

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19740130
 研究課題名（和文）相対論的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非平衡過程
 研究課題名（英文）Non-equilibrium processes of the quark gluon plasma in relativistic heavy ion collisions
 研究代表者
 平野 哲文（HIRANO TETSUFUMI）
 東京大学・大学院理学系研究科・講師
 研究者番号：40318803

研究成果の概要（和文）：本研究は、複雑で多様な過程を含む相対論的重イオン衝突反応のうち、生成された極限状態の物質「クォークグルーオンプラズマ（QGP）」の非平衡現象に注目し、衝突反応ダイナミクスを記述するためのモデルの構築、及び、QGPの輸送的性質を調べることを目的としている。研究成果は大別して、（1）衝突直後の物質の揺らぎがダイナミクスに与える影響、（2）QGPの粘性流体力学、（3）QGPがハドロン化した後の散逸の影響の3つに分類される。

研究成果の概要（英文）：In this study, non-equilibrium phenomena of the quark gluon plasma (QGP) in relativistic heavy ion collisions, which involve various and complicated processes, are investigated toward development of a dynamical model and understanding of transport properties of the QGP. In particular, (1) effects of fluctuation of produced matter in the initial stage on the dynamics, (2) relativistic viscous hydrodynamics of the QGP, and (3) effects of dissipation of hadrons on final observables are studied in detail.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	700,000	0	700,000
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	660,000	3,560,000

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：理論核物理、重イオン衝突、クォーク・グルーオン・プラズマ、相対論的流体力学

1. 研究開始当初の背景

ビッグバン直後、数マイクロ秒後に我々の宇宙を満たしていたと考えられている超高温極限物質「クォークグルーオンプラズマ（QGP）」の生成、及び、物理的性質の探求の

ために、ブルックヘブン米国立研究所の Relativistic Heavy Ion Collider で高エネルギー重イオン衝突実験が行われている。QGP 物理の目的は、初期宇宙の再現だけに留まらず、「地球上で生成される最も熱い物質

(約 2 兆ケルビン以上)、「クォークやグルーオンのカラーの閉じ込めが破れた物質」、「動的に破れた量子色力学のカイラル対称性が回復した物質」といったフレーズで表されるように、様々な側面を持っている。

2005 年にブルックヘブン米国立研究所の研究者らは完全流体的に振舞う QGP の発見を報告した。この背景には、本研究代表者らのグループを含めたいくつかのグループが完全流体の仮定のもとで、相対論的流体方程式を解き、QGP の流体力学的振る舞いを定量的に再現したことによる。しかしながら、完全流体は粘性の影響を無視した近似的な描像に過ぎず、QGP の粘性自身がどの程度小さいのかという定量的な問いに答えが得られたわけではなかった。そのため、多くの研究らは次のステップとして、QGP の非平衡過程、特に、粘性を考慮した相対論的流体力学に基づく解析を目指すようになった。

2. 研究の目的

本研究は、重イオン衝突反応によって生成される QGP の非平衡過程に注目し、複雑な重イオン衝突反応ダイナミクスのモデル化、及び、QGP の輸送的性質の導出を目指している。

QGP の輸送的性質を調べるためには、まずは、重イオン衝突反応のダイナミクスを理解することが必要となる。高エネルギー重イオン衝突は大きく分けて 3 つのステージがある。光速近くにまで加速された重イオン同士の衝突、衝突によって作られた超高温物質 QGP の生成と流体力学的膨張、希薄なハドロンガスとしての膨張というように、ステージごとに描像が異なる。それぞれのステージに適したモデルを採用し、ダイナミクスを記述する一つのモデルとしてうまく統合していくことが、重イオン衝突反応の物理的解釈をするのに必要となる。

(1) 完全流体的振る舞いをする QGP の発見の背景には、楕円型フローと呼ばれる QGP 膨張の非等方的なパターンの物理的解釈があった。重イオン同士の非中心衝突では、二つの球形の重イオンがオーバーラップしたアーモンド状の物質が生成される。この幾何学的形状の所為で、短軸方向と長軸方向の圧力勾配に差が生まれ、膨張が非等方的となる。この興味深い現象を定量的に記述するためには、衝突初期にどの程度空間的に非等方な物質が作られたかを理解する必要がある。さらに、重イオンは平均的には球形をしているものの、核子の数は有限であり、その位置は事象ごとに揺らいでいる。したがって、衝突直後の初期状態を定量的に理解し、揺らぎの効果も含める必要がある。本研究では、グラウバーモデルとカラーグラス凝縮に基づくモデルを用いて、後の流体力学的時空発展の初期条件ともなるべき状態を調べる。

(2) 作られた QGP 自身の主な非平衡過程は、ずれ粘性による散逸である。一方、量子色力学のスケール不変性が大きく破れる領域（特に QGP がハドロンに転化する領域）では、体粘性の影響も重要になる。これらの効果を見積もるためには、粘性流体方程式を解く必要がある。しかしながら、素朴な相対論的拡張をした粘性流体方程式は、しばしば因果律を破ることがある。このことは、まずは粘性流体力学の相対論的定式化が必要であることを意味している。その上で、数値計算を用いて QGP の時空発展を記述し、粘性が楕円型フローに与える影響を調べ、QGP の輸送係数に制限を与えることを目的とする。

(3) ハドロンガスは、最も軽いパイ中間子を主成分として持つが、他にも多くの成分を含んでおり、それらの間の相互作用は粒子ごとに異なる。中には、 ϕ 中間子のように、ほとんど他のハドロンと相互作用しないものも含まれており、このような系の記述は流体力学的よりはむしろ運動学的記述をするのがふさわしい。この重イオン衝突反応の最後のステージとしてのハドロンガスを、ボルツマン方程式を用いて記述し、ハドロンの散逸の効果がどのように観測量に現れるかについても調べる。

3. 研究の方法

(1) 衝突による QGP 物質の生成過程の記述は一般には難しく、本研究では衝突に関与した核子数に基づくグラウバーモデル、量子色力学の高エネルギー極限におけるカラーグラス凝縮の描像に基づくモデルを採用した。特に、事象毎の有限核子数に起因する揺らぎの効果を見積もるため、モンテカルロ法に拡張されたこれらのモデル、すなわちモンテカルログラウバーモデルとモンテカルロカラーグラス凝縮モデルを用い、衝突事象毎の揺らぎが初期状態の非等方的形状に与える影響を定量的に評価した。

(2) 流体力学的記述から観測量に結びつけるために、ある適当な超局面を通して粒子描像に乗り移る必要がある。粘性が観測量に与える影響を調べるために、まずは、完全流体を仮定した場合の表式に対して、粘性の補正がどのように現れるかを調べた。一粒子分布関数に対する補正が運動量の 2 次関数で表されると仮定し、粘性量と分布の補正を結びつける一般的な表式を解析的に求めた。さらに、この表式をハドロンガスに適用し、適当な粘性のモデルを用いて、終状態の粒子スペクトルに現れる影響を定量的に評価した。

(3) QGP がハドロン化したあとのハドロン間の相互作用を記述するために、QGP の時空発展を流体モデルによる数値シミュレーション、ハドロンガスをハドロンカスケードモデルによる数値シミュレーションを用いた。

4. 研究成果

(1) 衝突する原子核の核子密度は一回の事象では、連続的に滑らかな分布を持っているというよりはむしろ、有限の核子数のため空間的にこぼこしている。そのため、衝突直後のQGPのエントロピー密度分布もこぼこしており、理論的に想定している散乱平面と物質自身の主軸から決定される見かけの散乱平面にはずれが生じる。すなわち、散乱平面が仮に決定されていたとしても、事象毎には見かけの散乱平面は、理論上の散乱平面の回りに揺らいでいる。実験的には、この見かけの散乱平面しか測定できないため、この揺らぎの効果は、散乱平面に関する粒子生成の非等方性を定量的に表す「楕円型フロー」の解釈に大きな影響を与える。本研究では、揺らぎの効果がある場合と無い場合で物質の非等方度合い「離心率(eccentricity)」を計算した。球形の原子核が完全に正面衝突(衝突係数がゼロ)するような理想的な場合、離心率がゼロとなる。しかし、揺らぎの影響で離心率が有限となり、結果として楕円型フローを増大させる効果があることが分かった。重イオン衝突実験では金同士の衝突の他に銅同士の衝突も行われているが、金イオンに比べて核子数の少ない銅イオンの衝突の場合、揺らぎの影響が大きく、離心率が特に大きく増大することが分かった。

このモデルを用いて、流体数値シミュレーションの初期条件を計算し、初期状態の分布の揺らぎが楕円型フローに与える影響を調べた。楕円型フローは、生成物質の空間的歪みに起因するため、離心率が大きいほど楕円型フローも大きくなる。金イオン同士の衝突の場合、揺らぎの効果はそれほど大きくなく、楕円型フローがわずかに増加するだけであった。一方、銅イオン同士の衝突の場合、核子数の少なさから予想されるように揺らぎの効果が大きく、楕円型フローパラメータを大きく増大させることが分かった。初期のエントロピー生成について、グラウパーモデルを用いた場合、楕円型フローの実験結果を概ね再現するか、多少下回ることが分かった。一方、カラーグラス凝縮描像では、グラウパーモデルより離心率が大きく、実験結果を上回ることが分かった。本研究ではまだ状態方程式に簡単なモデルを用いていることとQGPの粘性の影響が考慮されていないため、これらのずれは今後の研究課題である。

(2) 粘性の影響を取り入れた相対論的流体力学を構築したとしても、最終的に実験と比較するためには、流体方程式を解くことによって得られた熱力学量の連続分布から粒子描像に乗り移る必要がある。この点に着目し、Gradのモーメント法の枠内で、完全流体に基づく粒子のボーズ分布、フェルミ分布に対す

る粘性による補正を求めた。特に、従来無視されてきた体粘性の影響に着目した。ずれ粘性と違い、体粘性は系の対称性によって厳密にゼロになる場合がある。一方で、QGPがハドロンに転化する領域では体粘性係数が増大するという報告があり、体粘性の影響を取り入れることは必須である。粘性の補正が2次関数で与えられるという仮定の下で、ミクロな分布関数とマクロな流体力学変数(熱力学量、及び、粘性流)を結びつける関係式、及び、エントロピー増大と安定性との関係式のみを使い、補正の一般的な表式を導出した。

次に、この表式をハドロンガスモデルに適用し、楕円型フローに与える影響を定量的に評価した。物理量に与える粘性の影響は、ダイナミクス自身、及び、分布関数の補正を通して計算されるが、本研究ではまず後者に注目し、前者については完全流体の解を用いた。粘性の影響が少なくともどの程度見ることができるか、という点に注目し、ずれ粘性係数についてはAdS/CFTから推定されている最小値を、体粘性に関しては一般的に用いられる式を用いた。一般に粘性は楕円型フローを抑制する効果があるが、体粘性の場合、非自明な方法でその横運動量依存性を増大することが分かった。楕円型フローの横運動量依存性は、横運動量とともに一次関数的に増大する。その傾きは楕円型フローと平均横運動量の比で近似的に決まるが、体粘性は平均横運動量を抑制する効果が大きいため、結果として傾きが増大する効果が判明した。

(3) 楕円型フローに対するハドロンガスの散逸の影響、特に、ハドロンガス中でほとんど散乱をしない ϕ 中間子の物理量を調べた。

完全流体QGP発見の背景には、完全流体を用いた楕円型フローパラメータの横運動量依存性、及び、ハドロン質量の依存性の再現が挙げられる。しかし、この再現は、必ずしもQGP自身の完全流体性に起因するわけではないことを示した。ハドロン相にボルツマン方程式に基づくハドロンカスケードモデルを採用した場合、ハドロン間の相互作用の影響を調べることができる。QGPがハドロン化した直後は、楕円型フローの質量依存性はほとんど見られなかった。その後、ハドロン間の相互作用を通して、初めて楕円型フローの質量依存性が作られることが分かった。したがって、楕円型フローの理解には、QGP相の完全流体的膨張によって生成された非等方性と、ハドロン相互作用を通じた再分配の効果が重要であることが判明した。

そこで、ハドロン間の相互作用をほとんどしないと考えられている ϕ 中間子に着目した。 ϕ 中間子はsクォークとその反クォークから成り立っており、 π 中間子と散乱をしても共鳴状態を作りにくい。したがって、ハドロン媒質中での散乱断面積は小さくなる。 ϕ

中間子の楕円型フローを見ると、ハドロンガス中でほとんど変化しないことがわかった。結果として、ハドロン質量依存性のパターンから外れる特殊な粒子であることが分かった。実験的には、まだ確認されていないものの、この質量順パターンの破れが、ハドロン間相互作用の重要性、引いてはハドロン散逸過程を示す証拠となりえる。

(4) 本研究課題の副産物として、流体数値シミュレーションの他の観測量への応用を行った。

① 生成物質が熱平衡に達した場合、光子の熱輻射をする。そのスペクトルから QGP 自身の直接温度測定をする可能性がある。一方、熱輻射以外にも光子の源がいくつか考えられている。本研究では、相対論的重イオン衝突反応で生成される光子源を詳細に分類し、実験と比較するスペクトルを計算した。特に、最も興味のある熱輻射が、横運動量にして 3 GeV/c 辺りで主要な寄与を示すことが分かった。更に、流体力学的に振舞う光子源からの熱輻射を考え、光子スペクトルから楕円型フローパラメータを導出した。光子の楕円型フローパラメータは、ハドロン楕円型フローパラメータと異なり、非自明な横運動量依存性を示した。特に高横運動量領域は、最も温度の高い中心部からの輻射の寄与が大きく、流体力学的膨張の影響が小さいことが分かった。

② J/Ψ 中間子のように重いクォークとその反クォークでできたハドロンは、QGP の生成によって束縛する力が遮蔽を受け、抑制されることが指摘されている。本研究では、J/Ψ 中間子が QGP 流体中を横切る際に、この効果によって解離するモデル化を行い、実験結果との比較を行った。J/Ψ 中間子の生存確率の中心度(重イオン衝突の当たり具合)依存性で見られる折れ曲がったパターンは、J/Ψ 中間子が解離すると考えられるある温度以上の QGP 領域の時空体積に起因していることが分かった。

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 17 件)

① A. Monnai, T. Hirano, “Effects of Bulk Viscosity at Freezeout”, *Physical Review C80*, 054906 (2009), 査読有.

② F. Liu, T. Hirano, K. Werner, Y. Zhu, “Elliptic flow of thermal photons in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV”, *Physical Review C80*, 034905 (2009), 査読有.

③ T. Hirano, Y. Nara, “Eccentricity fluctuation effects on elliptic flow in

relativistic heavy ion collisions”, *Physical Review C79*, 064904 (2009), 査読有.

④ F. Liu, T. Hirano, K. Werner, Y. Zhu, “Centrality-dependent Direct Photon pt Spectra in Au+Au Collisions at the BNL Relativistic Heavy Ion Collider Energy”, *Physical Review C79*, 014905 (2009), 査読有.

⑤ T. Hirano, U. Heinz, D. Kharzeev, R. Lacey, Y. Nara, “Mass ordering of differential elliptic flow and its violation for phi mesons”, *Physical Review C77*, 044909 (2008), 査読有.

⑥ T. Gunji, H. Hamagaki, T. Hatsuda, T. Hirano, “Onset of J/psi melting in a quark-gluon fluid at RHIC”, *Physical Review C76*, 051901 (2007), 査読有.

[学会発表] (計 29 件)

① 平野哲文, 「相対論的流体力学と高エネルギー重イオン衝突反応」, 日本物理学会第 65 回年次大会, 2010 年 3 月 20 日, 岡山大学.

② T. Hirano, “Theoretical Perspectives of physics on relativistic heavy ion collisions”, Third Joint Meeting of the Nuclear Division of APS and JPS, 2009 年 10 月 17 日, Waikoloa, USA.

③ T. Hirano, “Dynamical Modeling of nucleus-nucleus collisions at high energies”, The 10th International Conference of Nucleus-Nucleus Collisions, 2009 年 8 月 1 日, Beijing, China.

④ T. Hirano, “Eccentricity fluctuation of initial conditions in hydrodynamics”, Quark Matter 2009, 2009 年 3 月 31 日, Knoxville, USA.

⑤ T. Hirano, “Conference Summary”, Relativistic Aspects of Nuclear Physics, 2008 年 11 月 6 日, Rio de Janeiro, Brazil.

⑥ T. Hirano, “Hydrodynamic Analysis of Heavy Ion Collisions at RHIC”, Strangeness in Quark Matter 2008, 2008 年 10 月 9 日, Beijing, China.

⑦ T. Hirano, “Dynamical Modeling of Relativistic Heavy Ion Collisions”, International Nuclear Physics Conference 2007, 2007 年 6 月 5 日, 東京国際フォーラム.

[図書] (計 1 件)

① T. Hirano, N. van der Kolk, A. Bilandzic, Chapter 4, “Hydrodynamics and Flow”, *Lecture Notes in Physics 785*, 139 (2009), Springer Verlag.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平野 哲文 (HIRANO TETSUFUMI)

東京大学・大学院理学系研究科・講師

研究者番号：40318803

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし