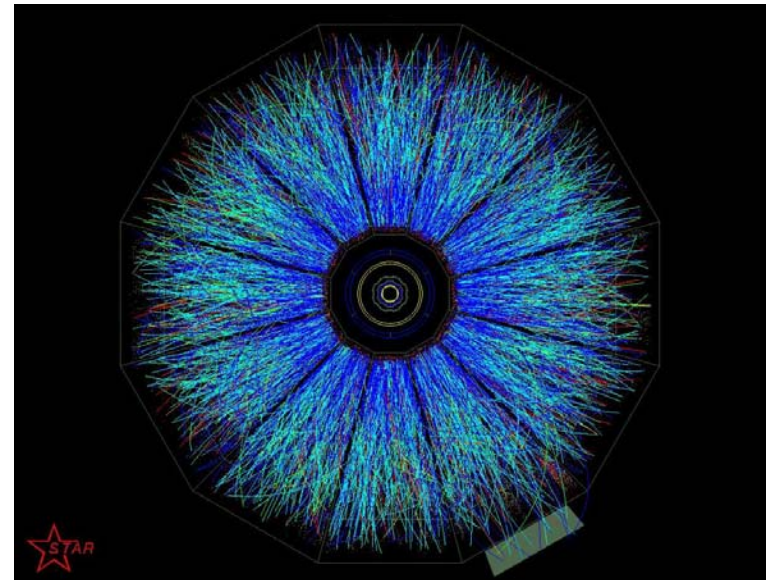


Das QCD-Phasendiagramm

Seminar: Schlüsselexperimente der Teilchenphysik

Nina Memenga

Betreuer: Prof. J. Stachel
Dr. Y. Pachmayer



http://www.bnl.gov/rhic/images/ev2_front1.jpg

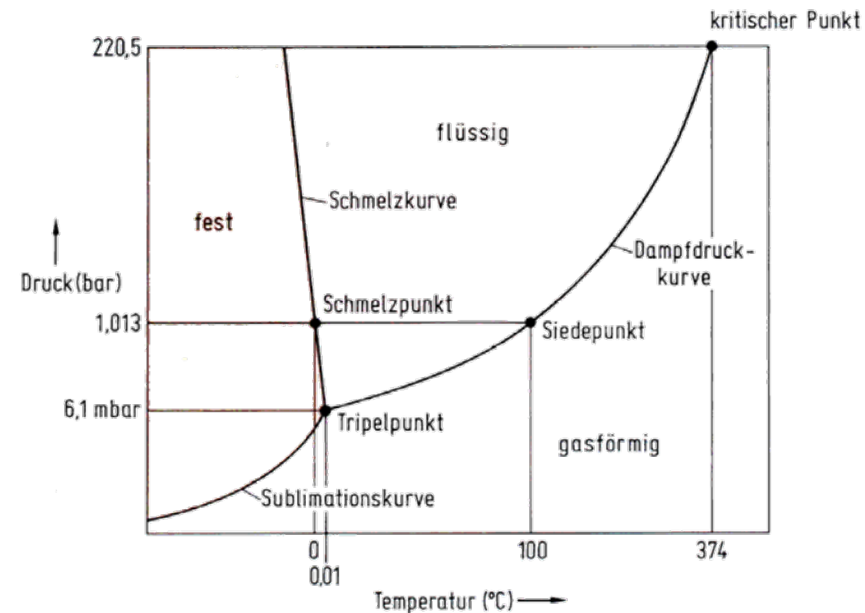
Inhalt

- Einleitung
- Grundlagen und Theorie
- Experimentelle Methoden
- Resultate
- Zusammenfassung
- Literatur

Klassisches Phasendiagramm

- Bereiche in denen verschiedene **Aggregatzustände** vorliegen
- **Phasenübergänge:** überschreiten einer Phasengrenze
- Ausgezeichnete Punkte: **Tripelpunkt** und **Kritischer Punkt**

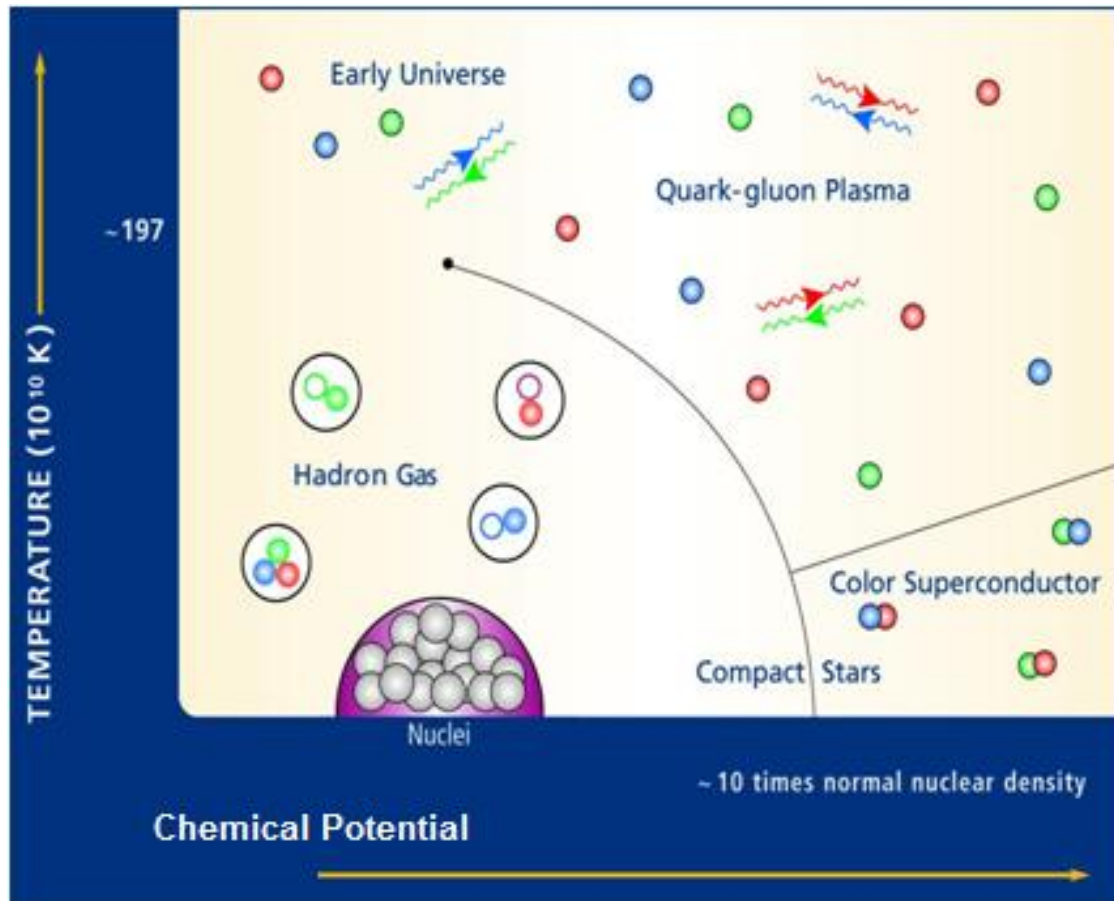
Phasendiagramm: Wasser



<http://chemie.fb2.fh-frankfurt.de/ACH-Vorlesung/Images/41-Zustandsdiagr-h2o.gif>

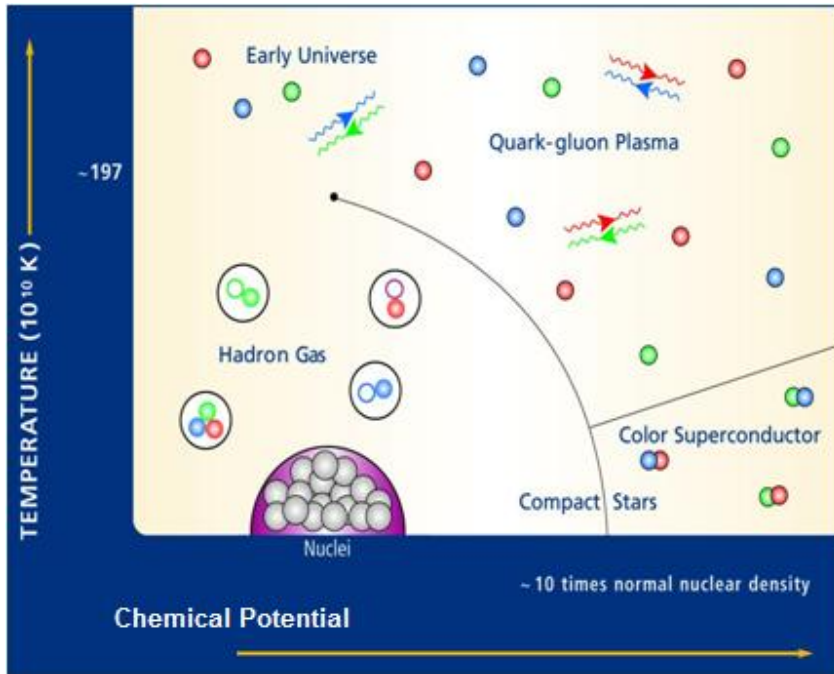
QCD-Phasendiagramm

QCD: Quantenchromodynamik
Theorie der starken Wechselwirkung



<http://www.ice.csic.es/en/graphics/phase.jpg>

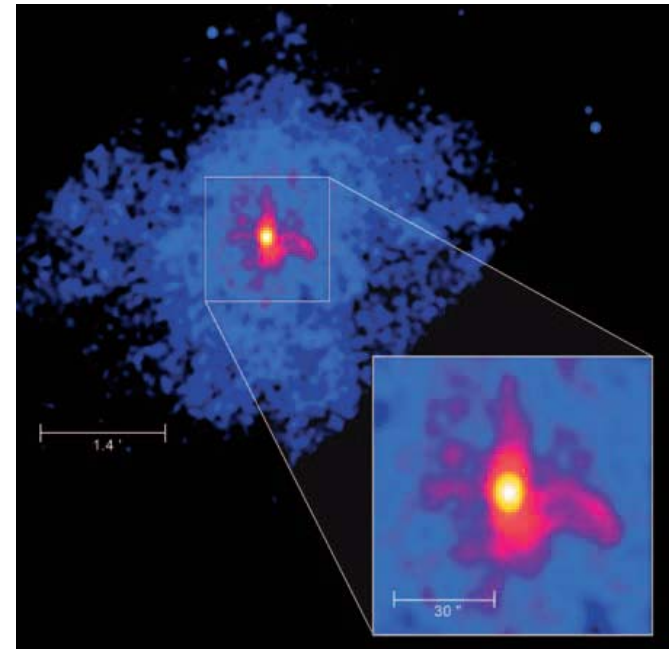
QCD-Phasendiagramm



<http://www.ice.csic.es/en/graphics/phase.jpg>

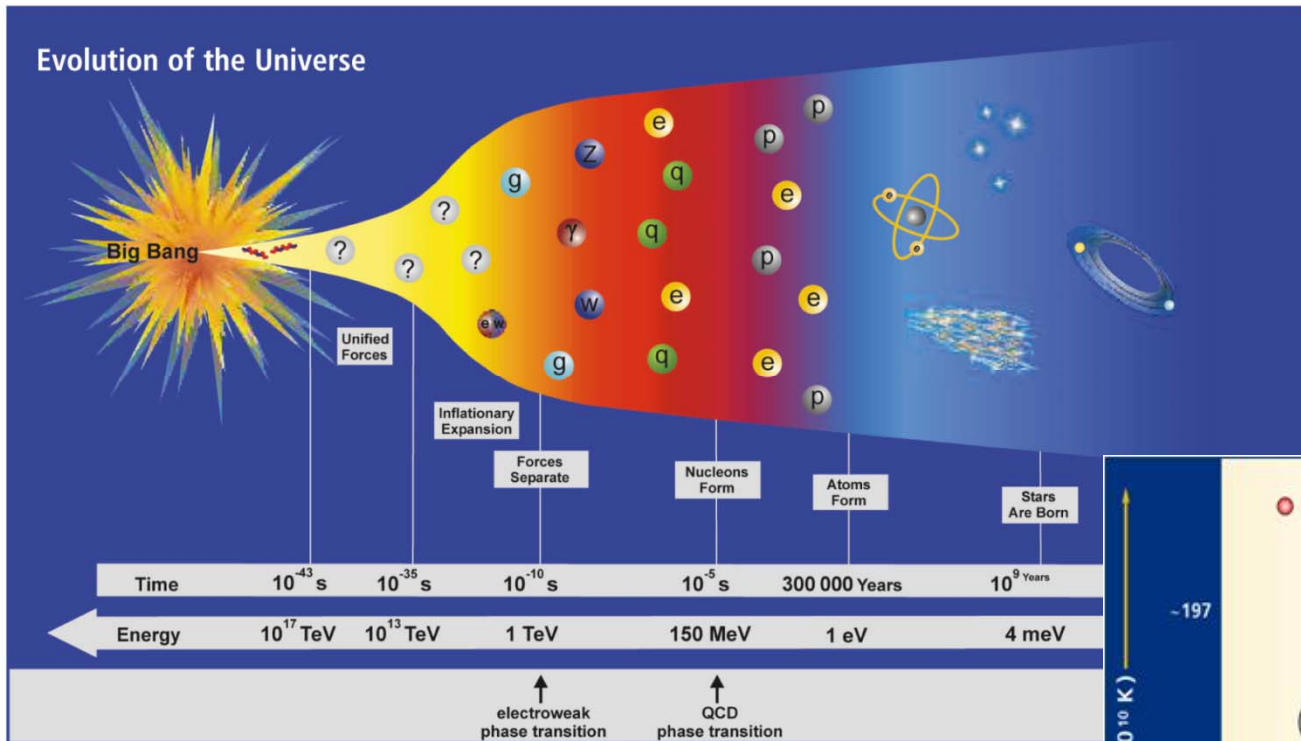
Neutronenstern

$$\rho \sim 10^{12} \text{ kg} / \text{cm}^3$$

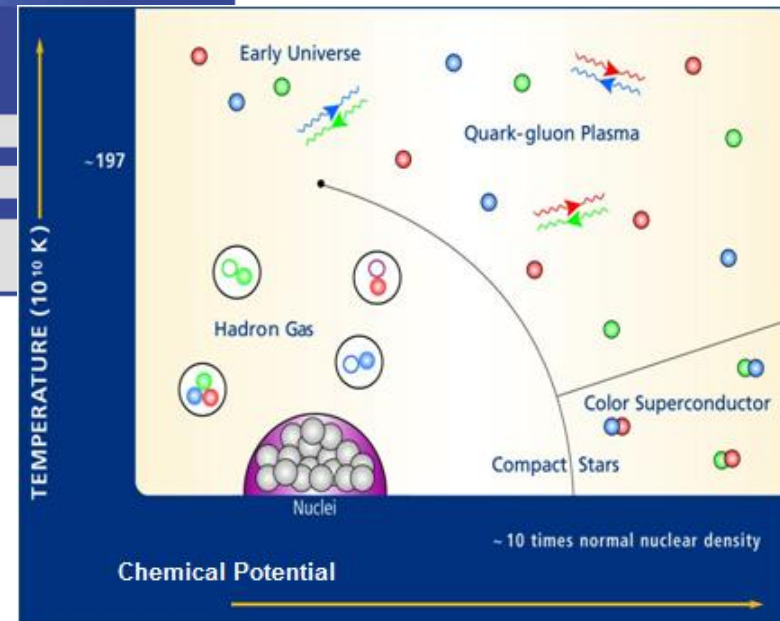


Physik Journal 5 (2006) Nr. 10. Braun-Munzinger & Wambach. Extreme Materie

QCD-Phasendiagramm

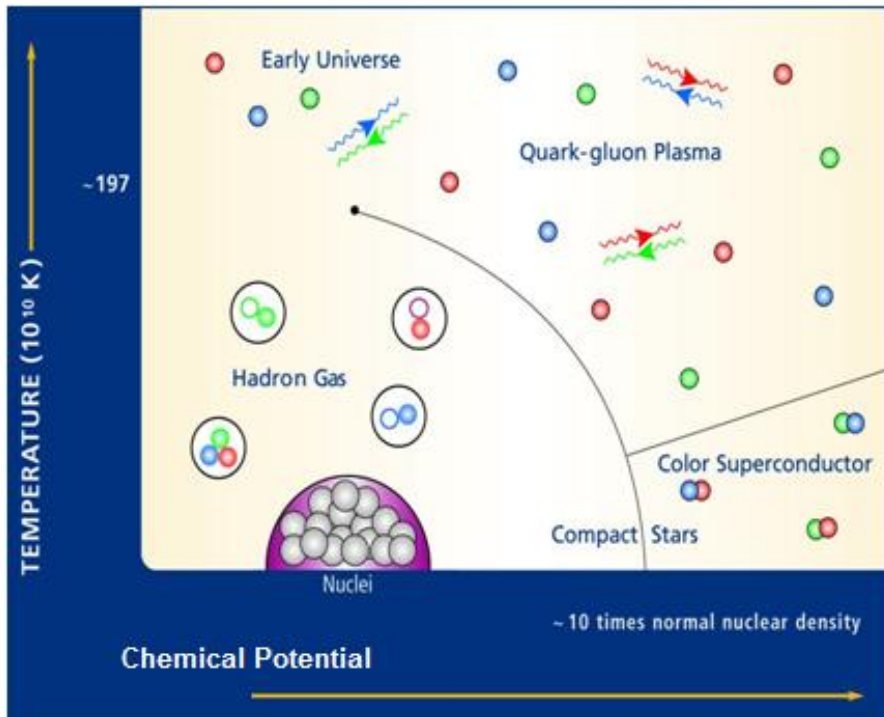


<http://www.fz-juelich.de/nic/Publikationen/Broschuere/Elementarteilchenphysik/universum-e.jpg>



<http://www.ice.csic.es/en/graphics/phase.jpg>

QCD-Phasendiagramm



<http://www.ice.csic.es/en/graphics/phase.jpg>

- Rückschlüsse auf die Anfänge des Universums
- Überprüfung der QCD

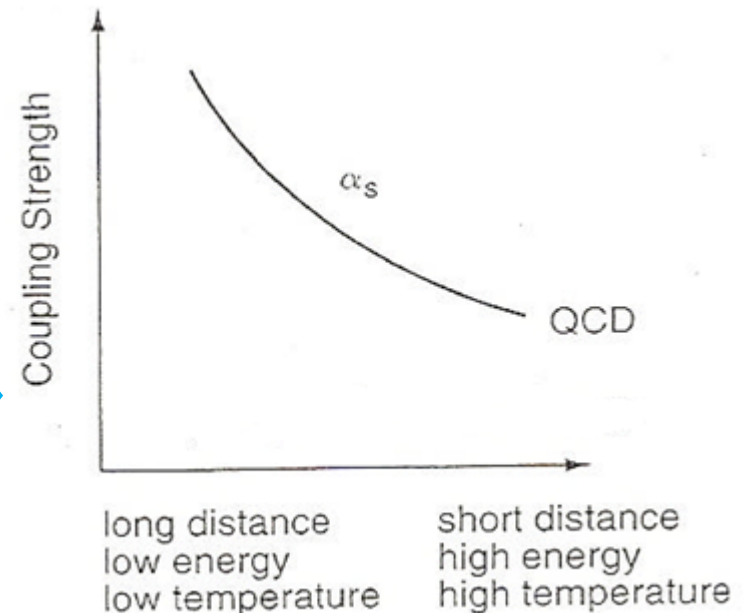
Starke Wechselwirkung

QCD (Nambu 1966)

- Theorie der starken Wechselwirkung;
d.h. der Farbladung
- Wechselwirkung durch Austausch von
Gluonen

Besonderheit der QCD:

- Quarks und Gluonen tragen
Farbe



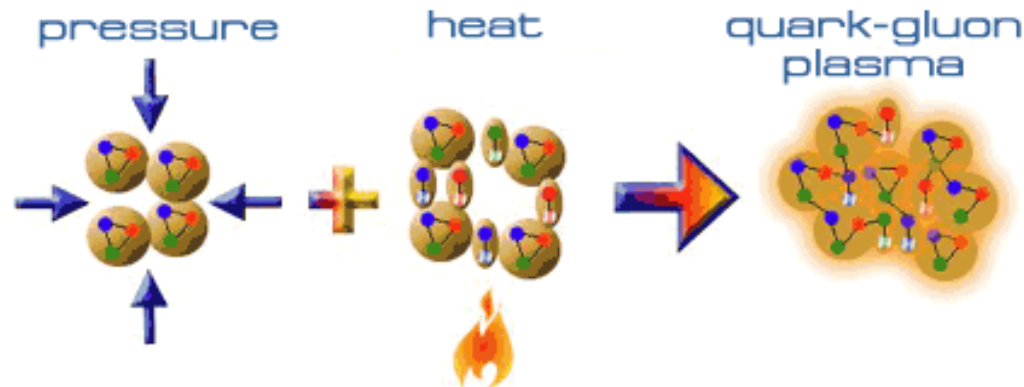
Yagi, K., Hatsuda, T., Miake, Y. Quark-Gluon
Plasma

Asymptotische Freiheit → Quark-Gluon Plasma

Quark-Gluon Plasma

“Suppe” von ungebundenen Quarks, Antiquarks und Gluonen

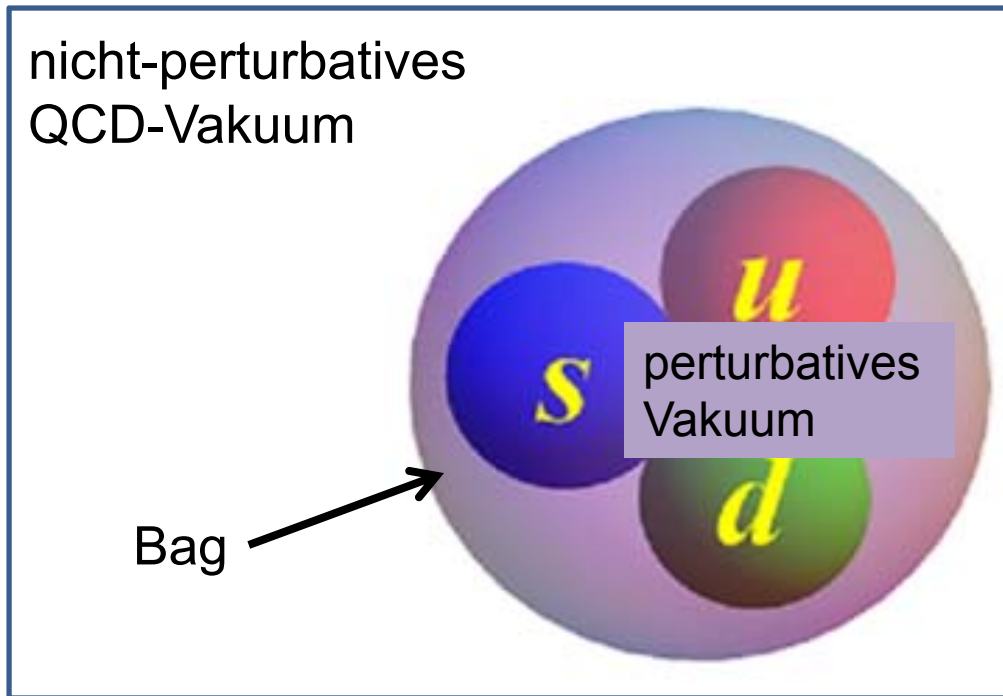
Wie können wir ein Quark-Gluon Plasma erzeugen?



<http://www.bnl.gov/rhic/QGP.htm>

Bag-Modell

berücksichtigt Confinement und asymptotische Freiheit

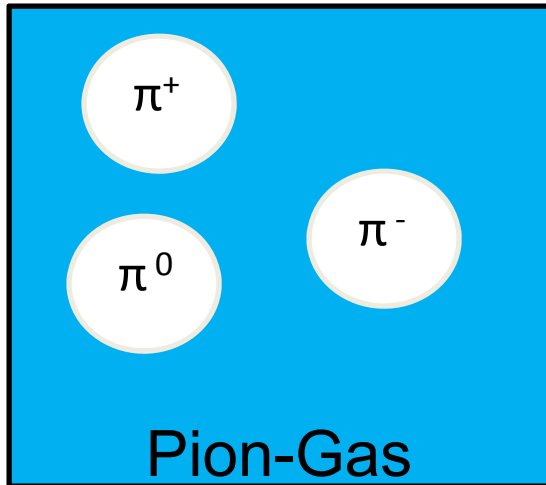


http://www.kvi.nl/~loehner/saf_seminar/2008/TheQuarkAndBagModels.ppt

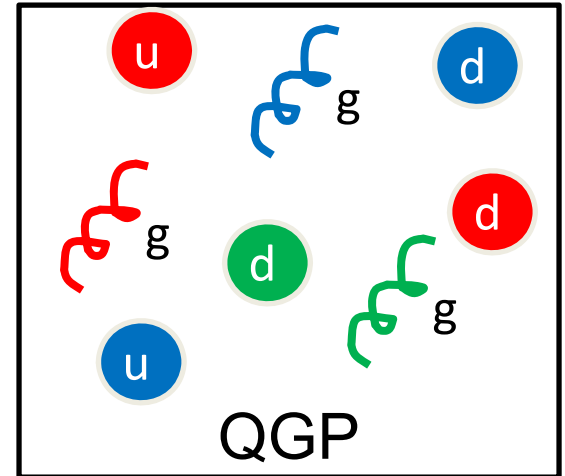
- Randbedingung: Quarks sind in Tasche eingesperrt
- Hadronen = Taschen konstanter Energiedichte (Λ_B^4) im nicht-perturbativen QCD-Vakuum

Bag-Konstante: $\Lambda_B \sim 200 \text{ MeV}$

Kritische Temperatur



Phasengrenze



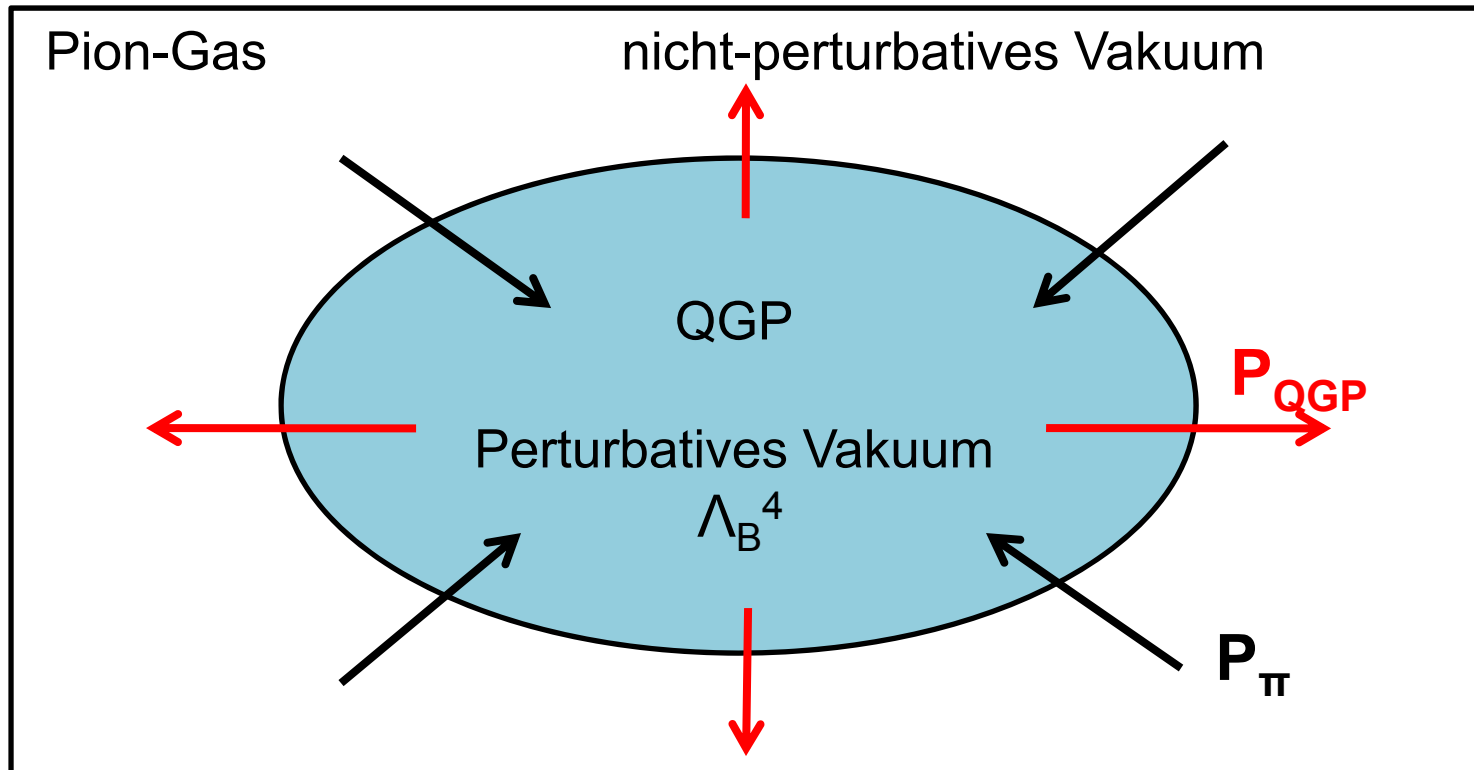
$$P_{\pi} = 3 \times \left(\frac{\pi^2}{90} \right) \times T^4$$

$$P_g = 2 \times 8 \times \left(\frac{\pi^2}{90} \right) \times T^4$$

$$P_{q,q} = 2 \times 2 \times 3 \times \frac{7}{4} \times \left(\frac{\pi^2}{90} \right) \times T^4$$

Kritische Temperatur

Pion-Gas und QGP im Gleichgewicht

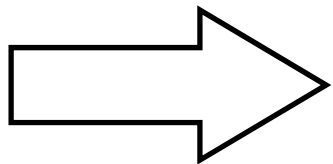


$$dE = +P_\pi 4\pi R^2 dR - P_{QGP} 4\pi R^2 dR + \Lambda_B^4 4\pi R^2 dR = 0$$

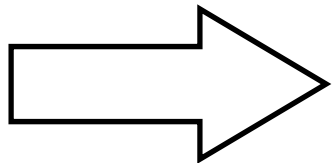
Kritische Temperatur

Gleichgewichtsbedingung:

$$P_{\pi} = P_{q,\bar{q}} + P_g - \Lambda_B^4$$



$$\frac{1}{30} \times \pi^2 \times T_c^4 = \frac{37}{90} \times \pi^2 \times T_c^4 - \Lambda_B^4$$

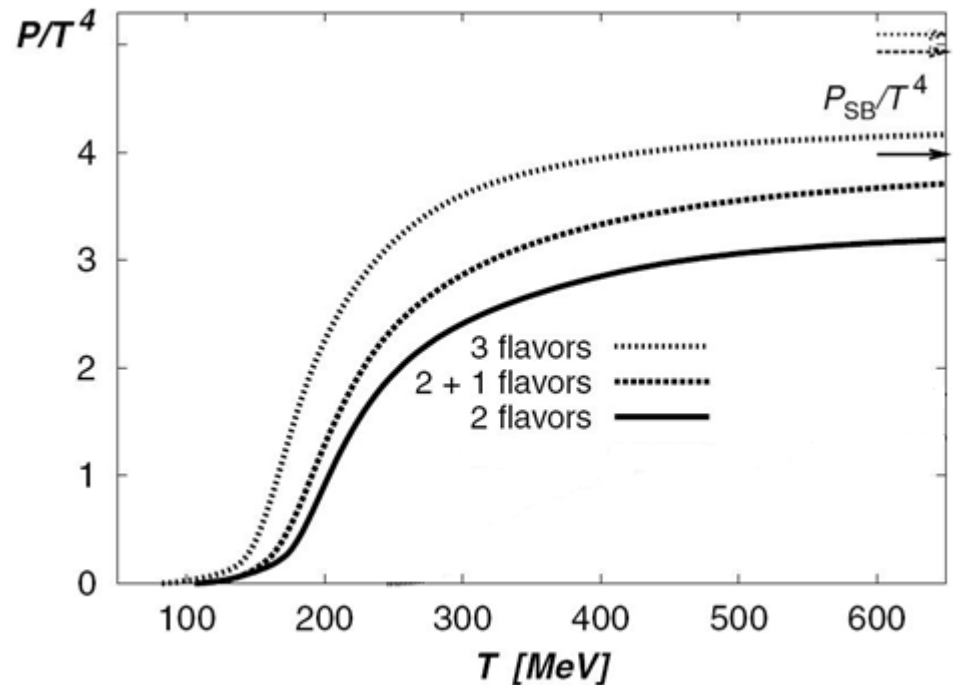


$$T_c = 144 \text{ MeV}$$

Kritische Temperatur

Gitter-QCD liefert bessere Möglichkeit für die Bestimmung von T_c

$$T_c = 173 \text{ MeV}$$

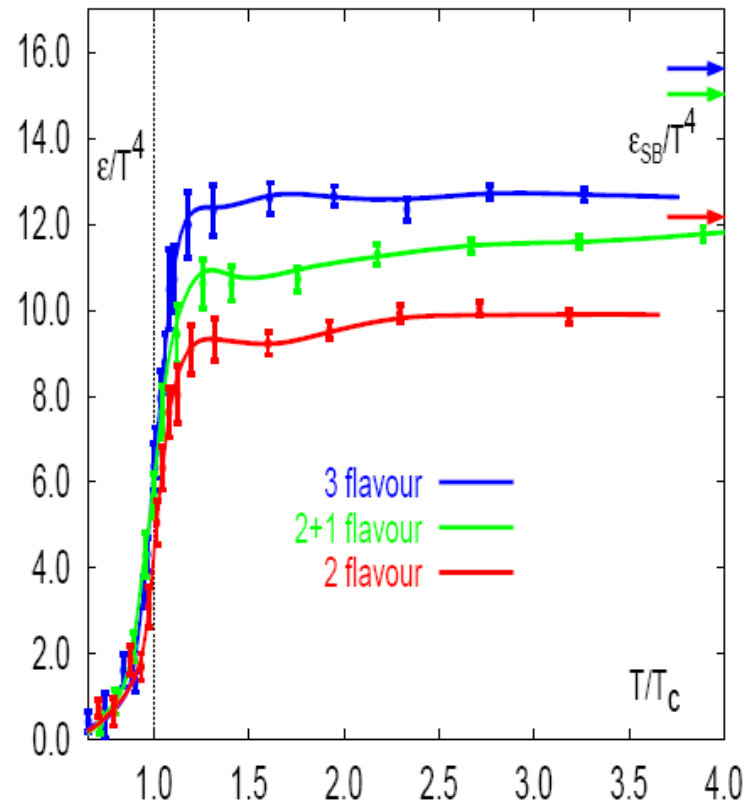


Letessier, J., Rafelski, J. Hadrons and quark-gluon plasma

Kritische Energiedichte

Abschätzung der kritischen Energiedichte mittels Gitter-QCD

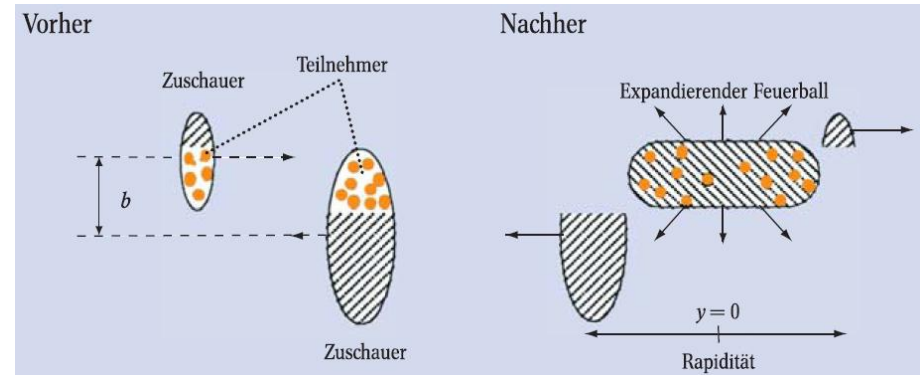
$$\varepsilon_c = 700 \frac{\text{MeV}}{\text{fm}^3}$$



arxiv.org/abs/nucl-th/0304013v1

Möglichkeiten ein QGP im Labor zu erzeugen

- Colliderexperimente mit ultra-relativistischen schweren Ionen
- möglichst zentrale Stöße

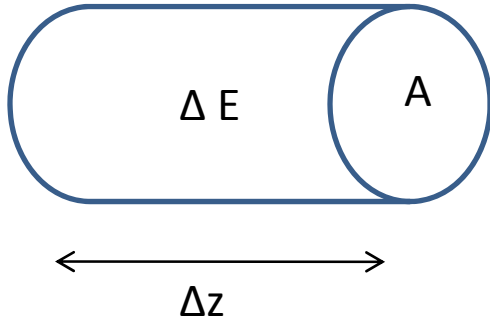


Physik Journal 1 (2002) Nr. 11. Eckardt et al.
Schwerionenphysik am RHIC

ultra-relativistisch heisst: $\sqrt{s_{NN}} > GeV / Nukleon$

**Können wir QGP erwarten?
Energiedichte?**

Energiedichte bei Colliderexperimenten



Energiedichte im Zylinder der Länge dz :

$$\varepsilon = \left(\frac{\Delta E_{\text{Zylinder}}}{A \Delta z_{\text{Zylinder}}} \right)_{z=0}$$

Pseudorapidität: $\eta = -\ln(\tan(\vartheta/2)) = \frac{1}{2} \ln\left(\frac{c\tau - z}{c\tau + z}\right)$

$$\Delta E_{\text{Zylinder}} = \left(\frac{dE}{d\eta} \right)_{\eta=0} \Delta \eta_{\text{Zylinder}} = \left(\frac{dE}{d\eta} \right)_{\eta=0} \left(\frac{d\eta}{dz} \right)_{z=0} \Delta z_{\text{Zylinder}} = \left(\frac{dE}{d\eta} \right)_{\eta=0} \frac{1}{c\tau} \Delta z_{\text{Zylinder}}$$



$$\varepsilon(\tau) = \frac{1}{c\tau A} \left(\frac{dE_{\perp}}{d\eta} \right)_{\eta=0}$$

wegen: $\left(\frac{dE}{d\eta} \right)_{\eta=0} = \left(\frac{dE_{\perp}}{d\eta} \right)_{\eta=0}$

Bjorken-Formel

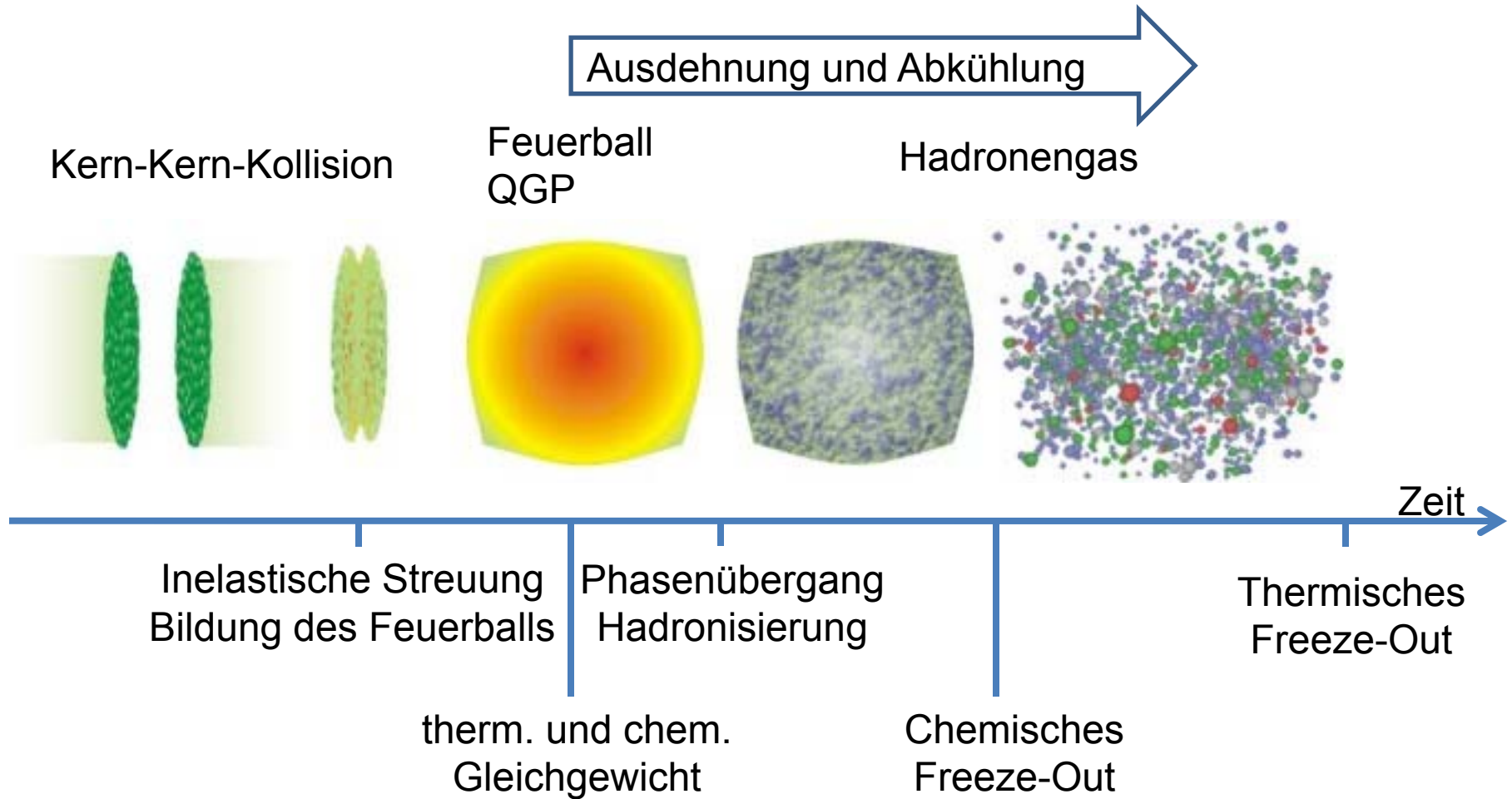
Collider

Start	Beschleuniger	Schwerpunkts- energie $\sqrt{s_{NN}}$	Beam	Energiedichte ϵ
1992	AGS (BNL)	5 GeV	Au	1.25 GeV/fm ³
1994	SPS (CERN)	17 GeV	Pb	2.6 GeV/fm ³
2000	RHIC (BNL)	200 GeV	Au	4.3 GeV/fm ³
2010	LHC (CERN)	5.5 TeV	Pb	15-60 GeV/fm ³

Kritische Energiedichte: $\epsilon_c = 700 \text{ MeV} / \text{fm}^3$

Theoretisch vorhergesagte Bedingung an die Energiedichte um QGP zu erzeugen ist erfüllt!

Ultra-relativistische Schwerionen-Kollision



<http://www.phy.duke.edu/research/NPTheory/QGP/transport/evo.jpg>

Charakteristische Temperaturen

- **Kritische Temperatur:**

Phasengrenze zwischen QGP und HG

- **Chemische Ausfrieretemperatur:**

keine inelastischen Stöße mehr

=> Hadronische Zusammensetzung steht fest

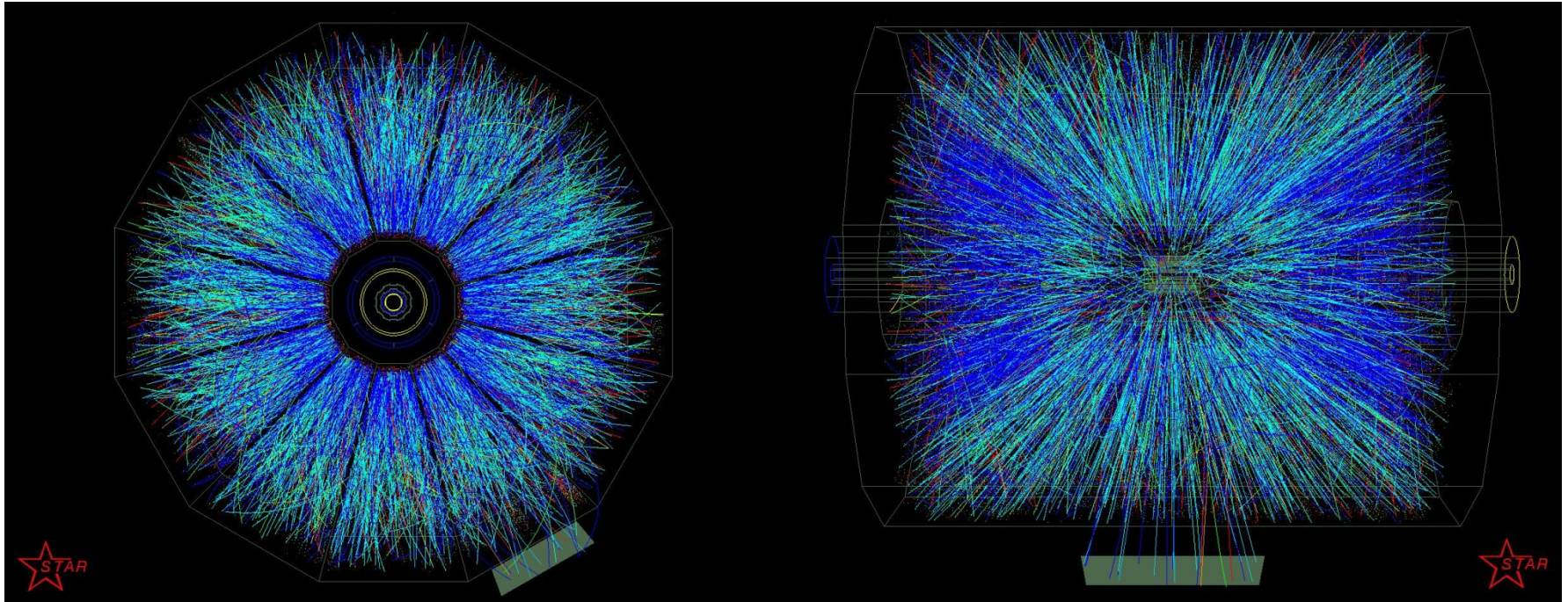
- **Thermische Ausfrieretemperatur:**

keine elastischen Stöße mehr (Hadronen entkoppeln)

=> Impulsverteilung steht fest

Detektor

Gold-Gold-Kollision am RHIC bei: $\sqrt{s_{NN}} = 200 \frac{\text{GeV}}{\text{Nukleon}}$



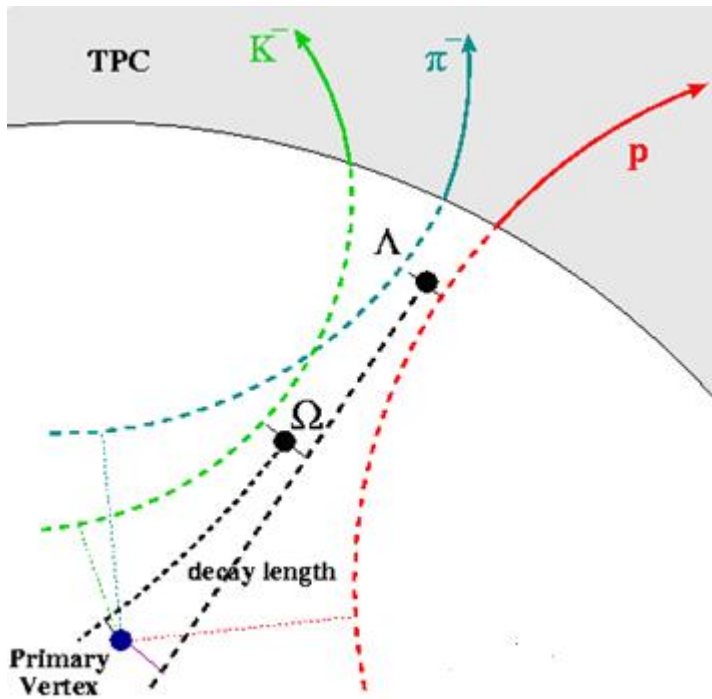
http://www.bnl.gov/rhic/images/ev2_front1.jpg

http://www.bnl.gov/rhic/images/ev2_side.jpg

Bestimmung von Teilchenhäufigkeiten

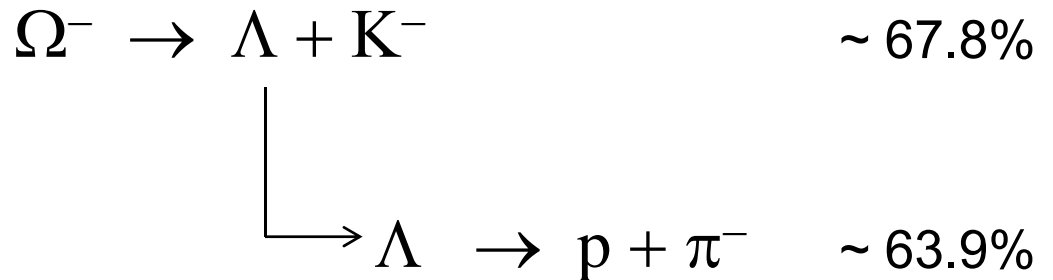
Zählratenbestimmung

Ω -Rekonstruktion



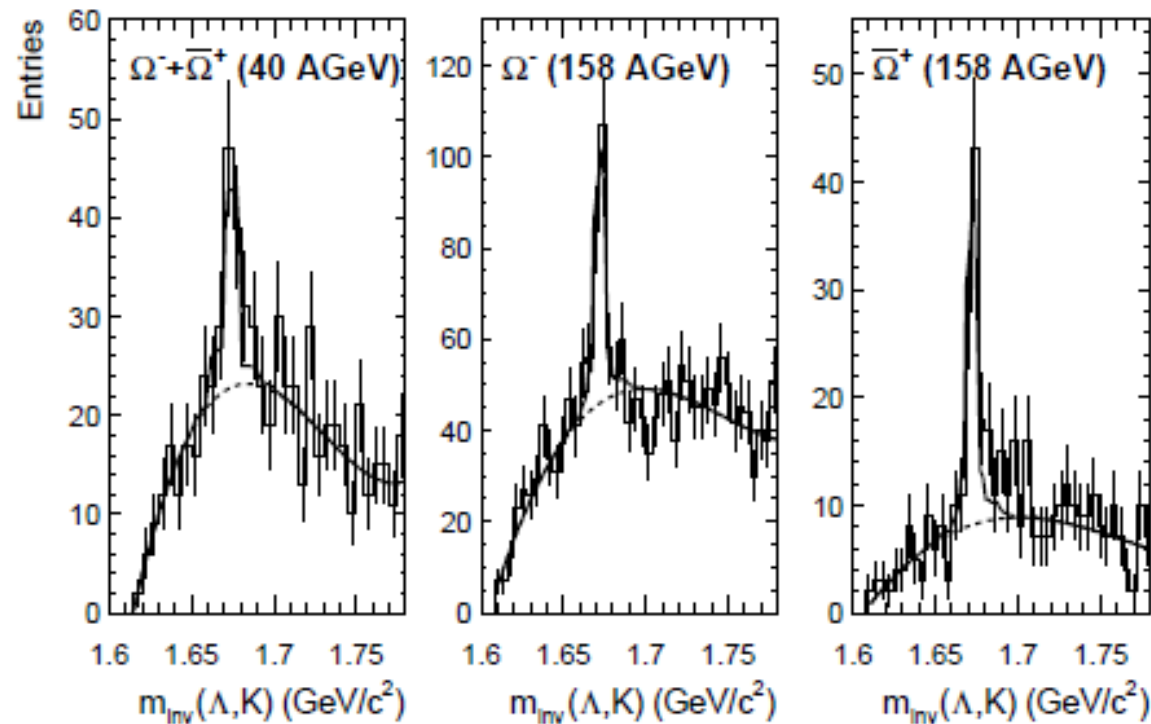
Ω (sss)
 $m=1.672 \text{ GeV}/c^2$
 $c\tau=2.46 \text{ cm}$ (Zerfallslänge)

Λ (uds)
 $m=1.116 \text{ GeV}/c^2$
 $c\tau=7.79 \text{ cm}$ (Zerfallslänge)



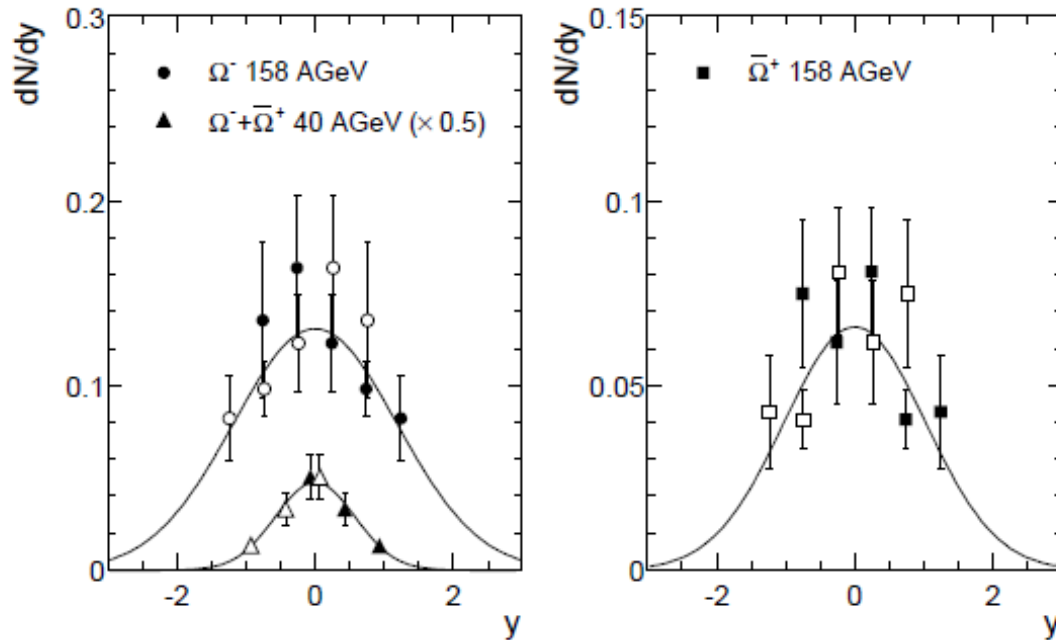
Messung am NA49 (SPS), Pb+Pb-Kollision

Bestimmung der invarianten Masse



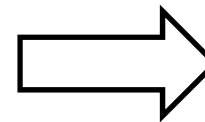
C. Alt et al., Phys.Rev.Lett. 94 (2005) 192301

Messung am NA49 (SPS), Pb+Pb-Kollision



Rapidity:

$$y = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{E + p_{\parallel}}{E - p_{\parallel}} \right)$$



Gesamtteilchenzahl

C. Alt et al., Phys.Rev.Lett. 94 (2005) 192301

	40 A GeV $\Omega^- + \Omega^+$	158 A GeV Ω^-	158 A GeV Ω^+
N	$0.14 \pm 0.03 \pm 0.04$	$0.43 \pm 0.09 \pm 0.03$	$0.19 \pm 0.04 \pm 0.02$

Statistisches Modell

Wähle zur Beschreibung: **Grosskanonisches Ensemble**
(Teilchenanzahl Sorte i nicht erhalten)

Grosskanonische Zustandssumme Teilchensorte i
(Wechselwirkung zwischen den Teilchensorten werden vernachlässigt)

$$Z_i^{GK}(T, V, \vec{\mu}) = \text{Tr}[e^{-\beta(H - \vec{\mu} \cdot \vec{N}_i)}]$$

$$\vec{\mu} \cdot \vec{N}_i = \mu_B B_i + \mu_{I_3} I_{3i} + \mu_S S_i + \mu_C C_i$$

Statistisches Modell

Bose-Einstein (-) bzw. Fermi-Dirac Verteilung (+)

$$n_i = \frac{g_i}{2\pi^2} \int_0^\infty \frac{dp p^2}{e^{(\varepsilon_i(p) - \bar{\mu} \bar{N}_i)/T} \pm 1}$$

Energie:

$$\varepsilon_i = \sqrt{p^2 + m_i^2}$$

Spinentartungsfaktor (Spin- S_i -Teilchen): $g_i = 2S_i + 1$

Statistisches Modell

Erhaltungssätze

$$V \sum_i n_i B_i = N_B$$

B_i : Baryonenzahl, Teilchensorte i

$$V \sum_i n_i I_{3i} = I_3^{tot}$$

I_{3i} : Isospin, Teilchensorte i

$$V \sum_i n_i S_i = 0$$

S_i : Strangeness, Teilchensorte i

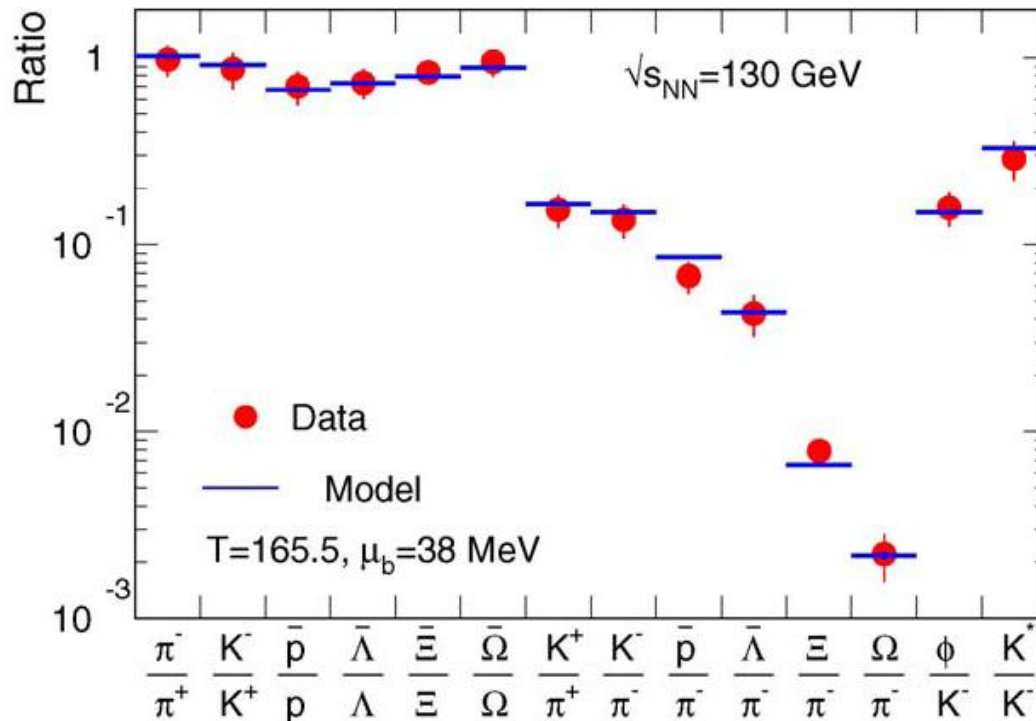
$$V \sum_i n_i C_i = 0$$

C_i : Charm, Teilchensorte i

Unter Verwendung dieser Gleichungen können wir n_i als Funktion von T und μ_B schreiben.

Teilchenhäufigkeiten

Minimiere: $\chi^2 = \sum_i \frac{(R_i^{\text{exp}} - R_i^{\text{theo}})^2}{\sigma_i^2}$ \longrightarrow μ_B und T

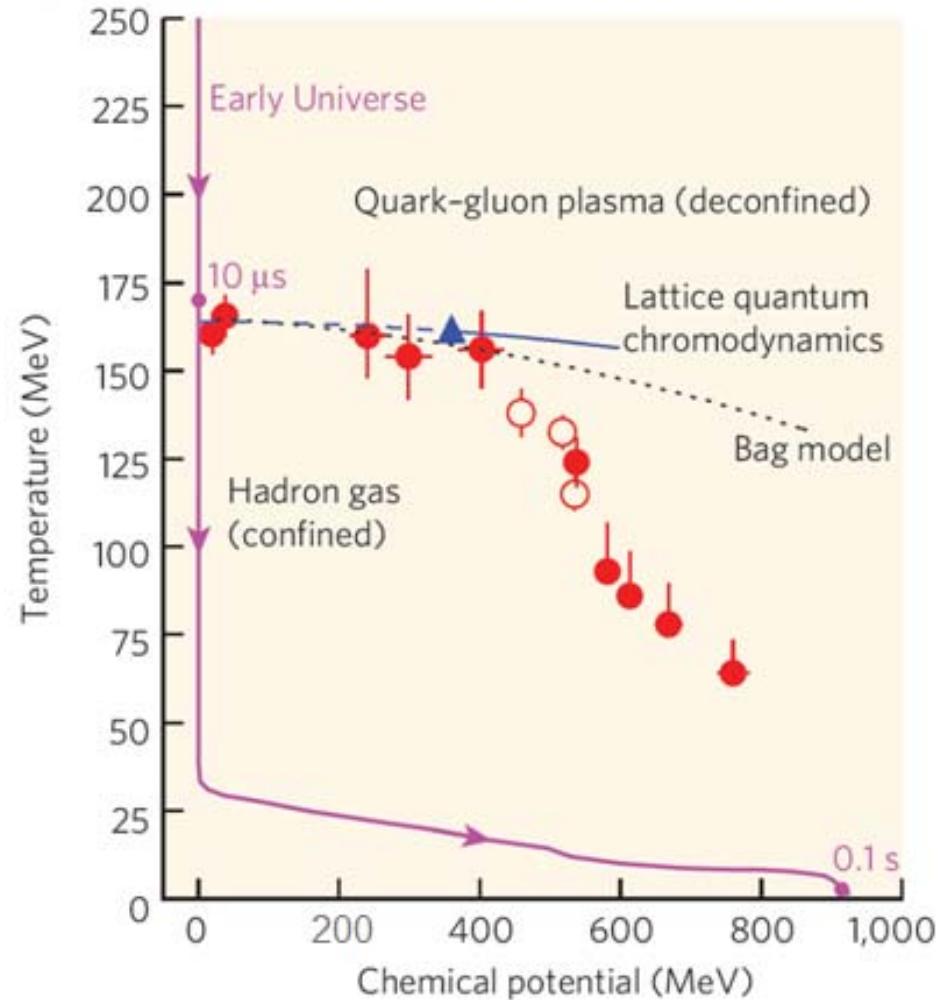
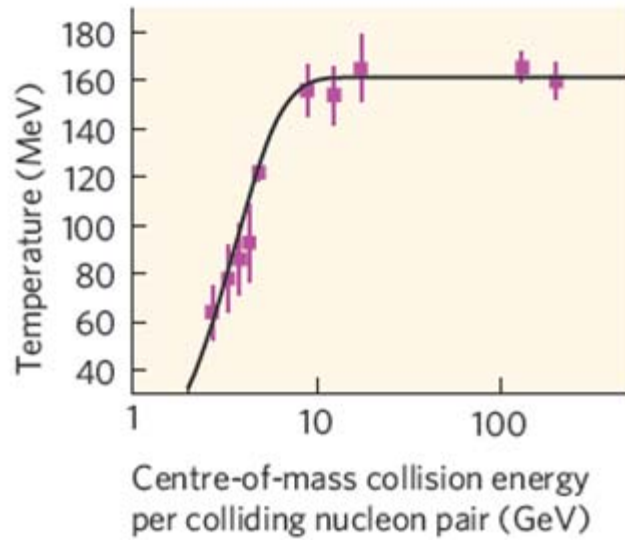
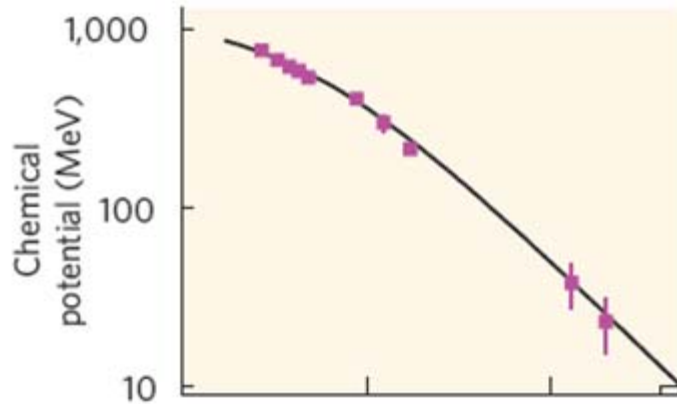


Messung am RHIC:
Gold-Gold-Kollision bei einer
Schwerpunktsenergie von

$$\sqrt{s_{NN}} = 130 \text{ GeV}$$

A. Andronic et al. / Nuclear Physics A 772 (2006) 167–199

$T(\sqrt{s_{NN}})$, $\mu_B(\sqrt{s_{NN}})$ und Phasendiagramm



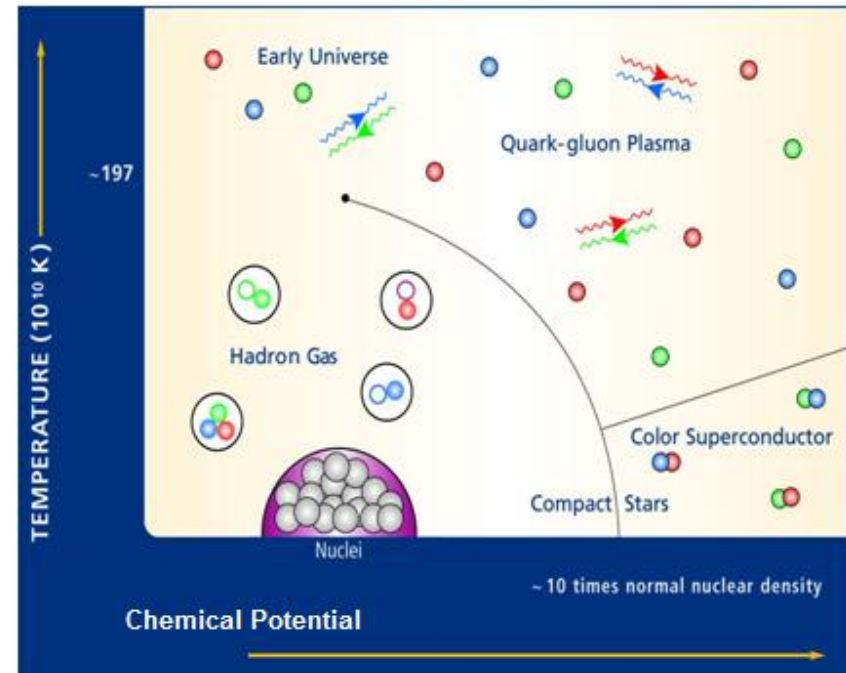
Braun-Munzinger , Stachel. The quest for the quark-gluon plasma. Nature 448 (2007) 19

Zusammenfassung

- Theoretisch erwartet man Quark-Gluon Plasma aufgrund des speziellen Verlaufs der starken Kopplungskonstante
- Experimente am AGS, SPS und RHIC werden gut durch das statistische Modell beschrieben
- Es gibt weitere Signaturen des QGP, die ausnutzen, dass das QGP als ein sehr dichtes Medium angenommen wird:
 - Häufigkeit J/ψ
 - Jet-Quenching

Zusammenfassung

- LHC (z.B. ALICE) soll endgültige Sicherheit bringen, ob das QGP existiert.
Es sollen dort weiterhin die Eigenschaften des QGP untersucht werden und die Phasengrenze genauer bestimmt werden



- Man strebt an, das Verhalten von stark wechselwirkender Materie für hohe μ_B zu untersuchen (CBM; FAIR in Darmstadt)
- Man strebt an, Signaturen des Phasenübergangs im Universum nachzuweisen

Literatur

- Yagi, K., Hatsuda, T. and Miake, Y. Quark-Gluon Plasma
- Letessier, J. and Rafelski, J. Hadrons and quark-gluon plasma
- Braun-Munzinger, P., Stachel, J. The quest for the quark-gluon-plasma. Nature Vol 448 Issue no. 7151 19 July 2007
- Andronic, A., Braun-Munzinger, P. and Stachel, J. Hadron production in central nucleus–nucleus collisions at chemical freeze-out. Nucl. Phys. A 772 (2006) 167–199
- 19. Becattini, B., Gadzicki, M., Keranen, A., Manninen, J. and Stock, R. Chemical equilibrium study in nucleus–nucleus collisions at relativistic energies. Phys. Rev. C 69, 024905 (2004)
- Braun-Munzinger, P., Redlich, K. and Stachel, J. in Quark–Gluon Plasma 3 (eds Hwa, R. C. & Wang, X. N.), 491–599 (World Scientific, Singapore, 2004).
- Braun-Munzinger, P. and Stachel, J. Probing the phase boundary between hadronic matter and the quark-gluon plasma in relativistic heavy-ion collisions. Nucl. Phys. A 606, 320–328 (1996)
- Braun-Munzinger, P., Stachel, J. and Wetterich, C. Chemical freeze-out and the QCD phase transition temperature. Phys. Lett. B. 596, 61–69 (2004).
- Eckardt, V., Schmitz, N. und Seyboth, P. Schwerionenphysik am RHIC. Physik Journal 1 (2002) Nr. 11
- www.phenix.bnl.gov/phenix/WWW/publish/stankus/FOCUS_06/PHENIX_Focus06_Stankus.ppt
- Braun-Munzinger, P., Wambach, J. Extreme Materie. Physik Journal 5 (2006) Nr. 10

Literatur

- Klanner , R. und Schörner-Sadenius, T. Verstehen wir die starke Kraft? Physik Journal 5 (2006) Nr. 5
- Rafelski, J. and Letessier, J. Status of Strangeness-Flavor Signature of QGP. arXiv:hep-ph/0610106v1
- Bjorken, J. Highly relativistic nucleus-nucleus collisions: The central rapidity region. Phys. Rev. D. Vol. 27, 1 (Jan. 1983)
- <http://www.physik.uni-bielefeld.de/theory/e6/particle/particle.html>
- www.physi.uni-heidelberg.de/~fschney/2008SS-Preseminar/Model.pdf
- Munzinger, P. and Wambach, J. The Phase Diagram of Strongly-Interacting Matter. arXiv:0801.4256v1 [hep-ph]
- Reygers, K. Die Suche nach dem Quark-Gluon-Plasma mit dem PHENIX-Experiment am RHIC (2004)
- <http://www.ikf.physik.uni-frankfurt.de/IKF-HTML/highenergy/virtual/workshops/meeting-Jan-2006/Stachel/stachel-vi-sim-jan06-edens.pdf>
- Na49 Collaboration. Ω^- and Ω^+ production in central Pb+Pb collisions at 40 and 158A GeV. arXiv:nucl-ex/0409004v4
- Hands, S. The Phase Diagramm of QCD. arXiv:physics/0105022v1 (2001)