

Schwerionenstöße und das stark wechselwirkende Quark-Gluon-Plasma

Hendrik van Hees

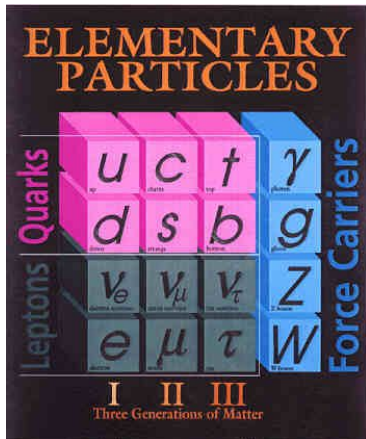
Texas A&M University

3. November 2005



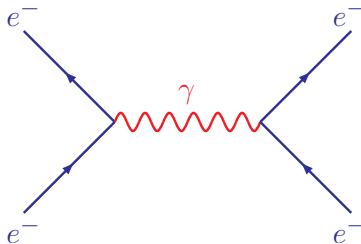
- 1 Das Standardmodell der Elementarteilchen
- 2 Das Quark-Gluon-Plasma
- 3 Schwerionenstöße
- 4 Elektromagnetische Observable
- 5 Schwere Quarks im Quark-Gluon-Plasma
- 6 Zusammenfassung

Teilchen und Kräfte im Standardmodell



und Higgsboson

- Grundprinzip des Standardmodells: **Eichsymmetrie**
- Eichbosonen „koppeln“ an **erhaltene Ströme**

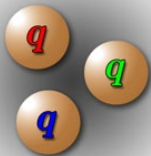


- **Higgsboson**: spontane Brechung der schwachen Eichsymmetrie
- $m_q, m_l, m_W, m_Z \propto \langle H \rangle$
- $m_\gamma, m_g = 0$

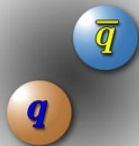
PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

Property \ Interaction	Gravitational	Weak	Electromagnetic	Strong	
		(Electroweak)		Fundamental	Residual
Acts on:	Mass – Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge	See Residual Strong Interaction Note
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons	Electrically charged	Quarks, Gluons	Hadrons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	W^+ W^- Z^0	γ	Gluons	Mesons
Strength relative to electromag for two u quarks at:	10^{-41}	0.8	1	25	Not applicable to quarks
	10^{-41}	10^{-4}	1	60	
	10^{-36}	10^{-7}	1	Not applicable to hadrons	20

- Starke Wechselwirkung: **asymptotisch frei**
- Kräfte **groß** bei **großen Abständen** von Teilchen mit **Farbladung**
- bei niedrigen Energien nur farbneutrale Teilchen frei beobachtbar („**Confinement**“)
- \Rightarrow „relevante Freiheitsgrade“ **Hadronen**



- Baryonen: drei Quarks
- Beispiele: Protonen, Neutronen, ...



- Mesonen: Quark+Antiquark
- Beispiele: Pionen, ρ -Mesonen, ...

- Näherungsweise **chirale Symmetrie** der QCD

$$\mathcal{L}_{\text{QCD}} = \bar{q}(\not{\partial} - ig\not{A} - \hat{M})q - \frac{1}{4}G_{\mu\nu}^a G^{a\mu\nu}$$

- Im chiralen Limes $\hat{M} \rightarrow 0 \Rightarrow$ **Vektor-Axialvektor**symmetrien

$$\psi \rightarrow \exp[-i(\vec{\alpha}_V + \gamma_5 \vec{\alpha}_A)\vec{T}]\psi, \quad \vec{T} : \text{SU}(2)_{\text{flavor}} \text{ oder } \text{SU}(3)_{\text{flavor}}$$
$$G_{\mu}^a \rightarrow G_{\mu}^a$$

- (**Fast**) erhaltene Ströme (Noether)

$$\vec{j}_V^{\mu} = \bar{\psi}\vec{T}\gamma^{\mu}\psi, \quad \vec{j}_A^{\mu} = \bar{\psi}\vec{T}\gamma_5\gamma^{\mu}\psi$$

- Näherungsweise **chirale Symmetrie** der QCD

$$\mathcal{L}_{\text{QCD}} = \bar{q}(\not{\partial} - ig\not{A} - \hat{M})q - \frac{1}{4}G_{\mu\nu}^a G^{a\mu\nu}$$

- Im chiralen Limes $\hat{M} \rightarrow 0 \Rightarrow$ **Vektor-Axialvektor**symmetrien

$$\psi \rightarrow \exp[-i(\vec{\alpha}_V + \gamma_5 \vec{\alpha}_A)\vec{T}]\psi, \quad \vec{T} : \text{SU}(2)_{\text{flavor}} \text{ oder } \text{SU}(3)_{\text{flavor}}$$

$$G_{\mu}^a \rightarrow G_{\mu}^a$$

- spontane Brechung der chiralen Symmetrie durch **Quarkkondensat**
 $\langle 0 | \bar{u}u | 0 \rangle \neq 0$

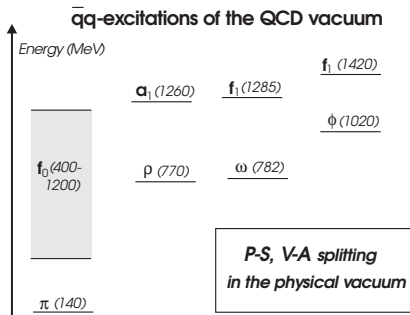
- explizite Brechung durch **Quarkmassen** \hat{M}

- Ward Identitäten**

$$\left\langle 0 \left| \partial^{\mu} j_{A\mu}^k \right| \pi^j(\vec{k}) \right\rangle = iF_{\pi} m_{\pi}^2 \delta^{kj}$$

$$m_{\pi}^2 F_{\pi}^2 = -(m_u + m_d) \langle 0 | \bar{u}u | 0 \rangle$$

- Pionen als Pseudo-Goldstonebosonen
- Unterschiede der Massen der chiralen Partnermesonen



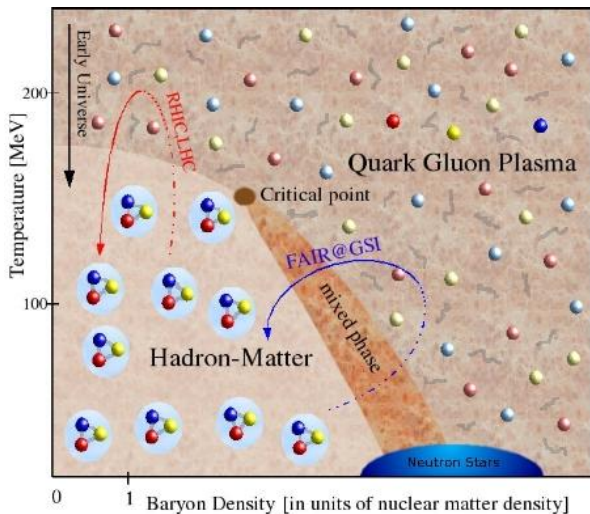
QCD bei hohen Temperaturen und Dichten

- Asymptotische Freiheit
- Wechselwirkungen schwach bei hohen Energien oder geringen Teilchenabständen

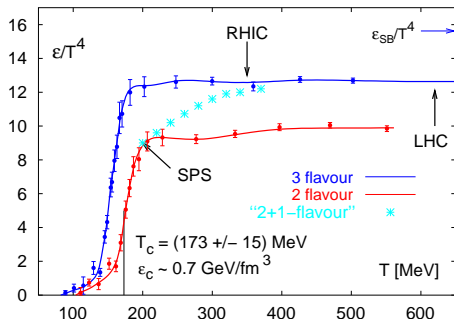


- „Relevante Freiheitsgrade“ Hadronen \rightarrow quarks + Gluonen

Das QCD-Phasendiagramm



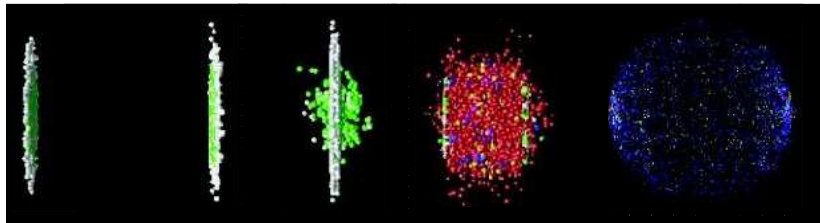
Das QCD-Phasendiagramm



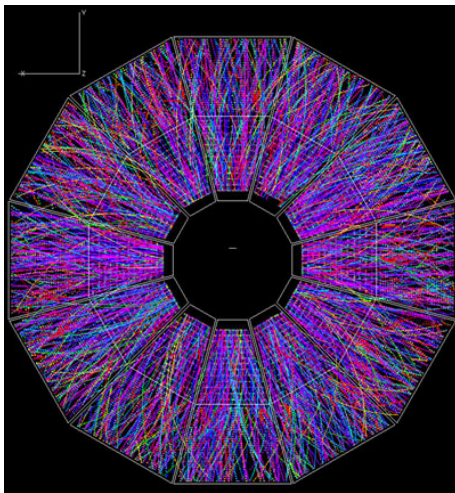
Gitter-QCD-Simulationen
[Karsch, Laermann et al]

- Energiedichte \rightarrow für $T > T_c$
Gas aus masselosen Quarks und Gluonen
- Stefan-Boltzmann-Limes
(noch?) nicht erreicht \Rightarrow
Wechselwirkungen!
- Gitterrechnungen:
„**Deconfinementphasenübergang**“
 \leftrightarrow **Chiraler Phasenübergang**

- Schwerpunktsenergie am RHIC:
 $\sqrt{s} = 200 \text{ GeV/Nukleon}$ (Gold-Goldstöße)

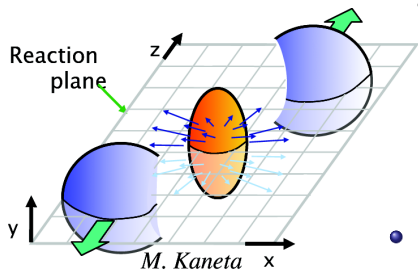


- Problem: Confinement \Rightarrow QGP nicht direkt beobachtbar
- In Detektor: Hadronen, Leptonen, Photonen
- Nachweis des QGP's?
- Eigenschaften des QGP's?



Au-Au (200 GeV)-Event im STAR-Detektor am RHIC

Thermalisierung und kollektive Bewegung

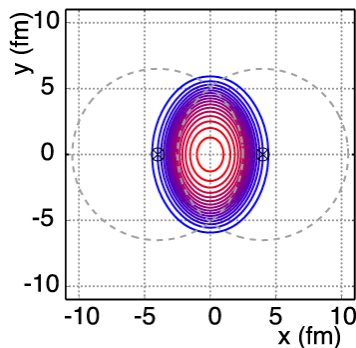


- Bewegung der erzeugten Teilchen: wird gut durch **ideale Hydrodynamik** beschrieben

- **Lokales thermisches Gleichgewicht** (nach $\sim 0.6 \text{ fm}/c$)
- **Geringe Viskosität**
- **Große Streuquerschnitte!**
- Energiedichte $\epsilon \sim 20 \text{ GeV}/\text{fm}^3 \gg \epsilon_c!$

- Halbzentrale Stöße:
Elliptische Reaktionszone
- Druckgradienten \Rightarrow
Anisotroper („elliptischer“) Fluß

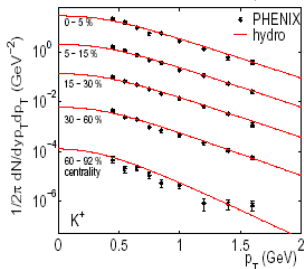
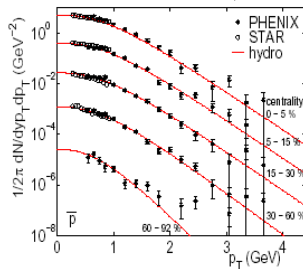
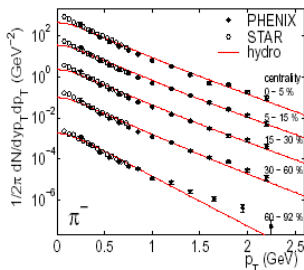
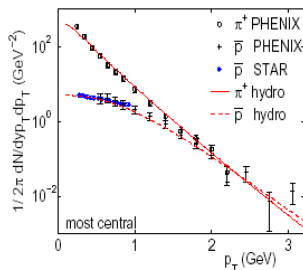
$$\frac{dN}{p_T dp_T dy d\varphi} = \frac{dN}{2\pi p_T dp_T dy} [1 + v_2(p_T) \cos(2\varphi) + \dots]$$

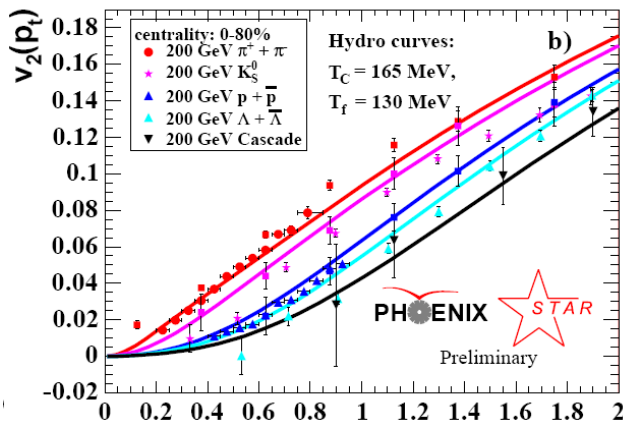


- Bewegung der erzeugten Teilchen: wird gut durch **ideale Hydrodynamik** beschrieben
 - **Lokales thermisches Gleichgewicht** (nach $\sim 0.6 \text{ fm}/c$)
 - **Geringe Viskosität**
 - **Große Streuquerschnitte!**
 - Energiedichte $\epsilon \sim 20 \text{ GeV}/\text{fm}^3 \gg \epsilon_c!$
- Halbzentrale Stöße:
Elliptische Reaktionszone
- Druckgradienten \Rightarrow
Anisotroper („elliptischer“) Fluß

$$\frac{dN}{p_T dp_T dy d\varphi} = \frac{dN}{2\pi p_T dp_T dy} [1 + v_2(p_T) \cos(2\varphi) + \dots]$$

Thermalisierung und kollektive Bewegung

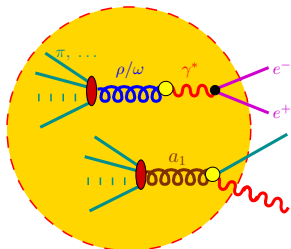




- Kollektiver **anisotroper Fluß** beobachtet
⇒ Frühe (lokale) Equilibrierung

Elektromagnetische Observable

- γ, ℓ^\pm : nur em. (und schwache) Wechselwirkungen
- können auch aus heißer, dichter Phase entkommen
- Wiederherstellung der chiralen Symmetrie beobachtbar?



Elektromagnetische Observable

- γ, ℓ^\pm : nur em. (und schwache) Wechselwirkungen
- können auch aus heißer, dichter Phase entkommen
- Wiederherstellung der chiralen Symmetrie beobachtbar?

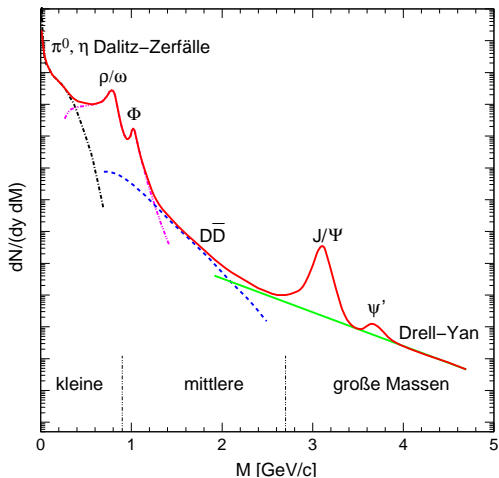
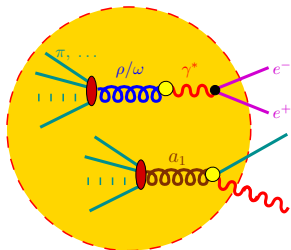


Fig. von A. Drees

- thermische **Photonen-** and **Dileptonenrate** \leftrightarrow **Korrelationsfunktion** für **em. Strom** ($J_\mu = \sum_f Q_f \bar{\psi}_f \gamma_\mu \psi_f$)

- thermische **Photonen-** and **Dileptonenrate** \leftrightarrow **Korrelationsfunktion** für em. Strom ($J_\mu = \sum_f Q_f \bar{\psi}_f \gamma_\mu \psi_f$)

$$\Pi_{\mu\nu}^<(q) = \int d^4x \exp(iq \cdot x) \langle J_\mu(0) J_\nu(x) \rangle_T = -2n_B(q_0) \text{Im} \Pi_{\mu\nu}^{(\text{ret})}(q)$$

$$q_0 \frac{dN_\gamma}{d^4x d^3\vec{q}} = \frac{\alpha_{\text{em}}}{2\pi^2} g^{\mu\nu} \text{Im} \Pi_{\mu\nu}^{(\text{ret})}(q) \Big|_{q_0=|\vec{q}|}$$

$$\frac{dN_{e^+e^-}}{d^4x d^4k} = -g^{\mu\nu} \frac{\alpha^2}{3q^2 \pi^3} \text{Im} \Pi_{\mu\nu}^{(\text{ret})}(q) \Big|_{q^2=M_{e^+e^-}^2}$$

- niedrigste Ordnung in α : $e^2 \Pi_{\mu\nu} \simeq \Sigma_{\mu\nu}^{(\gamma)}$

- **Vektor-** und **Axialvektormesonen** \leftrightarrow Korrelatoren der entsprechenden Ströme

$$\Pi_{V/A}^{\mu\nu}(p) := \int d^4x \exp(ipx) \left\langle J_{V/A}^\nu(0) J_{V/A}^\mu(x) \right\rangle_{\text{ret}}$$

- **Vektor-** und **Axialvektormesonen** \leftrightarrow Korrelatoren der entsprechenden Ströme

$$\Pi_{V/A}^{\mu\nu}(p) := \int d^4x \exp(ipx) \left\langle J_{V/A}^\nu(0) J_{V/A}^\mu(x) \right\rangle_{\text{ret}}$$

- Wardidentitäten der chiralen Symmetrie \Rightarrow **Weinberg-Summenregeln**

$$f_\pi^2 = - \int_0^\infty \frac{dp_0^2}{\pi p_0^2} [\text{Im } \Pi_V(p_0, 0) - \text{Im } \Pi_A(p_0, 0)]$$

- **Vektor-** und **Axialvektormesonen** \leftrightarrow Korrelatoren der entsprechenden Ströme

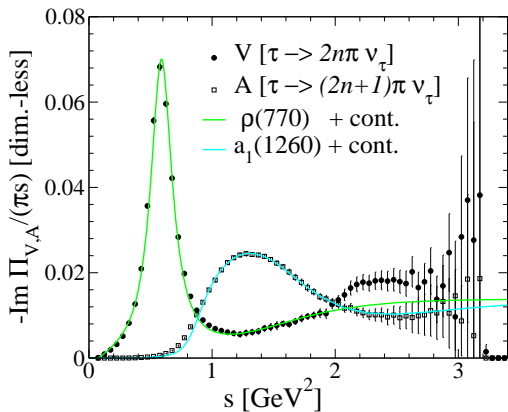
$$\Pi_{V/A}^{\mu\nu}(p) := \int d^4x \exp(ipx) \left\langle J_{V/A}^\nu(0) J_{V/A}^\mu(x) \right\rangle_{\text{ret}}$$

- Wardidentitäten der chiralen Symmetrie \Rightarrow **Weinberg-Summenregeln**

$$f_\pi^2 = - \int_0^\infty \frac{dp_0^2}{\pi p_0^2} [\text{Im } \Pi_V(p_0, 0) - \text{Im } \Pi_A(p_0, 0)]$$

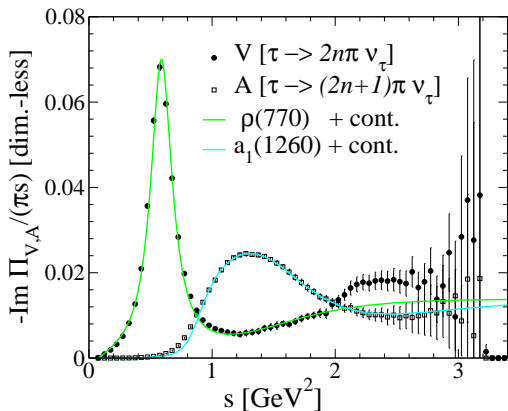
- Spektralfunktionen von **Vektor-** (z.B. ρ) und **Axialvektormesonen** (z.B. a_1) \leftrightarrow **Ordnungsparameter der chiralen Symmetrie!**

Vektormesonen und chirale Symmetrie

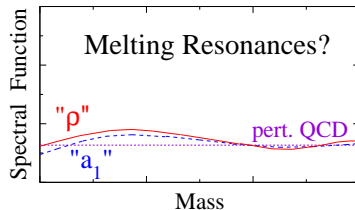
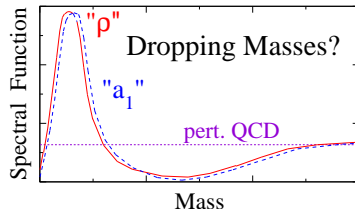


[R. Rapp]

Vektormesonen und chirale Symmetrie

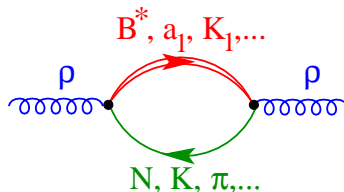
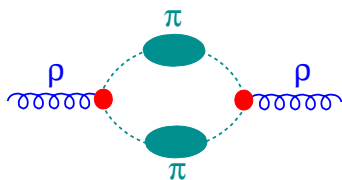


[R. Rapp]



[R. Rapp]

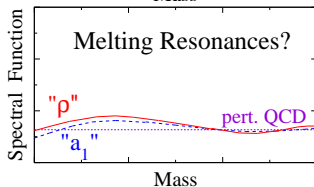
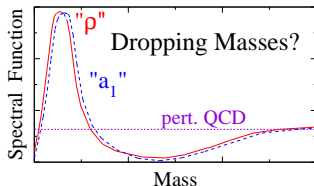
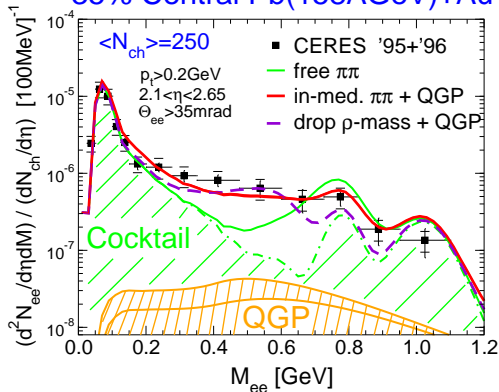
- Chirale Modelle: universell nur im **Niederenergielimes**
- Phänomenologische hadronische Modelle [Chanfray et al, Herrmann et al, Rapp et al, ...]
- $\pi\pi$ -Wechselwirkungen und **baryonische Anregungen**



- **Baryonen** wichtig (auch am RHIC mit kleinen **Nettobaryonendichten** $n_B - n_{\bar{B}}$)
- $n_B + n_{\bar{B}}$ relevant (CP-Invarianz der starken Wechselwirkung)

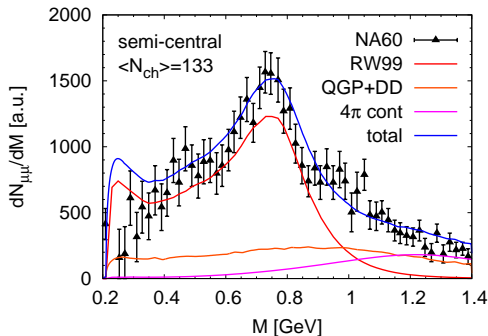
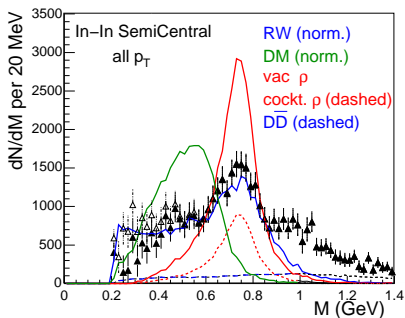
- Chirale Modelle: universell nur im **Niederenergielimes**
- „Hidden local symmetry“ und „Vektormanifestation“
- longitudinaler Anteil des ρ -Mesons \leftrightarrow chiraler Partner des Pions
- „dropping mass“
- (noch) keine **Baryonen**

35% Central Pb(158A GeV)+Au



Neue Daten von NA60

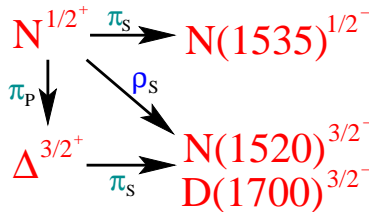
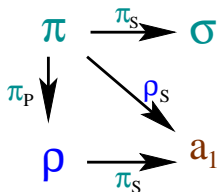
[Damjanovic et al]



• neu:

- QGP-Beitrag
- Beitrag von $D\bar{D}$ -Annihilation
- 4π und höhere Beiträge
(einschließlich AV-Mischung!)

- **Chirales** Modell mit Baryonen



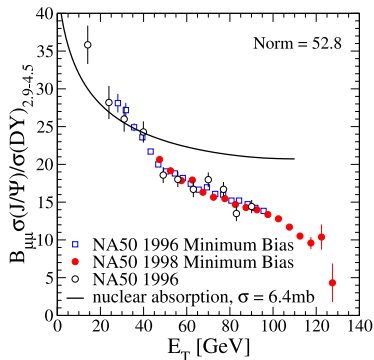
- (Axial-) Vektor Mesonen (Eichtheorie?)
- Näherungsverfahren für **dynamische Eigenschaften** (Spektralfunktionen) und **thermodynamische Größen** (Phasendiagramm)?
⇒ Selbstkonsistente Näherungsverfahren

Schwere Quarks im Quark-Gluon-Plasma

- Charm- und Bottomquarks werden **früh in primordialen Stößen** erzeugt
- Anfangsverteilung \sim wie in pp-Stößen (\times Zahl der Stöße)
- Modifikation von Observablen von Hadronen mit schweren Quarks \Rightarrow Eigenschaften des QGP
- „Klassische“ Vorhersage: **Unterdrückung von J/ψ -Mesonen** ($\bar{c}c$) \Leftrightarrow **Abschirmung der „Farbkräfte“** im QGP [Matsui, Satz 1986]

Schwere Quarks im Quark-Gluon-Plasma

- Charm- und Bottomquarks werden **früh in primordialen Stößen** erzeugt
- Anfangsverteilung \sim wie in pp-Stößen (\times Zahl der Stöße)
- Modifikation von Observablen von Hadronen mit schweren Quarks \Rightarrow Eigenschaften des QGP
- „Klassische“ Vorhersage: **Unterdrückung von J/ψ -Mesonen** ($\bar{c}c$) \Leftrightarrow **Abschirmung der „Farbkraft“** im QGP [Matsui, Satz 1986]



(Anomale) Unterdrückung von J/ψ -Mesonen in **Pb-Pb-Stößen** am SpS (CERN)

Thermalisierung und elliptischer Fluß schwerer Quarks

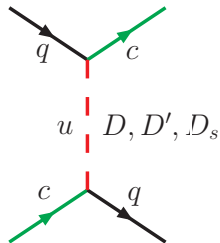
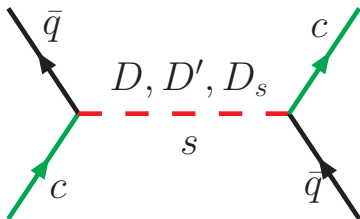
HvH, R. Rapp, Phys. Rev. C 71, 034907 (2005); HvH, V. Greco, R. Rapp, nucl-th/0508055, hep-ph/0510050

- am RHIC (BNL): **Elektronen** von D - und B -Mesonzerfällen:
 D -Mesonen = $c\bar{u}/\bar{d}$ -Mesonen
 B -Mesonen = $b\bar{u}/\bar{d}$ -Mesonen
- Verteilungen geben D - und B -Mesonen-Spektren wieder
- großes v_2 und kleines **kleines** R_{AA}

$$R_{AA} = \frac{\left(\frac{dN}{dp_T}\right)_{AA\text{-Sto\ss}}}{\left(\frac{dN}{dp_T}\right)_{pp\text{-Sto\ss}}}$$

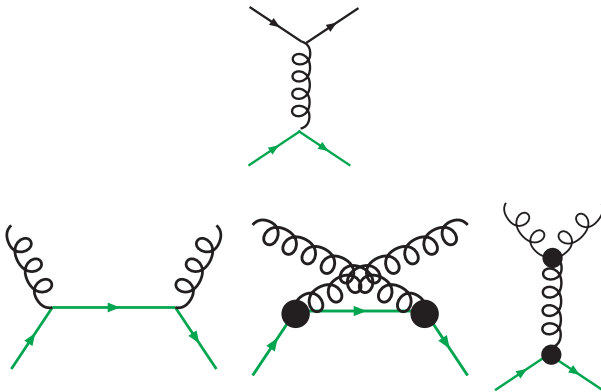
- Nur erklärbar, wenn **schwere Quarks** thermalisieren
⇒ Starke Wechselwirkung mit leichten Konstituenten des **QGP** ⇒ **sQGP**

- Möglicher **nicht-perturbativer** Mechanismus: Existenz von „D- und B-mesonischen Resonanzen“ bei $T > T_c$
- motiviert durch Gitter-QCD-Rechnungen (Umeda et al '02, Datta et al '03)
- führt zu **elastischer Resonanzstreuung** schwerer Quarks im QGP
- Effektives feldtheoretisches Modell
 - chirale Symmetrie
 - Spinsymmetrie von „heavy-quark effective theory“



- **D-Mesonpropagatoren** (mit Einschleifenselbstenergie „gedressed“)
- **Zwei** Modellparameter:
 - Masse der Resonanzen: $m_D = 2 \text{ GeV}$
 - Kopplungskonstante $\Rightarrow \Gamma_D = 0.4 \dots 0.75 \text{ GeV}$
(\rightarrow von NJL-Modellrechnungen [Blaschke et al])
- Analoges Modell für **B-mesonen**
 $m_B = 5 \text{ GeV}, \Gamma_B = 0.4 \dots 0.75 \text{ GeV}$

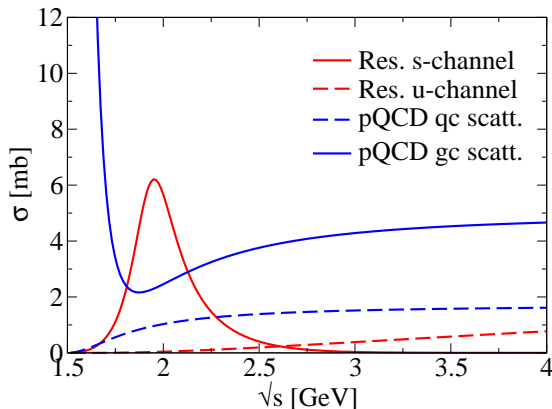
Matrixelemente niedrigster Ordnung [Combridge '79]



Regularisierung des t -Kanal-Gluonaustauschdiagramms:

Gluonen-Debye-Masse: $\mu_g = gT$, $\alpha_s = 0.4$

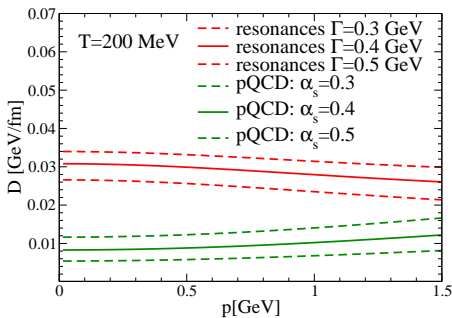
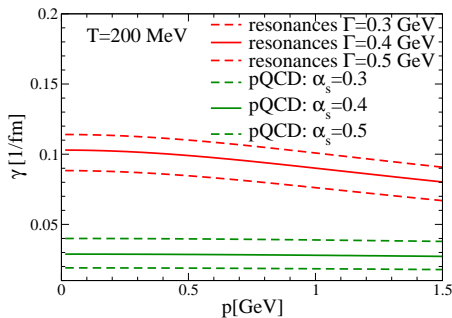
Streuquerschnitte



- pQCD- und Resonanz-Streuquerschnitte von vergleichbarer Größenordnung
- ABER pQCD vorwärtsgerichtet \leftrightarrow s-Kanal-Resonanzbeitrag isotrop
- Resonanzstreuung effektiver für Reibungs- und Diffusionskoeffizienten

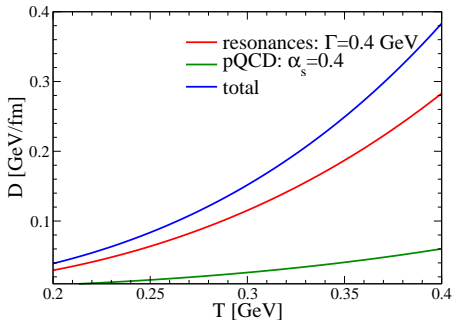
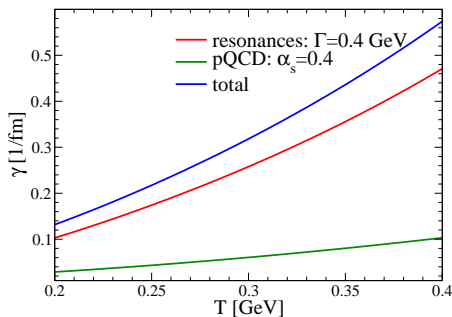
Reibungs- und Diffusionskoeffizienten

- Fokker-Planck-Ansatz \Rightarrow Reibungs- und Diffusionskoeffizienten
- Reibungskoeffizient: $\gamma = 1/\tau_{\text{eq}}$ bestimmt Relaxationszeit (Thermalisierungszeit) des schweren Quarks mit Medium
- Diffusionskoeffizient: $D = m\gamma T$ bestimmt Breite der Impulsverteilung



- Resonanzbeiträge: Faktor $\sim 2 \dots 3$ größer als pQCD-Beitrag!

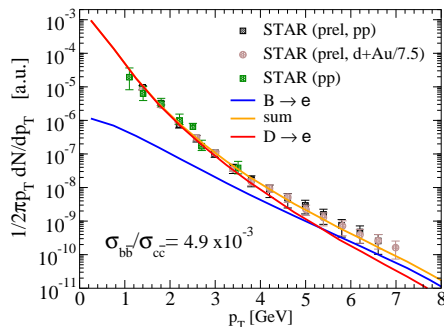
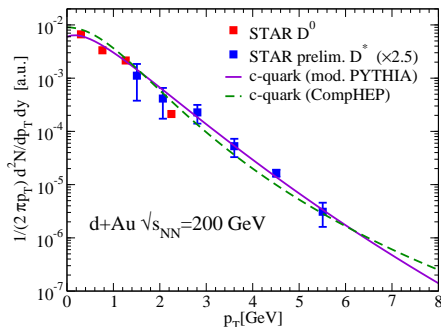
Reibungs- und Diffusionskoeffizienten



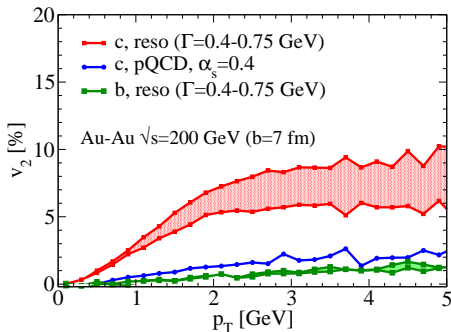
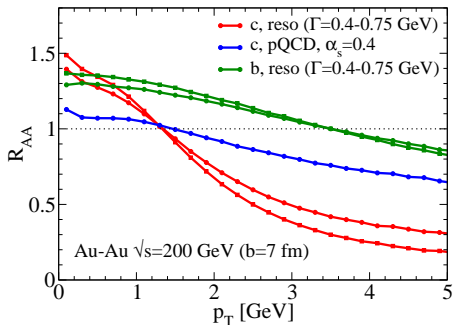
● schwere Quarks im sQGP

- Beschreibe Medium durch Feuerballparametrisierung (gibt hydrodynamische Strömung wieder)
- isentrope Expansion $\Rightarrow T(t)$
- Fokker-Planck-Koeffizienten zeitabhängig
- Bewegung schwerer Quarks \Rightarrow relativistischer Langevinprozess

- benötige p_T -Spektren der **Charm-** and **Bottomquarks**
 - (modifiziertes) PYTHIA-Fit für **D** Meson Spektren (**δ -Funktionsfragmentierung**) in pp-Stößen
 - Bottom-Anteil über **nichtphotonische- e^\pm -Spektren** \Rightarrow bottom/charm-Verhältnis

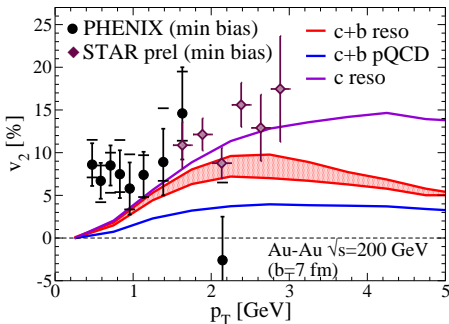
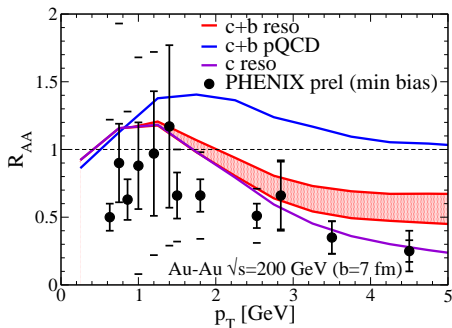


p_T -Spektren und elliptischer Fluß schwerer Quarks



Observablen: e^\pm - p_T -spectra (R_{AA}) und v_2

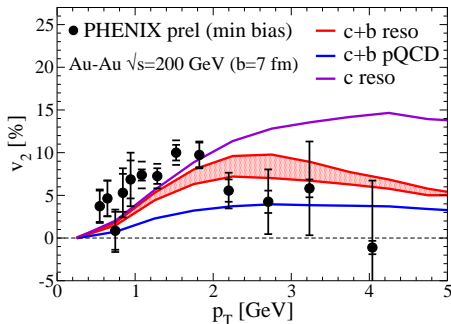
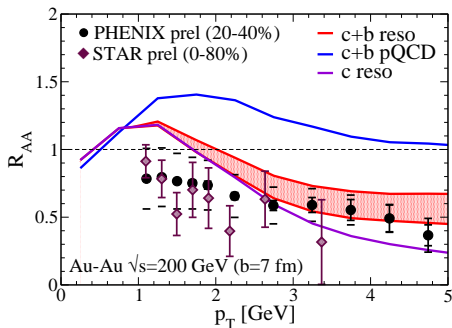
- Hadronisierung über Quark-Koaleszenz und Fragmentation
- Elektronen aus Zerfall der D - und B -Mesonen



(Daten vor Quark Matter '05)

Observablen: e^\pm - p_T -spectra (R_{AA}) und v_2

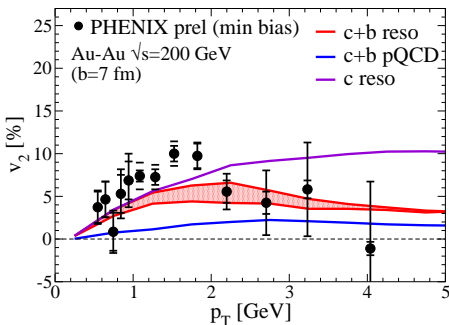
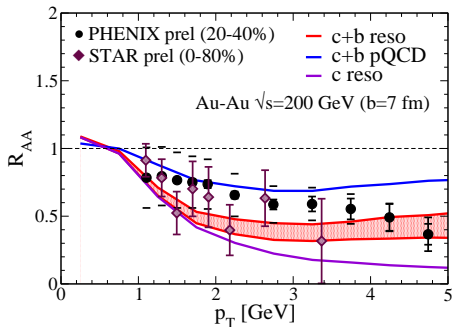
- Hadronisierung über Quark-Koaleszenz und Fragmentation
- Elektronen aus Zerfall der D - und B -Mesonen



(Daten: Quark Matter '05)

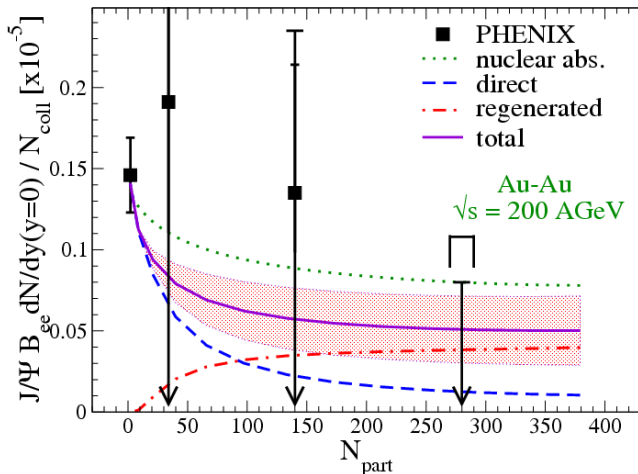
Observables: e^\pm - p_T -spectra (R_{AA}) und v_2

- Hadronisierung: nur Fragmentation
- Elektronen aus Zerfall der D - und B -Mesonen



- Langevin für D (B)-Mesonen in hadronischer Phase?!
- realistischere Fragmentationsfunktionen
- Verhältnis Koaleszenz/Fragmentation?
- Berücksichtigung von Gluonenbremsstrahlungsprozessen
- Erweiterung des Modells für Quarkonia
[J/ψ (Υ)-Dissoziation \leftrightarrow Regenerierung]

J/ψ -Dissoziation vs. Regenerierung@RHIC



[Grandchamp et al]

- Für Υ : Dissoziation vorherrschender Prozeß [Grandchamp, HvH et al]

- Standardmodell der Elementarteilchen
- QCD als Theorie der starken Wechselwirkung
- **Asymptotische Freiheit** \Leftrightarrow QGP
- **schnelle Thermalisierung** + **kollektive Bewegung** \Rightarrow s QGP

- Standardmodell der Elementarteilchen
- QCD als Theorie der starken Wechselwirkung
- **Asymptotische Freiheit** \Leftrightarrow **QGP**
- **schnelle Thermalisierung** + **kollektive Bewegung** \Rightarrow **s QGP**
- **Dileptonen** und **chirale Symmetrie**
- **Thermalisierung** und **Fluß schwerer Quarks**

- Standardmodell der Elementarteilchen
- QCD als Theorie der starken Wechselwirkung
- **Asymptotische Freiheit** \Leftrightarrow **QGP**
- **schnelle Thermalisierung** + **kollektive Bewegung** \Rightarrow **s QGP**
- **Dileptonen** und **chirale Symmetrie**
- **Thermalisierung und Fluß schwerer Quarks**
- Reichhaltiges und **interessantes** Anwendungsgebiet für
 - Relativistische **Vielteilchenquantenfeldtheorie**
 - Herausforderung: **stark wechselwirkende Systeme**
 - **Nichtstörungstheoretische Methoden**
 - ...