

自己評価報告書

平成 23 年 5 月 20 日現在

機関番号：21402

研究種目：基盤(c)

研究期間：2008 ~ 2011

課題番号：20540276

研究課題名(和文) アーベリアンプラズマにおける非平衡ダイナミクスの研究

研究課題名(英文) Study of non-equilibrium dynamics in non-Abelian plasmas.

研究代表者

奈良 寧 (Nara Yasushi)

国際教養大学・国際教養学部・准教授

研究者番号：70453008

研究分野：理論核物理

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：量子色力学、高エネルギー重イオン衝突、クォークグルーオンプラズマ(QGP)

1. 研究計画の概要

ブルックヘブン国立研究所(BNL)のRelativistic Heavy Ion Collider (RHIC) 加速器やCERNのLarge Hadron Collider(LHC)での高エネルギー原子核衝突実験では、宇宙初期で存在していたと予想される高温高密度状態を作り出しその物性を研究することが目的である。本研究では、高エネルギー重イオン衝突直後に生成される高温高密度状態の非平衡物理を理解することである。具体的な手法は、SU(2)プラズマの場合のparticle-in-cell (PIC) シミュレーションあるいは、古典Yang-Mills場の時間発展の数値的な計算をする。また、カラーグラス凝縮(Color Glass Condensate, CGC)の効果を見るために、kt-factorization の枠組みを初期条件に使った流体計算や、走る結合定数の効果を取り入れたBalitsky-Kovchegov方程式(rcBK)の数値解を取り入れた計算をして、実験値と比較検討する。

2. 研究の進捗状況

(1) SU(2) ゲージ理論におけるボルツマン-ブラソフ方程式にプラズマ粒子(今の場合グルーオン)間の弾性散乱の効果を取り入れた粒子-セル(particle-in-cell, PIC) シミュレーションを行った。この枠組みは、ソフトな相互作用はプラズマ粒子とYang-Mills 古典場との相互作用で記述され、ハードな相互作用はプラズマ粒子間の散乱で記述される。非可換ゲージ場において、プラズマ粒子とゲージ場の相互作用とプラズマ粒子間の相互作用を同時に取り入れた3次元シミュレーションは世界初であり、現在RHICやLHCで行われてい

る実験結果を議論するために必要である。モデル構築にあたって、ソフトとハードの分離スケールを導入しなければならないが、分離スケールは数値計算の結果が格子サイズに依存しないことを確かめた。したがって、ソフトとハードの両方の効果を矛盾なく取り入れた輸送係数を計算できるようになった。我々は、弱く結合した非等方的なプラズマにおけるプラズマ不安定性の効果により、カラー磁場とカラー電場の強さが方向依存性を持つことを明らかにし、この効果がどのように、ジェットがプラズマ中を走っていくのかを議論した。特に、プラズマ不安定性の効果で、ジェットの運動量は横方向にくらべて、縦方向(ビーム方向)に2倍以上広がるという結果を得た。

(2) ハドロン衝突の高エネルギー極限で出現されると考えられているカラーグラス凝縮状態を考慮にいたれたモンテカルロKharzeev-Levin-Nardi (KLN)モデル(MC-KLN)は、RHICにおいては生成された粒子の数をうまく再現できるが、LHCにおいても再現できることがわかった。しかしMC-KLNモデルはフリーパラメータがあるなど、改良すべきところがある。特に、グルーオンの分布関数を仮定せずにrcBK方程式の数値解を採用できるようになった。

(3) カラーグラス凝縮状態を考慮にいたれた計算では、衝突で作られた熱い物質の空間的分布の歪み(eccentricity)が大きくなり、したがって楕円型フローも大きくなることが知られている。このように、原子核が衝突してから平衡状態に達する前の情報を正しく知ることが必要である。この非平衡状態の情報を実

験から引き出すために、今回は原子核中の核子の揺らぎの効果を考慮にいたれたCGC 計算を用いて流体模型の初期条件としてその効果を調べた。その揺らぎの効果を取り入れることによって、これまで説明されていなかった中心衝突における楕円型フローを再現できることを示し、楕円型フローのインパクトパラメータ依存性がうまく再現されることを示した。

(3) MC-KLNで初期条件を計算し、格子QCDの結果を使った状態方程式を用いた流体計算とLHCの結果を比較し、LHCエネルギーにおいても、RHICと同様に生成された系の粘性はあまり大きくないことがわかった。

3. 現在までの達成度

②おおむね順調に進展している。
初めの研究計画により、PICシミュレーションにプラズマ粒子間の散乱の効果を導入することができた。その後、カラーグラス凝縮を考慮した初期条件を用いた流体計算や、rcBK 方程式の数値解を用いた計算ができるようになったことは大きい進展である。

4. 今後の研究の推進方策

(1)モンテカルロ KLNモデル (MCKLN) は RHICにおける粒子生成のインパクトパラメータ依存性をうまく再現できることが知られている。また、このモデルはフリーパラメータを動かせば LHCにおける粒子生成もうまく再現できることを確認された。しかし、このことから直ちに 重イオン衝突で生成される粒子の個数は衝突の初期でカラーグラス凝縮からのグルーオン生成だけで理解できるという結論は導けない。重イオン反応で生成された系が熱平衡になるまでにどのくらいエントロピー生成があるのだろうか？
ボトムアップ熱平衡シナリオによれば、熱平衡に達するまでに、強結合定数の $-2/5$ に比例してグルーオンが多くなると予想されている。この効果を取り入れた計算をする予定である。

(2) MCKLNにおけるパラメータの不定性を改善するために、rcBK方程式の解を使ったモンテカルロコードを開発したが、それをもちいた詳細な実験結果との比較をすることで、グルーオン生成のメカニズムを理解する。

(3) 非アーベリアンプラズマの非平衡状態の時間発展を理解するために、古典SU(2)場の次官発展の数値解析を行い、非アーベリアンプラズマの不安定性のメカニズムを理解する。

5. 代表的な研究成果 (研究代表者、研究

分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 11 件)

- ① Adrian Dumitru, Yasushi Nara, Boern Schenke, and Michael Strikland, “jet broadening in unstable non-Abelian plasmas” Physical Review C78, 024909-1-024909-5 (2008) 査読あり
- ② Bjoern Schenke, Adrian Dumitru, Yasushi Nara and Michael Strikland, “QGP collective effects and jet transport” Journal of Physics G35, 104109-104114 (2008) 査読あり
- ③ B. Schenke, M. Strickland, A. Dumitru, Y. Nara, and C. Greiner, Physical Review C79 034903-1-034903-10 (2009) 査読あり
- ④ T. Hirano and Y. Nara, “Eccentricity fluctuation effects on elliptic flow in relativistic heavy ion collisions” Physical Review C79, 064904-1-064904-8 (2009) 査読あり
- ⑤ 奈良 寧 「原子核衝突に現れる非アーベリアンゲージ場の不安定性」日本物理学会誌 65 340-344 (2010) 査読あり

[学会発表] (計 8 件)

- ① 奈良 寧 「非アーベリアンプラズマの非平衡ダイナミクス」ワークショップ「熱場の量子論とその応用」2008年9月3日京都大学基礎物理学研究所
- ② 奈良 寧 “Initial Conditions at RHIC” International Conference on “The 2nd Asian Triangle Heavy Ion Conference ATHIC 2008 2008年10月14日, 筑波大学
- ③ 奈良 寧 「高エネルギー重イオン衝突における非平衡状態の記述の現状と問題点」原子核・ハドロン物理：横断研究会 2009年8月13日高エネルギー加速器研究機構(KEK)
- ④ 奈良 寧 ” Understanding Thermal and Collective Properties of the Quark Gluon Plasma” 第3回 日米物理学会 合同核物理分科会 2009年10月15日, Hilton Waikoloa Village on Hawaii’s Big Island
- ⑤ 奈良 寧 “CGC initial conditions at RHIC and LHC” 27th Winter workshop on nuclear dynamics, 2011/2/7 Winter park Colorado

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年月日：

国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕なし。