

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 12 月 9 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25800148

研究課題名(和文)重イオン衝突実験における非ガウスゆらぎの時間発展

研究課題名(英文)Time evolution of non-Gaussian fluctuations in heavy ion collisions

研究代表者

北澤 正清 (Kitazawa, Masakiyo)

大阪大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：10452418

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：相対論的重イオン衝突実験は物質の未知なる状態であるクォークグルオンプラズマを地上で生成する重要な実験的手段である。本研究では、この実験で生成される高温物質の初期状態を探る有用な観測量として近年注目を集める、保存電荷の非ガウスゆらぎに関する研究に関して多角的な研究を行った。具体的には、実験的に測定可能な保存電荷のラピディティ幅依存性を用いてゆらぎの性質を実験的に理解する方法を提案したほか、実験的観測における有限体積効果や誤検出・検出効率の問題を論じるなど、様々な研究成果を挙げる事ができた。これらの研究成果は、本研究期間中に国際会議の招待講演を10回以上引き受けるなど、世界的に注目された。

研究成果の概要(英文)：The relativistic heavy-ion collisions are important experimental tool to investigate the new state of matter called the quark-gluon plasma on the earth. In the present research, I extensively studied non-Gaussian fluctuations of conserved charges which acquire much attention recently in this field as important experimental observables which enable us to investigate properties of the hot medium in early stage created by the heavy-ion collisions. In particular, we studied rapidity window dependences as experimental tools to understand early-stage thermodynamics, finite volume effects and efficiency problem in fluctuation observables in experiments for the first time. These results received much attention over the world and I accepted invitations to international conferences more than 10 times during this period.

研究分野：原子核理論

キーワード：非ガウスゆらぎ 重イオン衝突実験 QCD臨界点 ビームエネルギー走査実験 キュムラント 保存電荷
ゆらぎ

1. 研究開始当初の背景

相対論的重イオン衝突実験は、物質の未知なる状態であるクォークグルオンプラズマを地上で生成する重要な実験的手段である。この実験分野で、2010年頃から、生成される高温物質の初期状態を探る有用な観測量として、保存電荷の非ガウスゆらぎへの注目が高まっていた。特に、重イオン衝突実験で観測される物理量のビームエネルギー依存性を QCD 相構造の探索に用いる計画が実験的に遂行され始めたのが2010年頃であり、保存電荷非ガウスゆらぎはこの計画におけるもっとも有用な観測量として、実験・理論双方による研究が精力的に行われ始めていた。

2. 研究の目的

相対論的重イオン衝突実験での保存電荷非ガウスゆらぎの測定は、イベント毎測定という方法で行われる。この測定では、実験終状態の位相空間の一部の領域に到達する保存電荷の衝突イベント毎のゆらぎが観測される。従来のイベント毎測定では、検出器が囲うことのできる最大の位相空間を用いた測定のみが行われていた。一方本研究の目的は、位相空間の大きさを検出器が許す範囲で変更し、ゆらぎの位相空間に対する依存性を調べることにより、ゆらぎの性質をより深く理解することである。特に、ラピディティと呼ばれる、ビームに垂直な座標軸方向に位相空間の幅を変えた際のゆらぎのラピディティ幅に対する依存性を理論的に解析することで実験に対する予言を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

実験で測定されるゆらぎのラピディティ幅を理論的に理解するために、本研究では確率論的方程式を用いた研究を行った。特に、拡散マスター方程式と呼ばれる確率論的方程式を用いて、相互に相互作用しないブラウン粒子系における非ガウスゆらぎの時間発展を記述し、非ガウスゆらぎのラピディティ幅依存性から

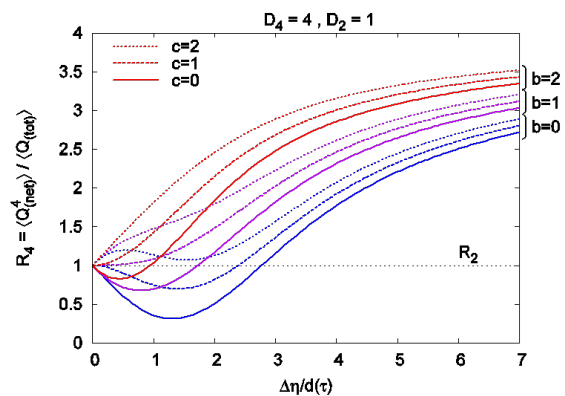
- (1) 非ガウスゆらぎの衝突初期段階での数値
- (2) 拡散係数など、保存電荷の拡散に関する情報

等の非ガウスゆらぎを持つ性質を抜き出し、ゆらぎの性質を深く理解することを目指した。

4. 研究成果

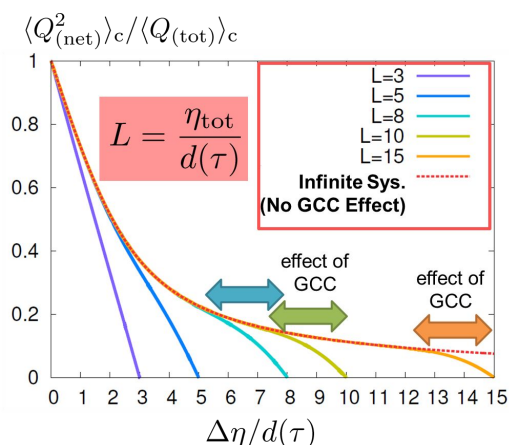
(1) 拡散マスター方程式を用いて、ゆらぎの解析を行うことにより、相互に相互作用しないブラウン粒子系における非ガウスゆらぎ

の時間発展を記述し、衝突初期段階に生成された非ガウスゆらぎが検出器に至るまでの間の拡散過程によりどのように変更されるかを論じた。また、この計算結果に立脚して実験で観測可能な非ガウスゆらぎのラピディティ幅依存性を初めて理論的に計算することにより、この量に対する理論的予言を行った。この研究の結果によれば、非ガウスゆらぎを特徴づける高次キュムラントはラピディティ幅の関数として複雑にふるまうことが予言され(下図) そのような振る舞いを実験的に観測することが本解析の妥当性を検証する証拠となることを論じた。



なお、本研究の結果に触発される形で、2015年からラピディティ幅依存性の実験解析結果が各実験グループから報告され始めており、現在はこれらの実験結果と理論解析の結果を比較し、高温物質の非ガウスゆらぎの解析や輸送的性質などを本研究の描像に基づいて抜き出していく発展的研究を進めている。

(2) 上で得られた結果は重イオン衝突実験で生成される高温物質がラピディティ方向に無限に広がっている場合の解析となっていた。一方、現実の実験で作られる物質は有限体積であり、ラピディティ方向への広がりも有限である。この有限性がゆらぎの測定に比較的強く影響することが以前から指摘されていた。しかし、これらの先行研究は終状態が熱平衡状態であることを暗黙に仮定して行われたものであった。そこで本研究では、(1)で行った解析を有限体積のものに拡張し、ゆらぎの非平衡性を考慮しながら有限体積効果が観測量にもたらす影響を議論した。この解析により、下図に結果の一部を示すように、有限体積効果(GCC)の影響は境界領域では強くゆらぎに寄与するが、ラピディティ幅が十分小さい場合には抑制されることが分かった。特に、LHCのALICE実験で観測された電磁電荷ゆらぎに対する有限体積効果の影響は著しく小さいことが示された。



(3)本研究では、上述した非ガウスゆらぎの時間発展を追跡する研究と並行して、実験で保存電荷非ガウスゆらぎを観測する際に、検出器が無限の性能を持っていないために起こる様々な問題に関する議論と、実験解析における具体的な処方箋の提案も精力的に行った。

現実的な検出器では、観測される粒子を誤って別種類のものであると同定してしまうことが一定の確率で起こる。また、検出器を構成するバリオンが弾き出されることで作られた粒子が誤検出の要因となることもある。

本研究では、このような誤検出が非ガウスゆらぎの測定値に与える影響を議論した。この問題が、多くの場合に注目する粒子の測定と独立な事象として扱えることを指摘し、そのような場合に実験結果を補正する方法を提案した。

現実的な検出器では、誤検出の問題に加え、本来検出するべき粒子を正しく測定する検出効率が100%でないという問題を持っている。

検出効率が実験の測定に与える影響については我々が以前に補正方法を示していたが、想定する電荷が二種類の粒子の線形結合である場合のみしか扱っていなかった。一方、各種の保存電荷は多種の粒子の数の結合としてあらわされているため、そのような場合への拡張が実験側から求められていた。本研究では、このような場合に検出効率を容易に行うための公式を導出した。

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 10 件)

【以下全て査読有】

[1] Masayuki Asakawa, Masakiyo Kitazawa, "Fluctuations of conserved charges in relativistic heavy ion collisions: An introduction," Progress in Particle and Nuclear Physics, in press, 2016.

[2] Masakiyo Kitazawa, "Efficient formulas for efficiency correction of cumulants," Physical Review **C93** (2016) No.4, 044911 (1-7). DOI: 10.1103/PhysRevC.93.044911

[3] Taekwang Kim, Masayuki Asakawa, Masakiyo Kitazawa, "Dilepton production spectrum above T_c with a lattice quark propagator," Physical Review **D92** (2015) No.11, 114014 (1-12). DOI:10.1103/PhysRevD.92.114014

[4] Masakiyo Kitazawa, "Rapidity window dependences of higher order cumulants and diffusion master equation," Nuclear Physics **A942** (2015) 65-96. DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2015.07.008

[5] Miki Sakaida, Masayuki Asakawa, Masakiyo Kitazawa, "Effects of global charge conservation on time evolution of cumulants of conserved charges in relativistic heavy ion collisions," Physical Review **C90** (2014) no.6, 064911. DOI: 10.1103/PhysRevC.90.064911

[6] Masakiyo Kitazawa, Teiji Kunihiro, Yukio Nemoto, "Emergence of soft quark excitations by the coupling with a soft mode of the QCD critical point," Physical Review **D90** (2014) no.11, 116008 (1-9). DOI: 10.1103/PhysRevD.90.116008

[7] Masayuki Asakawa, Tetsuo Hatsuda, Etsuko Ito, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, "Thermodynamics of SU(3) gauge theory from gradient flow on the lattice," Physical Review **D90** (2014) no.1, 011501. DOI: 10.1103/PhysRevD.90.011501

[8] Masakiyo Kitazawa, Teiji Kunihiro, Yukio Nemoto, "Possible generation of anomalously soft quark excitations at nonzero temperature: Nonhyperbolic dispersion of the parapion and van Hove singularity," Physical Review **D89** (2014) no.5, 056002. DOI: 10.1103/PhysRevD.89.056002

[9] Masakiyo Kitazawa, Masayuki Asakawa, Hirosato Ono, "Non-equilibrium time evolution of higher order cumulants of conserved charges and event-by-event analysis," Physical Letters **B728** (2014) 386-392.

DOI: 10.1016/j.physletb.2013.12.008

[10] Hirosato Ono, Masayuki Asakawa, Masakiyo Kitazawa, "Effect of secondary protons on baryon and proton number cumulants in event-by-event analysis," Physical Review **C87** (2013) no.4, 041901.

DOI: 10.1103/PhysRevC.87.041901

〔学会発表〕(計 36 件)

北沢正清、「格子ゲージ理論における、エネルギー運動量保存則とゆらぎの線形応答関係」、日本物理学会 71 回年次大会、東北学院大学(仙台)、2016 年 3 月 21 日

Masakiyo Kitazawa, "For the J-PARC Heavy-Ion Collisions," The 31st Reimei Workshop on Hadron Physics in Extreme Conditions at J-PARC, J-PARC (Tokai), Jan. 21, 2016.

Masakiyo Kitazawa, "Non-Gaussian fluctuations in relativistic heavy-ion collisions," 2nd CiRfSE Workshop, Tsukuba University (Tsukuba), Jan. 18-19, 2016.

北沢正清、「J-PARC が目指す重イオン衝突実験」、原子核・ハドロン物理の課題と将来、KEK (筑波) 2015 年 11 月 26 日

Masakiyo Kitazawa, "Diffusion of conserved-charge fluctuations," EMMI Workshop on Fluctuations in Strongly Interacting Hot and Dense Matter: Theory and Experiment, Darmstadt (Germany), Nov. 3, 2015.

Masakiyo Kitazawa, "QCD Thermodynamics from Gradient Flow," The 13th international eXtreme QCD (XQCD), Wuhan (China), Sep. 22, 2015.

北沢正清、「Diffusion of non-Gaussian fluctuations of conserved charges,」熱場の量子論と応用、京都大学(京都)、2015 年

9 月 1 日

北沢正清、「Physics of Dense Matter in Heavy-ion Collisions at J-PARC,」 「ストレンジネス核物理の発展方向・チャームハドロン」の構造と相互作用、J-PARC(東海)、2015 年 8 月 7 日

Masakiyo Kitazawa, "Rapidity window and centrality dependences of higher order cumulants," HIC for FAIR workshop on Fluctuations and Correlations Measured in Nuclear Collision 2015, Frankfurt (Germany), Jul. 30, 2015.

北沢正清、「 $dn/dt=d2n/dx2$ 」、研究会『方程式でつながる科学』、大阪大学(大阪)、2015 年 3 月 31 日

北沢正清、「レプトン対生成量(理論)」、チュートリアル研究会「重イオン衝突の物理：基礎から最先端まで」、理研(和光市)、2015 年 3 月 27 日

北沢正清、「文学に学ぶクォークの物理」、物理院生春の学校、南紀勝浦休暇村(三重県)、2015 年 3 月 9 日。

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織
(1) 研究代表者
北沢正清 (大阪大学大学院理学研究科、助教、KITAZAWA, Masakiyo)

研究者番号：25800148