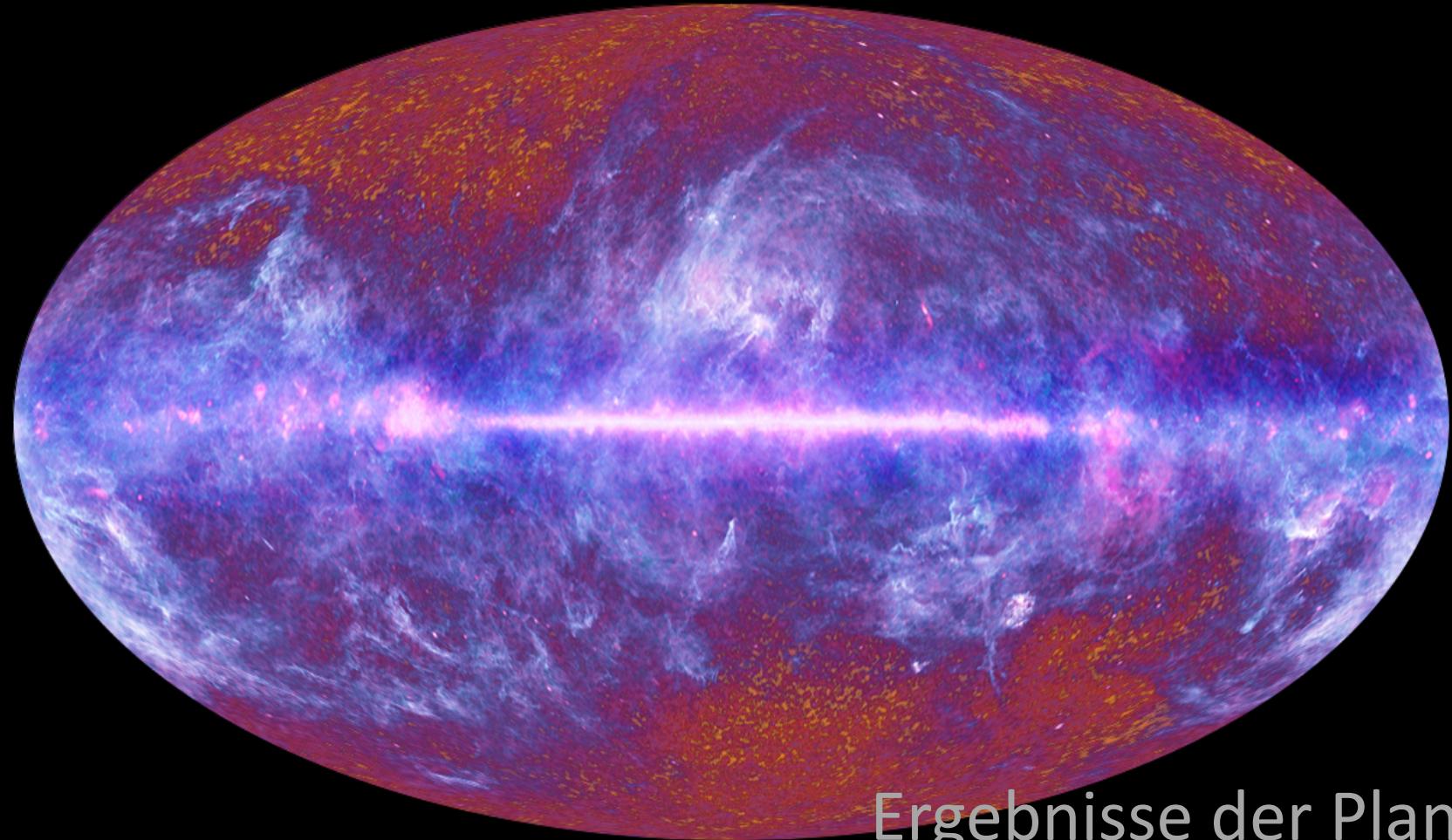


Das neue Bild des Universums



Ergebnisse der Planck
Satellitenmission

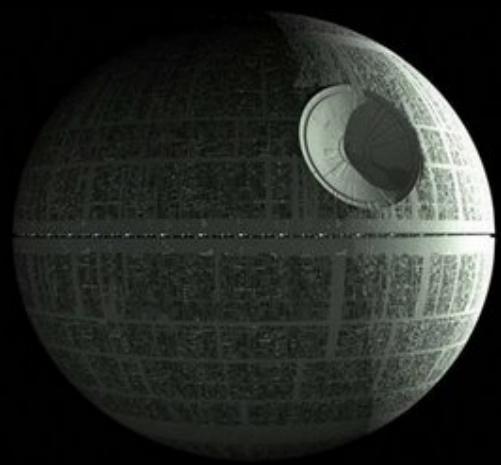
K. Zuber, Inst. f. Kern- und Teilchenphysik

The Planck one-year all-sky survey

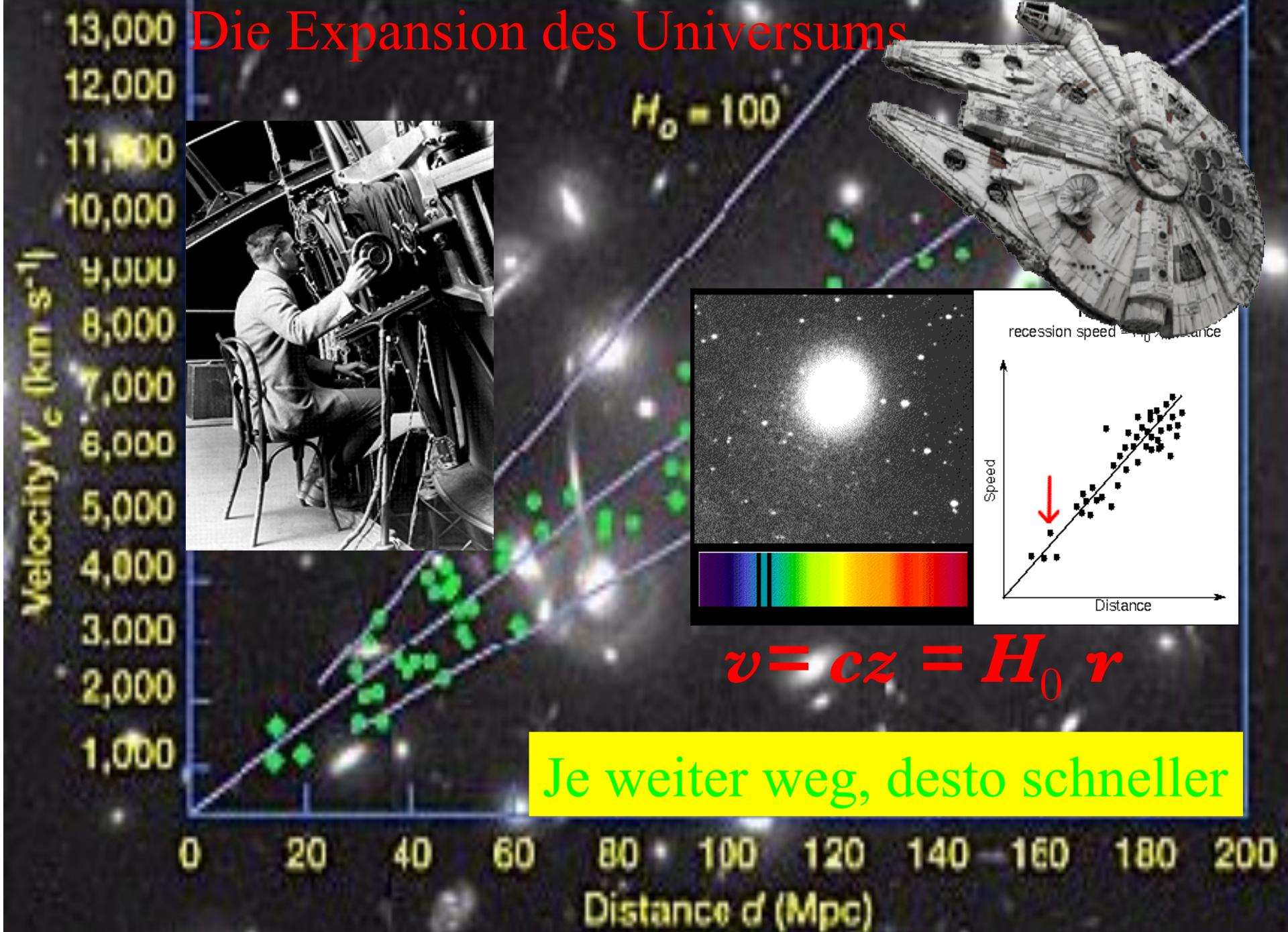


(c) ESA, HFI and LFI consortia, July 2010

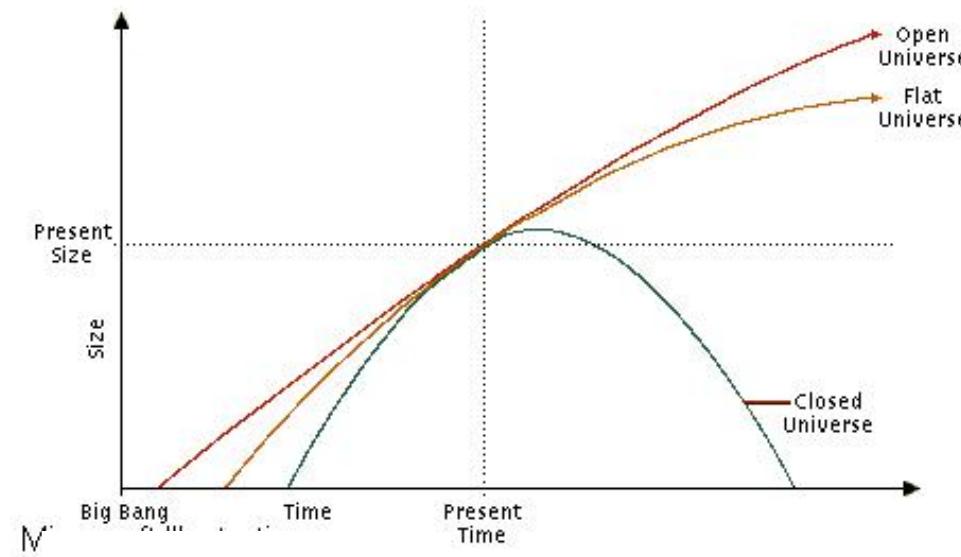
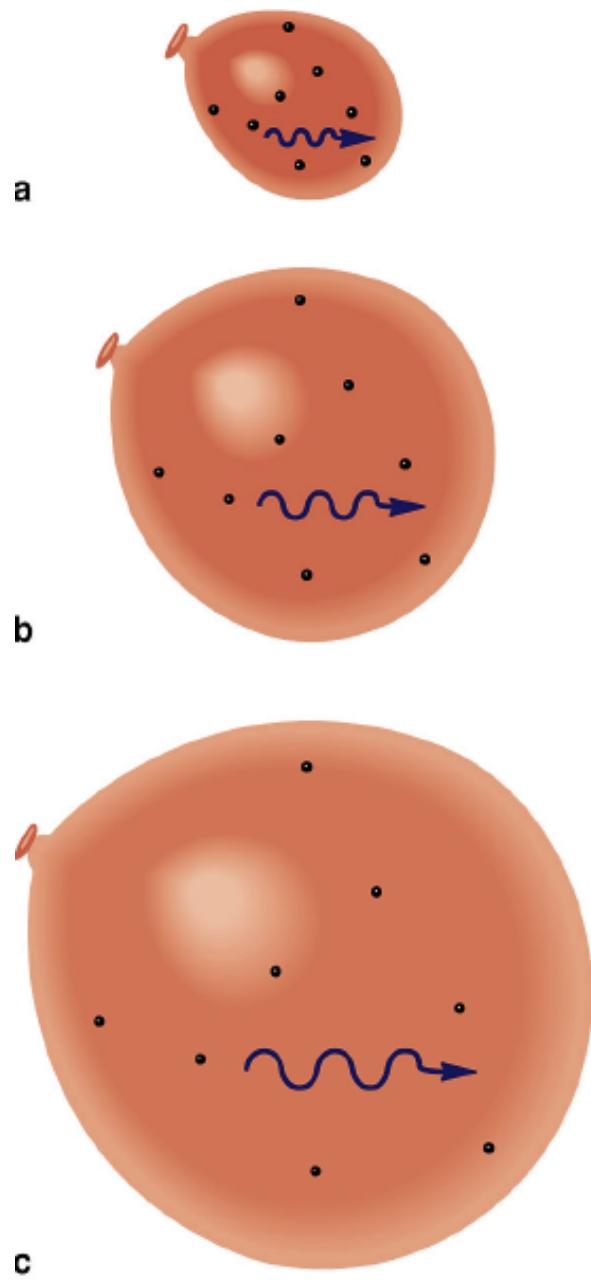




Die Expansion des Universums



Die Entwicklung des Universums



Die entscheidende Größe ist
die Materiedichte im Universum!

Kritische Dichte =flaches Universum

Hubble Parameter

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

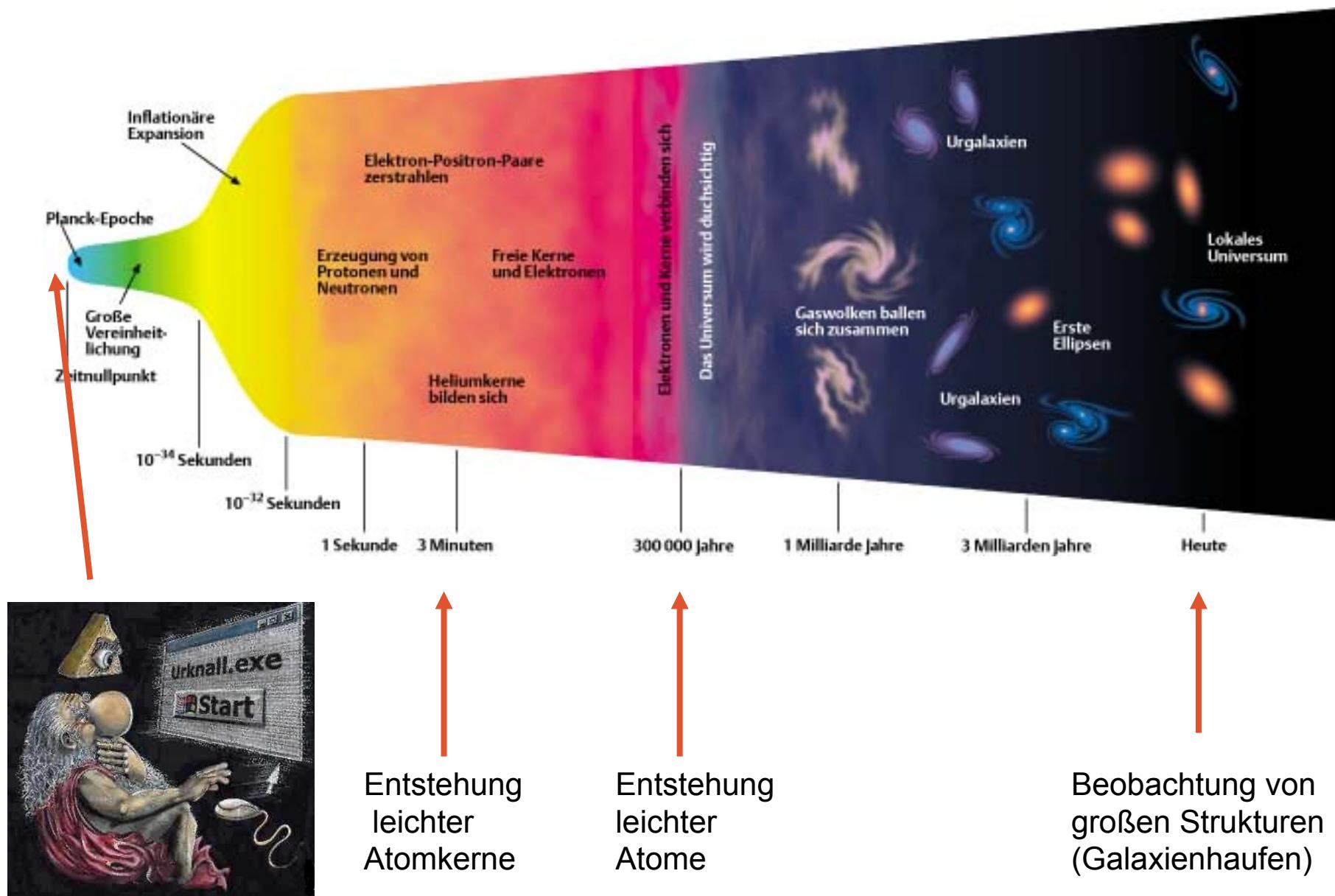
$$h_{70} = \frac{H_0}{70 km s^{-1} Mpc^{-1}}$$

Kritische Dichte

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

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

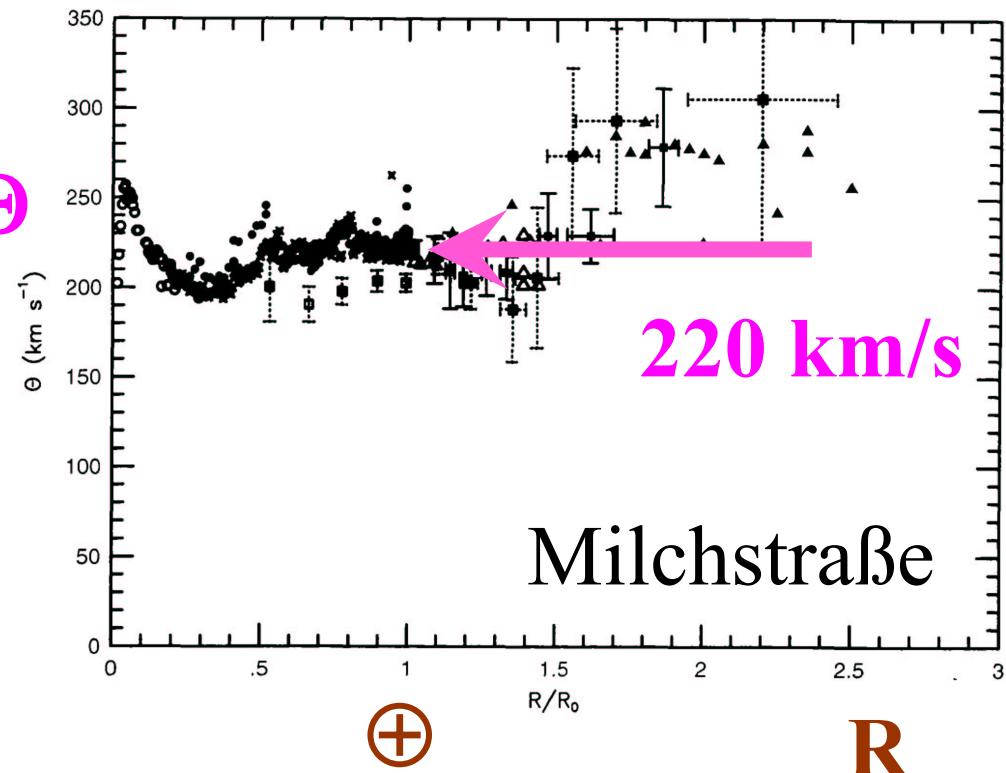
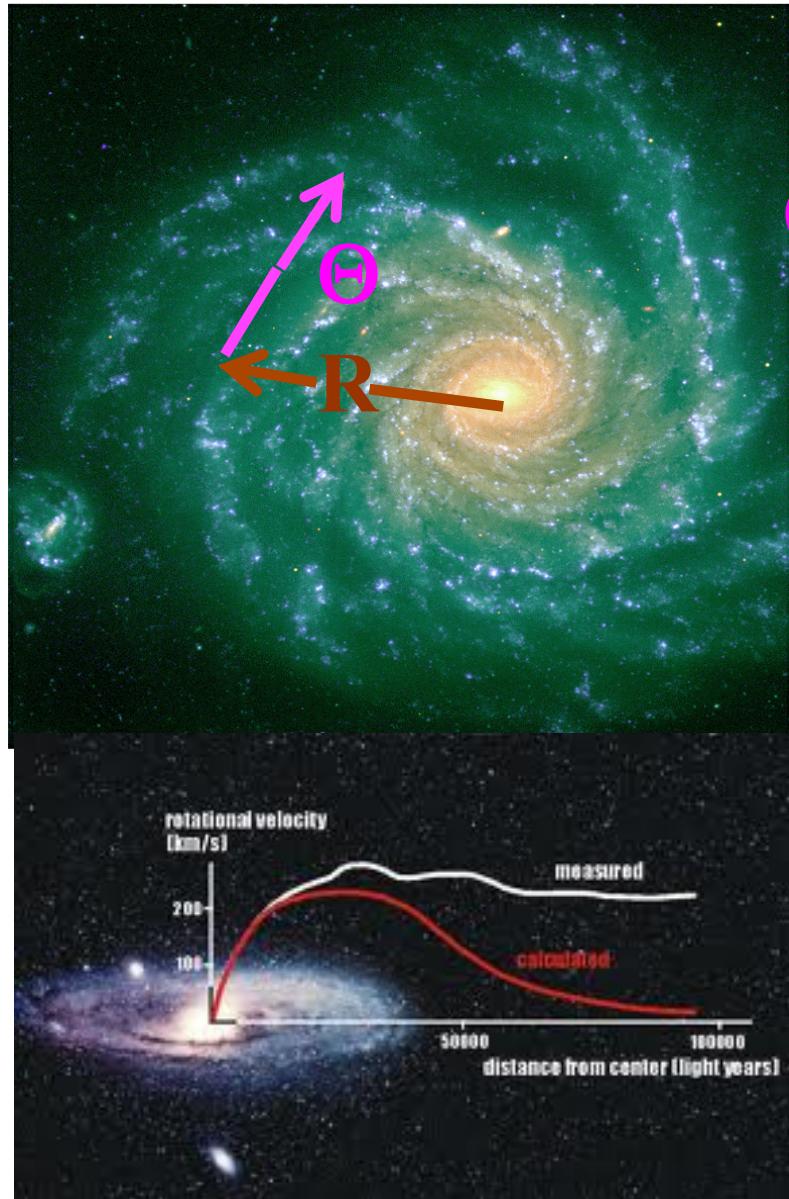
Die Evolution des Universums



A dark, star-filled background with a glowing blue and white structure on the left.

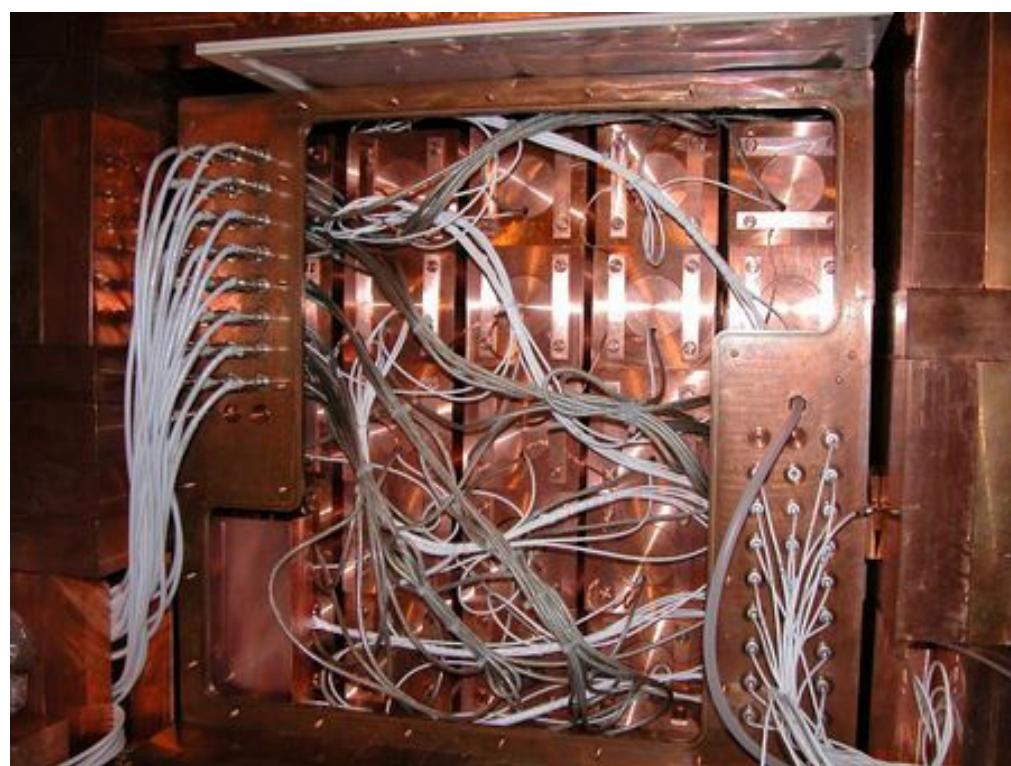
*The dark
side*

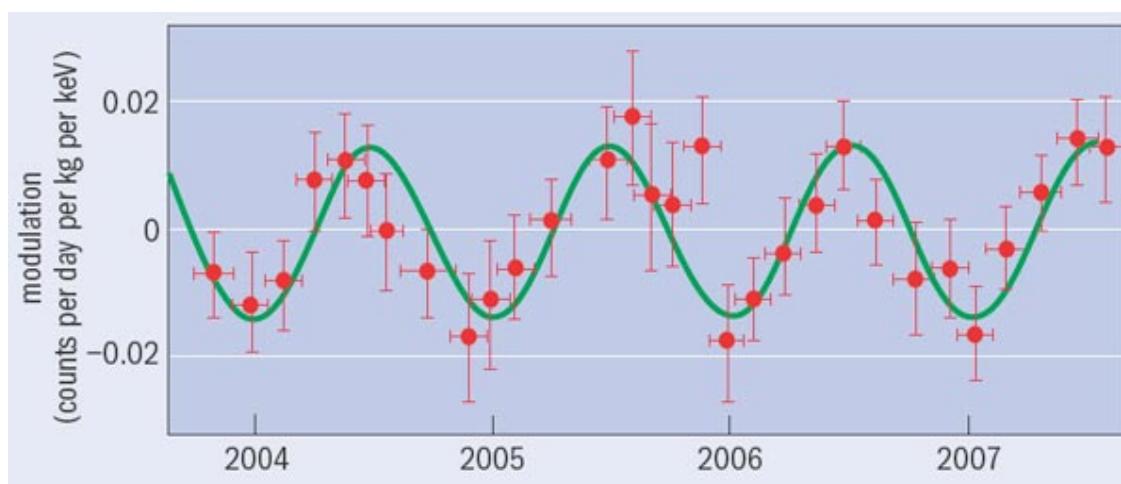
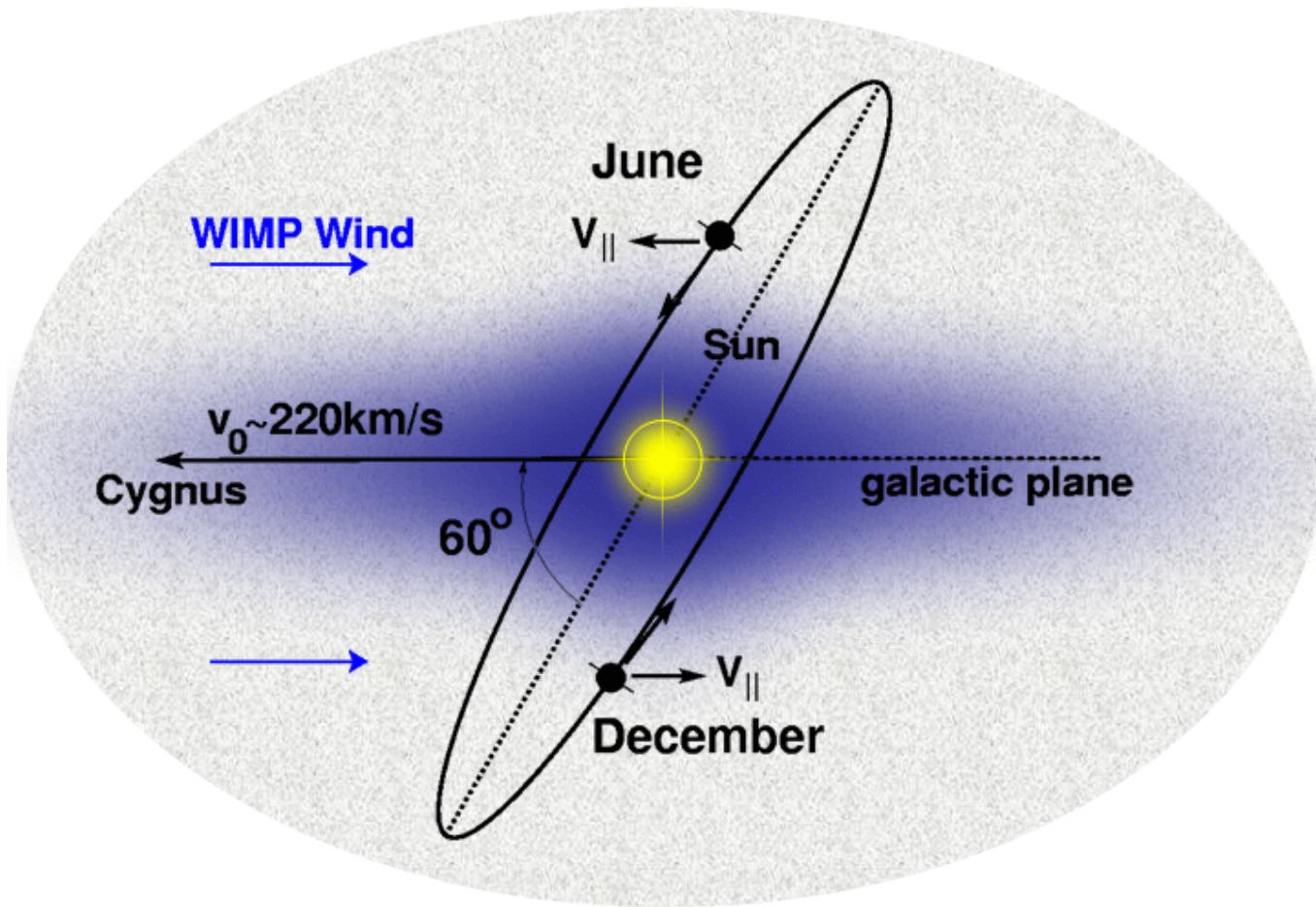
Rotationskurven von Galaxien



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

$M_V = -0.6$



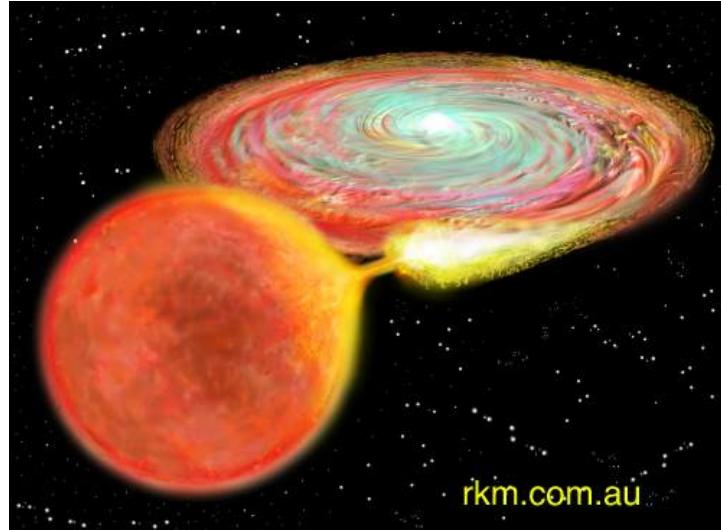
Cepheiden

$M_V = a + b \log P$

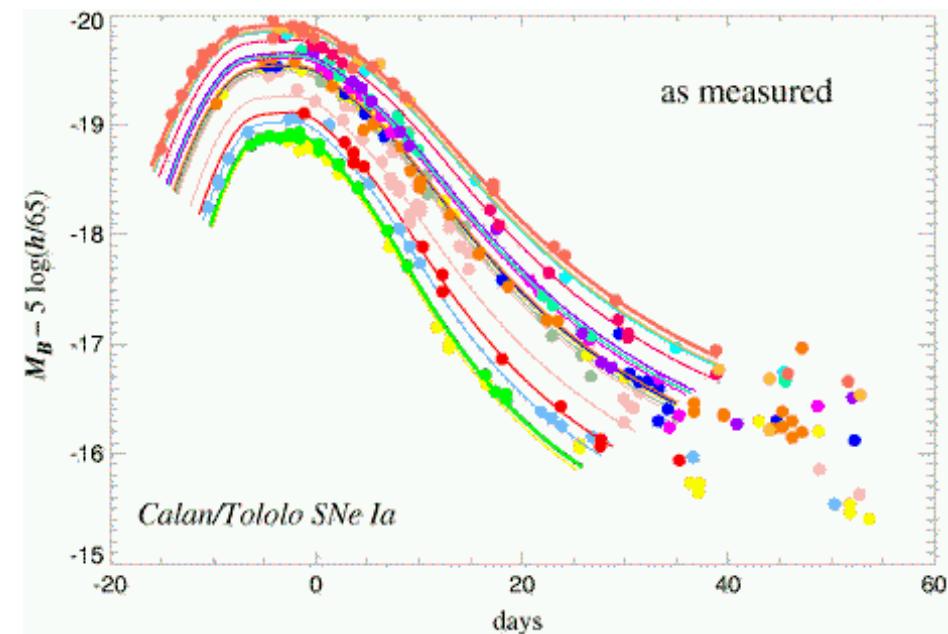
Supernovae Typ Ia

$M_V = -19.2$

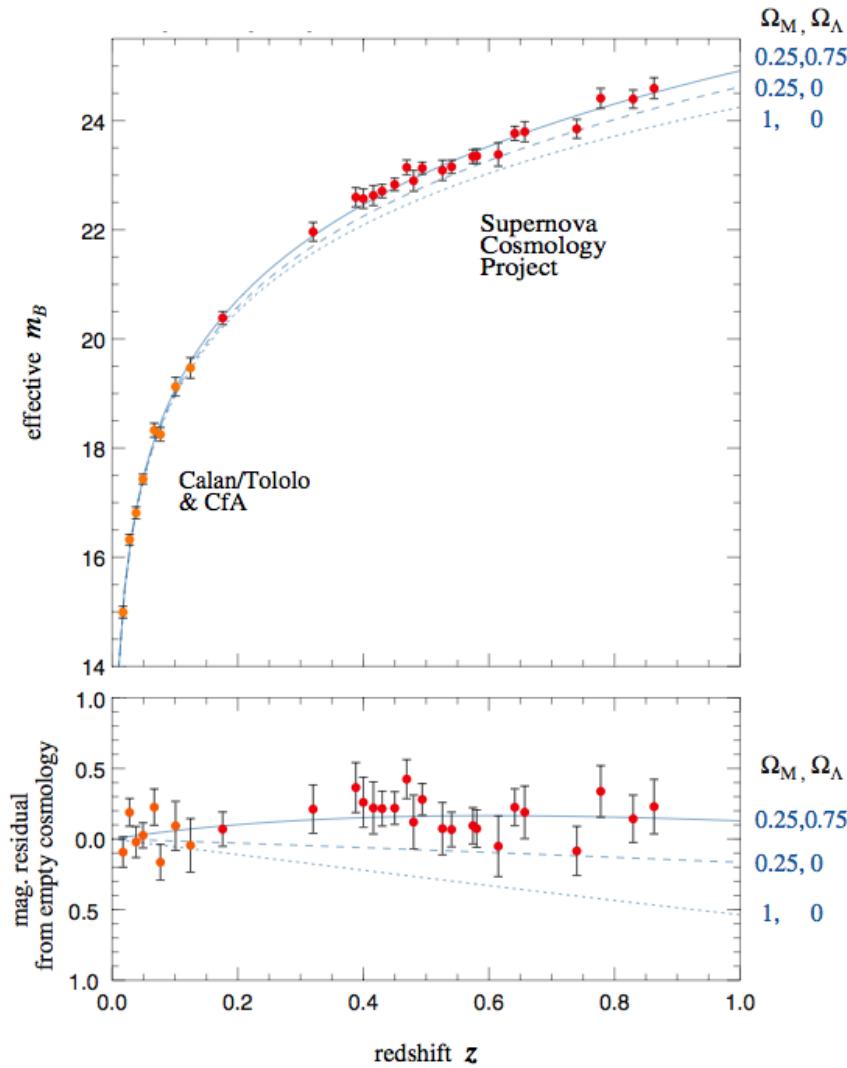
Supernova Typ Ia als Standardkerze



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

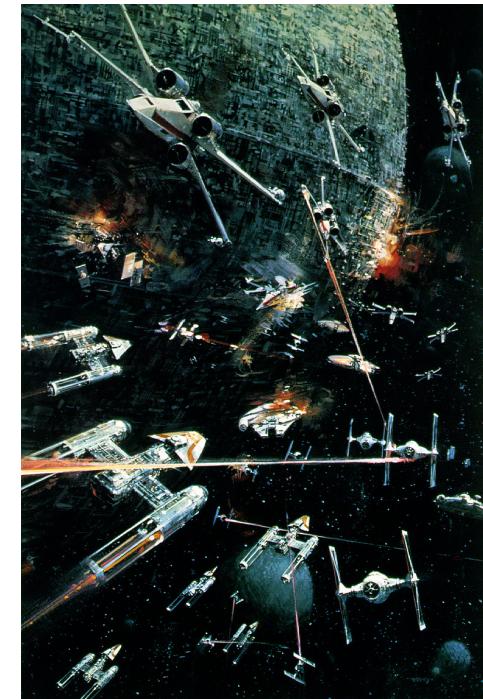
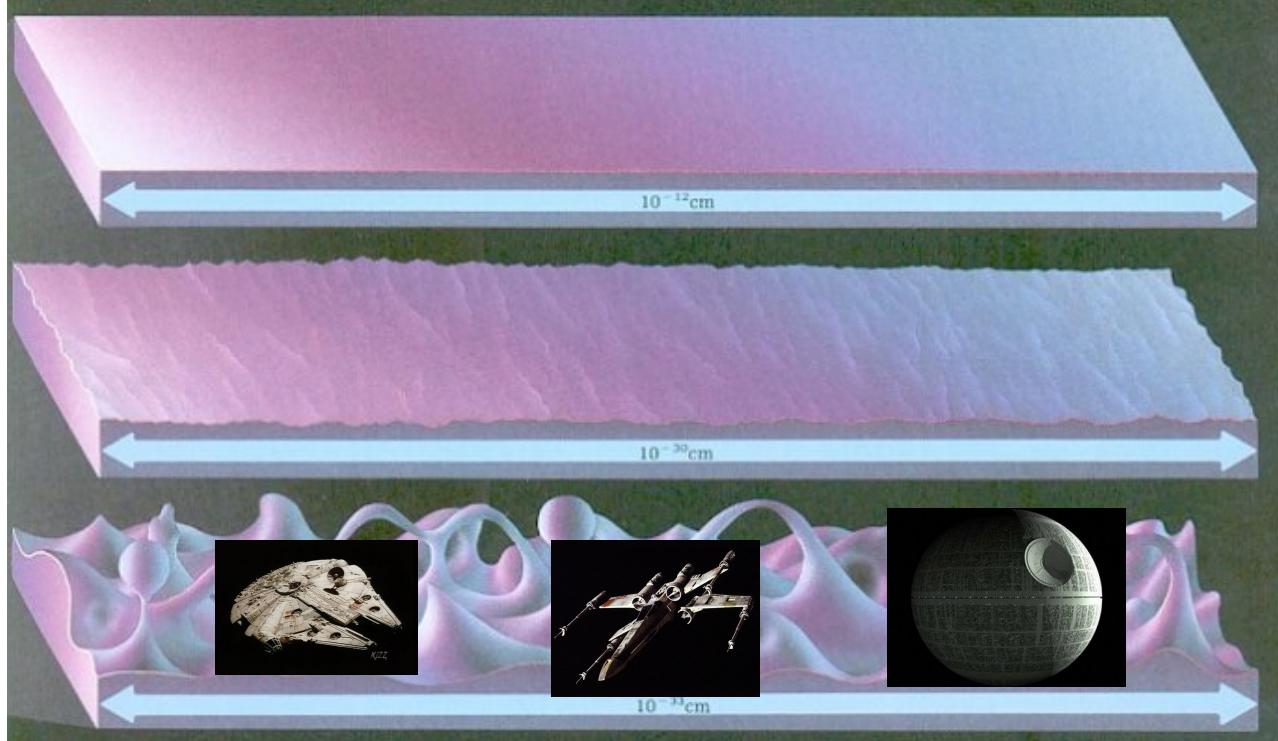
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = -\frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

~~+ Λ~~

Mit der neuen Konstante ist
ein statisches Universum möglich!

1929 beweist Hubble Expansion des
Universums!

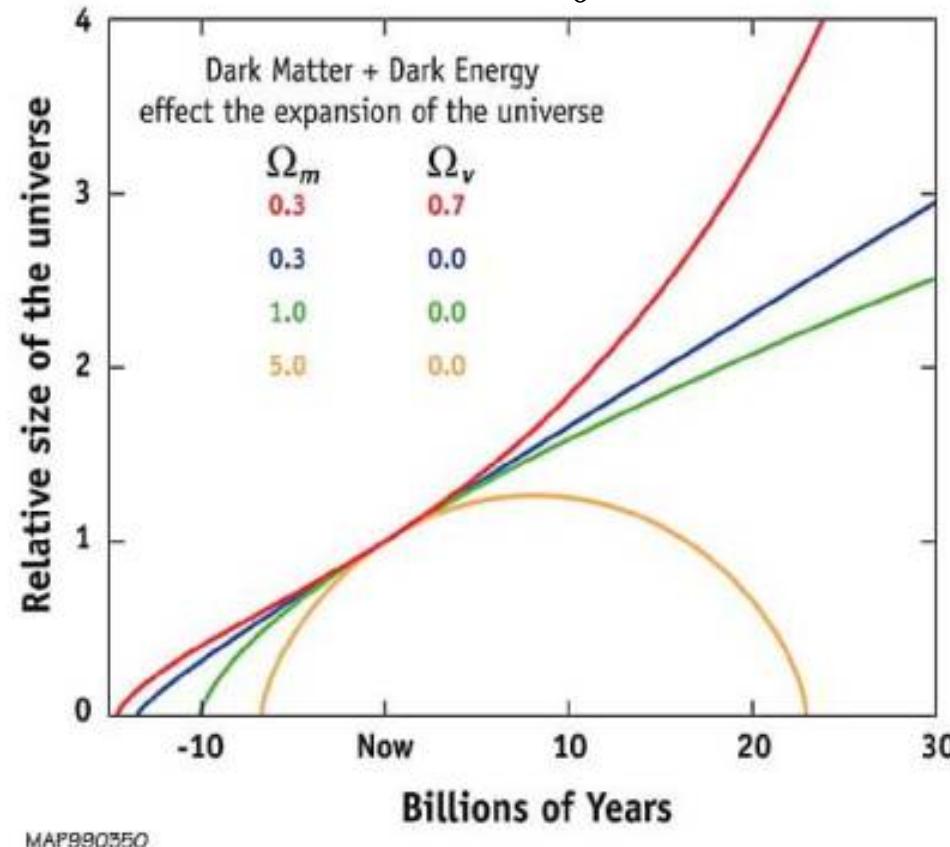
Im Vakuum ist die Hölle los



Theorie und Experiment unterscheiden sich um einen Faktor

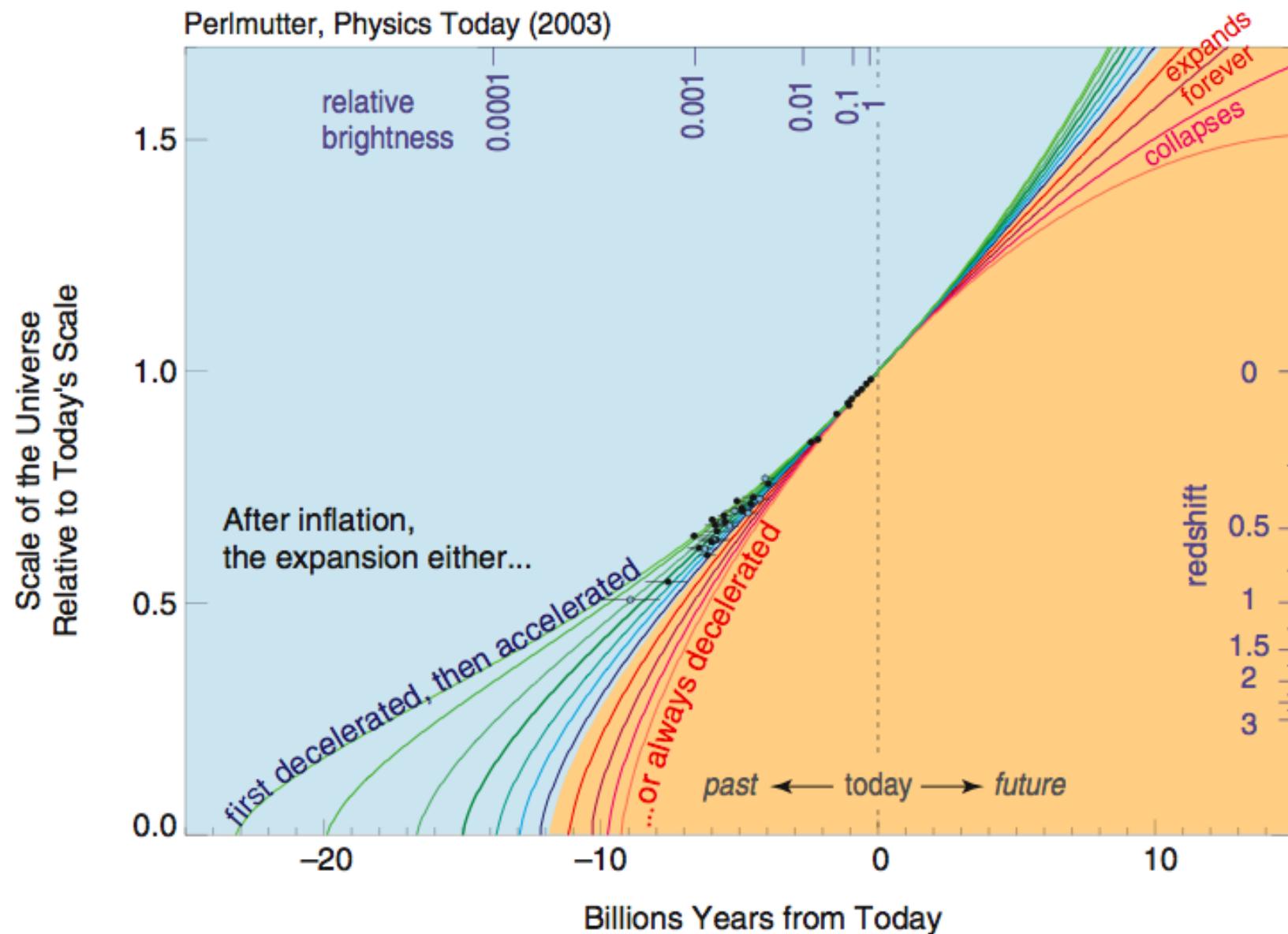
Kosmologische Konstante = Energiedichte des Vakuums

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

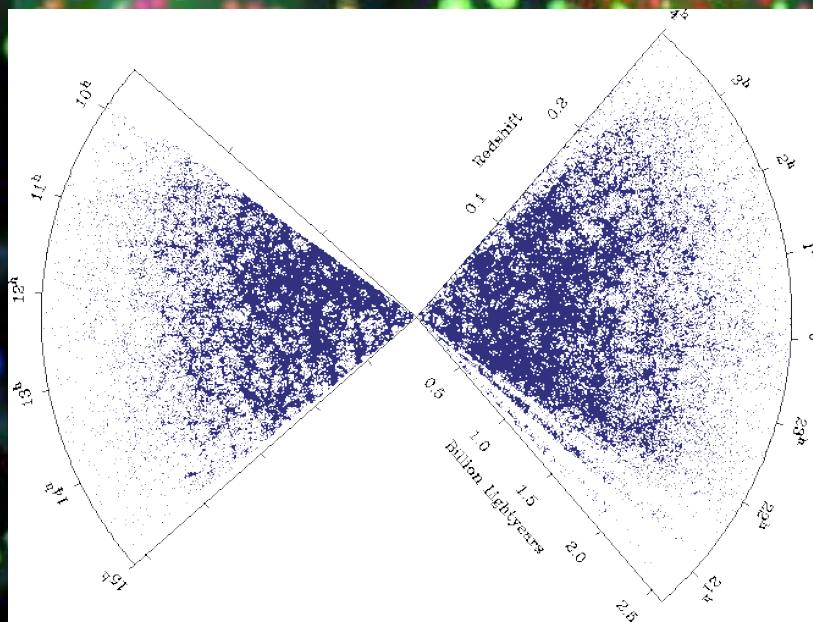
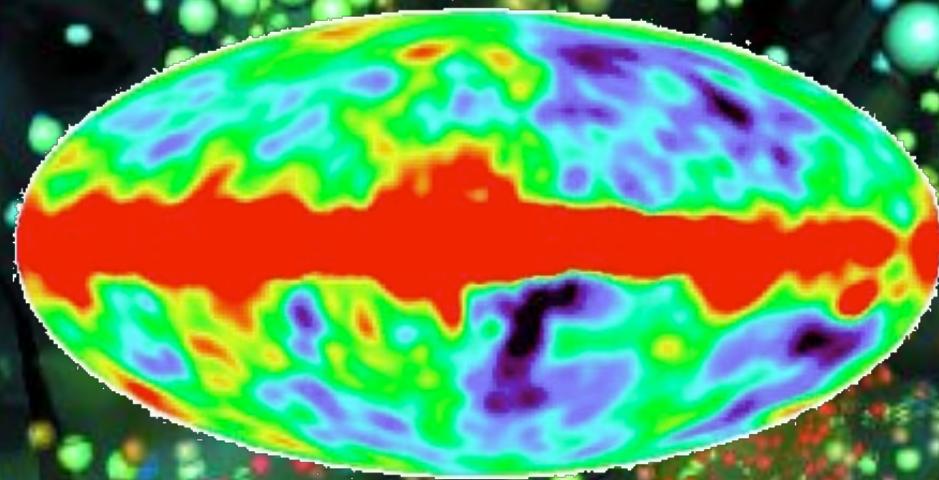


$p = -\rho \rightarrow$ beschleunigte Universen

Expansion History of the Universe



Struktur Formation



Wie schafft man das???

Primordiale Nukleosynthese

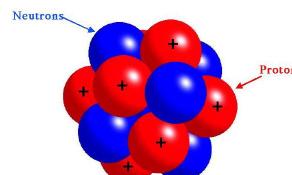
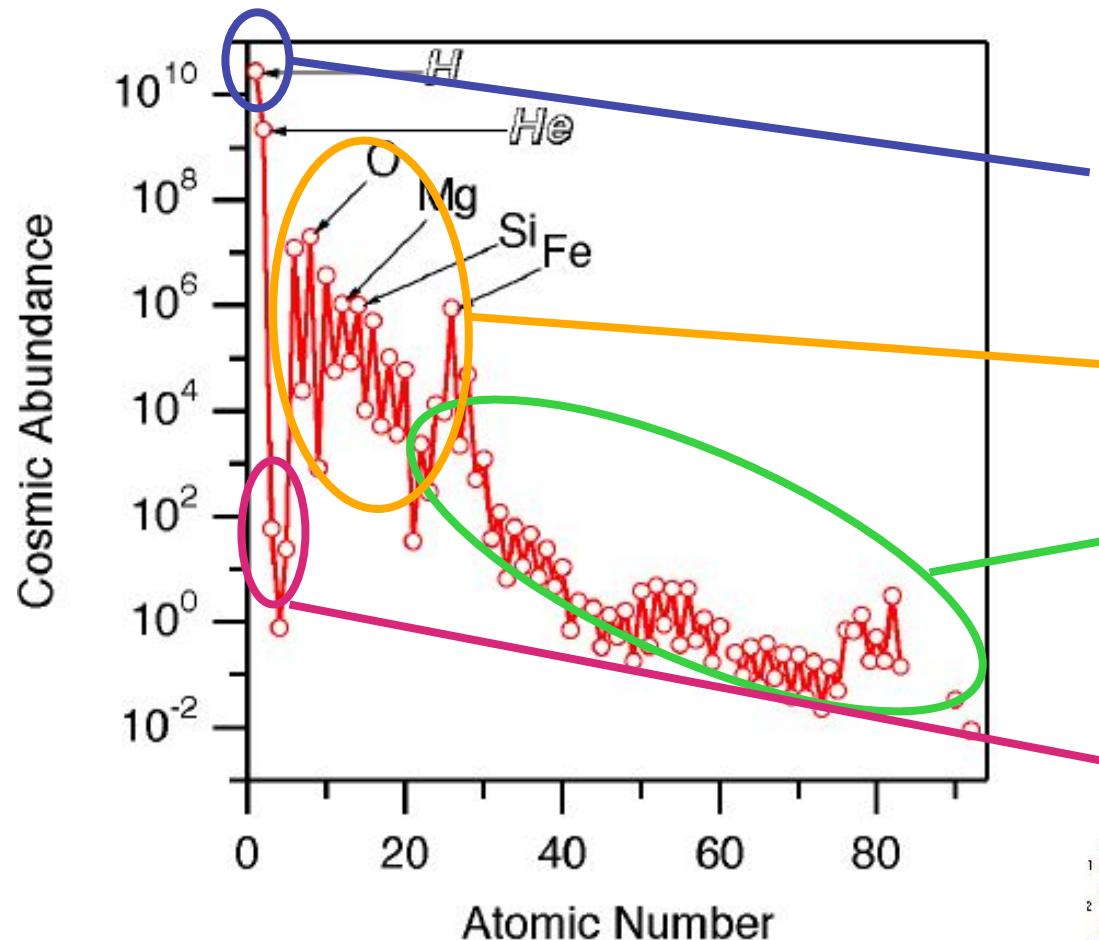
Die ersten 3 Minuten...



Produktion der Atomkerne von Helium und Lithium

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

Ursprung der Elemente



entstanden in:

Primordialer Nukleosynthese

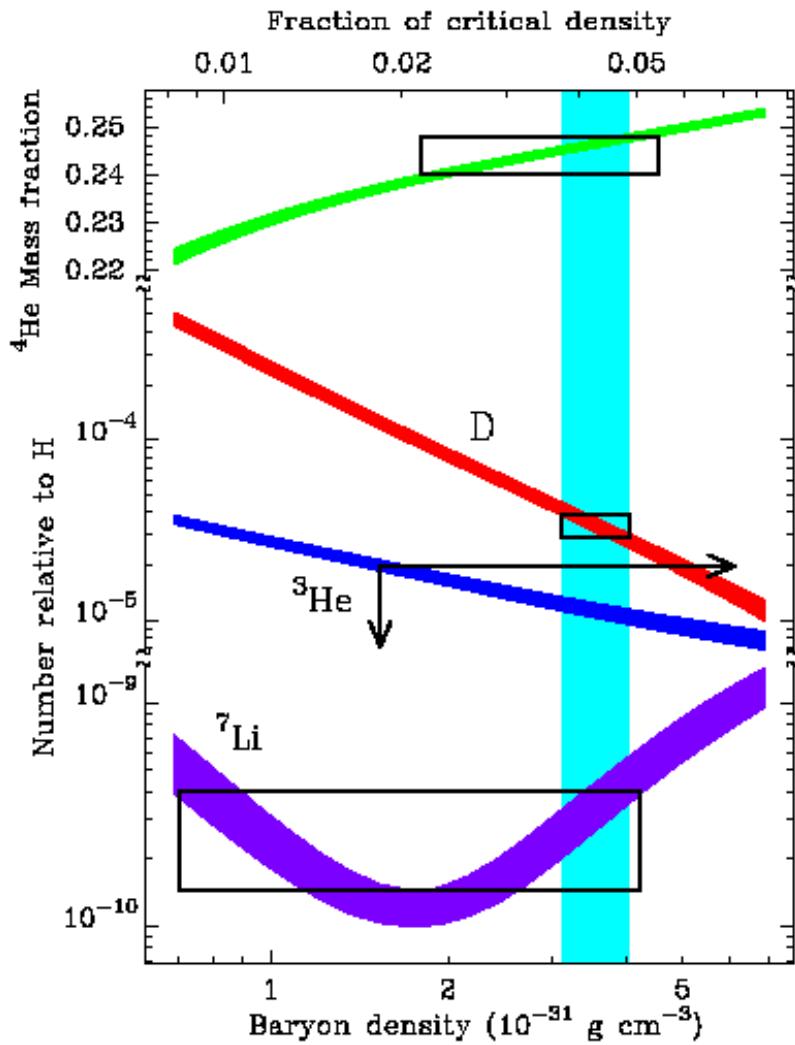
Fusion in Sternen

Supernova Explosionen

Wechselwirkung der
kosmischen Strahlung

Periodic Table of the Elements																		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
H	He	Li	Be	Na	Mg	Al	Si	P	Ne	Li	Ti	Al	Si	P	S	Cl	Ar	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Li	Be	Be	Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
Na	Mg	Mg	Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Na	Mg	Mg	Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
Ca	Sc	Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
Ca	Sc	Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Ar	Ar	
7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Ar	Ar	
8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Ar	Ar	
9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Ar	Ar	
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Ar	Ar	
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	
Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Ar	Ar	
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	
Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Ar	Ar	
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Ar	Ar	
14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Ar	Ar	
15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	
Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Ar	Ar	
16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	
Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Ar	Ar	
17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	
Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Ar	Ar	
18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	
Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Ar	Ar	
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Ar	Ar	
20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	
Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Ar	Ar	
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	
Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Ar	Ar	
22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	
Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Ar	Ar	
23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	
Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Ar	Ar	
24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	
Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Ar	Ar	
25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	
Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Ar	Ar	
26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	
Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Ar	Ar	
27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	
Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Ar	Ar	
28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	
Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Ar	Ar	
29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	
Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Ar	Ar	
30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	
Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Ar	Ar	
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	
Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Ar	Ar	
32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	
Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Ar	Ar	
33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	
Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Ar	Ar	
34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	
Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Ar	Ar	
35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	
Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Ar	Ar	
36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	
Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Ar	Ar	
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	
Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Ar	Ar	
38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	
Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Ar	Ar	
39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	
Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Ar	Ar	
40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	
Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Ar	Ar	
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	
Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Ar	Ar	
42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52</td								

Theory versus experiment



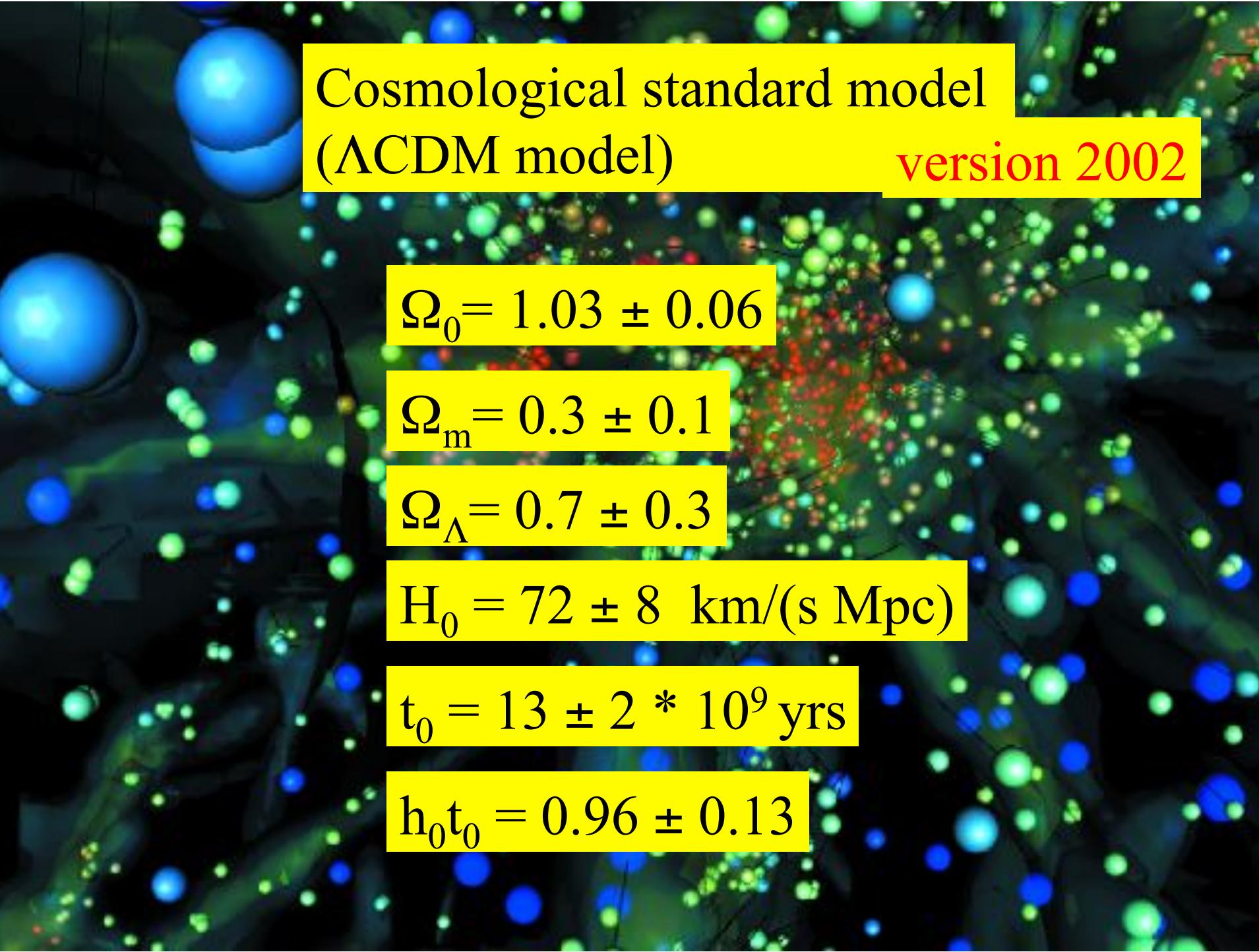
$$D/H = 3.0 \pm 0.4 * 10^{-5}$$

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

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

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

Consistent solution covering 10 orders of magnitude



Cosmological standard model (Λ CDM model)

version 2002

$$\Omega_0 = 1.03 \pm 0.06$$

$$\Omega_m = 0.3 \pm 0.1$$

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

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

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

$$h_0 t_0 = 0.96 \pm 0.13$$

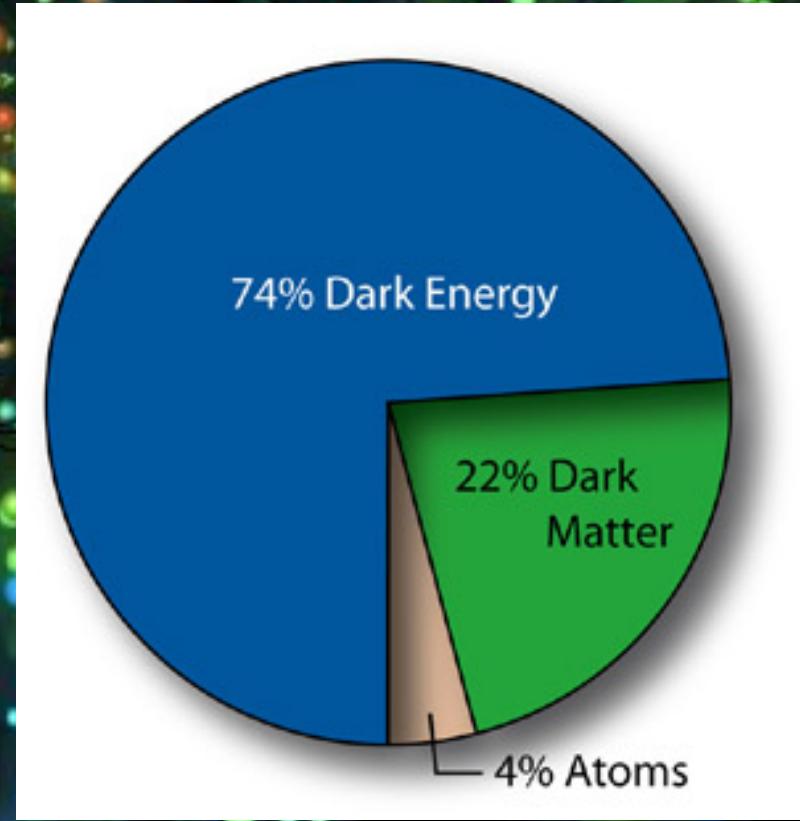
Das kosmologische Standard Modell (Λ CDM Modell)

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

Ω_{tot}

Ω_b

Ω_{DM}

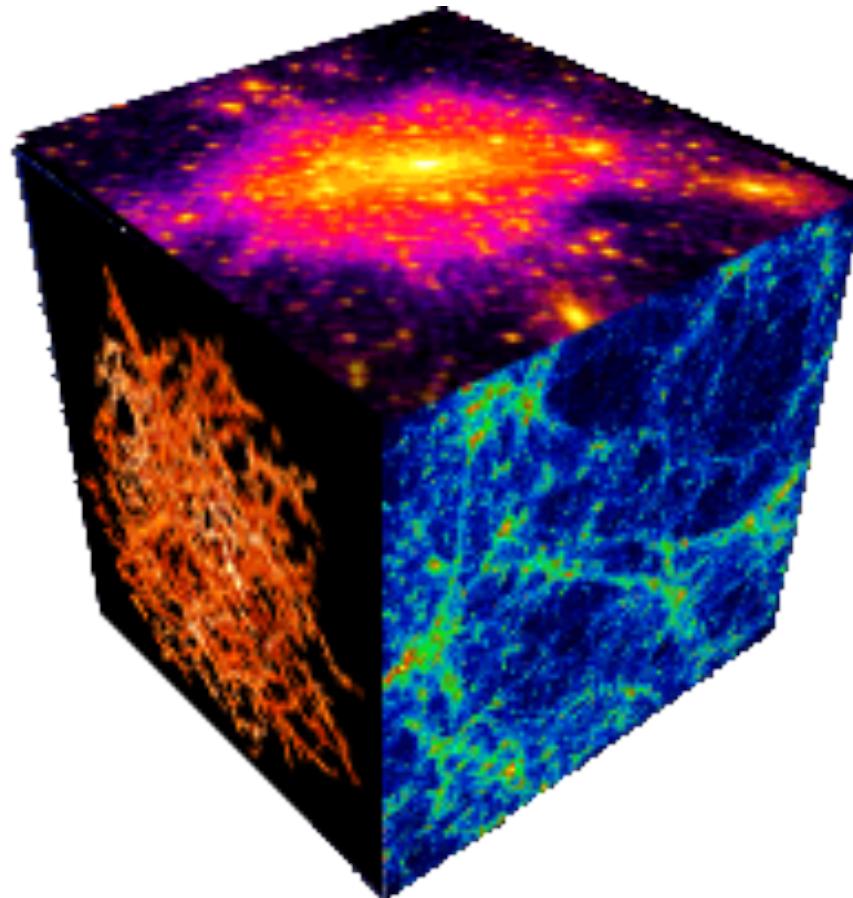
Ω_{Λ}

Ω_{mat}

Ω_{vis}

Ω_{ν}

Ω_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

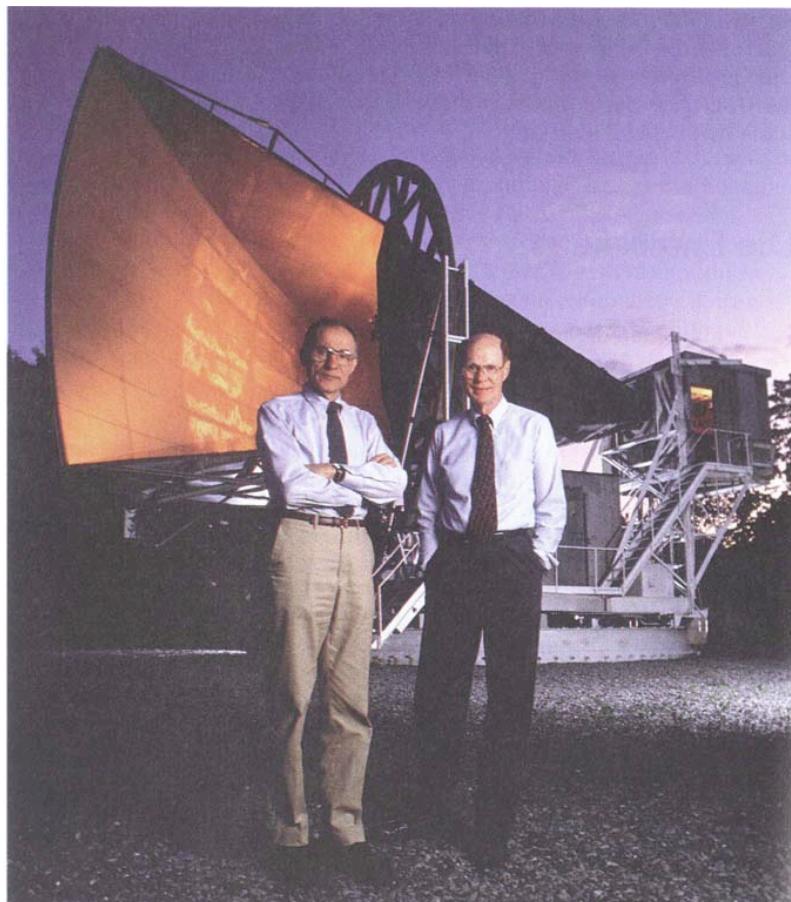
Präzisionsmessung aller kosmologischen Parameter

Die kosmische Hintergrundstrahlung

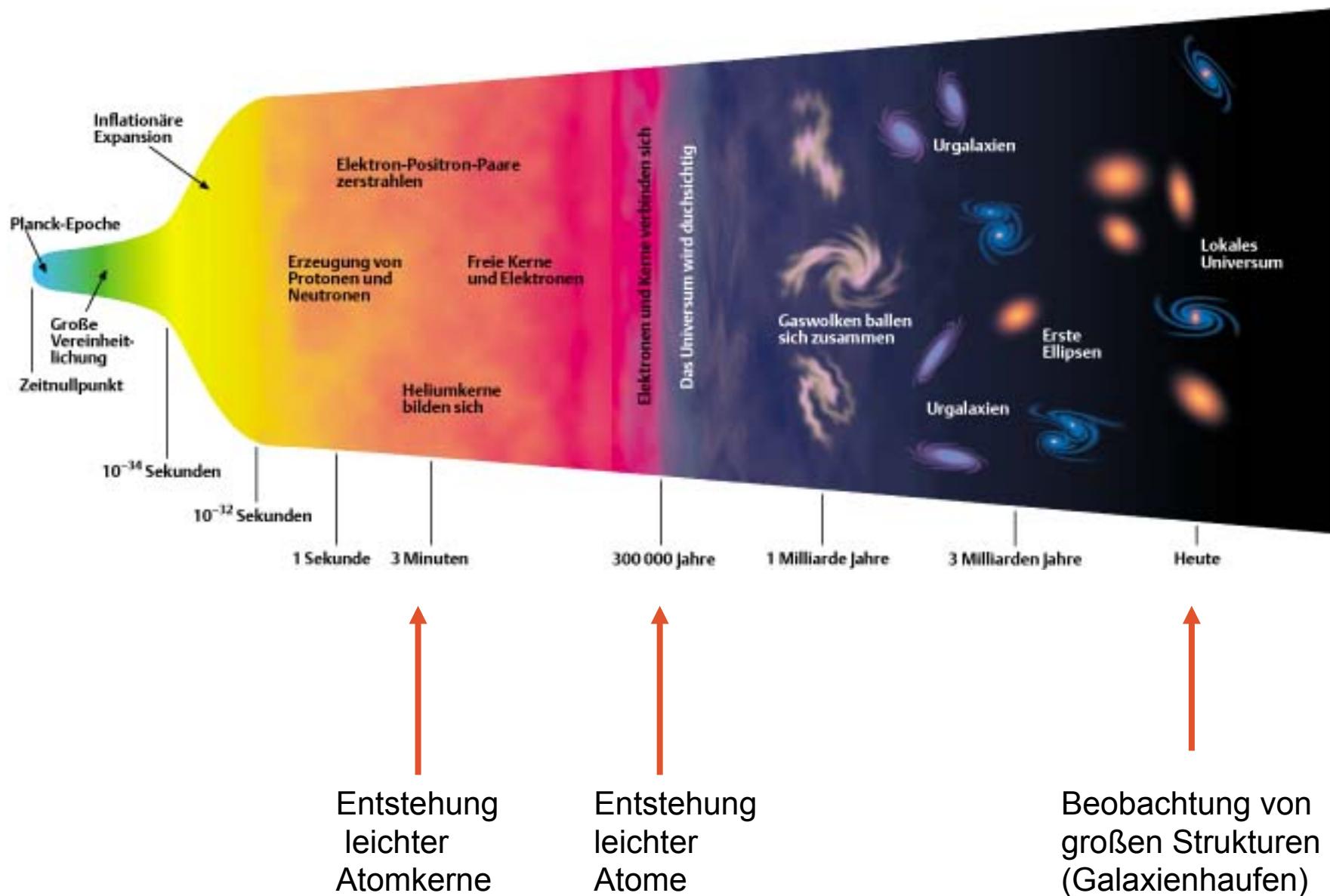
Das Nachglühen des Urknalls

Zufallsentdeckung durch Penzias & Wilson 1964

Nobelpreis 1978

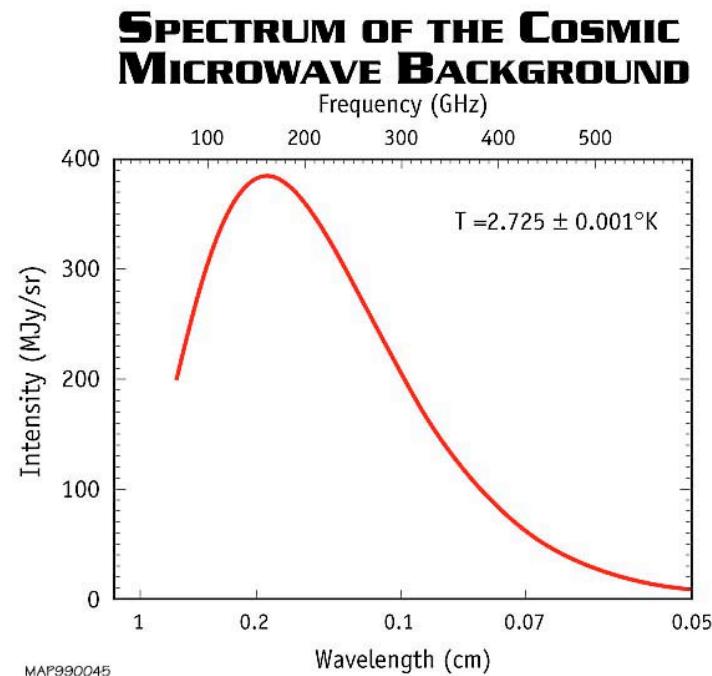
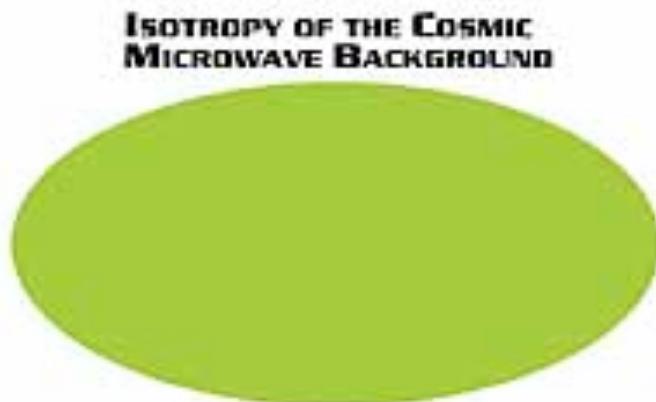


Die Evolution des Universums



Die 3K-Strahlung

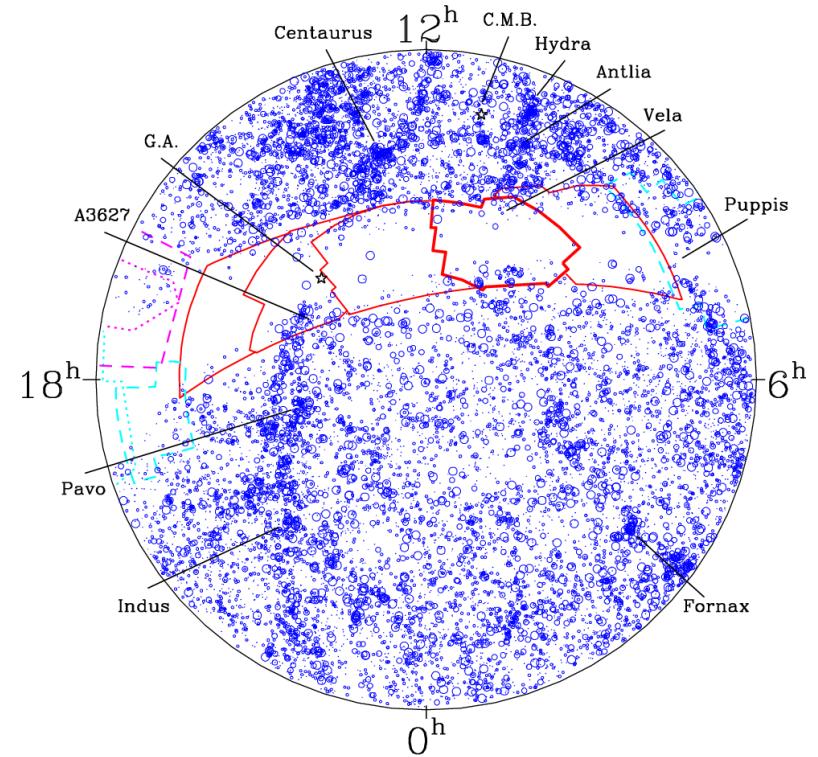
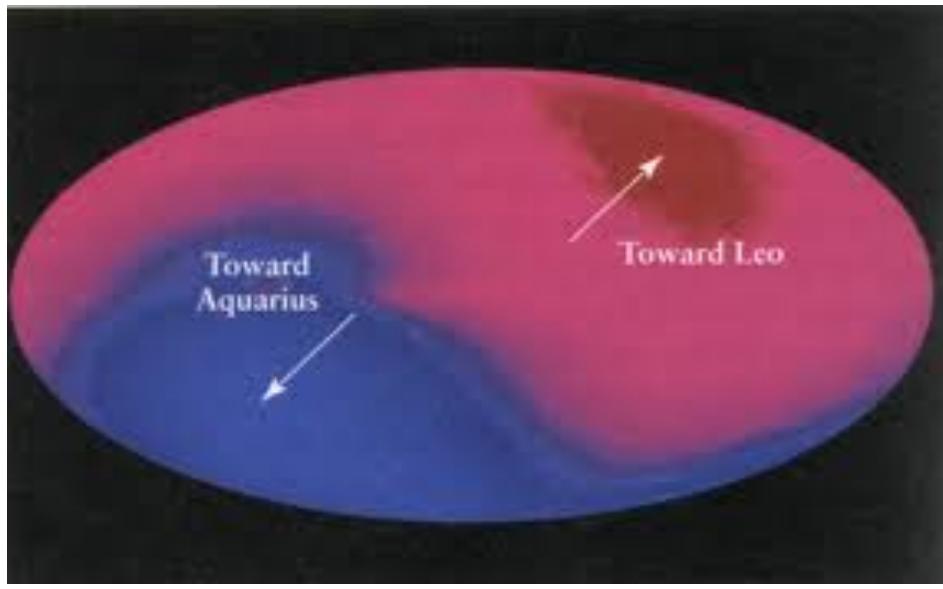
- Ein einmaliger Schnappschuss des Universums bei einer Rotverschiebung von $z = 1100$
- Licht entkoppelt sich von der Materie, Universum wird transparent
- Verdichtungen von Atomen können anfangen zu wachsen → Galaxien



Perfekte Schwarzkörperstrahlung

Die Dipol Komponente

Temperaturunterschied von mK beobachtet

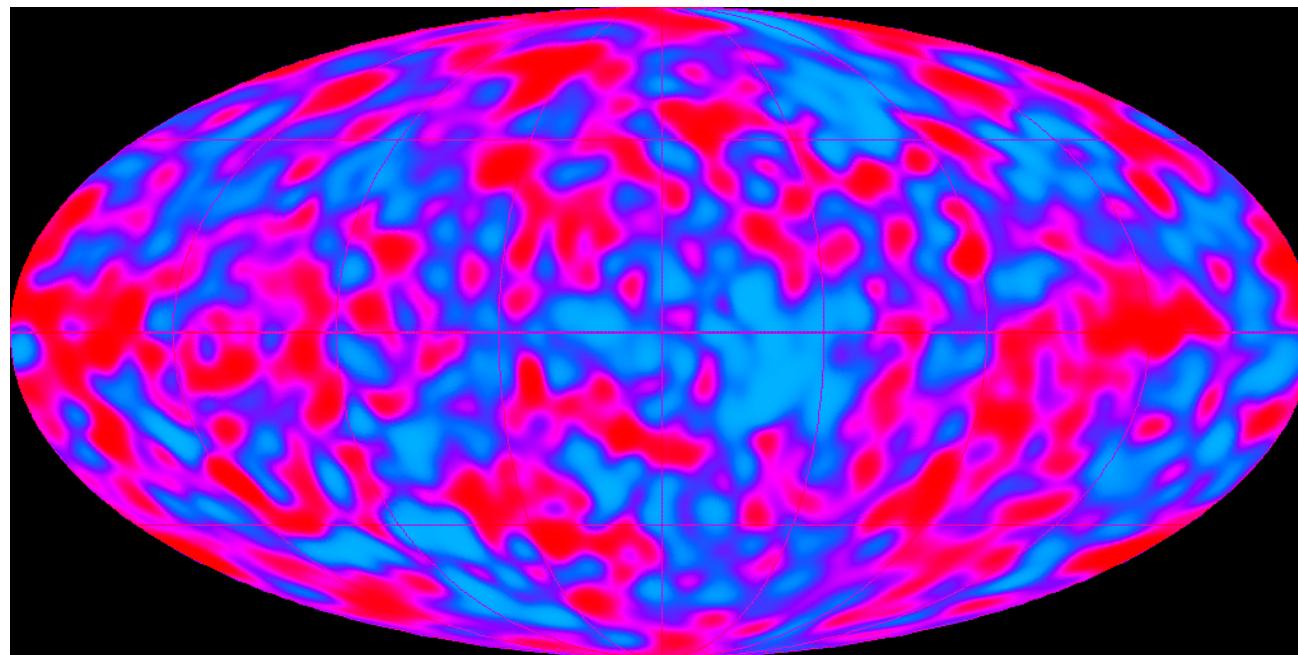


Wir bewegen uns mit 369 kms^{-1} im Bezug auf die Hintergrundstrahlung durchs All

Doch nicht so perfekt

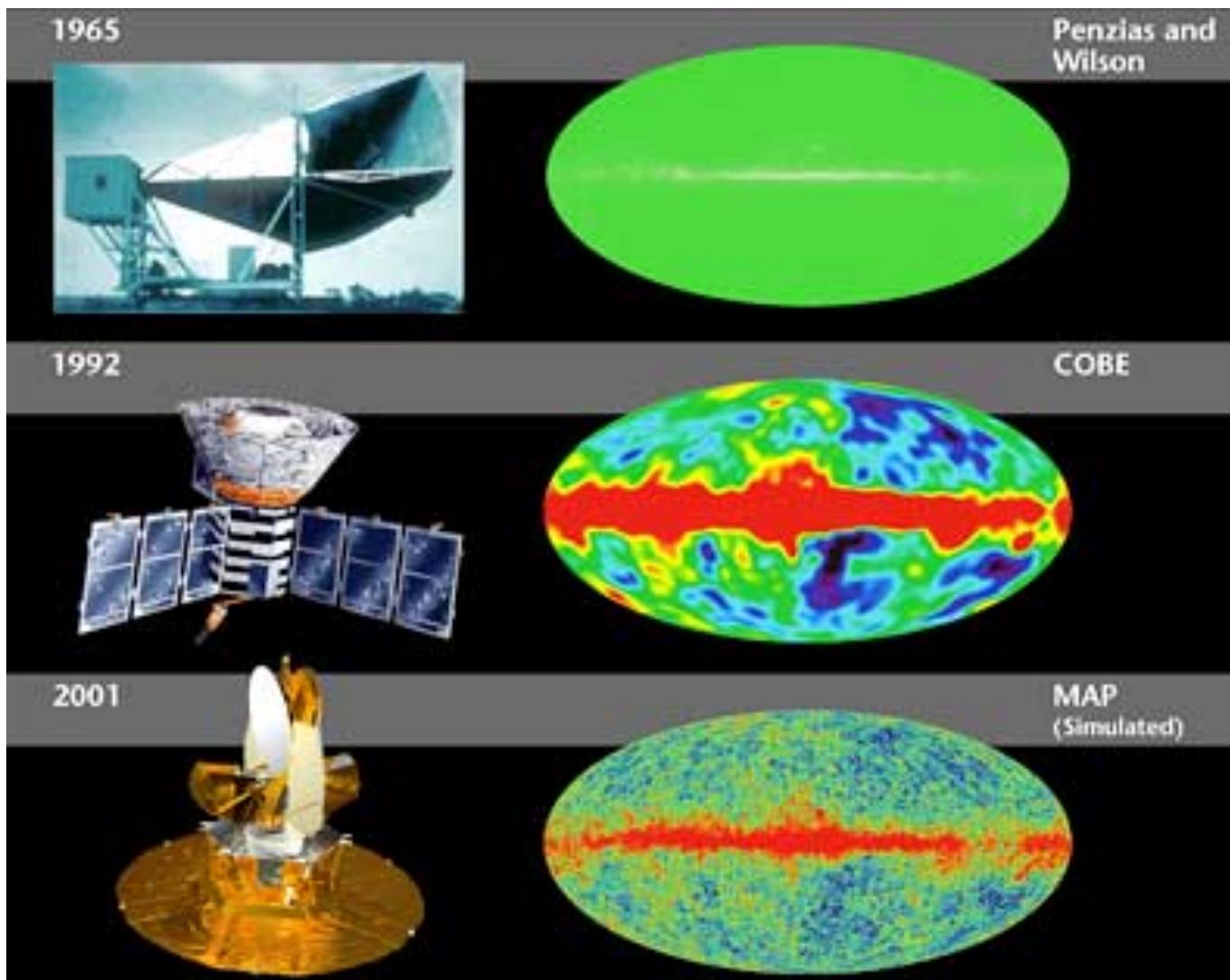
Weitere Temperaturunterschiede von μK beobachtet

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

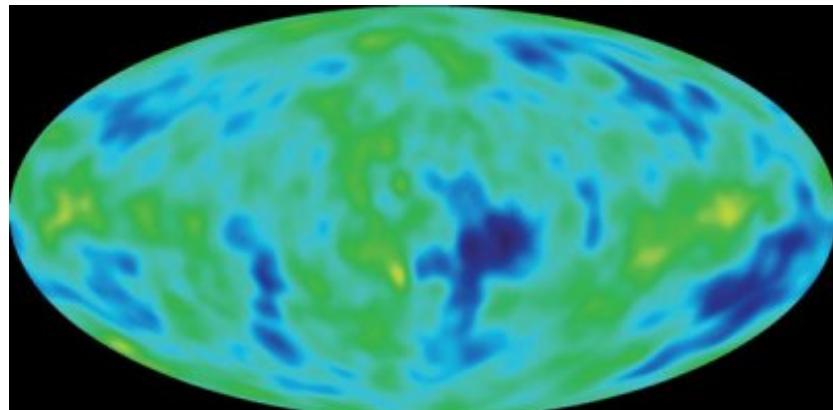


Nobelpreis 2006: G. Smoot, J. Mather

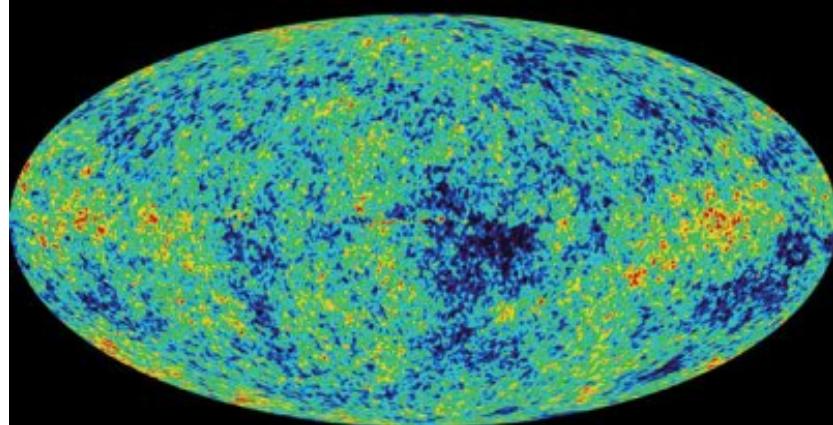
Die Temperatur beträgt in alle Richtungen etwa 3 K



Nach Abzug aller bekannten Quellen sieht man jedoch
Schwankungen im Bereich von 0,00001 K



COBE
1994

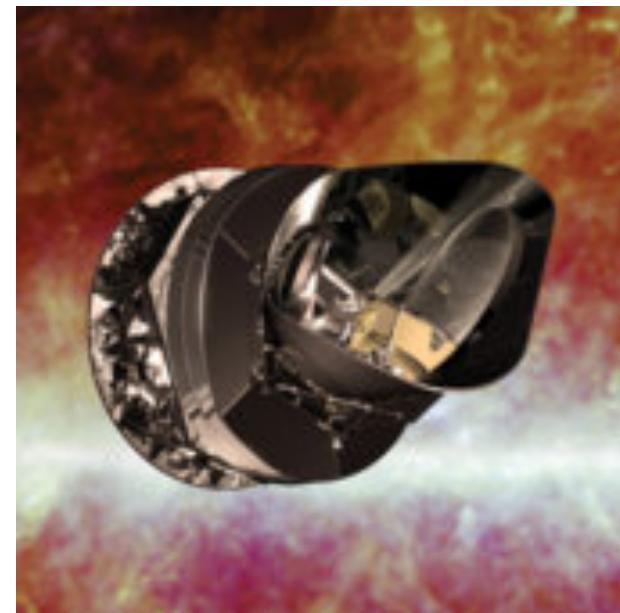
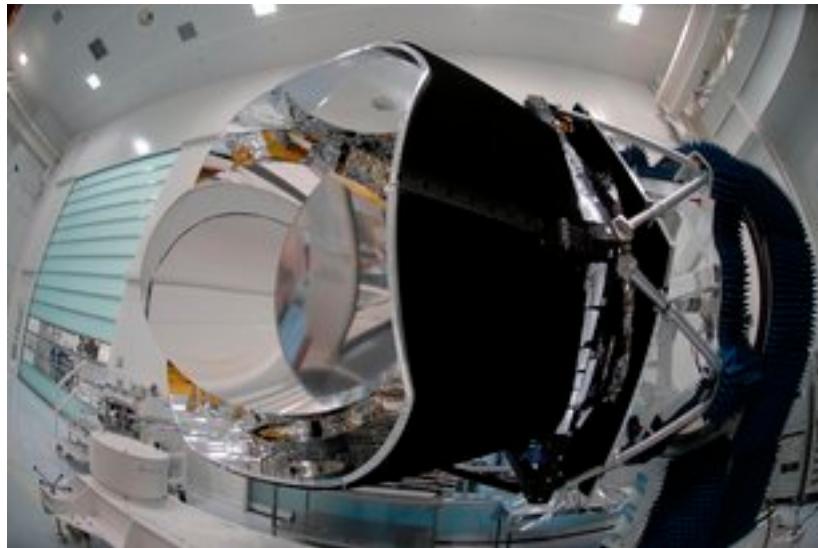


WMAP
2007

Aus diesen Schwankungen formen sich später Galaxien

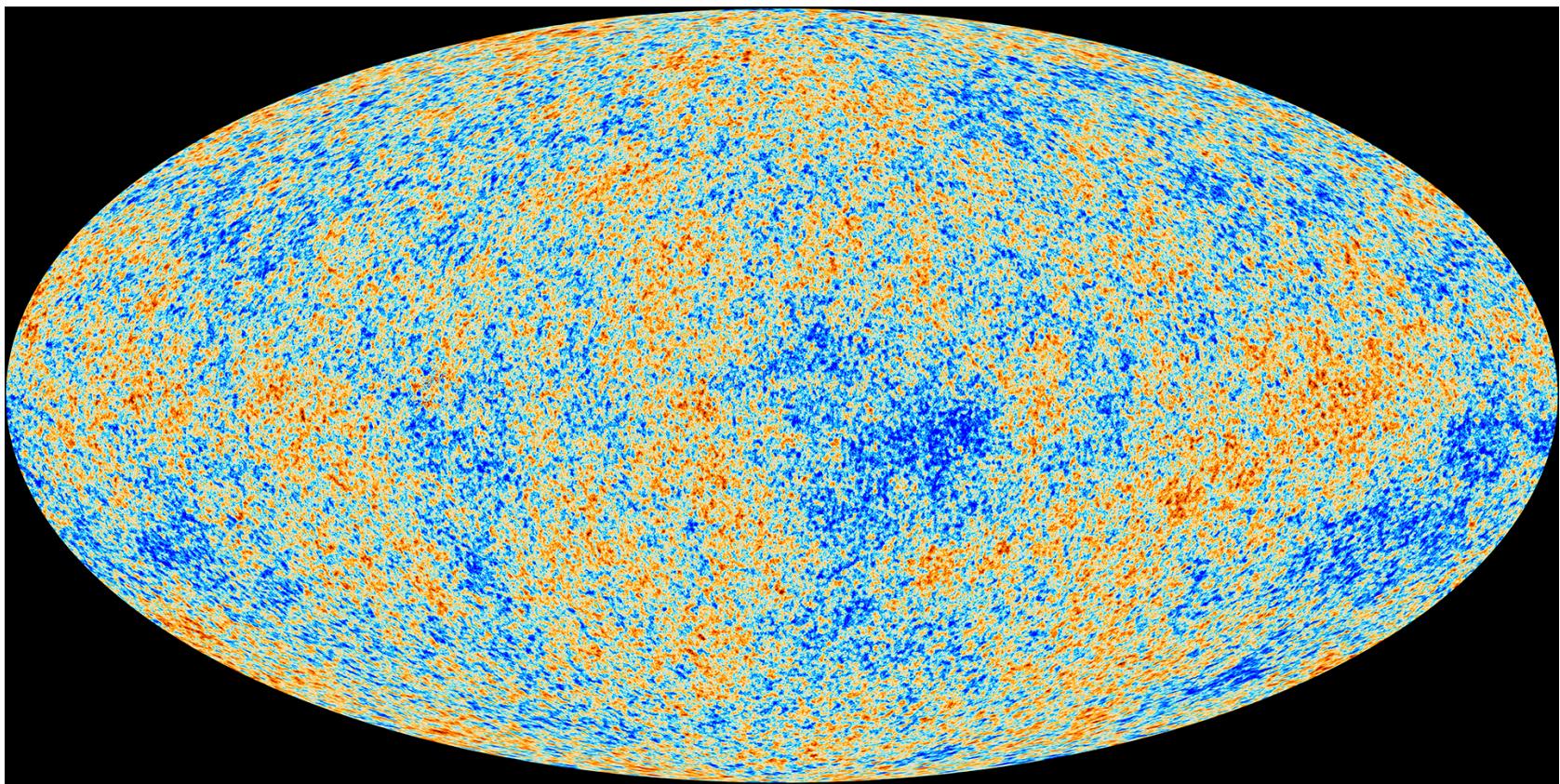
Planck ist erste europäische Mission zum Studium des CMB

Start am 14.5.2009
mit Ariane 5 von Kourou

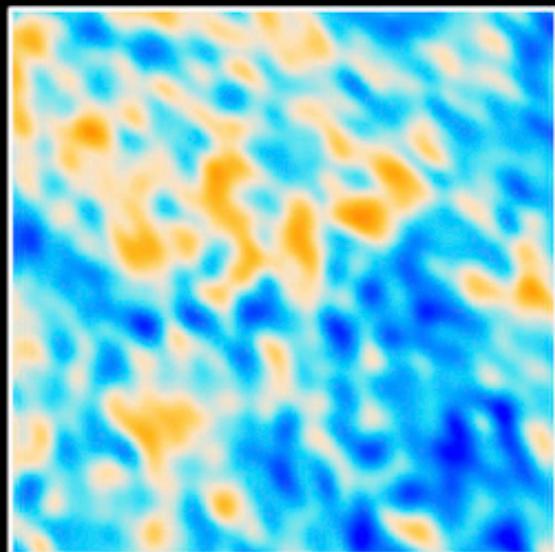
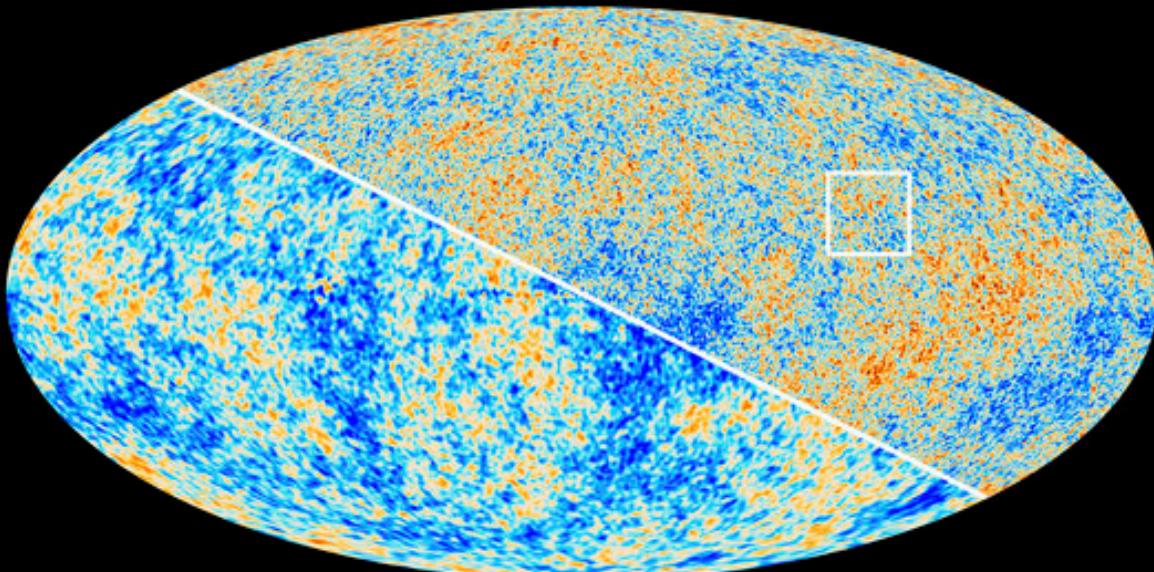


Gewicht bei Start etwa 1950 kg, 4.2 m hoch und 4.2 m maximaler Durchmesser

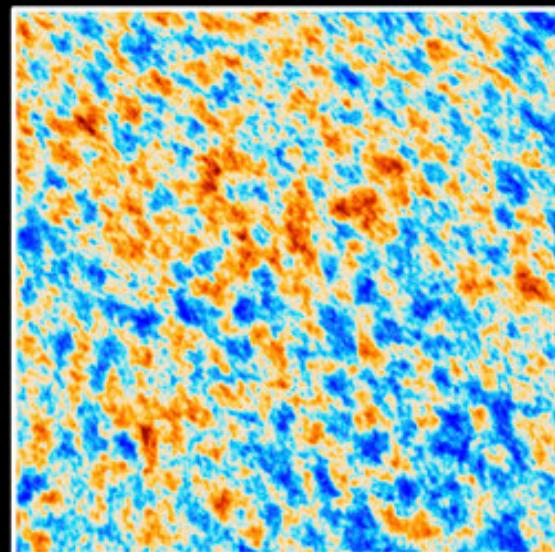
Die Anistropien – Planck 2013



The Cosmic Microwave Background as seen by Planck and WMAP



WMAP

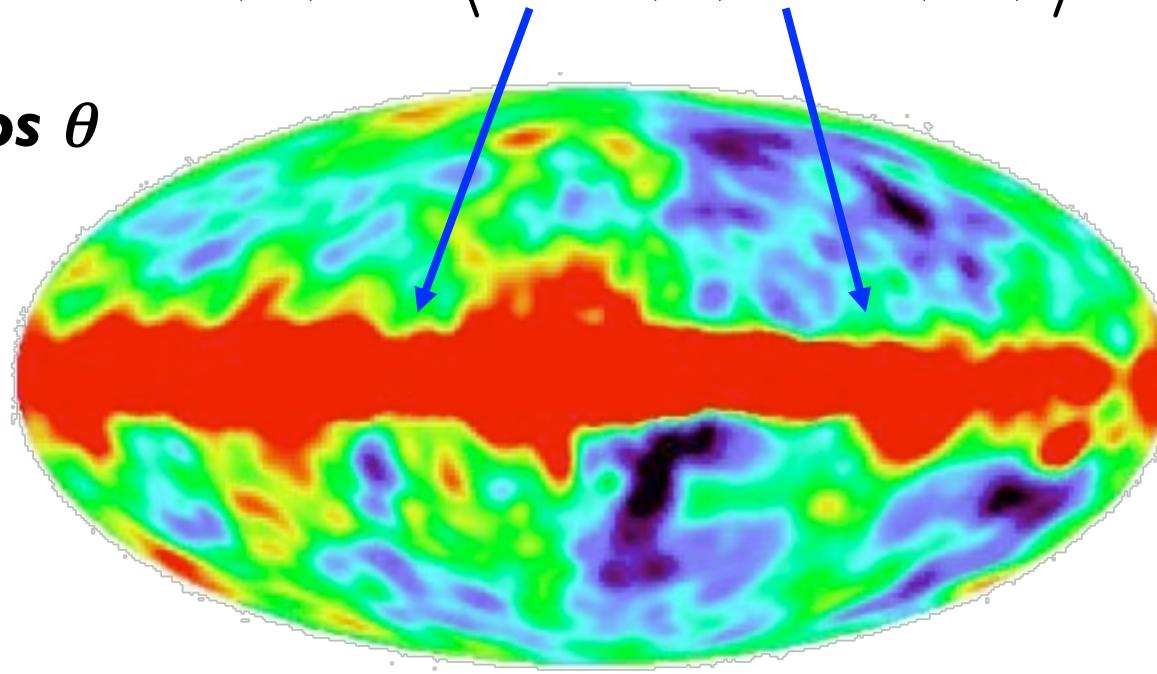


Planck

Anisotropies

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

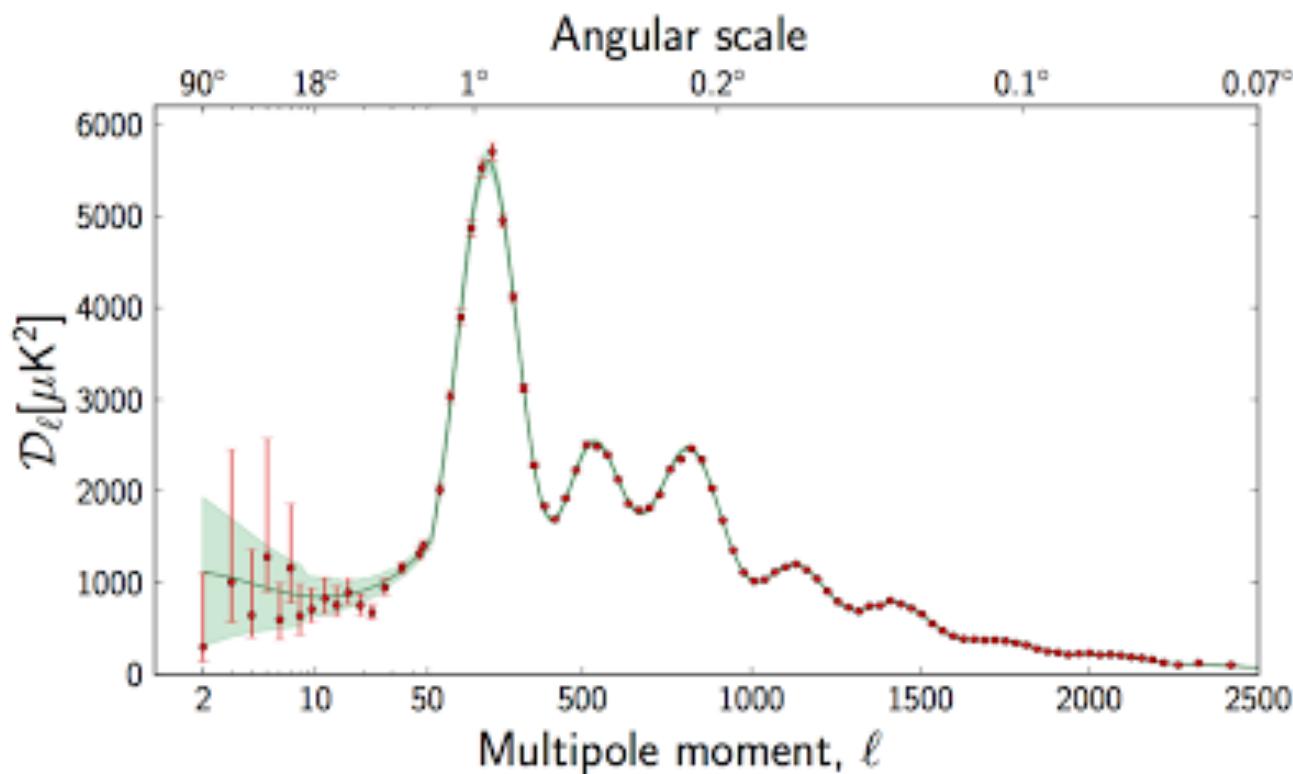
$$\overrightarrow{n} \overrightarrow{n'} = \cos \theta$$



Expansion in spherical harmonics

Legendre polynomials

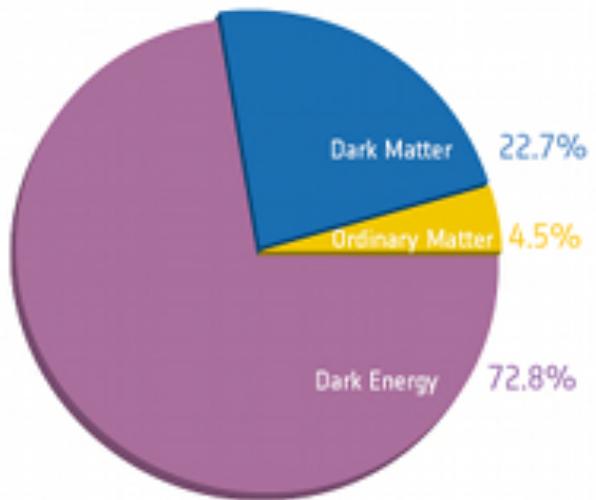
Power Spektrum



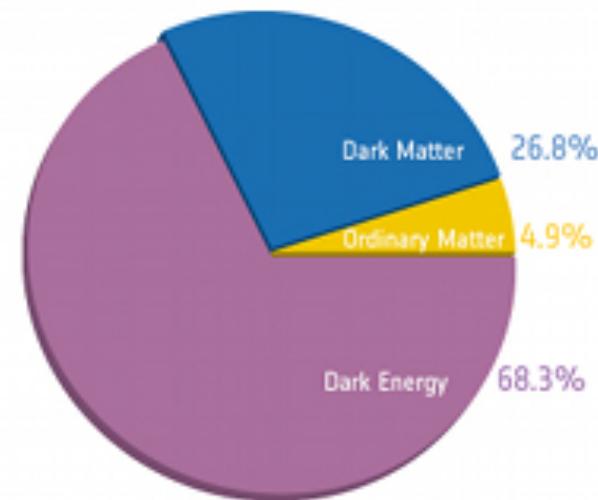
Lage, Höhe, Anzahl der Peaks hängt von den kosmologischen Parametern ab



Kosmologisch wichtigstes Resultat



Before Planck



After Planck

Cosmological standard model (Λ CDM model) Planck version 2013

$$\Omega_B = 0.0481$$

$$\Omega_{DM} = 0.257$$

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

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

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

