

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Schlussbericht

Verbund: 05P2018 - Aufbau von CBM bei FAIR

Zuwendungsempfänger: Universität Heidelberg
Projektleitung: Prof. Dr. Jan M. Pawlowski
E-Mail: j.pawlowski@thphys.uni-heidelberg.de
Förderkennzeichen: 05P18VHFCA
Förderzeitraum: 01.07.2018 - 30.06.2021
Zuwendung: 135.103,61 €
Projektträger: Projektträger DESY

Zusätzlicher Kontakt: j.bloch-ditzinger@thphys.uni-heidelberg.de
Zusätzlicher Name: Jeannette Bloch-Ditzinger

Genutzte Großgeräte:	Labor	Gerät	Experiment
	Hadronen- und Kernphysik		Theorie
Diplomarbeiten:	0		
Dissertationen:	2		
Habilitationen:	0		
Referierte Publikationen:	25		
Andere Veröffentlichungen:	6		
Patente:	0		
Bachelorarbeiten:	0		
Masterarbeiten:	2		
Staatsexamen:	0		

Dieser Bericht wurde beim Projektträger über einen individuellen Online-Zugang vom Projektleiter eingereicht und am 14.02.2022 19:47 für eine Veröffentlichung freigegeben.

Schlussbericht

Zuwendungsempfänger: **Universität Heidelberg**

Projektleitung: **Prof. Dr. J.M. Pawlowski**

Verbund: **CBM**

Thema: **Signaturen der Nichtgleichgewichtsphysik des QCD Phasenübergangs und Fluktuationen erhaltener Ladungen bei CBM-Dichten**

Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes wurden Signaturen des QCD Phasenübergangs bei hohen Dichten und Temperaturen in Hinblick auf laufende und geplante Schwerionenexperimente am LHC (ALICE), STAR (RHIC) und CBM (FAIR) untersucht. Für diese theoretische Studie muss einerseits die Phasenstruktur der QCD bei endlicher Dichte und Temperatur aufgelöst werden, andererseits müssen Fluktuationen erhaltener Ladungen (insbesondere baryon number) berechnet werden. Des Weiteren wurden nichtstörungstheoretische Realzeitkorrelationsfunktionen in der QCD und Effektiven Niederenergie-theorien berechnet, was einen völlig neuen Zugang benötigt.

Die Ziele des Vorhabens wurden im Großen und Ganzen erreicht und teilweise übertroffen.

Bericht

1 Aufgabenstellung und Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

QCD bei endlichen und insbesondere hohen Dichten kann im Moment nur mit Hilfe von diagrammatischen (funktionalen) Methoden bearbeitet werden. Das Projekt hatte das Ziel, diese Methoden auf experimentell zugängliche Observable bei hohen Dichten anzuwenden, und dafür sowohl Effektive Niederenergie-theorien als auch direkte Rechnungen in der QCD zu verwenden.

2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die durchgeführten Untersuchungen bauen auf ein mittlerweile hochentwickelte diagrammatische Zugänge zur QCD (Dyson-Schwinger Gleichungen, Funktionale Renormierungsgruppe auf), die bei verschwindender Dichte alle ‚Benchmark‘ Vergleiche mit Gitterrechnungen erfüllen.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens sowie Kooperation mit Dritten

Das Vorhaben benötigte die Weiterentwicklung der schon erwähnten funktionalen Zugänge zur QCD sowie die Anwendung auf experimentell zugängliche Observable.

1. Auflösung der Phasenstruktur der QCD einschliesslich des Bereichs der bei CBM (Fair facility Darmstadt) in Zukunft untersuchten Dichten. Dieser Bereich kann innerhalb der QCD nur mit diagrammatischen funktionalen Methoden aufgelöst werden, da jetzige Gittersimulationen nur bei sehr viel niedrigeren Dichten angewendet werden können.

Im jetzigen Projekt wurden das erste Mal Ergebnisse für die Phasenstruktur erzielt, die auch alle zur Verfügung stehenden Vergleichsresultate der GitterQCD bei verschwindenden Dichten reproduzieren. Diese Ergebnisse wurden dann mit einer verwandten funktionalen Methode in den Arbeiten quantitativ bestätigt. Das ist ein wichtiger Meilenstein für die theoretische Vorhersage der Position des kritischen Endpunktes (oder allgemeiner einer Region mit neuer Physik).

Die obigen Ergebnisse sind für eine Untersuchung von Observablen, den sogenannten Fluktuationsobservablen (hyper-order baryon fluctuations) im Vergleich zu experimentellen Daten (STAR) benutzt worden. Die Ergebnisse erfüllen alle theoretischen Konsistenzchecks und sind in Übereinstimmung mit den experimentellen Daten. Darüber hinaus werden Voraussagen für höhere Fluktuationsobservable gemacht, die in Zukunft bei entsprechend höherer experimenteller Statistik überprüft werden können. Die Observablen sind sensitiv auf die Position des kritischen Endpunktes, bzw. einer Region mit neuer Physik, und die vorliegende Arbeit legt den Grundstein für eine kombinierte Theorie-Experiment Vorhersage.

2. Die frühe Phase von Schwerionenkollisionen findet weit vom Gleichgewicht statt. Wir benötigen daher auch Nichtgleichgewichtsmethoden, um den Gesamtprozess quantitative beschreiben zu können.

Im vorliegenden Projekt wurden zum einen die Frühzeitevolution von Korrelationsfunktionen (aus denen dann die oben genannten Fluktuationsobservable bestimmt werden) in Niederenergietheorien bestimmt, als auch die für die Frühzeitdynamik sehr interessante Frage von Gluonkondensation beantwortet.

Weitere Ergebnisse wurden in der Transportphase nah am Gleichgewicht erzielt. Diese Phase ist besonders interessant für experimentelle Signaturen eines kritischen Endpunktes: Nahe des Endpunktes sollte die Equilibrierung besonders lange dauern. Es konnte gezeigt werden, daß diese Region sehr klein ist und daher höchstwahrscheinlich nach anderen Signaturen einer solchen Region Ausschau gehalten werden muss.

Es folgt eine Übersicht über die erzielten Hauptergebnisse zu den Meilensteinen AP1.1 und AP1.2.

AP1.1:

3. Auflösung der Phasenstruktur: Lage der Phasenlinie einschliesslich CBM Dichten ('1st principles' QCD):
7, 11, 16

Effektive Niederenergietheorien bei endlicher Dichte (Ordnungsparameter und Detailstruktur)

4

4. Chirale Phasenstruktur ('1st principles' QCD):
9

5. Baryon-Strangeness fluctuations mit Hilfe von neuen Relationen:
20, 21

6. Fluktuationsobservable (hyper-order baryon fluctuations) im Vergleich zu experimentellen Daten (STAR) (Kombination '1st principles' QCD & Niederenergietheorien):
5

AP1.2:

1. Transport mit Fluktuationsphysik:
Proceedings 4

2. Nichtgleichgewichtsprozesse und Nichtgleichgewichtshydrodynamik:
10, 22, 24

3. Eichkondensation fern vom Gleichgewicht:
15

4. Verwendung der Zuwendung (wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises, z. B. Investitionen, Personalmittel)

Personalmittel:

Tobias Denz (Computeralgebraische Methoden zum Aufstellen und Lösen von Integral-Differentialgleichungen in der QCD)

Nicolas Wink (Phasenstruktur der QCD, QCD Transport & Transportkoeffizienten, Computeralgebraische und numerische Methoden zum Aufstellen und Lösen von diagrammetrischen Integral-Differentialgleichungen in der QCD und Niederenergiemodellen)

Friederike Ihssen (Phasenstruktur der QCD, numerische Methoden zum Aufstellen und Lösen von von diagrammetrischen Integral-Differentialgleichungen in der QCD und Niederenergiemodellen)

5 Erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vereinbarten Ziele

Der Meilenstein AP1.1 wurde voll erzielt und in Bezug auf die Auflösung der Phasenstruktur qualitativ übertroffen. Die Fluktuationsobservablen wurden erfolgreich mit STAR Daten verglichen, weitere Arbeiten bezüglich der Konsequenzen für die Phasenstruktur bei hohen Dichten sind in Arbeit.

Beim Meilenstein AP1.2 sind die Ergebnisse zu der Dynamik von Fluktuationsobservablen erzielt worden, allerdings für Fluktuationen der skalaren Dichte und nicht der Baryonzahl. Es wurde auch die Nichtgleichgewichtsevolution von Niederenergietheorien (Quark-Mesonmodell) aufgelöst und die entsprechenden Spektralfunktionen hergeleitet. Dies ermöglicht jetzt die Berechnung von dynamischen Transportkoeffizienten; dies wird dann auch die Dynamik von Gluonen einbeziehen, die auch (far-from-equilibrium) in Bezug auf Kondensate untersucht wurde.

6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Rahmen der Arbeit erzielten Erkenntnisse über die Phasenstruktur der QCD und die Fluktuationen der Baryonladung (im Experiment Protonladung) sind von essentieller Wichtigkeit für das theoretische Verständnis der experimentellen Ergebnisse und deren Relevanz für die Suche nach einem möglichen kritischen Endpunkt und dessen experimentelle Signaturen. Die verwendeten diagrammatischen (funktionalen) QCD Methoden sind bei diesen Dichten kokurrenzlos, da Gittersimulationen wegen des Vorzeichenproblems nicht angewendet werden können.

7 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Ergebnisse für die Phasenstruktur und insbesondere die Lage des kritischen Endpunktes im CBM Energiebereich sind wichtig für die Suche nach entsprechenden Signaturen. Für eine quantitative Vorhersage werden weitere Verbesserungen der Rechnung vorgenommen und sind innerhalb dieses Projektes angestossen worden.

Die Ergebnisse zu den Fluktuationsobservablen sind kompatibel mit Gitterergebnissen bei verschwindender Dichte und den existierenden experimentellen Resultaten. Die im Rahmen dieses Projektes erarbeiteten Resultate für höhere Fluktuationsobservablen werden hoffentlich in Zukunft am Experiment überprüft.

8 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannten Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

keine

9 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

9.1 Referierte Publikationen (z. B. in Fachzeitschriften oder -büchern und referierte Konferenzproceedings)

1. Spectral representation of the shear viscosity for local scalar QFTs at finite temperature
Peter Lowdon, Ralf-Arno Tripolt, Jan M. Pawłowski, Dirk H. Rischke
Phys.Rev.D 104 (2021) 6, 065010.
2. Ghost spectral function from the spectral Dyson-Schwinger equation
Jan Horak, Joannis Papavassiliou, Jan M. Pawłowski, Nicolas Wink
Phys. Rev. D 104, 074017.
3. Fully coupled functional equations for the quark sector of QCD
Fei Gao, Joannis Papavassiliou, Jan M. Pawłowski
Phys.Rev.D 103 (2021) 9, 094013.
4. Shocks and quark-meson scatterings at large density
Eduardo Grossi, Friederike J. Ihssen, Jan M. Pawłowski, Nicolas Wink
Phys.Rev.D 104 (2021) 1, 016028.
5. Hyper-order baryon number fluctuations at finite temperature and density
Wei-jie Fu, Xiaofeng Luo, Jan M. Pawłowski, Fabian Rennecke, Rui Wen, Shi Yin
Phys.Rev.D 104 (2021) 9, 094047.
6. Chiral and effective $U(1)_A$ symmetry restoration in QCD
Jens Braun, Marc Leonhardt, Jan M. Pawłowski, Daniel Rosenblüh
7. Chiral phase structure and critical end point in QCD
Fei Gao, Jan M. Pawłowski
Phys.Lett.B 820 (2021) 136584.
8. Spectral functions in the ϕ^4 -theory from the spectral DSE
Jan Horak, Jan M. Pawłowski, Nicolas Wink
Phys.Rev.D 102 (2020) 125016.
9. Chiral Susceptibility in (2+1)-flavour QCD
Jens Braun, Wei-jie Fu, Jan M. Pawłowski, Fabian Rennecke, Daniel Rosenblüh, Shi Yin
Phys.Rev.D 102 (2020) 5, 056010.
10. Thermalization and dynamical spectral properties in the quark-meson model
Linda Shen, Jürgen Berges, Jan M. Pawłowski, Alexander Rothkopf
Phys.Rev.D 102 (2020) 1, 016012.
11. QCD phase structure from functional methods
Fei Gao, Jan M. Pawłowski

- Phys.Rev.D 102 (2020) 3, 034027.
12. Dynamics of critical fluctuations: Theory -- phenomenology -- heavy-ion collisions
Marcus Bluhm et al.
Nucl.Phys.A 1003 (2020) 122016.
 13. Flowing with the Temporal Renormalisation Group
Lukas Corell, Anton K. Cyrol, Markus Heller, Jan M. Pawłowski
Phys.Rev.D 104 (2021) 2, 025005.
 14. Exploring the Tan contact term in Yang-Mills theory
Ouraman Hajizadeh, Markus Q. Huber, Axel Maas, Jan M. Pawłowski
Phys.Rev.D 103 (2021) 3, 034023.
 15. Gauge-invariant condensation in the nonequilibrium quark-gluon plasma
Jürgen Berges, Kirill Boguslavski, Mark Mace, Jan M. Pawłowski
Phys.Rev.D 102 (2020) 3, 034014.
 16. The QCD phase structure at finite temperature and density
Wei-jie Fu, Jan M. Pawłowski, Fabian Rennecke
Phys.Rev.D 101 (2020) 5, 054032.
 17. DoFun 3.0: Functional equations in Mathematica
Markus Q. Huber, Anton K. Cyrol, Jan M. Pawłowski
Comput.Phys.Commun. 248 (2020) 107058.
 18. Reducing Autocorrelation Times in Lattice Simulations with Generative Adversarial Networks
Julian M. Urban, Jan M. Pawłowski
Mach.Learn.Sci.Tech. 1 (2020) 045011.
 19. Bound state properties from the functional renormalization group
Reinhard Alkofer, Axel Maas, Walid Ahmed Mian, Mario Mitter, Jordi París-López, Jan M. Pawłowski, Nicolas Wink
Phys.Rev.D 99 (2019) 5, 054029.
 20. Strangeness neutrality and baryon-strangeness correlations
Wei-jie Fu, Jan M. Pawłowski, Fabian Rennecke
Phys.Rev.D 100 (2019) 11, 111501.
 21. Strangeness Neutrality and QCD Thermodynamics
Wei-jie Fu, Jan M. Pawłowski, Fabian Rennecke
SciPost Phys.Core 2 (2020) 002.
 22. Schwinger pair production and string breaking in non-Abelian gauge theory from real-time lattice improved Hamiltonians
Daniel Spitz, Jürgen Berges
Phys.Rev. D99 (2019) no.3, 036020.
 23. Breaking the fluctuation-dissipation relation by universal transport processes

Asier Piñeiro Orioli, Jürgen Berges
Phys.Rev.Lett. 122 (2019) no.15, 150401.

24. Prescaling and far-from-equilibrium hydrodynamics in the quark-gluon plasma
Aleksas Mazeliauskas, Jürgen
Phys.Rev.Lett. 122 (2019) no.12, 122301.

25. Dynamical Topological Transitions in the Massive Schwinger Model with a θ Term
T.V. Zache, N. Mueller, J.T. Schneider, F. Jendrzewski, J. Berges, P. Hauke
Phys.Rev.Lett. 122 (2019) no.5, 050403.

9.2 Andere Veröffentlichungen (z. B. Konferenzbeiträge wie Vorträge und Poster, unreferierte Proceedings, Conference Notes)

1. QMeS-Derivation: Mathematica package for the symbolic derivation of functional equations
Jan M. Pawłowski, Coralie S. Schneider, Nicolas Wink
e-Print: 2102.01410 [hep-ph].
2. Strangeness neutrality and the QCD phase diagram
Fabian Rennecke, Wei-jie Fu, Jan M. Pawłowski
PoS CORFU2018 (2019) 182.
3. Physics Beyond Colliders: QCD Working Group Report
A. Dainese et al.
e-Print: arXiv:1901.04482 [hep-ex].
4. Time-evolution of fluctuations as signal of the phase transition dynamics in a QCD-assisted transport approach
M. Bluhm, Y. Jiang, M. Nahrgang, J.M. Pawłowski, F. Rennecke, N. Wink
Nucl.Phys. A982 (2019) 871-874.
5. Entanglement and thermalization
Jürgen Berges, Stefan Floerchinger, Raju Venugopalan
Nucl.Phys. A982 (2019) 819-822.
6. Nonequilibrium quark production in the expanding QCD plasma
Naoto Tanji, Jürgen Berges
Nucl.Phys. A982 (2019) 243-246.

9.3 Abschlussarbeiten (Bachelor, Master, Diplom, Staatsexamen, Promotion, Habilitation)

Doktorarbeiten

Linda Shen (2020)

Nicolas Wink (2020)

Masterarbeiten

Jan Horak (2019)

Friederike Ihssen (2020)

Kurzbericht

- öffentlich -

Zuwendungsempfänger: **Universität Heidelberg**

Projektleitung: **Prof. Dr. J.M. Pawlowski**

Verbund: **CBM**

Thema: **Signaturen der Nichtgleichgewichtsphysik des QCD Phasenübergangs und Fluktuationen erhaltener Ladungen bei CBM-Dichten**

1. Ziel und Inhalt des Projektes

2. Im Rahmen des Projektes wurden Signaturen des QCD Phasenübergangs bei hohen Dichten und Temperaturen in Hinblick auf laufende und geplante Schwerionenexperimente am LHC (ALICE), STAR (RHIC) und CBM (FAIR) untersucht. Für diese theoretische Studie muss einerseits die Phasenstruktur der QCD bei endlicher Dichte und Temperatur aufgelöst werden, andererseits müssen Fluktuationen erhaltener Ladungen (insbesondere baryon number) berechnet werden. Des Weiteren wurden nichtstörungstheoretische Realzeitkorrelationsfunktionen in der QCD und Effektiven Niederenergie-theorien berechnet, was einen völlig neuen Zugang benötigt.

3. Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens

Das Vorhaben benötigte die Weiterentwicklung der schon erwähnten funktionalen Zugänge zur QCD sowie die Anwendung auf experimentell zugängliche Observable.

1. Auflösung der Phasenstruktur der QCD einschliesslich des Bereichs der bei CBM (Fair facility Darmstadt) in Zukunft untersuchten Dichten. Dieser Bereich kann innerhalb der QCD nur mit diagrammatischen funktionalen Methoden aufgelöst werden, da jetzige Gittersimulationen nur bei sehr viel niedrigeren Dichten angewendet werden können.
Im jetzigen Projekt wurden das erste Mal Ergebnisse für die Phasenstruktur erzielt, die auch alle zur Verfügung stehenden Vergleichsresultate der GitterQCD bei verschwindenden Dichten reproduzieren. Diese Ergebnisse wurden dann mit einer verwandten funktionalen Methode in den Arbeiten quantitativ bestätigt. Das ist ein wichtiger Meilenstein für die theoretische Vorhersage der Position des kritischen Endpunktes (oder allgemeiner einer Region mit neuer Physik).
Die obigen Ergebnisse sind für eine Untersuchung von Observablen, den sogenannten Fluktuationsobservablen (hyper-order baryon fluctuations) im Vergleich zu experimentellen Daten (STAR) benutzt worden. Die Ergebnisse erfüllen alle theoretischen Konsistenzchecks und sind in Übereinstimmung mit den experimentellen Daten. Darüber hinaus werden Voraussagen für höhere Fluktuationsobservable gemacht,

die in Zukunft bei entsprechend höherer experimenteller Statistik überprüft werden können. Die Observablen sind sensitiv auf die Position des kritischen Endpunktes, bzw. einer Region mit neuer Physik, und die vorliegende Arbeit legt den Grundstein für eine kombinierte Theorie-Experiment Vorhersage.

2. Die frühe Phase von Schwerionenkollisionen findet weit vom Gleichgewicht statt. Wir benötigen daher auch Nichtgleichgewichtsmethoden, um den Gesamtprozess quantitative beschreiben zu können.
Im vorliegenden Projekt wurden zum einen die Frühzeitevolution von Korrelationsfunktionen (aus denen dann die oben genannten Fluktuationsobservable bestimmt werden) in Niederenergietheorien bestimmt, als auch die für die Frühzeitdynamik sehr interessante Frage von Gluonkondensation beantwortet.
Weitere Ergebnisse wurden in der Transportphase nah am Gleichgewicht erzielt. Diese Phase ist besonders interessant für experimentelle Signaturen eines kritischen Endpunktes: Nahe des Endpunktes sollte die Equilibrierung besonders lange dauern. Es konnte gezeigt werden, daß diese Region sehr klein ist und daher höchstwahrscheinlich nach anderen Signaturen einer solchen Region Ausschau gehalten werden muss.

4. Konkreter Nutzen sowie Anwendungsmöglichkeiten der Ergebnisse

Die Ergebnisse für die Phasenstruktur und insbesondere die Lage des kritischen Endpunktes im CBM Energiebereich sind wichtig für die Suche nach entsprechenden Signaturen. Für eine quantitative Vorhersage werden weitere Verbesserungen der Rechnung vorgenommen und sind innerhalb dieses Projektes angestossen worden.

Die Ergebnisse zu den Fluktuationsobservablen sind kompatibel mit Gitterergebnissen bei verschwindender Dichte und den existierenden experimentellen Resultaten. Die im Rahmen dieses Projektes erarbeiteten Resultate für höhere Fluktuationsobservablen werden in Zukunft am Experiment (STAR, später CBM) überprüft.