

# Die Entwicklung des Universums

Thomas Hebbeker  
(RWTH)  
Sternwarte Aachen  
Mai 2002

- Grundlegende Beobachtungen
- Das Big-Bang - Modell
- Die kosmologische Konstante

# Galaxien

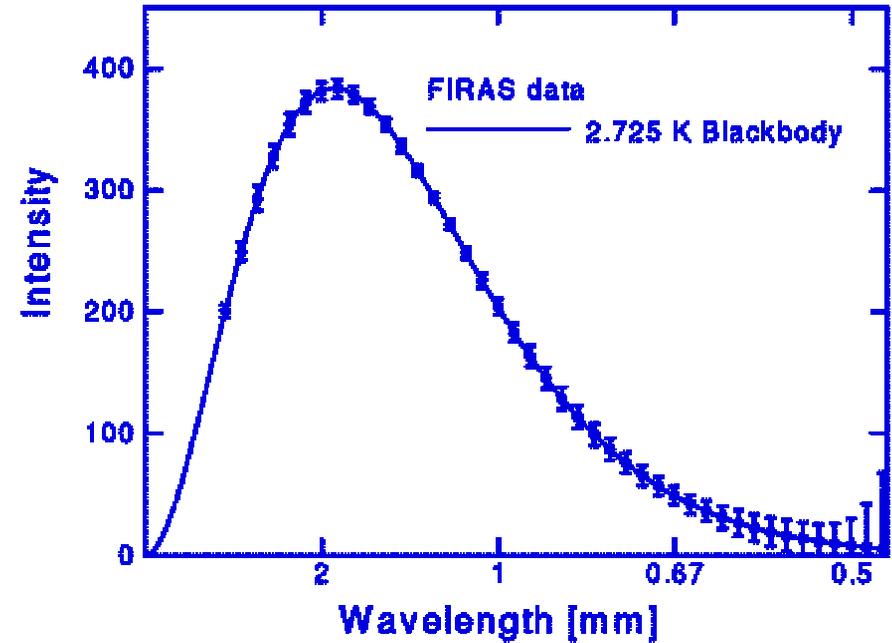
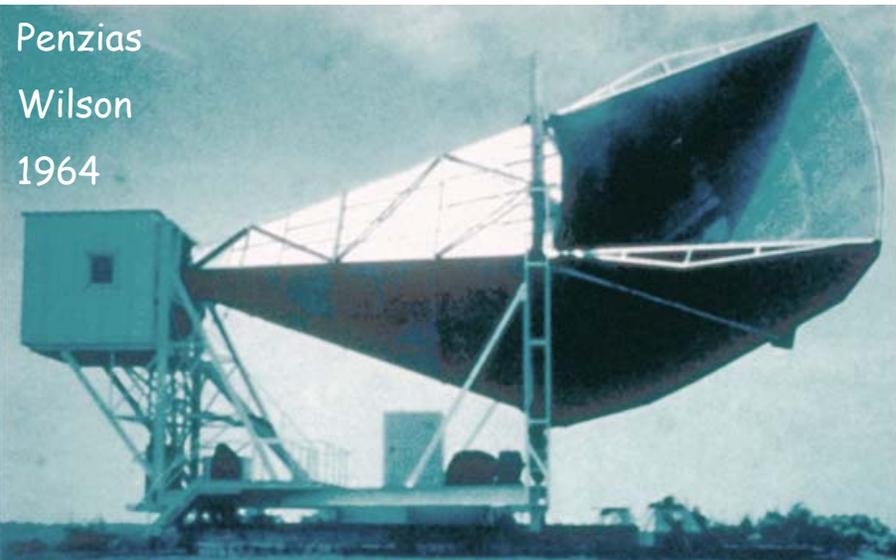


„Whirlpool“ (HST)  
37 Millionen Lj



HST „deep field“  
bis zu 10 Milliarden Lichtjahre  
Blick in die Vergangenheit!

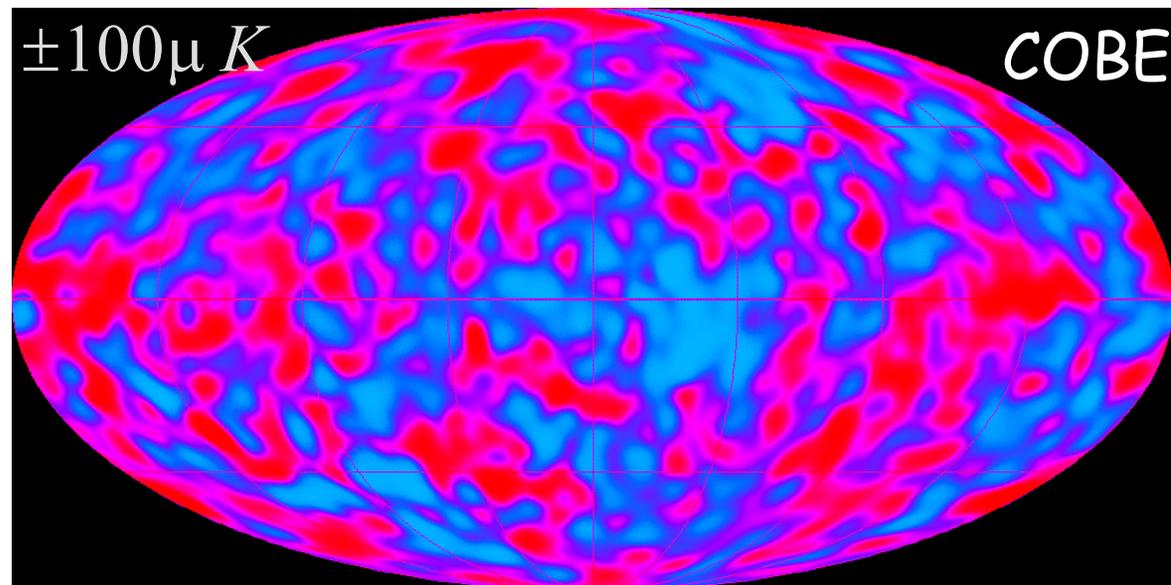
# Die kosmische Hintergrundstrahlung



Mikrowellenstrahlung  
aus allen Richtungen

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

Kleine Temperatur-  
unterschiede

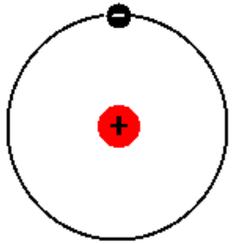


# Die Chemie des Universums

## Vor der Sternbildung:

75 %

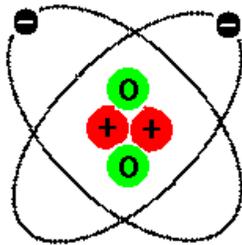
Wasserstoff



$^1\text{H}$

25 %

Helium (Massenanteil)



$^4\text{He}$

proton:

electron:

neutron:

## Am Ende des Sternenlebens:

Periodic Table of Elements

1																	2							
1	H																	He						
3	Li	Be																	B	C	N	O	F	Ne
11	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar																
19	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr						
37	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe						
55	Cs	Ba	*La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn						
87	Fr	Ra	+Ac	Rf	Ha	106	107	108	109	110														

\* 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

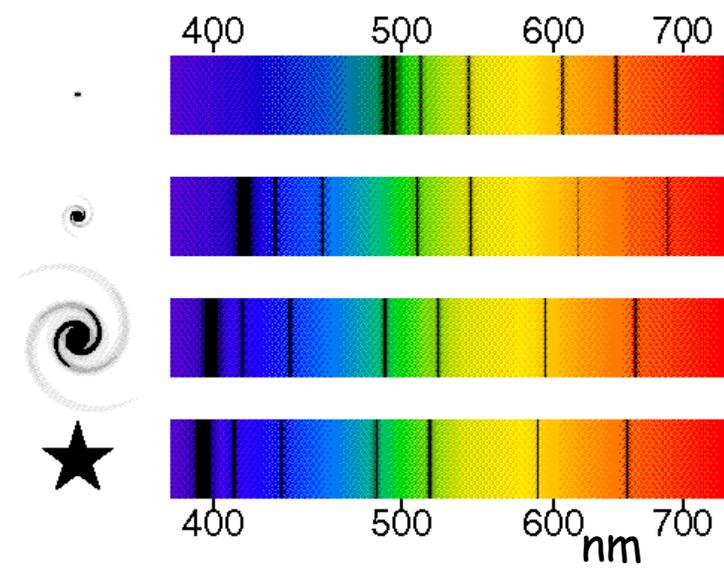
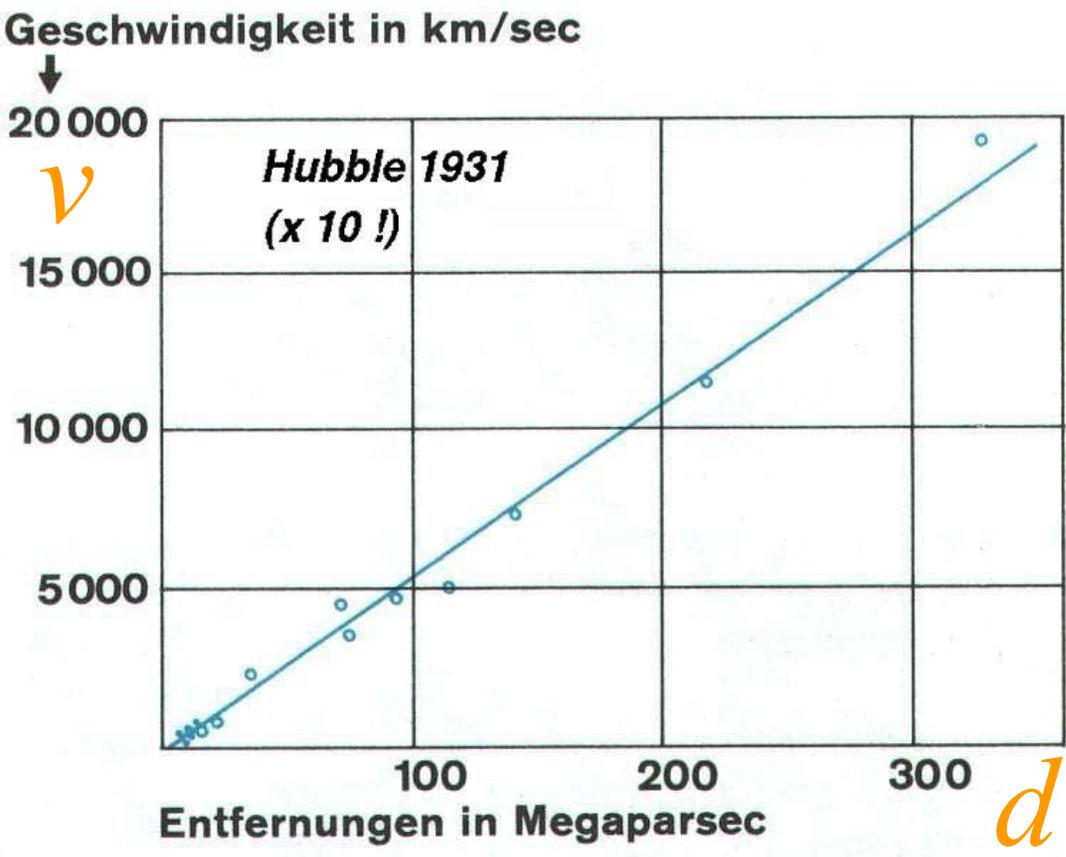
+ Actinide Series

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 !**

# Rotverschiebung der Galaxien

## Hubble 1929: Universum expandiert



$$v = H \cdot d$$

$$\begin{aligned}
 H &= 65 \text{ km} / \text{s} / \text{Mpc} \\
 &= 2 \text{ cm} / \text{s} / Lj \\
 &= 1 / (15 \cdot 10^9 \text{ a})
 \end{aligned}$$

# Das heutige Universum

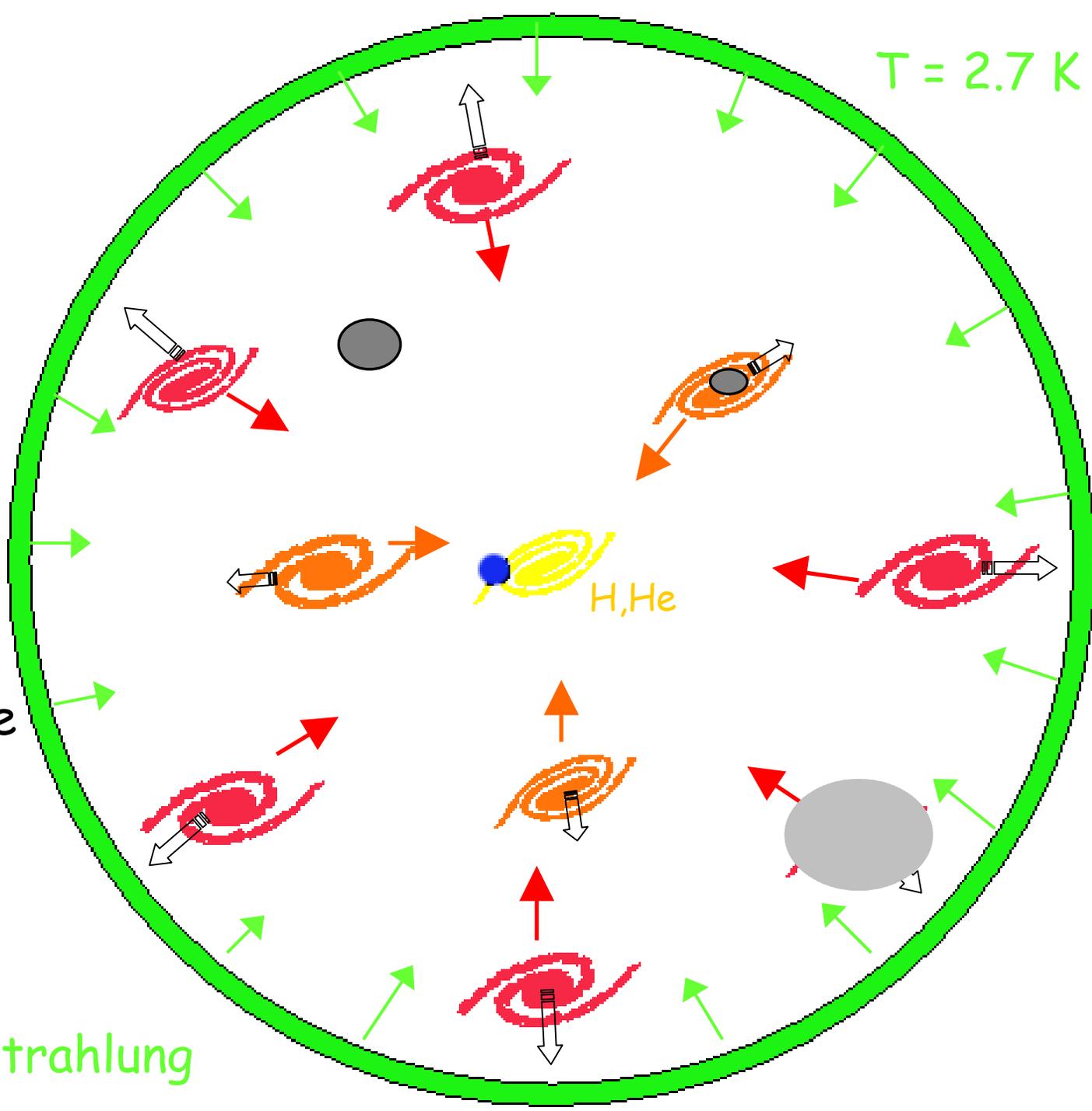
$T = 2.7 \text{ K}$

## Materie:

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

## Strahlung:

- Sternenlicht
- Hintergrundstrahlung



# Inhalt

## Grundlegende Beobachtungen:

(auseinanderfliegende) Galaxien, Chemie, Hintergrundstrahlung

## Standard-Big-Bang-Modell:

Überblick

Berechnung der Evolutionsgleichungen und Interpretation

Messungen der Evolutionsparameter

## Die kosmologische Konstante:

Modifizierte Evolutionsgleichungen

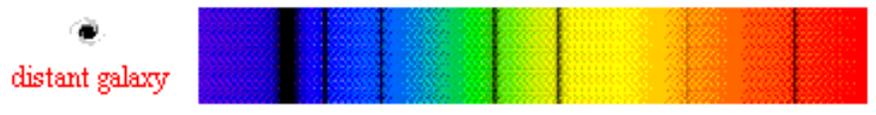
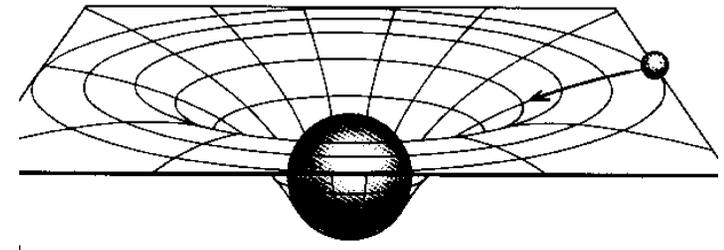
Konsequenzen

# Das Big-Bang - Modell

Einsteins  
allgemeine  
Relativitätstheorie

+

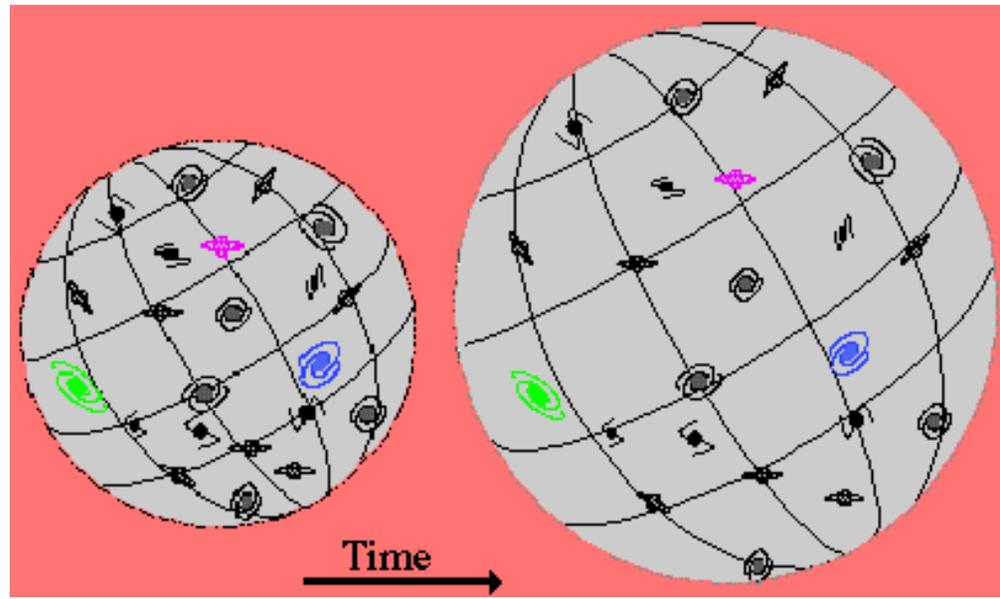
Astrophysikalische  
Beobachtungen



=

Der Raum expandiert  
Anfang: „Big Bang“

- ➔ Hintergrundstrahlung
- ➔ Rotverschiebung
- ➔ Chemie



# Evolution des Universums (a la Einstein)

Bestimmt von:

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

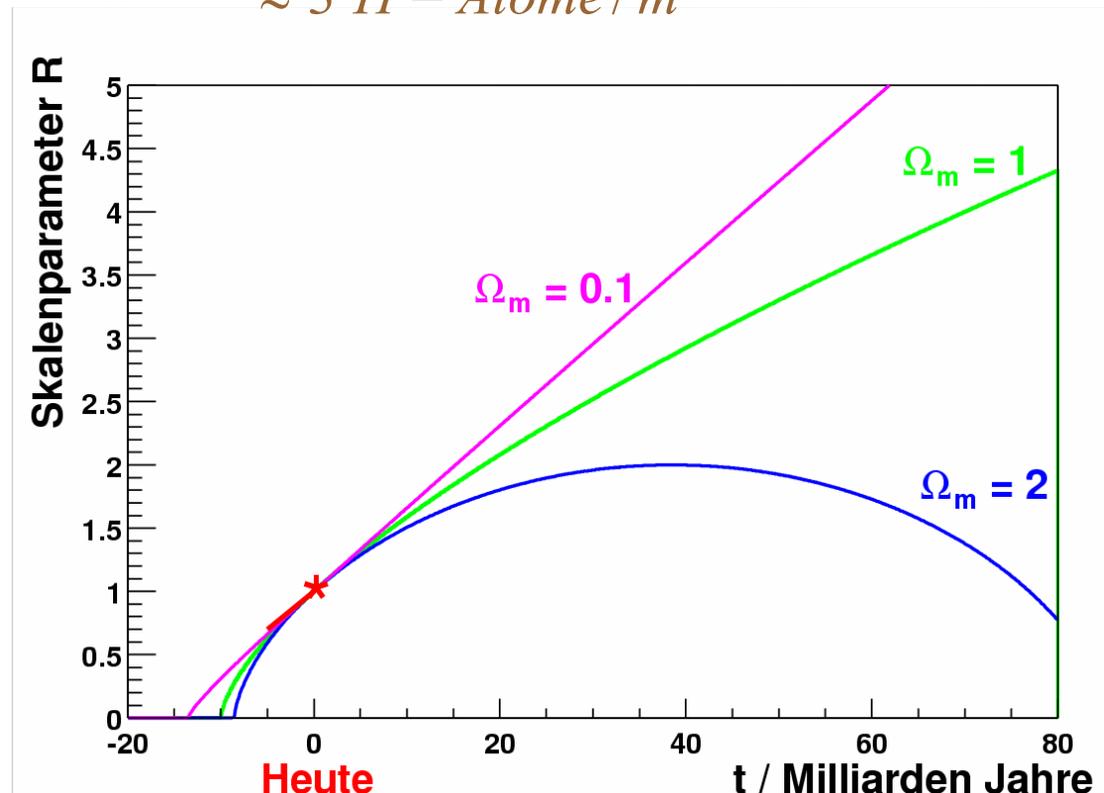
$$\Omega_m = \frac{\rho}{\rho_{krit}} = \frac{\text{mittlere Massendichte}}{\text{kritische Massendichte}} \approx 3 H - \text{Atome} / m^3$$

*nicht genau bekannt*

Hubble-Konstante

## Skalenparameter R:

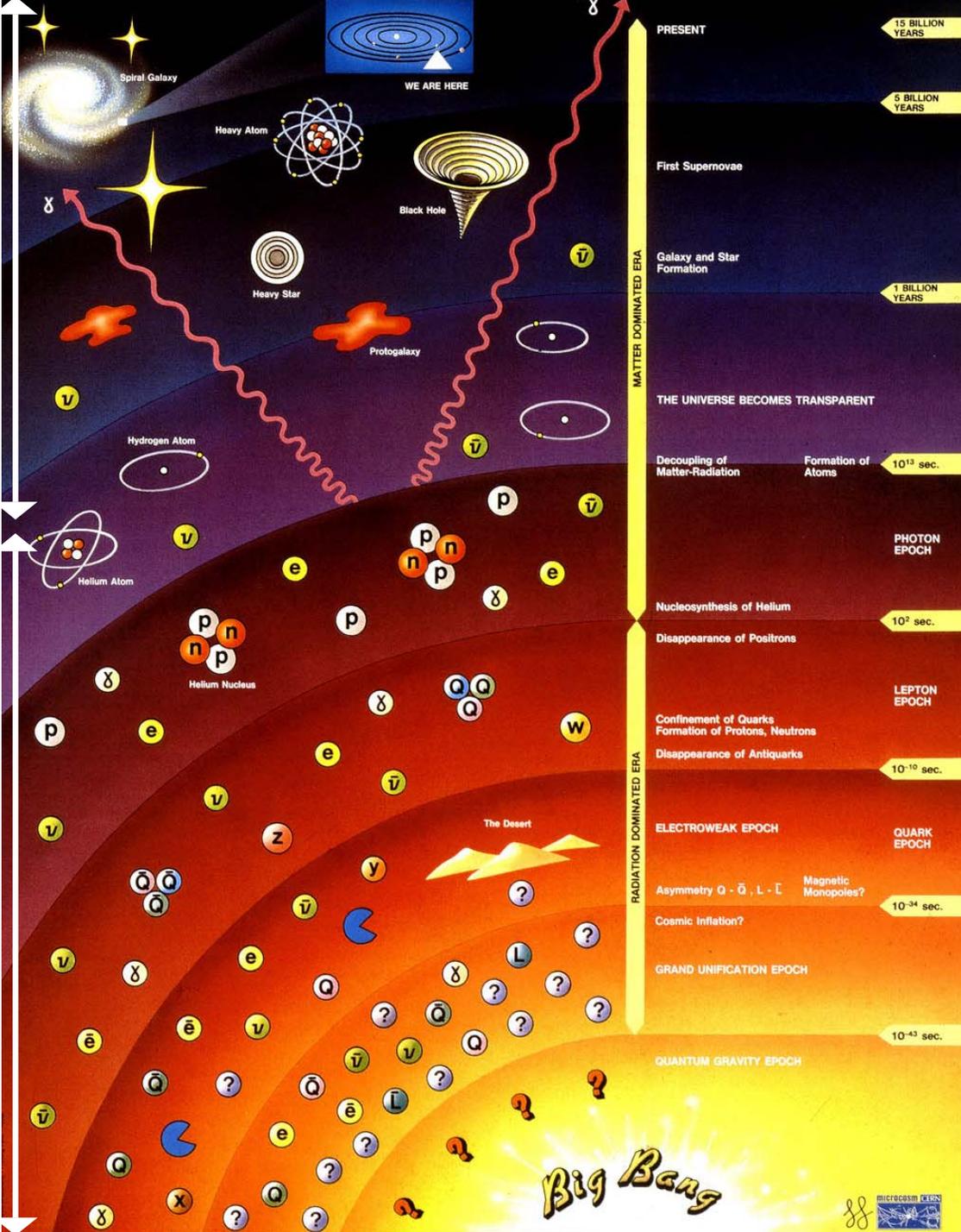
Abstand zwischen zwei entfernten Galaxien



# Prozesse im frühen Universum

Materie dominiert

Strahlung dominiert



10<sup>10</sup> a heute

300 000 a Atome

3 min Kerne

10<sup>-10</sup> s 100 GeV (Beschleuniger)

Ladungssumme = 0

Big Bang

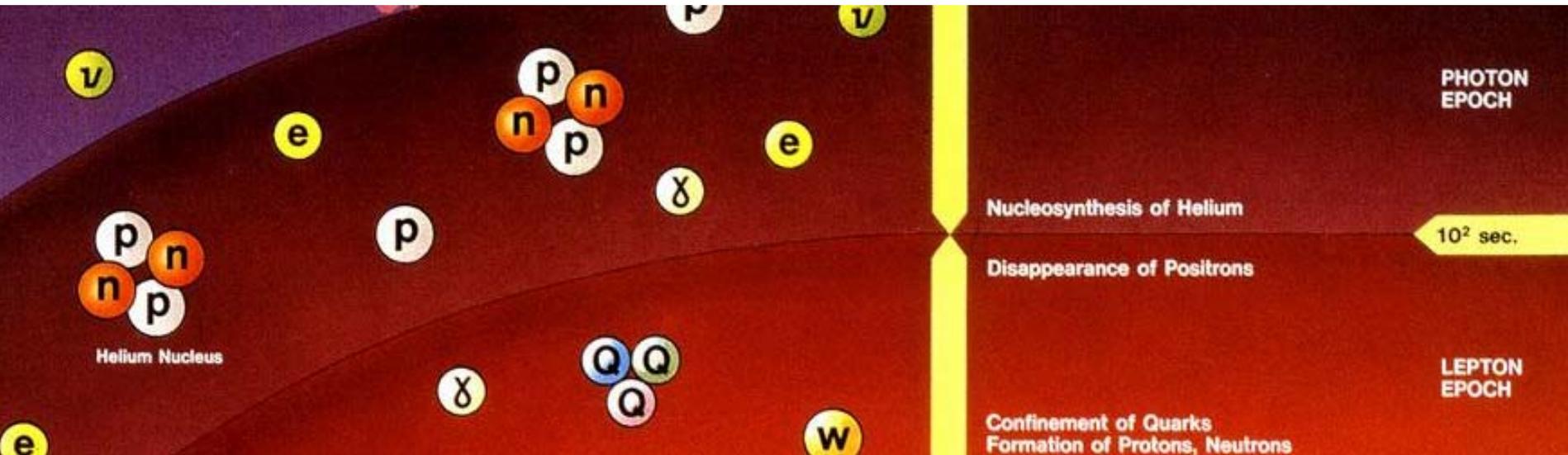


# Nukleosynthese

$t = 3 \text{ min}$

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

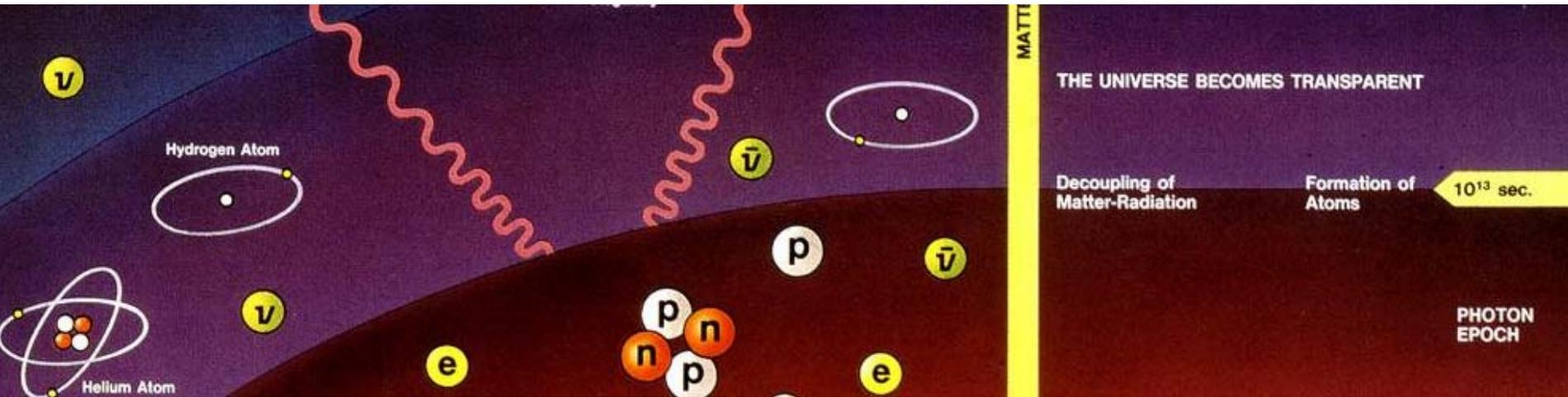
$E = 0.1 \text{ MeV}$



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

# Bildung von Atomen

$$t = 300\,000 \text{ a} \quad T = 3000 \text{ K} \quad E = 0.3 \text{ eV}$$



und auch ein wenig  
D, Li, ...

Weltall ohne freie Ladung!

Licht kann sich ungehindert ausbreiten!

Universum wird durchsichtig!

kosmische  
Hintergrund-  
strahlung!

# Inhalt

## Grundlegende Beobachtungen:

(auseinanderfliegende) Galaxien, Chemie, Hintergrundstrahlung

## Standard-Big-Bang-Modell:

Überblick

Berechnung der Evolutionsgleichungen und Interpretation

Messungen der Evolutionsparameter

## Die kosmologische Konstante:

Modifizierte Evolutionsgleichungen

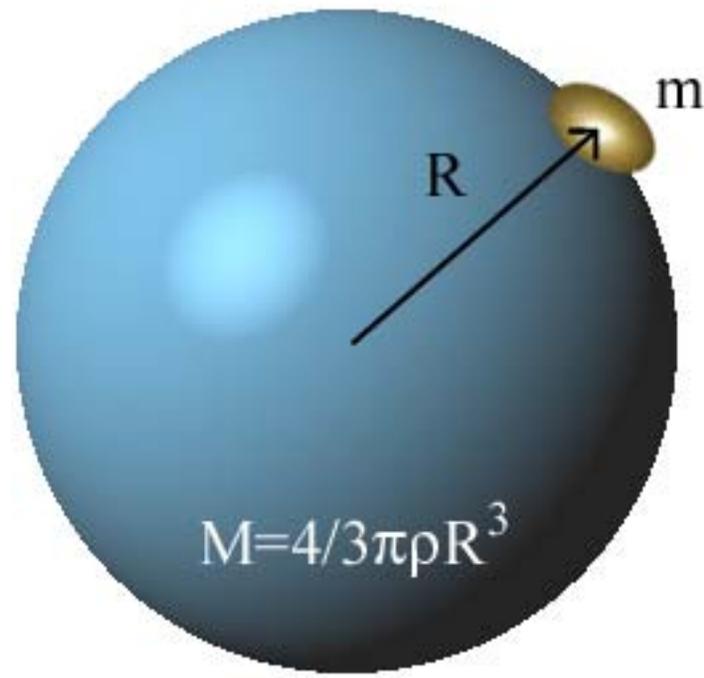
Konsequenzen

# „klassische“ Evolutionsgleichung

Falls Materie dominiert:

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

$$M = \frac{4\pi}{3} \rho(t) R^3(t) = const$$



Integration:

$$\left( \frac{dR(t)}{dt} \right)^2 - 2 G_N \cdot \frac{M}{R(t)} = -k$$

$$k \left\{ \begin{array}{l} < 0 \\ = 0 \\ > 0 \end{array} \right\} = const$$

Bis auf Faktoren:

kinetische Energie + potentielle Energie = Gesamtenergie und Raumkrümmung (AR)

# Umformulierungen der Evolutionsgleichung

$$\left( \frac{dR(t)}{dt} \right)^2 - 2 G_N \cdot \frac{M}{R(t)} = -k$$

Hubble-'Konstante':

$$H(t) = \frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt}$$

$$H^2(t) - \frac{8\pi}{3} G_N \rho(t) = -\frac{k}{R^2(t)}$$

$\Omega$ -Parameter:  $\Omega_m(t) = \frac{\rho(t)}{\rho_c}$      $\rho_c(t) = \frac{3H^2(t)}{8\pi G_N}$     kritische Dichte

$$H^2(t) \cdot (\Omega_m(t) - 1) = \frac{k}{R^2(t)}$$

# Interpretation der Evolutionsgleichung

$$-k \sim E_{tot}$$

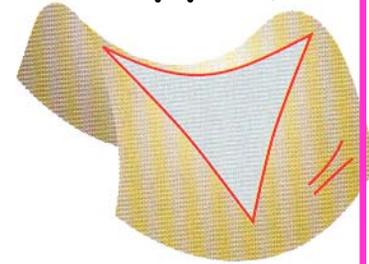
$$H^2(t) \cdot (\Omega_m(t) - 1) = \frac{k}{R^2(t)}$$

$$k < 0$$

offen

$$\Omega_m < 1$$

$$E_{tot} > 0$$



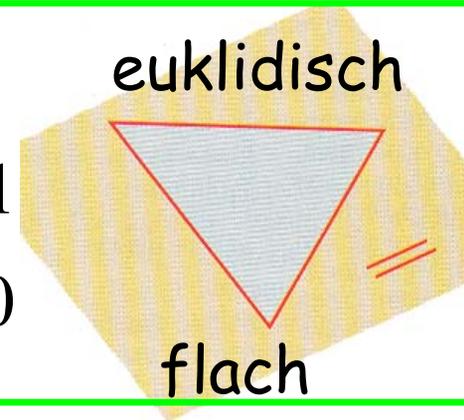
$$k = 0$$

euklidisch

$$\Omega_m = 1$$

$$E_{tot} = 0$$

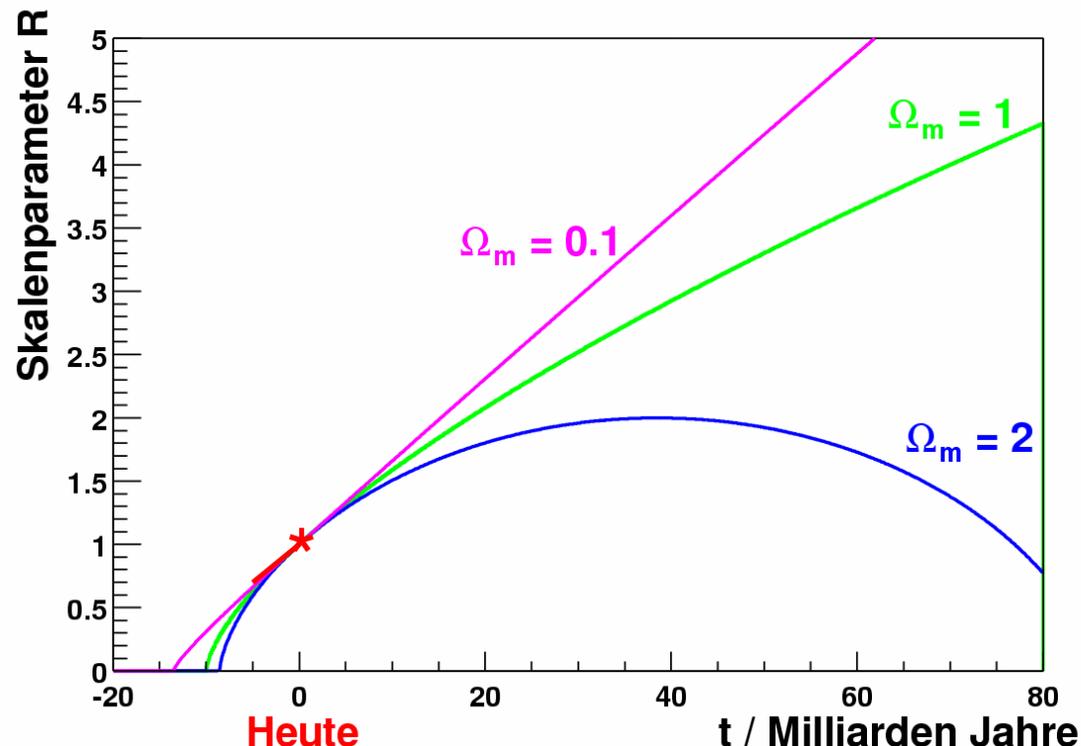
flach



$$k > 0$$

$$\Omega_m > 1$$

$$E_{tot} < 0$$



# Lösung der Evolutionsgleichung

Spezialfall  $k=0$ :

$$\frac{dR(t)}{dt} = \text{const} \cdot \frac{1}{\sqrt{R(t)}}$$

Abstand

Geschwindigkeit

Beschleunigung

$$R(t) \sim t^{2/3}$$

$$H(t) = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{t} > 0$$

$$\frac{dH}{dt} = -\frac{2}{3} \cdot \frac{1}{t^2} < 0$$

Weltalter:

Urknall:  $t = 0$

heute:  $t = t_0$        $H(t_0) = H_0$

$$t_0 = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{H_0}$$

# Inhalt

## Grundlegende Beobachtungen:

(auseinanderfliegende) Galaxien, Chemie, Hintergrundstrahlung

## Standard-Big-Bang-Modell:

Überblick

Berechnung der Evolutionsgleichungen und Interpretation

Messungen der Evolutionsparameter

## Die kosmologische Konstante:

Modifizierte Evolutionsgleichungen

Konsequenzen

# Messung der Evolutionsparameter

(Standard-)Evolutionsgleichung hat 2 unabh. freie Parameter

Zu bestimmen via astrophysikalischer Messungen!

Messung von mehr als 2 Parametern: *TEST* des Modells!

Mögliche Wahl der zwei Parameter:

$$H_0 \quad k$$

Geschwindigkeit, Krümmung

$$t_0 \quad \Omega$$

Weltalter,  $\Omega = \rho / \rho_c$

$$\rho \quad H_0$$

Dichte, Geschwindigkeit

$$H_0 \quad \dot{H}_0 = dH / dt (t_0)$$

Geschwindigkeit, Beschleunigung

immer negativ!

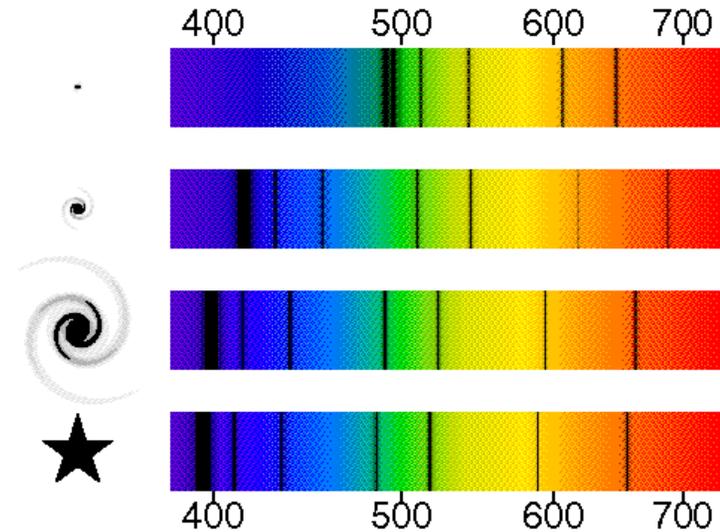
# Messung der Hubble-Konstanten

$$H_0 = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dt}$$

## Relativ einfach:

- $v = dR/dt$  aus Rotverschiebung  
der Wellenlängen:

$$v = c \cdot z = c \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$$



## Schwierig:

- absolute Entfernung  $R$   
aus scheinbarer Helligkeit ( $\sim 1/R^2$ ) von  
„Standardkerzen“ (Cepheiden u.a. Periodische, Supernovae)

$$H = 65 \text{ km} / \text{s} / \text{Mpc} \pm 10\% = 1 / (15 \cdot 10^9 \text{ a})$$

# Messung des Weltalters

## a) Kugelsternhaufen in der

Nähe der Milchstrasse:

Anzahl alter Sterne (rote Riesen)

berechenbar (t)

$$t_0 = (13 \pm 5) \cdot 10^9 \text{ a}$$



## b) Radioaktiver Zerfall schwerer Kerne

aus Supernova-Explosionen:

Isotopenverhältnis (z.B.  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ )

berechenbar (t)

$$t_0 = (19 \pm 6) \cdot 10^9 \text{ a}$$

$$t_0 = (16 \pm 4) \cdot 10^9 \text{ a}$$

# Messung der mittleren Massendichte

$$\rho \xrightarrow{H} \Omega$$

## a) Beobachtungen:

sichtbares Licht:  $\Omega \approx 0.01$

Nukleosynthese Big Bang:  $\Omega \approx 0.05$

dunkle Materie:  $\Omega = 0.2 - 0.4$

---

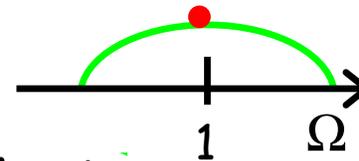

$$\Omega \sim 0.3 - 0.5$$

$$\Omega \lesssim 1$$

## b) Stabilitätsargument:

Abweichungen von  $\Omega = 1$  nehmen

mit der Zeit zu!



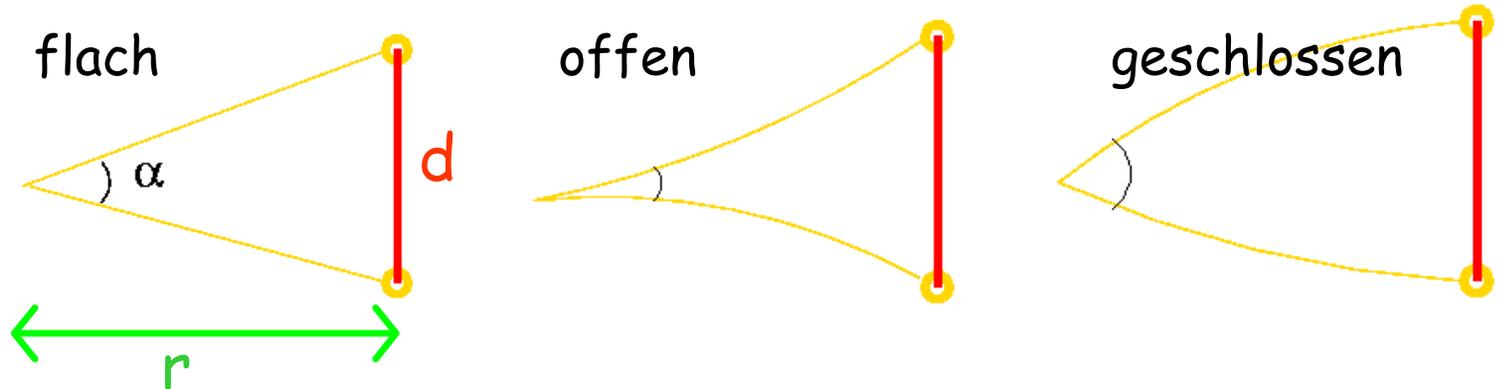
Heutiger Wert zurückextrapoliert:

$$\Omega(t = 1s) = 0.99999999999999999999 - 1.00000000000000000001$$

# Bestimmung der Raumkrümmung

## Messung der Raumkrümmung:

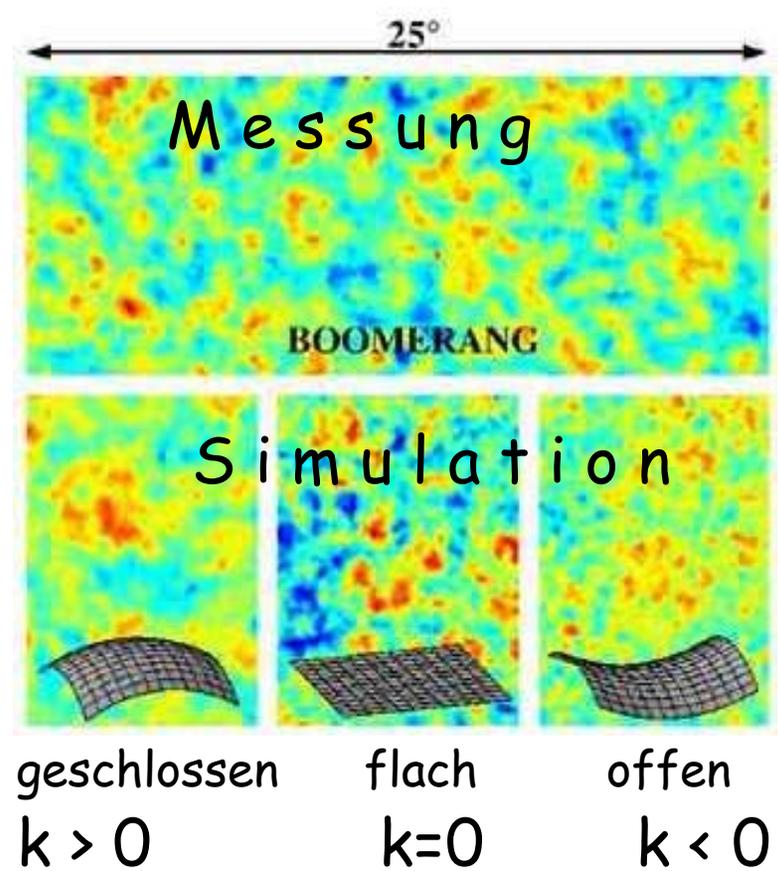
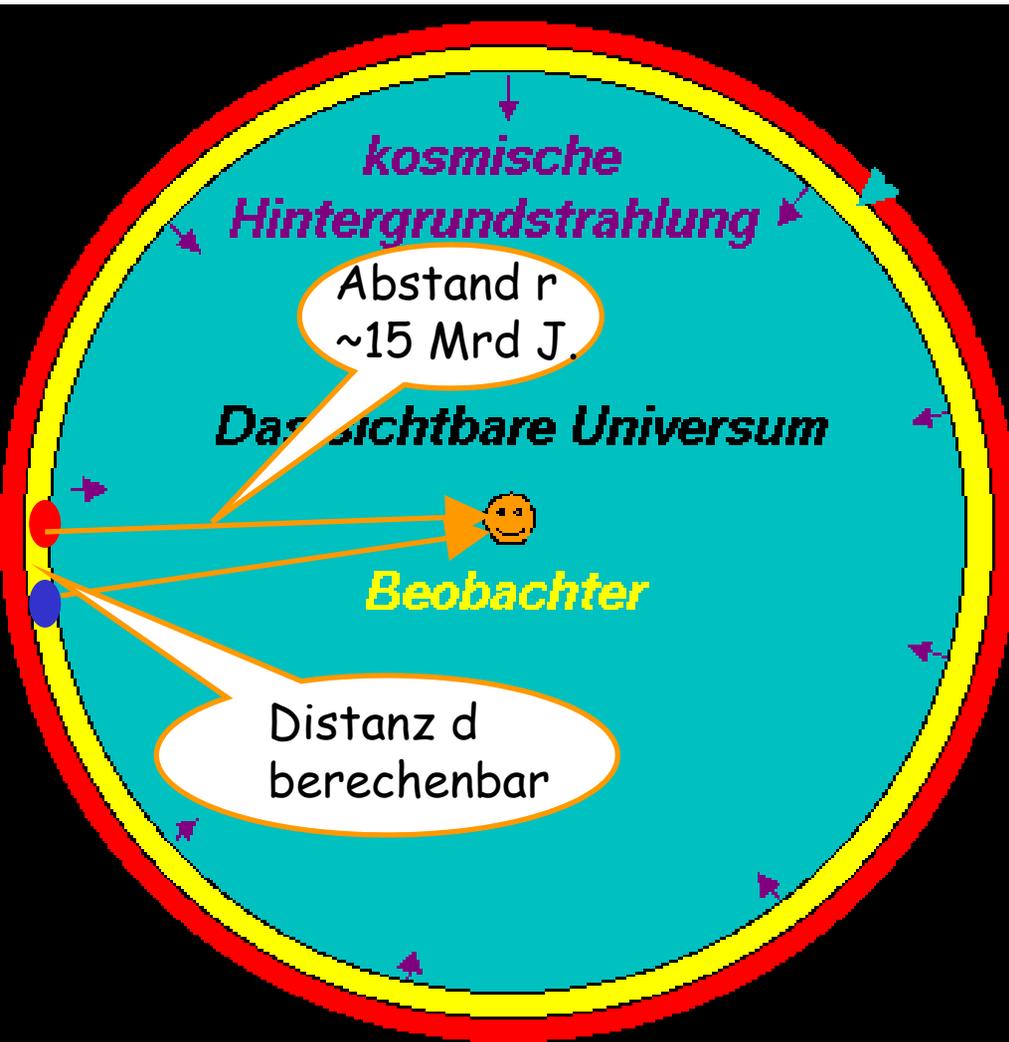
Winkel:



## Methode:

- Berechnung der Distanz  $d$  zwischen 2 kosmischen Objekten im bekannten (grossen!) Abstand  $r$
- Messung, unter welchem Winkel  $\alpha$  die beiden Objekte erscheinen
- Vergleich von  $\alpha$  mit  $d / r$

# Messung von Raumkrümmung bzw. $\Omega$

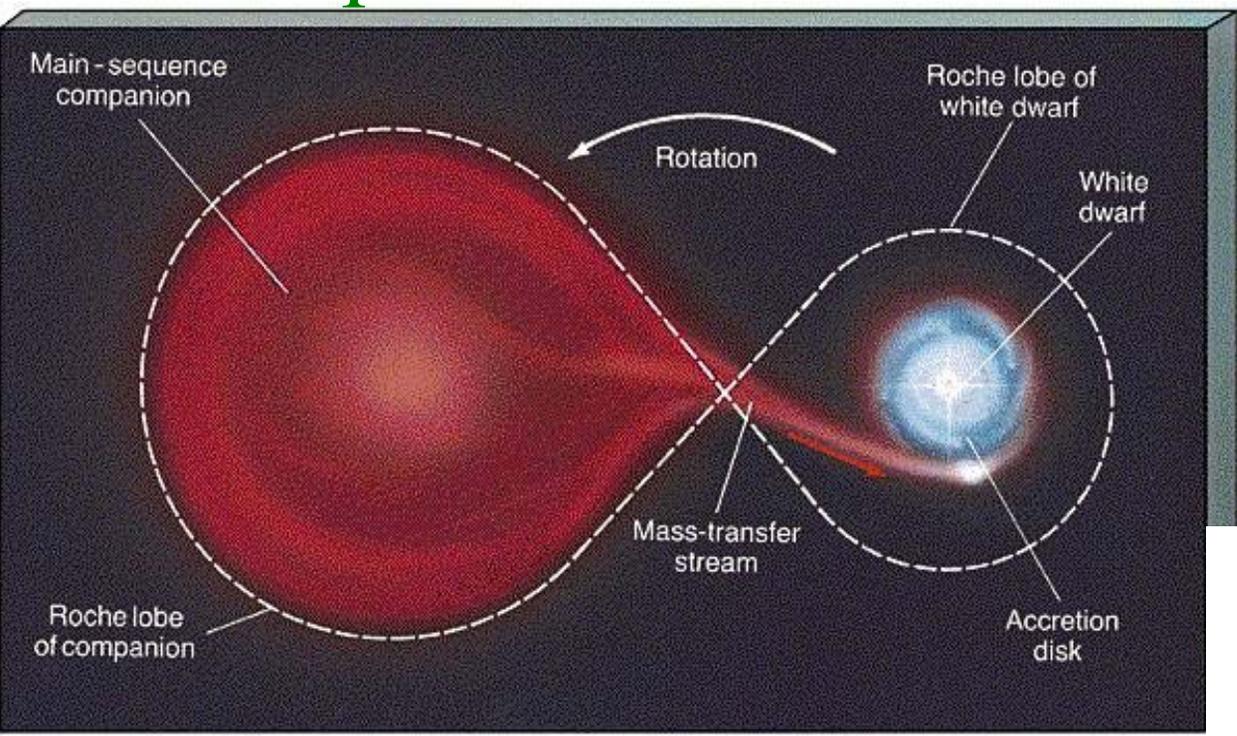


passt am besten:

$$\Omega = 1.06 \pm 0.06$$

$k \rightarrow H$  bekannt  $\rightarrow$

# Supernovae Ia = Standardkerzen



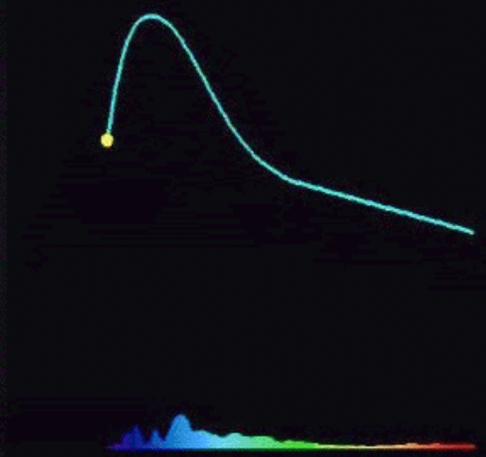
**Explosion** wenn  
 Masse kritischen  
 Wert  $\cong 1.4 \cdot m_{\text{Sonne}}$   
 erreicht!

„Standardkerzen“



Helligkeit:  
gleich  
groß

Entfernungs-  
 bestimmung



Zeitskala: einige Wochen

# Messung der Expansionsbeschleunigung

Supernovae Typ Ia  
= „Standardkerze“

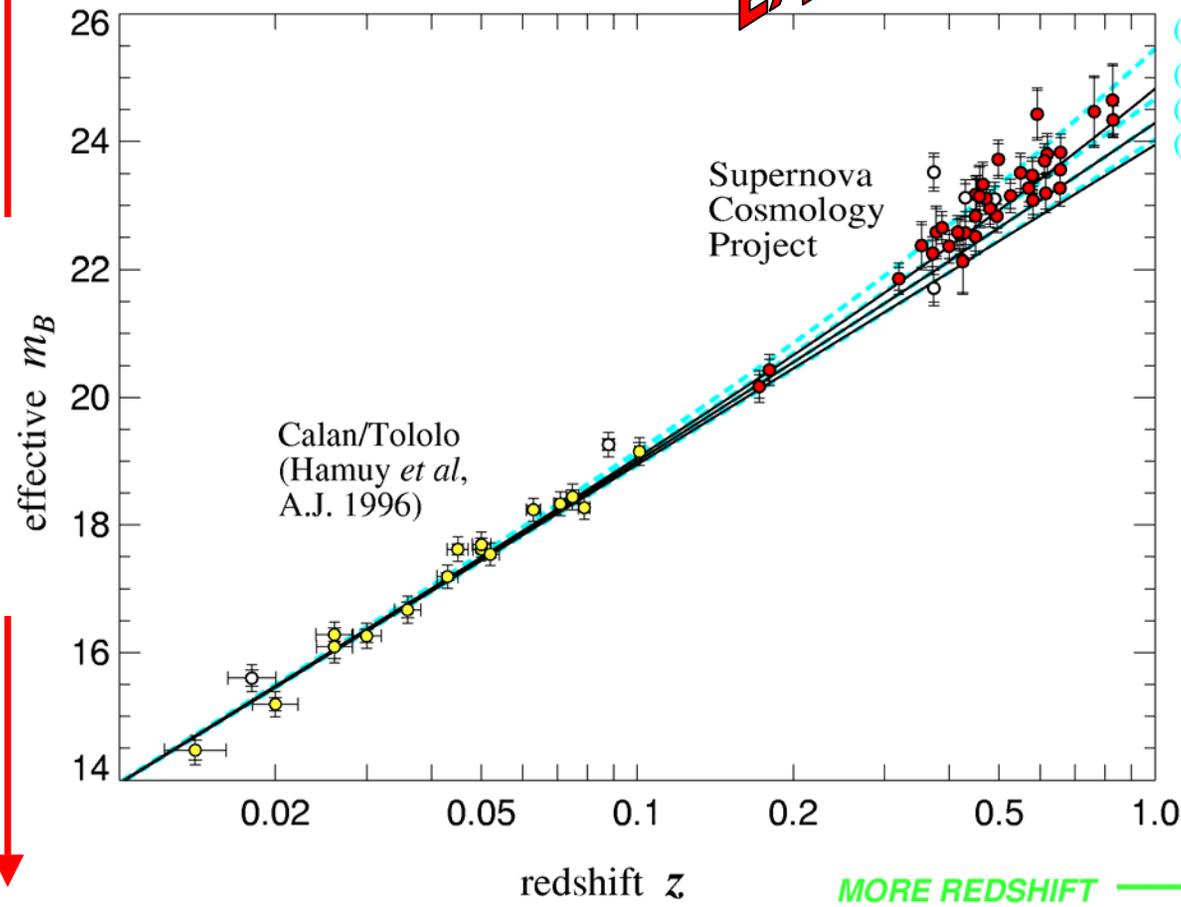
Entfernung  $d \sim$  Alter

FAINTER (Farther) (Further back in time)

**beschleunigte Expansion**

Helligkeit

Perlmutter, et al. (1998)



$(\Omega_M, \Omega_\Lambda) =$   
 (0, 1)  
 (0.5, 0.5) (0, 0)  
 (1, 0) (1, 0)  
 (1.5, -0.5) (2, 0)

Flat  $\Lambda = 0$

$$v = H \cdot d$$

$$\log d = \log v - \log H$$

Fluchtgeschwindigkeit  $v$

MORE REDSHIFT (More total expansion of universe since the supernova explosion)

# Zusammenfassung der Messergebnisse

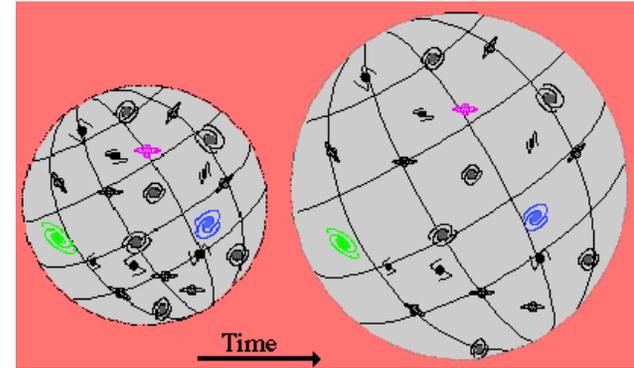
## Unabhängige Messungen von

Hubblekonstante

Materiedichte

Raumkrümmung

Weltalter



„passen (einigermaßen) zusammen“ und bestätigen damit das **Standard-Big-Bang-Modell**

Dessen Parameter werden auf ~10% genau bestimmt

## Neue Messungen der kosmischen Beschleunigung:

$$\dot{H} > 0$$

„negative Gravitation“

Widerspruch zum Big-Bang-Modell!

# Inhalt

## Grundlegende Beobachtungen:

(auseinanderfliegende) Galaxien, Chemie, Hintergrundstrahlung

## Standard-Big-Bang-Modell:

Überblick

Berechnung der Evolutionsgleichungen und Interpretation

Messungen der Evolutionsparameter

## Die kosmologische Konstante:

Modifizierte Evolutionsgleichungen

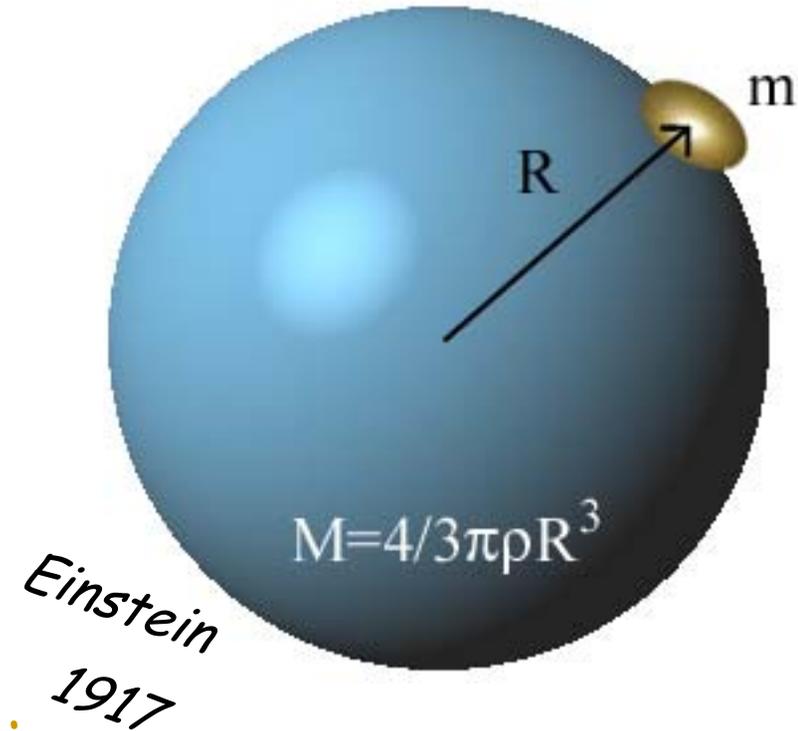
Konsequenzen

# Evolution mit kosmologischer Konstanten

ohne kosmologische Konstante:

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

$$M = \frac{4\pi}{3} \rho(t) R^3(t) = \text{const}$$



mit kosmologischer Konstanten  $\Lambda$ :

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

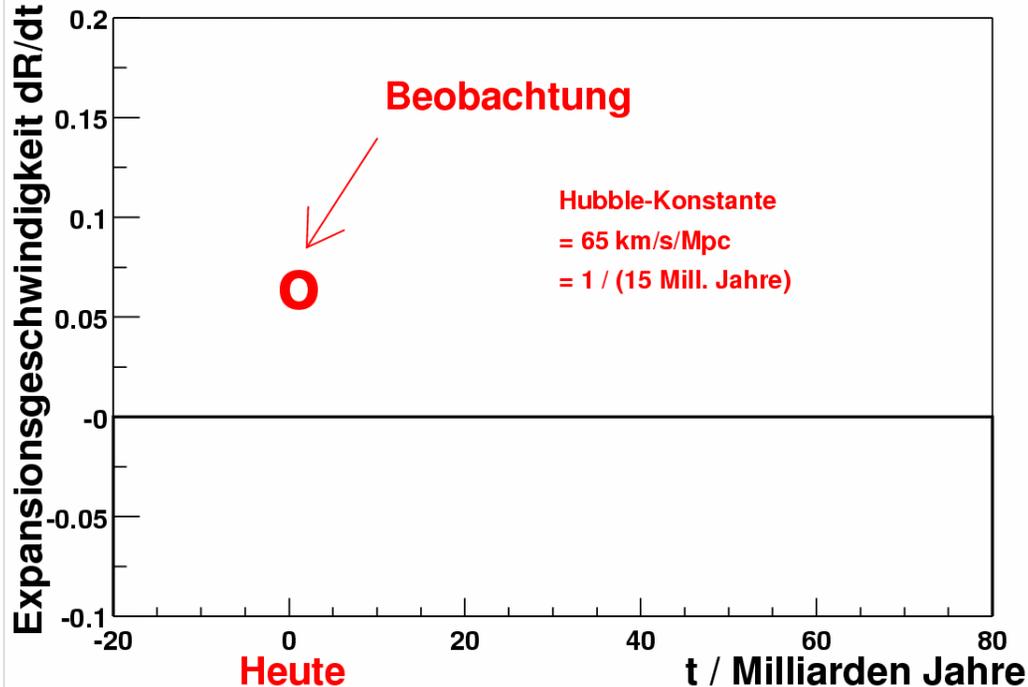
abstossend

grosse  
Entferng!

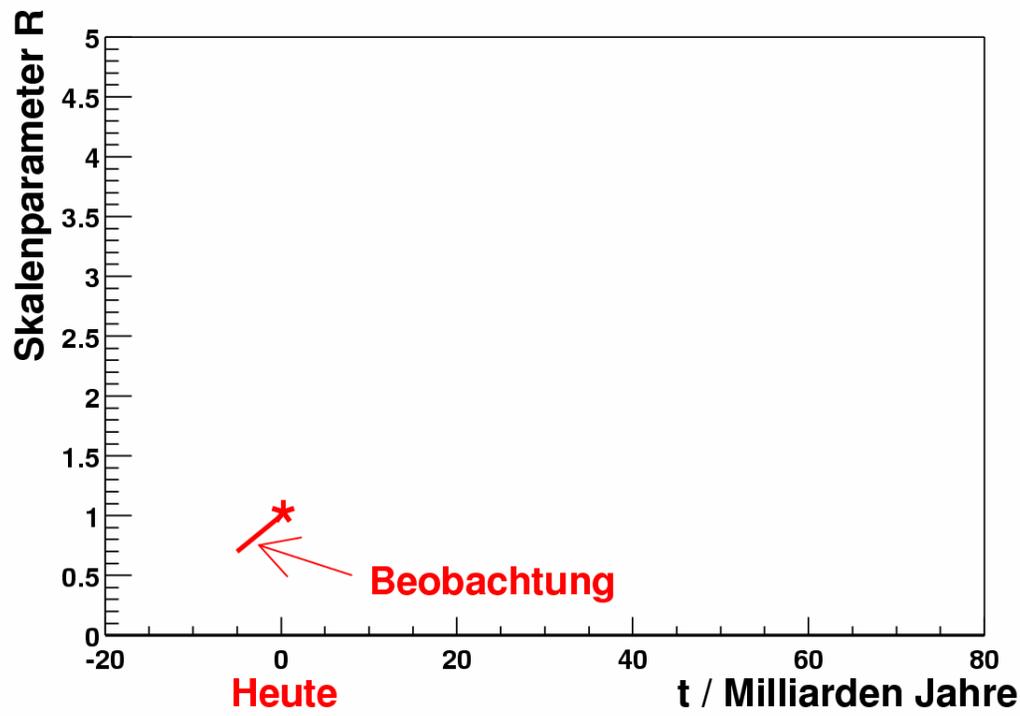
# Evolution - Beobachtungen

## Messung der Expansions-GESCHWINDIGKEIT

Einheit: 1 / Milliarden Jahre

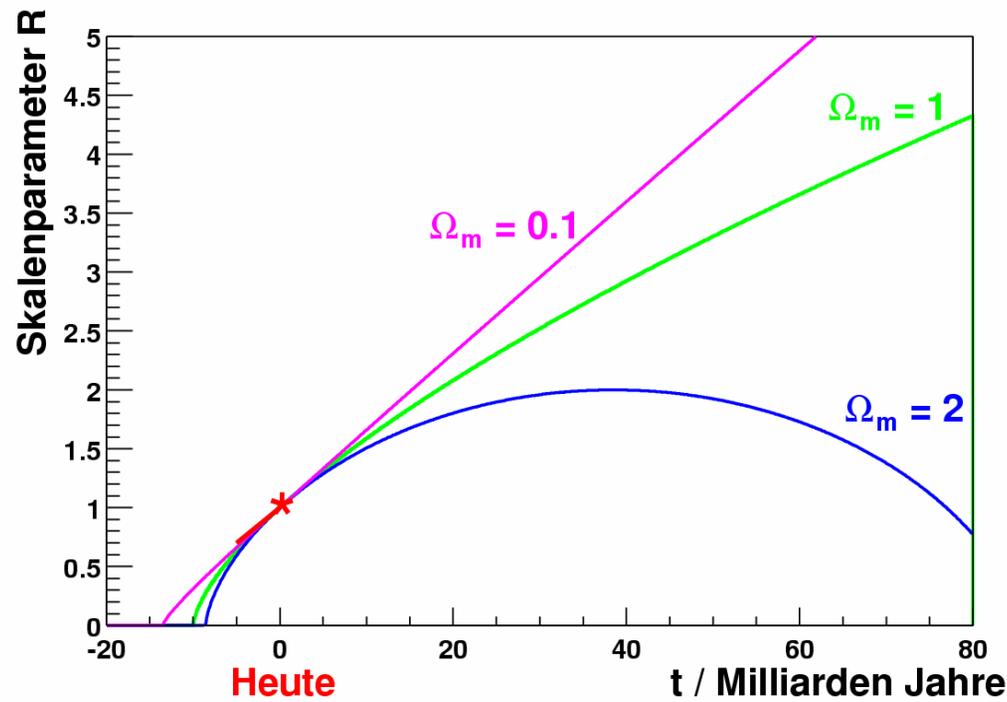


Einheit: dimensionslos

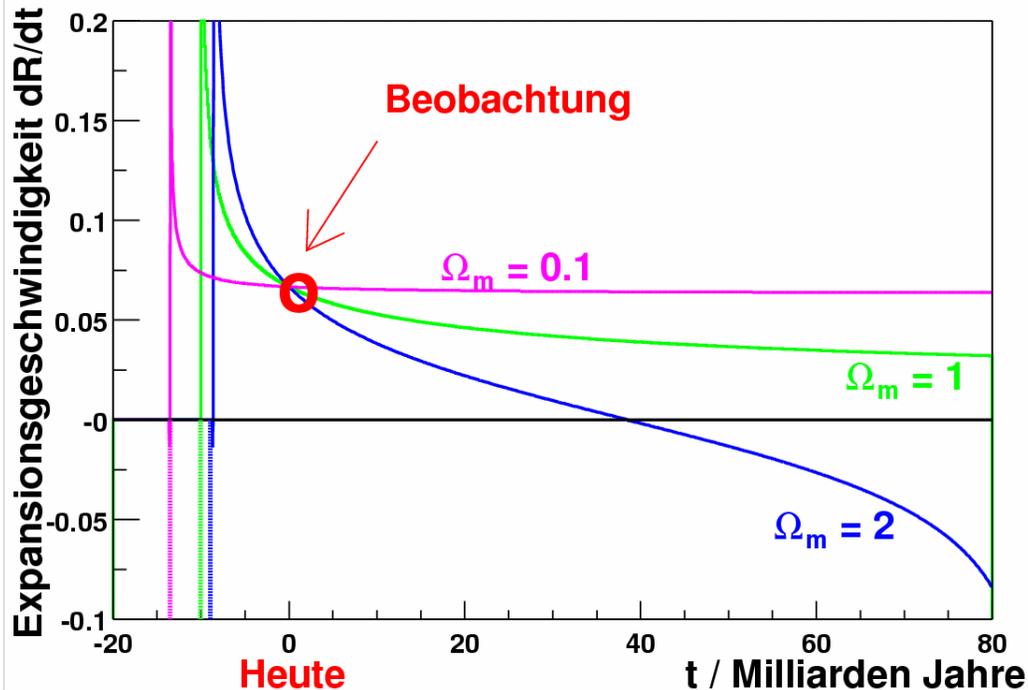


# Evolution im Big-Bang-Modell

## Vergleich mit Modellrechnungen



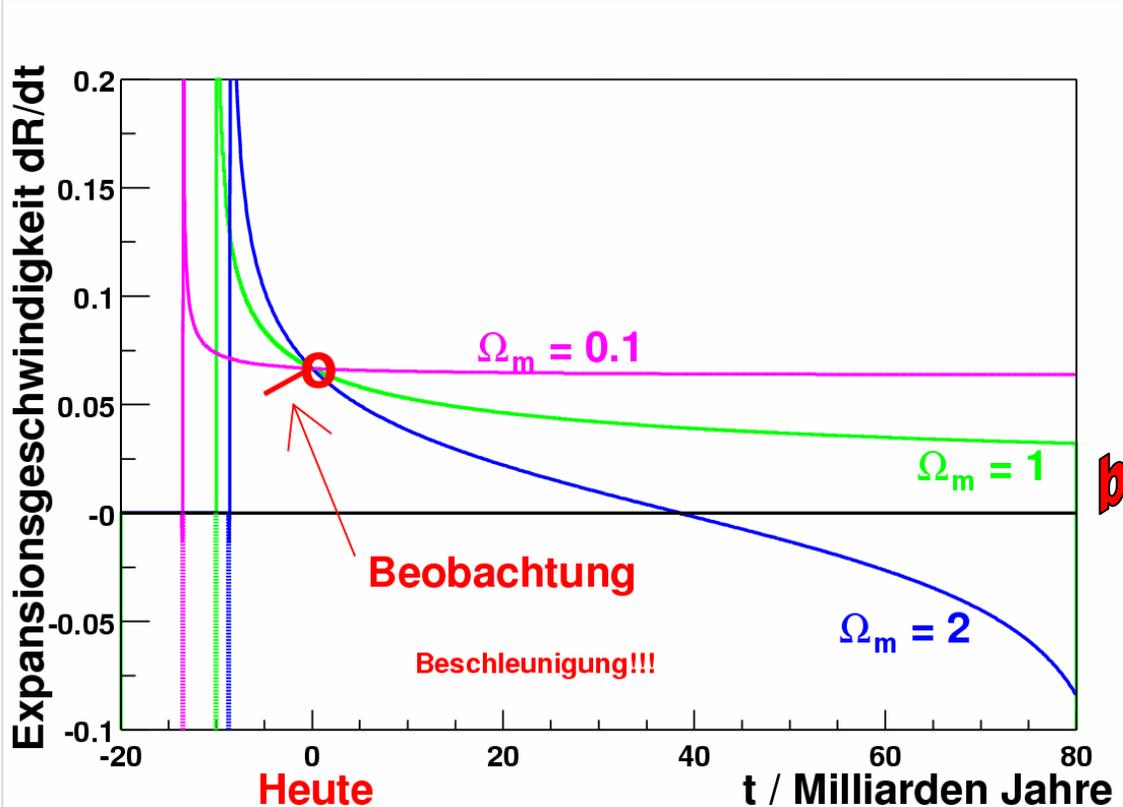
„passt“



# Messungen der Beschleunigung

## Messung der Expansions-BESCHLEUNIGUNG

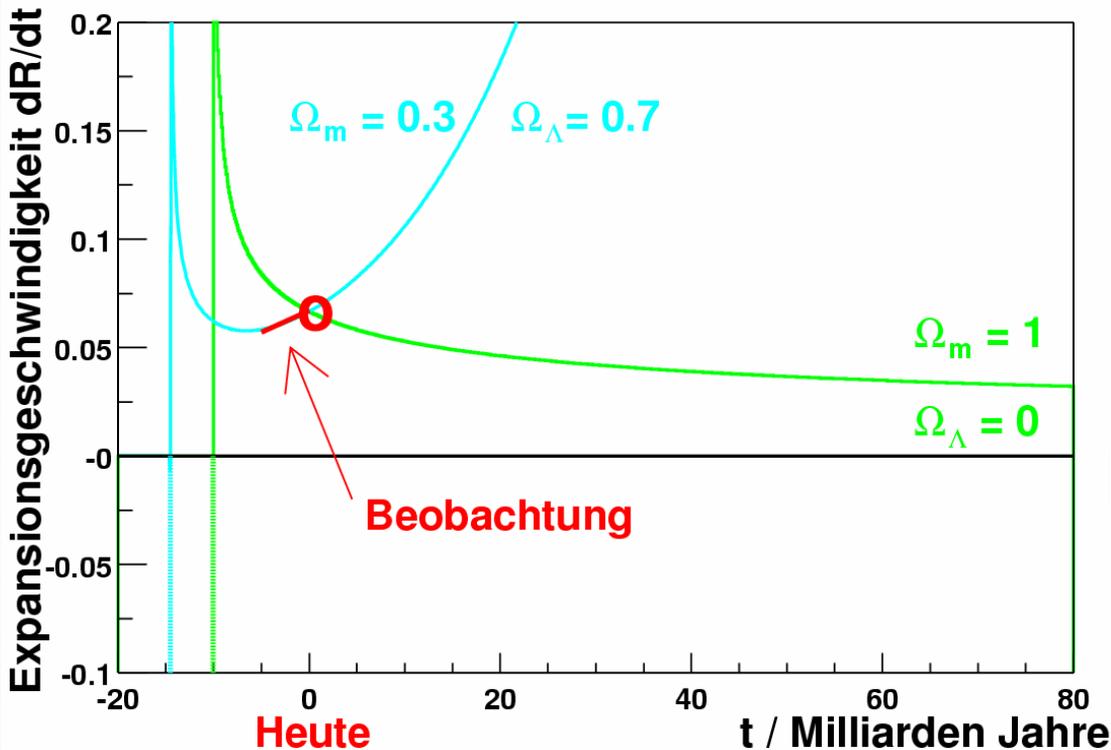
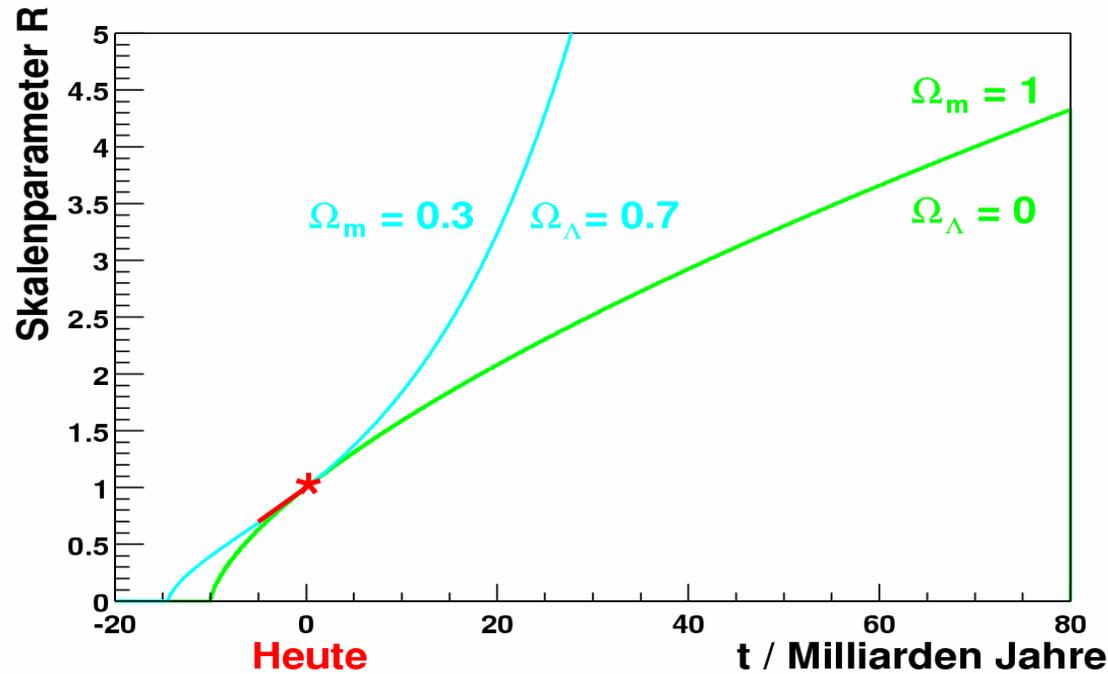
**Neu!**



**beschleunigte Expansion**

# Modifizierte Gravitationstheorie

Erweitertes Modell: Einsteins  
„kosmologische Konstante“



$\Lambda$

„dunkle  
Energie“

wirkt  
abstossend!

„negativer  
Druck“

**beschleunigte  
Expansion**

# Inhalt

## Grundlegende Beobachtungen:

(auseinanderfliegende) Galaxien, Chemie, Hintergrundstrahlung

## Standard-Big-Bang-Modell:

Überblick

Berechnung der Evolutionsgleichungen und Interpretation

Messungen der Evolutionsparameter

## Die kosmologische Konstante:

Modifizierte Evolutionsgleichungen

Konsequenzen

# Dunkle Energie im Universum

Jetzt 3 Parameter:  
 $H, \Omega_m, \Omega_\Lambda$

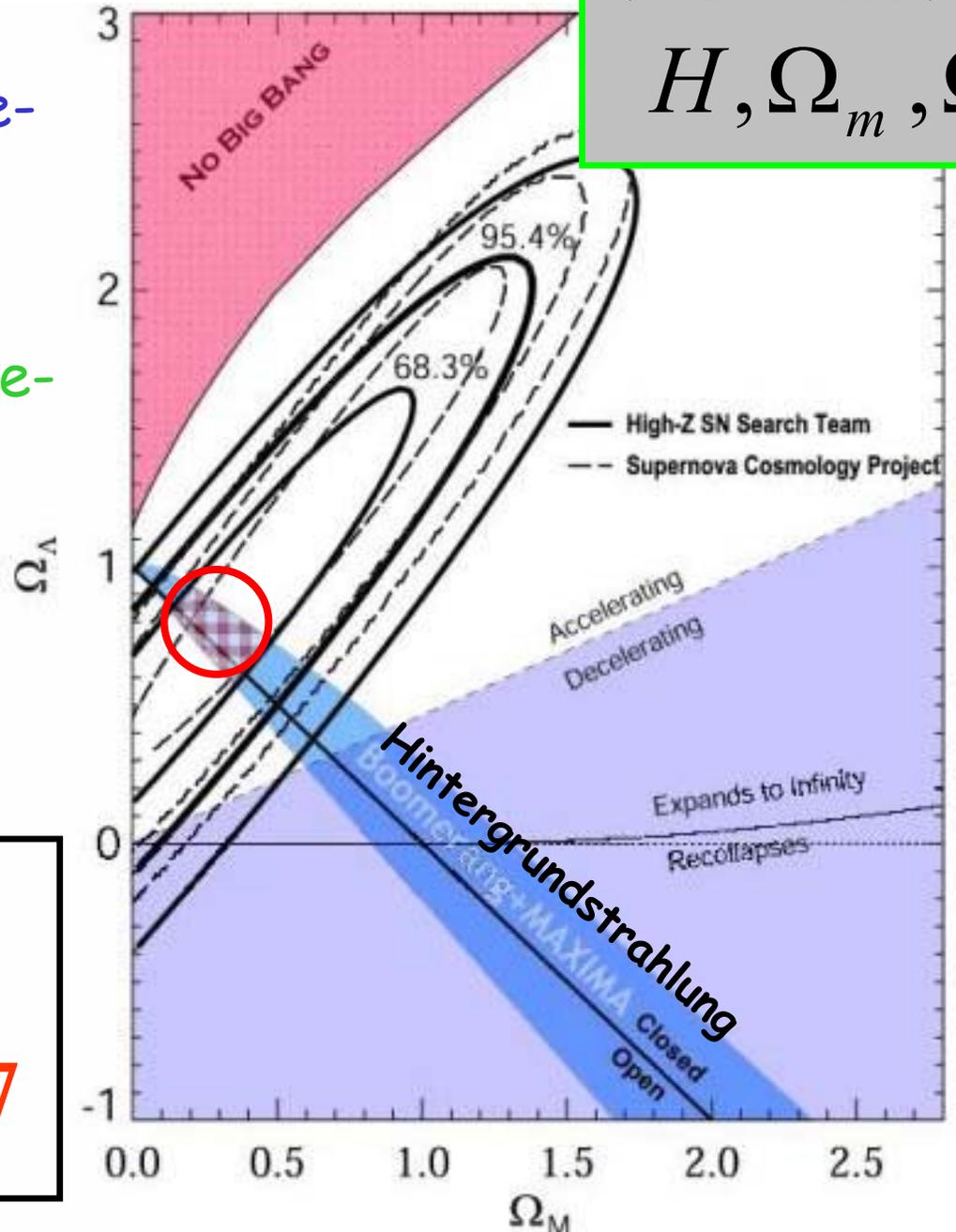
$\Omega_m$  : Massenenergie-Dichte

**Neu:**

$\Omega_\Lambda$  : Dunkle Energie-Dichte

erfüllt den ganzen Raum,  
nicht an Masse gebunden

$$1 \approx \Omega = \Omega_m + \Omega_\Lambda$$
$$\approx 0.3 + 0.7$$



# Bedeutung und Grösse von $\Lambda$ ?

$$\Omega = \Omega_m + \Omega_\Lambda \quad \Omega_\Lambda = \frac{\Lambda}{3H^2} \approx 0.7$$

Kosmologische Konstante:

$$\Lambda \approx 10^{-35} / s^2$$

$$\sqrt[3]{\frac{3G_N M}{\Lambda}} \approx 4 \cdot 10^7 Lj$$

= charakteristische Längenskala

(M = Galaxienhaufen)

Vakuumenergiedichte:

$$E_{vac} = \frac{c^2 \Lambda}{8\pi G_N} \approx 5 \cdot 10^{-10} \frac{J}{m^3} \approx \frac{3H - \text{Atome}}{m^3}$$

# Folgerungen aus $\Lambda > 0$



- Auf Erde und im Sonnensystem:

Effekte nicht messbar

(Kraft  $\sim R$ )

- frühes Universum:  $\Omega_m$  dominiert  
unverändert

- jetziges Universum:  $\Omega_m, \Omega_\Lambda$  etwa gleich gross  
Neue Berechnung Weltalter: 10  $\rightarrow$  15 Milliarden J.

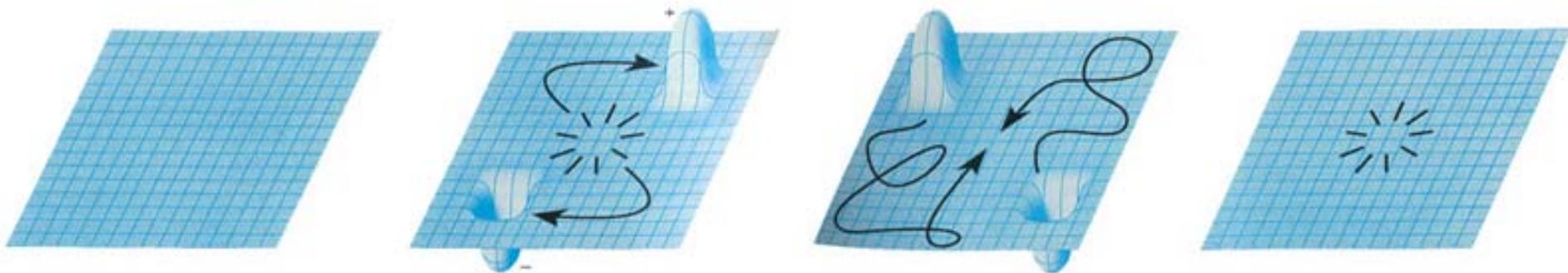
- zukünftiges Universum:  $\Omega_\Lambda$  dominiert  
exponentielles Auseinanderfliegen:

$$R(t) = \exp(t \cdot \sqrt{\Lambda / 3})$$

Zahl der beobachtbaren Galaxien nimmt ab!

# Offene Fragen

- Sind die Supernova-Messungen richtig ?
- Ist unsere Interpretation der Daten korrekt ?
  - *Waren frühe Supernovae vielleicht „anders“ ?*
- Ist die kosmologische *Konstante* verantwortlich ?
  - *Nimmt  $\Lambda$  mit der Zeit ab („Quintessenz“) ?*
- Wie entsteht diese Energiedichte ? Vakuumschwankungen ?



- Warum sind  $\Omega_m, \Omega_\Lambda$  heute etwa gleich gross ?

# Zusammenfassung

„goldenes Zeitalter der Kosmologie“

Faszinierende neue Beobachtungen :

Die Expansionsgeschwindigkeit scheint zuzunehmen,  
entgegen der Gravitationskraft!

Kosmologische Konstante ?

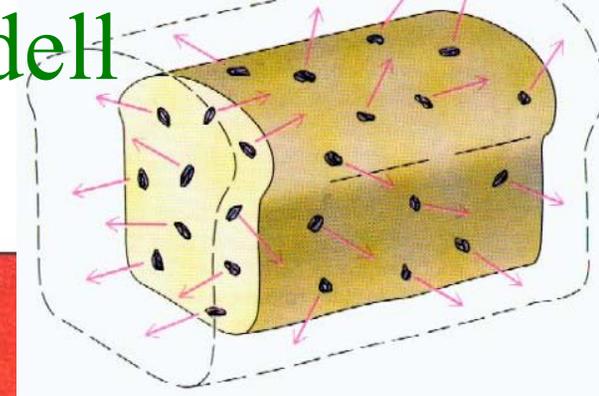
# Literatur: Bücher

- C. Grupen:  
Astroteilchenphysik, Vieweg, 2000
- H.V. Klapdor-Kleingrothaus und K. Zuber:  
Teilchenastrophysik, Teubner, 1997 (Vorsicht: Fehler!)
- A. Unsöld, B. Bachel:  
Der neue Kosmos, Springer, 1999
- Bergmann-Schaefer, Lehrbuch der Experimentalphysik:  
Band 8, Sterne und Weltraum, Walter de Gruyter, 1997
- S. Weinberg:  
The first three minutes, Basic Books, 1993

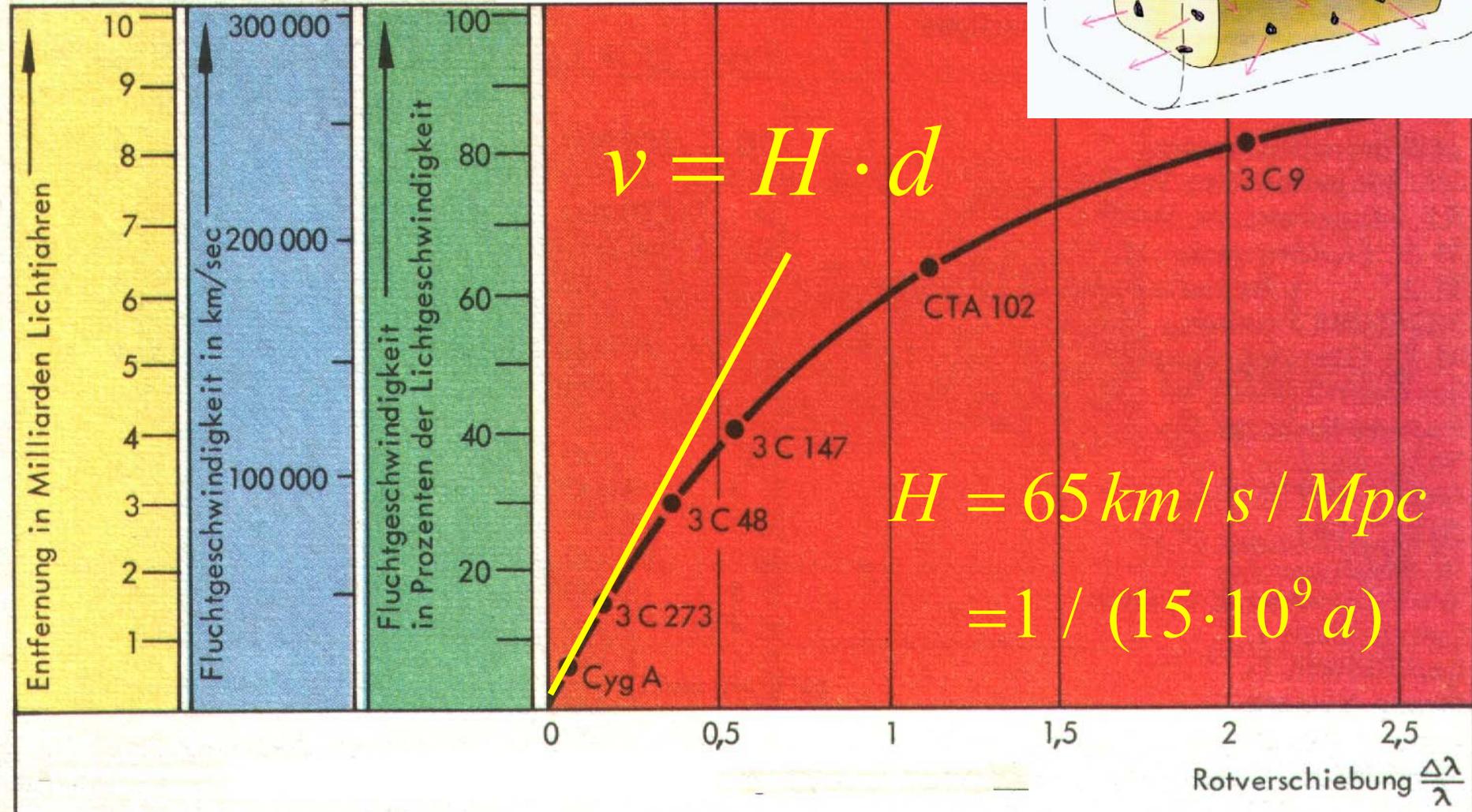
# Literatur: Artikel Kosmologie

- J.P. Ostriker, P.J. Steinhardt,  
Brave New Cosmos, *Scientific American*, Jan. 2001:
- N.A. Bahcall et al,  
The Cosmic Triangle: Revealing the State of the Universe,  
*Science*, 28 May 1999
- J.W. van Holten,  
Introduction to Cosmology, NIKHEF-H/92-12
- M. Bartelmann,  
Die kosmologische Inflation,  
*Physikalische Blätter*, Sep. 2001

# Anhang: Big-Bang - Modell



Hubble 1929: Universum expandiert

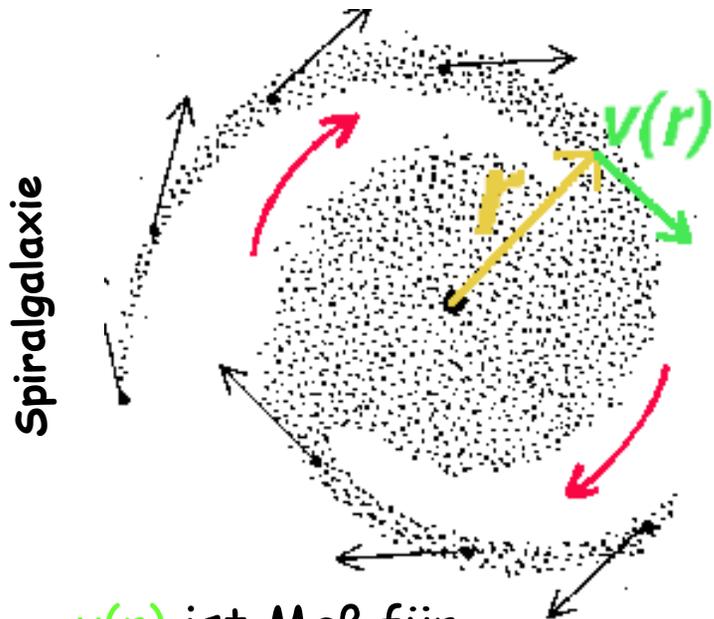


Hoyle 1950: „Big Bang“

# Anhang: Dunkle Materie in/um Galaxien

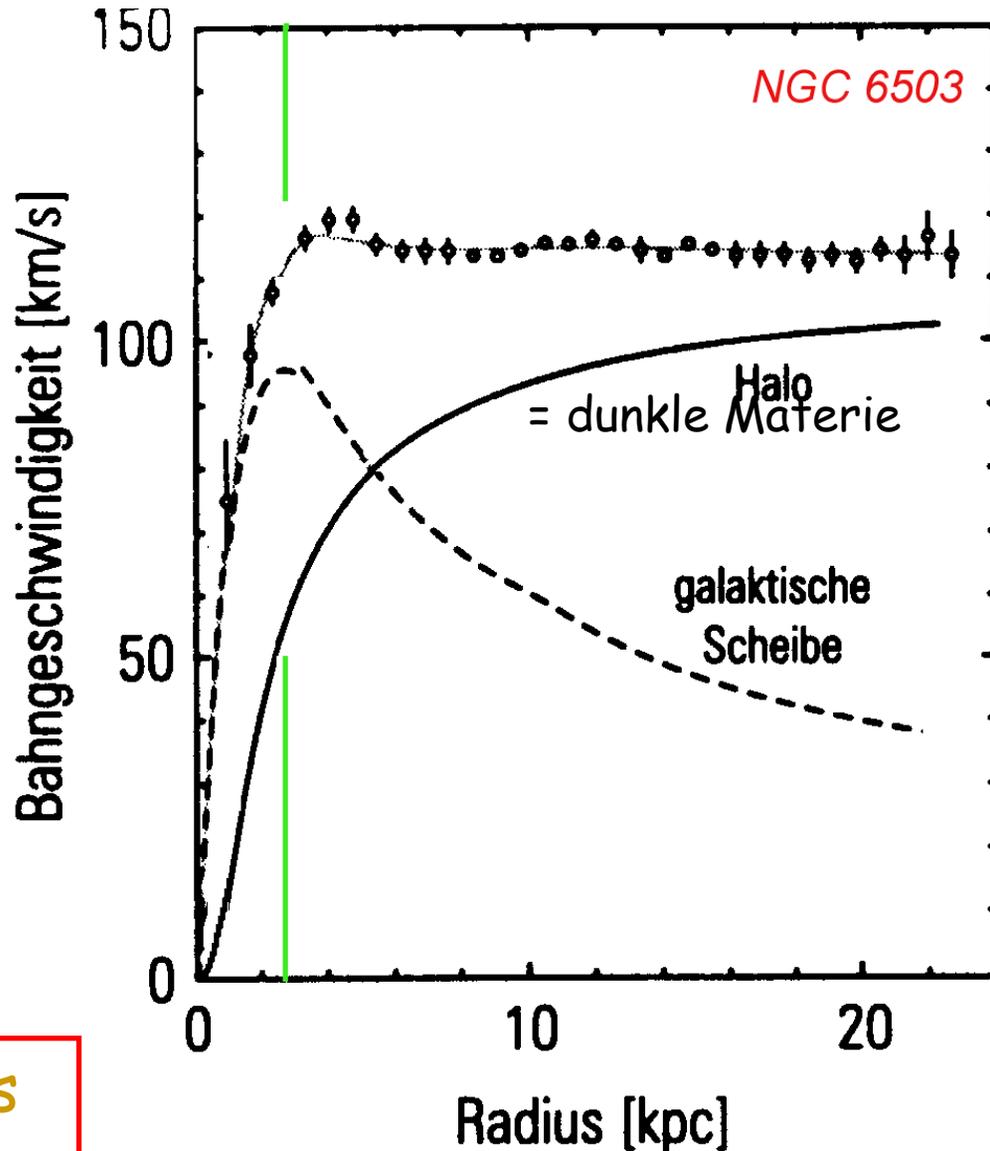
Rotationsgeschwindigkeit  $v(r)$

via Doppler-Effekt:



$v(r)$  ist Maß für  
eingeschlossene Masse!

etwa 10 mal mehr dunkle als  
leuchtende Materie!



# Anhang: Supernova-Explosion

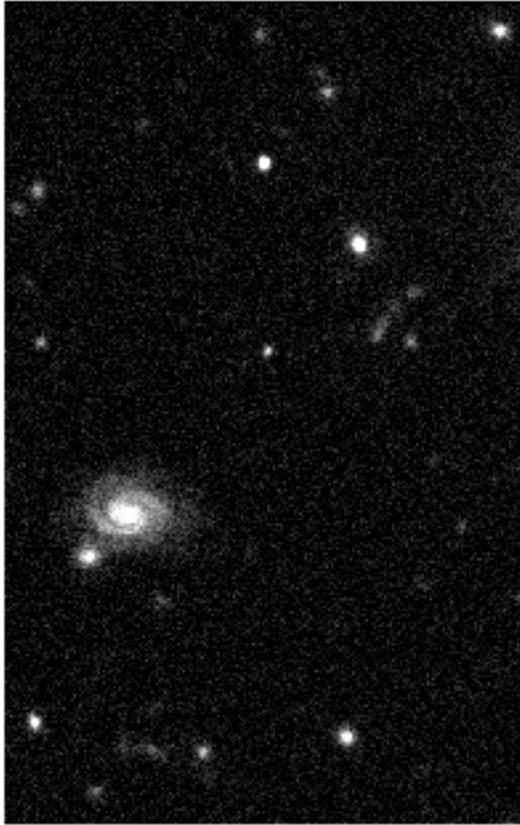


Bild 1

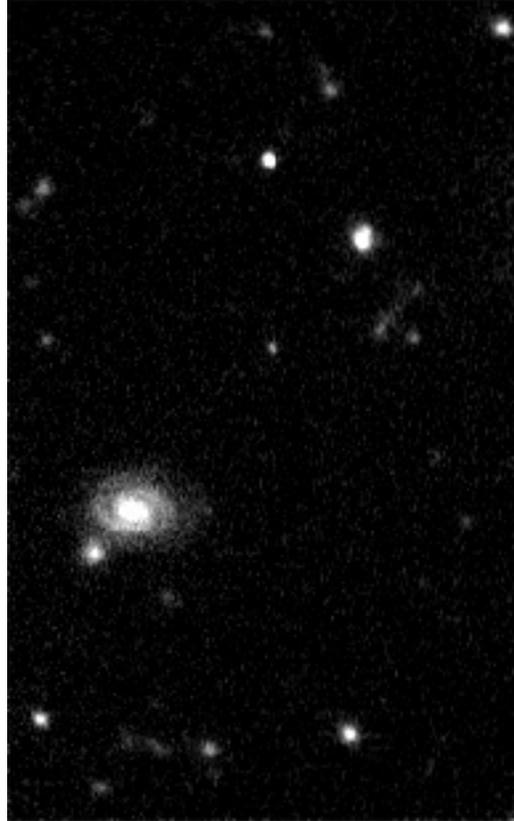


Bild 2

(3 Wochen später)

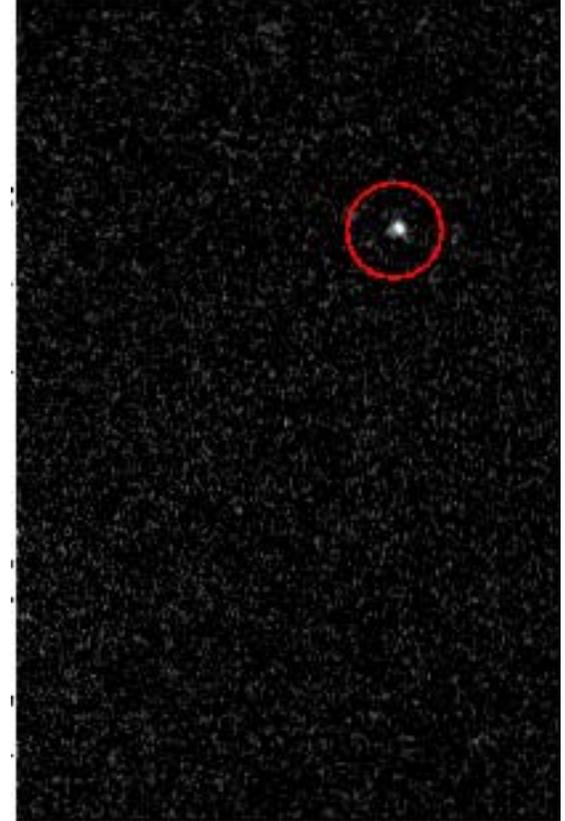
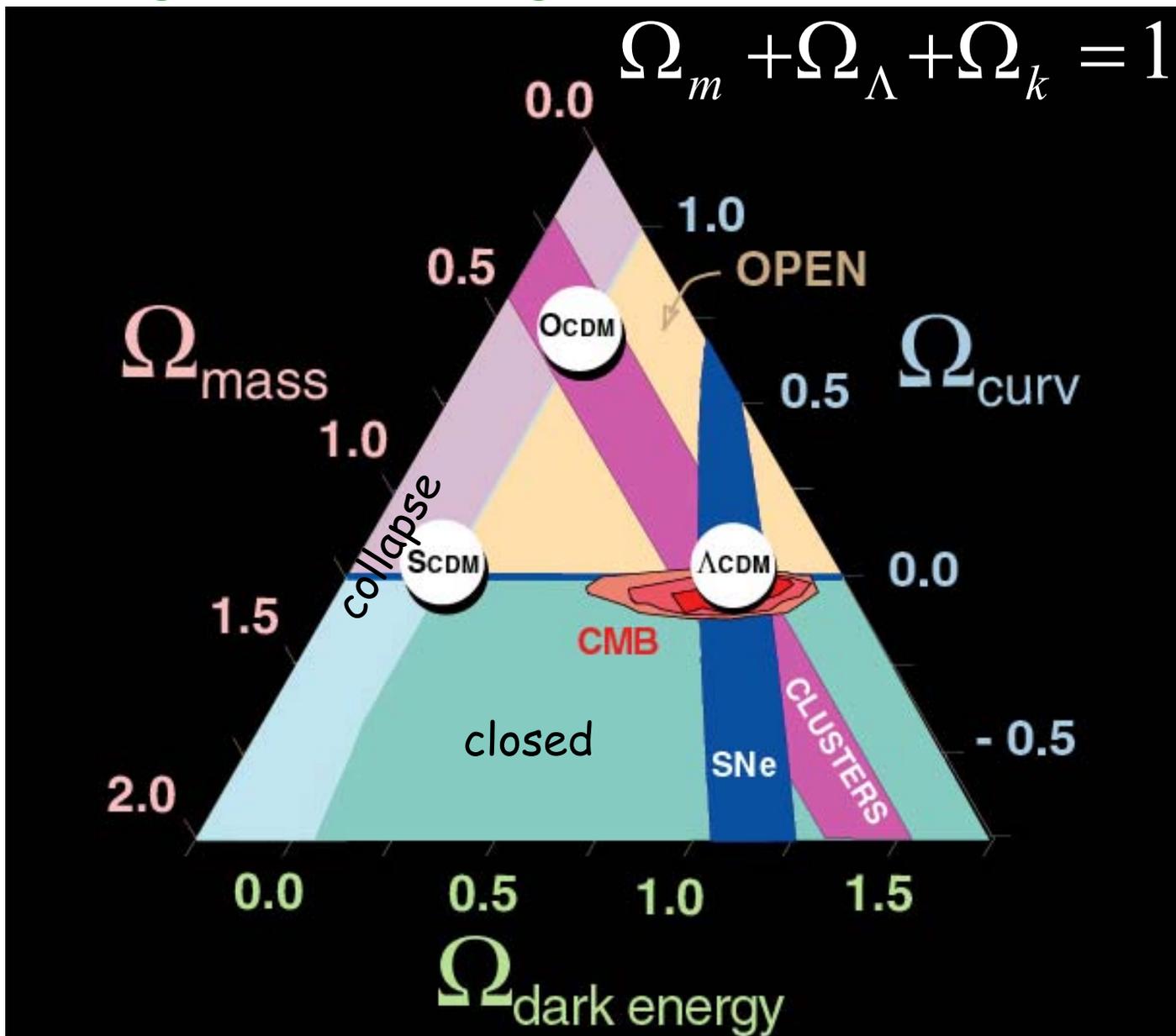


Bild 2 – Bild 1

# Anhang: Kosmologisches Dreieck



# Anhang: Formeln, Zahlen

$$\frac{8\pi G_N \rho_m}{3H^2} + \frac{\Lambda}{3H^2} - \frac{k}{R^2 \cdot H^2} = 1$$

$$\Omega_m + \Omega_\Lambda + \Omega_k = 1$$

$$R(t_0) = R(t_1) \cdot (1 + z)$$

$$t_0 = t_1 \cdot (1 + z)^{3/2}$$

$$H: 1/\text{Zeit} = 1/5E17 \text{ s} \rightarrow L = 1E26 \text{ m}$$

$$k: \text{Laenge}^{**2}/\text{Zeit}^{**2}$$

$$\Lambda: 1/\text{Zeit}^{**2} = 1E-35 / \text{s}^{**2}$$

$$G = 6.7E-39 / \text{GeV}^2$$