

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：32621

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400269

研究課題名(和文)揺らぎの入った相対論的流体力学と重イオン衝突反応への応用

研究課題名(英文)Relativistic fluctuating hydrodynamics and its application to heavy ion collisions

研究代表者

平野 哲文 (HIRANO, Tetsufumi)

上智大学・理工学部・教授

研究者番号：40318803

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：高エネルギー原子核衝突反応で生成するクォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)に対する流体揺らぎに注目して研究を行った。初めに相対論的揺動流体力学を定式化し、観測可能量に対する影響を調べた。流体揺らぎは異なるラピディティ領域間の事象平面角相関を減らすことが分かった。また非平衡統計物理学における揺らぎの定理を用いて高エネルギー原子核衝突反応における負のエントロピー生成を議論した。また、ジェット伝搬に対するQGPの流体力学的応答を調べた。ジェット軸から大角度方向に現れる低運動量を持つ粒子の生成はマッハ錐という衝撃波の生成と伝搬に依るものと分かった。

研究成果の概要(英文)：The quark gluon plasma (QGP) existed 10 micro seconds after the Big Bang. The QGP can be also created in high-energy nuclear collision experiments. So far, it has turned out that the QGP behaves like a perfect fluid and its evolution is well described by relativistic hydrodynamics. In this study, focused on fluctuations in the QGP. We first formulated relativistic fluctuating hydrodynamics and implemented it in the numerical code to investigate effects of the hydrodynamic fluctuations on observables. We found hydrodynamic fluctuations reduces correlation of the event plane angle between forward rapidity and central rapidity. We also found hydrodynamic fluctuations can decrease entropy of the system. This can be quantified from the fluctuation theorem. We also studied how the QGP responses to jet propagation. Experimentally low momentum particles are observed away from the jet axis. This can be interpreted by formation and propagation of shock wave, Mach cone, in the QGP.

研究分野：理論核物理学

キーワード：クォーク・グルーオン・プラズマ 相対論的流体力学 流体揺らぎ 高エネルギー原子核衝突反応 揺らぎの定理

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超高温物質「クォークグルーオンプラズマ(quark gluon plasma, QGP)」がブルックヘブン米国立研究所における高エネルギー原子核衝突実験によって発見されてから、現在、その物理的性質を詳細に調べる研究が進められている。

QGP の発見の背景には、QGP が完全流体のように振る舞う現象が大きな役割を果たした。高エネルギー原子核衝突実験によって生成された超高温物質のダイナミクスを、相対論的流体力学を用いて解析すると、完全流体近似のもとでその膨張の様子が非常によく記述できる。近年では、どれだけ粘性の影響が小さいのかという観点から、QGP の輸送係数を定量的に評価する解析が多くなされている。

一方で、高エネルギー原子核衝突反応では QGP と同時にジェットと呼ばれる高エネルギーのパートンが生成され、QGP 中を通過する際にエネルギー損失を起こす。このエネルギー損失量自体は、パートンと QGP との相互作用によって決まることから、この現象は QGP のプローブとされている。近年、このようなジェットを伴う事象では、ジェットの軸から見て大角度方向に比較的低運動量の粒子が生成されることが実験的に分かった。ジェットが落とすエネルギーや運動量がいかにして大角度方向に輸送されるかにも注目が集まっている。

ヨーロッパ共同原子核研究機構における大型ハドロン衝突型加速器(Large Hadron Collider, LHC)でも高エネルギー原子核衝突実験が行われ、今まで以上に詳細な実験結果の解析も行われている。また、これまで大きな原子核同士を衝突したときのみ QGP が生成されると考えられてきたが、QGP の膨張を示す現象は陽子や重陽子と重い原子核の間の衝突でも見つかっており、QGP の流体的振る舞いはどれだけ小さいスケールまで保持されるかにも注目が集まっている。

2. 研究の目的

本研究課題では、「QGP の揺らぎ」に注目し、高エネルギー原子核衝突実験で生成される QGP の時空発展や、実験的に観測可能な物理量に与える影響を調べる。

(1) QGP の輸送的性質には、ずれ粘性、体粘性、拡散係数といった輸送係数が挙げられる。非平衡統計力学の揺動散逸定理によれば、これらの物理量は対応する散逸流の揺らぎの相関と密接に関連している。このことは揺らぎの解析を通して QGP の輸送係数を引き出す可能性を示唆している。そこで、本研究では揺らぎの影響を取り入れた相対論的流体力学の枠組みを構築し、高エネルギー原子核衝突実験で得られた実験結果の解析から、QGP の物性量の一つである輸送的性質を探ることを目的とする。

(2) QGP に対する熱揺らぎを内的な揺らぎとするならば、QGP に対して外的な揺らぎを考へることもできる。高エネルギー原子核衝突反応では、QGP と同時にジェット(高エネルギーパートン)も多数生成されて、QGP を通過する間に、QGP にエネルギーや運動量を供給していく。エネルギー・運動量保存則に立脚した相対論的流体力学にこのような外部からのエネルギー、運動量の流入を考慮し、その QGP の時空発展に及ぼす影響、特にマッハ錐といった衝撃波の伝搬の様子を調べる。そのうえで、マッハ錐の生成の直接的な証拠となり得る実験的に観測可能な物理量を調べ、QGP のジェットに対する阻止能や QGP の音速といった物性量の研究につなげる。

3. 研究の方法

(1) 近年、衝突初期段階における QGP の形状の揺らぎが議論されており、衝突事象毎に流体力学的時空発展をシミュレーションする方法が主流となってきた。このことは、単に初期条件だけでなく、従来の流体力学の枠組みだけではコントロールできない「流体力学的時空発展における事象毎の熱揺らぎ(流体揺らぎ)」の必要性を示唆している。そこで本研究では「相対論的揺動流体力学」の定式化をし、これを取り入れた数値計算コードを開発した。特に、衝突反応の様子に即した衝突軸方向に膨張する座標系を採用し完全に 3 次元空間におけるシミュレーション、流体揺らぎの影響を直観的に解釈するために衝突軸方向にローレンツブースト不変性を仮定した解析解に取り入れた簡易版のシミュレーションの 2 通りを行った。

(2) 高エネルギー原子核衝突反応で QGP と同時に生成されるジェット(高エネルギーパートン)が QGP 中を伝搬することを考慮し、従来の相対論的流体モデルにジェットからのエネルギーと運動量の流入(バックリアクション)を考慮した新たなモデルを構築した。QGP の強結合性を考慮してジェットから落とされたエネルギーや運動量が瞬時に熱化すると仮定すると、これらの流入は、エネルギー・運動量保存則を表す連続の方程式の源項(ソース項)をモデル化することで記述できる。従来通り、高エネルギー原子核衝突反応で生成された QGP の膨張を背景場として、その上で流体数値シミュレーションによってジェットとマッハ錐の伝搬を記述した。

4. 研究成果

(1) 高エネルギー原子核衝突反応では、反応直後にハドロンストリングまたはカラーフラックスチューブが衝突軸方向に伸び、それが物質化して QGP が生成されると考えられる。そのため、作られた QGP は衝突軸方向に同じ形をしている。別の言い方をすると、衝突軸に垂直な平面で楕円型をしていると仮定すると、その主軸が衝突軸方向に依らないと考えられる。このことは、観測される物理量の

言葉で言い換えると「事象平面角がラピディティに依らない」と表現できる。一方、系が場所ごとに流体揺らぎのような乱雑な影響を受けたとすると、このラピディティ方向に持つ相関を壊す傾向にある。その相関の強さの度合いは流体揺らぎの大きさに依存するため、この物理量を通して QGP の輸送係数を議論できる。事象平面角の相関関数が流体揺らぎによって減少することを確かめ、実験結果と無矛盾であるためには予想通り流体揺らぎ、引いては粘性の影響が非常に小さいことが分かった。

衝突軸方向にのみ膨張する簡易版のシミュレーションを用いて、単位ラピディティあたりのエントロピー生成の時間発展を調べた。エントロピーは実験で測定される粒子数に比例する熱力学量である。エントロピー生成率は散逸流を時間平均することで得ることができる。ここで相対論的揺動流体力学を用いると、散逸流は時間ステップごとに揺らぐので、揺らぎが大きい場合にはこの生成率が負になることもある。その定量的評価は、非平衡物理学における「揺らぎの定理」を用いて記述することができる。すなわち、有名な熱力学第 2 法則は事象平均をした後に成立しており、事象毎には微小な確率ながらエントロピー生成率が負になっても良い。実際、このシミュレーションを用いて、一つの（マクロな意味で）固定した初期条件から最終状態のエントロピー分布を導出し、揺らぎの定理から解釈を行った。また、近年話題の陽子や重陽子を用いた衝突反応で生成された小さい QGP における揺らぎの重要性を指摘した。(2) LHC の衝突エネルギーを想定し、高エネルギーのジェットが放射状に膨張する QGP 中を伝搬した際に生じるマッハ錐の歪みを議論した。ジェットを特徴付けるジェット半径内とその外のエネルギーや運動量を計算したところ、マッハ錐の生成と背景となる QGP の膨張によりジェット軸から大角度方向へエネルギーと運動量の輸送が起こることが分かった。このことは LHC における CMS 実験グループが観測した実験結果とも定性的に合致している。一方で、より定量的な記述を行うためには、ジェットのシャワー構造やジェットの生成地点の揺らぎも考慮する必要が生じた。

また、マッハ錐が生じたことをより直接的に表す物理量として、ジェット軸に対する 2 粒子相関関数を解析した。マッハ錐による衝撃波の進む向きと放射状の膨張の向きが反平行になる場合、互いに移流する物質のせめぎ合いが生じ、結果として、放射状の膨張が特定の方向に抑制され、2 粒子相関関数にくぼみが生じることが分かった。これにより、ジェットが生成された場所についての情報が得られる可能性が広がった。

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 11 件)

S.Takeuchi, K.Murase, T.Hirano, P.Huovinen, Y.Nara, Effects of hadronic rescatterings on multistrange hadrons in high-energy nuclear collisions, *Physical Review C* 92, 2015, 44907 (査読有)

DOI: 10.1103/PhysRevC.92.044907

Y.Tachibana, T.Hirano, Momentum transport away from a jet in an expanding nuclear medium, *Physical Review C* 90, 2014, 021902(R) (査読有)

DOI: 10.1103/PhysRevC.90.021902

Y.Hirono, M.Hongo, T.Hirano, Estimation of the electric conductivity of the quark gluon plasma via asymmetric heavy-ion collisions, *Physical Review C* 90, 2014, 021903(R) (査読有)

DOI: 10.1103/Phys.RevC.90.021903

T.Hirano, R.Kurita, K.Murase, K.Nagai, Multiplicity fluctuation from hydrodynamic noise, *Nuclear Physics A* 931, 2014, 831-835 (査読有)

DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2014.08.029

[学会発表](計 20 件)

T.Hirano, Relativistic Fluctuating Hydrodynamics for Heavy Ion Collisions, Selected topics in the physics of the Quark-Gluon Plasma and Ultrarelativistic Heavy Ion Collisions, 2015 年 9 月 14 日, 京都大学基礎物理学研究所(京都府・京都市)

T.Hirano, Hydrodynamic noise in small systems, RBRC Workshop on Collectivity in Small Colliding Systems with High Multiplicity, 2015 年 3 月 4 日, Brookhaven National Laboratory, Upton (USA)

T.Hirano, Recent Development in Hydro, Flow and heavy flavor in high energy heavy-ion collisions, 2015 年 2 月 24 日, Inha University, Incheon (South Korea)

T.Hirano, Recent development of hydrodynamic modeling, HAWAII 2014, 2014 年 10 月 7 日, The Hilton Waikoloa Village, Hawaii (USA)

T.Hirano, Recent Development in Relativistic Hydrodynamic Model, Asian Triangle Heavy Ion Conference, 2014 年 8 月 5 日, 大阪大学(大阪府・吹田市)

T.Hirano, Multiplicity fluctuation from hydrodynamic noise, Quark Matter 2014, 2014 年 5 月 19 日, Darmstadt, Darmstadt (Germany)

T.Hirano, Causal hydrodynamic fluctuation and its application to heavy ion physics, Hydrodynamics for Strongly Coupled Fluids, 2014 年 5 月 12 日, ECT*, Trent (Italy)

T.Hirano, Hydrodynamics in Relativistic Heavy Ion Collisions, Future Trends in High-Energy Nuclear Collisions, 2013 年 8 月 19 日, Beijing (China)

〔図書〕(計 1 件)

平野 哲文 他、日本評論社、宇宙の物質はどのようにできたのか 素粒子から生命へ、2015、62-79

〔その他〕

ホームページ

<https://www.facebook.com/qgpfluid>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平野 哲文 (HIRANO, Tetsufumi)

上智大学・理工学部・教授

研究者番号：4 0 3 1 8 8 0 3

(2) 連携研究者

奈良 寧 (NARA, Yasushi)

国際教養大学・国際教養学部・教授

研究者番号：7 0 4 5 3 0 0 8

(3) 研究協力者

村瀬 功一 (MURASE, Koichi)

橘 保貴 (TACHIBANA, Yasuki)