

# **Vorhaben: 06FY169; Abschlußbericht zur Förderperiode 01.07.2006 bis 30.06.2009**

## **Antragsteller**

Horst Stöcker, Prof. Dr. phil. nat.  
Universitätsprofessor (C4)  
geb. am 16.12.1952, deutsch  
Institut für Theoretische Physik  
Johann Wolfgang Goethe–Universität  
Max von Laue-Straße 1  
Postfach 11 19 32  
60054 Frankfurt am Main  
Tel. 069 - 798 - 47833  
Privat: 61440 Oberursel 5, Weisskirchener Straße 67  
Tel. 06171 - 981234

Elena Bratkovskaya, Dr. rer. nat., Hochschuldozentin  
01.02.1966, russisch  
Institut für Theoretische Physik  
Johann Wolfgang Goethe–Universität  
Max-von-Laue-Straße 1  
Postfach 11 19 32  
60054 Frankfurt am Main  
Tel. 069 - 798 - 47523  
Privat: 35398 Giessen, Wetzlarerstr. 98

Mit dem Wechsel von Prof. Stöcker zum GSI Direktor im Sommer 2007 wurde die Projektverantwortung intern auf PD. Dr. Elena Bratkovskaya übertragen.

## **Thema**

CERN-ALICE-Theorie: Hadronisierung des Quark-Gluon-Plasmas und Dynamik von Hadronen mit Charm-Quarks

## **Ursprüngliche Ziele des Antrags**

Das beantragte Forschungsvorhaben hat zum Ziel, die Dynamik der frühen partonischen Phase in relativistischen Schwerionenreaktionen im Vergleich mit experimentellen Resultaten bei SPS und FAIR Energien von 10 – 200 A GeV zu untersuchen und ein dynamisches Bild der Hadronisierung zu erreichen. Darüberhinaus sollten im Rahmen des zu entwickelnden Parton-Hadron-String Transportmodells die Dynamik von Charm-Quarks in der partonischen Flüssigkeit sowie im hadronischen Medium (Resonanzgas) untersucht werden.

## Ursprüngliches Arbeitsprogramm

Das Forschungsvorhaben beinhaltet drei Phasen, für deren Realisierung jeweils etwa 12 Monate veranschlagt wurden.

- Erweiterung der bestehenden Hadron-String Transportmodelle (HSD/ UrQMD) auf partonische Freiheitsgrade, wobei die Quarks und Gluonen als effektive Freiheitsgrade mit endlichen Massen und endlicher spektraler Breite eingeführt werden. Die entsprechenden Parameter werden aus Fits an Gitter QCD Rechnungen extrahiert. In dieser ersten Phase werden nur  $u, d, s$  Quarks (und Antiteilchen) sowie transversale Gluonen berücksichtigt. Die effektive Zustandsgleichung wird zunächst in einer endlichen Box (mit periodischen Randbedingungen) berechnet und mit entsprechenden Gitter QCD Rechnungen verglichen (bzw. adjustiert). Erste Rechnungen zum Studium der dynamischen Hadronisierung über lokale Ratengleichungen ( $q + \bar{q} \rightarrow$  mesonische Resonanzen bzw.  $3q \rightarrow$  baryonische Resonanzen) sollen für Au+Au Reaktionen bei FAIR/-SPS Energien durchgeführt werden.
- Systematische Analysen von peripheren und zentralen Au+Au Kollisionen von 10–200 A GeV im neu entwickelten Transportmodell mit dem primären Ziel transversaler Mesonenspektren. Simultan soll in diesen Reaktionen der Einfluß des implementierten Phasenüberganges auf den kollektiven Fluß der Hadronen untersucht werden und geprüft werden, inwieweit sich Spuren eines Phasenüberganges erster Ordnung in einem endlichen und schnell expandierenden System auffinden lassen.
- In der dritten Phase soll die Dynamik von Charm Quarks re-implementiert werden. Die Berechnung der Produktionsquerschnitte für  $c\bar{c}$  Paare erfolgt im Rahmen von PYTHIA Rechnungen, die wie in früheren Arbeiten auf vorhandene experimentelle Daten reskaliert werden. Als Streuquerschnitte der Charm Quarks mit den leichten  $u, d, s$  Quarks und Gluonen werden zunächst die gleichen Querschnitte verwendet wie bei leichten Quarks. Der relative Einfluß dieser Querschnitte auf den kollektiven Fluß der  $D, \bar{D}$  Mesonen wird sodann in Transportrechnungen ermittelt, wobei die Hadronisierung wiederum durch lokale Ratengleichungen (z.B.  $\bar{d} + c \rightarrow D^*$ ) realisiert wird. Zum Abschluß soll weiterhin untersucht werden, welchen Einfluß hadronische Selbstenergien (insbesondere für  $D, \bar{D}$  Mesonen) auf den Hadronisierungsprozeß haben und welche Spuren in dreifach-differentiellen Spektren sichtbar werden. Auch ein Vergleich mit dem statistischen Hadronisierungsmodell von Kostyuk et al. bietet sich an dieser Stelle an.

## Abweichungen vom beantragten Forschungsprogramm

Für die erste Phase des Arbeitsprogramms war beabsichtigt, Dr. Andre Peshier zu gewinnen, der mit seinen Erfahrungen auf diesem Gebiet in Giessen (in Zusammenarbeit mit Prof. W. Cassing) für eine optimale Realisierung hätte sorgen können.

Leider hat sich Dr. Peshier im SS 2006 entschlossen, seine Studien auf anderen Gebieten ab Okt. 2006 in Nantes fortzusetzen, so daß unmittelbar kein erfahrener Postdoc für die erste Phase zur Verfügung stand. Andererseits konnte Dr. Olena Linnyk für das Projekt gewonnen werden, deren Schwerpunkt allerdings auf der Dynamik von Charm-Quarks und 'off-shell' Quark-Propagatoren lag. Diese personelle Maßnahme erforderte eine Umstrukturierung des Arbeitsprogrammes zumal sich Prof. W. Cassing (Uni. Giessen) zur Fortführung der Arbeiten auf dem Gebiet der partonischen Quasiteilchen bereit erklärt hatte. Es wurde vereinbart, die erste Phase des Arbeitsprogramms primär nach Giessen zu verlagern und mit der Ausarbeitung der Charm-Dynamik (3. Arbeitsphase) in Frankfurt bereits zu beginnen. Diese Umorientierung führte zwangsläufig zu einer Verzögerung des Projektes. In den weiteren Phasen des Projektes sollten sodann die separaten Entwicklungen (in modularer Form) zusammengefügt werden, um die systematische Analyse von peripheren und zentralen Au+Au Kollisionen von 10–200 A GeV im neu entwickelten Transportmodell PHSD durchzuführen.

## Erreichte Ziele

### Hadronisierung des Quark-Gluon-Plasmas

Das dynamische Quasiteilchen Modell von Peshier und Cassing (DQPM) [1] wurde einerseits erweitert auf explizite Quark Freiheitsgrade als auch auf endliche chemische Potentiale  $\mu_q$  der Quarks [2]. Die für eine transporttheoretische Behandlung der Partonen (Quarks und Gluonen) notwendigen Potentiale bzw. Reaktionsraten wurden dabei bestimmt aus Fits der Zustandsgleichung an Gitter QCD Rechnungen [1, 2, 3] für die Massen  $M_x$  und Breiten  $\Gamma_x$  der Gluonen und Quarks, die deren Spektralfunktionen (in relativistischer Breit-Wigner Form) festlegen. Durch Separation von zeitartigen und raumartigen Anteilen in den Funktionalen für Dichte und Energie konnten sodann die expliziten (zeitartigen) Freiheitsgrade isoliert werden, welche allein für eine Propagation im Rahmen von Transportmodellen geeignet sind. Die raumartigen Anteile der Partonendichten charakterisieren dagegen 'virtuelle' Partonen, die in Wechselwirkungsprozessen als Austauscheteilchen auftreten. Es zeigt sich, daß knapp oberhalb der kritischen Temperatur  $T_C$  nahezu 60% der effektiven Gluonen virtuell sind und etwa 35% der effektiven Quarks. Dieses Ergebnis steht im krassen Gegensatz zur konventionellen Betrachtung der Partonen als masselosen Teilchen auf dem 'Lichtkegel'.

Analog zur Partonendichte weisen die Energiedichten große Anteile im raumartigen Bereich auf [2, 3], die ihrerseits mit potentiellen Energiedichten zu vergleichen sind. Der Energiedichte der zeitartigen Gluonen - die explizit in Transport propagiert werden können - ist wieder klein im Vergleich zur potentiellen Energiedichte für Gluonen, während für Quarks und Antiquarks die zeitartigen Beiträge dominieren. Mit der Separation von (raumartigen) potentiellen Energiedichten und zeitartigen partonischen Freiheitsgraden steht der Weg offen zur Definition von mittleren Feldern für die effektiven Partonen. Letztere werden bestimmt aus den Ableitungen der potentiellen Energiedichte nach den zeitartigen partonischen Dichten

und können durch einfache Funktionen der Partonendichte approximiert werden [2, 3, 4]. Analog geben zweite Ableitungen der potentiellen Energiedichte die effektive (integrale) Wechselwirkung  $v_{eff}(1, 2)$  der zeitartigen Partonen untereinander [2, 3].

Es ist zu bemerken, daß die so definierten Wechselwirkungen ein interessantes Verhalten als Funktion der zeitartigen Partonendichte  $\rho_p$  zeigen: bei hohen Dichten ist  $v_{eff}$  repulsiv und nimmt langsam mit  $\rho_p$  ab, wechselt allerdings für  $\rho_p < 2.2 \text{ fm}^{-3}$  das Vorzeichen und wird stark attraktiv. Dieses bedeutet, daß z.B. in der Expansion eines partonischen Feuerballs (mit zeitlich abnehmender Dichte) die Wechselwirkung zwischen einem Quark und Antiquark bei geringer Dichte stark attraktiv wird und die Partonen als gebundene Zustände (Hadronen oder Hadronenresonanzen) bei geringer Dichte weiter propagieren. Weiterhin ist aufzuweisen, daß die über die Breiten  $\Gamma_x$  definierten Reaktionsraten auf Zwei-Teilchen Wirkungsquerschnitte  $\sigma_x$  führen, die um Faktoren 5-8 größer sind als entsprechende Resultate der perturbativen QCD [1].

Mit der Festlegung der effektiven Potentiale, der Quasiteilchen - Massen und Reaktionsraten können nun die effektiven (zeitartigen) partonischen Freiheitsgrade im Rahmen der Off-Shell Transporttheorie [5] propagiert werden [6]. Neue Wege müssen allerdings für die Hadronisierung beschritten werden, d.h. für den Übergang von partonischen zu hadronischen Freiheitsgraden. Zu diesem Zweck wird in kovarianter Form eine lokale Übergangsratengleichung formuliert, in der für  $v_{eff} < 0$  die effektive Wechselwirkung selbst als Matrixelement eingeht sowie die Randbedingungen der Farbneutralität, Flavorstrom-Erhaltung sowie Energie-Impulserhaltung. Die entsprechenden Ratengleichungen werden auf einem endlichen Raum-Zeit-Gitter numerisch integriert [6]. Bei der Bildung von Quark-Antiquark-Paaren (Hadronen) treten dabei vorwiegend Übergänge in massive Mesonen auf, da die Quarks/Antiquarks im Mittel etwa 0.4 GeV Masse haben, was eine Bildung des 0<sup>-</sup>Oktetts aus energetischen Gründen nahezu verhindert. Für den Übergang zu massiveren Mesonen (oder Baryonen/Antibaryonen) mit Massen oberhalb von 1.5 GeV wird ein Stringzerfall im Rahmen von JETSET [7] implementiert, wie er auch im konventionellen HSD Transport Code [8] Verwendung findet. Die entstehenden Hadronen bzw. Stringzerfallsprodukte werden im Rahmen des HSD Transport Modells weiter propagiert. Erste numerische Ergebnisse der partonischen Expansion und Hadronisierung im Rahmen des PHSD Transportmodells wurden in Ref. [6] publiziert.

Es ist zu bemerken, daß der hier vorgestellte Hadronisierungsprozeß nicht auf das Problem der Entropie-Reduktion wie im Koalescence-Modell masseloser Partonen stößt, da die hadronischen Produkte Resonanzen mit Zerfällen in 2-3 Hadronen darstellen und somit zusätzlich Entropie erzeugen.

## Dynamik von Hadronen mit Charm-Quarks

In aktueller Vorbereitung des 'White Books' zur Dynamik von Kern-Kern-Reaktionen bei FAIR und SPS Energien [9] wurden die beantragten Untersuchungen zur Charm-Dynamik in 2006/2007 vorgezogen, wobei bisher eine explizite Einbeziehung der partonischen Reaktionsphase nicht realisiert und erst in 2009 adressiert wurde.

Von aktuellem Interesse waren in 2006 das erwartete Maß an  $J/\Psi$  Unterdrückung bei FAIR Energien sowie der kollektive elliptische Fluß von  $D$ -Mesonen und Charmonia bei FAIR und SPS Energien. Zu diesem Zweck wurden die bekannten Szenarien der  $J/\Psi$  Unterdrückung im Rahmen des HSD Transportmodells mikroskopisch untersucht [10]: einerseits das  $J/\Psi$  'melting Szenario' von Matsui und Satz [11], andererseits das konventionelle 'hadronische Comover Szenario' wie es u.a. von Capella et al. [12] vorgeschlagen wurde. Allerdings werden im Rahmen des HSD Modells nicht nur die Charmonium Dissoziationsreaktionen (z.B:  $J/\Psi + \rho \rightarrow D + \bar{D}, D + \bar{D}^*$  etc.) berechnet, sondern auch die Rückreaktionen auf der Basis von 'Detailed Balance' [13]. Erstmals wurde auch das gekoppelte Problem der Charmonium Zustände  $J/\Psi, \chi_c, \Psi'$  bei niedrigen (FAIR) Energien untersucht und der elliptische Fluß der Charm-Zustände explizit berechnet wie auch das Verhältnis von  $\Psi'$  zu  $J/\Psi$  als Funktion der Zentralität der Schwerionenreaktion.

Für das  $J/\Psi$  'melting Szenario' von Matsui und Satz wurden aktuelle QCD Rechnungen für die 'Schmelztemperaturen' von  $J/\Psi, \chi_c$ , und  $\Psi'$  zugrunde gelegt, d.h. die Zustände  $\Psi'$  und  $\chi_c$ , schmelzen bereits bei Energiedichten oberhalb von etwa  $2 \text{ GeV}/\text{fm}^3$  während das  $J/\Psi$  bis zu Energiedichten von nahezu  $16 \text{ GeV}/\text{fm}^3$  überlebt. Die Energiedichten selbst lassen sich im Rahmen des HSD Modells aus dem Energie-Impulstensor  $T^{\mu\nu}$  im lokalen Ruhesystem extrahieren; Charmonia oberhalb der kritischen Energiedichten werden einfach in ihre Bestandteile 'zerlegt'. Es ist zu bemerken, daß im 'hadronischen Comover Szenario' lediglich ein einziges Matrix-Element  $M_0$  als Parameter für die Stärke der Comover Wechselwirkung auftritt, welches bei zentralen Reaktionen von Pb+Pb bei 160 A·GeV ein für alle Mal 'fixiert' wird.

Die detaillierten Ergebnisse der Rechnungen sind in Ref. [10] aufgeführt und haben ergeben, daß bei SPS Energien beide Szenarien im Vergleich mit Daten der NA50 und NA60 Kollaborationen recht gut abschneiden. Dabei liefert das 'hadronische Comover Szenario' ebenfalls exzellente Resultate für das  $\Psi'$  zu  $J/\Psi$  Verhältnis als Funktion der Zentralität, während das  $J/\Psi$  'melting Szenario' ein zu geringes Verhältnis liefert. Letzteres ist darauf zurückzuführen, daß bereits in peripheren Reaktionen Energiedichten erreicht werden, bei denen die  $\Psi'$  schmelzen. Eine Reproduktion von  $\Psi'$  über hadronische Reaktionen ist bei SPS (und FAIR) Energien zu gering (und ohnehin im ursprünglichen Szenario nicht vorgesehen).

Eine Anregungsfunktion der  $J/\Psi$  Unterdrückung erlaubt, die beiden Szenarien experimentell bei FAIR Energien zu unterscheiden, da das 'hadronische Comover Szenario' eine monotone Funktion von  $T_{lab}$  liefert während das  $J/\Psi$  'melting Szenario' aufgrund der Energieschwellen eine schneller veränderliche Anregungsfunktion impliziert [10]. Diese Aussagen werden sich auch im Rahmen des neuen PHSD Modells nicht wesentlich ändern (s.u.). Zu bemerken ist weiterhin, daß in den betrachteten Szenarien der elliptische Fluß der Charmonia aufgrund (kleiner) hadronischer Restwechselwirkungen nur sehr gering ist.

Im Zusammenhang mit neuen Daten der PHENIX Kollaboration [14] zur  $J/\Psi$  Unterdrückung wurden ebenfalls Au+Au Reaktionen bei  $\sqrt{s} = 200 \text{ GeV}$  in beiden obigen Szenarien berechnet [15]. Hier zeigte sich, daß beide Vorstellungen nicht mehr korrekt die  $J/\Psi$  Unterdrückung als Funktion der Rapidität und der Zentralität

beschreiben. Insbesondere die Unterdrückung bei Vorwärts-Rapiditäten relativ zur Mid-Rapidität wird völlig falsch beschrieben [15]. In der Tat konnte in einer weiteren systematischen Analyse der Charm-Dynamik bei RHIC Energien gezeigt werden, daß die Inversion der Unterdrückung als Funktion der Rapidität auf elastische Stöße der Charm-Quarks in der prä-hadronischen Phase zurückgeführt werden kann [16]. Ebenfalls der elliptische Fluß der  $D$ -Meson erweist sich als zu schwach im Vergleich zu den PHENIX Daten, falls prä-hadronische Reaktionen vernachlässigt werden [16]. Die systematischen Analysen zur Charm-Produktion und -Dynamik wurden in 2008 in einem eingeladenen Review zusammengefaßt [17].

## In-Medium Modifikationen der $D$ -Mesonen

In Ergänzung der Untersuchungen zur Charm-Dynamik in Schwerionenkollisionen wurden mikroskopische 'coupled-channel' Rechnungen zu den spektralen Eigenschaften der  $D, \bar{D}$  Mesonen bei endlicher Dichte und Temperatur im Rahmen einer G-Matrix Näherung durchgeführt [18]. In dieser Näherung wurde die Meson-Baryon Wechselwirkung in einem  $SU(4)_{\text{flavor}}$  Modell mit Symmetriebrechung bestimmt mit zusätzlich attraktiver skalarer-isoskalarer Wechselwirkung. Die In-Medium Rechnungen berücksichtigen sowohl Pauli-Blocking Effekte bei endlicher Temperatur und Dichte, die Dynamik aller Baryonen im mittleren Potential als auch Pion- und  $D, \bar{D}$  Selbstenergien im Medium. Die mikroskopischen Rechnungen zeigen, daß im  $DN$  Sektor die  $\Lambda_c$  und  $\Sigma_c$  Resonanzen bei 2593 und 2770 MeV dynamisch erzeugt werden im Falle des Vakuums, d.h. bei verschwindender Baryondichte und Temperatur. Bei endlicher Dichte und Temperatur verbleiben die Polmassen der  $D, \bar{D}$  Mesonen in der Nähe der Vakuummassen, jedoch werden die Spektralfunktionen der  $D, \bar{D}$  Mesonen im Medium signifikant verbreitert infolge der Wechselwirkung mit dem Medium. Dabei bildet sich zugleich ein deutlicher Ausläufer der Spektralfunktionen zu kleineren Massen hin mit ansteigender Baryondichte. Das  $\bar{D}$  mittlere Potential zeigt eine geringe Repulsion bei endlicher Dichte, die von der  $I = 1 \bar{D}N$  Wechselwirkung verursacht wird.

Es ist allerdings zu bemerken, daß diese hadronischen Rechnungen nur bei moderaten Baryondichten Gültigkeit haben und Extrapolationen zu Dichten von 5-10  $\rho_0$  rein spekulativ bleiben.

## PHSD Rechnungen für Pb+Pb Reaktionen von 10-160 A·GeV

Im Einklang mit dem Projektantrag wurden in 2008/2009 systematische Analysen von Schwerionenreaktionen im Rahmen des entwickelten PHSD Transportmodells im SPS-FAIR Energiebereich durchgeführt, um einerseits die Unterschiede zwischen den in HSD integrierten hadronischen Freiheitsgraden und den in PHSD zusätzlich integrierten partonischen Freiheitsgraden herauszustellen [4]. Als unabhängiger 'Regulator' dienen dabei aktuelle experimentelle Ergebnisse der NA49 Kollaboration im SPS Energiebereich [19].

Es stellte sich heraus, daß selbst in zentralen Pb+Pb Stößen bei 158 A·GeV, d.h. den höchsten SPS Energien, die partonische Phase nur sehr moderat ist; max-

imal 50% der transferierten Energie - der Relativbewegung - werden in partonische Freiheitsgrade umgewandelt. Der Rest verbleibt in einer recht großen hadronischen Korona, in der die lokale Energiedichte stets unterhalb der kritischen Energiedichte von ca.  $1 \text{ GeV}/\text{fm}^3$  verbleibt. Der partonische Anteil der Reaktionsphase nimmt damit stetig ab mit geringer Zentralität der Reaktion als auch der Einschußenergie. Es stellte sich daher die Frage nach optimalen Observablen mit großer Sensitivität auf die partonische Phase.

Die systematische Analyse der Pb+Pb Reaktionen in Ref. [4] ergab, daß die longitudinalen Freiheitsgrade der produzierten Pionen und Kaonen nur wenig sensitiv auf die Präsenz der partonische Phase sind. Gleiches gilt auch für das 'Baryon-Stopping', welches in HSD wie PHSD vergleichbare Resultate liefert, die allerdings in bemerkenswerter Übereinstimmung mit den Messungen der NA49 Kollaboration sind [4]. Die transversale Dynamik der Pionen und insbesondere der Kaonen/Antikaonen ist dagegen sensitiver auf die partonische Freiheitsgrade, was sich in einem signifikanten Anstieg der Kaonen-Slopes in PHSD relativ zu HSD äußert. Wiederum sind die PHSD Rechnungen in weit besserer Übereinstimmung mit den NA49 Daten.

Der bedeutendste Einfluß der Partodynamik und Hadronisierung wurde in der Erhöhung von Antibaryonen mit antistrange Quarks gefunden. Hier führte die partonische Evolution nur zu einer kleinen Anreicherung von  $s$ ,  $\bar{s}$  Quarks in der partonischen Phase, jedoch lieferte der Rehadronisierungsprozeß deutlich mehr Antibaryonen mit Strangeness als im HSD Modell. Wiederum sind die PHSD Rechnungen in weit besserer Übereinstimmung mit den NA49 Daten, so daß der Hadronisierungsprozeß selbst für das 'strange antibaryon enhancement' verantwortlich ist.

In Zusammenfassung möchte die Antragstellerin bemerken, daß etwa 90% der beantragten Ziele erfolgreich bearbeitet werden konnten und die Resultate der Forschungen - neben den zentralen Hauptartikeln - in allen wesentlichen Konferenzen berichtet (und separat publiziert) wurden (siehe Publikationsverzeichnis).

## References

- [1] A. Peshier und W. Cassing, Phys. Rev. Lett. 92 (2005) 172301.
- [2] W. Cassing, Nucl. Phys. A 795 (2007) 70.
- [3] W. Cassing, Nucl. Phys. A 791 (2007) 365.
- [4] W. Cassing, E. L. Bratkovskaya, arXiv:0907.5331 [nucl-th]
- [5] W. Cassing, S. Juchem, Nucl. Phys. A 665 (2000) 377; *ibid.* A 672 (2000) 417.
- [6] W. Cassing, E. L. Bratkovskaya, Phys. Rev. C 78 (2008) 034919.
- [7] B. Anderson, G. Gustafson, Hong Pi, Z. Phys. C 57 (1993) 485.
- [8] W. Cassing, E. L. Bratkovskaya, Phys. Rep. 308 (1999) 65.
- [9] CBM Physics Book, Springer Verlag, 2009, im Druck.

- [10] O. Linnyk, E. L. Bratkovskaya, W. Cassing, H. Stöcker, Nucl. Phys. A 786 (2007) 183.
- [11] T. Matsui and H. Satz, Phys. Lett. B 178 (1986) 416; H. Satz, J. Phys. G 32 (2006) R25.
- [12] N. Armesto and A. Capella, Phys. Lett. B 430 (1998) 23; N. Armesto, A. Capella and E. G. Ferreira, Phys. Rev. C 59 (1999) 395.
- [13] E. L. Bratkovskaya, W. Cassing, H. Stöcker, Phys. Rev. C 67 (2003) 054905.
- [14] H. Büsching *et al.* PHENIX Collaboration, Nucl. Phys. A 774 (2006) 103; *ibid.* A 783 (2007) 285.
- [15] O. Linnyk, E. L. Bratkovskaya, W. Cassing, and H. Stöcker, Phys. Rev. C 76 (2007) 041902.
- [16] O. Linnyk, E. L. Bratkovskaya, W. Cassing, Nucl. Phys. A 807 (2008) 79-104.
- [17] O. Linnyk, E.L. Bratkovskaya, and W. Cassing, Int. J. Mod. Phys. E 17 (2008) 1367-1439.
- [18] L. Tolos, A. Ramos, and T. Mizutani, Phys. Rev. C 77 (2008) 015207.
- [19] C. Blume *et al.*, NA49 Collaboration, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 35 (2008) 044004; H. Ströbele *et al.*, NA49 Collaboration, Proceedings of the CPOD-2009: Workshop on 'Critical Point and Onset of Deconfinement', Brookhaven, June 8-12 (2009); C. Alt *et al.*, NA49 Collaboration, Phys. Rev. C 66 (2002) 054902; Phys. Rev. C 77 (2008) 024903.

## Liste der im Rahmen des Projektes entstandenen Diplom- und Doktorarbeiten

Es wurden keine Diplom- bzw. Doktorarbeiten im Rahmen des Projektes erstellt. Dr. Laura Tolos erhielt im Projektzeitraum einen Ruf auf eine Professur am KVI Groningen, welchen sie mit Wirkung vom 01.10.2008 angenommen hat.

## Personalliste mit Erläuterung der Tätigkeitsbereiche der Mitarbeiter

Dr. Olena Linnyk, 01.10.2006 - 31.03.2008:

Berechnungen der Charm-Dynamik im Rahmen des HSD Transport-Modells

Dr. Laura Tolos, 01.12.2006 - 31.12.2007:

Berechnungen zur In-Medium Spektralfunktion der  $D, \bar{D}$  Mesonen im Medium

PD Dr. E. L. Bratkovskaya, 01.01.2008 - 28.02.2009



Entwicklung des off-shell PHSD Transport Modells für relativistische Schwerionenreaktionen

Frankfurt, den 27.08.2009

PD. Dr. Elena Bratkovskaya

# Publikationsliste der Arbeitsgruppe 2006-2009

E. L. Bratkovskaya, O. Linnyk, L. Tolos

## 1 Reviews

1. O. Linnyk, E.L. Bratkovskaya, and W. Cassing,  
*'Open and hidden charm in proton-nucleus and heavy-ion collisions'*,  
(invited review) **Int. J. Mod. Phys. E** **17** (2008) 1367-1439,  
arXiv:0808.1504 [nucl-th].

## 2 Refereed journals

1. V.P. Konchakovski, M. Hauer, M.I. Gorenstein, and E.L. Bratkovskaya,  
*'Particle Number Fluctuations and Correlations Nucleus-Nucleus Collisions'*,  
submitted to **J. Phys. G** (2009), arXiv:0906.3229 [nucl-th].
2. V.P. Konchakovski, M. Hauer, G. Torrieri, M.I. Gorenstein, and E.L. Bratkovskaya,  
*'Forward-backward correlations in nucleus-nucleus collisions: baseline contributions from geometrical fluctuations'*,  
**Phys. Rev. C** **79** (2009) 034910 (6 pages), arXiv:0812.3967 [nucl-th].
3. M.I. Gorenstein, M. Hauer, V.P. Konchakovski, and E.L. Bratkovskaya,  
*'Fluctuations of the  $K/\pi$  Ratio in Nucleus-Nucleus Collisions: Statistical and Transport Models'*,  
**Phys. Rev. C** **79** (2009) 024907 (11 pages), arXiv:0811.3089 [nucl-th].
4. W. Cassing and E.L. Bratkovskaya,  
*'Parton transport and hadronization from the dynamical quasiparticle point of view'*,  
**Phys. Rev. C** **78** (2008) 034919 (8 pages), arXiv:0808.0022 [hep-ph].
5. M.L. Benabderrahmane et al. [FOPI Collaboration] and E.L. Bratkovskaya,  
W. Cassing  
*'Measurement of the in-medium  $K^0$  inclusive cross section in  $\pi^-$ -induced reactions at 1.15 GeV/c'*,  
**Phys. Rev. Lett.** **102** (2009) 182501 (4 pages), arXiv:0807.3361 [nucl-ex].
6. E.L. Bratkovskaya, S.M. Kiselev, and G.B. Sharkov,  
*'Direct photon production from hadronic sources in high-energy heavy-ion collisions'*,  
**Phys. Rev. C** **78** (2008) 034905 (10 pages), arXiv:0806.3465 [nucl-th].
7. E.L. Bratkovskaya, W. Cassing, and O. Linnyk,  
*'Low mass dilepton production at ultrarelativistic energies'*,  
**Phys. Lett. B** **670** (2009) 428-433, arXiv:0805.3177 [nucl-th].

8. O. Linnyk, E.L. Bratkovskaya, and W. Cassing,  
*'Evidence for non-hadronic interactions of charm degrees of freedom in heavy-ion collisions at relativistic energies'*,  
**Nucl. Phys. A** **807** (2008) 79-104, arXiv:0801.4282 [nucl-th].
9. V. P. Konchakovski, B. Lungwitz, M. I. Gorenstein, and E. L. Bratkovskaya,  
*'Multiplicity Fluctuations in Nucleus-Nucleus Collisions: Dependence on Energy and Atomic Number'*,  
**Phys. Rev. C** **78** (2008) 024906 (14 pages), arXiv:0712.2044 [nucl-th].
10. L. Tolos, B. Friman, and A. Schwenk,  
*'Neutron matter at finite temperature'*.  
**Nucl. Phys. A** **806** (2008) 105-116, arXiv:0711.3613 [nucl-th].
11. L. Tolos, A. Ramos, and T. Mizutani,  
*'Open charm in nuclear matter at finite temperature'*.  
**Phys. Rev. C** **77** (2008) 015207 (24 pages), arXiv:0710.2684 [nucl-th].
12. E. L. Bratkovskaya and W. Cassing,  
*'Dilepton production and off-shell transport dynamics at SIS energies'*,  
**Nucl. Phys. A** **807** (2008) 214-250, arXiv:0712.0635 [nucl-th].
13. O. Linnyk, E. L. Bratkovskaya, W. Cassing and H. Stöcker,  
*'Charmonium dynamics in Au+Au collisions at  $\sqrt{s} = 200$  GeV'*,  
**Phys. Rev. C** **76** (2007) 041902, arXiv:0705.4443 [nucl-th].
14. V. P. Konchakovski, M. I. Gorenstein, and E. L. Bratkovskaya,  
*'Multiplicity Fluctuations in Au+Au Collisions at ultrarelativistic energies'*,  
**Phys. Rev. C** **76** (2007) 031901(R), [nucl-th/0704.1831].
15. V. P. Konchakovski, M. I. Gorenstein, and E. L. Bratkovskaya,  
*'Multiplicity Fluctuations in Proton-Proton and Nucleus-Nucleus Collisions'*,  
**Phys. Lett. B** **651** (2007) 114-118, [nucl-th/0703052].
16. O. Linnyk, E. L. Bratkovskaya, W. Cassing and H. Stöcker,  
*'Charmonium dynamics in nucleus-nucleus collisions at SPS and FAIR energies'*,  
**Nucl. Phys. A** **786** (2007) 183-200, [nucl-th/0612049].
17. V. P. Konchakovski, M. I. Gorenstein, E. L. Bratkovskaya, and H. Stöcker,  
*'Baryon Number and Electric Charge Fluctuations in High Energy Nucleus-Nucleus Collisions'*,  
**Phys. Rev. C** **74** (2006) 064911, [nucl-th/0606047].
18. V. P. Konchakovski, S. Haussler, M. I. Gorenstein, E. L. Bratkovskaya, M. Bleicher and H. Stöcker,  
*'Particle number fluctuations in high energy nucleus-nucleus collisions from microscopic transport approaches'*,  
**Phys. Rev. C** **73** (2006) 034902 (10 pages), [nucl-th/0511083].

### 3 Conference proceedings

1. W. Cassing, E.L. Bratkovskaya, Y.-Z. Xing,  
*'Parton dynamics and hadronization from the sQGP'*,  
Proceedings of the Erice School/Workshop on Nuclear Physics 2008, Sep.  
2008, Erice, Italy,  
**Prog. Part. Nucl. Phys.** **62** (2009) 359-364, arXiv:0810.2804 [nucl-th]
2. O. Linnyk, E.L. Bratkovskaya, W. Cassing,  
*'Charmed hadron signals of partonic medium'*,  
Proceedings of the International Conference Strangeness in Quark Matter,  
6 - 10 Oct 2008, Beijing, China, **J. Phys. G** **36** (2009) 064059 (6 pp.)  
arXiv:0810.4257 [nucl-th].
3. E.L. Bratkovskaya,  
*'Signals of the QGP phase transition - a view from microscopic transport models'*.  
Proceedings of the CRIMEA-2007 Conference on "New Trends in High-Energy  
Physics: Experiment, Phenomenology, Theory", Yalta, Crimea, Ukraine, 15-  
22 Sep 2007, pp. 159-166, arXiv:0710.5756 [nucl-th].
4. O. Linnyk, E. Bratkovskaya, W. Cassing, and H. Stöcker,  
*'Charmonium dynamics in heavy ion collisions'*.  
Proceedings of the International Conference Strangeness in Quark Matter, 24  
- 29 June 2007, Levoca, Slovakia. **J. Phys. G** **35** (2008) 044037 (5 pp.),  
arXiv:0710.1535 [nucl-th].
5. E. Bratkovskaya, O. Linnyk, W. Cassing, H. Stöcker,  
*'Charmed signatures for phase transitions in heavy-ion collisions'*.  
Contributed to 4th International Workshop on Critical Point and Onset Decon-  
finement, Darmstadt, Germany, 9-13 Jul 2007. arXiv:0709.2185 [nucl-th]
6. A. Ramos, V.K. Magas, T. Mizutani, E. Oset, and L. Tolos,  
*'Resonances in chiral unitary approaches'*.  
Contributed to Workshop on the Physics of Excited Nucleons (NSTAR 2007),  
Bonn, Germany, 5-8 Sep 2007. arXiv:0711.4042 [nucl-th].
7. L. Tolos, A. Ramos, and T. Mizutani,  
*'Self-consistent coupled-channel approach to D and anti-D in hot dense mat-  
ter'*.  
Proceedings of 12th International Conference on Hadron Spectroscopy (Hadron  
07), Frascati, Italy, 8-13 Oct. 2007, arXiv:0711.3410 [nucl-th].
8. L. Tolos, A. Ramos, and T. Mizutani,  
*'D and anti-D mesons in hot and dense matter'*.  
Proceedings of 11th International Conference on Meson-Nucleon Physics and  
the Structure of the Nucleon (MENU 2007), Jülich, Germany, 10-14 Sep 2007,  
pp 301. arXiv:0710.3323 [nucl-th].

9. B. Friman, K. Hebeler, A. Schwenk, and L. Tolos,  
*'Neutron matter from low-momentum interactions'*.  
Published in the proceedings of YKIS Seminar on New Frontiers in QCD:  
Exotic Hadrons and Hadronic Matter, Kyoto, Japan, 20 Nov - 8 Dec. 2006,  
**Prog. Theor. Phys. Suppl. 168 (2007) 639-642**, arXiv:0704.1404  
[nucl-th].
10. L. Tolos, A. Ramos, and E. Oset,  
*'The In-medium anti-K N interaction within a chiral unitary approach'*.  
Presented at YKIS Seminar on New Frontiers in QCD: Exotic Hadrons and  
Hadronic Matter, Kyoto, Japan, 20 Nov - 8 Dec 2006. Published in **Prog.  
Theor. Phys. Suppl. 168 (2007) 635-638**, nucl-th/0702089.
11. L. Tolos, J. Schaffner-Bielich, and H. Stoecker,  
*'In-medium properties of D-mesons at FAIR'*.  
Published in the proceedings of 9th International Conference on Hypernuclear  
and Strange Particle Physics (HYP 2006), Mainz, Germany, 10-14 Oct 2006  
nucl-th/0612077.