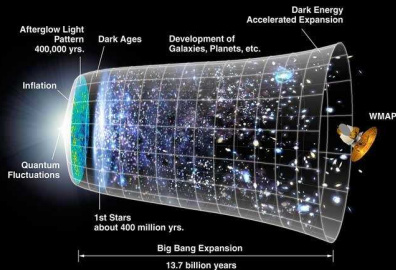


Über die Vergangenheit und Zukunft des Universums

Jutta Kunz
CvO Universität Oldenburg



Physics in the City, 10. Dezember 2009



Beobachtungen zur Kosmologie

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

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

Dunkle Materie und Dunkle Energie

Beobachtungen zur Kosmologie

Theorie der Kosmologie

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

Dunkle Materie und Dunkle Energie

Vergangenheit des Universums

Beobachtungen zur Kosmologie

Theorie der Kosmologie

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

Dunkle Materie und Dunkle Energie

Vergangenheit des Universums

Zukunft des Universums

Distanzen in der Astronomie



12,756 km

Erde

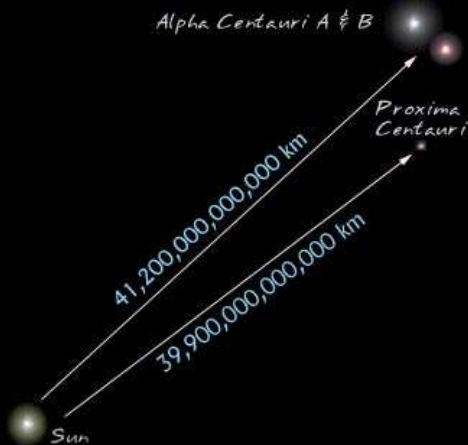
Distanzen in der Astronomie



Sonnensystem

Abstand Erde – Sonne: 150 Millionen km = 8 Lichtminuten

Distanzen in der Astronomie



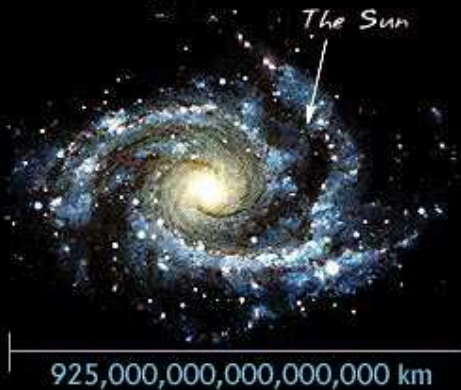
Die nächsten Sterne
Abstand Sonne – Proxima Centauri: 4 Lichtjahre

Distanzen in der Astronomie



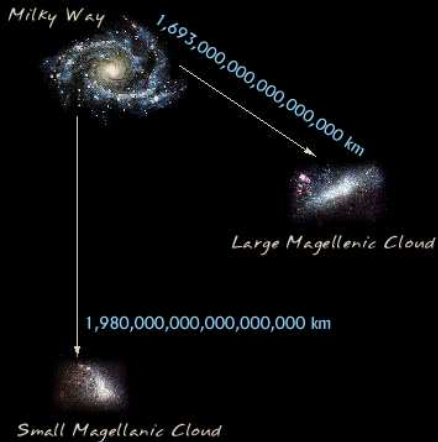
Die Umgebung der Sonne

Distanzen in der Astronomie



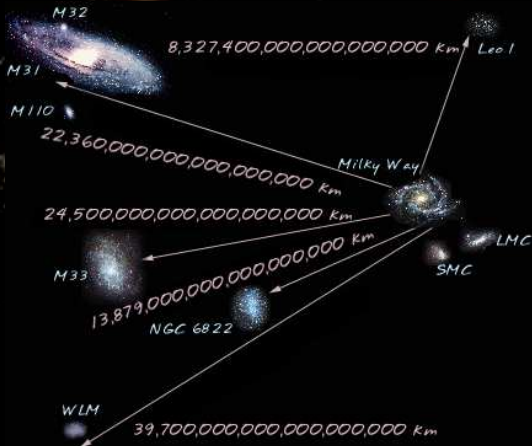
Die Milchstraße
Durchmesser etwa 100000 Lichtjahre

Distanzen in der Astronomie



Nächste Galaxien

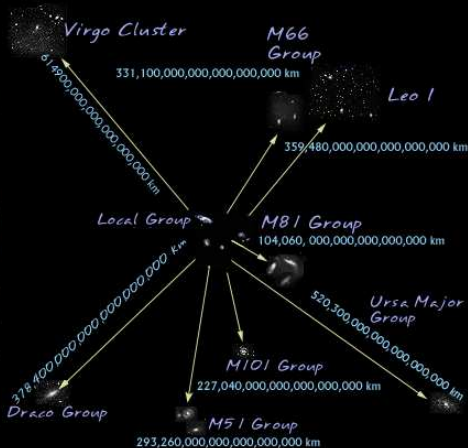
Distanzen in der Astronomie



Die lokale Gruppe

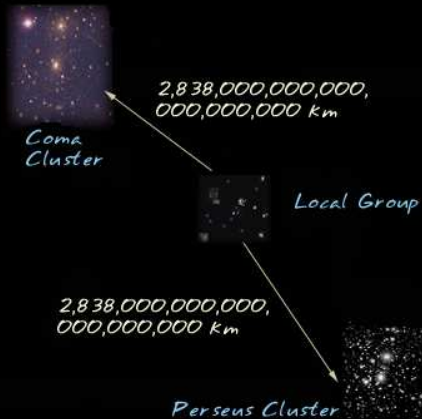
Abstand Milchstrasse – Andromeda: ca. 2,5 Millionen Lichtjahre

Distanzen in der Astronomie



Das lokale Supercluster

Distanzen in der Astronomie



Die nächsten Supercluster

Distanzen in der Astronomie



Die entferntesten sichtbaren Strukturen – Hubble deep field

Beobachtungsstationen: Teleskope



European Southern Observatory – Paranal

Beobachtungsstationen: Teleskope



Hubble Space Telescope

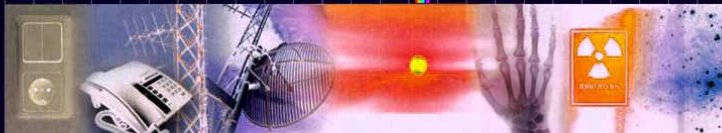
Das elektromagnetische Spektrum

Das elektromagnetische Spektrum

Energie in eV

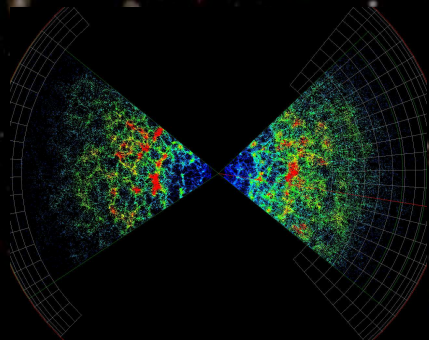
 $1,24 \cdot 10^{-13}$ $\cdot 10^{-12}$ $\cdot 10^{-11}$ $\cdot 10^{-10}$ $\cdot 10^{-9}$ $\cdot 10^{-8}$ $\cdot 10^{-7}$ $\cdot 10^{-6}$ $\cdot 10^{-5}$ $\cdot 10^{-4}$ $\cdot 10^{-3}$ $\cdot 10^{-2}$ $\cdot 10^{-1}$ $\cdot 10^0$ $\cdot 10^1$ $\cdot 10^2$ $\cdot 10^3$ $\cdot 10^4$ $\cdot 10^5$ $\cdot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

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

Das Universum auf großen Skalen

Beobachtungsergebnis:



Die Galaxien Verteilung ist auf großen Skalen gleichförmig

“Auf großen Skalen sieht das Universum für jeden überall gleich aus”

Wie gross sind große Skalen?
Hunderte von Megaparsec (Mpc)

Erläuterung der Einheit Mpc:

1Mpc = 1 Million pc

1pc = 3.261 Lichtjahre

1 Parsec = 1 Parallaxensekunde

Abstand, in dem der mittlere
Abstand Erde-Sonne

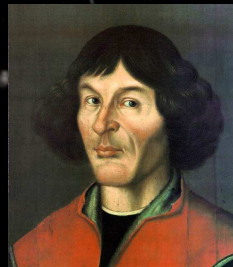
(\approx 150 Millionen km)

einer Bogensekunde entspricht

Das kosmologische Prinzip

Wir verallgemeinern das kopernikanische Prinzip
Nikolaus Kopernikus (1473-1543):

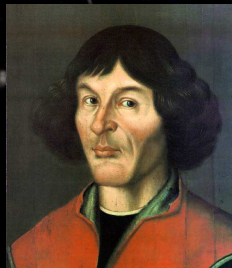
- Die Erde steht nicht im Mittelpunkt des Sonnensystems
- Das Sonnensystem steht an keiner ausgezeichneten Stelle des Universums
- Kein Beobachter steht an einer ausgezeichneten Stelle des Universums



Das kosmologische Prinzip

Wir verallgemeinern das kopernikanische Prinzip
Nikolaus Kopernikus (1473-1543):

- 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



Gilt das auch bezüglich der Zeit?

Sieht das Universum zu allen Zeiten gleich aus?

Gilt also ein *perfektes* kosmologisches Prinzip?

Die Expansion des Universums

Beobachtungsergebnis:

Das Hubble–Gesetz

Andere Galaxien entfernen sich von uns mit einer Geschwindigkeit, die proportional zu ihrem Abstand von uns ist:

$$v = H r$$



Edwin P. Hubble 1889 – 1953

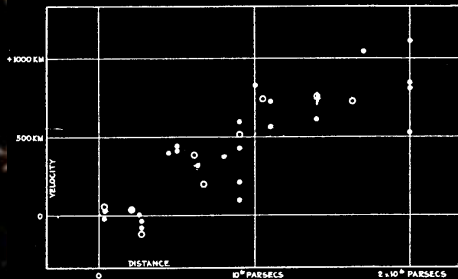
Die Expansion des Universums

Beobachtungsergebnis:

Das Hubble-Gesetz

Andere Galaxien entfernen sich von uns mit einer Geschwindigkeit, die proportional zu ihrem Abstand von uns ist:

$$v = H r$$



Originaldaten von Hubble 1929

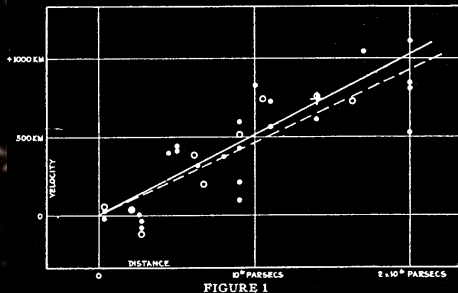
Die Expansion des Universums

Beobachtungsergebnis:

Das Hubble–Gesetz

Andere Galaxien entfernen sich von uns mit einer Geschwindigkeit, die proportional zu ihrem Abstand von uns ist:

$$v = H r$$



Originaldaten von Hubble 1929

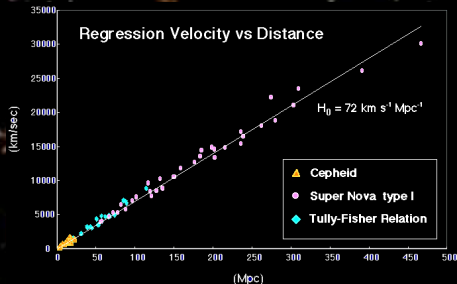
Die Expansion des Universums

Beobachtungsergebnis:

Das Hubble–Gesetz

Andere Galaxien entfernen sich von uns mit einer Geschwindigkeit, die proportional zu ihrem Abstand von uns ist:

$$v = H r$$



heutige Hubble Daten:

$H = 70 \text{ km pro Sekunde pro Mpc}$

Was bedeutet das?

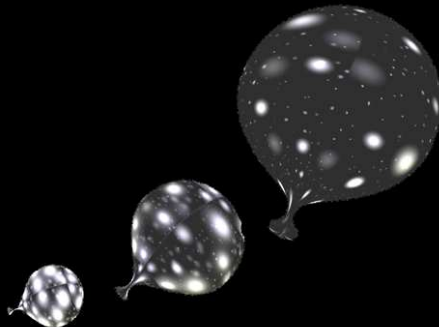
Die Expansion des Universums

Beobachtungsergebnis:

Das Hubble–Gesetz

Andere Galaxien entfernen sich von uns mit einer Geschwindigkeit, die proportional zu ihrem Abstand von uns ist:

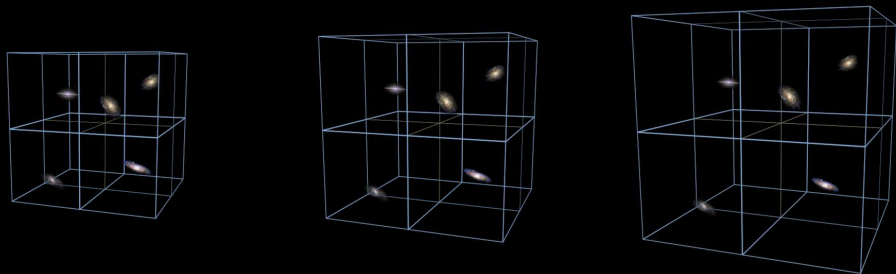
$$v = H r$$



Das Universum dehnt sich aus.

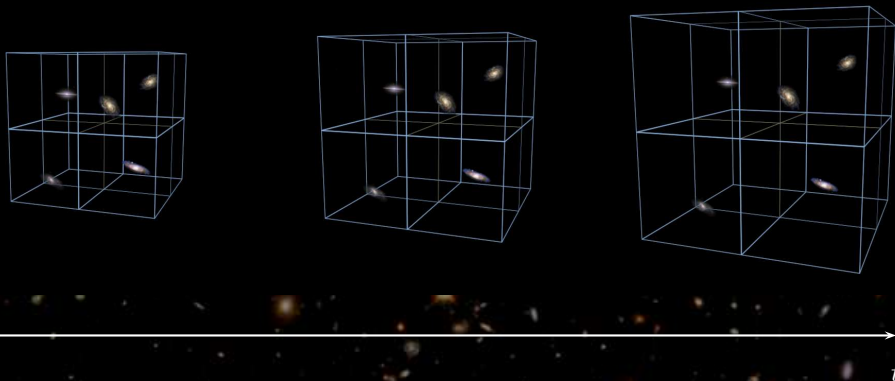
2-dimensionales Analogon

Die Expansion des Universums

 t

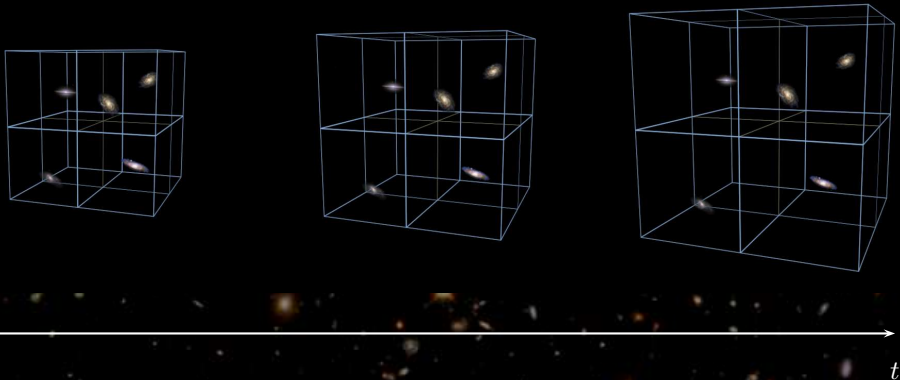
Die Ausdehnung eines räumlich 3-dimensionalen flachen Universums

Die Expansion des Universums



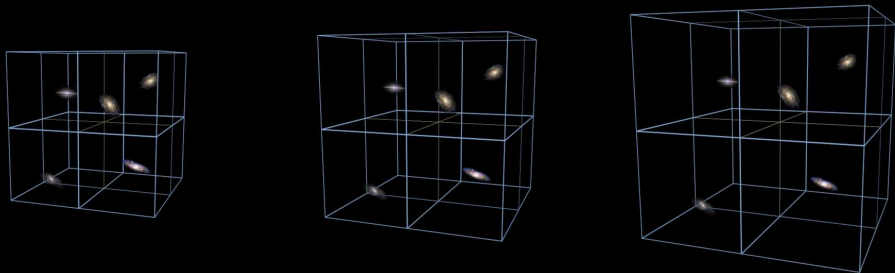
Wächst man, wenn sich das Universum ausdehnt?

Die Expansion des Universums



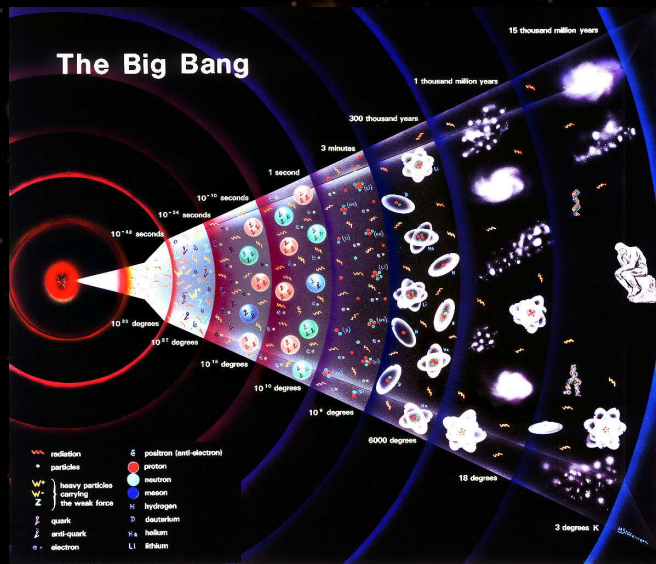
Was ist, wenn man in der Zeit zurückgeht?

Die Expansion des Universums

 t

Urknall

Das dynamische Universum



Wann?

Vor
13,7
Milliarden
Jahren

Das heutige Universum

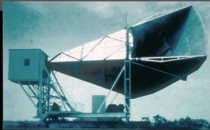


So sieht das Universum heute aus. Doch wie sah es früher aus?

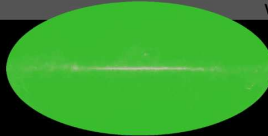
Die kosmische Hintergrundstrahlung

Jugendbilder des Universums: ca. 380 000 Jahre nach dem Urknall

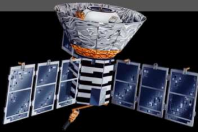
1965



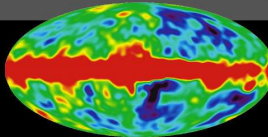
Penzias and
Wilson



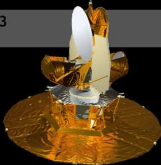
1992



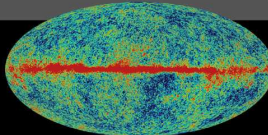
COBE



2003

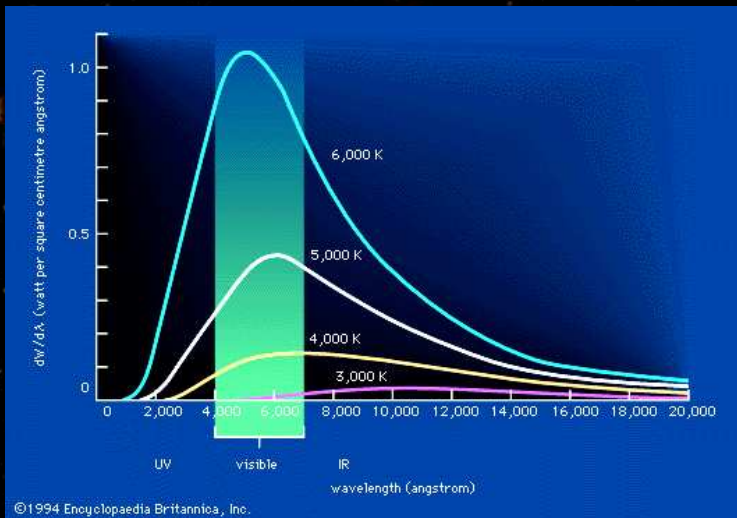


WMAP



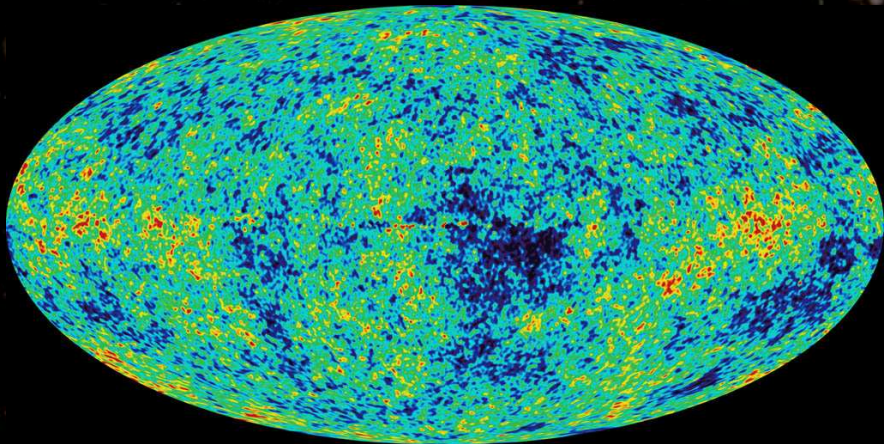
Die kosmische Hintergrundstrahlung

Jugendbilder des Universums: ca. 380 000 Jahre nach dem Urknall



Die kosmische Hintergrundstrahlung

Jugendbilder des Universums: ca. 380 000 Jahre nach dem Urknall



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

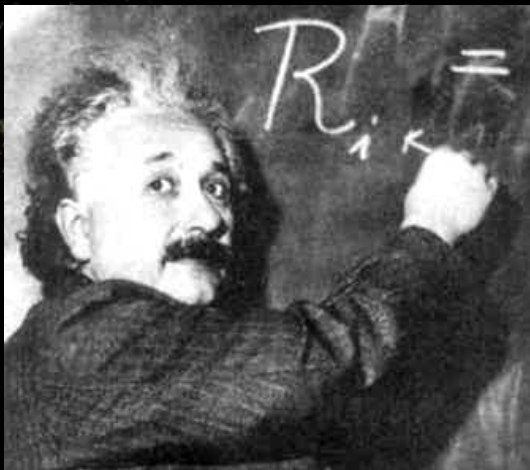
John C. Mather



Photo: R. Kaltschmidt/LBNL

George F. Smoot

Annahmen: Allgemeine Relativitätstheorie

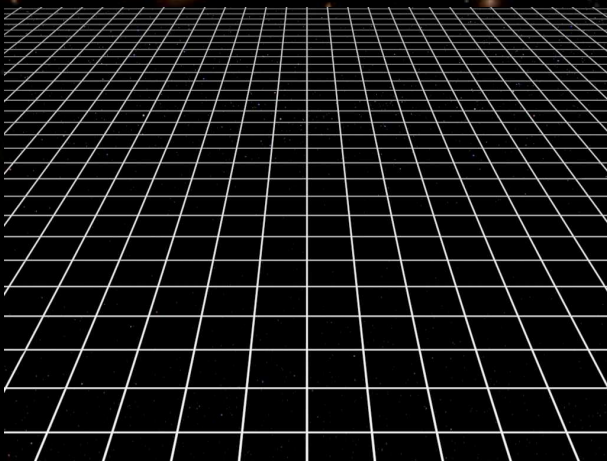


Albert Einstein 1879 – 1955

Annahmen: Allgemeine Relativitätstheorie

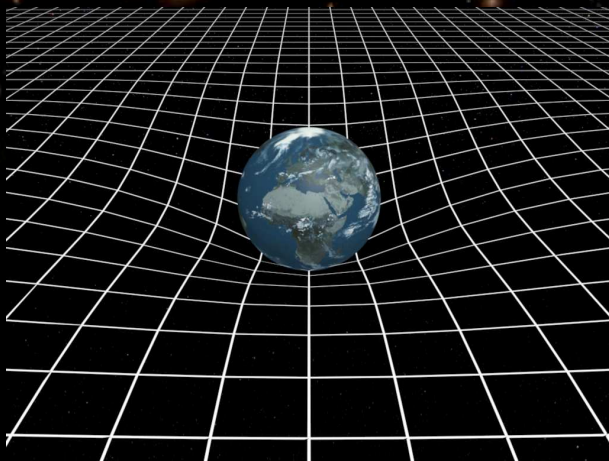


Flache Raum-Zeit



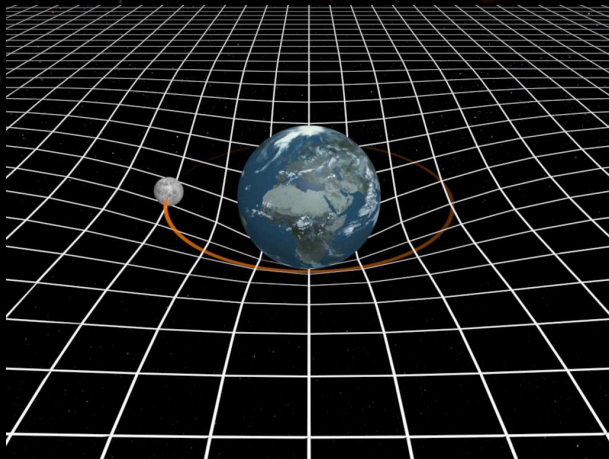
Keine Materie: flache Raum-Zeit

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

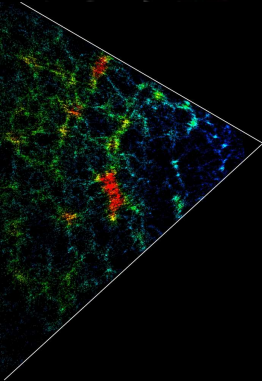
Annahmen: Gesetze und Naturkonstanten

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

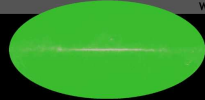


- Die fundamentalen Konstanten haben **überall** und **zu allen Zeiten** die Werte, die wir hier und heute messen.

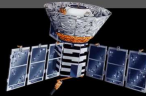
Annahmen: Kosmologisches Prinzip



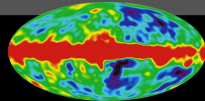
1965

Penzias and
Wilson

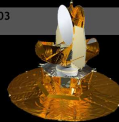
1992



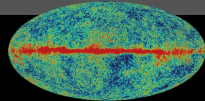
COBE



2003



WMAP

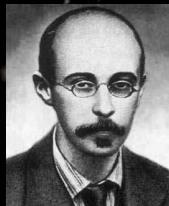
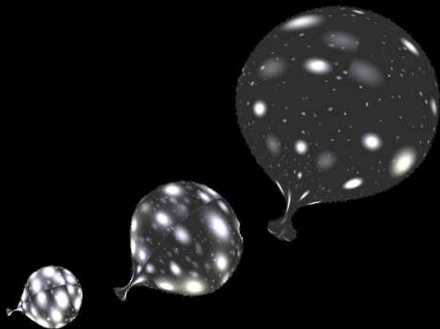


Das Universum sieht für jeden Beobachter im Universum gleich aus

Dynamik des Universums

Friedmann–Lemaître Gleichung:

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



Alexander Friedmann
1888–1925

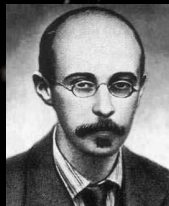
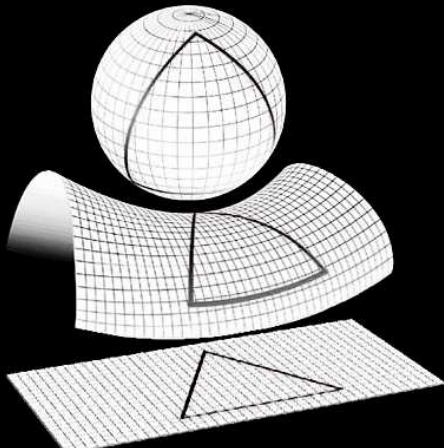


Georges Lemaître
1894–1966

Dynamik des Universums

Friedmann–Lemaître Gleichung:

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



Alexander Friedmann
1888–1925

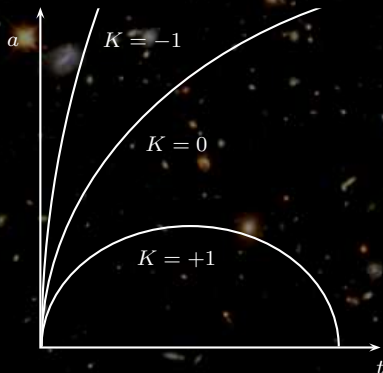


Georges Lemaître
1894–1966

Dynamik des Universums

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

In der Vergangenheit gab es notwendigerweise einen Urknall



Die Gravitation wirkt immer anziehend.

Folglich dehnt sich das Universum immer langsamer aus.
Falls genügend Materie vorhanden ist, kollabiert es wieder.

Wird die Ausdehnung wirklich abgebremst?

1998: Supernova Ia Daten



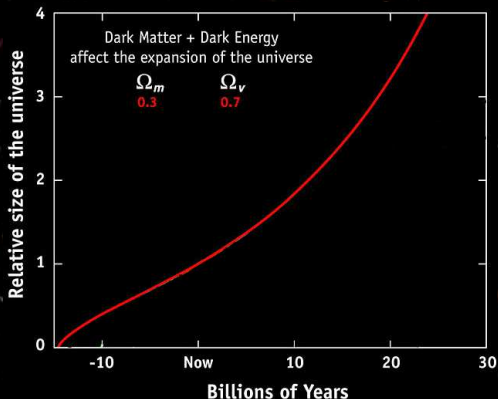
1998: Supernova Ia Daten



Die Expansion des Universums beschleunigt sich

Die beschleunigte Expansion des Universums

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

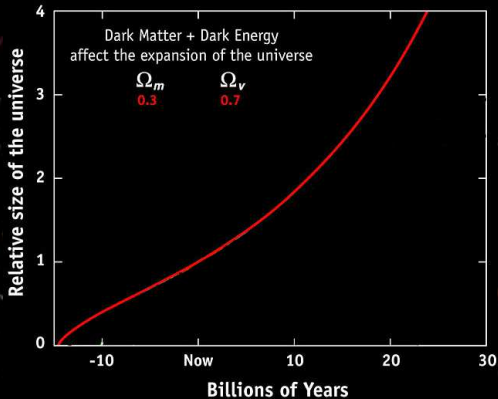


Wendepunkt als das Universum halb so alt war wie heute

Was ist die Ursache für die beschleunigte Expansion?

Die beschleunigte Expansion des Universums

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



DUNKLE ENERGIE

wirkt abstoßend

Inhalt

Beobachtungen zur Kosmologie

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

Dunkle Materie und Dunkle Energie

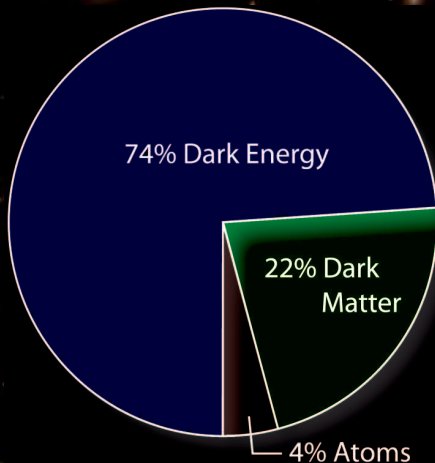
Vergangenheit des Universums

Zukunft des Universums

Die dunkle Seite des Universums



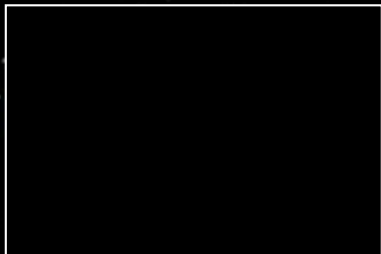
Woraus besteht das Universum?



Der kosmische Kuchen

Was bedeutet "Dunkle Materie?"

Die meiste Materie im Universum ist dunkel



Dunkle Materie

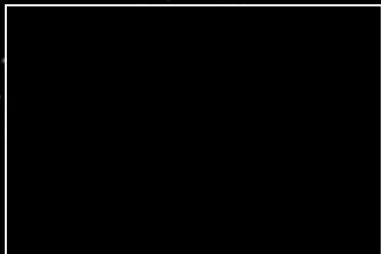


Leuchtende Materie

- 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**:

Was bedeutet "Dunkle Materie?"

Die meiste Materie im Universum ist dunkel



Dunkle Materie



Leuchtende Materie

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

Evidenz für Dunkle Materie: Spiralgalaxien

Rotationskurven von Spiralgalaxien



Andromedanebel



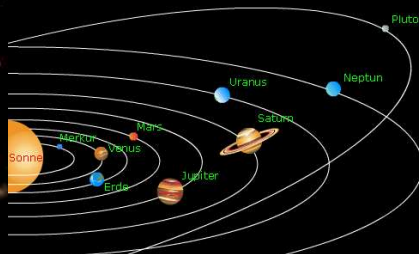
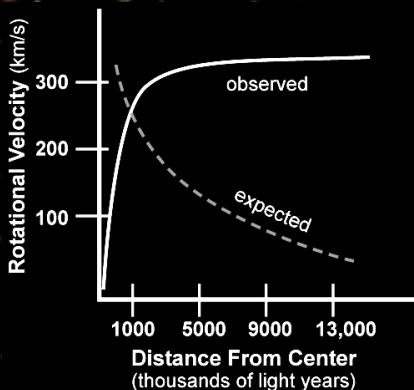
Vera Rubin

Messung der Geschwindigkeit
mit der die Sterne um das galaktische Zentrum rotieren

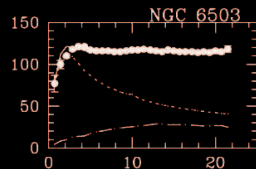
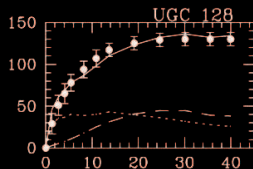
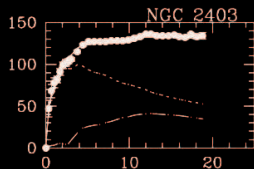
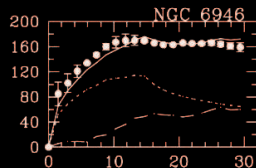
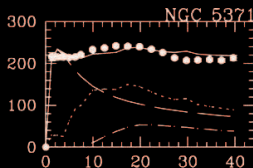
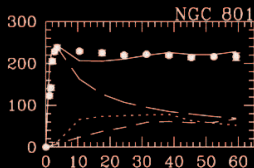
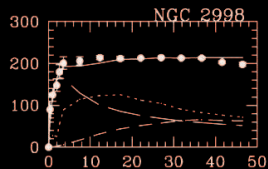
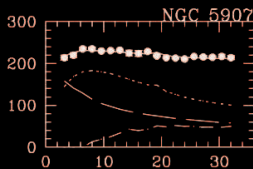
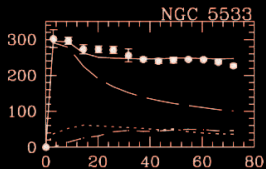
Evidenz für Dunkle Materie: Spiralgalaxien

Erwartung für die Rotationskurven von Spiralgalaxien

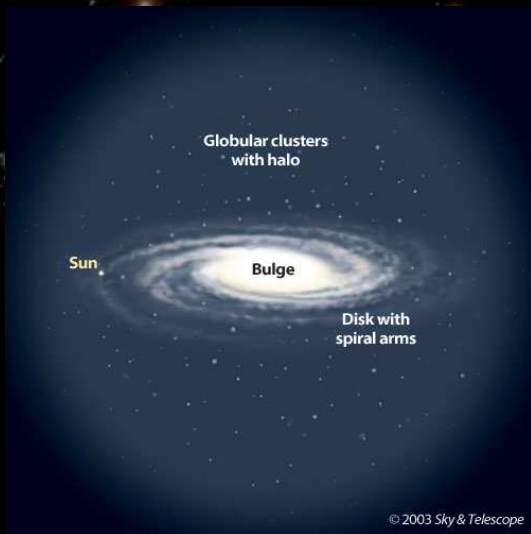
Beobachtung der Rotationskurven von Spiralgalaxien



Evidenz für Dunkle Materie: Spiralgalaxien



Evidenz für Dunkle Materie: Spiralgalaxien



Spiralgalaxie eingebettet in einen Halo aus Dunkler Materie

Weitere Evidenz für Dunkle Materie

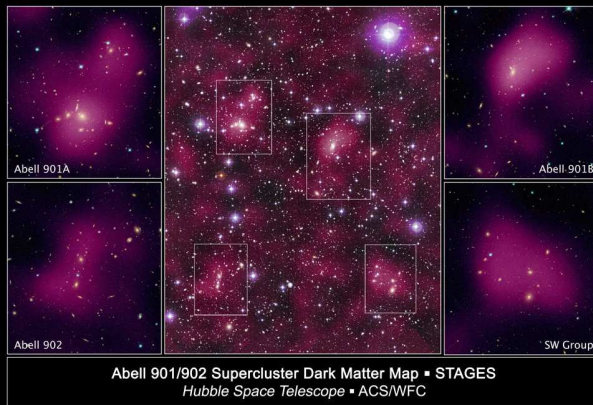


Galaxien Cluster



Fritz Zwicky

Weitere Evidenz für Dunkle Materie



NASA, ESA, C. Heymans (University of British Columbia), M. Gray (University of Nottingham),
 and the STAGES Collaboration

STScI-PRC08-03

Gravitationslinseneffekt: Abell Supercluster

Woraus besteht Dunkle Materie?

Unterscheidung von 2 Arten von Dunkler Materie:

Dunkle Materie, die aus Atomen besteht

- Gas, Staub
- Planeten
- braune Zwerge
- weiße Zwerge
- Neutronensterne

} < 4 %

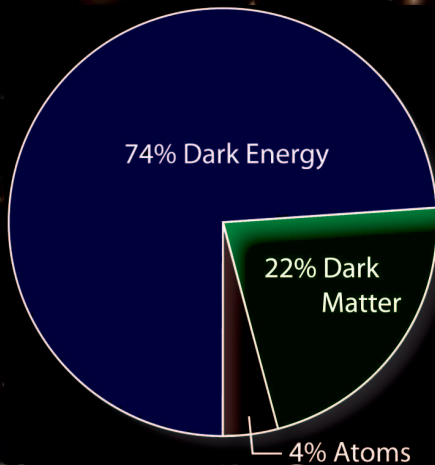
Dunkle Materie, die nicht aus Atomen besteht

exotische dunkle Materie!

- WIMPs

} = 22 %

Woraus besteht das Universum?

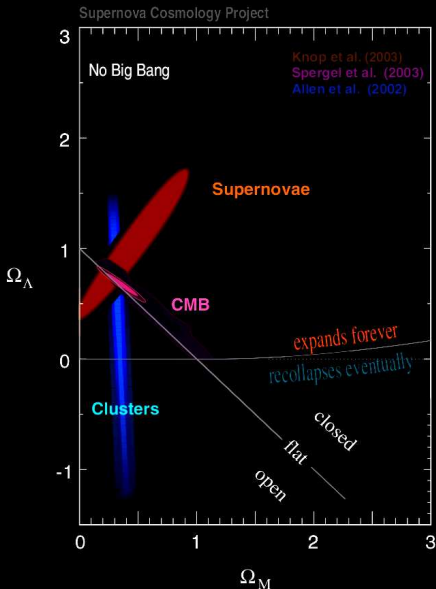


Der kosmische Kuchen

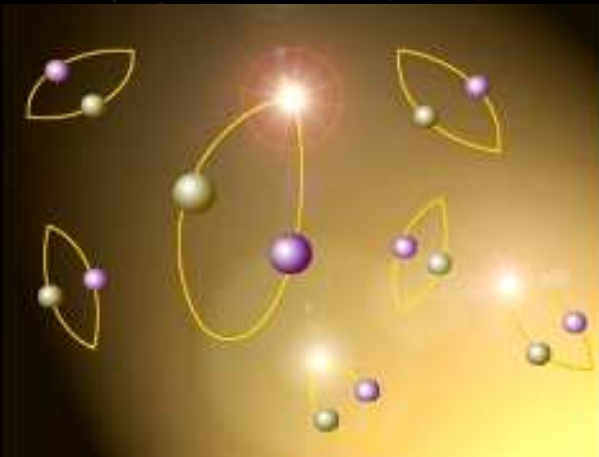
Evidenz für Dunkle Energie: Supernovae Ia



Überwältigende Evidenz für Dunkle Energie



Was ist Dunkle Energie?



Ist es Vakuumenergie?

Einsteins kosmologische Konstante

Was ist Dunkle Energie?

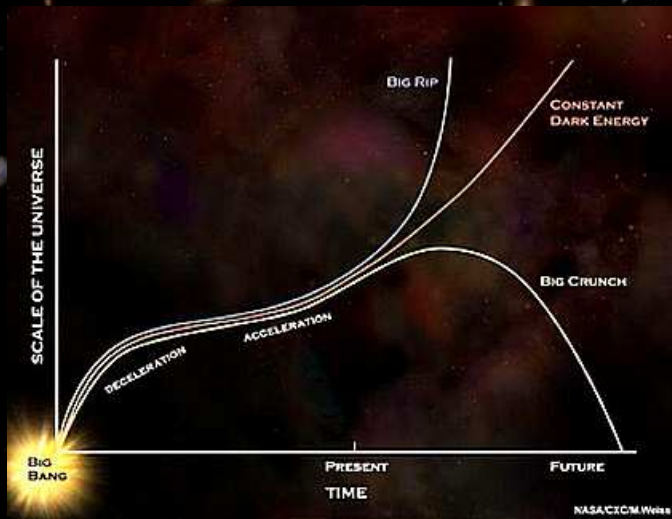
Plato postulierte ein 5. Element, das zu dem 5. platonischen Körper gehören sollte, aus dem der Kosmos selbst gemacht sei: **Quintessenz**



Ist es **Quintessenz**?

eine hypothetische fünfte Kraft neben den vier bekannten Kräften?

Was ist Dunkle Energie?



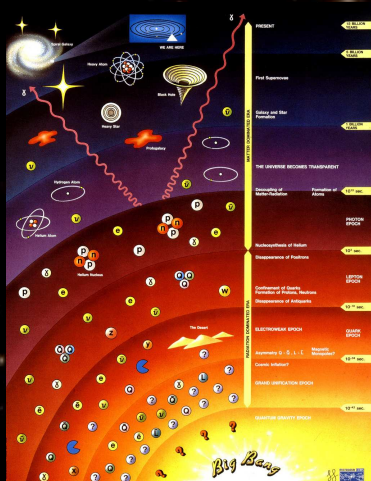
Oder ist es ein **Phantomfeld**?

Zusammenfassung: Dunkle Energie

Dunkle Energie: größtes Rätsel der heutigen Physik

Die Natur der Dunklen Energie hat großen Einfluss
auf die Zukunft des Universums!

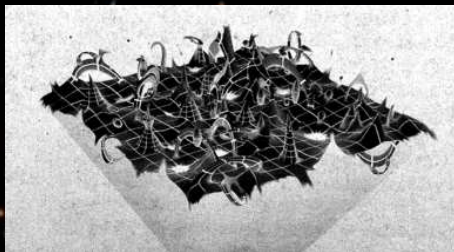
Kleine zeitliche Übersicht



Ära der Spekulationen

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

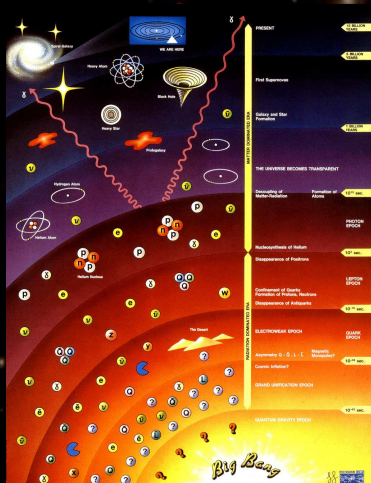
Planck Ära: Quantengravitation



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

Die Zeit vor dem Standardmodell

Kleine zeitliche Übersicht



Ära der Teilchenphysik

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

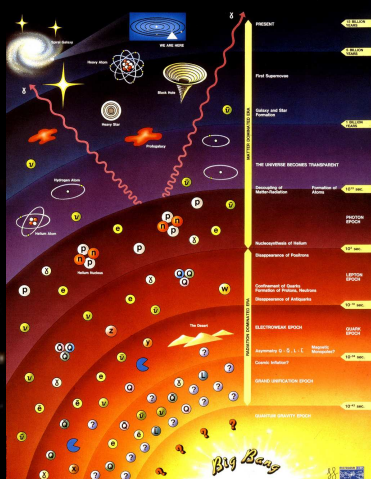
Die äußerst heiße Ursuppe besteht aus den bekannten Elementarteilchen

ELEMENTARY PARTICLES

Leptons	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z Z boson
	e electron	μ muon	τ tau	W W boson
Quarks	u up	c charm	t top	γ photon
	d down	s strange	b bottom	g gluon

I II III
Three Generations of Matter

Kleine zeitliche Übersicht



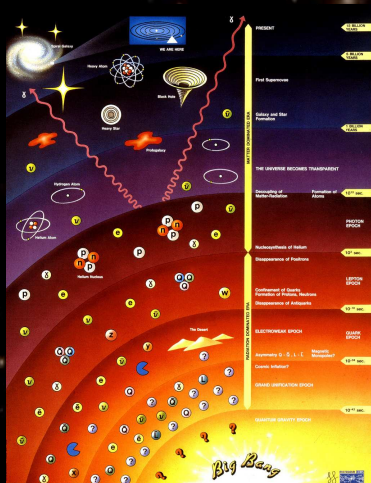
Ära der Teilchenphysik

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

Die Kernbausteine entstehen:
Protonen und Neutronen

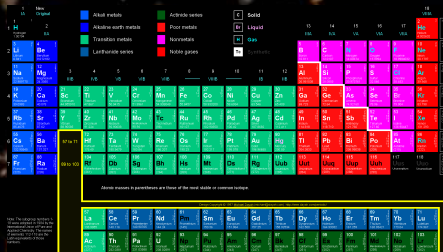


Kleine zeitliche Übersicht

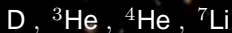


Ära der Kernphysik

$10^{-2} < t < 10^2$ s: die ersten 3 Minuten

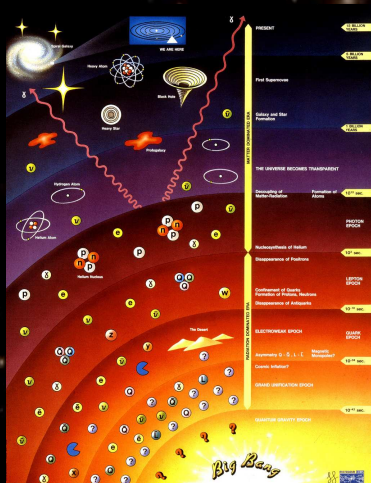


Im Urknall werden nur ganz leichte Elemente gebildet:



Die schweren Elemente werden später in Sternen gebildet

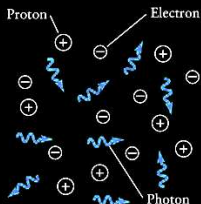
Kleine zeitliche Übersicht



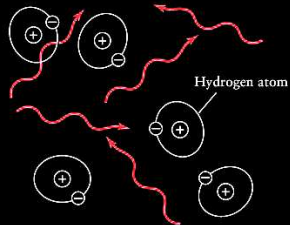
Ära der Atomphysik

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

- Elektronen und Protonen bilden neutralen Wasserstoff
- Das Universum wird durchsichtig
- Die Hintergrundstrahlung entsteht



a Before recombination



b After recombination

Inhalt

Beobachtungen zur Kosmologie

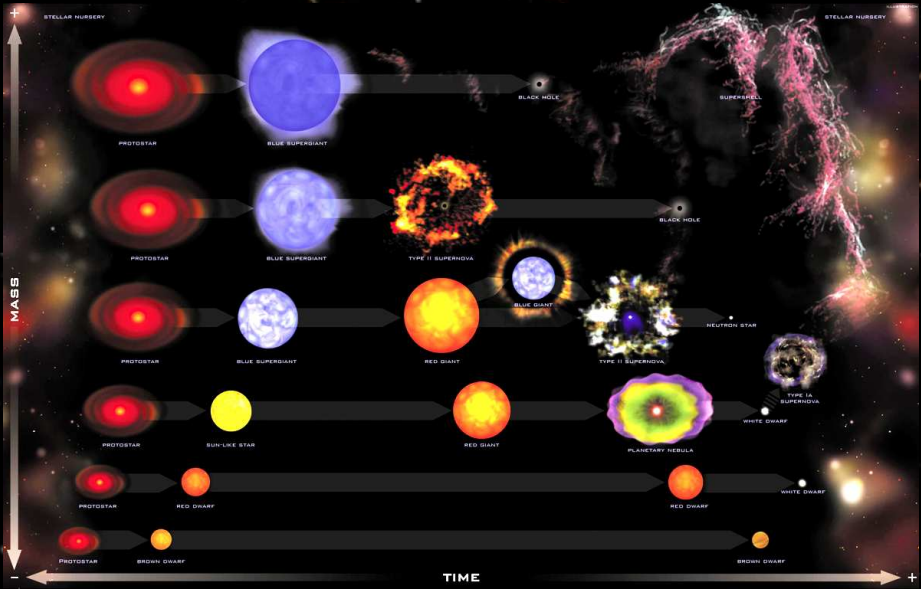
Theorie der Kosmologie $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$

Dunkle Materie und Dunkle Energie

Vergangenheit des Universums

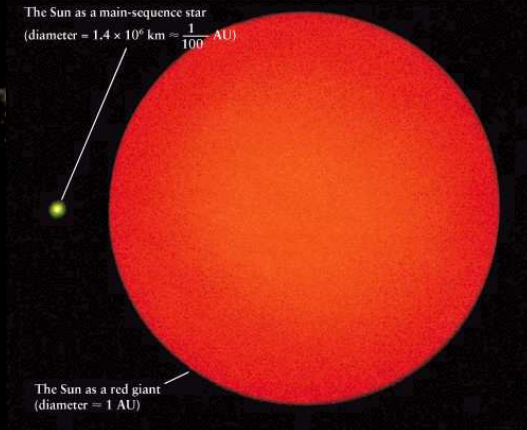
Zukunft des Universums

Geburt und Tod der Sterne



Das Schicksal der Erde

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



Ende des Lebens auf der Erde

Ära der Sternbildung

Wie lange können noch neue Sterne gebildet werden?

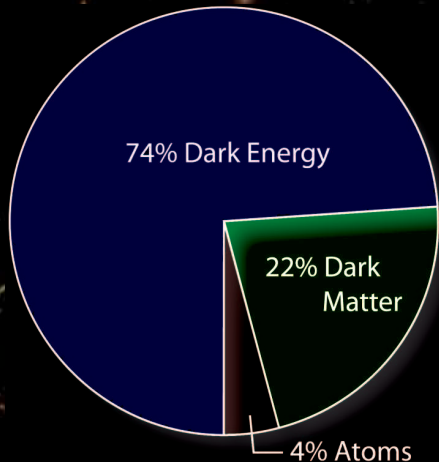
Wann ist alles Gas verbraucht?

Heute sind wir noch am Anfang der Ära der Sternbildung.

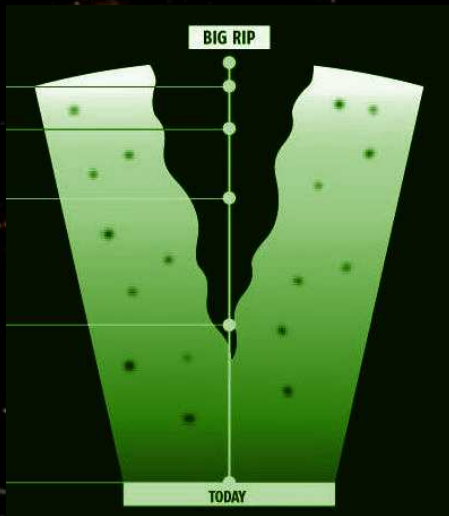
Die Sternbildungsphase endet nach 100 Billionen (10^{14}) Jahren

3 Zukunftsszenarien

- 1 Der Big Rip
- 2 Das zyklische Universum
- 3 Das leere Universum



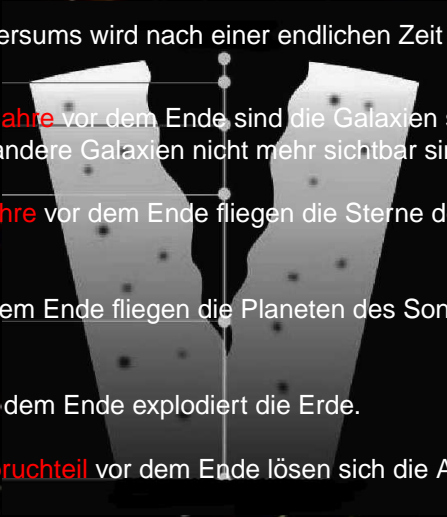
The Big Rip



Ein **Phantomfeld** reißt das Universum auseinander

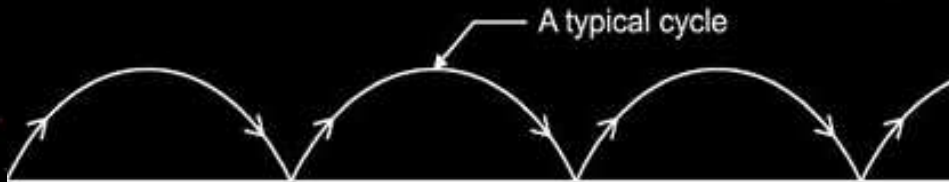
The Big Rip

Das Ende des Universums wird nach einer endlichen Zeit erreicht:

- 
- **Eine Milliarde Jahre** vor dem Ende sind die Galaxien so weit voneinander entfernt, dass andere Galaxien nicht mehr sichtbar sind.
 - **60 Millionen Jahre** vor dem Ende fliegen die Sterne der Milchstraße auseinander.
 - **3 Monate** vor dem Ende fliegen die Planeten des Sonnensystems weg von der Sonne.
 - **30 Minuten** vor dem Ende explodiert die Erde.
 - **Ein Sekundenbruchteil** vor dem Ende lösen sich die Atome auf.

Das war's.

Das zyklische Universum



Das Universum ist zeitlich periodisch.

- ...
- Es zieht sich wieder zusammen und dehnt sich danach wieder aus.
- Neue Sterne entstehen, neue Planeten, neues Leben.
- Dann zieht es sich wieder zusammen...
- ...

Das leere Universum

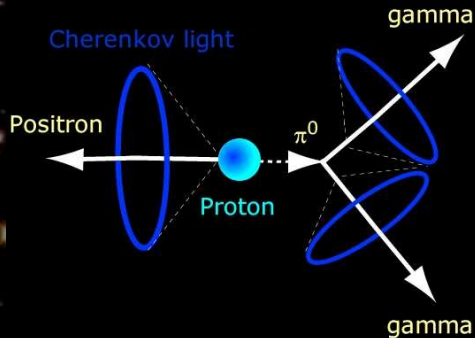
- Die Sterne sterben, übrig bleiben
 - Planeten
 - braune Zwerge
 - weiße Zwerge
 - Neutronensterne
 - schwarze Löcher
- Die Galaxien zerfallen, übrig bleiben
 - einsam umherwanderende tote Sterne
 - Schwarze Löcher



Das leere Universum

Die Protonen zerfallen:

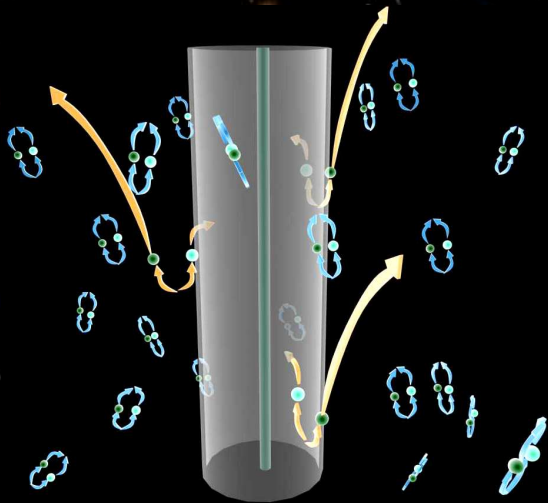
- Die Planeten zerfallen
- Die braunen Zwerge zerfallen
- Die weißen Zwerge zerfallen
- Die Neutronensterne zerfallen



Das leere Universum

Schließlich zerfallen auch noch die Schwarzen Löcher:

- Auflösung durch Hawkingstrahlung
- Zeitskala: 10^{98} Jahre für galaktische Schwarze Löcher



Das leere Universum

10^{100} Jahre:

Es herrscht Leere

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.
000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000 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.
000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000 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

