

Die Entwicklung des Universums

Thomas Hebbeker
RWTH Aachen
September 2003

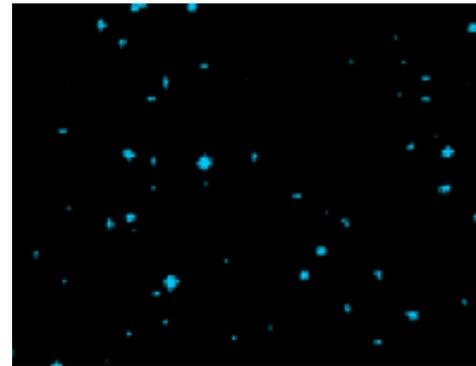
- Grundlegende Beobachtungen
- Das Big-Bang - Modell
- Die Entwicklung des Universums

Blick ins Universum: Sterne und Galaxien

Die Milchstrasse



„Unsere“ Galaxie = Milchstrasse

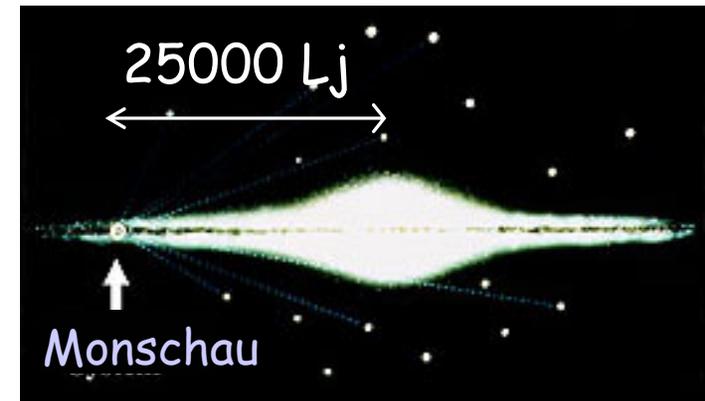


Nachbarstern

„Proxima Centauri“

4 Lichtjahre

1 Lichtjahr
=70000 mal
Abstand Erde-Sonne



25000 Lj

Menschau

Das Sonnensystem in der
Milchstrasse

Blick ins Universum: Sterne und Galaxien

Andere Galaxien



Palomar Observatory, E. Hubble (1949)



Nachbargalaxie

„Andromeda“

3 Millionen Lichtjahre

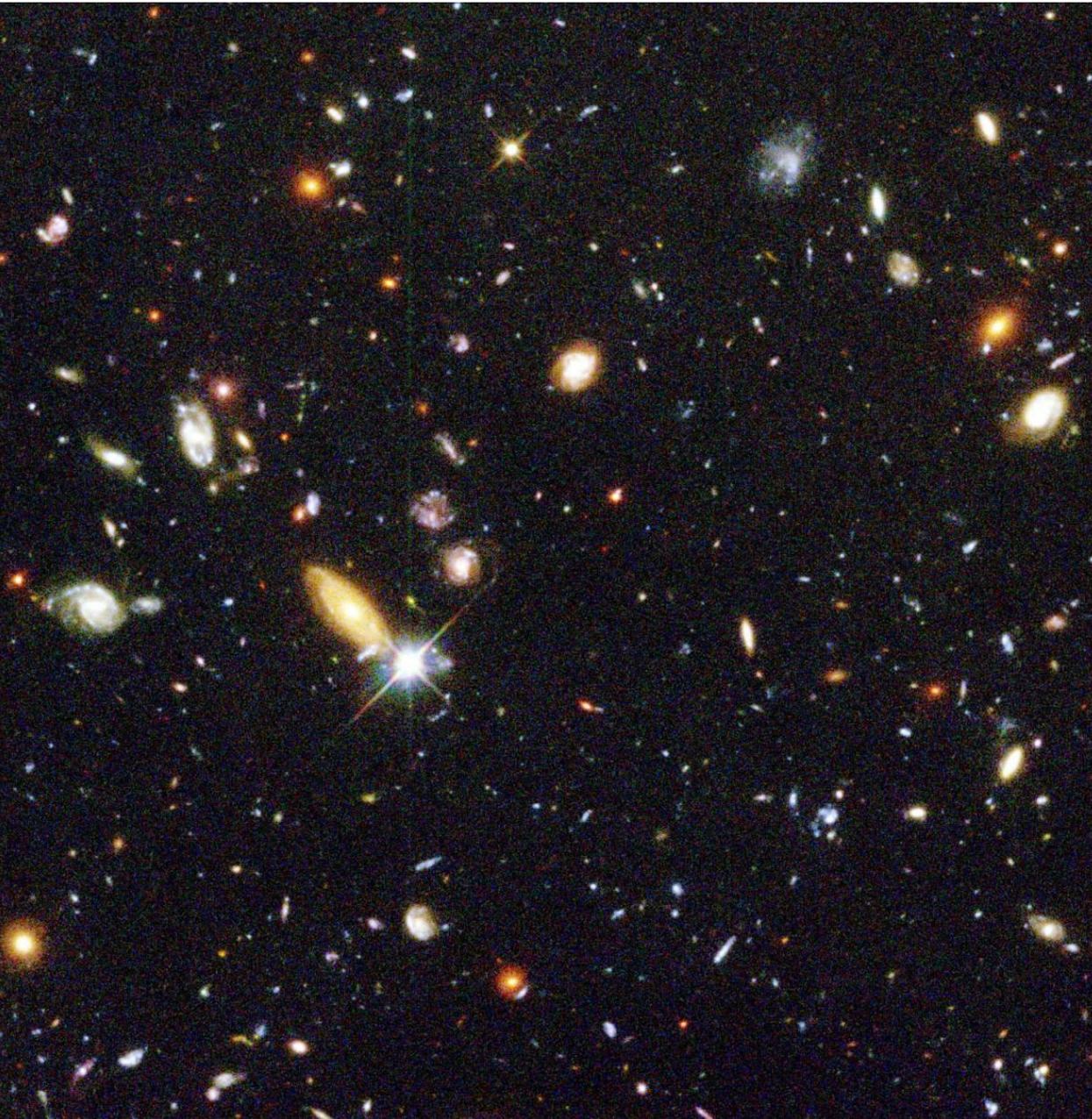


„Whirlpool“ (HST)

37 Millionen Lj

Blick ins Universum: Sterne und Galaxien

T.Hebbeker



Entfernte Galaxien



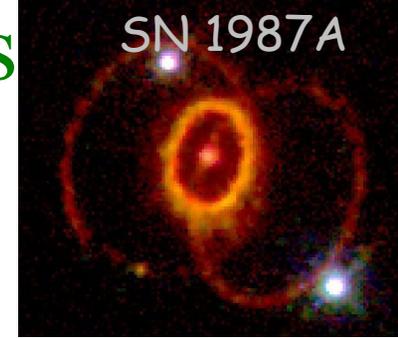
Hubble-Teleskop

bis zu einigen
Milliarden Lichtjahren

Blick in die
Vergangenheit!

Die Chemie des Universums

SN 1987A



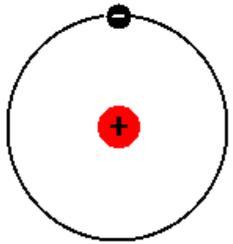
Vor der Sternbildung:

75 %

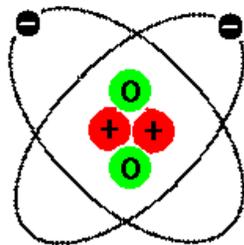
Wasserstoff

25 %

Helium



^1H



^4He

proton:

electron:

neutron:

Am Ende des Sternenlebens:

Periodic Table of Elements

1	2																	3							
1	2																	2							
3	4																	5	6	7	8	9	10		
11	12	13	14	15	16	17	18																	19	20
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36								
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54								
55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86								
87	88	89	104	105	106	107	108	109	110									111							

* Lanthanide Series

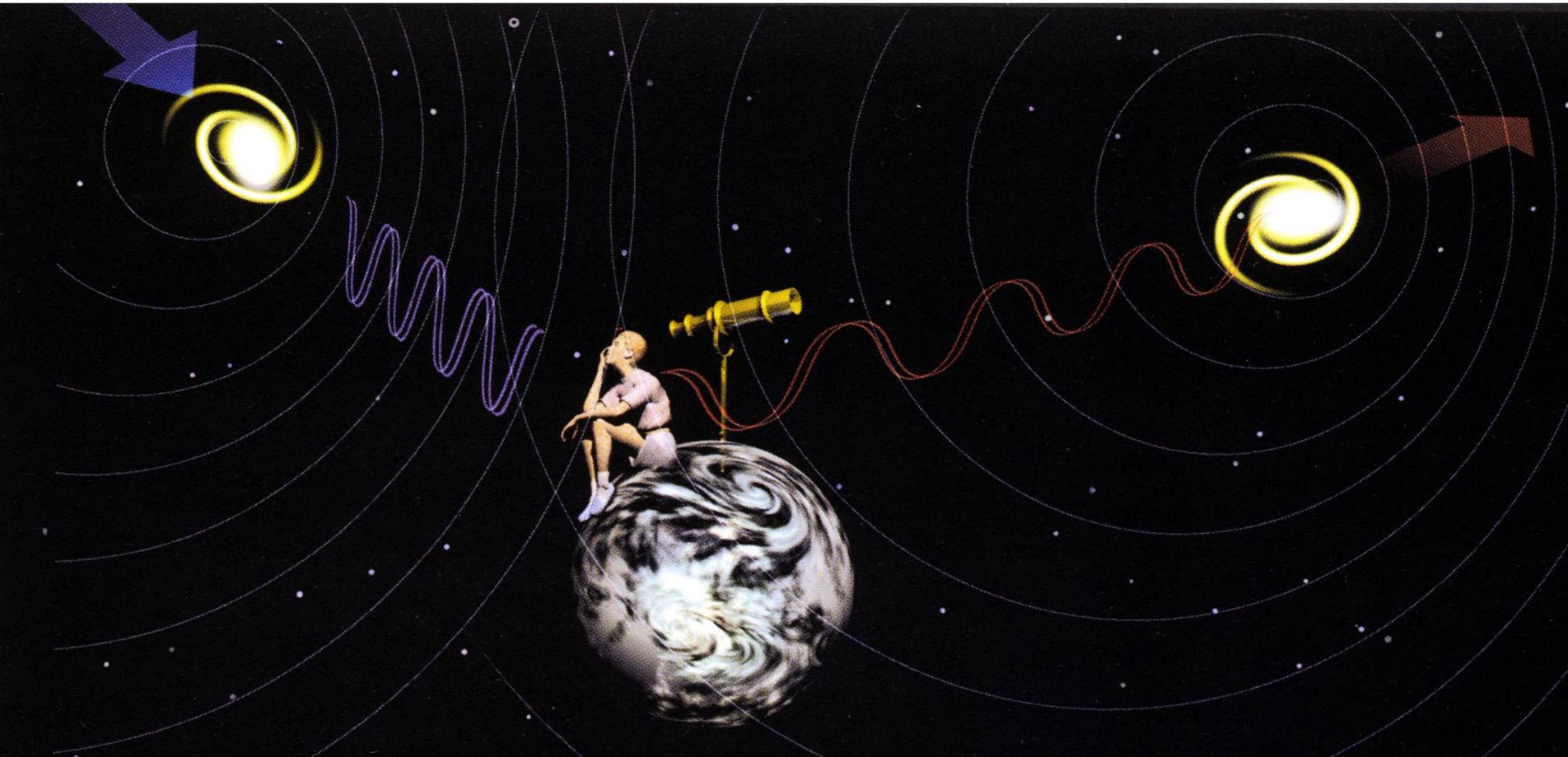
58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu

+ Actinide Series

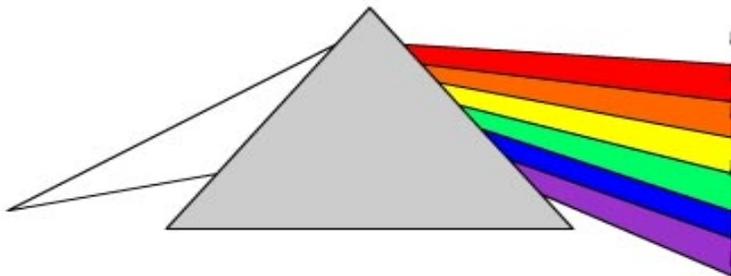
90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

**Wir bestehen aus
Sternenasche !**

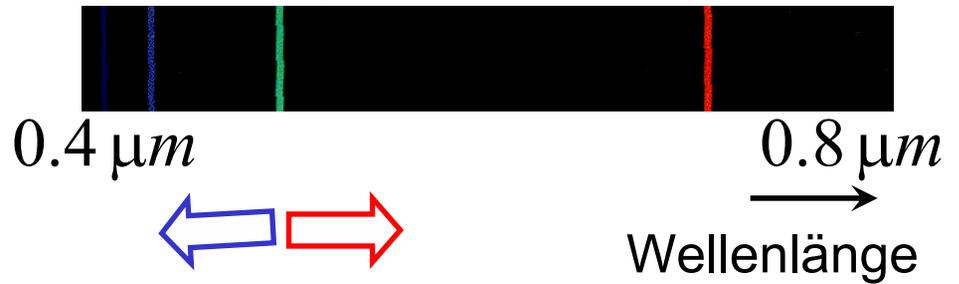
Doppler-Effekt (Licht)



Sonnenlicht:

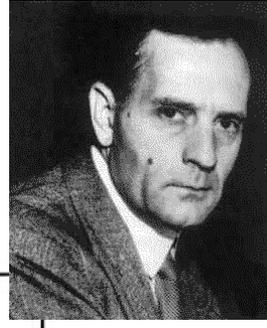


Atomare Spektrallinien:

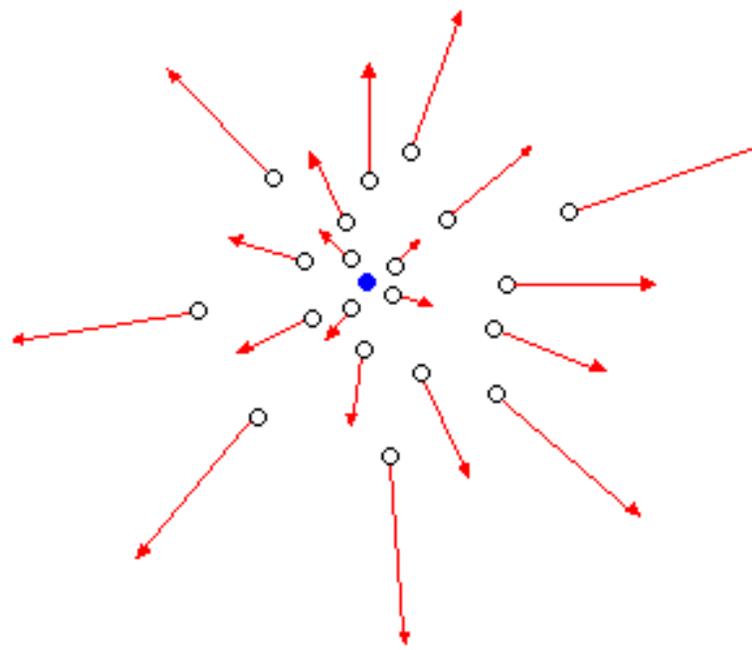
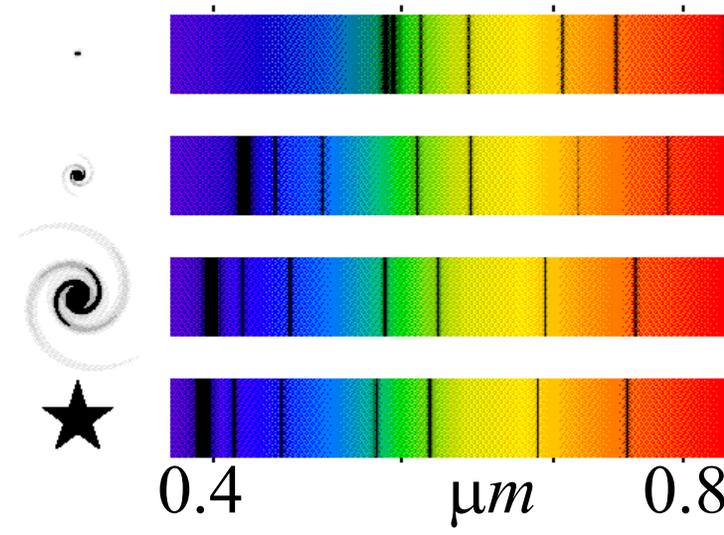
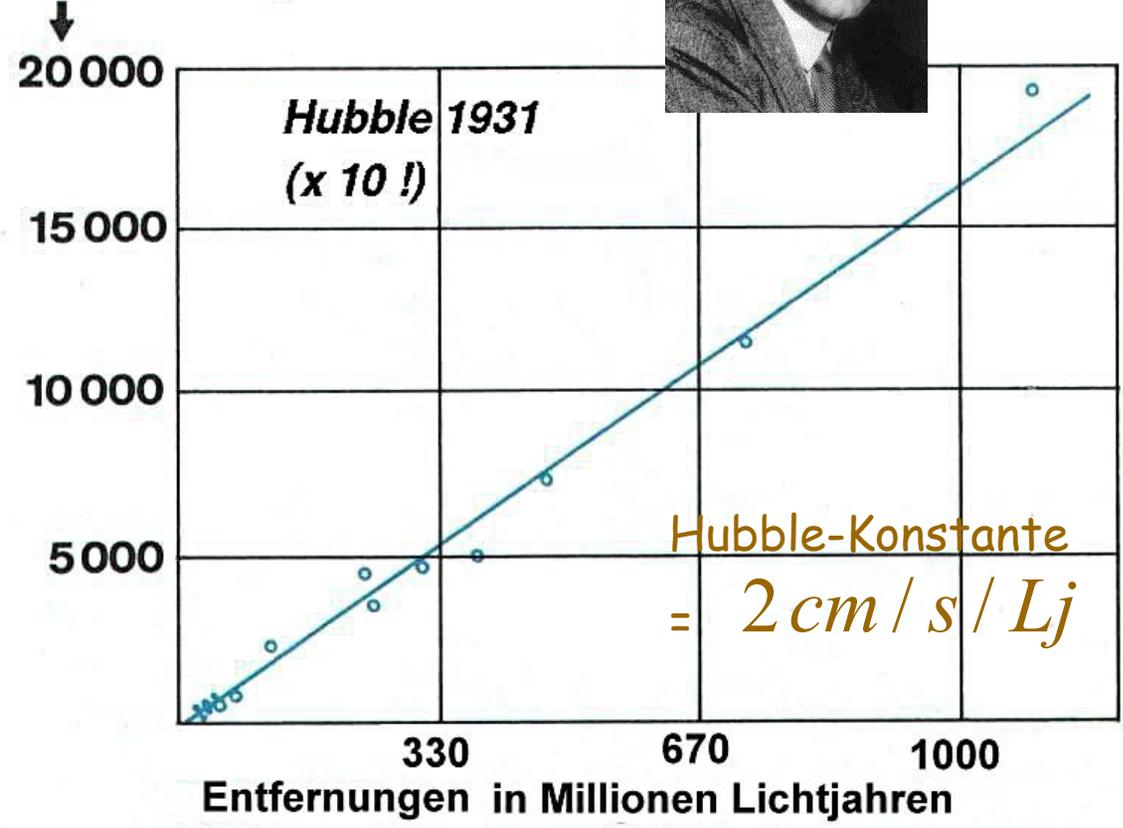


Rotverschiebung der Spektrallinien

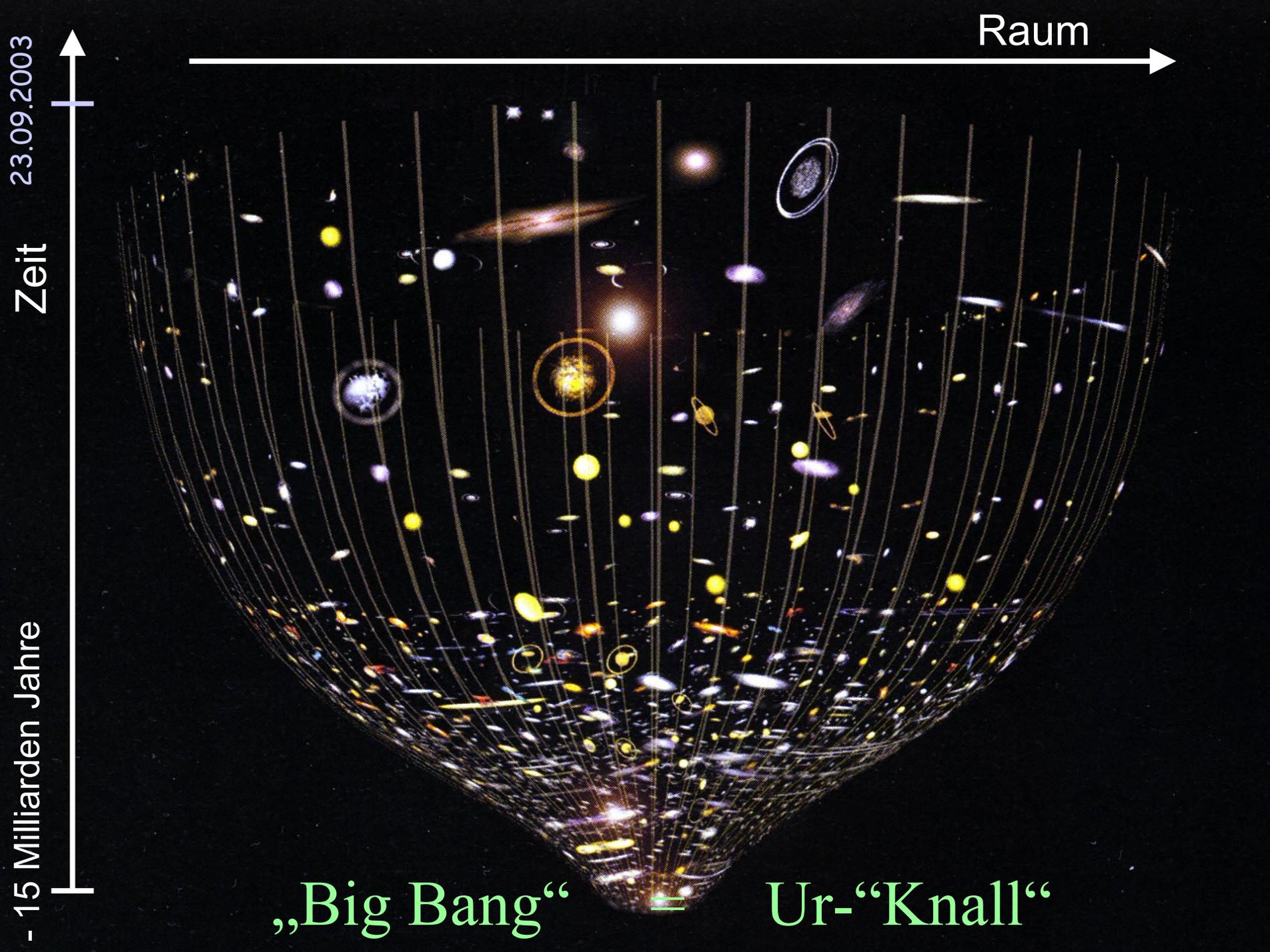
E. Hubble

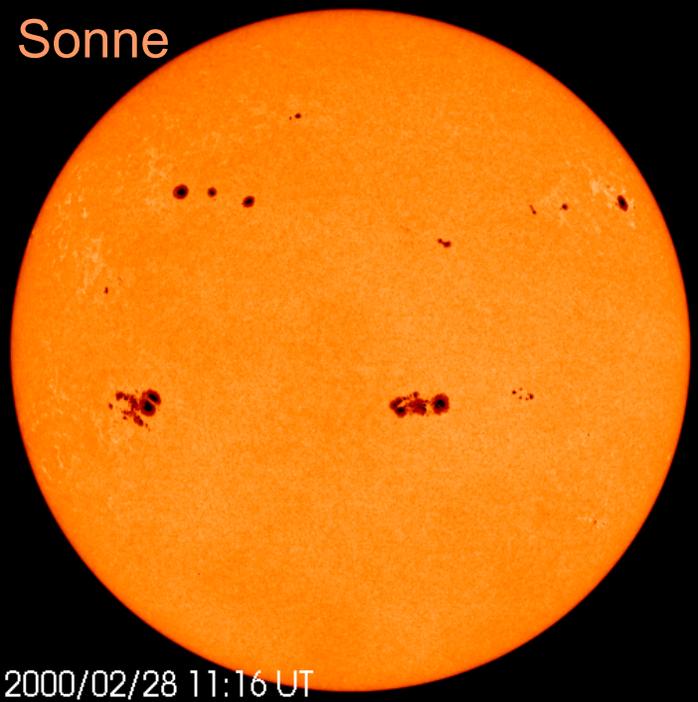


Geschwindigkeit in km/sec



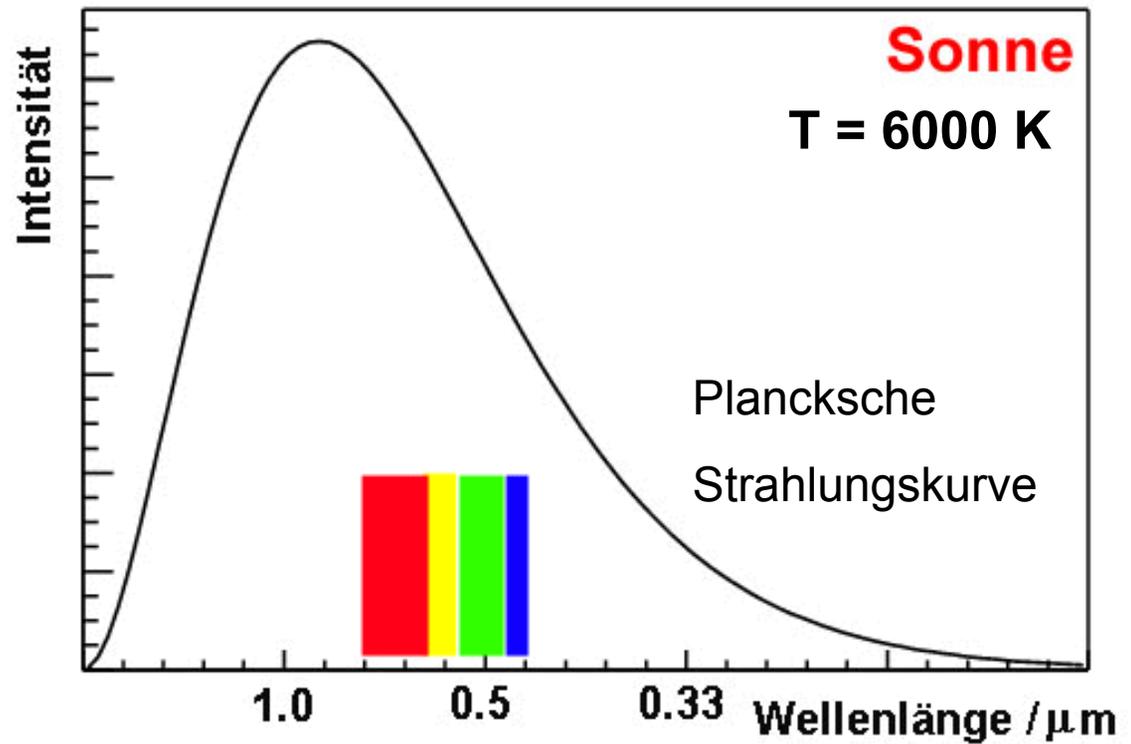
Universum expandiert !

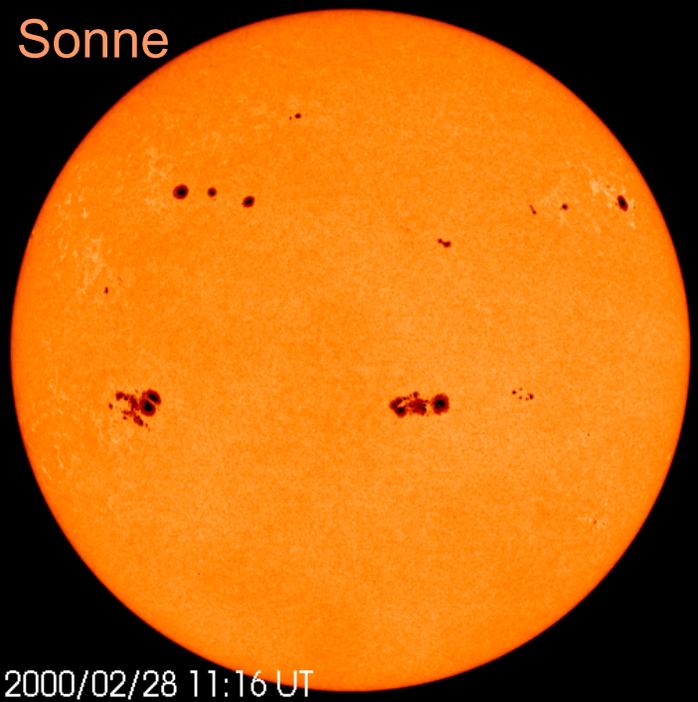




Licht von der Urexplosion

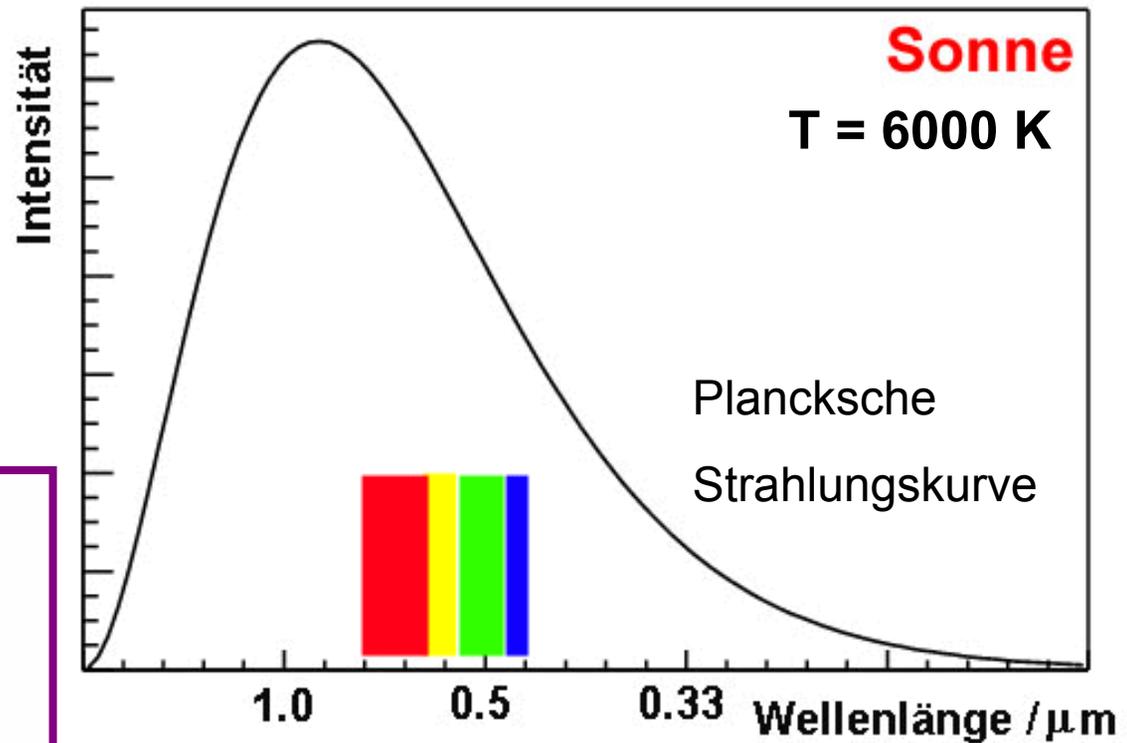
Urexplosion: heißes Gas / Plasma
(ähnlich Sonne)





Licht von der Urexplosion

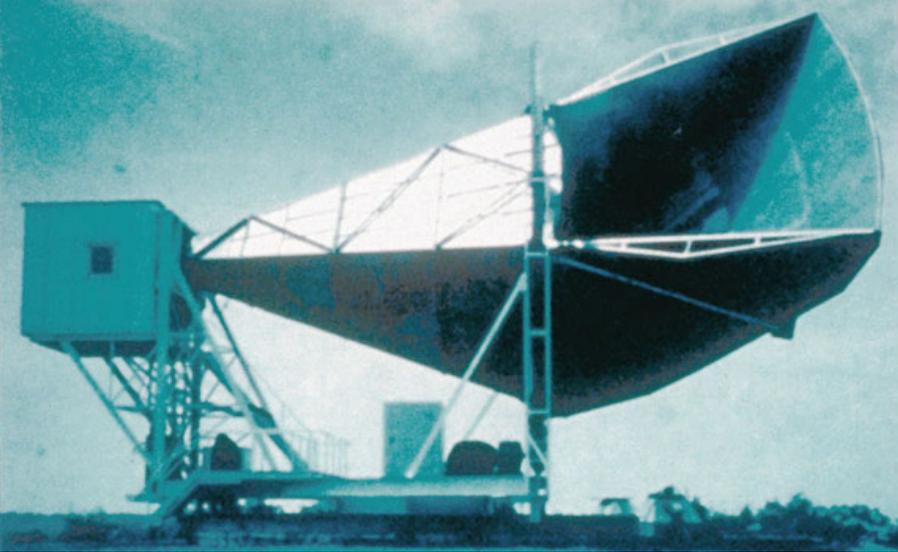
Urexplosion: heißes Gas / Plasma
(ähnlich Sonne)



Vorhersage von
R. Alpher u.a. 1948:

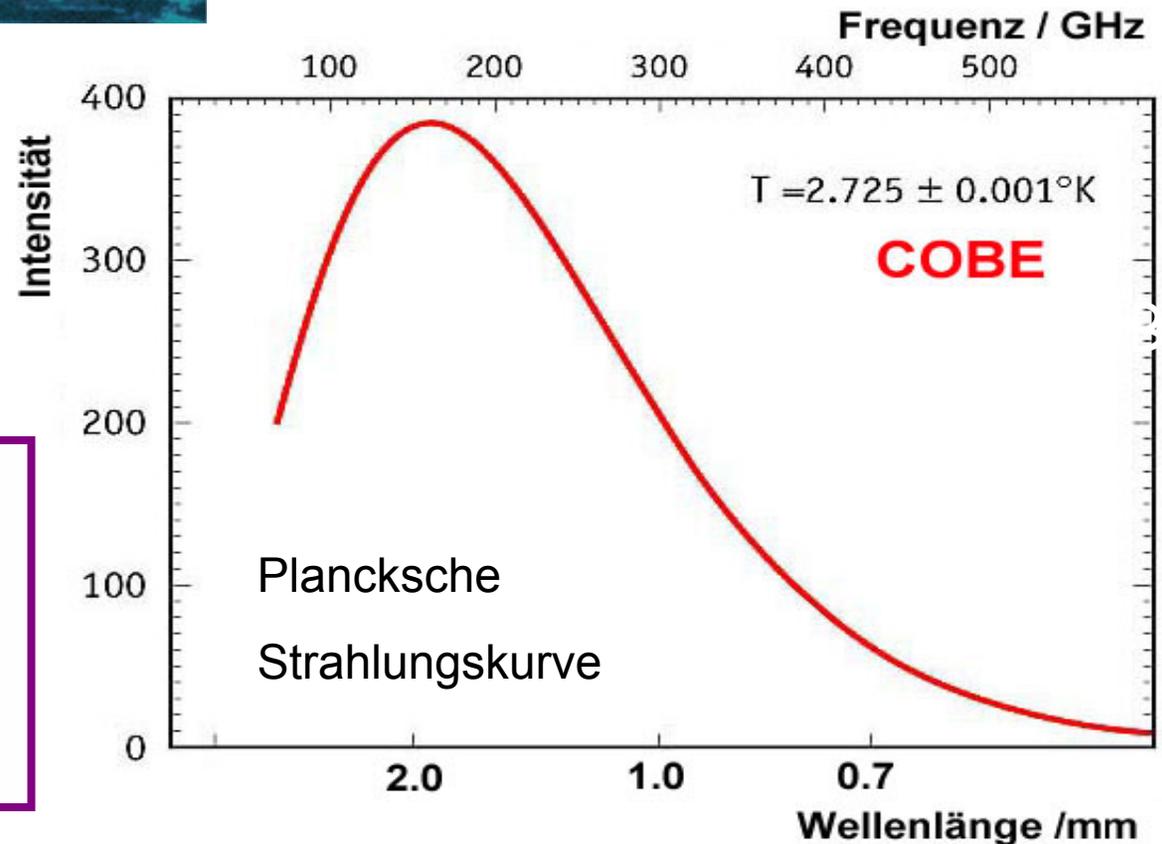
Ur-Licht heute noch
beobachtbar
Wellenlängen ~ 1000
mal größer
Spektrum gleiche Form

Die kosmische Hintergrundstrahlung



A. Penzias und
R. Wilson 1965:

Mikrowellenstrahlung
aus dem Kosmos
= Blitz der Urexplosion



Das heutige Universum

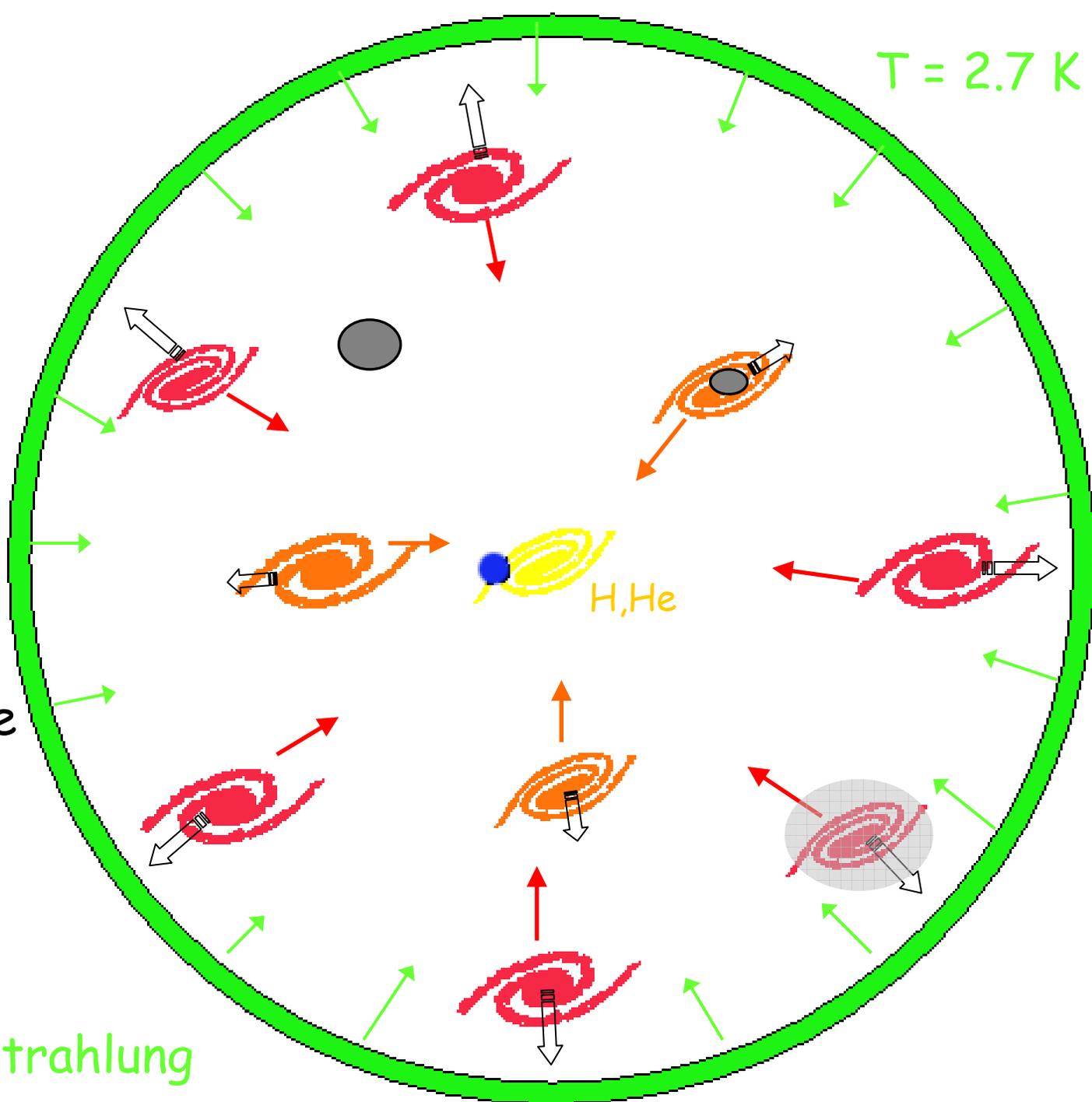
$T = 2.7 \text{ K}$

Materie:

- 10^{11} Galaxien
mit je 10^{11}
Sternen
- dunkle Materie

Strahlung:

- Sternenlicht
- Hintergrundstrahlung



Zusammenfassung „Grundlegende Beobachtungen“

- **Universum = viele Galaxien**
- **Chemische Elemente: H, He**
- **Galaxien fliegen auseinander**
- **Licht aus „Urexplosion“**

**Big-Bang
- Modell**

The image shows the Eagle Nebula (M16), a prominent interstellar cloud in the constellation of Boreas. It is famous for the 'Pillars of Creation', a group of dark, towering structures of interstellar dust and gas. The nebula is illuminated by nearby stars, creating a vibrant blue and purple glow. The image is a composite of several smaller images, with a black box in the upper right corner containing the text 'Adler-Nebel (M16)' and 'HST'.

Adler-Nebel (M16)

HST

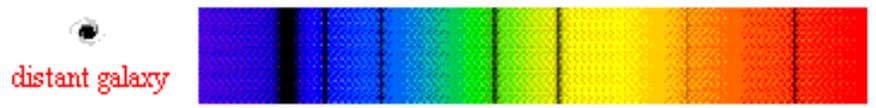
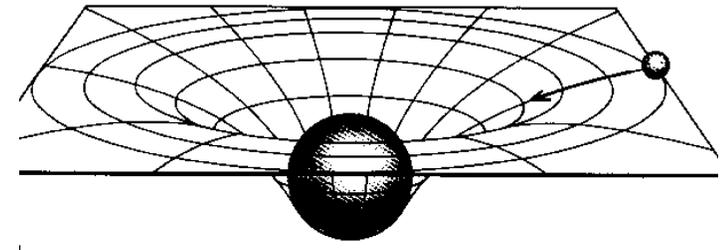
- Grundlegende Beobachtungen
- Das Big-Bang - Modell
- Die Entwicklung des Universums

Das Big-Bang - Modell

Einsteins
allgemeine
Relativitätstheorie

+

Astrophysikalische
Beobachtungen



=

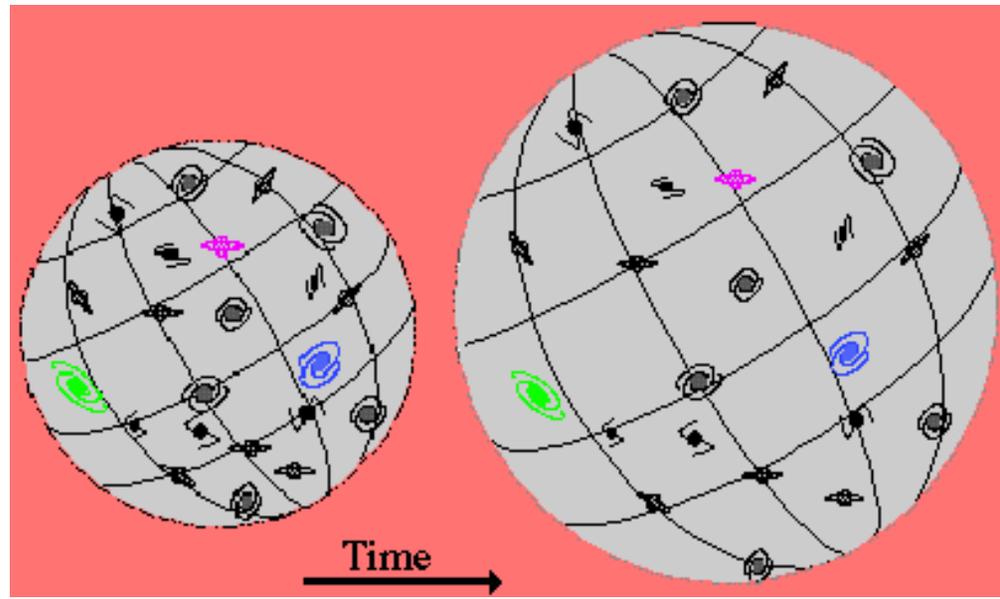
Der Raum expandiert
Anfang: „Big Bang“

➔ Hintergrundstrahlung

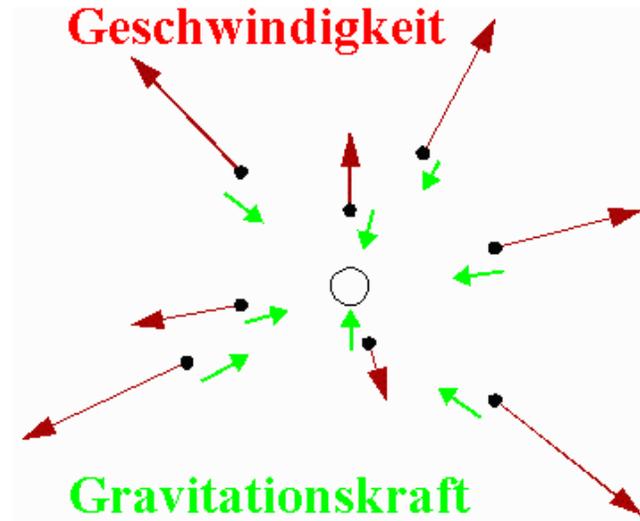
➔ Rotverschiebung

Alter $\sim 15 \cdot 10^{10}$ Jahre

➔ Chemie : 75% H, 25% He



Evolution des Universums (a la Einstein)



Geschwindigkeit
nimmt ab!

- Hubble-Konstante (kinetische Energie \Rightarrow Expansion)
- mittlere Massendichte (potentielle Energie \Rightarrow Kontraktion) Gravitation!

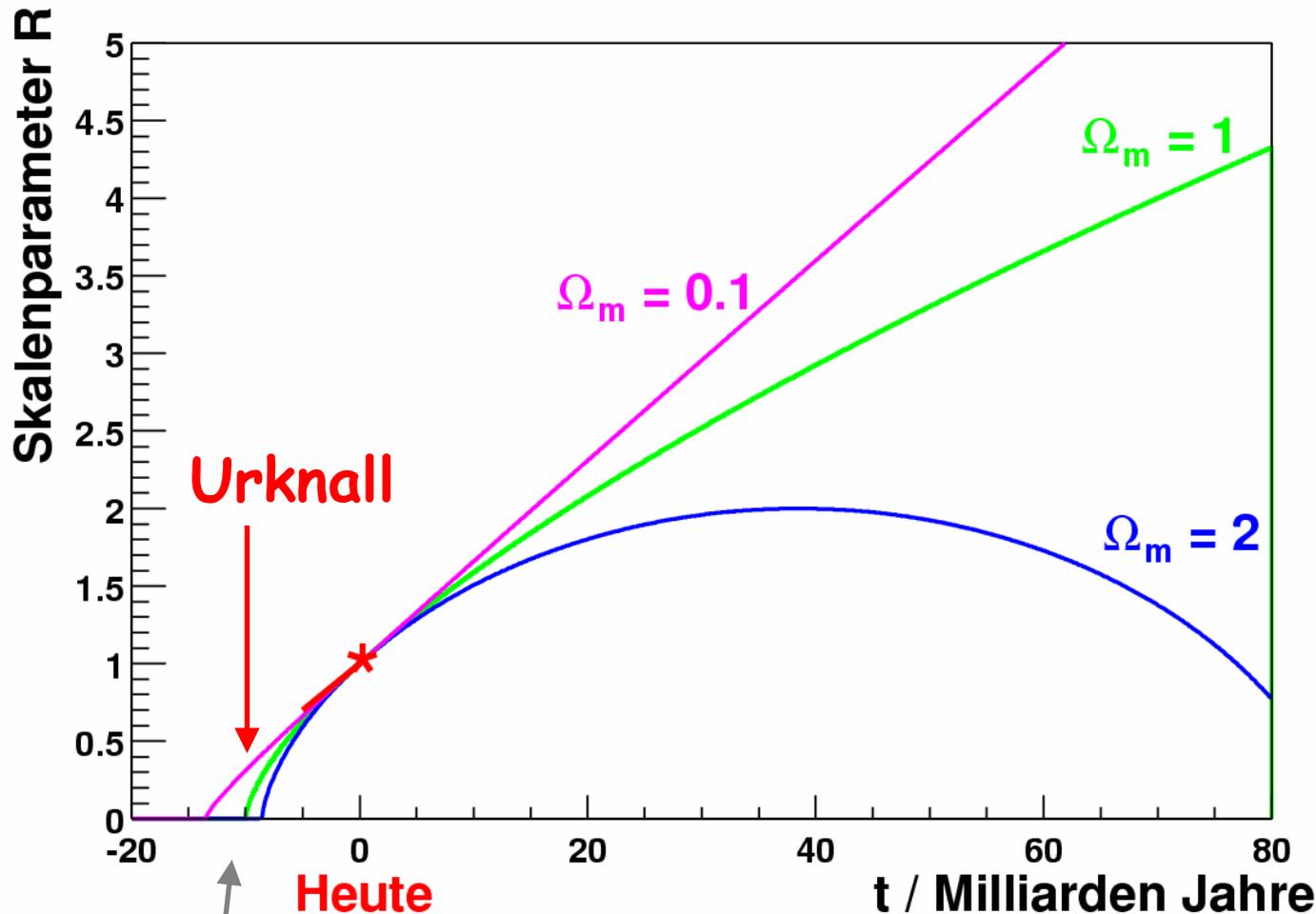
$$\Omega_m = \frac{\rho}{\rho_{krit}} = \frac{\text{mittlere Massendichte}}{\text{kritische Massendichte}} \leftarrow \text{nicht genau bekannt}$$

$\approx 3 H - \text{Atome} / m^3$

Hubble-Konstante
= $2 \text{ cm} / \text{s} / Lj$

Ω_m entscheidet über unser Schicksal !

Evolution des Universums (Einstein)



Evolution
wird durch
Massendichte
bestimmt:

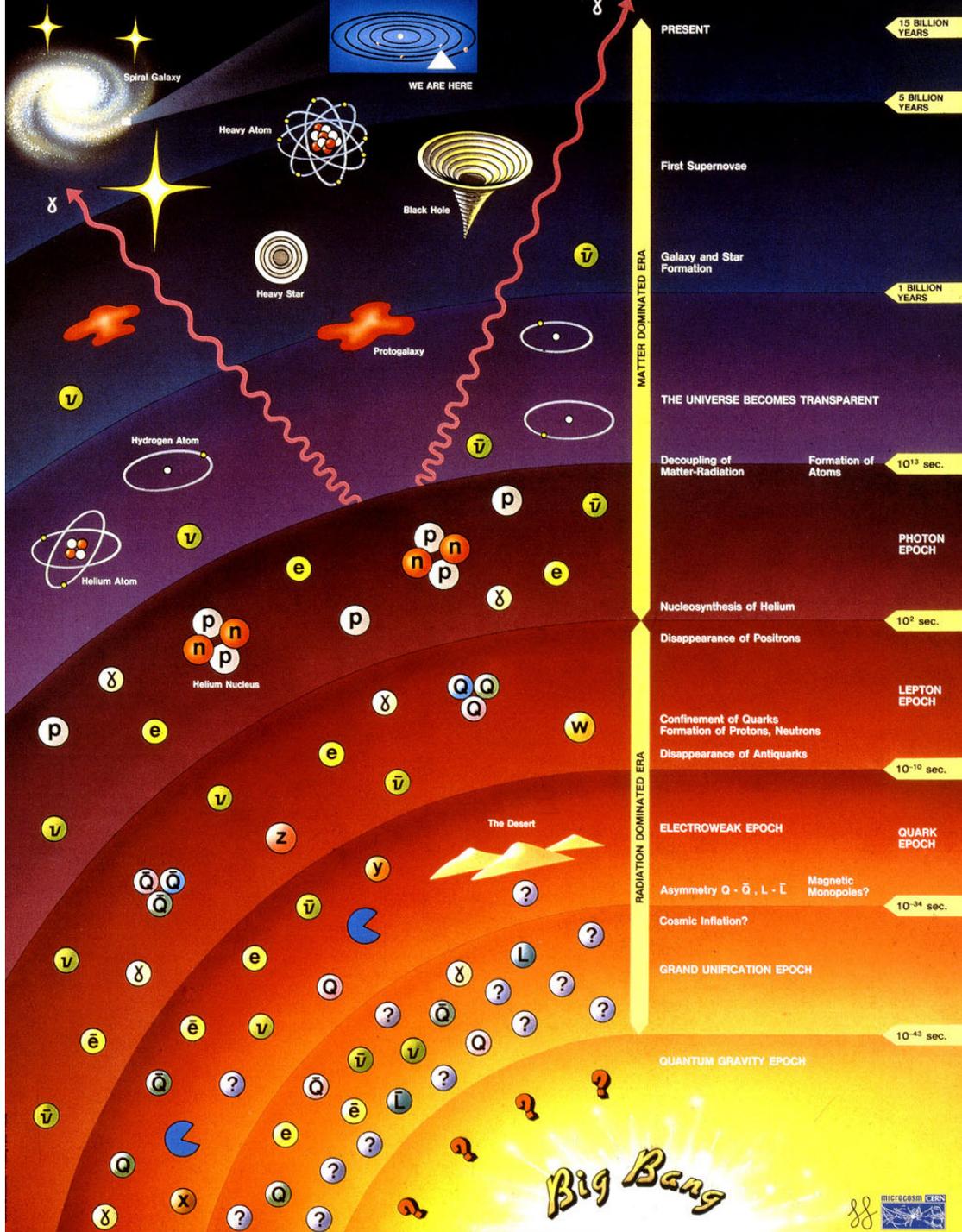
$$\Omega_m = \rho / \rho_{krit}$$

Alter des Universums
~ 15 Milliarden Jahre

Welche Kurve ist richtig ?

Prozesse im frühen Universum

$10^{10} a$ 23.09.2003



$300\,000 a$ Atome

3 min Kerne

$10^{-10} s$

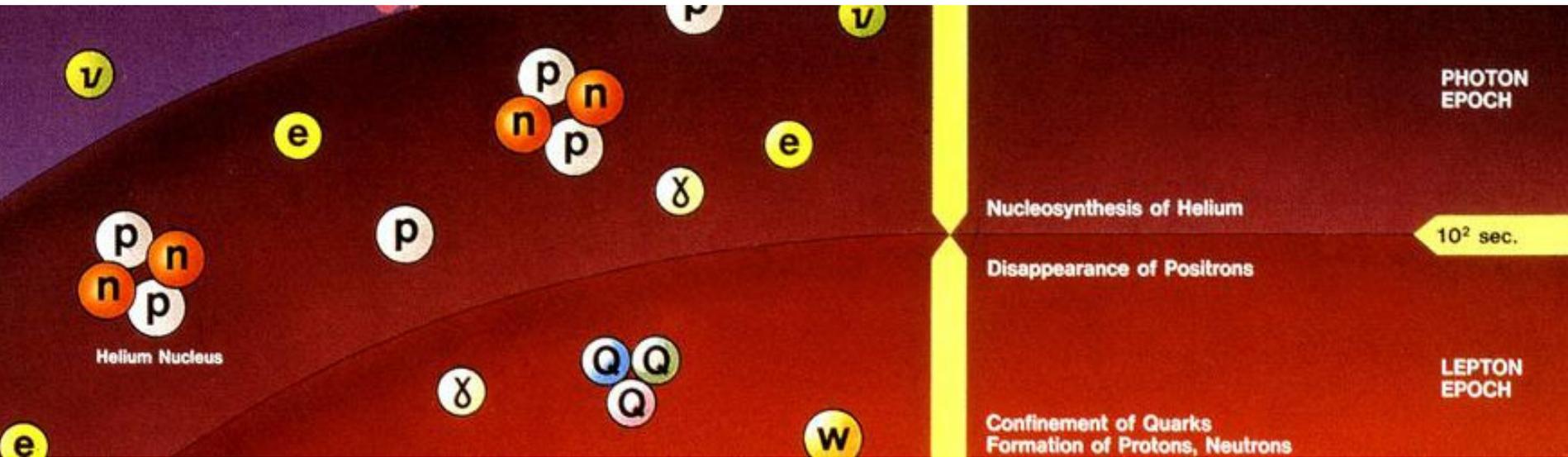
Ladungssumme = 0

Nukleosynthese

$t = 3 \text{ min}$

$T = 1\,000\,000\,000 \text{ K}$

$E = 0.1 \text{ MeV}$



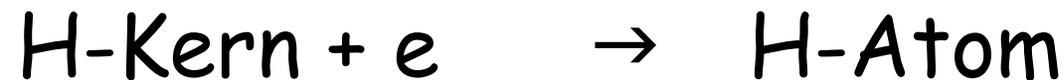
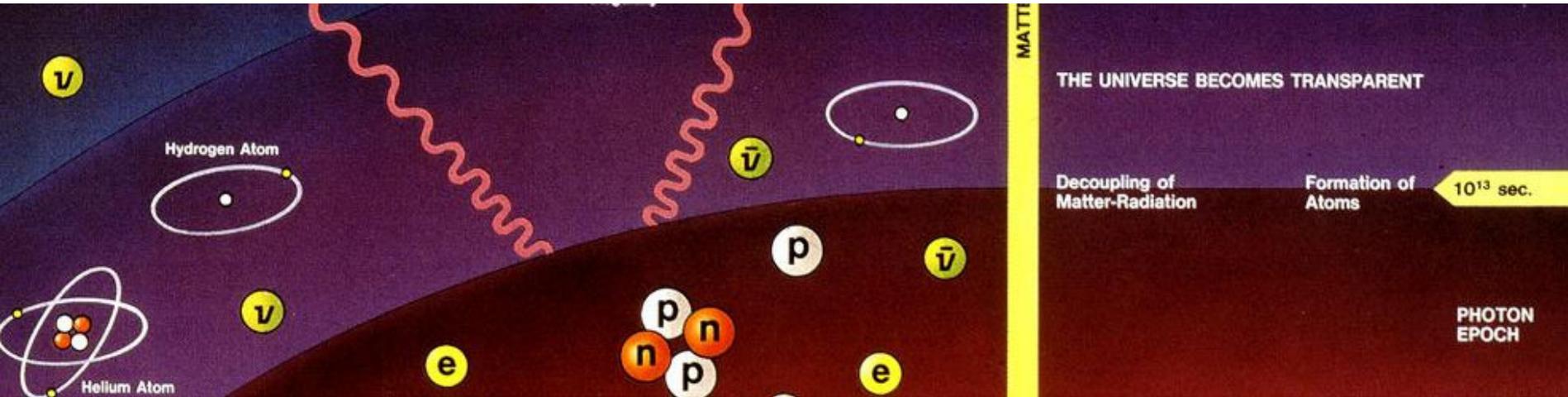
Schwere Kerne (C, O, U...) entstanden erst in Sternen/Supernovae !

Bildung von Atomen

$t = 300\,000\text{ a}$

$T = 3000\text{ K}$

$E = 0.3\text{ eV}$



Weltall ohne freie Ladung!

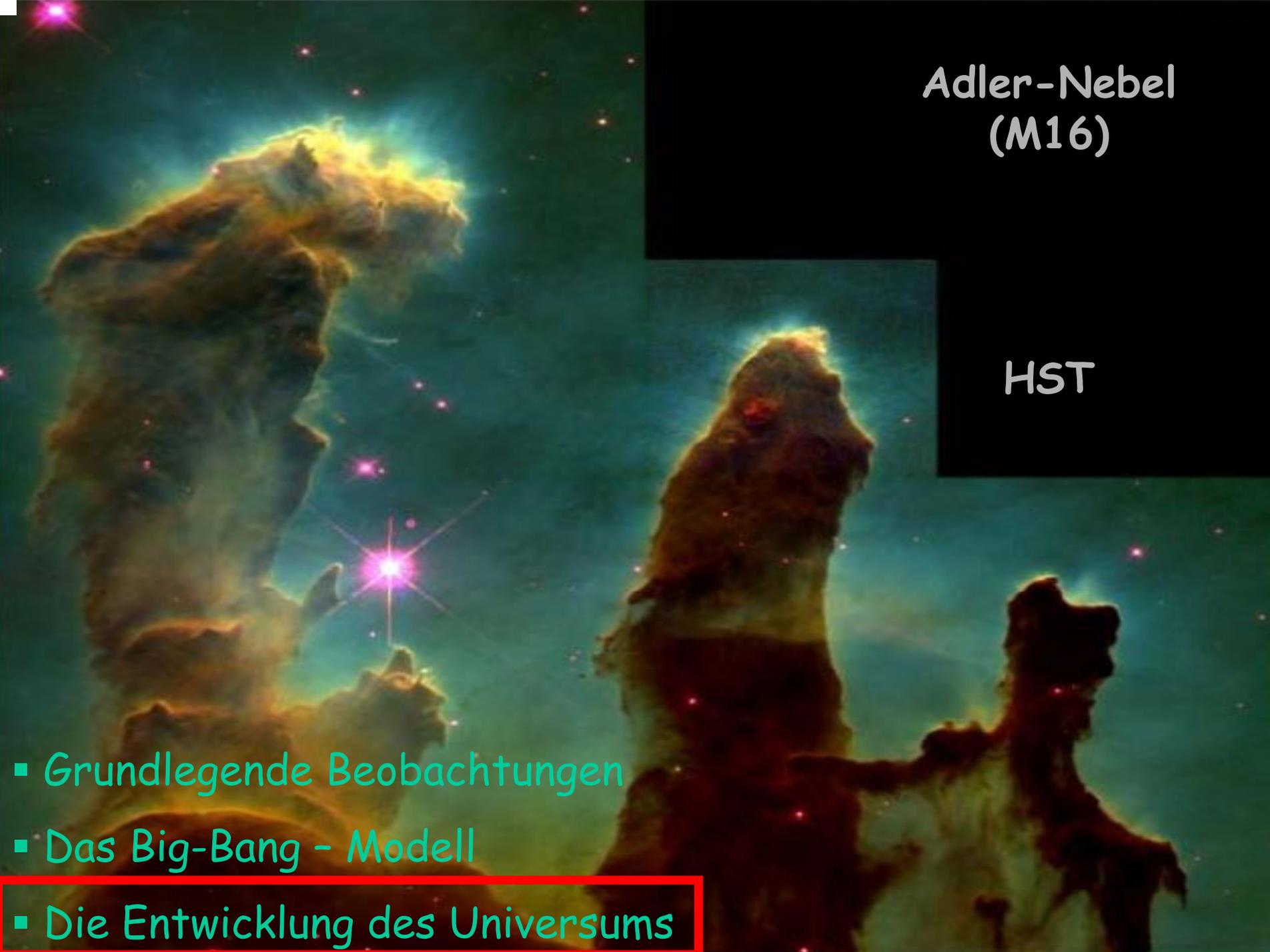
Licht kann sich ungehindert ausbreiten!

Universum wird durchsichtig!

„kosmische
Hintergrund-
strahlung“

Zusammenfassung „Big-Bang - Modell“

- **Universum entstand aus heißem Urknall
vor ~15 Milliarden Jahren**
- **Mit Abkühlung entstanden Atome und Galaxien**
- **Galaxien bewegen sich voneinander weg**
- **FRAGE: EVOLUTION QUANTITATIV ?**



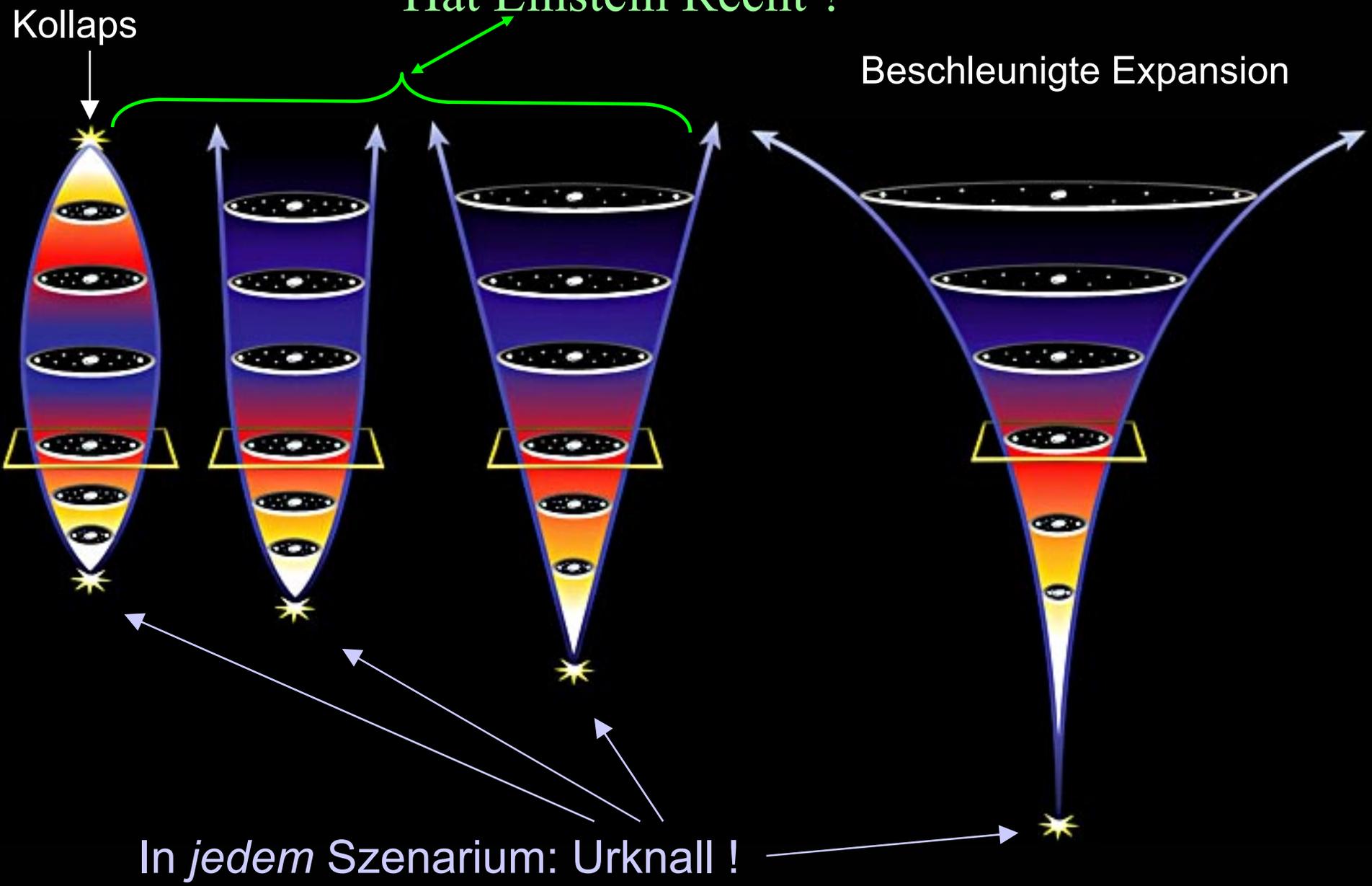
Adler-Nebel
(M16)

HST

- Grundlegende Beobachtungen
- Das Big-Bang - Modell
- Die Entwicklung des Universums

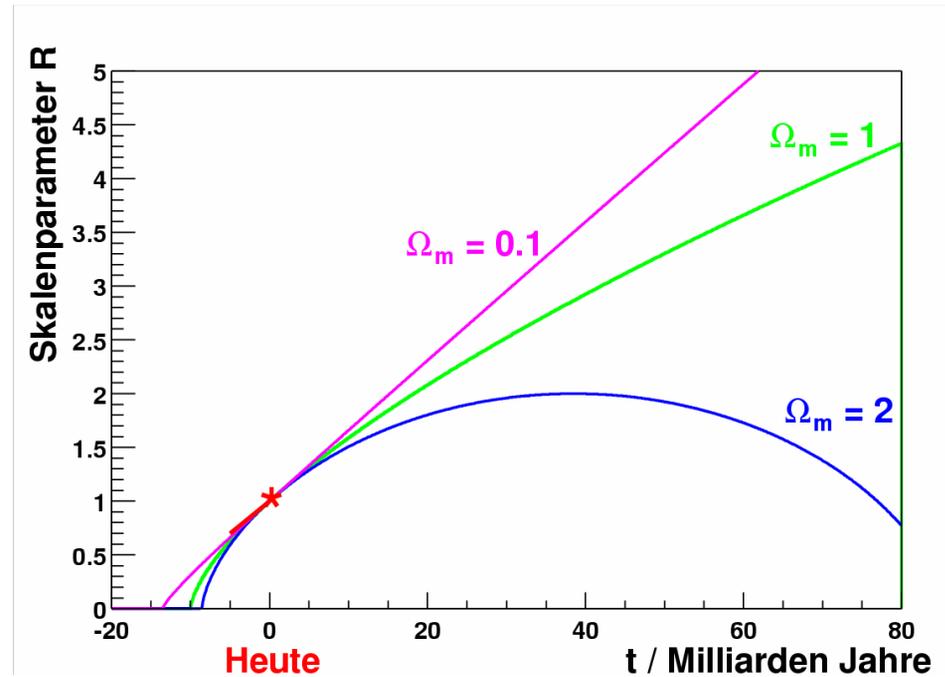
Entwicklung des Universums ?

Hat Einstein Recht ?

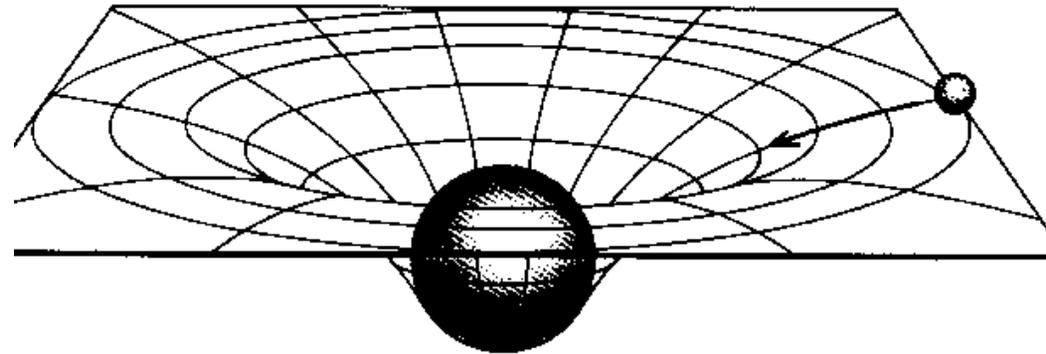


Wie misst man die Evolution ?

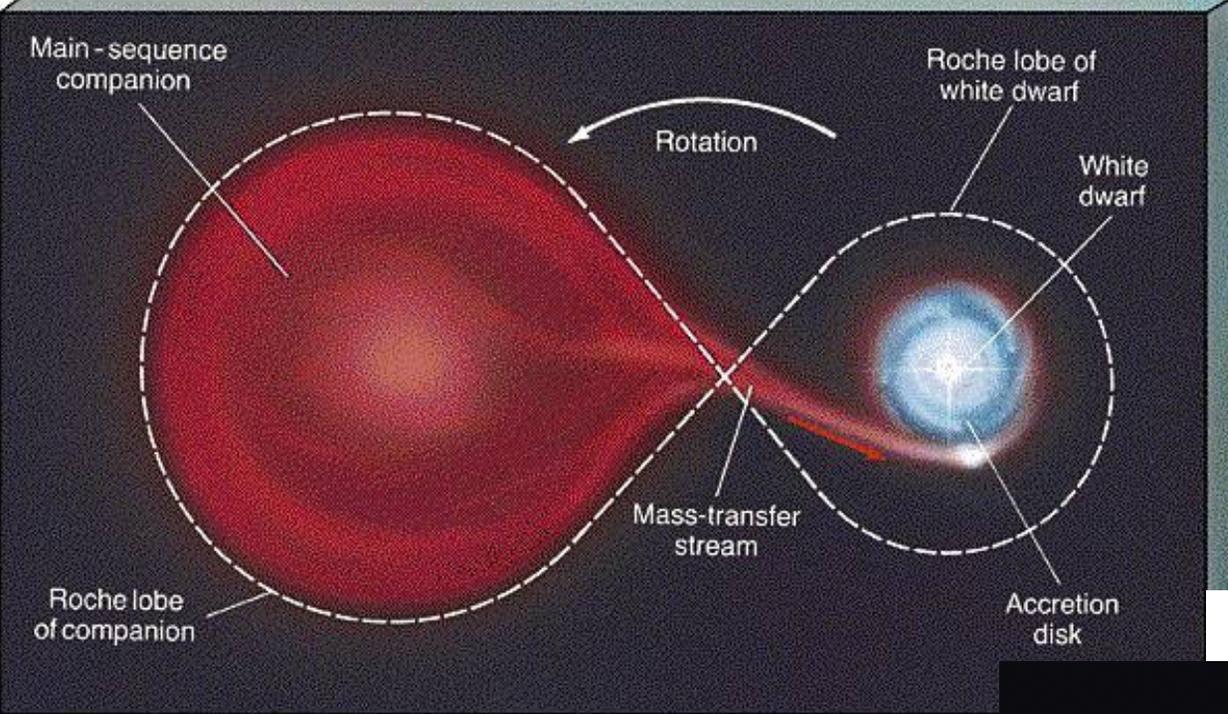
A) Bestimmung der Geschwindigkeitsänderung der Galaxienflucht mit der Zeit



B) Messung der von der Materiedichte abhängigen Raumkrümmung



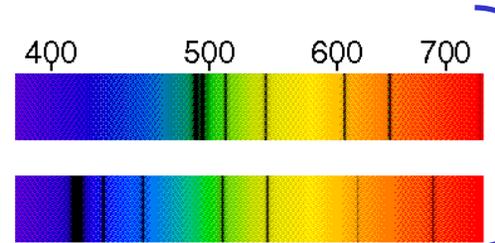
Supernovae Ia



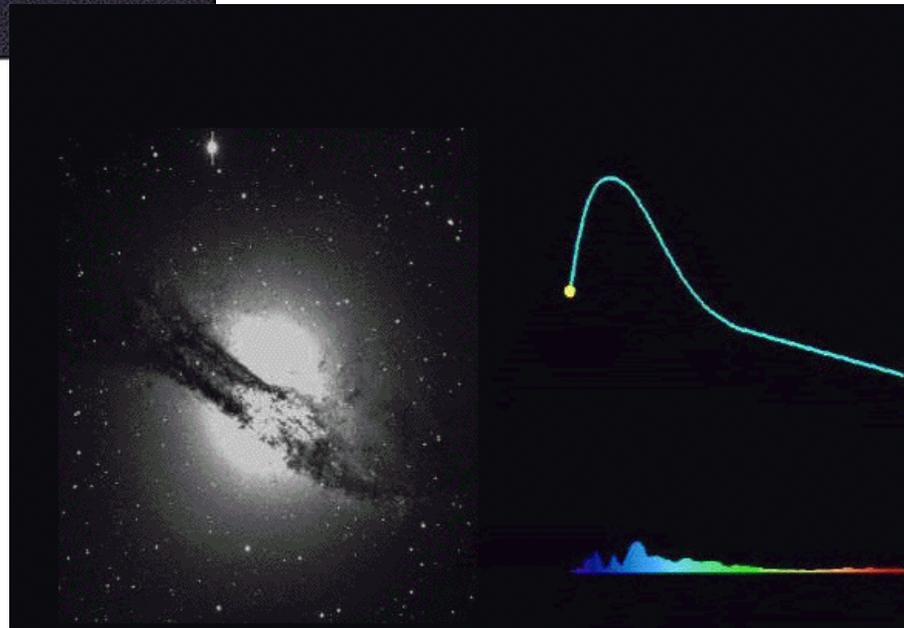
Explosion wenn
 Masse kritischen
 Wert $\approx 1.4m_{\text{Sonne}}$
 erreicht!

Helligkeit:
gleich
groß

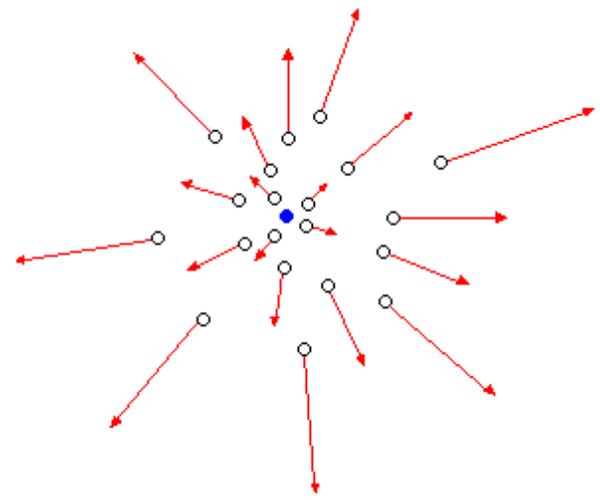
Entfernung
 Blick in
 Vergangenheit !



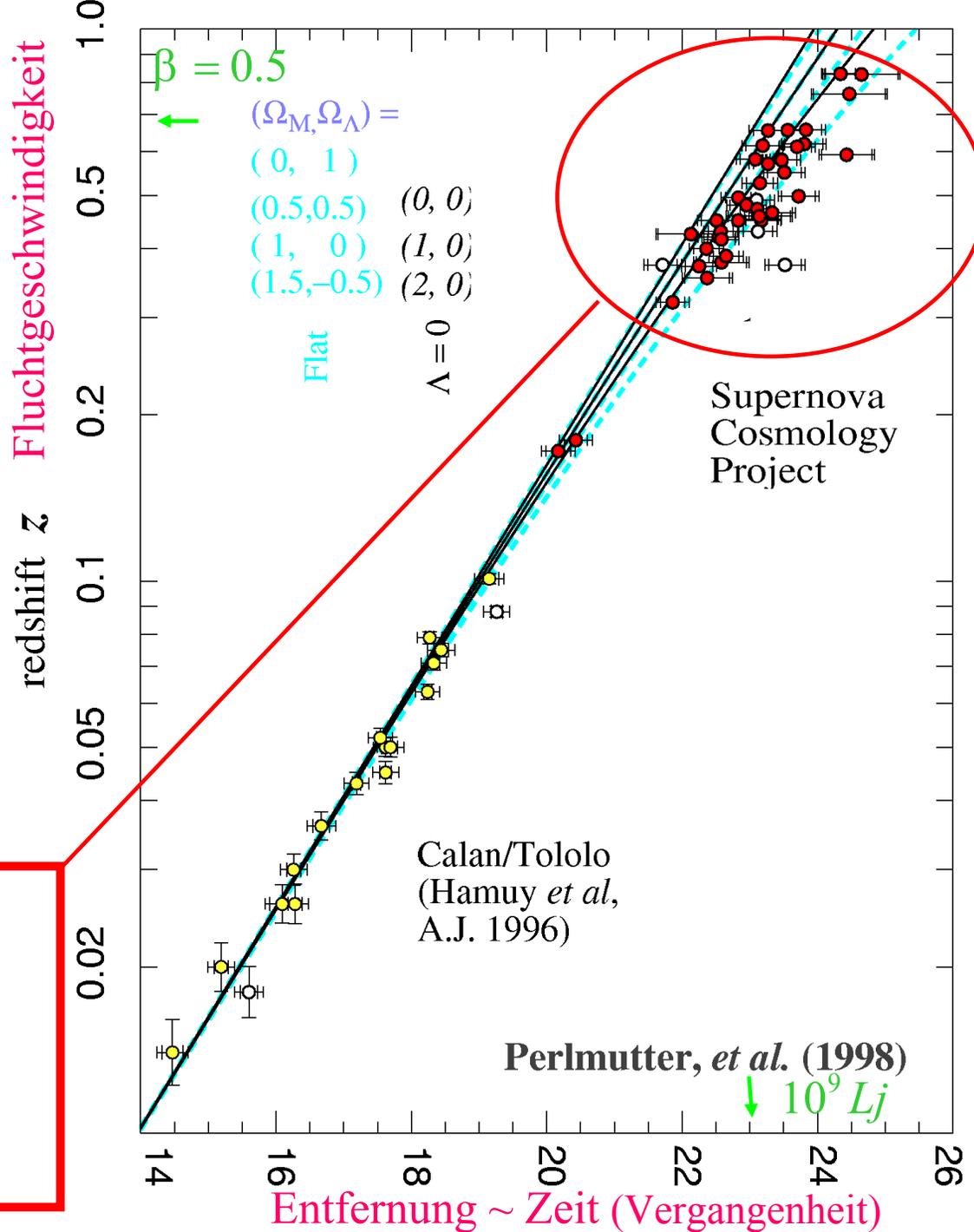
Flucht-
 geschwindigkeit



Messung der Geschwindigkeitsänderung mit Supernovae



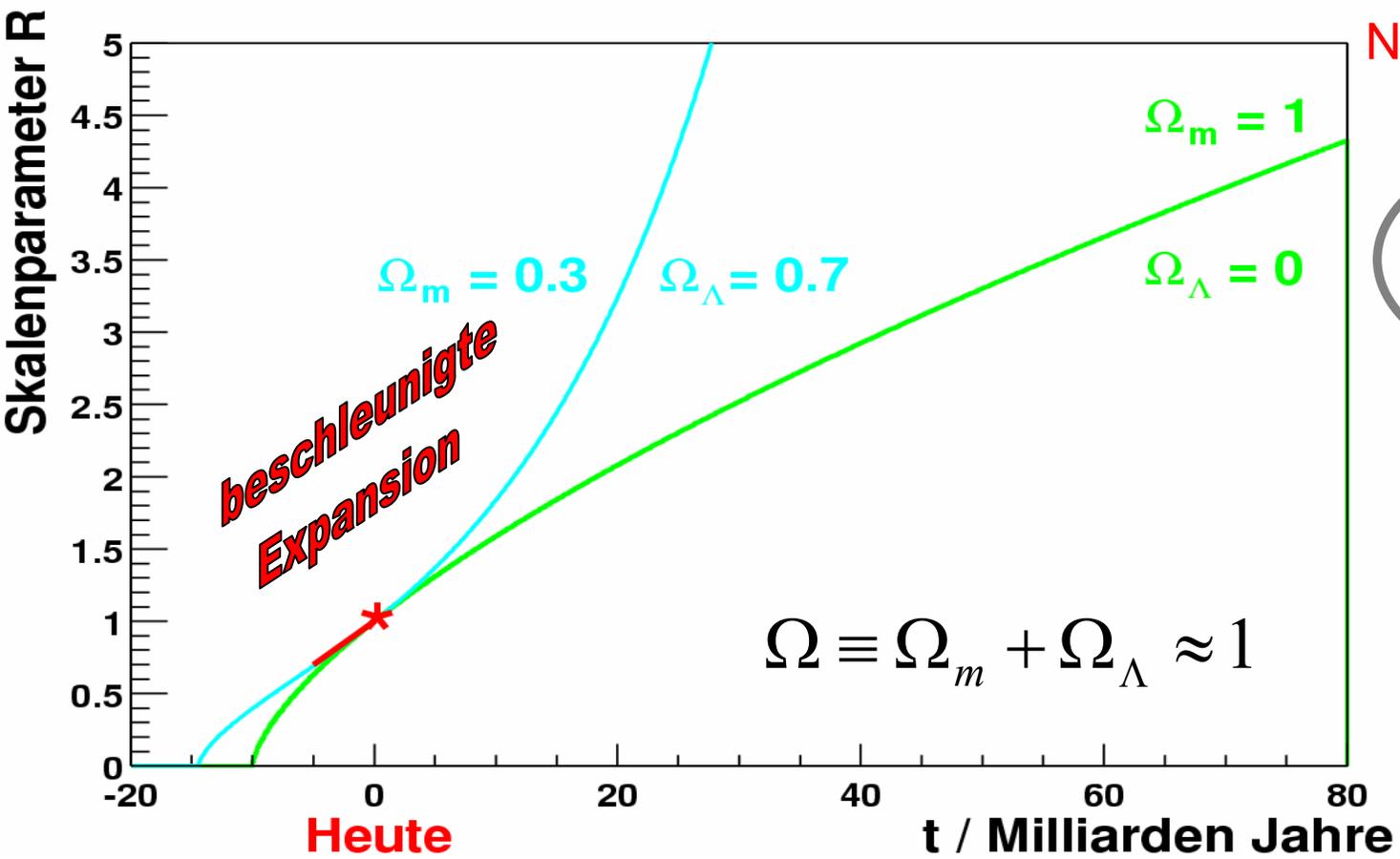
Geschwindigkeit heute höher als früher!
„ABSTOSSUNG!“



Evolution des Universums – „neu“

Messungen an Supernovae: beschleunigte Expansion !

Erweitertes Modell: Einsteins „kosmologische Konstante“ $\Lambda \neq 0 \rightarrow \Omega_\Lambda$



Neue Energieform:

„dunkle Energie“

wirkt abstossend!

Modifiziertes Gravitationsgesetz

Newton/Einstein:

$$m \cdot \frac{d^2 R(t)}{dt^2} = -G_N \cdot \frac{m \cdot M}{R(t)^2}$$



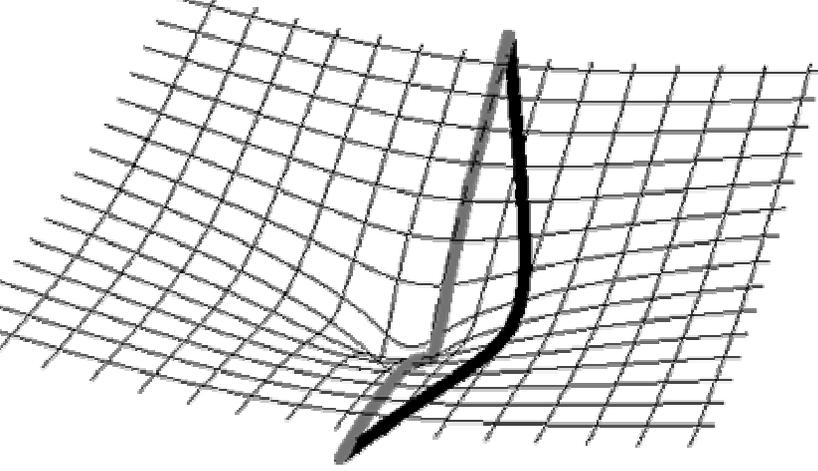
mit kosmologischer Konstanten Λ :

$$m \cdot \frac{d^2 R(t)}{dt^2} = -G_N \cdot \frac{m \cdot M}{R(t)^2} + m \cdot \Lambda \cdot R(t) / 3$$

abstossend

grosse
Entferng!

Raumkrümmung ?



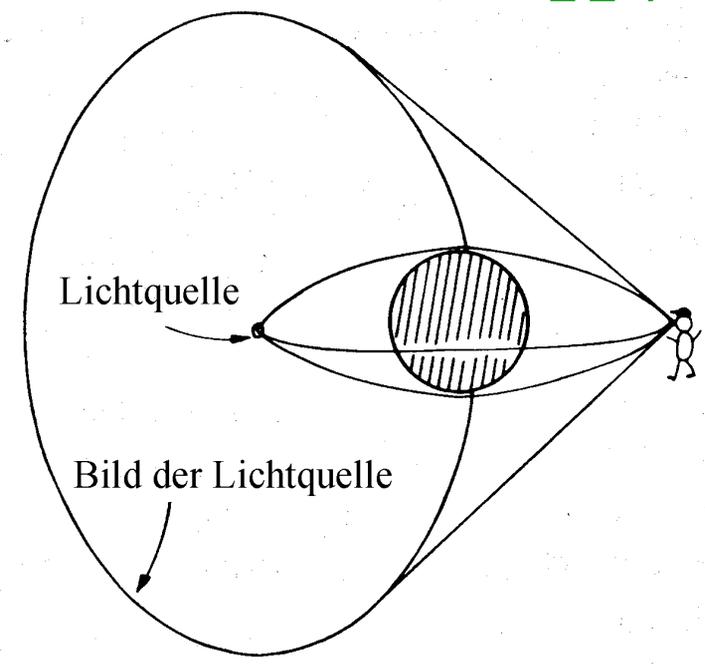
Einstein: ja!

„lokal“: Gravitationsfelder

„global“ (Kosmos): vielleicht
 $\Omega \neq 1$?



Heute:
Einstein-Ring
(Hubble-Teleskop)

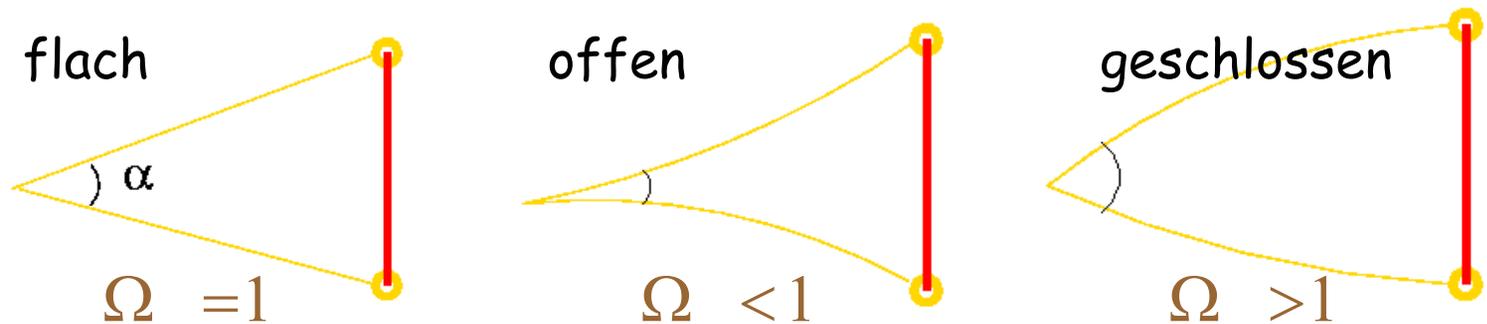


Gravitationslinse
(„lokal“)

Raumkrümmung im Universum (global) ?

Messung der Raumkrümmung:

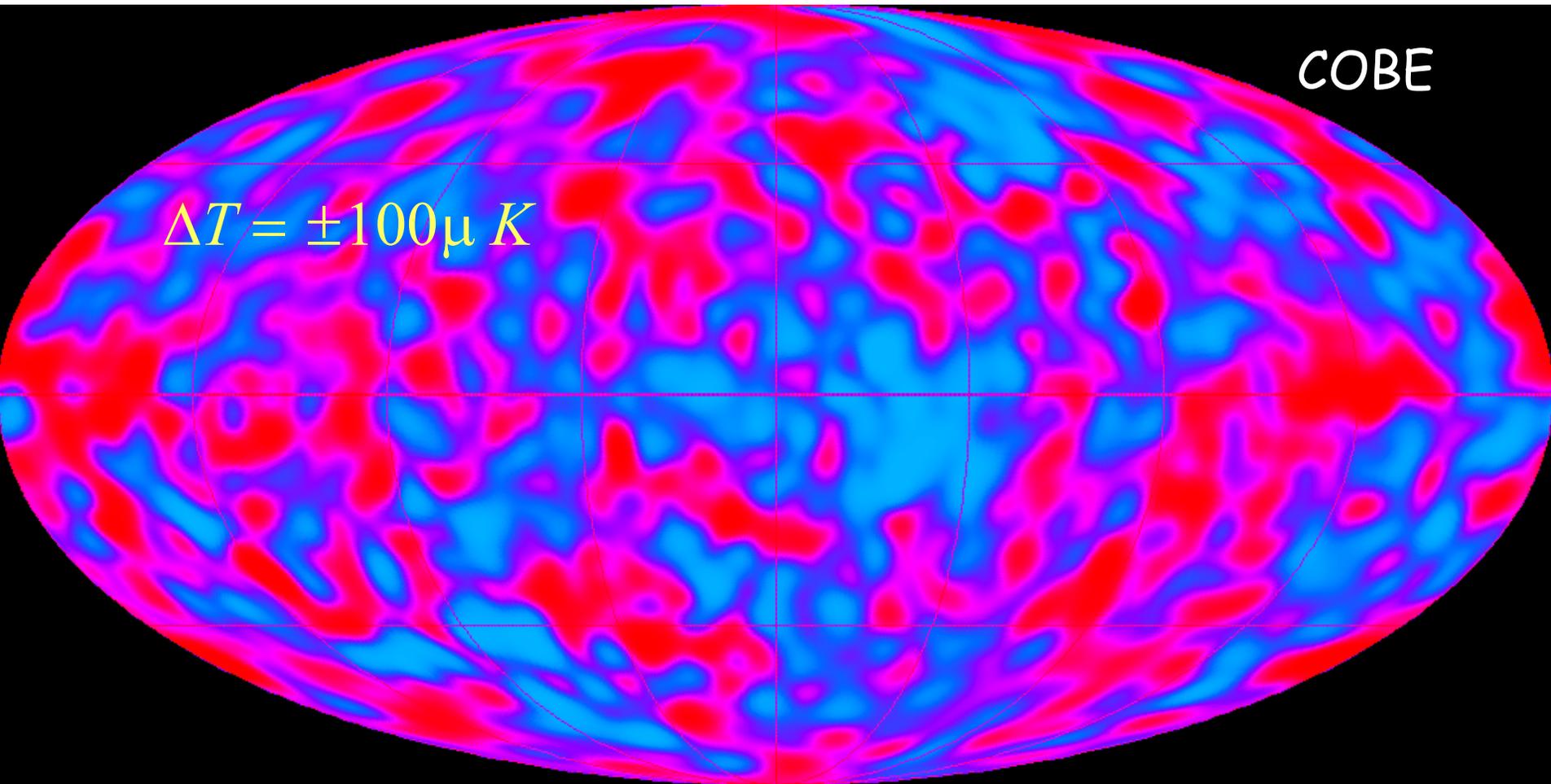
Winkelmessung:



Zusammenhang mit Energiedichte:

$$\Omega = \frac{\rho}{\rho_{krit}} = \frac{\text{mittlere Energiedichte}}{\text{kritische Energiedichte}}$$

Die kosmische Hintergrundstrahlung



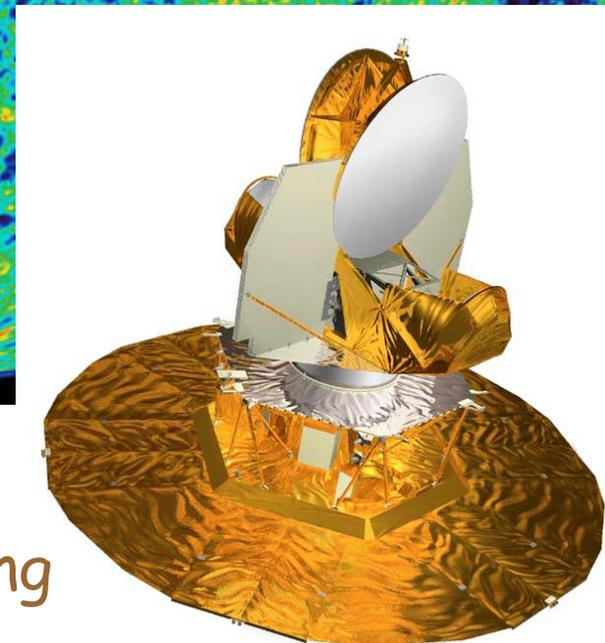
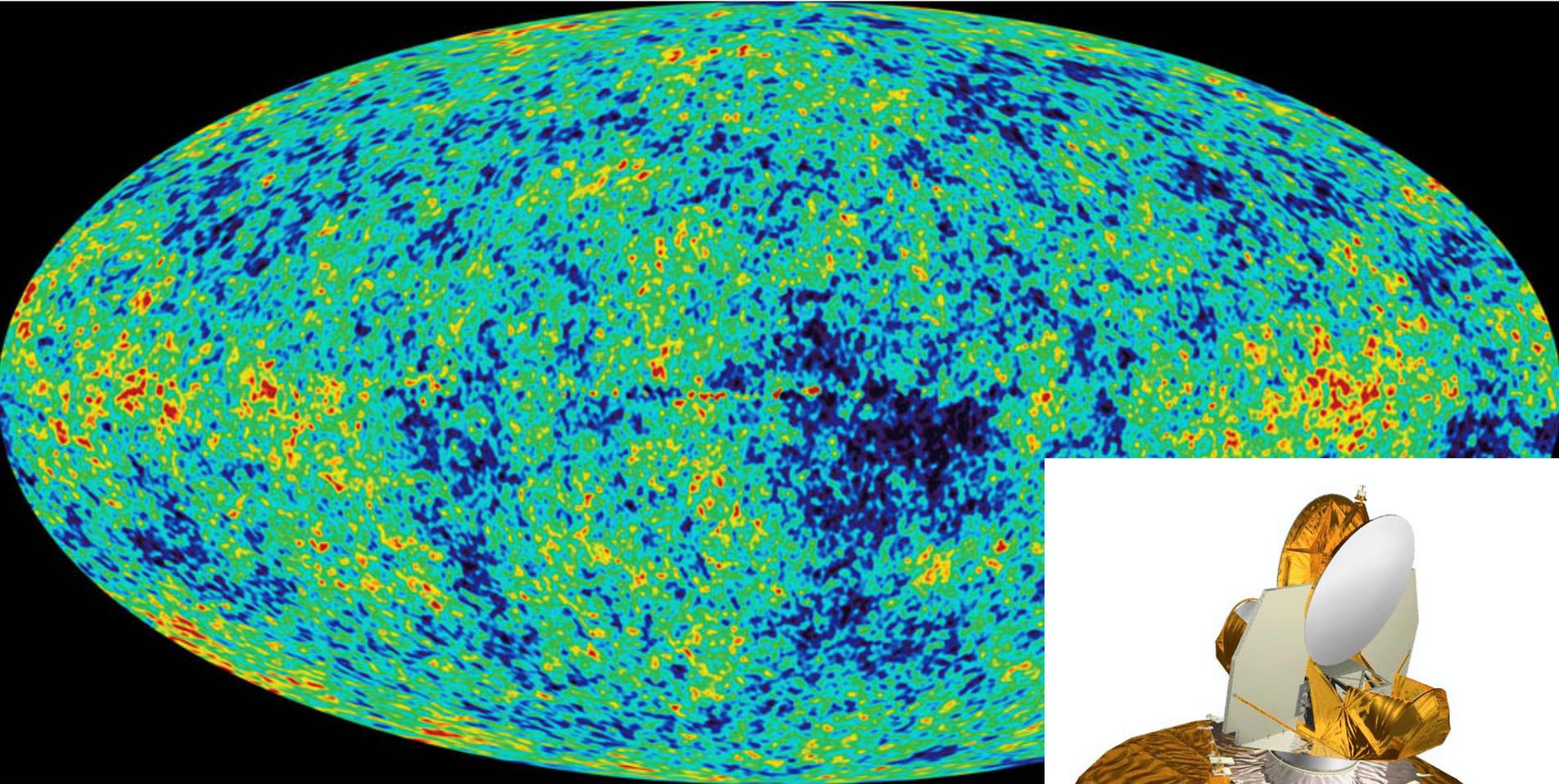
Ursprung: 300000 Jahre nach Urknall

$T = 2.7 \text{ K}$

400 Photonen/ccm

Messungen mit dem WMAP-Satelliten

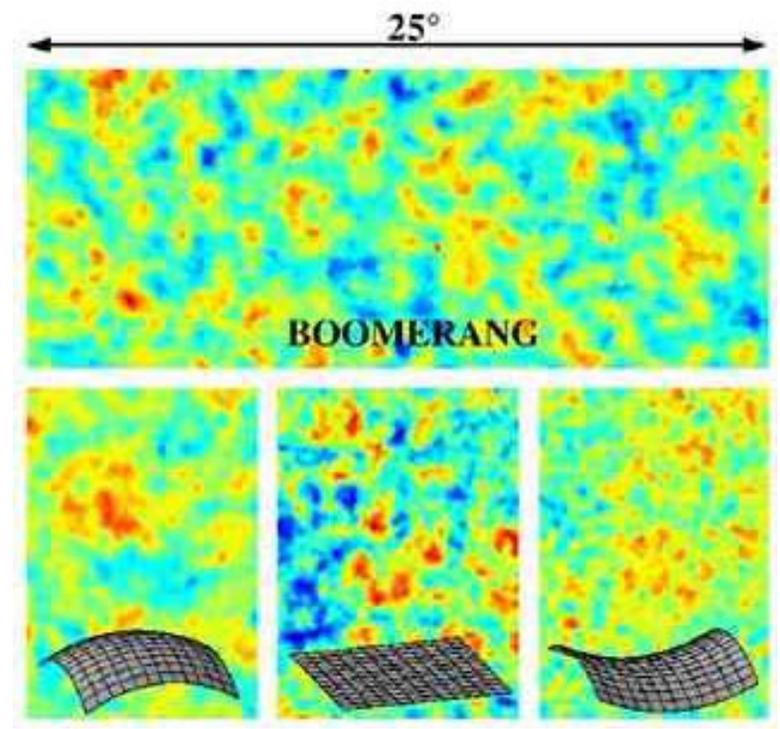
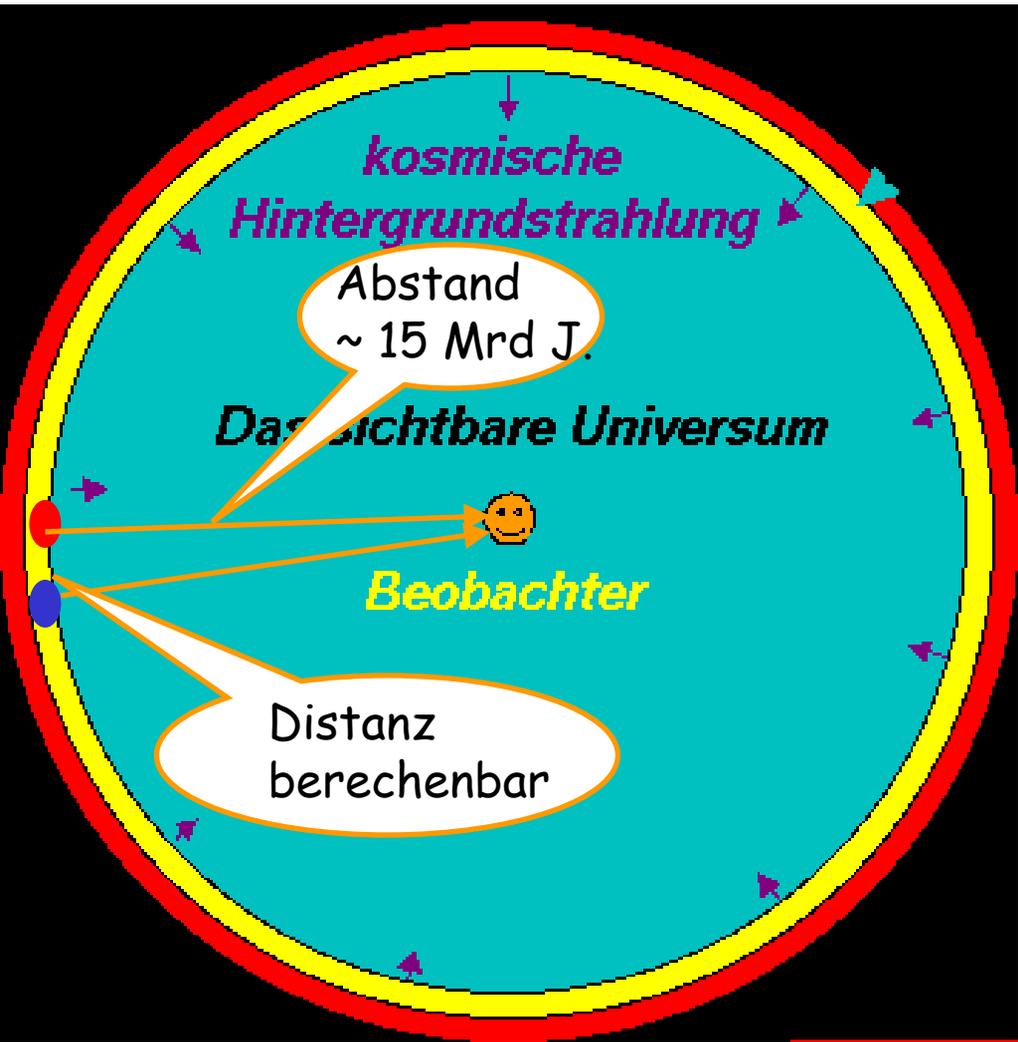
Wilkinson Microwave Anisotropy Probe



Temperaturschwankungen

↔ Druckschwankungen → Galaxienbildung

Die Raumkrümmung im Universum



geschlossen flach offen



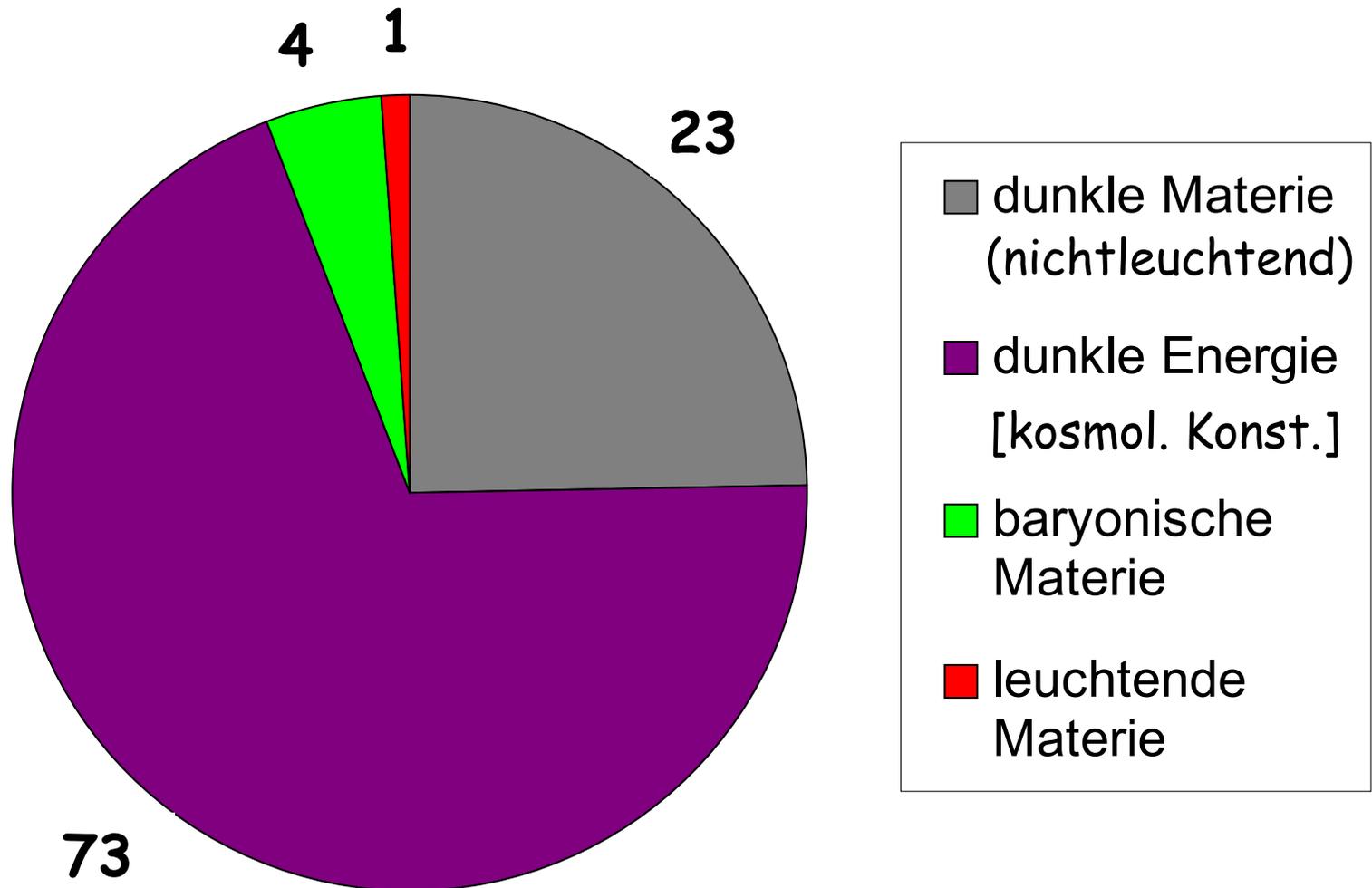
passt am besten:

Keine Krümmung!

$$\Omega = \Omega_m + \Omega_\Lambda = 1.02 \pm 0.02$$

Energieformen im Universum

Anteil in %



Zusammenfassung „Entwicklung des Universums“

- **Newtons/Einsteins Gravitationsgesetz**
sagt Verlangsamung der Expansion voraus
- **Messungen zeigen das Gegenteil !**
Mögliche Erklärung:
Modifikation des Gravitationsgesetzes
durch Einsteins „kosmologische Konstante“

„goldenes Zeitalter der Kosmologie“

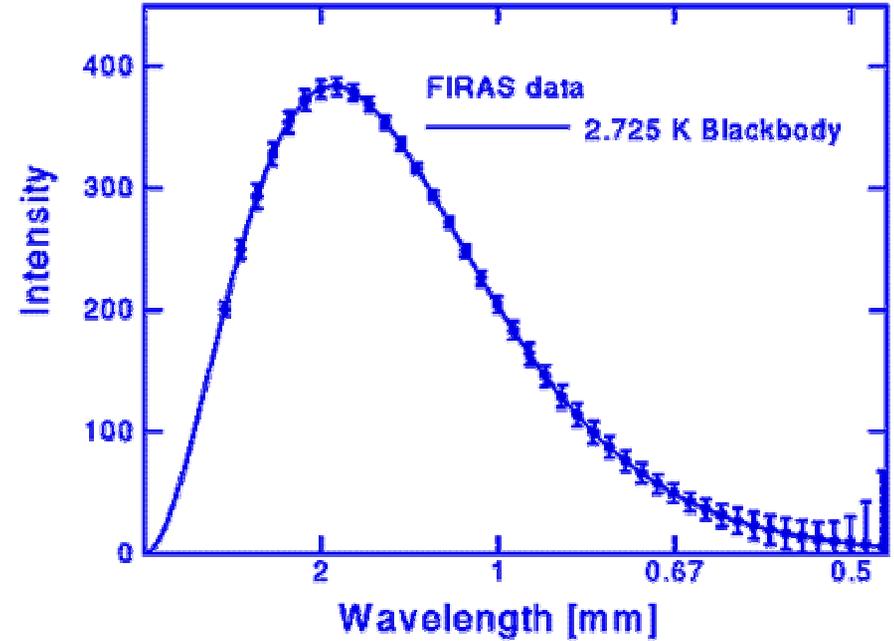
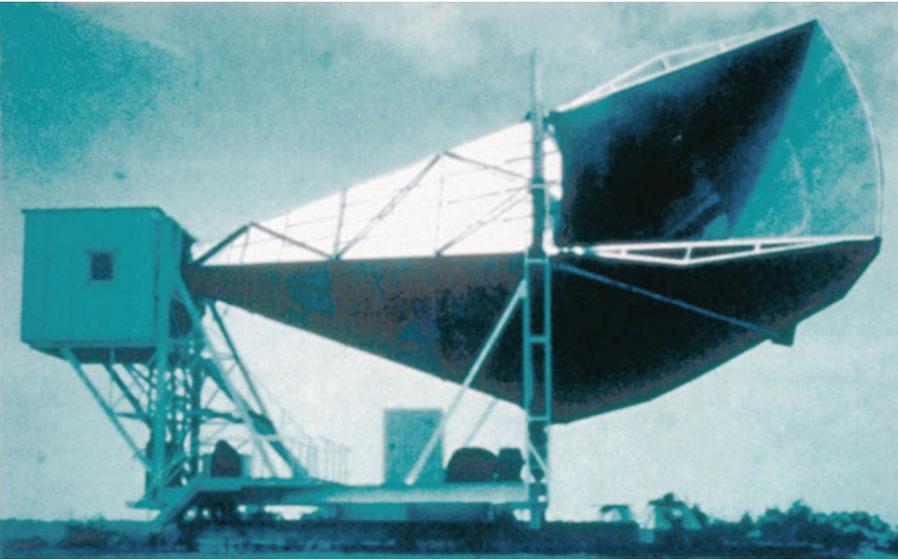
.... Messungen....Theorie....

Die Expansionsgeschwindigkeit scheint zuzunehmen!

Revolution in der Physik !?

Anhang

Die kosmische Hintergrundstrahlung



Mikrowellenstrahlung
aus allen Richtungen

= „schwarzer Körper“
mit $T = 2.7\text{K}$

Kleine Temperatur-
unterschiede

