

Förderung von ausgewählten Schwerpunkten der naturwissenschaftlichen Grundlagenforschung auf dem Gebiet „Hadronen- und Kernphysik“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung

Abschlussbericht (Juli 2009 bis Juni 2012)

Thema:

Phasendiagramm der QCD: Anwendungen auf Observablen in Schwerionenstößen und in der Astrophysik

(Förderkennzeichen: 06HD9127)

bzw. 05P09VHCTE

Prof. Dr. Jan Pawlowski und Prof. Dr. Jürgen Schaffner-Bielich  
Institut für Theoretische Physik  
Ruprecht-Karls Universität  
Philosophenweg 16  
69120 Heidelberg

## 1 Darstellung der bisherigen Ergebnisse

In der folgenden Darstellung werden insbesondere die Forschungsergebnisse der Periode von Januar 2011 bis Juni 2012 im Detail diskutiert. Die Forschungsergebnisse der Periode vom Juli 2010 bis Dezember 2011 werden in diesem Bericht mit berücksichtigt, jedoch verweisen wir für Details dazu auf den Zwischenbericht.

Die Forschungsarbeiten zielen auf ein quantitatives Verständnis des QCD Phasendiagramms, insbesondere bei nichtverschwindenden Dichten. Dabei ist die Detailkenntnis des Mittel- und Hochdichtebereichs des Phasendiagramms für die Physik in Schwerionenkollisionen sowie bei astrophysikalischen Prozessen wichtig. Es ist insbesondere auch die Voraussetzung für einen kontrollierten Zugang zu den beteiligten Nichtgleichgewichtsprozessen. Dieser Bereich des Phasendiagramms ist durch Gittermethoden wegen des Vorzeichenproblems nicht auflösbar, und höchstens mittelbar durch Fortsetzung von Ergebnissen bei imaginärem chemischen Potential zu erreichen. Letzteres ist jedoch immer mit nichttrivialen Annahmen verbunden, was die Zuverlässigkeit der Voraussagen stark mindert. Daher wurden funktionale Kontinuumsmethoden (Funktionale RG, DSE's, 2PI) sowie Modellrechnungen unter zusätzlicher Verwendung und dem Vergleich von Gitterresultaten benutzt. Neu sind in diesem Zusammenhang die dynamische Verknüpfung von Gluesektor und Materiesektor der QCD sowie insbesondere auch der dynamische und quantitative Zugang zum Gluesektor. Die Arbeiten [3, 4, 5, 13, 14, 15, 17, 19, 20, 21, 23] zielen auf eine Verbesserung der Ergebnisse im Gluesektor sowie dem Zugang zu den Nichtgleichgewichtsaspekten des Forschungsthemas, und sind essentiell für die quantitative Zuverlässigkeit der Ergebnisse in [9, 10, 24] und das Verständnis der physikalischen Mechanismen im Gluesektor.

In [24] wurde das Phasendiagramm der 2-flavour QCD bei endlicher Temperatur und imaginärem chemischen Potential in der fundamentalen Theorie, der QCD, berechnet. Letzteres ermöglicht den Vergleich zu analogen Gitterrechnungen und somit eine Einschätzung der Zuverlässigkeit der Methode. Darüber hinaus sind die Ergebnisse numerisch außerordentlich präzise, was die Fortsetzung der Phasenlinie zu reellem chemischen Potential erleichtert, sowie quantitativen Aufschluß über das Verhalten von physikalischen Observablen insbesondere in der Nähe der Phasengrenzen gibt.

Es handelt sich um die erste Rechnung dieser Art, und ist auch von großer Bedeutung für die Verbesserung von Modellen für den Materiesektor der Niederenergie-QCD, insbesondere für die Klasse der sogenannten Polyakovloop-erweiterten Modelle des Materiesektors wie dem Polyakovloop-erweiterten Nambu-Jona-Lasinio Modells (PNJL) und des Polyakovloop-erweiterten Quark-Meson Modells (PQM). Dabei ist es wichtig, daß diese Modelle durch das Abschalten eines Teils der QCD-Dynamik direkt aus dem in [24] verwendeten Renormierungsgruppenzugangs gewonnen werden können, siehe auch [2, 9, 16]. So wird in den Polyakovloop-erweiterten Modellen die Quantendynamik der Gluo-

nen durch das Effektive Potential des Polyakovloops approximiert. Die Ergebnisse von [24] erlauben nun eine Bestimmung dieses Effektiven Polyakovloop-Potentials aus der QCD für beliebige Temperaturen und Dichten, erste Ergebnisse sind in [9] dokumentiert. Dieser Zusammenhang wurde mittelbar auch schon in PQM-Rechnungen verwendet, da sie eine Bestimmung einiger Modellparameter ermöglichen, insbesondere der charakteristischen Skala des Polyakovloop-Potentials, die von der Gluedynamik abhängt. Hier bestätigen die QCD-Ergebnisse in [9, 10, 24] eine frühere phänomenologische Abschätzung mit hard-thermal/hard-dense loop Methoden.

In [1] wurden die oben aufgeführten Arbeiten auf QCD in starken magnetischen Feldern erweitert. Starke Magnetfelder können zu dem Effekt der magnetischen Katalyse bei der chiralen Symmetriebrechung führen, eine zum Teil signifikante Erhöhung der Phasenübergangstemperatur sowie des chiralen Kondensats. Einerseits ermöglicht das eine weitere Kontrolle der Theorie durch einen weiteren externe Parameter, der auch insbesondere auf dem Gitter durchgestimmt werden kann. Dies lässt weitere indirekte Hinweise auf die Theorie bei mittleren und grossen chemischen Potential zu. Andererseits treten starke Magnetfelder in der ersten Phase von Schwerionenkollisionen auf, so daß entsprechende Signaturen diskutiert werden. In [1] wurde der Einfluß von Quark und Mesonfluktuationen auf die magnetische Katalyse diskutiert. Interessanterweise haben die thermischen und Quantenfluktuationen der Mesonen in der Anwesenheit von starken Magnetfeldern einen abschwächenden Effekt zur magnetischen Katalyse. Falls dieser Effekt dominieren würde, hätte das die inverse magnetische Katalyse zur Folge, wie sie in neueren Gitterarbeiten beobachtet wird.

In [16] wurde das PQM-Modell mit Quantenfluktuationen der Quarks und Mesonen für das volle Phasendiagramm einschließlich endlicher Dichte bestimmt (2 Flavour). Es stellt sich heraus, daß mesonische Quantenfluktuationen die Cross-over Natur der chiralen und Confinement-Deconfinement Cross-over verstärkt, beziehungsweise selbige auswäscht. Der kritische Endpunkt wird durch diese Effekte weit in die Region mit hoher Dichte (großes chemisches Potential) und niedrigen Temperaturen geschoben. Die kombinierten QCD-Rechnungen aus [9, 10, 24] und der PQM-Rechnung [16] erlauben den Schluß, daß der kritische Endpunkt nur für  $\mu_{\text{baryon}}/T > 2$  auftreten kann. Über seine Existenz kann daher noch keine definitive Aussage getroffen werden, da in diesem Bereich auch baryonische Fluktuationen für die Ordnung des Phasenübergangs potentiell wichtig sind. Diese sind jedoch in [16] nicht berücksichtigt worden. In [2] und einer entsprechenden längeren Arbeit in Vorbereitung wird die Analyse des Phasendiagramms bei mittleren und hohen chemischen Potential fortgesetzt und das oben beschriebene Bild bestätigt. Die bei tiefen Temperaturen und chemischen Potential bei nuklearen Dichten beobachtete Substruktur lassen eine Interpretation als Signatur des nuklearen 'liquid-gas'-Übergangs zu. Dies wird im Moment mithilfe von baryonischen Freiheitsgraden untersucht.

In Bezug auf die kosmologischen und astrophysikalischen Fragestellungen des

Programms ist zu bemerken, daß diese stark sensitiv auf das Effektive Potential der QCD bei mittleren und hohen Dichten sind, eins der Ergebnisse der Arbeiten [24, 10, 9]. Tatsächlich sind die QCD Potentiale im Vergleich zu den gebräuchlichen Modellpotentialen teilweise stark verändert, was sich weniger im Wert der Ordnungsparameter widerspiegelt als vielmehr in der Höhe der Potentialbarrieren.

In einer kombinierten Arbeit unserer beider Arbeitsgruppen wurde die chirale und Confinement-Deconfinement Phasenstruktur der 2+1 Flavour QCD mit Hilfe eines Polyakovloop-verbesserten chiralen Sigma-Modells untersucht. Die neue Eigenschaft dieses Modells ist seine direkte Ankopplung des Polyakovloop Potentials der QCD, gewonnen aus den Berechnungen diese Potentials in [24, 10, 9], an ein effektives Niederenergiemodells des Materiesektors. Diese Arbeit wird in den nächsten Wochen erscheinen, Die Ergebnisse sind in einer 'Mean field' Näherung erzielt, eine volle Fluktuationsrechnung ist in Arbeit. Die Ergebnisse sind vielversprechende, unter anderem ist die Skalenanomalie dieses verbesserten Modells deutlich näher an den Gitterresultaten.

Das Forschungsteilprojekt zum Studium eines Phasenüberganges erster Ordnung von heißer und dichter Kernmaterie in Supernova-Explosionen wurde motiviert durch einen möglichen Phasenübergang erster Ordnung im QCD Phasendiagramm durch die Restaurierung der chiralen Symmetrie. Die wissenschaftlichen Ergebnisse wurden mittlerweile in mehreren Publikationen veröffentlicht und auf mehreren internationalen Tagungen präsentiert [34, 35, 53, 29, 25, 49, 42]. Findet der QCD Phasenübergang kurz nach Entstehung der ersten Stoßwelle, die durch die Steifheit von normaler nukleonischer Kernmaterie generiert wird, statt, kann die Dynamik von Supernova-Explosionen dramatisch geändert werden. Durch die entstehende gemischte Phase im Kern des Proto-Neutronensternes wird die Zustandsgleichung weicher. Die entsprechende Schale kollabiert und generiert einen reinen Quarkmateriekern, der eine steifere Zustandsgleichung als die gemischte Phase besitzt. Es bildet sich eine zweite Stoßwelle aus, die durch den hohen Dichtegradienten an der Oberfläche des Proto-Neutronensternes beschleunigt wird. Die zweite Stoßwelle produziert eine zweite Welle an emittierten Anti-Neutrinos, wenn sie über die Neutrinosphäre läuft. Im Gegensatz zur ersten, normalen, Stoßwelle werden hauptsächlich Anti-Neutrinos frei gelassen, da die Kernmaterie durch die zweite Stoßwelle Protonen-reicher gemacht wird und nicht noch weiter Neutronen-reicher wie bei der ersten Stoßwelle. Die Signatur ist gross genug, um von derzeitigen terrestrischen Neutrino-Detektoren für eine galaktische Supernova gemessen zu werden. Bei der Modellierung der Zustandsgleichung für diese QCD-Phasenübergangsszenario stellte sich heraus, dass die Parameter entsprechend fein eingestellt werden müssen, um den Phasenübergang an den entsprechenden kritischen Dichtebereich einzustellen. Desweiteren musste die gemischte Phase entsprechend weich sein, um eine zweite Stoßwelle zu generieren. Die Massenbestimmung des Pulsars PSR J1614-2230 im Jahre 2010 zu  $M = (1.97 \pm 0.04)M_{\odot}$  gegenüber der Masse des Hulse-Taylor-Pulsars von 1.44 Sonnenmassen führte

zu einer erheblich höheren Maximalmasse von Neutronensternen, die als Bedingung von allen realistischen Zustandsgleichungen nun erfüllt werden muss. Die vorher verwendeten Zustandsgleichungen für die Supernova-Simulationen stellten sich insgesamt als zu weich heraus, und konnten nicht Maximalmassen von zwei Sonnenmassen für kalte Neutronensterne erreichen. Die Zustandsgleichungen für Quarkmaterie wurden darauf hin verändert, durch Korrekturen motiviert aus dem Ein-Gluon-Austausch. Maximalmassen von zwei Sonnenmassen konnten damit erreicht werden, hingegen wurden keine reinen Quarkmateriekern mehr in Neutronensternen noch in Supernova-Simulationen erzeugt. Die zweite Stoßwelle konnte damit nicht mehr auftreten. Es ist erstaunlich, dass diese Pulsarmassenbestimmung wohl das Szenario eines QCD-Phasenüberganges erster Ordnung in einer Kernkollaps-Supernova ausschliesst. Eine abschliessende Simulation mit einer steiferen nukleonischen Zustandsgleichung ist in Arbeit, um zu zeigen, dass dieses Ergebnis auch im Bezug auf den Niedrigdichteanteil der Zustandsgleichung robust ist.

Die physikalische Realisierung eines QCD Phasenüberganges in astrophysikalischen Szenarien und in relativistischen Schwerionenkollisionen hängt auch von den involvierten dynamischen Zeitskalen ab. Die dynamische Zeitskala muss hierbei mit der des Phasenüberganges verglichen werden. Wir untersuchten in einer internationalen Kollaboration die Zeitskalen für die Blasenbildung der QCD-Phase unter verschiedenen Bedingungen, wie sie in einer Supernova, im frühen Universum und in Schwerionenkollisionen vorliegen. Es stellte sich in Vorarbeiten heraus, dass die genaue Kenntnis der Oberflächenenergie zwischen der chiral restaurierten und der chiral gebrochenen Phase entscheidend für die Bestimmung der Zeitdauer der Blasenbildung ist [31, 27]. Nur bei einer genügend kleinen Oberflächenenergie konnte der Phasenübergang innerhalb der zur Verfügung stehenden Zeit, die durch das dynamische Szenario vorgegeben ist, erfolgen. Das auf die SU(3)-Flavour-Symmetrie erweiterte Polyakov-Quark-Meson Modell wurde zu diesem Zwecke explizit in der Theorie der Blasenbildung für relativistische feldtheoretische Modelle studiert. Dabei wurde eine Obergrenze für die Oberflächenenergie durch eine vereinfachte Annahme der Feldkonfiguration beim Phasenübergang ermittelt. Wir konnten zeigen, dass in den verschiedenen PQM-Modellen jeweils übereinstimmend relativ kleine Werte für die Oberflächenenergie heraus kommen, in Übereinstimmung mit chiralen effektiven Modellen im Zwei-Flavour Fall und ohne Berücksichtigung der Effekte eines Farbaufschlusses mittels der Änderung des Polyakov-Loops in den beiden Phasen. Diese Änderungen stellten sich als gering heraus, so dass der QCD Phasenübergang durch Blasenbildung in den gängigen Szenarien wegen der kleinen Oberflächenspannung ermöglicht wird.

Die Bestimmung der extrem hohen Masse des Pulsars PSR 1614-2230 weist auf eine entsprechend steife Zustandsgleichung für Materie bei hohen Baryonendichte und wirft die Frage der Verträglichkeit mit anderen Observablen zur Zustandsgleichung auf, wie sie in relativistischen Schwerionenkollisionen gemessen wird. Im KaoS-Experiment wurde an der GSI die Anregungsfunktion von produ-

zierten positiv geladenen Kaonen weit unterhalb der elementaren Proton-Proton Einschussenergieschwelle ermittelt. Dabei zeigte sich, dass die Anregungsfunktion von Schwerionenstößen von Goldkernen, geeicht auf die Reaktionen des leichten Systems von Kohlenstoffkernen, insensitiv auf die diversen Annahmen zum Wirkungsquerschnitt im Medium und der Potentiale der Kaonen im Medium sind. Hingegen konnte die starke Abhängigkeit von der Einschussenergie nur mit einer weichen Zustandsgleichung in Einklang gebracht werden. Den scheinbaren Widerspruch zu den astrophysikalischen Daten konnten wir anhand einer Analyse basierend auf Kausalitätsbetrachtungen zur Hochdichtezustandsgleichung auflösen [45]. Daraus ergab sich eine maximal mögliche Neutronensternmasse von drei Sonnenmassen, die sich nur auf die Bestimmung der Zustandsgleichung aus dem KaoS-Experiment und Kausalität stützt.

In einer weiteren Arbeit wurde die Frage untersucht, inwieweit sich die Eigenschaften von Quarkmaterie durch die neue Untergrenze für die Masse von Neutronensternen eingrenzen lassen [50]. Dabei wurden beide Möglichkeiten zur Realisierung von Quarkmaterie in kompakten Sternen diskutiert, zum einen reine Quarksterne, die dann selbstgebunden sein müssen, und sogenannte Hybridsterne, die Quarkmaterie im Kern enthalten, aber durch einen Mantel aus baryonischer Materie abgeschirmt werden. Im letzteren Fall wurde implizit ein QCD Phasenübergang erster Ordnung vereinfacht modelliert, indem zum einen sowohl eine Maxwell- als auch eine Gibbs-Konstruktion der Niedrigdichte- und der Hochdichtenphase studiert wurde. Die Präsenz einer gemischten Phase, wie sie bei einer Gibbsschen Phasenkonstruktion diktiert wird, führt zu einer generell kleineren Maximalmasse im Vergleich zu einem rein hadronischen Neutronenstern, es sei denn der Hybridstern besitzt einen Kern aus reiner Quarkmaterie. Eine minimale Neutronensternmasse von  $2M_{\odot}$  für Quarksterne führt zu signifikanten Einschränkungen der Zustandsgleichung von Quarkmaterie. So müssen Korrekturen aus der QCD, entweder über Modifikationen motiviert aus dem Eingluon-Austauschpotential oder über die Einführung eines 'gap' motiviert aus der Farbsupraleitung, mitgenommen werden, um mit den astrophysikalischen Daten kompatibel zu sein.

Wie schon im Zwischenbericht ausgeführt, hat sich unser Arbeitsplan dynamisch an neue wissenschaftliche Erkenntnisse und Beobachtungen angepasst, verknüpft mit einer entsprechenden Änderung der Reihenfolge und einer Anpassung der Schwerpunkte.

Der erste Meilenstein des Teilprojektes **3.1**, verbunden mit der  $U_A(1)$  Anomalie, wurde mit der Verknüpfung mit der Skalenanomalie der QCD und deren Relevanz für die Physik des frühen Universums das Signal im kosmologischen Gravitationswellenhintergrundes berechnet. Hier ist unter anderem die Relevanz für die zukünftigen Studien im Rahmen des Square Kilometre Array SKA anzuführen, in dem Deutschland nun als neues Mitglied aufgenommen wurde.

Die Meilensteine des Teilprojektes **3.2** sind mit der Existenz des kritischen Punktes verbunden und sind in modifizierter Form bearbeitet worden. Unsere

verfeinerten Modellrechnungen und bisher noch unveröffentlichte Erweiterungen der dynamischen QCD-Rechnung weisen stark darauf hin, daß kein Endpunkt existiert. Es ist zu erwarten, daß baryonische und Diquark-Fluktuationen diesen Befund noch verschärfen. Andererseits gibt es durchaus indirekte Hinweise auf eine gemischte Phase in der Region großer Dichten und tiefer Temperaturen.

Im Teilprojekt **3.3** wurde der erste Meilenstein erfolgreich bearbeitet und in mehreren Arbeiten publiziert. Der zweite Meilenstein wurde zum Teil bearbeitet. Die Zustandsgleichung wurde auch für Simulationen von Neutronensternkollisionen konzipiert, Zusammenarbeiten mit den entsprechenden astrophysikalischen Arbeitsgruppen sind in Vorbereitung. Auch der dritte Meilenstein wurde in ersten Arbeiten angegangen. Die Fokussierung der astrophysikalischen Anwendungen des QCD Phasendiagrammes war nun nach der aufsehenerregenden Messung eines supermassiven Neutronensternes in 2010 auf die Konstruktion einer geeignet steifen Zustandsgleichung. Die Implikationen auf die Vorstudien des Teilprojektes wurden dazu in mehreren Publikationen ausgearbeitet.

## 2 Projektbezogene Publikationsliste

### Literatur

- [1] K. Fukushima and J. M. Pawłowski,  
*Magnetic catalysis in hot and dense quark matter and quantum fluctuations*,  
Phys. Rev. D **86** (2012) 076013 [arXiv:1203.4330 [hep-ph]].
- [2] T. K. Herbst, J. M. Pawłowski and B. -J. Schaefer,  
*The Impact of Fluctuations on QCD Matter*,  
Acta Phys. Polon. Supp. **5** (2012) 733 [arXiv:1202.0758 [hep-ph]].
- [3] L. Fister and J. M. Pawłowski,  
*Yang-Mills correlation functions at finite temperature*,  
arXiv:1112.5440 [hep-ph].
- [4] L. Fister and J. M. Pawłowski,  
*Yang-Mills theory at non-vanishing temperature*,  
arXiv:1112.5429 [hep-ph].
- [5] A. Maas, J. M. Pawłowski, L. von Smekal, D. Spielmann,  
*The gluon propagator close to criticality*,  
Phys. Rev. D **85** (2012) 034037 [arXiv:1110.6340 [hep-lat]].
- [6] A. Weber, M. Leder, J. M. Pawłowski, H. Reinhardt,  
*Functional approaches to infrared Yang-Mills theory in the Coulomb gauge*,  
J. Phys. Conf. Ser. **287** (2011) 012023 [arXiv:1106.3044 [hep-th]].
- [7] M. Leder, H. Reinhardt, A. Weber, J. M. Pawłowski,  
*Color Coulomb Potential in Yang-Mills Theory from Hamiltonian Flows*,  
arXiv:1105.0800 [hep-th].
- [8] H. Reinhardt, D. R. Campagnari, M. Leder, G. Burgio, J. M. Pawłowski,  
M. Quandt and A. Weber,  
*Hamiltonian approach to Yang-Mills theory in Coulomb gauge - revisited*,  
AIP Conf. Proc. **1354** (2011) 161-170 [arXiv:1101.5098 [hep-th]].
- [9] J. M. Pawłowski,  
*The QCD phase diagram: Results and challenges*,  
AIP Conf. Proc. **1343** (2011) 75-80 [arXiv:1012.5075 [hep-ph]].
- [10] L. M. Haas, J. Braun, J. M. Pawłowski,  
*On the QCD phase diagram at finite chemical potential*,  
AIP Conf. Proc. **1343** (2011) 459-461 [arXiv:1012.4735 [hep-ph]].

- [11] R. Alkofer, D. Diakonov, J. Pawłowski, H. Reinhardt, V. Zakharov, D. Zwanziger and J. Greensite,  
*Panel discussion: What don't we know about confinement?*,  
AIP Conf. Proc. **1343** (2011) 17-24 [arXiv:1012.3192 [hep-th]].
- [12] H. Reinhardt, M. Leder, J. M. Pawłowski and A. Weber,  
*Hamiltonian Dyson-Schwinger and FRG Flow Equations of Yang-Mills Theory in Coulomb Gauge*,  
AIP Conf. Proc. **1343** (2011) 164-166 [arXiv:1011.3462 [hep-th]].
- [13] A. Eichhorn, H. Gies, J. M. Pawłowski,  
*Gluon condensation and scaling exponents for the propagators in Yang-Mills theory*,  
Phys. Rev. **D83** (2011) 045014 [arXiv:1010.2153 [hep-ph]].
- [14] J. -P. Blaizot, J. M. Pawłowski, U. Reinosa,  
*Exact renormalization group and Phi-derivable approximations*,  
Phys. Lett. **B696** (2011) 523-528 [arXiv:1009.6048 [hep-ph]].
- [15] H. Reinhardt, M. Leder, J. M. Pawłowski and A. Weber,  
*Hamiltonian Flow of Yang-Mills Theory in Coulomb Gauge*,  
PoS **LATTICE2010** (2010) 283 [arXiv:1008.1530 [hep-lat]].
- [16] T. K. Herbst, J. M. Pawłowski and B. J. Schaefer,  
*The phase structure of the Polyakov-quark-meson model beyond mean field*,  
Phys. Lett. B **696** (2011) 58 [arXiv:1008.0081 [hep-ph]].
- [17] J. Braun, A. Eichhorn, H. Gies and J. M. Pawłowski,  
*On the Nature of the Phase Transition in  $SU(N)$ ,  $Sp(2)$  and  $E(7)$  Yang-Mills theory*,  
Eur. Phys. J. C **70** (2010) 689 [arXiv:1007.2619 [hep-ph]].
- [18] M. Leder, J. M. Pawłowski, H. Reinhardt and A. Weber,  
*Hamiltonian Flow in Coulomb Gauge Yang-Mills Theory*,  
Phys. Rev. D **83** (2011) 025010 [arXiv:1006.5710 [hep-th]].
- [19] T. Gasenzer, S. Keßler and J. M. Pawłowski,  
*Far-from-equilibrium quantum many-body dynamics*,  
Eur. Phys. J. **C70** (2010) 423 [arXiv:1003.4163 [cond-mat.quant-gas]].
- [20] A. Maas, J. M. Pawłowski, D. Spielmann, A. Sternbeck and L. von Smekal,  
*Strong-coupling study of the Gribov ambiguity in lattice Landau gauge*,  
Eur. Phys. J. **C68** (2010) 183 [arXiv:0912.4203 [hep-lat]].
- [21] J. M. Pawłowski, D. Spielmann and I. O. Stamatescu,  
*Lattice Landau gauge with stochastic quantisation*,  
Nucl. Phys. B **830** (2010) 291 [arXiv:0911.4921 [hep-lat]].

- [22] Y. Igarashi and J. M. Pawłowski,  
*CP invariance of chiral gauge theories and Majorana-Yukawa couplings on the lattice*,  
PoS(LAT2009)219 [arXiv:0911.2038 [hep-lat]].
- [23] H. Reinhardt, G. Burgio, D. R. Campagnari, D. Epple, C. Feuchter, M. Leder, M. Pak, J. M. Pawłowski, M. Quandt, W. Schleifenbaum and A. Weber,  
*Hamiltonian approach to Yang-Mills theory in Coulomb gauge*,  
PoS **QCD-TNT09** (2009) 038 [arXiv:0911.0613 [hep-th]].
- [24] J. Braun, L. M. Haas, F. Marhauser and J. M. Pawłowski,  
*Phase Structure of Two-Flavor QCD at Finite Chemical Potential*,  
Phys. Rev. Lett. **106** (2011) 022002 [ arXiv:0908.0008 [hep-ph]].
- [25] J. Schaffner-Bielich, T. Fischer, M. Hempel, M. Liebendörfer, G. Pagliara and I. Sagert:  
*“Can a supernova bang twice?”*  
Prog. Theor. Phys. Suppl. **186** (2010) 93 [arXiv:1009.6096 [astro-ph.CO]].
- [26] G. Pagliara and J. Schaffner-Bielich:  
*“Hadron-quark phase transition at nonzero isospin density: The Effect of quark pairing,”*  
Phys. Rev. **D81**, 094024 (2010), 9 pp., arXiv:1003.1017 [nucl-th]
- [27] B.W. Mintz, E.S. Fraga, J. Schaffner-Bielich, G. Pagliara:  
*“On thermal nucleation of quark matter in compact stars,”*  
J. Phys. **G37**, 094066 (2010), 6 pp., arXiv:1001.3143 [hep-ph]
- [28] G. Pagliara, M. Hempel, J. Schaffner-Bielich:  
*“Quark-hadron mixed phases in protoneutron stars,”*  
J. Phys. **G37**, 094065 (2010), 6 pp., arXiv:1001.2191 [astro-ph.SR]
- [29] I. Sagert, T. Fischer, M. Hempel, G. Pagliara, J. Schaffner-Bielich, F. K. Thielemann and M. Liebendörfer:  
*“Strange quark matter in explosive astrophysical systems,”*  
J. Phys. **G37**, 094064 (2010), 6 pp., arXiv:1003.2320 [astro-ph.HE]
- [30] T. Boeckel, M. Hempel, I. Sagert, G. Pagliara, B. Sa’d and J. Schaffner-Bielich:  
*“Strangeness in Astrophysics and Cosmology,”*  
J. Phys. **G37**, 094005 (2010), 6 pp., arXiv:1002.1793 [astro-ph.CO]
- [31] B. W. Mintz, E. Fraga, G. Pagliara and J. Schaffner-Bielich:  
*“Nucleation of quark matter in protoneutron star matter,”*  
Phys. Rev. **D81**, 123012 (2010), 9 pp., arXiv:0910.3927 [hep-ph]

- [32] M. Hempel and J. Schaffner-Bielich:  
“*Statistical model for a complete supernova equation of state,*”  
Nucl. Phys. A **837**, 210-254 (2010), arXiv:0911.4073 [nucl-th]
- [33] J. Schaffner-Bielich:  
“*Strangeness in Compact Stars,*”  
Nucl. Phys. A **835**, 279-286 (2010), arXiv:1002.1658 [nucl-th]
- [34] B. Dasgupta, T. Fischer, S. Horiuchi, M. Liebendörfer, A. Mirizzi, I. Sagert, J. Schaffner-Bielich:  
“*Detecting the QCD phase transition in the next Galactic supernova neutrino burst,*”  
Phys. Rev. **D81**, 103005 (2010), 6pp., arXiv:0912.2568 [astro-ph.HE]
- [35] T. Fischer, I. Sagert, M. Hempel, G. Pagliara, J. Schaffner-Bielich, M. Liebendörfer:  
“*Signals of the QCD phase transition in core collapse supernova – microphysical input and implications on the supernova dynamics*”  
Class. Quantum Grav. **27**, 114102 (2010) (11pp)
- [36] J. Aichelin and J. Schaffner-Bielich:  
“*The Quest for the Nuclear Equation of State,*”  
invited review for Landolt-Börnstein, New Series, volume I/23 on ‘Relativistic Heavy-Ion Physics’, edited by Reinhard Stock, Springer, Heidelberg, 2010, chapter 3.1., 34 pp., arXiv:0812.1341 [nucl-th]
- [37] M. Hempel, G. Pagliara, J. Schaffner-Bielich:  
“*Conditions for phase equilibrium in supernovae, proto-neutron and neutron stars,*”  
Phys. Rev. **D80**, 125014 (2009), 16 pp., arXiv:0907.2680 [astro-ph.HE]
- [38] G. Pagliara, M. Hempel, J. Schaffner-Bielich:  
“*A new possible quark-hadron mixed phase in proto-neutron stars,*”  
Phys. Rev. Lett. **103**, 171102 (2009), 4 pp., arXiv:0907.3075 [astro-ph.HE]
- [39] B. Sa’d and J. Schaffner-Bielich:  
“*Dissipation of radial oscillations in compact stars,*”  
4 pp., arXiv:0908.4190 [astro-ph.SR]
- [40] G. Pagliara:  
“*Quark matter formation in explosive astrophysical phenomena,*”  
Acta Phys. Polon. Supp. **3** (2010) 791, 6 pp.
- [41] G. Pagliara:  
“*Formation of quark phases in protoneutron stars: the transition from the*

- 2SC to the normal quark phase,*  
Phys. Rev. D **83** (2011) 125013 [arXiv:1012.3046 [nucl-th], 9 pp.
- [42] I. Sagert, T. Fischer, M. Hempel, G. Pagliara, J. Schaffner-Bielich, F. K. Thielemann and M. Liebendorfer:  
*“Strange matter in core-collapse supernovae,”*  
Acta Phys. Polon. B **43** (2012) 741 [arXiv:1112.6328 [astro-ph.HE]].
- [43] S. Weissenborn, D. Chatterjee and J. Schaffner-Bielich:  
*“Hyperons and massive neutron stars: vector repulsion and SU(3) symmetry,”*  
Phys. Rev. C **85** (2012) 065802 [arXiv:1112.0234 [astro-ph.HE]].
- [44] S. Weissenborn, D. Chatterjee and J. Schaffner-Bielich:  
*“Hyperons and massive neutron stars: the role of hyperon potentials,”*  
Nucl. Phys. A **881** (2012) 62 [arXiv:1111.6049 [astro-ph.HE]].
- [45] I. Sagert, L. Tolos, D. Chatterjee, J. Schaffner-Bielich and C. Sturm:  
*“Soft nuclear equation-of-state from heavy-ion data and implications for compact stars,”*  
Phys. Rev. C **86** (2012) 045802 [arXiv:1111.6058 [astro-ph.SR]].
- [46] M. Hempel, T. Fischer, J. Schaffner-Bielich and M. Liebendorfer:  
*“New Equations of State in Simulations of Core-Collapse Supernovae,”*  
Astrophys. J. **748** (2012) 70 [arXiv:1108.0848 [astro-ph.HE]].
- [47] T. Boeckel and J. Schaffner-Bielich:  
*“A little inflation at the cosmological QCD phase transition,”*  
Phys. Rev. D **85** (2012) 103506 [arXiv:1105.0832 [astro-ph.CO]].
- [48] S. Schettler, M. T. Boeckel and J. Schaffner-Bielich:  
*“Detecting quark matter in the early universe by gravitational waves,”*  
arXiv:1105.0339 [astro-ph.CO].
- [49] T. Fischer, D. Blaschke, M. Hempel, T. Klähn, R. Lastowiecki, M. Liebendorfer, G. Martinez-Pinedo, G. Pagliara, I. Sagert, F. Sandin, J. Schaffner-Bielich, S. Typel:  
*“Core collapse supernovae in the QCD phase diagram,”*  
Phys. Atom. Nucl. **75** (2012) 613 [arXiv:1103.3004 [astro-ph.HE]].
- [50] S. Weissenborn, I. Sagert, G. Pagliara, M. Hempel and J. Schaffner-Bielich:  
*“Quark Matter In Massive Neutron Stars,”*  
Astrophys. J. **740** (2011) L14 [arXiv:1102.2869 [astro-ph.HE]].
- [51] L. Bonanno, C. Cuofano, A. Drago, G. Pagliara and J. Schaffner-Bielich:  
*“Magnetic field generated by r-modes in accreting quark stars,”*  
Astron. Astrophys. **532** (2011) A15 [arXiv:1101.4875 [astro-ph.HE]].

- [52] T. Boeckel, S. Schettler and J. Schaffner-Bielich:  
“*The Cosmological QCD Phase Transition Revisited,*”  
Prog. Part. Nucl. Phys. **66** (2011) 266 [arXiv:1012.3342 [astro-ph.CO]].
- [53] T. Fischer, I. Sagert, G. Pagliara, M. Hempel, J. Schaffner-Bielich, T. Rauscher, F. K. Thielemann, R. Kappeli, G. Martinez-Pinedo, M. Liebendörfer:  
“*Core-collapse supernova explosions triggered by a quark-hadron phase transition during the early post-bounce phase,*”  
Astrophys. J. Suppl. **194** (2011) 39 [arXiv:1011.3409 [astro-ph.HE]].
- [54] S. Schettler, T. Boeckel and J. Schaffner-Bielich:  
“*Imprints of the QCD Phase Transition on the Spectrum of Gravitational Waves,*”  
Phys. Rev. D **83** (2011) 064030 [arXiv:1010.4857 [astro-ph.CO]].

## 3 Abgeschlossene Diplom- und Doktorarbeiten

### 3.1 Doktorarbeiten

- Leonard Fister:  
„On the phase diagram of QCD with dynamical quarks“,  
Dissertation, Universität Heidelberg, Disputation 18. October 2012
- Lisa Haas:  
„The phase diagram of QCD and astrophysical applications“,  
Dissertation, Universität Heidelberg, Disputation 19. October 2012
- Daniel Spielmann:  
„Stochastic quantisation and infrared QCD“ Dissertation, Universität Heidelberg, Disputation 12. Januar 2011
- Florian Marhauser:  
„The phase diagram of QCD: order parameters and phase structure“,  
Dissertation, Universität Heidelberg, Disputation 14. Oktober 2009
- Irina Sagert:  
„Probing the QCD Phase Diagram with Compact Stars“,  
Dissertation, Goethe Universität Frankfurt, Disputation 01. Oktober 2010
- Matthias Hempel:  
„Hot and Dense Matter in Compact Stars – From Nuclei to Quarks“,  
Dissertation, Universität Heidelberg, Disputation: 19. Oktober 2010
- Tillmann Boeckel:  
„A Little Inflation at the Cosmological QCD Phase Transition“,  
Dissertation, Universität Heidelberg, Disputation: 8. Juni 2011

### 3.2 Diplomarbeiten

- Daniel Yueker:  
„An Effective Theory for the QCD Phase Transition in the Early Universe“,  
Diplomarbeit, Goethe Universität Frankfurt, Dezember 2009
- Alessandro Brillante:  
„Structure and Evolution of Third Family Compact Stars“,  
Diplomarbeit, Goethe Universität Frankfurt, Mai 2010
- Simon Schettler:  
„Imprints of the QCD Phase Transition on the Spectrum of Gravitational Waves“,  
Diplomarbeit, Universität Heidelberg, Juni 2010

- Andreas Lohs:  
„Neutrino Interactions in Hot Strange Quark Matter“,  
Masterarbeit, Universität Heidelberg, Februar 2011
- Simon Weissenborn:  
„Hadronic and Quark Matter in Massive Compact Stars“,  
Diplomarbeit, Universität Heidelberg, August 2011
- Margit Maly:  
„Compact Stars in the Quark-Meson Model“,  
Diplomarbeit, Universität Heidelberg, März 2012
- Miriam Saltzer:  
„Auswirkungen einer kosmologischen QCD-Inflationsphase auf thermisch  
entkoppelte Kalte Dunkle Materie“,  
Diplomarbeit, Goethe Universität Frankfurt, Mai 2012
- Christian Zielinski:  
„Lattice theories at finite density“,  
Diplomarbeit, Universität Heidelberg, Mai 2012
- Fabian Rennecke:  
„Finite volume effects in QCD“,  
Diplomarbeit, Universität Heidelberg, Januar 2012
- Roman Hennig:  
„Transport coefficients in ultracold gases“,  
Diplomarbeit, Universität Heidelberg, Dezember 2011
- Naseemuddin Khan:  
„The phase structure of two-colour QCD“,  
Diplomarbeit, Universität Heidelberg, Dezember 2011
- Fabian Spallek:  
„Dynamical quarks and the phase diagram of QCD“,  
Diplomarbeit, Universität Heidelberg, Juni 2010

## 4 Personalliste mit Tätigkeitsbereichen

### Wissenschaftliche Mitarbeiter

- Dr. Debarati Chatterjee (Alexander von Humboldt Stipendiat, Mai 2010 – Mai 2012): Oszillationen und 'glitches' in superfluiden Neutronensternen
- Dr. Giuseppe Pagliara (Wissenschaftlicher Mitarbeiter): Phasengrenzen in effektiven Modellen der QCD
- Dr. Basil Sa'd (Wissenschaftlicher Mitarbeiter, bis September 2010): Dissipative Effekte für hochdichte Materie und Implikationen für r-Moden Instabilitäten
- Dr. Denes Sexty (Wissenschaftlicher Mitarbeiter, bis September 2011): Dynamics in few and many body systems & applications to heavy ion collisions

### Doktoranden

- Tillmann Boeckel (Promotion): Kosmologische Signale eines inflationären QCD Phasenüberganges
- Leonard Fister (Promotion): On the Phase diagram of QCD with dynamical quarks
- Lisa M. Haas (Promotion): The phase diagram of QCD and astrophysical applications
- Michael Haas (Doktorand): Transport coefficients and hydrodynamics in the quark-gluon plasma
- Mattias Hempel (Promotion): Statistische Modelle von Zustandsgleichungen für Supernova Simulationen
- Naseemuddin Khan (Doktorand, Master Student): Baryons and diquarks at large densities
- Florian Marhauser (Promotion): The phase diagram of QCD: order parameters and phase structure
- Steven Mathey (Doktorand): Non-equilibrium quantum field theory and thermalisation
- Fabian Rennecke (Doktorand, Diplom): Glue and matter fluctuations in the phase diagram of QCD

- Irina Sagert (Promotion): Phasenübergang zu Quarkmaterie in Neutronensternen und in Kernkollaps-Supernovae
- Simon Schettler (Diplom, Doktorand): Gravitationswellen vom QCD Phasenüberganges im frühen Universum
- Rainer Stiele (Doktorand): Phasenübergänge im Polyakov-Quark-Meson Modell
- Simon Weissenborn (Diplom, Doktorand): Maximalmassen von Neutronensternen mit Quarkmaterie

### Diplomanden/Master-Studenten

- Alessandro Brillante (Diplom): Kollaps eines Neutronensternes zu einem Quarkstern
- Andreas Lohs (Master Student): Neutrino-Wirkungsquerschnitte in Quarkmaterie
- Andreas Risch (Diplom): Matter Fluctuations and the phase diagram of QCD
- Miriam Saltzer (Diplom): Primordiale Änderung des Anteils an Dunkler Materie durch einen inflationären QCD Phasenübergang
- Fabian Spallek (Diplom): Dynamische Quarks und das Phasendiagramm der QCD
- Daniel Yueker (Diplom): Dilaton-Modell und Brechung der Skaleninvarianz der QCD

### Gäste

- Dr. Luca Bonanno: Forschungsaufenthalt über das Compstar Projekt der European Science Foundation (Juni bis August 2010): Magnetische Dämpfung der r-Moden in kompakten Sternen
- Bruno Mintz: CNPq Stipendium (Februar bis August 2010): Zeitskalen von Nichtgleichgewichtsprozessen in QCD Phasenübergängen erster Ordnung