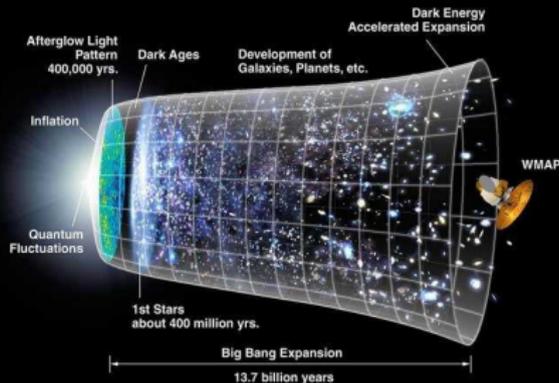
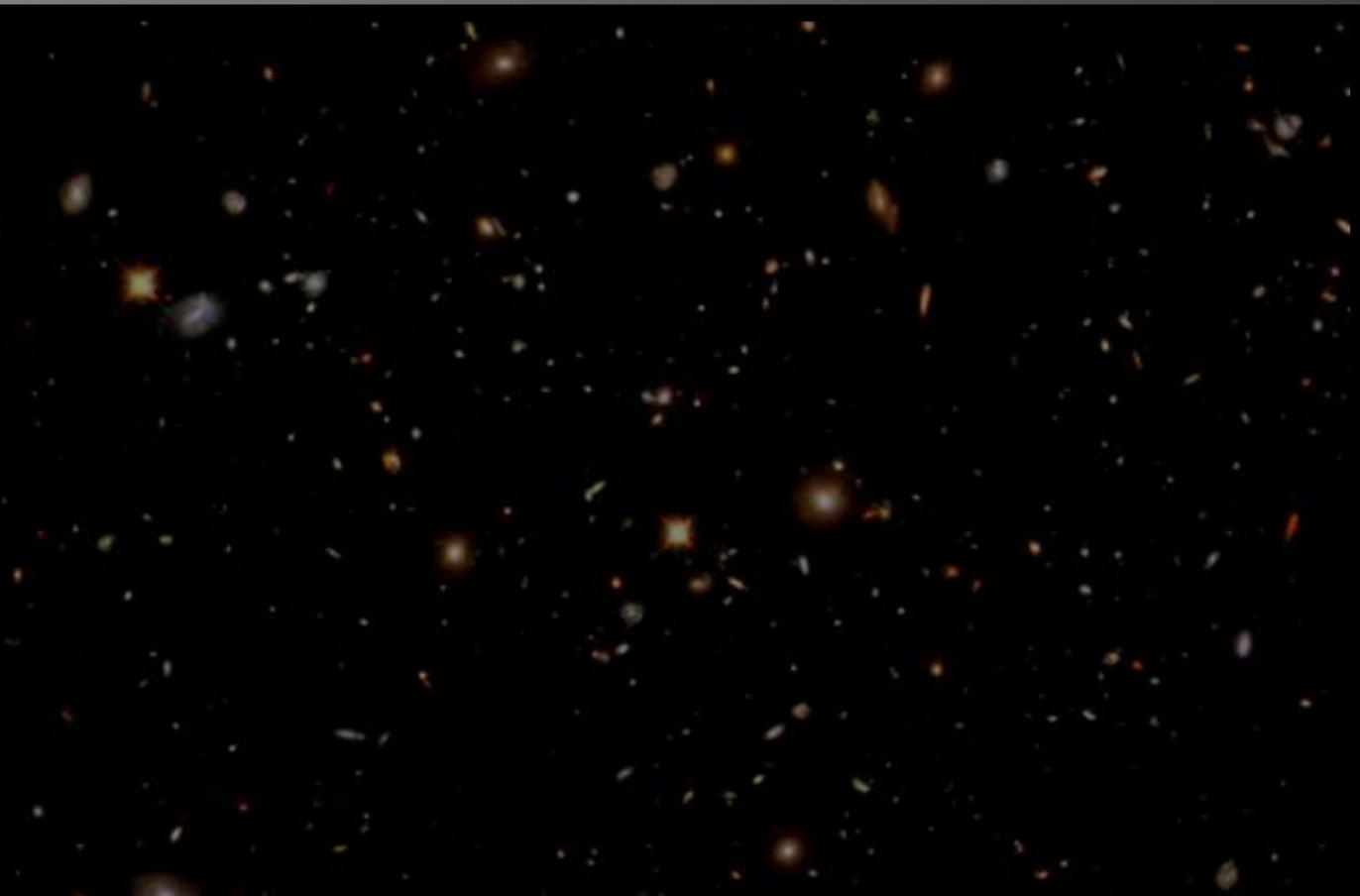


# Über die Vergangenheit und Zukunft des Universums

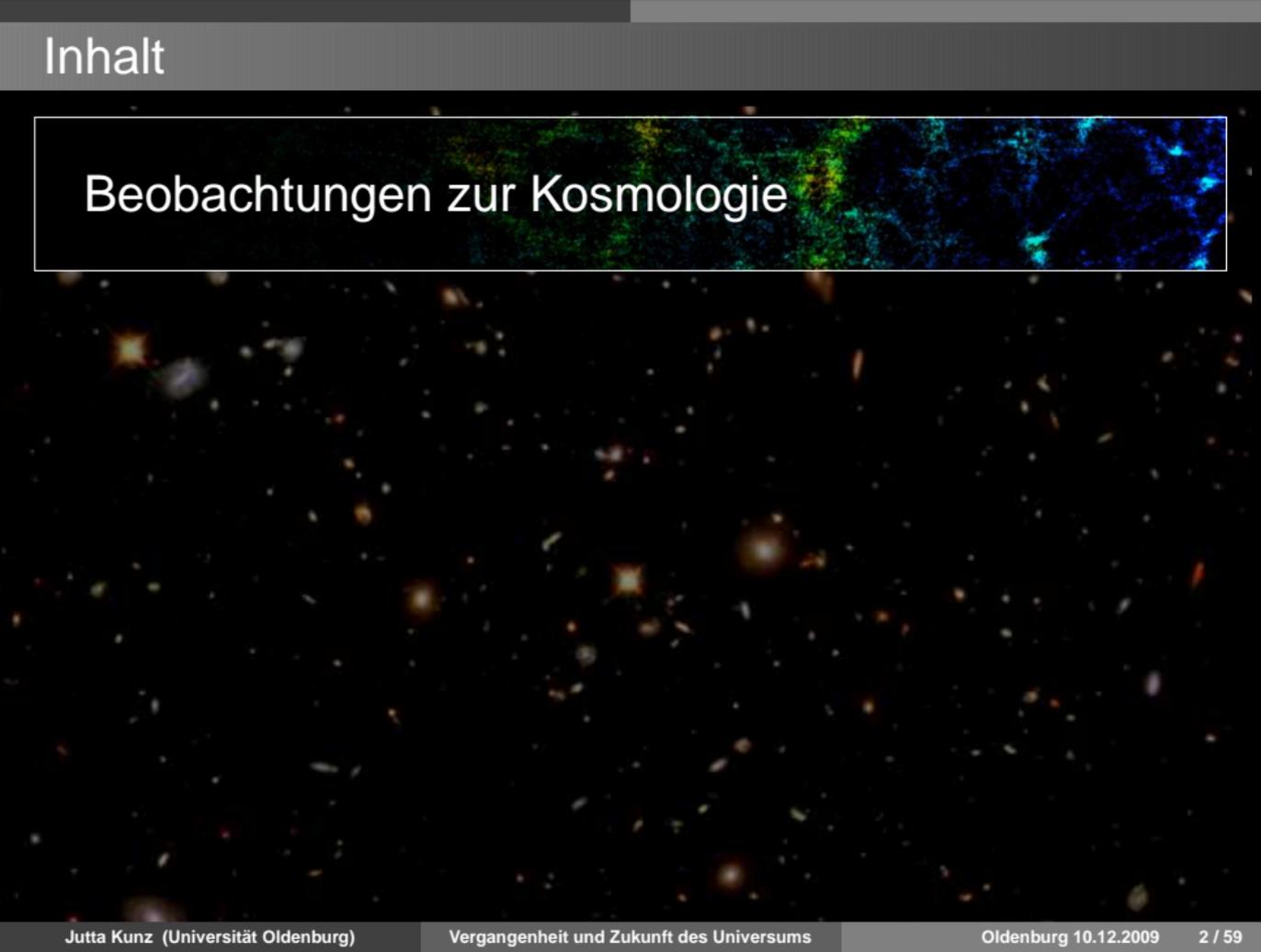
Jutta Kunz  
CvO Universität Oldenburg



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

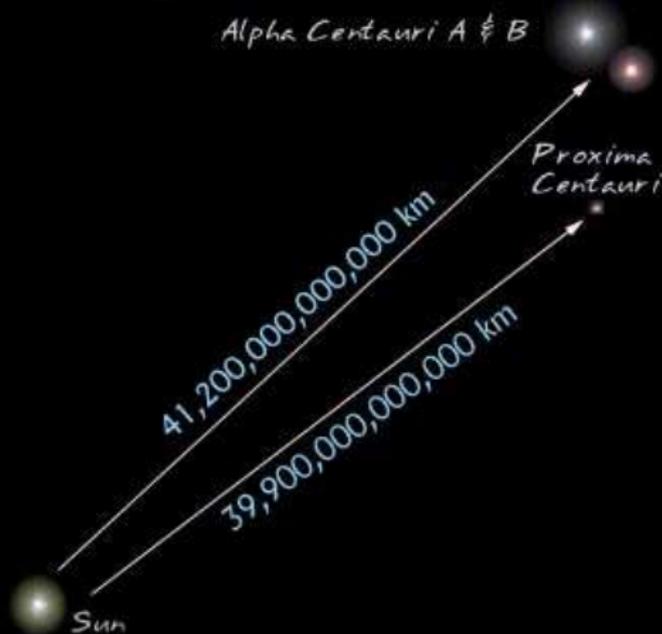
# Distanzen in der Astronomie



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



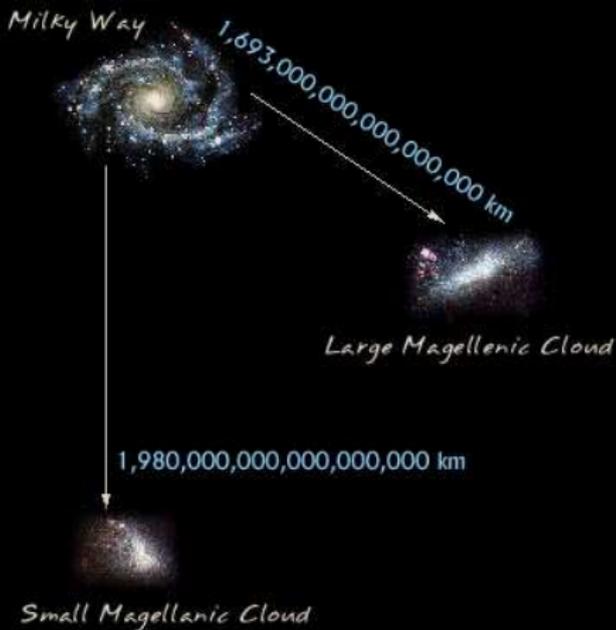
## Die Umgebung der Sonne

# Distanzen in der Astronomie



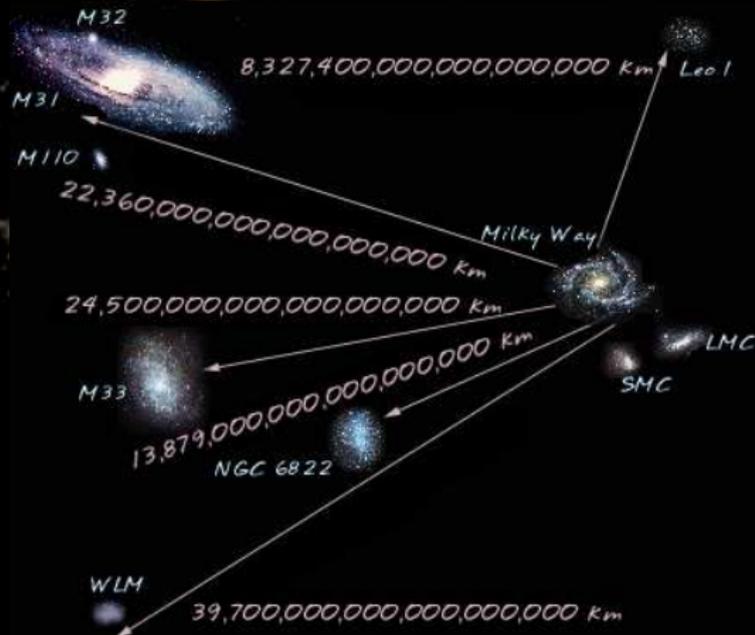
Die Milchstraße  
Durchmesser etwa 100000 Lichtjahre

# Distanzen in der Astronomie



Nächste Galaxien

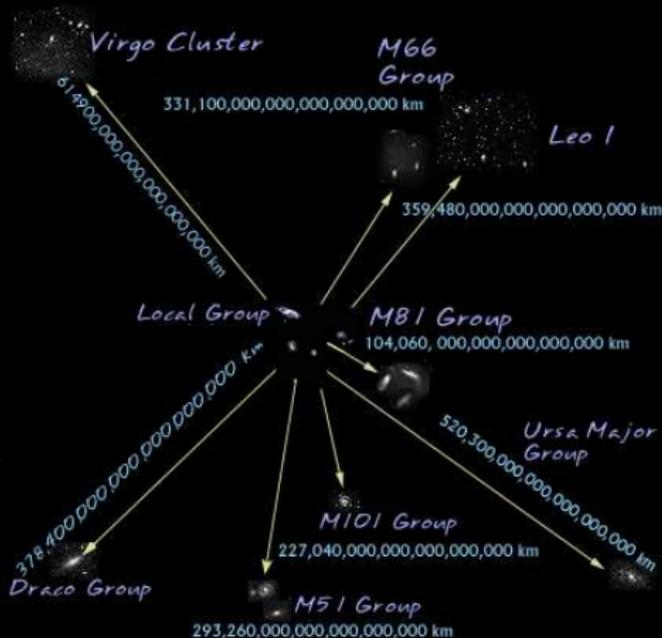
# Distanzen in der Astronomie



## Die lokale Gruppe

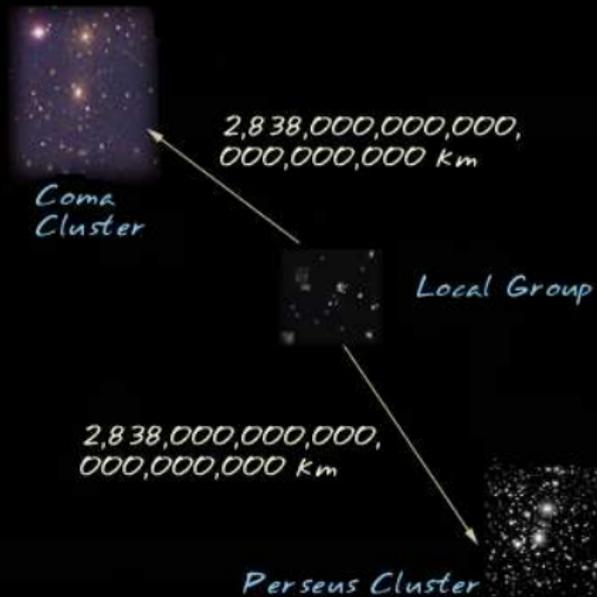
Abstand Milchstrasse – Andromeda: ca. 2,5 Millionen Lichtjahre

# Distanzen in der Astronomie



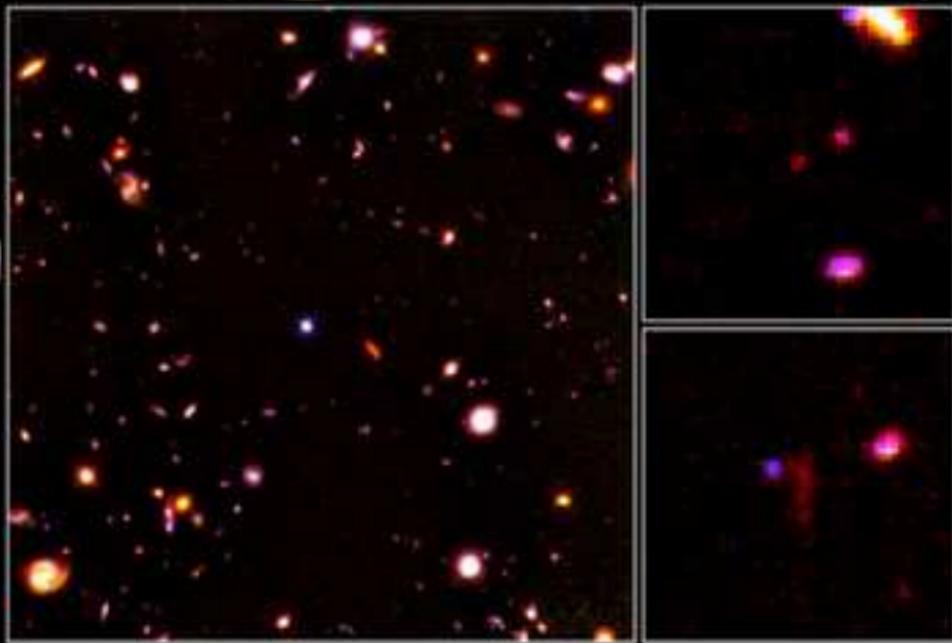
Das lokale Supercluster

# 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

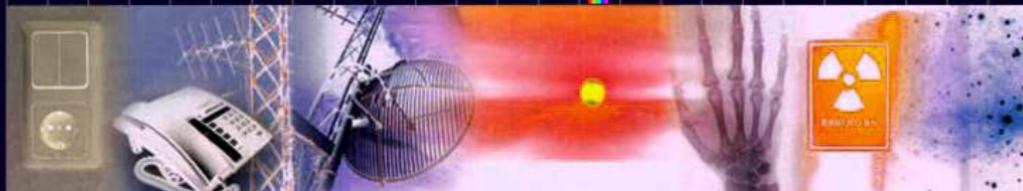
# Das elektromagnetische Spektrum

## Das elektromagnetische Spektrum

Energie in eV

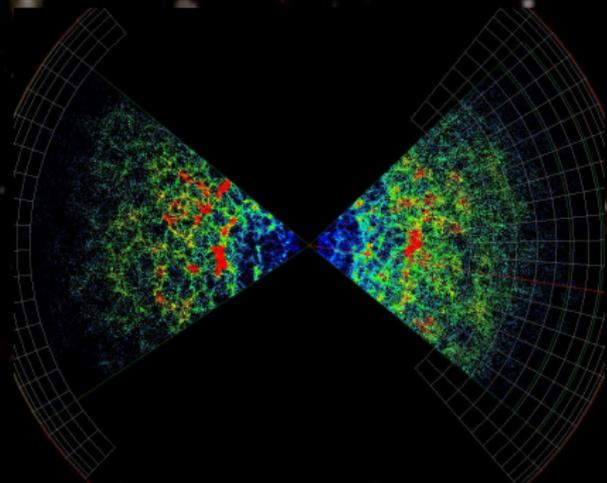
 $1,24 \cdot 10^{-13}$   $\cdot 10^{-12}$   $\cdot 10^{-11}$   $\cdot 10^{-10}$   $\cdot 10^{-9}$   $\cdot 10^{-8}$   $\cdot 10^{-7}$   $\cdot 10^{-6}$   $\cdot 10^{-5}$   $\cdot 10^{-4}$   $\cdot 10^{-3}$   $\cdot 10^{-2}$   $\cdot 10^{-1}$   $\cdot 10^0$   $\cdot 10^1$   $\cdot 10^2$   $\cdot 10^3$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

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

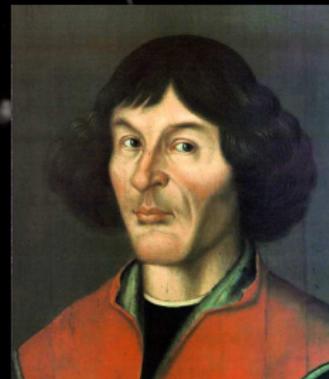
( $\approx$  150 Millionen km)

einer Bogensekunde entspricht

# Das kosmologische Prinzip

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

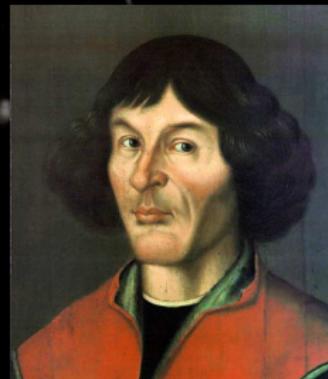
- Die Erde steht nicht im Mittelpunkt des Sonnensystems
- Das Sonnensystem steht an keiner ausgezeichneten Stelle des Universums
- Kein Beobachter steht an einer ausgezeichneten Stelle des Universums



# 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:

$$v = H r$$

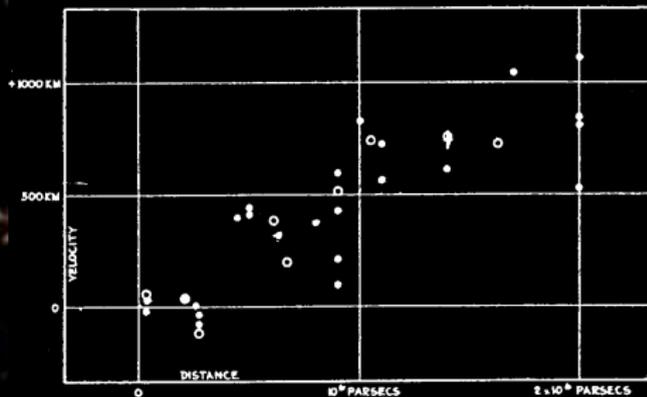


FIGURE 1

Originaldaten von Hubble 1929

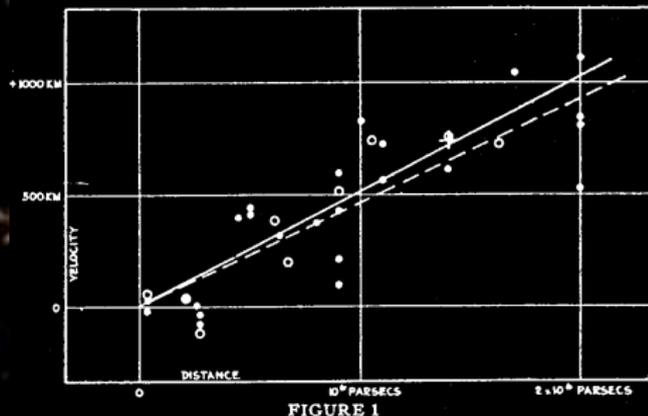
# Die Expansion des Universums

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

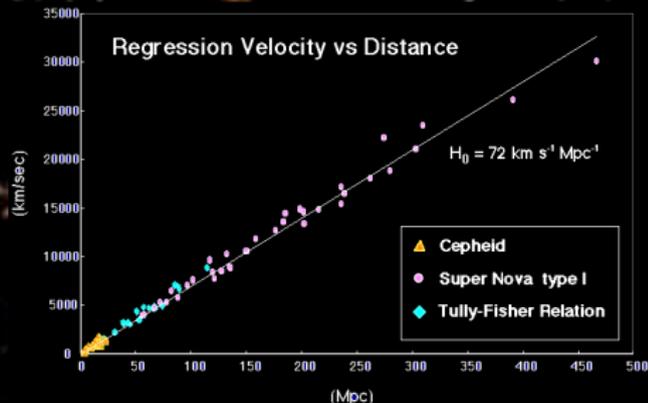
# Die Expansion des Universums

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?

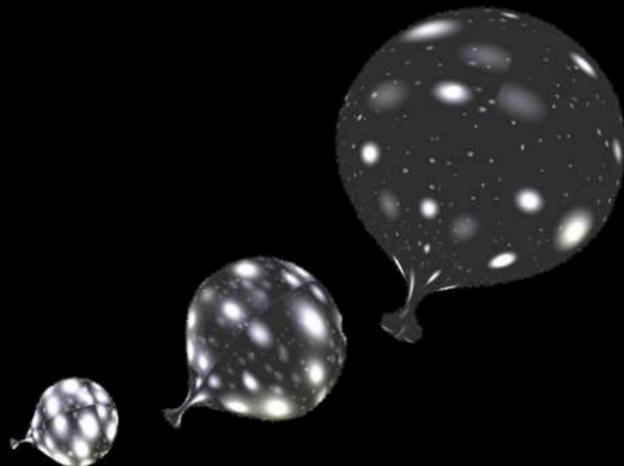
# Die Expansion des Universums

Beobachtungsergebnis:

Das Hubble–Gesetz

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

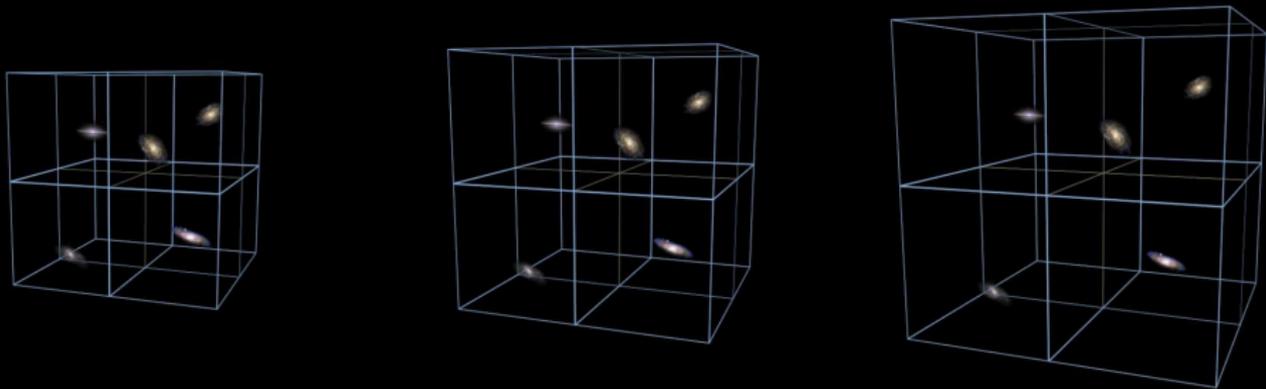
$$v = H r$$



**Das Universum dehnt sich aus.**

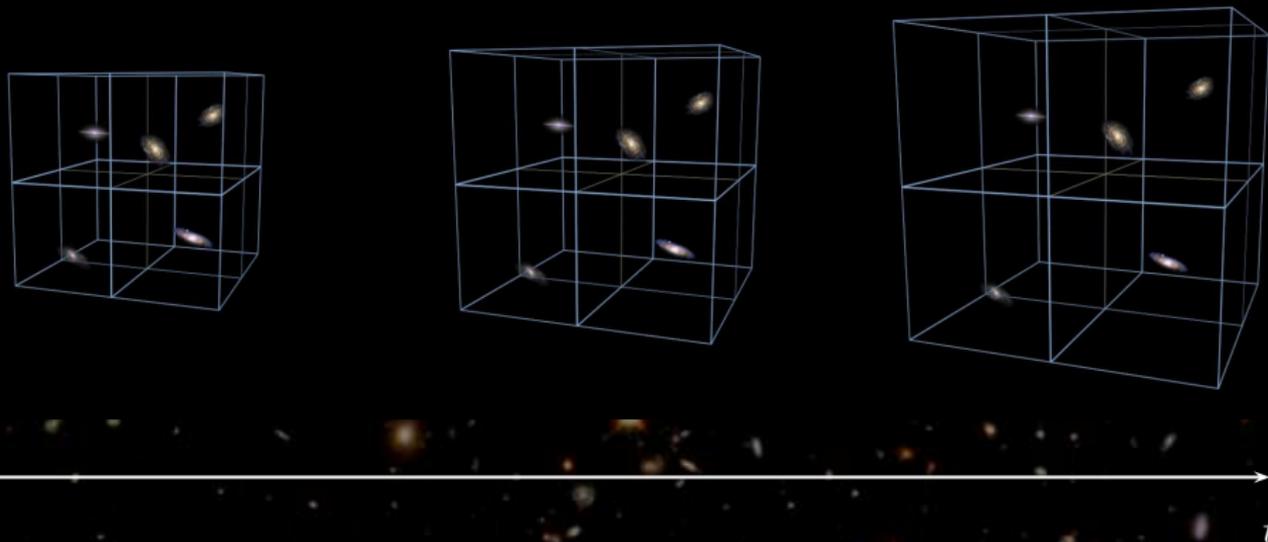
2-dimensionales Analogon

# Die Expansion des Universums



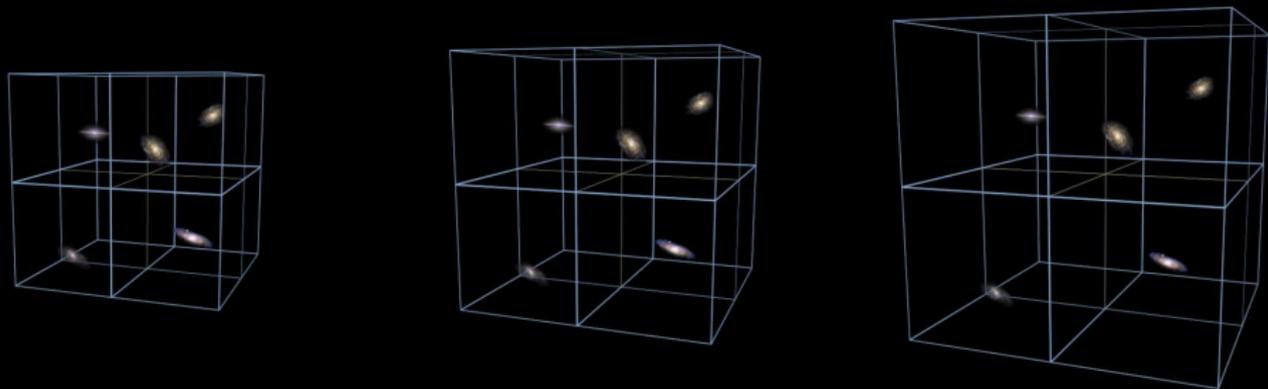
Die Ausdehnung eines räumlich 3-dimensionalen flachen Universums

# Die Expansion des Universums



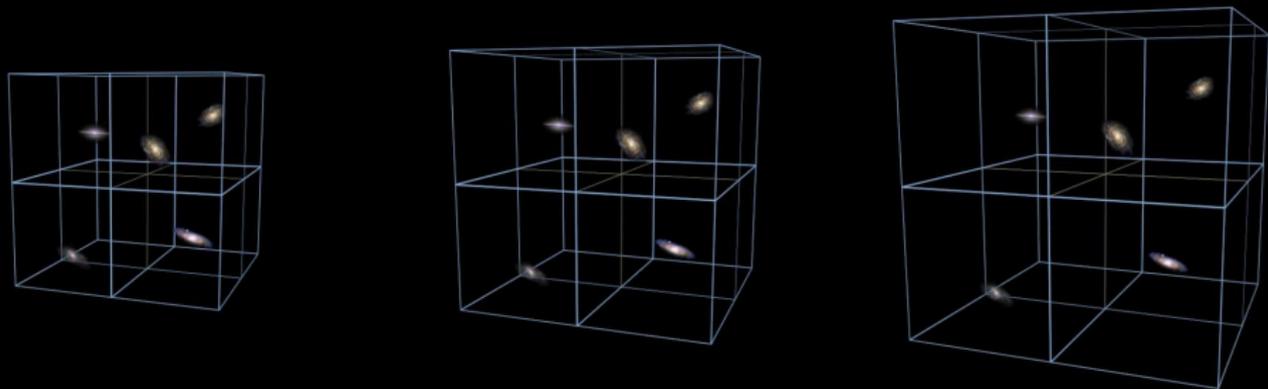
Wächst man, wenn sich das Universum ausdehnt?

# Die Expansion des Universums



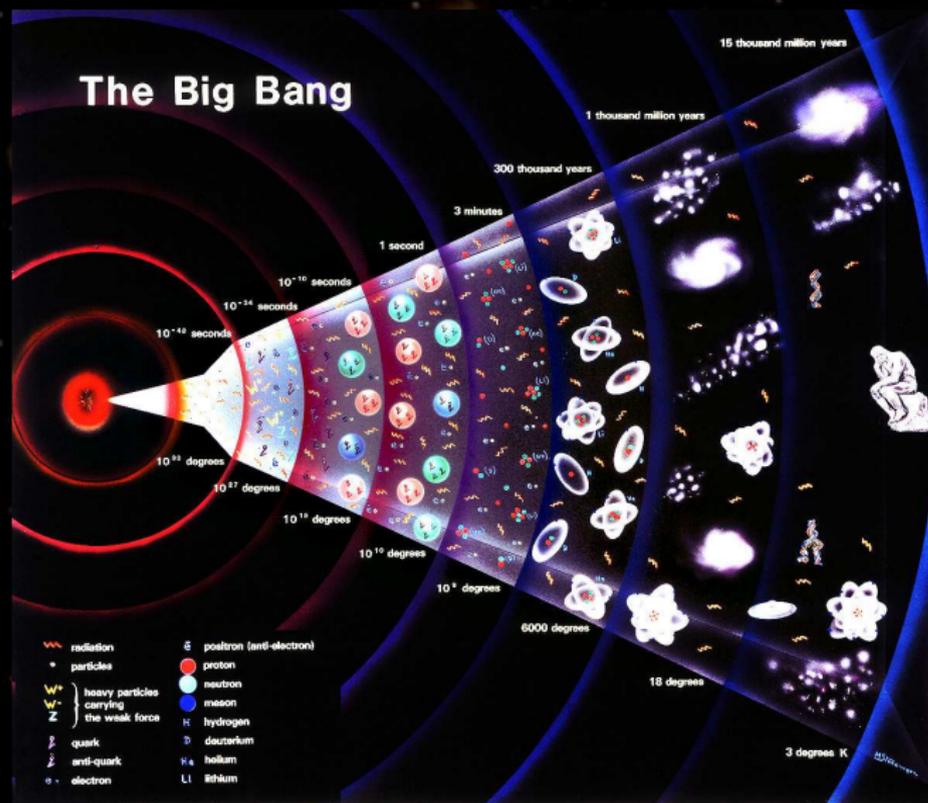
Was ist, wenn man in der Zeit zurückgeht?

# 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?

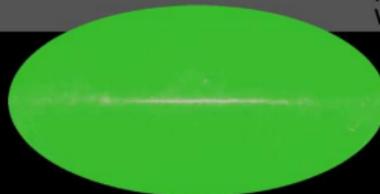
# Die kosmische Hintergrundstrahlung

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

1965



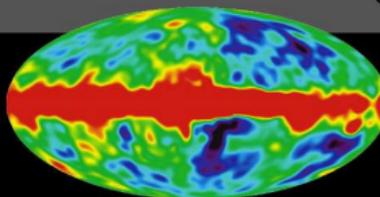
Penzias and  
Wilson



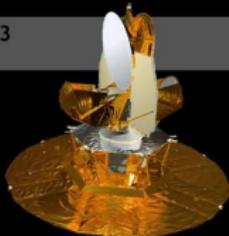
1992



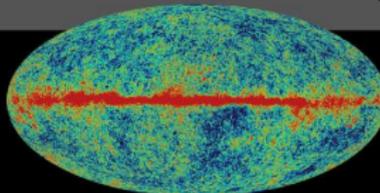
COBE



2003

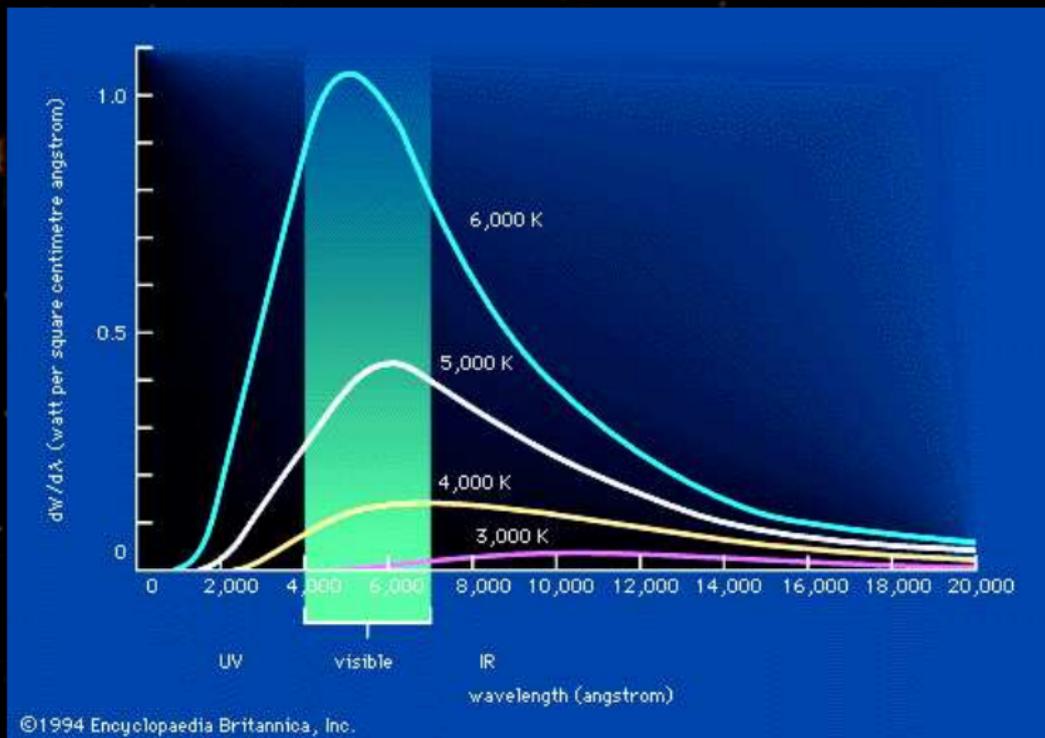


WMAP



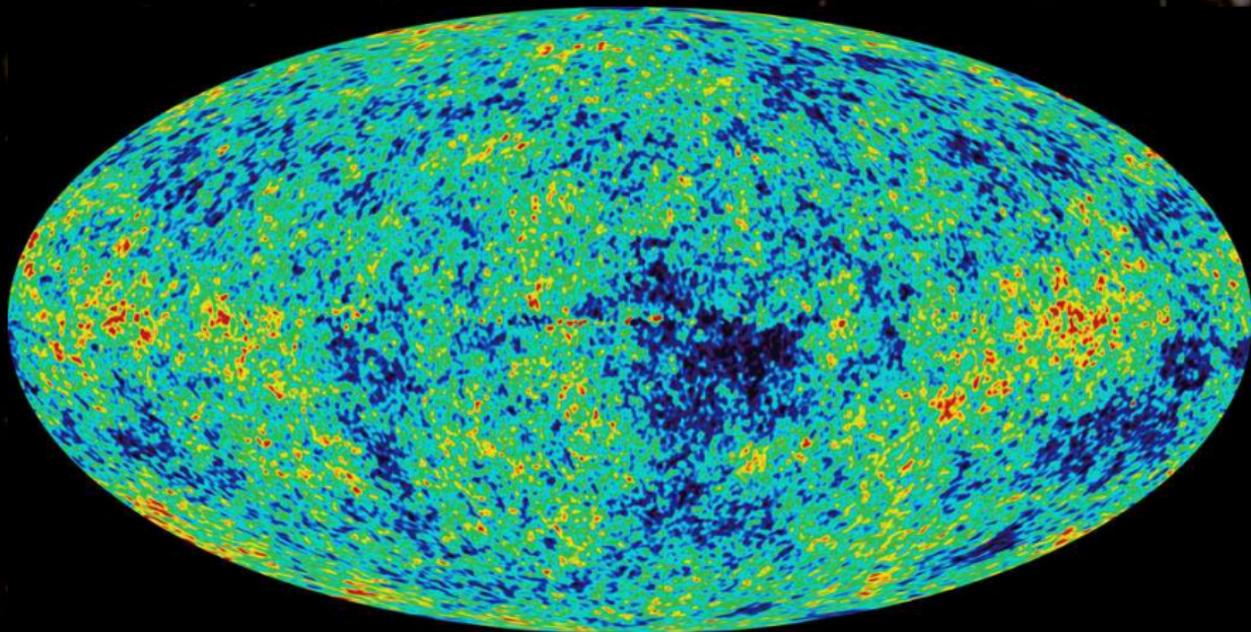
# Die kosmische Hintergrundstrahlung

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**

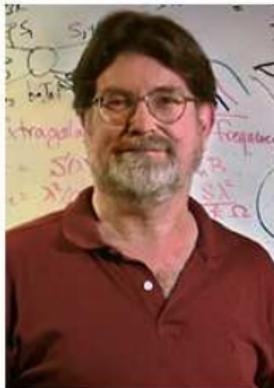
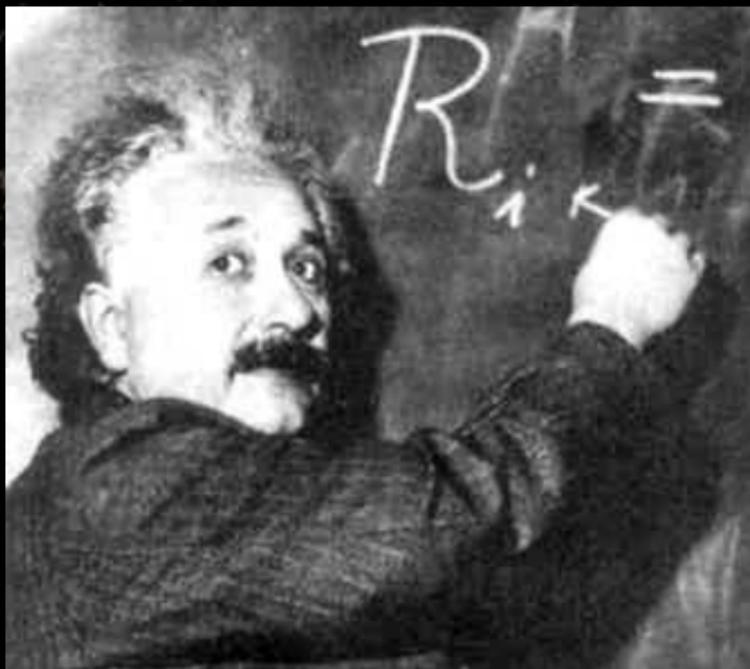


Photo: R. Kaltschmidt/LBNL

**George F. Smoot**



## Annahmen: Allgemeine Relativitätstheorie

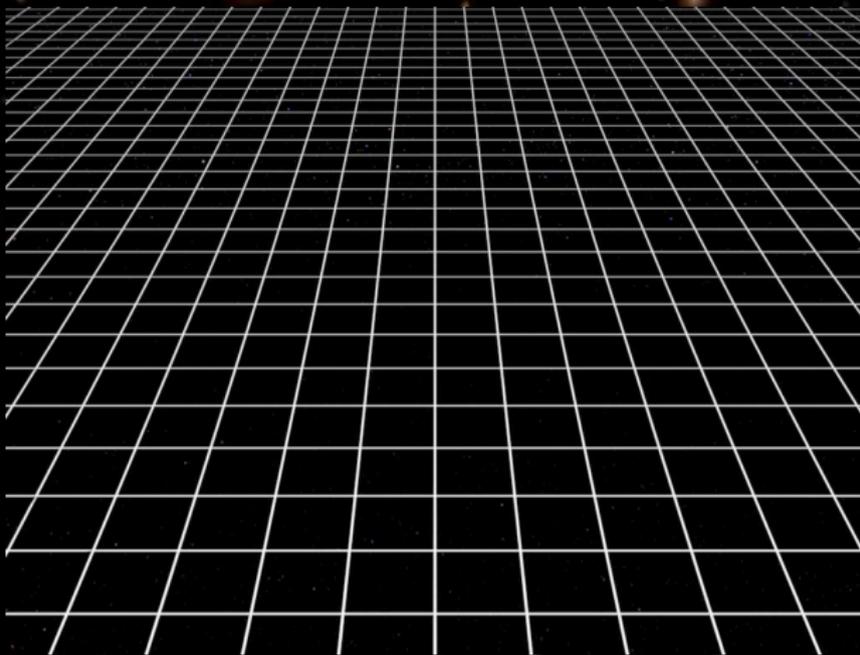


Albert Einstein 1879 – 1955

## Annahmen: Allgemeine Relativitätstheorie

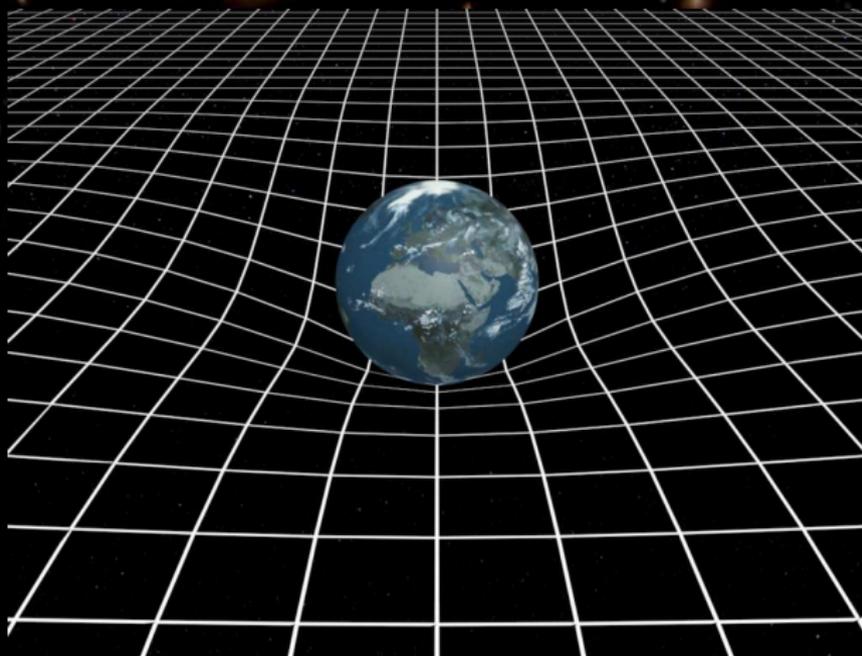


# Flache Raum-Zeit



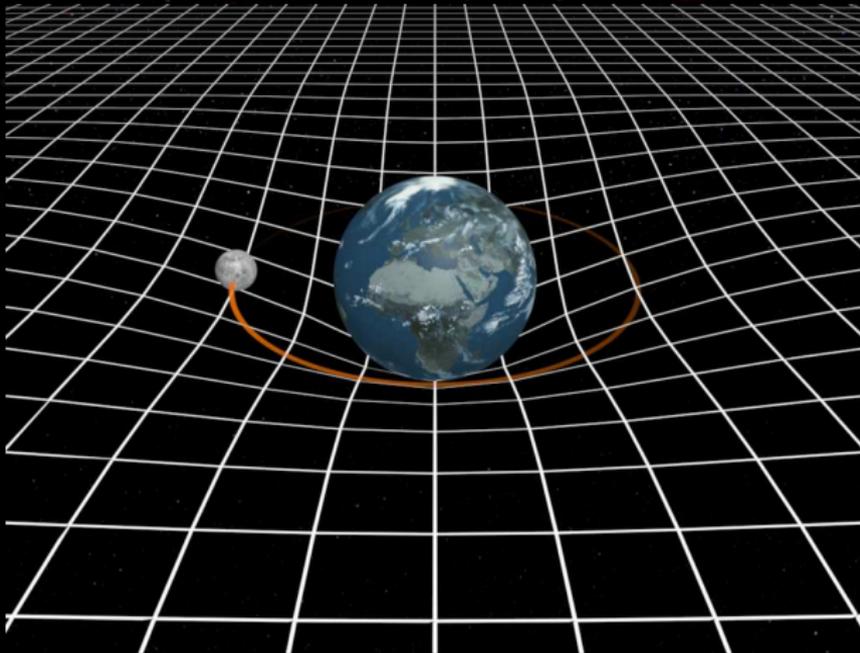
Keine Materie: flache Raum-Zeit

# 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

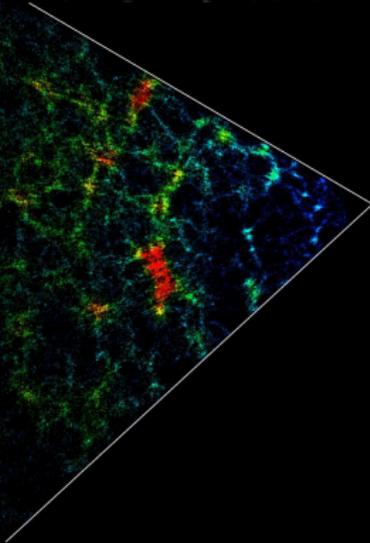
# Annahmen: Gesetze und Naturkonstanten

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

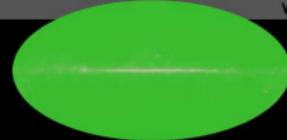


- Die fundamentalen Konstanten haben **überall** und **zu allen Zeiten** die Werte, die wir hier und heute messen.

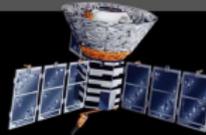
# Annahmen: Kosmologisches Prinzip



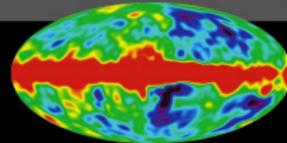
1965

Penzias and  
Wilson

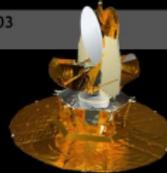
1992



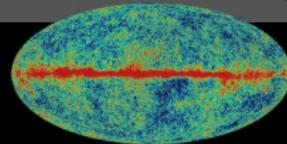
COBE



2003



WMAP

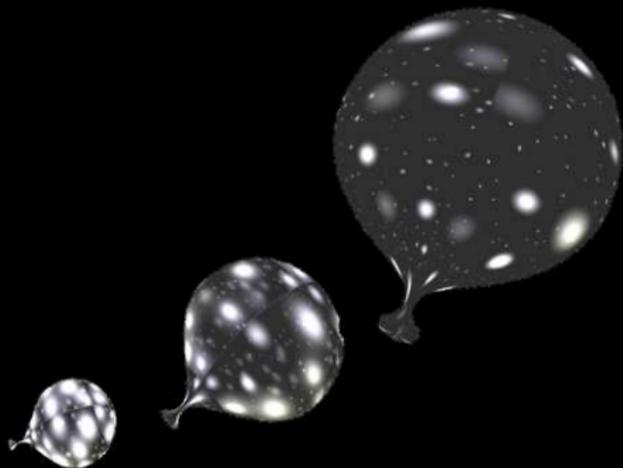


Das Universum sieht für jeden Beobachter im Universum gleich aus

# Dynamik des Universums

Friedmann–Lemaître Gleichung:

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



Alexander Friedmann  
1888–1925

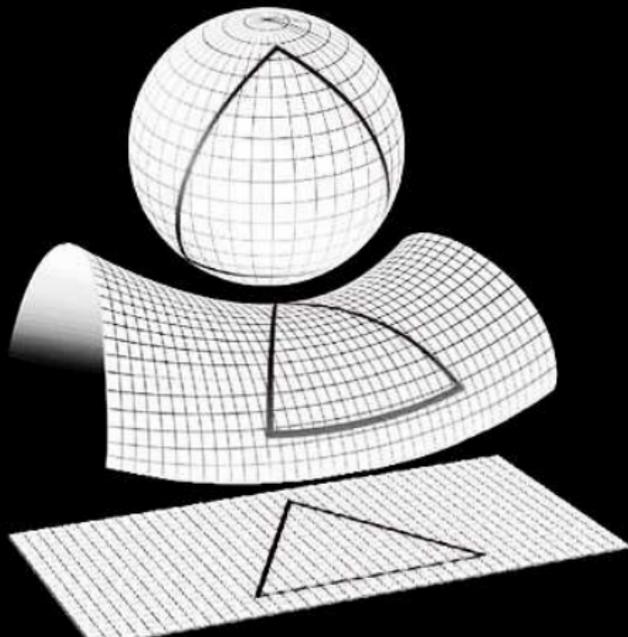


Georges Lemaître  
1894–1966

# Dynamik des Universums

Friedmann–Lemaître Gleichung:

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



Alexander Friedmann  
1888–1925

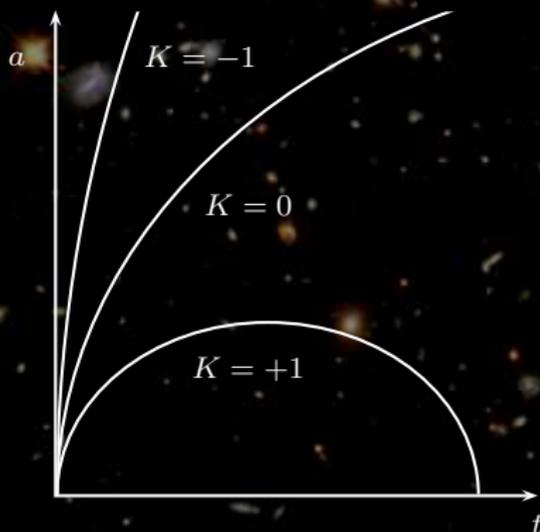


Georges Lemaître  
1894–1966

# Dynamik des Universums

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

In der Vergangenheit gab es notwendigerweise einen Urknall

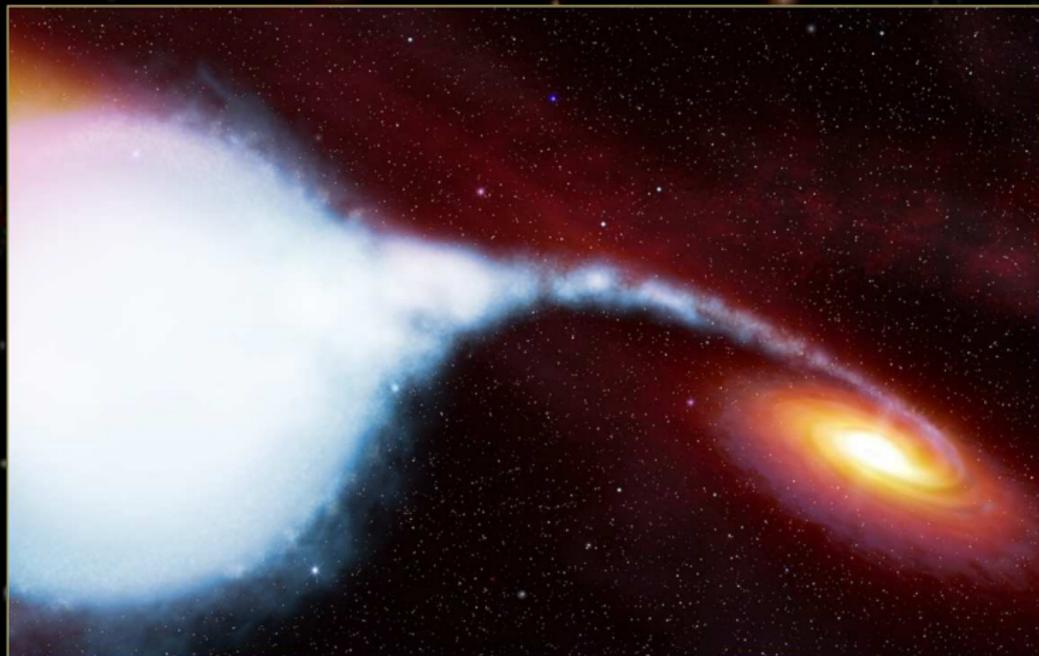


Die Gravitation wirkt immer anziehend.

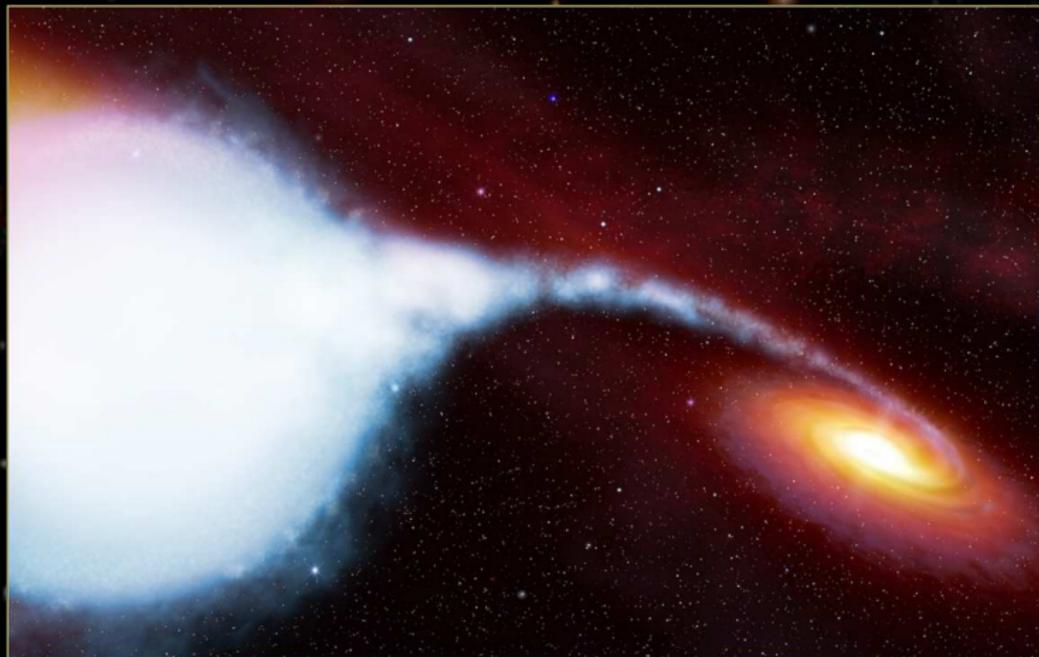
Folglich dehnt sich das Universum immer langsamer aus.  
Falls genügend Materie vorhanden ist, kollabiert es wieder.

Wird die Ausdehnung wirklich abgebremst?

# 1998: Supernova Ia Daten



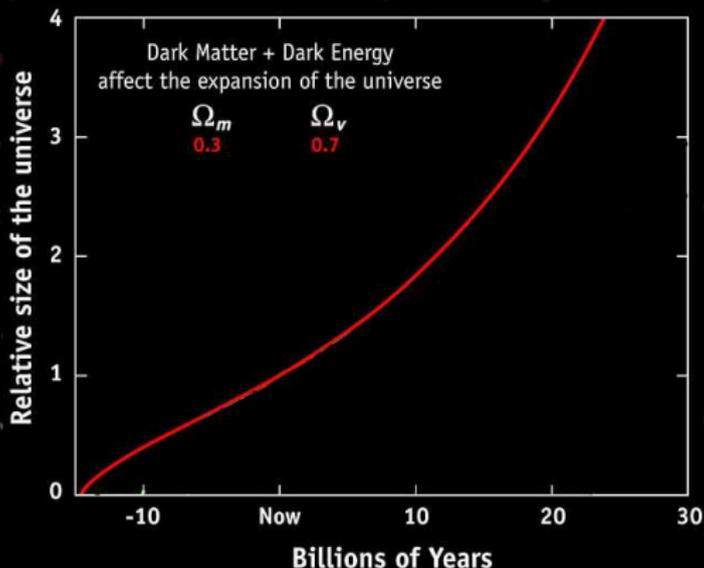
# 1998: Supernova Ia Daten



Die Expansion des Universums beschleunigt sich

# Die beschleunigte Expansion des Universums

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

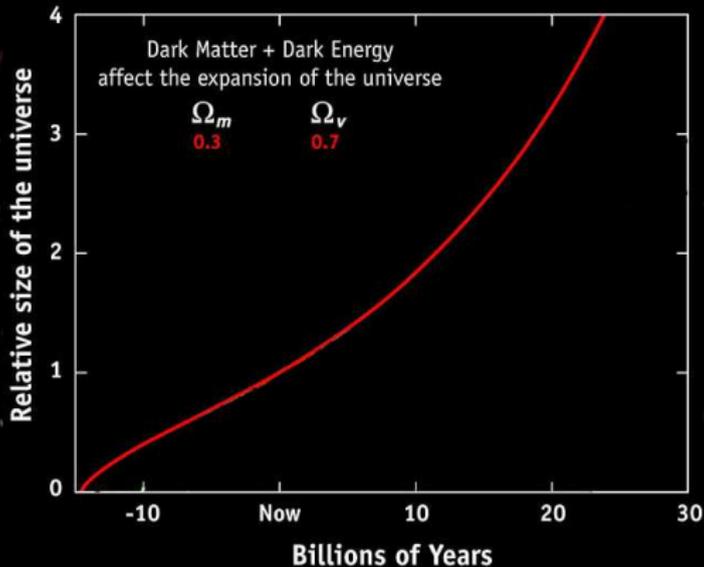


**Wendepunkt** als das Universum halb so alt war wie heute

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

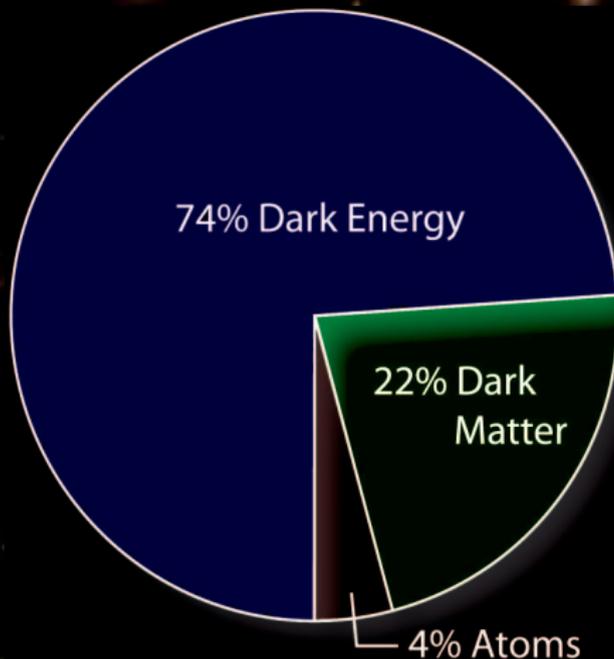
Vergangenheit des Universums

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



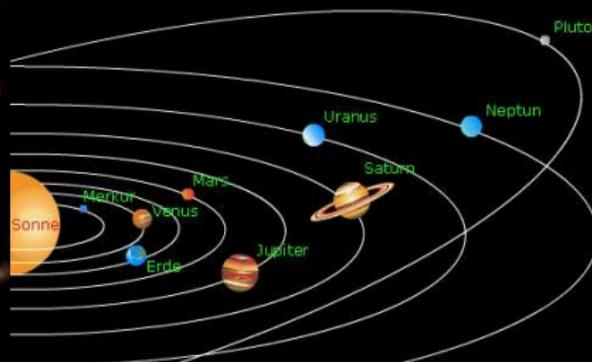
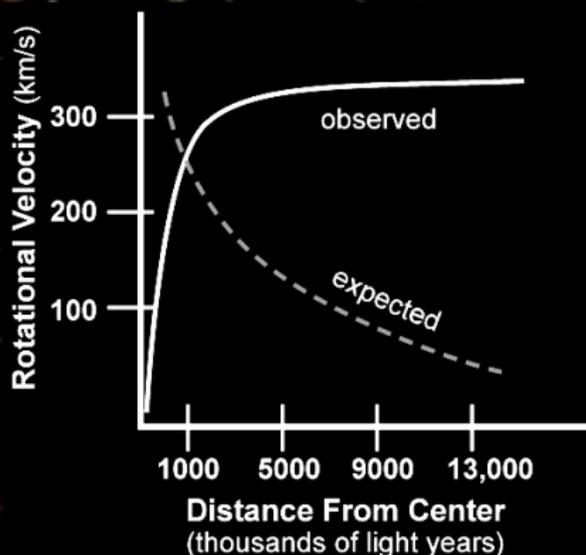
Vera Rubin

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

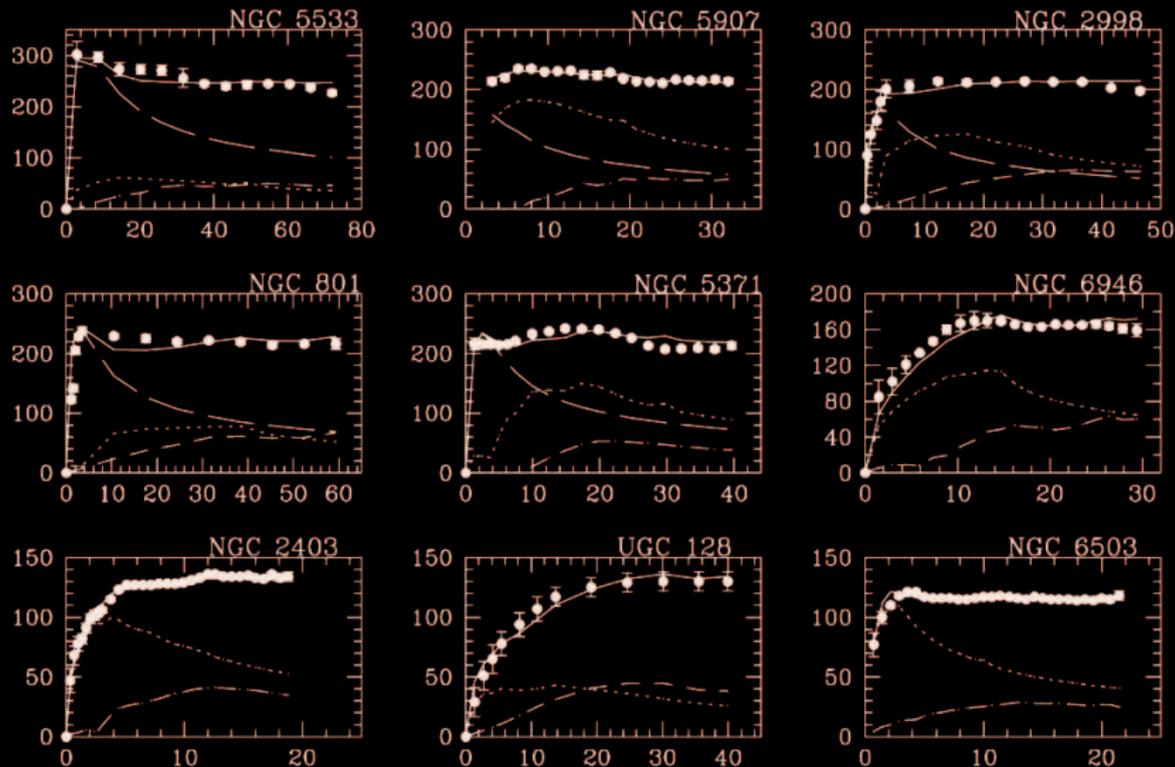
# Evidenz für Dunkle Materie: Spiralgalaxien

Erwartung für die Rotationskurven von Spiralgalaxien

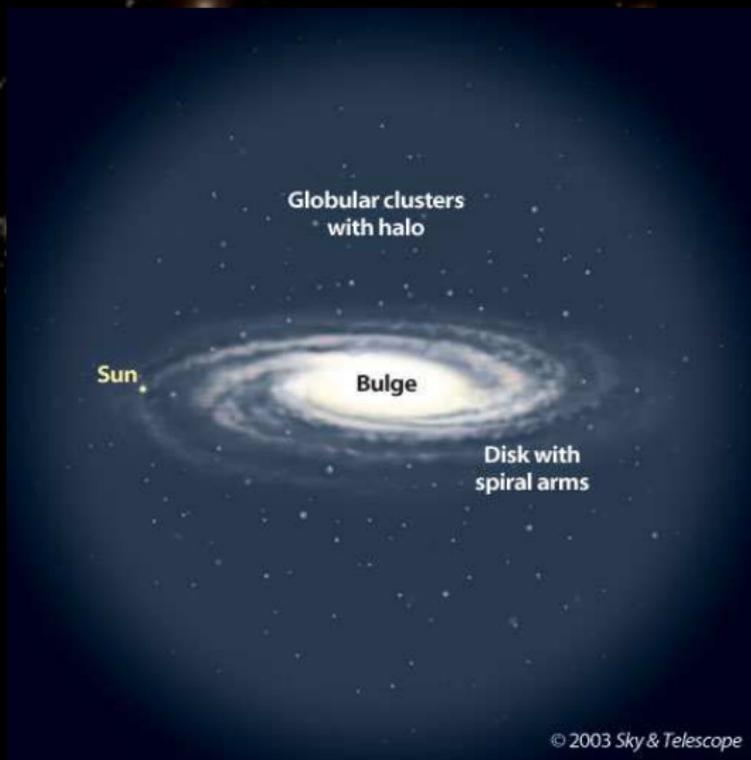
Beobachtung der Rotationskurven von Spiralgalaxien



## 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 %

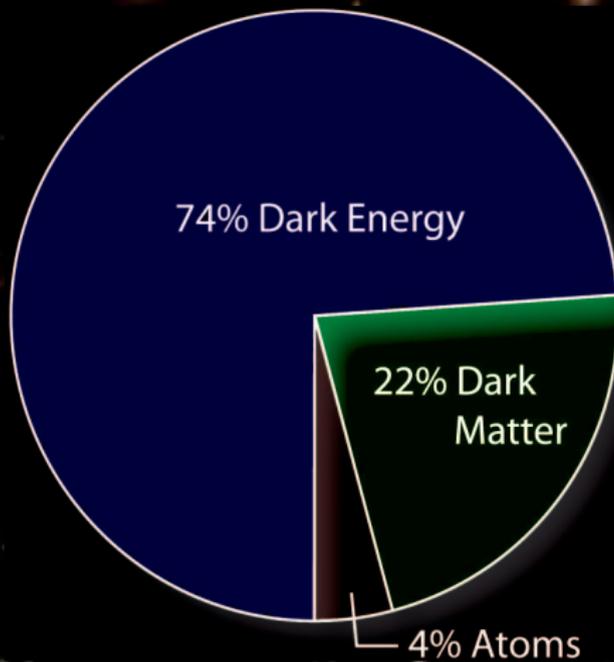
Dunkle Materie, die nicht aus Atomen besteht

**exotische dunkle Materie!**

- WIMPs

} = 22 %

# Woraus besteht das Universum?

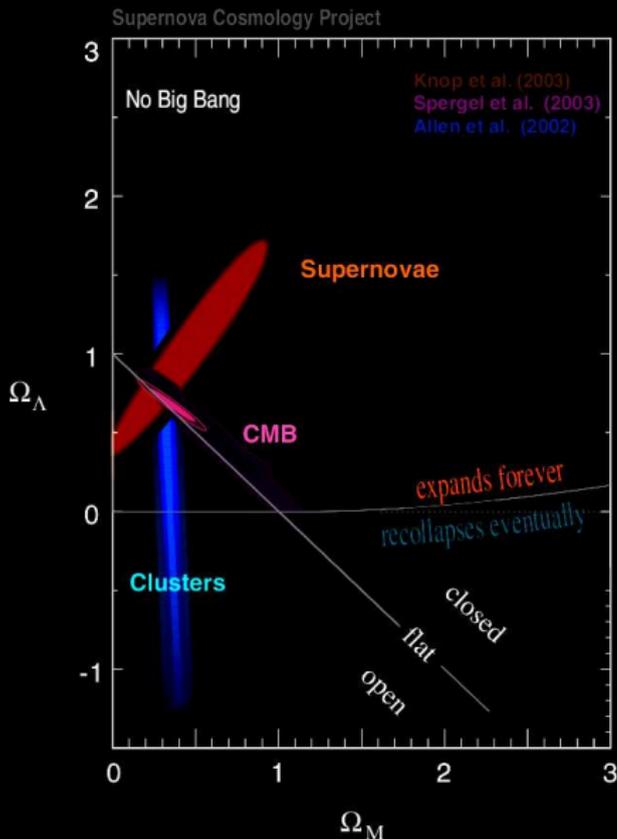


Der kosmische Kuchen

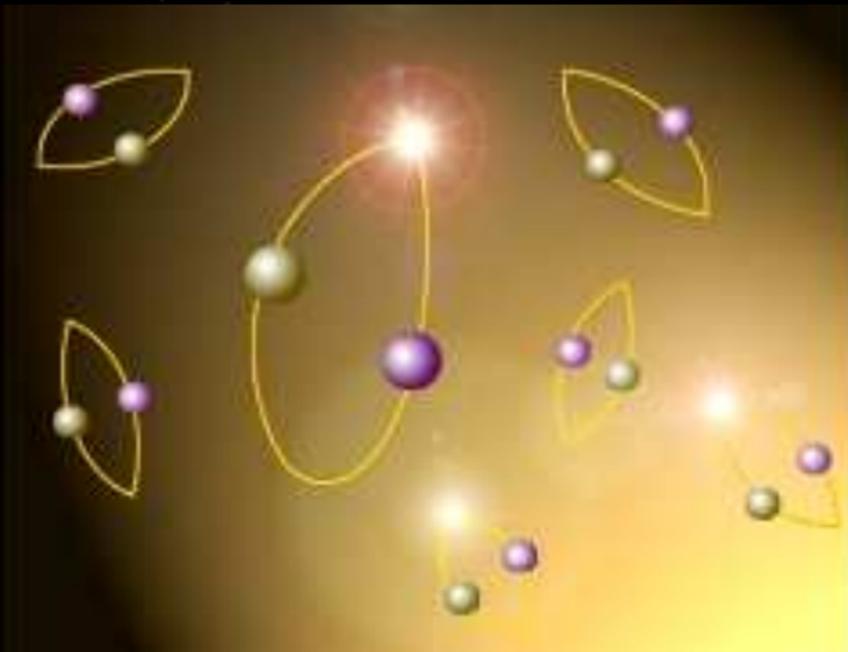
# Evidenz für Dunkle Energie: Supernovae Ia



# Überwältigende Evidenz für Dunkle Energie



# Was ist Dunkle Energie?



Ist es Vakuumenergie?

Einsteins kosmologische Konstante

# Was ist Dunkle Energie?

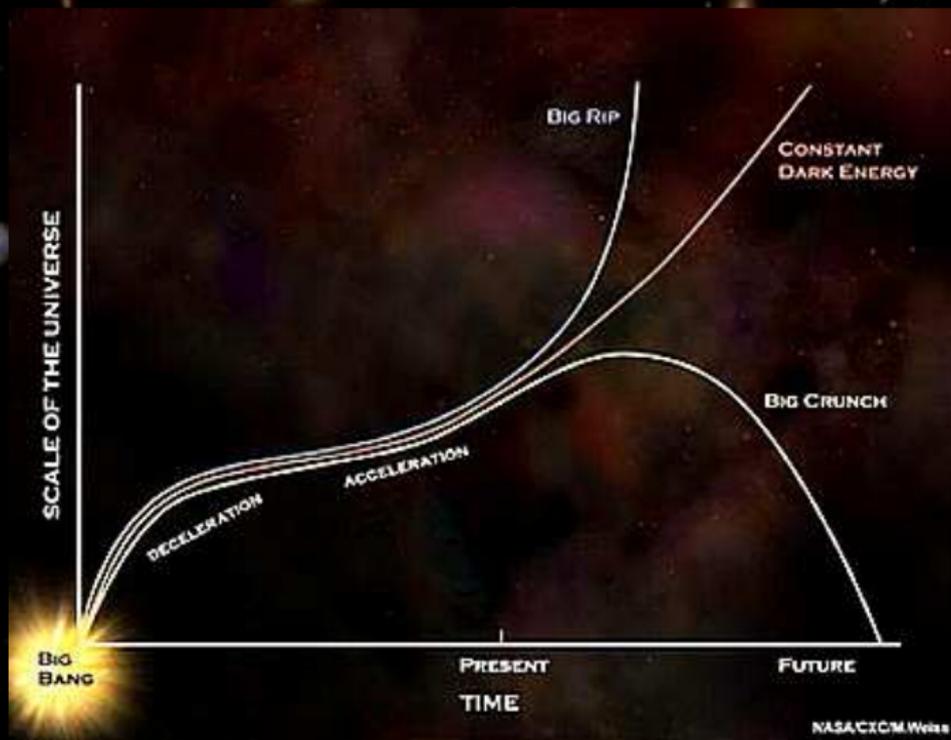
Plato postulierte ein 5. Element, das zu dem 5. platonischen Körper gehören sollte, aus dem der Kosmos selbst gemacht sei: **Quintessenz**



Ist es **Quintessenz**?

eine hypothetische fünfte Kraft neben den vier bekannten Kräften?

# Was ist Dunkle Energie?



Oder ist es ein **Phantomfeld**?

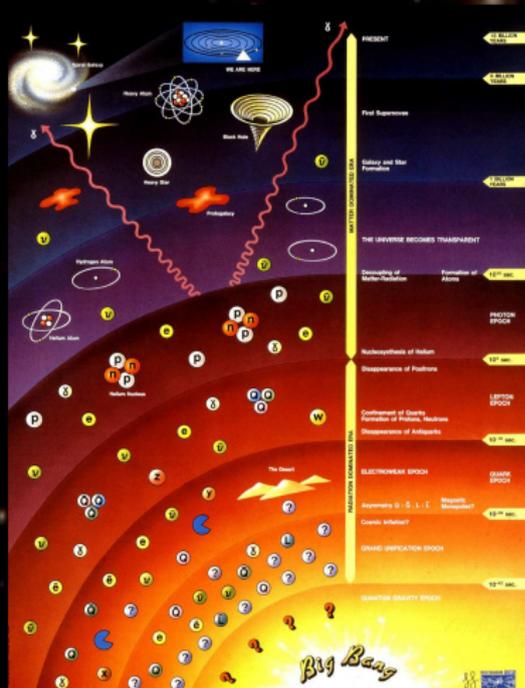
# Zusammenfassung: Dunkle Energie

## Dunkle Energie: größtes Rätsel der heutigen Physik

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



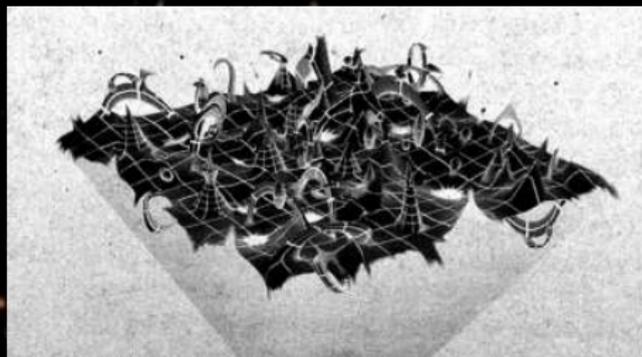
# Kleine zeitliche Übersicht



## Ära der Spekulationen

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

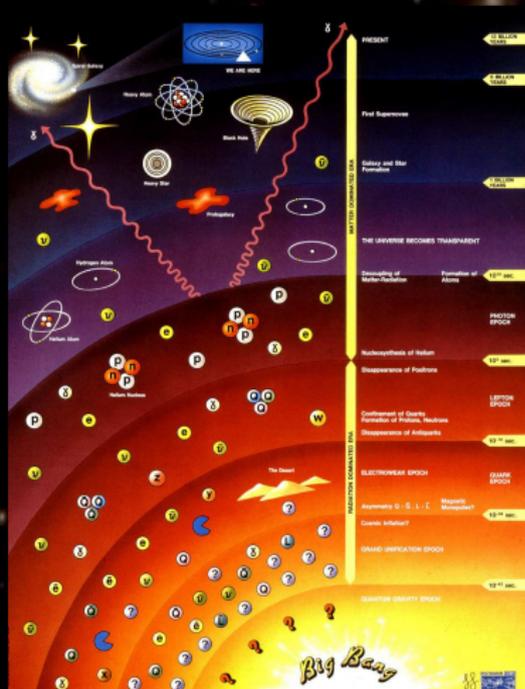
## Planck Ära: Quantengravitation



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

## Die Zeit vor dem Standardmodell

# Kleine zeitliche Übersicht



## Ära der Teilchenphysik

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

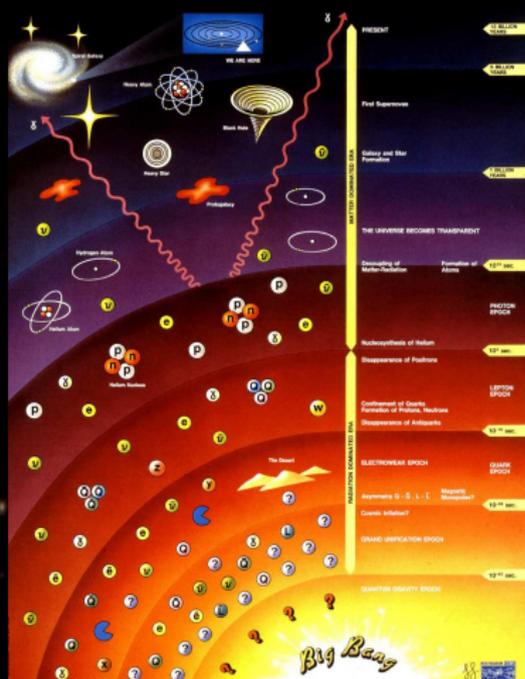
Die äußerst heiße Ursuppe besteht aus den bekannten Elementarteilchen

## ELEMENTARY PARTICLES

Leptons	$\nu_e$ electron neutrino	$\nu_\mu$ muon neutrino	$\nu_\tau$ tau neutrino	$Z$ Z boson
	$e$ electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau	$W$ W boson
Quarks	$u$ up	$c$ charm	$t$ top	$\gamma$ photon
	$d$ down	$s$ strange	$b$ bottom	$g$ gluon

I II III  
Three Generations of Matter

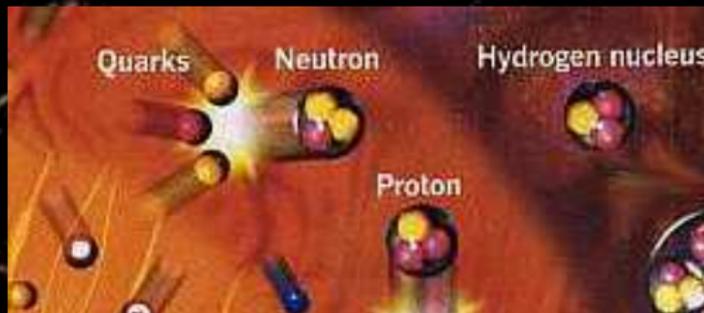
# Kleine zeitliche Übersicht



## Ära der Teilchenphysik

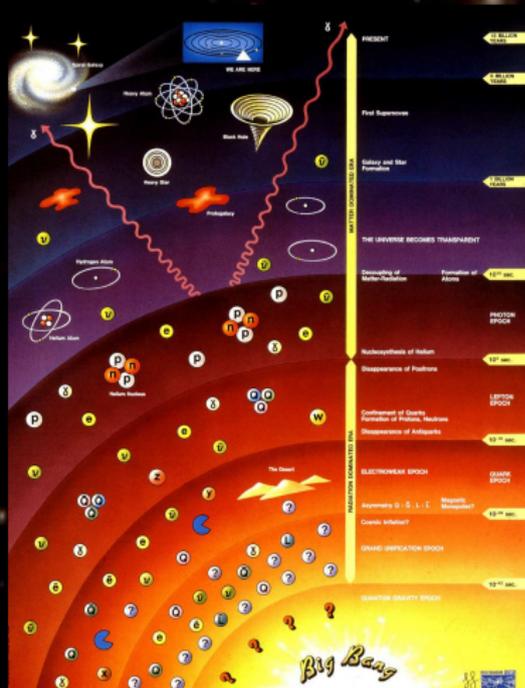
$$t \approx 10^{-5} \text{ s}$$

Die Kernbausteine entstehen:  
Protonen und Neutronen





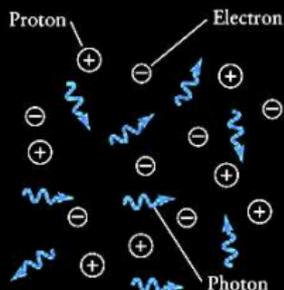
# Kleine zeitliche Übersicht



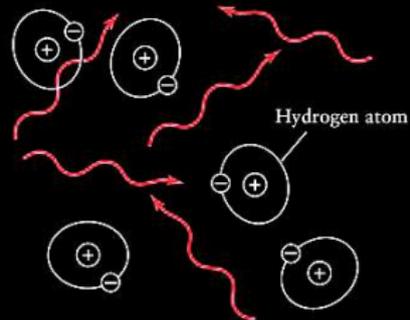
## Ära der Atomphysik

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

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

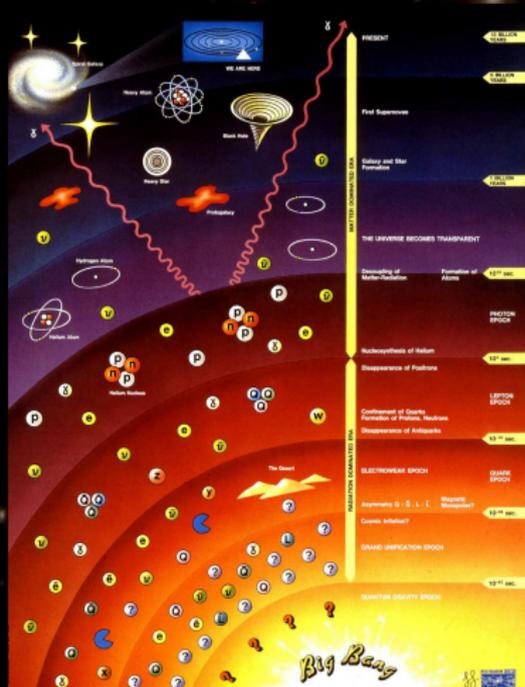


a Before recombination



b After recombination

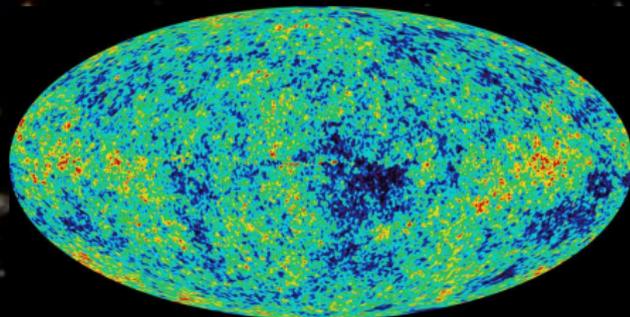
# Kleine zeitliche Übersicht



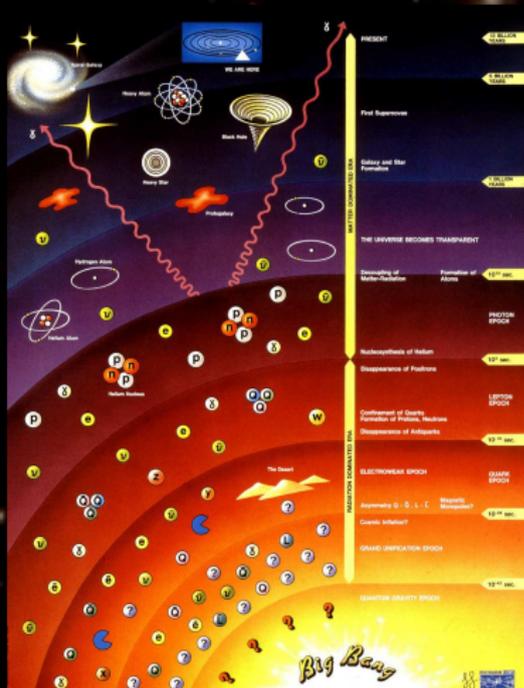
## Ära der Atomphysik

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

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



# Kleine zeitliche Übersicht



## Ära der Sternbildung

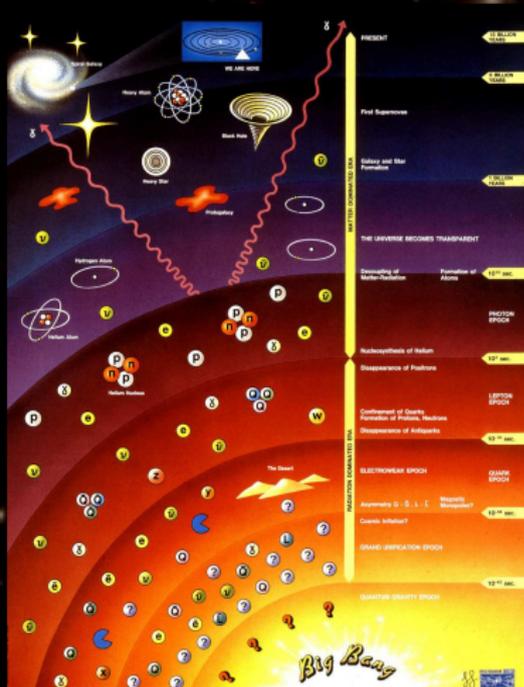
$t \geq 10^{16}$  s  $\approx$  einige hundert Millionen Jahre

- Die erste Sternengeneration entsteht
- Die schweren Elemente entstehen



Riesen-Protostern

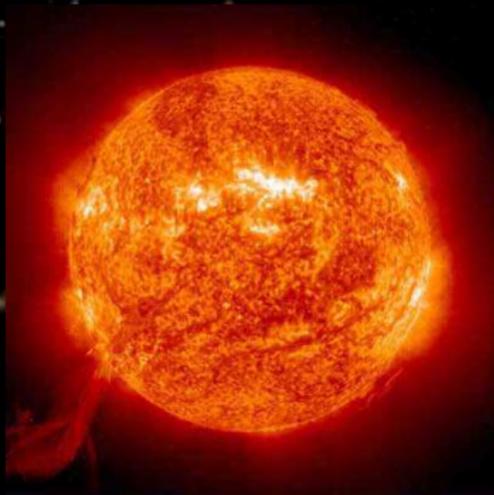
# Kleine zeitliche Übersicht



## Ära der Sternbildung

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

- Die erste Sternengeneration entsteht
- Die schweren Elemente entstehen



Sonne: Alter 5 Milliarden Jahre

# Inhalt

Beobachtungen zur Kosmologie

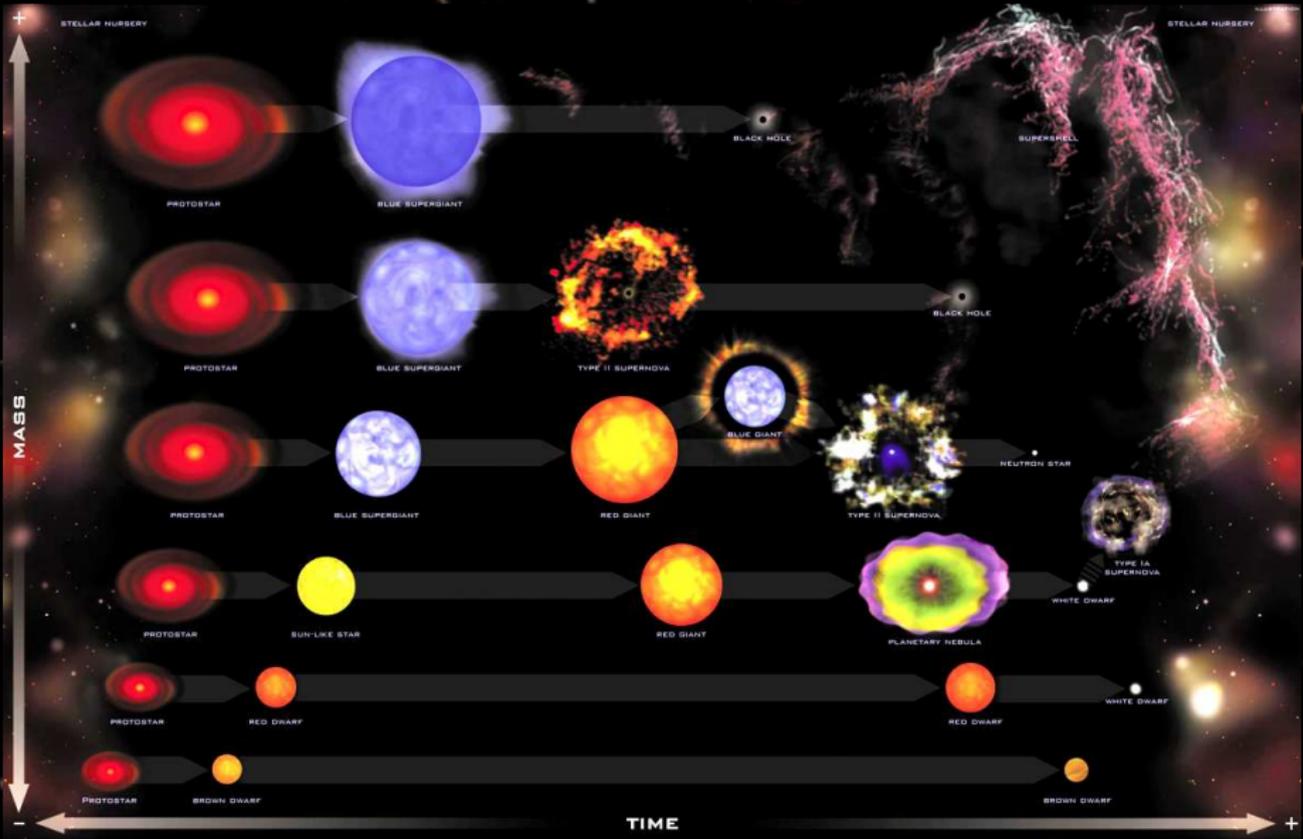
Theorie der Kosmologie  $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$

Dunkle Materie und Dunkle Energie

Vergangenheit des Universums

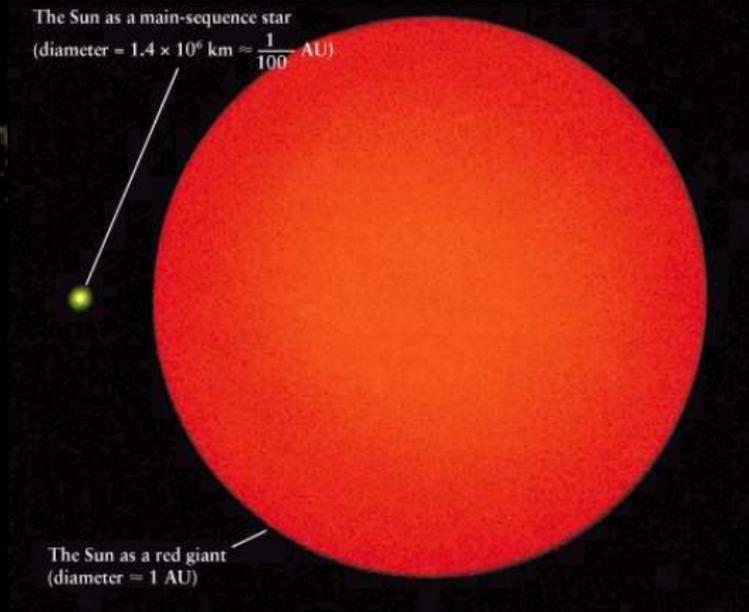
Zukunft des Universums

# 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?

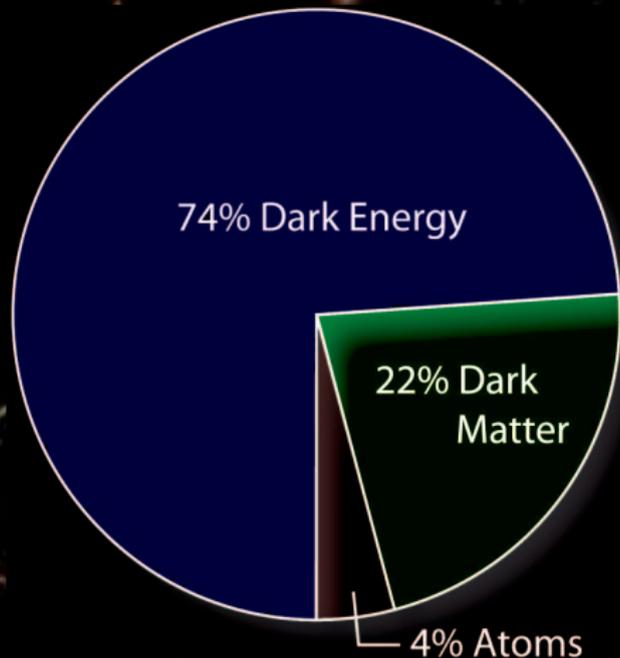
Wann ist alles Gas verbraucht?

Heute sind wir noch am Anfang der Ära der Sternbildung.

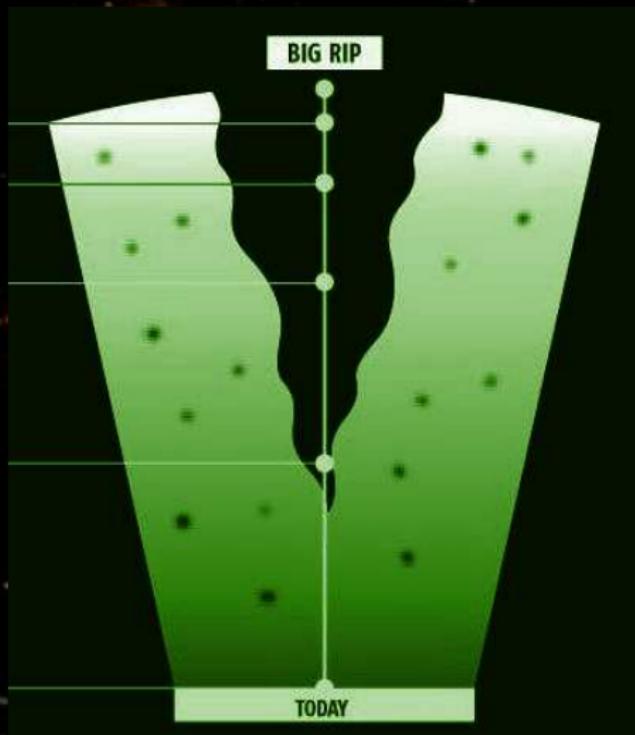
Die Sternbildungsphase endet nach 100 Billionen ( $10^{14}$ ) Jahren

# 3 Zukunftsszenarien

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



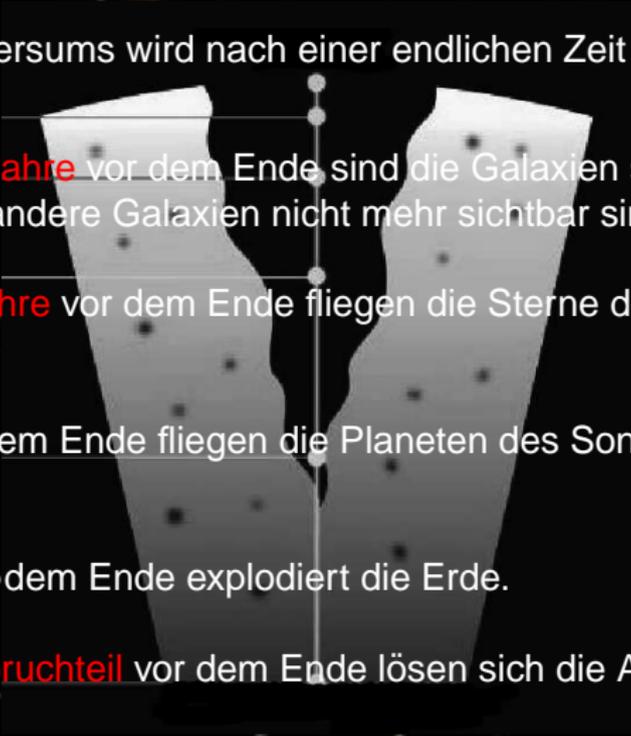
# The Big Rip



Ein **Phantomfeld** reißt das Universum auseinander

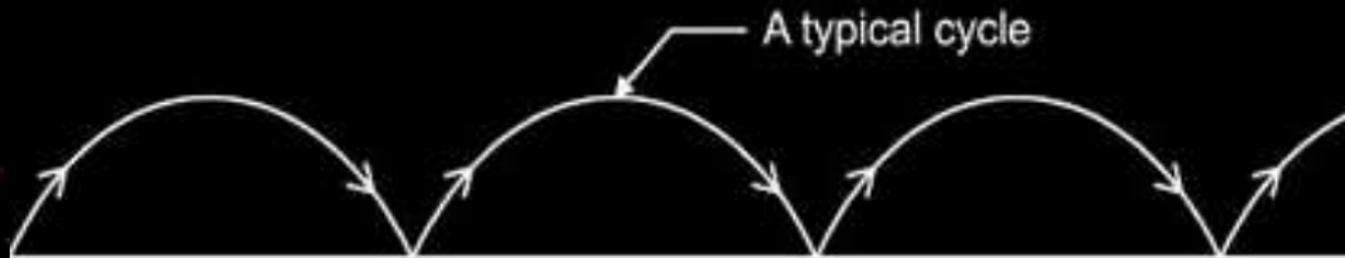
# The Big Rip

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

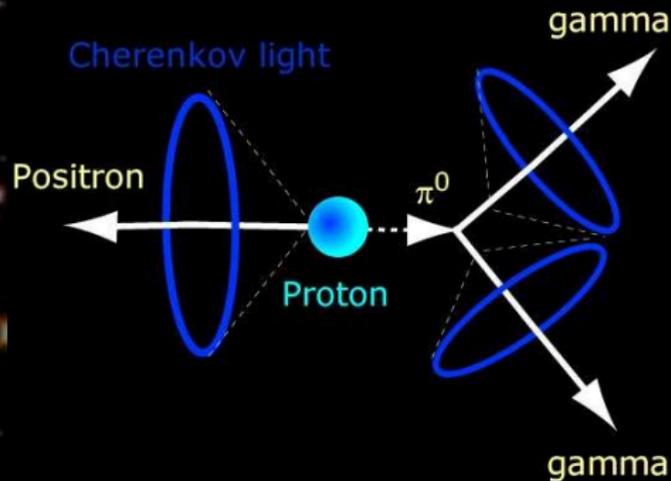
- Die Sterne sterben, übrig bleiben
  - Planeten
  - braune Zwerge
  - weiße Zwerge
  - Neutronensterne
  - schwarze Löcher
- Die Galaxien zerfallen, übrig bleiben
  - einsam umherwanderende tote Sterne
  - Schwarze Löcher



# Das leere Universum

Die Protonen zerfallen:

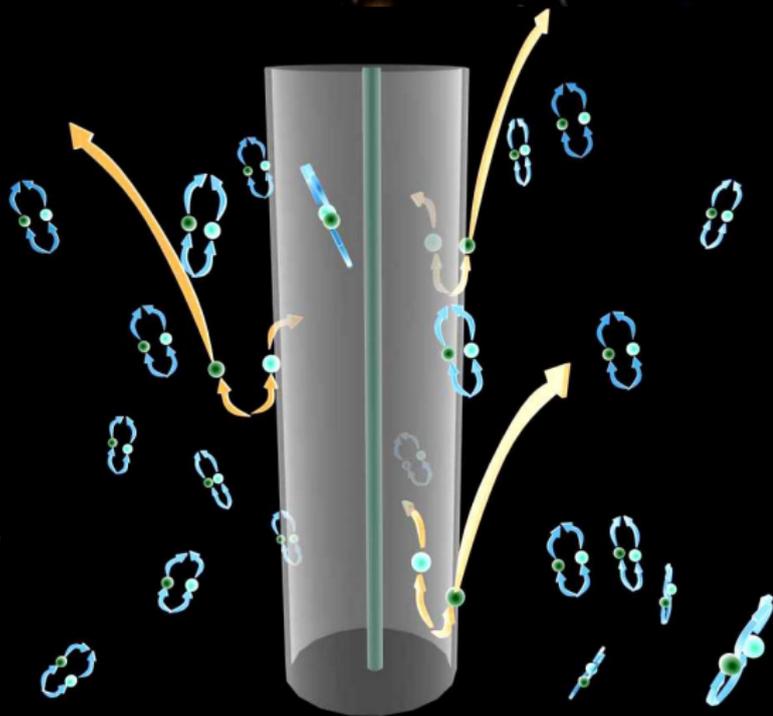
- Die Planeten zerfallen
- Die braunen Zwerge zerfallen
- Die weißen Zwerge zerfallen
- Die Neutronensterne zerfallen



# 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





# Das Ende des Universums

# Das Ende des Universums

# Das Ende des Universums

# Das Ende des Universums

# Das Ende des Universums

# Das Ende

Ende

