

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 18 日現在

機関番号：21402

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2011

課題番号：20540276

研究課題名（和文） 非アーベリアンプラズマにおける非平衡ダイナミックスの研究

研究課題名（英文） Study of Non-equilibrium dynamics in the Non-Abelian plasma

研究代表者

奈良 寧 (NARA YASUSHI)

国際教養大学・国際教養学科・准教授

研究者番号：70453008

研究成果の概要（和文）：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間の弾性散乱の効果を取り入れた粒子シミュレーションを行った。数値計算の結果がソフトとハードの分離スケール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。また、グルーオン生成における揺らぎと原子核の中の核子の位置揺らぎの効果を取り入れたモデルをもちいて、カラーガラス凝縮からの粒子生成を計算した。これらの揺らぎの効果は高次のフロー係数に非常に大きな効果を与えることを示した。

研究成果の概要（英文）：Boltzmann-Vlasov equation in the SU(2) gauge theory in which elastic scattering between plasma particles are incorporated has been performed. We showed that numerical results is independent of lattice size in our particle-cell simulation. Therefore we can extract transport coefficients consistently. We also compute gluon distributions in the initial stages of nuclear collision in which fluctuations from both gluon production itself and the position of nucleons in nucleus are included. It is found that the effects of these fluctuations have very important contributions to the higher order flow coefficients in the initial spacial distribution.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

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. 研究開始当初の背景

標準ビッグバン理論によれば、今から約 137 億年前に宇宙が始まったと考えられている。ビッグバン直後から 100 万分の一秒から数十万分の一秒の間の宇宙は高温高密度状態であり、クォークグルーオンプラズマ (QGP) 相といわれる陽子すらも分解したプラズマ状態であったと考えられている。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。これまでの RHIC 実験から、膨大な興味深い実験データが得られた。特に、高エネルギー粒子のエネルギーロスと、強い楕円形フローの発見は、高温高密度物質ができていることを強く示唆するものである。理論的には、楕円型フローの実験結果を完全流体模型で理解できることが報告され RHIC で生成された物質は、平衡状態に達している可能性があることが示された。

しかしながら、高エネルギー原子核衝突において、衝突した瞬間に生成されたパートンが熱平衡状態に達したならば、どのようなメカニズムで熱平衡状態に達するのかという課題はいまだに理解されていない。

とくに、カラーグラス凝縮状態を考慮にいった計算では、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。

### 2. 研究の目的

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し、実験結果の詳細な理解を目的とする。また、流体模型における初期条件について重要な情報を調べ、それを用いた流体計算を行い RHIC や LHC で測られた実験値との比較をし、実験結果の詳細な解析をする。

### 3. 研究の方法

(1) SU(2) プラズマの場合の particle-in-cell (PIC) シミュレーションを用いて、プラズマ粒子とゲージ場の時間発展のダイナミクスを調べる。

(2) カラーグラス凝縮 (Color Glass Condensate, CGC) の効果を見るために、CGC から生成されるグルーオン数を計算する。具体的には、走る結合定数の効果を取り入れた running coupling Balitsky Kovchegov 方程式 (rcBK) の数値解を取り入れた計算をして、反応の初期で生成されたグルーオン分布を計算する。また、これを初期条件とした流体計算を行い、実験と比較する。

### 4. 研究成果

(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ったモンテカルロ 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。

(3) 原子核中の核子の揺らぎの効果を検討にいった 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。

(4) グルーオンの分布関数を仮定せずに rcBK 方程式の数値解を用いて グルーオン分布を計算した。また、高次のフロー係数は、グルーオン数の揺らぎの効果が重要であることを始めて明らかにした。

(5) MCKLN を用いた初期条件と、格子 QCD の結果を使った状態方程式を用いた流体計算を行い、LHC の実験結果と比較し、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極めて小さいことが確認された。

## 5. 主な発表論文等

(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 15 件)

- 1 Adrian Dumitru, Yasushi Nara, Bjoern Schenke, and Michael Strickland, "Jet broadening in unstable non-Abelian plasmas, Physical Review Letters 102, 024909 (2009).
- 2 Bjoern Schenk, Adrian Dumitru, Yasushi Nara, Michael Strickland, "QGP collective effects and jet transport", Journal of Physics G: Nuclear Physics Letters 35, 104109 (2008).
- 3 Bjoern Schenke, Michael Strickland, Adrian Dumitru, Yasushi Nara, and Carsten Greiner, "Transverse momentum diffusion and jet energy loss in non-abelian plasmas", Physical Review Letters 103, 034903 (2009).
- 4 Tetsufumi Hirano and Yasushi Nara, "Eccentricity fluctuation effects on elliptic flow in relativistic heavy ion collisions," Physical Review Letters 103, 064904 (2009)
- 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プラズマ不安定性", 日本物理学会誌, 査読有, 第 65 巻 5 号 2010 年 340
- 6 Javier L. Albacete, Adrian Dumitru and Yasushi Nara, "CGC initial conditions at RHIC and LHC", Journal of Physics Conference Series, 査読有, 316, 012011 (2011)
- 7 Tetsufumi Hirano, Pasi Huovinen

and Yasushi Nara, "Elliptic flow in U+U collisions at sNN = 200 GeV and in Pb+Pb collisions at sNN = 2.76 TeV: Prediction from a hybrid approach," Physical Review Letters 103, 021902 (2011).

- 8 Tetsufumi Hirano, Pasi Huovinen and Yasushi Nara, "Elliptic flow in Pb+Pb collisions at sNN = 2.76 TeV: hybrid model assessment of the first data," Physical Review Letters 103, 011901 (2011)
- 9 Adrian Dumitru and Yasushi Nara, "KNO scaling of fluctuations in pp and pA, and eccentricities in heavy-ion collisions", Physical Review Letters 105, 034907 (2012)

[学会発表] (計 15 件)

- 1 奈良寧, "Vlasov Simulation of Gluons", International conference "New Frontiers in QCD 2008, Fundamental Problems in Hot and/or Dense Matter" 2008/3/17, 京都大学基礎物理学研究所
- 2 奈良寧, "Eccentricity fluctuations in CGC", Molecule Workshop "Entropy production before QGP" 2008/8/15, 京都大学基礎物理学研究所
- 3 奈良寧, "非アーベリアンプラズマの非平衡ダイナミクス", Workshop "熱場の量子論とその応用", 2008/9/3, 京都大学基礎物理学研究所
- 4 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", Workshop "原子核・ハドロン物理: 横断研究会", 2009/8/11, 高エネルギー加速器研究機構 (KEK)
- 5 奈良寧, "Understanding Thermal and Collective Properties of the Quark Gluon Plasma", 第 3 回日米物理学会, 2009/10/15, Hilton Waikoloa, Hawaii Big Island
- 6 奈良寧, "Fluctuating Valence Charges and the CGC", Workshop "Initial-State Fluctuations and Final State Particle Correlations", 2011/2/2, Brookhaven National Laboratory
- 7 奈良寧, "CGC initial conditions at RHIC and LHC" 27th Winter

- workshop on nuclear Dyanmics,  
2011/2/6-13, Winter Park Colorado.
- 8 奈良 寧, ” カラーグラス凝縮におけるグルーオン生成と流体計算の初期条件”, 日本物理学会 2011 年秋大会, 2011/9/16, 弘前大学
  - 9 奈良 寧, ” Harmonic moments of the gluon density distribution in AA collisions”, XLI International Symposium on Multiparticle Dynamics (ISMD2011) 2011/9/30,

- Miyajima in Hiroshima
- 10 奈良 寧, 「高エネルギーで原子核衝突で生成されるプラズマ」 Symposium on Shock Waves in JAPAN, 2012/5/7-9 at the university of Tokyo, Kashiwa campus.
  - 11 奈良 寧, ” カラーグラス凝縮におけるグルーオン生成数の揺らぎの効果”, 日本物理学会 2012 年次大会, 2012/3/24, 関西学院大学

〔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〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

奈良 寧 (NARA YASUSHI )

国際教養大学・国際教養学科・准教授

研究者番号： 7045300

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：