



上智大学
SOPHIA UNIVERSITY



公立大学法人
国際教養大学

2022年11月21日

報道関係各位

上智大学
国際教養大学

高エネルギー原子核衝突反応における 超低運動量粒子の起源の特定

—クォーク・グルーオン・プラズマの解明へ一歩前進—

【要点】

- 高エネルギー原子核衝突反応において未知の成分であった非常に小さな運動量を持つ粒子の起源を新たに特定
- クォーク・グルーオン・プラズマの物性の解明における道筋の提示

【概要】

上智大学 理工学部の 平野哲文 教授、金久保優花 大学院生（博士後期課程3年、現ユヴァスキュラ大学 博士研究員 兼 上智大学 理工共同研究員）、国際教養大学の 橘保貴 助教の研究グループは、高エネルギー原子核衝突反応（用語解説1）における非常に小さな運動量を持つ粒子の起源を新たに特定しました。超高温物質「クォーク・グルーオン・プラズマ」（用語解説2）の物性を解明するうえで、この非常に小さな運動量の領域における粒子が重要な役割を果たすことが分かりました。

高エネルギー原子核衝突反応は、約 10^{-23} 秒という非常に短い時間で起こるにもかかわらず、多数の過程が複雑に絡んでいます。衝突実験で測定されたハドロン粒子（用語解説3）のスペクトルには、理論的には説明できない粒子数の増大があり、その起源は長年に渡って特定できていませんでした。本研究グループはこの反応を詳細に記述する次世代の枠組みを構築することで、非常に小さな運動量を持つハドロン粒子は、大きな運動量を持つクォー

クやグルーオンの破碎現象（用語解説4）が起源であることを新たに明らかにしました。衝突反応によって得られた実験データを詳細に解析することで、生成されたクォーク・グルーオン・プラズマの粘性といった輸送的性質を引き出す試みが行われてきました。しかし、これまでは理論側における粒子数不足問題のため、その定量性には疑問が呈されていました。本研究において、非常に小さな運動量を持つハドロン粒子の起源が新たに特定されたことにより、クォーク・グルーオン・プラズマの物性を定量的に理解する道筋が開けました。

本研究成果は2022年11月18日に米国物理学会が出版する学術論文誌 Physical Review C に掲載され、特に注目される論文として Editors' Suggestion に選ばれました。

【研究の背景】

物質の基本構成要素である素粒子「クォーク」やそれらの間に力を伝える「グルーオン」はカラー荷という自由度を持っており、自然界では白色の状態となって陽子や中性子、中間子といったハドロン粒子の内部に閉じ込められています。一方、ビッグバン直後の初期宇宙のような数兆度に達する超高温下では、それらがバラバラな状態である「クォーク・グルーオン・プラズマ」となります。超高温物理研究の最前線として、この新奇な物質の特性を明らかにするために、大型加速器を用いた高エネルギー原子核衝突実験とその理論的解析が行われてきました。これまでに衝突反応によって得られた実験データのベイズ推定による理論的解析を通して、状態方程式や輸送係数といった物性を引き出す研究がなされてきました。

高エネルギー原子核衝突反応は約 10^{-23} 秒という非常に短い時間で起こるにもかかわらず、複雑な過程を経ることがこれまで分かってきました。光の速さの99%以上にまで加速された原子核が持つ大きな運動エネルギーの一部が衝突によって熱エネルギーに転換することで数兆度に達するクォーク・グルーオン・プラズマが生成されます。生成されたクォーク・グルーオン・プラズマは流体のように膨張しながら冷えていき、再び、陽子や中性子、中間子といったハドロン粒子から成るガス状態になります。実験で測定されるのはすべての反応が終わって飛び散ったハドロン粒子のスペクトル（運動量毎の粒子数）です。したがって、このような非常に短い時間しか存在できないクォーク・グルーオン・プラズマの特性は、測定されたハドロン粒子のスペクトルに残された痕跡から間接的に調べることになります。いわば、バラバラになったパズルのピースを再び組み立てるようなものです。ここで、衝突反応の最初から最後まで複雑な過程をどれだけ詳細に理論的に記述できるかが鍵となります。

従来の理論的枠組みでハドロン粒子のスペクトルを解析してみると、非常に小さな運動量の領域の粒子数が実験結果に比べて数十パーセント不足していることが2000年代から問題になっていました。このことは従来の理論的枠組みに含まれない未知の寄与の存在を示唆していました。また、このような基本的な物理量が理論的枠組みを用いて再現できないことから、実験データをベイズ推定による理論的解析を通してクォーク・グルーオン・プラズマ

マの状態方程式や輸送係数を導出する標準的な手法の定量性に疑問が呈されていました。

【研究の手法と結果】

本研究グループは、高エネルギー原子核衝突反応を記述する次世代の枠組みとして、平衡-非平衡共存モデル（正式名称：Dynamical Core-Corona Initialization model）を構築しました（図1）。クォーク・グルーオン・プラズマのような局所的に平衡に達する物質に加え、クォーク・グルーオン・プラズマ中を突き抜けるような大きな運動量を持つ非平衡なクォークやグルーオンの成分も加えたハイブリッドなモデルになります。このような非平衡なクォークやグルーオンは一般的には大きな運動量を持つため、従来はハドロン粒子のスペクトルにおいて大きな運動量の領域で重要であると考えられてきました。本研究では、平衡-非平衡共存モデルを用いて CERN の大型ハドロン衝突型加速器 LHC における鉛相互衝突反応の解析を行いました。すると、この大きな運動量を持つクォークやグルーオンが破碎して（図2）、大量の非常に小さな運動量を持つハドロンを生成することが分かりました（図3）。このように「平衡成分は小さな運動量領域で、非平衡成分は大きな運動量領域で重要である」という従来の常識を覆す結果が得られました。これによって長年、粒子数不足が指摘されていた非常に小さな運動量の領域における新たな起源が大きな運動量を持つクォークやグルーオンの破碎現象と判明しました。いわば、パズルのミッシングピースが見つかったようなものです。

この平衡-非平衡共存モデルを用いて、生成物質の膨張パターンの強さに関する物理量を解析しました。この物理量はクォーク・グルーオン・プラズマの輸送的性質を引き出す際に用いられています。すると、非平衡成分が存在することで、クォーク・グルーオン・プラズマのような平衡成分の膨張のシグナルを薄めることが分かりました（図4）。このことは、既存の平衡成分のみを記述する枠組みを用いてクォーク・グルーオン・プラズマの輸送的性質を引き出す手法に警鐘を鳴らします。更に本研究で構築したモデルのように非平衡成分も同時に記述して、その補正の影響を評価する重要性を提示しています。

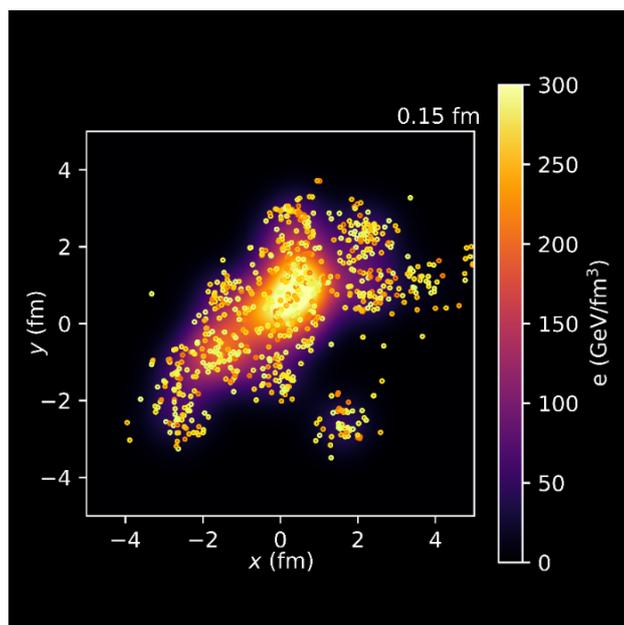


図1：平衡-非平衡共存モデルを用いた鉛相互衝突反応のシミュレーションの例。衝突軸に対して垂直な平面を示している。色のグラデーションが平衡に達したクォーク・グルーオン・プラズマのエネルギー密度分布を表す。黄色の点は平衡に達していないクォークやグルーオンを表す。

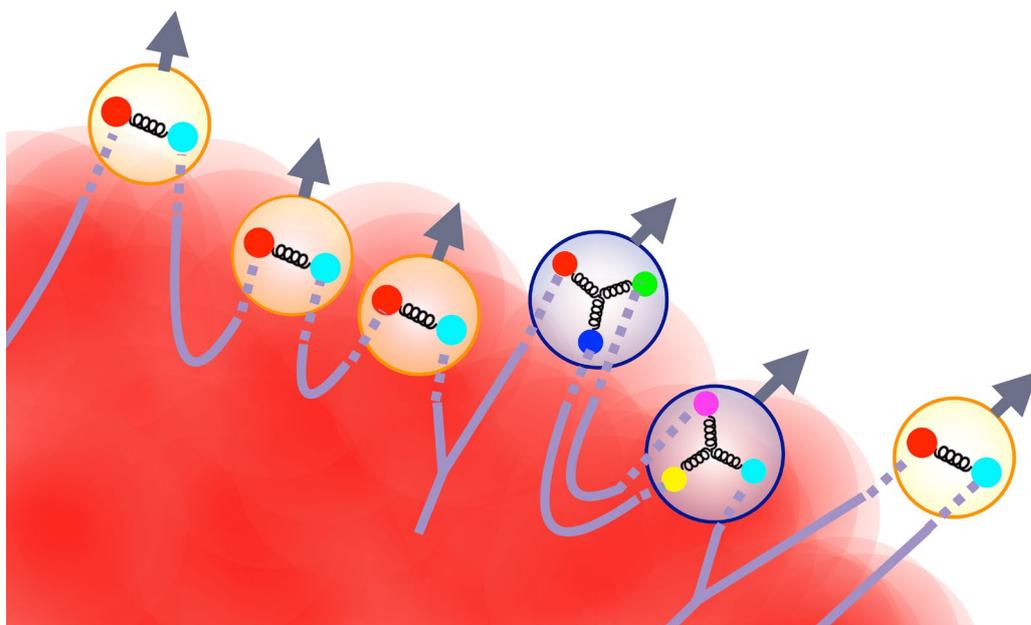


図2：破碎現象の模式図。平衡物質中（赤色の領域）から出てきた非平衡なクォークやグルーオンに付随する強い場から複合粒子であるハドロンが生成される様子を表している。

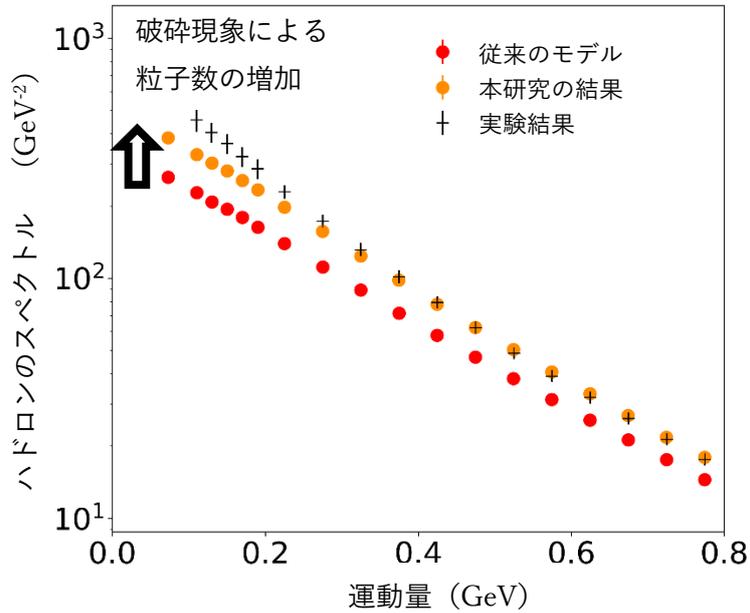


図3：ハドロンスペクトル（運動量毎の粒子数）。従来モデルの結果（赤）に比べて、本研究によって取り入れた非平衡なクォークやグルーオンの破碎現象による寄与を取り入れた結果（橙）は実験結果（十字）をよく再現している。

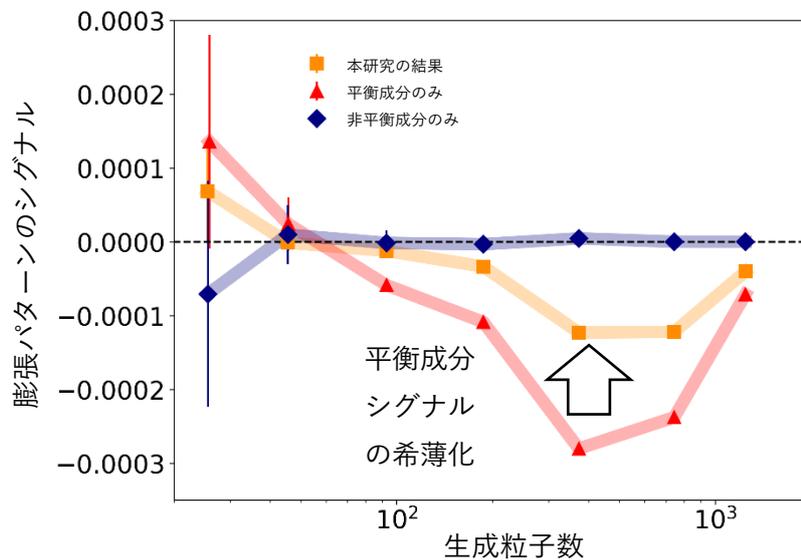


図4：生成物質の膨張パターンのシグナル（縦軸：大きな負の値ほど膨張パターンが強い）の生成粒子数（横軸）依存性。平衡成分のみ（赤）に比べ、非平衡成分も取り入れた場合（橙）は膨張パターンのシグナルが希薄化され、絶対値が小さくなっていることが分かる。非平衡成分のみ（青）では膨張パターンが無いので、ゼロとなる。

【今後の展望】

今後、高エネルギー原子核衝突反応を通してクォーク・グルーオン・プラズマの特性を引き出す物理は、より精密な方向へ進んでいきます。その際、非平衡成分、特に、大きな運動量を持つクォークやグルーオンの破砕現象が重要な役割を果たし、この寄与を取り入れることで初めて定量的に信頼できるクォーク・グルーオン・プラズマの特性を引き出すことが可能になります。

【用語解説】

(1) 高エネルギー原子核衝突実験：原子核を光速の99%以上に加速し、衝突させることにより、その大きな運動エネルギーの一部を熱エネルギーに転換し、素粒子極限物質「クォーク・グルーオン・プラズマ」の物性の解明を目指す実験。CERN（欧州原子核研究機構）の大型ハドロン衝突型加速器（Large Hadron Collider: 略してLHC）やブルックヘブン米国立研究所の相対論的重イオン衝突型加速器（Relativistic Heavy Ion Collider: 略してRHIC）などで主に行われている。

(2) クォーク・グルーオン・プラズマ：物質の基本構成要素である「クォーク」とそれらの間に力を伝える「グルーオン」からなる温度にして数兆度の達したプラズマ状態。ビッグバンから約10マイクロ秒後の宇宙初期に宇宙全体を満たしていた。

(3) ハドロン粒子：クォークやグルーオンから成る強い相互作用をする複合粒子。クォークやグルーオンがカラー荷を持っているのに対し、それらが複数集まることでカラー荷が中性（白色）になった状態。

(4) 破砕現象：カラー荷を持ったクォークやグルーオンに付随する強い場から、複合粒子であるハドロンを生成する過程。

【論文情報】

掲載誌：Physical Review C

論文題目：Nonequilibrium components in the region of very low transverse momentum in high-energy nuclear collisions

著者：Yuuka Kanakubo, Yasuki Tachibana, Tetsufumi Hirano

論文掲載日：2022年11月18日

DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.106.054908>

【付記】

今回の研究の一部は、JSPS 科学研究費補助金（課題番号：20J20401）の助成を受けました。

【問い合わせ先】

・研究全般に関すること

上智大学 理工学部 機能創造理工学科・教授

平野 哲文（ひらの てつふみ）

Tel: 03-3238-3434

E-mail: hirano@sophia.ac.jp

上智大学 大学院理工学研究科・博士後期課程3年

（現ユヴァスキュラ大学・博士研究員 兼 上智大学・理工共同研究員）

金久保 優花（かなくぼ ゆうか）

E-mail: yuka.y.kanakubo@jyu.fi

国際教養大学・助教

橘 保貴（たちばな やすき）

Tel: 018-886-5940

E-mail: ytachibana@aiu.ac.jp

広報に関すること

上智大学 広報グループ

E-mail: sophiapr-co@sophia.ac.jp

国際教養大学 研究・地域連携支援課

E-mail: research@aiu.ac.jp