

# **Das Expandierende Universum**

200 Mpc/h

**Max Camenzind  
Senioren-Universität  
Würzburg 26-01-2010**

# Zur Erinnerung ...

- **Galaxien** sind die sichtbaren Bausteine des Univerums, sind eingebettet in einen Halo Dunkler Materie.
- Supersymmetrische Teilchen sind die wahrscheinlichste Form Dunkler Materie.
- Nach Hubble expandiert das Universum der Galaxien. Hubble-Gesetz  $cz = H_0 d$  wurde bestätigt, ist allerdings bei hoher Rotverschiebung verletzt, falls  $z > 0,1$ .
- Die räumliche Verteilung kann aus dem Hubble-Gesetz abgeleitet werden → **homogen und die Expansion ist isotrop.**

# Inhalt

- Universum der Galaxien homogen & isotrop.
- Grundlagen der Einsteinschen Gravitation.
- Das Kosmologische Prinzip:  
~~→~~ nur 3 mögliche Raumformen.
- Die kosmische Rotverschiebung erklärt.
- Die Friedmann-Gleichung und Expansionsgesetze des FRW Universums.
- Die Dichteparameter des expandierenden Universums.
- Das Alter des expandierenden Universums.

# Fundamente der Kosmologie

## Gravitationstheorie

Einstein'sche Relativitätstheorie

## Isotropie

Es gibt keine bevorzugte Richtung im Universum

## Homogenität

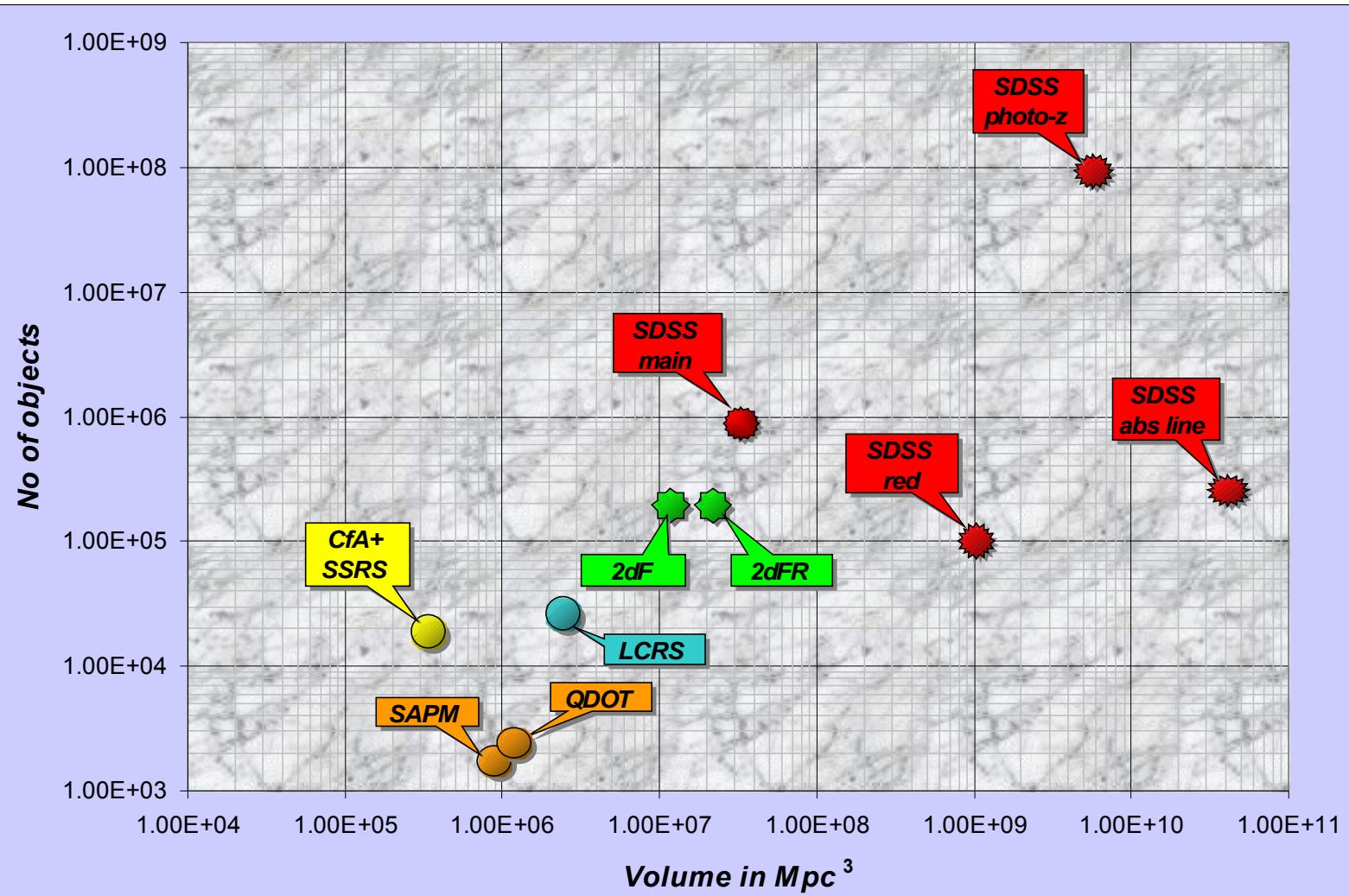
Es gibt keine bevorzugte Region

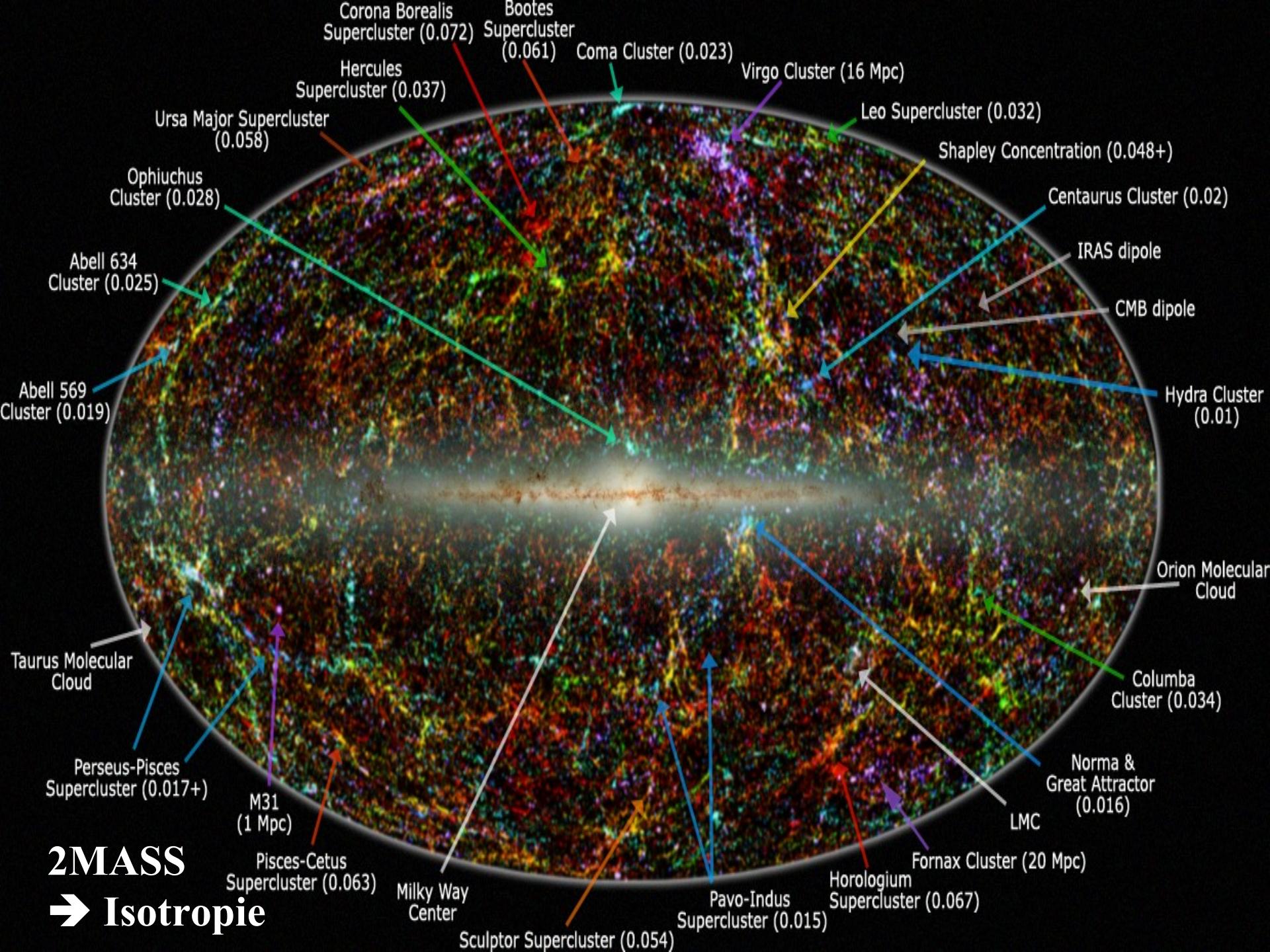
(e.g. es gibt kein Zentrum des Universums)

## Anthropisches Prinzip

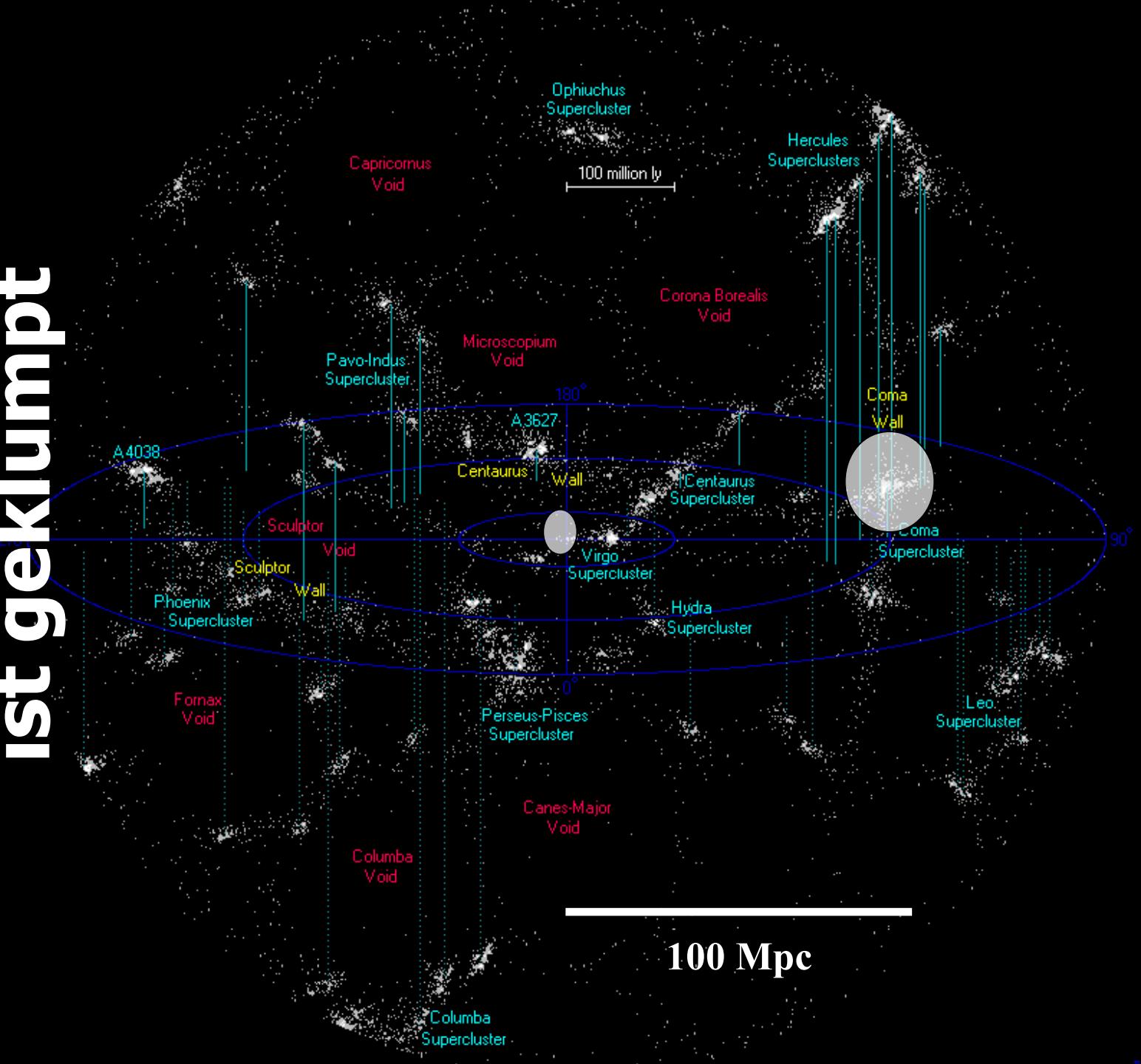
Das Universum hat uns erzeugt

# Tests der Homogenität - Galaxien

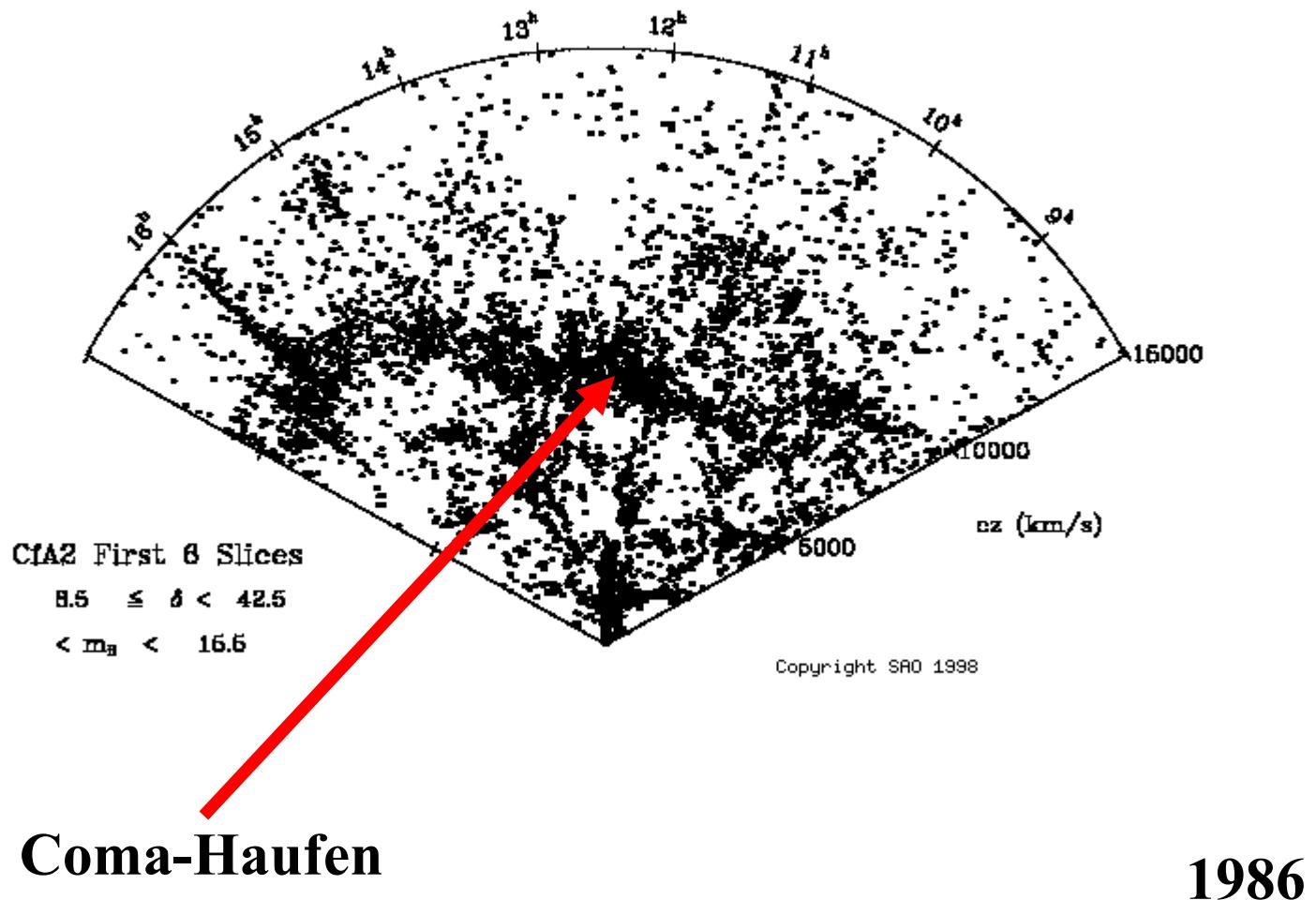


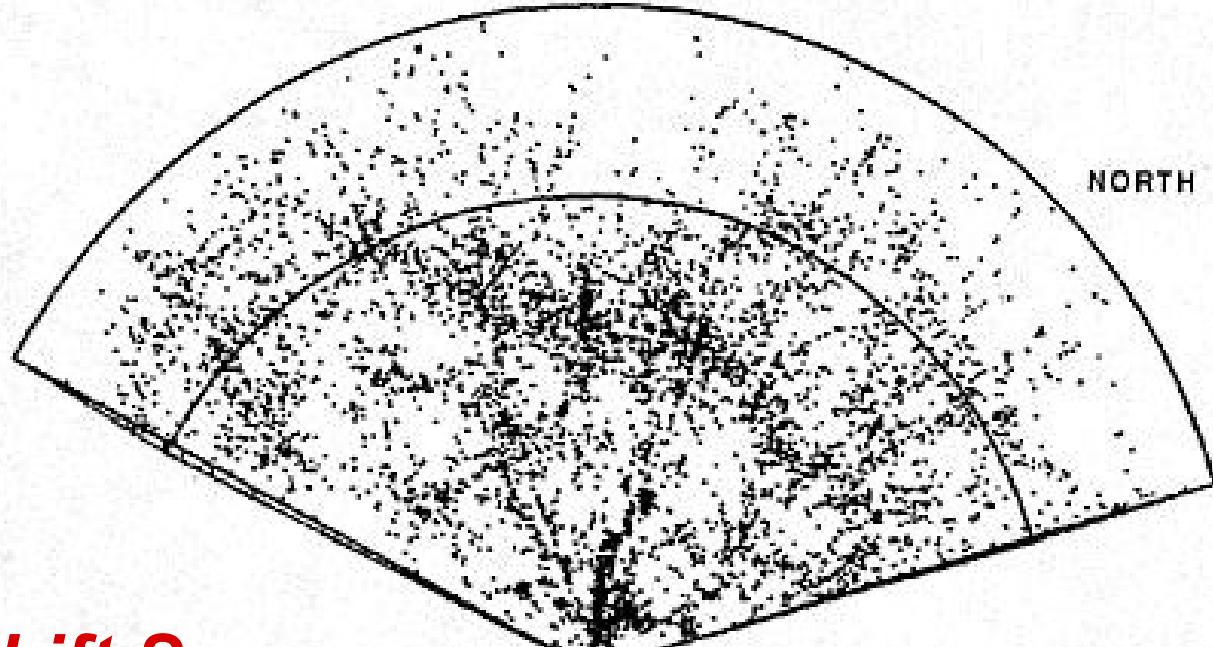


# 3 dimensionale Galaxienverteilung ist geklumpt

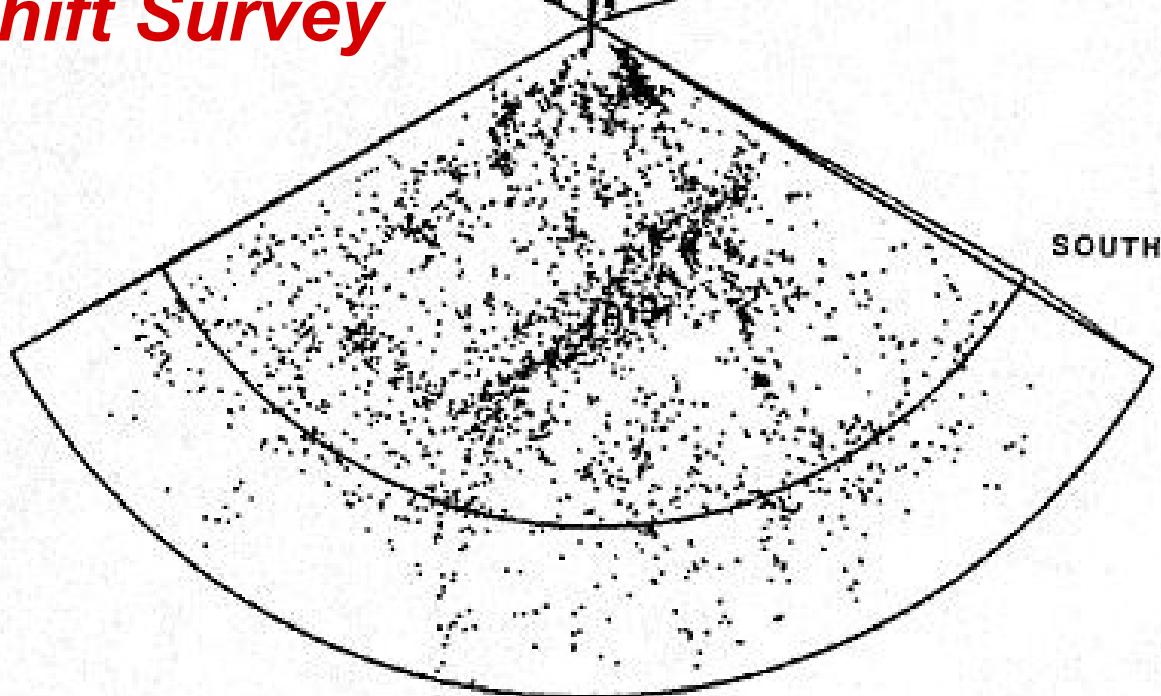


# CfA Galaxienverteilung



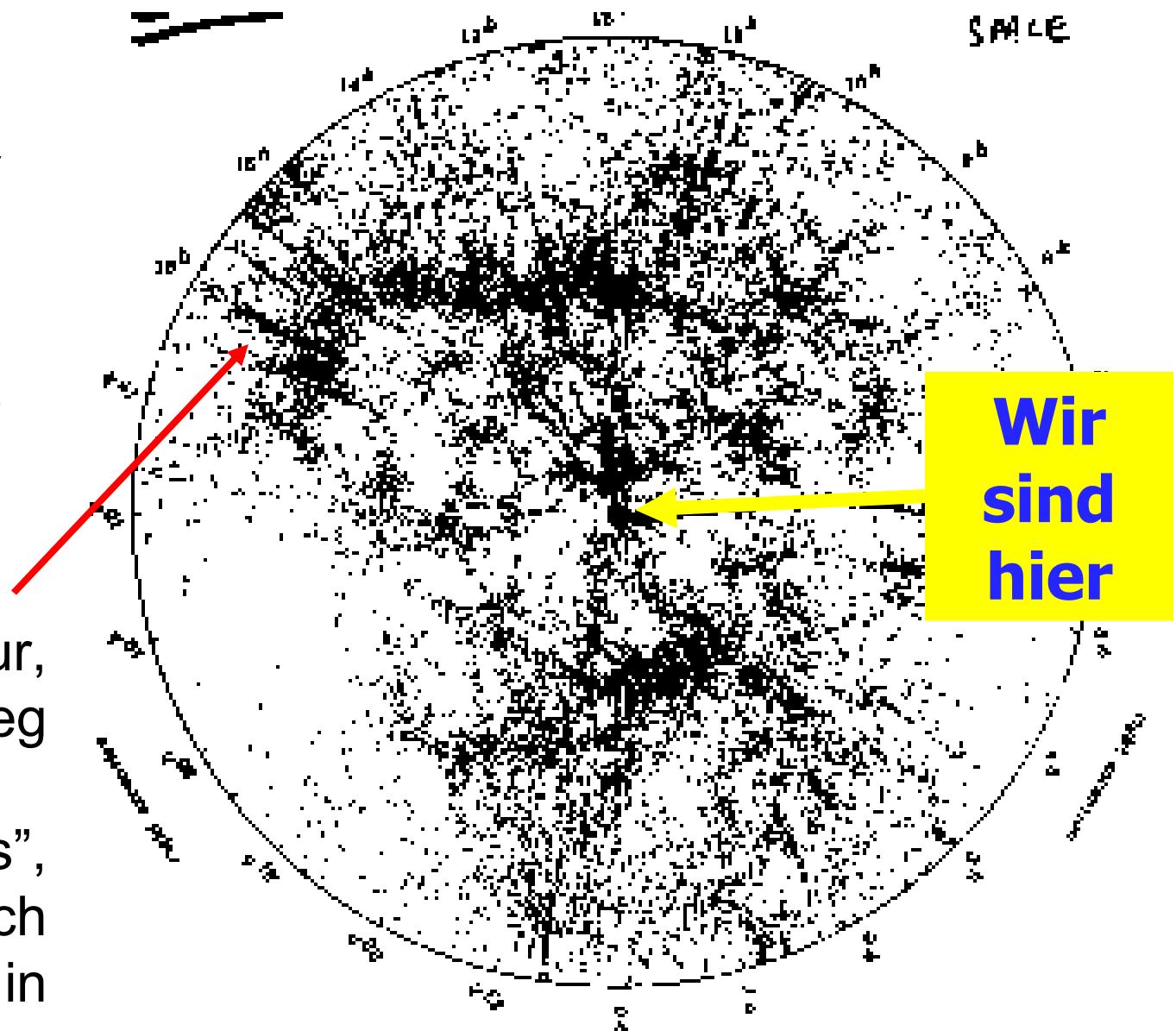


## CfA Redshift Survey

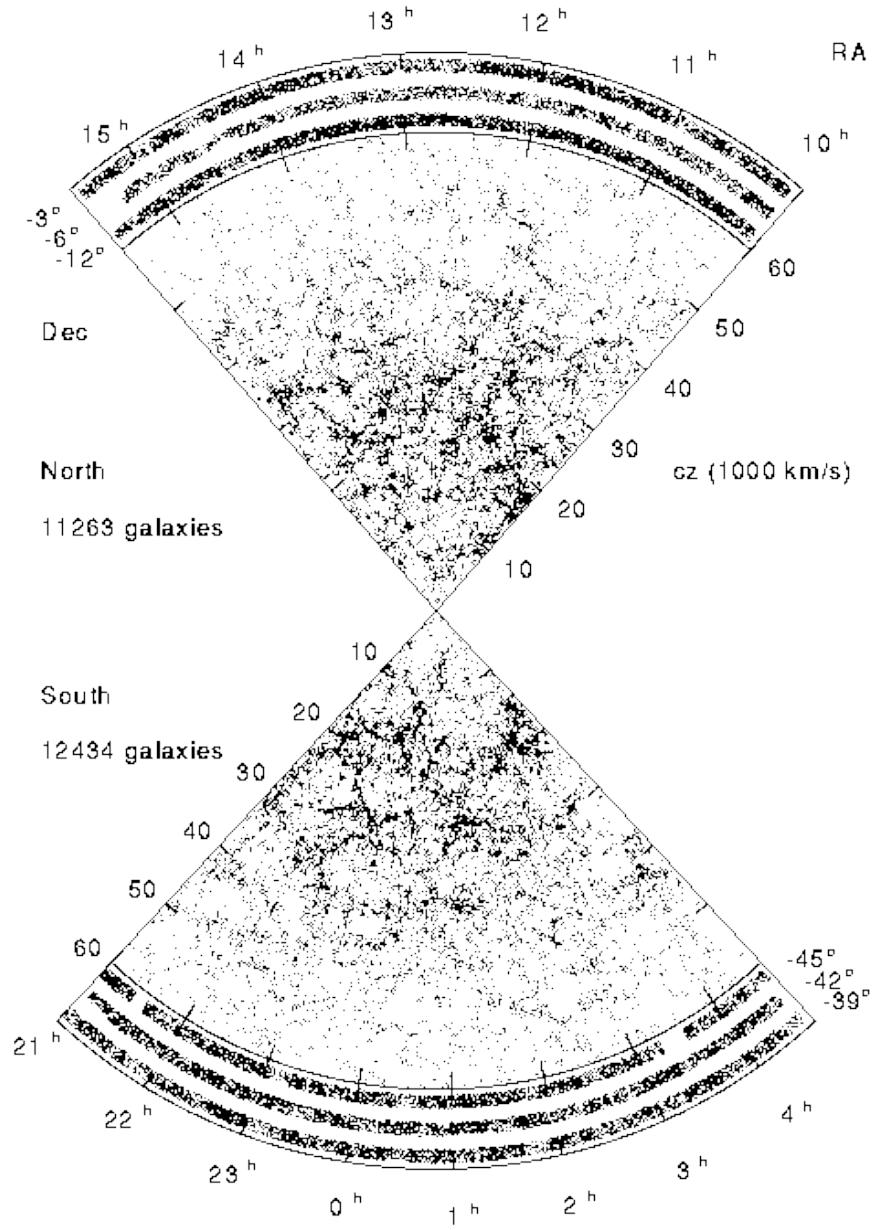


Ähnliche  
Karte mit  
mehr  
Galaxien.

“Extra” Struktur,  
die von uns weg  
zeigt →  
“Finger Gottes”,  
entstehen durch  
Bewegung in  
Galaxien-Haufen



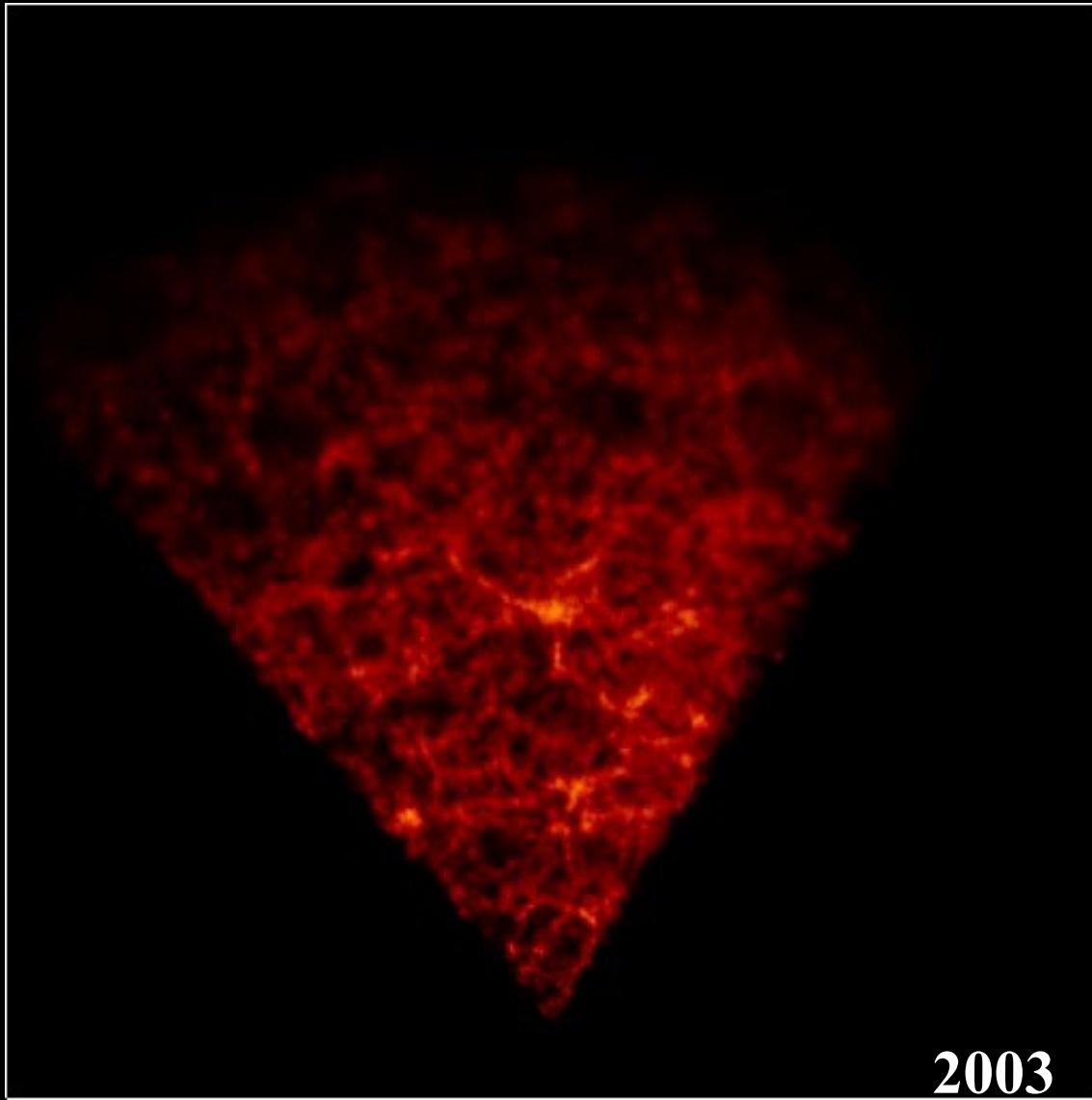
# Las Campanas Galaxienverteilung



1986

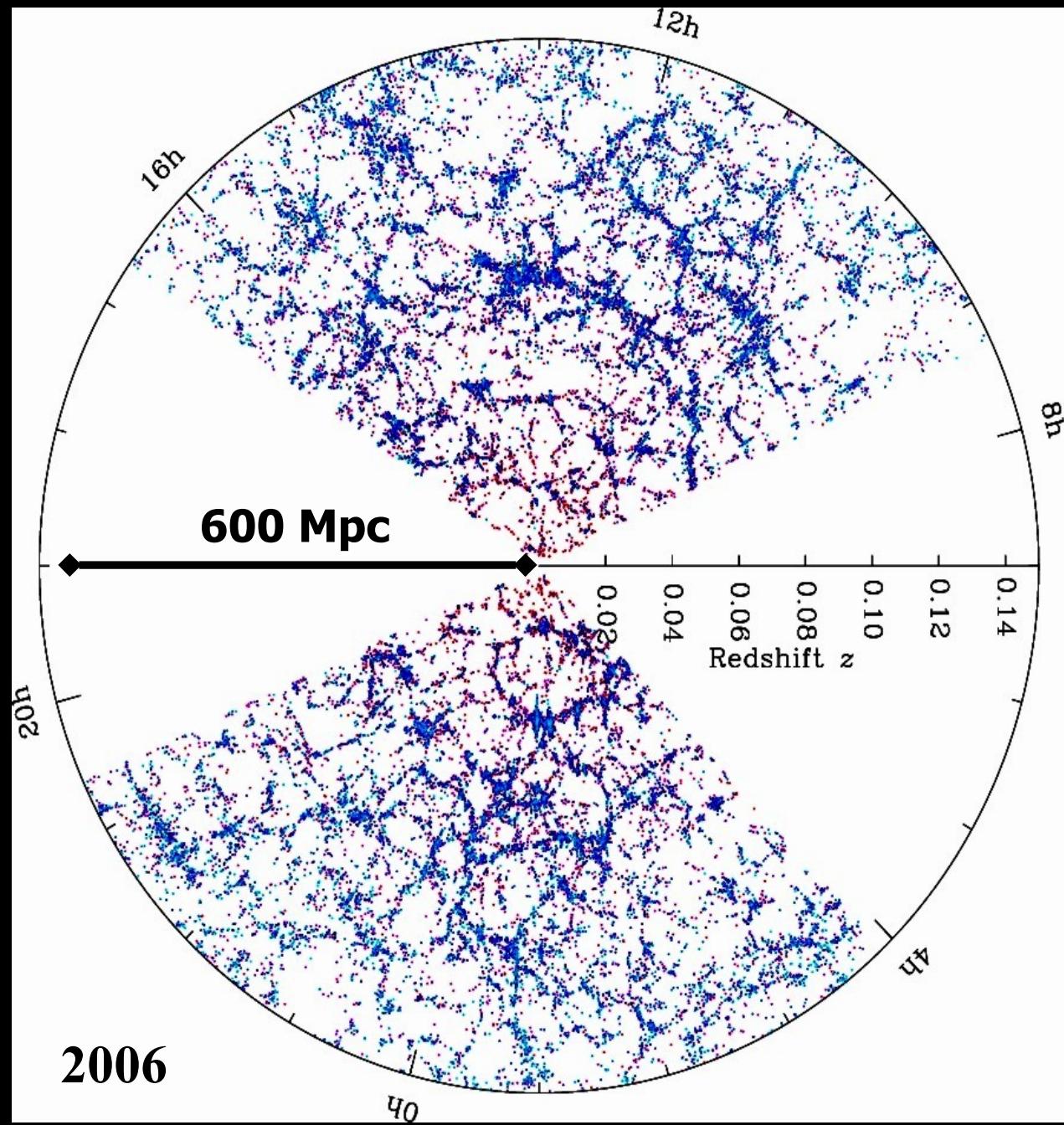
**2dFGRS**

# **Galaxienverteilung**



**2003**

# SDSS Galaxienverteilung

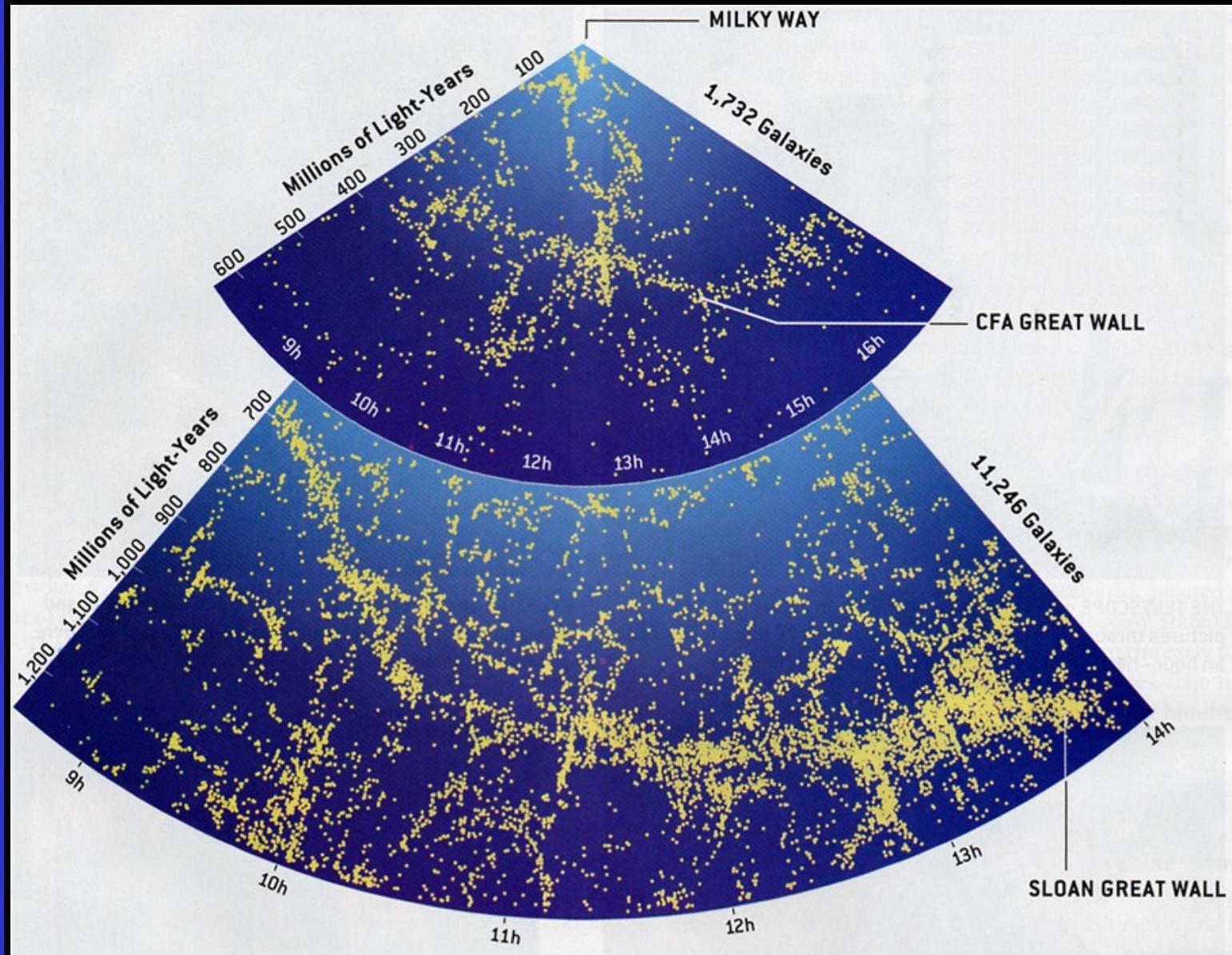


# Schaumartige Struktur „Cosmic Web“

Kosmische Struktur:  
Filamente  
Haufen  
Voids (< 100 Mpc)

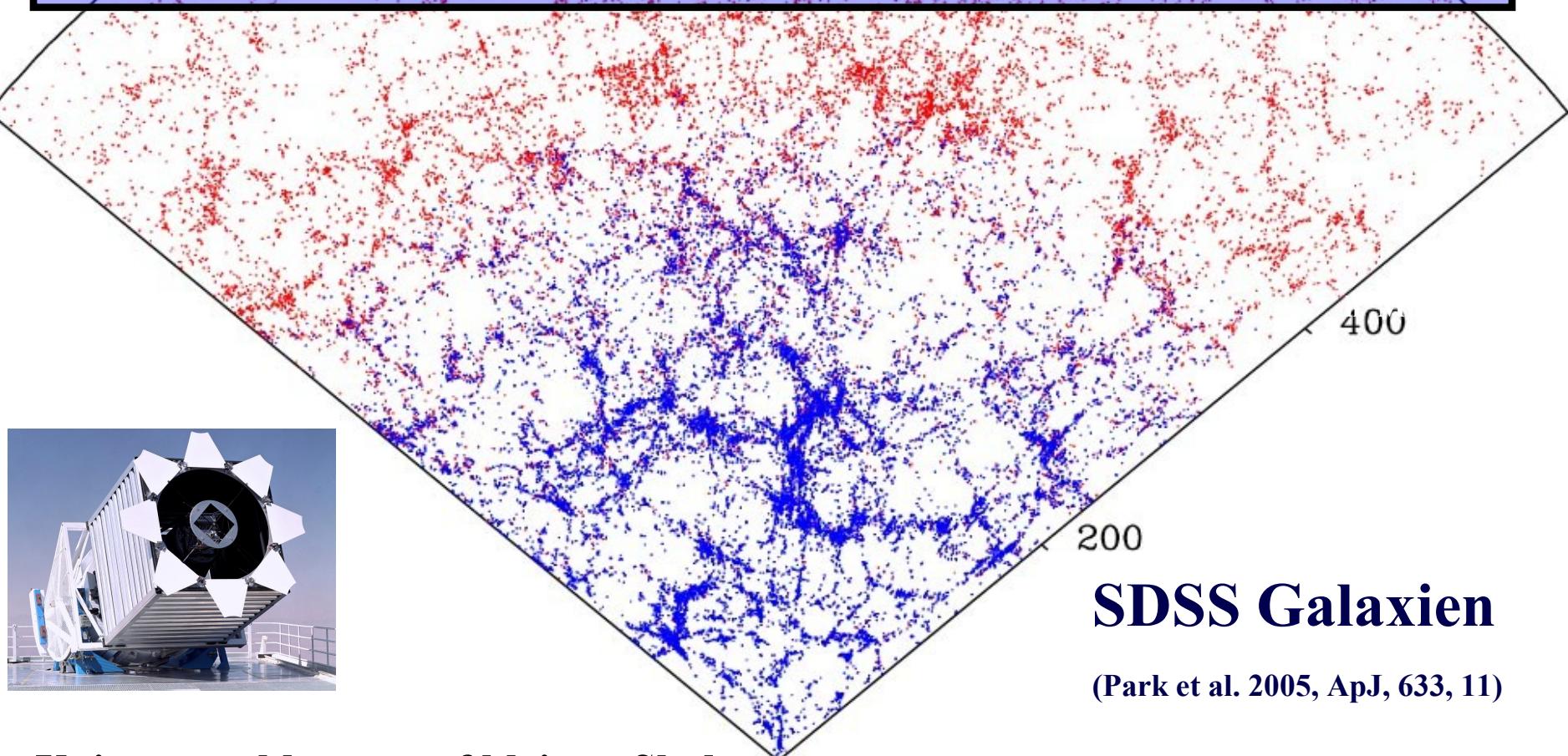
SDSS

CfA 1986



SDSS 2006

Das Universum ist nur auf großen Skalen homogen,  $> 100$  Mpc

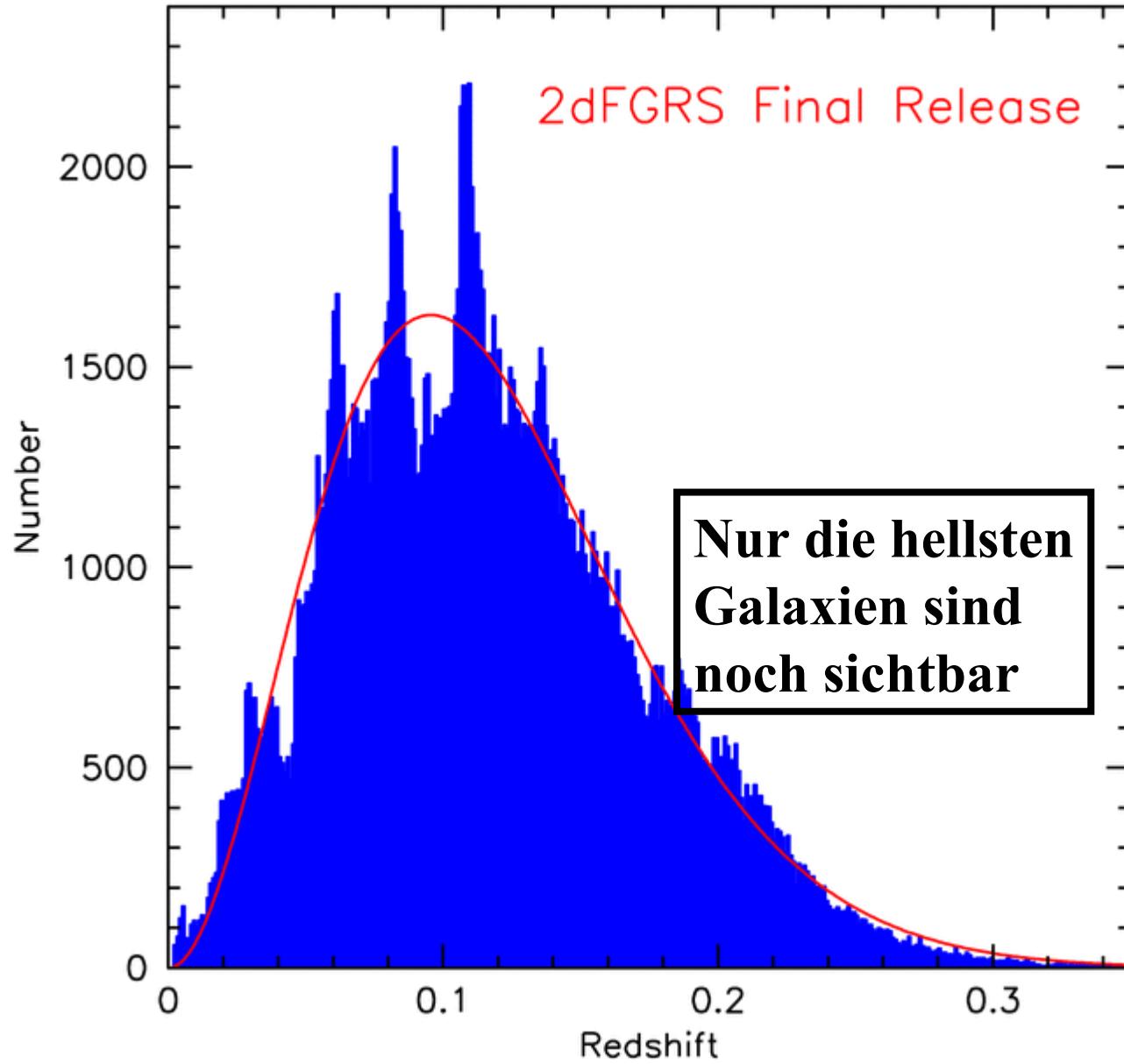


**SDSS Galaxien**

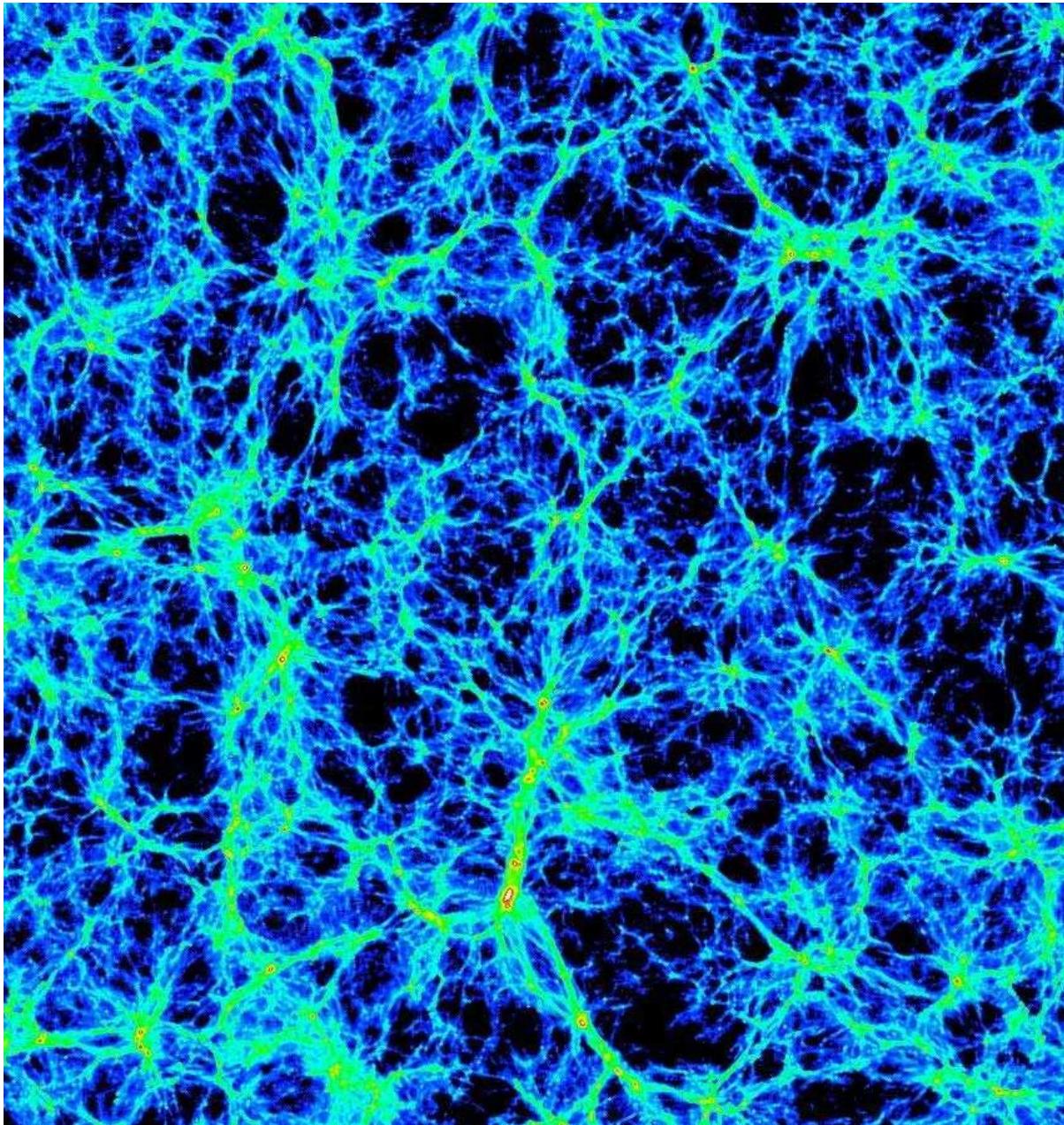
(Park et al. 2005, ApJ, 633, 11)

Universum klumpt auf kleinen Skalen  
→ Galaxienhaufen, Filamente & Voids

# Galaxienverteilung in Rotverschiebung

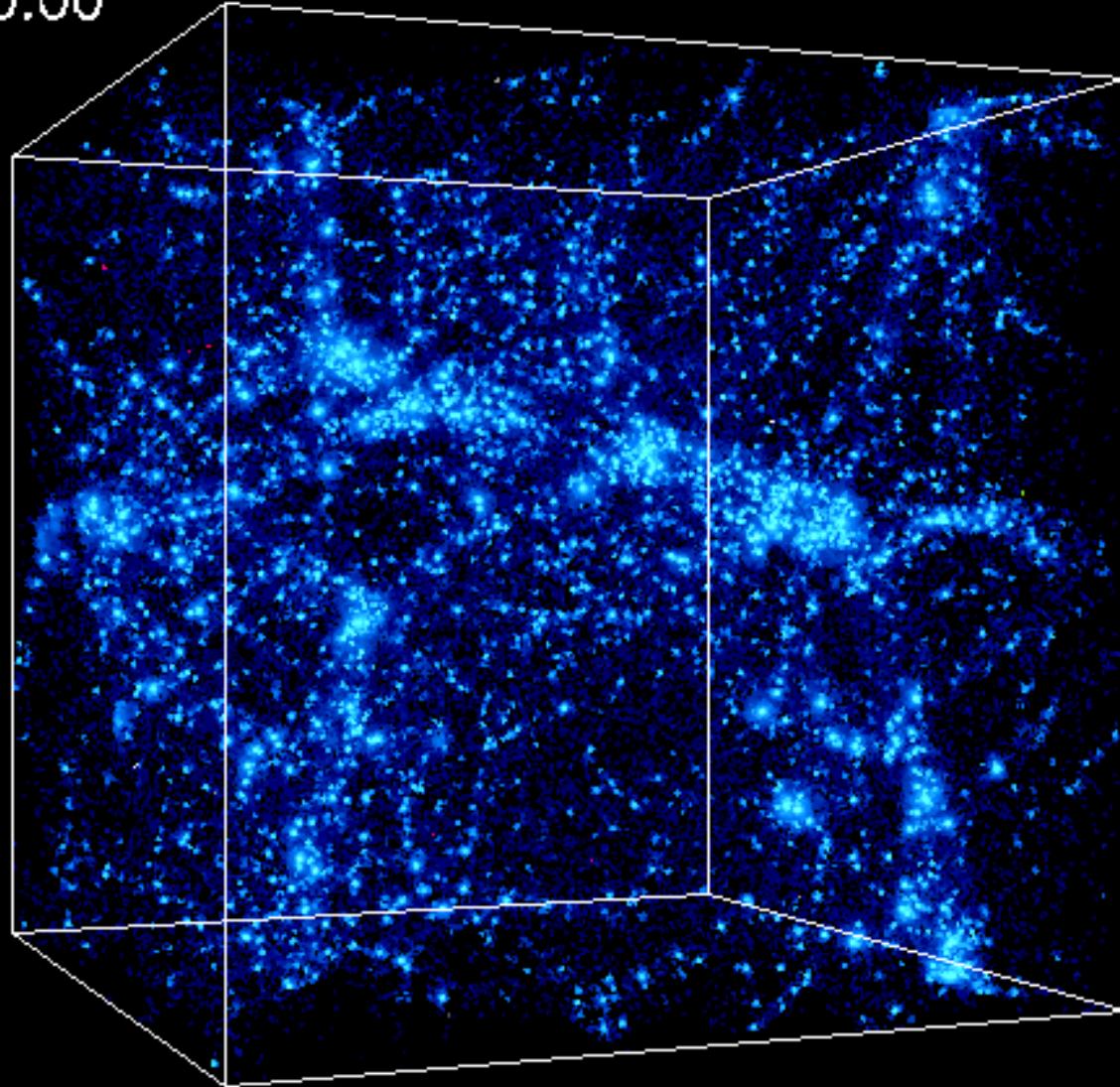


# Großräumige Galaxienverteilung



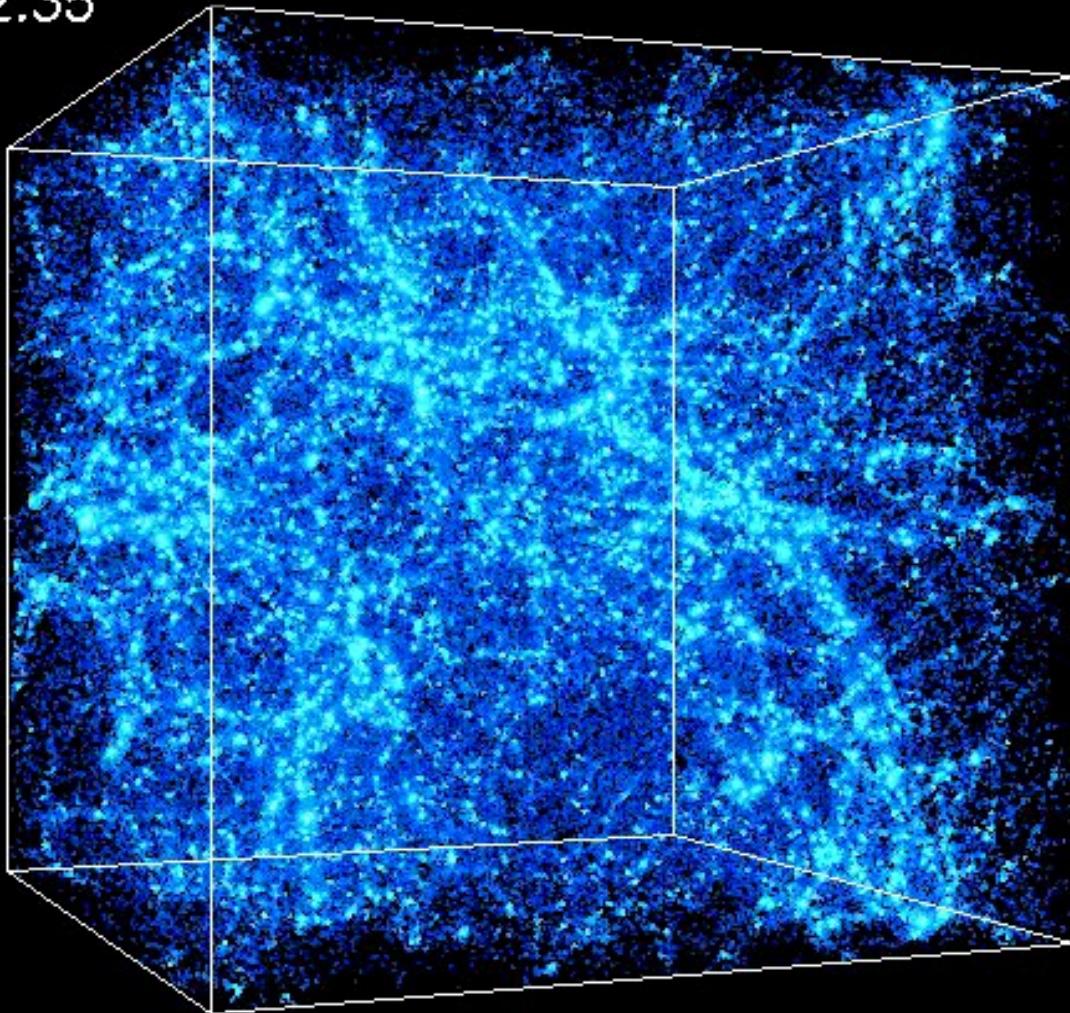
200 x 200 Mpc

$Z = 0.00$



→ Universum ist homogen für Skalen > 100 Mpc

$Z = 2.35$

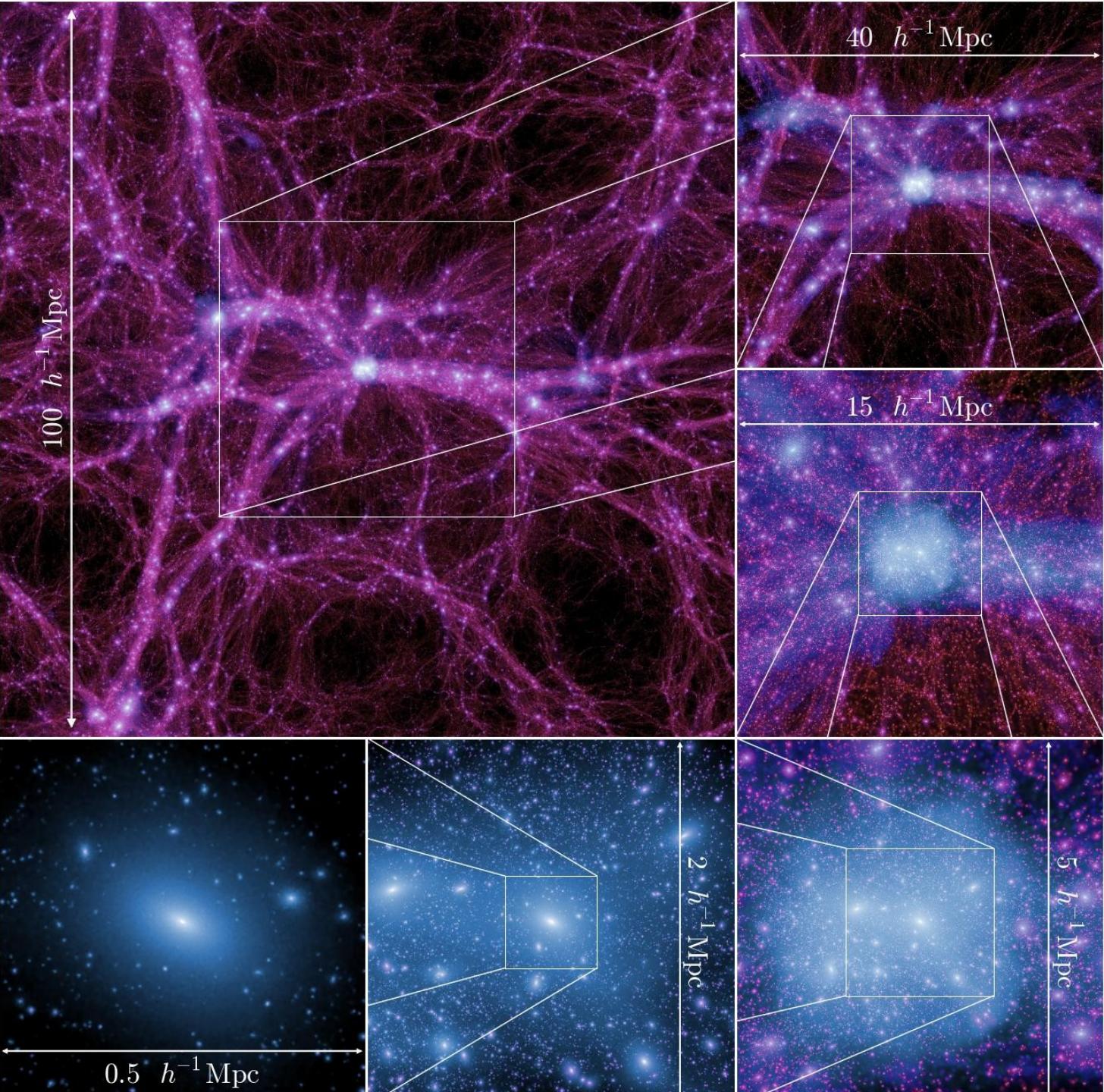




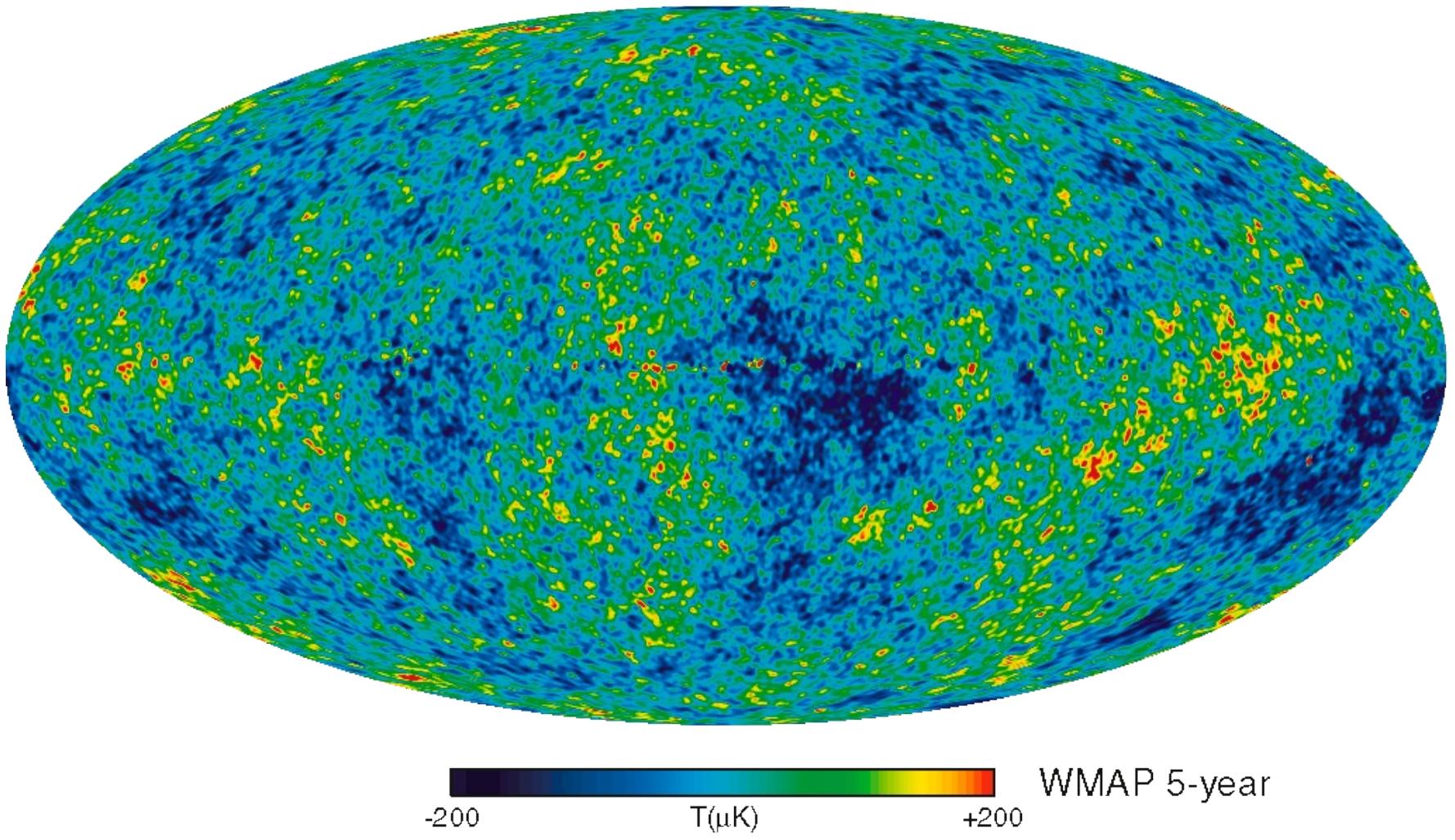
500 Mpc/h

# Millennium Flug durchs Universum @ MPA Garching 2005

# Millennium II Simulation / MPA



# Das Universum ist Isotrop





# **Das Olberssche Paradoxon 1826**

## **Warum ist der Nachthimmel nicht hell?**

# Fundamente der Kosmologie

## Gravitationstheorie

Einstein'sche Relativitätstheorie

## Isotropie

Es gibt keine bevorzugte Richtung im Universum

## Homogenität

Es gibt keine bevorzugte Region

(e.g. es gibt kein Zentrum des Universums)

## Anthropisches Prinzip

Das Universum hat uns erzeugt

# Einstein überwindet die Krise der Physik um 1900

- Der Äther (griechisch für *der (blaue) Himmel*) ist eine Substanz, die im ausgehenden 17. Jahrhundert als Medium für die Ausbreitung von Licht postuliert wurde. Später wurde das Konzept aus der Optik auch auf die Elektrodynamik und Gravitation übertragen, vor allem um auf Fernwirkung basierende Annahmen zu vermeiden.
- Seit der allgemeinen Akzeptanz der Speziellen Relativitätstheorie Albert Einsteins und der Quantenmechanik wird ein solcher Äther nicht mehr als physikalisches Konzept benötigt.



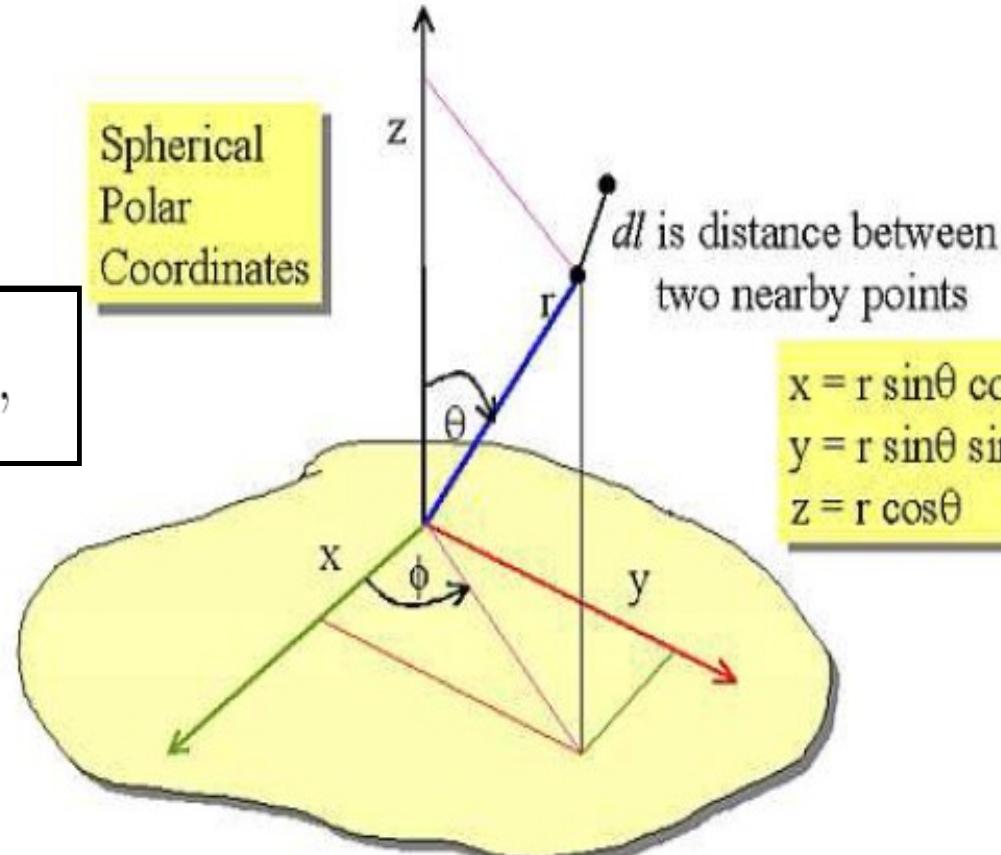
# 2 Postulate der Speziellen Relativität 1905

- **Prinzip von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit c:** Messen verschiedene Beobachter die Geschwindigkeit eines Lichtstrahls relativ zu ihrem Standort, so kommen sie unabhängig von ihrem eigenen Bewegungszustand zum selben Ergebnis.
- **Relativitätsprinzip:** Die physikalischen Gesetze haben für alle Beobachter, die sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegen, das heißt keiner Beschleunigung unterliegen, dieselbe Gestalt. Man spricht von Inertialsystemen, in denen sich diese Beobachter befinden.

# Minkowski Linien-Element

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dl^2 ,$$

Spherical  
Polar  
Coordinates

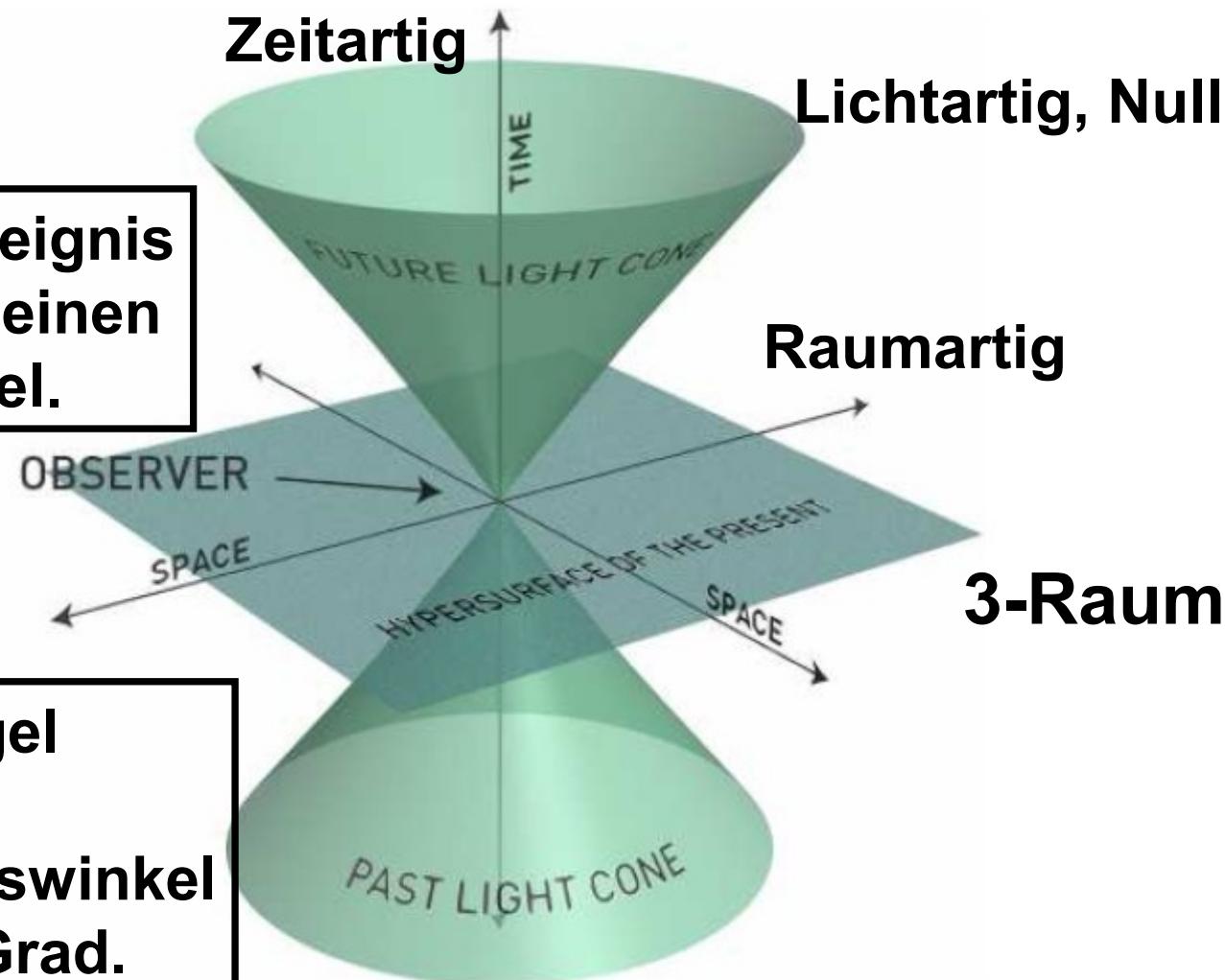


**Ereignis:**  
 $(ct, x)$   
→  
**RaumZeit**  
= Menge aller  
Ereignisse

$$dl^2 = dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2)$$

# Kausale Struktur der RaumZeit

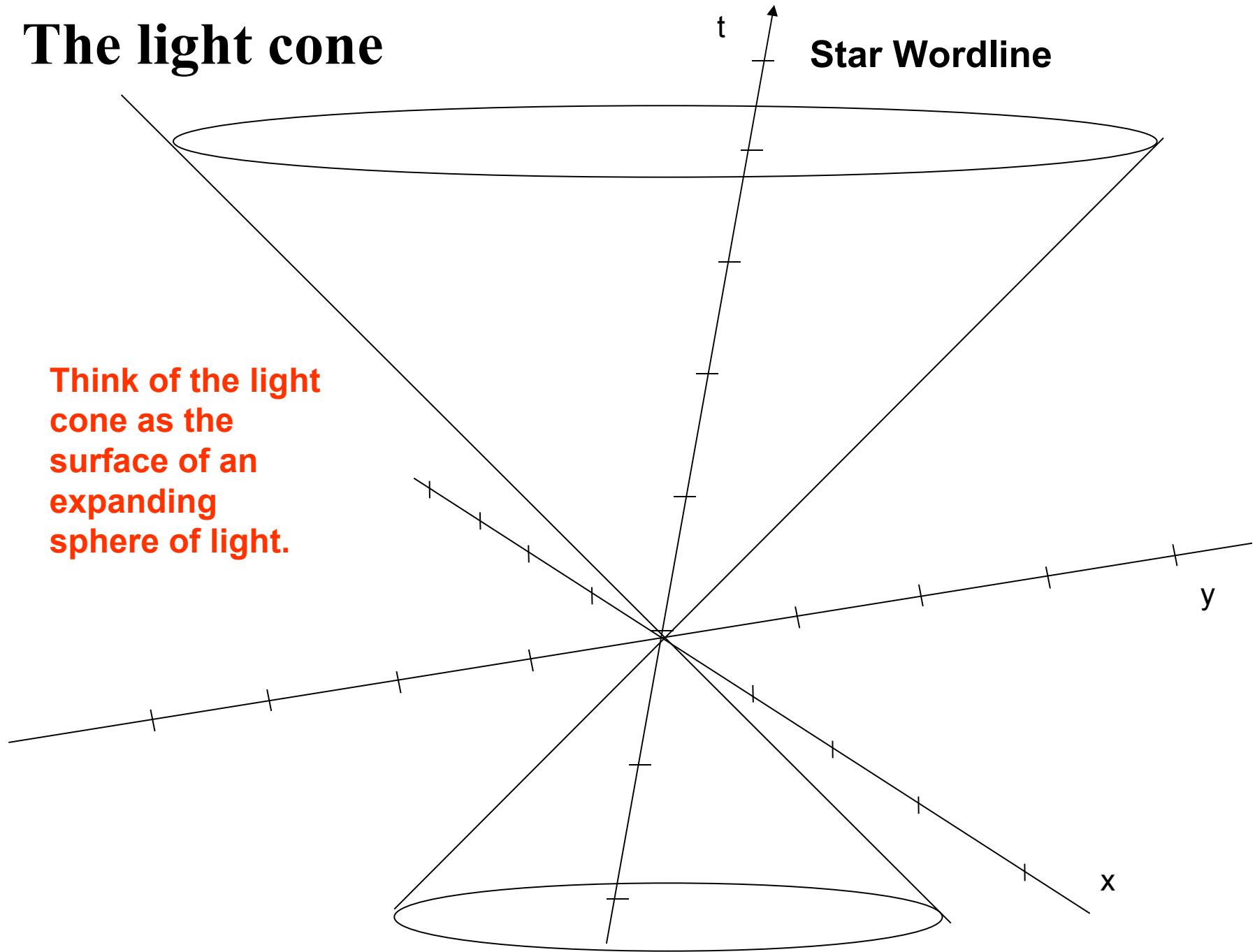
Jedes Ereignis definiert einen Lichtkegel.



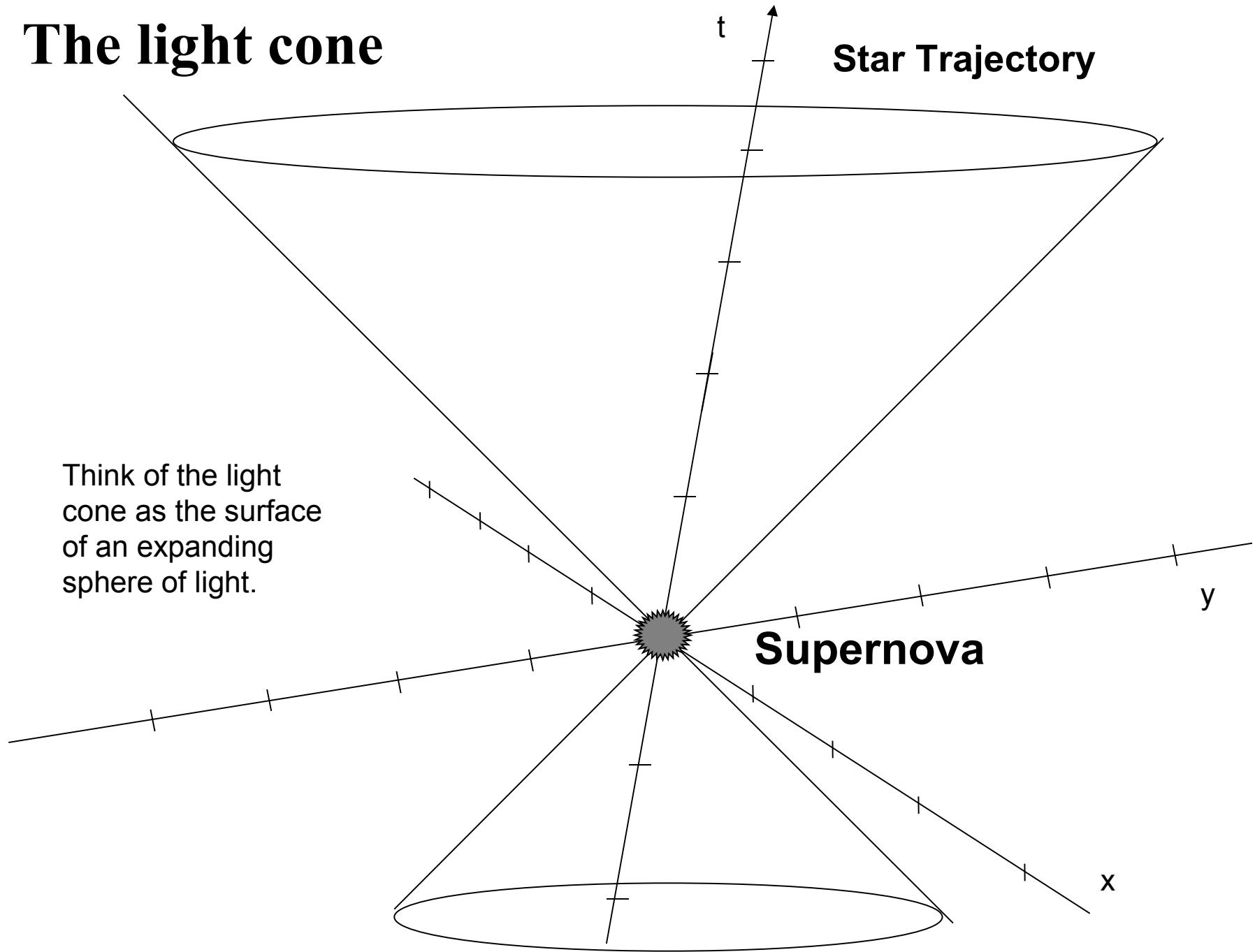
# The light cone

**Star Wordline**

Think of the light cone as the surface of an expanding sphere of light.



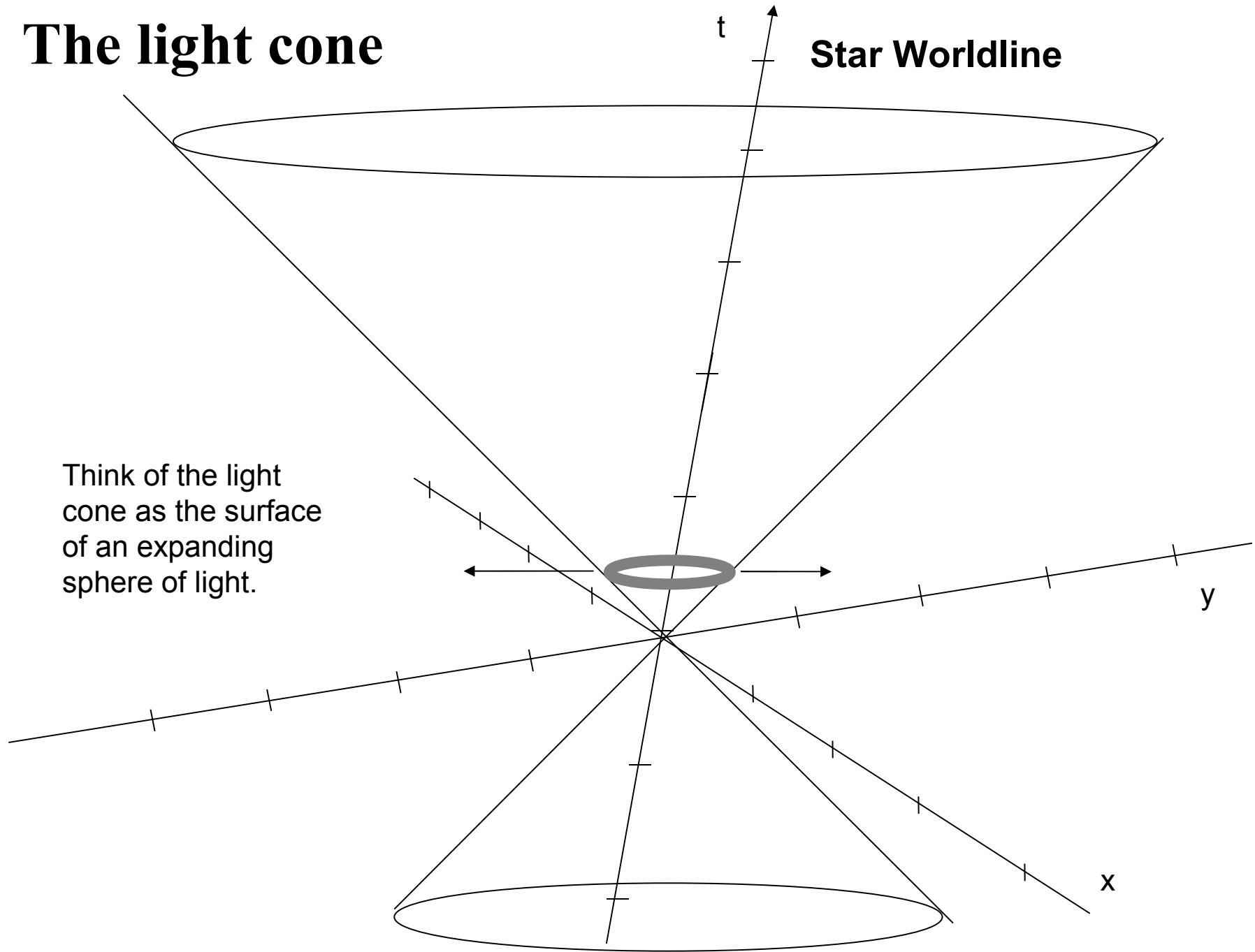
# The light cone



# The light cone

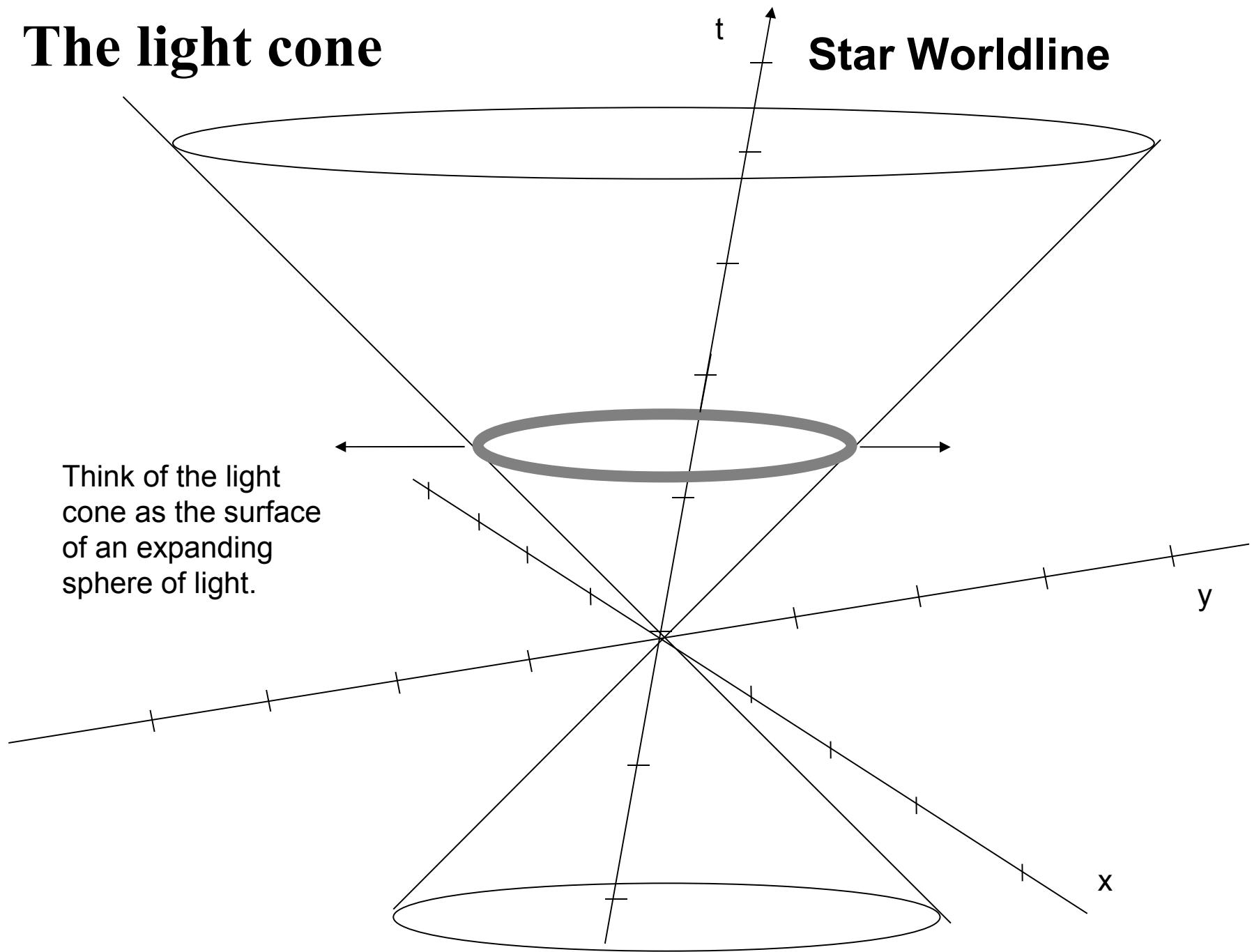
**Star Worldline**

Think of the light cone as the surface of an expanding sphere of light.



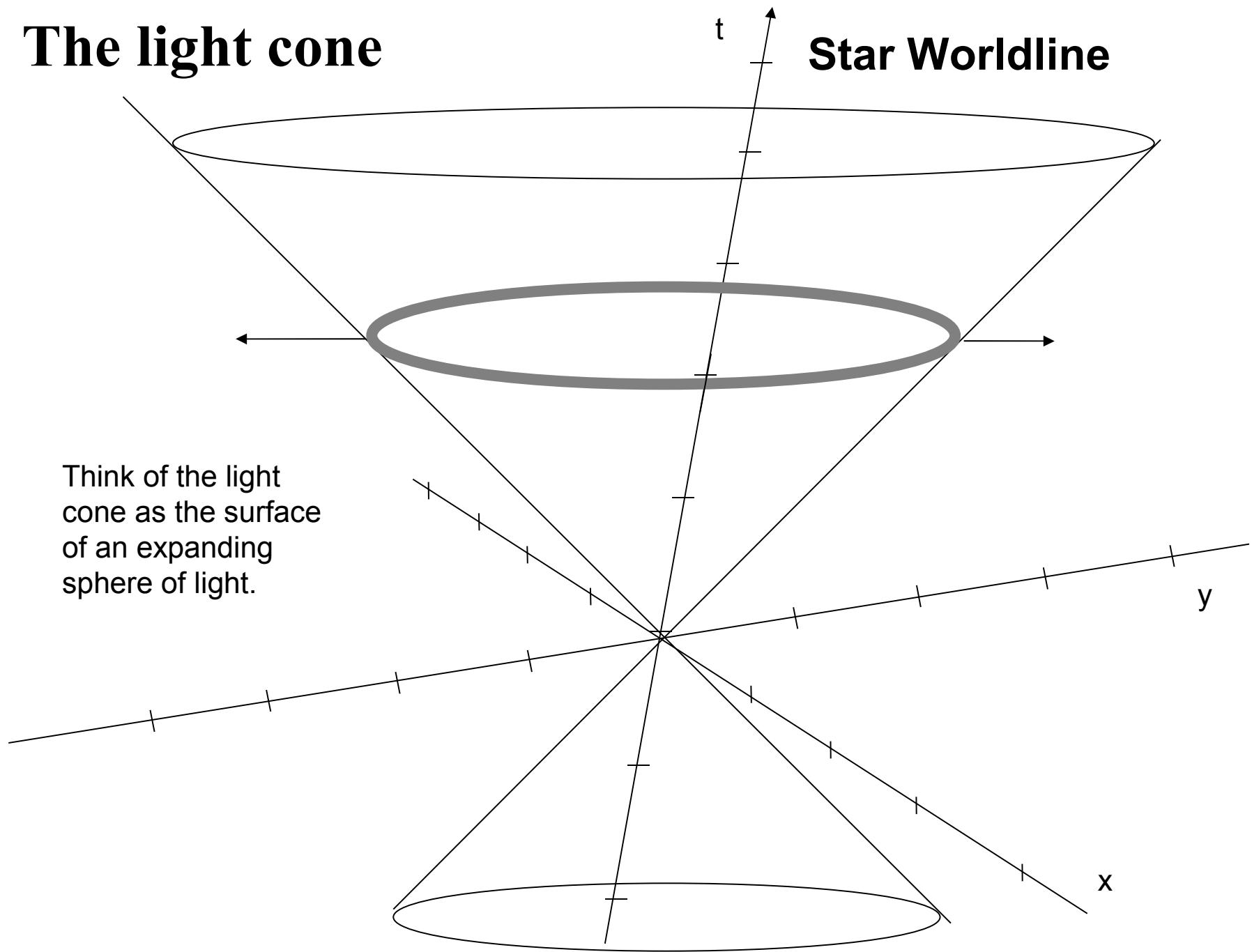
# The light cone

## Star Worldline



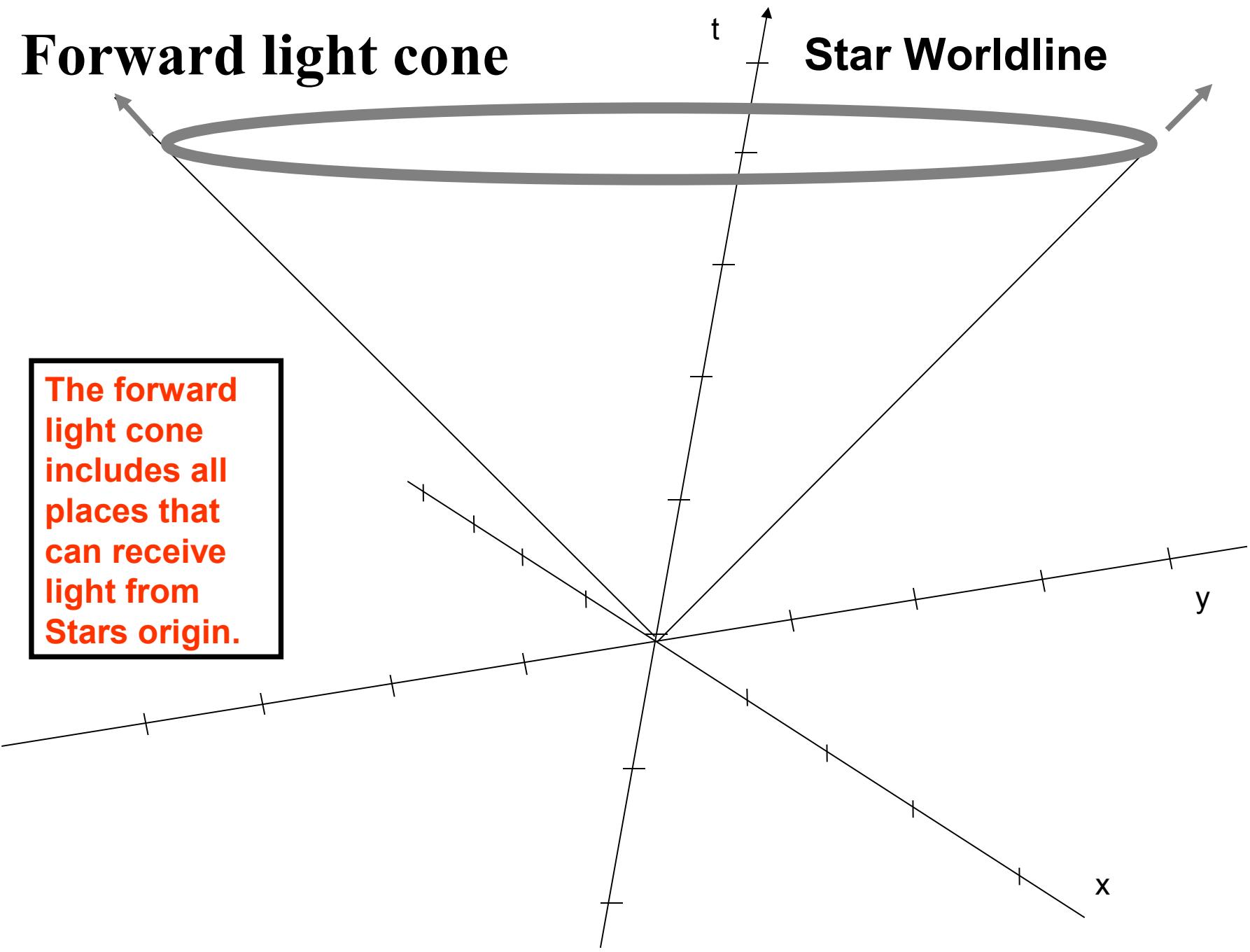
# The light cone

## Star Worldline



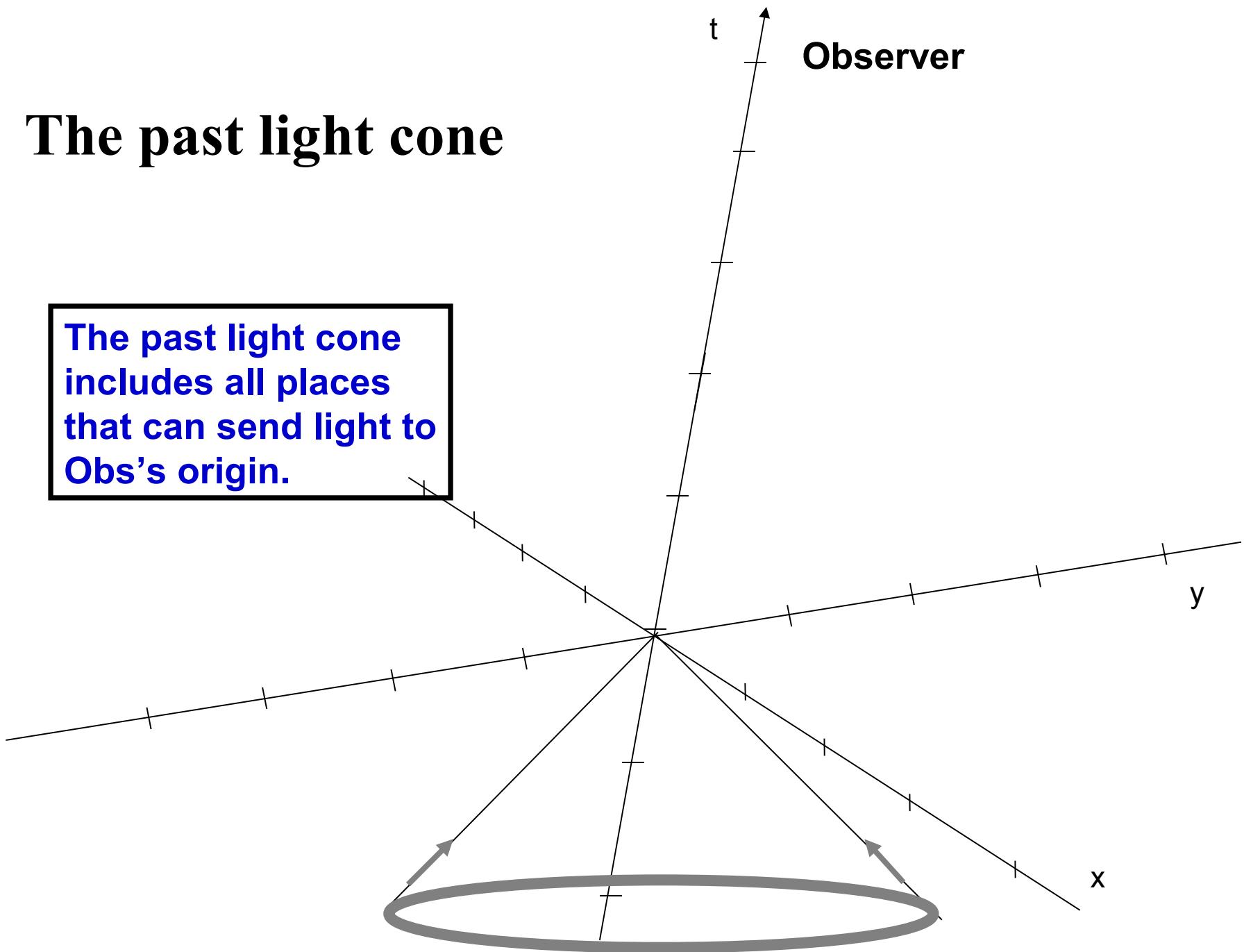
# Forward light cone

## Star Worldline



# The past light cone

The past light cone includes all places that can send light to Obs's origin.





# Einstein's Vision (1915): Gravitation ist Geometrie, Geometrie erzeugt Gravitation.

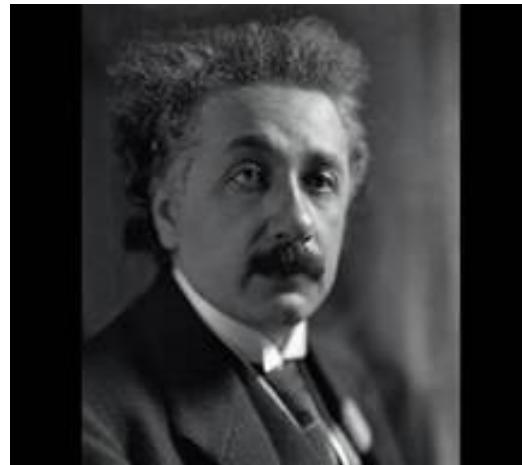
Μεδεις αγεωμέτρητος εισιτω  
μον τὴν στήγων.

Let none ignorant of geometry  
enter my door.

*Legendary inscription over  
the door of Plato's Academy*

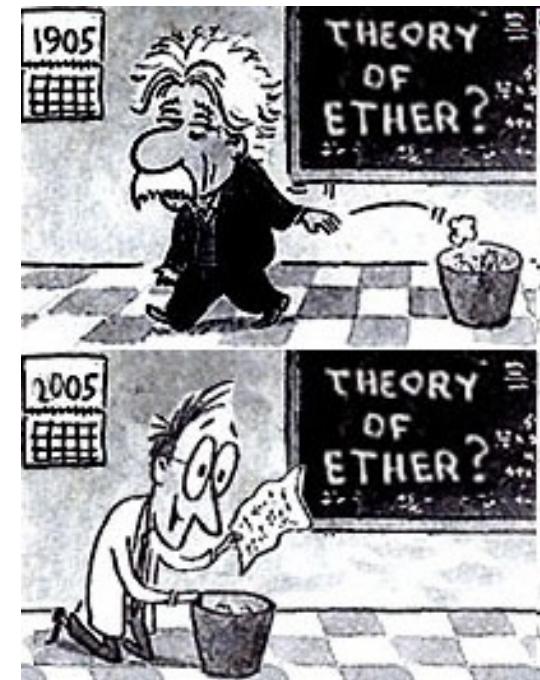
# Gravitation ist Eigenschaft des Raumes

- Einsteins Verständnis der Gravitation
- „Die Gravitation ist eine Eigenschaft des Raums“
- Raum und Zeit werden zu einer 4-dim. Einheit verschmolzen

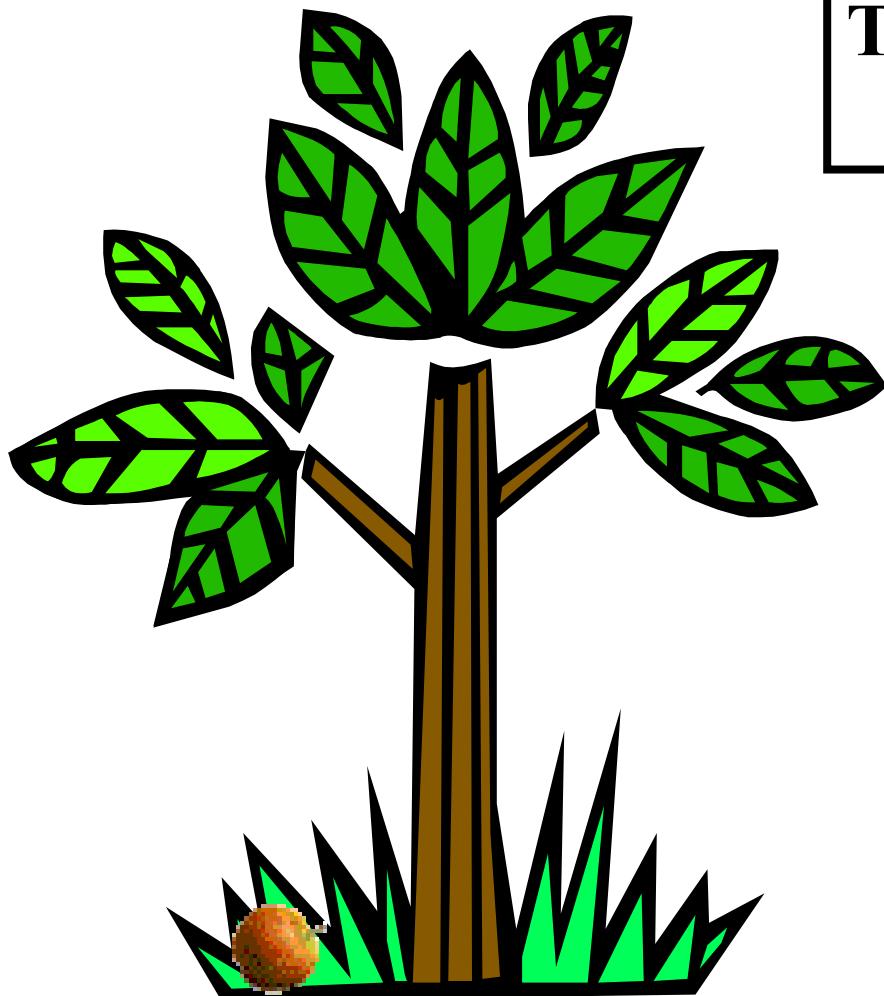


Albert Einstein  
1879-1955

**Einstein 1915:  
Allgemeine  
Relativitäts-  
Theorie  
Ann. d. Physik**



# Schwaches Äquivalenzprinzip



Träge Masse =  
schwere Masse



**Isaac Newton**  
**1643-1727**

# Die Metrik des flachen Raumes

- Im flachen Minkowski Raum gilt

$$\Delta s^2 = (c\Delta t)^2 - \Delta x^2 - \Delta y^2 - \Delta z^2$$

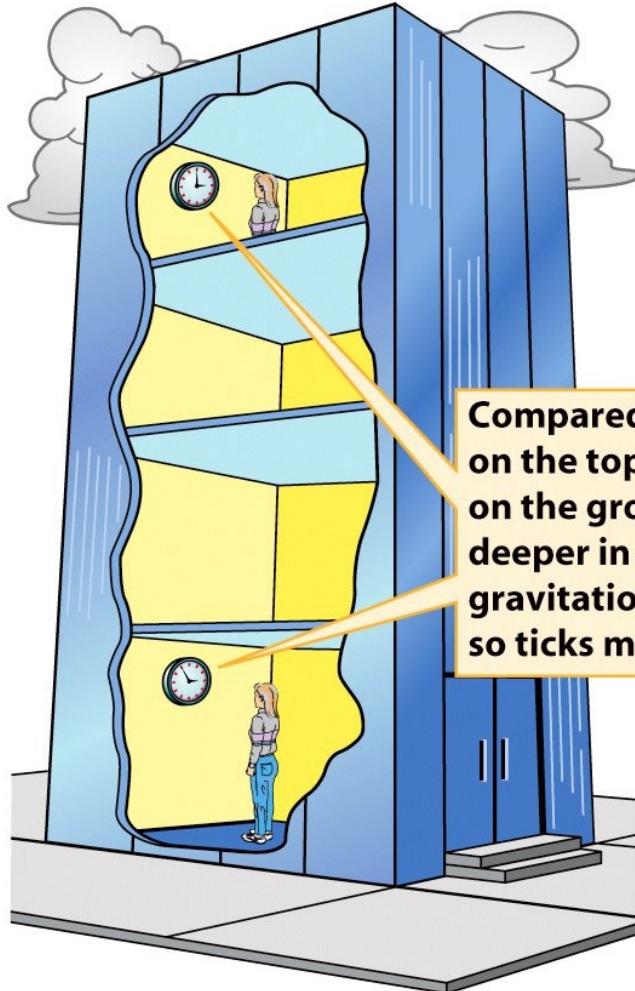
- Oder in sphärischen Koordinaten  $(r, \theta, \phi)$

$$\Delta s^2 = (c\Delta t)^2 - \Delta r^2 - r^2 \Delta \theta^2 - r^2 \sin^2 \theta \Delta \phi^2$$

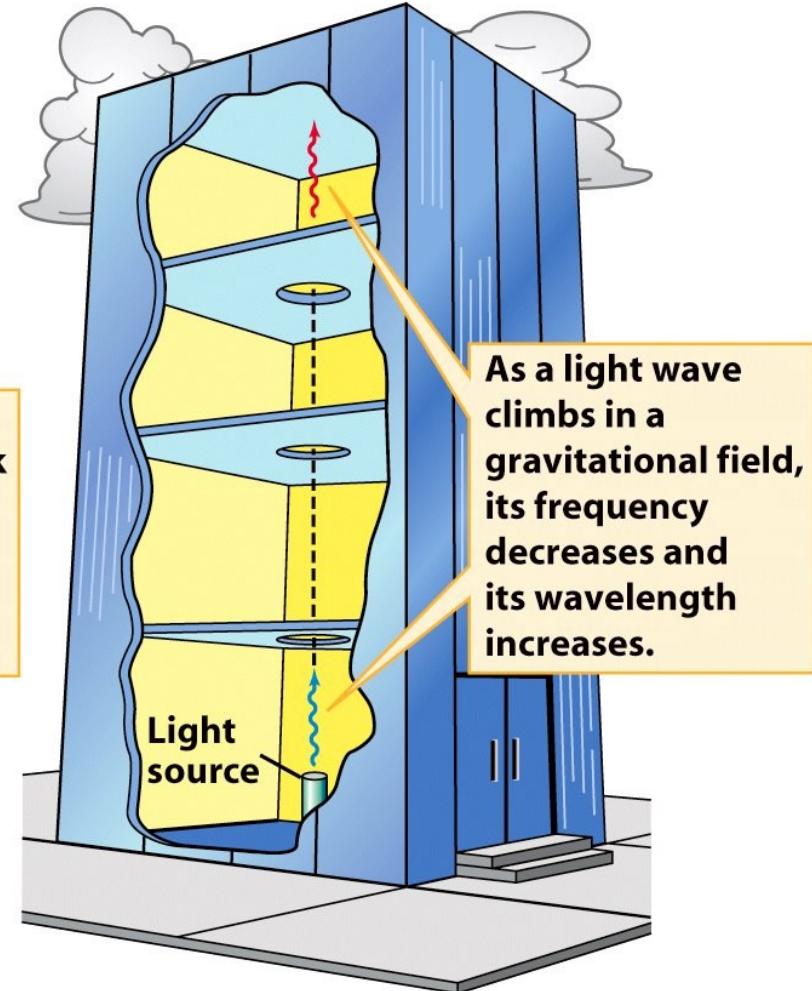
# Konsequenzen der ART

- **Gravitative Rotverschiebung** → Photonen von der Oberfläche eines Neutronensterns werden bis zu 30% nach rot verschoben.
- **Lichtablenkung:** am Sonnenrand, an Galaxien, Galaxienhaufen etc.
- **Periheldrehung** der Merkurbahn (keine geschlossenen Ellipsen).
- Lichtlaufzeiteffekte am Rande der Sonne
- Doppelsternsysteme **strahlen G-Wellen ab!**

# Metrik → Gravitative Rotverschiebung existiert in jeder metrischen Theorie



Compared to a clock on the top floor, a clock on the ground floor is deeper in the Earth's gravitational field and so ticks more slowly.



(a) The gravitational slowing of time

(b) The gravitational redshift

A diagram illustrating the curvature of spacetime by a massive object, like a yellow sun, shown as a central yellow sphere with small black spots. The spacetime fabric is represented by a grid of black lines. The grid is warped downwards and to the right by the sun's mass, creating a funnel-like shape. A blue elliptical orbit is shown, starting from a point on the left, curving around the sun, and then curving back towards the left. A red wavy arrow points along this orbit. Another red wavy arrow points towards the sun from the top-left. A light ray, shown as a straight orange line, enters from the top-left and follows the curved path of the orbit, bending downwards and to the right as it passes the sun, demonstrating how light is affected by gravity.

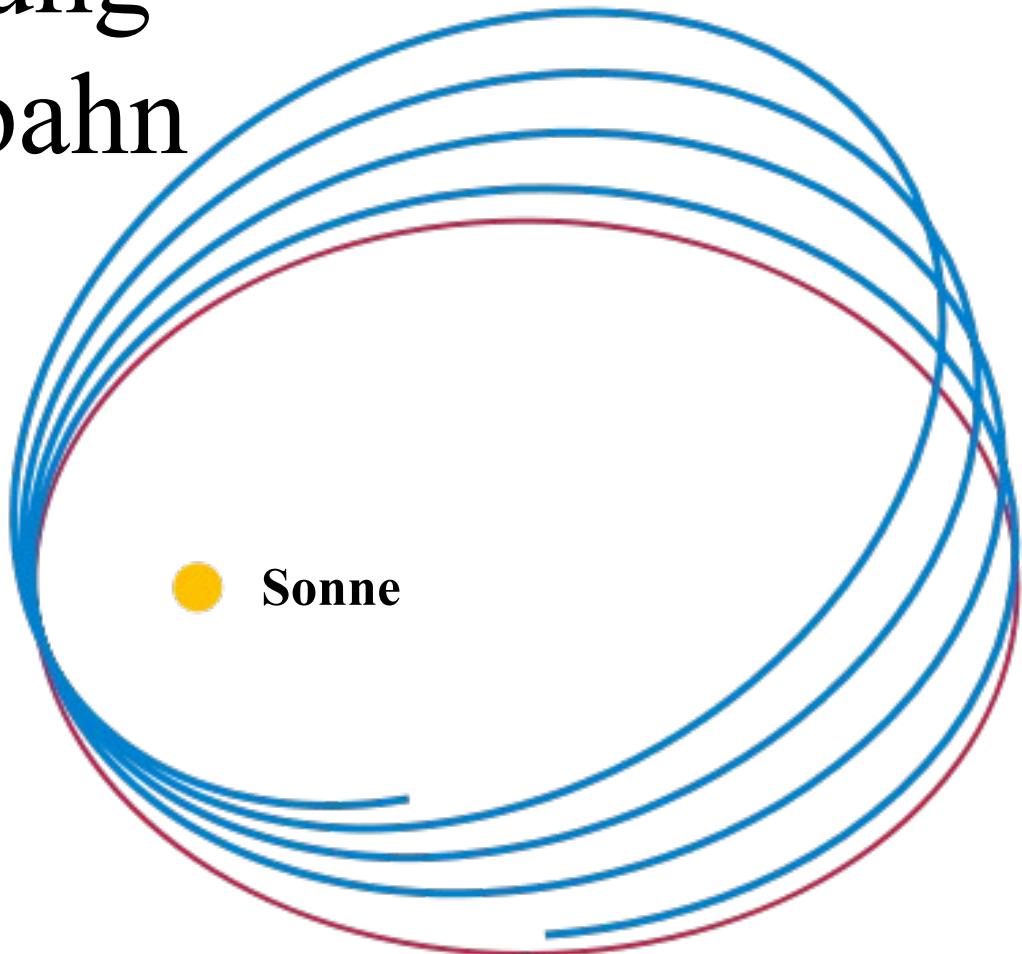
**Gravitationskräfte  
krümmen die RaumZeit  
und erzeugen so eine  
Potentialmulde.**

**Dadurch sind die Keplerbahnen  
nicht mehr geschlossene Ellipsen.**

**Auch Licht unterliegt der  
Anziehung**

# Periheldrehung der Merkurbahn

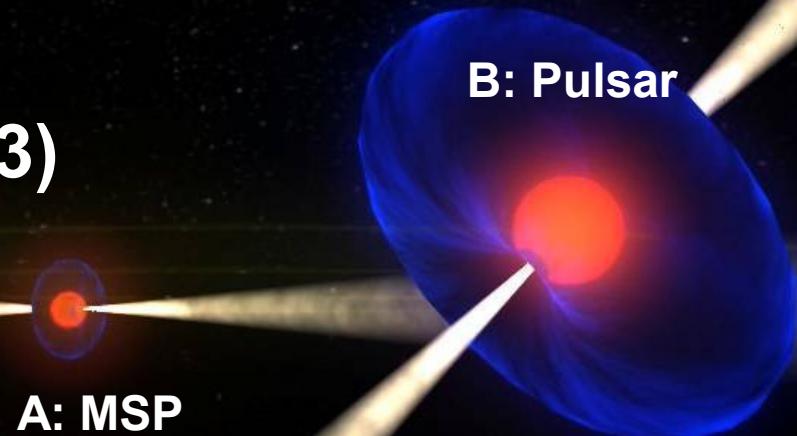
**Kepler-Gesetze  
müssen  
revidiert werden  
→ Keine  
geschlossenen  
Ellipsen mehr.**



$$\Delta\phi_{\text{Mercury}} = 43.0 \text{ arcsec/century} .$$

# Doppel-Pulsar

Testsystem für  
post-Newtonische  
Gravitation  
 $(P_b = 2,4 \text{ hr}; 2003)$

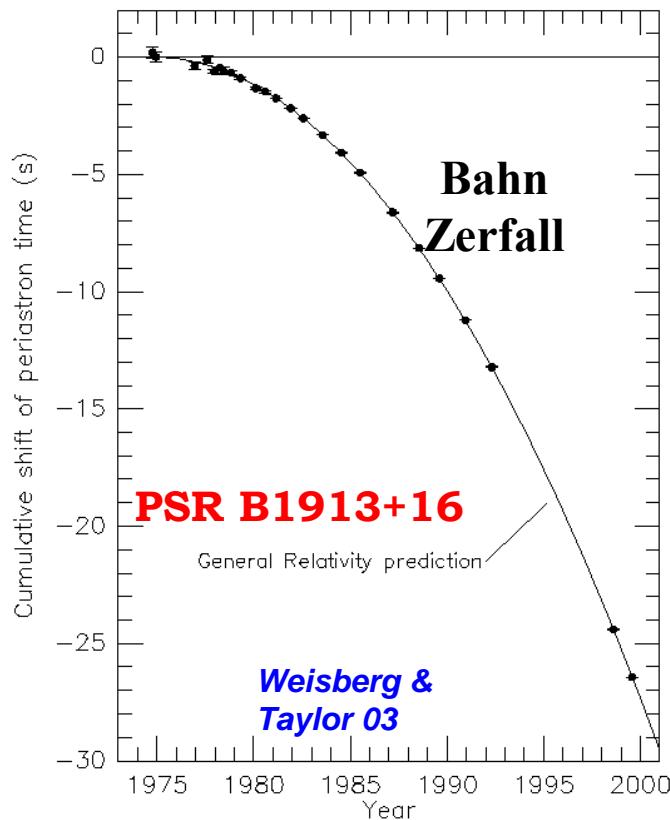


- Hohe Inklination
- Große Magnetosphäre
- Magnetosphärische Absorption des MSP Radiosignals
- Extremer Shapiro Effekt

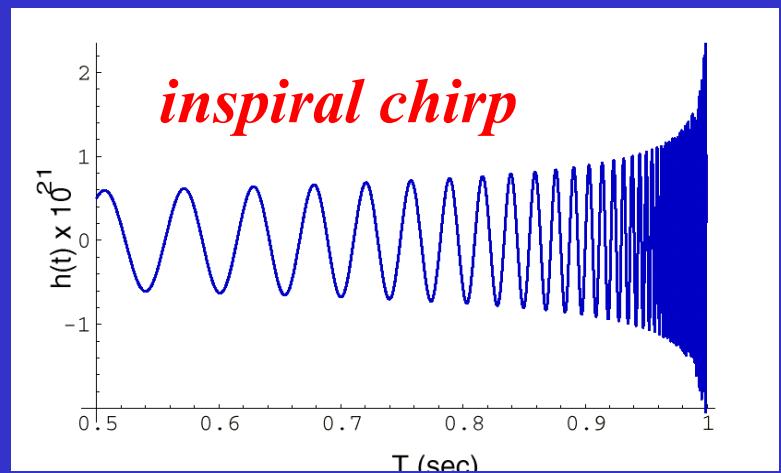
# *Binärer Neutronstern Inspiral*

*Do they exist ? YES!*

*Erste NS –NS System:  
Radiopulsar PSR B1913+16*



*What kind of signal ?*



*GW Emission verursacht orbital shrinkage leading to higher GW frequency and amplitude*

# Fundamente der Kosmologie

## Gravitationstheorie

Einstein'sche Relativitätstheorie

## Isotropie

Es gibt keine bevorzugte Richtung im Universum

## Homogenität

Es gibt keine bevorzugte Region

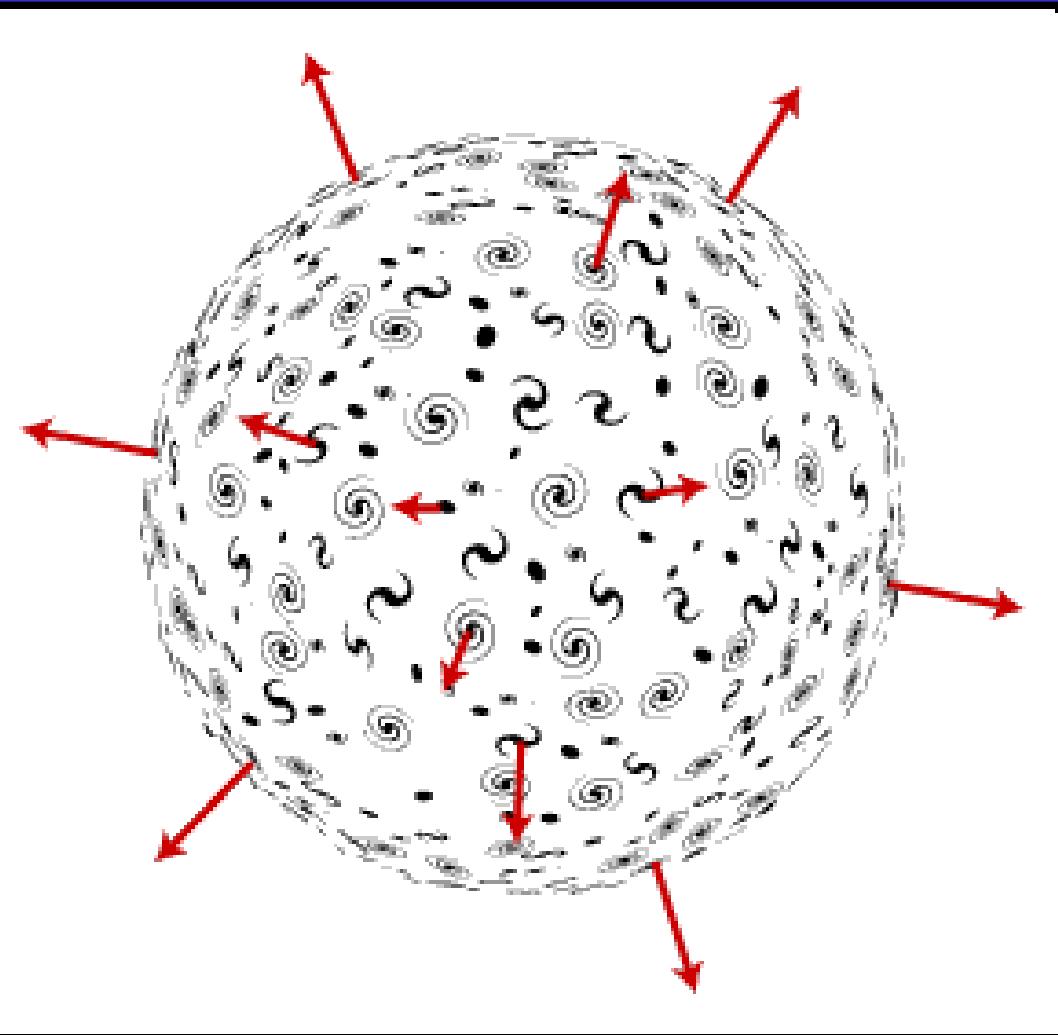
(e.g. es gibt kein Zentrum des Universums)

## Anthropisches Prinzip

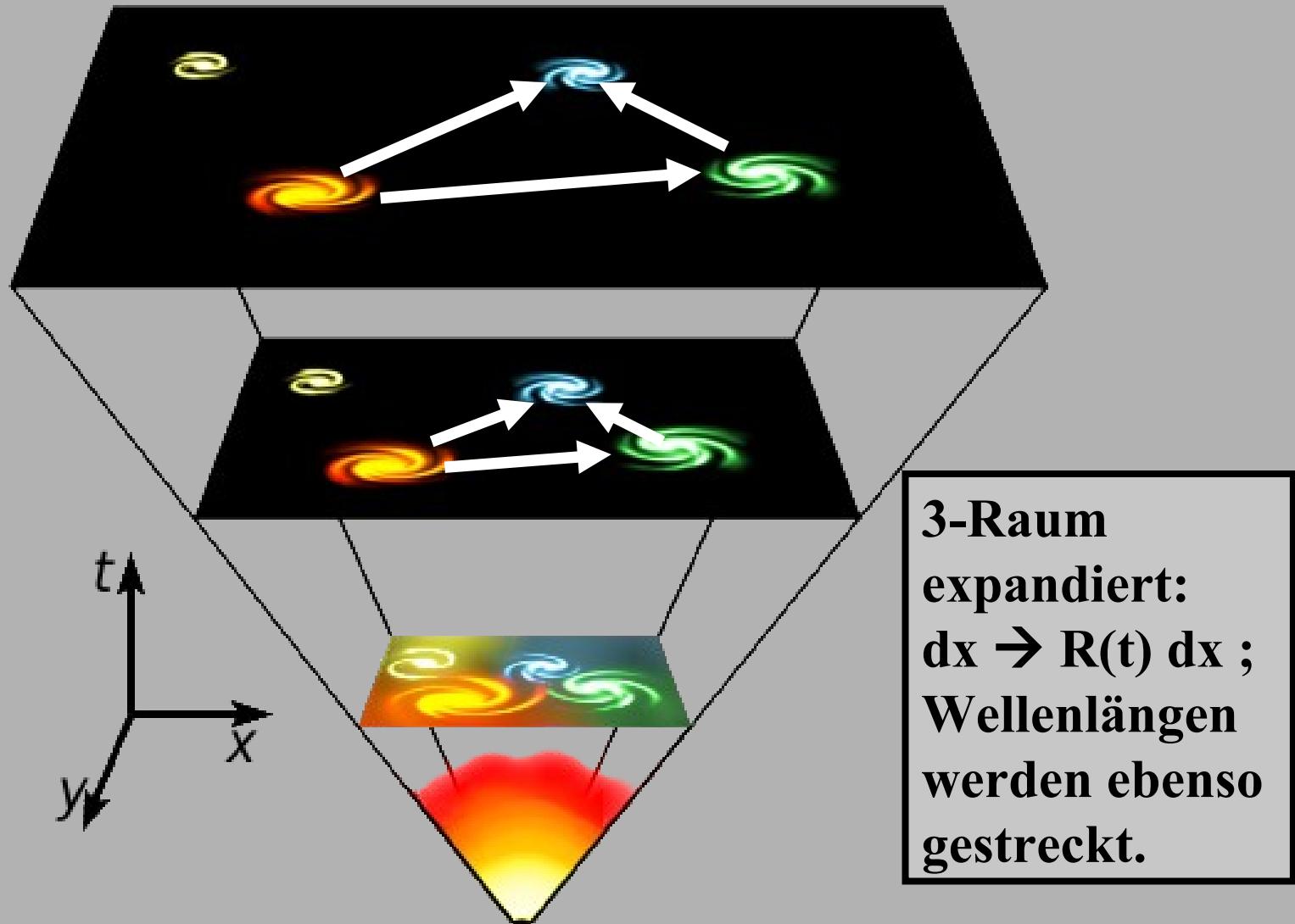
Das Universum hat uns erzeugt

# Das Expandierende Universum

Nach dem Hubble-Gesetz nehmen Distanzen zwischen Galaxien mit der Zeit zu. Dies wird als Expansion des Raumes interpretiert. Die Expansion erfolgt isotrop in allen Richtungen



# RaumZeit Interpretation eines expandierenden Universums



# Das Kosmologische Prinzip

- Unter **Kosmologisches Prinzip** sind zwei Grundannahmen in der naturwissenschaftlichen Kosmologie zusammengefasst, die deren Modellen vom Weltall als Ganzes zu Grunde liegen. Es ist eng verknüpft mit dem Kopernikanischen Prinzip. Das Kosmologische Prinzip wurde **1933 von dem Astrophysiker Edward A. Milne** eingeführt.
- **Das Universum ist homogen**, d.h. es stellt sich einem Beobachter unabhängig von dem Punkt des Raumes, indem er sich befindet, immer gleich dar (Prinzip der Homogenität, auch *Kopernikanisches Prinzip* genannt).
- **Das Universum ist isotrop**, d.h. es stellt sich dem Beobachter unabhängig von der Beobachtungsrichtung im Raum immer gleich dar (Prinzip der Isotropie). Die **Hubble-Expansion und CMB sind richtungsunabhängig!**

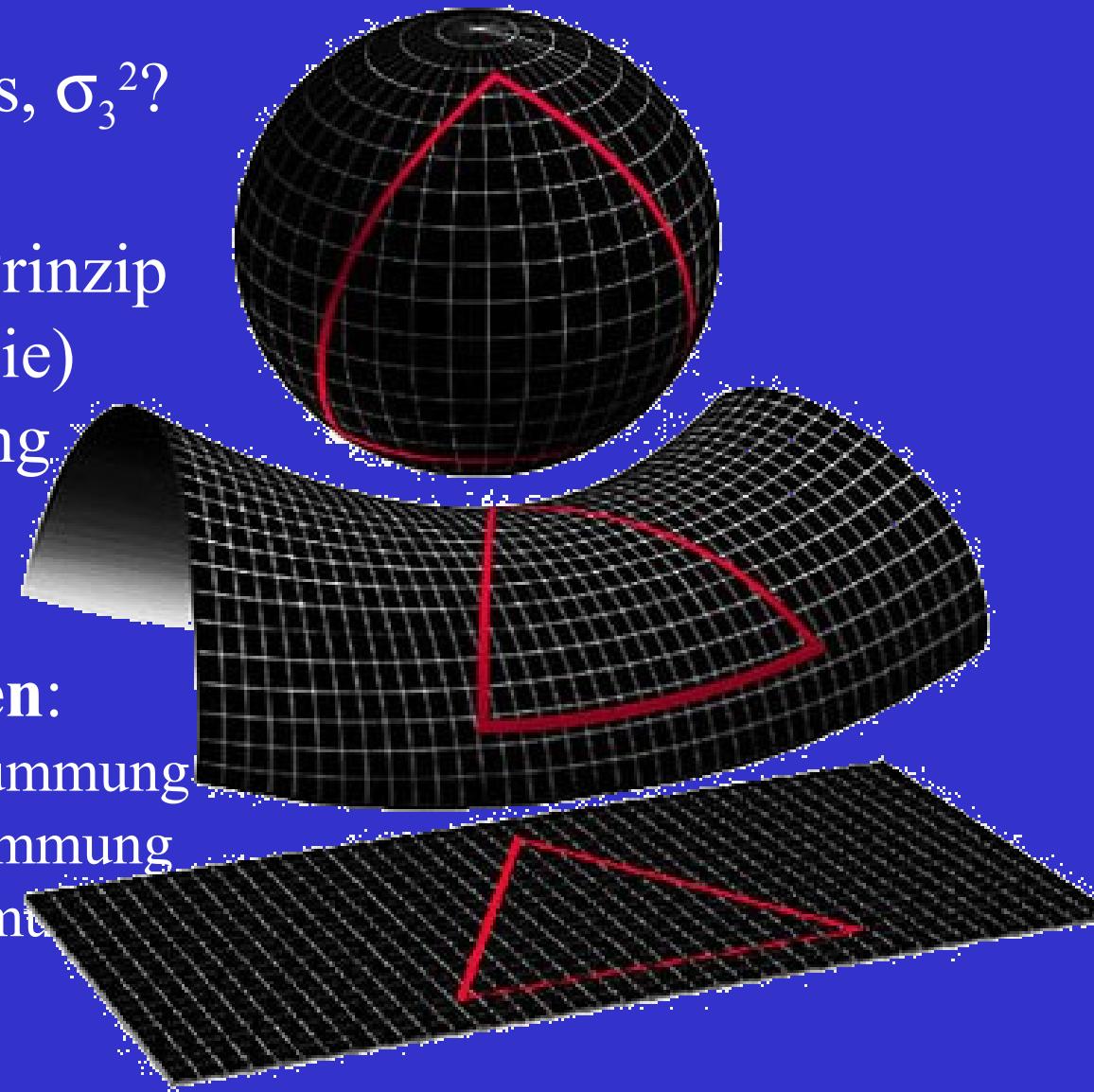
# Das Kosmologische Prinzip

- Die Annahme, dass das **Universum in hinreichend großen Raumbereichen homogen und isotrop** ist. Es gibt danach keinen ausgezeichneten Punkt (abgesehen von lokalen Variationen), **keinen Mittelpunkt** und auch **keine ausgezeichnete Richtung im Universum**. Das kosmologische Prinzip ist Grundlage der meisten kosmologischen Weltmodelle und steht im Einklang mit den bisherigen Beobachtungen des Weltalls.

# Geometrien des 3-Raumes

- Wie sieht der Raum aus,  $\sigma_3^2$ ?

- Aus Kosmologischen Prinzip  
(Homogenität + Isotropie)  
→ räumliche Krümmung  
überall konstant.



- → Nur 3 Möglichkeiten:
  - 3-Sphäre – positive Krümmung
  - 3-Sattel – negative Krümmung
  - Flach  $E^3$  – keine Krümmung

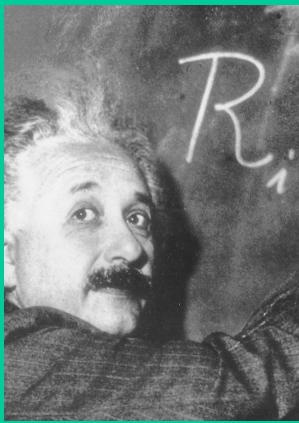
# Einstein'sche Gleichungen

## → Materie erzeugt Krümmung



$$G_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

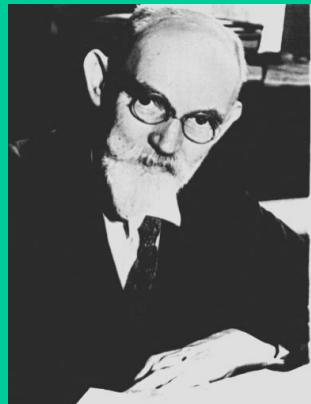
- ◆ Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie
- ◆ 1917:  $\Lambda$ -Term
- ◆ statisches Universum
- ◆ 1931: „Einstein's Eselei“
- ◆ 1998: rehabilitiert



**Albert Einstein**

Deutsch

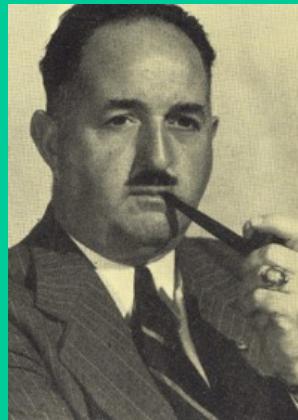
Allgemeine  
Relativität (1915);  
Statisches, geschl.  
Universum (1917)



**W. de Sitter**

Holländer

Vakuum-Energie-  
gefülltes  
Universum  
“de Sitter” (1917)



**H.P. Robertson**

Amerikaner



**A.G. Walker**

Britisch

Allgemeine Herleitung der Metrik eines  
isotropen und homogenen Universums in  
ART “Robertson-Walker Metrik” (1935-6)



**A. Friedmann**

Russe

Entwicklung eines homogenen,  
expandierenden Universums  
“Friedmann Modelle” (1922)

**G. LeMaitre**

Belgier



„burst of fireworks“ 1927  
hat den Big Bang erfunden

# Einfaches Modell: Flacher Raum

Der einfachste Ansatz: expandierender Euklidischer Raum:  $dx \rightarrow R(t) dx$  in allen Rägen.

Standard 3-Raum Metrik:

$$\begin{aligned} ds^2 &= dx^2 + dy^2 + dz^2 \\ &= dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2\theta d\phi^2 \end{aligned}$$

in Cartesischen oder Sphärischen Koordinaten im Euklidischen Raum (Abstandsmessung).

# Metrik des expandierenden Universums

- Diese Form galt für einen statischen Raum.  
Wir lassen den Raum jetzt **isotrop expandieren**

$$\Delta s^2 = (c\Delta t)^2 - R^2(t)(\Delta r^2 + r^2 \Delta \theta^2 + r^2 \sin^2 \theta \Delta \phi^2)$$

- **$R(t)$**  ist dann der sog. **Skalenfaktor**, sein heutiger Wert wird mit  $R_0$  bezeichnet.
- $R(t)$  ist der einzige Freiheitsgrad eines solchen Modells → Differentialgleichung.

# Metrik expandierenden Universums

- Allgemein: Friedmann-Robertson-Walker Metrik (1936)

$$\Delta s^2 = (c\Delta t)^2 - R^2(t) \left( \frac{\Delta r^2}{1 - kr^2} + r^2 \Delta \theta^2 + r^2 \sin^2 \theta \Delta \phi^2 \right)$$

- $R(t)$  : sog. Skalenfaktor,  $a(t) = R(t)/R_0$
- $k$  ist die Krümmungskonstante
  - $k=0$ : 3-dim. flacher Raum (Euklidisch)
  - $k>0$ : 3-dim. Kugeloberfläche (endliches Vol)
  - $k<0$ : 3-dim. hyperbolische Sattelfläche

# FRW Modelle des Universums

$$ds^2 = dt^2 - a^2(t) \left\{ \frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \right\}$$

Räumliche Krümmung (+1,0,-1)

r,θ,ϕ sind co-moving Koordinaten (“Labels” für Objekte).  
t: ausgezeichnete kosmologische Zeit (Atomuhren in Clusters).

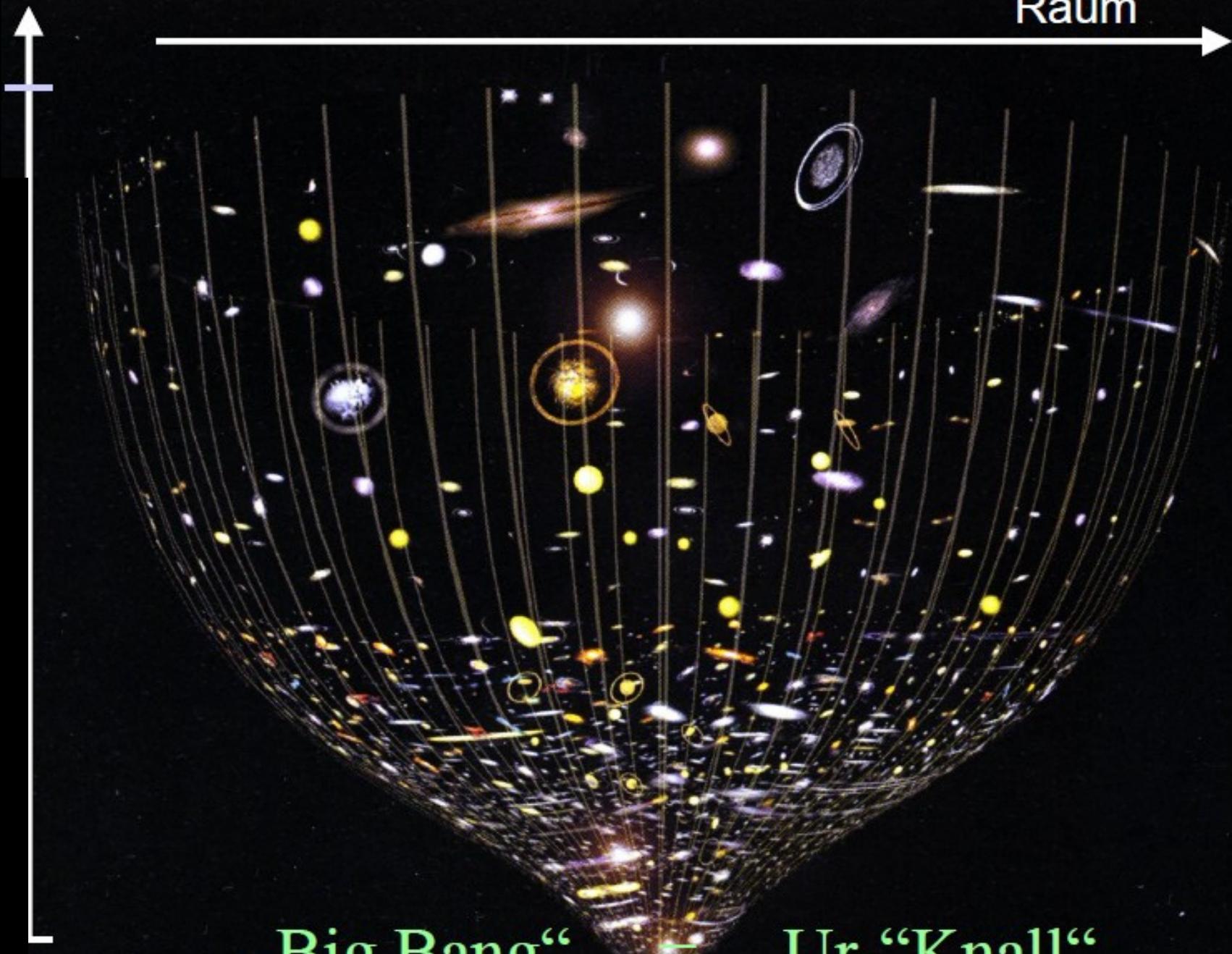
x = a(t) r : Distanzen werden gestreckt (isotrop).

a(t) ist eine Funktion der Zeit und r bleibt konstant.

a(t) ist als Skalenfaktor des Universums bekannt und misst die universelle Expansionsrate des Universums.

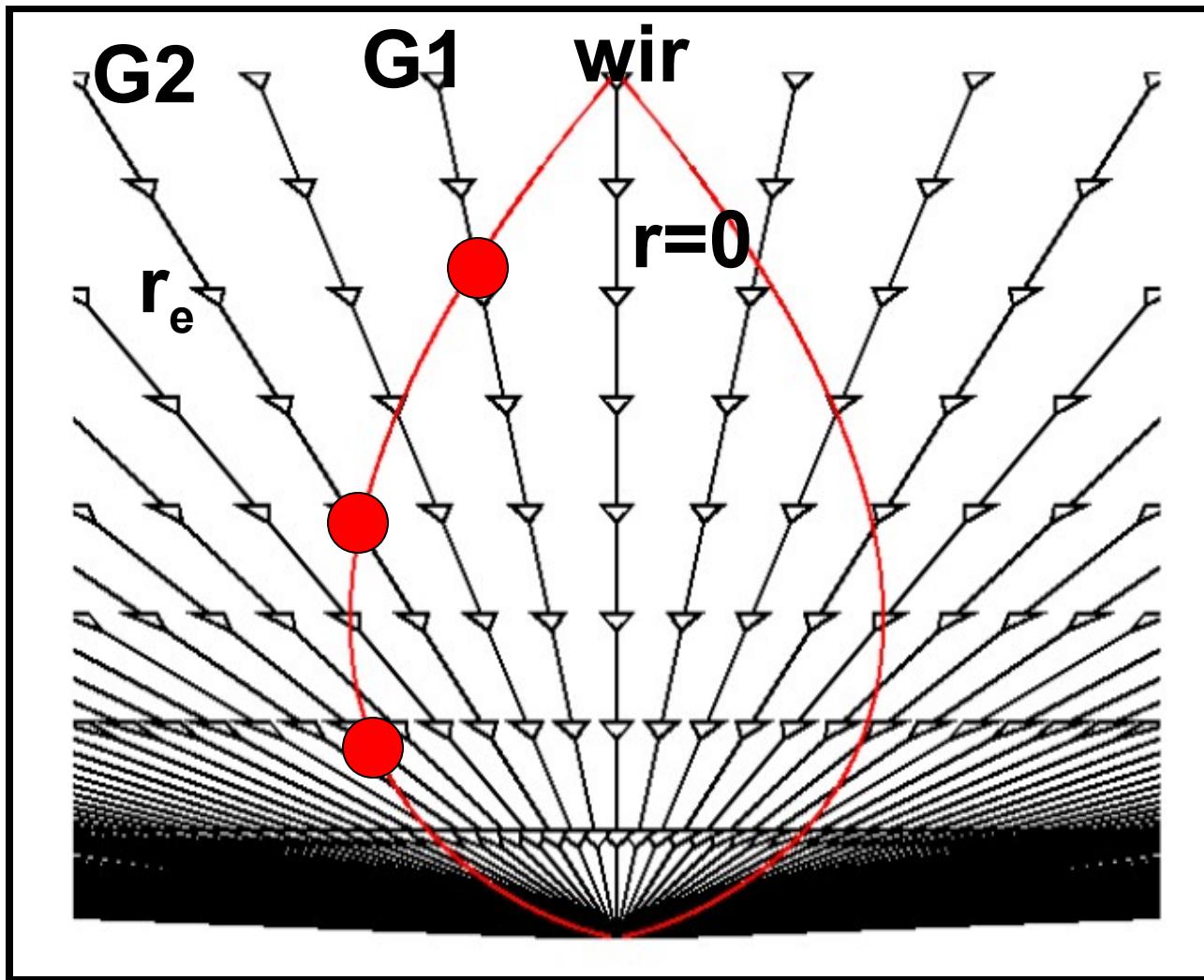
a(t<sub>0</sub>) = 1, wobei t<sub>0</sub> die heutige Zeit.

Raum



# RaumZeit ist erfüllt mit Weltlinien der Galaxien

Zeit  
z  
↓



Wir beobachten längs Rückwärtslichtkegel.

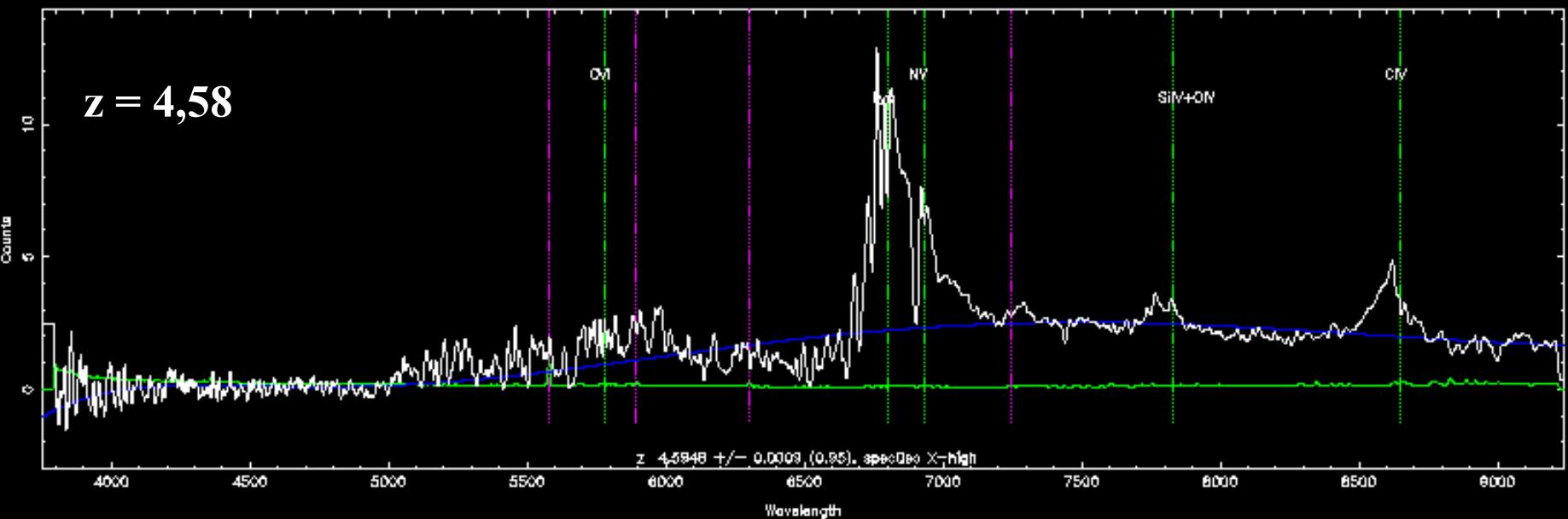
# Kosmologische Rotverschiebung entsteht durch Raumstreckung

- Allgemeine Definition von Rotverschiebung:

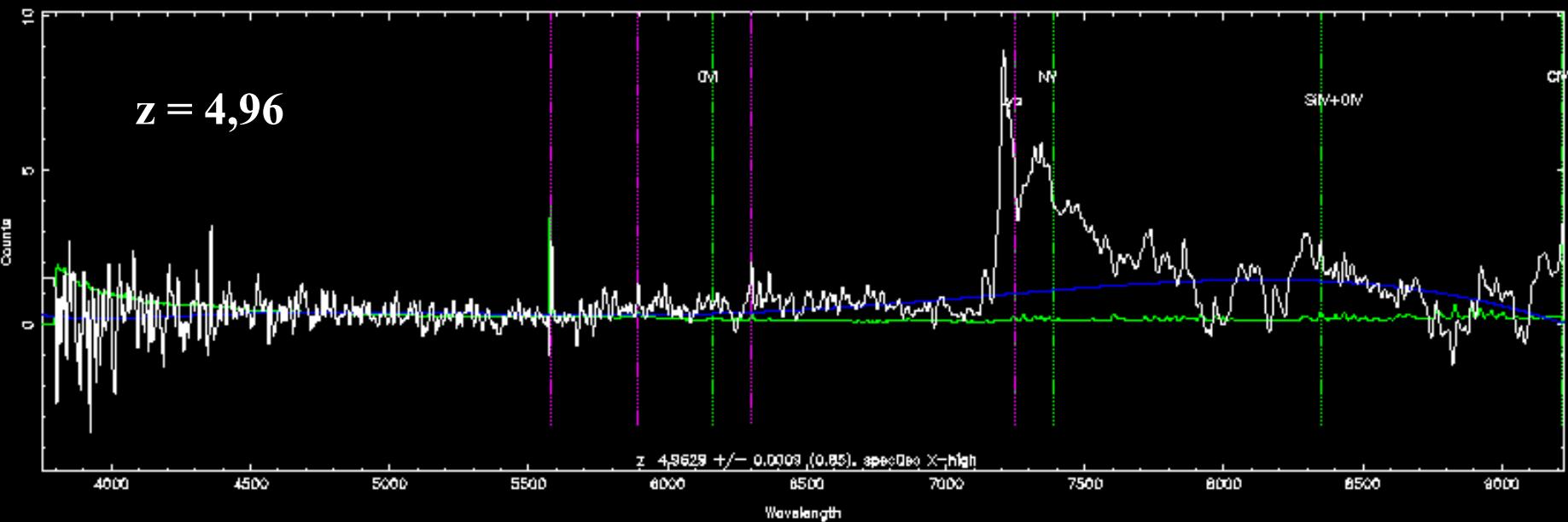
$$z = \frac{\lambda_{received} - \lambda_{emitted}}{\lambda_{emitted}}$$

→ Kosmologische Rotverschiebung entsteht durch Expansion:

$$1 + z = \frac{\lambda_{received}}{\lambda_{emitted}} = \frac{R_{now}}{R_{then}}$$



Quasare haben charakteristische rotver. Emission-Linien Spektren



# Hubble-Gesetz folgt aus Expansion

$$d_L = d_L(z) = \frac{c}{H_0} \left( z + \frac{1}{2} (1 - q_0) z^2 + O(z^3) \right).$$

$$H_0 = \left( \frac{\dot{R}}{R} \right)_0.$$

→ Hubble-Konstante ist gerade die Expansionsgeschwindigkeit des heutigen Universums.

# Friedmann Kosmologie

In der Robertson-Walker Metrik (Homogenität und Isotropie des Universums) die Expansion wird durch die Energie Dichte, die Krümmung, und die Dichte des Vakuums (Kosmologische Konstante) bestimmt.

$$H^2 = \left( \frac{\dot{R}}{R} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho_M - \frac{kc^2}{R^2} + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

$$\Omega_M = \frac{8\pi G}{3H_0^2} \rho_M$$

$$\Omega_k = - \frac{kc^2}{R^2 H_0^2}$$

$$\Omega_\Lambda = \frac{\Lambda c^2}{3H_0^2}$$

„Dunkle Energie“

# 3 Kosmologische Dichte-Parameter

- Materiedichthe parameter:

$$\Omega_M \equiv \frac{8\pi G}{3H_0^2} \rho_{M,0} = \frac{\rho_{M,0}}{\rho_{\text{crit}}}$$

- Vakuumdichthe parameter: Dunkle Energie

$$\Omega_\Lambda = \frac{\Lambda c^2}{3H_0^2}$$

- Krümmungsparameter:

$$\Omega_k = -\frac{kc^2}{R_0^2 H_0^2} = -\frac{kR_H^2}{R_0^2}.$$

Hubble-Radius

$$R_H = c/H_0 \\ = 4000 \text{ Mpc}$$

Das Universum  
erscheint flach,  
wann immer



$$R_0 > 10 R_H$$



$$\Omega_k \sim 0$$

$$\Omega_M + \Omega_\Lambda + \Omega_k = 1.$$

Fundamental-Ebene  
der Kosmologie

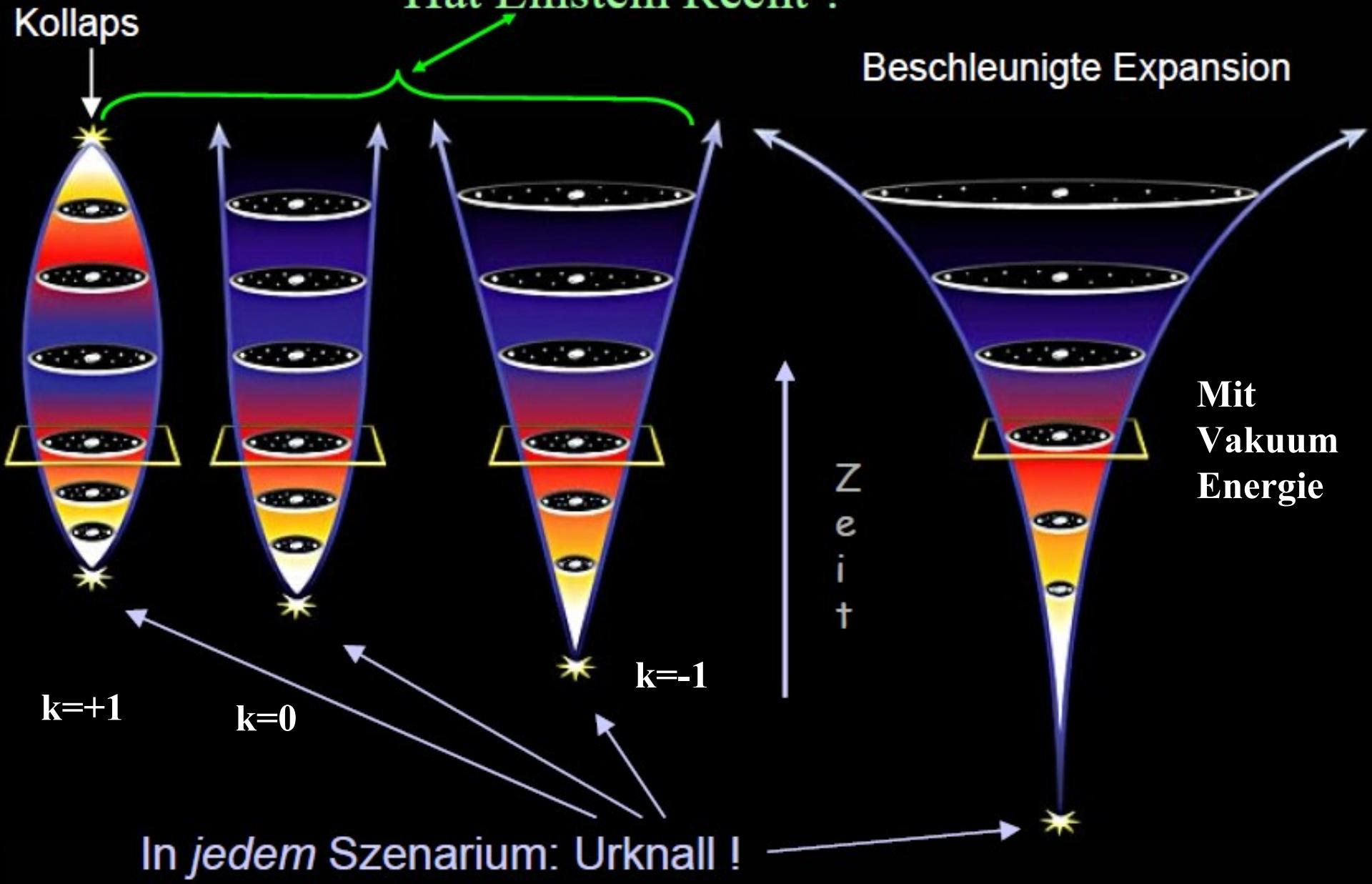
# Fazit →

- Als Konsequenz der Friedmann-Gleichung wird das heutige Universum eindeutig durch **5 Parameter** bestimmt:
- (i) die Hubble-Konstante  $H_0$
- (ii) 3 Dichteparameter:  $\Omega_M$ ,  $\Omega_k$  und  $\Omega_\Lambda$
- (iii) die Zustandsgleichung  $w$  der Vakuum-Energie,  $P_v = w \rho_v$ ,  $w = -1$ .

$$\Omega_M + \Omega_\Lambda + \Omega_k = 1 .$$

# Entwicklung des Universums ?

Hat Einstein Recht ?



# Parameter des Universums

- Hubble-Konstante:  
 $H_0 = 74 +/- 3 \text{ km/s/Mpc}$  (Riess et al. 2009)
- Krümmung des Universums:  
 $\Omega_k = 0,01 +/- 0,01$
- Materie des Universums:  $\Omega_m = 0,23 + 0,04$   
**Dunkle Materie + Baryonen**
- Vakuum Energie:  $\Omega_\Lambda = 0,73$
- Zustandsgleichung  $w = -1$  des Vakuums.

# Dichte-Entwicklung; $1+z = R_0/R$

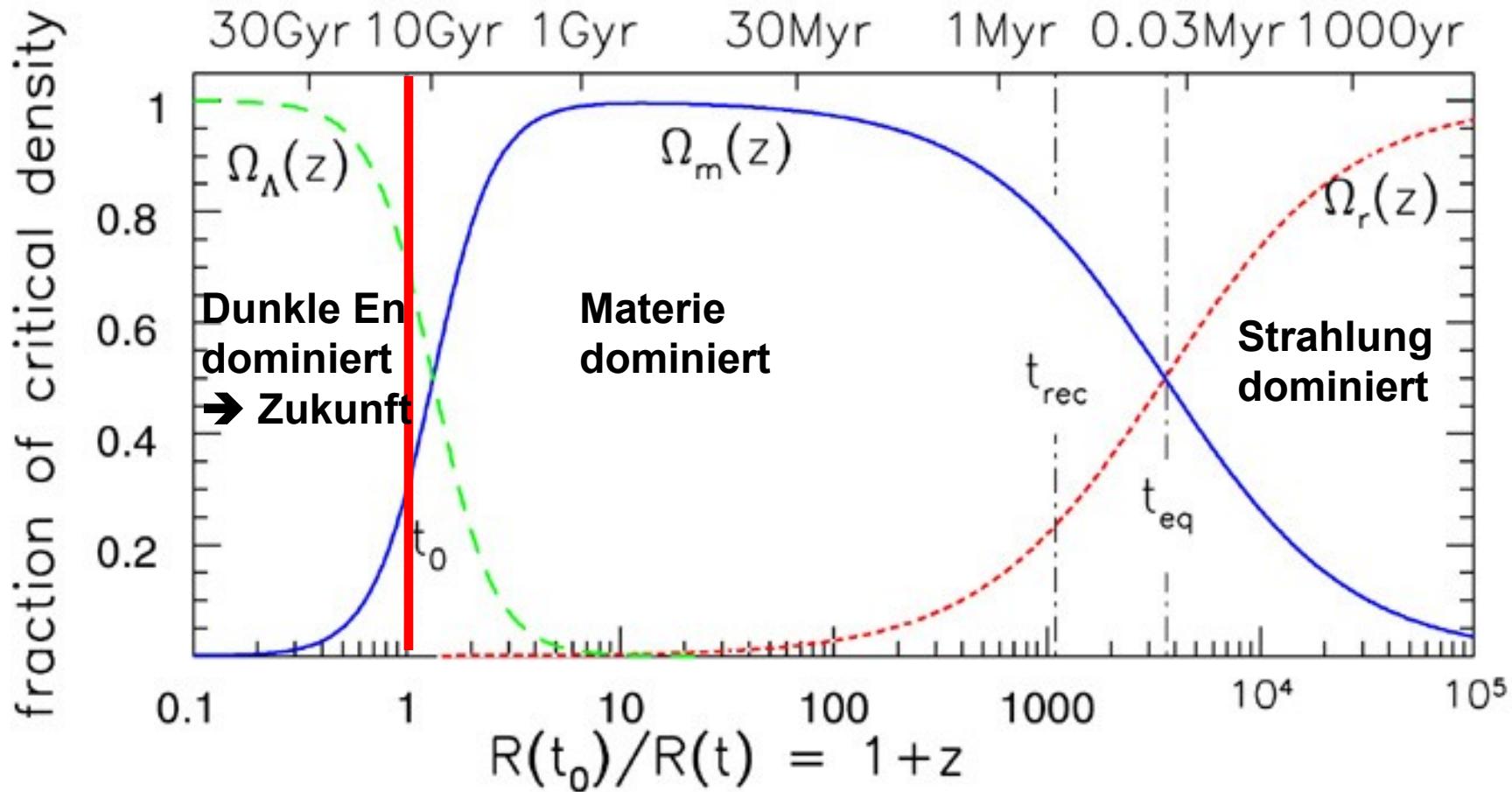
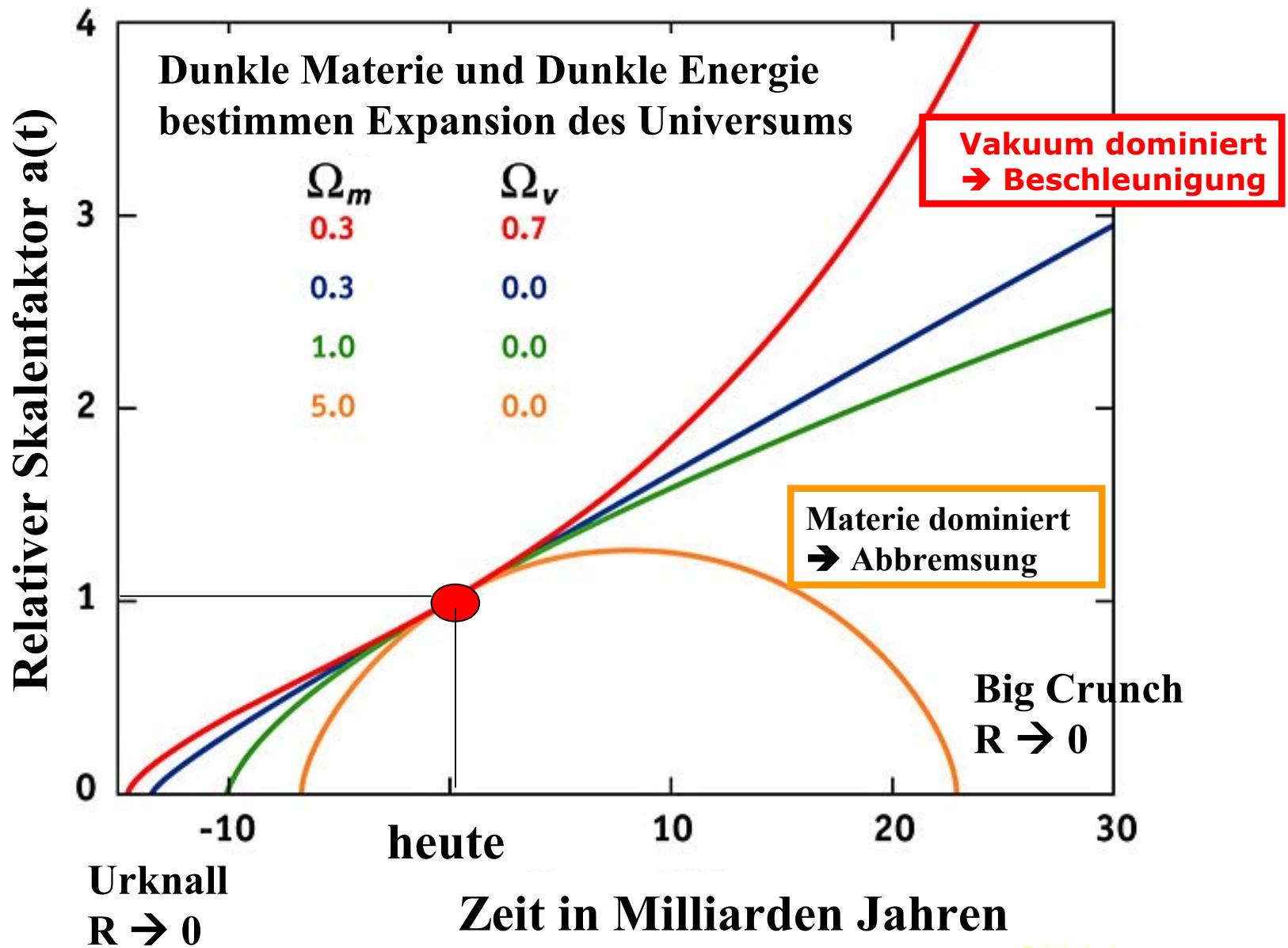
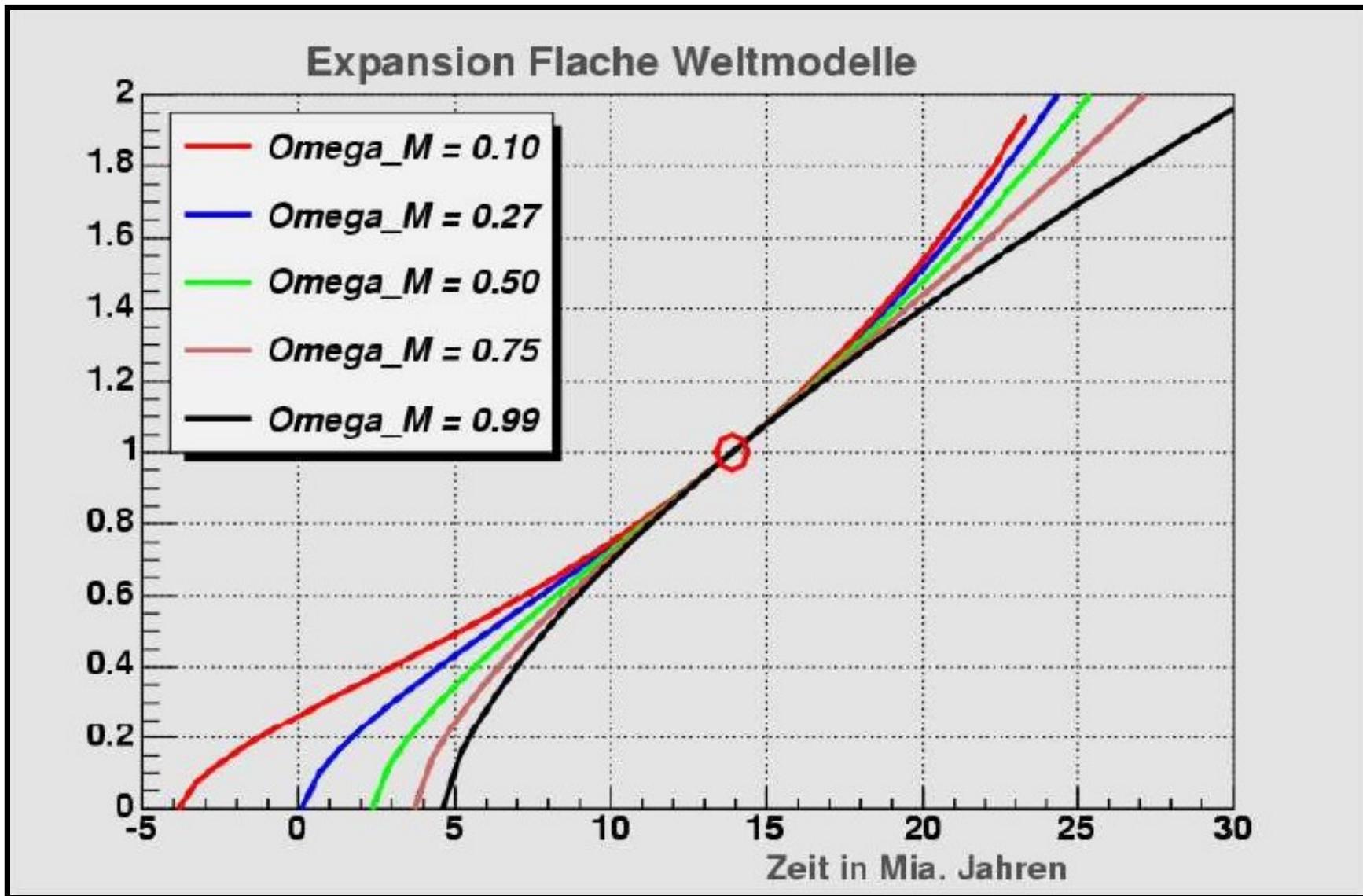


Fig 8.7 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

# Expansion des Universums



# Expansion des flachen Universums



# Allgemeines FRW Hubble-Gesetz

**Annahme:**  
**homogenes und isotropes Universum**

**Nullgeodäten der Friedmann-Robertson-Walker**

**Metrik**

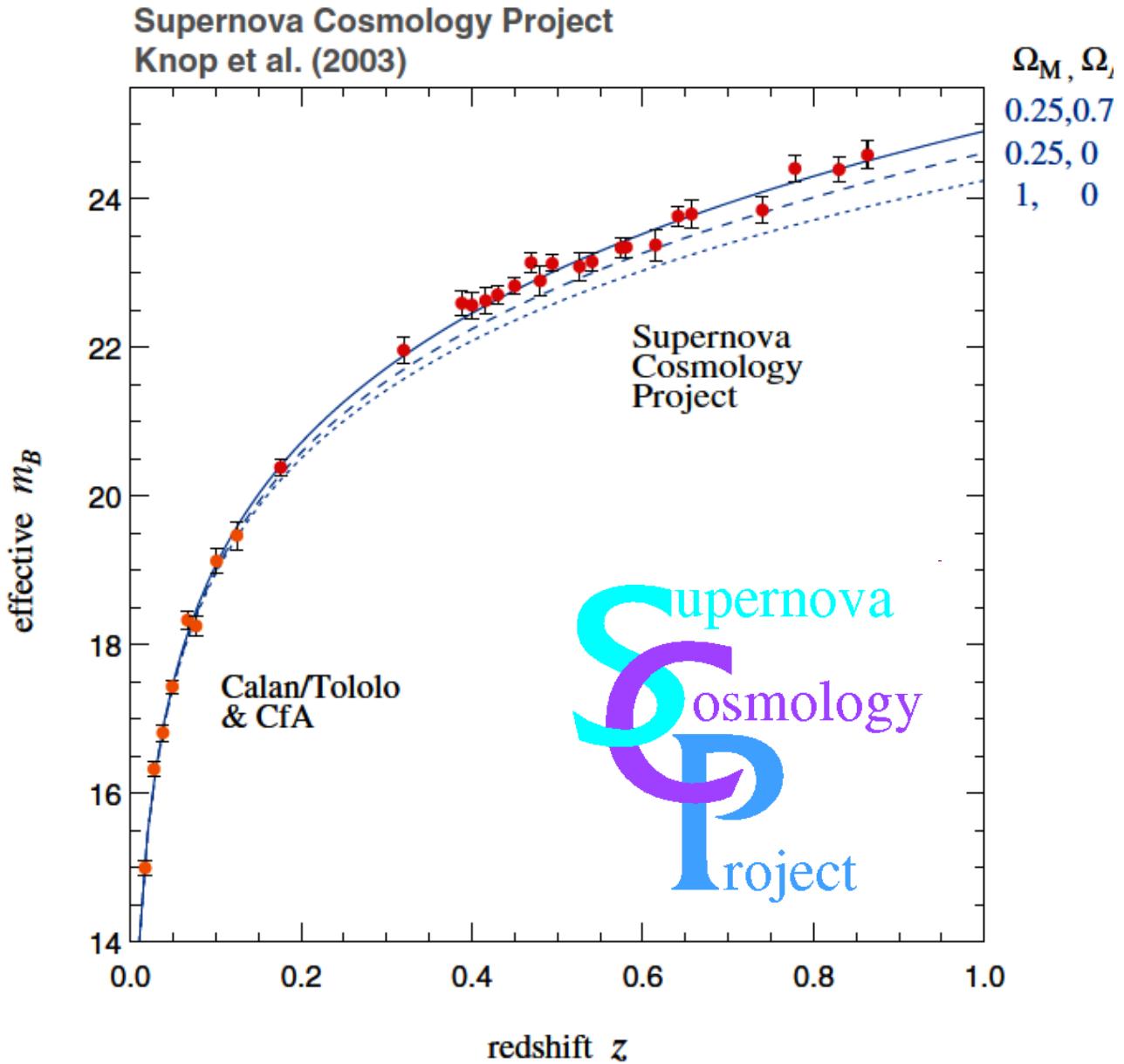
$$D_L = \frac{(1+z)c}{H_0 \sqrt{|\Omega_k|}} S \left\{ \sqrt{|\Omega_k|} \int_0^z [\Omega_k (1+z')^2 + \Omega_M (1+z')^3 + \Omega_\Lambda]^{-\frac{1}{2}} dz' \right\}$$

$S(x) = \{\sin(x), x, \sinh(x)\}, k=\{1,0,-1\}$

$$\Omega_M = \frac{8\pi G}{3H_0^2} \rho_M \quad \Omega_k = -\frac{kc^2}{R^2 H_0^2} \quad \Omega_\Lambda = \frac{\Lambda c^2}{3H_0^2}$$

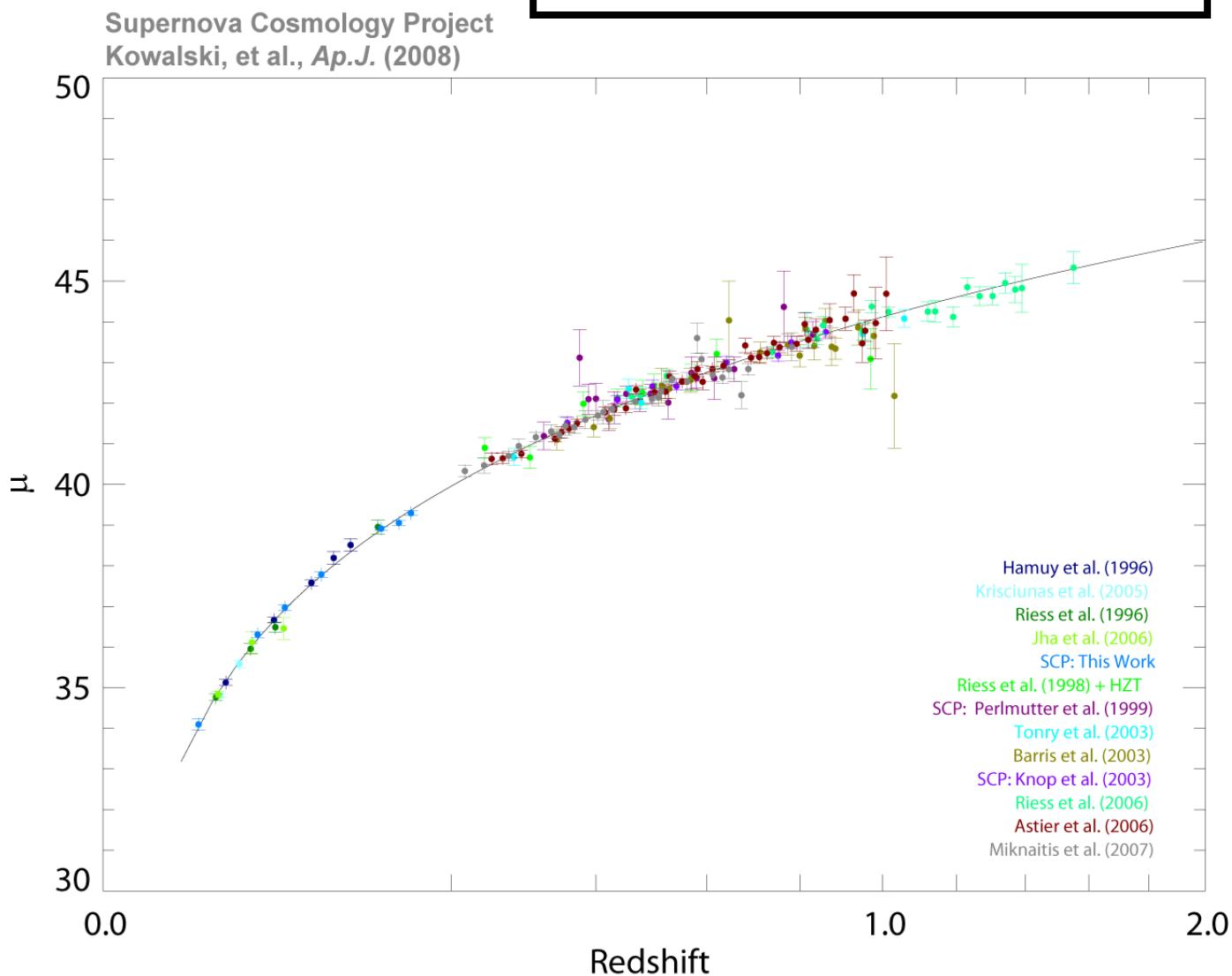
$\Omega_M$ : Materiedichte    $\Omega_k$ : Raumkrümmung    $\Omega_\Lambda$ : Kosmologische Konstante

# Hubble-Diagramm der Supernovae entscheiden Kosmologie

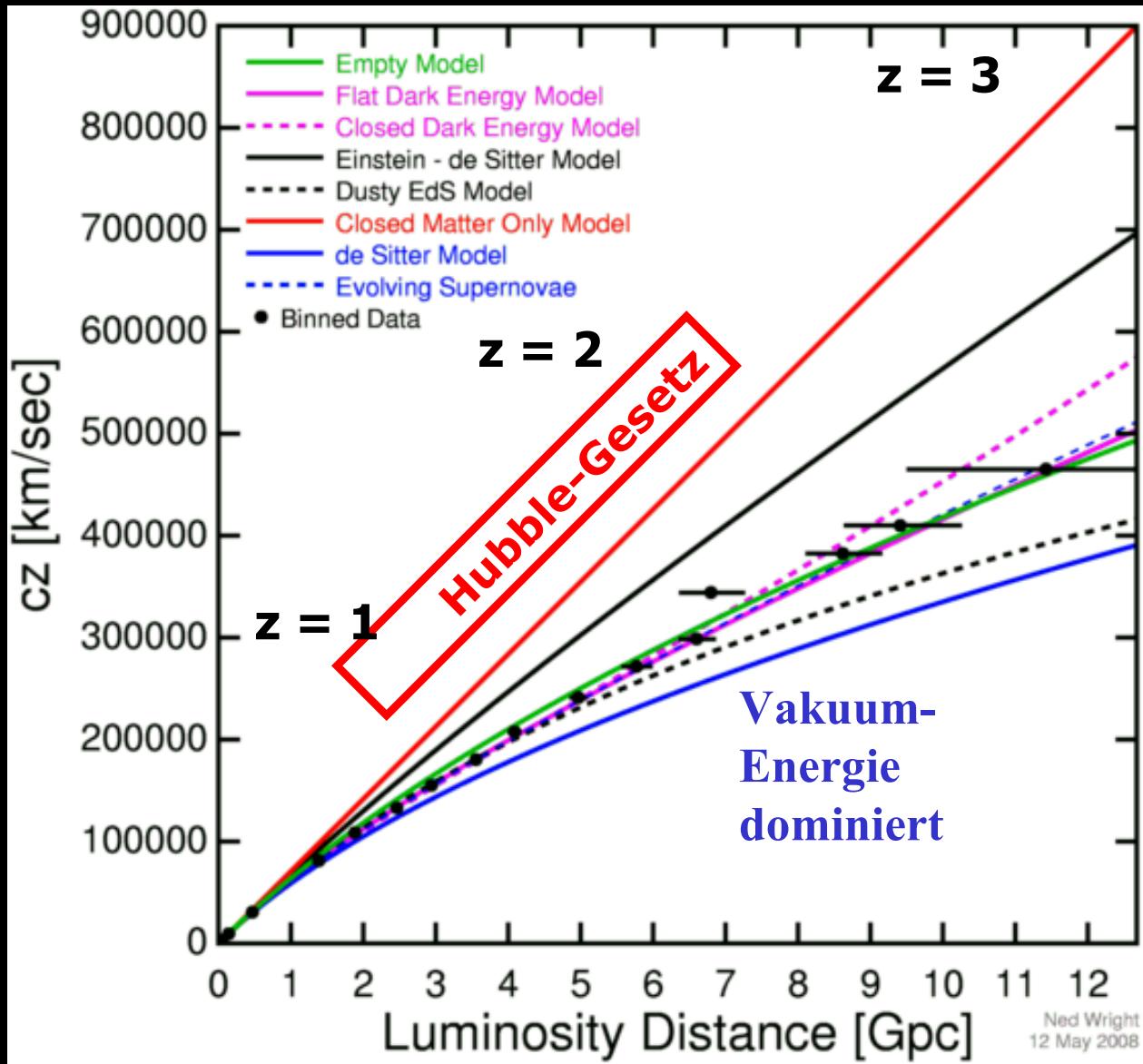


# Supernovae für $z > 1$ bestimmen das Universum

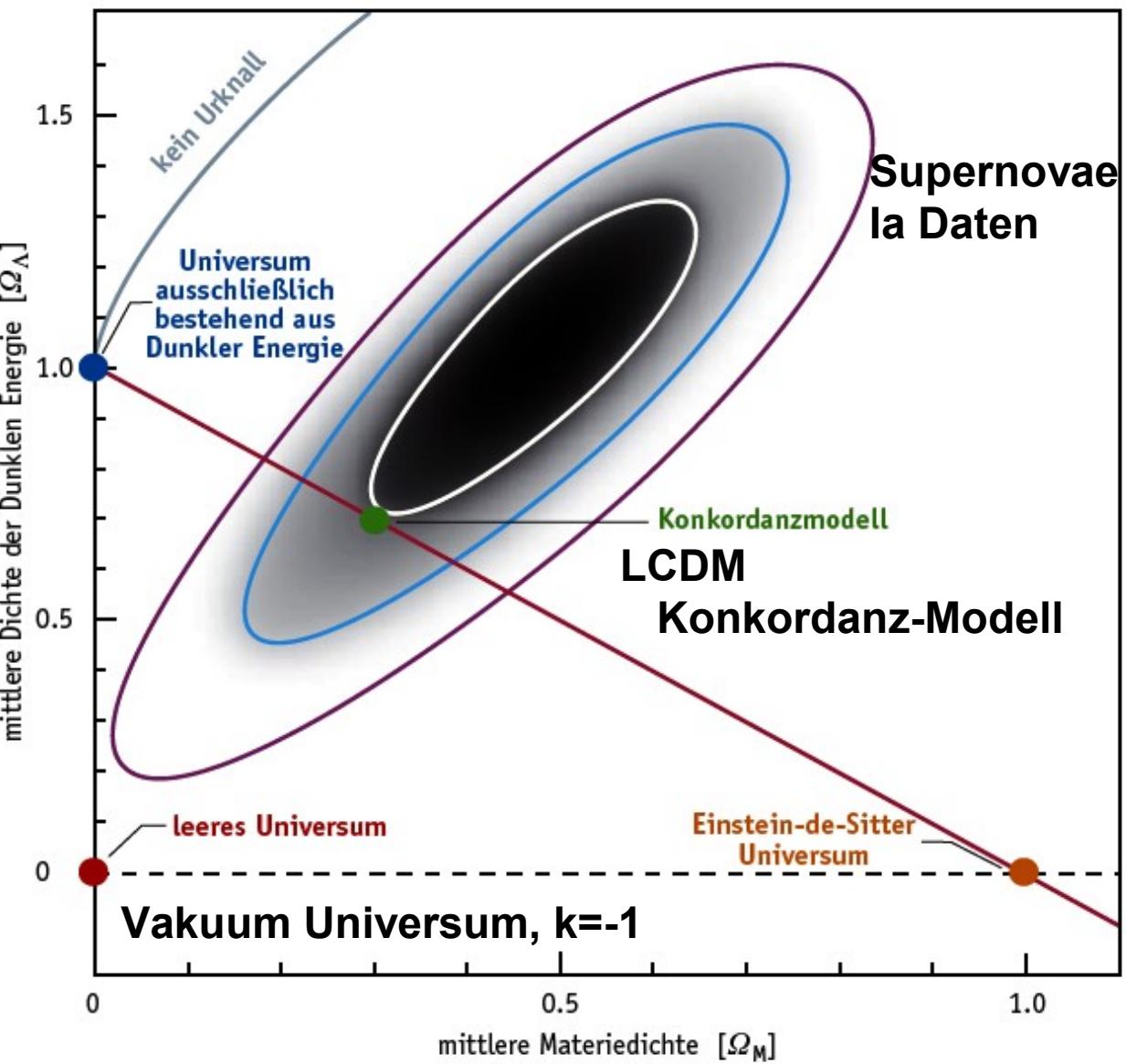
# Hubble-Diagramm der Supernovae



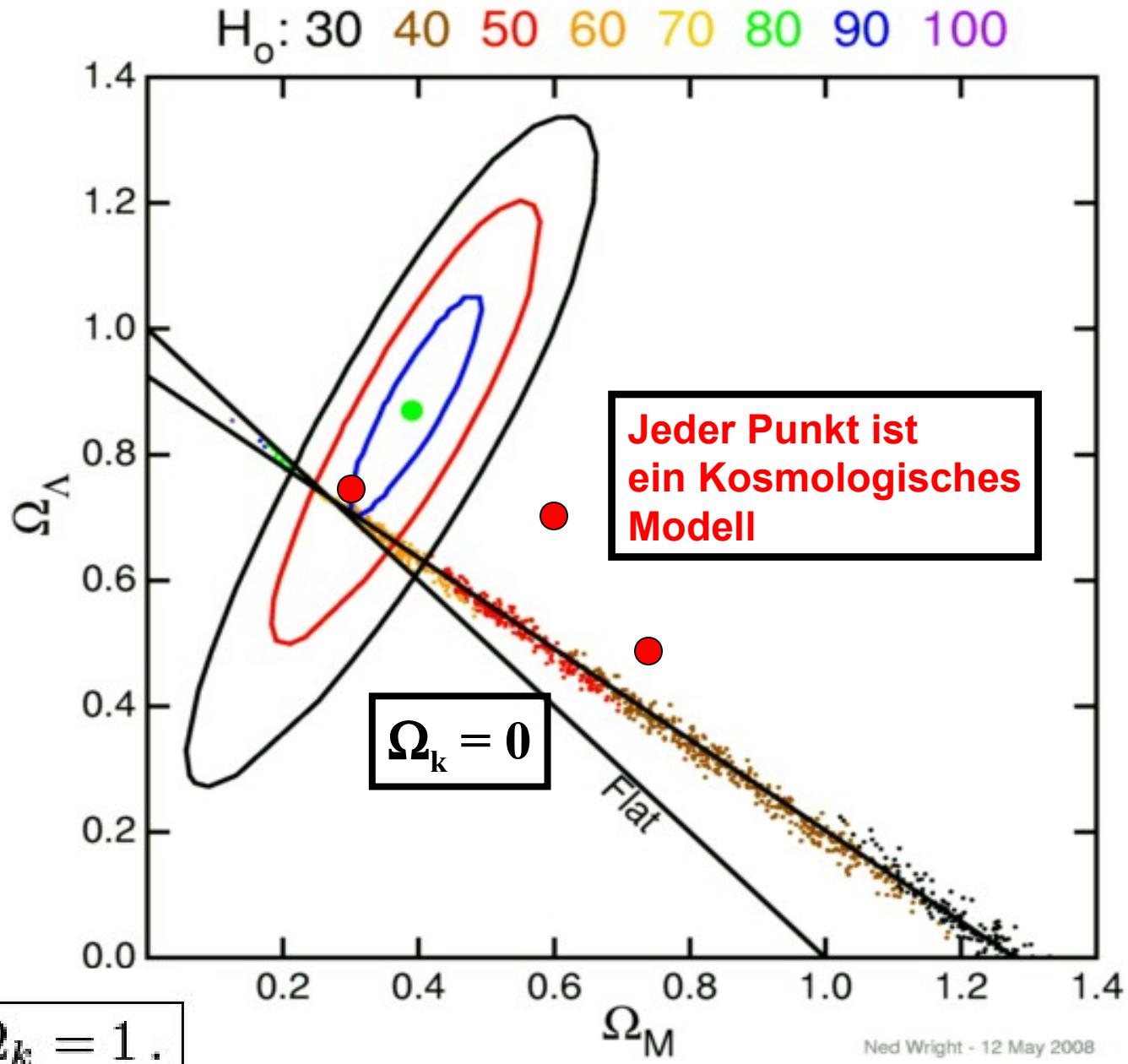
# Verallgemeinertes Hubble-Gesetz



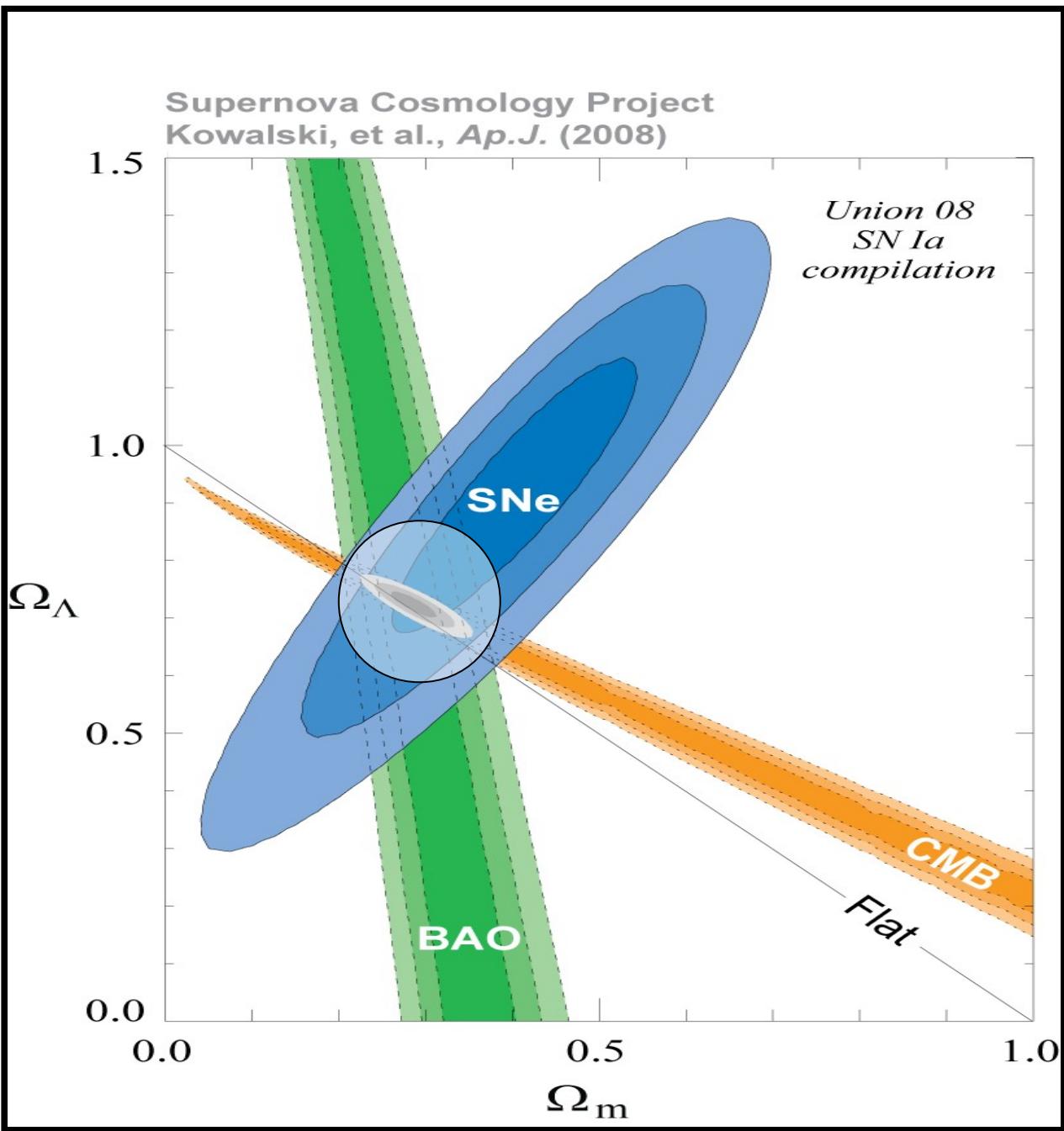
# Fundamental-Ebene der Kosmologie



# Fundamental-Ebene der Kosmologie



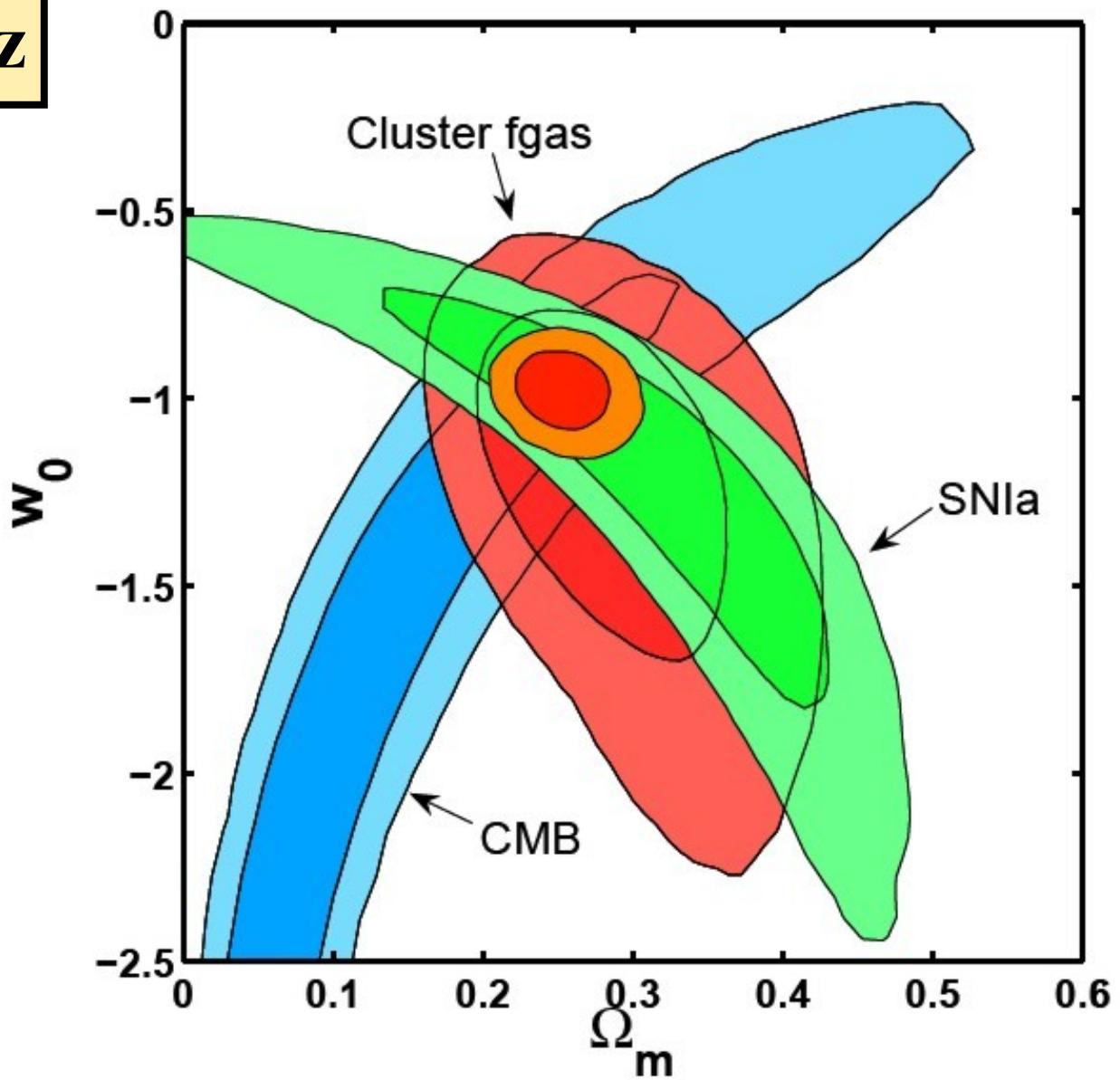
# Fundamental-Ebene der Kosmologie



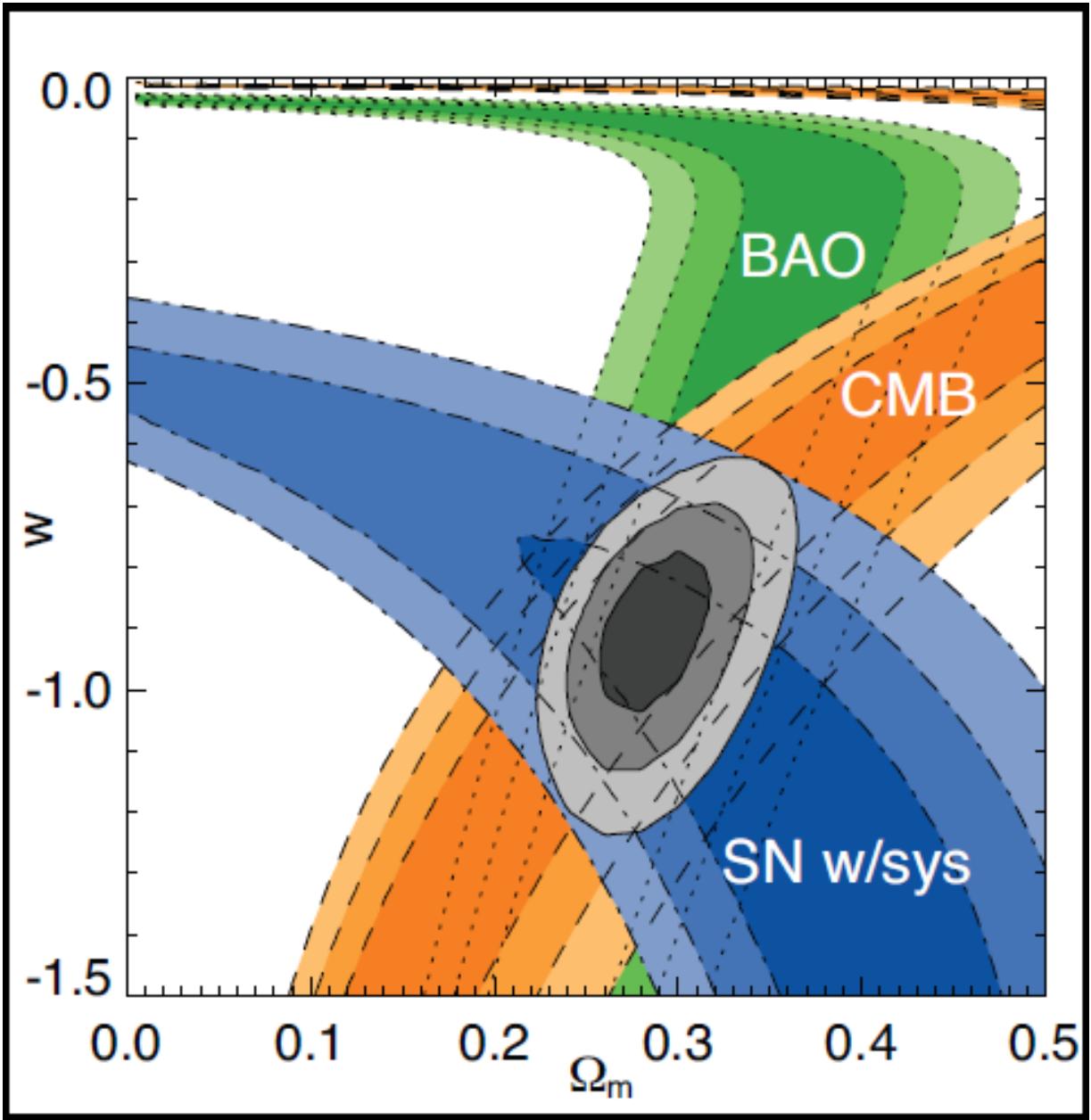
$$P_V = w \rho_V$$

$$w \sim w_0 + w_1 z$$

Ist Dunkle Energie  
Vakuum Energie?  
 $\rightarrow w_0 = -1$



# Ist Dunkle Energie Vakuum Energie?



# Das kosmologische Standard Modell ( $\Lambda$ CDM Modell)

Version 2008

$$\Omega_k = -0,0052 \pm 0,006$$

$$\Omega_B = 0,0462 \pm 0,001$$

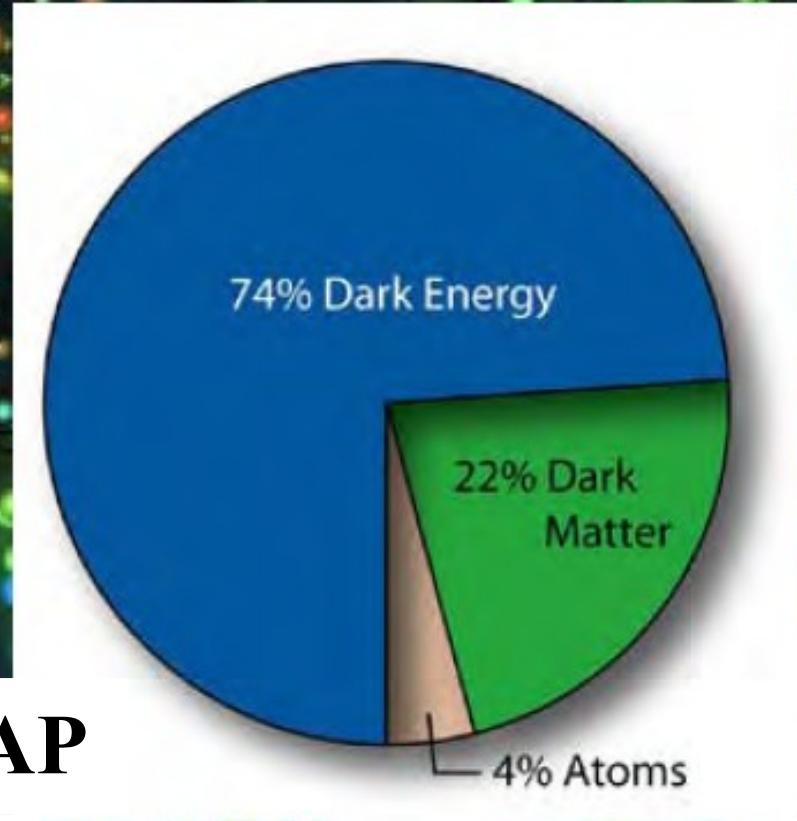
$$\Omega_{DM} = 0,233 \pm 0,013$$

$$\Omega_\Lambda = 0,726 \pm 0,015$$

$$H_0 = 70,1 \pm 1,5 \text{ WMAP}$$

$$t_0 = 13,73 \pm 0,12 \text{ Mrd a}$$

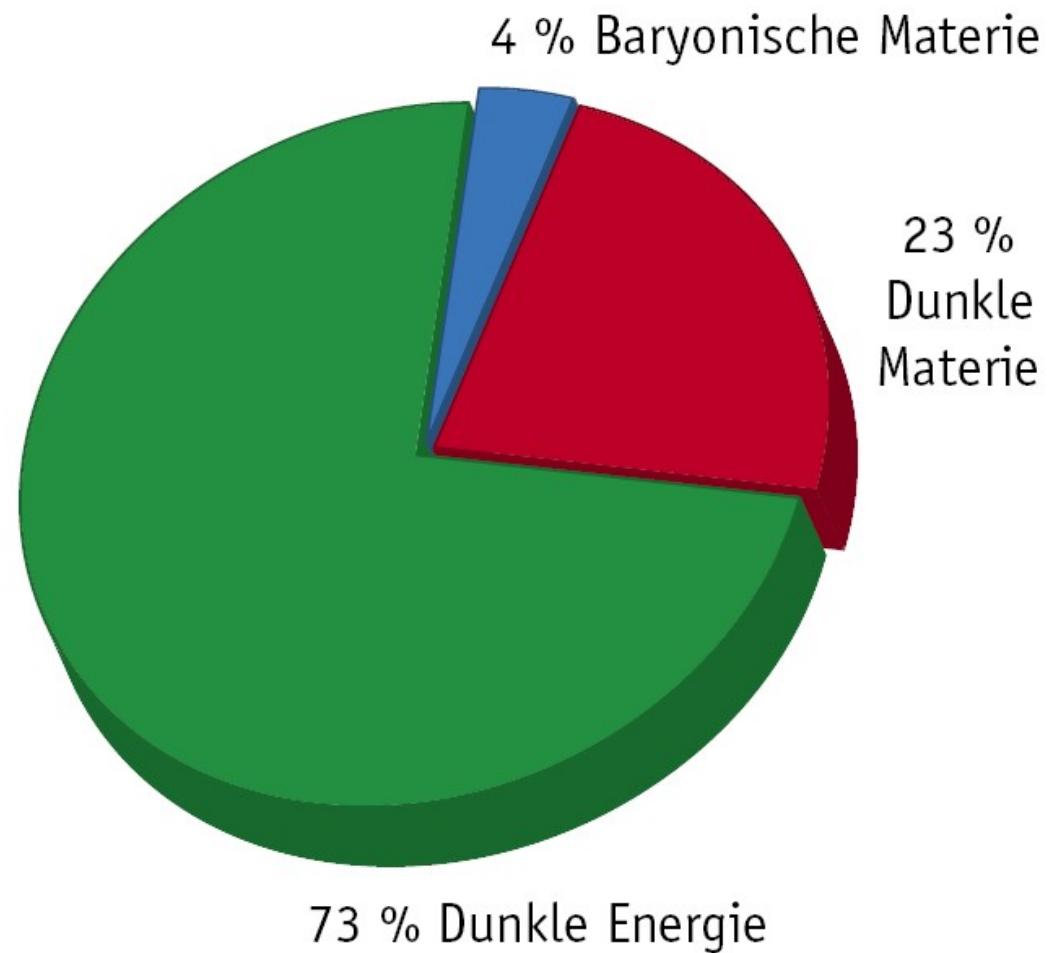
$$w = -1 \text{ Kosm Konst}$$



Das Universum ist dominiert  
von der dunklen Seite

# Die Materie des Universums

Dunkle Materie  
und Dunkle  
Energie sind die  
bestimmenden  
Energiebeiträge  
des Universums.



Was sind sie?

# Zusammenfassung

Keine physikalische Identifizierung der Dunklen Materie mit einem Elementarteilchen (möglicherweise ein supersymmetrisches Teilchen → CERN/LHC)

Keine physikalische Erklärung für die Dunkle Energie. Elementarteilchenphysik hat eine Vorhersage, die um einen Faktor von  $10^{54}$  bis  $10^{120}$  falsch ist.

Daher die Namen: Dunkel steht für etwas das wir nicht verstehen.

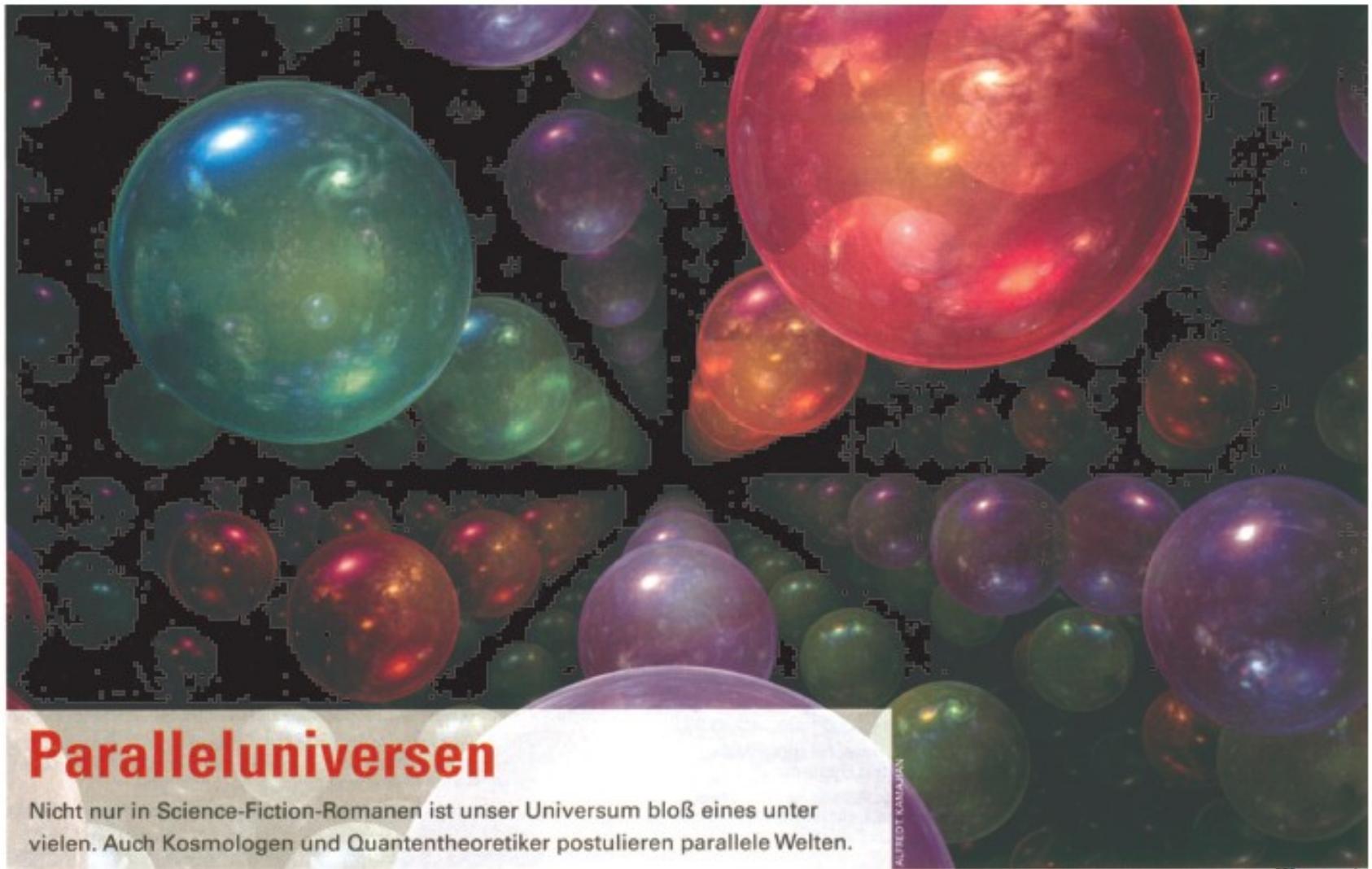
# Ist das Universum Endlich ?

- Diese Frage kann heute prinzipiell nicht beantwortet werden.
- ~~✗ →~~ Der Parameter  $k$  ist nicht messbar.
- ~~✗ →~~ Nur  $\Omega_k = -k R_H^2/R_0^2$  kann gemessen werden
- ~~✗ →~~ Heutiger Grenzwert  $|\Omega_k| < 0,01$ .
- Angenommen  $R_0 = 30 R_H \rightarrow \Omega_k = -0,001$ .
  - Aus physikalischen Gründen erwarte ich  $k = +1$ . Platonisches Argument!

# Der kosmische Jackpot - Multiversen

- Alex Vilenkin, Martin Rees, ... propagieren die Theorie des „Multiversums“. **Demnach sind Naturgesetze nicht eindeutig festgelegt. Sie lassen einen gewissen Spielraum.** Deshalb gebe es eine Vielzahl von Sub-Universen in einem einzigen Multiversum, spekuliert Rees. Unser Urknall wäre nicht der einzige. Neben unserem Universum gibt es unzählige andere. Wir sehen sie nicht, weil sie in einer abgetrennten Raumzeit existieren. Manches Universum lebte vielleicht nur wenige Mikrosekunden. Ein anderes Universum hat vielleicht Sterne hervorgebracht, aber keine Planeten wie die Erde. Und **unser eigenes Universum hatte genau die richtigen Naturgesetze**, um 14 Milliarden Jahre nach dem Urknall intelligente Menschen hervorzubringen, die sich über den Ursprung des Universums den Kopf zerbrechen.

# Deutungen: Ein Multiversum?

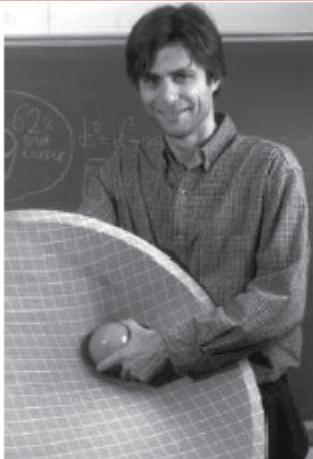


## Paralleluniversen

Nicht nur in Science-Fiction-Romanen ist unser Universum bloß eines unter vielen. Auch Kosmologen und Quantentheoretiker postulieren parallele Welten.

## Deutungen: Entweder – Oder

---



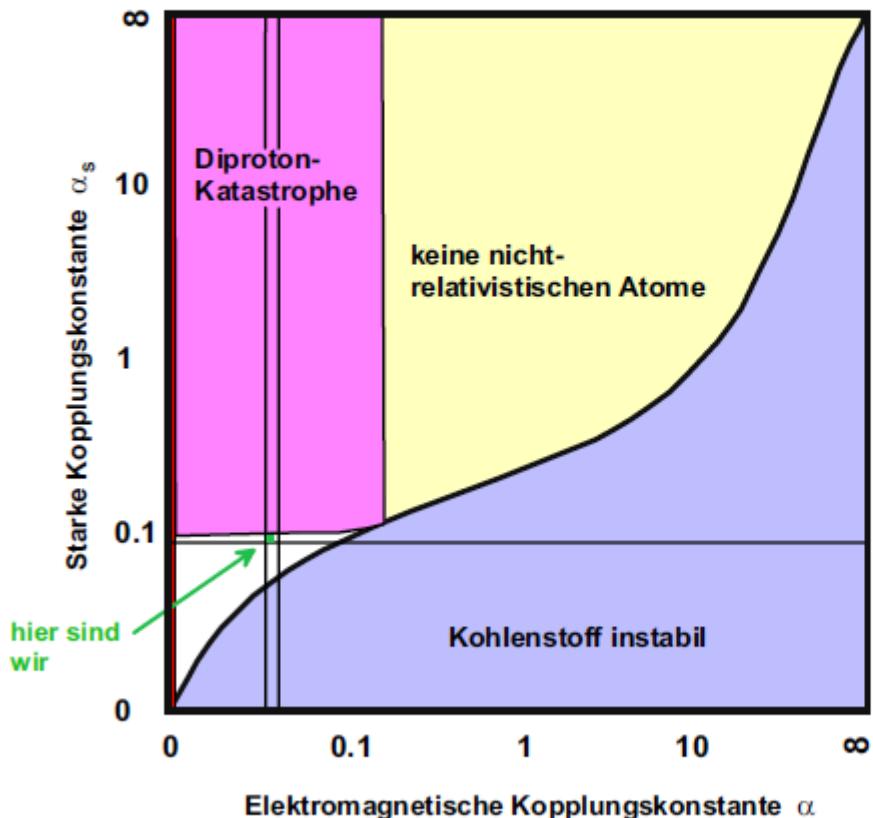
**Prof. Dr. MAX TEGMARK (\*1967)**

Ph.D. University of California at Berkeley (1994)  
Research Associate, Max-Planck-Institut für  
Physik, München (9/94-9/96)  
Hubble Fellow, member, Institute for  
Advanced Study (10/96-6/99)  
Assistant Professor, Dept. of Physics  
and Astronomy, Univ. of Pennsylvania (7/99- )

*„Es gibt zwei mögliche Erklärungen: Entweder wurde das Universum von einem Schöpfer speziell für uns entworfen. Oder es gibt eine große Anzahl von Universen, jedes mit unterschiedlichen Werten der fundamentalen Konstanten, und wir befinden uns, was kaum überrascht, in einem Universum, in dem die Konstanten genau den richtigen Wert haben, um Galaxien, Sterne und Leben zuzulassen.“*

(zit. nach M. CHOWN: Das Universum nebenan. S. 140. München: dtv 2003.)

# Feinabstimmung von Kopplungskonstanten



Feinabstimmung der elektromagnetischen und der starken Wechselwirkung

nach M. TEGMARK in:  
J.D.BARROW, P.C.W.DAVIES, &  
C.L.HARPER (Eds.):  
From Quantum to Cosmos, honoring  
John Wheeler's 90th birthday.  
Cambridge Univ. Press (2003)

# Feinabstimmung: Kohlenstoff

Synthese von Kohlenstoff  $^{12}\text{C}$  aus  $^4\text{He}$

(HOYLE, FOWLER 1954)

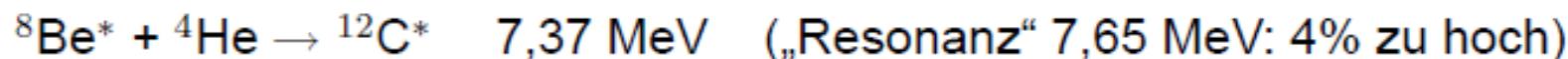


${}^8\text{Be}^*$ -Halbwertszeit:  $6,7 \cdot 10^{-17} \text{ s}$

(lang gegen typischerweise  $10^{-24} \text{ s}$ )

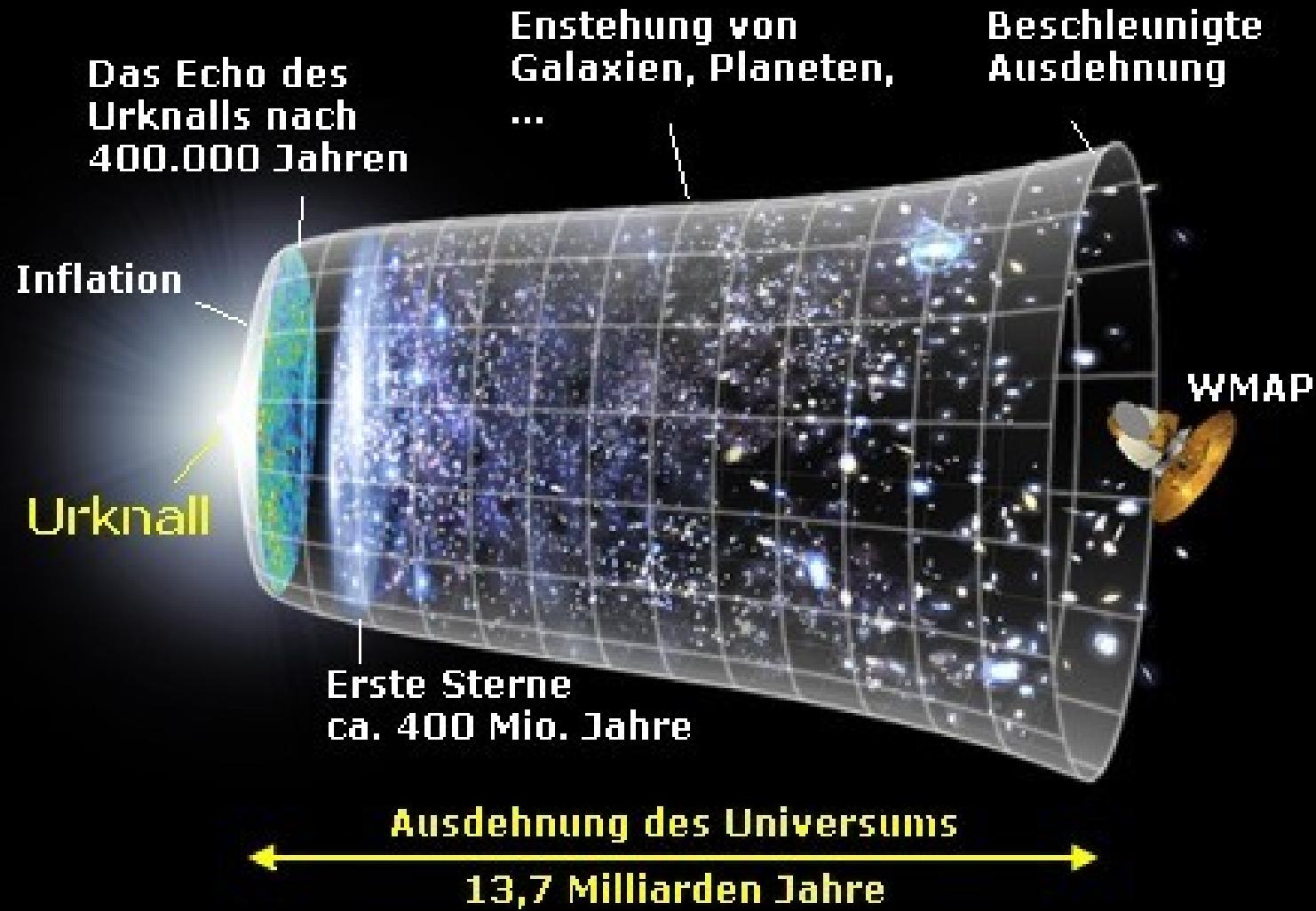
wenn größer: Fusion schwerer Elemente; Katastrophen

wenn kleiner: keine Elemente jenseits Be; keine Biochemie

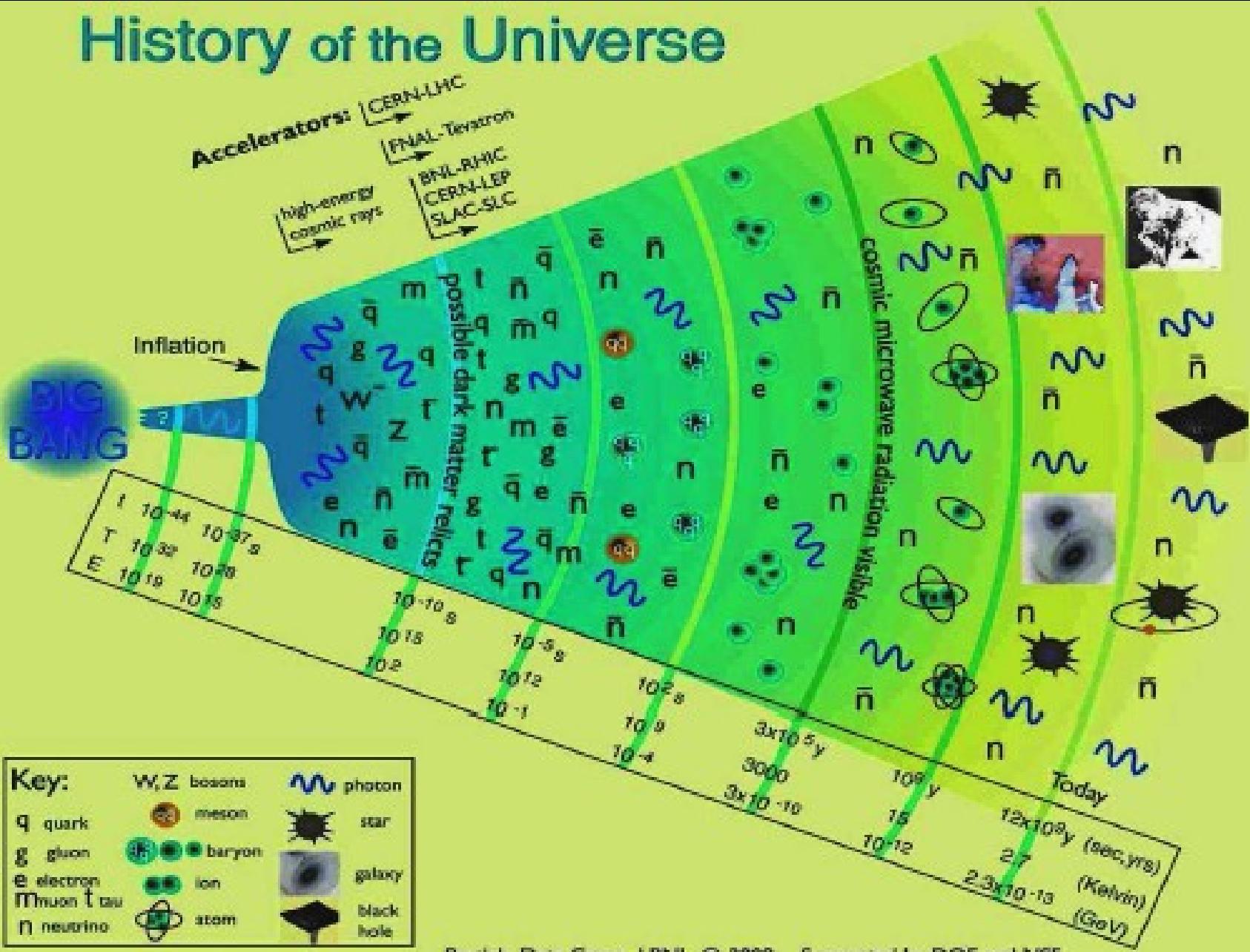


,Nothing has shaken my atheism as much as this discovery.“ (HOYLE)

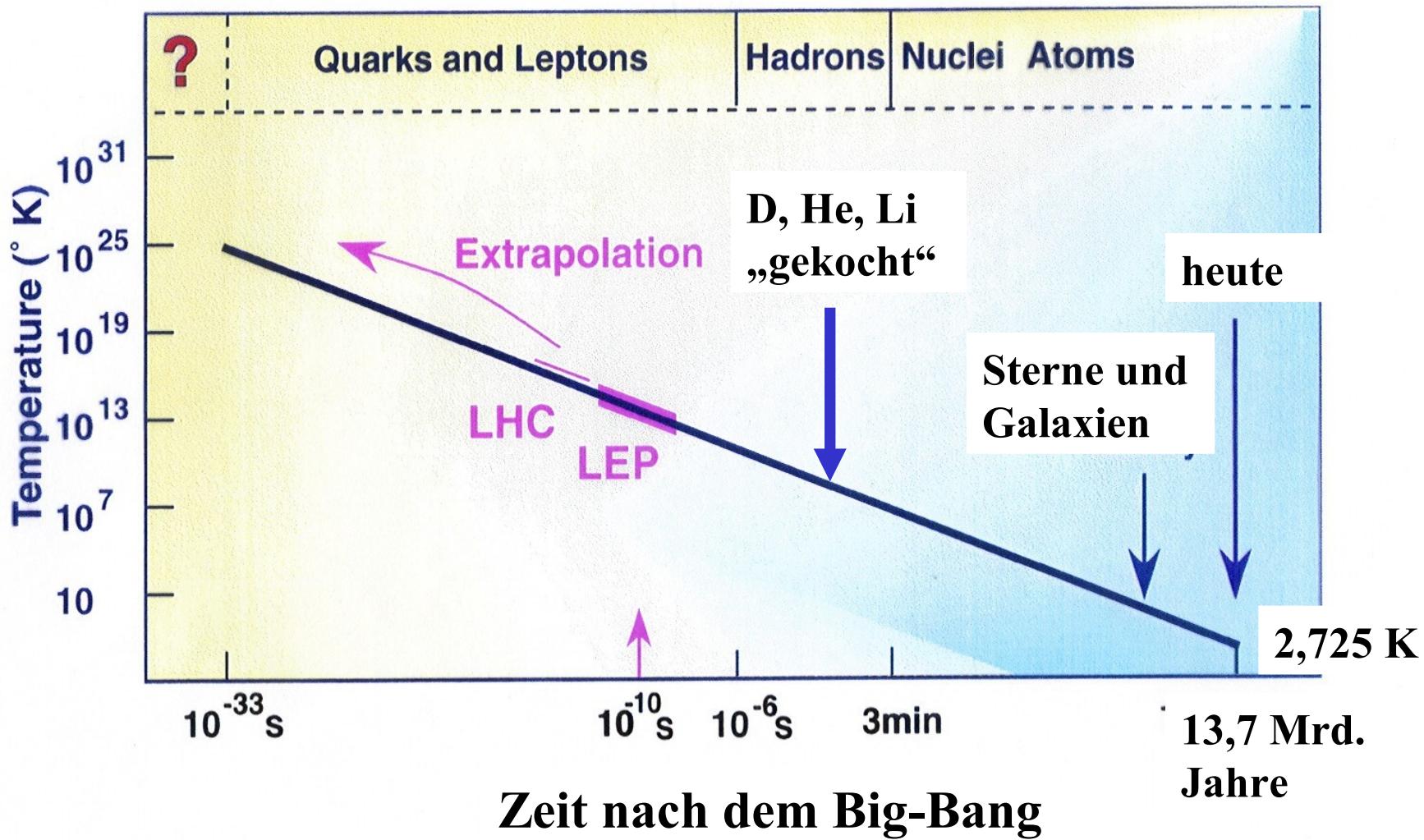
# Die Geschichte des Universums

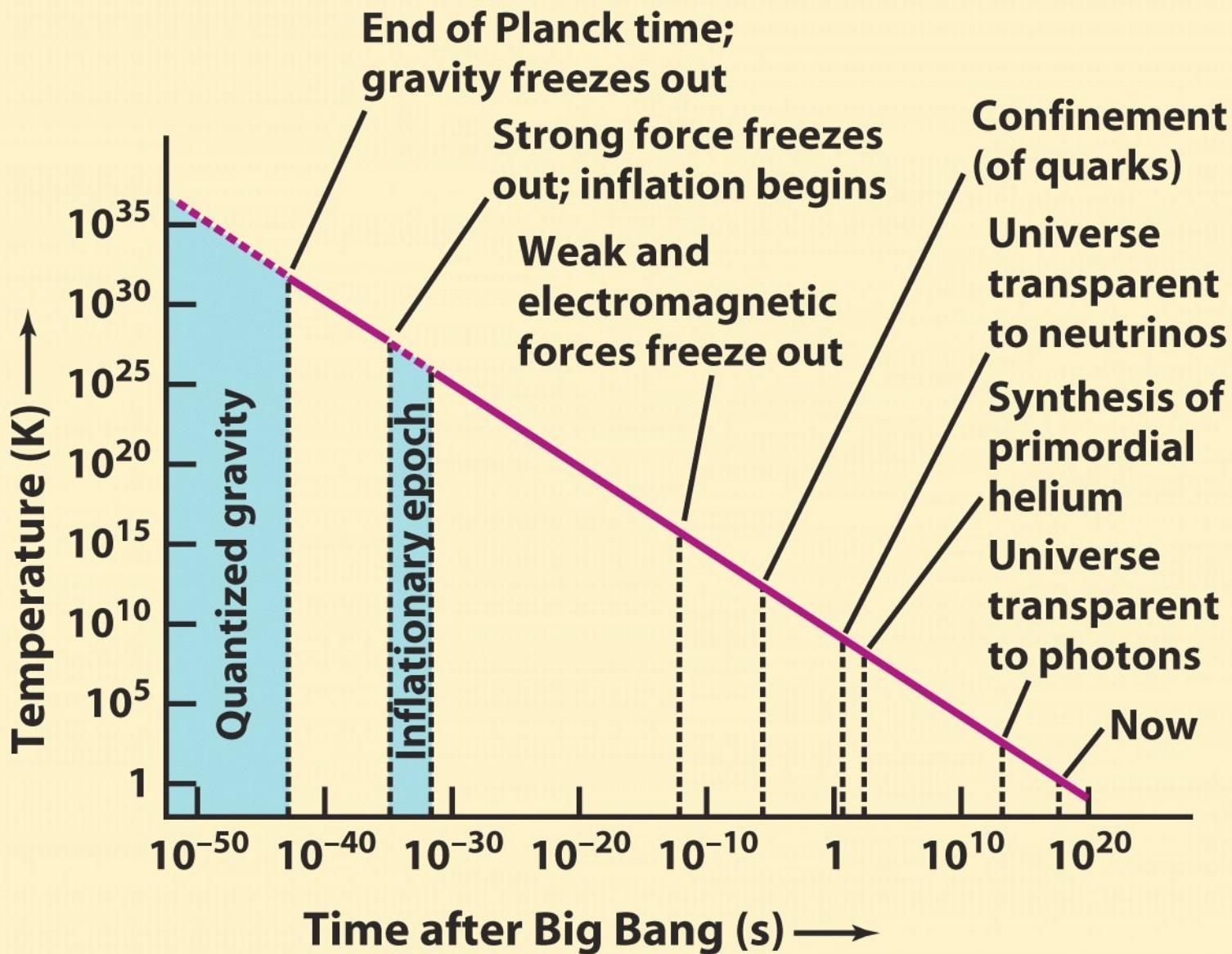


# History of the Universe



# Temperatur des Universums





# Die Entdeckung der 3K-Hintergrundstrahlung

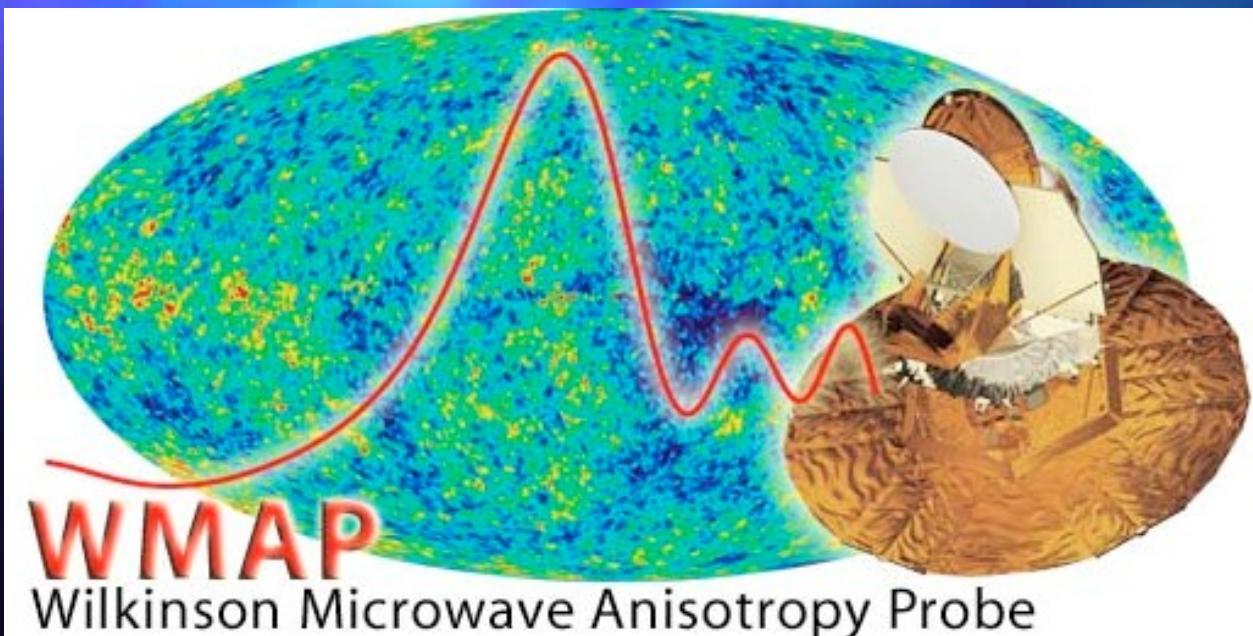
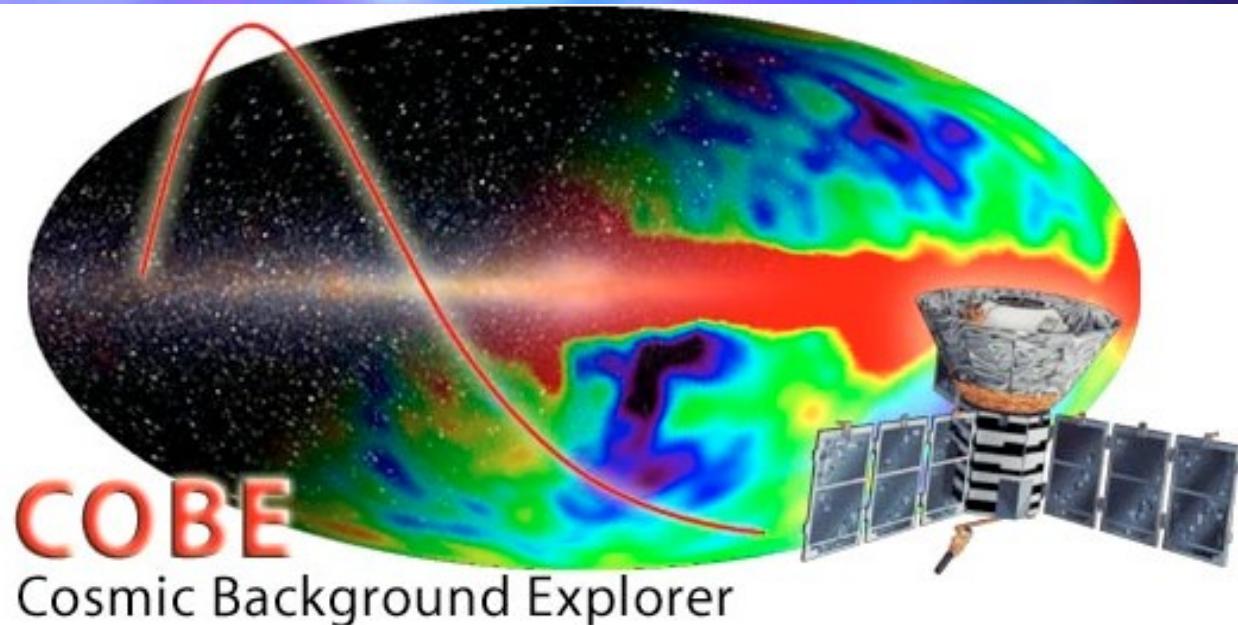
1964 entdeckten die beiden Radio Ingenieure **Arno Penzias** und **Robert Wilson** bei der Eichung einer Antenne **ein Strahlungssignal im Mikrowellenlängenbereich ( $\lambda = 7,15$  cm)**

Da dieses Signal keine periodischen Schwankungen zeigte und aus allen Richtungen in gleicher Stärke kam, schien es **kosmischen Ursprungs** zu sein.



(beide erhielten später den Nobelpreis für ihre Entdeckung)

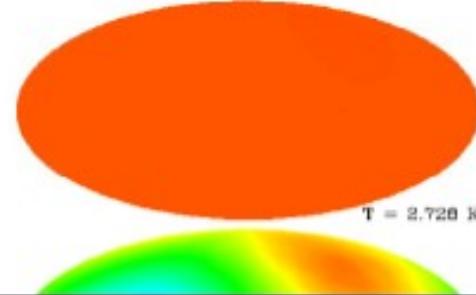
Vermes-  
sung  
3K CMB





[http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2006/](http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2006/)

## Nobelpreis für Physik 2006

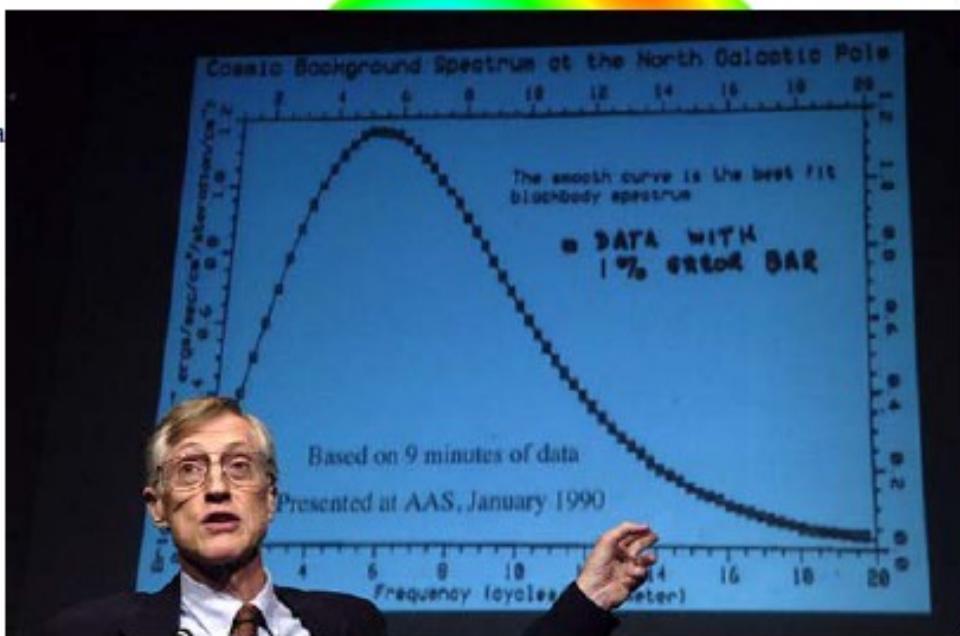


**John C. Mather    George F. Smoot**

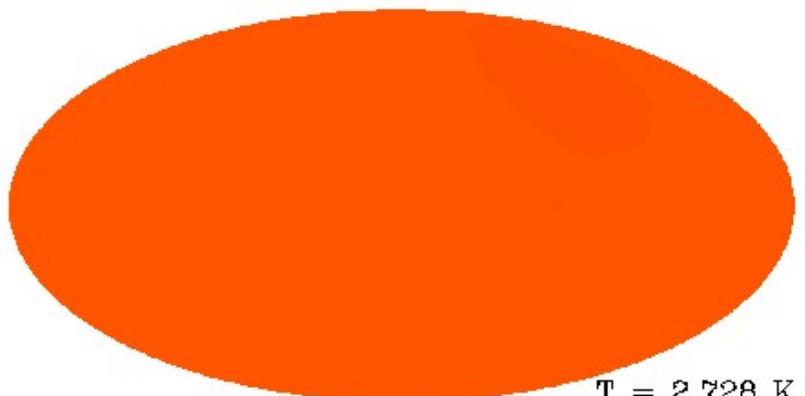
NASA

Goddard Space Flight Center  
Greenbelt, MD,  
USA

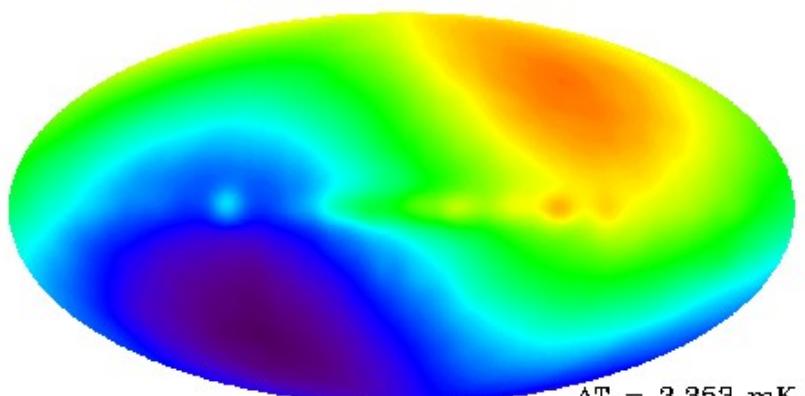
University of California  
Berkeley, CA, USA



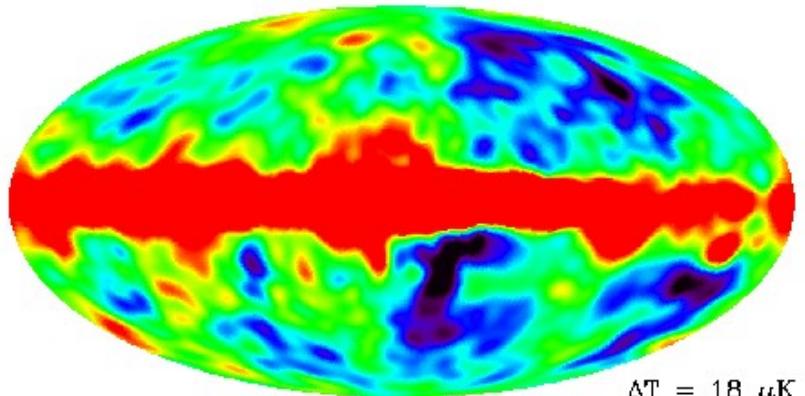
Nobel Laureate Dr. John C. Mather shows some of the earliest data from the NASA Cosmic Background Explorer (COBE) Satellite during a press conference held at the NASA Headquarters in Washington, DC, USA.



$T = 2.728 \text{ K}$

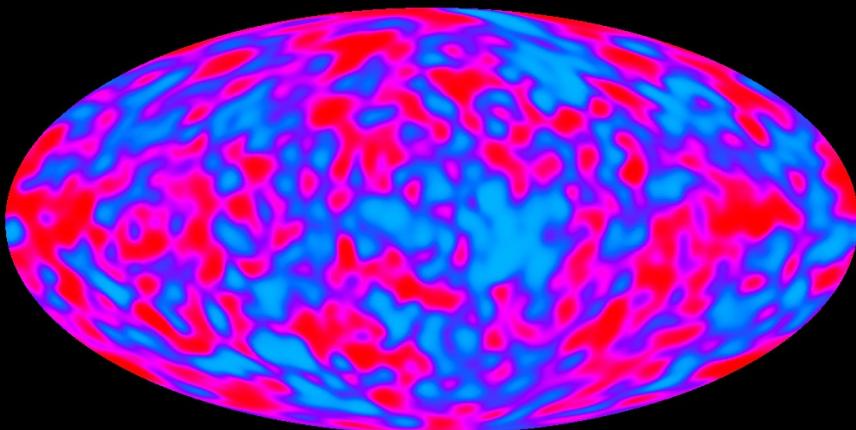
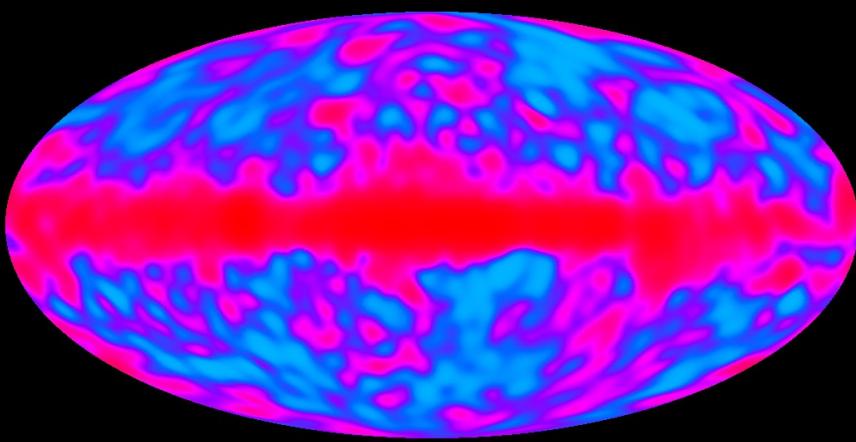
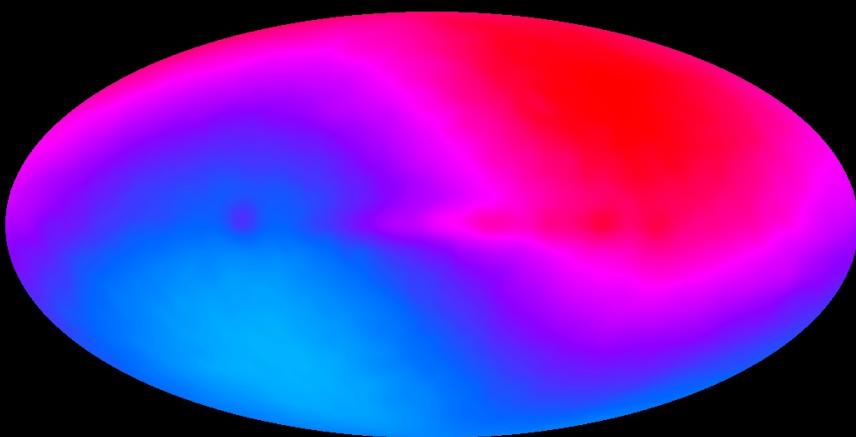


$\Delta T = 3.353 \text{ mK}$

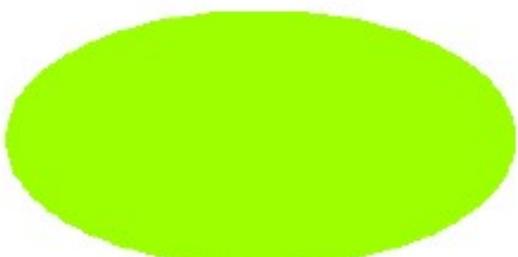


$\Delta T = 18 \mu\text{K}$

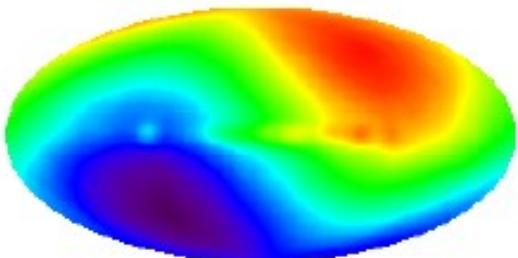
**COBE**



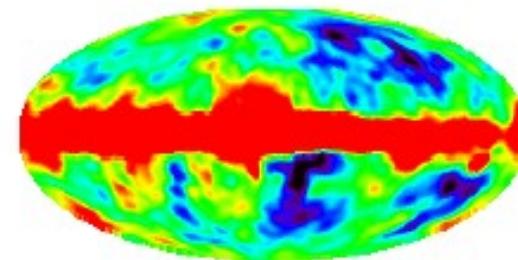
## Hintergrundstrahlung



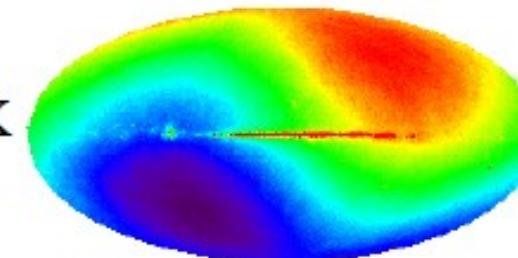
Blau=0K  
Rot=4k



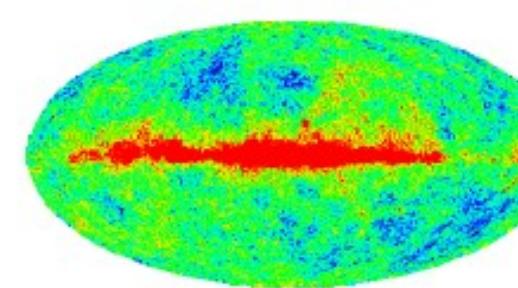
Blau=2.721K  
Rot=2.729K



COBE satelite

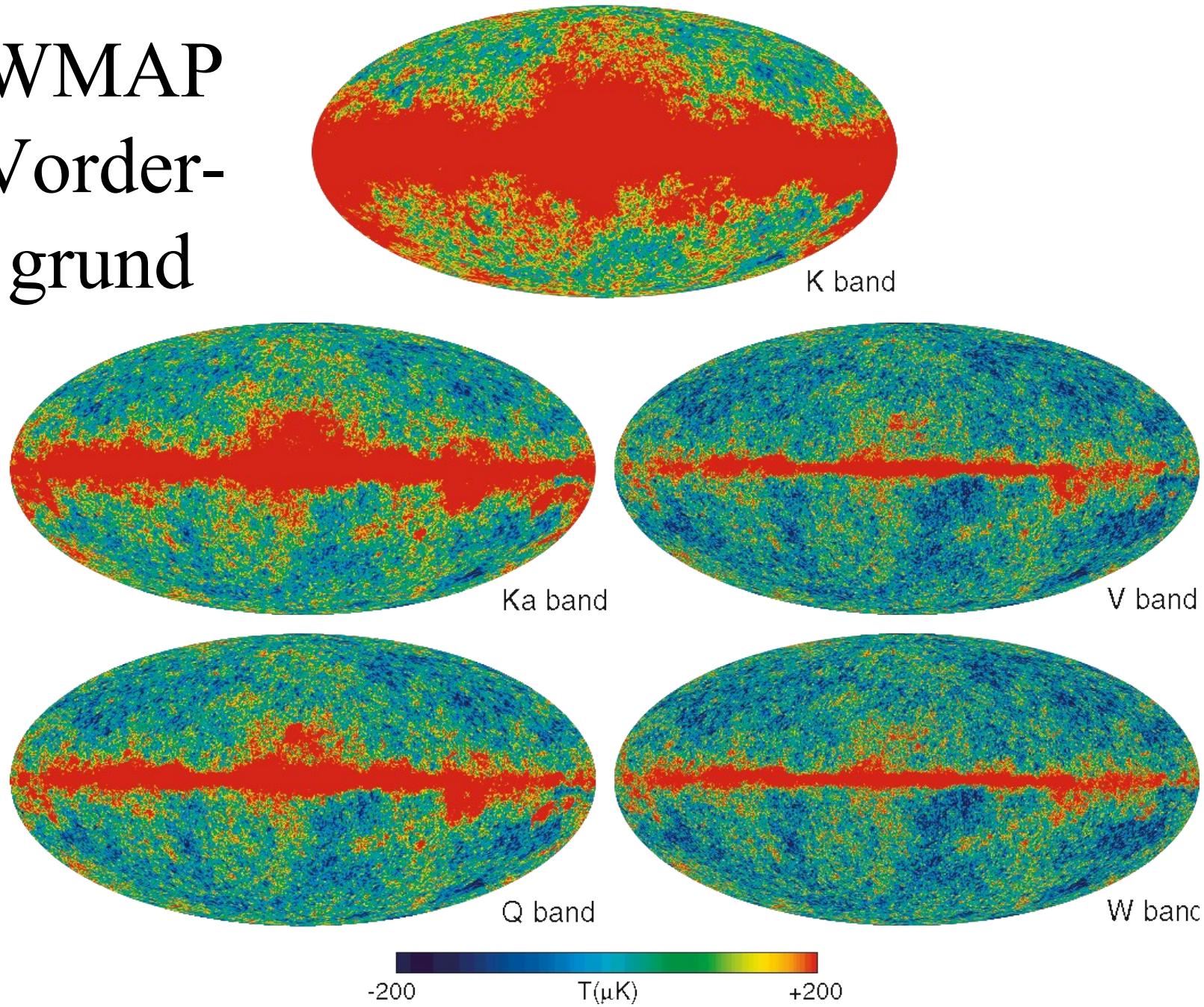


Dipole  
substracted  
Full scale  
0.0002K

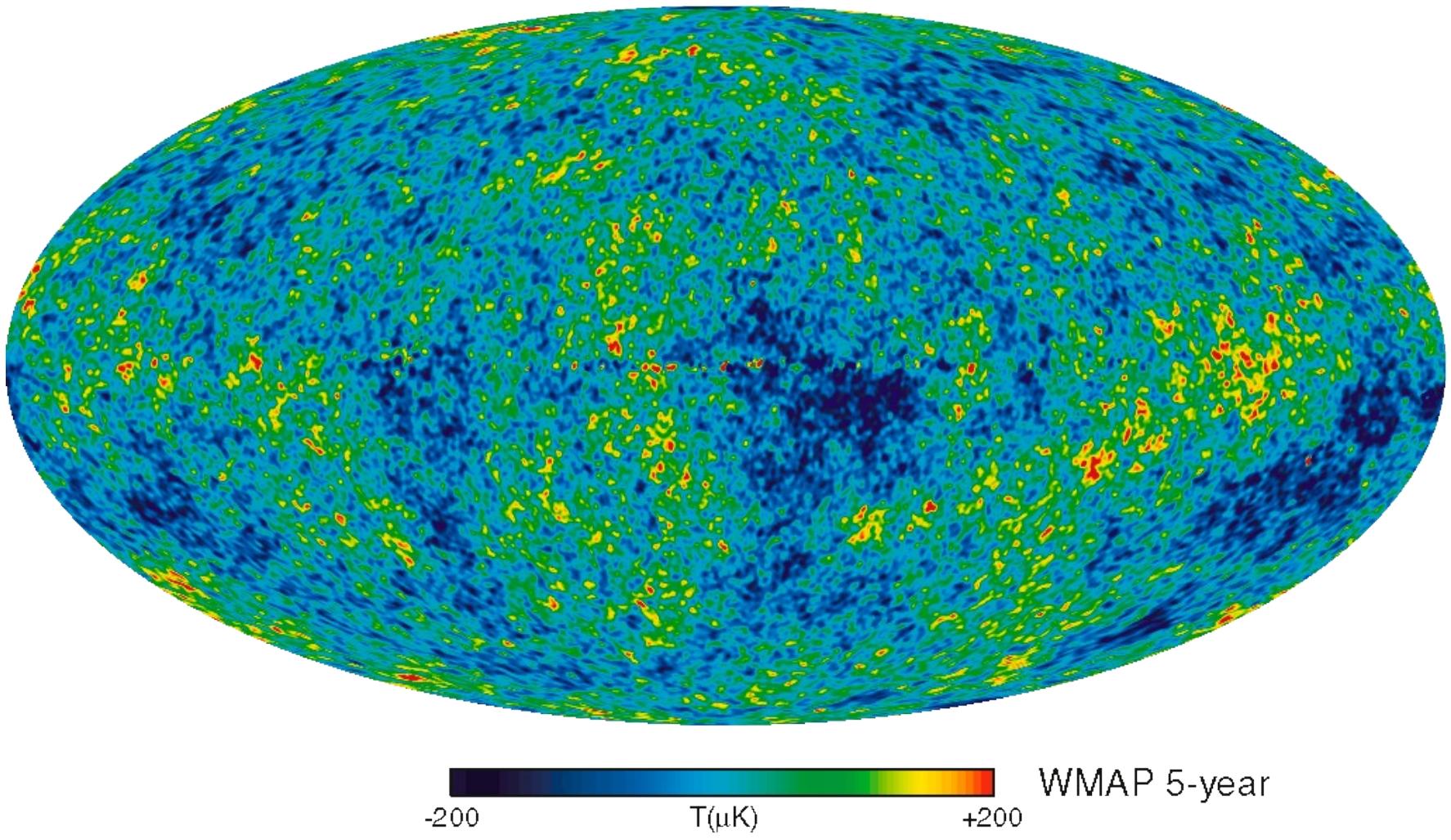


WMAP Fig.2

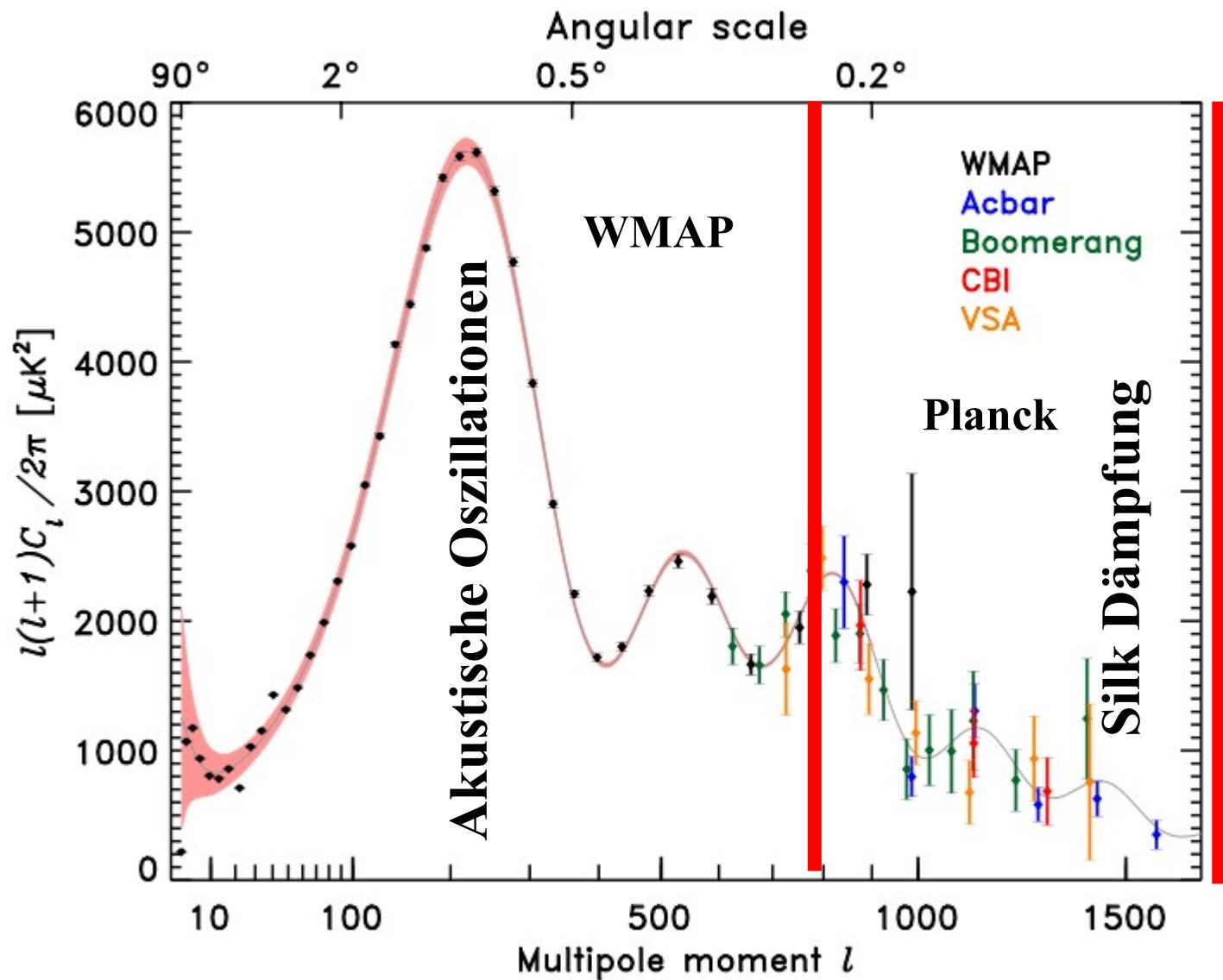
# WMAP Vorder- grund



# CMB Temperaturfluktuationen Vordergrund subtrahiert

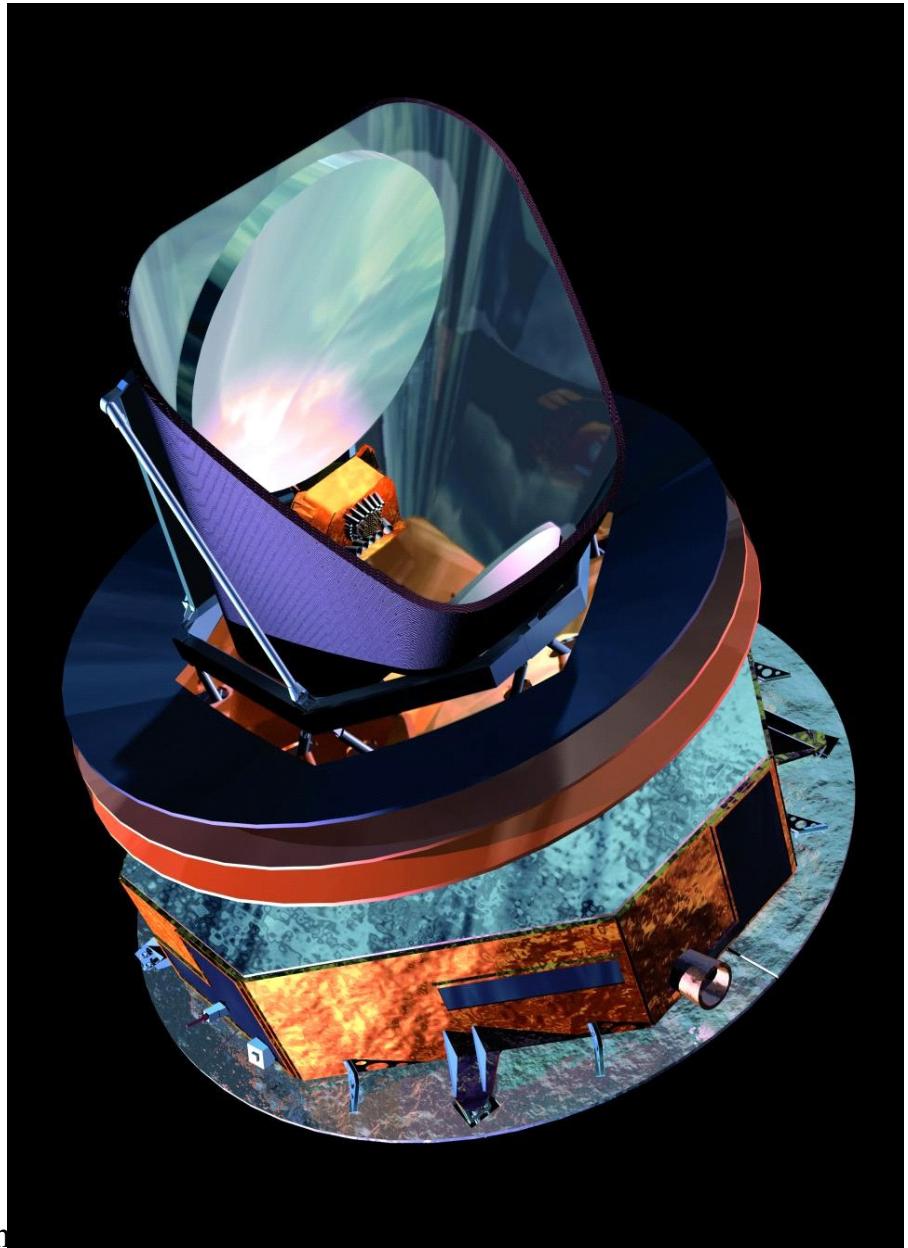


# Winkelskala = 180 Grad/I

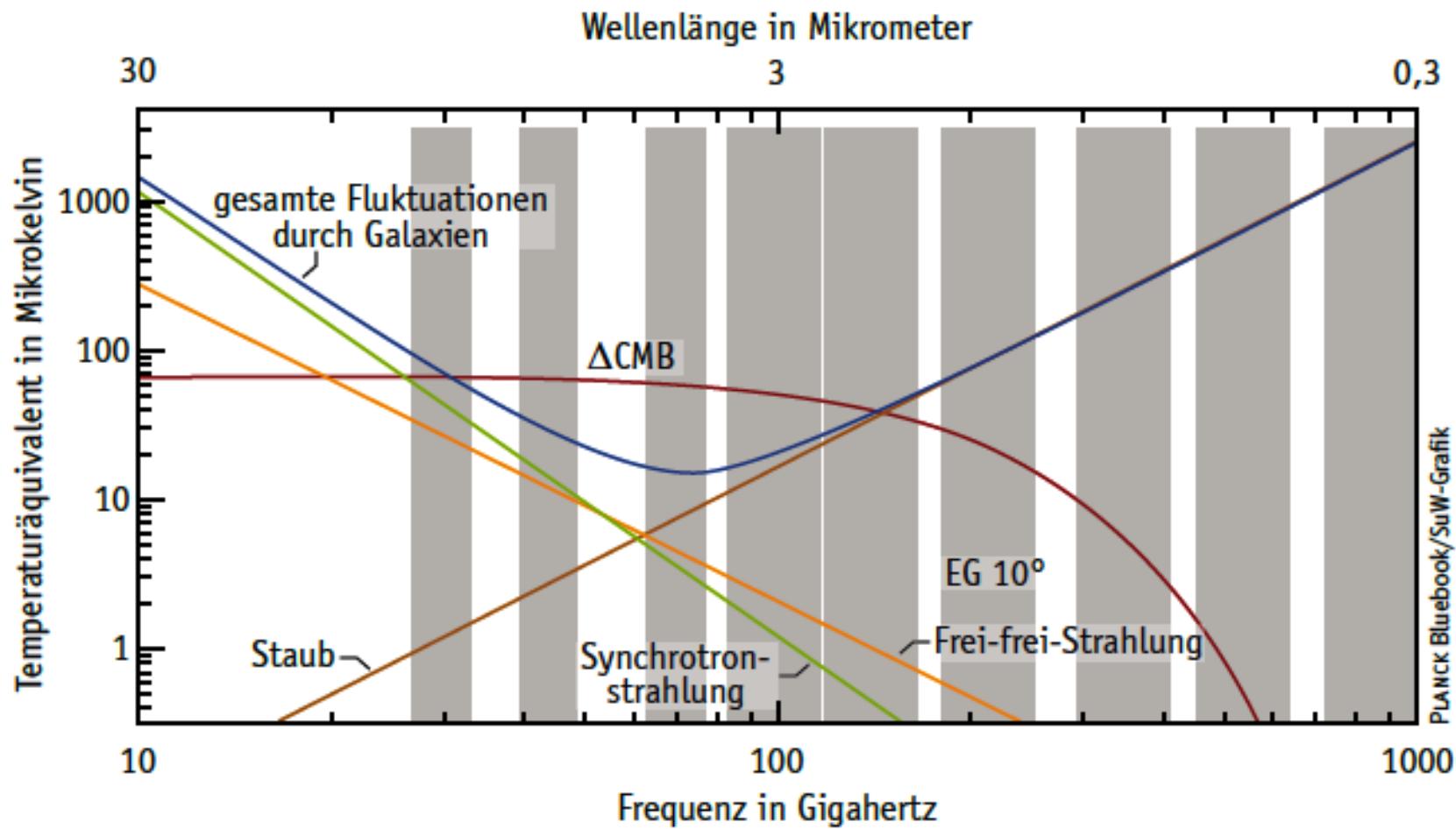


# ESA CMB Mission

- **Planck:**
    - ESA-Satellit
    - Start: 14. Mai 2009
    - Messung der Anisotropien für Winkel größer 5-8 arcmin,  
mit einer Genauigkeit von 2 Mikro-Kelvin!
- Vermessung der Polarisation in der Hintergrundstrahlung.



# 9 Frequenzbänder von Planck



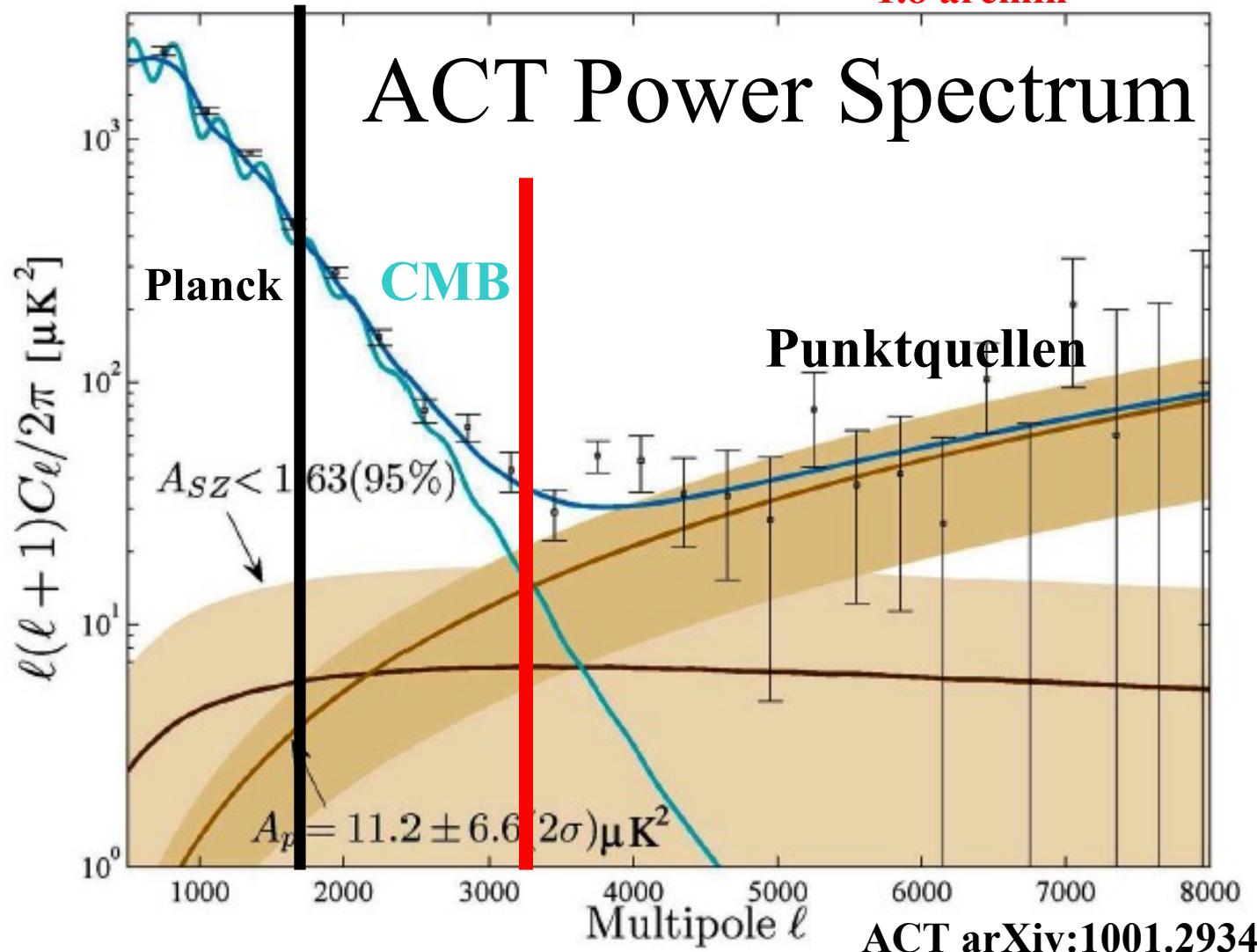
# Atacama Cosmology Telescope ACT



Cerro Toco  
5190 mÜ  
6m Gregorian  
Res > 1 arcmin

1.8 arcmin

# ACT Power Spectrum



# Zusammenfassung

- Verteilung der Galaxien ist homogen und isotrop auf Skalen  $> 100 \text{ Mpc}$ ; CMB isotrop.
- Das Universum der Galaxien expandiert → Hubble Gesetz für geringe Rotverschiebungen ist Konsequenz des rel. Modells.
- Das Kosmologische Prinzip impliziert einen Raum konstanter Krümmung → das heutige Universum im wesentlichen flach.
- Parameter des Friedmann Universums können heute sehr genau vermessen werden (Supernovae, CMB, Haufengas): Hubble-Konstante und Dichteparameter.

# Einstein

„Das Schönste, was  
wir erleben können,  
ist das  
Geheimnisvolle.“

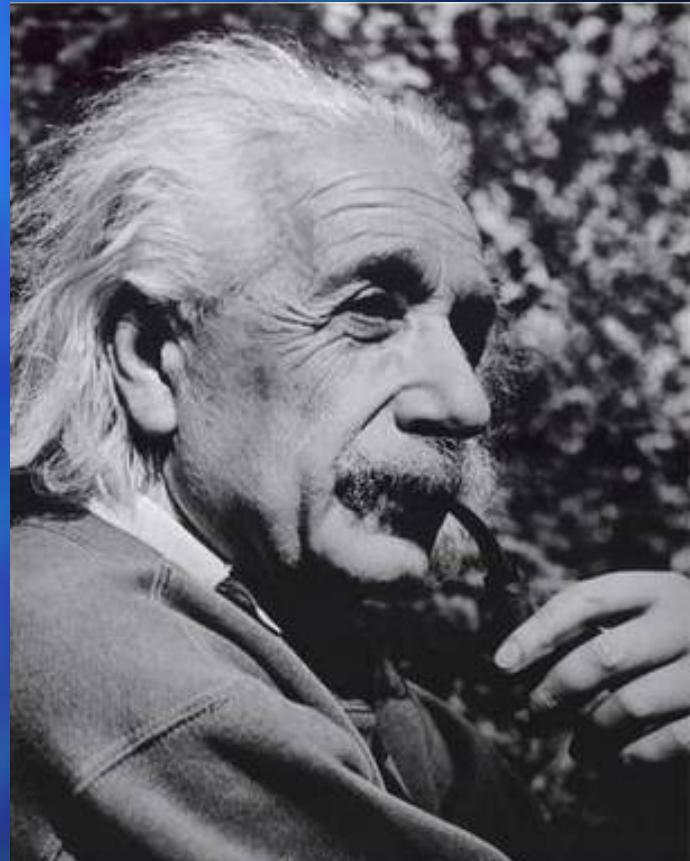
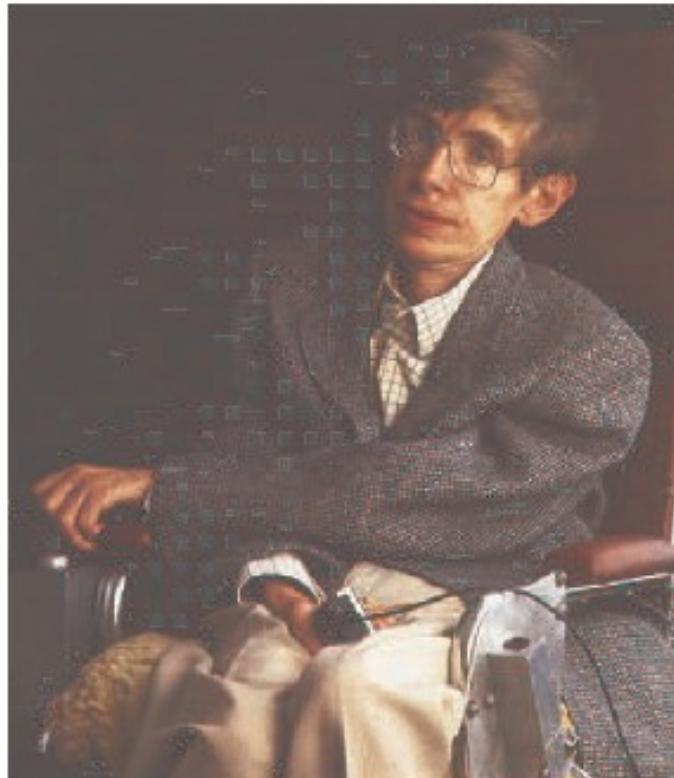


Bild: Web, [www.art.com/.../  
Einstein\\_Great\\_Spirit.htm](http://www.art.com/.../Einstein_Great_Spirit.htm)

# Woher?

---



*„Der Mensch lebt nicht vom Brot allein.  
Wir alle wollen wissen, woher wir kommen.“*

(STEPHEN W. HAWKING)