

Die Evolution des Universums

Thomas Hebbeker
RWTH Aachen
November 2001

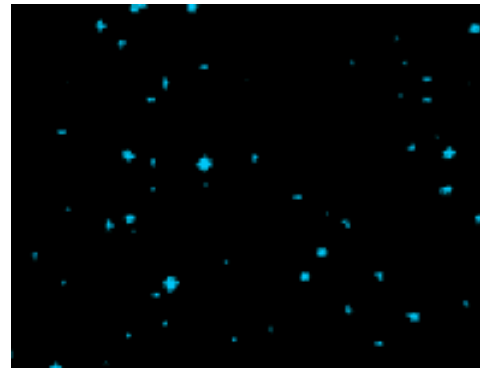
- Grundlegende Beobachtungen
- Das Big-Bang - Modell
- Die Entwicklung des Universums

Blick ins Universum: Sterne und Galaxien

Die Milchstrasse



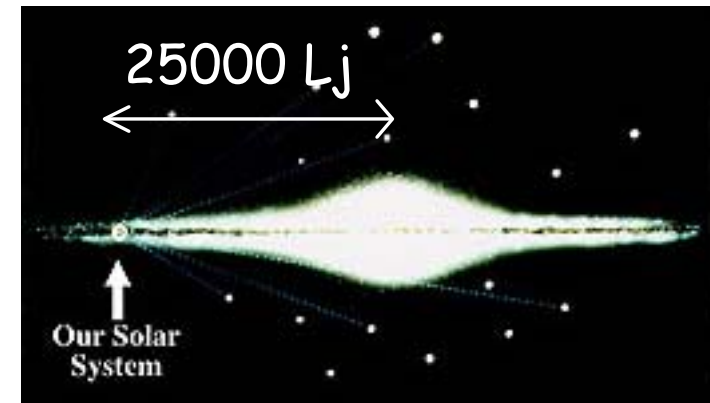
„Unsere“ Galaxie = Milchstrasse



Nachbarstern

„Proxima Centauri“

4 Lichtjahre



Das Sonnensystem in der
Milchstrasse

Blick ins Universum: Sterne und Galaxien

T.Hebbeker

Andere Galaxien



Palomar Observatory, E. Hubble (1949)



Nachbargalaxie

„Andromeda“

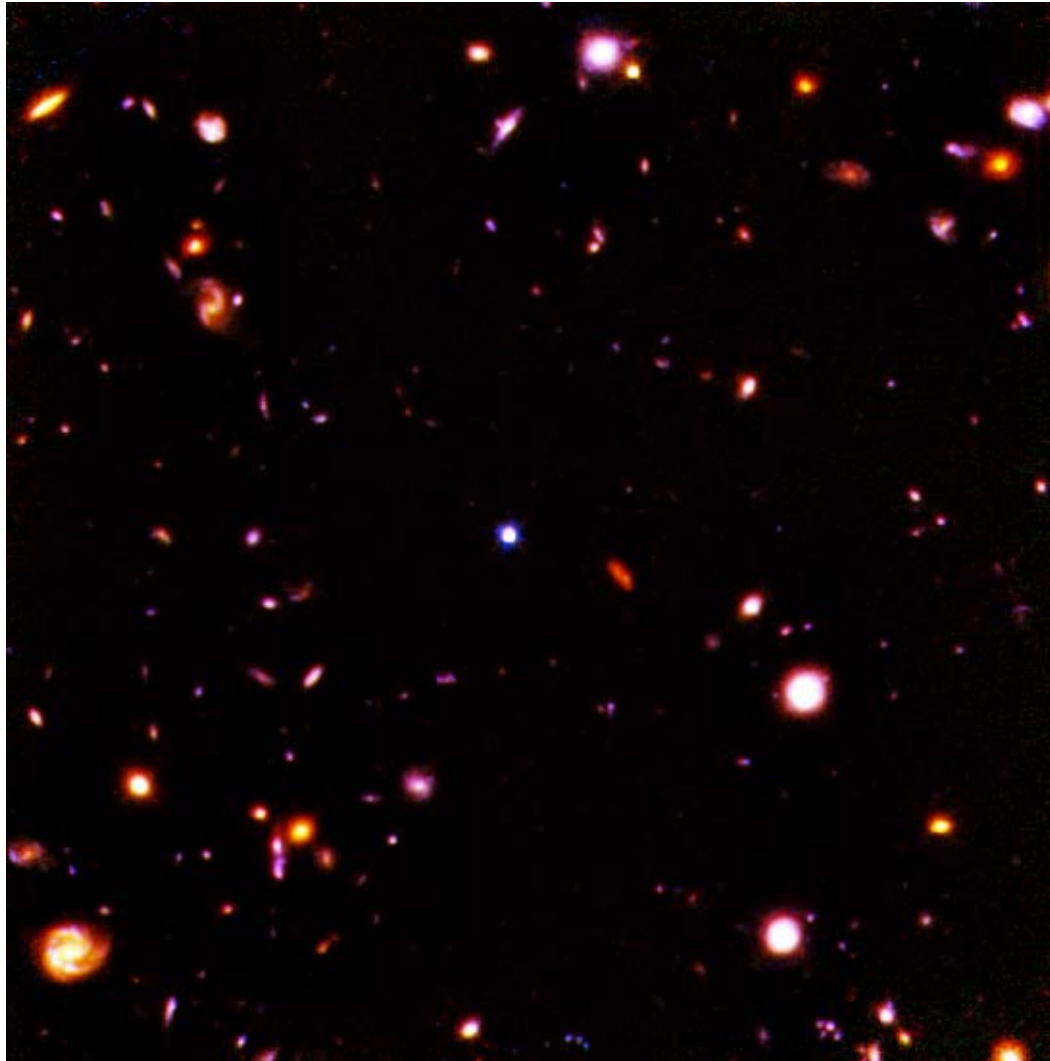
2 Millionen Lichtjahre



„Whirlpool“ (HST)

37 Millionen Lj

Blick ins Universum: Sterne und Galaxien

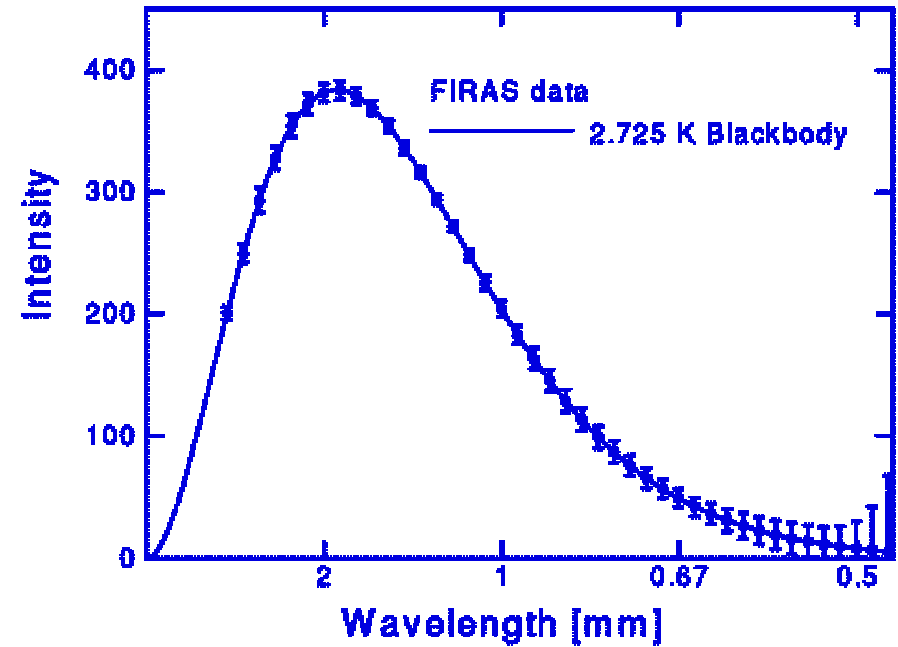
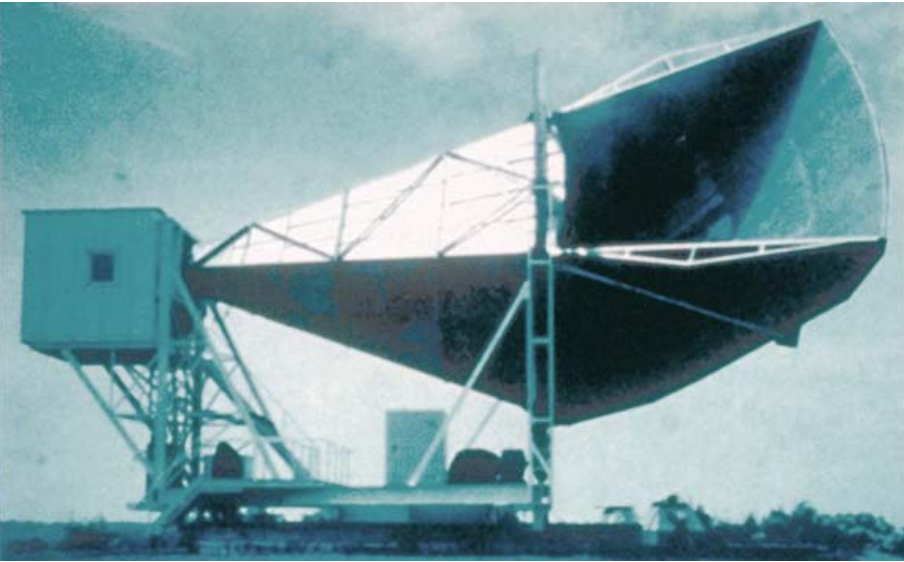


HST „deep field“

bis zu 10 Milliarden Lichtjahre

Blick in die Vergangenheit!

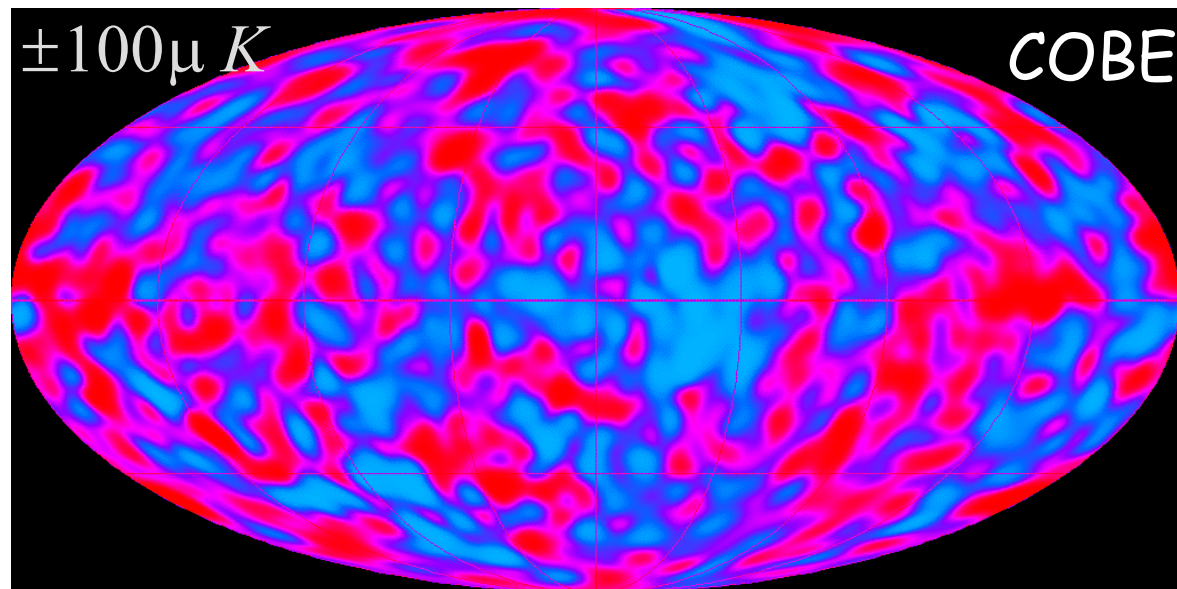
Die kosmische Hintergrundstrahlung



Mikrowellenstrahlung
aus allen Richtungen

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

Kleine Temperatur-
unterschiede

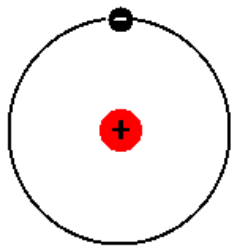


Die Chemie des Universums

Vor der Sternbildung:

75 %

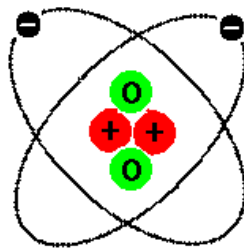
Wasserstoff



^1H

25 %

Helium



^4He

proton:

electron:

neutron:

Am Ende des Sternenlebens:

Periodic Table of Elements

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg									13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar		
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	*La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	+Ac	104 Rf	105 Ha	106	107	108	109	110								

* Lanthanide Series

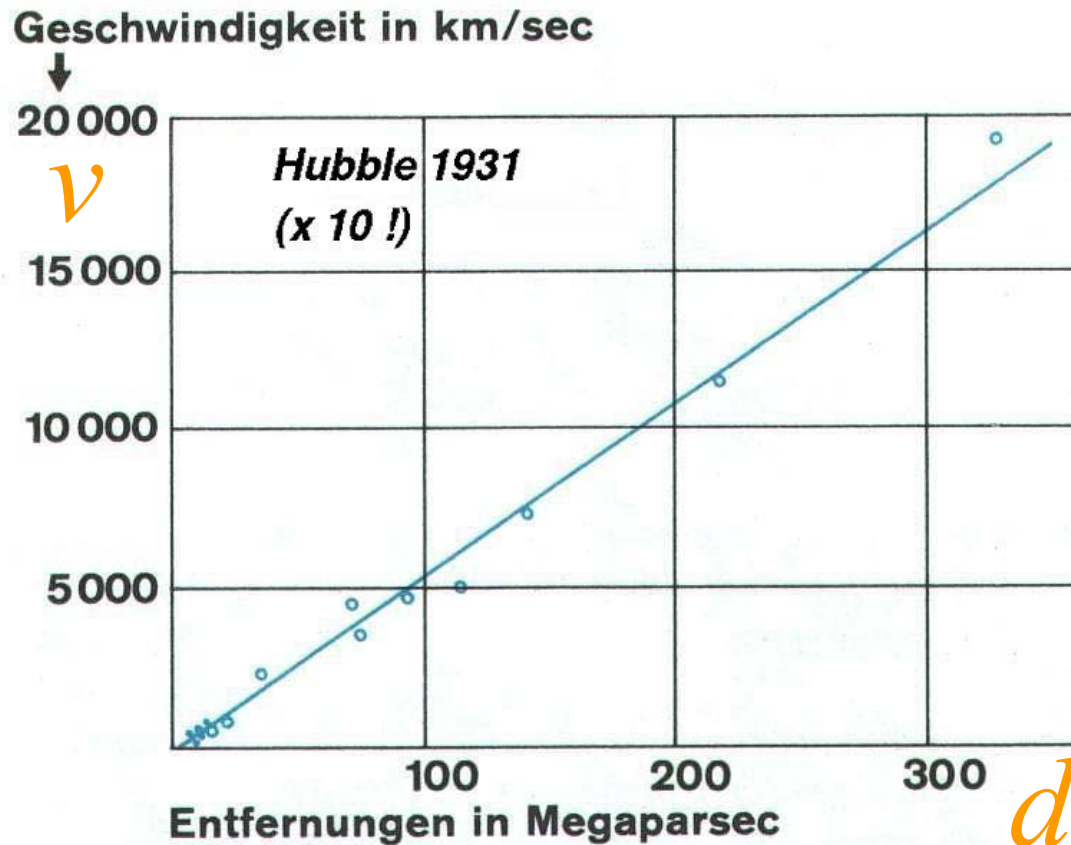
+ Actinide Series

58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

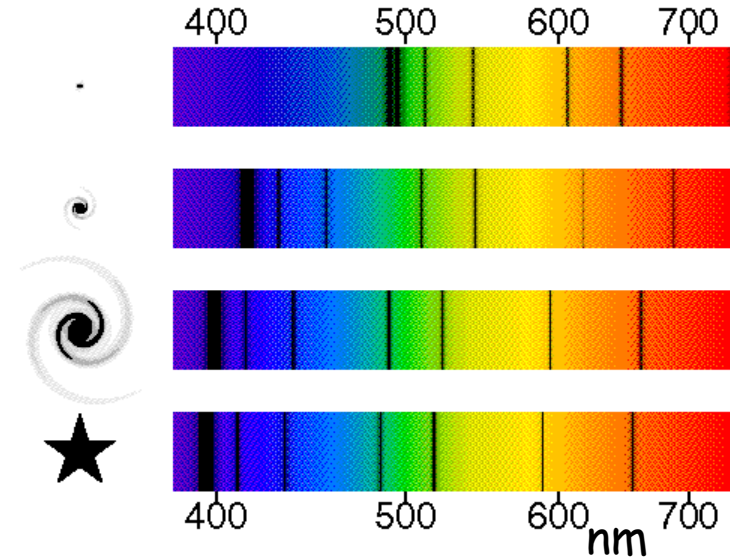
**Wir bestehen aus
Sternenasche !**

Rotverschiebung der Galaxien

Hubble 1929: Universum expandiert



$$v = H \cdot d$$



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

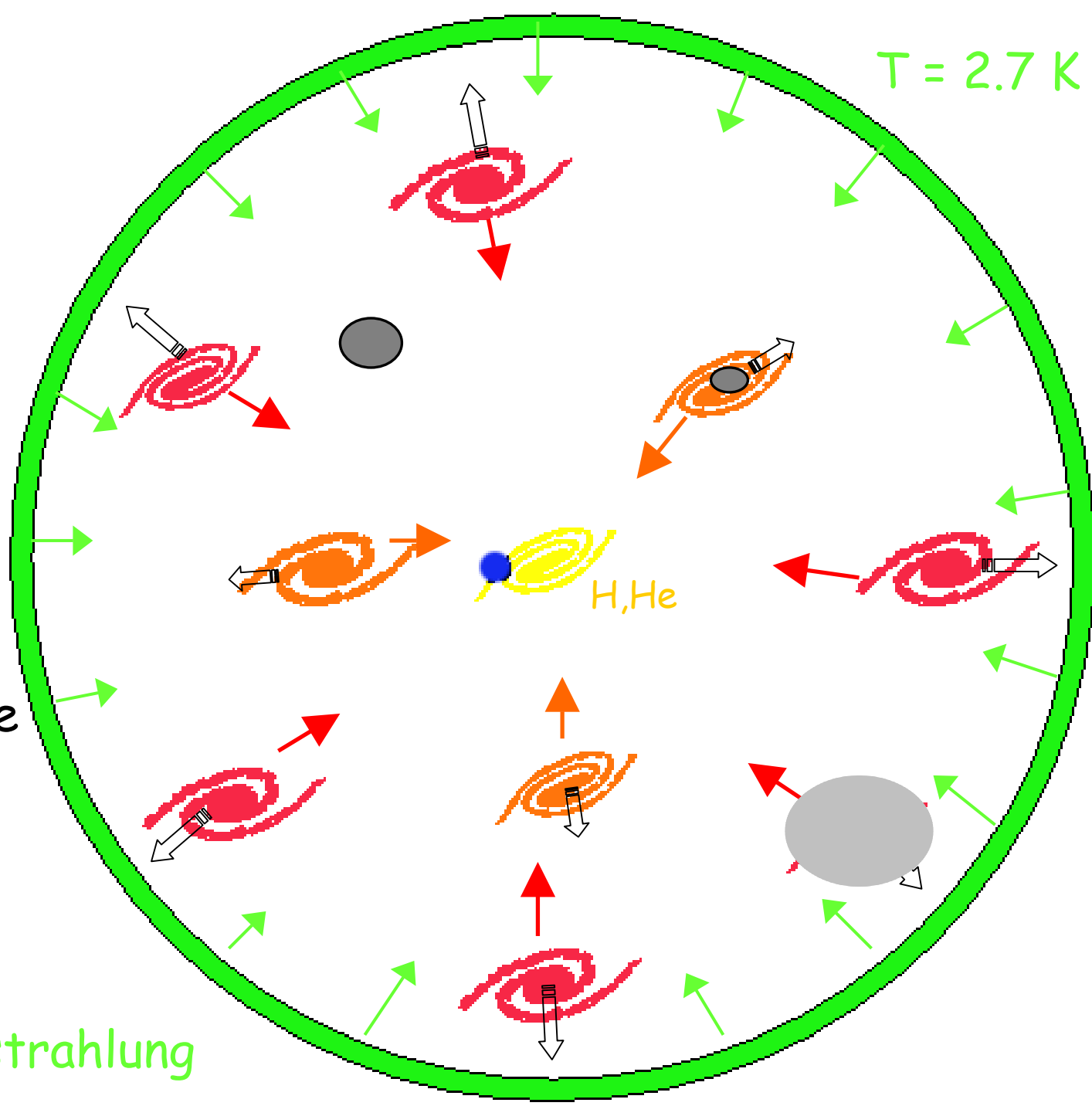
Das heutige Universum

Materie:

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

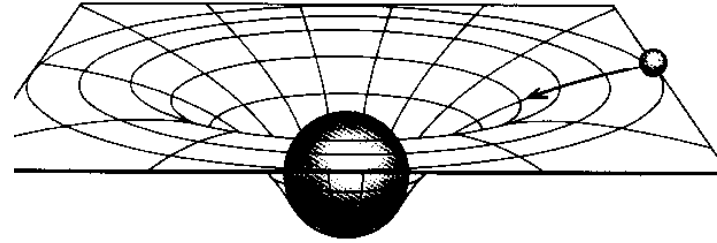
Strahlung:

- Sternenlicht
- Hintergrundstrahlung

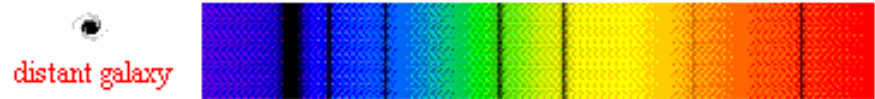


Das Big-Bang - Modell

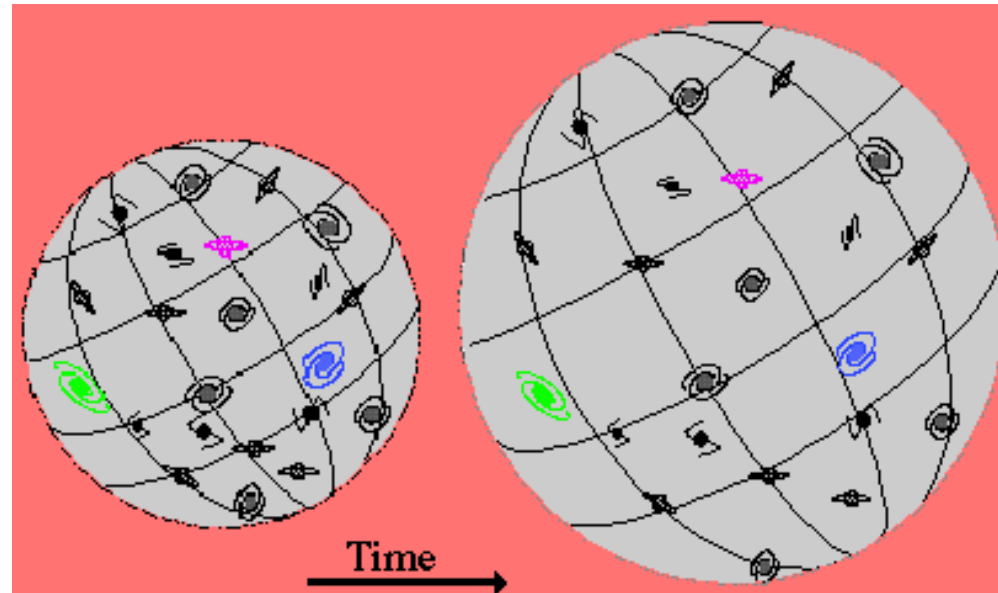
Einsteins
allgemeine
Relativitätstheorie



Astrophysikalische
Beobachtungen



Der Raum expandiert
Anfang: „Big Bang“

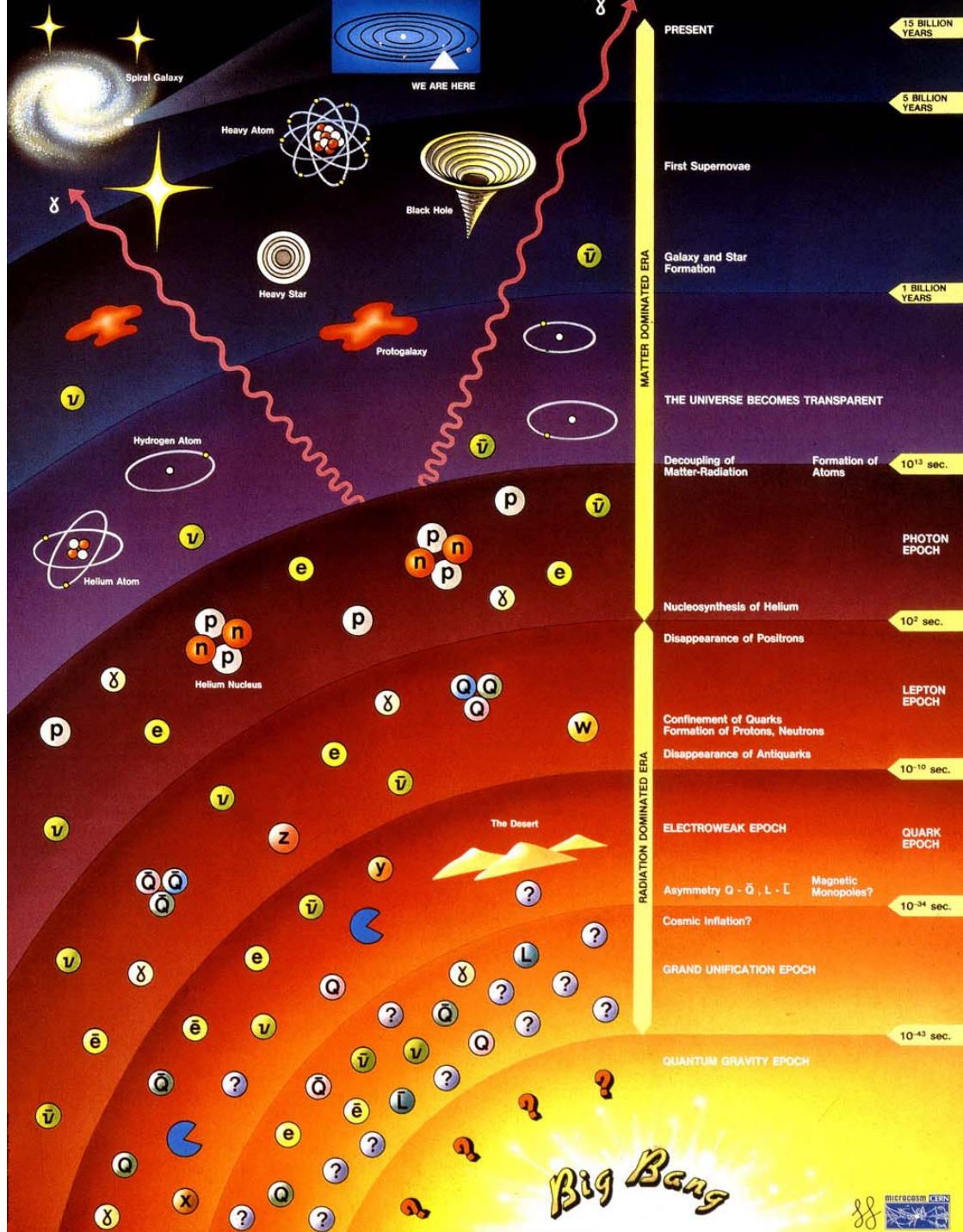


➡ Hintergrundstrahlung

➡ Rotverschiebung

➡ Chemie

Prozesse im frühen Universum



10^{10} a heute

300 000 a Atome

3 min Kerne

10^{-10} s

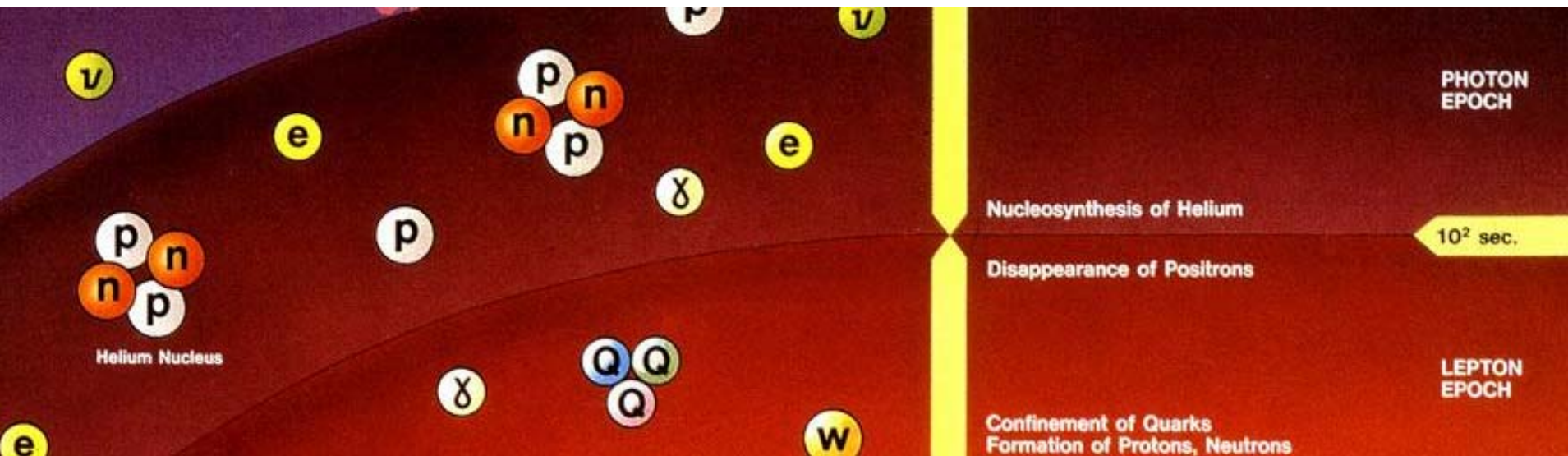
Ladungssumme = 0

Nukleosynthese

$t = 3 \text{ min}$

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

$E = 0.1 \text{ MeV}$



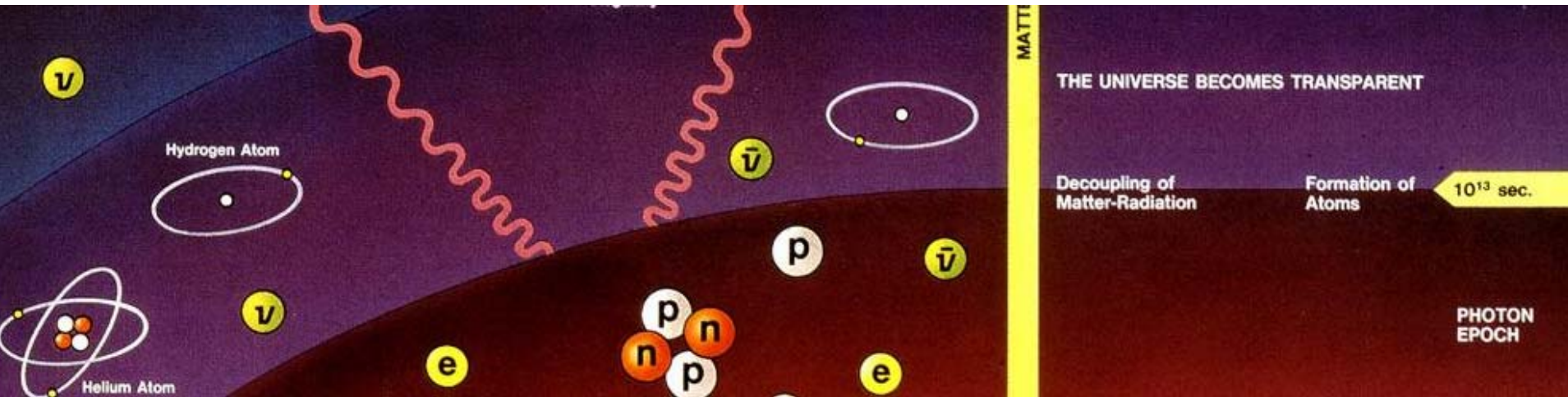
$2n + 2p \rightarrow \text{He-Kern} \quad (\text{stabil})$

$p = \text{H-Kern} \quad (\text{übriggebliebene Protonen})$

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

Bildung von Atomen

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



Weltall ohne freie Ladung!

Licht kann sich ungehindert ausbreiten!

Universum wird durchsichtig!

Evolution des Universums (a la Einstein)

Expansionsgeschwindigkeit gegeben durch:

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

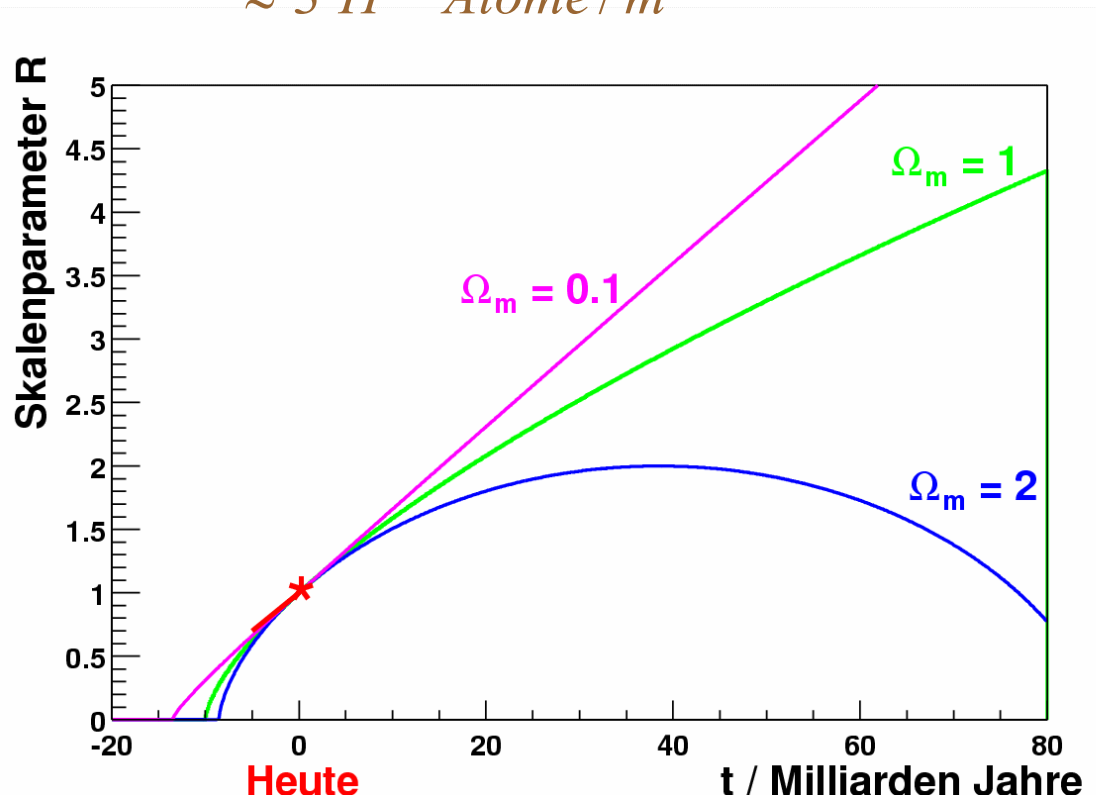
$$\Omega_m = \frac{\rho}{\rho_{krit}} = \frac{\text{mittlere Massendichte}}{\text{kritische Massendichte}} \approx 3 H - \text{Atome} / m^3$$

nicht genau bekannt

Hubble-Konstante

Skalenparameter R:

Abstand zwischen zwei
entfernten Galaxien

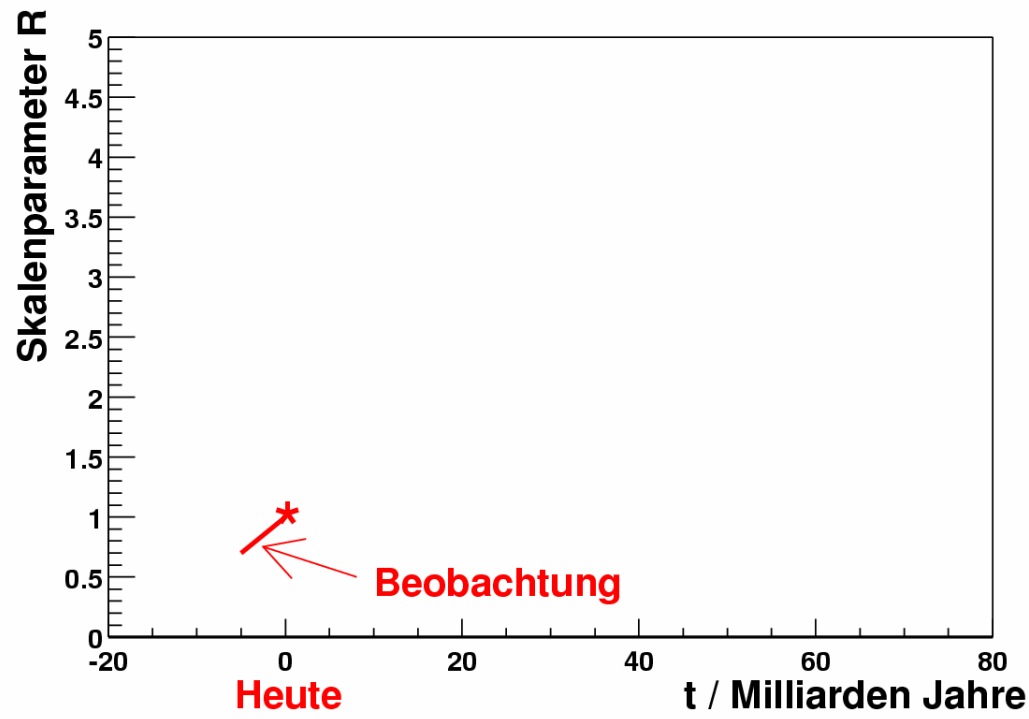
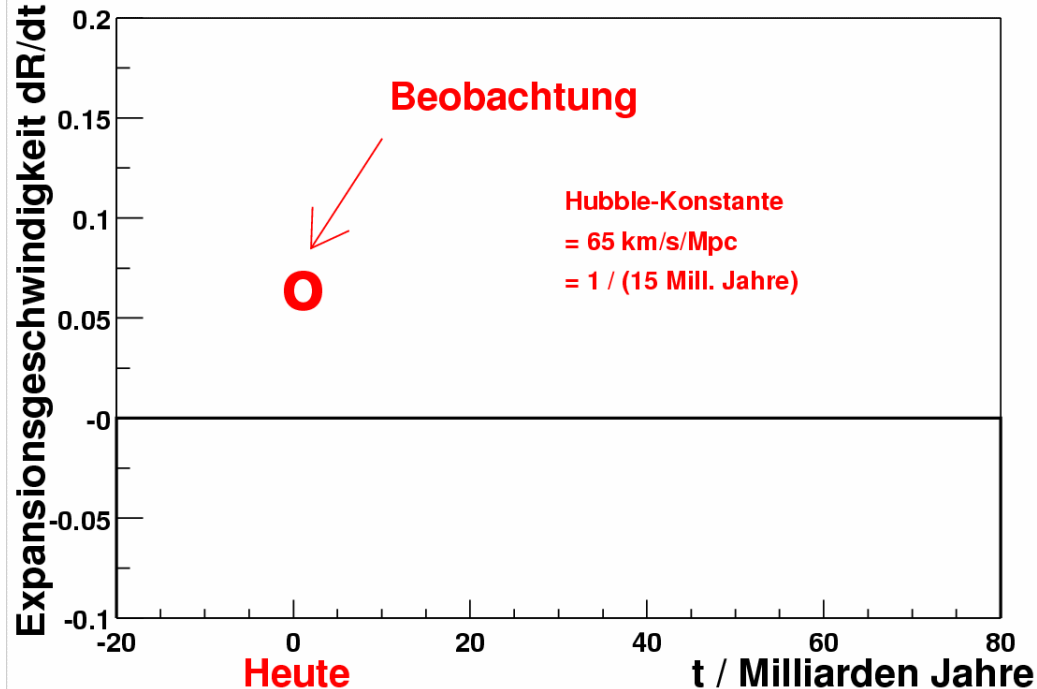


Evolution - Beobachtungen

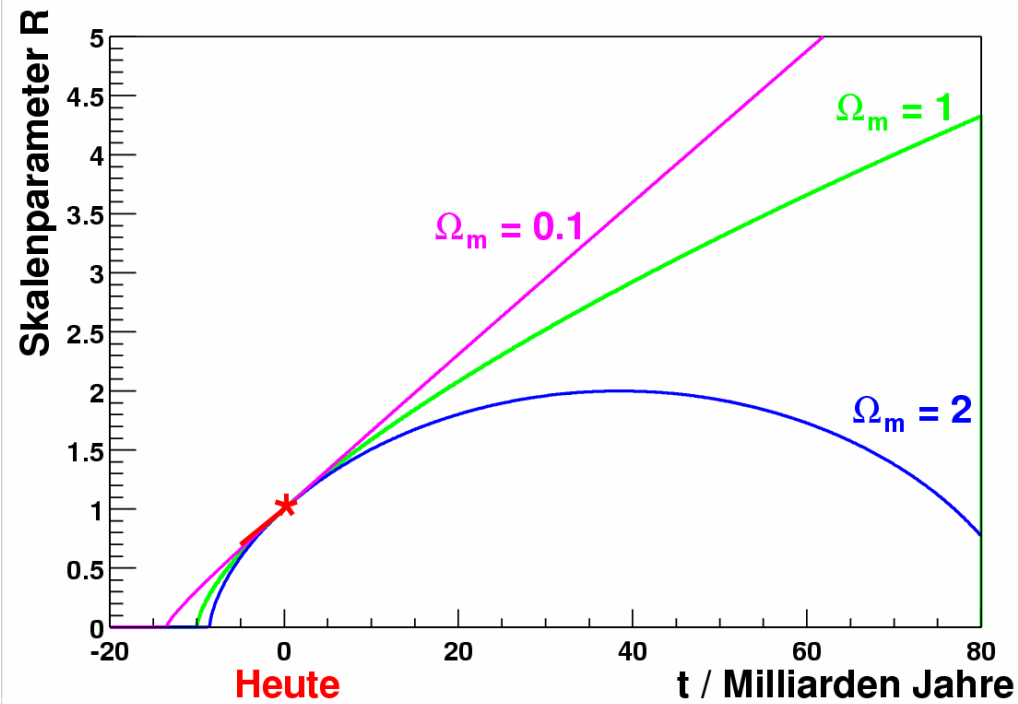
Messung der Expansions-GESCHWINDIGKEIT

Einheit: 1 / Milliarden Jahre

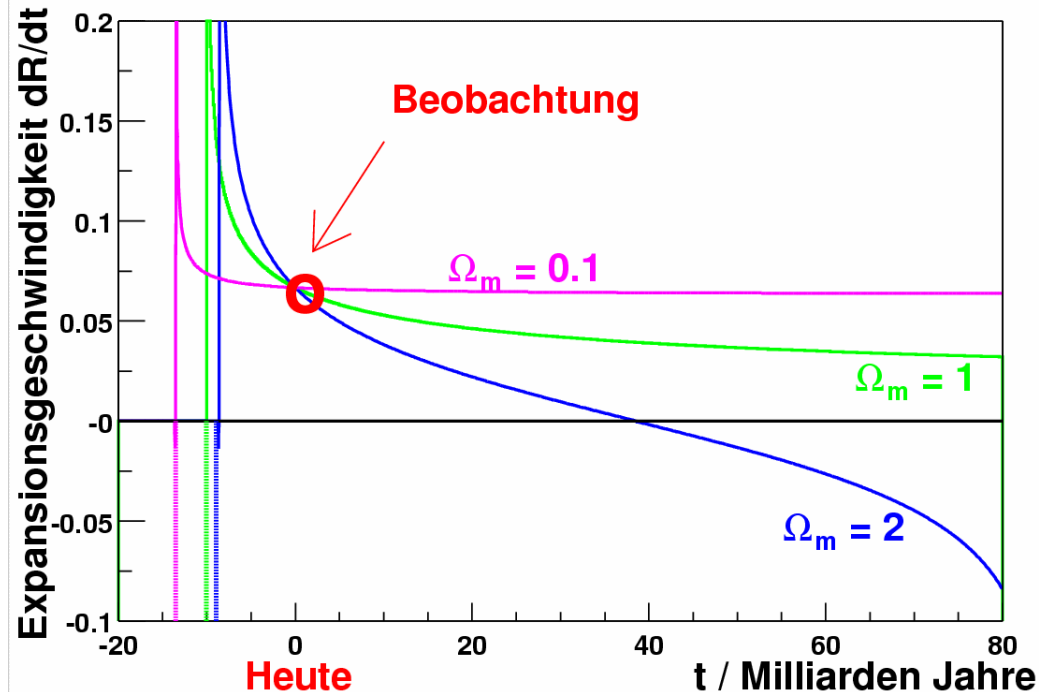
Einheit: dimensionslos



Vergleich mit Big-Bang-Modellrechnungen

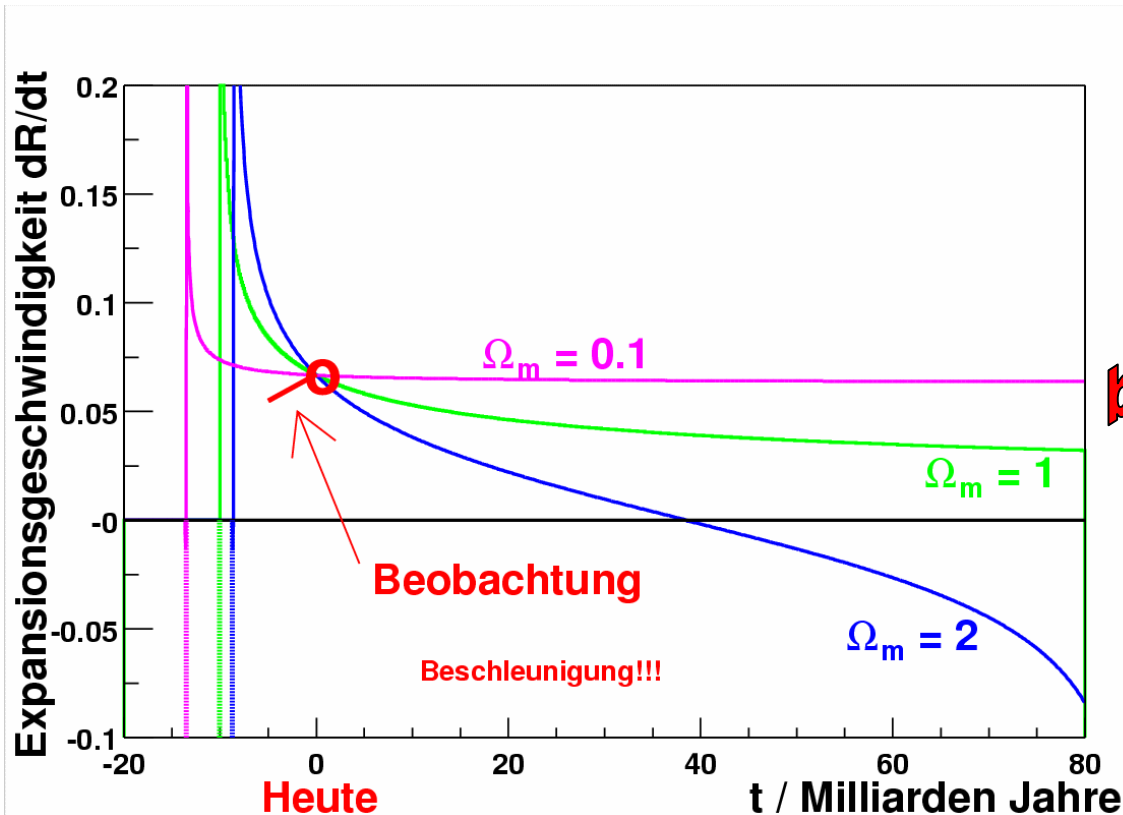


„passt“



Messung der Expansions-BESCHLEUNIGUNG

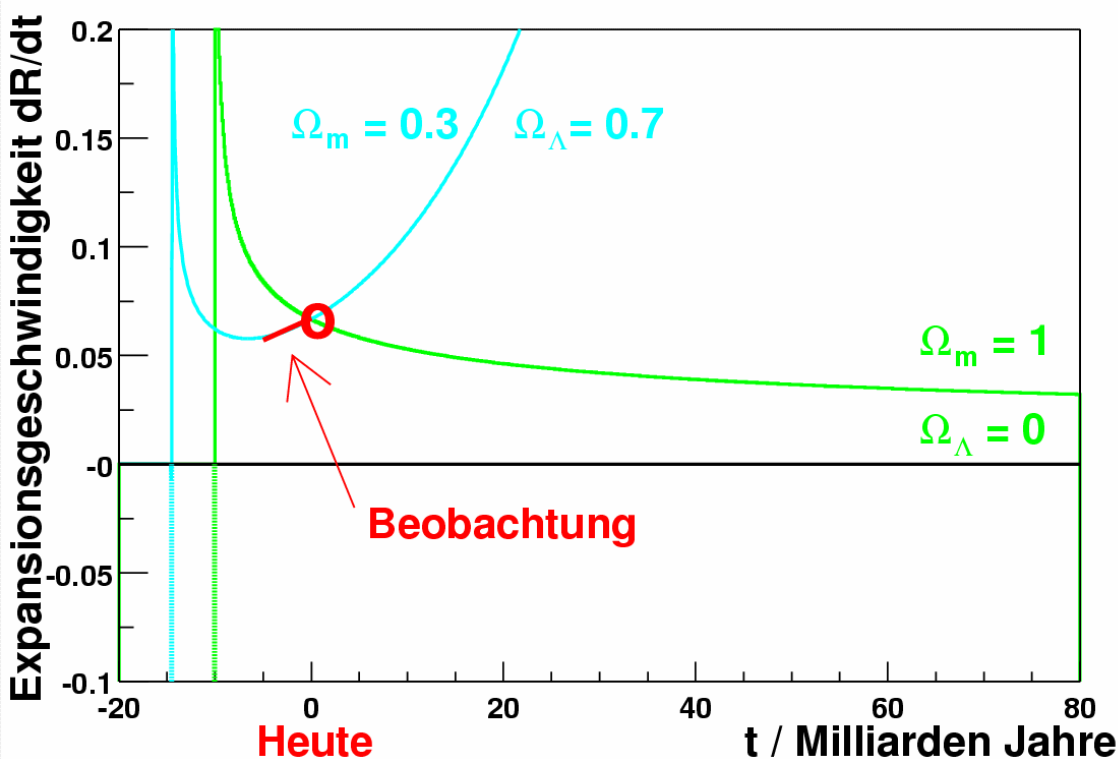
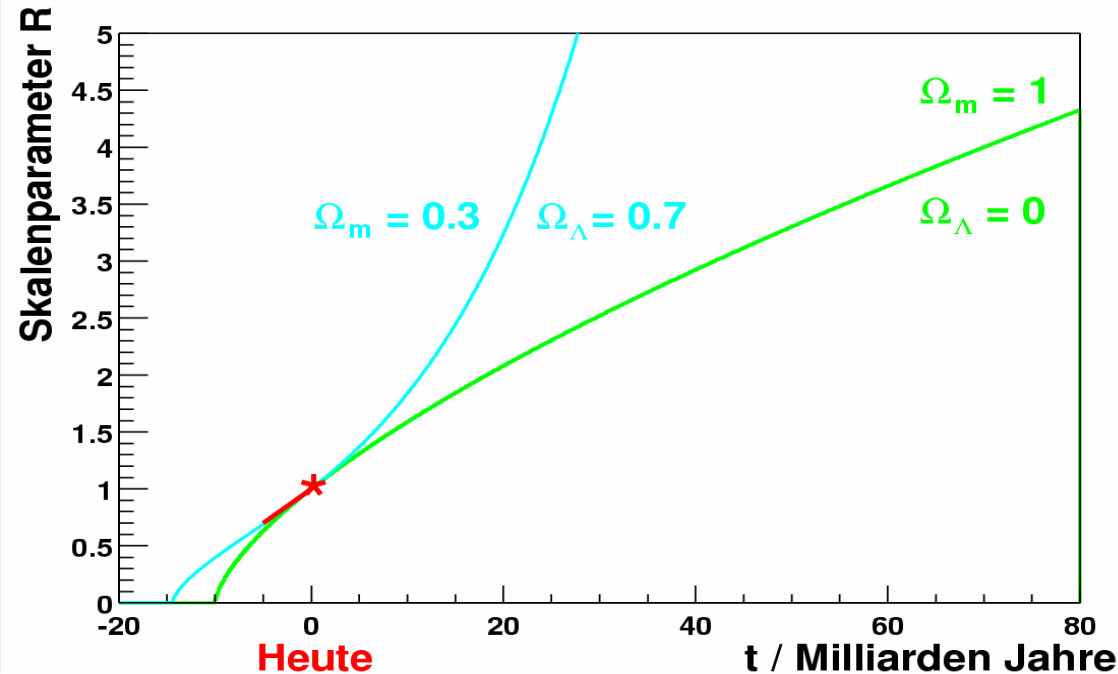
Neu !



**beschleunigte
Expansion**

Modifizierte Gravitationstheorie

Erweitertes Modell: Einsteins
„kosmologische Konstante“



Λ

„dunkle
Energie“

wirkt
abstossend!

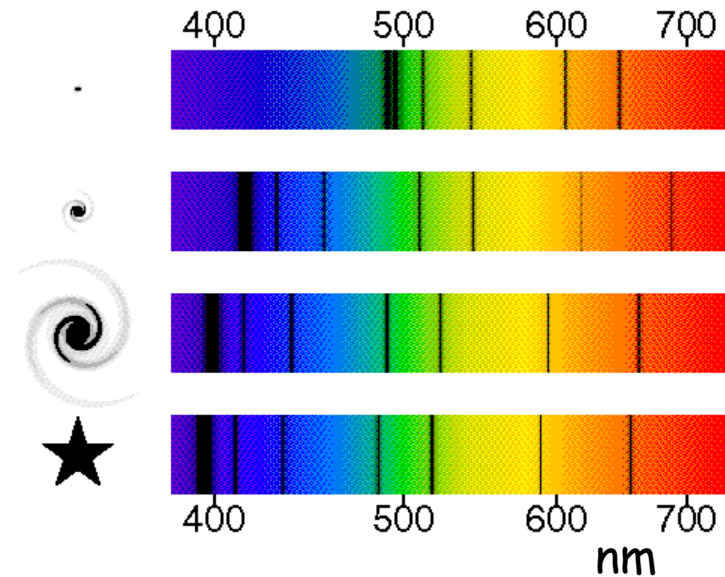
**beschleunigte
Expansion**

Wie misst man das ?

Benötigt: R , und dR/dt und $dR/dt(t)$?

Relativ einfach:

- dR/dt aus Rotverschiebung der Wellenlängen



Schwierig:

- absolute Entfernung R
aus scheinbarer Helligkeit ($\sim 1/R^2$) von
„Standardkerzen“ = Supernovae vom Typ Ia

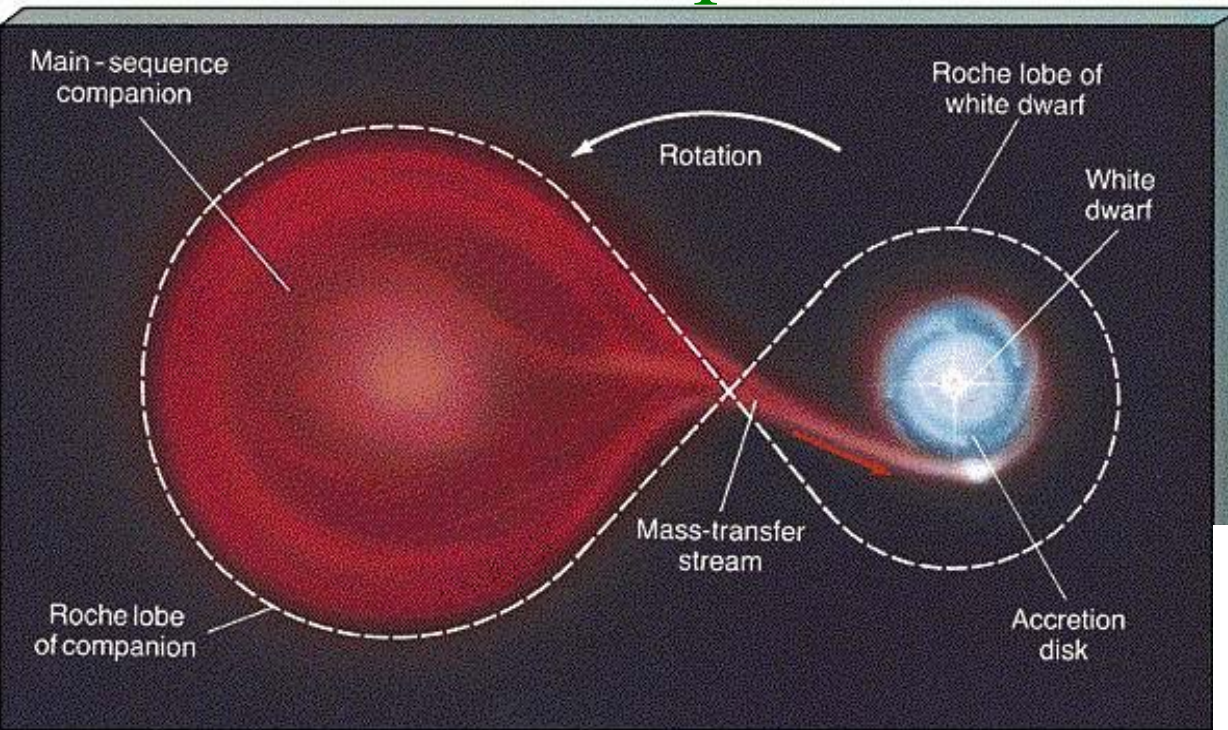


Zeitabhängigkeit:

New!

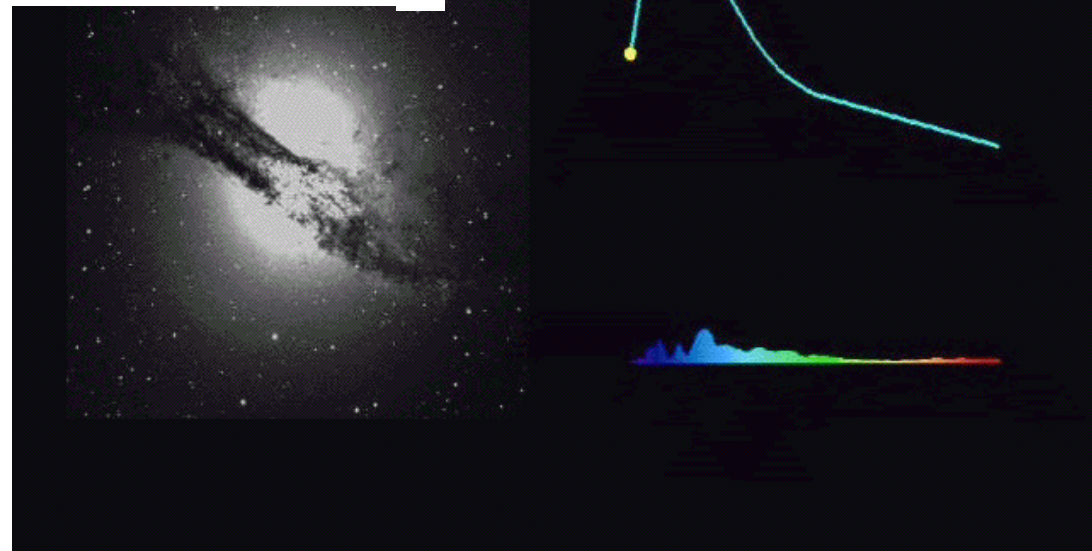
- weit entfernte Galaxien/Supernova = alt !

Supernovae Ia



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

Helligkeit:
gleich
groß



Zusammenfassung

„goldenes Zeitalter der Kosmologie“

Faszinierende neue Beobachtungen zur Evolution des Universums:

Die Expansionsgeschwindigkeit scheint zuzunehmen!

Können sie durch andere Messungen bestätigt werden ?

Wie kann man sie interpretieren ?

Kosmologische Konstante ?

Anhang: Bücher

- H.V. Klapdor-Kleingrothaus und K. Zuber:
Teilchenastrophysik, Teubner, 1997
- C. Grupen:
Astroteilchenphysik, Vieweg, 2000
- A. Unsöld, B. Bachel:
Der neue Kosmos, Springer 1999
- M. Rowan-Robinson:
Cosmology, Clarendon Press, 1996
- S. Weinberg:
The first three minutes, Basic Books, 1993

Anhang: Galaxie

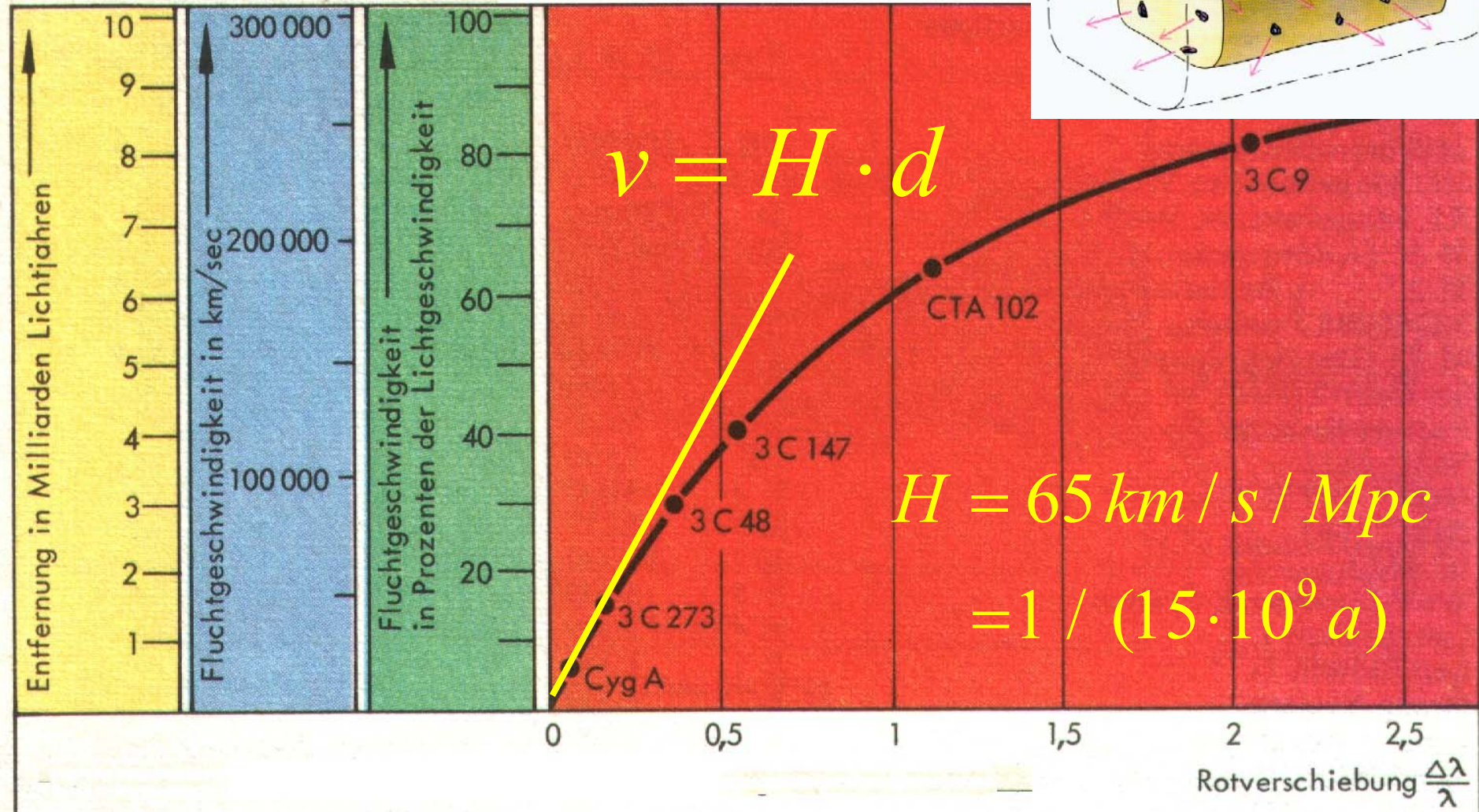
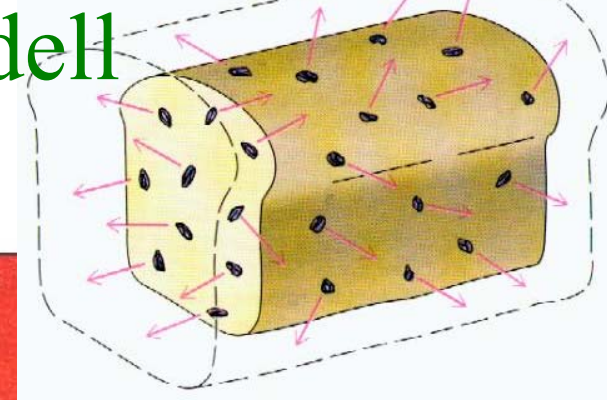
Galaxie NGC 1232

VLT Chile,

100 Millionen Lichtjahre

Anhang: Big-Bang - Modell

Hubble 1929: Universum expandiert



Hoyle 1950: „Big Bang“

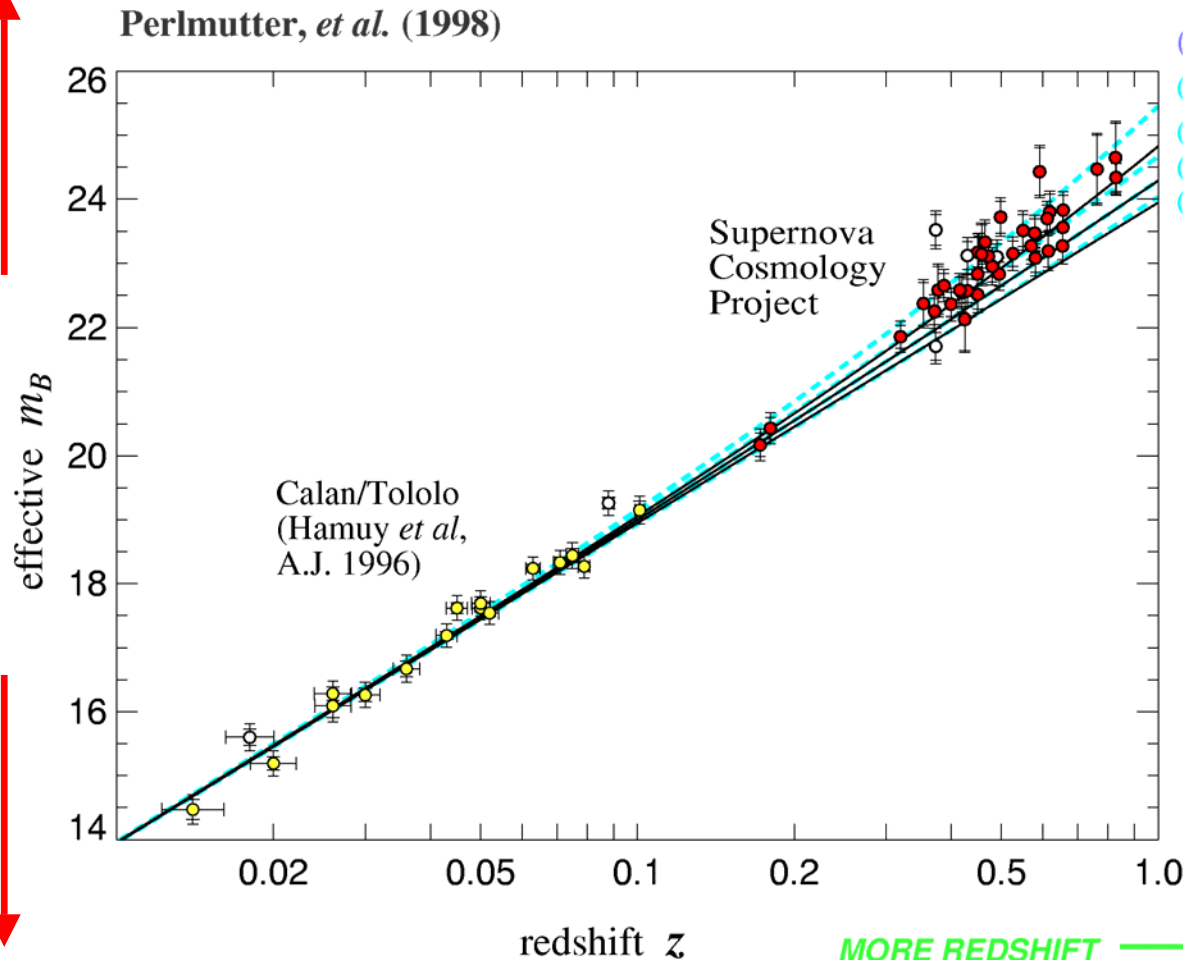
Anhang: Messung der Expansion

Supernovae Typ Ia

= „Standardkerze“

Entfernung ~ Alter

FAINTER
(Farther)
(Further back in time)



$(\Omega_M, \Omega_\Lambda) =$

$(0, 1)$

$(0.5, 0.5)$ $(0, 0)$

$(1, 0)$ $(1, 0)$

$(1.5, -0.5)$ $(2, 0)$

Flat

$\Lambda = 0$

$$d = v \cdot t$$

$$\log d = \log v + \log t$$

Fluchtgeschwindigkeit

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

Helligkeit

Anhang: Supernova-Explosion

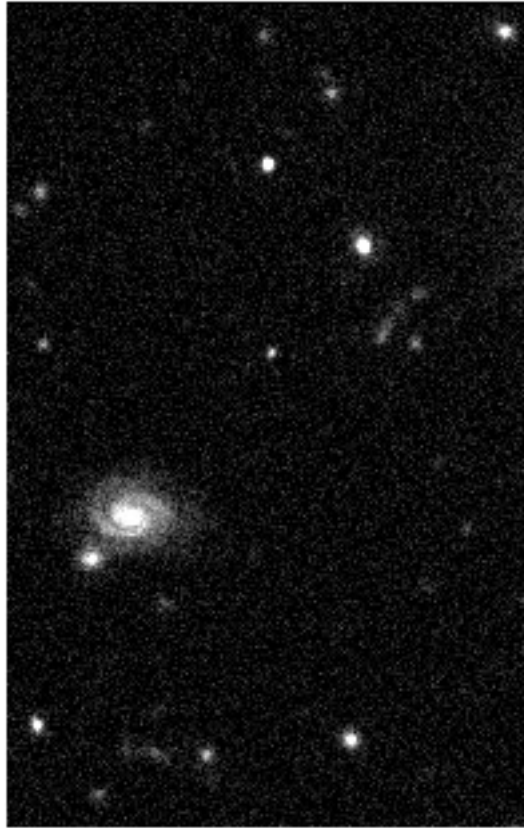


Bild 1

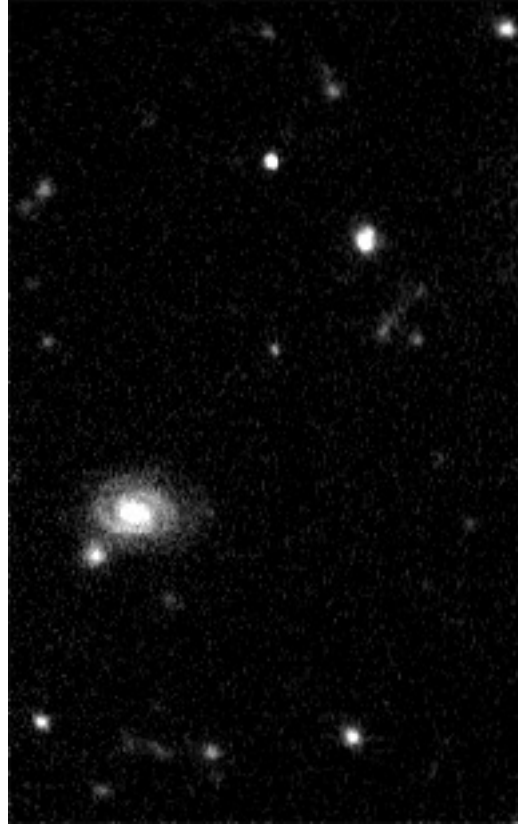


Bild 2

(3 Wochen später)

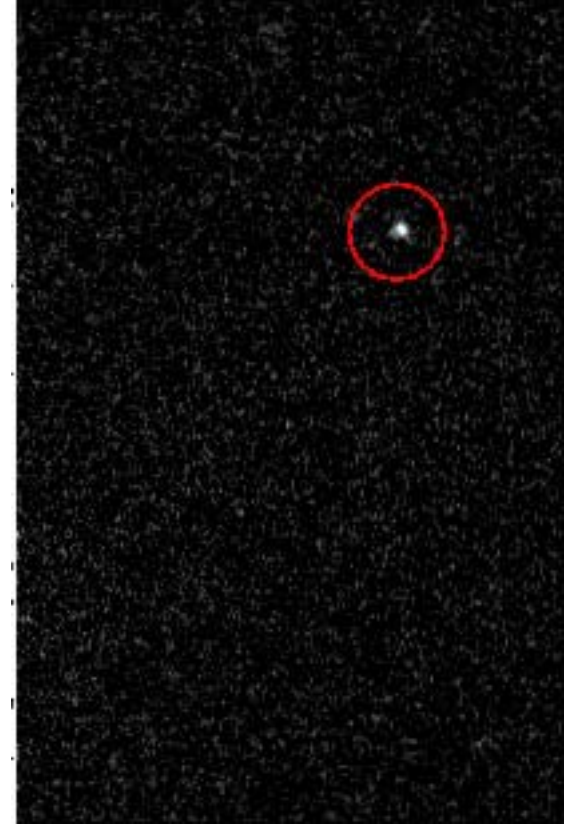


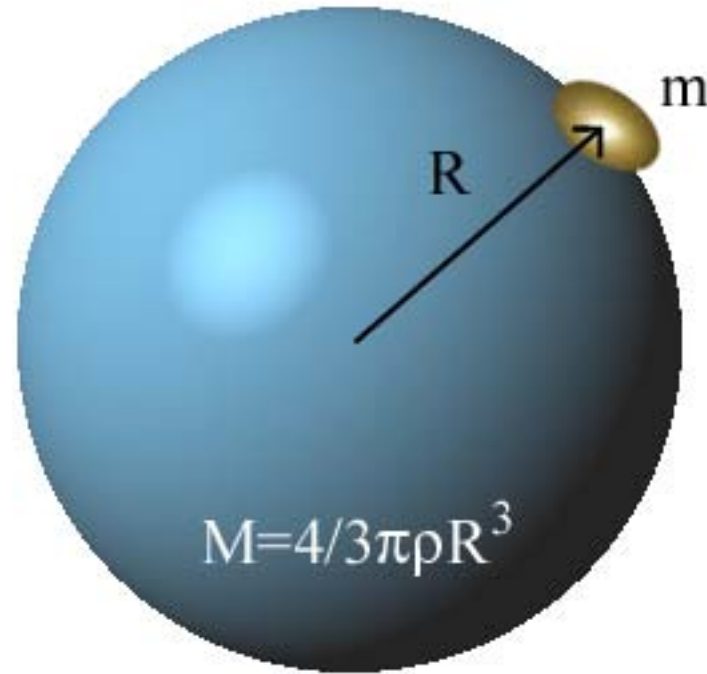
Bild 2 – Bild 1

Anhang: Berechnung der Evolution

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 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!