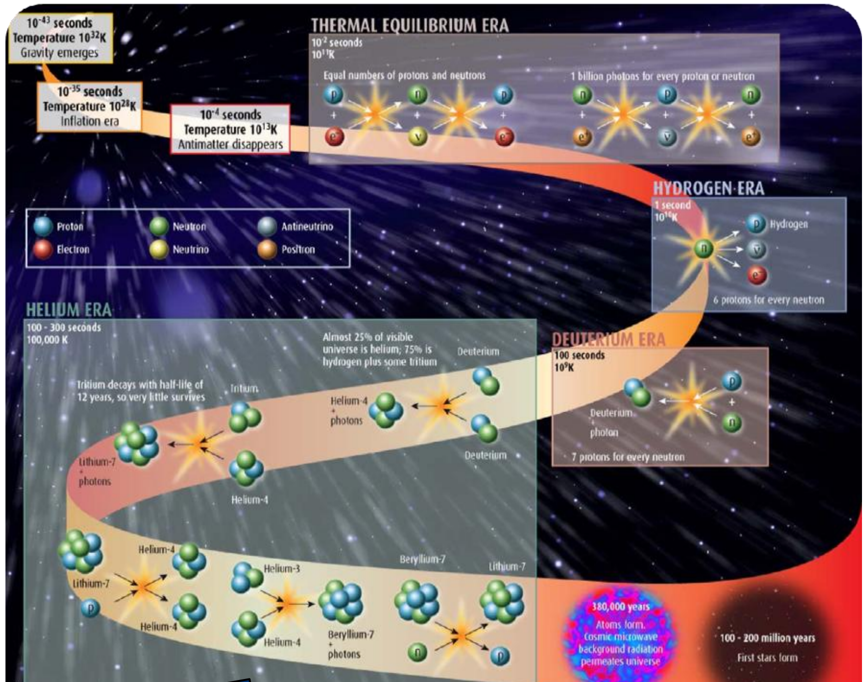
Karlsruhe Institute of Technology



10^{-43} seconds
Temperature 10^{32}K
Gravity emerges
10^{-35} seconds
Temperature 10^{28}K
Inflation era
10^{-6} seconds
Temperature 10^{13}K
Antimatter disappears
THERMAL EQUILIBRIUM ERA
Equal numbers of protons and neutrons
1 billion photons for every proton or neutron
HYDROGEN ERA
1 second
6 protons for every neutron
Proton
Electron
Neutron
Neutrino
Antineutrino
Positron
HELIUM ERA
100 - 300 seconds
100,000 K
Almost 25% of visible universe is helium, 75% is hydrogen plus some tritium
Tritium decays with half-life of 12 years, so very little survives
DEUTERIUM ERA
100 seconds
Deuterium
photon
7 protons for every neutron
Tritium
Helium-4
Helium-3
Lithium-7
Beryllium-7
photons
380,000 years
Atoms form. Cosmic microwave background radiation permeates universe
100 - 200 million years
First stars form

Astroteilchenphysik – I

Wintersemester 2012/13
Vorlesung # 3, 08.11.2012

Helmut Hetznecker

Expansionsgeschichte des Universums

Vom heißen Urknall zum kalten Kosmos

Astrophysik aktuell

Spektrum

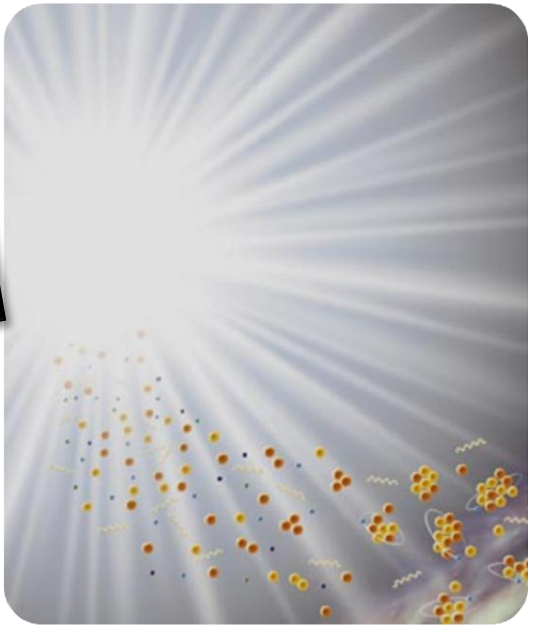
Guido Drexlin, Institut für Experimentelle Kernphysik

Frühes Universum

- Friedmann-Lemaître Gleichungen
- Krümmungsparameter k
- Zustandsgleichungen, kritische Dichte

primordiale Nukleosynthese:

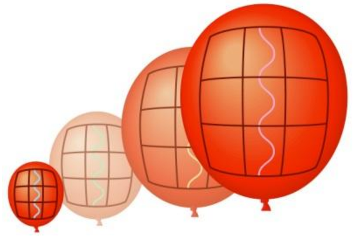
- Überblick & Grundlagen
- die 4 Phasen der Nukleosynthese



Dynamik der Hubble-Expansion

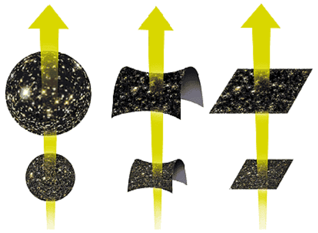
Hubble – Expansion

- Rotverschiebung: $z = \Delta\lambda / \lambda_0$
- Hubble-Gesetz: $v = H_0 \cdot r$ mit $H_0 \sim 70$ km/s Mpc^{-1}
- Hubble-Parameter: $H(t) = \dot{a}(t) / a(t)$ mit a(t) = Skalenparameter



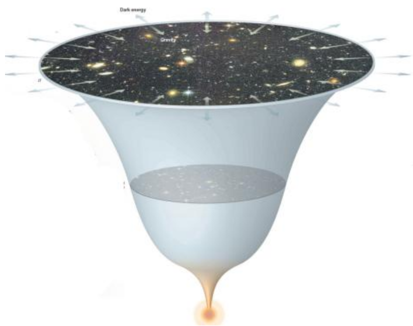
Beschreibung der Hubble – Expansion

- alle Energieformen wirken gravitativ
- der Raum selbst expandiert und ist gekrümmt

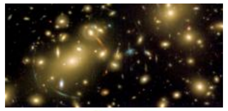


I. Expansionsgleichung:

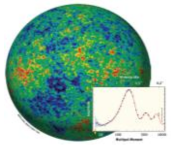
$$\frac{\ddot{a}(t)}{a(t)} = -\frac{4}{3}\pi G\left(\rho(t) + \frac{3P}{c^2}\right) + \frac{\Lambda}{3}$$



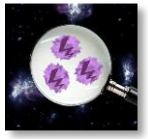
Materie **$P_m = 0$**



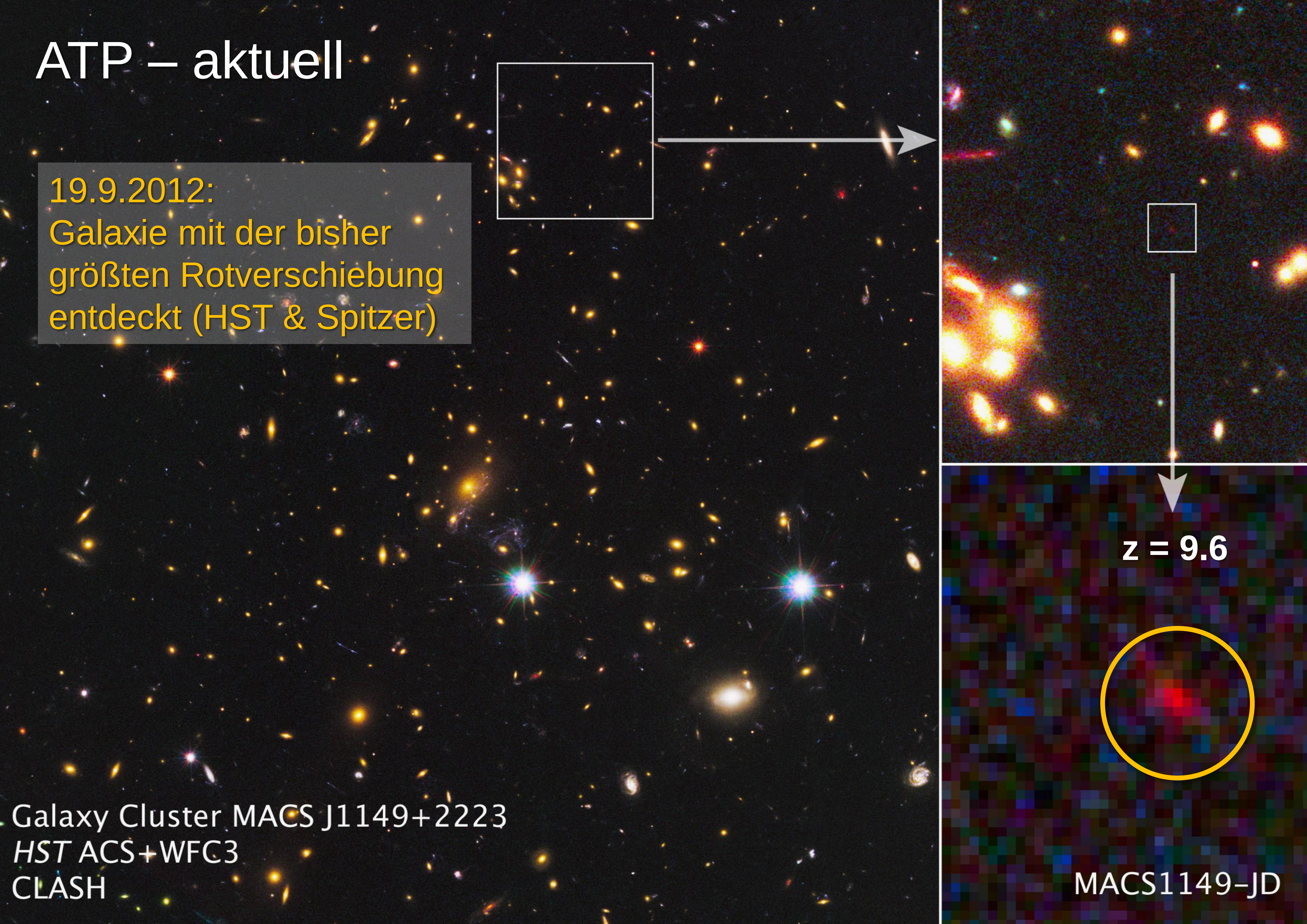
Strahlung **$P_r = \frac{1}{3}\, \rho_r \cdot c^2$**



Vakuum **$P_V = -\rho_V \cdot c^2$**



ATP – aktuell


Galaxy Cluster MACS J1149+2223
HST ACS+WFC3
CLASH
z = 9.6
MACS1149-JD

19.9.2012:
Galaxie mit der bisher größten Rotverschiebung entdeckt (HST & Spitzer)

Dynamik der Expansion, Teil II

II. Expansionsgleichung

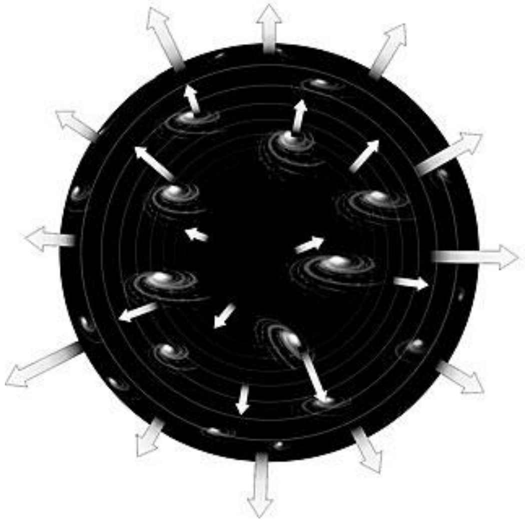
(ä → ȧ)   zurück zur Newton´schen Betrachtung

$$\ddot{a}(t) = -\frac{4}{3}\pi G \rho_0 \frac{1}{a^2(t)} \quad \Big| \cdot 2\dot{a}(t)$$

$$\ddot{a}(t) \cdot 2\dot{a}(t) = -\frac{8}{3}\pi G \rho_0 \frac{\dot{a}(t)}{a^2(t)}$$

Integration:

$$\dot{a}^2(t) = -\frac{8}{3}\pi G \rho_0 \left(\frac{-1}{a(t)}\right) - kc^2$$



kc² : Integrationskonstante

CONSTANT
Sir Isaac, wie groß war mein H(t) damals?

$$\ddot{a}(t) = -\frac{4}{3}\pi \cdot G \cdot \rho(t) \cdot a(t)$$

Albert, wir brauchen noch ´ne Gleichung
Ok!

Dynamik der Expansion

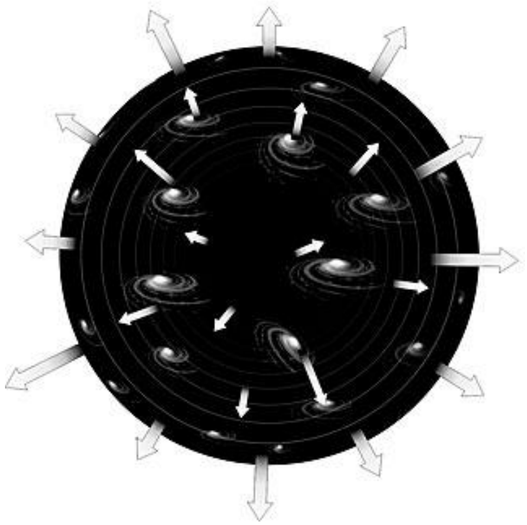
II. Expansionsgleichung

(ä → ȧ)   zurück zur Newton´schen Betrachtung

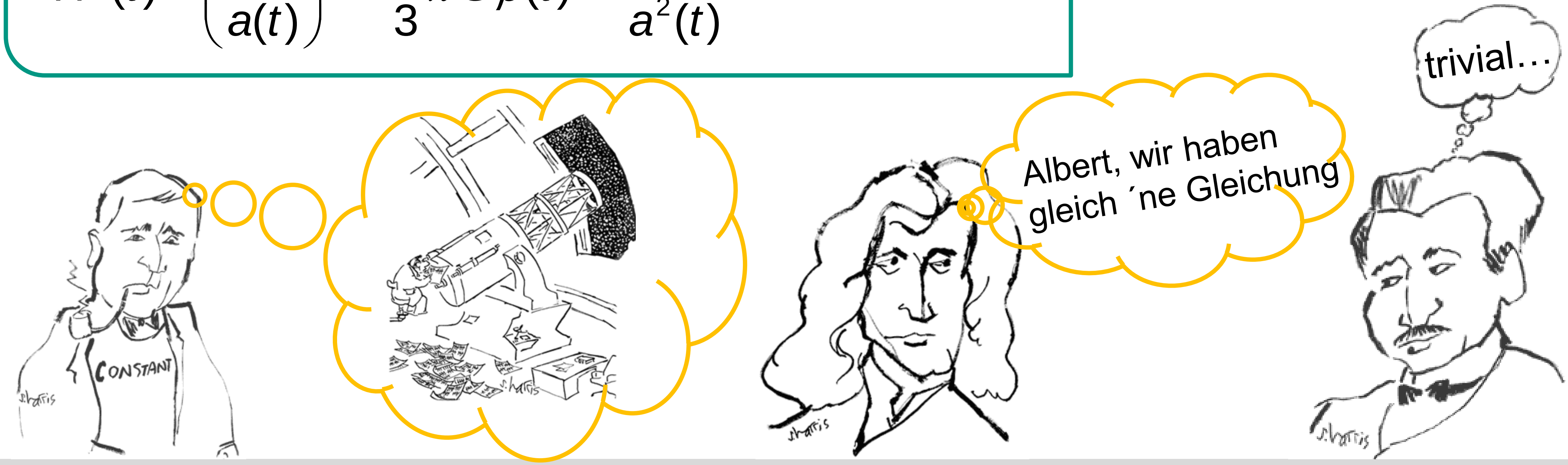
$$\dot{a}^2(t) = -\frac{8}{3}\pi G\rho_0\left(\frac{-1}{a(t)}\right) - kc^2$$

$$\dot{a}^2(t) = \frac{8}{3}\pi G\rho(t)a^2(t) - kc^2 \qquad |:a^2(t)$$

$$H^2(t) = \left(\frac{\dot{a}(t)}{a(t)}\right)^2 = \frac{8}{3}\pi G\rho(t) - \frac{kc^2}{a^2(t)}$$



kc^2 : Integrationskonstante

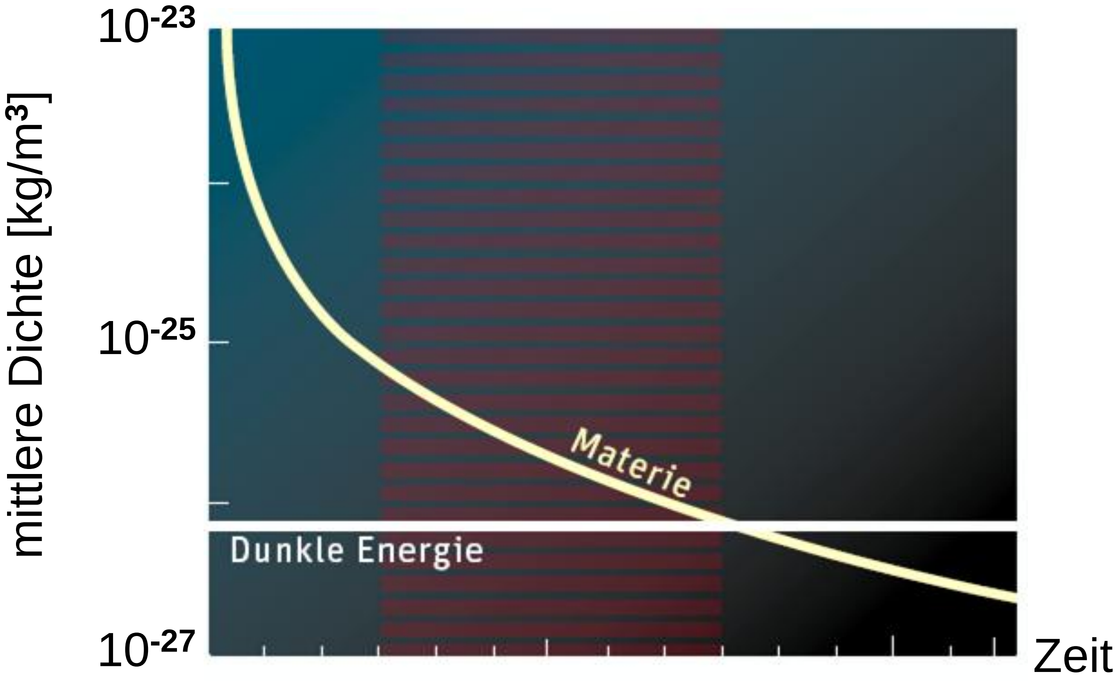

CONSTANT
S.harris
S.harris
Albert, wir haben gleich ´ne Gleichung
S.harris
trivial…
S.harris

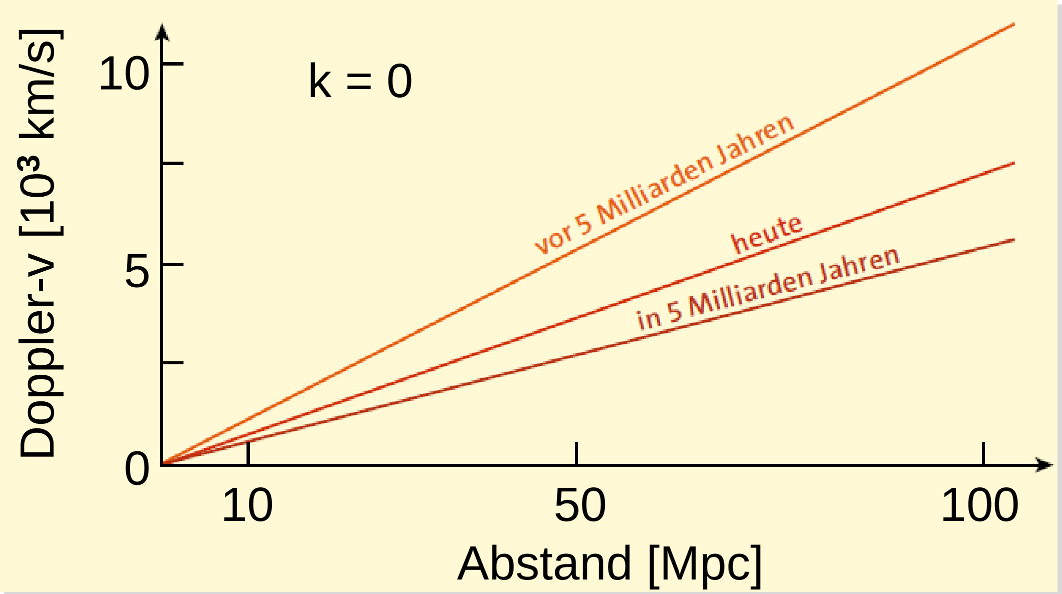
Dynamik der Expansion - Energieerhaltung

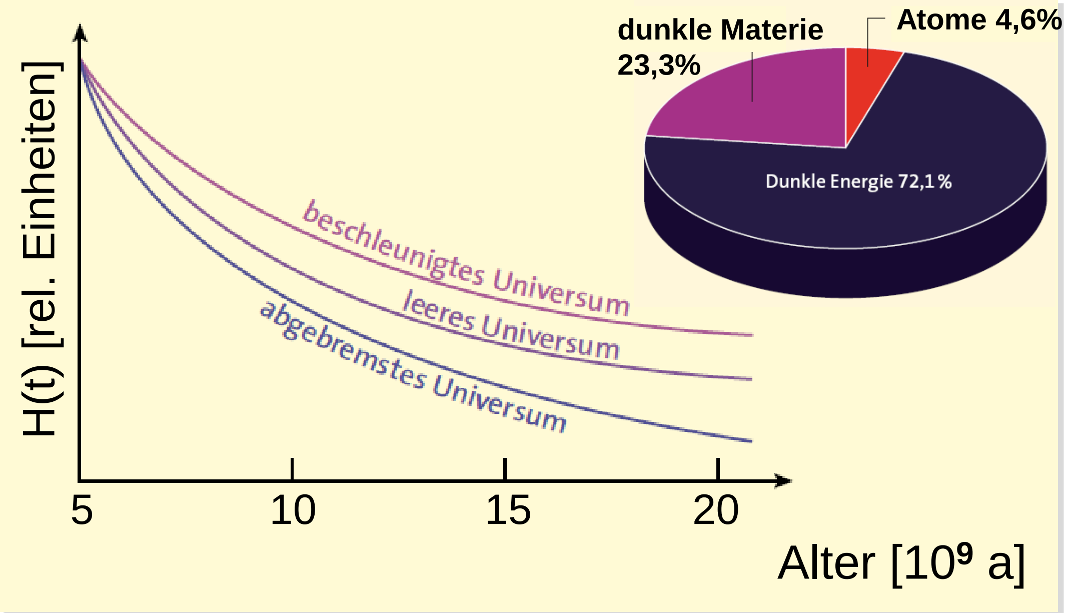
II. Expansionsgleichung (Änderung des Hubble-Parameters)

$$\boxed{H^2(t) = \left(\frac{\dot{a}(t)}{a(t)}\right)^2 = \frac{8}{3}\pi G\rho(t) - \frac{kc^2}{a^2(t)}}$$

- Hubbleparameter H(t) nur abhängig von der Massendichte: **$H(t) \sim \rho(t)^{1/2}$** falls Parameter k = 0



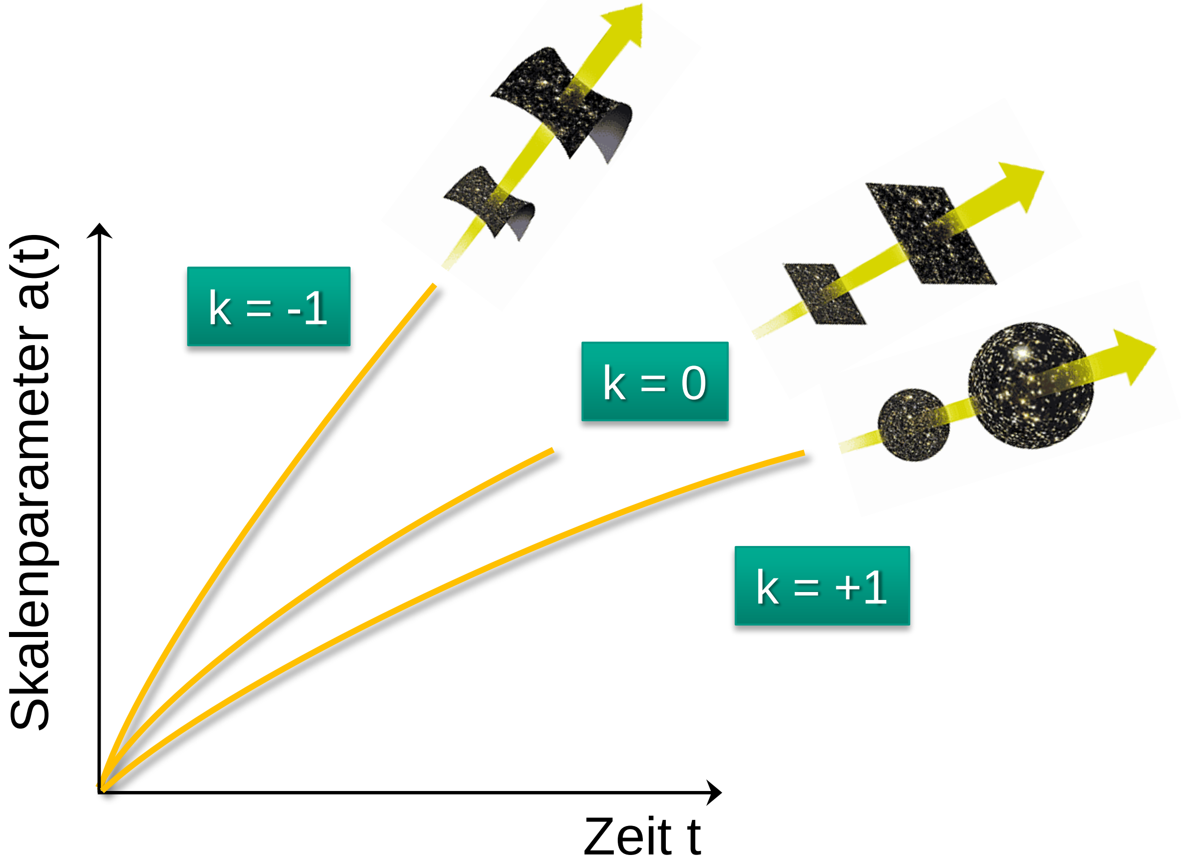


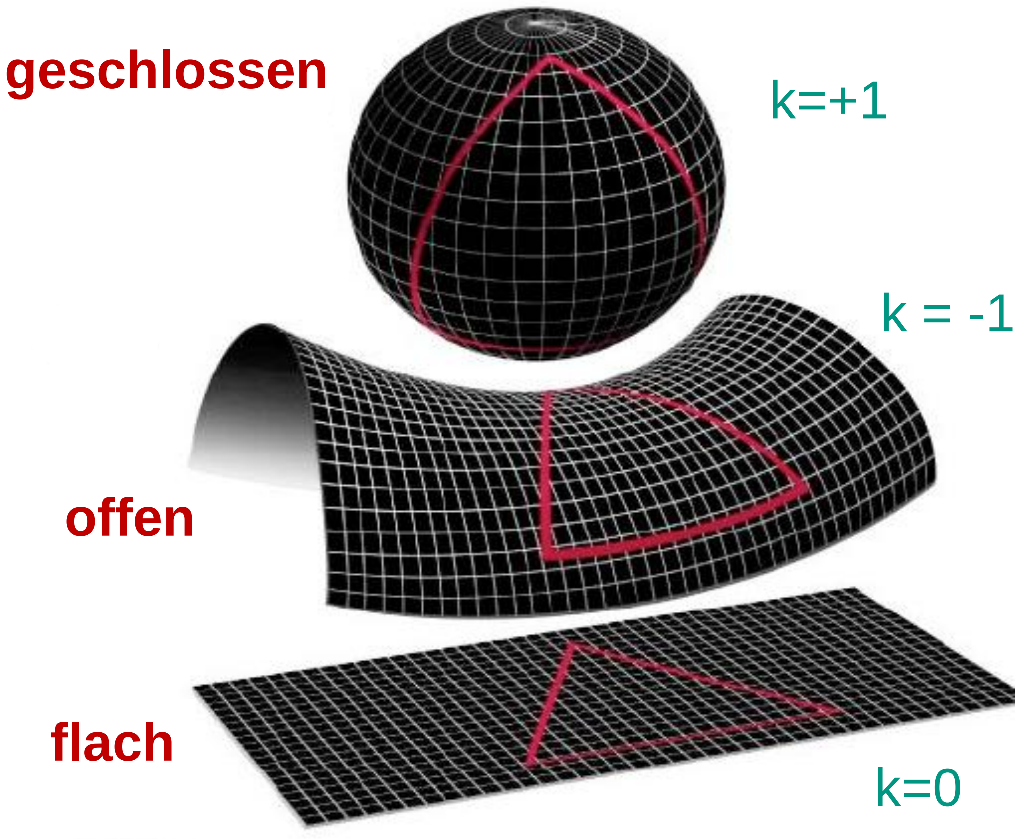


Raumkrümmung und Topologie

- Integrationskonstante k: **Krümmung des Raumes**

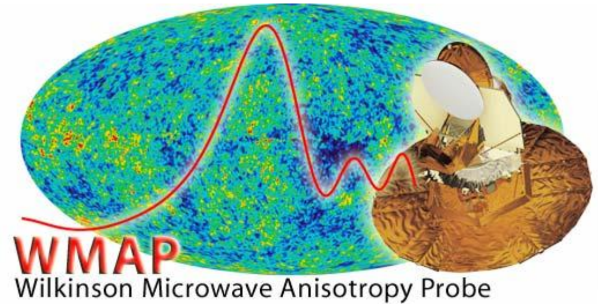
Konstante k	**Krümmung**	**Gesamtenergie**	**Topologie Universum**
k = -1	hyperbolisch	$E_{tot} > 0$	offen
k = 0	euklidisch	$E_{tot} = 0$	flach
k = +1	sphärisch	$E_{tot} < 0$	geschlossen

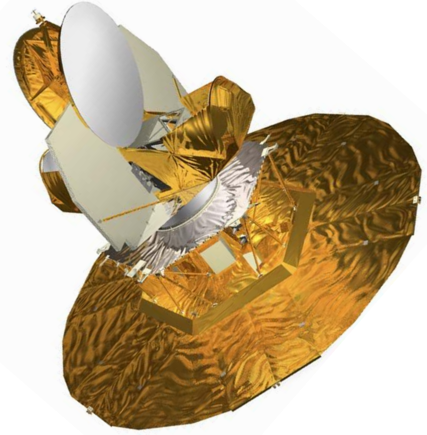

Skalenparameter a(t)
k = -1
k = 0
k = +1
Zeit t

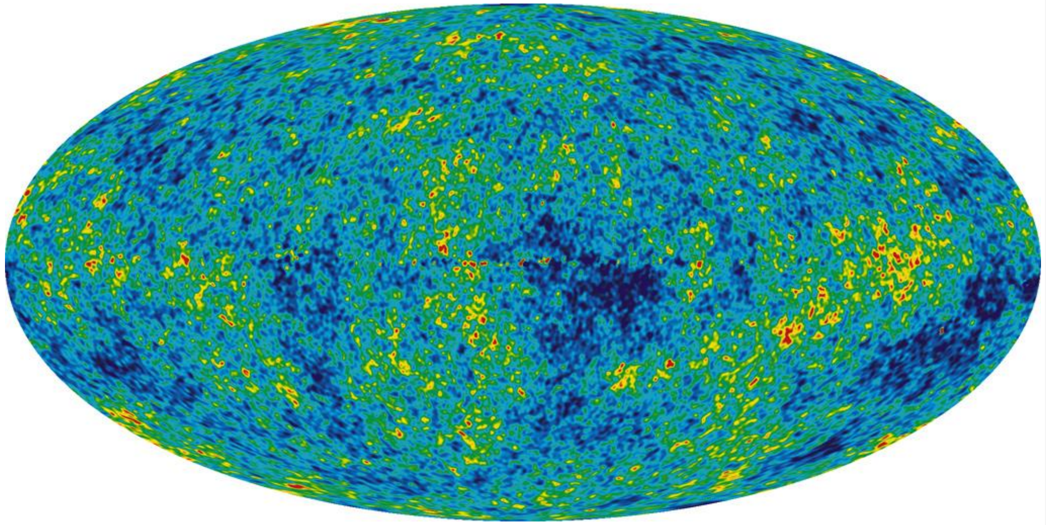

geschlossen
k=+1
k = -1
offen
flach
k=0

Raumkrümmung:

- Experimentelle Befunde zur Topologie unseres Universums:
  Analyse des Leistungsspektrums der 3K Hintergrundstrahlung


WMAP
Wilkinson Microwave Anisotropy Probe



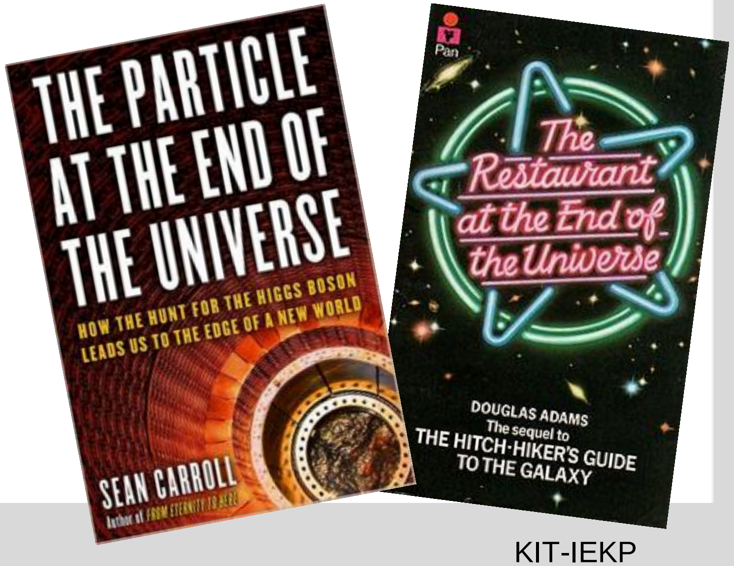


- aktueller experimenteller Wert für Ω_k (WMAP):
  gute Übereinstimmung mit euklid. Geometrie

$$\Omega_k = \frac{-kc^2}{H_0^2 R_{curv}^2}$$

$$\boxed{-0.0178 < \Omega_k < 0.0066}$$ 95%CL.

heutiger Radius $R_{curv} > 22\ h^{-1}$ Gpc für (k=+1)


THE PARTICLE AT THE END OF THE UNIVERSE
HOW THE HUNT FOR THE HIGGS BOSON LEADS US TO THE EDGE OF A NEW WORLD
SEAN CARROLL
Pan
The Restaurant at the End of the Universe
DOUGLAS ADAMS
The sequel to
THE HITCH-HIKER'S GUIDE TO THE GALAXY

Friedmann-Lemaître Gleichungen

- Bewegungsgleichungen für die Expansion eines homogenen & isotropen Universums (**Robertson-Walker Metrik**) :

I. Friedmann-Lemaître Expansionsgleichung

H(t): Hubble-Parameter **k: Krümmung**

$$H^2(t) = \left(\frac{\dot{a}(t)}{a(t)}\right)^2 = \frac{8}{3}\pi G \rho(t) - \frac{k}{a^2(t)} + \frac{\Lambda}{3}$$

Λ: kosmolog. Konstante

ρ(t): Energiedichte **a(t): Skalenfaktor**

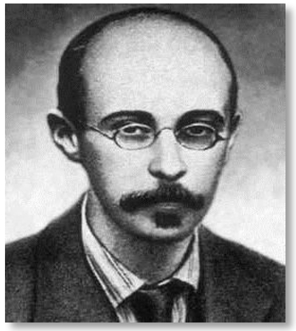
II. Friedmann-Lemaître Expansionsgleichung

ä(t): Beschleunigung des Skalenfaktors

$$\frac{\ddot{a}(t)}{a(t)} = -\frac{4}{3}\pi G\left(\rho(t) + \frac{3P}{c^2}\right) + \frac{\Lambda}{3}$$

$$\rho_V = \frac{\Lambda}{8\pi G}$$

P(t): Druck

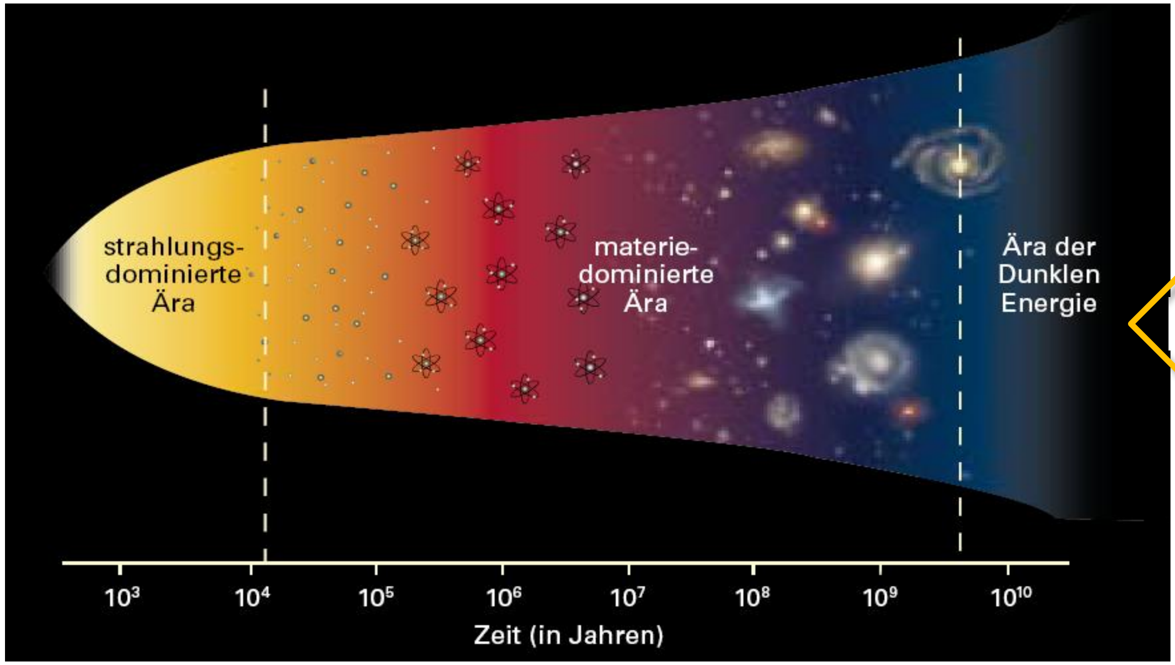


Aleksandr Friedmann (1888 – 1925)

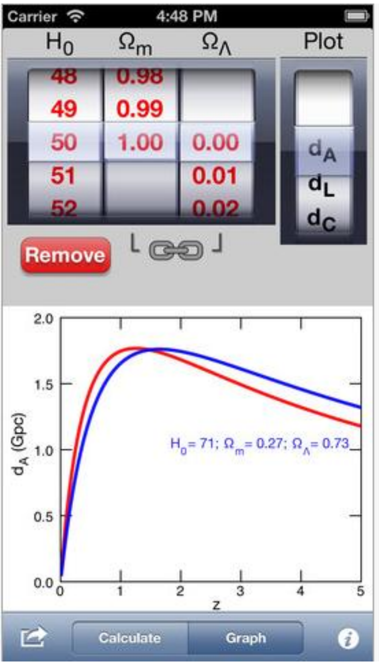
Georges Lemaître (1894 – 1966)

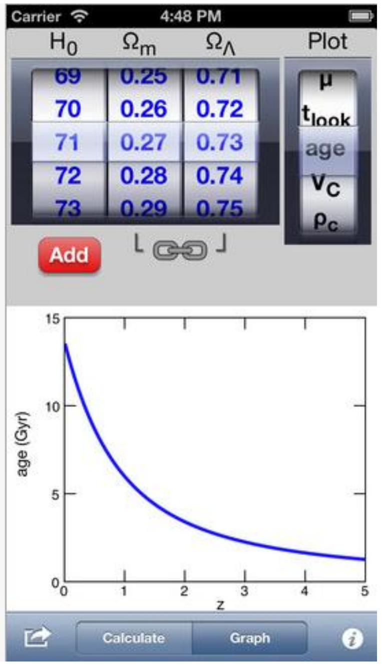
Vergleich Strahlung-Materie-Vakuum

dominante Komponente	Zustands-gleichung	Energiedichte ρ (t)	Skalenparameter a(t)
Strahlung	$P_r = \frac{1}{3} \rho_r c^2$	$\rho_r \sim 1/a^4$	$a(t) = t^{1/2}$
Materie	$P_m = \frac{2}{3} \rho_m c^2 \, v^2/c^2 \sim 0$	$\rho_m \sim 1/a^3$	$a(t) \sim t^{2/3}$
Vakuumenergie	$P_V = - \rho_V c^2$	$\rho_V = \text{const.}$	$a(t) \sim e^{\alpha t}, \alpha = \sqrt{\Lambda/3}$


strahlungs-dominierte Ära
materie-dominierte Ära
Ära der Dunklen Energie
10^3
10^4
10^5
10^6
10^7
10^8
10^9
10^{10}
Zeit (in Jahren)

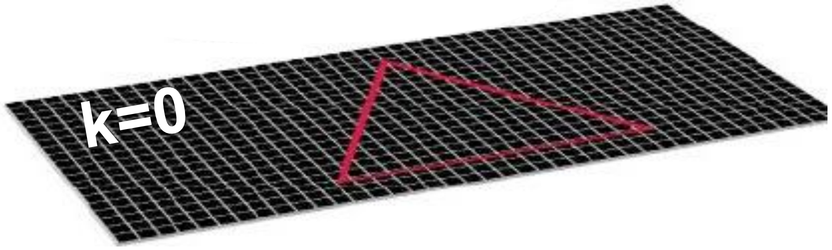
CosmoCalc


Carrier
4:48 PM
H_0
Ω_m
Ω_Λ
Plot
48 0.98
49 0.99
50 1.00 0.00
51 0.01
52 0.02
d_A
d_L
d_C
Remove
2.0
1.5
1.0
0.5
0.0
d_A (Gpc)
$H_0 = 71$; $\Omega_m = 0.27$; $\Omega_\Lambda = 0.73$
0 1 2 3 4 5
z
Calculate
Graph


Carrier
4:48 PM
H_0
Ω_m
Ω_Λ
Plot
69 0.25 0.71
70 0.26 0.72
71 0.27 0.73
72 0.28 0.74
73 0.29 0.75
μ
t_{look}
age
V_C
ρ_C
Add
15
10
5
0
age (Gyr)
0 1 2 3 4 5
z
Calculate
Graph

kritische Dichte

- für ein flaches Universum mit k = 0
  kritische Dichte ρ_C im *heutigen* Universum:



$$\rho_c = \frac{3}{8\pi G} H_0^2 = 9.2 \times 10^{-27} \frac{kg}{m^3}$$

= 5.1 GeV / m³ (d.h. ~5 Protonen pro m³)

- ausgedrückt als dimensionsloser Parameter **Ω** (Verhältnis der aktuellen zur kritischen Dichte):

$$\boxed{\Omega = \frac{\rho}{\rho_c} = 1}$$

- dimensionsloses Verhältnis: (Anteile an kritischer Dichte)

$$\boxed{\Omega_i = \frac{\rho_i}{\rho_c}}$$

- mit den Anteilen:

$$\boxed{\Omega = \Omega_m + \Omega_r + \Omega_V = 1}$$

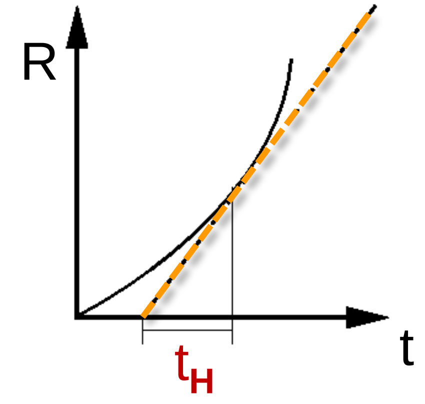
- falls k ≠ 0:

$$\boxed{\Omega = \Omega_m + \Omega_r + \Omega_V + \Omega_k = 1}$$

Hubble Zeit und H_0

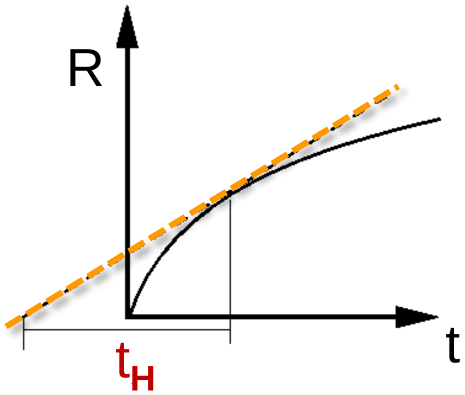
- **Hubble-Zeit t_H**: gleichförmige kosmische Expansion mit $H(t) = \text{const.} = H_0$

$$\boxed{t_H = \frac{1}{H_0}} \qquad H_0 = \frac{72\,km/s}{Mpc} = 2.3\times10^{-18}\,s^{-1} \quad \Longrightarrow \quad t_H = \frac{1}{2.3\times10^{-18}}\,s = 13.8\times10^{9}\ Jahre$$



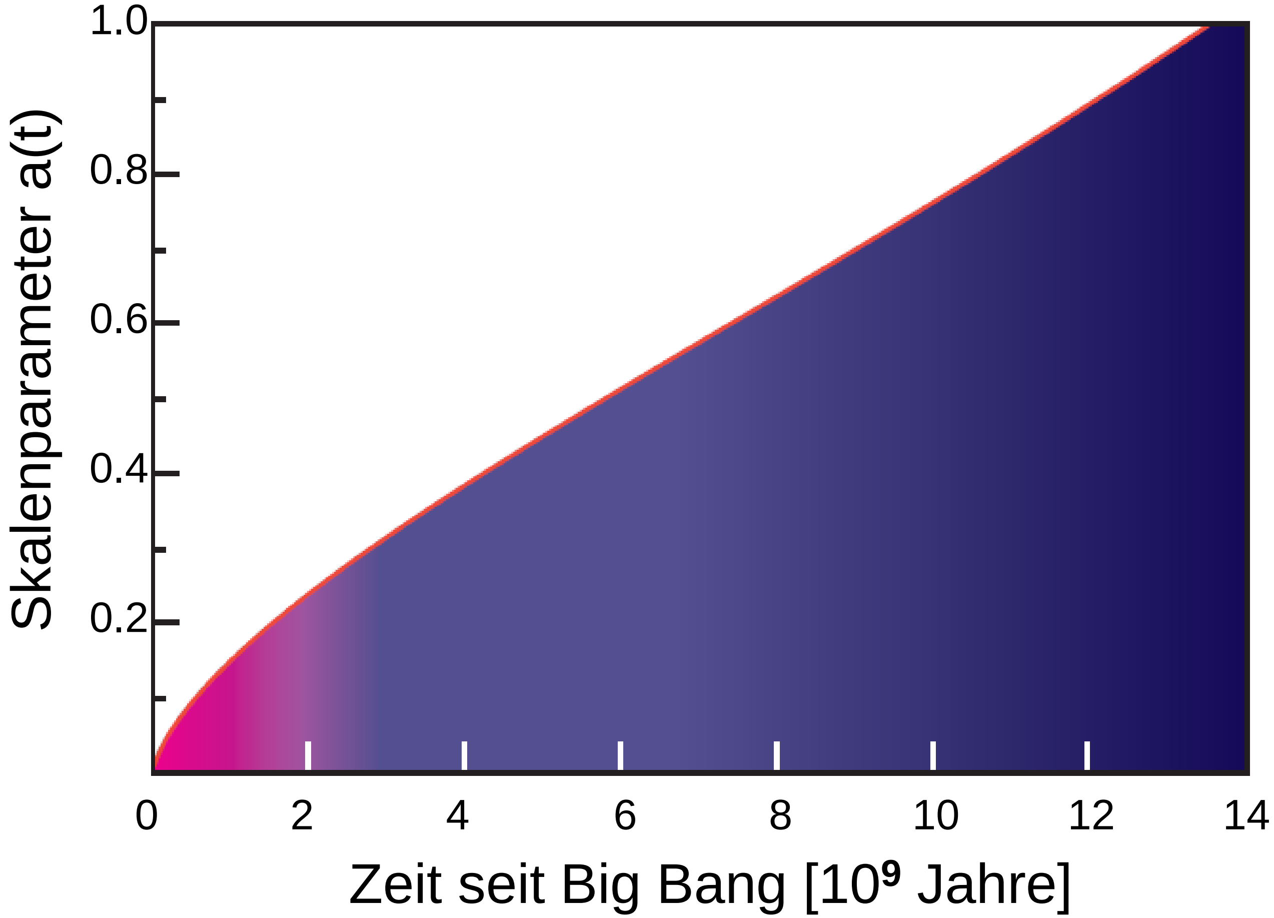
beschleunigte Expansion

$\rho < \rho_c$



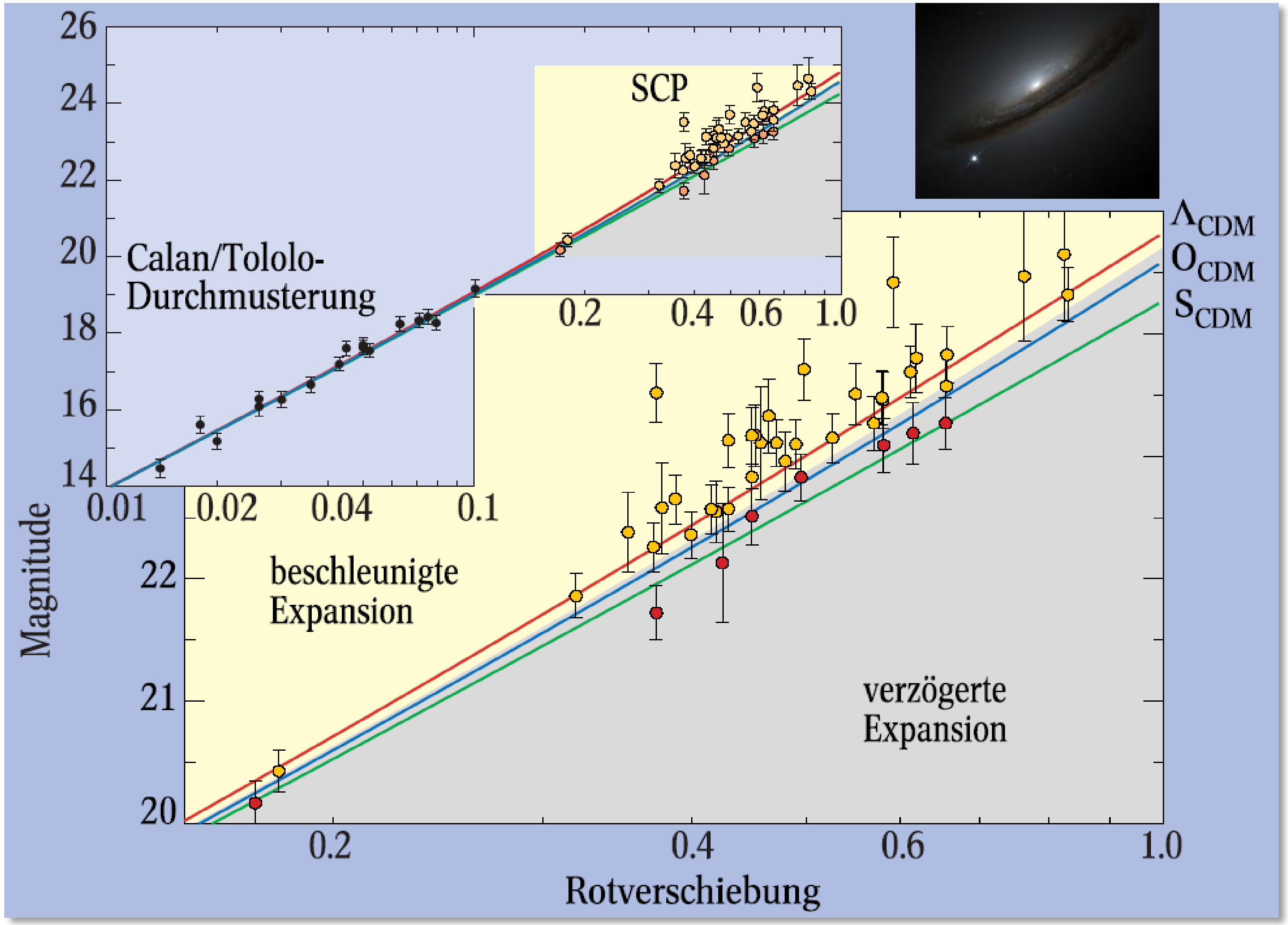
gebremste Expansion

$\rho > \rho_{crit}$

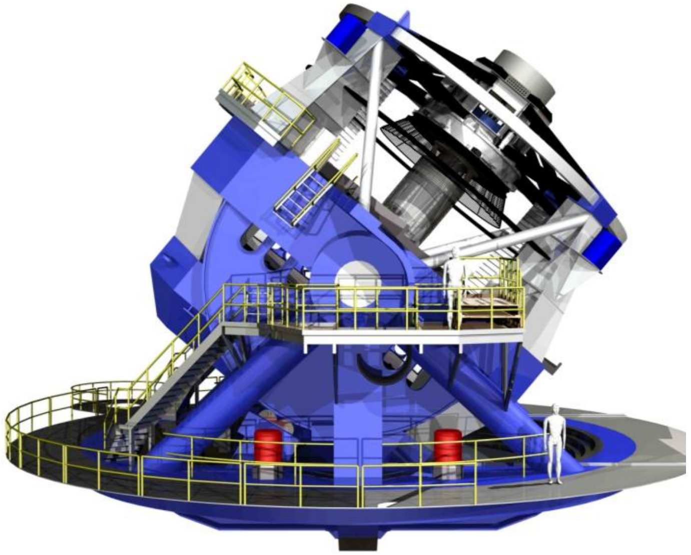


SNae Ia & die Entwicklung des Universums

- **SNIa**: weit entfernte SNIa erscheinen lichtschwächer als erwartet
  $\Omega_V \sim 0.7$ ⇨ beschleunigte kosmische Expansion (vgl. Kap. 4.5)

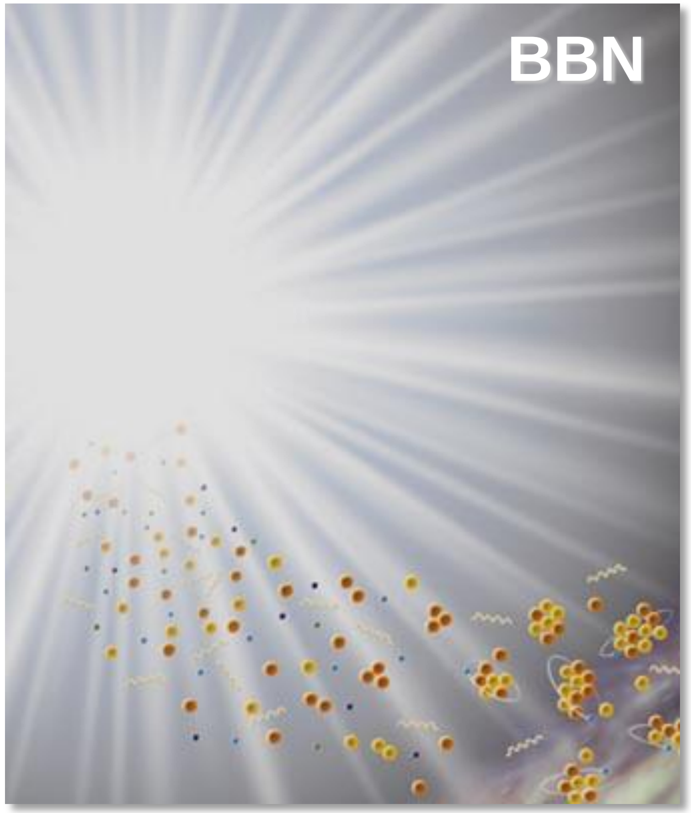


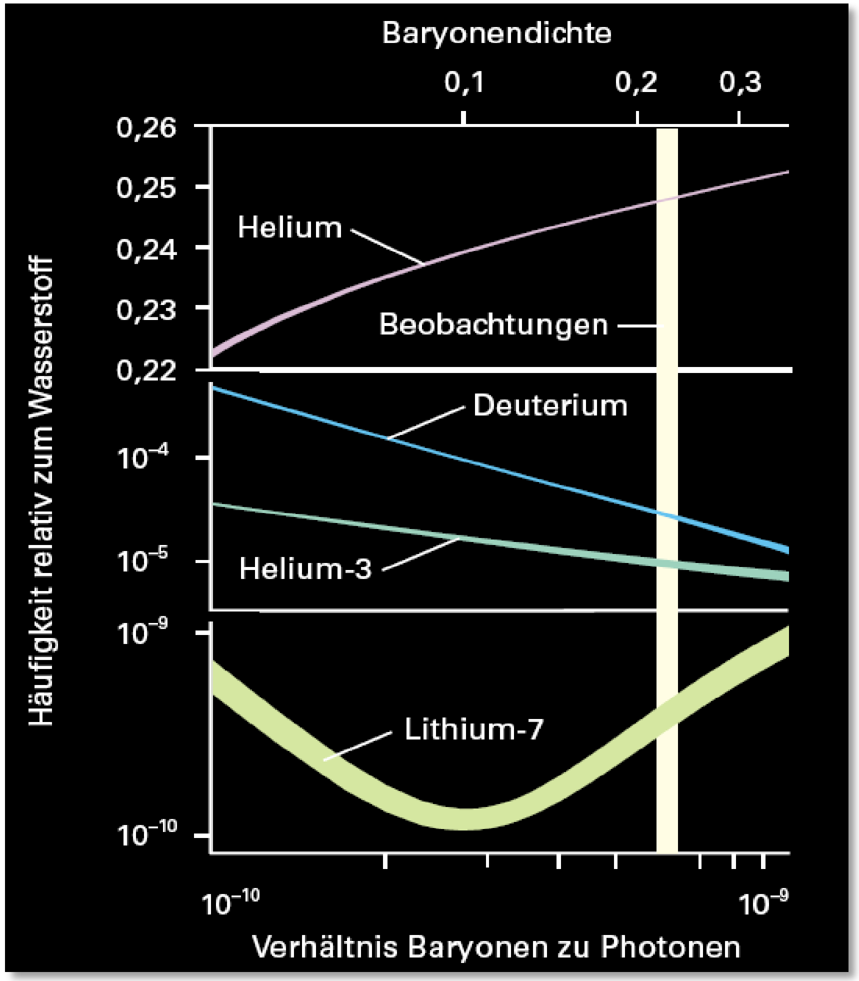
LSST – Large Synoptic Survey Telescope

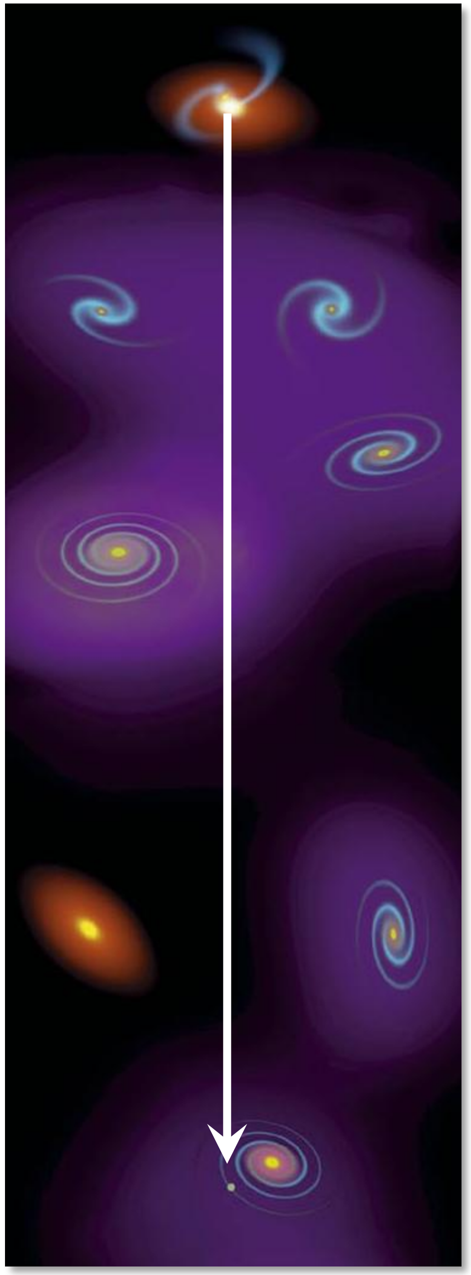


- weltweite große Anstrengungen zur Messung von Ω_V mit Teleskopen/Satelliten

2.1 Primordiale Nukleosynthese





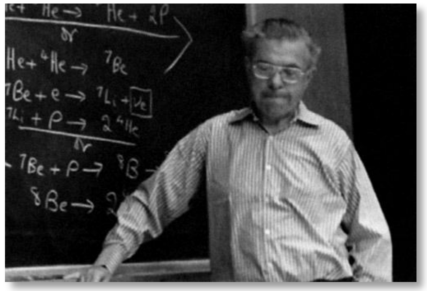


ALFR. NOBEL
NAT. MDCCC XXXIII OB. MDCCC XCVI

NUCLEAR ALCHEMIST 1

Willy
Fowler

Fred Hoyle



Primordiale Nukleosynthese - Historie

1940: G. Gamov & R. Alpher – alle Elemente entstehen im frühen Universum durch Neutroneinfang & ß-Zerfall

1957: W. Fowler et al. – schwere Elemente nur in Sternen

1964: F. Hoyle et al. – He-4 Produktion ist primordial

1965: J. Peebles – erste moderne BBN Berechnung

1970: H. Reeves – Deuterium zur Messung der Baryonendichte

1977: Schramm et al. – BBN beschränkt die Anzahl der ν–Generationen (Link: Teilchenphysik-Kosmologie)

1982: Spite & Spite beobachten ein Plateau von Li-7 in Sternen

1992: COBE misst Fluktuationen der 3 K Hintergrundstrahlung

2003: WMAP misst präzise den Baryonenanteil Ω_b in der CMBR in Übereinstimmung mit BBN

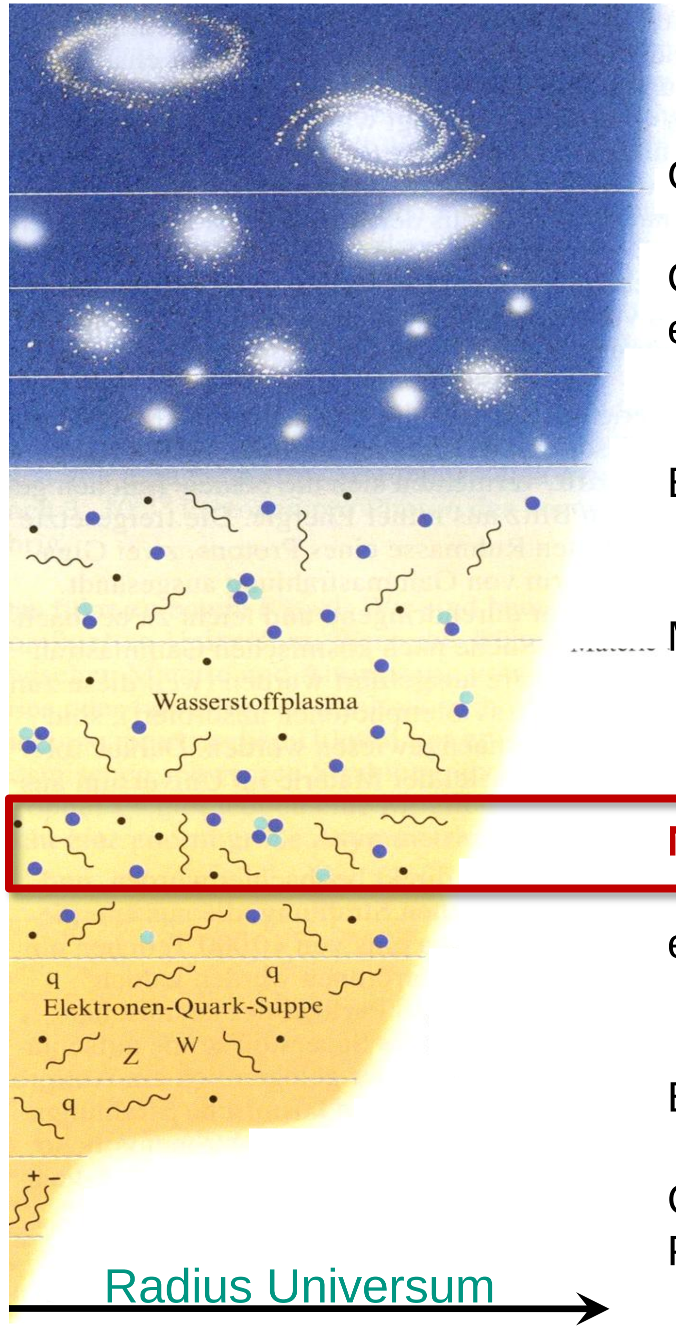
George Gamov

Ralph Alpher

Primordiale Nukleosynthese – Grundlagen

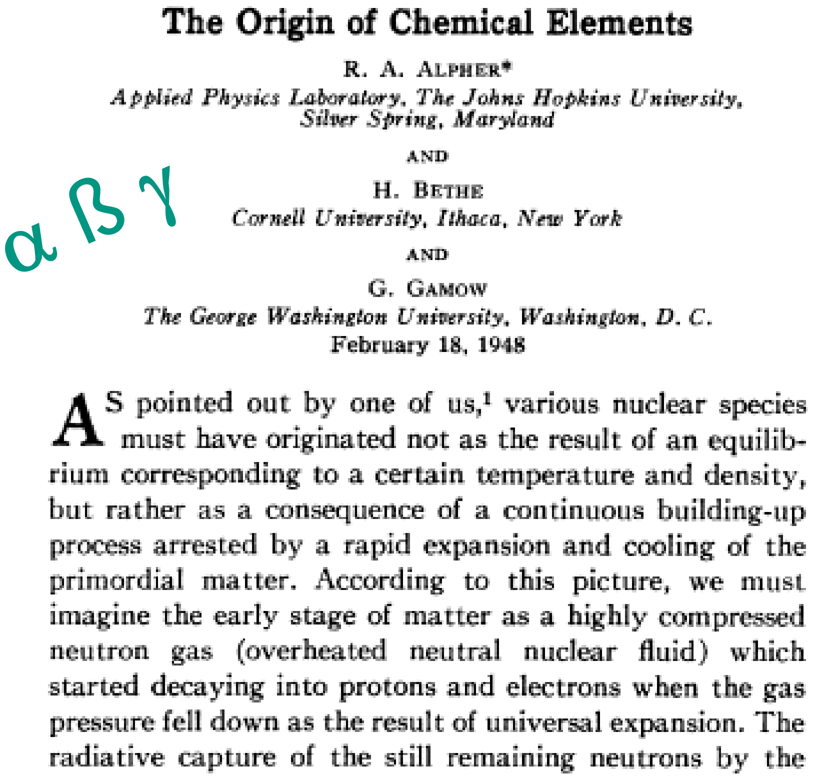
- **BBN (Big Bang Nukleosynthese):**
  - beschreibt die Entstehung der leichten Elemente (**D**, **^{3}He**, **^{4}He**, **^{7}Li**) in den **ersten drei Minuten** nach den Urknall (die ´thermonukleare Explosion´ des Universums) im Intervall T = $10^9 – 10^{11}$ K
  - sagt beobachtete Häufigkeiten der leichten Elemente korrekt voraus (Variation über 10 Größenordnungen!)
  - wesentlicher Stützpfeiler der Big Bang Theorie
  - ermöglicht Einblicke in die Physik des frühen Universums
  - wesentliche Motivation: genaue Bestimmung von Baryonendichte Ω_b bzw. **Verhältnis η (Baryonen/Photonen)**
  - guter Testfall für neue Theorien (Anzahl ν–Generationen, sterile Neutrinos, neuartige Teilchen - Gravitinos): **Astroteilchenphysik**
  - wichtiger Teil der Nuklearen Astrophysik (Elementsynthese in Sternen)

Nukleosynthese – zeitliche Einordnung



Galaxien	3 Mrd. Jahre
Quasare	1 Mrd. Jahre
erste Sterne	100 Mio. Jahre
Entkopplung CMBR	300000 Jahre
Materie dominiert	10000 Jahre
Nukleosynthese	**3 min.**
e+-e$^-$ Zerstrahlung	1 s
Baryonenerzeugung	
Große Vereinheitlichung Planck Epoche	

α β γ

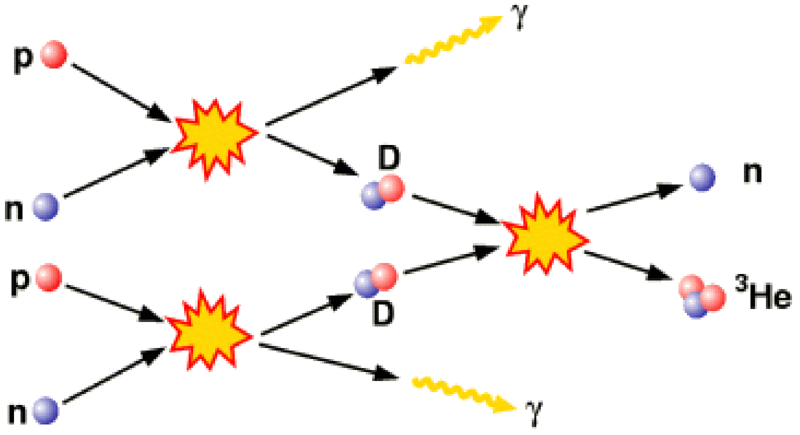


The Origin of Chemical Elements

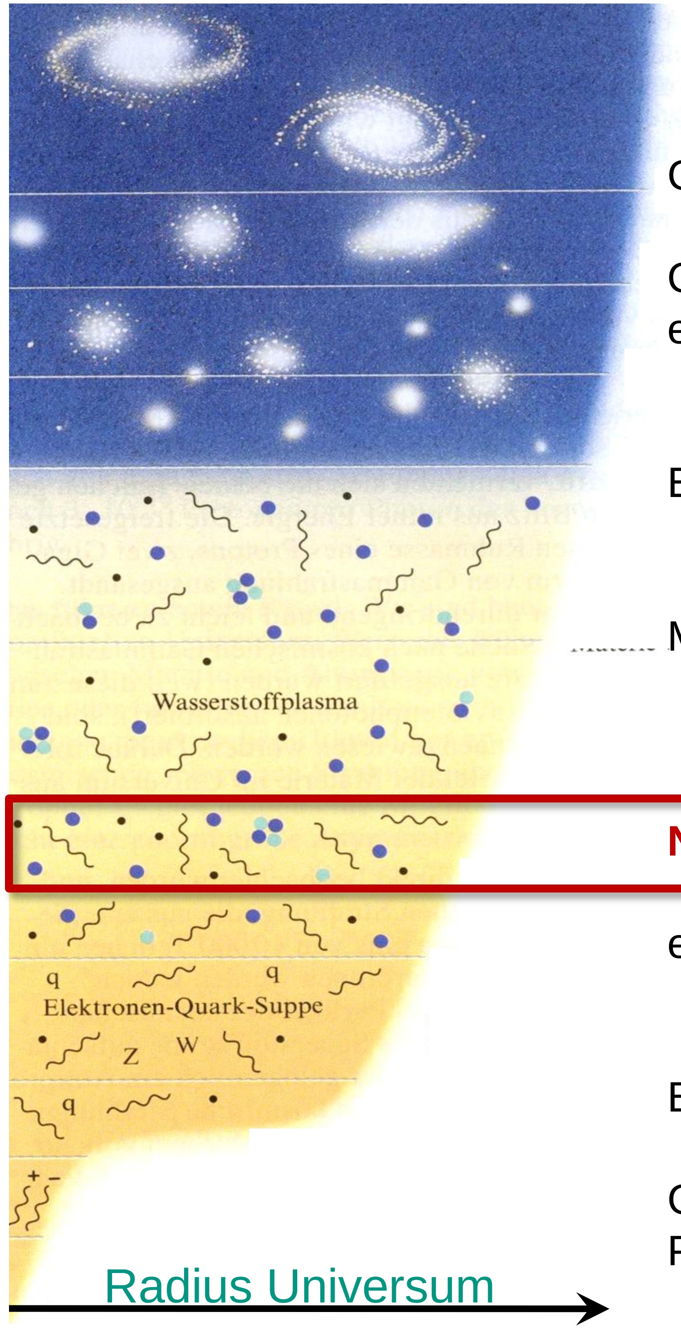
R. A. Alpher*
Applied Physics Laboratory, The Johns Hopkins University, Silver Spring, Maryland
and
H. Bethe
Cornell University, Ithaca, New York
and
G. Gamow
The George Washington University, Washington, D. C.
February 18, 1948

AS pointed out by one of us,[1] various nuclear species must have originated not as the result of an equilibrium corresponding to a certain temperature and density, but rather as a consequence of a continuous building-up process arrested by a rapid expansion and cooling of the primordial matter. According to this picture, we must imagine the early stage of matter as a highly compressed neutron gas (overheated neutral nuclear fluid) which started decaying into protons and electrons when the gas pressure fell down as the result of universal expansion. The radiative capture of the still remaining neutrons by the

T= 0.1 – 10 MeV



Nukleosynthese – zeitliche Einordnung

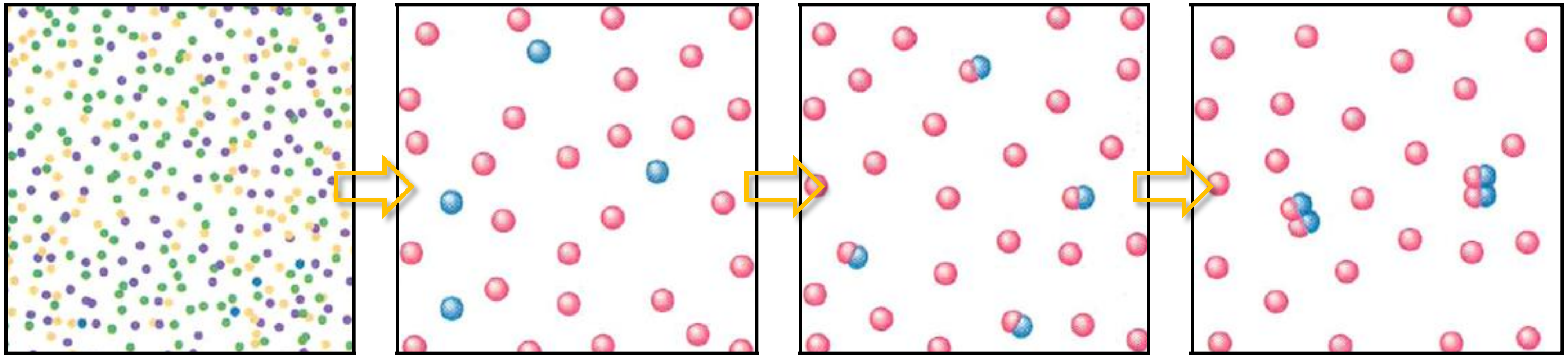

Wasserstoffplasma
q
q
Elektronen-Quark-Suppe
Z
W
q
Radius Universum

Galaxien	3 Mrd. Jahre
Quasare erste Sterne	1 Mrd. Jahre 100 Mio. Jahre
Entkopplung CMBR	300000 Jahre
Materie dominiert	10000 Jahre
Nukleosynthese	**3 min.**
e^+-e^- Zerstrahlung	1 s
Baryonenerzeugung	
Große Vereinheitlichung Planck Epoche	

…the elements were cooked
in less time than it takes
to cook a dish of duck
and rost potatoes…

G. Gamov

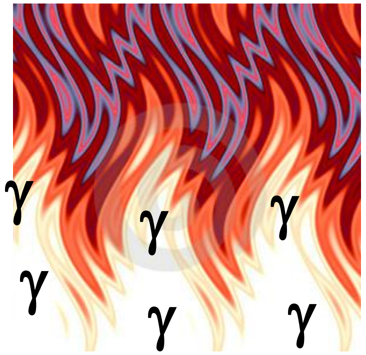
Nukleosynthese – Grundlagen



Quark-Gluon Plasma | **Nukleonen n/p ~1/7** | **Deuterium-Bildung** | **Helium-Bildung**

- **Hadronisation:**
  - Protonen
  - Neutronen

Photodesintegration

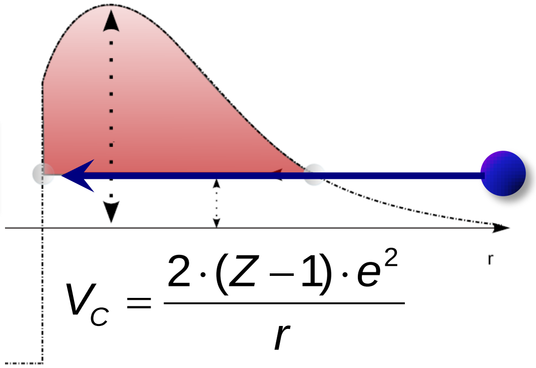


$T = 5 \times 10^{10}$ K

obere Grenze

Fusionsreaktionen

Coulombwall



$$V_C = \frac{2 \cdot (Z-1) \cdot e^2}{r}$$

$T = 5 \times 10^8$ K

untere Grenze

Nukleosynthese – I: therm. Gleichgewicht

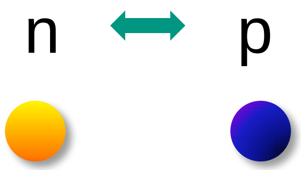
Phase - I

E = 10 MeV

T = 10^{11} K

t = 0.01 s

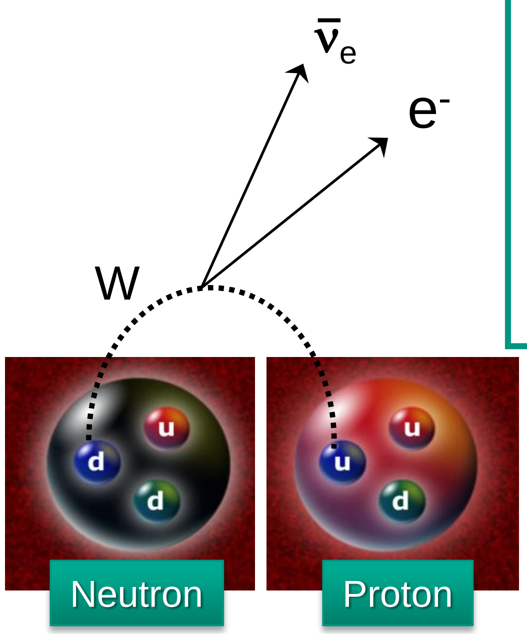
- Protonen & Neutronen sind im **thermischen Gleichgewicht**



$$\frac{n}{p} = e^{-\frac{\Delta mc^2}{kT}}$$

n-p Massendifferenz $\Delta mc^2 = 1.3$ MeV

$= (m_n - m_p) \cdot c^2$



$$p + e^- \leftrightarrow n + \nu_e$$

$$p + \bar{\nu}_e \leftrightarrow n + e^+$$

$$p + e^- + \bar{\nu}_e \leftrightarrow n$$

- Umwandlungen **n → p , p → n** nur durch schwache Ww. (Isospin!) aber: Rate dieser Prozesse sinkt rasch bei fallender Temperatur T

$\Gamma(pe \rightarrow n\nu) \sim G_F^2\, T^5$

für $T \gg Q, m_e$

Nukleosynthese – II: Ausfrieren

Phase - II

E = 1 MeV

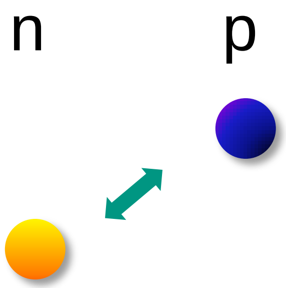
$T_f = 10^{10}$ K

t = 1 s

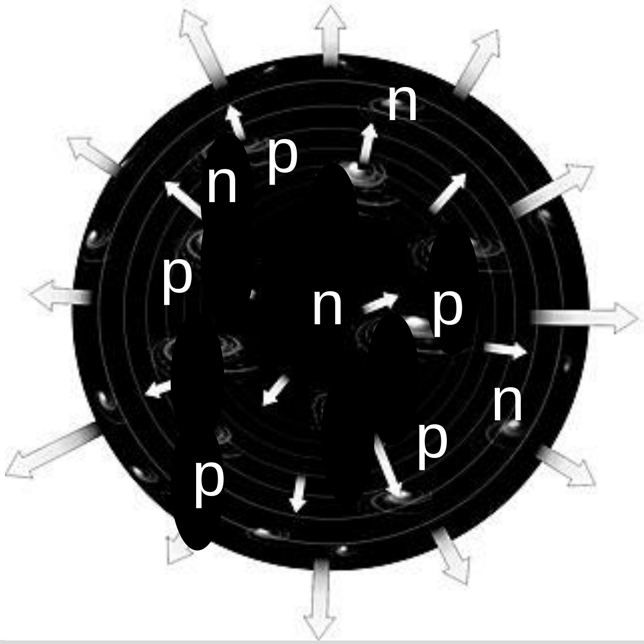
- Protonen und Neutronen **nicht** im thermischen Gleichgewicht
  - Γ**(schwache Wechselwirkung) ~ $G_F^2 \cdot T^5$**
  - **H (Expansionsrate) ~ $(g_* \, g_N)^{1/2}\, T^2$**

schwache Wechselwirkung friert aus (entkoppelt) T_f = 1MeV

Verhältnis $\Gamma / \mathbf{H \sim (T/0.8\,MeV)^3}$



$$\boxed{\frac{n}{p} = e^{-\frac{\Delta mc^2}{kT_f}} \approx \frac{1}{6}}$$



Ausfrieren ist fundamentaler Mechanismus:
CMB, Neutrinos, WIMPs, Wechselwirkungen

Nukleosynthese – III : Neutronzerfall

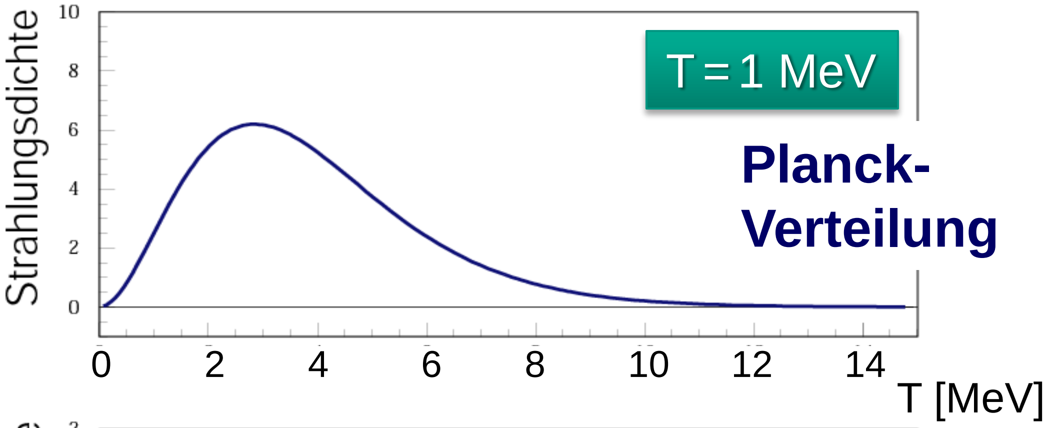
Phase - III

E > 0.1 MeV

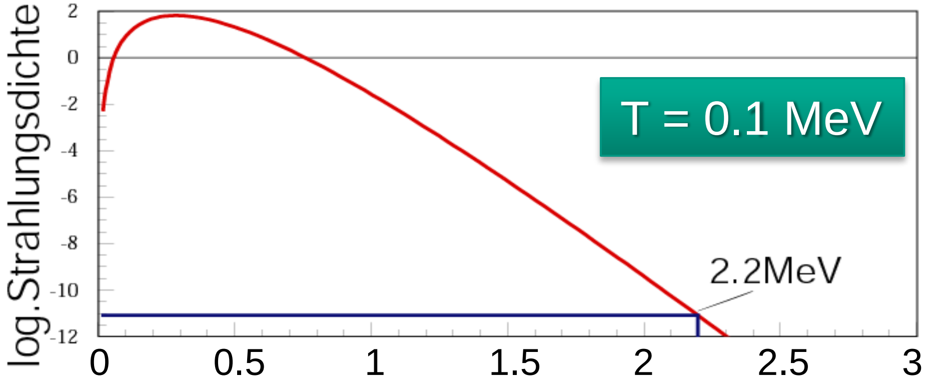
t = 1 s – 1 min

a) Neutronen zerfallen durch schwache Wechselwirkung

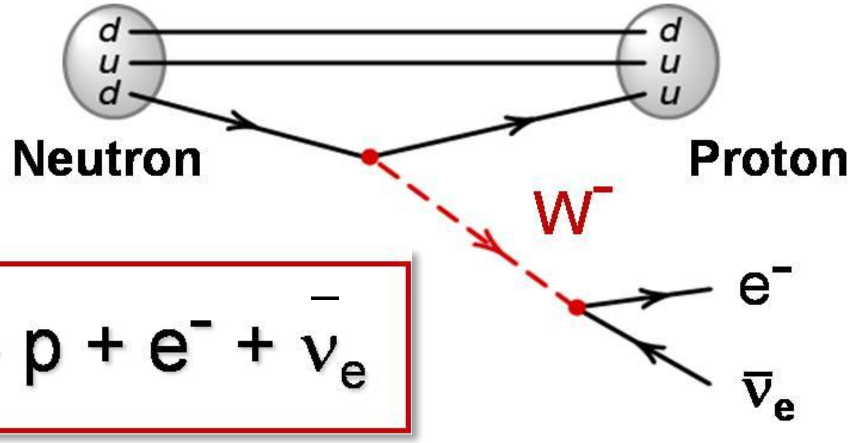
b) noch keine Nukleosynthese-Reaktionen, da alle gebildeten Kerne durch Gammaquanten (CMB) dissoziiert werden



Planck-Verteilung



τ = 887s



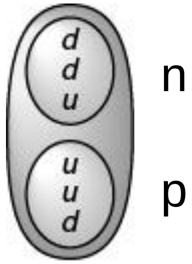
$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

- Deuterium wird von CMB Gammas mit E_γ > 2.2 MeV aufgebrochen, T muss daher von T = 1 MeV auf T = 0.1 MeV fallen!

Nukleosynthese – IV: Kernreaktionen

Phase - IV **E = 0.1 MeV** $\mathbf{T_{BBN} = 10^9\ K}$ **$\mathbf{t_{BBN}}$ = 1 – 3 min.**

D

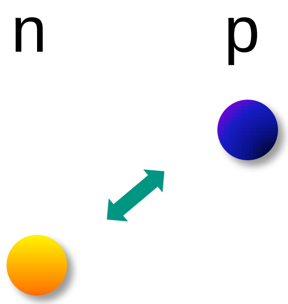


- **Protonen und Neutronen fusionieren zu leichten Elementen**

  $n + p \rightarrow D + \gamma$ (E_b von D = 2.2 MeV)

  praktisch alle Neutronen werden in ^{4}He eingebaut

  nach $t = t_{BBN}$ ist das Verhältnis n/p weiter leicht gefallen auf:



$$\frac{n}{p} = e^{-\frac{\Delta mc^2}{kT}} \approx \frac{1}{7}$$

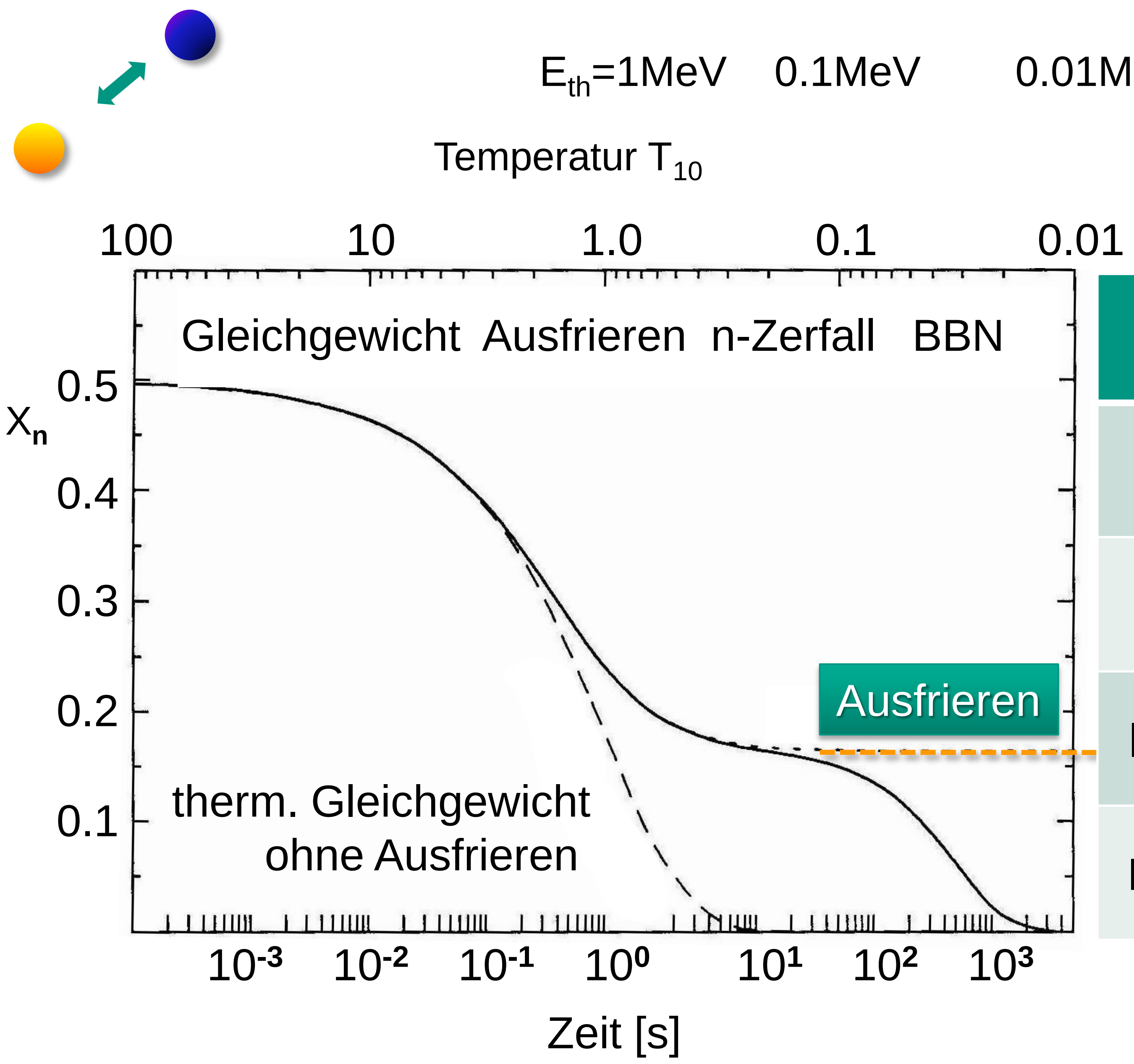
- Ausgangsverhältnis für Nukleosynthese

$$Y_p = \frac{2n_n}{n_n + n_p} = \frac{2\left(\frac{n}{p}\right)}{\left(\frac{n}{p}\right)+1} \approx 0.25$$

- mit einem n/p – Verhältnis von 1/7 ergibt sich ein ^{4}He Massenanteil

  $\mathbf{Y_p}$ ~ 25% (d.h. ^{1}H ~ 75%)

Nukleosynthese – die 4 Phasen im Überblick

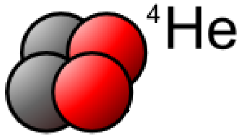


n/p Verhältnis:

$$\boxed{X_n = \frac{N(n)}{N(p)+N(n)}}$$

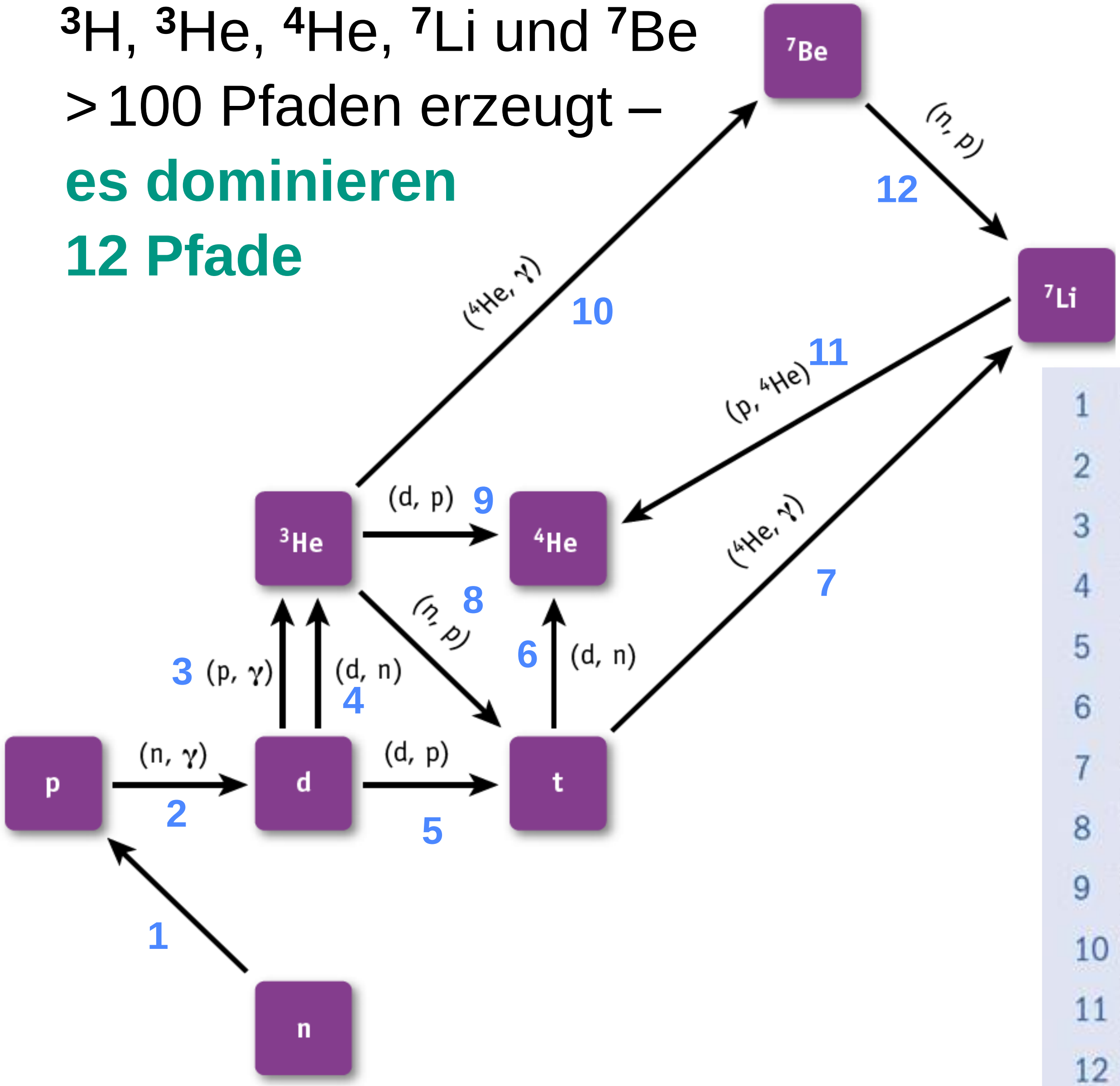
	die 4 Epochen der Big Bang Nukleosynthese	
I	thermisches Gleichgewicht	$T = 10^{11}$ K t = 0.01 s
II	Ausfrieren der schwachen Ww.	$T = 10^{10}$ K t = 1 s
III	Neutronen-zerfall	$T > 10^{9}$ K t ~ 1 min.
IV	Fusions-reaktionen	$T = 10^{9}$ K t >1 min.

alle n in He-4:
Ende der BBN



Haupt-Reaktionen im BBN-Netzwerk

- in den ersten 3 Minuten werden in der BBN aus p und n ^{3}H, ^{3}He, ^{4}He, ^{7}Li und ^{7}Be in über >100 Pfaden erzeugt – **es dominieren 12 Pfade**



^{7}Be
(n, p)
12
^{7}Li
(^{4}He, γ)
10
(p, ^{4}He)
11
(^{4}He, γ)
7
^{3}He
(d, p)
9
^{4}He
(n, p)
8
3
(p, γ)
(d, n)
4
6
(d, n)
p
(n, γ)
2
d
(d, p)
5
t
1
n

1 $n \longrightarrow {}^1H + e^- + \bar{\nu}$

2 ${}^1H + n \longrightarrow {}^2H + \gamma$

3 ${}^2H + {}^1H \longrightarrow {}^3He + \gamma$

4 ${}^2H + {}^2H \longrightarrow {}^3He + n$

5 ${}^2H + {}^2H \longrightarrow {}^3H + {}^1H$

6 ${}^2H + {}^3H \longrightarrow {}^4He + n$

7 ${}^3H + {}^4He \longrightarrow {}^7Li + \gamma$

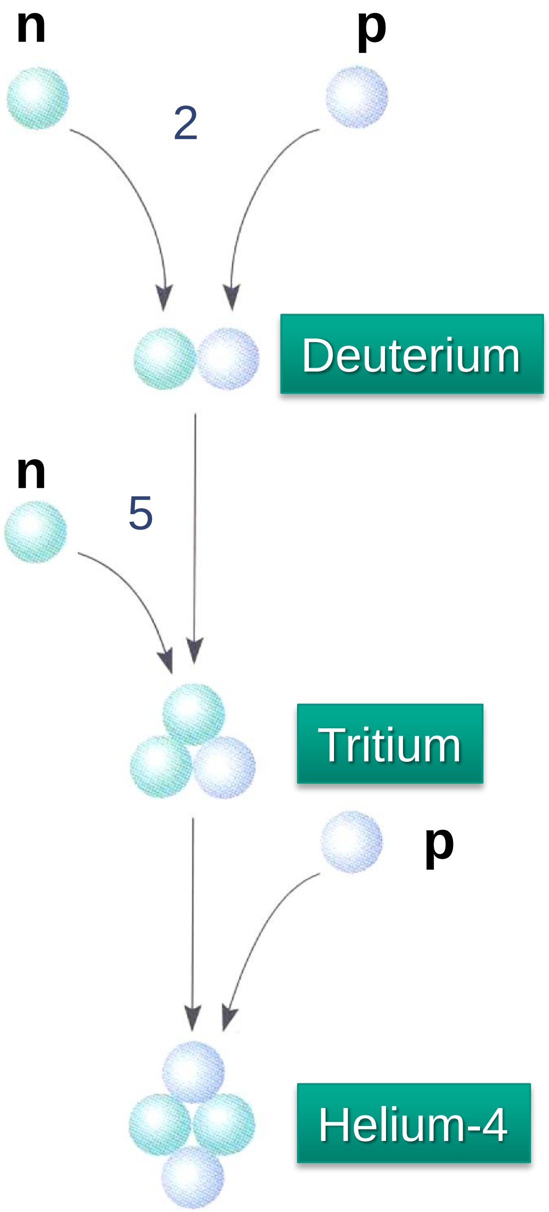
8 ${}^3He + n \longrightarrow {}^3H + {}^1H$

9 ${}^3He + {}^2H \longrightarrow {}^4He + {}^1H$

10 ${}^3He + {}^4He \longrightarrow {}^7Be + \gamma$

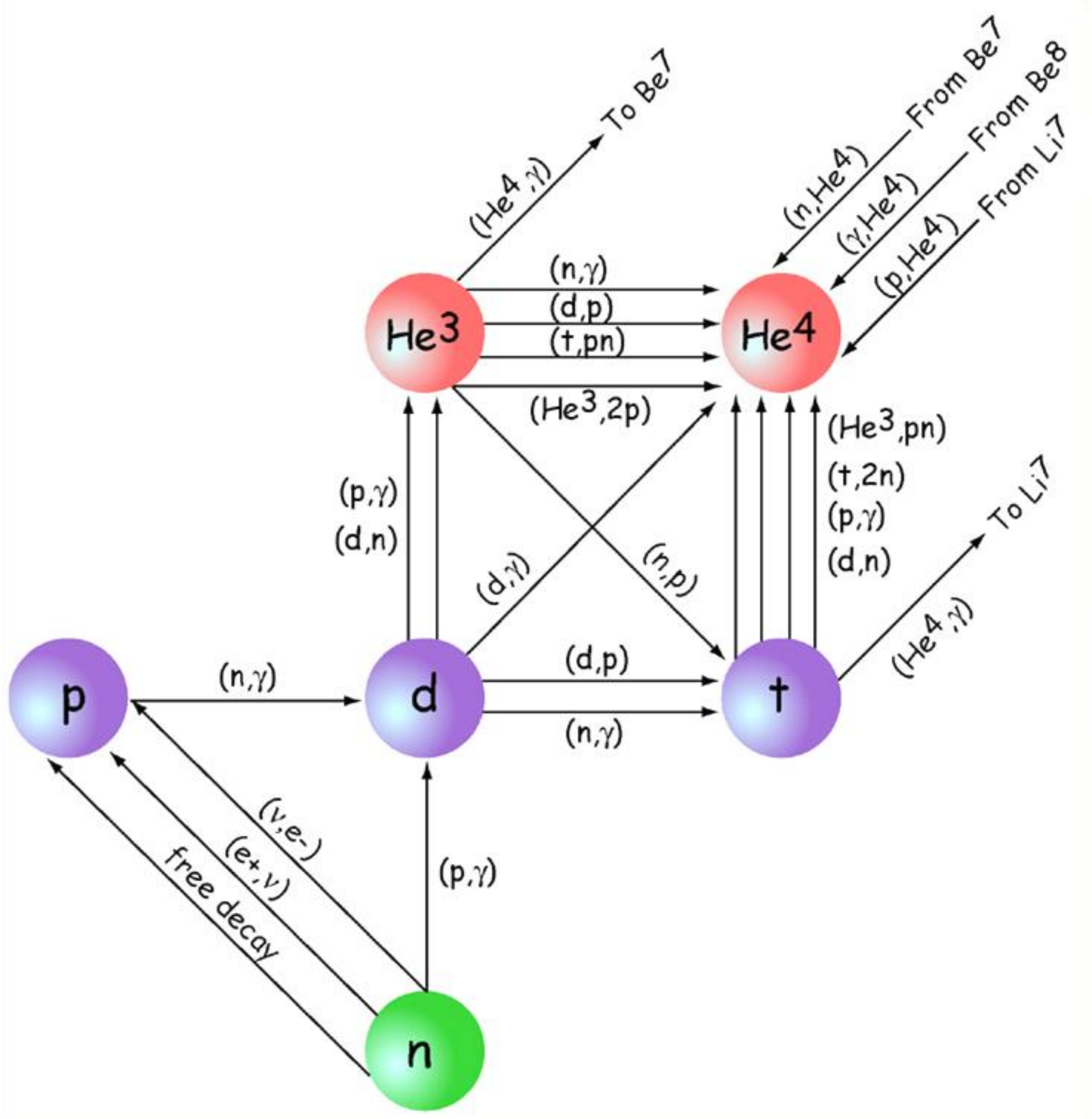
11 ${}^7Li + {}^1H \longrightarrow {}^4He + {}^4He$

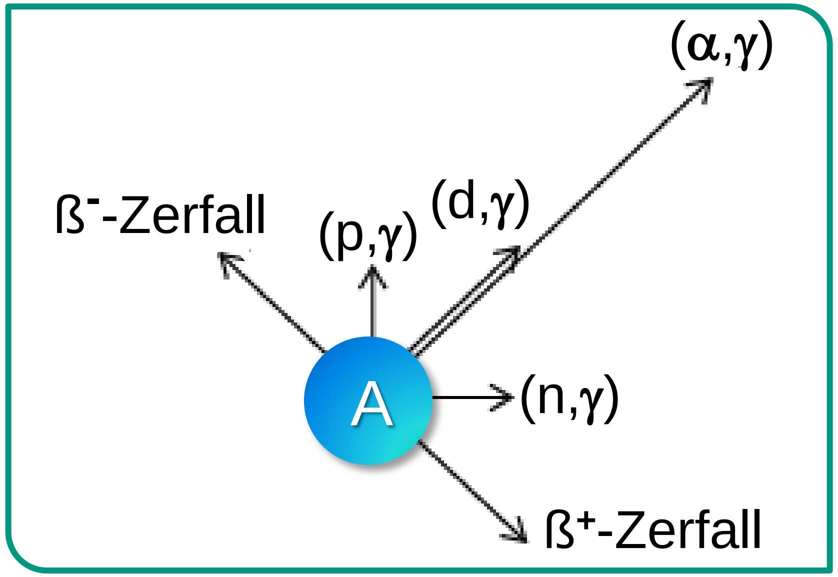
12 ${}^7Be + n \longrightarrow {}^7Li + {}^1H$



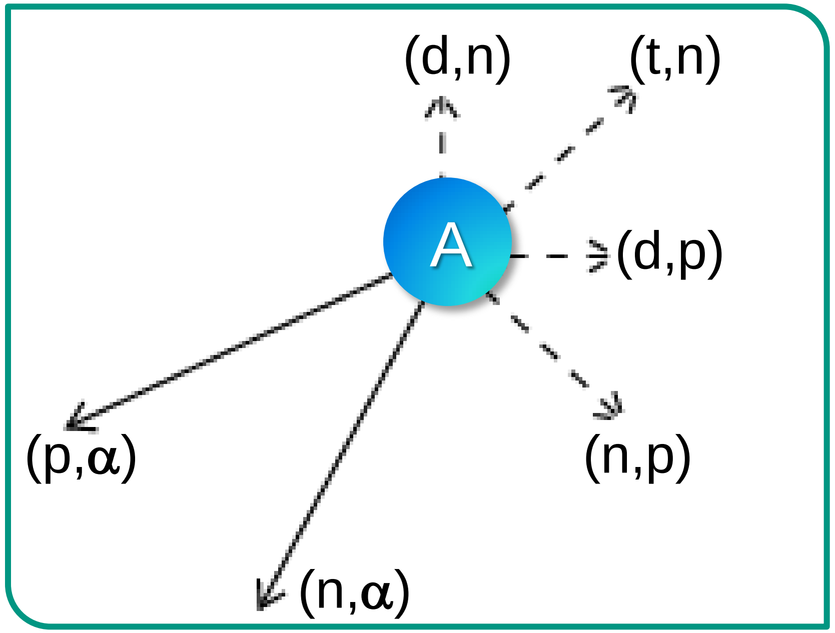
n
p
2
Deuterium
n
5
Tritium
p
Helium-4

Reaktions-Netzwerk: alle möglichen Pfade


To Be7
(He4,γ)
From Be7
From Be8
From Li7
(n,He4)
(γ,He4)
(p,He4)
He3
He4
(n,γ)
(d,p)
(t,pn)
(He3,2p)
(p,γ)
(d,n)
(d,γ)
(n,p)
(He3,pn)
(t,2n)
(p,γ)
(d,n)
To Li7
(He4,γ)
p
(n,γ)
d
(d,p)
(n,γ)
t
(ν,e-)
(e+,ν)
free decay
(p,γ)
n

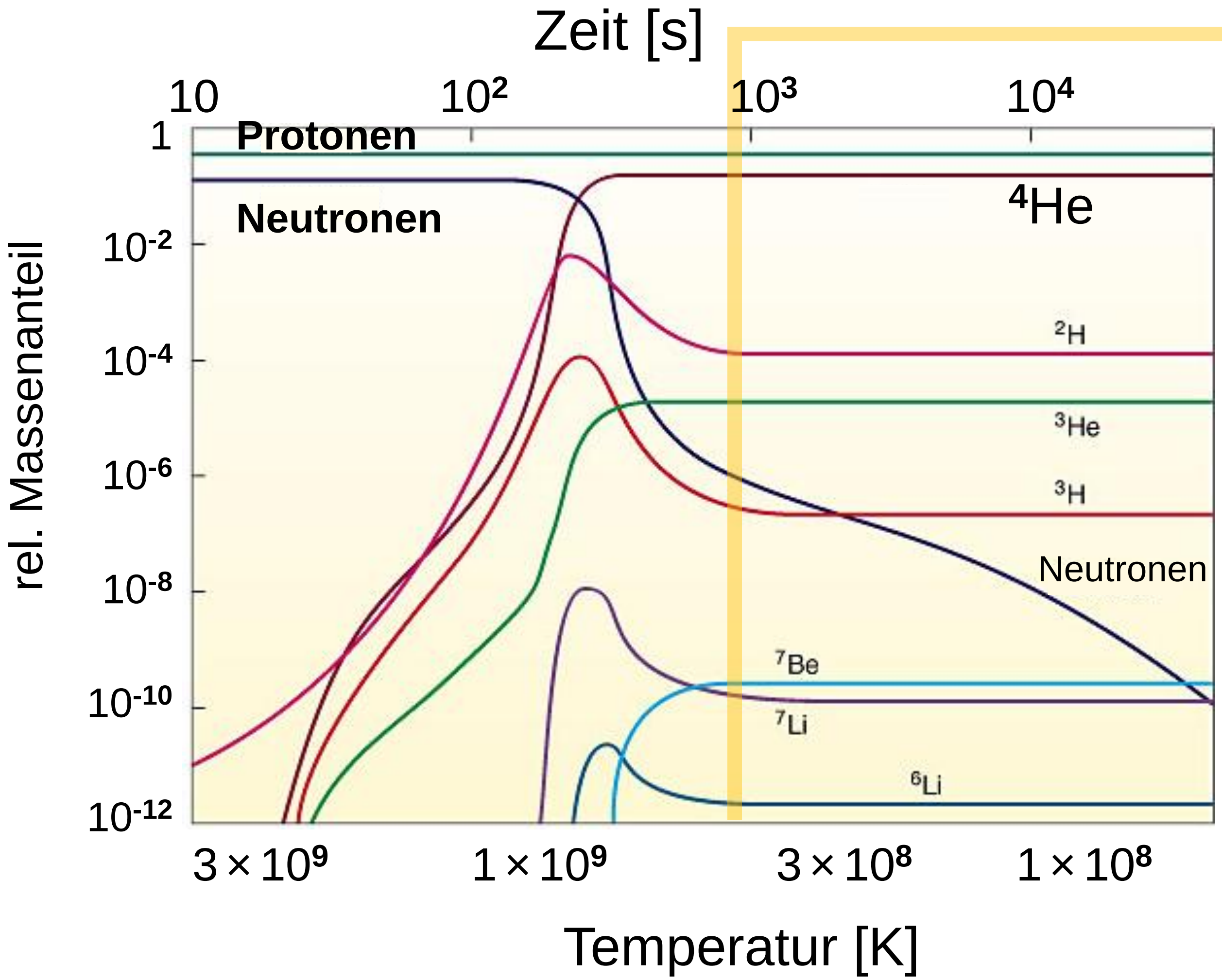

(α,γ)
ß$^-$-Zerfall
(p,γ)
(d,γ)
A
(n,γ)
ß$^+$-Zerfall

Reaktionskanäle


(d,n)
(t,n)
A
(d,p)
(p,α)
(n,p)
(n,α)

Nukleosynthese – Modellrechnungen

- **BBN-Modellrechnungen** mit Variation der **Dichte Ω_b von Baryonen**, Neutronlebensdauer τ_n, Anzahl N_ν der ν–Generationen
  dann: Vergleich der Rechnungen mit exp. Beobachtungen



Ende der Nukleosynthese:

^{4}He ~ 0.25

^{2}H/^{1}H ~ 10^{-5}

^{7}Li/^{1}H ~ 10^{-10}

Energie der Nukleonen ist zu gering, um durch den Coulombwall zu tunneln!