

金原子核衝突実験により理論的に予測される量子色力学臨界点の存在を示唆

国際共同実験プロジェクト「STAR 実験」で、RHIC（相対論的重イオン衝突型加速器）において金原子核衝突実験を行い、「正味陽子数の 4 次ゆらぎ」を測定し、その結果、理論的に存在が予測されている量子色力学（QCD）臨界点特有のパターンを確認しました。

米国ブルックヘブン国立研究所の大型加速器 RHIC（相対論的重イオン衝突型加速器）における国際共同実験プロジェクトで筑波大学も参加する「STAR 実験」は、金の原子核同士を衝突させた際の「正味陽子数の 4 次ゆらぎ」を高精度に測定し、「量子色力学（QCD）臨界点」の存在を示唆する成果を得ました。

原子核を構成する陽子や中性子はクォークとグルーオンという素粒子から成り、通常は核子に閉じ込められています。しかし超高温・高密度環境では、これらが自由に動き回る「クォーク・グルーオンプラズマ」と呼ばれる状態に変化します。この変化の仕組みを理解する鍵が「QCD 相図」です。これは温度と密度によって物質の状態を示すもので、そこには「QCD 臨界点」の存在が理論的に予測されています。

STAR 実験では、衝突エネルギーを変えることで QCD 相図のさまざまな領域を探索しています。衝突エネルギーが高いと QCD の密度が低く、低いほど密度が高くなるため、衝突エネルギーを調整することで QCD 相図を実験的に探索することができます。2010 年からの第一期実験に続き、今回の第二期実験では第一期の約 20 倍のデータを収集しました。

その結果、20GeV（ギガエレクトロンボルト）付近の衝突で「正味陽子数の 4 次ゆらぎ」が理論計算より小さくなるという特徴的な傾向が見つかりました。これは臨界点を含むモデルが予測する挙動と一致しており、7.7GeV 以下の領域に QCD 臨界点が存在する可能性を強く示しています。今後、より低いエネルギーでの解析などによって、QCD 臨界点の解明がさらに進むと期待されます。

研究代表者

筑波大学数理物質系

江角 晋一 教授

研究の背景

物質をつくる原子の中の原子核を構成する陽子や中性子（核子）は、3つのクォークとそれをつなぐグルーオンという素粒子からできています。通常、クォークやグルーオンは「強い力^{注1)}」によって核子の中に閉じ込められており、単独で存在することはできません。しかし、極めて高温・高密度の環境では、この閉じ込めが解け、クォークとグルーオンが自由に動き回る「クォーク・グルーオンプラズマ (Quark-Gluon Plasma, QGP)」という状態に変化します。このQGPは、金や鉛などの重い原子核を高速で衝突させると生じることが、米国ブルックヘブン国立研究所のRHIC加速器（相対論的重イオン衝突型加速器）や欧州原子核研究機構のLHC加速器（大型ハドロン衝突型加速器）で確認されています。

この変化の仕組みを理解するために重要なのが「QCD (Quantum Chromodynamics, 量子色力学) 相図^{注2)}」です。これは温度と密度を軸にして、原子核を形づくる物質がどの状態にあるかを示す図です（参考図左上）。水は温度と圧力によって氷（固体）・水（液体）・水蒸気（気体）と姿を変えますが（相転移）、これと同様の関係を原子核物質についても描くことができ、通常物質（ハドロンガス）からQGPへの変化の過程に「QCD 臨界点（1次相転移の終端）」が存在すると、理論上、予測されています。その臨界点発見を目指す実験的・理論的な研究が、世界中で進められています。

研究内容と成果

RHICのSTAR実験^{注3)}（参考図左下）では、「Beam Energy Scan (BES)」という大規模なプログラムで金の原子核をさまざまなエネルギーで衝突させることにより、QCD相図のさまざまな領域を探索しています。衝突エネルギーが高いほどQGPの密度は低く、逆にエネルギーが低いほど密度が高くなるという関係があります（参考図左上）。つまり、衝突エネルギーを変えることで、QCD相図のさまざまな領域を実験的に調べることができるのです。

2010年から2017年まで行われた第一期実験 (BES-I) に続き、低エネルギー領域に絞った第二期実験 (BES-II) では、BES-Iの約20倍のデータを収集しました。そのデータを用いて「正味陽子数の4次ゆらぎ^{注4)}」の精密測定を行いました。理論モデルによれば、QGPが冷えていく過程で臨界点付近を通ると、この「4次ゆらぎ」は特徴的に変化します。具体的には、高いエネルギー側から低いエネルギーへ走査する場合を考えると、ある衝突エネルギーの領域でいったん小さくなり、その後臨界点近傍で大きくなるというパターンを示すと予想されています（参考図右上）。

実験結果からは、金原子核同士がかするような周辺衝突を起こした場合には、衝突エネルギーによる変化はあまり見られませんでした（参考図右下）。しかし、正面衝突の場合には、14.5 GeV (ギガエレクトロンボルト)^{注5)}以下と27 GeV以上では理論計算と一致する一方、20 GeV付近で明らかに小さくなるという特徴が観測され、臨界点を含んだ理論モデルの予測とよく一致しています。従って、7.7 GeV以下の低エネルギー領域にQCD臨界点が存在する可能性が強く示唆されました。

今後の展開

STAR実験グループでは、さらに低いエネルギー (3.0~4.5 GeV) の固定標的実験^{注6)}も行っており、現在、そのデータ解析が進められています。RHIC加速器の実験終了 (今年度末) までに、この領域で「4次ゆらぎの増大」を確認し、QCD臨界点の存在をより確実にすることを目指しています。

しかしながら、STAR検出器は低エネルギーでの測定には必ずしも最適化されていません。特に4.5~7.7 GeVのエネルギー領域におけるデータ収集や、さらなる高統計には限界があります。そのため、ドイツ、スイス、中国、ロシア、日本では新たな加速器実験の計画が進められており、次世代の測定によって決定的な証拠が得られることが期待されています。

参考図

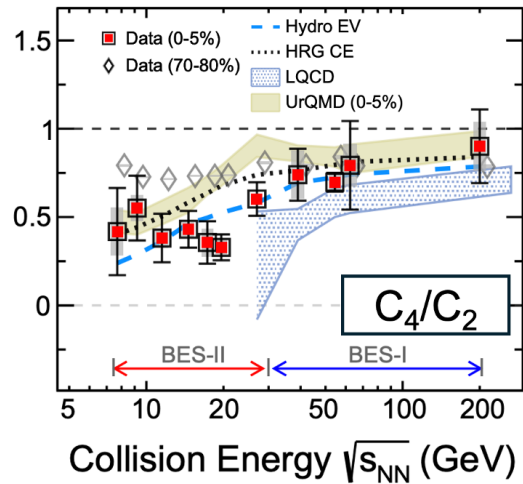
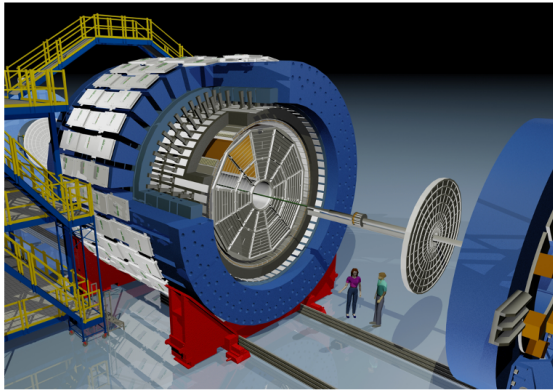
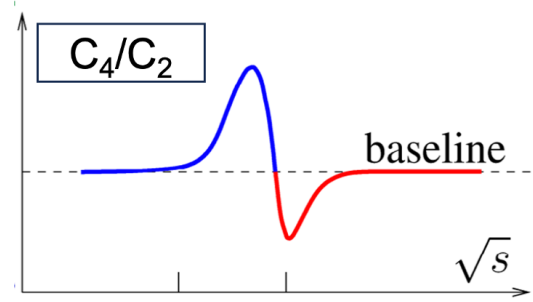
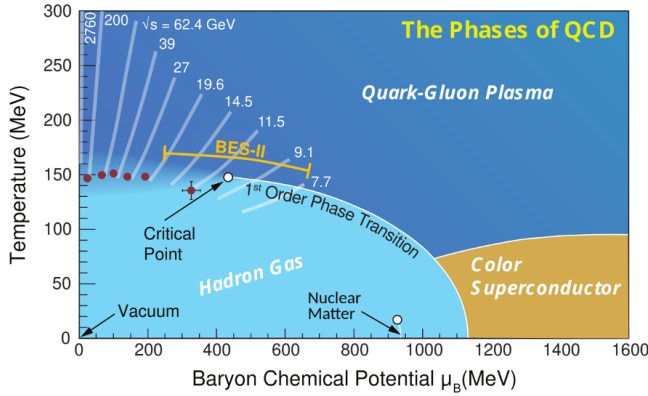


図 (左上) QCD 相図のイメージ図。横軸が密度、縦軸が温度。低温・低密度領域 (水色部分) では、クォークやグルーオンはハドロンガスとして存在しているが、高温・高密度領域 (青色部分) では QGP へ変化する。2つの相の間の相転移の仕組みはよく分かっていないが、低密度領域では滑らかな変化であるクロスオーバー、高密度領域では1次相転移 (体積やエントロピーに不連続が生じる変化) であると予想されている。QGP 相中に描かれた複数の白線は、原子核衝突実験において生成された QGP が時空発展とともに冷え、やがてハドロンガスへ相転移する様子を、異なる衝突エネルギーにおいて表したものである。高いエネルギーほど生成物質の密度は低く、低いエネルギーほど密度が高くなるという特徴がある。(左下) STAR 検出器の概観図。多数のサブシステムから構成され、原子核衝突実験において生成される数千以上の粒子の運動量やエネルギーの情報が得られる。(右上) QCD 臨界点を含んだ理論モデルの予測。縦軸が4次ゆらぎ (C_4/C_2)、横軸が衝突エネルギー。(右下) 正味陽子数の4次ゆらぎの衝突エネルギー依存性。金の原子核同士がかかるような周辺衝突事象を解析した結果がダイヤ、原子核同士が正面衝突した事象の結果が赤四角で示されている。Hydro EV は QGP の流体的な性質を考慮したモデル計算、HRG CE はバリオン数保存を考慮したハドロンガスのモデル計算、LQCD は格子 QCD による数値計算、UrQMD がハドロン輸送モデルを表す。これらのモデル計算 (右下図内) には、QCD 臨界点は含まれていない。

用語解説

注1) 強い力

自然界には4つの基本的な力がある。重力（万有引力）、電磁気力（電気や磁石の力）、弱い力（放射性崩壊に関与）、そして最も強いのが「強い力」である。強い力はクォークを結びつけて陽子や中性子をつくり、原子核を保つ働きをする。

注2) QCD (Quantum Chromodynamics, 量子色力学) 相図

QCDはクォークとグルーオンの間に働く強い力を記述する理論で、素粒子物理学の標準理論の一部をなす。QCDによって描かれる原子核物質の相図を「QCD相図」と呼ぶ。

注3) RHIC-STAR 実験

米国ブルックヘブン国立研究所の相対論的重イオン加速器 (RHIC) 内に設置された検出器を用いて行われている国際共同実験の一つ。世界14カ国の76の研究機関から参加する70人のメンバーによって運営されている。

注4) 正味陽子数の4次ゆらぎ

原子核衝突において生成された陽子の数と反陽子の数の差（正味陽子数）を測定すると、各衝突事象でばらつきが生じる。このばらつきはさまざまな次数の「キュムラント」と呼ばれる統計量（分布の特徴）によって表される。1次は平均値、2次は分散に等しい。3次以上のキュムラントはガウス分布でゼロになるため、「非ガウスゆらぎ」とも呼ばれる。「4次ゆらぎ」は4次キュムラントと2次キュムラントの比 (C_4/C_2) で定義される。

注5) GeV (ギガエレクトロンボルト)

エレクトロンボルト (eV) は、粒子のエネルギーを表す単位で、1電子が1ボルトの電圧で加速されたときのエネルギーを基準にしている。1ギガエレクトロンボルト (GeV) はその10億倍に当たる。

注6) 固定標的実験

2つの原子核ビーム同士を衝突させる衝突型実験は、低いエネルギーではビームが広がってしまい、衝突頻度が下がるという特徴があるため、限られた時間の中で多くの実験データを収集することが難しくなる。RHICは200 GeVという高エネルギーでの衝突実験に最適化されているため、数 GeV 程度の低エネルギー領域ではその影響が顕著になる。そこで、2つのビームを衝突させるのではなく、片方は金のターゲット（標的）として固定しておき、そこに金のビームをぶつけるという方法により、低エネルギー領域における効率的なデータ収集を行っている。

研究資金

本研究は、科研費による研究プロジェクト (19H05598、23K13113) の一環として実施されました。

掲載論文

【題名】 Precision measurement of net-proton-number fluctuations in Au+Au collisions at RHIC (RHIC 金+金衝突実験における正味陽子数ゆらぎの精密測定)

【著者名】 STAR Collaboration (筑波大学参加者: 数理物質系 江角 晋一 教授、新井田 貴文 助教、野中 俊宏 助教)

【掲載誌】 *Physical Review Letters*

【掲載日】 2025年9月29日

【DOI】 10.1103/9l69-2d7p

問い合わせ先

【研究に関すること】

江角 晋一（えすみ しんいち）

筑波大学 数理物質系 教授

URL: <https://utkhii.px.tsukuba.ac.jp/>

【取材・報道に関すること】

筑波大学広報局

TEL: 029-853-2040

E-mail: kohositu@un.tsukuba.ac.jp