

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25年 5月31日現在

機関番号：32621

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22740151

研究課題名（和文）超高エネルギー重イオン衝突反応におけるクォークグルーオンプラズマのダイナミクス

研究課題名（英文）Dynamics of the quark gluon plasma in high-energy heavy ion collisions

研究代表者

平野 哲文（HIRANO TETSUFUMI）

上智大学・理工学部・准教授

研究者番号：40318803

研究成果の概要（和文）：高エネルギー重イオン衝突反応で生成されたクォークグルーオンプラズマを統合的ダイナミカルモデルで記述した。このモデルは重イオン衝突反応の3つのステージに対応した3つのモデルを統合し、事象毎のシミュレーションを可能にした。また、終状態の粒子分布の解析も実験グループと同様に行えるようになった。更にマッハコーンのようなQGPの新奇なダイナミクスに注目して解析を行い、最近観測されたジェットの構造を理解する上で重要であることが分かった。

研究成果の概要（英文）：Dynamics of the quark gluon plasma (QGP) created in high energy heavy ion collisions is described by developing an integrated dynamical model which unifies three models corresponding to three sequential stages of heavy ion reactions. The model enables us to simulate the reactions on an event-by-event basis and to analyze final particle distribution as done by experimental group. We also investigated novel phenomenon of the QGP dynamics such as Mach cone structure and found it important to interpret the recent observation of the jet structure at Large Hadron Collider.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：数物系科学

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：相対論的流体力学・クォークグルーオンプラズマ・相対論的重イオン衝突反応

1. 研究開始当初の背景

初期宇宙を満たしていた極限状態にある物質「クォークグルーオンプラズマ(QGP)」を実験的に生成すべく、ブルックヘブン米国立研究所(BNL)の相対論的重イオン衝突型加速器RHICで、重イオン衝突実験が行われてきた。この実験では、重イオンの持つ運動エネルギーを、衝突反応を通して熱エネルギー

ーに転化することにより、数兆度に達するQGPを生成することができる。その中でQGPの完全流体的振る舞いや、ジェットの大きなエネルギー損失といった重要な発見がなされた。

一方、研究開始時点では、まだヨーロッパ原子核共同研究所(CERN)の大型ハドロン衝突型加速器LHCでは重イオン衝突反応実験の

結果は出ておらず、よりエネルギーの大きな衝突反応で作られた QGP がどのように振る舞うのか、更に、QGP のより詳しい物性をどう引き出すかが中心課題の一つであった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、LHC で生成された QGP の流体力学的振る舞いを、相対論的流体力学に基づく統合的ダイナミカルモデルを用いて記述し、更に、LHC ならではの新奇な QGP の時空発展を探るものである。

3. 研究の方法

本研究で用いる統合的ダイナミカルモデル(Integrated Dynamical Model)は、以下に述べるように時系列に従って主に3つのモデルを統合したものである。

光速近くまで加速された重イオンはもはや核子の集合体としての原子核というよりはグルーオンの集合体「カラーグラス凝縮」とみなすことができる。このような描像の基で、重イオン同士の衝突をカラーグラス凝縮同士の衝突に見立て、モンテカルロ法に従って事象毎に記述したモデルは、モンテカルローカルゼーエフ・レビン・ナルディモデル(MC-KLN)と呼ばれる。これに対し、従来の核子同士の衝突に基づくグラウバーモデルにモンテカルロ法を適用したモンテカルロ・グラウバーモデル(MC-Glauber)も用いられており、現時点でどちらの描像がより現実的かは実験的に峻別されていない。これらの二つのモデルを採用し、それぞれこの後に続く QGP の流体力学的発展の初期条件を計算する。

ひとたび、局所的に熱化学平衡が達成されたと仮定すると、その後の QGP の時空発展は相対論的流体力学に基づき記述することができる。相対論的流体力学は、局所熱平衡の仮定の基で、系のエネルギーと運動量の保存則を記述する普遍的な枠組みである。物質固有の性質は状態方程式を通して取り込むことができ、本研究では第一原理計算である格子 QCD の結果を用いる。

衝突の中間状態として、熱化学平衡に達した QGP が生成されたとしても、その後の膨張・冷却に伴い、クォークやグルーオンが再びハドロンの中に閉じ込められ、更に、希薄化に伴いハドロン間の相互作用が切れて直線的な軌跡を持つハドロンが測定器に検出される。この最後のステージは、ハドロンに対する相対論的運動学を実装したイベントジェネレータを用いて記述する。

従来の流体モデルでは、終状態の粒子の運動量分布は連続的な関数として得ることができた。一方、本研究では、事象毎に個々の粒子の運動量のサンプルを得ることができるため、実験グループが物理量を算出する解析と同じ手法を用いることができる利点がある。

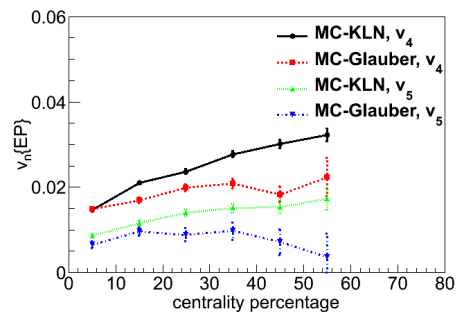
ある。

LHC では、熱化学平衡に寄与する比較的低下運動量のクォークやグルーオンに加え、平衡に達した QGP を突き抜けるほどの大きなエネルギーを持ったパートン(クォークやグルーオンの粒子描像)が作られる。このパートンは QGP 中を通過する際にエネルギーを損失すると考えられている。本研究では、上記の統合的モデルに加え、LHC ならではの新奇な現象を探るべく、流体的な振る舞いをする QGP の中を通過する高エネルギーパートンをモデル化した。このエネルギー損失のために、エネルギーや運動量の湧き出しのある相対論的流体方程式を数値的に解く。

4. 研究成果

統合的ダイナミカルモデルを用いて、BNL の RHIC 衝突エネルギーにおける金同士の衝突と CERN の LHC 衝突エネルギーにおける鉛同士の衝突のシミュレーションを行った。それぞれ、10 万イベントを生成し、実験の解析と同様、イベントの分類や系の時空発展を特徴付ける方位角方向の運動量分布の n 次のフーリエ級数 v_n を計算した。従来、それほど注目されてこなかったが、実験の解析と同じ手法を採用することは、高精度で実験結果と理論の結果を比較する上で極めて重要であることが分かった。このような解析は、本研究のような統合モデルを用いることで初めて可能になる。

グラウバーモデルを初期ステージに用いた計算は実験結果をよく再現した。一方、カラーグラス凝縮に基づく初期条件を用いた場合、2 次のフーリエ級数 v_2 が実験結果を大幅に上回ることが分かった。ただし、現時点では QGP の流体力学的ステージにおいて、粘性の影響を考慮していない。このことはグラウバーモデルを初期ステージに用いた場合、実際あるべき QGP の粘性の入る余地がないことを意味している。



図：4次と5次のフーリエ級数の中心度依存性(論文③より転載)

図は MC-KLN と MC-Glauber モデルを用いた際の4次と5次のフーリエ級数を中心度(衝突径数の目安)の違いで見たものである。図から分かるように、これらの物理量を観測す

ることによって、モデルの違いを峻別し、現時点ではあまりよく理解されていない重イオン衝突の初期状態を深めることが可能になることを示唆している。

一様なQGP中を高エネルギーパートンが通過し、エネルギーと運動量を供給している場合、QGP流体中にはマッハコーンと呼ばれる衝撃波の円錐状の構造が現れることが確認できた。この現象は、QGP中の音速は光速の60%程度であるのに対し、質量がほとんどないパートンは光速近くで運動するためである。この結果自体はすでに先行研究でも得られていたことだが、本研究では更に放射状に膨張するQGP中を高エネルギーパートンが通過するシミュレーションも行った。高エネルギー重イオン衝突反応で生成されるQGPは決して静的ではなく、四方八方に膨張するため、本研究の設定はより現実を則したものである。放射状に膨張するQGPが円錐構造を歪め、結果として衝撃波による低運動量粒子の輸送がパートンの進む軸から見て大角度に及ぶことが分かった。このことは最近LHCのCMS実験グループで観測された現象に対して新しい解釈を与える。

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17件)

- ① Y. Tachibana, T. Hirano, Emission of Low Momentum Particles at Large Angles from Jet, Nuclear Physics, 査読有, 904-905, 2013, 1023c-1026c
DOI:10.1016/j.nuclphysa.2013.02.189
- ② T. Hirano, Heavy-Ion Physics in a Nutshell, EPJ Web of Conferences, 査読無, 49, 2013, 02001-p.1--02001-p.6
DOI:10.1051/epjconf/20134902001
- ③ T. Hirano, P. Huovinen, K. Murase, Y. Nara, Integrated dynamical approach to relativistic heavy ion collisions, Progress in Particle and Nuclear Physics, 査読有, 70, 2013, 108-158
DOI:10.1016/j.pnnp.2013.02.002
- ④ T. Hirano, Y. Nara, Dynamical modeling of high energy heavy ion collisions, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 査読有, 01A203, 2012, 1-34
DOI:10.1093/ptep/pts007
- ⑤ T. Hirano, Dynamics of Relativistic Heavy Ion Collisions and the Quark Gluon Plasma, Progress of Theoretical Physics Supplement, 査読有, 195, 2012, 1-18
DOI:10.1143/PTPS.195.1
- ⑥ T. Hirano, Hydrodynamic approach to relativistic heavy ion collisions, Acta

Physica Polonica, 査読無, B42, 2011, 2811-2822

DOI:10.5506/APhysPolB.42.2811

⑦ H. Zhang, X. -F. Chen, T. Hirano, E. Wang, X. -N. Wang, Suppression of high pT hadrons in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s} = 2.76$ TeV, Journal of Physics, 査読有, G38, 2011, 124115-1--124115-5

DOI:10.1088/0954-3899/38/12/124115

⑧ C. Shen, S. A. Bass, T. Hirano, P. Huovinen, Z. Qiu, H. Song, U. Heinz, The QGP shear viscosity: Elusive goal or just around the corner?, Journal of Physics, 査読有, G38, 2011, 124115-1--124115-5

DOI:10.1088/0954-3899/38/12/124115

⑨ Y. Akamatsu, H. Hamagaki, T. Hatsuda, T. Hirano, Can transport peak explain the low-mass enhancement of dileptons at RHIC?, Journal of Physics, 査読有, G38, 2011, 124184-1--124184-5

DOI:10.1088/0954-3899/38/12/124184

⑩ A. Monnai, T. Hirano, Viscous Hydrodynamic Evolution with Non-Boost Invariant Flow for Color Glass Condensate, Journal of Physics, 査読有, G38, 2011, 124168-1--124168-4

DOI:10.1088/0954-3899/38/12/124168

⑪ X. -F. Chen, T. Hirano, E. Wang, X. -N. Wang, H. Zhang, Suppression of high pT hadrons in Pb+Pb collisions at LHC, Physical Review, 査読有, C84, 2011, 034902-1--034902-12

DOI:10.1103/PhysRevC.84.034902

⑫ A. Monnai, T. Hirano, Longitudinal Viscous Hydrodynamic Evolution for the Shattered Colour Glass Condensate, Longitudinal Viscous Hydrodynamic Evolution for the Shattered Colour Glass Condensate, 査読有, B703, 2011, 583-587

DOI:10.1016/j.physletb.2011.08.049

⑬ H. Song, S. A. Bass, Y. Heinz, T. Hirano, C. Shen Hadron spectra and elliptic flow for 200 A GeV Au+Au collisions from viscous hydrodynamics coupled to a Boltzmann cascade, Physical Review, 査読有, C83, 2011, 054901-1--054901-12

DOI:10.1103/PhysRevC.83.054910

⑭ T. Hirano, P. Huovinen, Y. Nara, Elliptic flow in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV: hybrid model assessment of the first data, Physical Review, 査読有, C84, 2011, 011901-1--011901-5

DOI:10.1103/PhysRevC.84.011901

⑮ H. Song, S. A. Bass, U. Heinz, T. Hirano, C. Shen, 200 A GeV Au+Au collisions serve a nearly perfect quark-gluon liquid, Physical Review Letters, 査読有, 106, 2011, 192301-1--192301-4

DOI:10.1103/PhysRevLett.106.192301

⑩ T.Hirano, P. Huovinen, Y. Nara, Elliptic flow in U+U collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV and in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV: Prediction from a hybrid approach, Physical Review, 査読有, C83, 2011, 021902-1--021902-5

DOI:10.1103/PhysRevC.83.021902

⑪ A. Monnai, T.Hirano, Relativistic Dissipative Hydrodynamic Equations at the Second Order for Multi-Component Systems with Multiple Conserved Currents, Nuclear Physics, 査読有, A 847, 2011, 283-314

DOI:10.1016/j.nuclphysa.2010.08.002

[学会発表] (計16件)

① T.Hirano, Relativistic Hydrodynamics, The 2nd DST-SERC school on Nuclear Physics, Nuclear Matter under Extreme Conditions, 2013年1月8日-12日, Variable Cyclotron Energy Centre, インド

② T.Hirano, Hydrodynamic Approach to Relativistic Heavy Ion Collisions, The 4th Asian Triangle Heavy Ion Conference, 2012年11月14日, Haeundae Grand Hotel, 韓国

③ T.Hirano, Heavy Ion Physics in a Nutshell, Hadron Collider Physics Symposium 2012, 2012年11月12日, 京都大学

④ T.Hirano, Hydrodynamic Event Generator at LHC and RHIC, International School of Nuclear Physics, the 34th course, Probing the Extremes of Matter with Heavy Ions, 2012年9月18日, Ettore Majorana Foundation and Center for Scientific Culture, イタリア

⑤ 平野哲文, クォーク・グルーオン・プラズマと相対論的流体力学, 平成23年度衝撃波シンポジウム, 2012年3月9日, 東京大学柏キャンパス新領域基盤棟

⑥ 平野哲文, 相対論的重イオン衝突実験とクォーク・グルーオン・プラズマ, 信州冬の学校, 2012年3月4日, 志賀スイスインホテル

⑦ T.Hirano, Recent development of hydro model after "Perfect Liquid", Heavy Ion Meeting, 2011年12月10日, Yonsei University, 韓国

⑧ T.Hirano, The Quark Gluon Plasma and Heavy Ion Collisions, Heavy Ion Meeting, 2011年12月9日, Asia Pacific Center of Theoretical Physics, 韓国

⑨ T.Hirano, Recent development of hydrodynamic simulations in relativistic heavy ion collisions, The 11th Zimanyi Winter School on Heavy Ion Physics, 2011年11月30日, Eötvös University, ハンガ

リー

⑩ T.Hirano, Dynamics of relativistic heavy ion collisions and the quark gluon plasma, Nonequilibrium Dynamics in Astrophysics and Material Science, 2011年10月31日, 京都大学基礎物理学研究所

⑪ 平野哲文, 相対論的流体モデルに基づく楕円型フローの解析, 日本物理学会, 2011年9月17日, 弘前大学

⑫ T.Hirano, Hydrodynamic Approach to Relativistic Heavy Ion Collisions, the 51st Cracow School of Theoretical Physics, 2011年6月12日, 13日, ザコパネ, ポーランド

⑬ T.Hirano, Hydrodynamic Modeling: A Hybrid Approach, The Berkeley School, 2010年6月9日, ローレンスバークレー米国立研究所, アメリカ

⑭ T.Hirano, Current status of QGP ideal hydro + hadronic cascade approach, Quantifying the Properties of Hot QCD Matter, 2010年6月14日, ワシントン大学理論核物理学研究所, アメリカ

⑮ T.Hirano, Hydrodynamic evolution and jet propagation in dense matter, Symposium on Jet and Electromagnetic Tomography of Dense Matter, 2010年6月18日, ローレンスバークレー米国立研究所, アメリカ

⑯ T.Hirano, Current status of QGP ideal hydro + hadronic cascade model, The sixth Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy, The sixth Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy, 2010年9月17日, ボゴリューボフ理論物理学研究所, ウクライナ

6. 研究組織

研究代表者

平野 哲文 (HIRANO TETUSUFMI)

上智大学・理工学部・准教授

研究者番号: 40318803