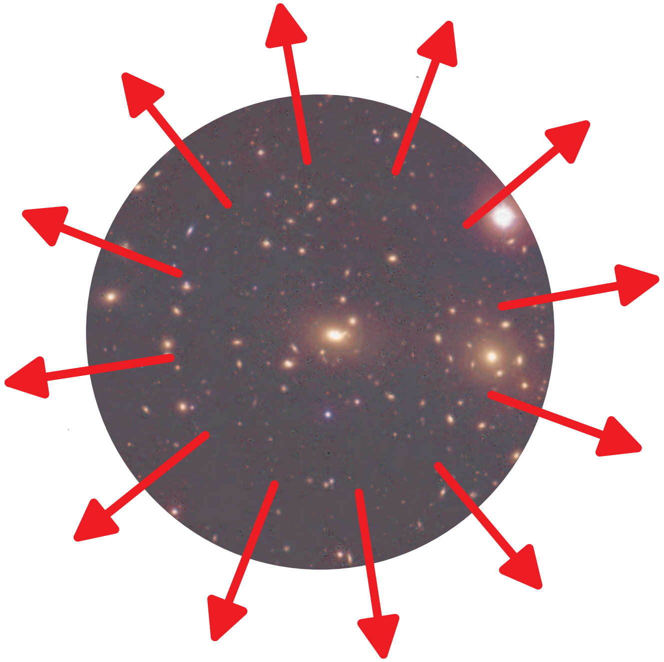
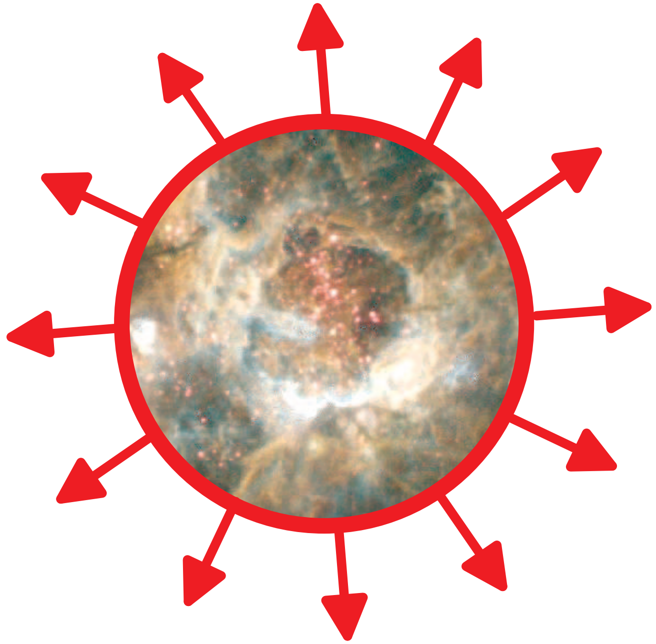
Kosmische Phasenübergänge

B. Kämpfer
Forschungszentrum Rossendorf/Dresden

Big Bang



für jeden Beobachter



2D - Analogie

Wechselwirkung von Teil und Ganzem $\Longrightarrow$ Evolutionsdynamik

lokale Materialeigenschaften   Kosmos

Voraussetzungen

		Kopplungsstärke
Kosmos:	Einstein-Gln.	$R_{\mu\nu} = 8\pi G(T_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} T_\rho^\rho)$
		Raum-Zeit Materie
Materie:	Staub, Gas, Flüssigkeit,	Felder
	Strahlung $\cdots$	
	(Zustandsgleichung)	(Feldstärken)
Symmetrie:	Kosmologisches Prinzip	Homogenität + Isotropie
		$\rightarrow$ Robertson-Walker-Metrik
		$g_{\mu\nu}(R(t), \hat{k})$
		offen,flach,geschlossen
		Skalenfaktor ("Weltradius")
Erhaltungs-	lokale Energie-Impuls-Erh.	
sätze:	lokale Teilchenzahl-Erh.	(Baryonen, Leptonen, nicht Photonen)

Phänomenologie

kosmische Materie $\Longrightarrow$ homogenes + isotropes Medium (keine Felder)

Einstein-Gln. $\Longrightarrow$ Bewegungs-Gln. für Materie & $R(t)$

1. Approximation: ideales Gas, Flüssigkeit, Staub, Strahlung
2. Approximation: Viskosität + Wärmeleitung

$$T_{\mu\nu}[\vec{v}(t); p(t), e(t); R(t)]$$

Energie-Dichte

Druck

Geschwindigkeit

Energie-Impuls-Erhaltung $\dot{\mathbf{e}} = -\mathbf{3}\frac{\dot{\mathbf{R}}}{\mathbf{R}}(\mathbf{e}+\mathbf{p})$

lokale Materie-Eigenschaften

globale kosmische Dynamik

$e+p>0$: e sinkt wegen (i) globaler Expansion

(ii) Arbeit des Druckes

Teilchenzahl-Erhaltung $\dot{\hat{\mathbf{n}}} = -\mathbf{3}\frac{\dot{\mathbf{R}}}{\mathbf{R}}\hat{\mathbf{n}} \to \hat{n}R^3 = const$

(mitbewegte Koordinaten:

$\hat{n}_{comov} = const$

$\to$ Interpretation von R)

Zustandsgleichung (ZGL)

e und p sind nicht unabhängig

Thermodynamik: $e(T, \mu)$, $p(T, \mu)$

chemisches Potential

Temperatur

T, μ = kanonische Variable füer p

Euler-Relationen: Entropie-Dichte $s = \frac{\partial p}{\partial T}$

Netto-Teilchenzahl-Dichte $\hat{n} = \frac{\partial p}{\partial \mu}$

Gibbs-Relation: $e + p - \mu \hat{n} = sT$

$\rightarrow$ 1. Hauptsatz der Thermodynamik: $dE = -pdV + TdS + \mu d\hat{N}$

Beispiele:

1. Strahlung $p = \frac{1}{3} e$ $\quad (k_B = \hbar = c = 1)$
2. Staub $p = 0$
3. inkompress. Flüssigkeit $e = const$
4. Lorentz-inv. phys. Vakuum $p = -e = const$

Modell: $p = we, \quad w = \begin{cases} \frac{1}{3} & (1.) \\ 0 & (2.) \\ -1 & (4.) \end{cases}$

Energie-Impuls-Erh. $\Longrightarrow e \propto R^{-3(w+1)} = \begin{cases} R^{-4} & (1.) \\ R^{-3} & (2.) \\ const & (4.) \end{cases}$

unsere Sicht: alle Information über Materialeigenschaften in ZGL

$$\mathbf{p}(\mathbf{T}, \mu)$$

Globale Evolution

Kopplungsstärke

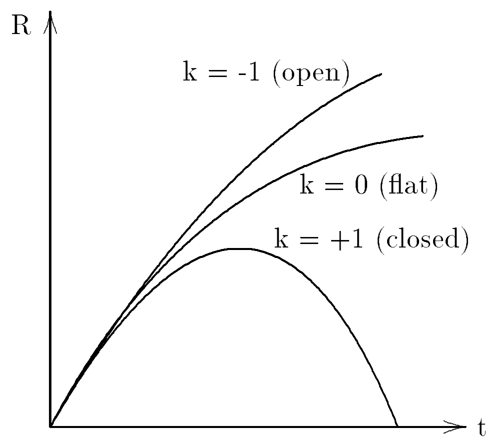
Einstein-Gln. $\quad \frac{\dot{\mathbf{R}}^2}{\mathbf{R}^2} + \frac{\hat{\mathbf{k}}}{\mathbf{R}^2} = \frac{8\pi}{3}\,\mathbf{G}\,\mathbf{e}$

$+$ Medium $\quad$ globale Dynamik $\quad$ Medium

Energie-Impuls-Erh. $\quad \dot{e} = -3\frac{\dot{R}}{R}(e+p)$

Teilchenzahl-Erh. $\quad \dot{\hat{n}} = -3\frac{\dot{R}}{R}\hat{n}$

$\rightarrow$ 3 Gln. für R, e, $\hat{n}$ + ZGL für $p(e,\hat{n})$



von nun an: frühe Zeiten + Besonderheiten der ZGL

Quanten-Statistik

Teilchen-Zahl pro Phasenraumzelle $= f(E,T) = d\,[e^{\frac{E\pm\mu}{T}} \pm 1]^{-1} \approx d\,e^{-\frac{E\pm\mu}{T}}$

Verabredung:	$+\mu$:	Teilchen	Fermi, Bose	Boltzmann
	$-\mu$:	Antiteilchen		
	$\mu = 0$:	Photonen etc.		

Teilchen-Dichte $= n = d \int \frac{d^3k}{(2\pi)^3} f(E(k),T) \approx d\,T^3$

$\to \mu = 0$: $\quad n = \bar{n} \quad \to \hat{n} \equiv n - \bar{n} = 0$

Antiteilchen-Dichte

Teilchen-Dichte

Beobachtung: $\frac{n_\gamma}{n_B} \approx 10^{10} \to$ Teilchen mit $m < T$: $\frac{\mu}{T} \approx 10^{-10} \to \mu \approx 0$

Energie-Dichte $= e = d \int \frac{d^3k}{(2\pi)^3} E(k)\, f(E(k),T) \approx d\,T^4$

Druck $= p = d \int \frac{d^3k}{(2\pi)^3} \cdots f(E(k),T) \approx \frac{1}{3} d\,T^4$

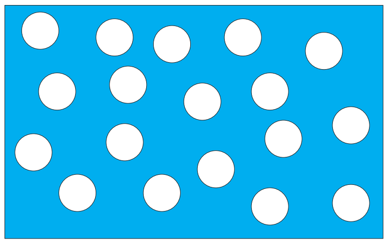
Deconfinement

Trend: größeres $T \to$ größere Dichte von Teilchen mit $m < T$

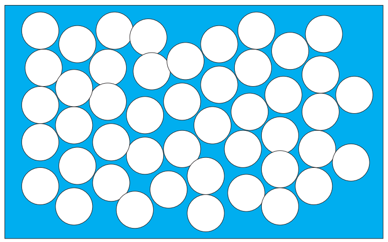
Frage: bis zu beliebig hohen T? Nein

Leptonen (e, μ, τ, ν), γ: punktförmige Teilchen

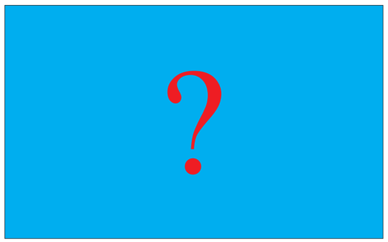
Hadronen $(\pi, n, p \cdots)$: Durchmesser $\approx$ 1 fm $= 10^{-13}$ cm



$T = 100$ MeV



$T = 150$ MeV

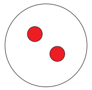


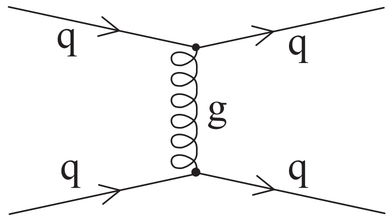
$T = 200$ MeV

Quark-Struktur der Hadronen:

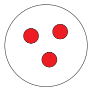
Mesonen (π): $q\bar{q}$

WW durch Gluon-Austausch



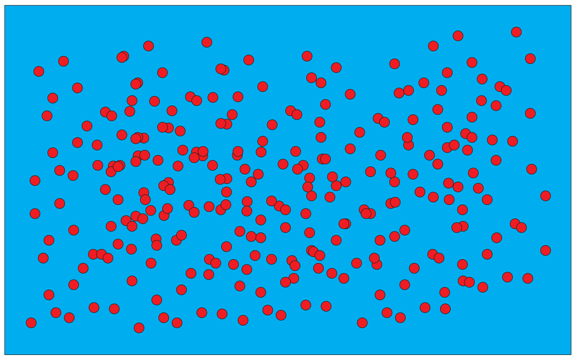


Baryonen (p, n): qqq



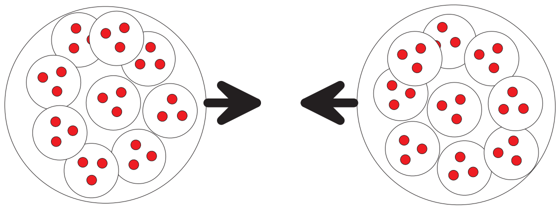
Quark-Gluon-Plasma:

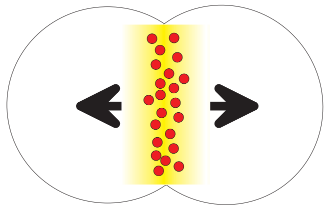
Quanten-Chromo-Dynamik



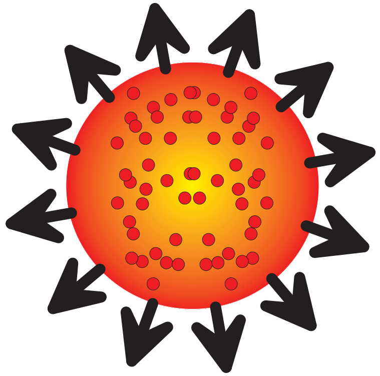
$T = 200$ MeV

Schwerionen-Kollisionen:



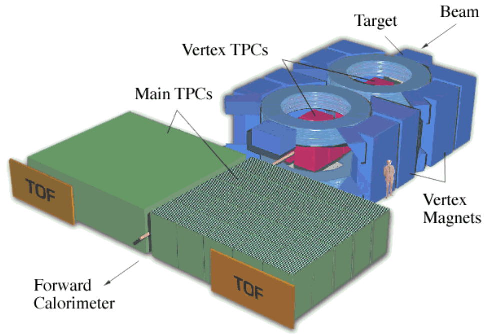


Schock-Zone



Little Bang

10^{-23} sec



NA49

CERN-SPS (Genf)
BNL-RHIC (Brookhaven)
CERN-LHC (Genf)

Kosmischer Confinement-Übergang:

$T >$ 170 MeV: γ, ν, e, μ q, g

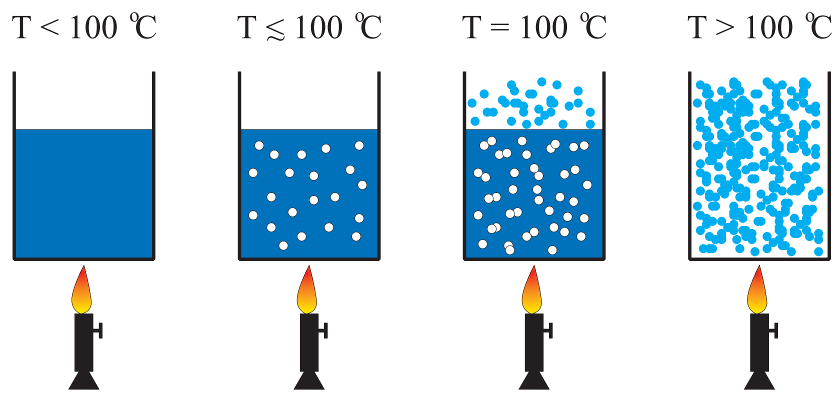
$T <$ 170 MeV: γ, ν, e, μ Hadronen

Phasenübergang des stark-wechselwirkenden Subsystems

Phasenübergänge

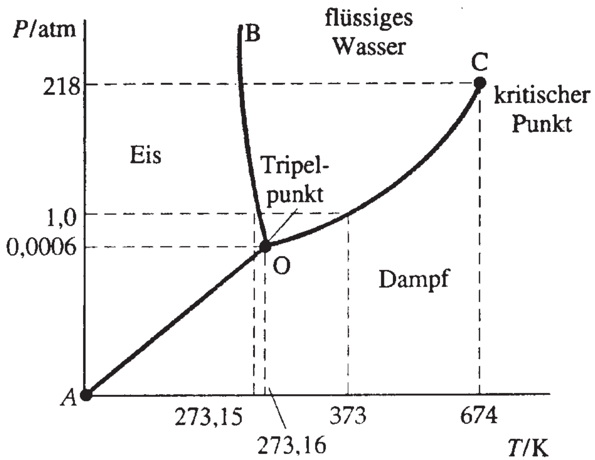
Wasser ↔ Dampf

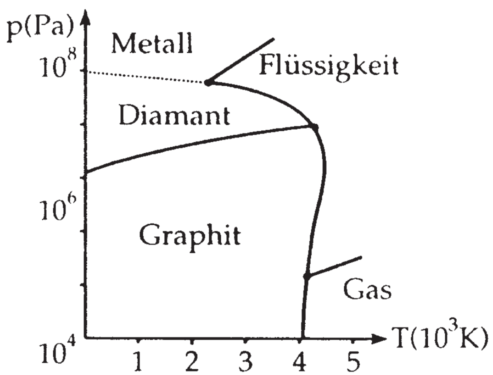
Wasser ↔ Eis

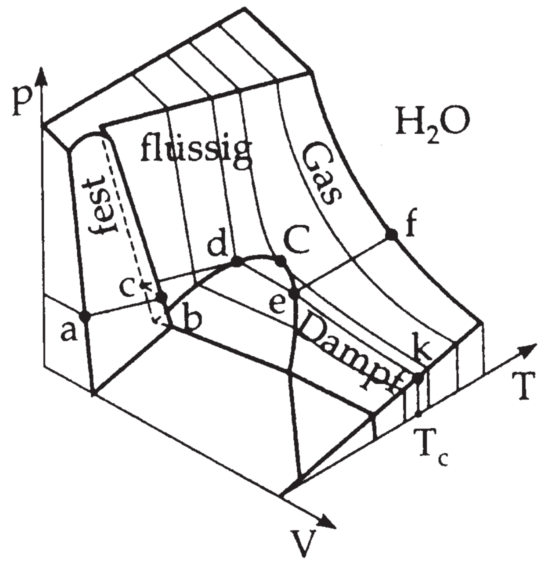


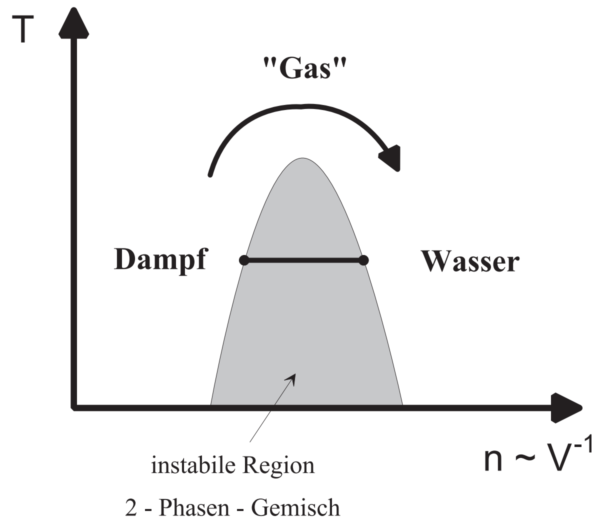
latente Wärme

Phasendiagramm von Wasser und Kohlenstoff



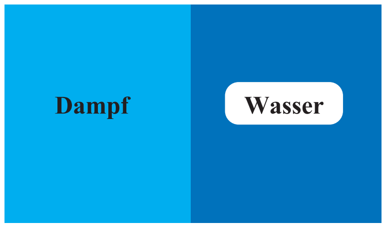






Phasen-Gleichgewicht: Gibbs-Kriterien (max. Entropie)

$$T_1 = T_2$$
$$p_1 = p_2$$
$$\mu_1 = \mu_2$$

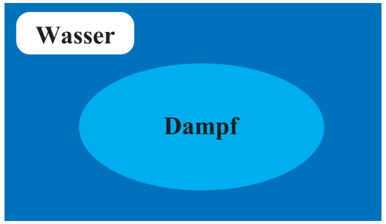


kritische Blasen: $R_{crit} = \frac{2\sigma}{p_1 - p_2}$

$R < R_{crit} \rightarrow$ Schrumpfen

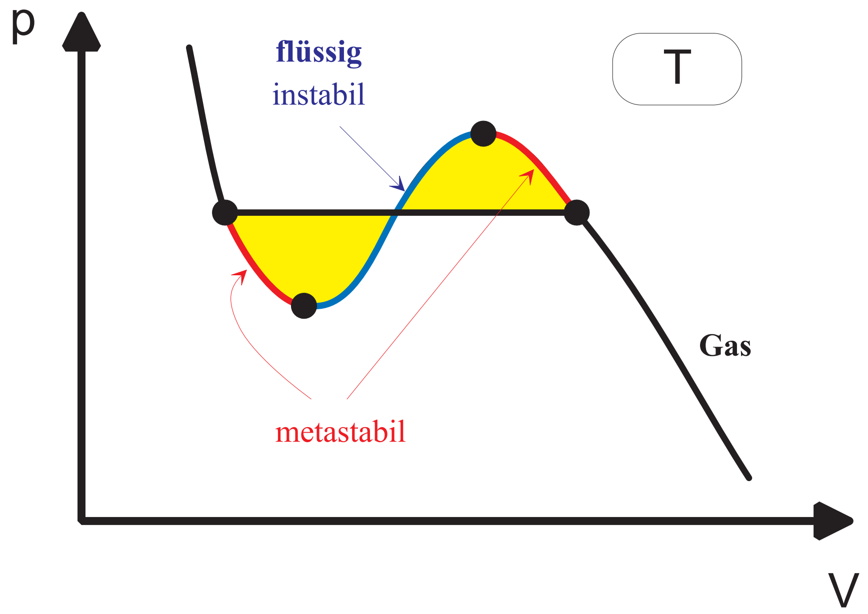
$R > R_{crit} \rightarrow$ Wachsen

Details $\rightarrow$ Nukleations-Kinetik



Unterkühlen, Überhitzen (verzögerter Phasenübergang)

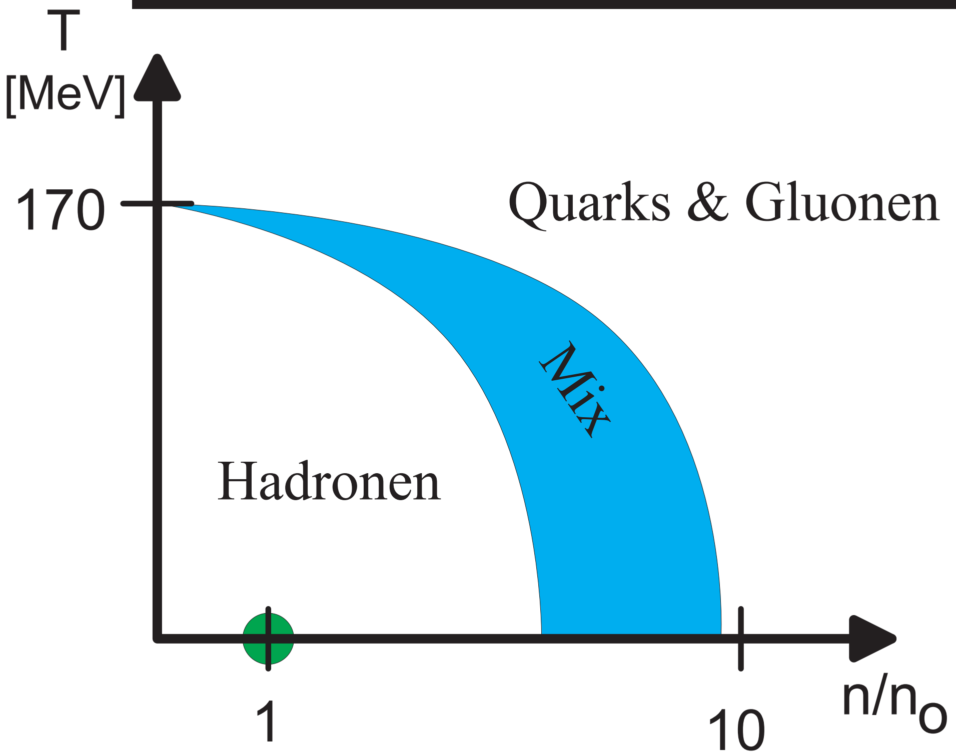
Maxwell-Konstruktion, van der Waals Modell



unterkühltes Wasser (noch kein Eis): $T < -10^o$C Unterkühlung

überhitztes Wasser (noch kein Dampf): $T > 100^o$C Überhitzung

Phasendiagramm stark wechselwirkender Materie



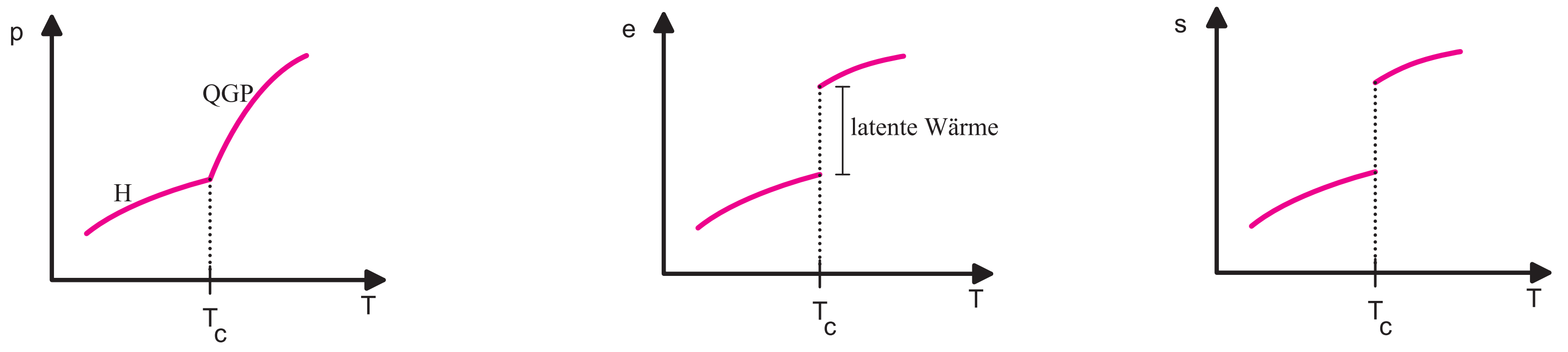
$n_0 = 0.15\text{fm}^{-3} = 1.5 \times 10^{38}\text{cm}^{-3}$
$\rho_0 = 2.7 \times 10^{14}\text{g} \quad \text{cm}^{-3}$
$1 \text{ MeV} \approx 10^{10} \text{ K}$

Chirale Symmetrie-Restauration

$T < T_c^{chir}$:	massive Quarks,	Kondensate
$T > T_c^{chir}$:	masselose Quarks,	keine Kondensate

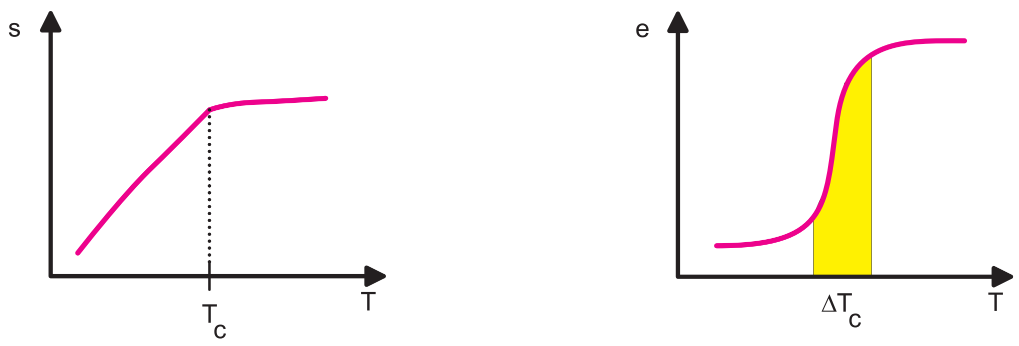
$T_c \stackrel{?}{=} T_c^{chir}$

ZGL für Kosmos: $\hat{n} \approx 0 \to \mu \approx 0$



$\Longrightarrow$ Phasenübergang 1. Ordnung

Kontrast: Phasenübergang 2. Ordnung, Cross Over



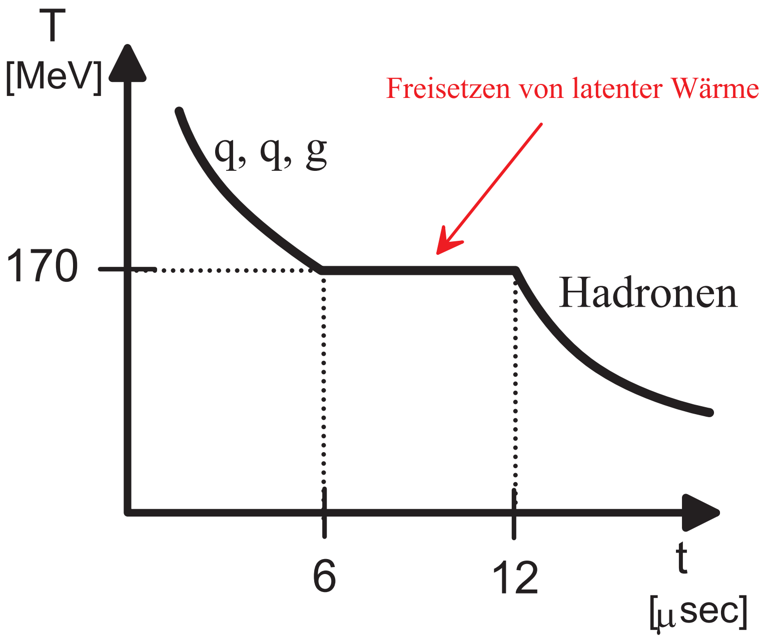
QCD-Gitter-Rechnungen: Ordnung des Phasenübergangs noch offen

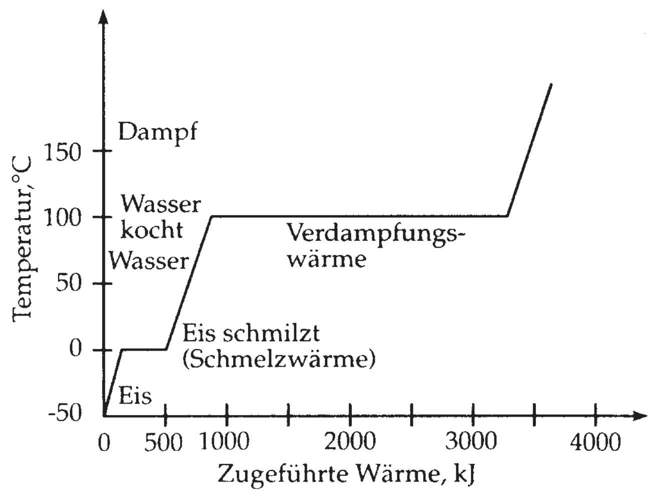
Kosmischer Confinement-Übergang: Details

1. Gleichgewichts-Übergang

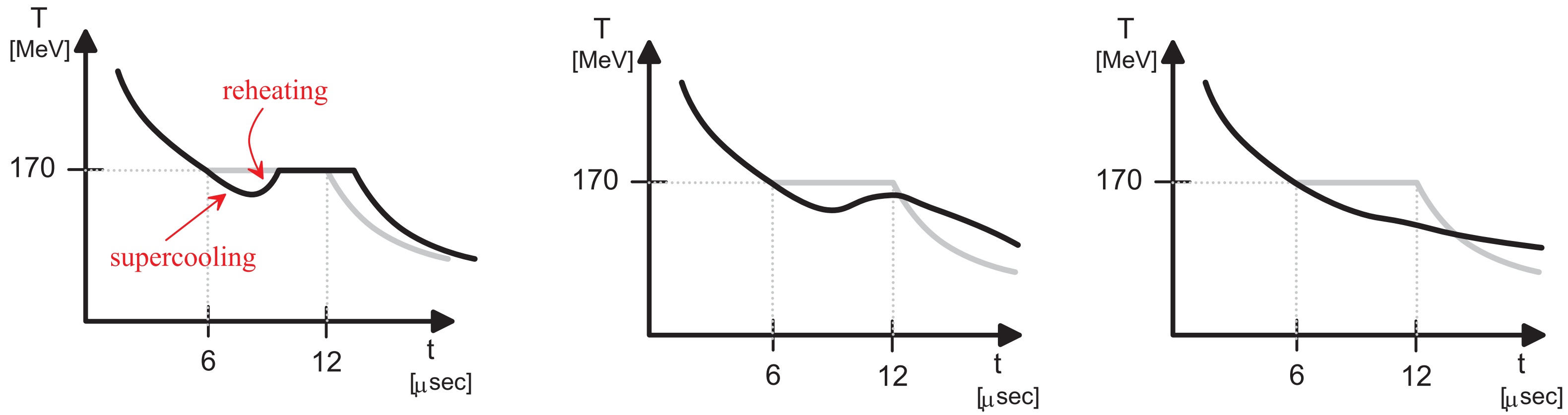
langsame Expansion: schnelles Blasen-Wachstum

schnelles Verteilen der latenten Wärme





2. Verzögerter Übergang

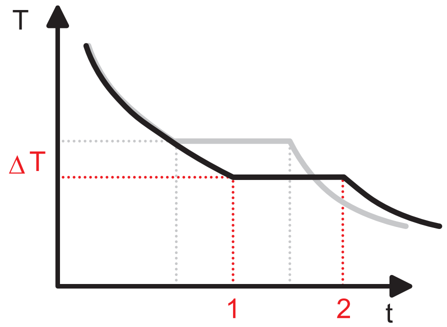


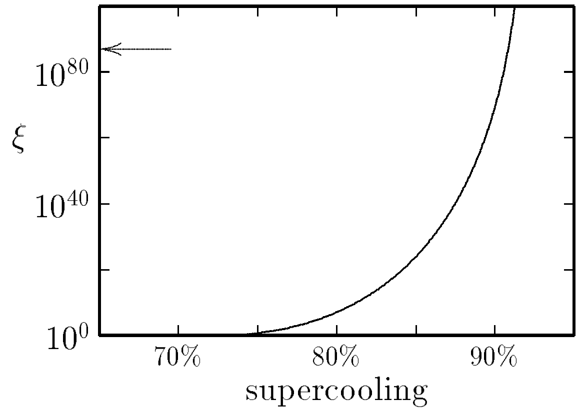
supercooling   supercooling   hypercooling

Unterkühlung $\rightarrow$ lokales Nicht-Gleichgewicht $\rightarrow$ Entropie-Erzeugung
(trotz idealen, nicht-dissipativen Mediums: Phasengemisch)
$\Longrightarrow$ Entropie $\neq$ Informationsbindeglied

Modell: isothermaler Übergang mit Unterkühlung

$$\xi \equiv \frac{s_2\, R_2^3}{s_1\, R_1^3}$$





Entropie ($\sim$ Teilchen-Anregungen) kommt aus Vakuum ($\sim$ Kondensat)

$$e_{vac} > 0, \quad s_{vac} = 0$$

Mini-Inflation

Expansion $\Longrightarrow$ i.a. T sinkt, R wächst

Einstein-Gln. $\quad \ddot{R} = -\frac{4\pi}{3} G\, R\, (e + 3p)$

$e + 3p > 0$: $\quad \ddot{R} < 0 \Longrightarrow$ verzögerte Expansion

ZGL

$e + 3p < 0$: $\quad \ddot{R} > 0 \Longrightarrow$ beschleunigte Expansion

$\equiv$ Inflation

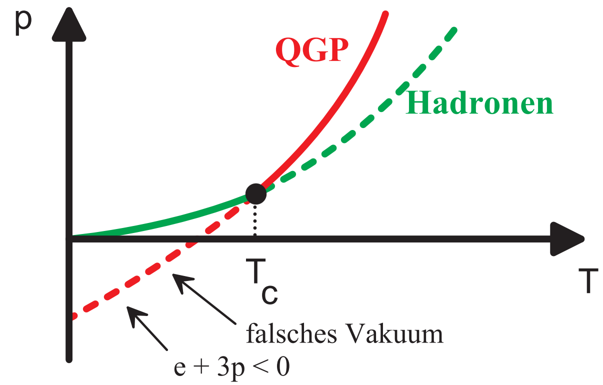
Bag-Modell für Quark-Gluon-Plasma

$e = d\,T^4 + B \quad \longleftarrow$ Vakuum-Energie-Dichte

$p = \frac{d}{3}\,T^4 - B \quad \longleftarrow$ Vakuum-Druck

$\rightarrow\ e + 3p < 0$ für $T < \left(\frac{B}{d}\right)^{1/4}$

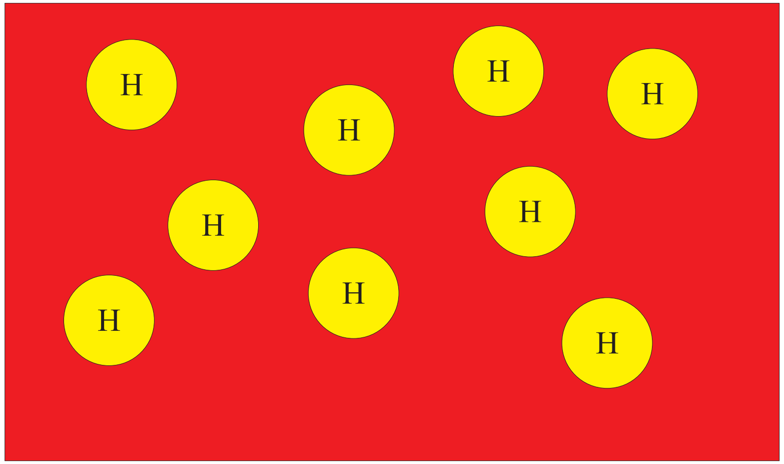
$$R \rightarrow e^{\sqrt{\frac{8\pi}{3}\,G\,B}\,t}$$



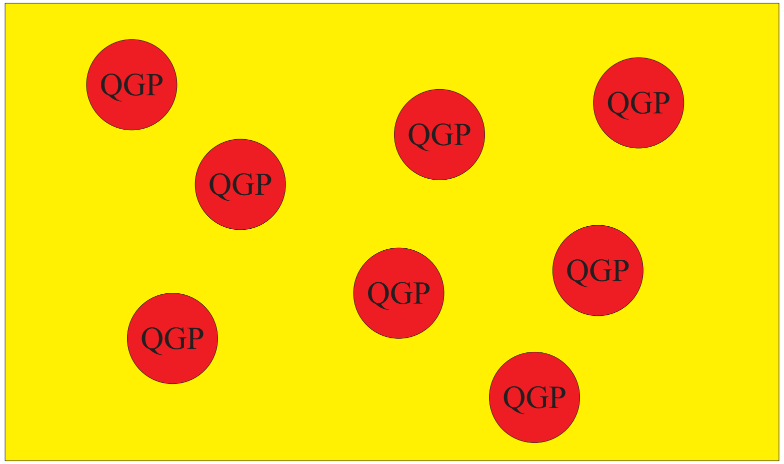
für Confinement unwahrscheinlich: $t_{exp} \sim \dot{R}^{-1} \sim 10^{18}\,t_{QCD}$

Beispiel für WW: lokaler Materie-Zustand $\leftrightarrow$ globale Expansion

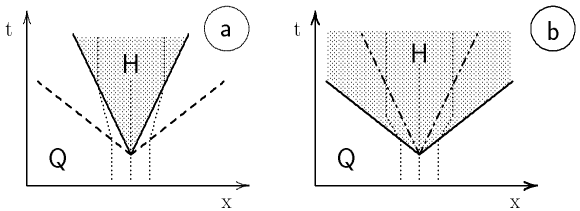
3. Turbulenter Confinement-Übergang



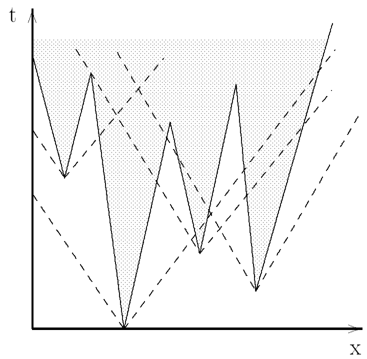
Beginn



Ende



Blasenwachstum



Schnittstellen von Schockwellen

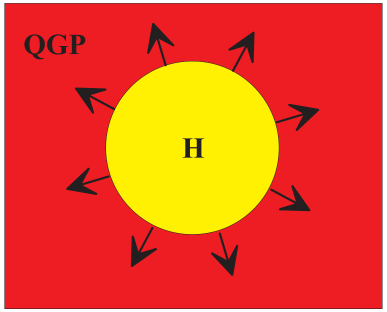
→ Dichte-Inhomogenitäten → Keime für – exotische Nukleosynthese?

– Schwarze Löcher (Hawking-Blitze)?

4. Relikte des Confinement-Übergangs?

(a) Dichte-Kontrast: von 3.

(b) Baryon-Kontrast:



chemisches Gleichgewicht an Phasengrenze

$3q \leftrightarrow N$: $\quad 3\mu_q = \mu_N \quad \rightarrow \hat{n}^B_{QGP} \gg \hat{n}^B_H$

Anreichern von Baryonen in letzten Quark-Inseln

$\rightarrow$ isothermale Baryon-Dichtefluktuationen

(c) Strange Matter:

Nukleonen: $N = (p,\, n) = (uud,\, ddu)$,   Kaonen: $K^+ = u\bar{s} \leftarrow$ Strangeness

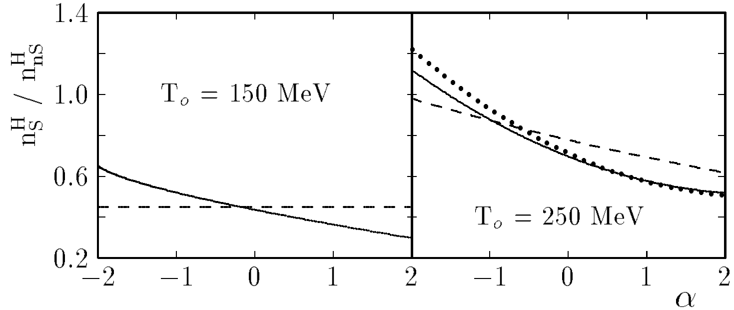
Gleichgewicht bez. schwacher WW:
$$d \leftrightarrow u - e^- + \nu_e$$
$$s \leftrightarrow u - e^- + \nu_e$$

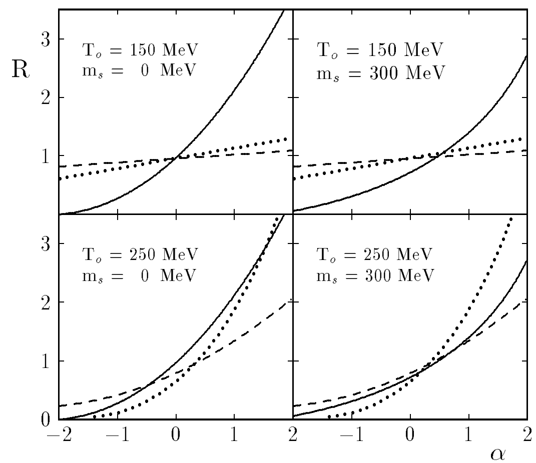
Bilanz-Gln.
$$\mu_d = \mu_u - \mu_{e^-} + \mu_{\nu_e}$$
$$\mu_s = \mu_u - \mu_{e^-} + \mu_{\nu_e}$$
$$\mu_s = \mu_d \quad \rightarrow n_s \approx n_d$$

elektrische Ladungs-Neutralität:
$$\sum_i e_i\, n_i = 0$$

$\Longrightarrow$ viel Strangeness im frühen Kosmos:

.





$$\mathcal{R} = \frac{n_s}{n_{n.s}}$$

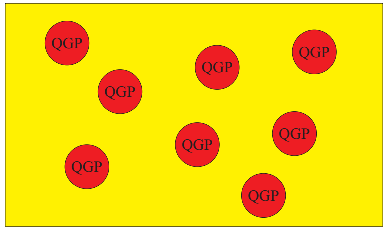
(d) Stangelets:

Quark-Materie mit hohem Strangeness-Anteil

$\rightarrow$ stabile strange Quark-Nuggets ($\equiv$ Strangelets)

$\rightarrow$ Dark Matter? Big Bang

Suche in Schwerionenstößen: bisher negativ Little Bang



(e) Modifizierte Nukleosynthese:

Baryon-Konzentration in letzten Quark-Inseln ($l \sim 1$ m)

$\rightarrow$ Baryon-Dichte-Fluktuationen

dann: schnelle Diffusion von Neutronen $\rightarrow$ inhomogenes $\frac{n}{p}$-Verhältnis

$\rightarrow$ $A \geq 12$ Elemente in Neutronen-reichen Regionen?

z.B. $^7Li(n,\gamma)^8Li(\alpha,n)^{11}B(n,\gamma)^{12}B(\beta^-)^{12}C$, Neutron-Einfang $\rightarrow$ ^{14}C

Zwischenbilanz

Confinement ist recht interessant aber: kosmische Expansion ist bereits langsam
$\Longrightarrow$ alle Effekte sind verwaschen
(Gleichgewicht = minimale Information = Gedächtnis-Verlust)

Details sind unzureichend bekannt: Ordnung des PÜ, Oberflächenspannung, $\cdots$)

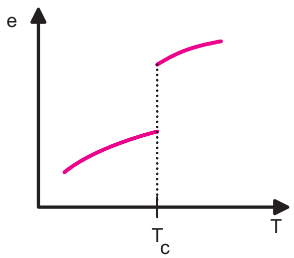
Idee: frühere Phasen $\to$ schnellere Expansion
$\to$ stärkere Nicht-Gleichgewichts-Effekte
deutlichere Spuren?

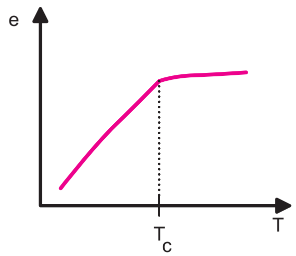
Elektroschwache Symmetrie-Brechung

$T > 100$ GeV $= 10^{15}$ K: Higgs $= 0 \leftrightarrow$ Symmetrie: Teilchen-Massen $= 0$

$T < 100$ GeV: Higgs $\neq 0 \leftrightarrow$ Symmetrie gebrochen: Teilchen-Massen > 0

$\rightarrow$ Phasenübergang schwach 1. Ordnung (?)





nicht-perturbative Effekte (Sphaleron-Übergänge)

$\rightarrow$ Baryon- und Lepton-Zahl–Nicht-Erhaltung

$\rightarrow$ Teilchen-Antiteilchen-symmetrischer Kosmos bekommt Baryon-Überschuß

von Beobachtung: $\frac{\mu}{T} \sim 10^{-10}$:

$$(10^{10}+1)\, e^- + 10^{10}\, e^+ \xrightarrow{\text{Annihilation}} 2 \times 10^{10}\, \gamma + 1\, e^-$$

$$(10^{10}+1)\, q + 10^{10}\, \bar{q} \xrightarrow{\text{Annihilation}} 2 \times 10^{10}\, \gamma + 1\, q \Longrightarrow \hat{B}$$

keine Antimaterie beobachtet $\Longrightarrow$ alles ist aus e^-, p^+, n aufgebaut

warum gerade 10^{-10}? $\quad$ (10^{-77} oder 10^7)

entweder als Anfangsbedingung gesetzt

oder dynamisch entstanden aus $\hat{B} = \hat{L} = 0$ oder beliebig

selbst im symmetrischen Kosmos gilt:

$\frac{n_B}{n_\gamma} \sim \frac{(m_N\, T)^{3/2}}{T}\, e^{\frac{m_N}{T}} \sim 10^{-20}$

$T \approx 20$ MeV (Annihilation stopt)

Leptonen:

$\hat{L} = \sum_i \hat{L}_i, \qquad \hat{L}_1 = \hat{L}_e + \hat{L}_\nu$

nicht beobachtbar

$\Longrightarrow$ Baryogenesis

Sakharov-Bedingungen:

1. B-verletzender Prozeß
2. C- und CP-Verletzung
3. term. Nicht-Gleichgewicht

$T > T_{dec}$: $X \leftrightarrow a + b$

$T < T_{dec}$: $X \rightarrow a + b$

zu 1. Sphalerons bei $T \sim 100$ GeV

X-Zerfälle bei GUT ($T \sim 10^{15}$ GeV)

direkte Übergänge bei SUSY

Grenze von Labor-Energien

höchste irdische Energien: kosmische Höhenstrahlung (wenige Ereignisse)
noch höhere Energien: früher Kosmos $\rightarrow$ intellektuelles Labor (Kontemplation)
Suche nach konsistem Bild, um genau unseren Kosmos möglichst voraussetzungslos zu konstuieren (keine spez. Anfangswerte)

Groß-unifizierte Theorie (GUT)

Standard-Modell aller WW:

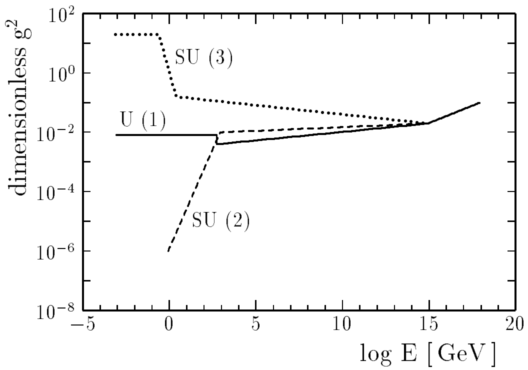
1. elektromag. WW   2. schwache WW   3. starke WW   4. gravitative WW

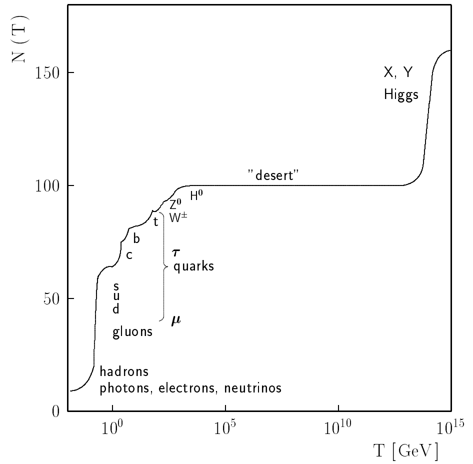
elektroschwache WW

$SU(2) \otimes U(1)$ $SU(3)$

GUT: SU(5), $\cdots$? $\rightarrow$ Proton-Zerfall

SUSY



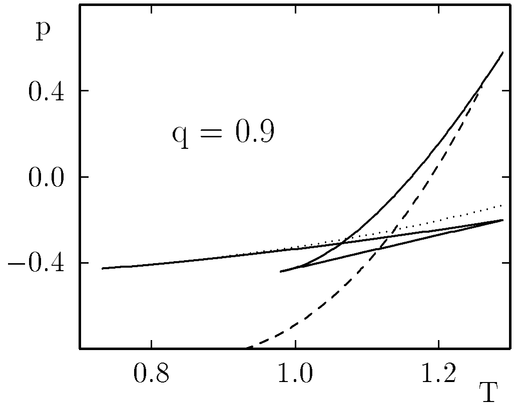


GUT-Phänomenologie

Symmetrie-Brechung bei $T_{GUT} \approx 10^{15}$ GeV, $t \sim 10^{-33}$ sec

$\rightarrow$ Phasenübergang 1. Ordnung

soll feld-theoretische Details modellieren



kurze Zeitskalen $\rightarrow$ Möglichkeit von starken Nicht-Gleichgewichts-Effekten (Unterkühlung)

Ziel: Konstruktion erfolgreicher inflationärer Szenarios

"zwanglose" Erklärung, warum unsere Welt so ist, wie sie ist

ohne spezielle Anfangsbedingungen

zu lösende Probleme:

1. Flachheits/Krümmungs/Alters-Problem:

Einstein-Gln. $\to$ Friedmann-Gln. $\left|\frac{e}{e_{crit}} - 1\right| = \frac{\hat{k}}{H^2 R^2}$

$H \equiv \frac{\dot{R}}{R} \qquad e_{crit} \equiv \frac{3}{8\pi G} H^2 \qquad H(t_0) = 100\, h \frac{\mathrm{km}}{\mathrm{sec \quad Mpc}} \to e_{crit} \approx 2h^2 \times 10^{-29} \frac{\mathrm{g}}{\mathrm{cm^3}}$

Beobachtung: $e(t_0) \sim e_{crit}(t_0)$

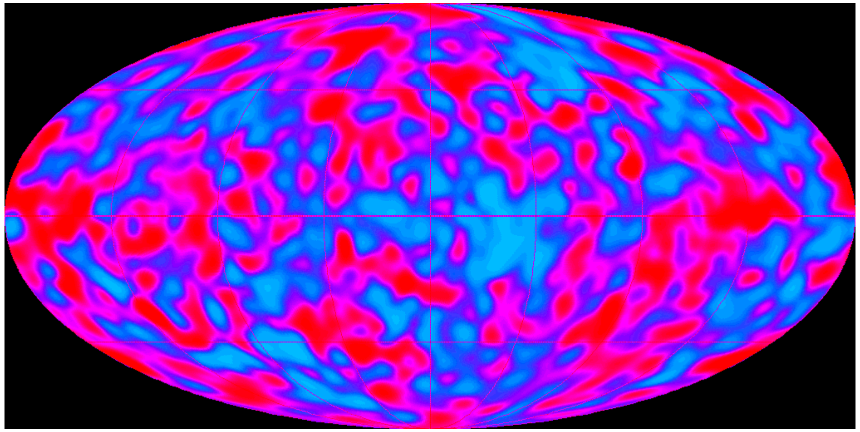
$e < e_{crit}$	$\leftrightarrow$	$\hat{k} = -1$	$\leftrightarrow$	offen	$\leftrightarrow$	zu schnelle Expansion
$e = e_{crit}$	$\leftrightarrow$	$\hat{k} = 0$	$\leftrightarrow$	flach	$\leftrightarrow$	gewünschte Expansion
$e > e_{crit}$	$\leftrightarrow$	$\hat{k} = +1$	$\leftrightarrow$	geschlossen	$\leftrightarrow$	zu schneller Rekollaps

zurückrechnen mit $R(t)$:

$\left|\frac{e}{e_{crit}} - 1\right|$	$\sim \mathcal{O}(1)$	(heute)	$\sim 10^{-16}$	(Nukleosynthese)
	$\sim 10^{-27}$	(elektroschwache T-Skala)	$\sim 10^{-55}$	(GUT-T-Skala)

$\to$ extremes fine tuning nötig: $\frac{e}{e_{crit}} = 1 \pm 10^{-55}$

2. Horizont-Problem:



bei γ-Entkopplung: 10^5 kausal nicht-verbundene Gebiete

$\rightarrow$ heute sichtbarer Teil des Kosmos mit $\frac{\Delta T}{T} \sim 10^{-5}$ $\quad T = 2.728$ K

3. Monopol-Problem:

GUT $\rightarrow$ sehr massive Monopole $\equiv$ stabile, solitäre Teilchen-Konfigurationen

Erhaltungssatz: $n_M \sim R^{-3} \quad e_\gamma \sim R^{-4} \Longrightarrow$ viel zu große Monopol-Dichte

4. Struktur-Problem:

richtige Verteilung von primordialen Dichte-Fluktuationen

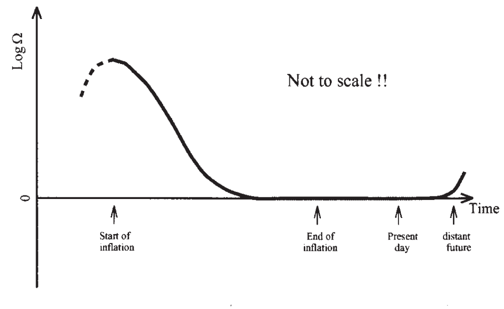
$\rightarrow$ Wachsen zu beobachteten Strukturen (Galaxien, Haufen)

5. usw. lange Liste von Problemen

Lösung: **Inflation:**

$\ddot{R} > 0 \rightarrow \dot{R}$ wächst:

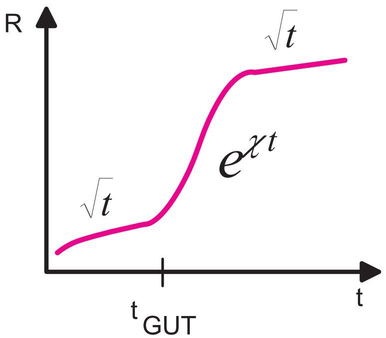
$|\frac{e}{e_{crit}} - 1| = \frac{\hat{k}}{\dot{R}^2}$ wird kleiner in Inflations-Epoche

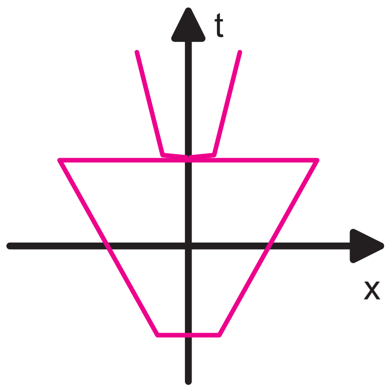


Forderung: $\dot{R}^2$ so groß, daß $e \overset{=}{\sim} e_{crit}$

$\rightarrow$ Lösung von 1.

Inflation $=$ Aufblasen des Raumes $\rightarrow$ extreme Dehnung der Längenskala





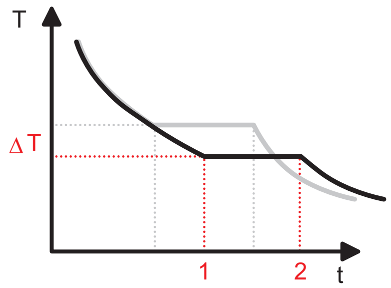
$\rightarrow$ Lösung von 2.

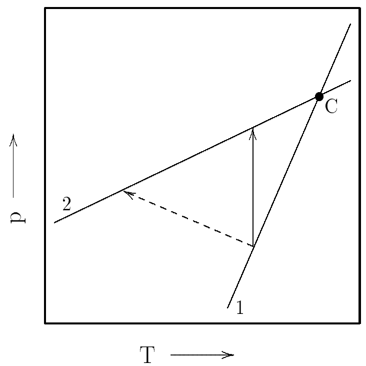
falls $e \sim R^{-2}$ oder weniger $\rightarrow$ Monopol-Verdünnung $\rightarrow$ Lösung von 3.

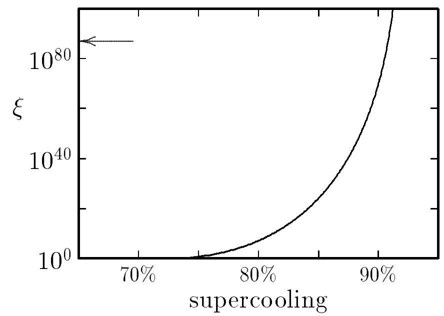
Quantifizierung R wächst auf 10^{30}-faches

$s\,R^3$ wächst auf 10^{90}-faches $\rightarrow$ Entropy $\neq$ Informationsträger

Beispiel für Realisierung: isothermaler Phaseübergang mit Unterkühlung







"realistisches" Modell: Blasen-Wachstum $v(T)$

Blasen-Kinetik $x(t)$ = Volumenanteil der neuen Phase

Rückkopplung der freiges. latenten Wärme

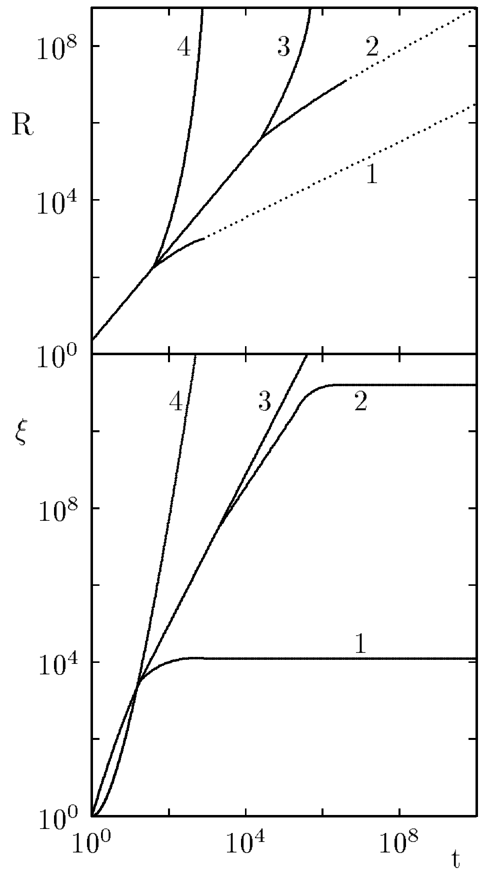
schnelle Thermalisierung

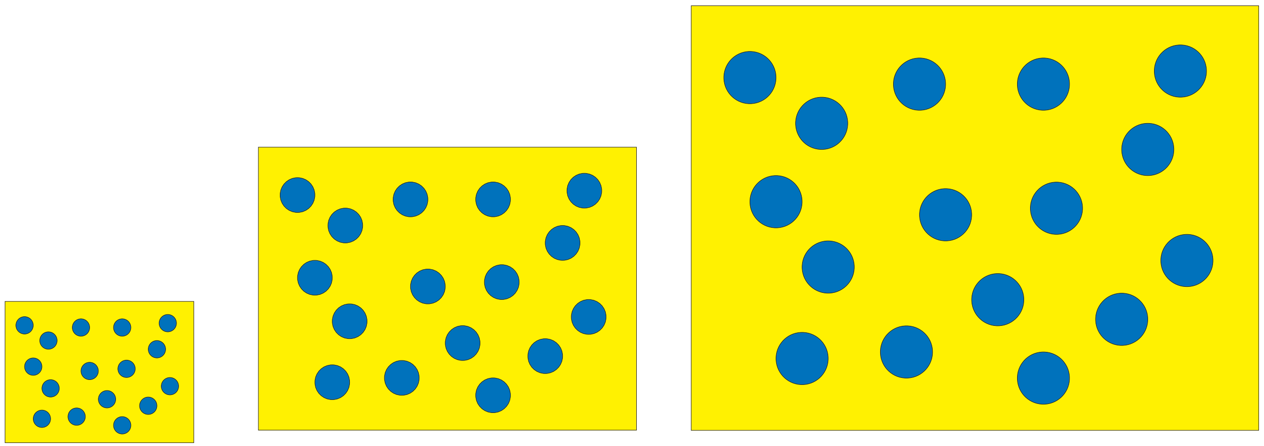
Problem: fine tuning von σ_0 = Oberflächen-Spannung:

zu klein $\rightarrow$ zu schnelles Ende der Inflation

zu groß $\rightarrow$ exp. Wachstum des Raumes $\rightarrow$ kein Exit

pawer law inflation: $\quad R \sim t^{\alpha}, \quad \alpha > 1$





brutaler Exit: spinodale Entmischung

Viskosität

dissipativer Effekt $\Longrightarrow$ Entropie-Erzeugung

$p \longrightarrow p - 3\frac{\dot{R}}{R}\,\xi_{visc}$

extremer Fall: Aufheizung durch innere Reibung kompensiert Kühlung durch Expansion
$\rightarrow$ isotherme Epoche

genügend exp. Wachstum, aber: spezielles $\xi_{visc}(T)$

Preheating = moderne Inflation

Vorher: ?

Begin: $T = 0$, nur Inflaton-Feld (Vakuum-artiger Zustand)

Inflation: $T = 0$, exp. Wachstum, Inflaton $\rightarrow$ Energie-Dichte

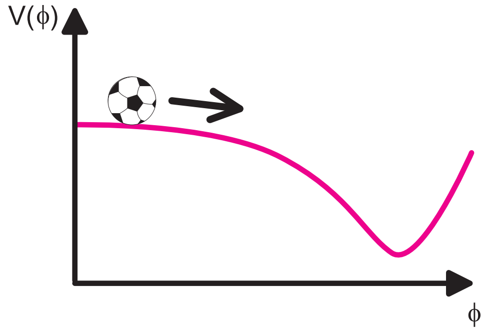
langsames Herunter-Rollen

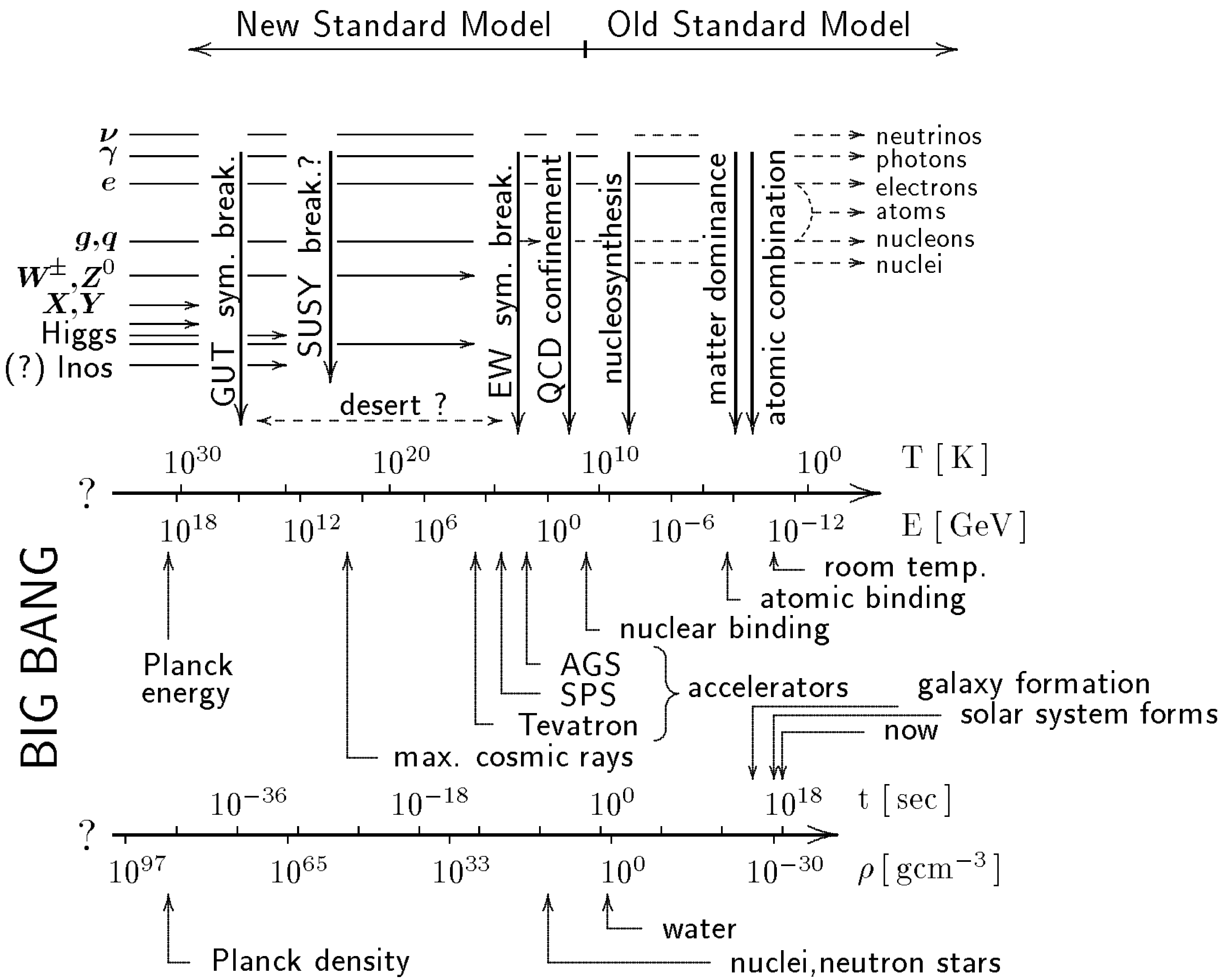
Ende: 1. Preheating: Inflaton-Feld-Oszillationen $\rightarrow$ kohärente Anregungen

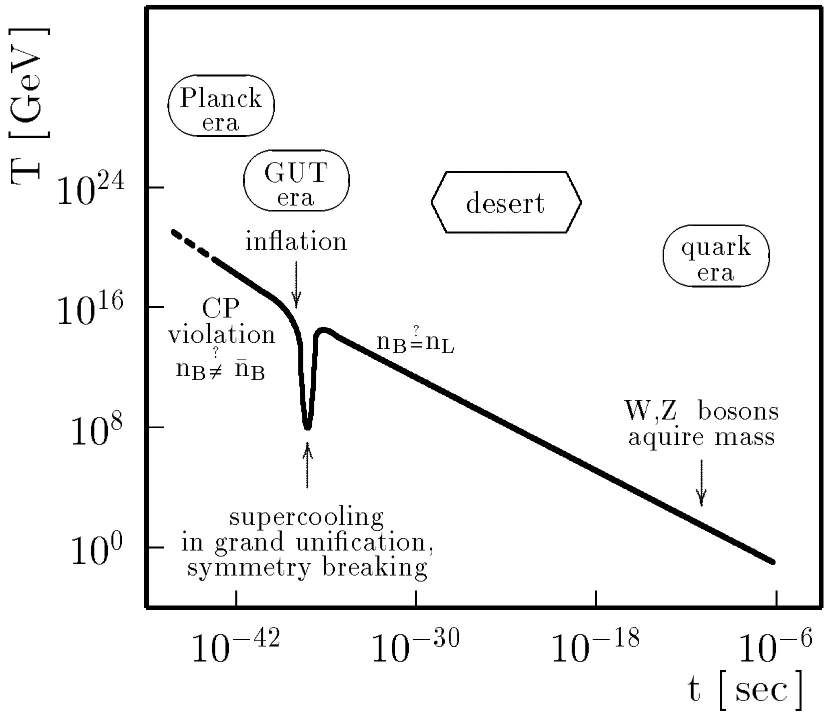
2. WW: Inflaton-Moden

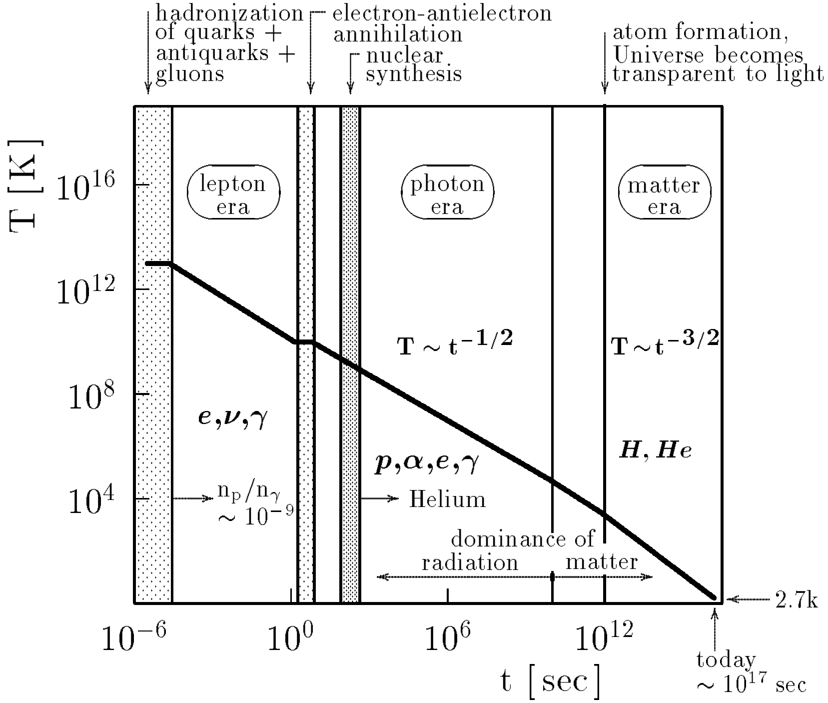
3. Inkohärenz: Teilchen-Anregungen + Thermalisierung

+ Übergang zum Strahlungs-Kosmos




New Standard Model
Old Standard Model
ν
γ
e
g,q
W±,Z0
X,Y
Higgs
(?) Inos
GUT sym. break.
SUSY break.?
EW sym. break.
QCD confinement
nucleosynthesis
matter dominance
atomic combination
neutrinos
photons
electrons
atoms
nucleons
nuclei
desert ?
T [K]
E [GeV]
BIG BANG
Planck energy
max. cosmic rays
Tevatron
SPS
AGS
accelerators
nuclear binding
atomic binding
room temp.
galaxy formation
solar system forms
now
t [sec]
ρ [gcm−3]
Planck density
nuclei,neutron stars
water


T [GeV]
Planck era
GUT era
desert
quark era
inflation
CP violation
$n_B \overset{?}{\neq} \bar{n}_B$
$n_B \overset{?}{=} n_L$
W,Z bosons aquire mass
supercooling in grand unification, symmetry breaking
10^{24}
10^{16}
10^{8}
10^{0}
10^{-42}
10^{-30}
10^{-18}
10^{-6}
t [sec]


hadronization of quarks + antiquarks + gluons
electron-antielectron annihilation
nuclear synthesis
atom formation, Universe becomes transparent to light
T [K]
lepton era
photon era
matter era
$T \sim t^{-1/2}$
$T \sim t^{-3/2}$
e,ν,γ
p,α,e,γ
H, He
$n_p/n_\gamma \sim 10^{-9}$
Helium
dominance of
radiation
matter
2.7k
10^{16}
10^{12}
10^{8}
10^{4}
10^{-6}
10^{0}
10^{6}
10^{12}
t [sec]
today $\sim 10^{17}$ sec

Kosmische Skalen

Naturkonstanten:

Grav.-Konstante	$G = 6.673 \times 10^{-8}$	$\frac{\mathrm{cm}^3}{\mathrm{g\ \ sec}^2}$
Planck'sches Wirk.-Quantum	$\hbar = 1.054 \times 10^{-27}$	$\frac{\mathrm{g\,cm}^2}{\mathrm{sec}}$
Licht-Geschwindigkeit	$c = 3 \times 10^{10}$	$\frac{\mathrm{cm}}{\mathrm{sec}}$

Physikalische Skalen:

Planck-Masse	$M_{Pl} = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}}$	$= 2.177 \times 10^{-5}$ g $= 1.22 \times 10^{19}$ GeV
Planck-Länge	$L_{Pl} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}}$	$= 1.616 \times 10^{-33}$ cm
Planck-Zeit	$t_{Pl} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}}$	$= 5.391 \times 10^{-44}$ sec
Planck-Dichte	$\rho_{Pl} = \frac{c^5}{\hbar G^2}$	$= 5.157 \times 10^{93}$ $\frac{\mathrm{g}}{\mathrm{cm}^3}$

$\rightarrow$ natürliche kosmische Größenordnungen

Heutige Skalen:

$$
\begin{array}{lll}
t_0 & \sim 10^{10} \text{ a} & \sim 10^{60}\, t_{Pl} \\
L_0 & \sim 10^{28} \text{ cm} & \sim 10^{60}\, L_{Pl} \\
T_0 & \sim 2.7 \text{ K} = 2.4 \times 10^{-4} \text{ eV} & \sim 10^{-30}\, M_{Pl}
\end{array}
$$

Hubble-Parameter: $H_0 \equiv \frac{\dot{R}_0}{R_0} = 100\, h\, \frac{\text{km}}{\text{sec} \quad \text{Mpc}}$

Hubble-Zeit: $H_0^{-1} \sim 10^{10}$ a

Hubble-Länge: $H_0^{-1} \sim 300$ Mpc

E, M, T in Energie-Einheiten

T	1 MeV $\cong 10^{10}$ K
	1 GeV $= 10^3$ MeV $\cong 10^{13}$ K
M	$M_e = 0.5$ MeV
	$M_\pi = 138$ MeV
	$M_N = 938$ MeV ≈ 1 GeV