

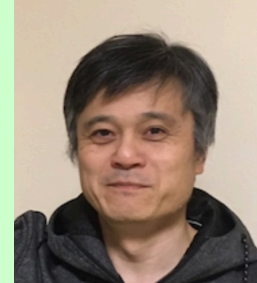
**高次ゆらぎと粒子相関による高密度クォーク核物質の
1次相転移と臨界点観測への挑戦**

Search for a critical point and first order phase transition of high density quark-nuclear matter via higher order fluctuations and particle correlations

課題番号：19H05598

江角 晋一（ESUMI ShinIchi）

筑波大学・数理物質系・教授



研究の概要（4行以内）

宇宙初期の高温・高密度の物質状態であるクォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)を、重イオン加速器で再現しその性質を調べる事により、量子色力学(QCD)で決まるクォーク核物質の QCD 相図を明らかにする事を目的とする。特に QCD 相図の高密度領域に1次相転移が存在するかどうか、またその終点となる臨界点が存在するかどうかを、高次揺らぎと粒子相関により調べる。

研究分野：原子核実験

キーワード：臨界点、1次相転移、QCD相構造、クォーク・グルーオン・プラズマ

1. 研究開始当初の背景

CERN・BNL 研究所の LHC・RHIC 加速器を用いた高エネルギー原子核衝突実験により、衝突領域の高温・高密度物質がクォーク・ハドロン相転移を起こしている証拠の一つとして、クォーク流体の楕円の膨張発展があり、それはハドロンではなくクォークが自由度を獲得し、熱平衡化していることを示しており、QGP 相が生成された事を示す。高温領域側では滑らかなクロスオーバー相転移であることが判明し、高密度側ではこのクォーク・ハドロン相転移は境界面が不連続な1次相転移である事が予測され、その1次相転移の終点として臨界点があるとされる。さらに高密度領域では、重力波の観測により中性子星同士の衝突・合体によって、高密度核物質の状態方程式や中性子星の内部構造が解明されつつあるが、本研究計画では加速器を用いた重

イオン衝突実験によって、高密度クォーク核物質の相転移を直接観測する事を目指す。

2. 研究の目的

量子色力学(QCD)で決まるクォーク核物質の QCD 相図は、高温領域の滑らかな相転移と質的に異なり、高密度領域に予測される豊富な相構造に注目が集まっており、原子核の衝突ビームエネルギーを走査することにより、相図の高温領域から高密度領域への変化を調べる。特に1次相転移や臨界点が存在するかどうかを調べるために、BNL 研究所の RHIC 加速器を用いた STAR 実験において、原子核衝突における揺らぎや粒子相関のビームエネルギー依存性を測定する。

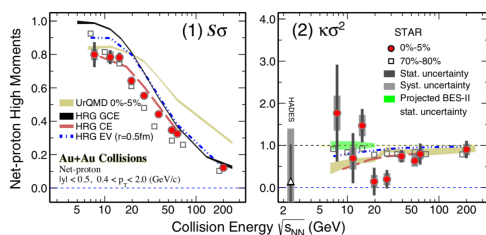
3. 研究の方法

原子核の衝突ビームエネルギーが百 GeV～

数 TeV の高い領域では、QCD 相図上高温領域のクロスオーバー相転移であり、数 GeV～十 GeV の低い領域は、同相図上高密度領域の 1 次相転移であり、さらに臨界点があると期待されるが、実験的には未確認である。BNL-RHIC 加速器を用いた STAR 国際共同実験グループにおいて、この比較的低い領域におけるビームエネルギー走査実験を行い、臨界点探索を推進する。特に、臨界点と 1 次相転移に敏感であると期待される保存量分布の高次揺らぎと粒子相関による流体力学的集団運動のエネルギー依存性に注目した測定を行い、非単調な振る舞いがあるかどうかを検証する。筑波大学と大阪大学を拠点とした実験・理論の共同研究体制により、揺らぎ物理に関する解析手法の開発と実験データや結果の検証を行っている。

4. これまでの成果

第 1 期ビームエネルギー走査実験において測定した正味陽子数分布の高次揺らぎの最終結果を出版した。特に高多重度の重イオン衝突において、粒子の多重入射による検出効果に対する新たな逐次型展開補正手法を揺らぎ分布の測定に実際に適用して、遂に「陽子-反陽子数分布の 4 次揺らぎに見える非単調な変化の兆候」(下図:PRL126(2021)092301)を正式



に公表するに至った。本研究計画の研究体制により、この新たな手法を開発し、長年の懸案事項が解決できたのである。

2019 年度より開始した第 2 期ビームエネルギー走査実験 (7~20GeV 領域) は、新型コロナウイルスにより 2020 年序盤に一時中断を

余儀なくされたが、実験時期を数ヶ月ずらし、ほぼ予定通り衝突実験データ収集を進めている。現在 2021 年 3 月時点では、エネルギー走査期間としては最終の 3 年目を、衝突型実験モードでは最低エネルギーとなる核子対あたり 7.7GeV のエネルギーで、金原子核同士の衝突実験を行っている。固定標的実験モード (3~10GeV) の衝突実験を行い、さらに低い衝突エネルギー領域での測定を遂行中である。

5. 今後の計画

前後方領域の測定器の改善・強化は完了し、粒子測定 η 領域の拡大によって臨界点揺らぎに対する検出感度の改善が期待できる。また前方領域での中心衝突度や反応平面の決定によって、可能になる物理解析の幅が飛躍的に広がる。特に高次揺らぎの η 領域依存性を測定する事は、重イオン衝突により複雑に膨張発展する高温・高密度反応領域やその中での相互作用に関して、時間を遡る情報を与えるため、理論的にこの実験結果を解釈する時には必要不可欠であり、実験・理論グループの共同研究体制の力量の見せ場となる。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

- "Nonmonotonic Energy Dependence of Net-Proton...", STAR Collaboration, Phys. Rev. Lett. 126 (2021) 092301
- "Reconstructing particle number distributions...", S. Esumi, et al., Nucl. Instrum. Meth. A 987 (2021) 164802
- "Mapping the Phases of Quantum Chromodynamics...", A. Bzdak et al., Phys. Rept. 853 (2020) 1-87

7. ホームページ等

<http://www.star.bnl.gov>
<http://www.u.tsukuba.ac.jp/~esumi.shinichi.gn/welcome.html> (改行なし)
esumi.shinichi.gn@u.tsukuba.ac.jp