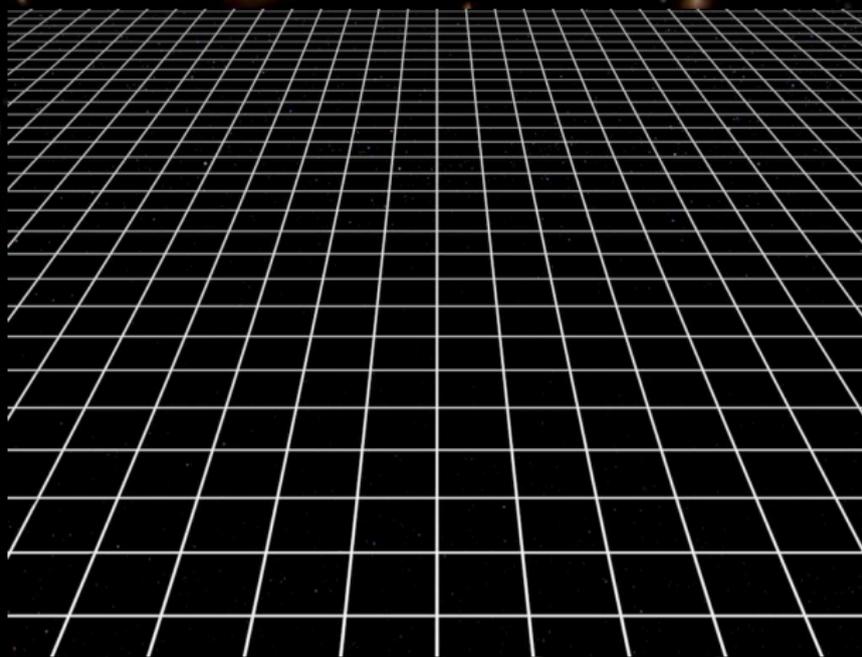


Resultat: ART



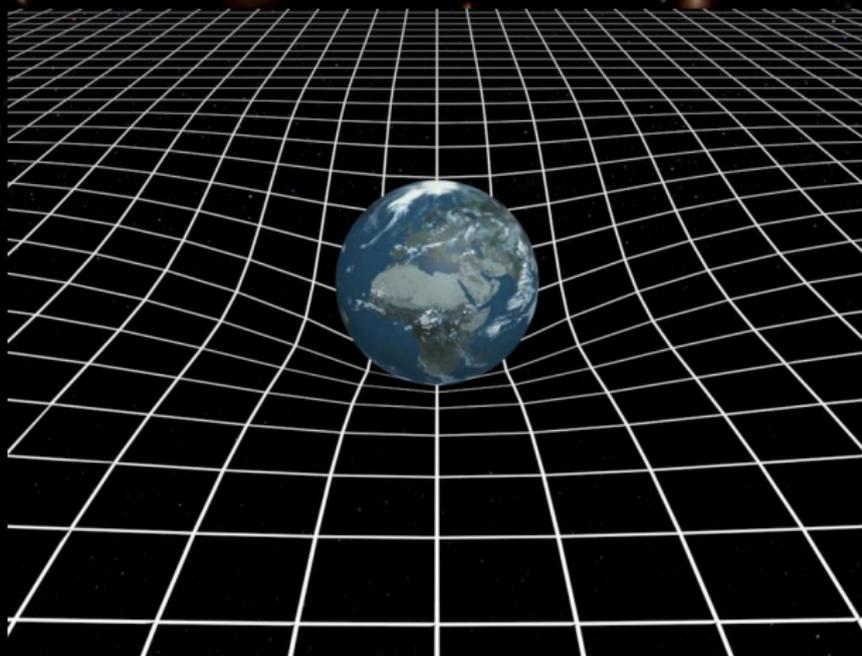
Albert Einstein 1879 – 1955

Flache Raum-Zeit



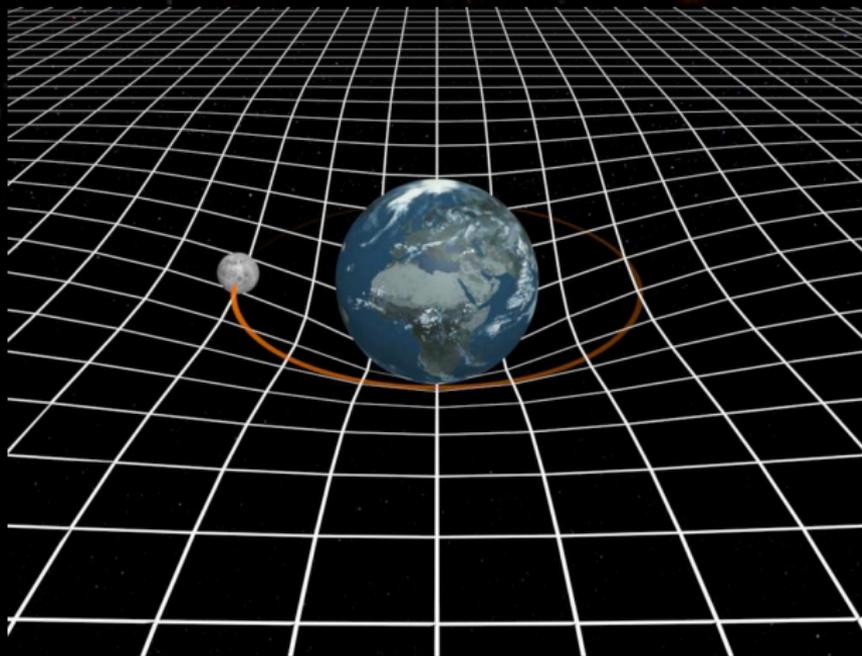
Keine Materie: flache Raum-Zeit

Gekrümmte Raum-Zeit



Die Materie bestimmt die Geometrie von Raum und Zeit

Bewegung in der gekrümmten Raum-Zeit



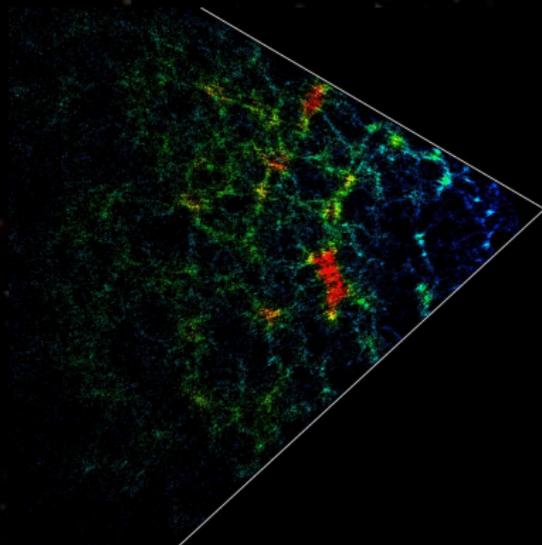
Die Geometrie der Raum-Zeit bestimmt die Bewegung von Körpern

Grundlegende Annahmen: Naturkonstanten

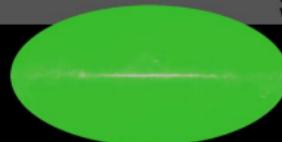


- Die fundamentalen Konstanten haben **überall** und **zu allen Zeiten** die Werte, die wir hier und heute messen.

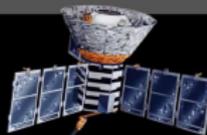
Grundlegende Annahmen: Kosmologisches Prinzip



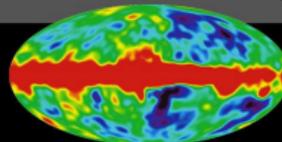
1965

Penzias and
Wilson

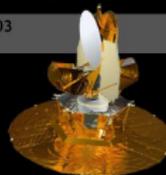
1992



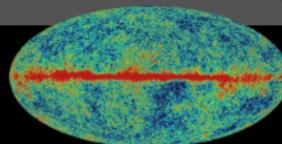
COBE



2003



WMAP

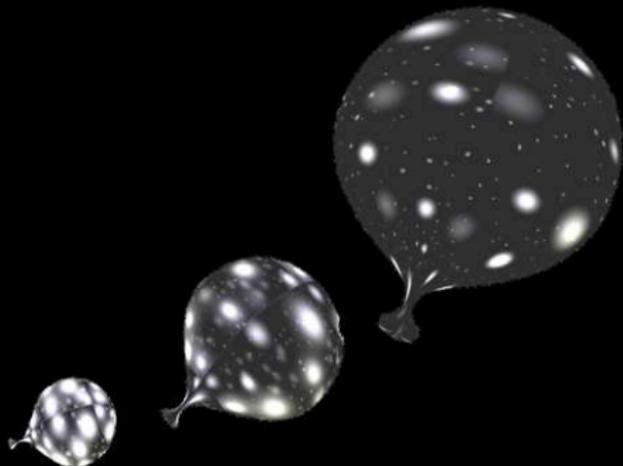


Das Universum sieht für jeden Beobachter im Universum gleich aus

Dynamik des Universums

Friedmann–Lemaître Gleichung:

- Radius oder Skalenfaktor des Universums $a(t)$
- Krümmungsparameter des Universums K



Alexander Friedmann
1888–1925

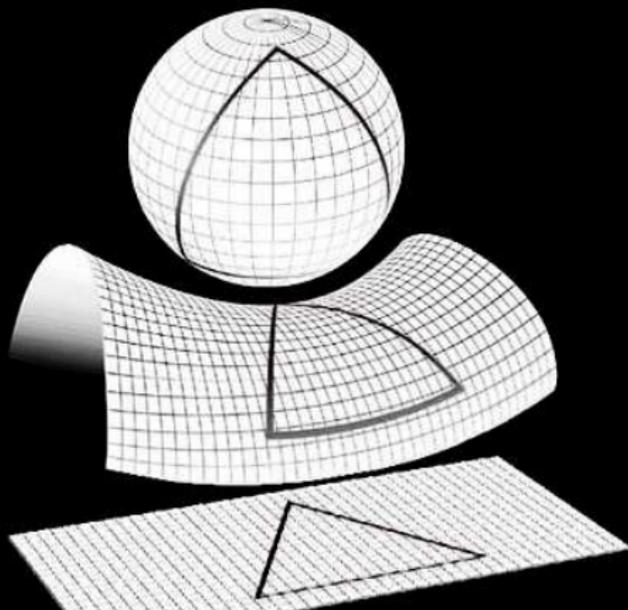


Georges Lemaître
1894–1966

Dynamik des Universums

Friedmann–Lemaître Gleichung:

- Radius oder Skalenfaktor des Universums $a(t)$
- Krümmungsparameter des Universums K



Alexander Friedmann
1888–1925

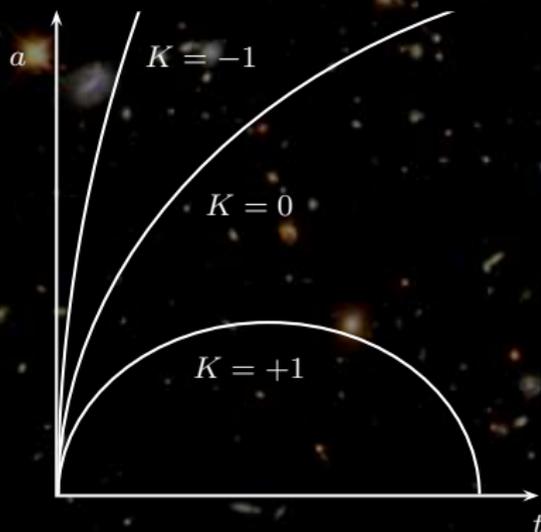


Georges Lemaître
1894–1966

Dynamik des Universums

Friedmann–Lemaître–Lösungen ($\Lambda = 0$)

In der Vergangenheit gab es notwendigerweise einen Urknall

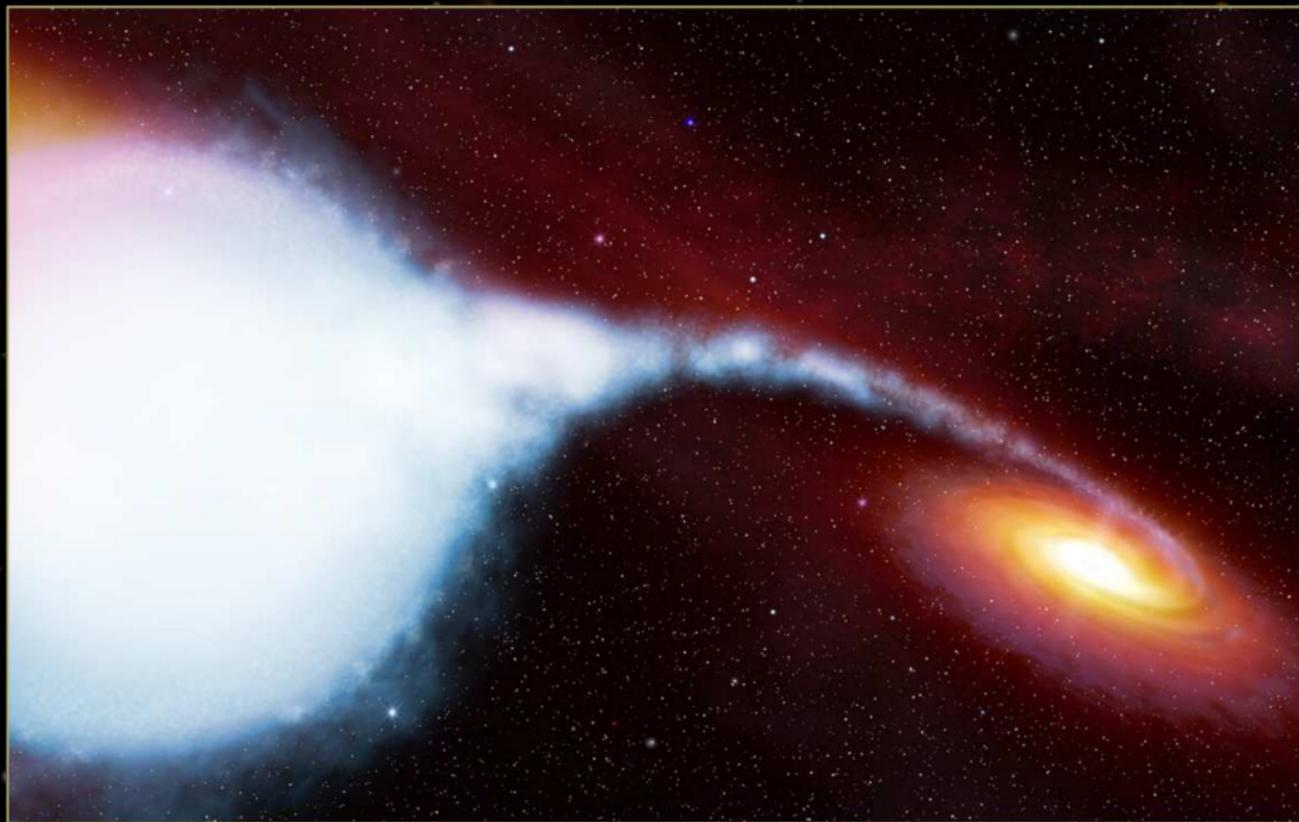


Die Gravitation wirkt immer anziehend

\Rightarrow Das Universum dehnt sich immer langsamer aus (und kollabiert wieder, wenn genügend Materie vorhanden ist)

Stimmt das wirklich?

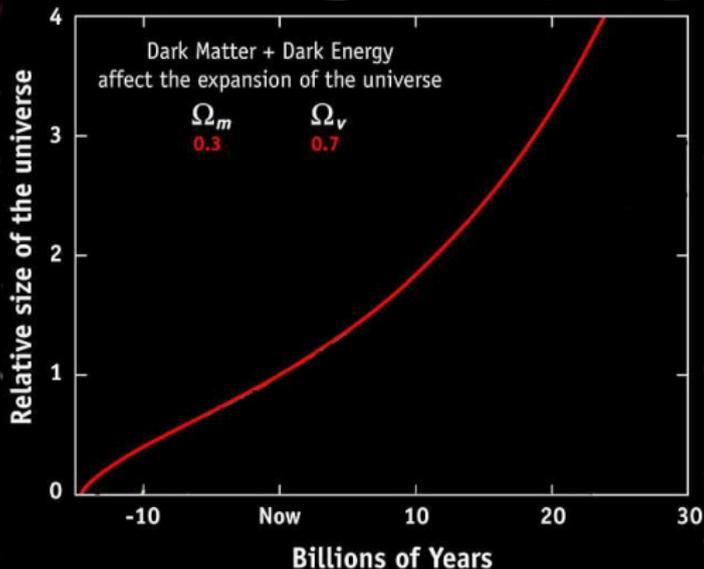
Die beschleunigte Expansion des Universums



Die beschleunigte Expansion des Universums

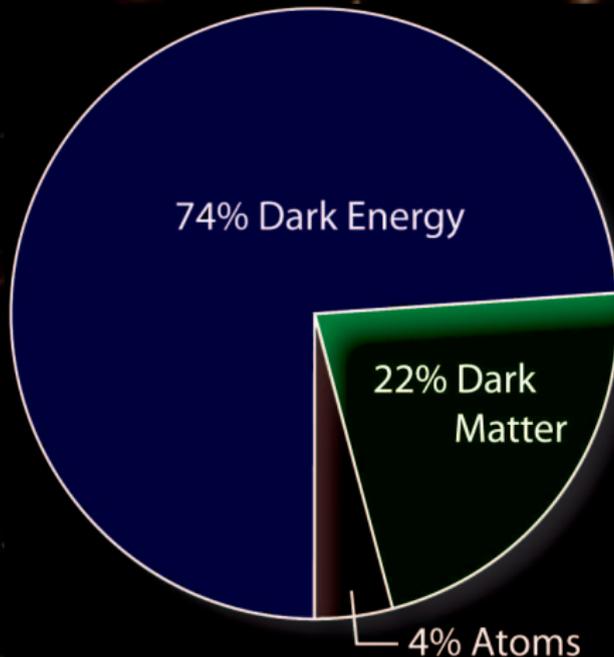
Friedmann–Lemaître–Lösungen ($\Lambda = 0$ und $\Lambda \neq 0$)

Alter des Universums 13,7 Milliarden Jahre



Die kosmologische Konstante wirkt abstoßend

Energie und Materie im Universum



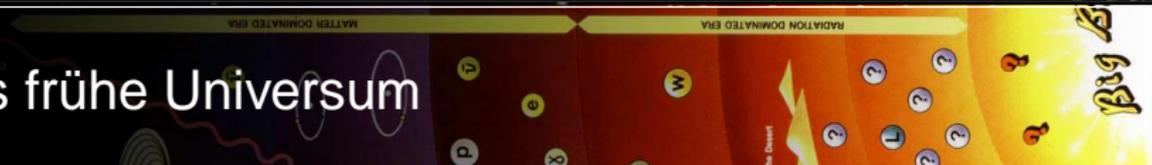
Das Unversum besteht zu 96% aus dunkler Materie und dunkler Energie

Inhalt

Beobachtungen zur Kosmologie

Theorie der Kosmologie $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$

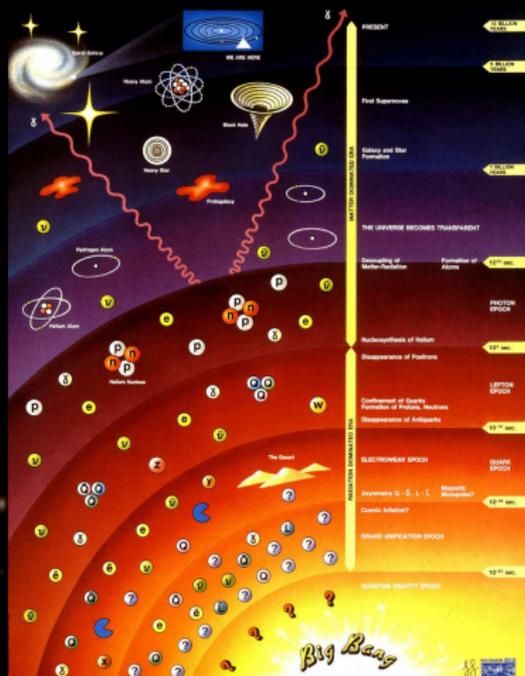
Das frühe Universum



Dunkle Materie und Dunkle Energie

Die Zukunft des Universums

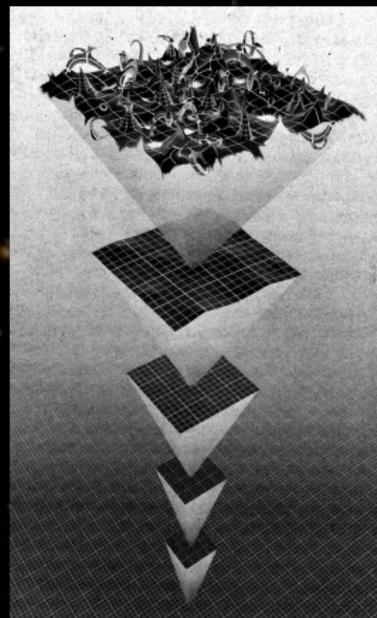
Kleine zeitliche Übersicht



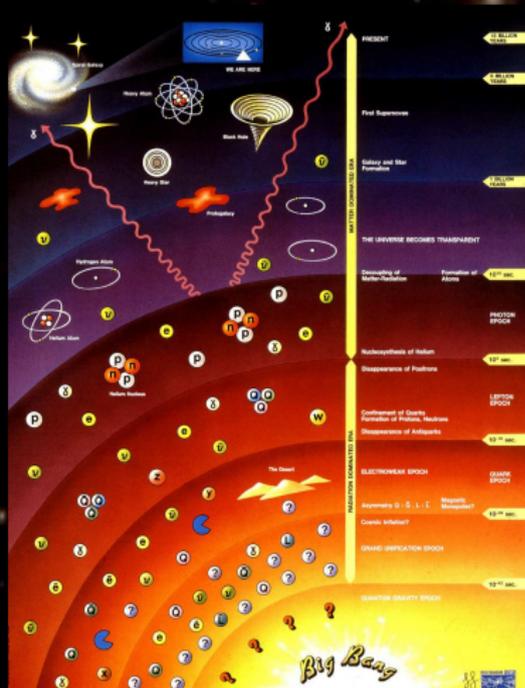
Ära der Spekulationen

$$t \approx 10^{-43} \text{ s}, T \approx 10^{19} \text{ GeV}$$

Planck Ära: Quantengravitation

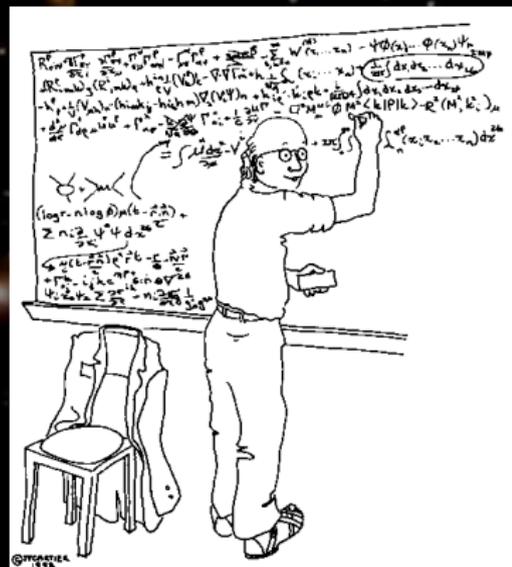


Kleine zeitliche Übersicht



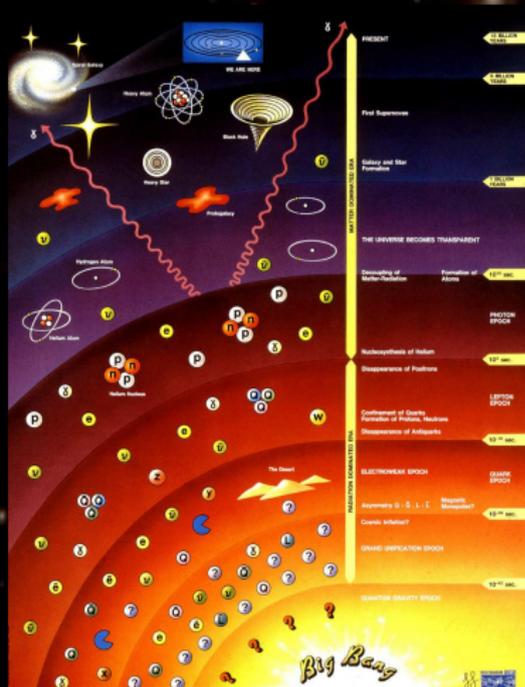
Ära der Spekulationen

$$10^{-43} < t < 10^{-12} \text{ s}$$



"At this point we notice that this equation is beautifully simplified if we assume that space-time has 92 dimensions."

Kleine zeitliche Übersicht



Ära der Teilchenphysik

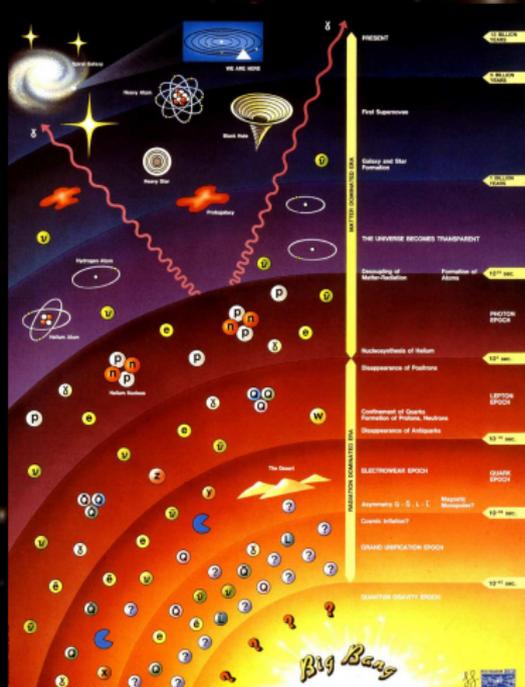
$$t \approx 10^{-12} \text{ s}$$

die Ursuppe besteht aus den bekannten Elementarteilchen

A visit to the particle zoo

		Matter			Antimatter				
		Charge						Charge	
Quarks	+2/3	u Up quark	c Charm quark	t Top quark	\bar{u} Anti-up quark	\bar{c} Anti-charm quark	\bar{t} Anti-top quark	-2/3	Quarks
	-1/3	d Down quark	s Strange quark	b Bottom quark	\bar{d} Anti-down quark	\bar{s} Anti-strange quark	\bar{b} Anti-bottom quark	+1/3	
Leptons	0	ν_e Electron neutrino	ν_μ Muon neutrino	ν_τ Tau neutrino	$\bar{\nu}_e$ Antineutrino	$\bar{\nu}_\mu$ Anti-muon neutrino	$\bar{\nu}_\tau$ Anti-tau neutrino	0	Leptons
	-1	e^- Electron	μ Muon	τ Tau	e^+ Positron	$\bar{\mu}$ Anti-muon	$\bar{\tau}$ Anti-tau	+1	

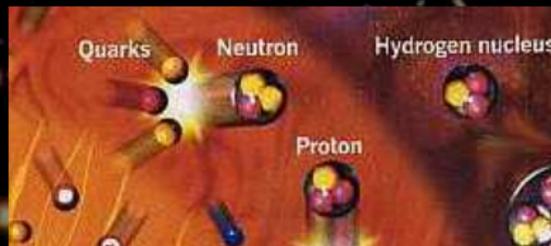
Kleine zeitliche Übersicht



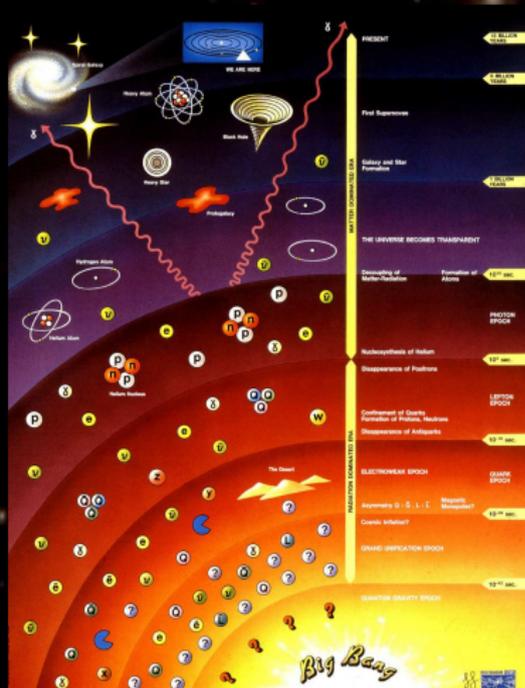
Ära der Teilchenphysik

$$t \approx 10^{-5} \text{ s}$$

Kernbausteine Proton und Neutron entstehen



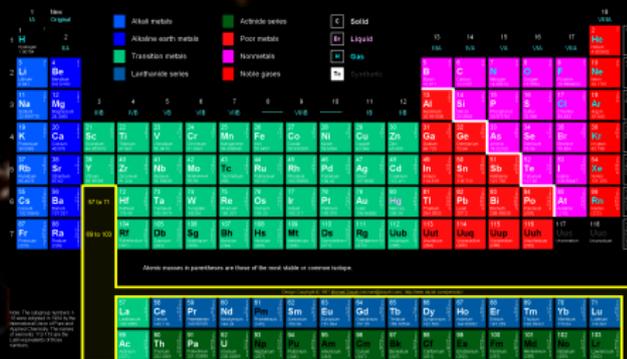
Kleine zeitliche Übersicht



Ära der Kernphysik

$$10^{-2} < t < 10^2 \text{ s}$$

Periodensystem

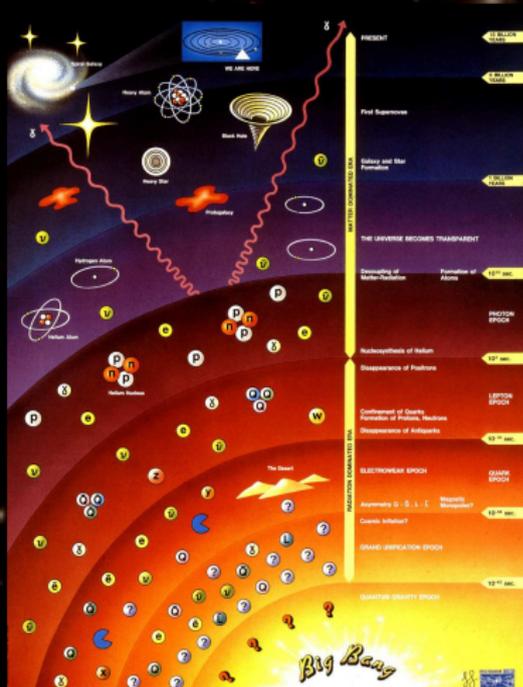


Im Urknall werden die leichten Elemente gebildet:



Die schweren Elemente werden später in Sternen gebildet

Kleine zeitliche Übersicht



Ära der Sternbildung

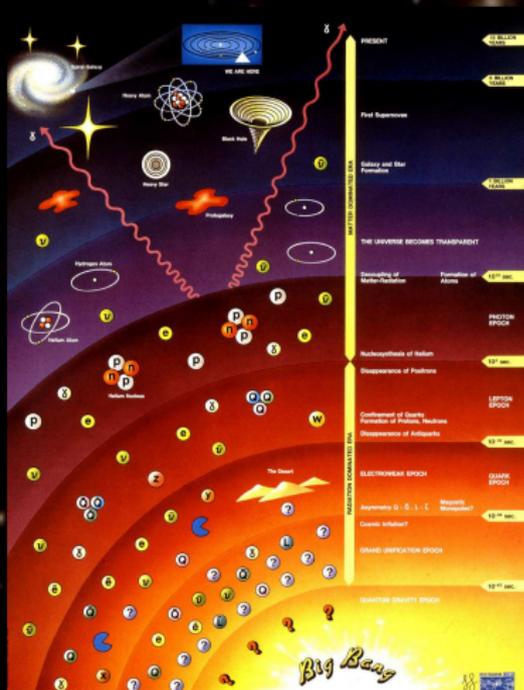
$t \approx 10^{16}$ s \approx einige hundert Millionen Jahre

- erste Sternengeneration: keine schweren Elemente
- Entstehung der schweren Elemente



Riesen-Protostern

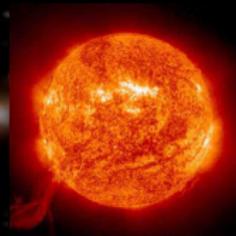
Kleine zeitliche Übersicht



Ära der Sternbildung

$t \geq 10^{16}$ s \approx einige hundert Millionen Jahre

- erste Sternengeneration: keine schweren Elemente
- Entstehung der schweren Elemente



Sonne: Alter 5 Milliarden Jahre

Inhalt

Beobachtungen zur Kosmologie

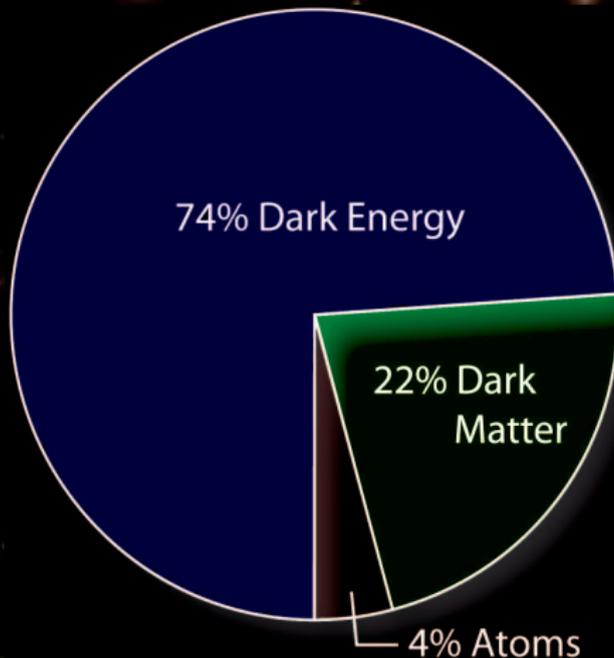
Theorie der Kosmologie $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$

Das frühe Universum

Dunkle Materie und Dunkle Energie

Die Zukunft des Universums

Energie und Materie im Universum



Das Unversum besteht zu 96% aus dunkler Materie und dunkler Energie

Dunkle Materie

Die meiste Materie im Universum ist dunkel



Dunkle Materie



Leuchtende Materie

Dunkle Materie sendet kein Licht aus und reflektiert kein Licht → dunkel.
Auf dunkle Materie kann nur indirekt geschlossen werden:
durch die Bewegung leuchtender Objekte und durch Lichtablenkung

- Gas
- Sterne
- Galaxien
- Cluster ...
- Licht (Gravitationslinseneffekt)

Dunkle Materie

Rotationskurven von Spiralgalaxien



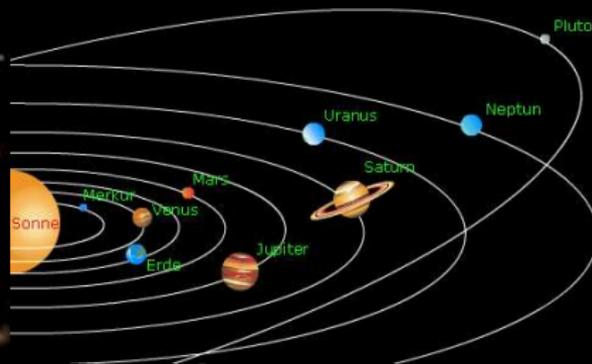
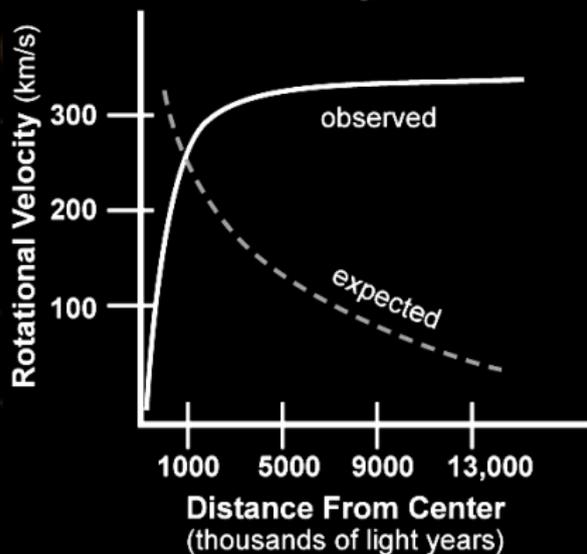
Spiralnebel



Vera Rubin

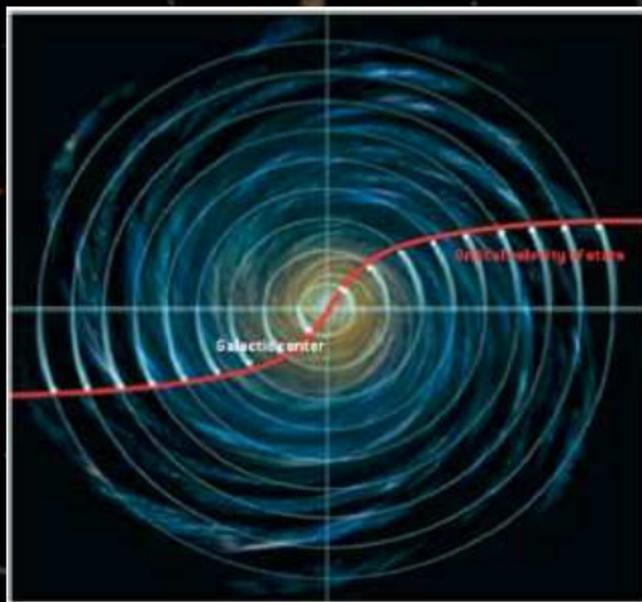
Dunkle Materie

Erwartung der Rotationskurve für eine Spiralgalaxie



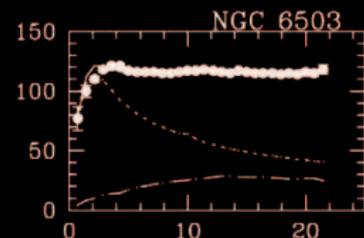
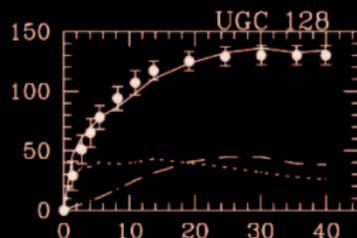
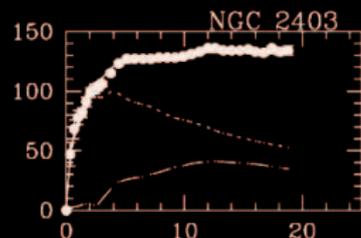
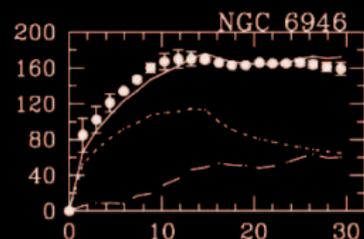
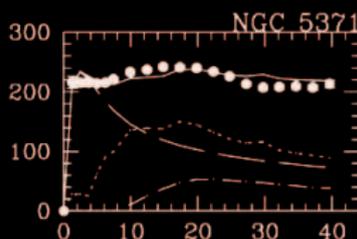
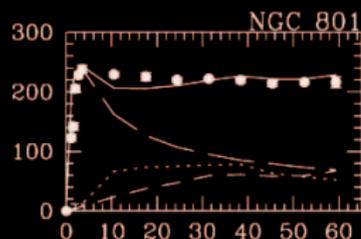
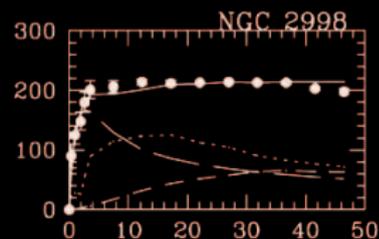
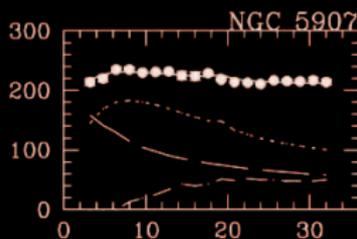
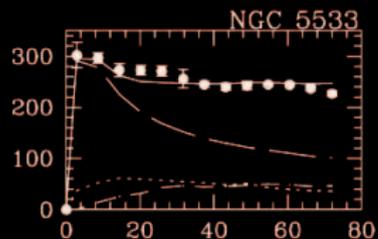
Dunkle Materie

gemessene Rotationskurven: typische Beispiele



Dunkle Materie

gemessene Rotationskurven: typische Beispiele

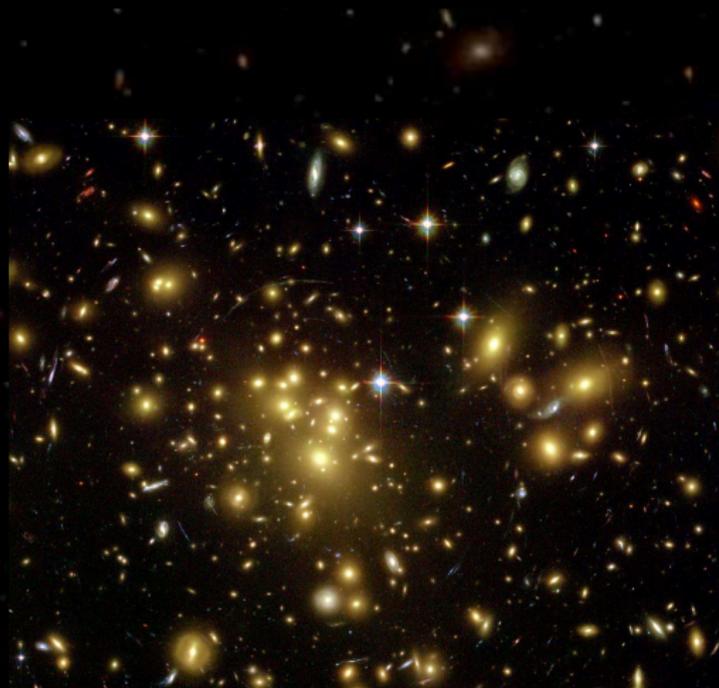


Dunkle Materie

Spiralgalaxie eingebettet in HALO



Dunkle Materie



Galaxien Cluster



Fritz Zwicky

Dunkle Materie

Zusammenfassung: Die meiste Materie im Universum ist **Dunkle Materie**.

Unterscheidung:

Dunkle Materie, die aus Atomen besteht

- Gas, Staub
- Planeten
- braune Zwerge
- weiße Zwerge
- Neutronensterne
- schwarze Löcher ...

} < 4 %

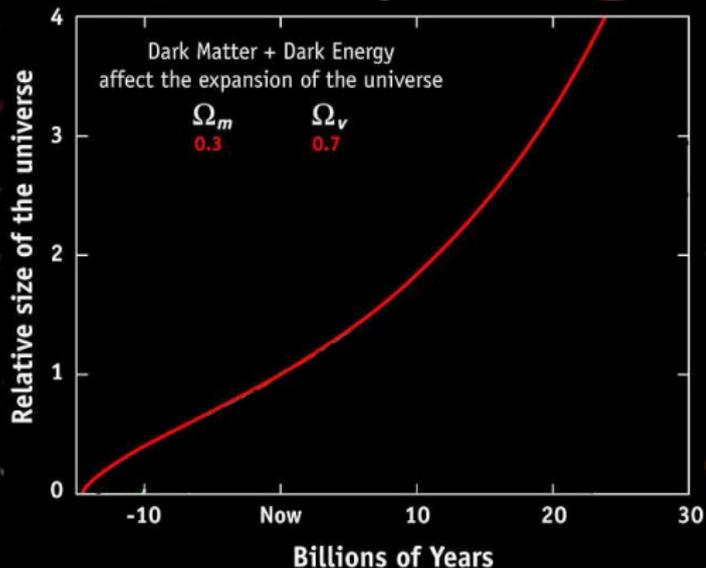
Dunkle Materie, die nicht aus Atomen besteht

exotische dunkle Materie!

- WIMPs

} = 22 %

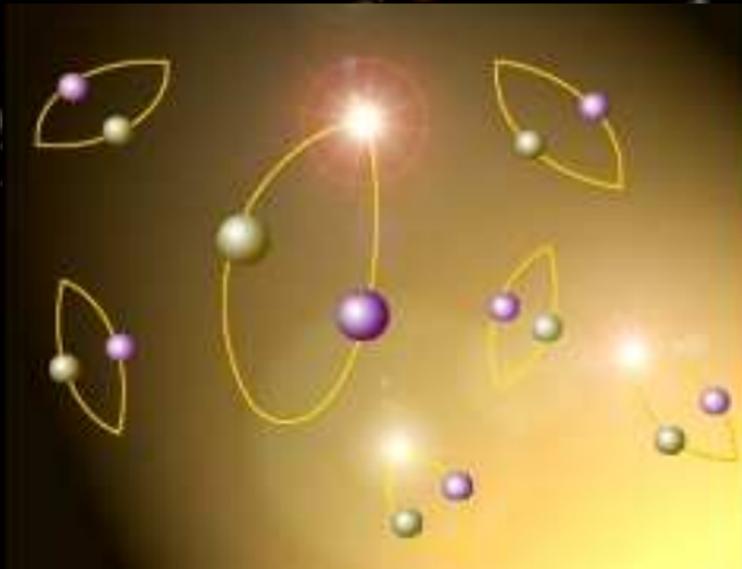
Die beschleunigte Expansion des Universums



Die kosmologische Konstante wirkt abstoßend

Dunkle Energie

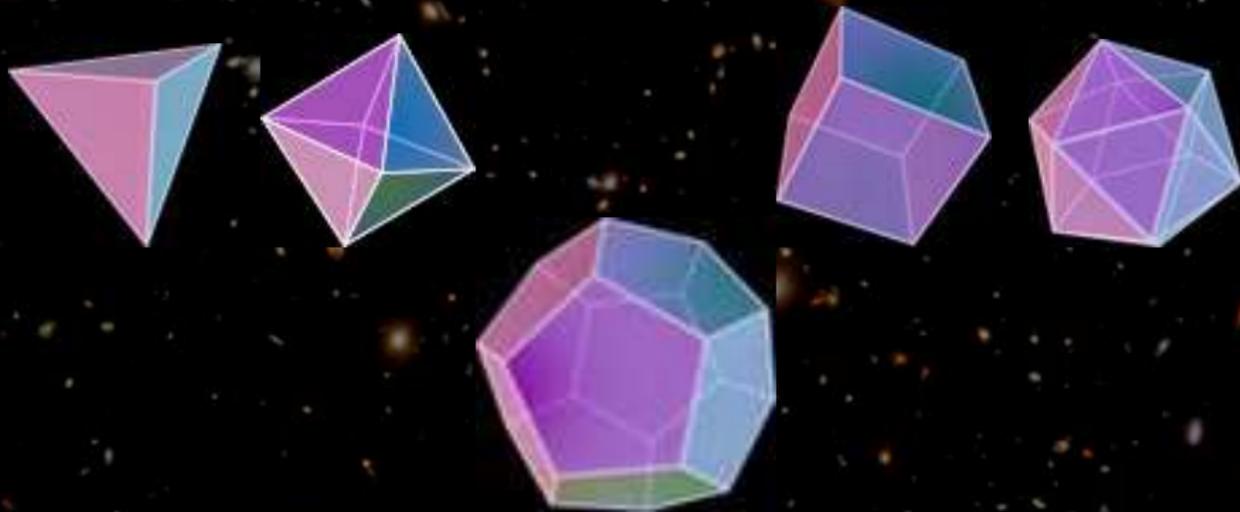
Vakuumenergie:



↔ Einsteins kosmologische Konstante

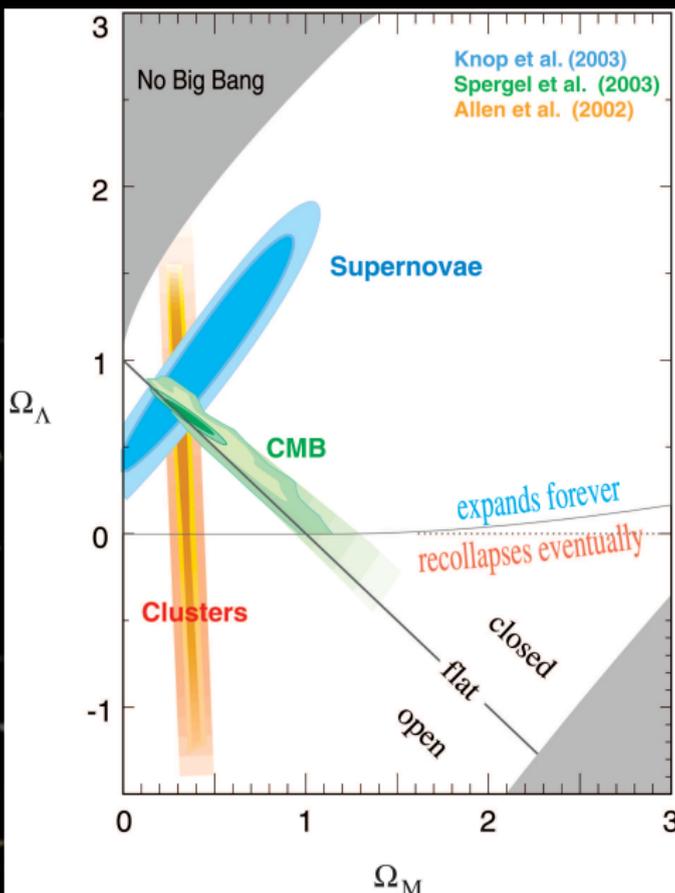
Dunkle Energie

Plato postulierte ein 5. Element, das zu dem 5. platonischen Körper (Dodekahedron) gehören sollte, aus dem der Kosmos selbst gemacht ist: Quintessenz



Quintessenz: Die fünfte Kraft,
kosmologische Kraft neben den vier bekannten Kräften

Dunkle Energie: überwältigende Evidenz



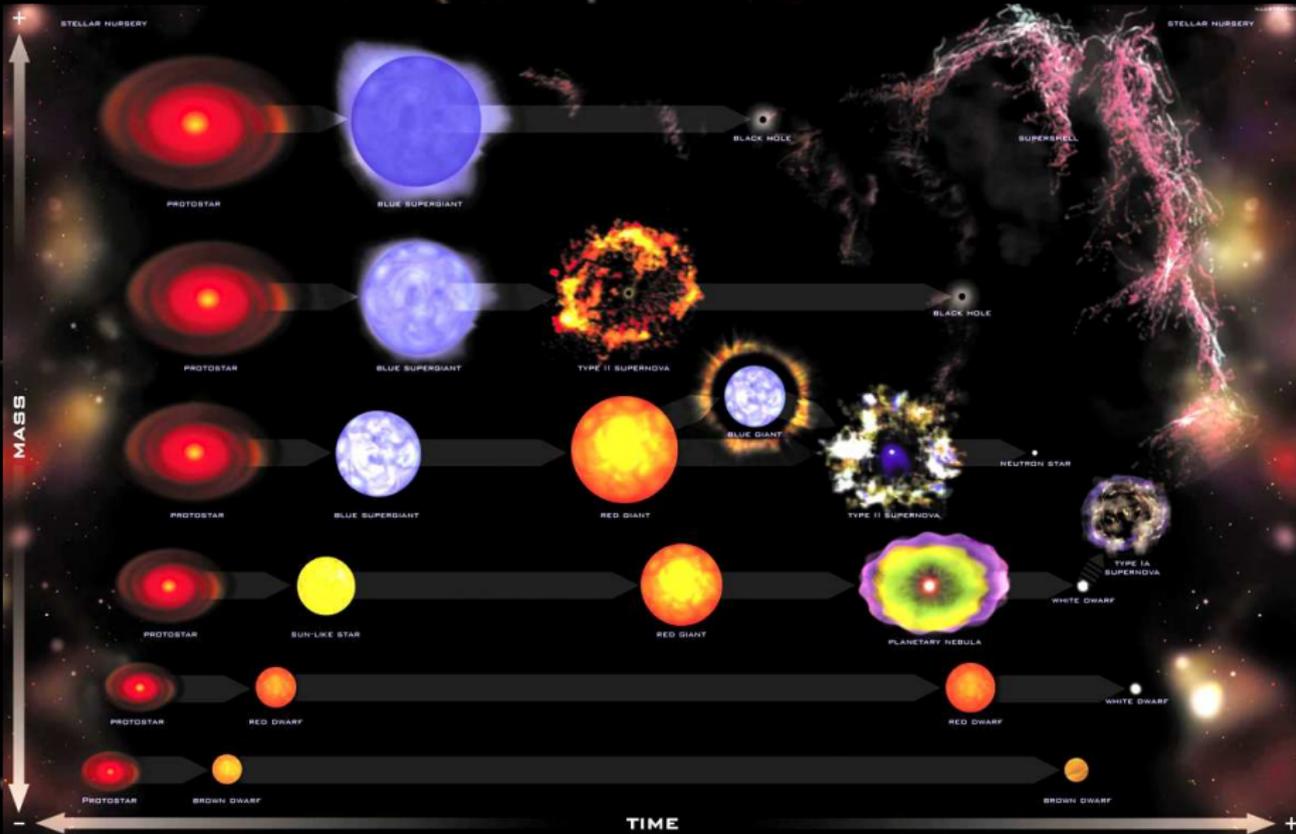
Dunkle Energie

96 % des Universums sind dunkel/unverstanden:

Dunkle Energie:

größtes Rätsel der heutigen Physik

Sternentwicklung



Ende des Lebens auf der Erde

In etwa 5 Milliarden Jahren wird die Sonne zu einem roten Riesen

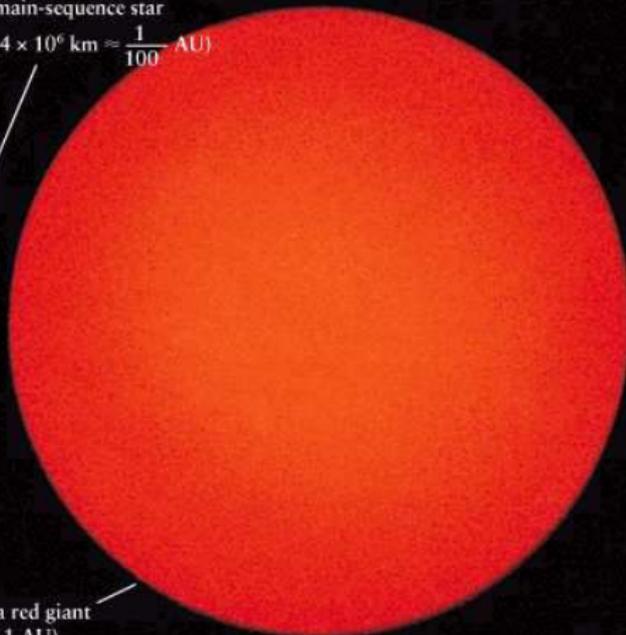
Zerstörung: Planeten

- Vergrößerung des Sternradius
- Erhöhung der Temperatur durch Ausdehnung des Sternplasma

The Sun as a main-sequence star
(diameter = 1.4×10^6 km $\approx \frac{1}{100}$ AU)



The Sun as a red giant
(diameter = 1 AU)



Ära der Sternbildung

Heute: Etwa 10^{10} Jahre, also 10 Milliarden Jahre

- heute sind wir noch am Anfang der Ära der Sternbildung
- die normale Sternbildungsphase endet nach 10^{14} Jahren d.h. nach 100 Billionen Jahren



Ära der Sternbildung

Sternbildung aus Sternen

Ursache

- Kollisionen von Sternen und Galaxien



Ende der Stern- und Galaxieevolution

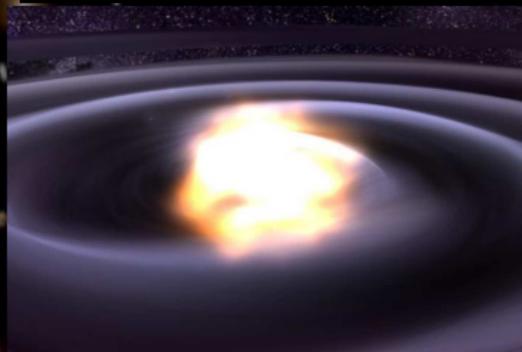
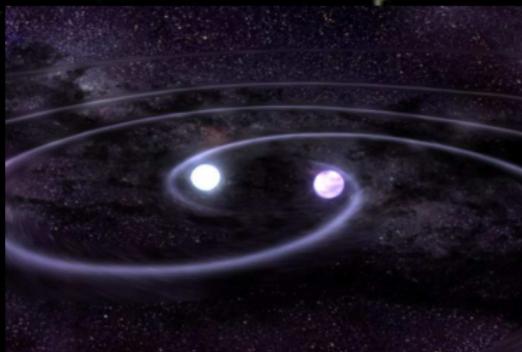
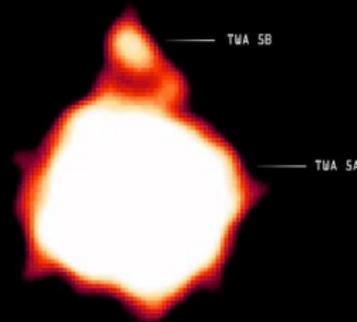
Sterne mit $0.08M_{\odot} - 0.25M_{\odot}$ am häufigsten, ihre Lebenszeit ist am längsten:

- Zeitskala für Wasserstoffverbrennung abhängig von Masse des Sterns
- Sternbildung und -verbrennung zur Zeit 10^{14} Jahren abgeschlossen
- Keine neuen Rohstoffe, um Sterne zu bilden
- Galaxien verblassen

Sternbildung nach der Ära der Sternbildung

Endprodukte, wenn die normale
Sternevolution aufgehört hat:
braune Zwerge, weiße Zwerge,
Neutronensterne, schwarze Löcher

- Stöße zwischen braunen Zwergen
- Stöße zwischen weißen Zwergen

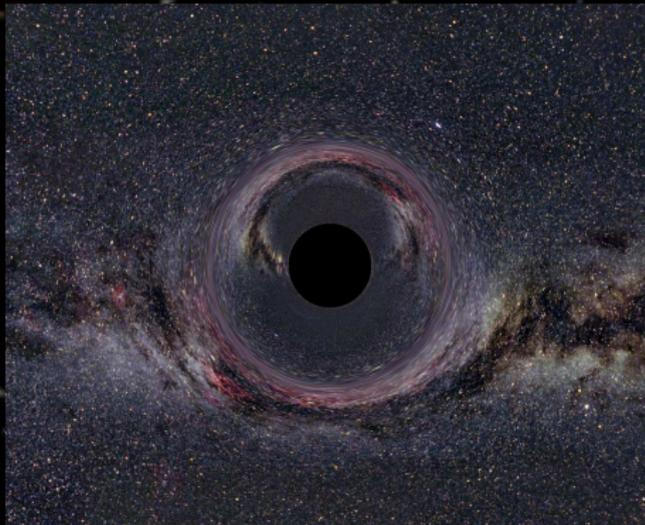


Zerfall der Galaxien

$10^{15} - 10^{30}$ Jahre

Mechanismen des Zerfalls

- Kollisionlose Zusammenstöße: Sterne verlassen Galaxis
 - Energieverlust durch Gravitationswellen:
- Ansammlung der gesamten Masse im zentralen schwarzen Loch



Zerfall der Galaxiencluster

Zerfall der Galaxiencluster durch

- Bildung von noch größeren schwarzen Löchern, massiv wie ganze Galaxien
- Zusammenstöße von schwarzen Löchern und stellaren Objekten wirft Objekte aus den Superclustersystemen (Abkopplung)

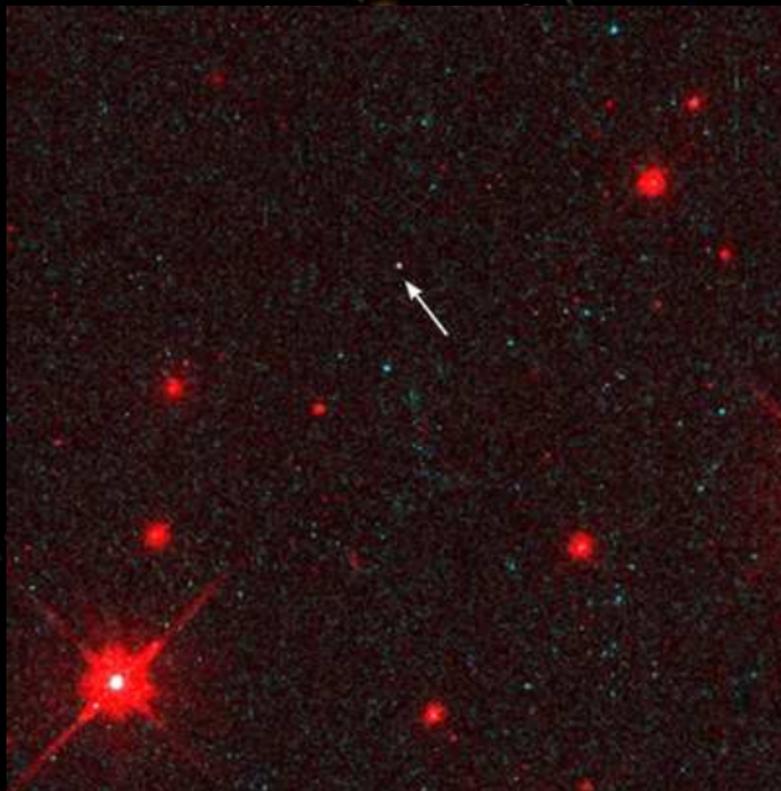
Resultat

Übrig bleiben einige supermassive schwarze Löcher, umgeben von umherwandernden toten Sternen



Das Zeitalter der Schwarzen Löcher

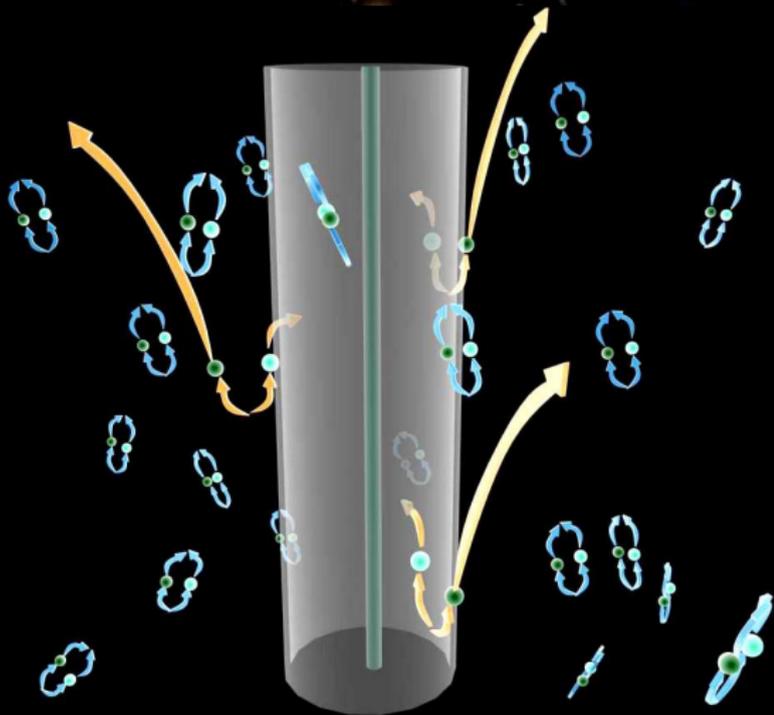
Zerfall von stellaren Objekten
Auflösung stellarer Objekte
(Neutronensterne, braune und
weiße Zwerge, Planeten)
durch Zerfall der Nukleonen



Das Zeitalter der Schwarzen Löcher

Auflösung der Schwarzen Löcher

- Auflösung durch Hawkingstrahlung
- Zeitskala: 10^{98} Jahre für $M = 10^{11} M_{\odot}$



Das dunkle Universum

“Leere”

Um 10^{100} Jahre:

- Universum besteht im Wesentlichen aus
 - Photonen mit immenser Wellenlänge
 - Elektronen
 - Positronen

Das Ende des Universums

Das Ende

Ende

