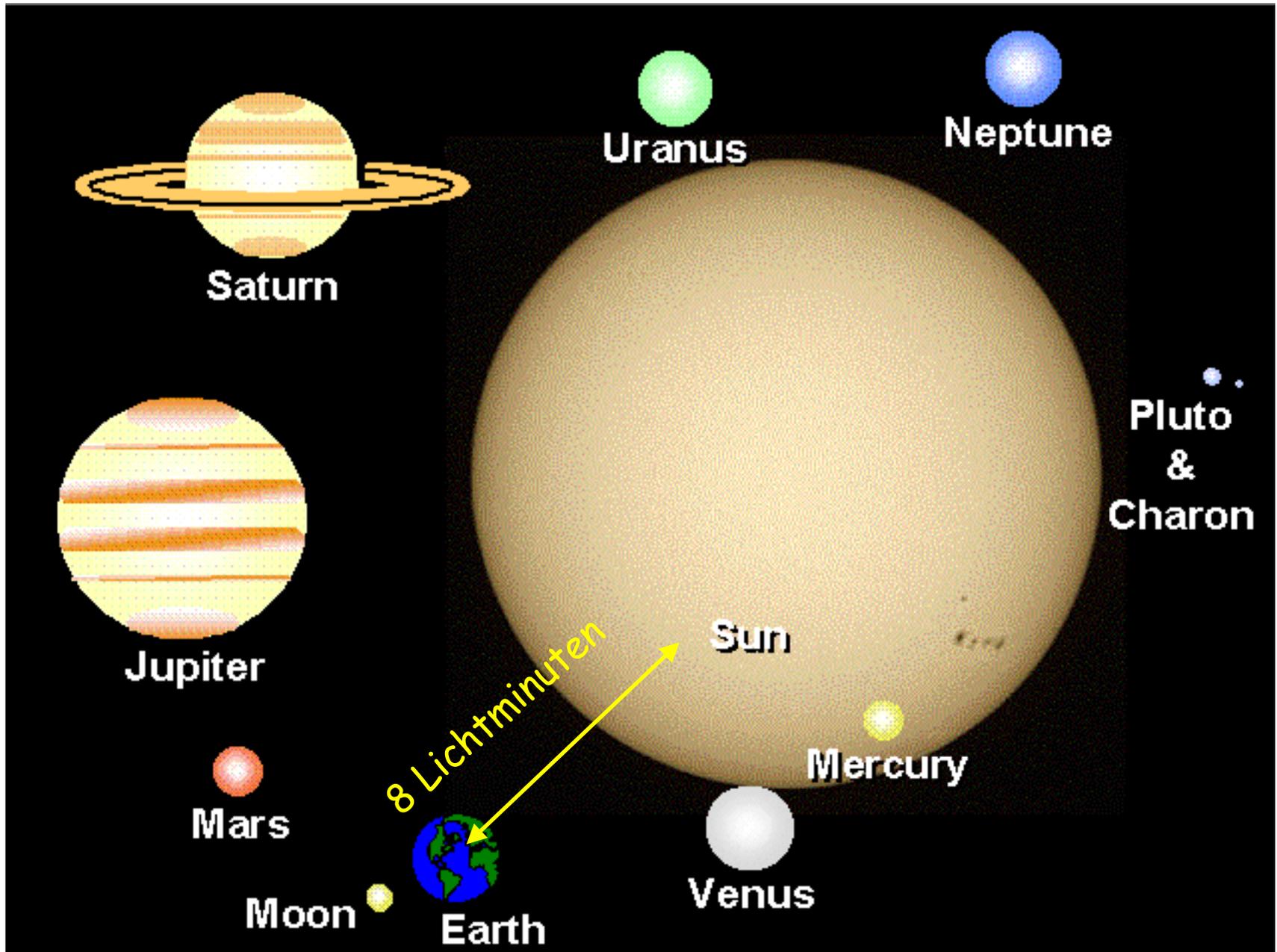


Urknall und Entwicklung des Universums

Thomas Hebbeker
RWTH Aachen University
Dies Academicus
11.06.2008

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

Blick ins Universum: Unser Sonnensystem

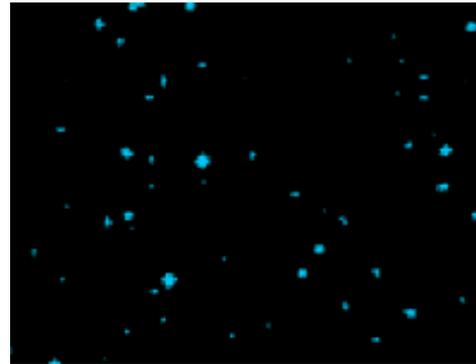


Blick ins Universum: Sterne und Galaxien

Die Milchstrasse



„Unsere“ Galaxie = Milchstrasse



Nachbarstern

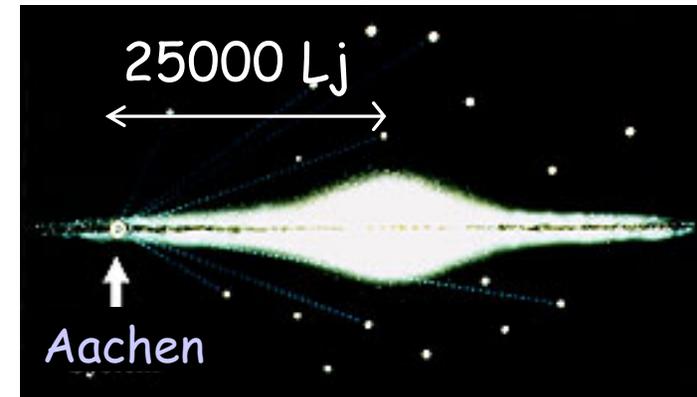
„Proxima Centauri“

4 Lichtjahre

1 Lichtjahr

=70000 mal

Abstand Erde-
Sonne



Das Sonnensystem in der
Milchstrasse

Blick ins Universum: Sterne und Galaxien



Andromeda-
Galaxie

Blick ins Universum: Sterne und Galaxien

T.Hebbeker

Andere Galaxien



Palomar Observatory, E. Hubble (1949)



Nachbargalaxie

„Andromeda“

3 Millionen Lichtjahre

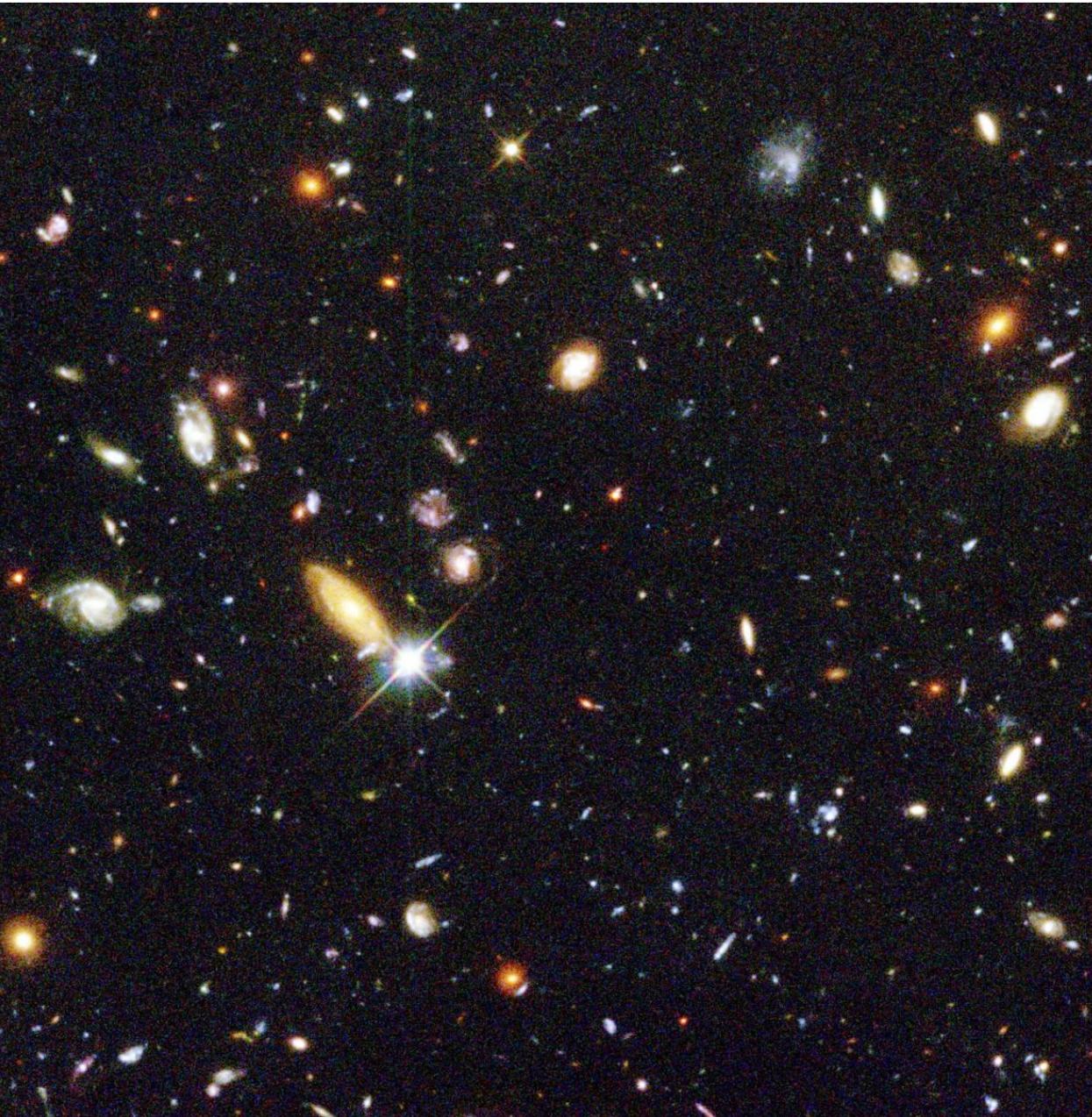


„Whirlpool“ (Hubble Teleskop)

37 Millionen Lj

Blick ins Universum: Sterne und Galaxien

T.Hebbeker



Entfernte Galaxien

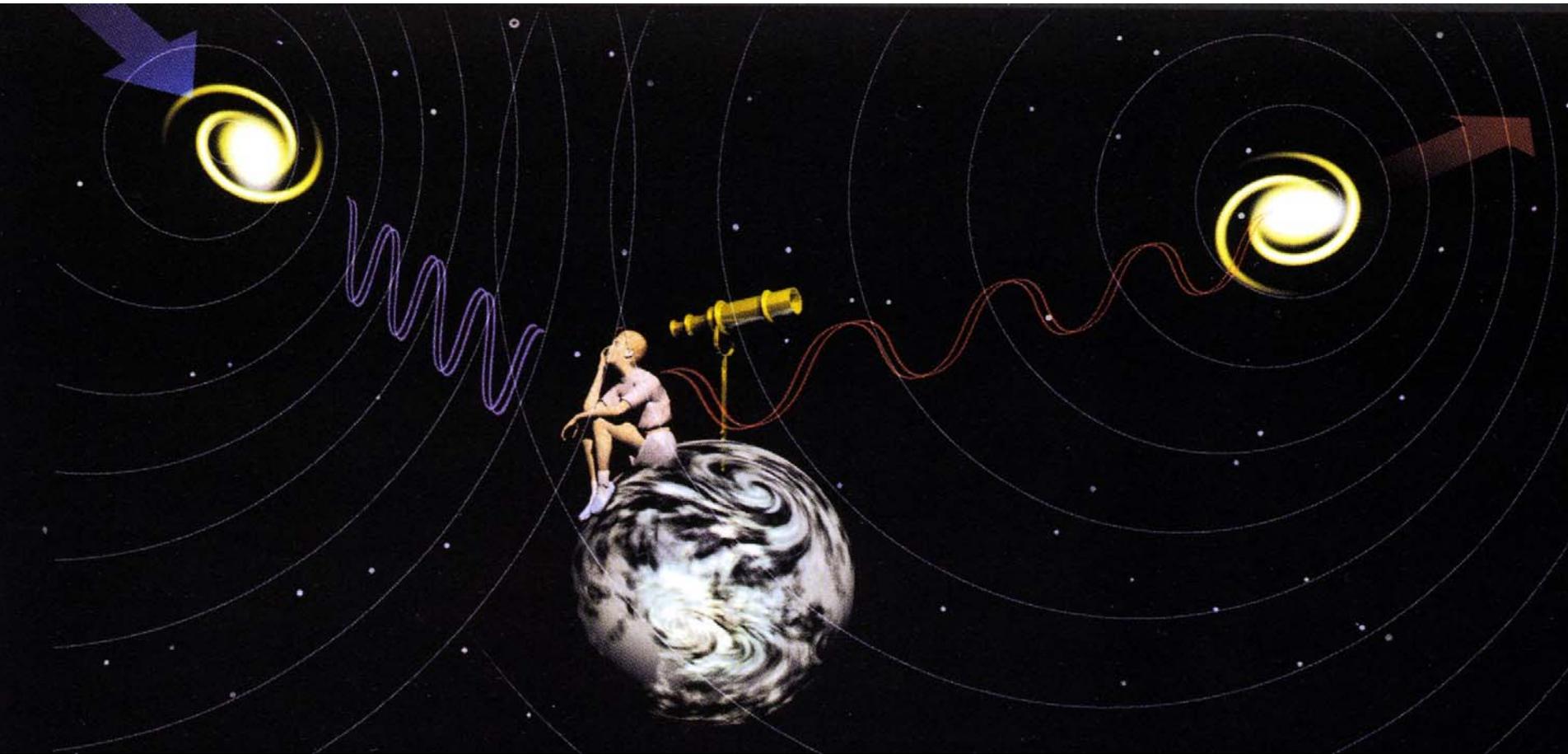


Hubble-Teleskop

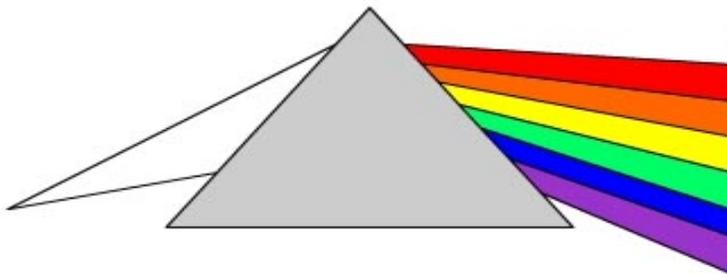
bis zu einigen
Milliarden Lichtjahren

Blick in die
Vergangenheit!

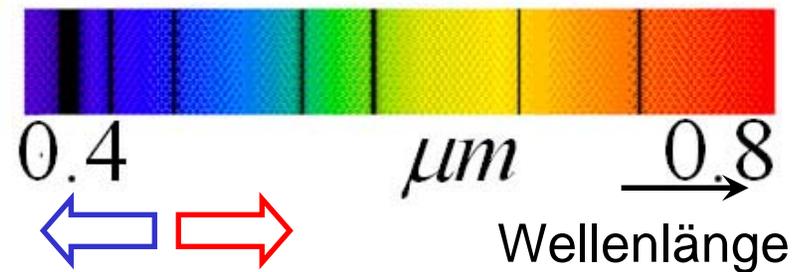
Doppler-Effekt (Licht)



Sonnenlicht:



Atomare Spektrallinien:

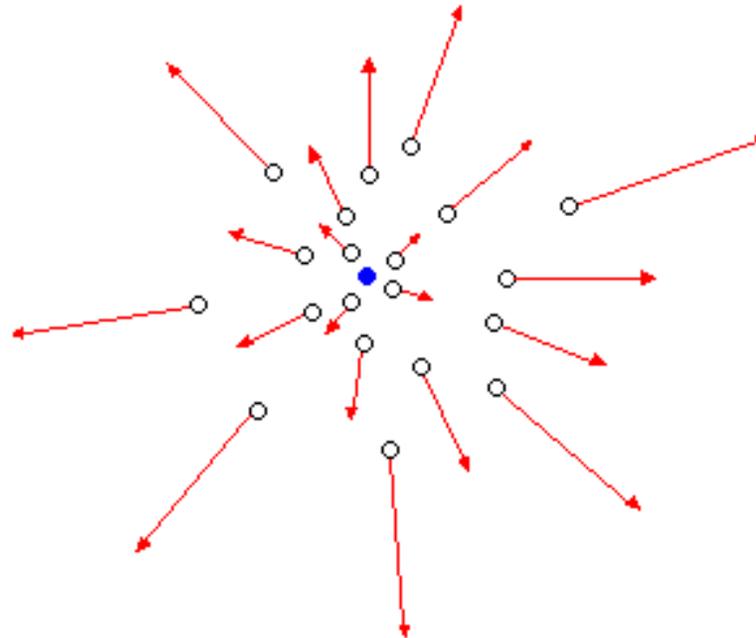
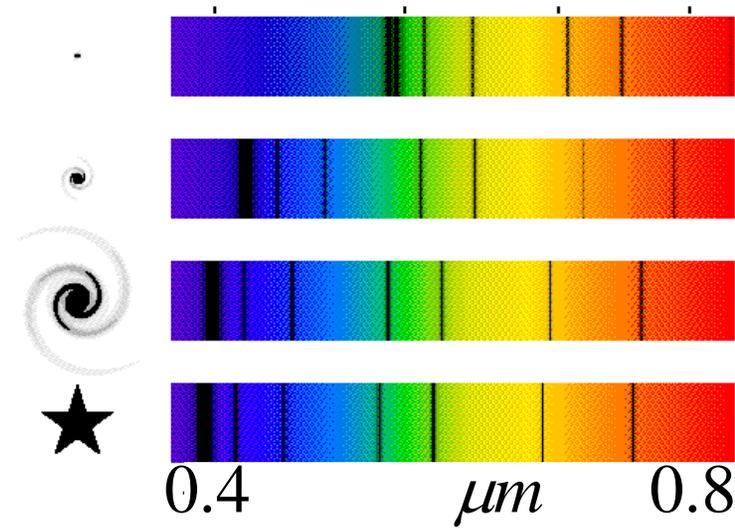
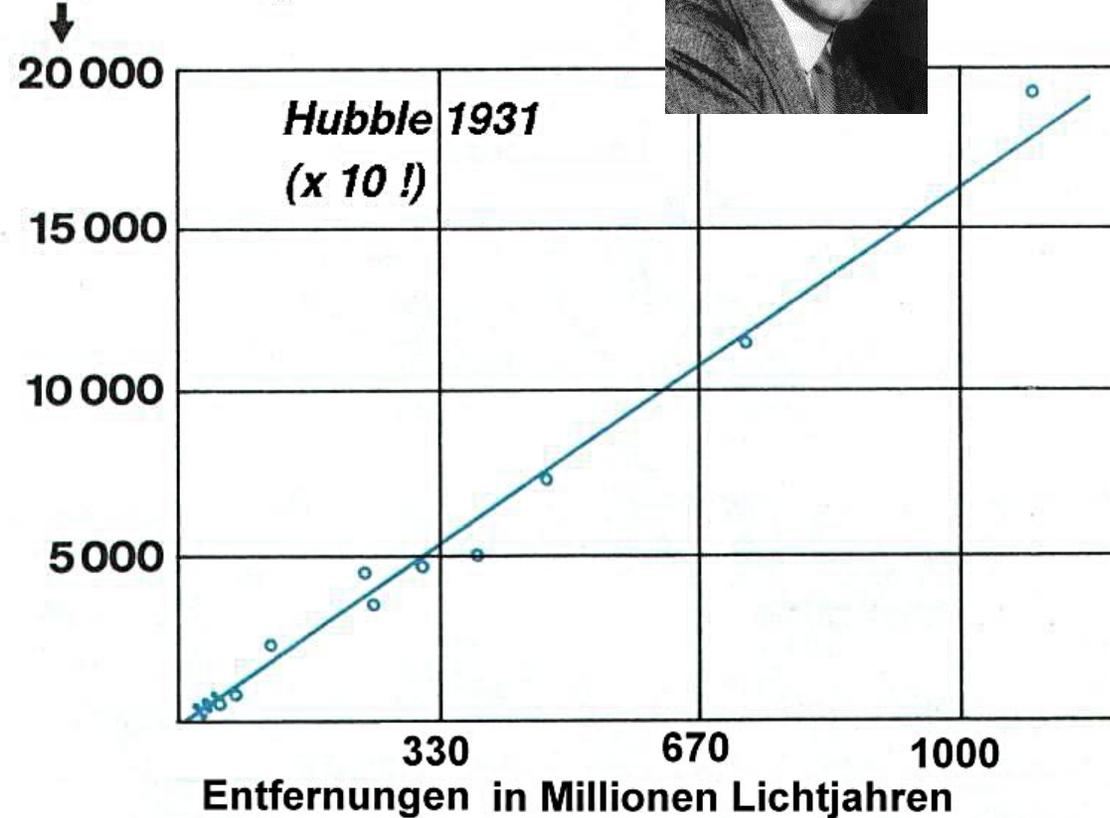


Rotverschiebung der Spektrallinien

E. Hubble

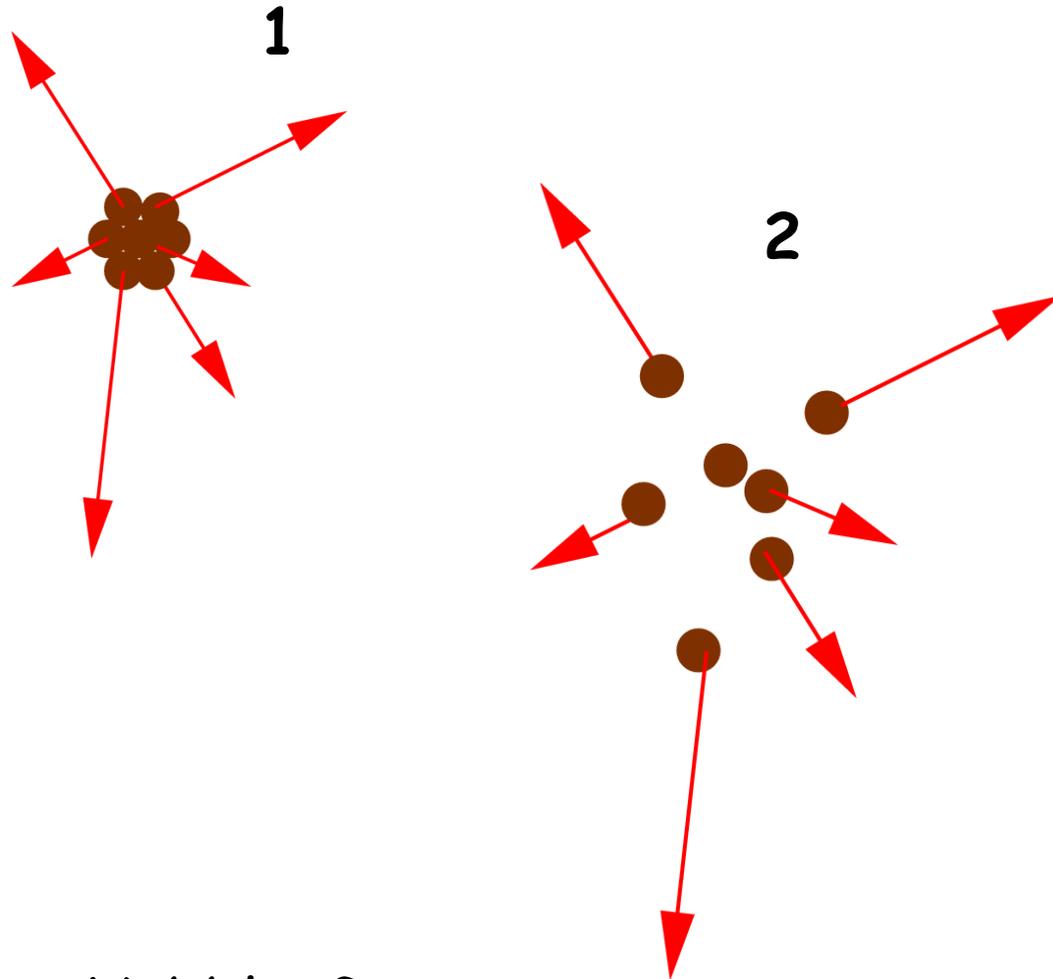


Geschwindigkeit in km/sec



Universum expandiert !

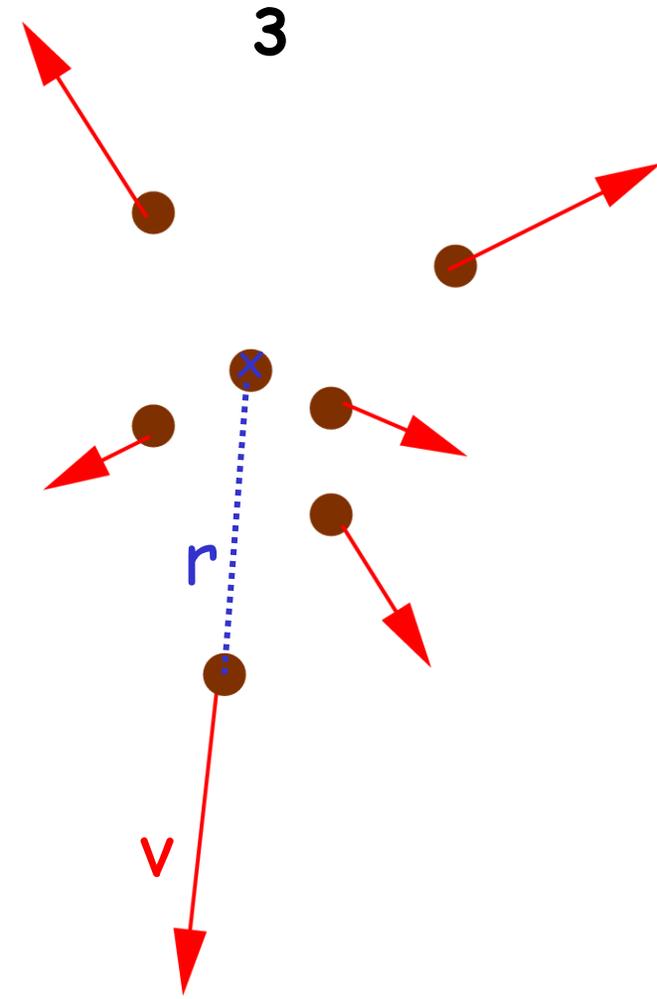
Explosionsmodell

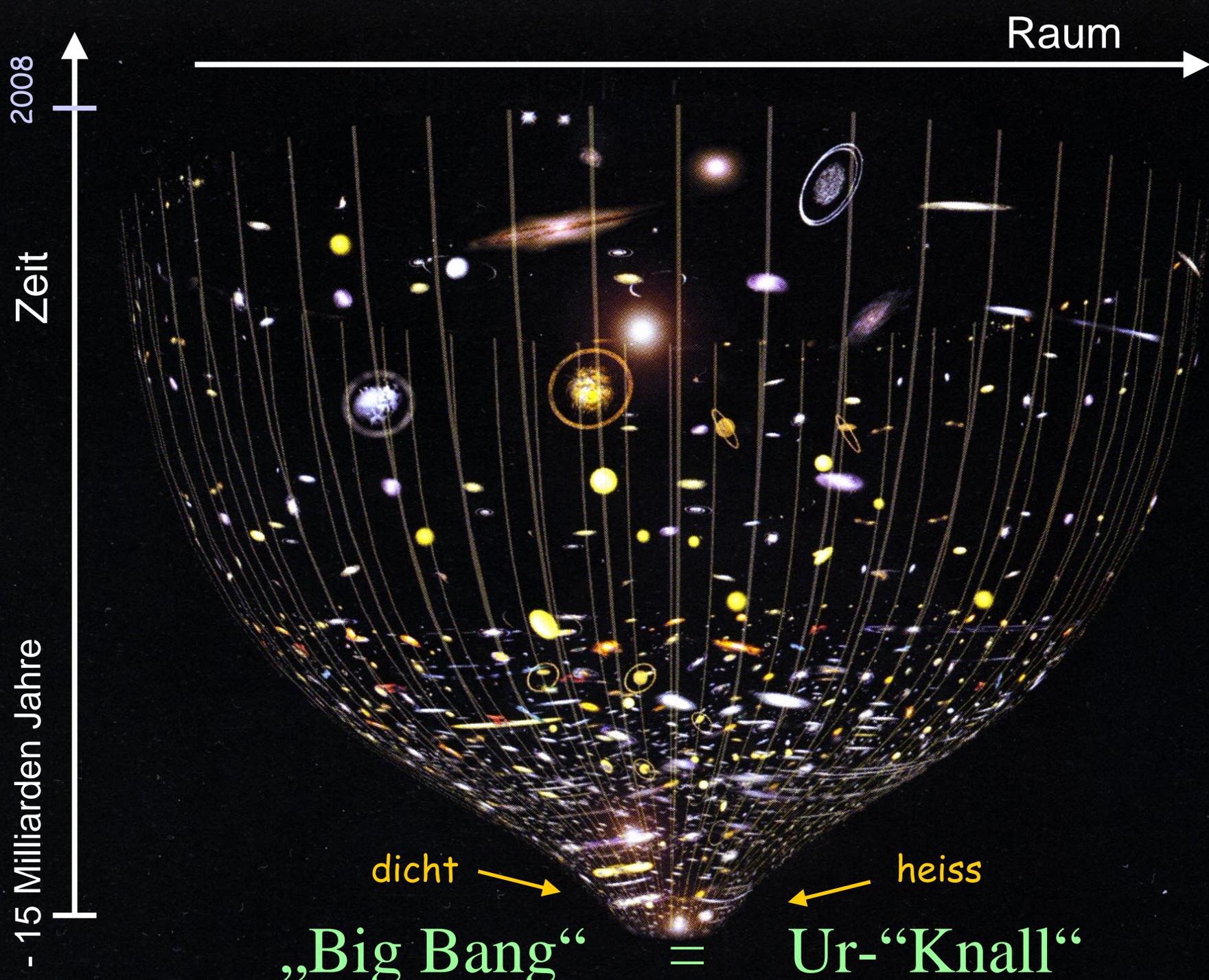


Hubble-Gesetz:

$$v = H \cdot r$$

$1/H = 15$ Milliarden Jahre = Weltalter





Raum

2008

Zeit

- 15 Milliarden Jahre

dicht → ← heiss
„Big Bang“ = Ur-„Knall“

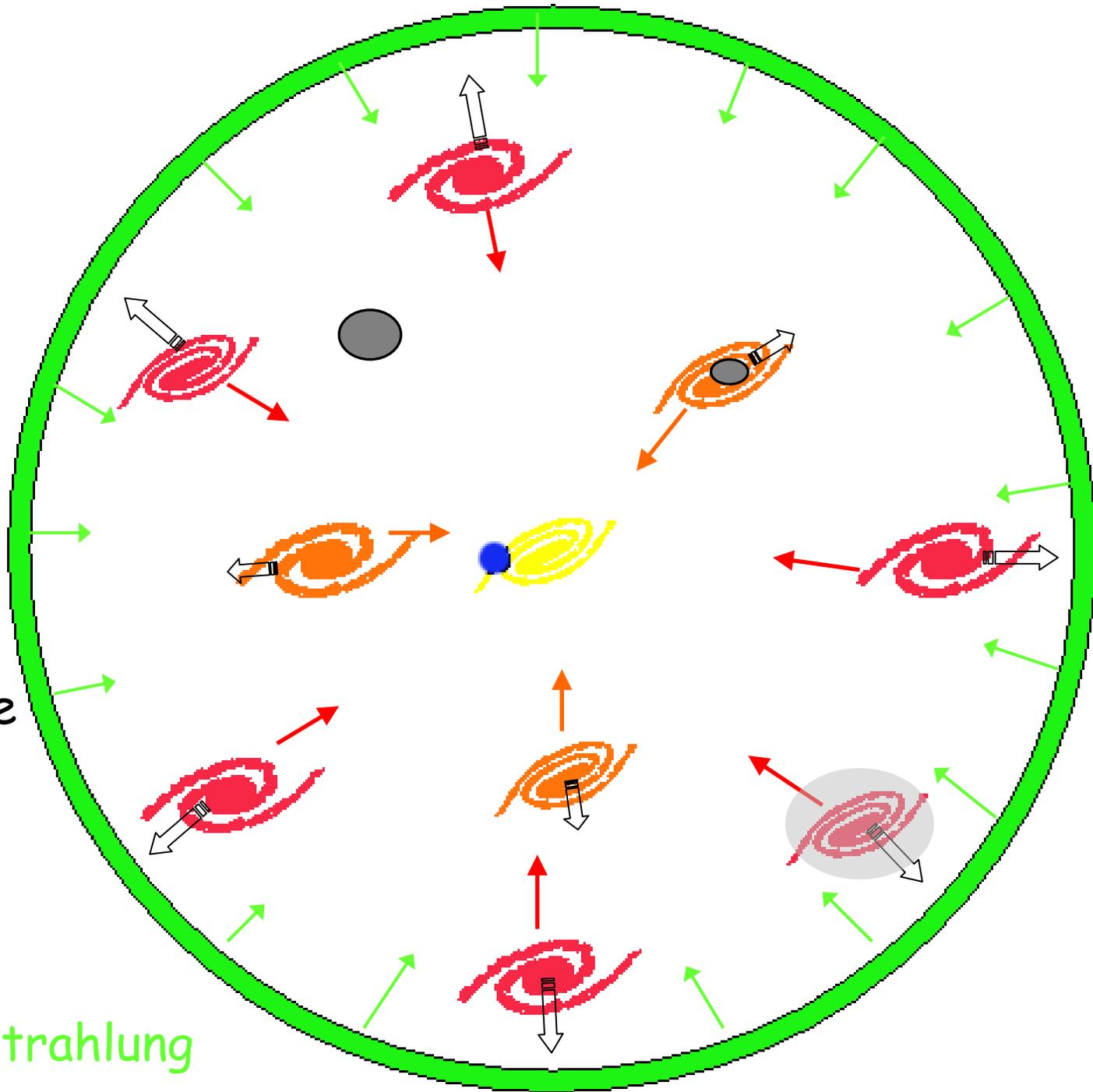
Das heutige Universum

Materie:

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

Strahlung:

- Sternenlicht
- Hintergrundstrahlung



Zusammenfassung „Grundlegende Beobachtungen“

- **Universum = viele Galaxien**
- **Galaxien fliegen auseinander**

**Big-Bang
- Modell**



Adler-Nebel
(M16)

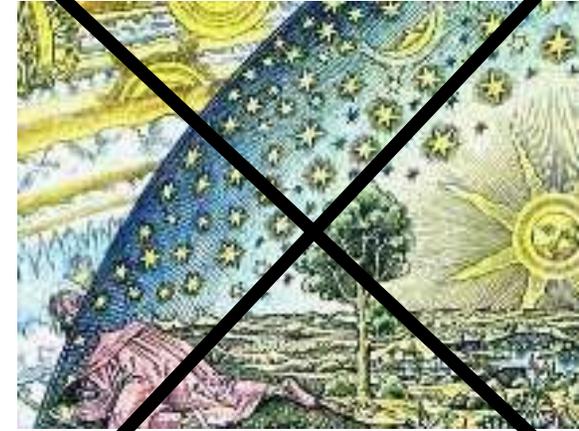
Hubble-
Teleskop

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

Ist das Urknall-Modell richtig ?

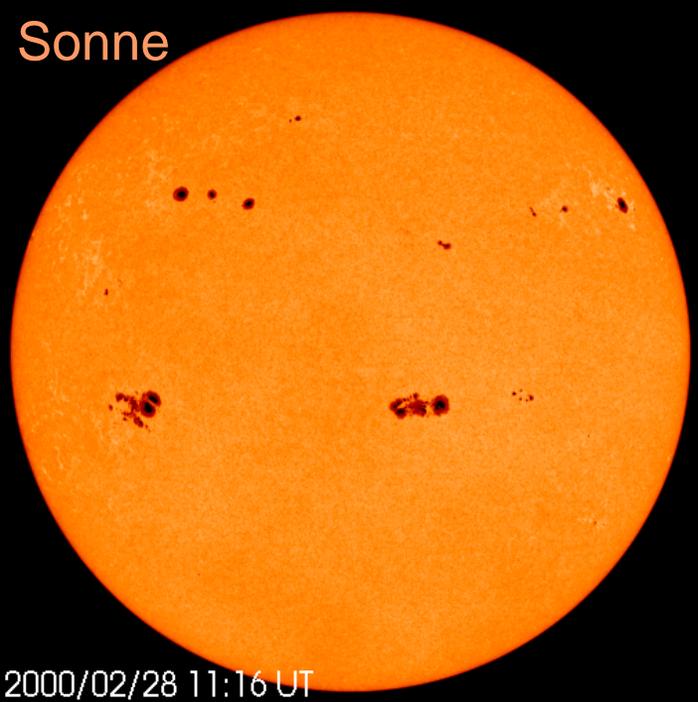
Unsere Vorstellung:

Universum früher dicht und heiß;
Galaxien fliegen voneinander weg



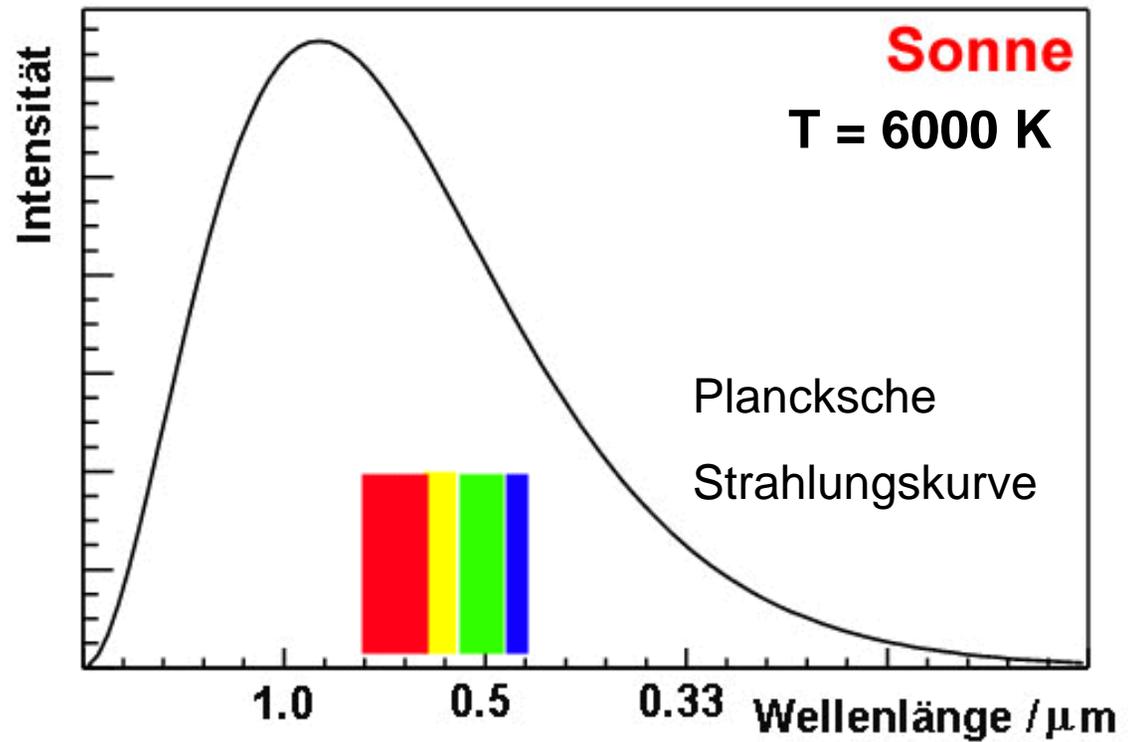
FRAGEN:

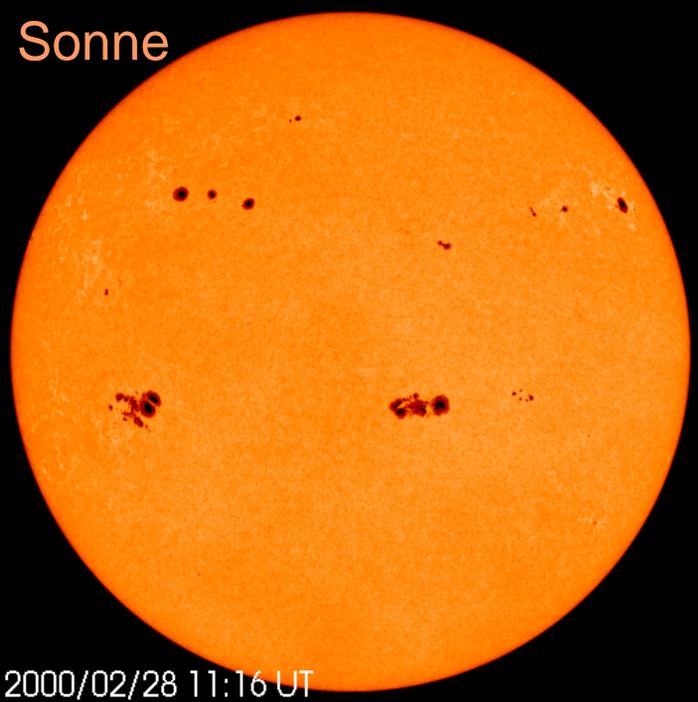
- Beobachtbare „Überbleibsel“ des heißen Urknalls ?
- Entstehung der Atome im frühen Universum ?
- Alter des Universums ?
- Zukunft ? Geht die Expansion immer weiter ?



Licht von der Urexplosion

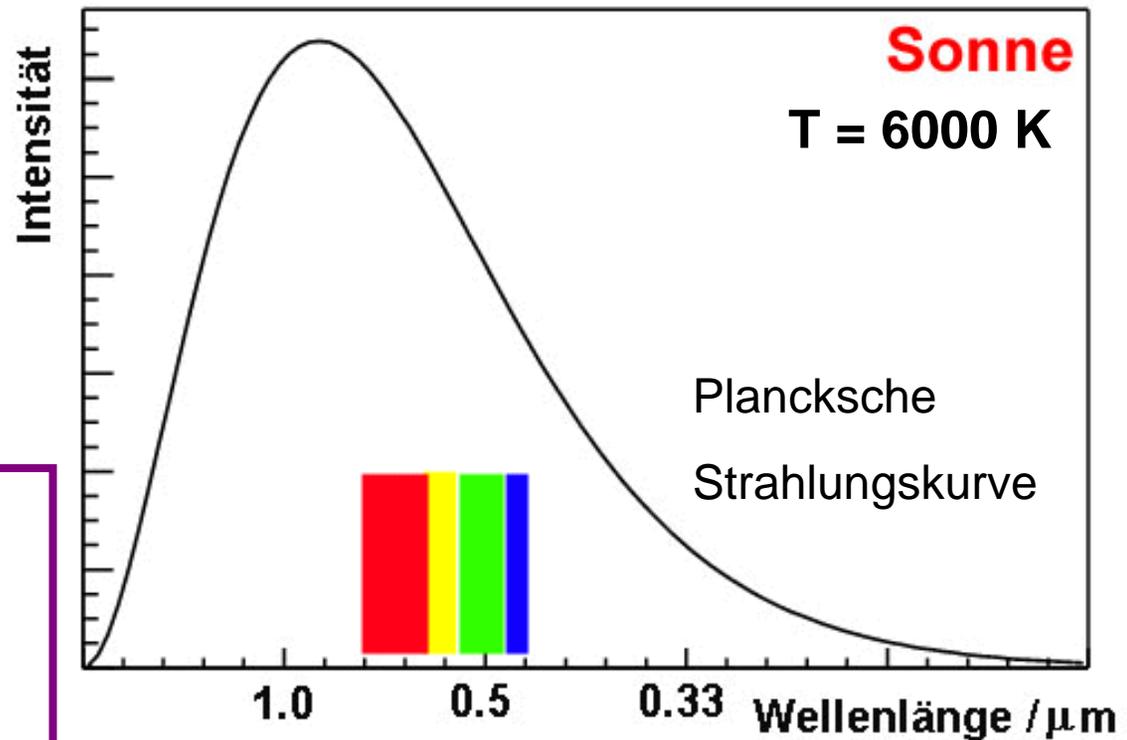
Urexplosion: heißes Gas / Plasma
(ähnlich Sonne)





Licht von der Urexplosion

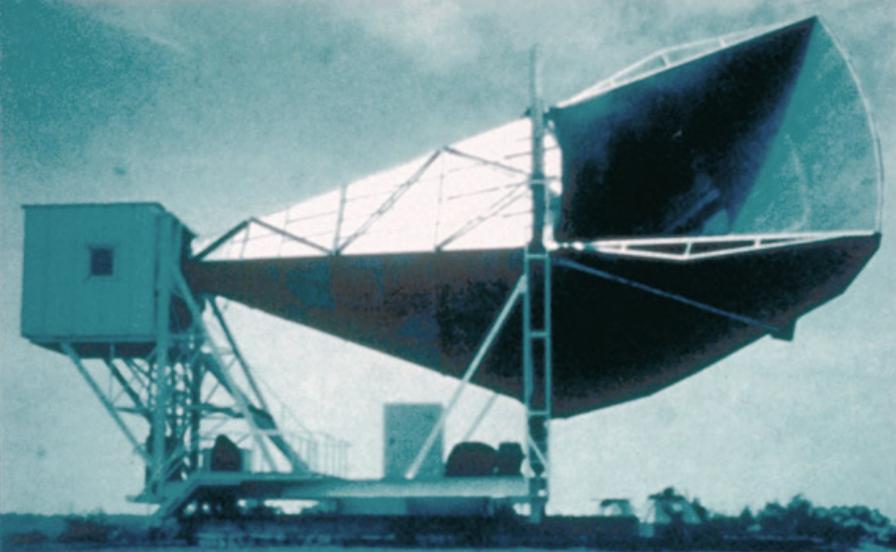
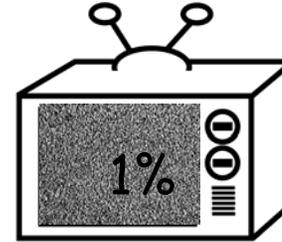
Urexplosion: heißes Gas / Plasma
(ähnlich Sonne)



Vorhersage von
R. Alpher u.a. 1948:

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

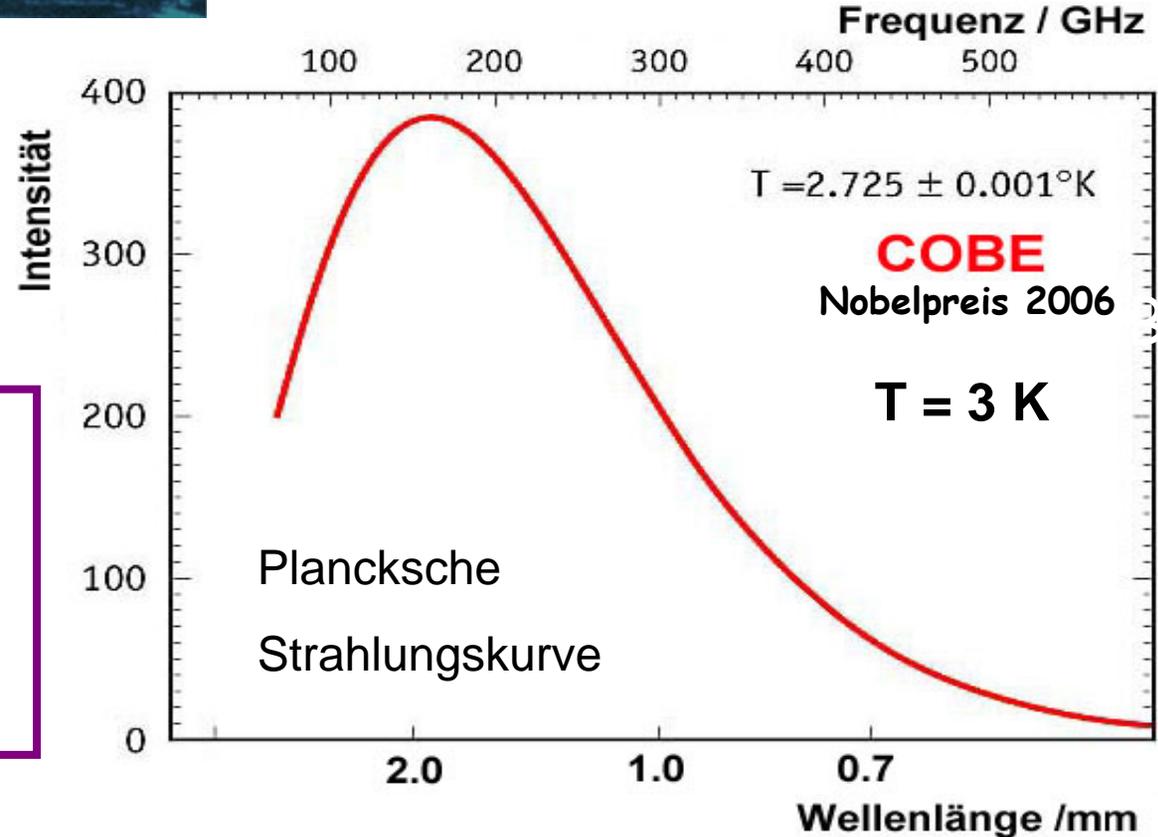
Die kosmische Hintergrundstrahlung



A. Penzias und
R. Wilson 1965:

Mikrowellenstrahlung
aus dem Kosmos
= Blitz der Urexplosion

Nobelpreis 1978



Ist das Urknall-Modell richtig ?

Unsere Vorstellung:

Universum früher dicht und heiß;

Galaxien fliegen voneinander weg

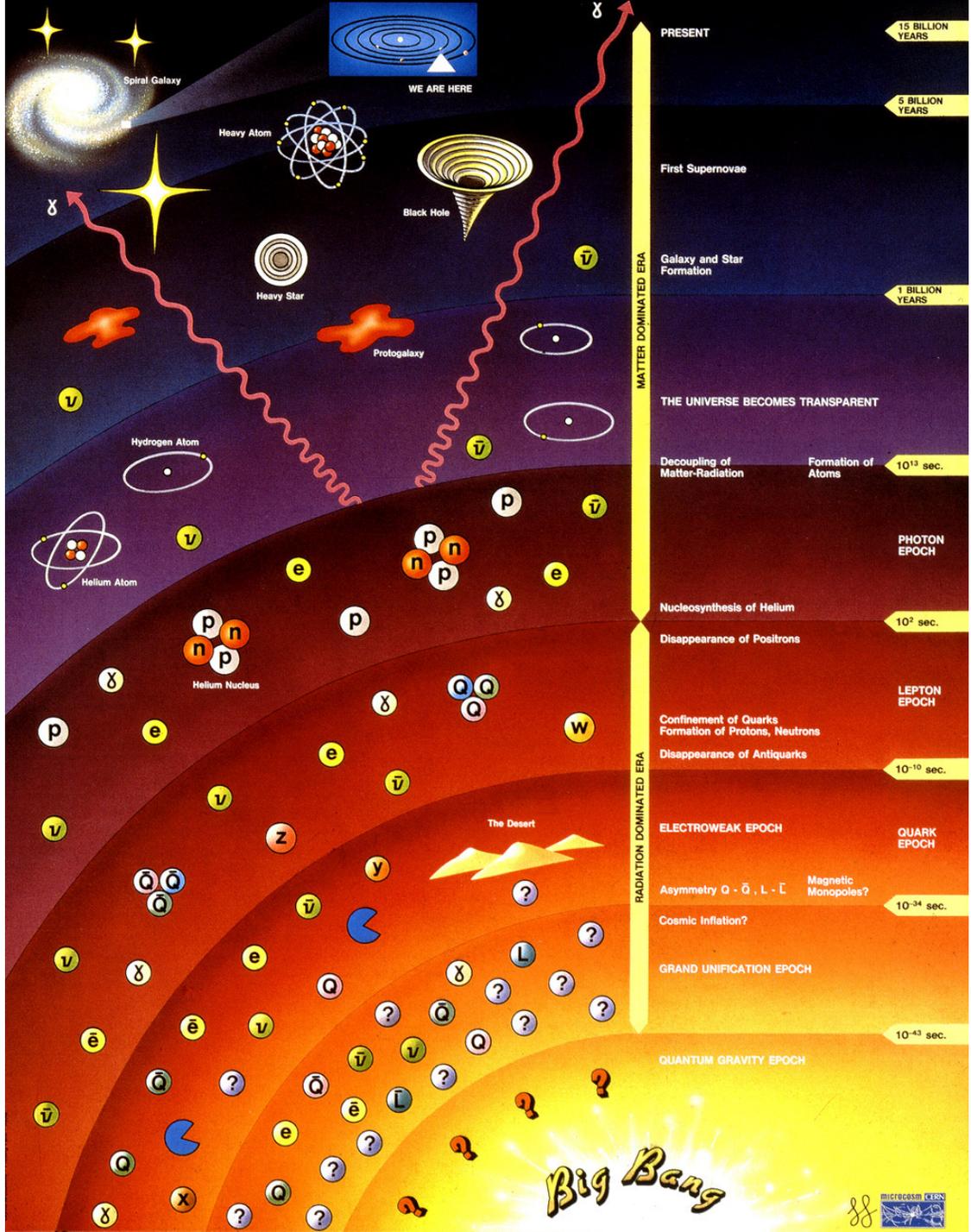
FRAGEN:

- Beobachtbare „Überbleibsel“ des heißen Urknalls ?

**Ja, kosmische „Hintergrundstrahlung“
= Mikrowellenstrahlung**

- Nächste Frage:
- Entstehung der Atome im frühen Universum ?

Prozesse im frühen Universum

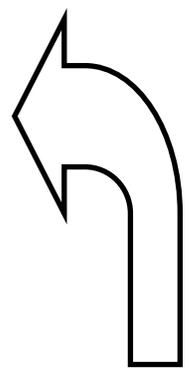


10^{10} a 11.06.2008

300 000 a Atome

3 min Kerne

10^{-10} s

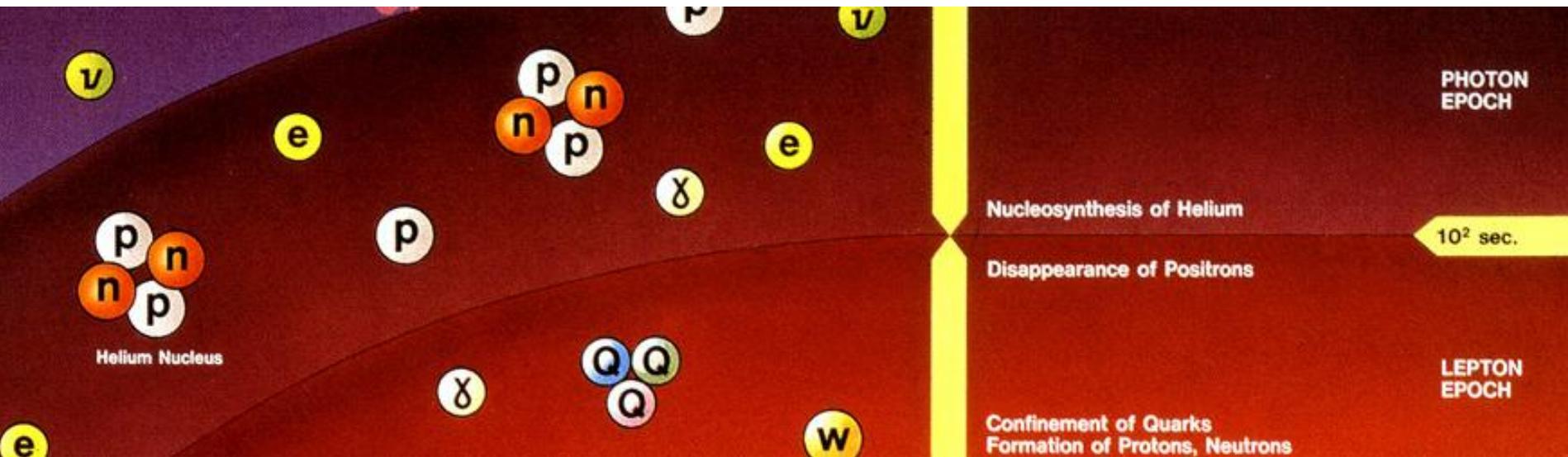


Elementarteilchenphysik

Nukleosynthese = Bildung der Atomkerne

$t = 3 \text{ min}$

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



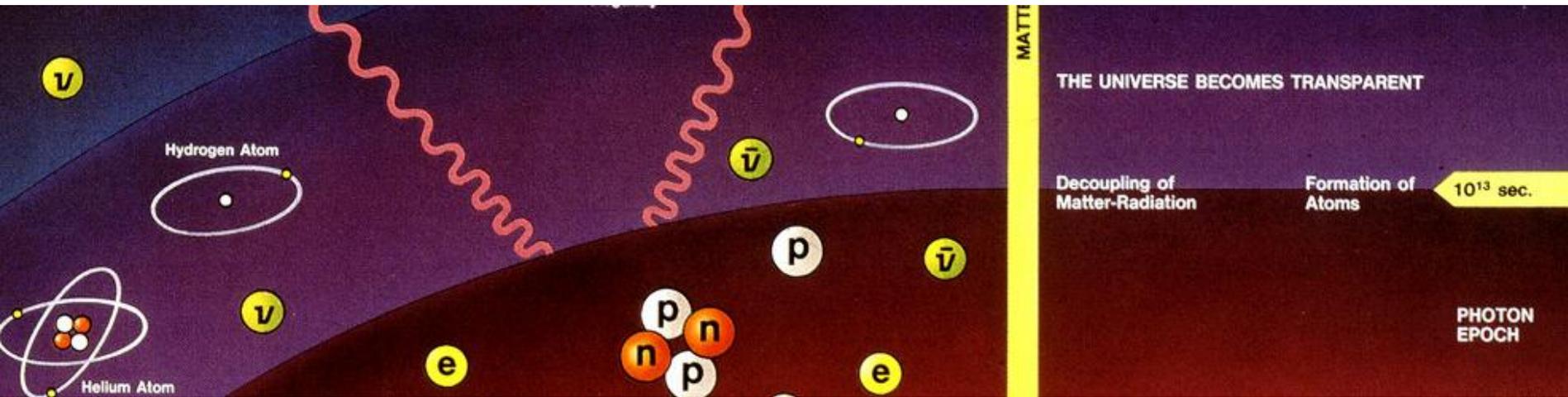
$2n + 2p \rightarrow \text{He-Kern} \quad (\text{stabil})$

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

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

Bildung von Atomen

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



„kosmische
Hintergrund-
strahlung“

Weltall ohne freie Ladung!

Licht kann sich ungehindert ausbreiten!

Atome bilden Sterne und Galaxien

Die Chemie des Universums



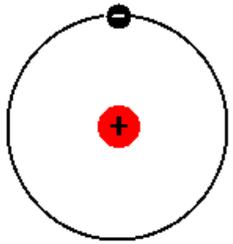
Vor der Sternbildung:

75 %

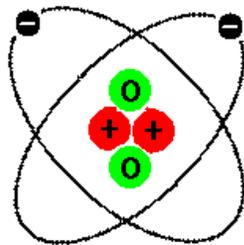
Wasserstoff

25 %

Helium



^1H



^4He

proton: ●

electron: ●

neutron: ●

**BIG BANG-
Modell sagt
Messdaten
richtig voraus!**

Am Ende des Sternenlebens:

Periodic Table of Elements

1	2											3	4	5	6	7	8	9	10		
1 H												3 Li	4 Be								2 He
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	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn				
87 Fr	88 Ra	+Ac	104 Rf	105 Ha	106 106	107 107	108 108	109 109	110 110												

* 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 !**

Ist das Urknall-Modell richtig ?

Unsere Vorstellung:

Universum früher dicht und heiß;

Galaxien fliegen voneinander weg

FRAGEN:

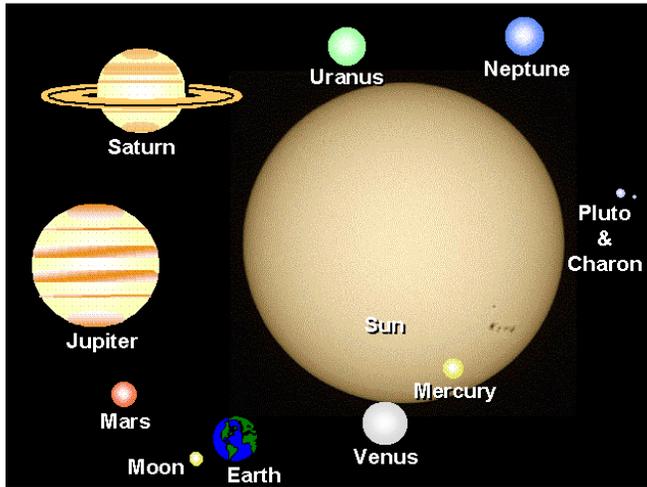
- Entstehung der Atome im frühen Universum ?

**Ja, Wasserstoff und Helium,
im Urknallmodell richtig berechnet**

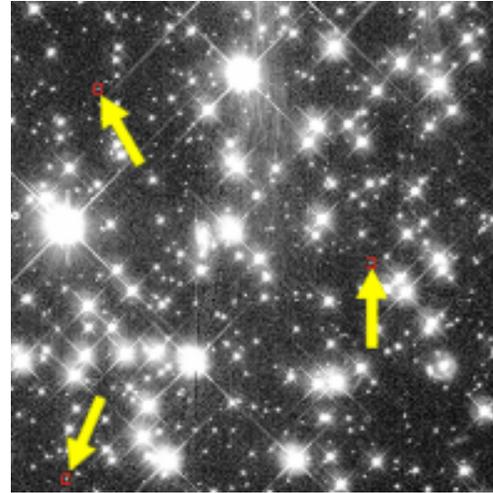
Nächste Frage: ▪ Alter des Universums ?

Wie alt ist das Universum ?

a) Objekte im Universum:



~ 4 Milliarden Jahre



~ 14 Milliarden Jahre

ausgebrannte
Sterne

b) Zeitpunkt des Urknalls

Hubble-Gesetz:

$$v = H \cdot r$$

$$1/H \sim 15 \text{ Milliarden Jahre} = \text{Weltalter}$$

passt!

Ist das Urknall-Modell richtig ?

Unsere Vorstellung:

Universum früher dicht und heiß;

Galaxien fliegen voneinander weg

FRAGEN:

- Alter des Universums ?

Ungefähr 15 Milliarden Jahre

Nächste Frage:

- Zukunft ? Geht die Expansion immer weiter ?

Zusammenfassung „Big-Bang - Modell“

- **Universum entstand aus heißem Urknall
vor ~15 Milliarden Jahren**
- **Mit Abkühlung entstanden Atome
(Wasserstoff + Helium) und später Galaxien**
- **Die kosmische Hintergrundstrahlung zeugt vom
„Explosionsblitz“**

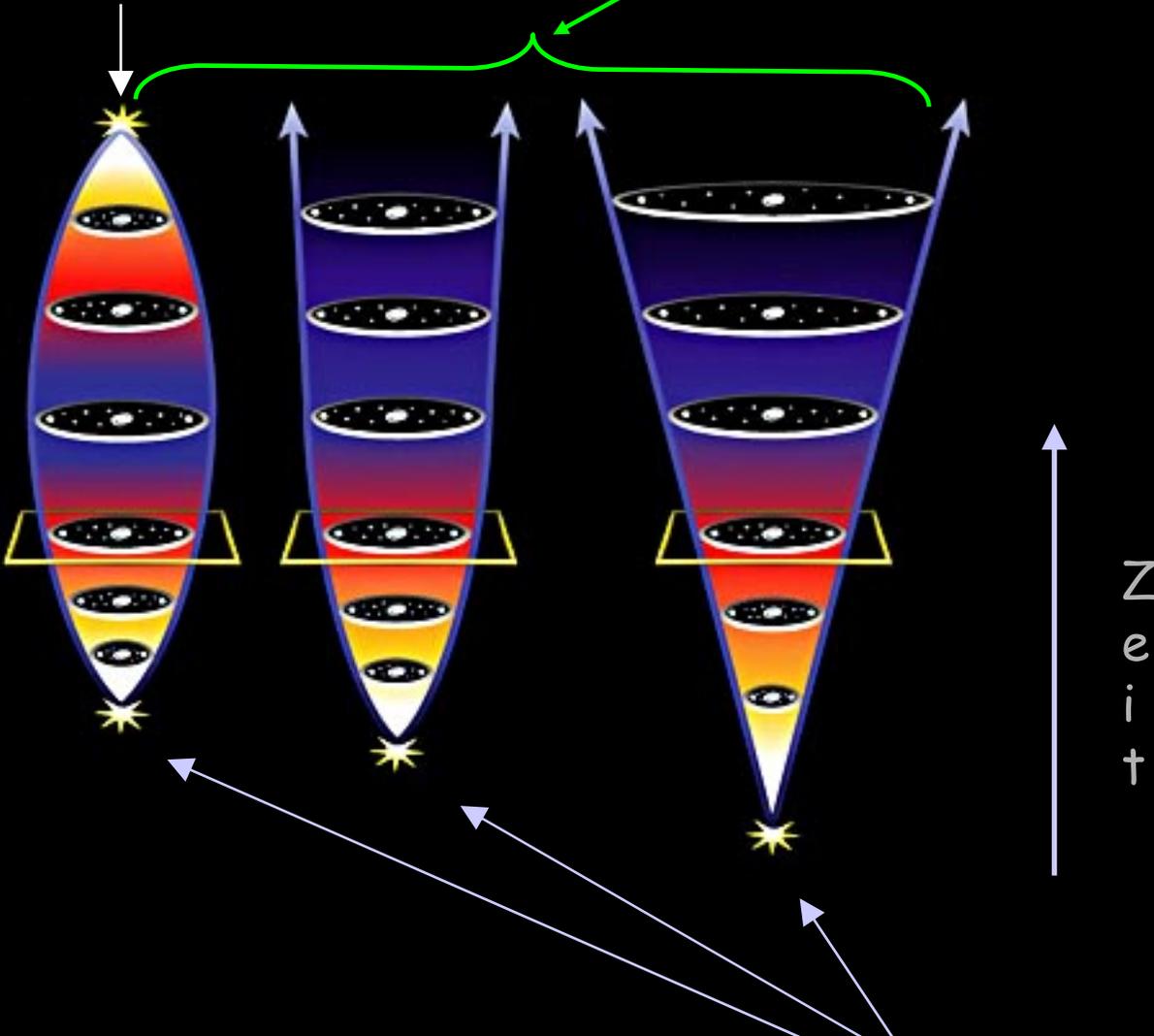
Adler-Nebel

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

Entwicklung des Universums ?

Hat Einstein Recht ?

Kollaps



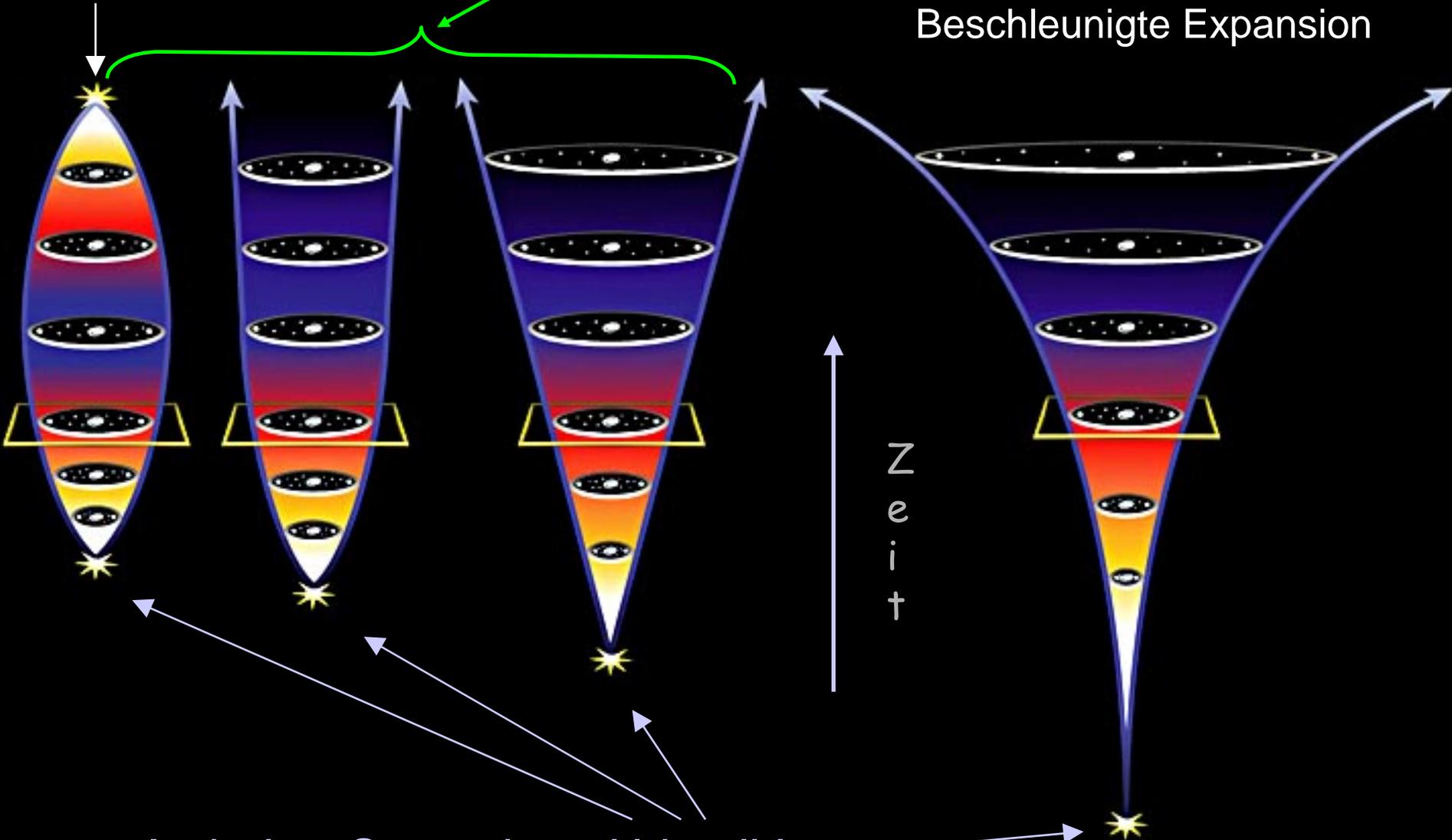
In *jedem* Szenarium: Urknall !

Entwicklung des Universums ?

Hat Einstein Recht ?

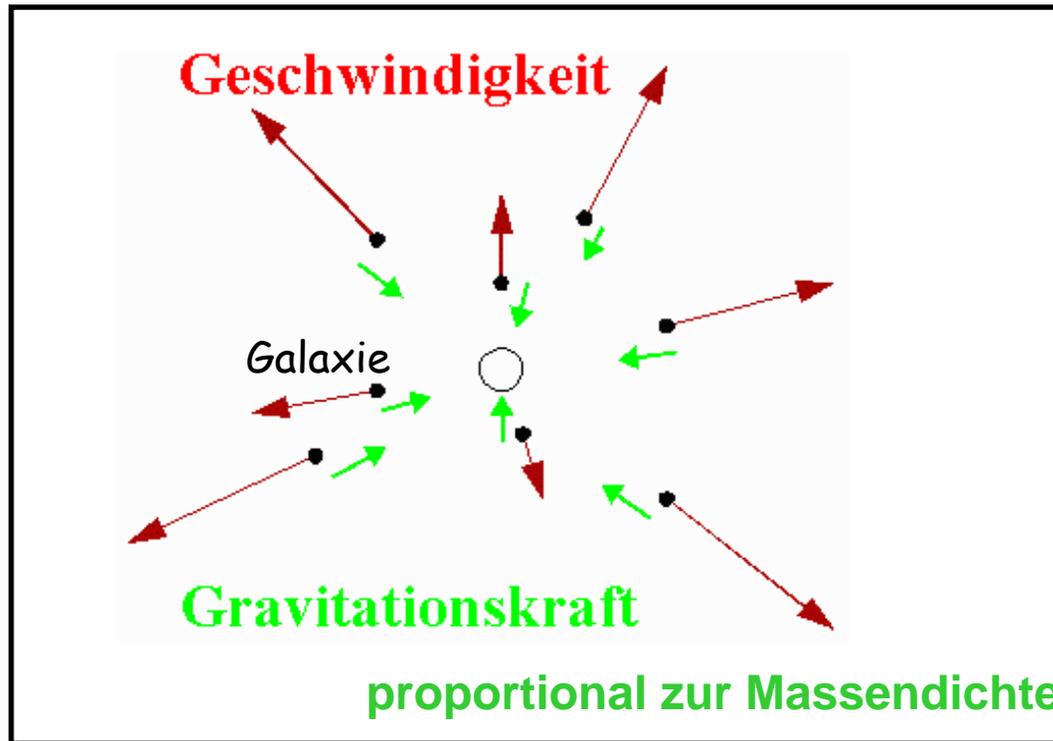
Kollaps

Beschleunigte Expansion



In *jedem* Szenarium: Urknall !

Evolution des Universums (a la Einstein)



Geschwindigkeit
nimmt ab, da
Gravitation
anziehend

(Unbekannter) Parameter Ω_m gibt an, welcher Effekt die Oberhand gewinnt:

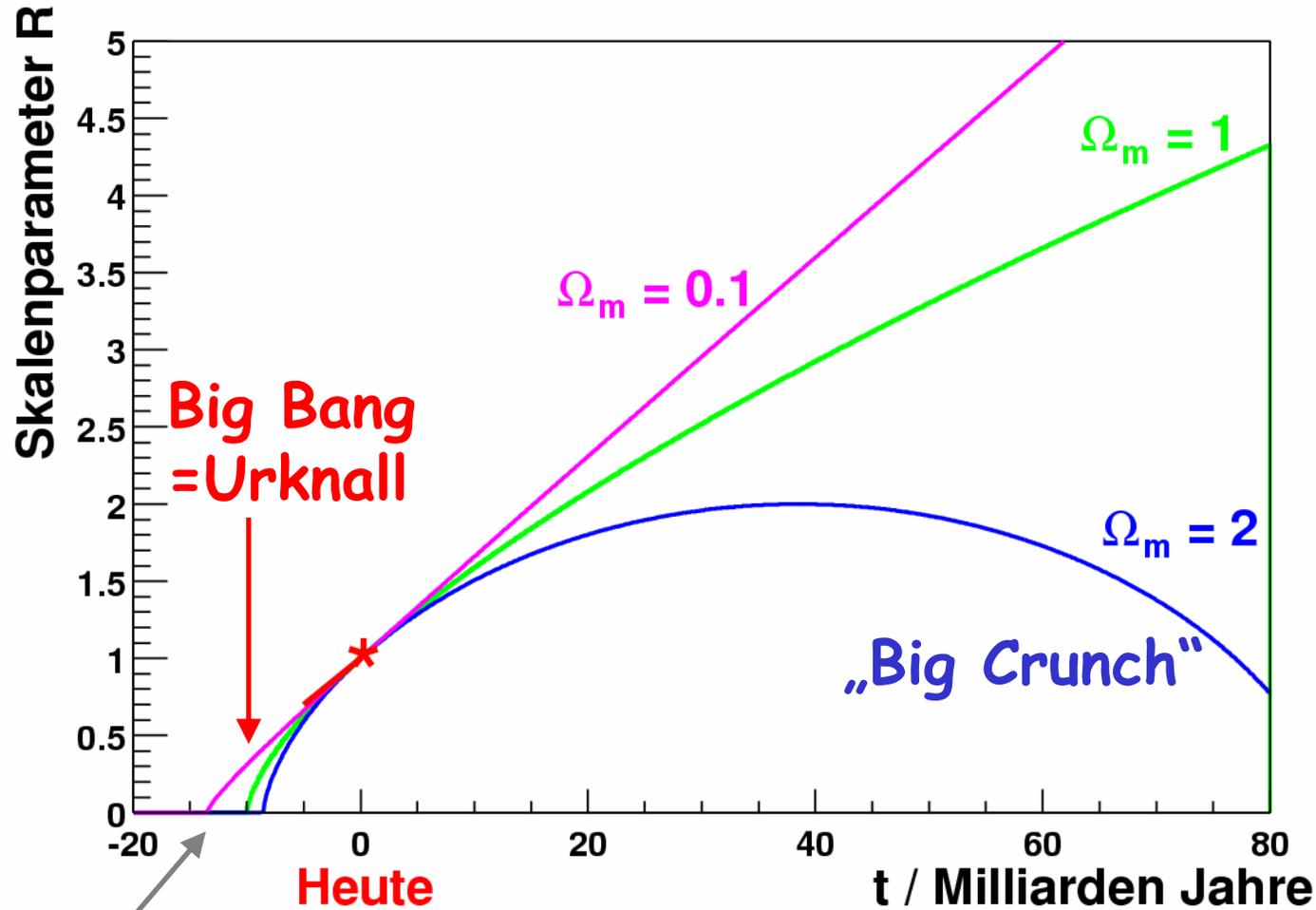
$\Omega_m > 1$: Schwerkraft „gewinnt“

schwer
zu messen

Ω_m entscheidet über unser Schicksal !

Evolution des Universums (Einstein)

= Abstand zwischen zwei
entfernten Galaxien

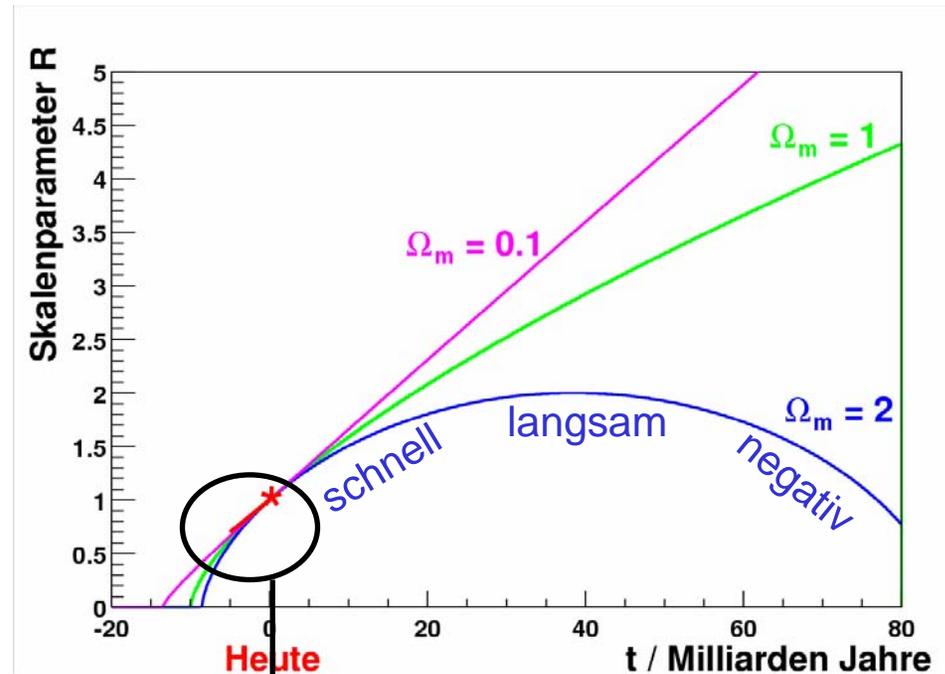


Alter des Universums
~ 15 Milliarden Jahre

Welche Kurve ist richtig ?

Wie kann man die Evolution messen ?

Bestimmung der
Geschwindigkeitsänderung
 der Galaxien
 mit der Zeit

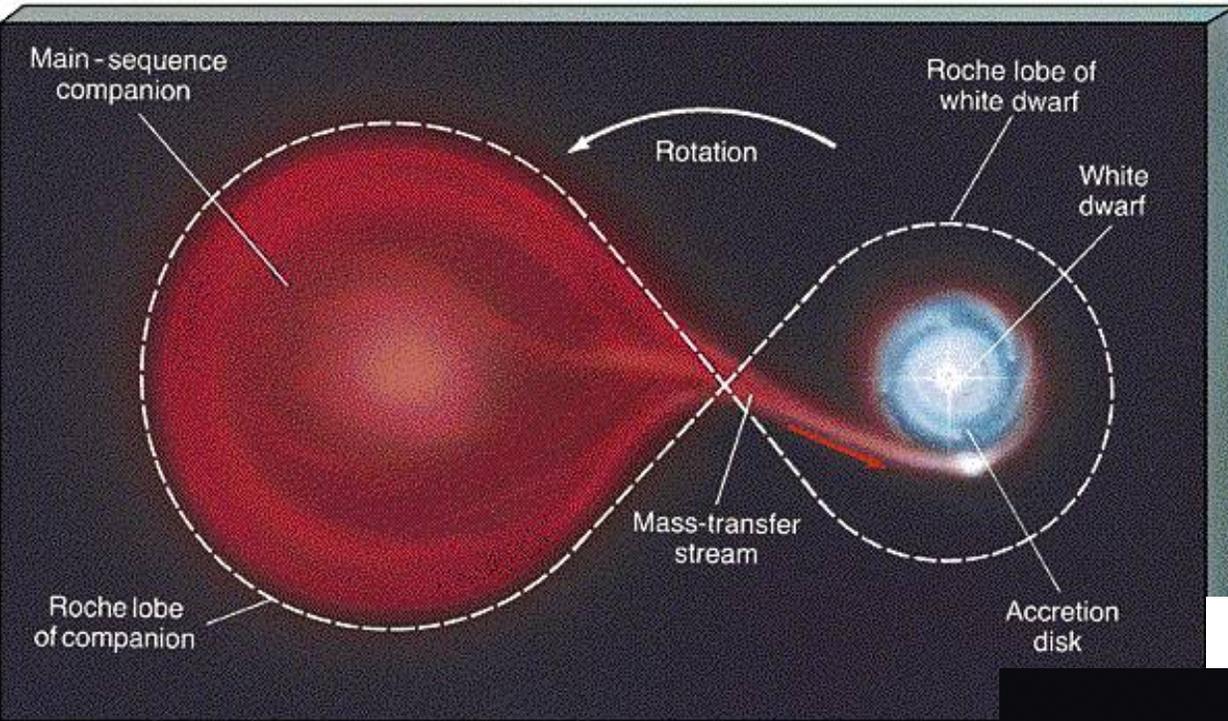


Idee:

weit entfernte Objekte = Blick in die Vergangenheit
 (Lichtlaufzeit !)

Geschwindigkeitsmessung mit Dopplereffekt

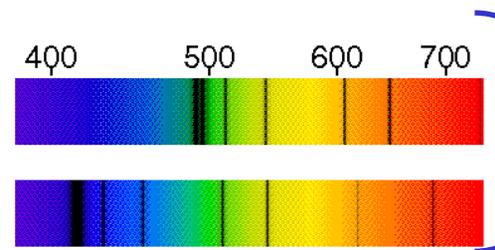
Supernovae Ia



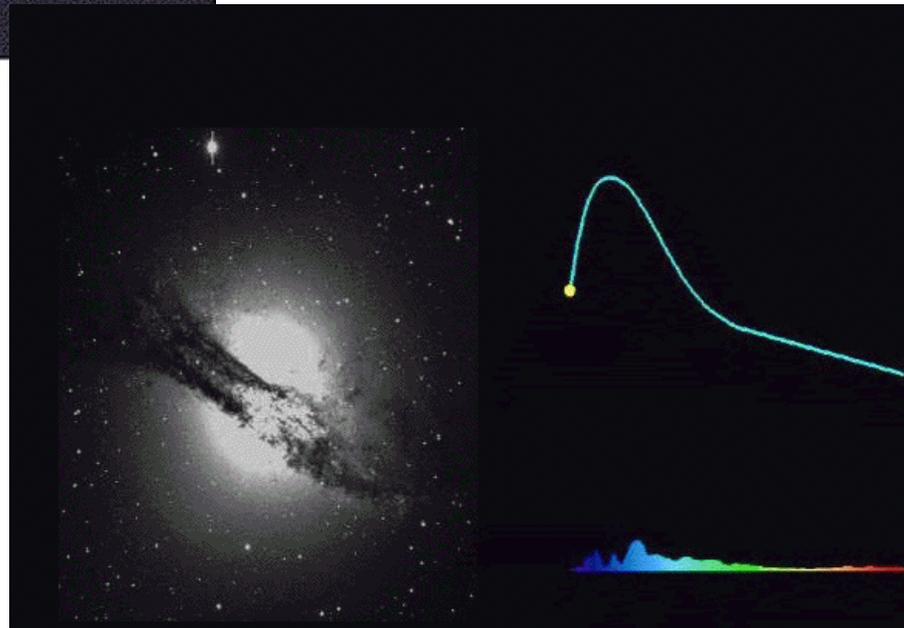
Explosion wenn
 Masse $\approx 1.4m_{\text{Sonne}}$

Helligkeit:
gleich
groß

Entfernung
 Blick in
 Vergangenheit !

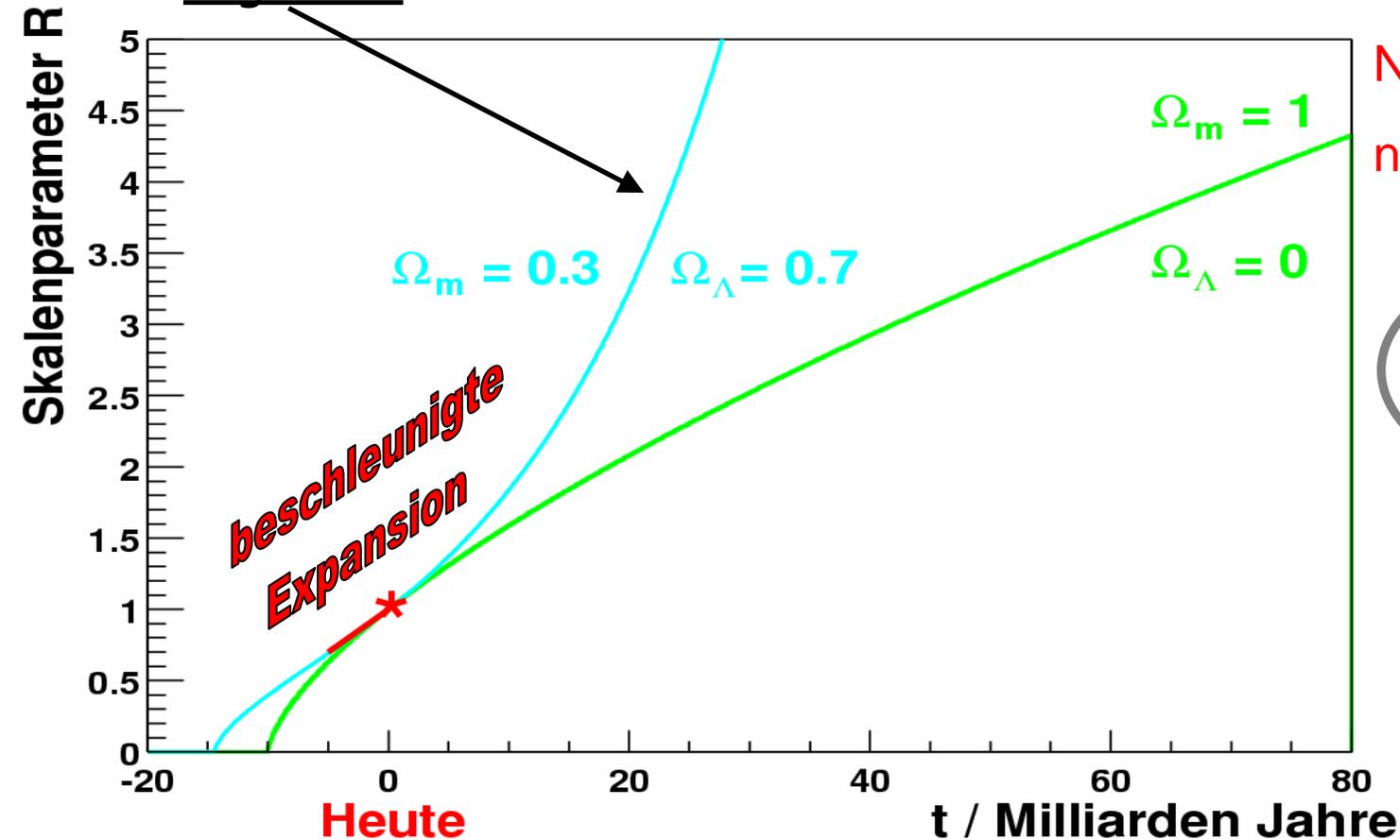


Flucht-
 geschwindigkeit



Messung der Geschwindigkeitsänderung mit Supernovae

Ergebnis:



Neue Kraft,
neue Energieform:

„dunkle
Energie“

wirkt
abstoßend!

Erweitertes Modell: Einsteins „kosmologische Konstante“ Λ

Messung der Geschwindigkeitsänderung mit Supernovae

Ergebnis:

Geschwindigkeit zwischen Galaxien heute höher als früher!

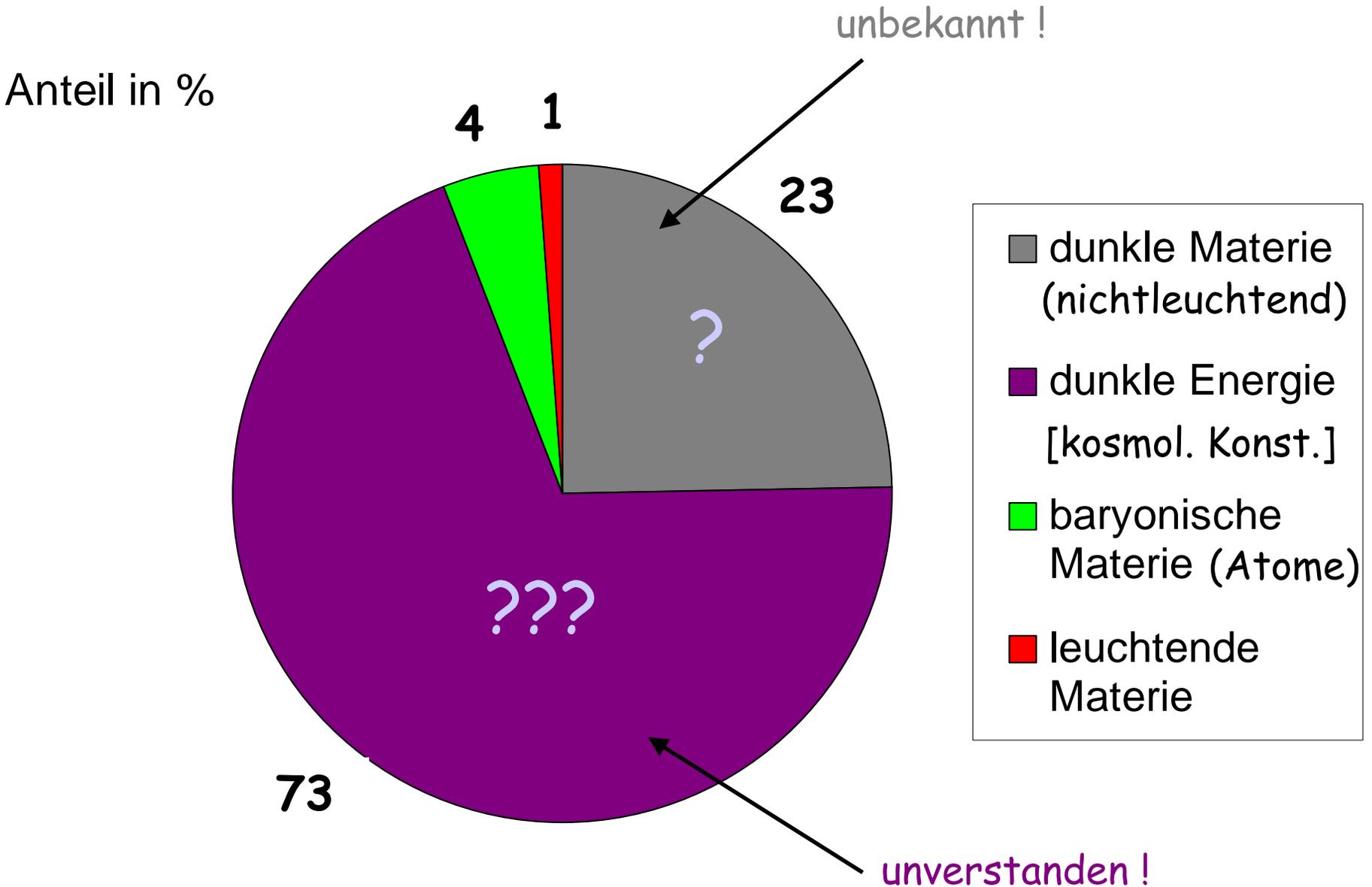
**Abstoßung,
beschleunigte Expansion !**

Konsequenz:

- modifiziertes Gravitationsgesetz
- neue Energieform: „dunkle Energie“



Energieformen im Universum



Zusammenfassung

„Entwicklung des Universums“

- Urknall-Modell qualitativ erfolgreich
- Messungen zeigen Abweichung von berechneter Entwicklung der Galaxiengeschwindigkeiten !

Mögliche Erklärung:

Erweiterung des Gravitationsgesetzes,
„dunkle Energie“

Zusammenfassung

„goldenes Zeitalter der Kosmologie“

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

Revolution in der Physik !?