

# Das neue Bild des Universums



Ergebnisse der Planck  
Satellitenmission

K. Zuber, Inst. f. Kern- und Teilchenphysik

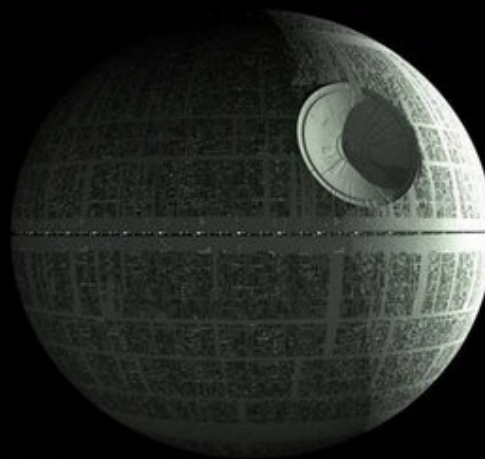
The Planck one-year all-sky survey



(c) ESA, HFI and LFI consortia, July 2010



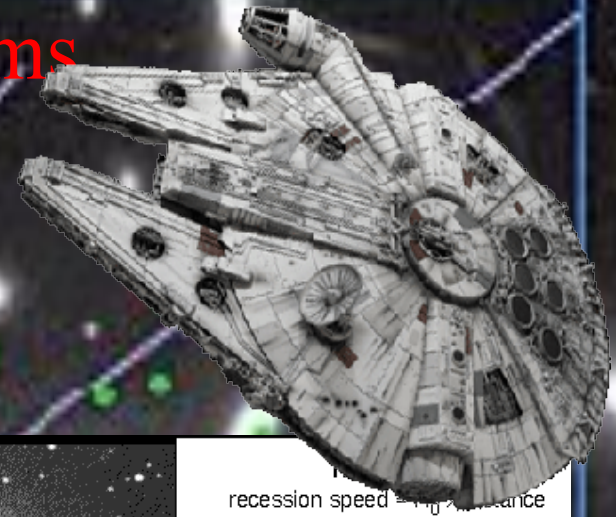






# Die Expansion des Universums

$$H_0 = 100$$

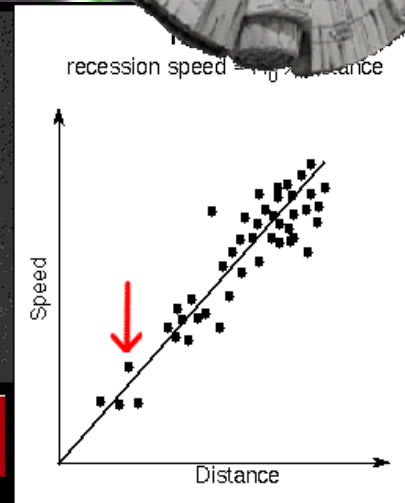
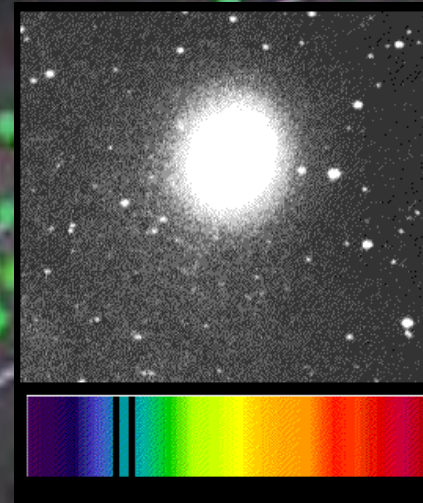


Velocity  $V_c$  (km s<sup>-1</sup>)

13,000  
12,000  
11,000  
10,000  
9,000  
8,000  
7,000  
6,000  
5,000  
4,000  
3,000  
2,000  
1,000

Distance  $d$  (Mpc)

0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200

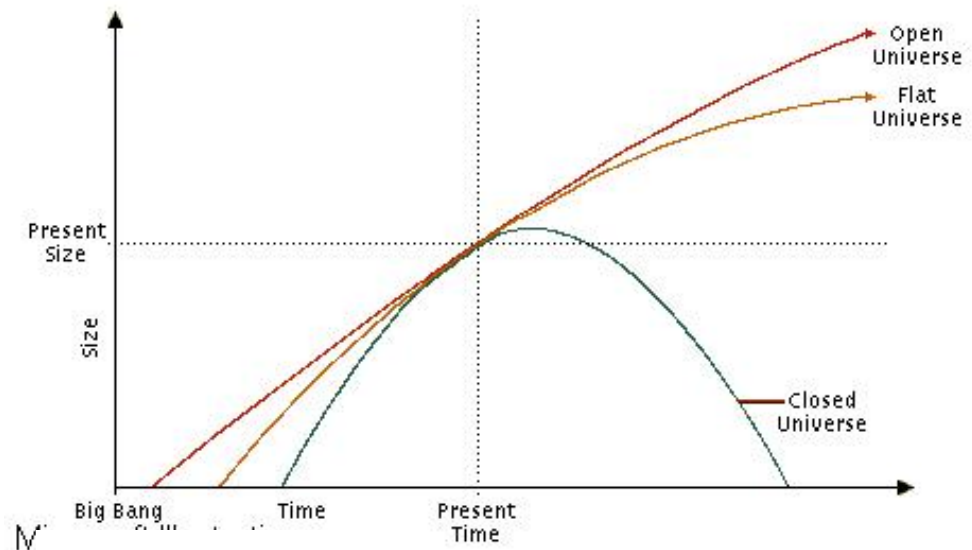
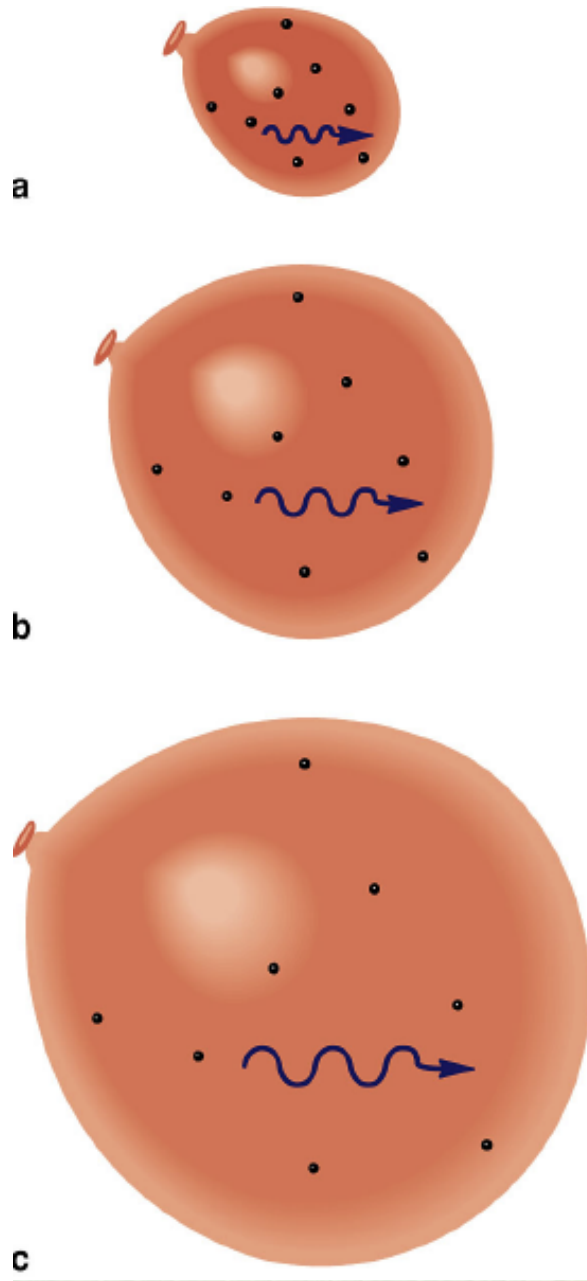


$$v = cz = H_0 r$$

Je weiter weg, desto schneller



# Die Entwicklung des Universums



Die entscheidende Größe ist  
die Materiedichte im Universum!

Kritische Dichte = flaches Universum

## Hubble Parameter

$$H = \frac{\dot{R}}{R}$$

$$h_{70} = \frac{H_0}{70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}}$$

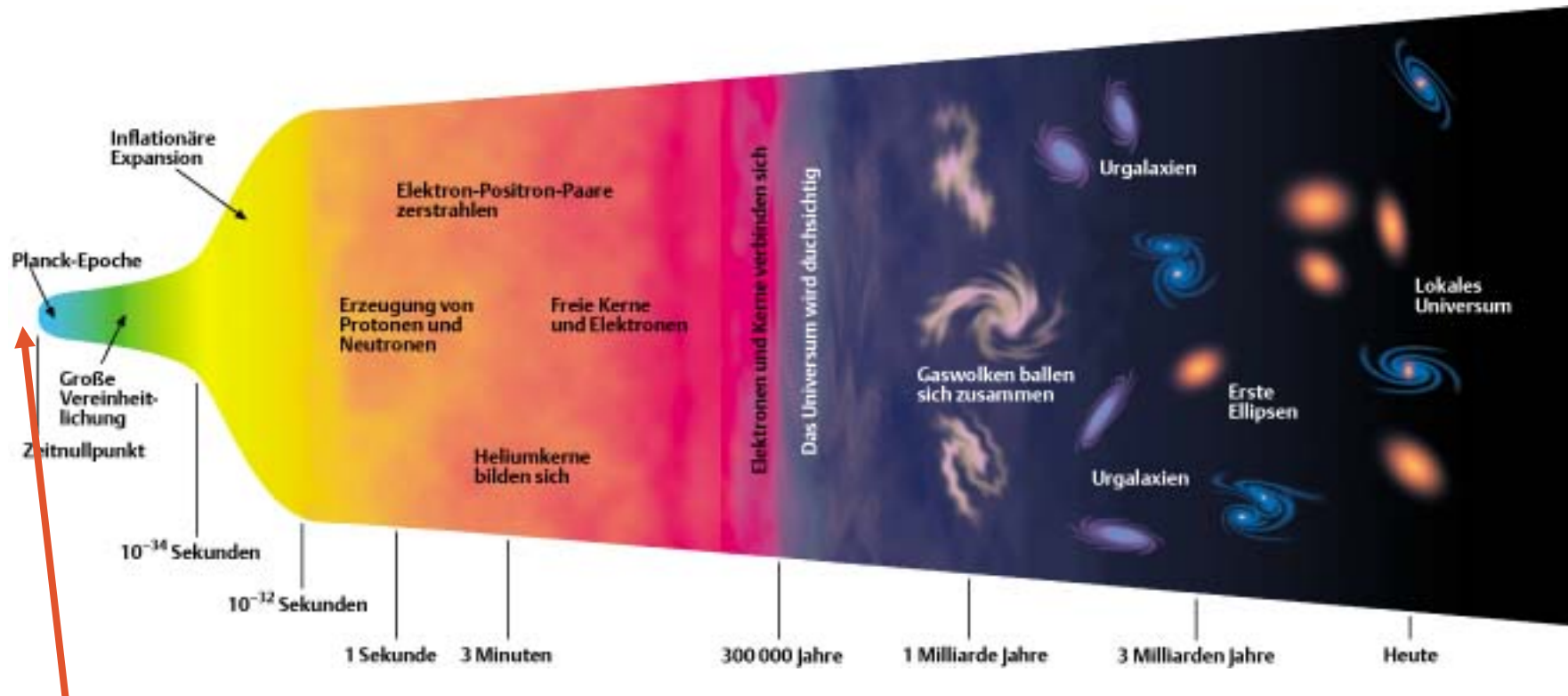
## Kritische Dichte

$$\rho_c = \frac{3H_0^2}{8G\pi} = 0.92 h_{70}^2 * 10^{-25} \text{ kg m}^{-3} = 5 \text{ protons} / \text{m}^3$$

$$\Omega = \frac{\rho}{\rho_c}$$



# Die Evolution des Universums



Entstehung  
leichter  
Atomkerne

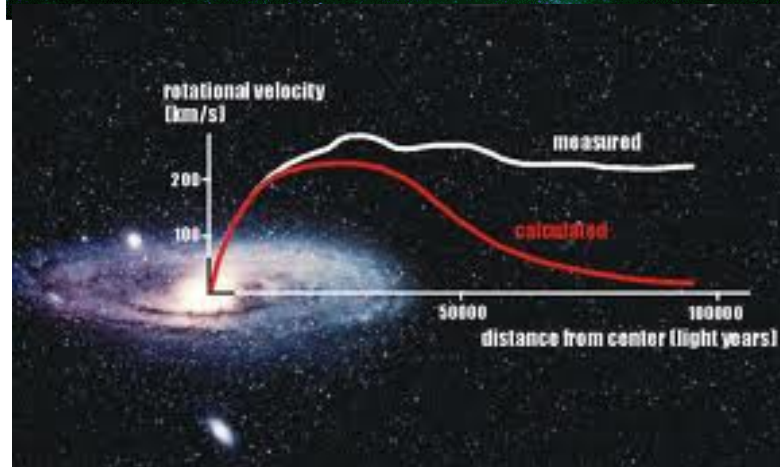
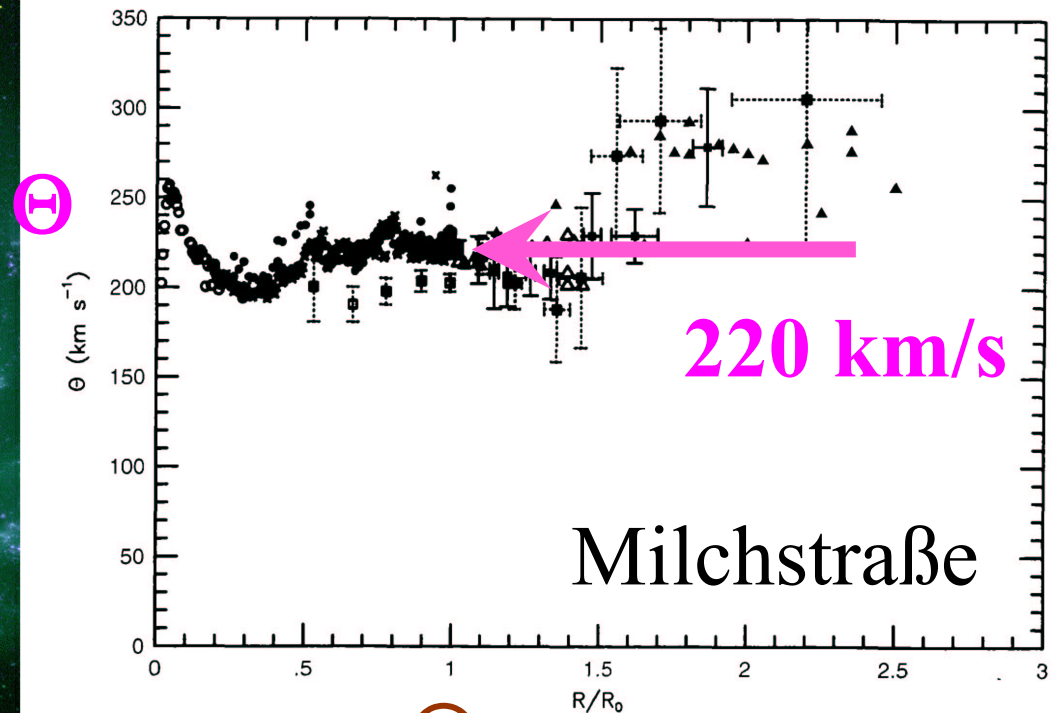
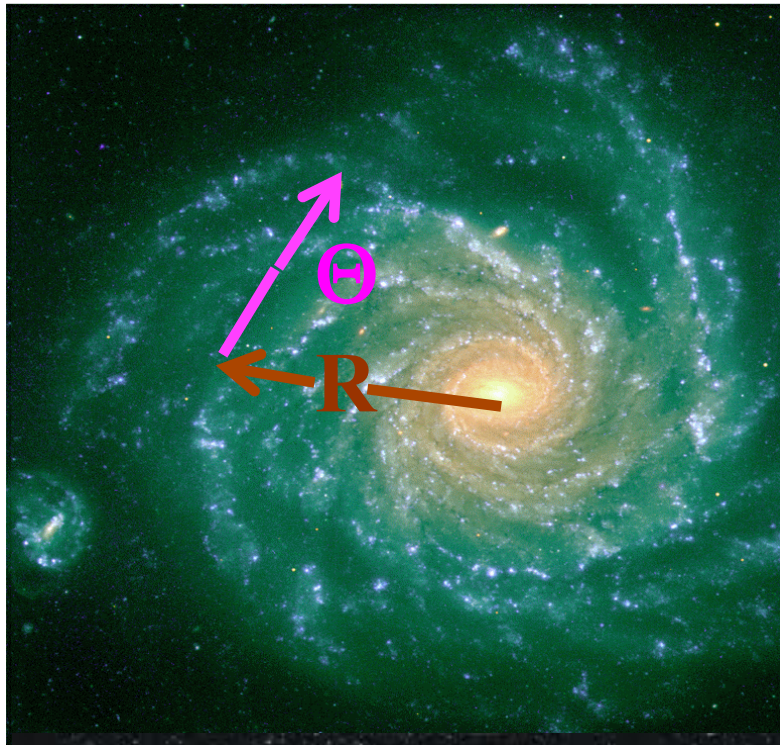
Entstehung  
leichter  
Atome

Beobachtung von  
großen Strukturen  
(Galaxienhaufen)





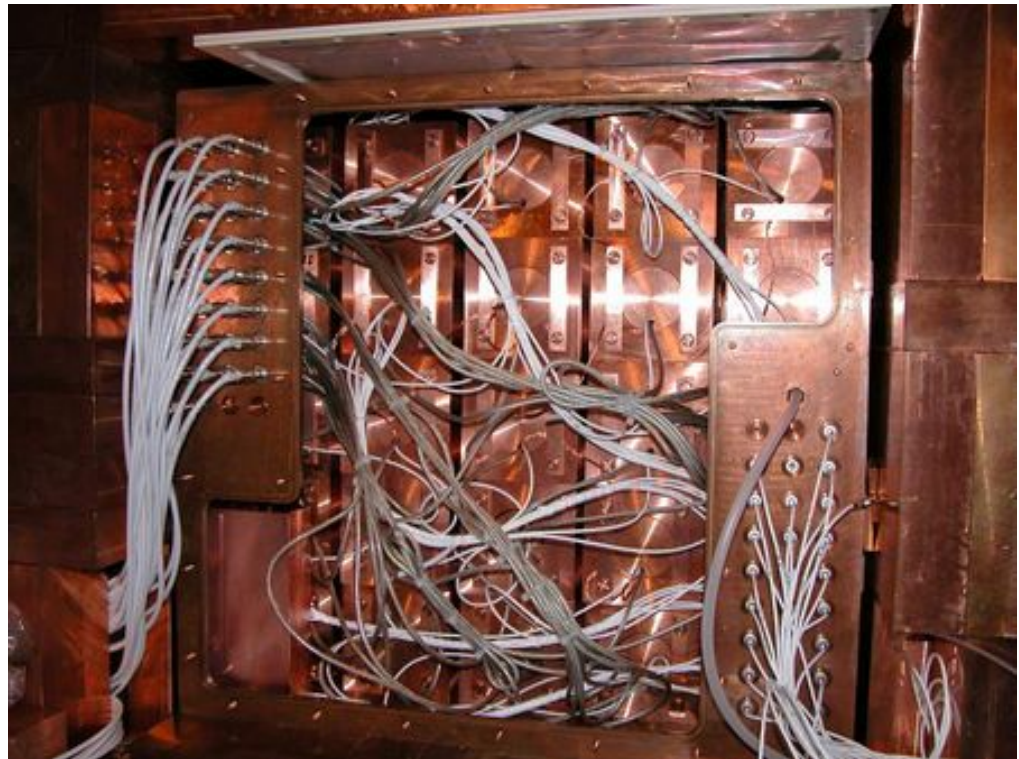
# Rotationskurven von Galaxien



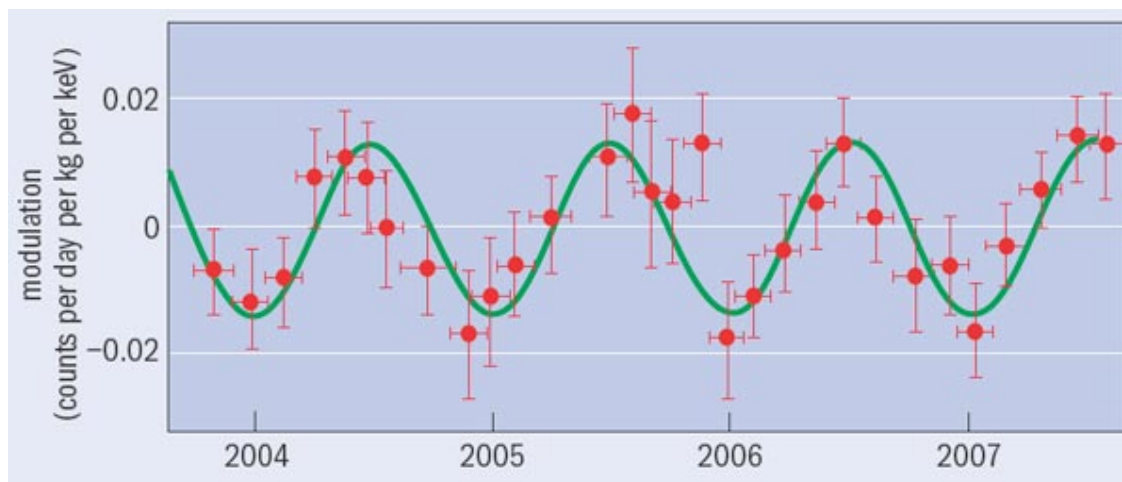
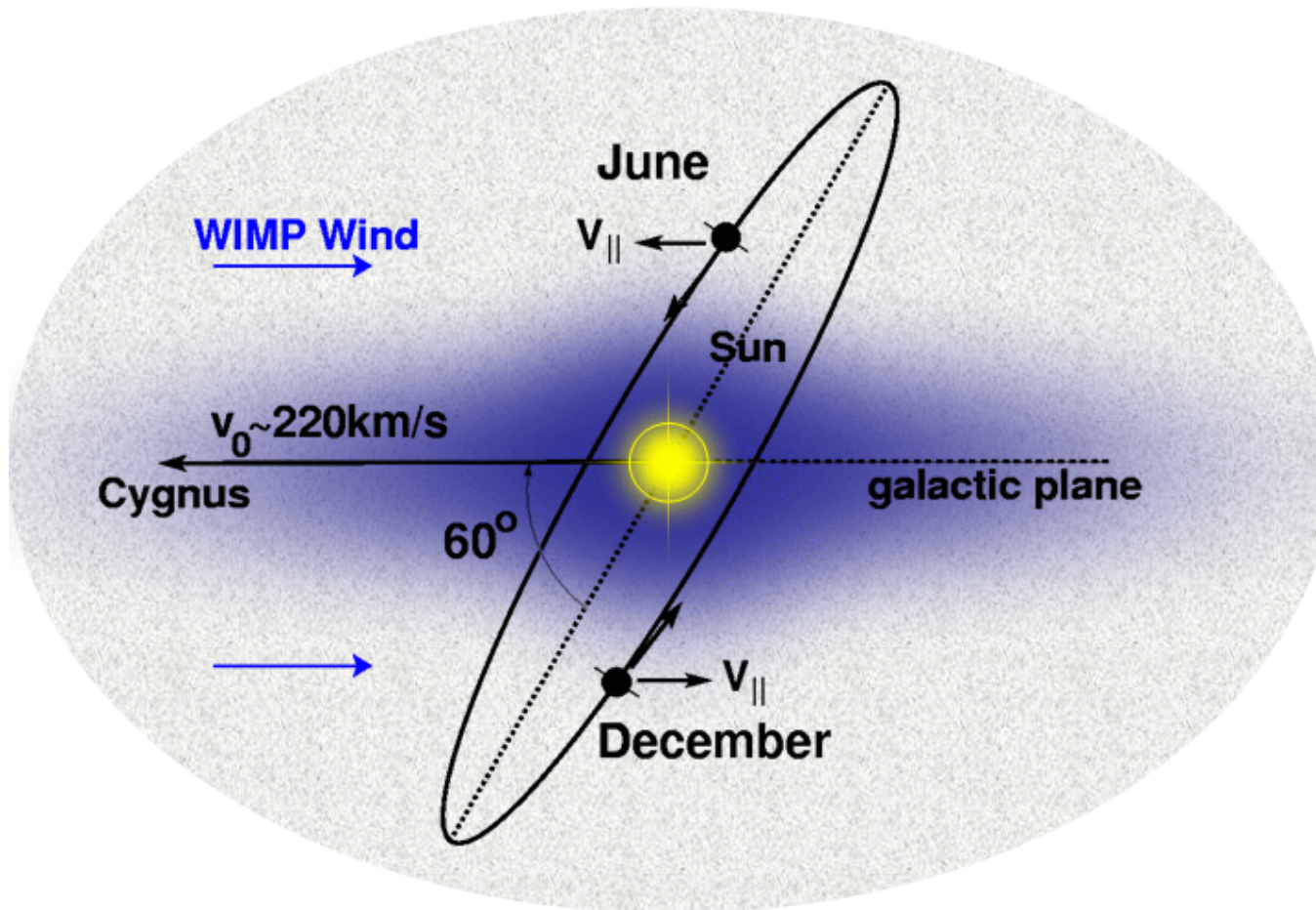
Flache Rotationskurve im  
Gegensatz zu Newton

Benötigt massives Halo









**Ist das der  
Nachweis?????**



... Die größte Eselei meines Lebens...“

A. Einstein

Die kosmologische Konstante





# Entfernungsmodul

$$\mu = m_V - M_V = 5 \log \frac{r}{10 \text{ pc}} + A$$

Benötigt unabhängige Messung von  $M_V$

## Standardkerzen

Hyaden

Übergang von Parallaxen  
zu spektroskopischen  
Methoden

RR-Lyrae

$$M_V = -0.6$$



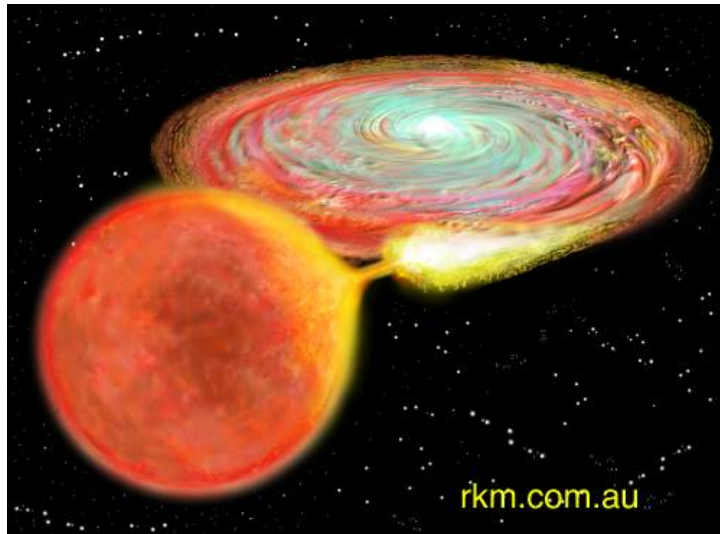
Cepheiden

$$M_V = a + b \log P$$

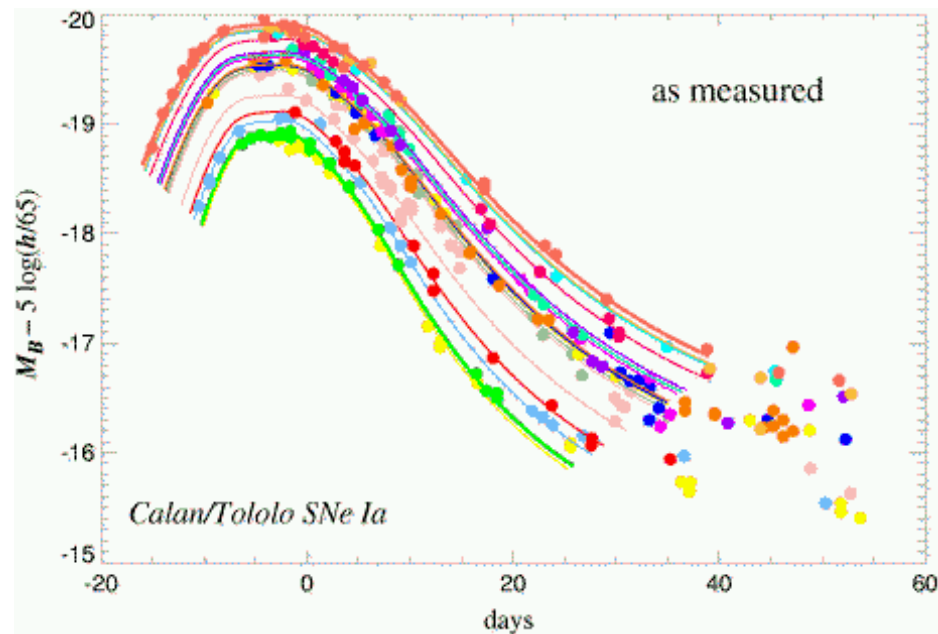
Supernovae Typ Ia

$$M_V = -19.2$$

# Supernova Typ Ia als Standardkerze

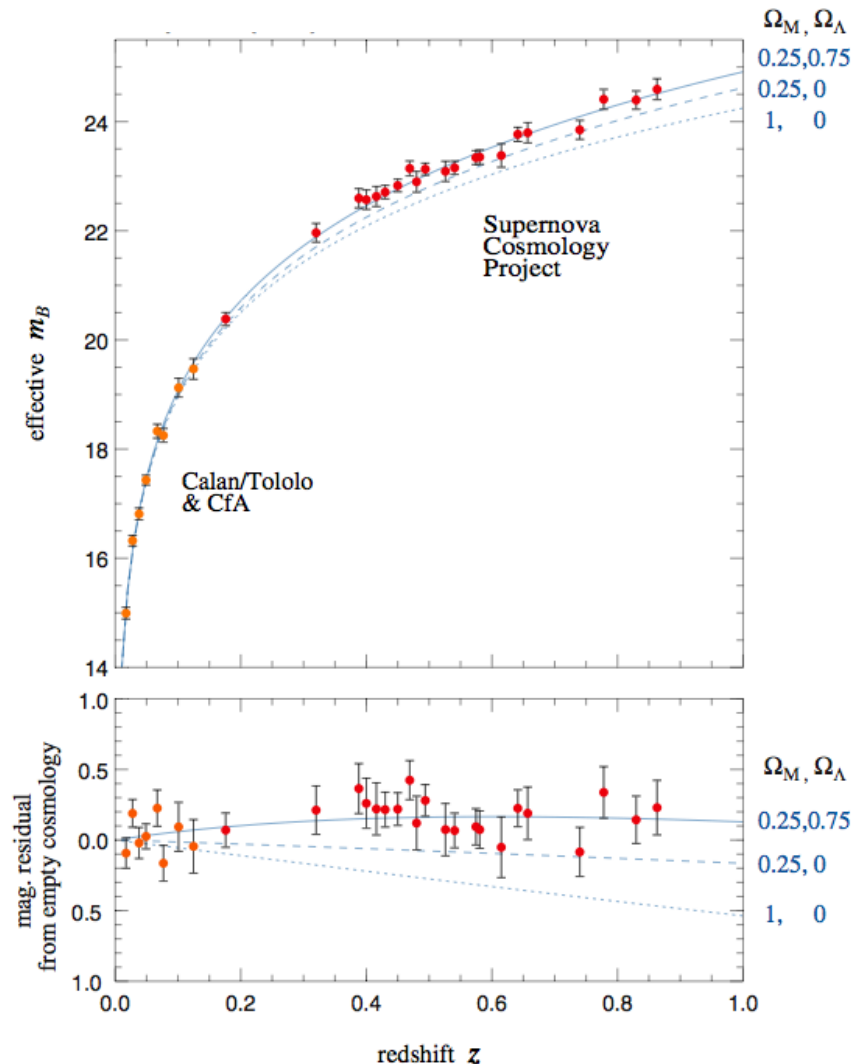


Die gleiche Explosionsart  
immer die gleiche  
Lichtkurve





Wir schreiben das Jahr 1996....



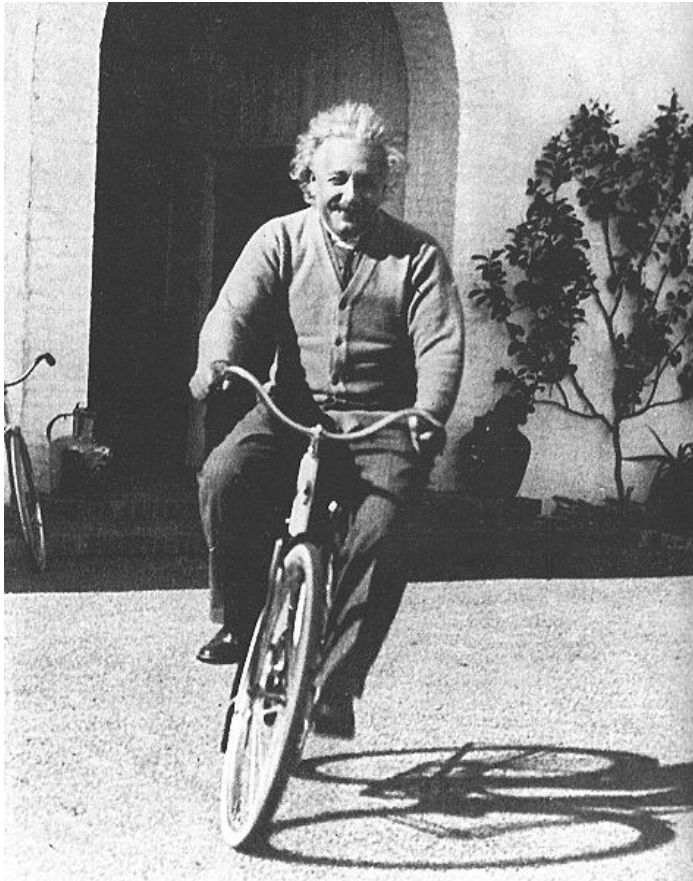
Beobachtung von  
Supernova mit großer  
Entfernung

Ist nicht mit den damaligen  
kosmologischen Modellen  
vereinbar

Erfordert neuen Beitrag  
zur Dichte im Universum  
Bester Kandidat:

Die kosmologische  
Konstante = die Energie des  
Vakuums (dunkle Energie)

## Wir schreiben das Jahr 1916...



## Allgemeine Relativitätstheorie

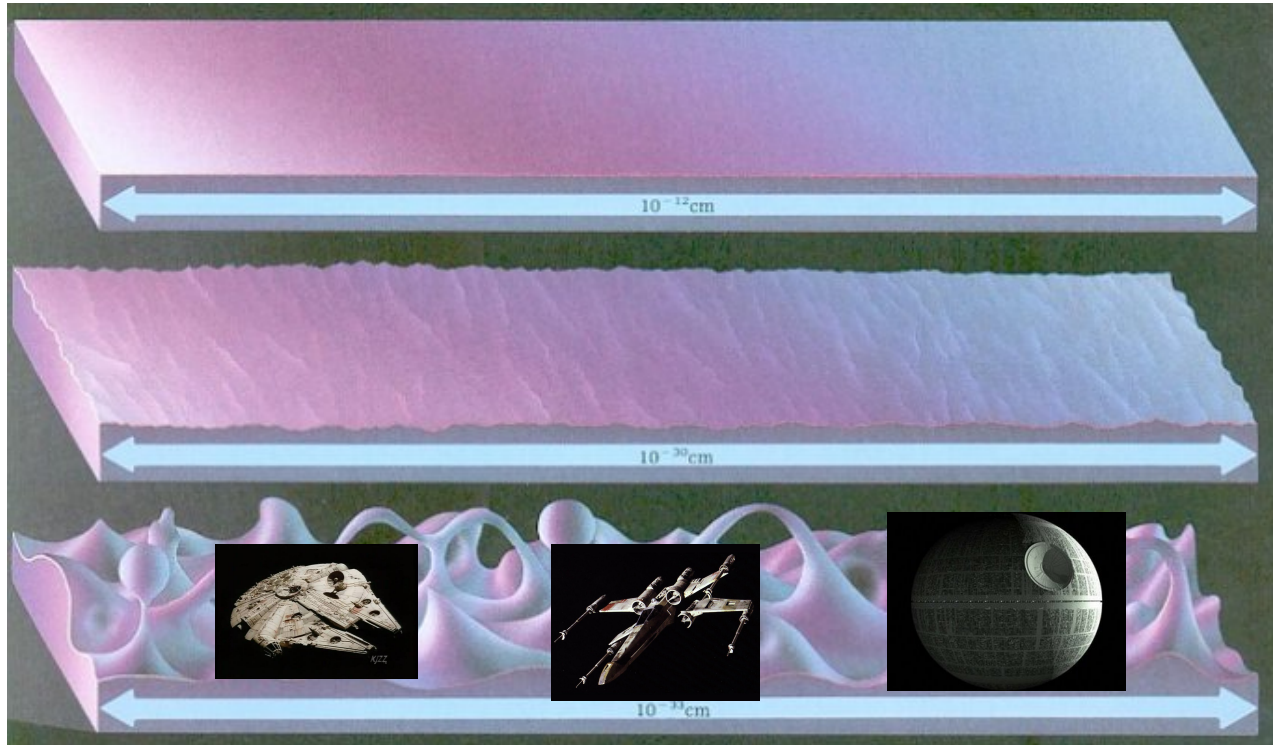
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} + \Lambda$$

Mit der neuen Konstante ist  
ein statisches Universum möglich!

1929 beweist Hubble Expansion des  
Universums!



# Im Vakuum ist die Hölle los

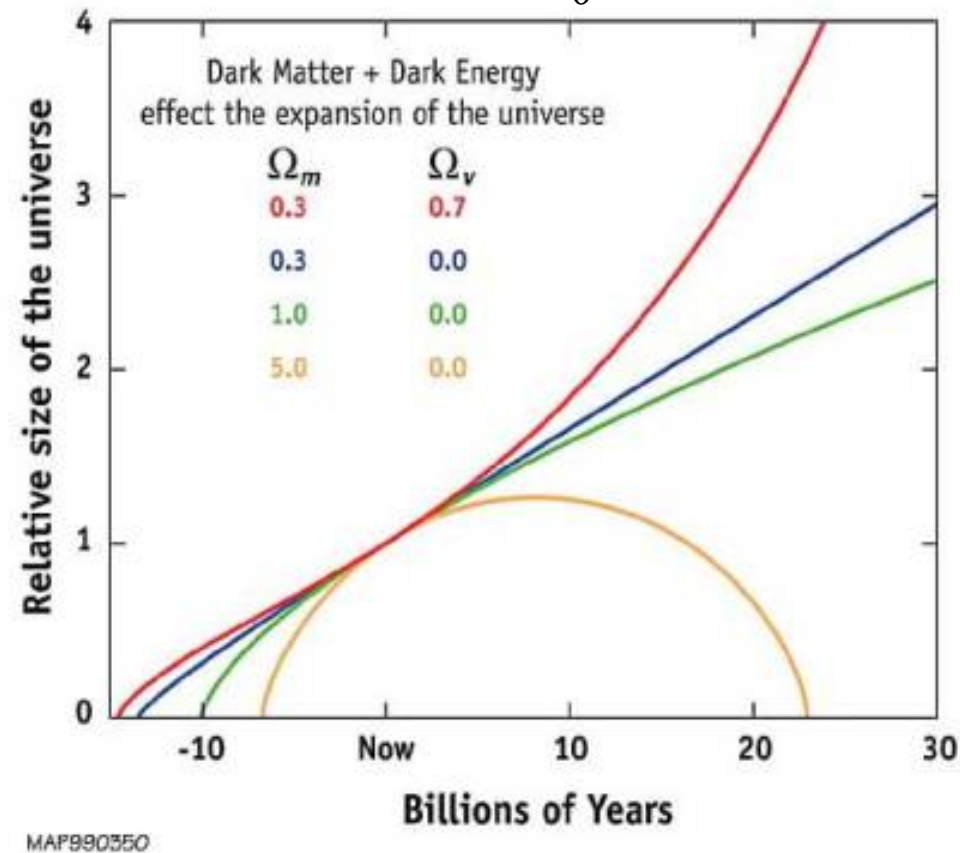


# Theorie und Experiment unterscheiden sich um einen Faktor

[illegible]

Kosmologische Konstante = Energiedichte des Vakuums

$$\Omega_{\Lambda} \approx \frac{\Lambda}{3H_0^2}$$

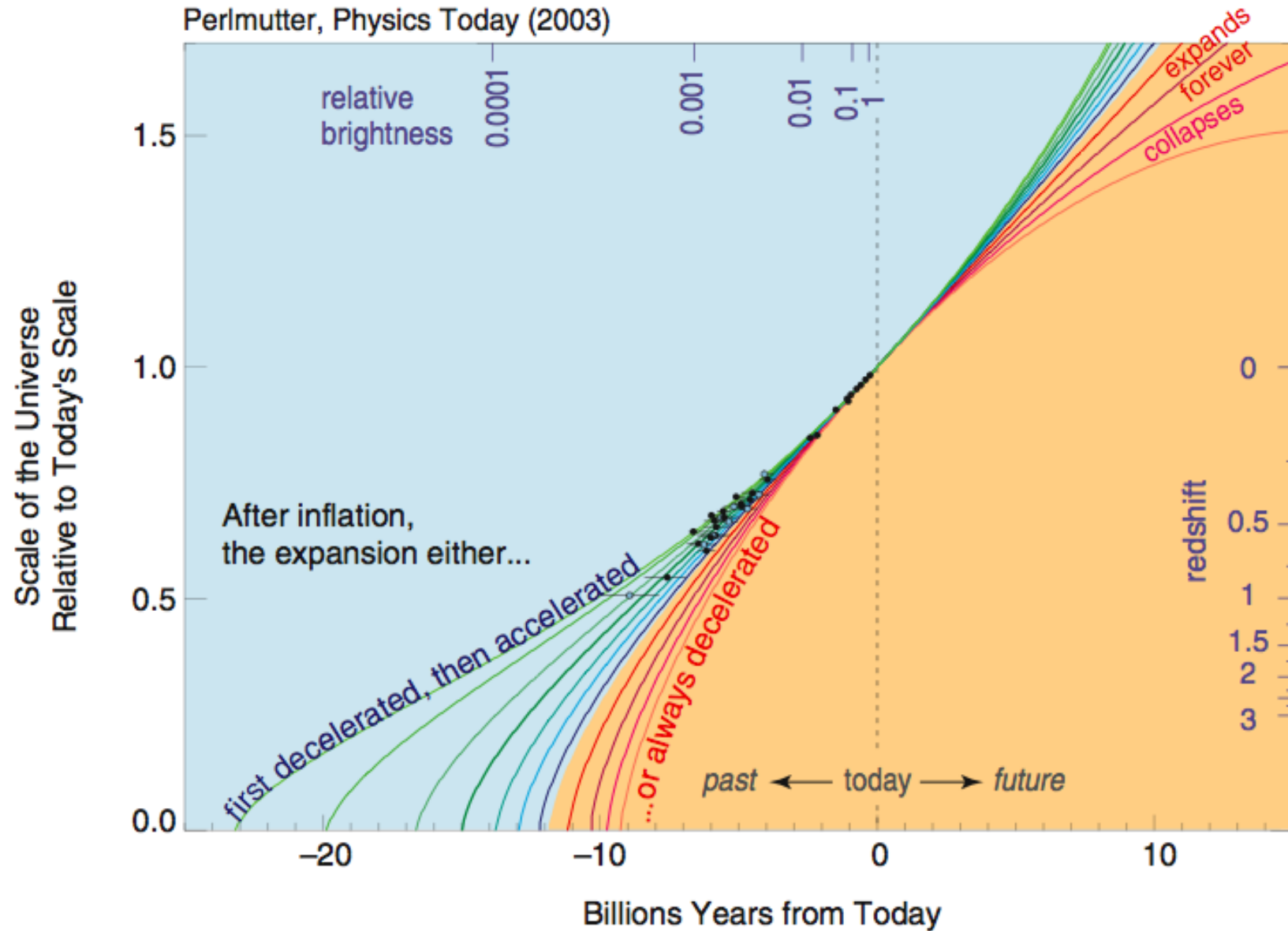


$p = -\rho \rightarrow$  beschleunigte Universen

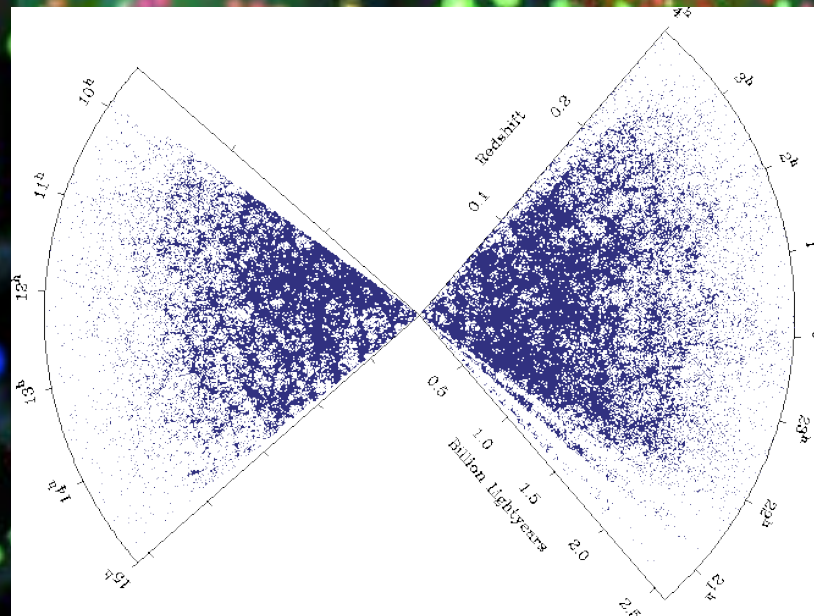
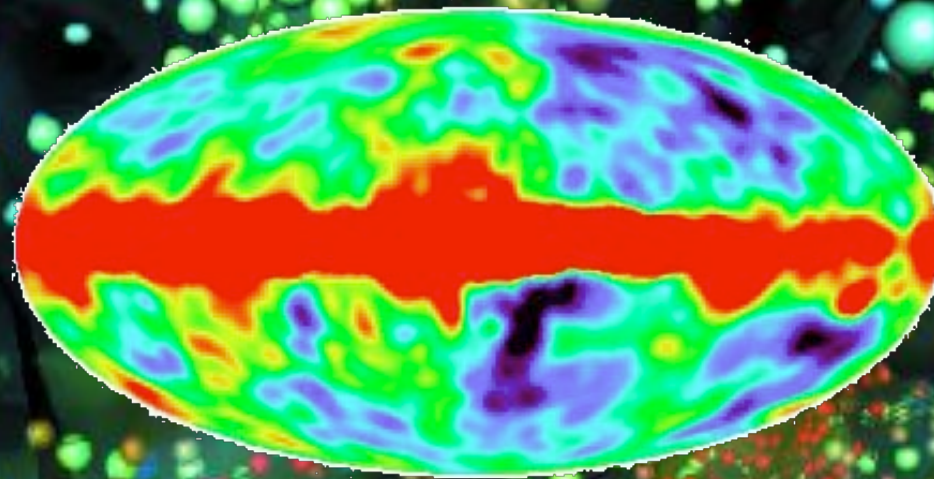


## Expansion History of the Universe

Perlmutter, Physics Today (2003)



# Struktur Formation



Wie schafft man das???



# Primordiale Nukleosynthese

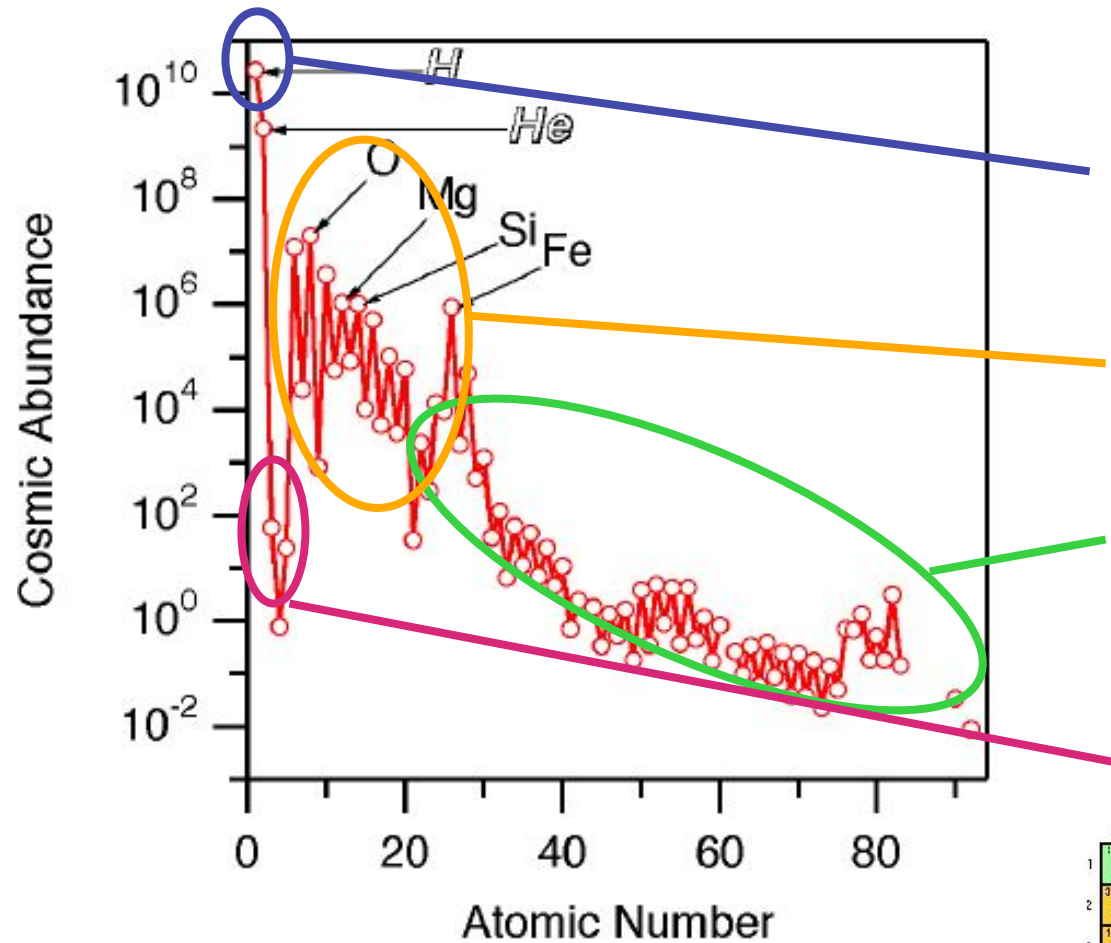
Die ersten 3 Minuten...



Produktion der Atomkerne von Helium und Lithium

Daraus ist alle normale Materie, die wir kennen später entstanden!!!!

# Ursprung der Elemente



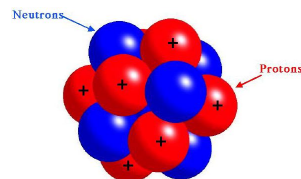
entstanden in:

Primordial Nukleosynthese

Fusion in Sternen

Supernova Explosionen

Wechselwirkung der kosmischen Strahlung



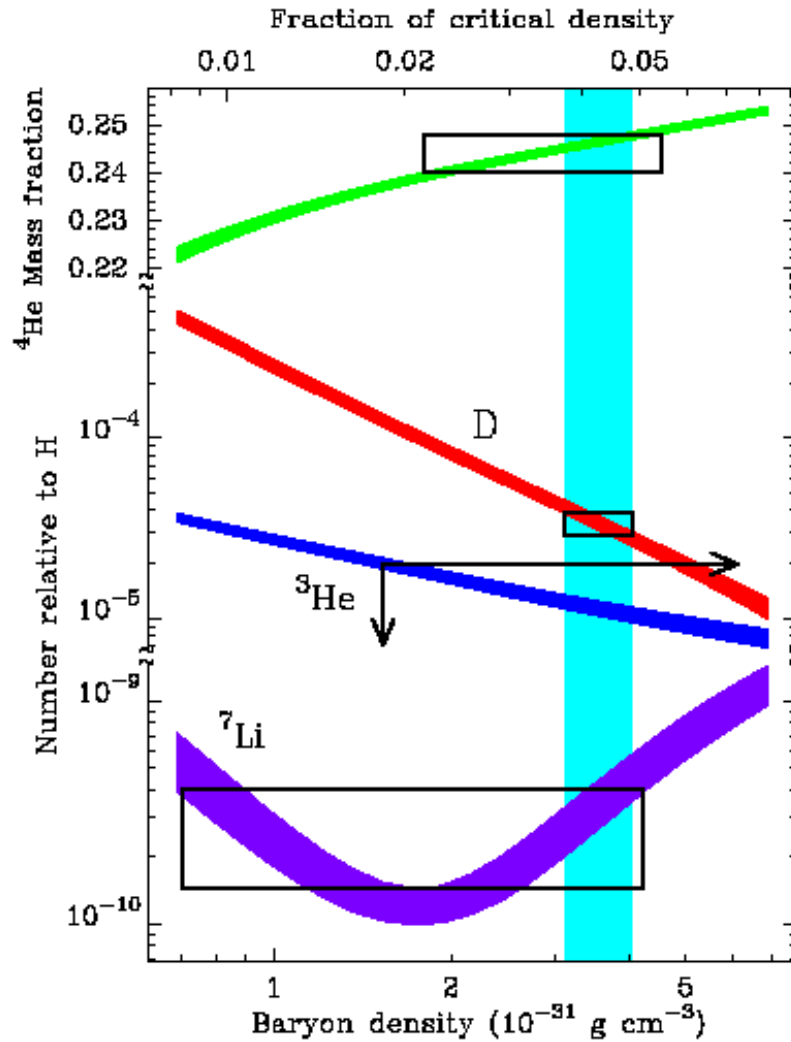
# Periodic Table of the Elements

1A																	8A																			
1	H																	He																		
2	Li	Be																	B	C	N	O	F	Ne												
3	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar									K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr		
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
6	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn				
7	Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	110	111	112	113	114	115	116	117	118				

\*Lanthanide Series  
+ Actinide Series



# Theory versus experiment



$$D/H = 3.0 \pm 0.4 * 10^{-5}$$

$$\eta = 5.5 \pm 0.5 * 10^{-10}$$

$$\Omega_b h^2 = 0.02 \pm 0.002$$

$$\eta = \frac{n_B}{n_\gamma}$$

Consistent solution covering 10 orders of magnitude

The background of the slide is a dark, abstract image featuring numerous glowing blue and green spheres of varying sizes, some of which are larger and more prominent than others, creating a sense of depth and cosmic scale.

# Cosmological standard model ( $\Lambda$ CDM model)

version 2002

$$\Omega_0 = 1.03 \pm 0.06$$

$$\Omega_m = 0.3 \pm 0.1$$

$$\Omega_\Lambda = 0.7 \pm 0.3$$

$$H_0 = 72 \pm 8 \text{ km}/(\text{s Mpc})$$

$$t_0 = 13 \pm 2 * 10^9 \text{ yrs}$$

$$h_0 t_0 = 0.96 \pm 0.13$$

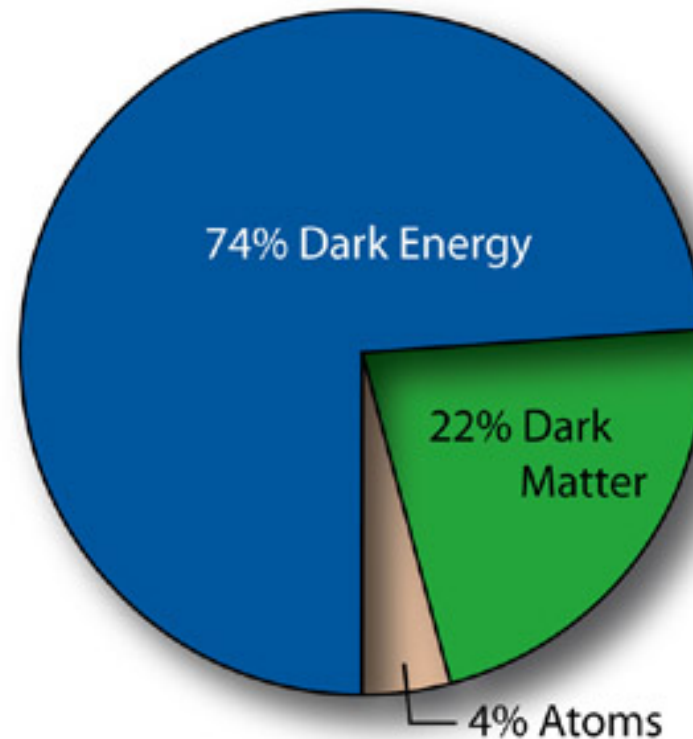


# Das kosmologische Standard Modell ( $\Lambda$ CDM Modell) Version 2012

$$\Omega_0 = 1.03 \pm 0.06$$

$$\Omega_m = 0.3 \pm 0.1$$

$$\Omega_\Lambda = 0.7 \pm 0.3$$



**Das Universum ist dominiert  
von der dunklen Seite**

# Kosmologische Parameter

$\Omega_{\text{tot}}$

$\Omega_{\text{b}}$

$\Omega_{\text{DM}}$

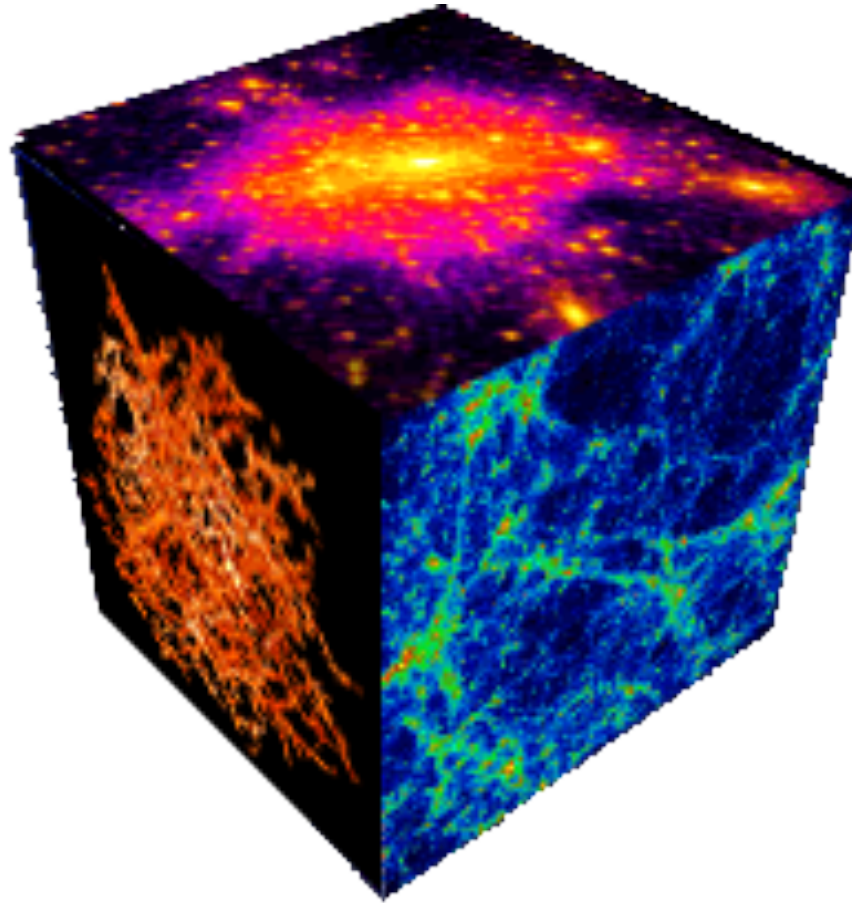
$\Omega_{\Lambda}$

$\Omega_{\text{mat}}$

$\Omega_{\text{vis}}$

$\Omega_{\text{v}}$

$\Omega_{\text{Q}}$



Primordiale  
Nukleosynthese  
(BBN)

Grossräumige  
Struktur des  
Universum (LSS)

Die kosmische  
Hintergrundstrahlung  
(CMB)

Gravitationslinsen

**Unabhängige Test ! Konsistenz!**



# Die Planck Mission

-

## Das ultimative Bild des CMB

Präzisionsmessung aller kosmologischen Parameter

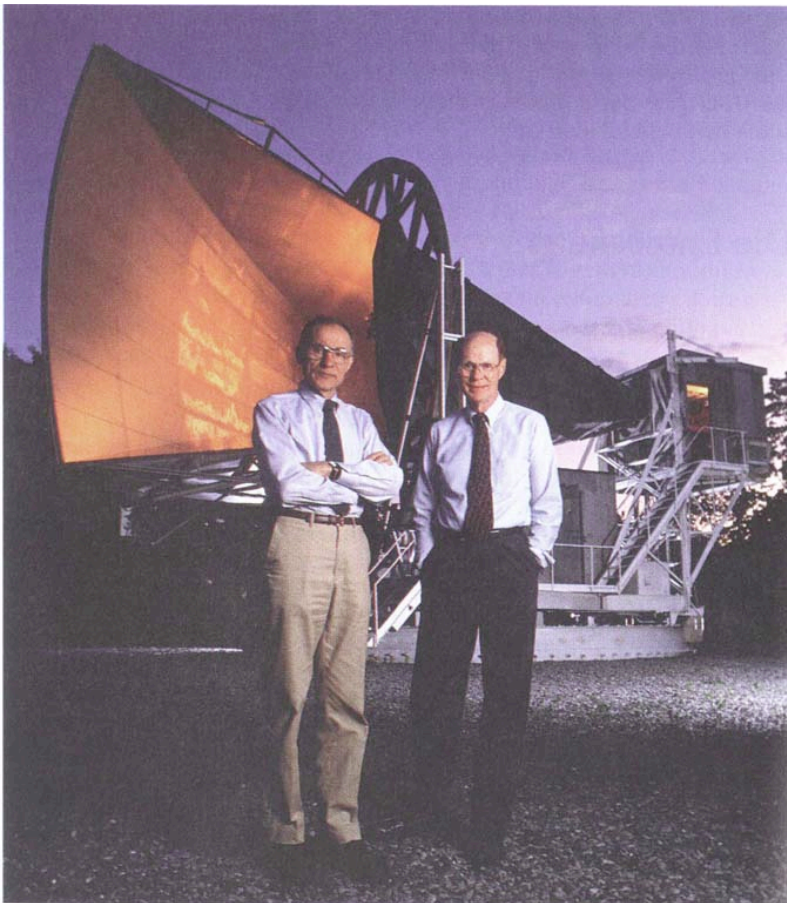


# Die kosmische Hintergrundstrahlung

## Das Nachglühen des Urknalls

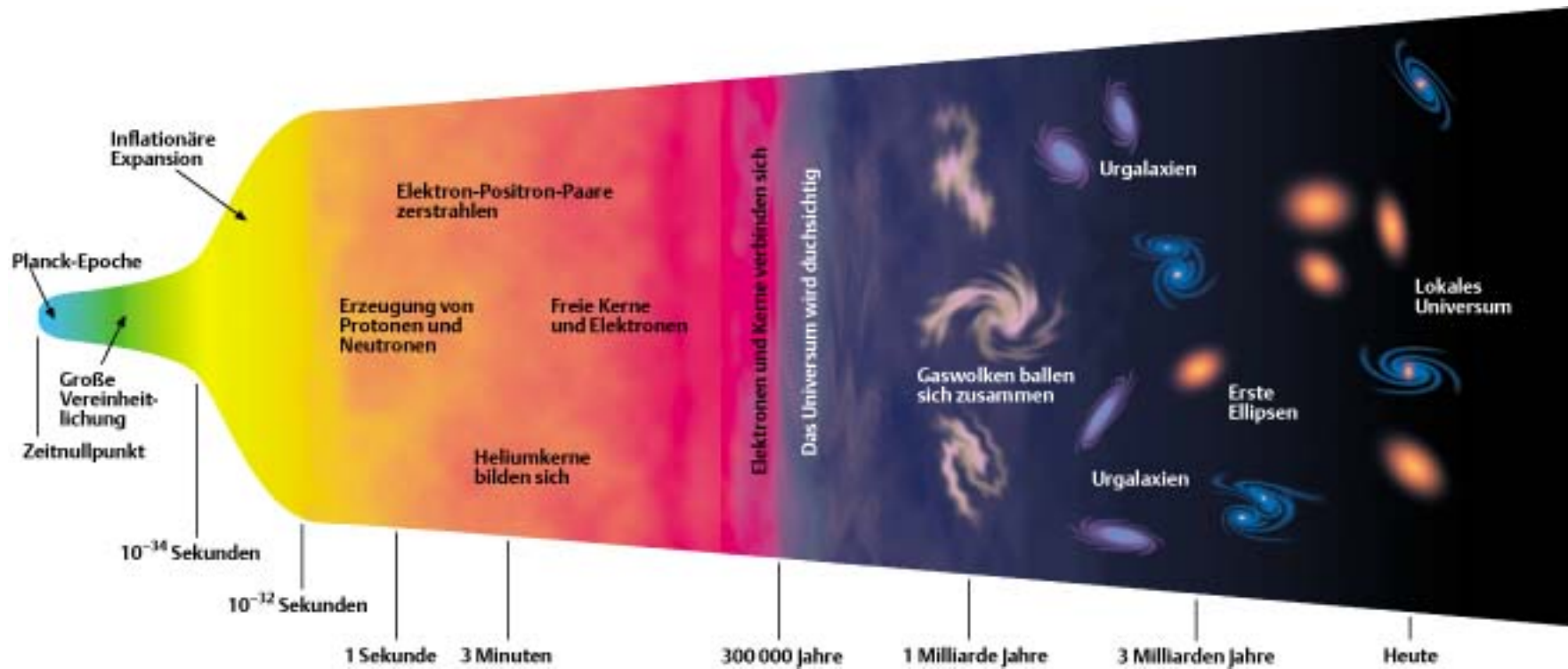
Zufallsentdeckung durch Penzias & Wilson 1964

Nobelpreis 1978





# Die Evolution des Universums



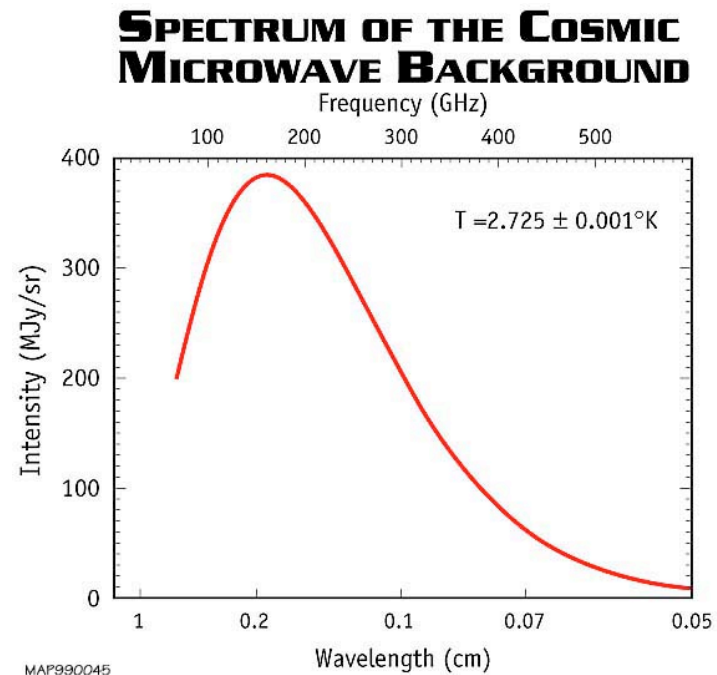
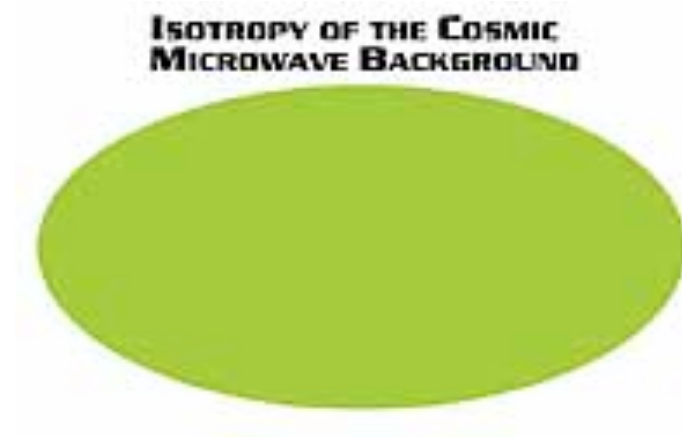
Entstehung  
leichter  
Atomkerne

Entstehung  
leichter  
Atome

Beobachtung von  
großen Strukturen  
(Galaxienhaufen)

# Die 3K-Strahlung

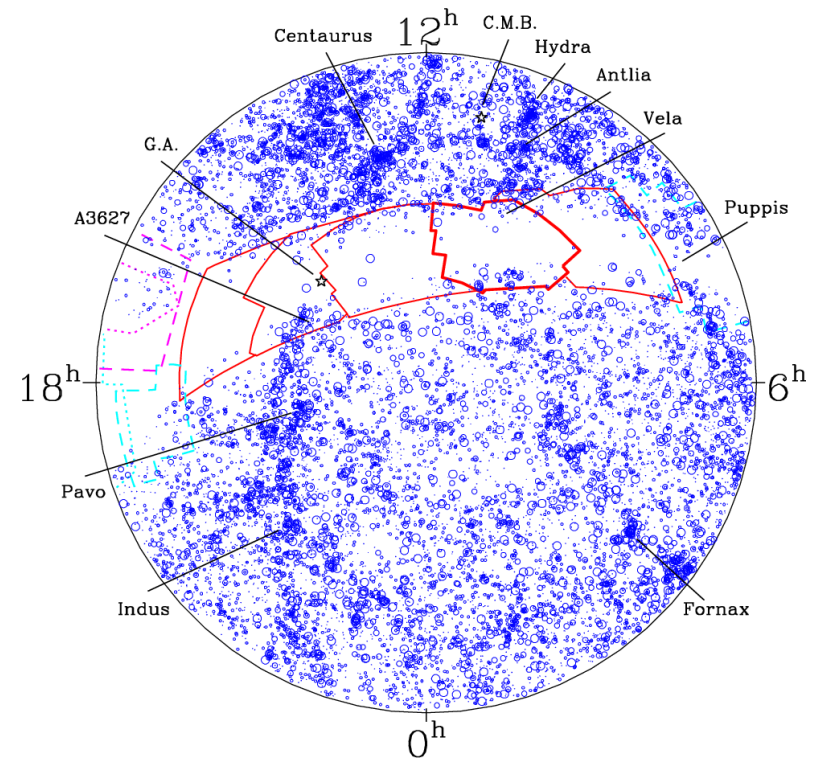
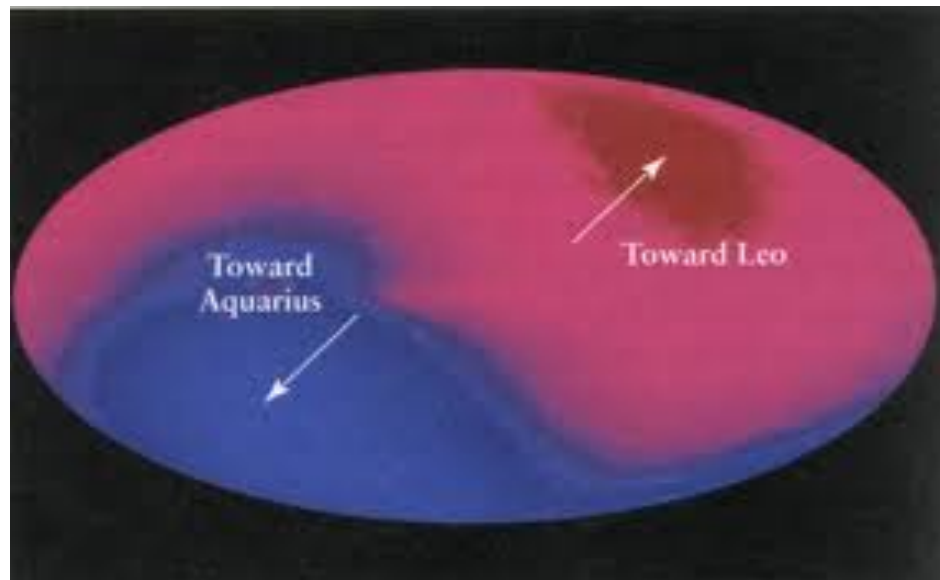
- Ein einmaliger Schnappschuss des Universums bei einer Rotverschiebung von  $z = 1100$
- Licht entkoppelt sich von der Materie, Universum wird transparent
- Verdichtungen von Atomen können anfangen zu wachsen → Galaxien



Perfekte Schwarzkörperstrahlung

# Die Dipol Komponente

Temperaturunterschied von mK beobachtet



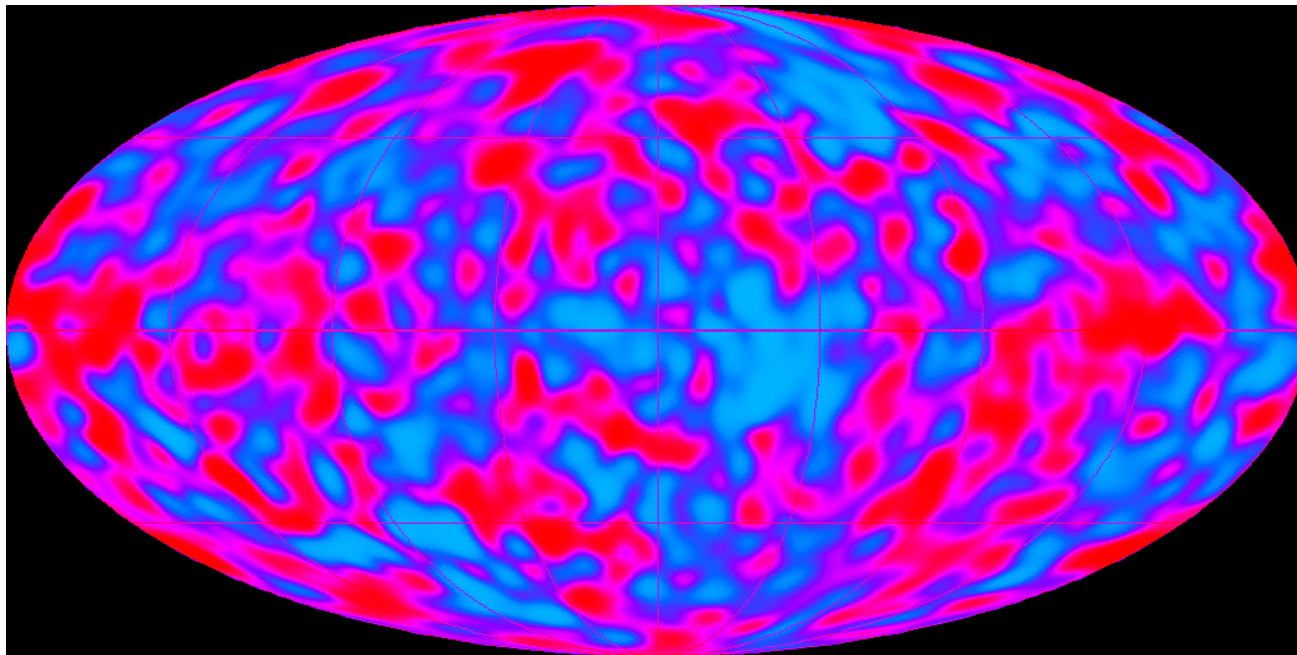
Wir bewegen uns mit  $369 \text{ km s}^{-1}$  im Bezug auf die Hintergrundstrahlung durchs All



# Doch nicht so perfekt

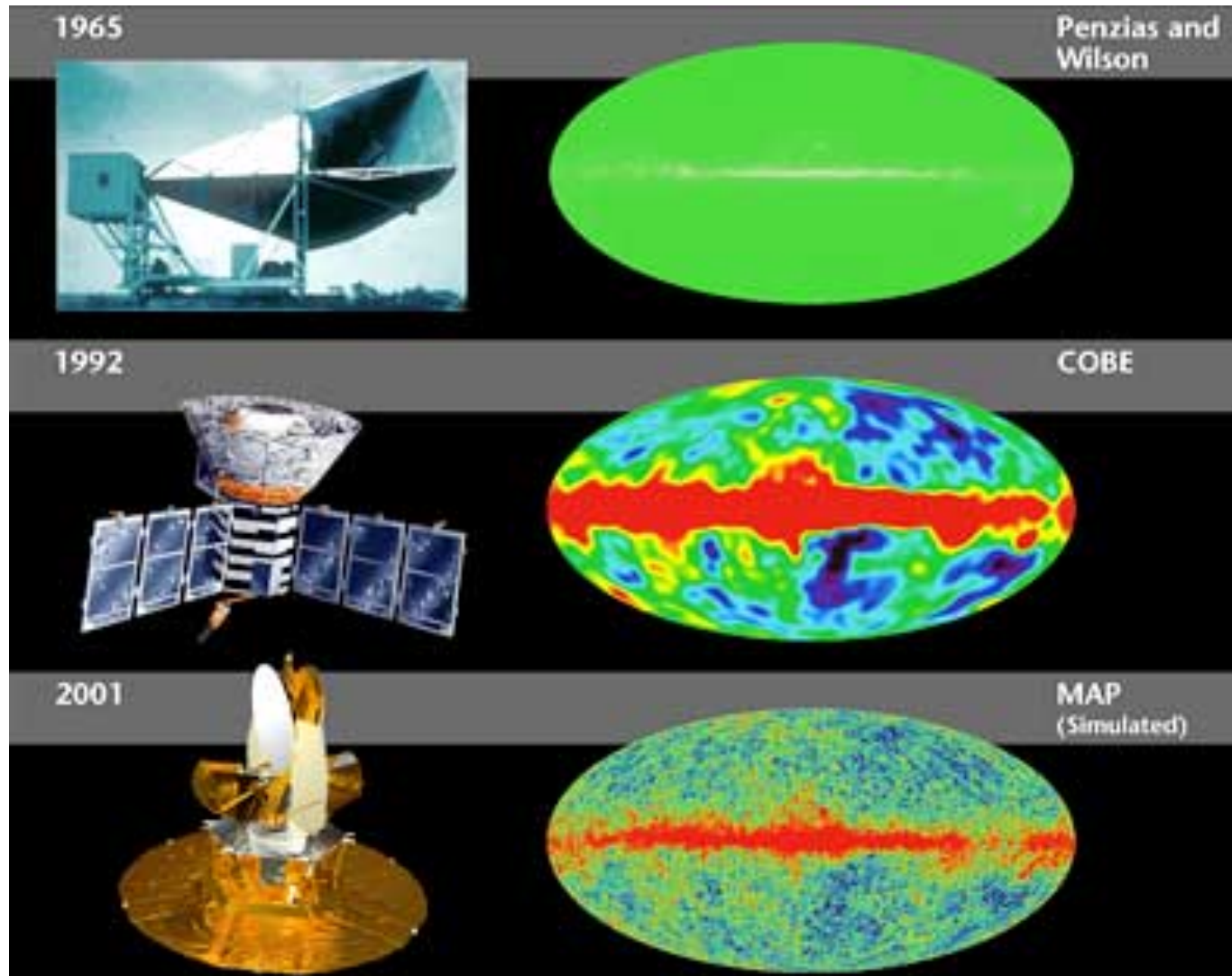
Weitere Temperaturunterschiede von  $\mu\text{K}$  beobachtet

COBE Satellit, verbessert mit dem WMAP Satellit,  
Milchstraße bereits „abgezogen“

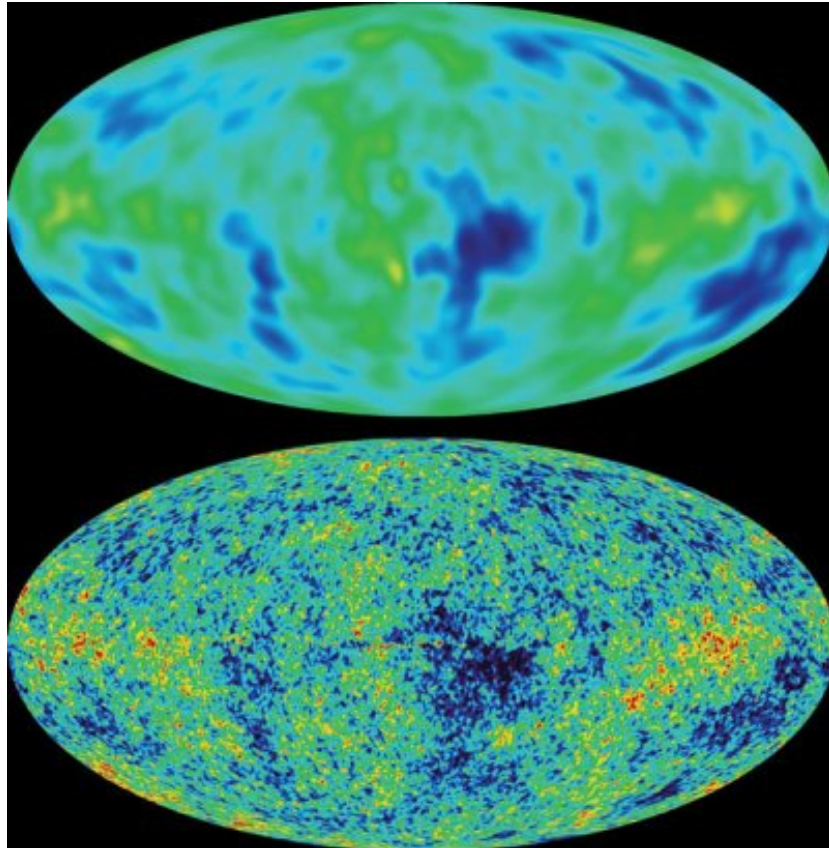


Nobelpreis 2006: G. Smoot, J. Mather

Die Temperatur beträgt in alle Richtungen etwa 3 K



Nach Abzug aller bekannten Quellen sieht man jedoch Schwankungen im Bereich von  $0,00001 \text{ K}$



COBE  
1994



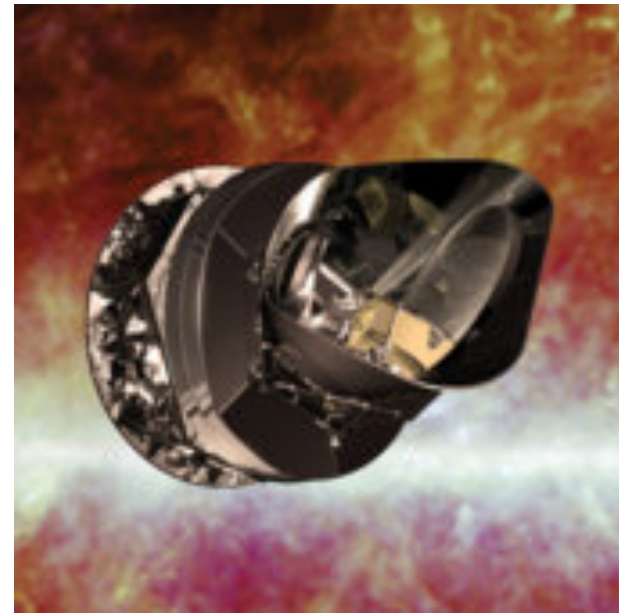
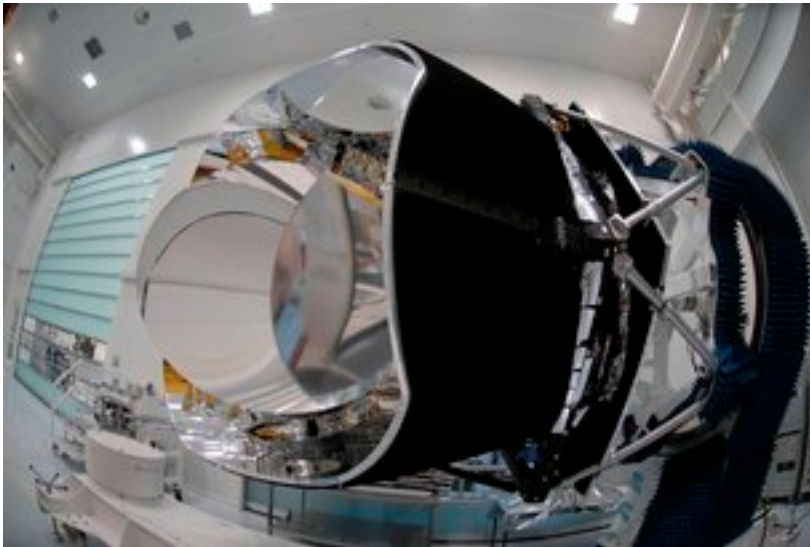
WMAP  
2007

Aus diesen Schwankungen formen sich später Galaxien



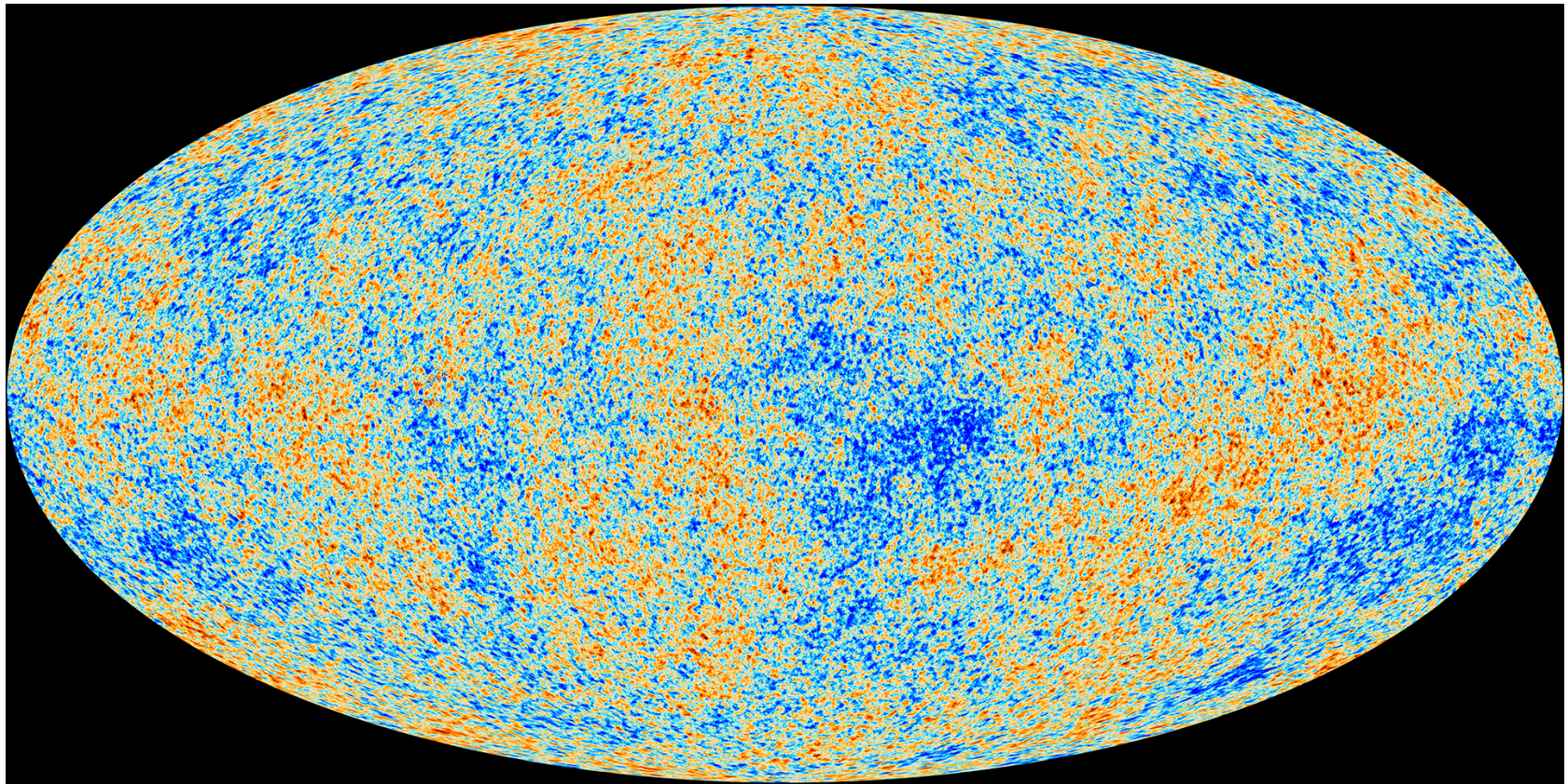
Planck ist erste europäische Mission zum Studium des CMB

Start am 14.5.2009  
mit Ariane 5 von Kourou



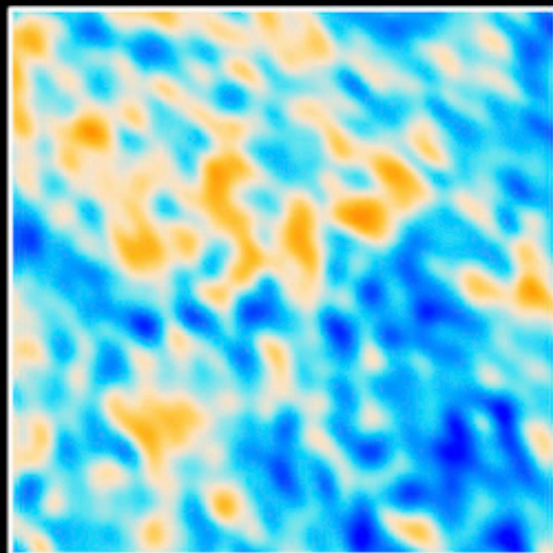
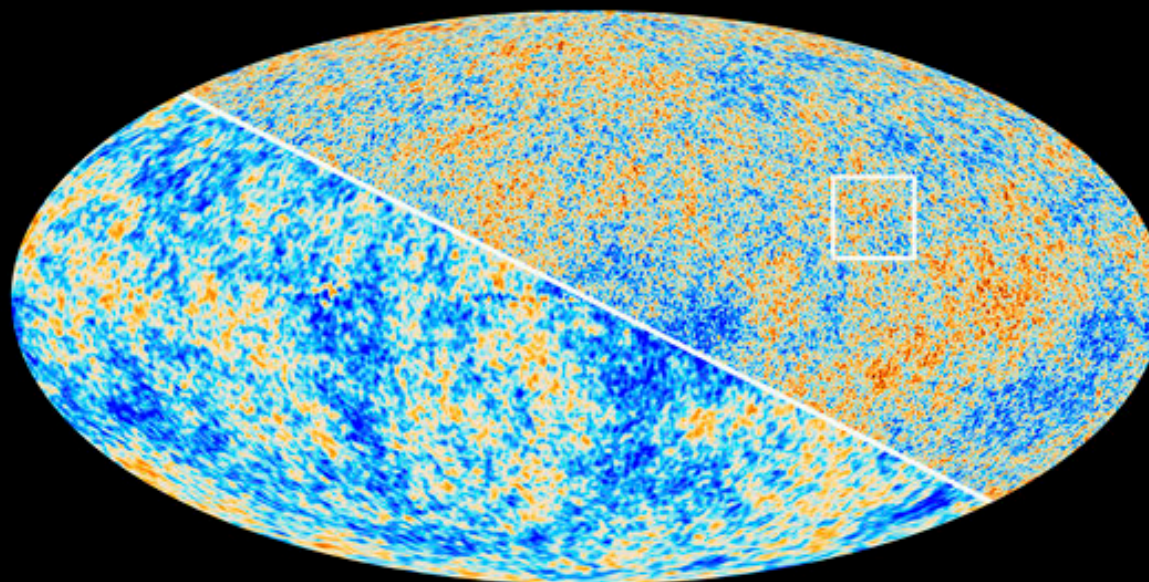
Gewicht bei Start etwa 1950 kg, 4.2 m hoch und 4.2 m maximaler Durchmesser

# Die Anisotropien – Planck 2013

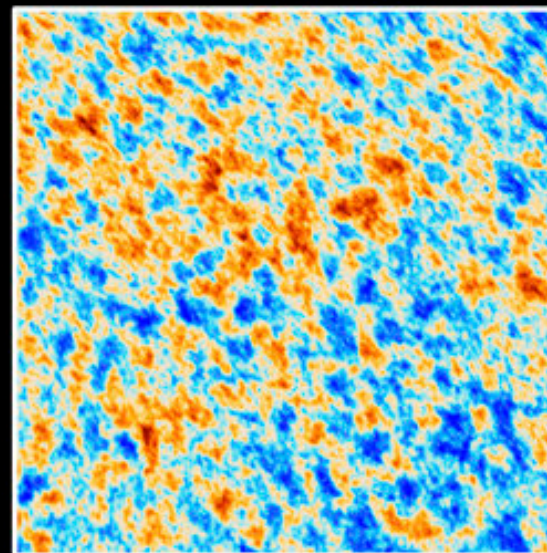




*The Cosmic Microwave Background as seen by Planck and WMAP*



*WMAP*



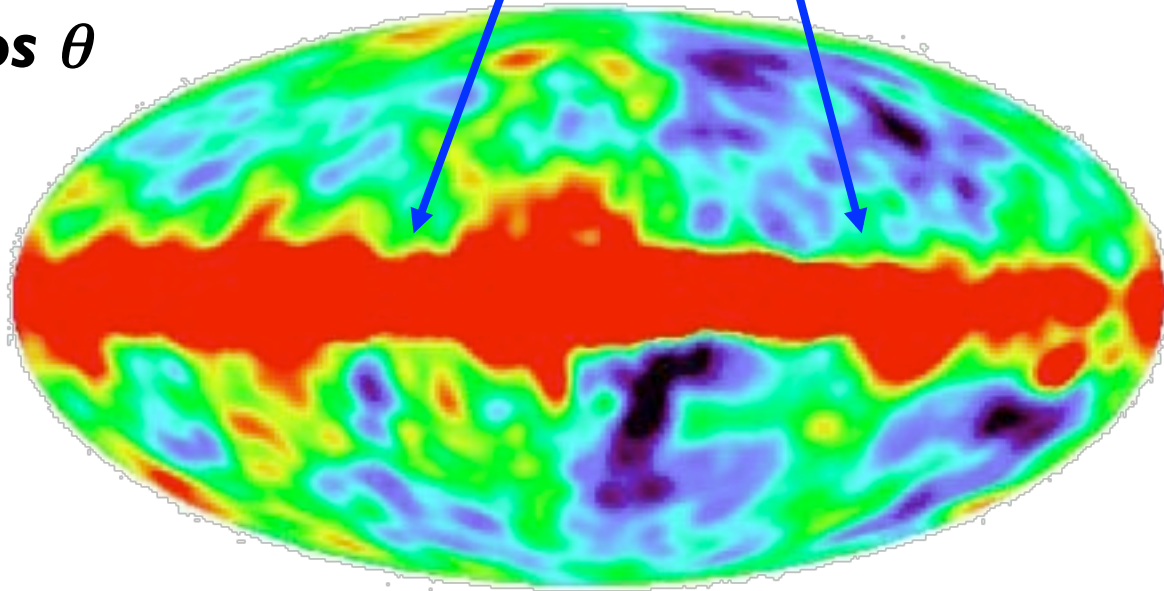
*Planck*



# Anisotropies

$$C(\theta) = \langle \Delta T(n) \Delta T(n') \rangle$$

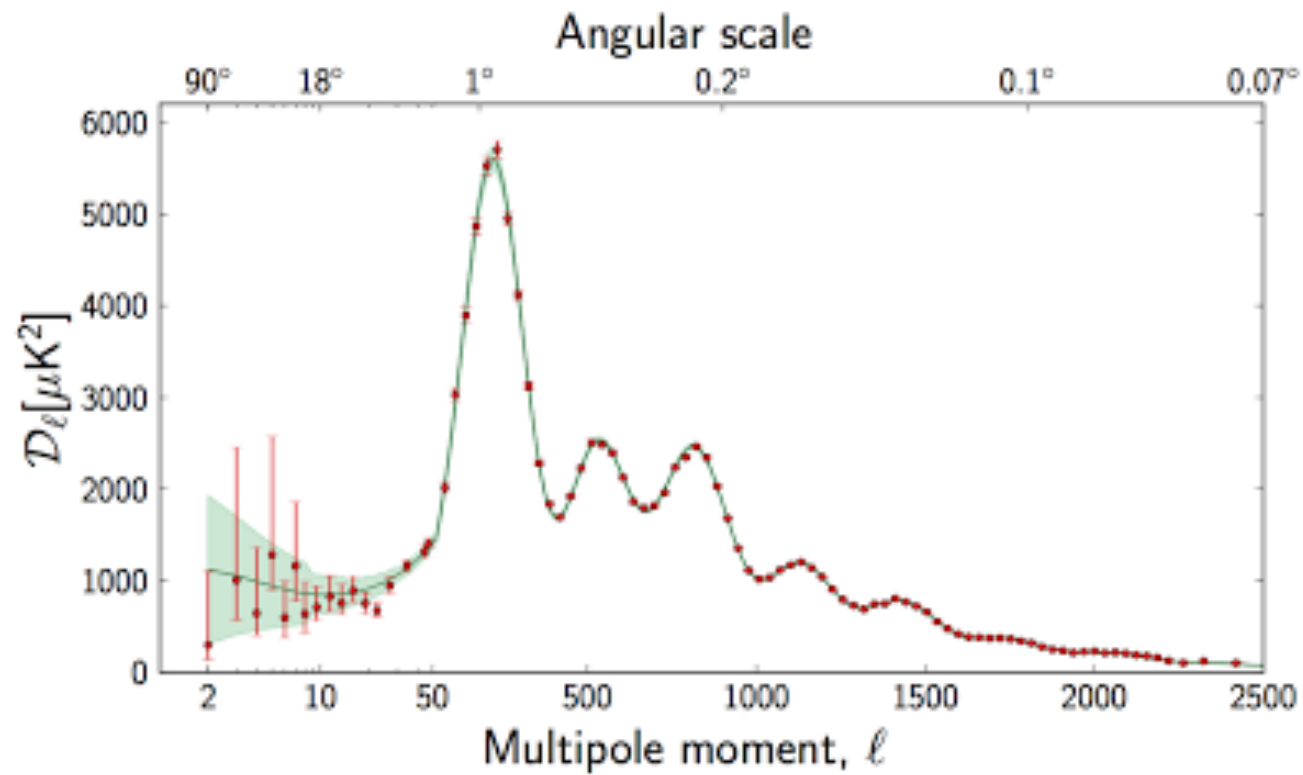
$$\vec{n} \cdot \vec{n}' = \cos \theta$$



Expansion in spherical harmonics

Legendre polynomials

# Power Spektrum

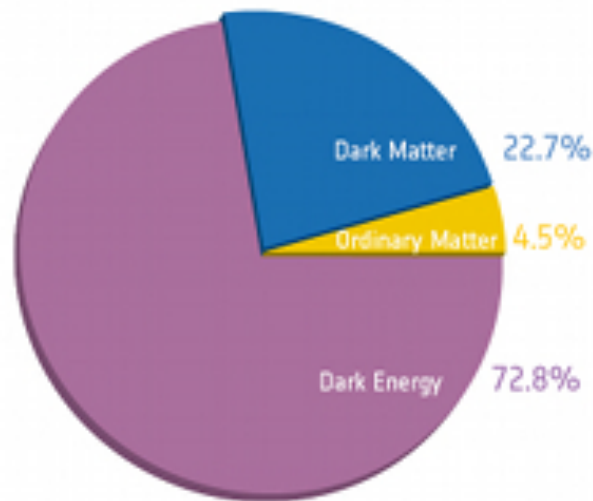


Lage, Höhe, Anzahl der Peaks hängt von den kosmologischen Parametern ab

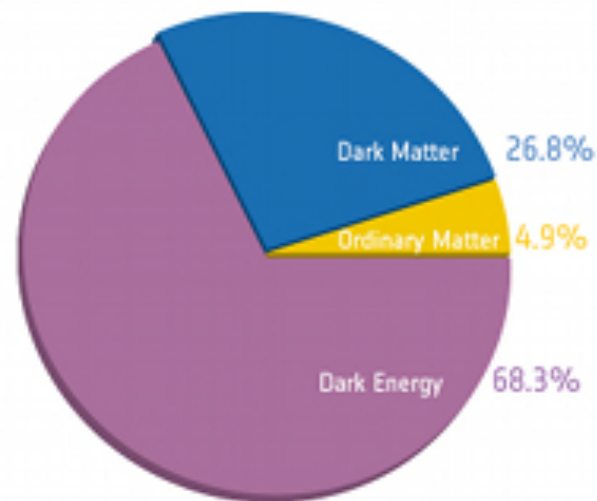




# Kosmologisch wichtigstes Resultat



Before Planck



After Planck

# Cosmological standard model ( $\Lambda$ CDM model) **Planck version 2013**

$$\Omega_B = 0.0481$$

$$\Omega_{DM} = 0.257$$

$$\Omega_\Lambda = 0.693 \pm 0.019$$

$$H_0 = 67.9 \pm 1.5 \text{ km}/(\text{s Mpc})$$

$$t_0 = 13.796 \pm 0.058 * 10^9 \text{ yrs}$$

