

平成 30 年 6 月 26 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K17696

研究課題名(和文) 相対論的流体力学への解析的アプローチ

研究課題名(英文) Analytic approaches to relativistic nonequilibrium processes

研究代表者

八田 佳孝 (Hatta, Yoshitaka)

京都大学・基礎物理学研究所・准教授

研究者番号：00512534

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,000,000円

研究成果の概要(和文)：超相対論的な原子核衝突では、衝突直後に生成された主にグルオンからなる物質が非平衡な時間発展を行い、いずれクォークグルオンプラズマ(QGP)と呼ばれる熱平衡状態に達する。この過程で、過渡的にグルオンのボーズ凝縮体が形成される可能性が以前から指摘されてきた。本研究では場の理論の非平衡発展を最も完全に記述する2粒子規約形式(2PI形式)を用いて、強結合スカラー場理論の高密度状態の時間発展を解析した。その結果、粒子数を変える非弾性衝突の効果により、凝縮はぎりぎりのところで回避されるという結論を得た。これは原子核衝突における早い熱化の問題に重要な知見を与える成果である。

研究成果の概要(英文)：In relativistic heavy-ion collisions, the high density gluonic matter produced after the collision evolves into a thermalized quark-gluon plasma. It has been suggested that, due to the high gluon occupancy in the initial state, a Bose-Einstein condensate (BEC) of gluons may be formed at an intermediate stage of the nonequilibrium evolution. We study the possibility of the BEC formation based on the 2PI (two-particle irreducible) formalism. We find that, while the system approaches the threshold of BEC formation, it is eventually avoided due to the number-changing inelastic processes. This is in contrast to the finding of previous studies based on the Boltzmann equation where inelastic processes are neglected and a BEC is formed.

研究分野：量子色力学

キーワード：重イオン衝突の熱化 非平衡系の場の理論 ボーズ凝縮

1. 研究開始当初の背景

RHIC や LHC で行われている重イオン衝突実験は、原子核中に含まれるクォークとグルオンの高温高密度状態であるクォークグルオンプラズマ(QGP)の生成を目指している。衝突後に生成される高密度 QCD 物質の非平衡時間発展とその QGP への熱平衡化は重要な理論的課題である。非平衡発展には 2 段階あり、初期に生成されたグルオンが衝突を繰り返して局所平衡に達するまでの急激な時間発展領域と、その後の流体力学的なゆっくりとした時間領域がある。前者に関しては、重イオン中のグルオンはカラーガラス凝縮と呼ばれる高密度多体系を成しており、ここから解放されたグルオンが熱平衡運動量分布を形成する過程が、実時間格子シミュレーションやボルツマン方程式などを用いてこれまでに研究されてきた。後者では粘性の効果も入れた流体力学方程式を数値的に解き、楕円フロー(elliptic flow)などのさまざまな観測を記述する研究が多くなされてきた。

2. 研究の目的

(1) 3+1 次元相対論的粘性流体力学方程式の解析解を構成し、楕円フローなどの観測を解析的に計算する。また、それによる STAR コラボレーションの実験結果の説明を目指す。特に、RHIC の STAR コラボレーションが測定した電荷非対称の関数としての粒子、反粒子の楕円フローパラメタ v_2 の差はいわゆるカイラル磁気波(chiral magnetic wave, CMW)の実験的証拠として注目を集めた。これを通常の流体力学でも説明可能かどうかを粘性流体力学方程式の解析解を用いて検証する。

なお、もう一つの研究目的であったブースト不変性を破る(ラピディティに依存する)解析解の構築に関しては、新たな共同研究者(D. Yang 氏)の獲得により当初予想していた以上に速く研究が進み、平成 28 年度が始まる前に論文が完成したため(Yoshitaka Hatta, Bowen Xiao, Dilun Yang, Physical Review D93 (2016) 016012)、以下では述べない。

(2) 重イオン衝突におけるボース凝縮形成

重イオン衝突によって解放されるグルオンはボース粒子であり、系は高過密状態(over-occupied)であるため、局所熱平衡に達する前の段階で過渡的にボース・アインシュタイン凝縮(BEC)が形成される可能性が以前から指摘されてきた。通常極低温で起きる BEC がクォークグルオンプラズマのような 1 兆度を超える極高温で起きるかもしれないという非常に興味深い示唆で

あり、このシナリオを場の理論の枠組みを用いて検証する。

3. 研究の方法

(1) Gubser によって導かれたブースト不変かつ横方向に非自明な勾配を持つ粘性流体力学の解析解と、その楕円変形バージョンを用いて楕円フロー係数 v_2 を計算する。これをもとに STAR が測定した電荷非対称の関数としての粒子、反粒子の v_2 の差を再現することを試みる。

我々の以前の研究では v_2 の差は質量を無視すると化学ポテンシャルと粘性の両方に比例することが解析的に分かった。この結果をもとにパイ中間子の場合に v_2 の差を数値的に見積もり、実験結果を定量的に再現することに成功した。その後、我々の結果に触発された STAR が K 中間子の v_2 の差を精密に測定しなおしたところ、我々の通常流体に基づいた結果と符号が合わなかった。一方で CMW の予言ではパイ中間子も K 中間子も同じ符号を持ち、STAR の結果とコンシステントになっている。ここでは以前の解析計算にいくつかの改良を行って K 中間子の場合に符号の反転が見られるかを調べる。

(2) QCD の代わりにスカラー場の理論を考え、場の理論の非平衡発展を最も完全に記述する 2 粒子規約形式(2PI 形式)を適用する。スカラー粒子もボース粒子であり、4 点の自己相互作用を持つためグルオンの場合と似通った性質を示すと期待できる。スカラー場の成分数 N の逆冪展開の next-to-leading order(NLO)までの効果を取り入れた時間発展方程式を数値的に解析し、高占有数の初期状態から出発して BEC の生成可能性を調べる。

4. 研究成果

(1) まず、これまでに無視していた粒子の質量の効果を取り入れた。K 中間子の質量は 500MeV と重く、観測される p_T の領域と同程度であるため、質量の効果は重要である。しかし、実際に計算してみると v_2 の符号は反転せず、絶対値が大きくなって余計に実験データと食い違う傾向を示した。次に、古典的なボルツマン分布ではなく、量子的なボース・アインシュタイン分布を用いて解析を行った。質量と粘性を無視した場合にボース・アインシュタイン分布を用いて計算すると、フガシティによる低次の展開では一見 v_2 の差がゼロでないように見える。しかし無限次まで展開を行うと、 v_2 の差がゼロになることを解析的に証明することができた。この場合に v_2 の差を出すためには粒子に質量 m を入れる、または横運動量 p_T の積分をゼロから無限大ま

ででなく、(実際の実験データのように)有限の区間に限定する必要がある。そこで、まず質量 m を有限にし、 pT 積分を無限大まで行った。 m が温度 T に比べて小さい場合には m/T の展開として解析的に v_2 の差を計算できることが分かった。しかし符号の反転は見られなかった。次に質量と pT 積分の範囲を現実的な値にして数値計算を行ったが、使ったパラメータの範囲では結局符号は変わらなかった。いずれにせよボース・アインシュタイン分布の効果は K 中間子にはそれほど重要でないため、これによって結果が大きく変わることはなさそうである。一方でパイ中間子には効果が大きく、定量的に実験結果とよりよく合う方向に向かうことが分かった。ここでの結論は、通常の流体力学では STAR の実験結果を説明できず、CMW などの 'anomalous' な流体力学が必要になるかもしれないということである。これ自体は重要なメッセージであるが、「説明できなかった」というネガティブな結果を論文にまとめるには至らなかった。

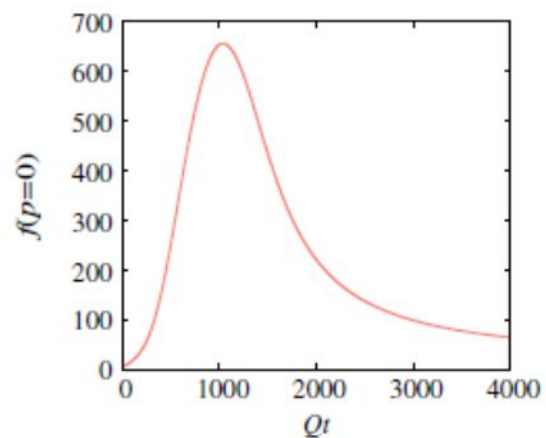
なお、2017 年 2 月に開催された国際会議 Quark Matter で、陽子重イオン衝突においても重イオン衝突の時と同程度のパイ中間子の v_2 の差が観測された。陽子重イオン衝突では生成される磁場が桁違いに小さく、CMW の効果はないと考えられる。つまり、最も有力だと思われた CMW による説明さえも疑問符がついたことになる。ただし LHC と RHIC ではバックグラウンドが異なる可能性があり、今後の RHIC の beam energy scan で同重核 (isobar) を用いた実験が行われ、最終的な CMW の検証が行われるであろう。

(2) N 成分スカラー場の理論において、 N が大きいとして $1/N$ 展開の NLO の $2PI$ ダイアグラムを取り入れた非平衡発展方程式を書き下し、高占有数の初期状態のもとで時間発展の数値計算を行った。系の膨張の効果は無視した。具体的には初期の分布関数を階段関数を用いて

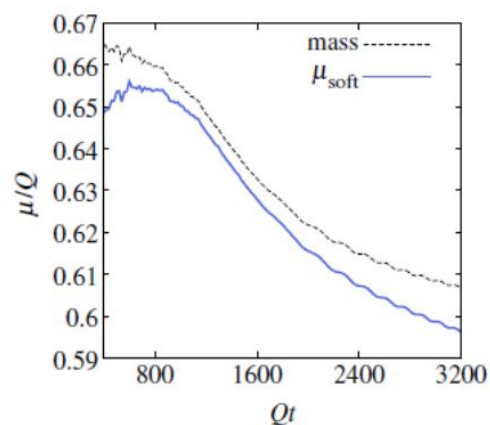
$$f(p) = A\theta(Q-p)$$

のようにとり、係数 A を変化させた。ここで Q はいわゆるグルオン飽和運動量であり、原子核から解放されたグルオンが持っている典型的な横運動量である。 A が小さいうちは、系は比較的短い時間で熱平衡に達し、BEC 形成の兆候は全く見られないという先行研究とコンシステントな結果を得た。しかし A を大きくして、古典的な考察に基づいて評価した BEC 生成の閾値を超えると、ゼロ運動量モード ($p=0$) の占有数 $f(0)$ が時間とともに急激に増大することが観測された。BEC が生成さ

れると $f(0)$ は発散し、数値的な不安定性が起こることが予想される。また、この場合には $p=0$ のゼロモードのみを分離して別に方程式をたてて、ノンゼロモードとの coupled equation を解くのが通常であり、ボルツマン方程式を用いた先行研究では実際にそのような計算がなされている。しかしながら我々が観測したのは発散ではなくピークであり (下図、横軸は飽和運動量の逆数を単位に取った時間)、数値的な不安定性は見られなかった。また、その後非常に長い時間をかけて系は熱平衡へと向かうことが確認された。(ただしこの時間スケールは長すぎるため、シミュレーションで最後まで追いかけることはできなかった。)



具体的にピーク時に何が起きているかを調べるため、粒子数分布をボース・アインシュタイン分布でフィットし、有効化学ポテンシャル μ と有効質量 m を読み取った。それらを時間の関数としてプロットしたのが下の図である。化学ポテンシャルは有効質量に非常に接近し、これが $f(0)$ が増大する原因になっている。しかし 2 本のカーブが交わることはなく、分布関数がピークをもつ時間帯に、両者の「準位反発」のような現象が起きていることが分かった。



ボース凝縮が起きるときには μ と m は等しくなり、そこでゼロモードが発散する。しかし 2PI 形式はポルツマン方程式よりも第一原理的であり、後者には含まれない量子効果を含んでいる。特に、粒子数を変える非弾性散乱を含んでおり、これによって上記の準位反発が起こり、ボース凝縮が抑制されていると考えられる。実際、粒子数を計算してみると分布関数がピークの値をとるときまで近似的に保存されるが、それ以降は急激に減少することが確認できた。運動量の低い粒子が $3 \rightarrow 1$ 過程により消滅、あるいは $2 \rightarrow 2$ 散乱により高い運動量のモードへと再分配されることにより、BEC が生成されないと考えられる。これらのスカラー場理論で得られた結果が QCD にそのまま適用できるわけではないが、QCD にももちろん粒子数を変える効果が含まれており、BEC の生成は抑制されるだろうと予想できる。少なくとも粒子数変化を無視した議論は不十分であろう。これらの結果を論文にまとめ、Physical Review D に投稿し、掲載へとこぎつけた。今後の課題としては、重イオン衝突の場合と同様に系の縦方向への膨張を考慮した $3 + 1$ 次元のシミュレーションを行うことが望ましい。膨張系では系の希薄化が起こるため BEC の生成はさらに抑制されると予想される。

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 1 件)

筒井翔一郎、Jean-Paul Blaizot、八田佳孝
Thermalization of overpopulated systems
in the 2PI formalism
Physical Review D96 (2017) 036004,
pp1-10、[10.1103/PhysRevD.96.036004](https://arxiv.org/abs/10.1103/PhysRevD.96.036004)

〔学会発表〕(計 1 件)

八田佳孝、Bo-Wen Xiao, Di-Lun Yang
ブースト普遍性を持たない相対論的流体力学の解析解
日本物理学会 2016 年秋季大会

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

八田佳孝 (HATTA, Yoshitaka)
京都大学・基礎物理学研究所・准教授
研究者番号：00512534

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

筒井翔一郎 (TSUTSUI, Shoichiro)
BLAIZOT, Jean-Paul
Xiao, Bo-Wen
YANG, Di-Lun