

# Stark wechselwirkende Materie in Schwerionenstößen

Hendrik van Hees

Justus-Liebig Universität Gießen

16. Juli 2009

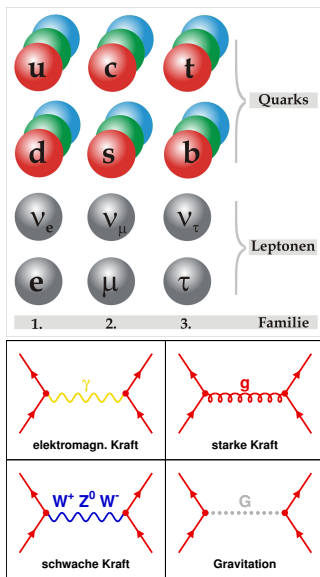
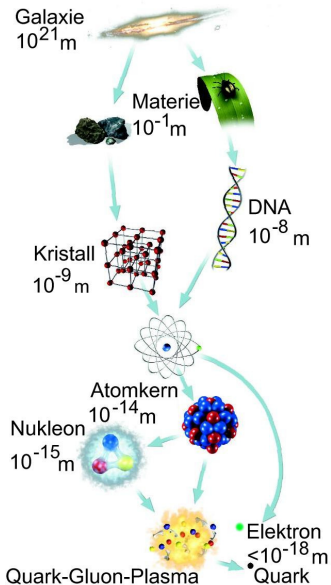


**Institut für  
Theoretische Physik**



- 1 Einführung in die Physik stark wechselwirkender Materie
  - Das Standardmodell der Elementarteilchen
  - Das Phasendiagramm stark wechselwirkender Materie
  - Phänomenologie der ultrarelativistischen Schwerionenreaktionen
- 2 Elektromagnetische Observablen (Dileptonen)
  - Chirale Symmetrie und Massen der Hadronen
  - Modellierung der Dileptonenspektren in Schwerionenstößen
- 3 Schwere Quarks im Quark-Gluon-Plasma
  - Diffusion schwerer Quarks: Langevindynamik
  - Die Wechselwirkung schwerer Quarks im QGP
  - „Nichtphotonische Elektronen“ am RHIC
- 4 Zusammenfassung und Ausblick

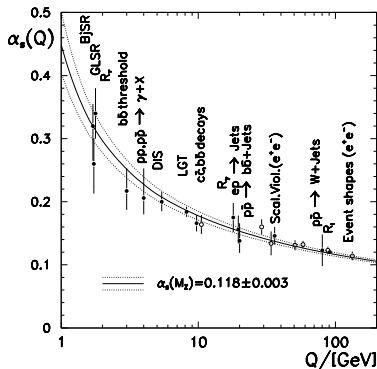
# Aufbau der Materie



+Higgsboson  $\Leftrightarrow$  Masse der Quarks, Leptonen und  $W^{\pm}$ ,  $Z^0$ -Bosonen

# Die starke Wechselwirkung und QCD

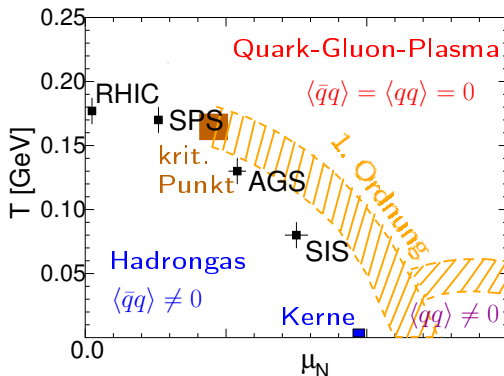
- **Quarks** „gefangen“ in Hadronen ( $\bar{q}q$ : Mesonen,  $qqq$ : Baryonen)
- **Gluonen** tragen selbst Farbe  $\Rightarrow$  **Asymptotische Freiheit**



- **Kopplungskonstante**  $\alpha_s$  nimmt ab mit Impulsübertrag  $Q$

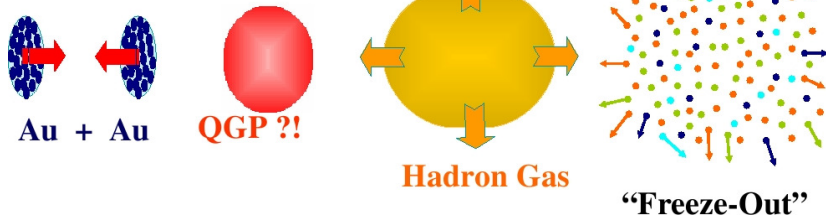
# Das Phasendiagramm stark wechselwirkender Materie

- Heiße, dichte Materie: **Quarks und Gluonen** dicht zusammengedrängt
- hochenergetische Stöße  $\Rightarrow$  „**Deconfinement**“
- **Quarks** und **Gluonen** relevante Freiheitsgrade  $\Rightarrow$  **Quark-Gluon-Plasma**
- immer noch stark wechselwirkend: **Schnelle Thermalisierung!**



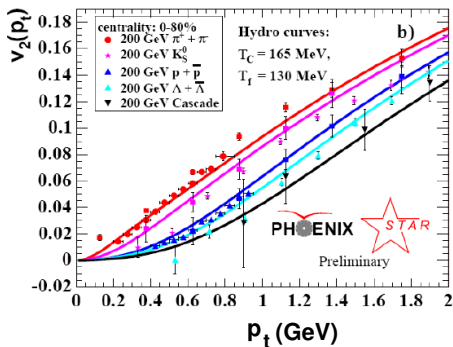
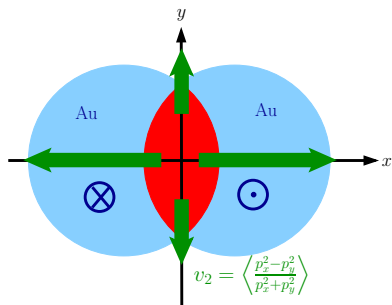
# Ultrarelativistische Schwerionenreaktionen

- hochenergetische Stöße von (schweren) Atomkernen
- viele Stöße der **Partonen** in den Nukleonen
- Erzeugung vieler Teilchen  $\Rightarrow$  **heißer dichter Feuerball**
- Erzeugung des **Quark-Gluon-Plasmas** (QGP)?
- Eigenschaften des QGP?



# Hydrodynamisches Verhalten

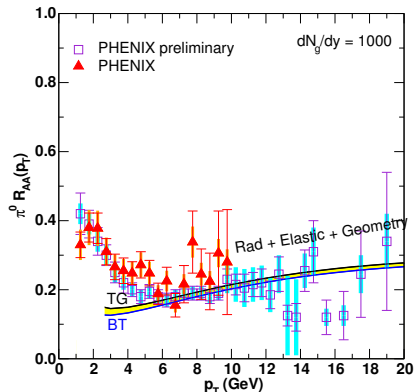
- Teilchenspektren kompatibel mit kollektiver Bewegung eines **idealen Fluids** (Hydrodynamik)  $\Rightarrow$  **kleine Viskosität**
- Medium im **lokalen thermodynamischen Gleichgewicht** (nach kurzer Formationszeit  $\lesssim 1$  fm/c)



- Vergleich zu [proton-proton-Stößen](#)

$$R_{AA} = \frac{dN_{AA}/dp_t}{N_{\text{coll}} dN_{pp}/dp_t}$$

- $R_{AA} < 1$  für große  $p_t$ : Jets durch Medium abgebremst
- Dichte des Mediums  $> \rho_{\text{crit}}$



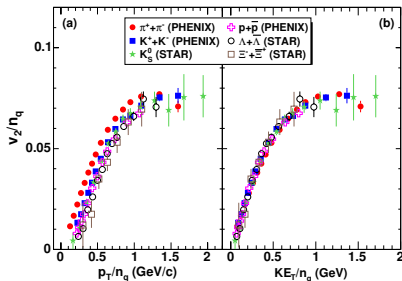


# Skalierung von $v_2$ mit der Anzahl der Konstituentenquarks

- Elliptischer Fluß skaliert mit Anzahl der **Konstituentenquarks**

$$v_2^{(\text{had})}(p_T^{(\text{had})}) = n_q v_2^{(q)}(p_T^{(\text{had})}/n_q)$$

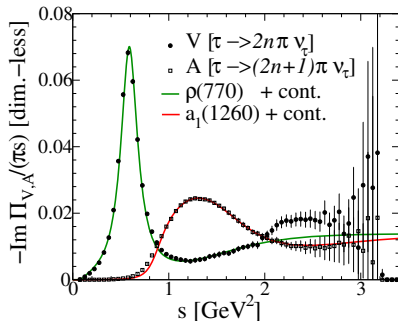
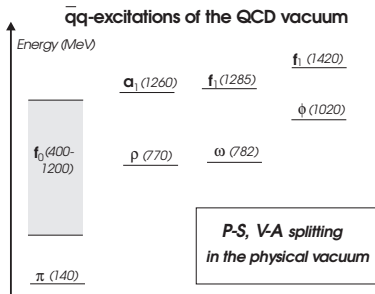
- Koaleszenz von **Quarks** bei  $T_c$



- möglicher Mechanismus: **Hadronresonanzbildung** bei  $T_c \Rightarrow$  Resonanzrekombinationsmodell [Ravagli, HvH, Rapp 2008]
- weiterer Hinweis für Quarkkoaleszenz: Erhöhtes **Baryon/Meson**-Verhältnis in **AA** vs. **pp** collisions

# Chirale Symmetrie

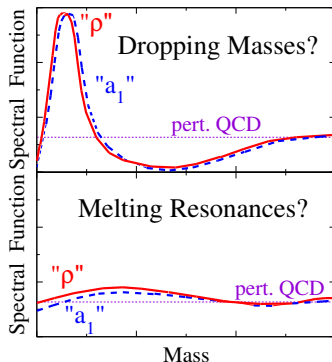
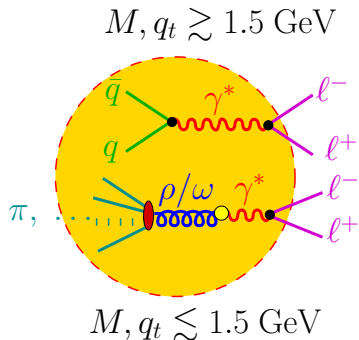
- **$u$ - und  $d$ -Quarks** „leicht“:  $m_{u,d} \simeq 5\text{-}10 \text{ MeV}/c^2$ .
- **QCD** näherungsweise symmetrisch unter **chiraler Symmetrie** ( $\chi S$ )
- $\langle \bar{q}q \rangle_{\text{vac}} \neq 0 \Rightarrow \chi S$  spontan gebrochen
- Nambu-Goldstone-Theorem:  $\approx$ masselose (pseudo-)skalare Bosonen:  
 $m_\pi \simeq 140 \text{ MeV}/c^2 \ll m_N \simeq 940 \text{ MeV}/c^2$



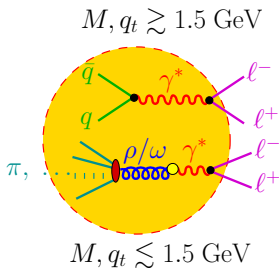
data: ALEPH Collaboration

# Wiederherstellung der Chiralen Symmetrie und Dileptonen

- große Temperaturen und Dichten  $\Rightarrow$  Quarkkondensat „schmilzt“
- $\chi S$  wieder hergestellt
- Phasenübergang: Massen chiraler Partner werden gleich („Entartung“ wegen  $\chi S$ )
- Gitter-QCD:  $T_c^{(\text{deconf})} \simeq T_c^{(\chi)}$
- **Dileptonen und Photonen**: verlassen Inneres des Feuerballs einer **Schwerionenkollision** ungestört



# Dileptonen und em. Stromkorrelationsfunktion



- **Dileptonenproduktionsrate** [McLerran, Toimela 85]

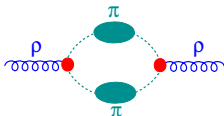
$$\frac{dN_{e^+e^-}}{d^4x d^4q} = -g^{\mu\nu} \frac{\alpha_{\text{em}}^2}{3q^2 \pi^3} \text{Im} \Pi_{\mu\nu}^{(\text{em})}(q) \Big|_{q^2=M_{e^+e^-}^2} f_B(q_0)$$

$$\Pi_{\mu\nu}^{(\text{em})}(q) = \int d^4x \exp(iq \cdot x) \Theta(x_0) \left\langle \left[ j_\mu^{(\text{em})}(x), j_\nu^{(\text{em})}(0) \right] \right\rangle_T$$

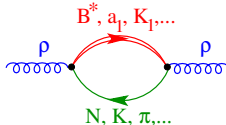
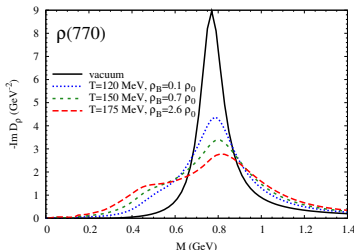
- $l^+l^-$ -Spektren  $\Leftrightarrow$  em. Stromkorrelationsfunktion im Medium
- **Vektordominanz**  $\Rightarrow$  **Vektormesonspektralfunktionen im Medium!**

- Modifikation der Pionenwolke, **baryonische/mesonische Anregungen**

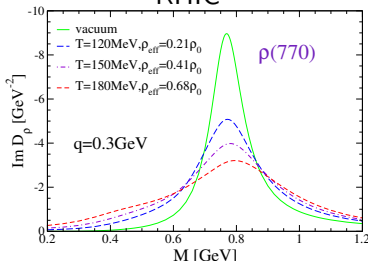
[Chanfray et al, Herrmann et al, Ko et al, Rapp et al, Klingl et al, Post et al, Friman et al, . . .]



SPS



RHIC

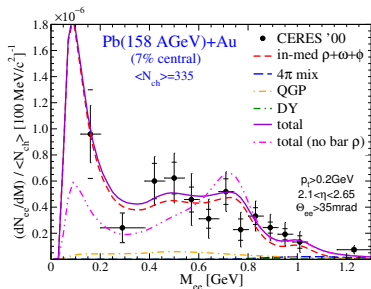


- **Verbreiterung der Spektralfunktion; kleine Massenverschiebungen!**
  - Baryoneffekte wesentlich ( $\rho_B + \rho_{\bar{B}}$ , nicht  $\rho_B - \rho_{\bar{B}}$ , relevant!)
  - verschiedene phänomenologische Modelle konsistent ( $\gamma N, \gamma A, \pi N \rightarrow \rho N$ )

# CERES vs. hadronische Vielteilchentheorie

- Dileptonenemission von thermischer Quelle
- thermischer Feuerball (isentropisch QGP/MIX + Hadronengas)

$$\frac{dN_{\ell\ell}^{\text{therm}}}{dM} \propto - \int_{\text{FB}} d^4x \int \frac{d^3q}{Mq_0} \text{Im} \Pi^{(\text{em})}(q_0, \vec{q}) f_B(q_0) \text{Acc}$$

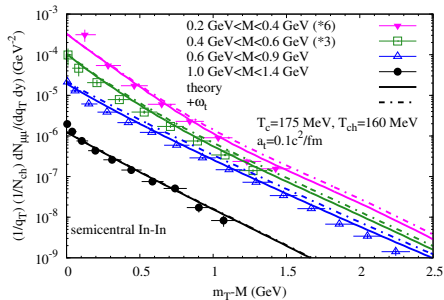
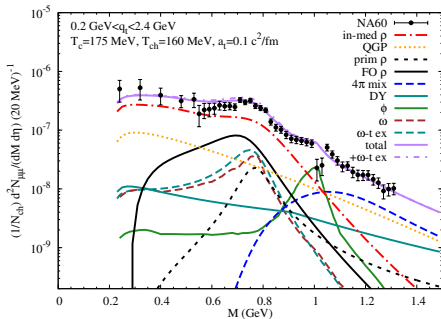


[HvH, R. Rapp 07]

- **Baryoneneffekte** wichtig!
  - Vielteilcheneffekte  $\Leftrightarrow$  Exzeß- $\ell^- \ell^+$  bei kleinen inv. Massen

# NA60 $\mu^+\mu^-$ -Daten in 158 AGeV In-In-Stößen

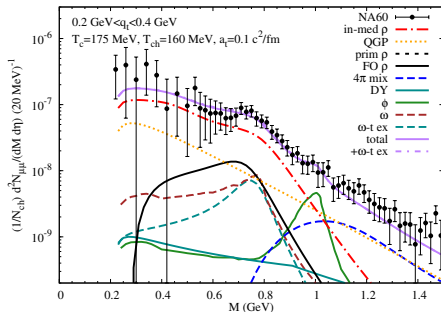
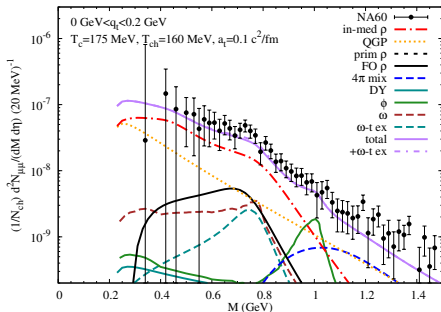
- Akzeptanzkorrigierte absolut normierte Exzeßspektra!
- **Zustandsgleichung:**  $T_c = 175$  MeV,  $T_{ch} = 160$  MeV
- Berücksichtigung „nichtthermischer Quellen“
  - $q\bar{q}$ -Annihilationen in harten frühen Stößen (Drell-Yan)
  - Zerfall von  $\rho$ -Mesonen  
(nicht-äquilibriert und nach thermischem Ausfrieren)



[HvH, R. Rapp 2009]

# NA60 $\mu^+\mu^-$ -Daten in 158 AGeV In-In-Stößen

- Akzeptanzkorrigierte absolut normierte Exzeßspektra!
- **Zustandsgleichung:**  $T_c = 175$  MeV,  $T_{\text{ch}} = 160$  MeV
- Berücksichtigung „nichtthermischer Quellen“
  - $q\bar{q}$ -Annihilationen in harten frühen Stößen (Drell-Yan)
  - Zerfall von  $\rho$ -Mesonen (nicht-äquilibriert und nach thermischem Ausfrieren)

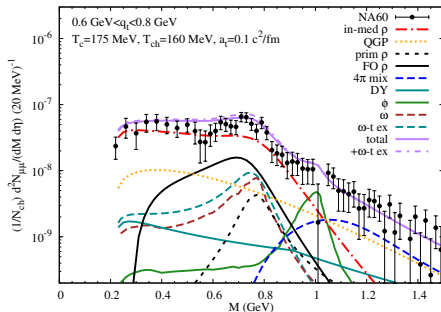
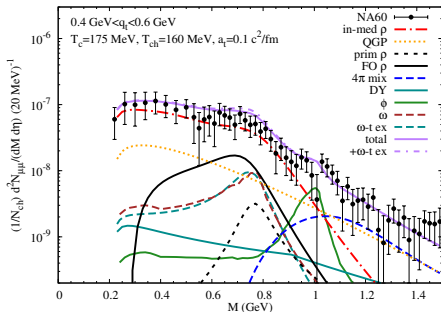


[HvH, R. Rapp 2009]



# NA60 $\mu^+\mu^-$ -Daten in 158 AGeV In-In-Stößen

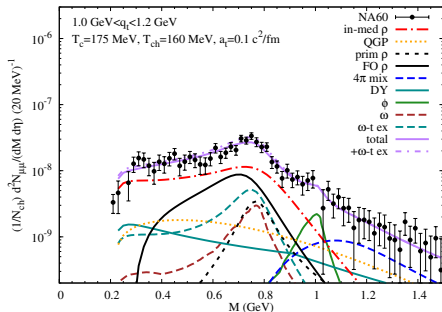
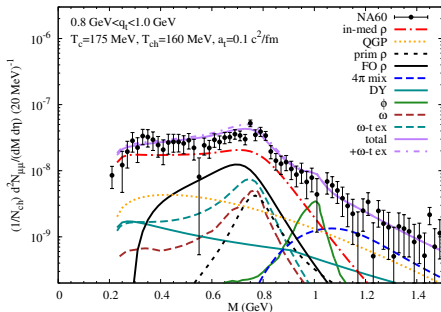
- Akzeptanzkorrigierte absolut normierte Exzeßspektra!
- **Zustandsgleichung:**  $T_c = 175$  MeV,  $T_{\text{ch}} = 160$  MeV
- Berücksichtigung „nichtthermischer Quellen“
  - $q\bar{q}$ -Annihilationen in harten frühen Stößen (Drell-Yan)
  - Zerfall von  $\rho$ -Mesonen (nicht-äquilibriert und nach thermischem Ausfrieren)



[HvH, R. Rapp 2009]

# NA60 $\mu^+\mu^-$ -Daten in 158 AGeV In-In-Stößen

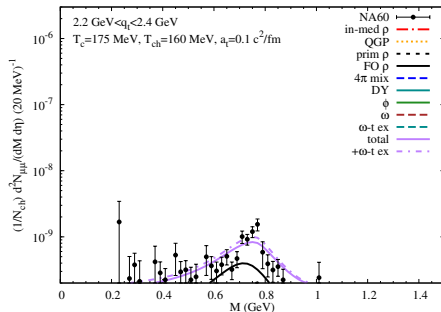
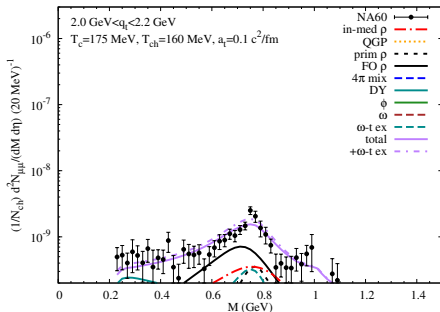
- Akzeptanzkorrigierte absolut normierte Exzeßspektra!
- **Zustandsgleichung:**  $T_c = 175$  MeV,  $T_{\text{ch}} = 160$  MeV
- Berücksichtigung „nichtthermischer Quellen“
  - $q\bar{q}$ -Annihilationen in harten frühen Stößen (Drell-Yan)
  - Zerfall von  $\rho$ -Mesonen (nicht-äquilibriert und nach thermischem Ausfrieren)



[HvH, R. Rapp 2009]

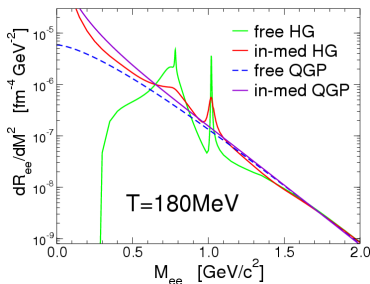
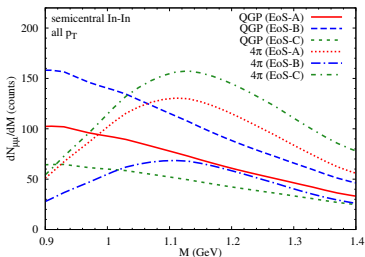
# NA60 $\mu^+\mu^-$ -Daten in 158 AGeV In-In-Stößen

- Akzeptanzkorrigierte absolut normierte Exzeßspektra!
- **Zustandsgleichung:**  $T_c = 175$  MeV,  $T_{ch} = 160$  MeV
- Berücksichtigung „nichtthermischer Quellen“
  - $q\bar{q}$ -Annihilationen in harten frühen Stößen (Drell-Yan)
  - Zerfall von  $\rho$ -Mesonen  
(nicht-äquilibriert und nach thermischem Ausfrieren)



[HvH, R. Rapp 2009]

# IMR: Dileptonen von partonischer oder hadronischer Phase?



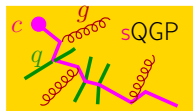
- EoS-B ( $T_c = T_{ch} = 160$  MeV) Emission vorwiegend vom QGP
- EoS-A ( $T_c = T_{ch} = 175$  MeV) und EoS-C ( $T_c = 190$  MeV,  $T_{ch} = 160$  MeV): Multipionprozesse
- Strahlung maximal bei  $T = T_{max} \simeq M/5.5$
- hadronische und partonische Raten „dual“ for  $T \sim T_c$   
kompatibel mit Wiederherstellung der chiralen Symmetrie!
- Emission von partonischer oder hadronischer Quelle  
 $\Leftrightarrow$  genauere Bestimmung von  $T_c$  notwendig!

# Schwere Quarks in Schwerionenstößen



Produktion von SQs  
beschrieben durch PDF's + pQCD (PYTHIA)

$c, b$  quark

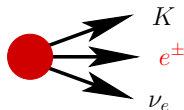


SQ-Streuung im QGP: Langevin-Simulation  
Reibungs- und Diffusionskoeffizienten von  
mikroskopischen Modellen für Wechselwirkung SQs im sQGP



Hadronisierung zu  $D, B$ -Mesonen via  
Quarkkoaleszenz + Fragmentation

V. Greco, C. M. Ko, R. Rapp, PLB **595**, 202 (2004)



semileptonische Zerfälle  $\Rightarrow$   
„nichtphotonische“ Elektronen-Observablen

- **Langevin-Prozeß: Reibungskraft** + **Gaußsche Kraftfluktuationen**
- im (lokalen) Ruhssystem des Wärmebades:

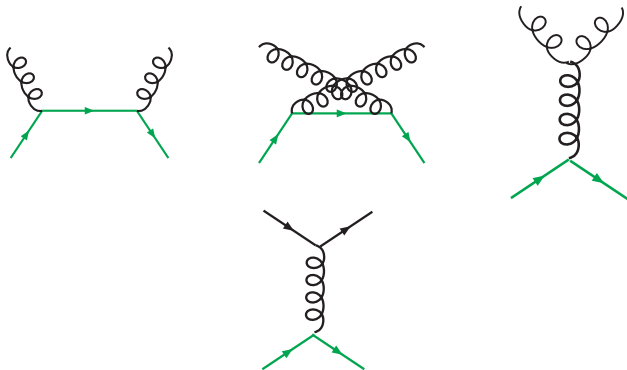
$$d\vec{x} = \frac{\vec{p}}{E_p} dt,$$

$$d\vec{p} = -A\vec{p}dt + \sqrt{2dt}[\sqrt{B_0}P_{\perp} + \sqrt{B_1}P_{\parallel}]\vec{w}$$

- $\vec{w}$ : normalverteilte Zufallsvariable
- $A$ : Reibungskoeffizient;  $B_{0,1}$ : Diffusionskoeffizient
- Einsteinsches Dissipations-Fluktuations-Theorem  $B_1 = E_p T A$   
 $\Rightarrow$  Korrekter **Gleichgewichtslimes** für  $t \rightarrow \infty$
- Kollektiver Fluß des Mediums:
  - **Lorentz**transformation ins lokale Ruhssystem des Wärmebades
  - verwende **Zeitschritt** im Wärmebadsystem
  - Lorentztransformation zurück ins Laborsystem

# Elastische pQCD-Streuung schwerer Quarks

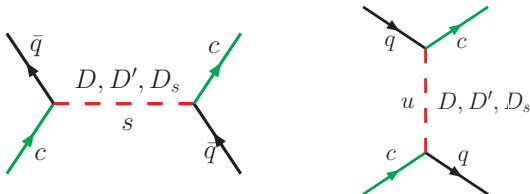
- Matrixelemente in niedrigster Ordnung [Combridge 79]



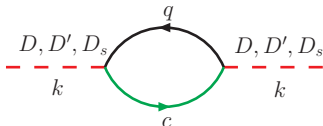
- **Debye-Abschirmmasse** für  $t$ -Kanal-Gluonaustausch:  $\mu_g = gT$ ,  $\alpha_s = 0.4$
- Wechselwirkung nicht ausreichend für Verständnis der Daten zu „nichtphotonischen Elektronen“

# Non-perturbative interactions: Resonance Scattering

- $D$ - und  $B$ -mesonartige **Resonanzen** oberhalb von  $T_c$
- **elastische** Streuung von **SQs** und leichten (Anti-)Quarks



- $D$ - und  $B$ -mesonartige Resonanzen im **sQGP**

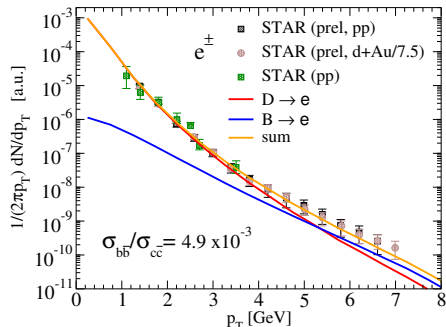
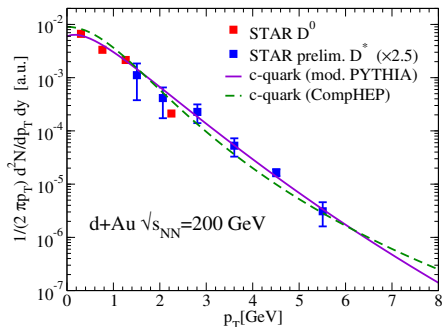


- Parameter

- $m_D = 2 \text{ GeV}, \Gamma_D = 0.4 \dots 0.75 \text{ GeV}$
- $m_B = 5 \text{ GeV}, \Gamma_B = 0.4 \dots 0.75 \text{ GeV}$

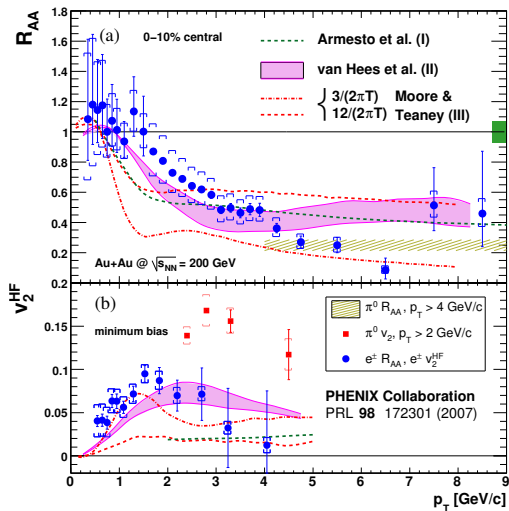


- $p_T$ -Spektren für **Charm-** und **Bottom-**Quarks
  - PYTHIA für D-Mesonspektren +  $\delta$ -Fragmentierungsfunktion
  - exp. „nichtphotonische“  $e^\pm$ -Spektren: bottom/charm-Verhältnis



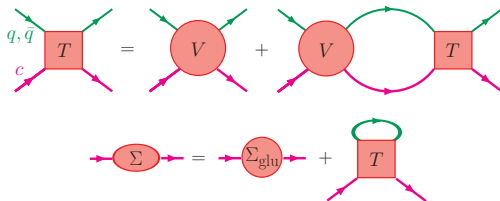
# Vergleich zu Daten vom RHIC

- Hadronisierung via **Quarkkoaleszenz+Fragmentation**
- Zerfall  $D, B \Rightarrow e^\pm + X$

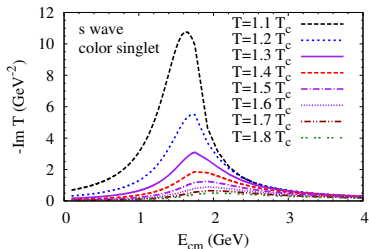


# T-Matrix-Rechnung

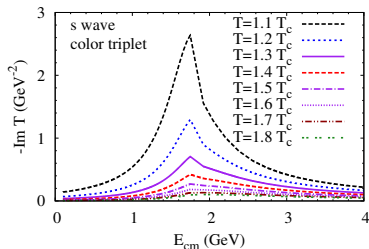
- Brückner-Rechnung für elastische  $Qq, Q\bar{q}$ -Streuung



- Reduktionsschema: 4D Bethe-Salpeter  $\rightarrow$  3D Lipmann-Schwinger
- $V$ : von Gitter-QCD-Rechnungen

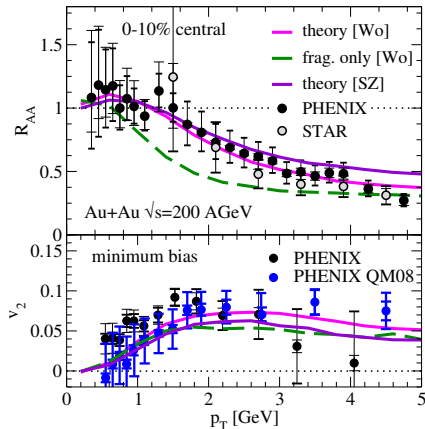
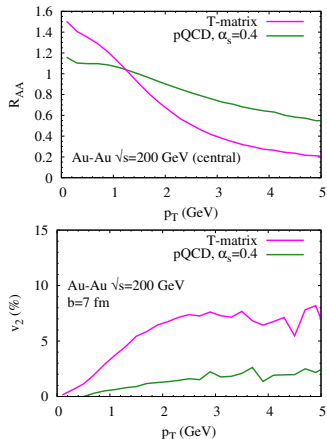


[HvH, Mannarelli, Greco, Rapp 2008]



# Vergleich mit RHIC-Daten

- **Quark-Koaleszenz** + **Fragmentation**  $\rightarrow D/B \rightarrow e + X$



[HvH, Mannarelli, Greco, Rapp 2008]

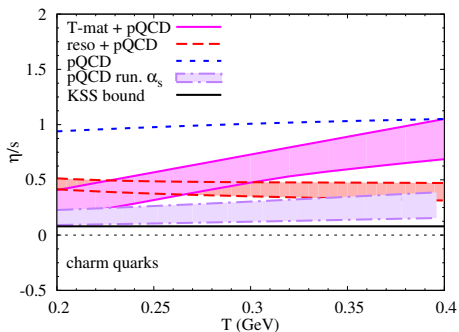
- **Koaleszenz** wichtig für Beschreibung der Daten
- erhöht  $R_{AA}$  und  $v_2 \Leftrightarrow$  „Impuls-Kick“ von leichten Quarks!
- Resonanzbildung für  $T \rightarrow T_c \Rightarrow$  **Koaleszenz als kinetischer Prozeß**

# Transporteigenschaften des sQGP

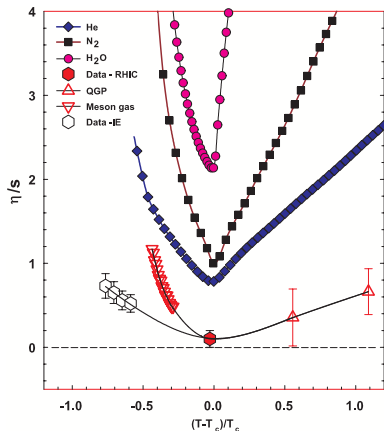
- räumlicher Diffusionskoeffizient: Langevin  $\Rightarrow D_s = \frac{T}{EA} = \frac{T^2}{D}$
- Maß für Plasmakopplungsstärke:

$$\frac{\eta}{s} \simeq \frac{1}{2} T D_s \quad (\text{AdS/CFT}),$$

$$\frac{\eta}{s} \simeq \frac{1}{5} T D_s \quad (\text{wQGP})$$



[HvH, R. Rapp 2008]



[Lacey, Taranenko (2006)]

## ● Elektromagnetische Observablen

- elektromagnetischer Stromkorrelator **im Medium**
- Spektralfunktionen von **Vektormeson** **im Medium**
- **chiraler Phasenübergang**?!?
- direkte Messung von chiralen Partnern (**Axialvektormeson**) schwierig (z.B.  $a_1 \rightarrow \pi + \gamma$ )
- mögliche Strategie für Theorie: **chirale Modelle**  $\Leftrightarrow$  **Weinberg-Summenregeln**  $\Leftrightarrow$  Gitter-QCD
- CBM-Experiment: Dileptonen von Stößen mit  $E_{\text{lab}}/A = 10\text{-}40$  GeV  $\Rightarrow$  (neuer Energiebereich!)

## ● Schwere Quarks

- **Diffusionsprozesse** im sQGP
- **D/B-meson** (oder „nichtphotonische“  $e^\pm$ )  $R_{AA}$ ,  $v_2$   $\Leftrightarrow$  **Transporteigenschaften** des QGP
- bei FAIR/CBM: Resonanzmodell überprüfbar  $\Leftrightarrow N_q \gg N_{\bar{q}}$   
 $\Rightarrow \bar{D}/\bar{B}$  stärker modifiziert als  $D/B$
- Resonanzrekombination  $\Leftrightarrow$  Charmonium Dissoziation+Regeneration