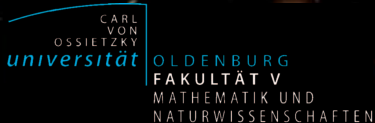


# Das dunkle Universum

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 temperature variations across the sky, with colors ranging from dark blue (cooler) to bright yellow and red (warmer). The fluctuations are most prominent in the upper right quadrant of the box.

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

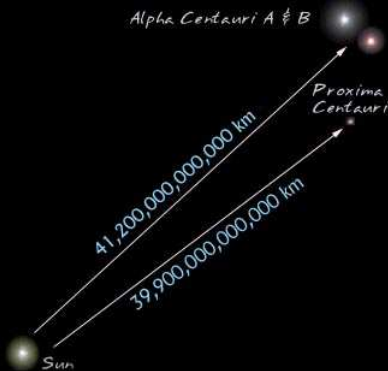
# Größen und Distanzen in der Astronomie



Sonnensystem

Abstand Erde – Sonne: 150 Millionen km = 8 Lichtminuten

# Größen und Distanzen in der Astronomie



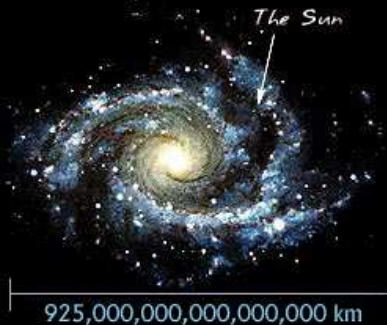
Die nächsten Sterne  
Abstand Sonne – Proxima Centauri: 4 Lichtjahre

# Größen und Distanzen in der Astronomie



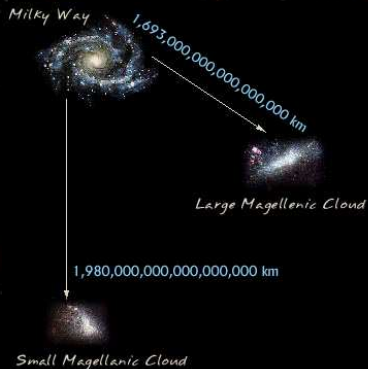
## Die Umgebung der Sonne

# Größen und Distanzen in der Astronomie



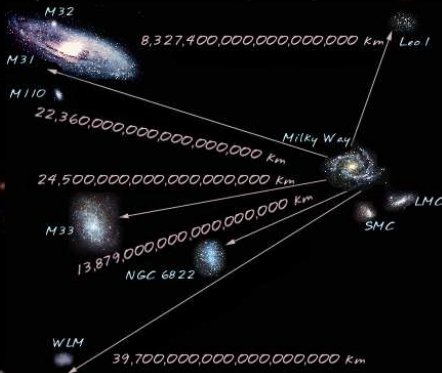
Die Milchstraße  
Durchmesser etwa 100000 Lichtjahre

# Größen und Distanzen in der Astronomie



Nächste Galaxien

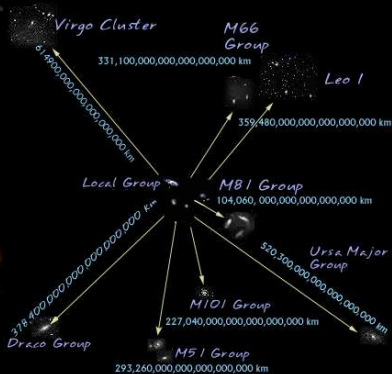
## Größen und Distanzen in der Astronomie



## Die lokale Gruppe

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

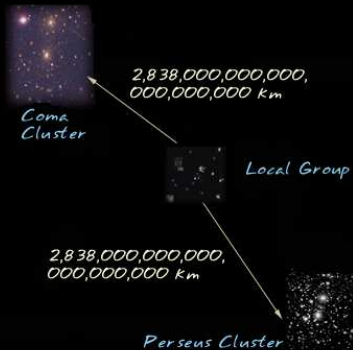
# Größen und Distanzen in der Astronomie



Das lokale Supercluster



# Größen und Distanzen in der Astronomie



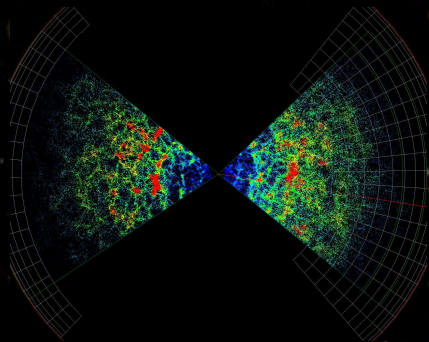
Die nächsten Supercluster

# 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 ( $\approx 150$  Millionen km) einer Bogensekunde entspricht = 3.261 Lichtjahre

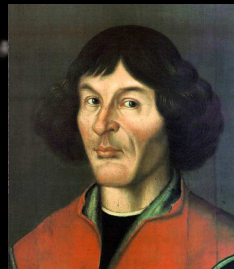
# Das kosmologische Prinzip

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



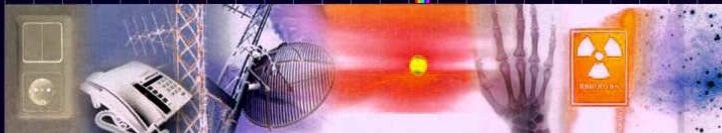
# Das elektromagnetische Spektrum

## 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

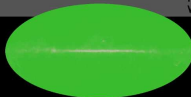
Jugendbilder des Universums

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

1965



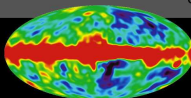
Penzias and  
Wilson



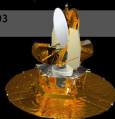
1992



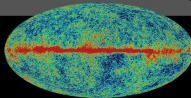
COBE



2003



WMAP

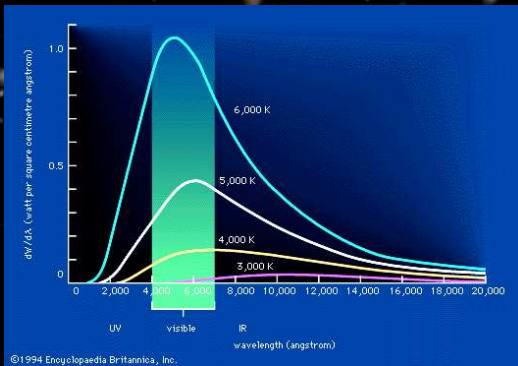


Die Hintergrundstrahlung ist sehr gleichförmig in allen Richtungen

# Die kosmische Hintergrundstrahlung

Jugendbilder des Universums

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

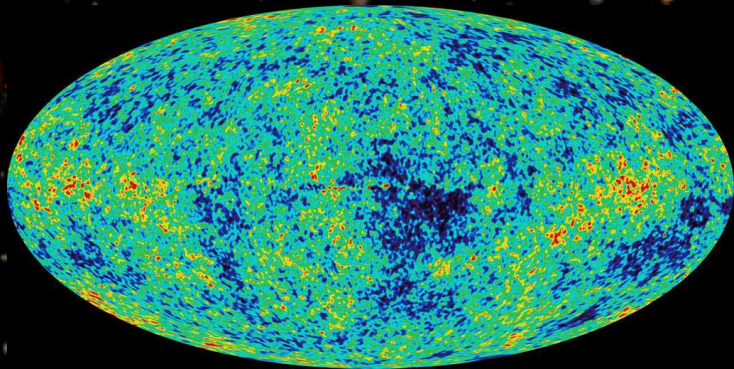


Die kosmische Hintergrundstrahlung hat die Form der Strahlung eines schwarzen Körpers

# 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**

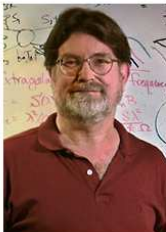


Photo: R. Kaltschmidt/LBNL

**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.



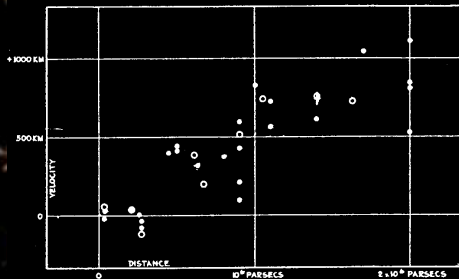
Edwin P. Hubble 1889 – 1953

# 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.



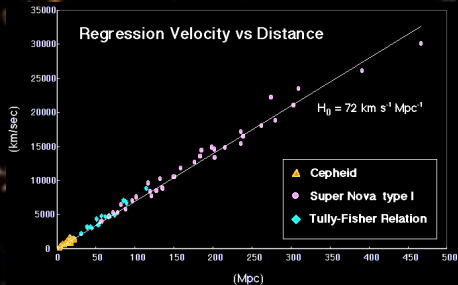
Originaldaten von Hubble 1929

# 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.



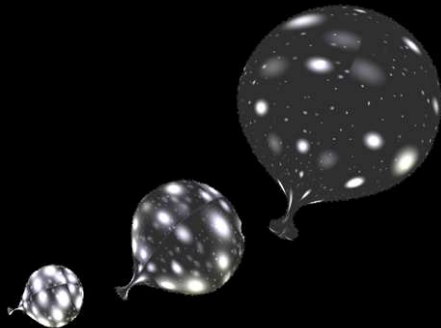
heutige Kurve

# Die Expansion des Universums

## Das Hubble–Gesetz

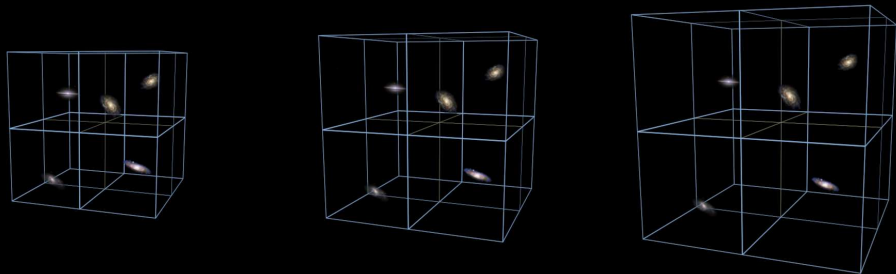
$$v_i = H r_i$$

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



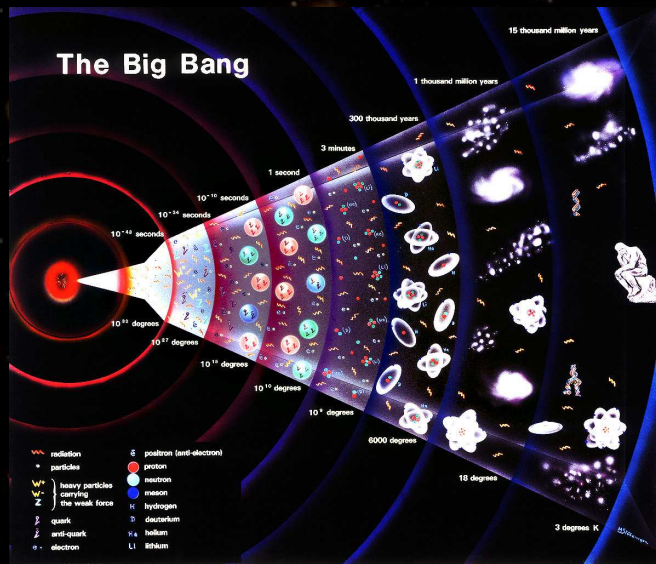
Luftballon-Analogie

# 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

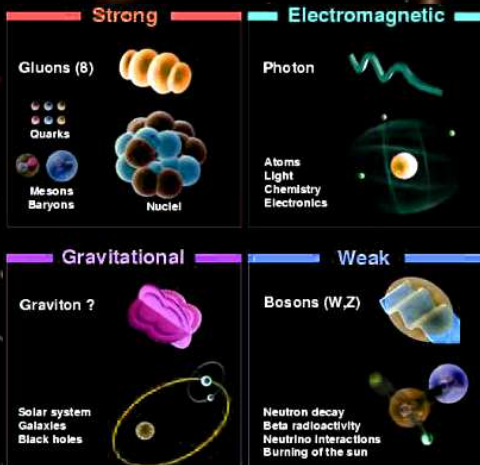
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Das frühe Universum

Dunkle Materie und Dunkle Energie

Die Zukunft des Universums

# Grundlegende Annahmen: Gesetze der Physik

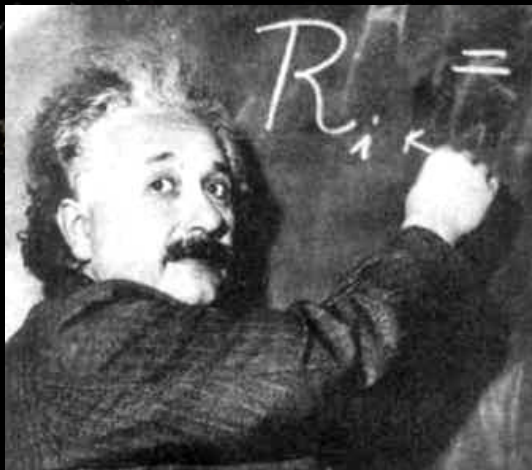


- Die physikalischen Gesetze, wie sie hier und heute gelten, gelten **überall** und **zu allen Zeiten**.

# Resultat: ART

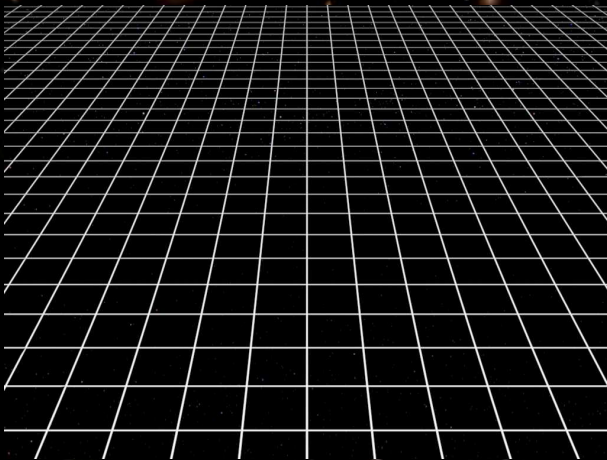


## Resultat: ART



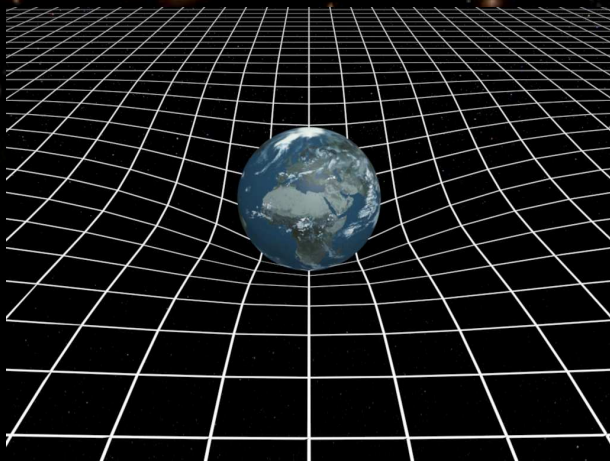
Albert Einstein 1879 – 1955

# Flache Raum-Zeit



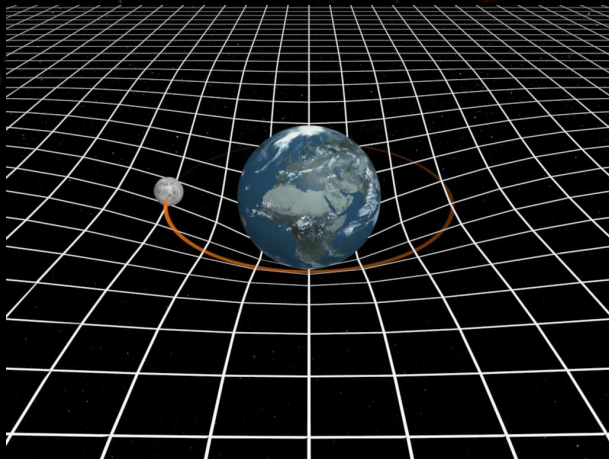
Keine Materie: flache Raum-Zeit

# 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

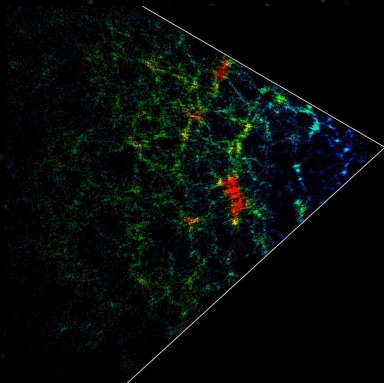
# Grundlegende Annahmen: Naturkonstanten



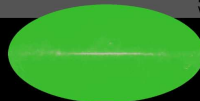
- Die fundamentalen Konstanten haben **überall** und **zu allen Zeiten** die Werte, die wir hier und heute messen.



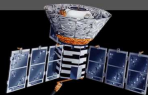
# Grundlegende Annahmen: Kosmologisches Prinzip



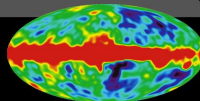
1965

Penzias and  
Wilson

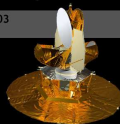
1992



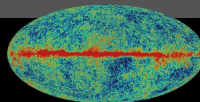
COBE



2003



WMAP

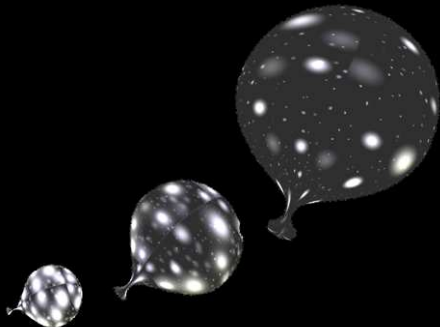


Das Universum sieht für jeden Beobachter im Universum gleich aus

# Dynamik des Universums

Friedmann–Lemaître Gleichung:

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



Alexander Friedmann  
1888–1925

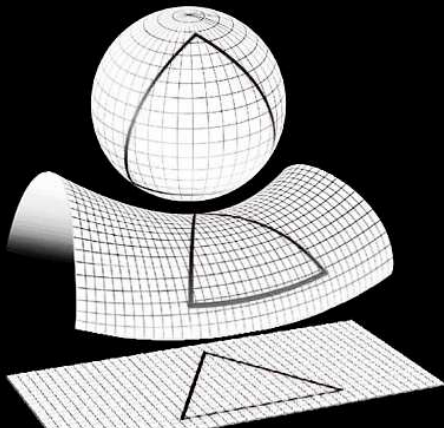


Georges Lemaître  
1894–1966

# Dynamik des Universums

Friedmann–Lemaître Gleichung:

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



Alexander Friedmann  
1888–1925

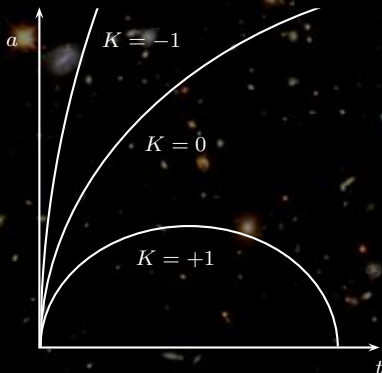


Georges Lemaître  
1894–1966

# Dynamik des Universums

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

In der Vergangenheit gab es notwendigerweise einen Urknall

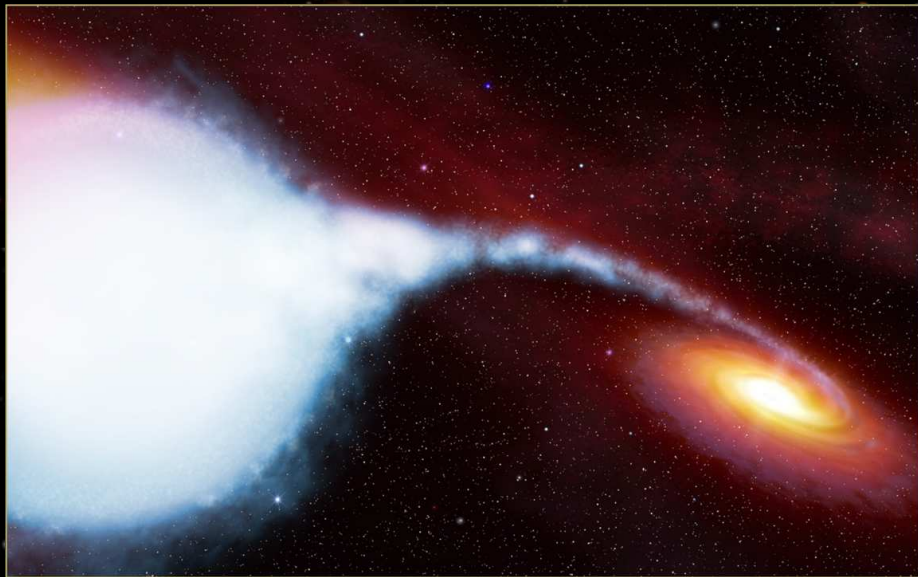


Die Gravitation wirkt immer anziehend

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

Stimmt das wirklich?

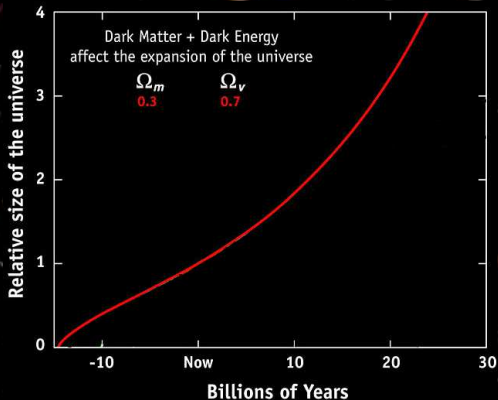
# Die beschleunigte Expansion des Universums



# Die beschleunigte Expansion des Universums

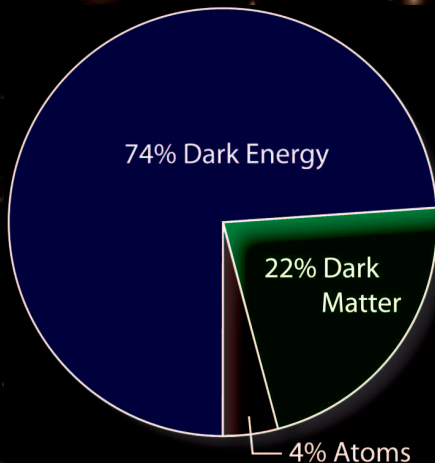
Friedmann–Lemaître–Lösungen ( $\Lambda = 0$  und  $\Lambda \neq 0$ )

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

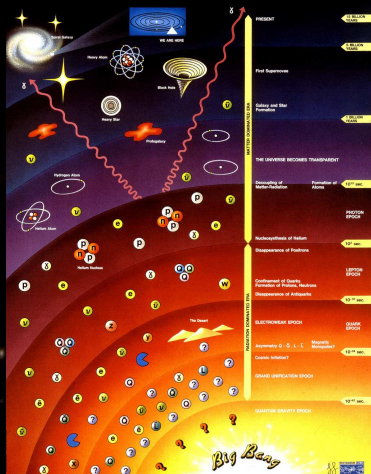


Dunkle Materie und Dunkle Energie

Die Zukunft des Universums



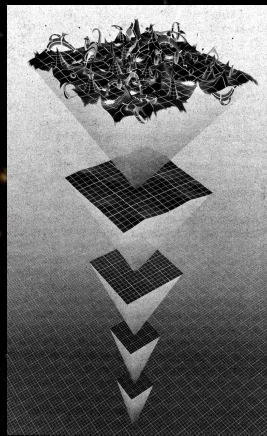
# Kleine zeitliche Übersicht



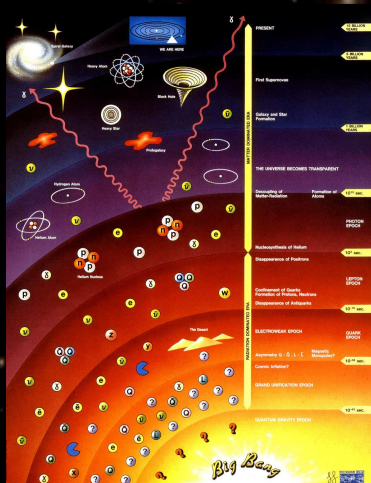
## Ära der Spekulationen

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

Planck Ära: Quantengravitation

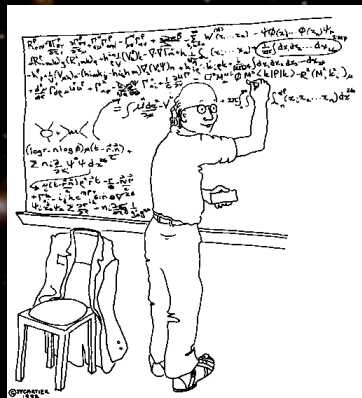


# Kleine zeitliche Übersicht



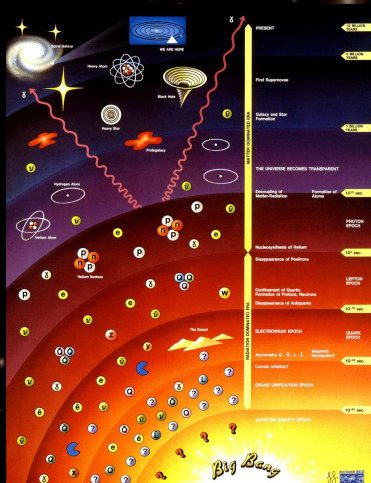
## Ära der Spekulationen

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



"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

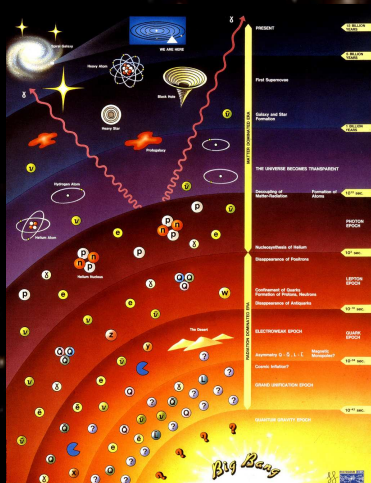
$$t \approx 10^{-12} \text{ s}$$

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	$\nu_e$ Electron neutrino	$\nu_\mu$ Muon neutrino	$\nu_\tau$ Tau neutrino	$\bar{\nu}_e$ Antineutrino	$\bar{\nu}_\mu$ Anti-muon neutrino	$\bar{\nu}_\tau$ Anti-tau neutrino	0	Leptons
	-1	$e^-$ Electron	$\mu$ Muon	$\tau$ Tau	$e^+$ Positron	$\bar{\mu}$ Anti-muon	$\bar{\tau}$ Anti-tau	+1	

# Kleine zeitliche Übersicht



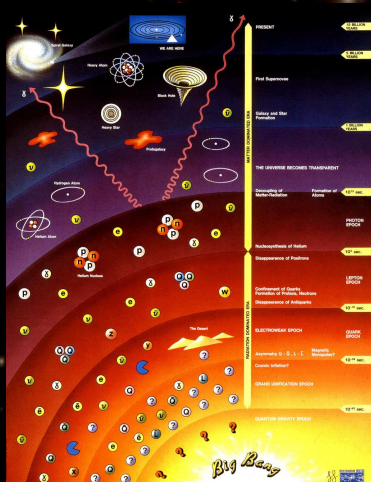
## Ära der Teilchenphysik

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

Kernbausteine Proton und Neutron entstehen



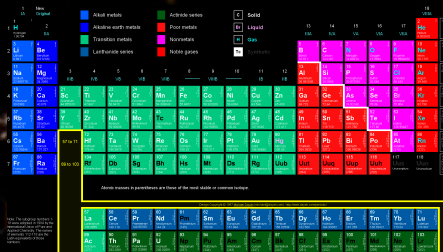
# Kleine zeitliche Übersicht



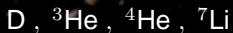
## Ära der Kernphysik

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

## Periodensystem

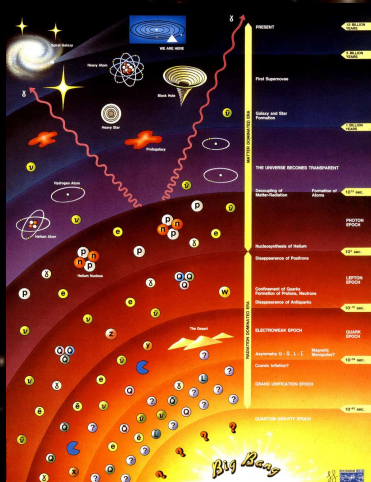


Im Urknall werden die leichten Elemente gebildet:



Die schweren Elemente werden später in Sternen gebildet

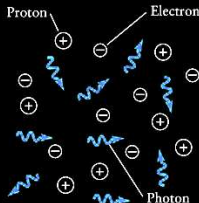
# Kleine zeitliche Übersicht



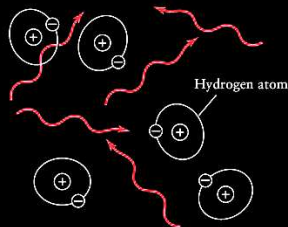
## Ära der Atomphysik

$t \approx 10^{13} \text{ s} \approx 380000 \text{ Jahre}$

- Materie und Strahlung entkoppeln
- Elektronen und Protonen bilden neutralen Wasserstoff
- die Energie der Photonen reicht nicht mehr zur Ionisation
- das Universum wird durchsichtig

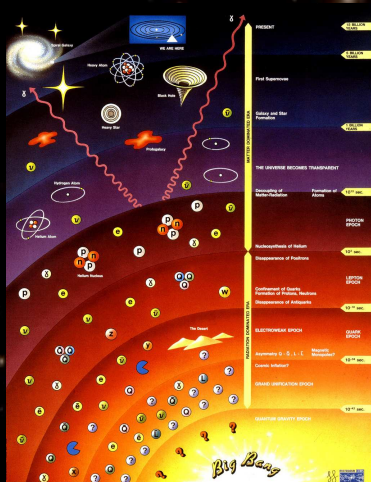


a Before recombination



b After recombination

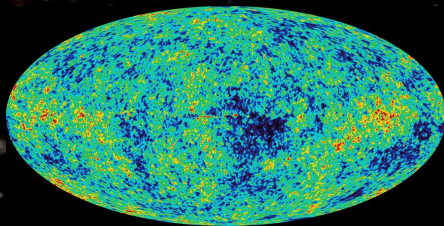
# Kleine zeitliche Übersicht



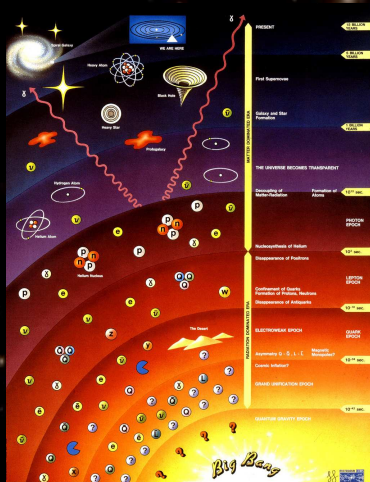
## Ära der Atomphysik

$t \approx 10^{13}$  s  $\approx$  380000 Jahre

- Materie und Strahlung entkoppeln
- das Universum wird durchsichtig
- Hintergrundstrahlung bleibt als Relikt:  
COBE, WMAP



## Kleine zeitliche Übersicht



## Ära der Sternbildung

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

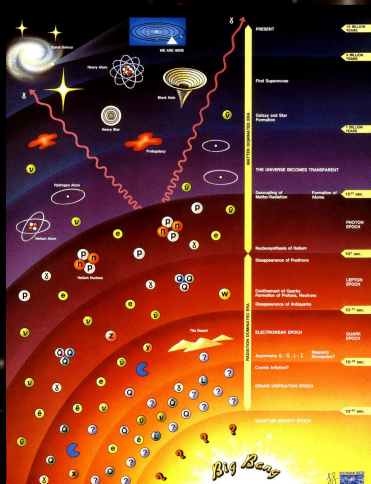
- erste Sterngeneration: keine schweren Elemente
- Entstehung der schweren Elemente



Riesen-Protostern



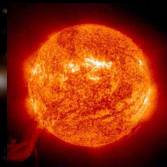
# Kleine zeitliche Übersicht



## 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

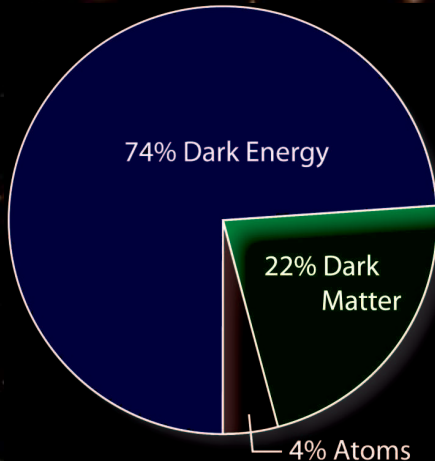
Theorie der Kosmologie  $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$

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



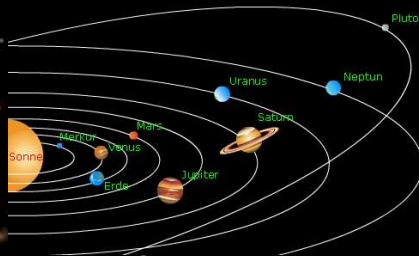
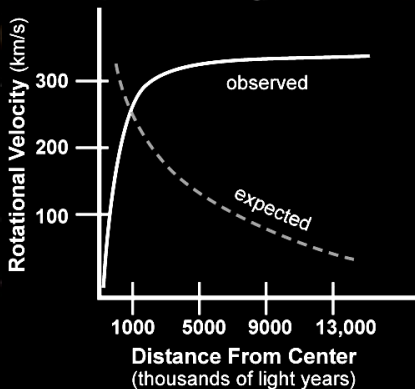
Spiralnebel



Vera Rubin

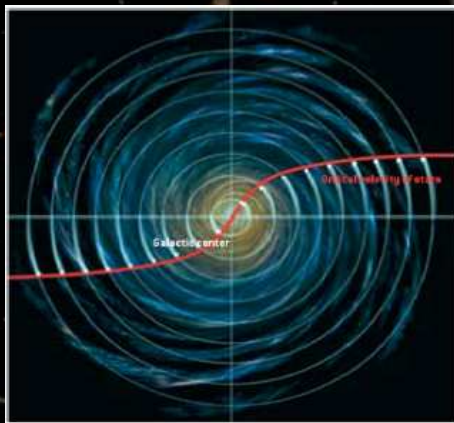
# Dunkle Materie

Erwartung der Rotationskurve für eine Spiralgalaxie



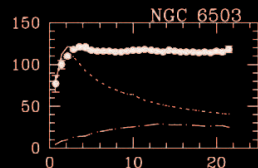
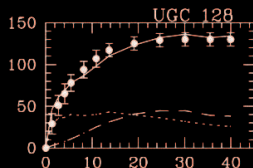
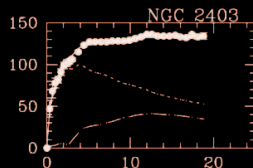
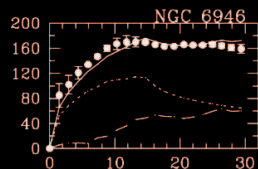
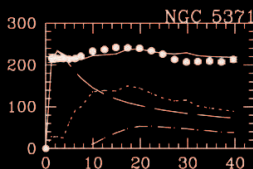
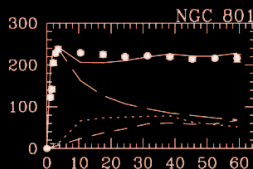
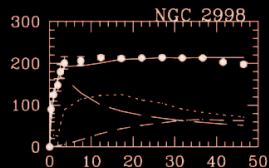
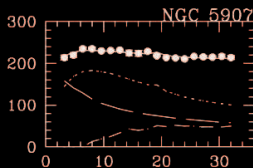
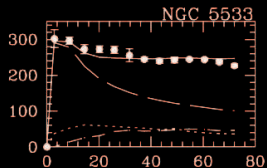
# Dunkle Materie

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 ...

}  $< 4 \%$

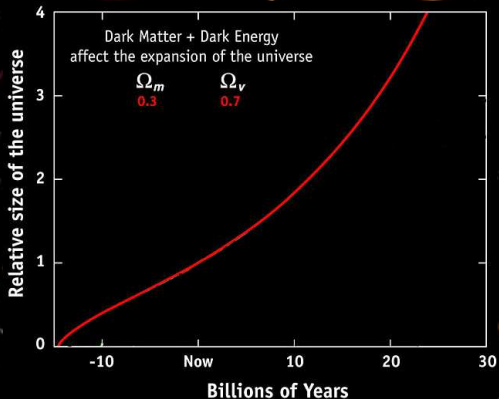
Dunkle Materie, die nicht aus Atomen besteht

exotische dunkle Materie!

- WIMPs

}  $= 22 \%$

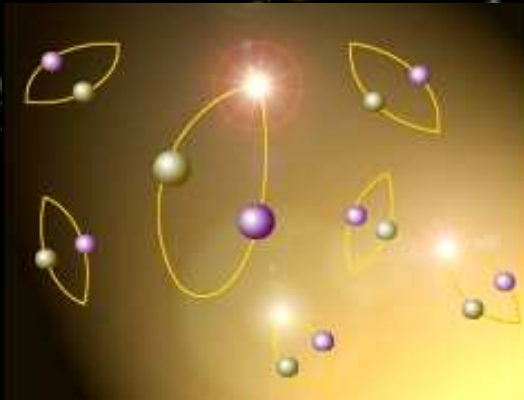
# Die beschleunigte Expansion des Universums



Die kosmologische Konstante wirkt abstoßend

# Dunkle Energie

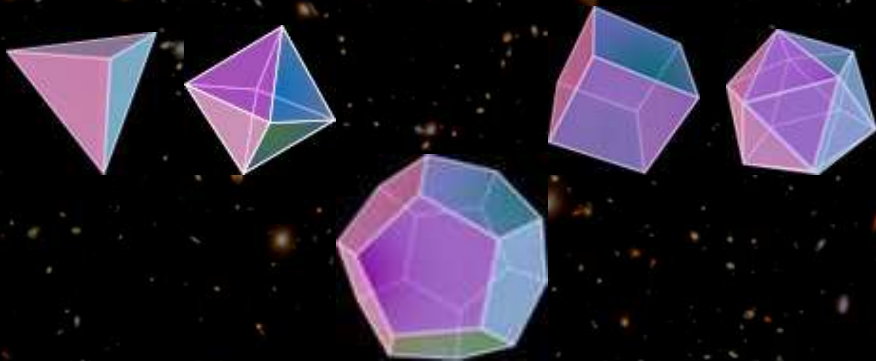
Vakuumenergie:



↔ Einsteins kosmologische Konstante

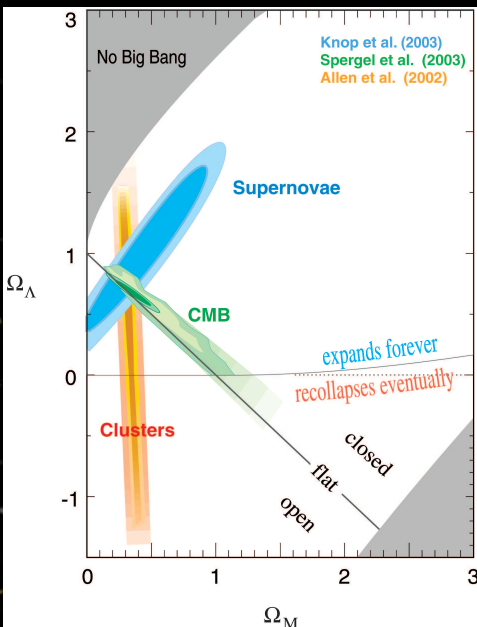
# Dunkle Energie

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



# Inhalt

Beobachtungen zur Kosmologie

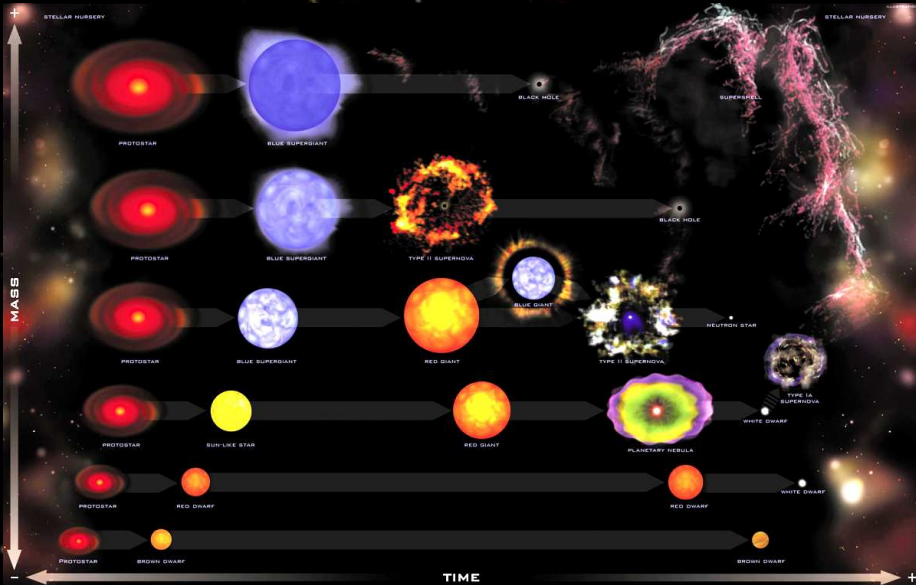
Theorie der Kosmologie  $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$

Das frühe Universum

Dunkle Materie und Dunkle Energie

Die Zukunft des Universums

# Sternentwicklung



# Ende des Lebens auf der Erde

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

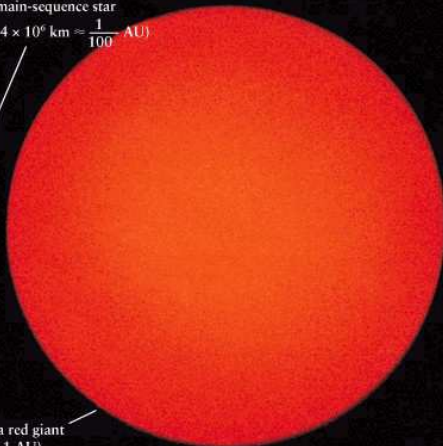
Zerstörung: Planeten

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

The Sun as a main-sequence star  
(diameter =  $1.4 \times 10^6$  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

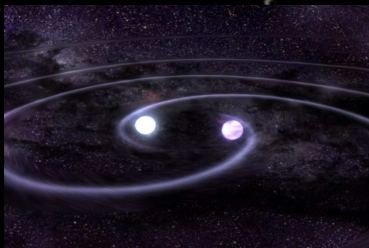
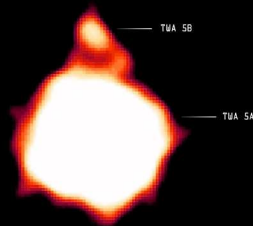
Sterne mit  $0.08M_{\odot} - 0.25M_{\odot}$  am häufigsten, ihre Lebenszeit ist am längsten:

- 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

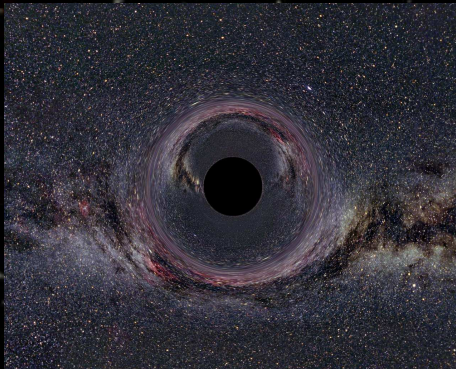


# Zerfall der Galaxien

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

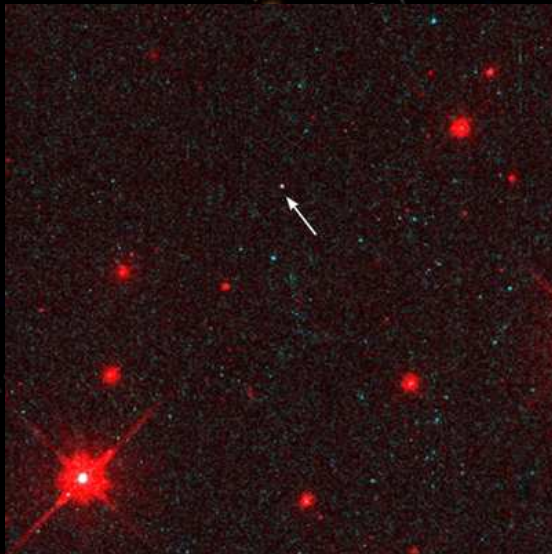
Übrig bleiben einige supermassive schwarze Löcher, umgeben von umherwandernden toten Sternen





# Das Zeitalter der Schwarzen Löcher

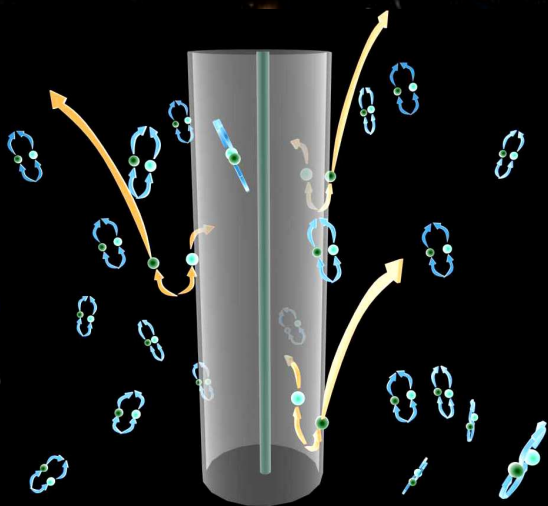
Zerfall von stellaren Objekten  
Auflösung stellarer Objekte  
(Neutronensterne, braune und  
weiße Zwerge, Planeten)  
durch Zerfall der Nukleonen



# 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

Nach

100.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.  
000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.  
000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.  
000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.  
000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000 Jahren:

# Das Ende des Universums

Nach

100.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.  
000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.  
000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.  
000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.  
000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000 Jahren:

# Das Ende des Universums

Nach

100.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.  
000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.  
000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.  
000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.  
000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000 Jahren:

# Das Ende des Universums







# Das Ende des Universums

# Das Ende des Universums

# Das Ende des Universums

# Das Ende des Universums

# Das Ende des Universums

Das Ende

Ende

