

ALICE FoCal 実験で拓く新しい量子色力学と宇宙初期物質QGP誕生の謎

	研究代表者	筑波大学・数理論系・講師 中條 達也 (ちゅうじょう たつや) 研究者番号：70418622
	研究課題情報	課題番号：24H00003 研究期間：2024年度～2030年度 キーワード：高エネルギー重イオン衝突、クォーク・グルーオン・プラズマ、カラーガラス凝縮、初期宇宙、LHC加速器

なぜこの研究を行おうと思ったのか（研究の背景・目的）

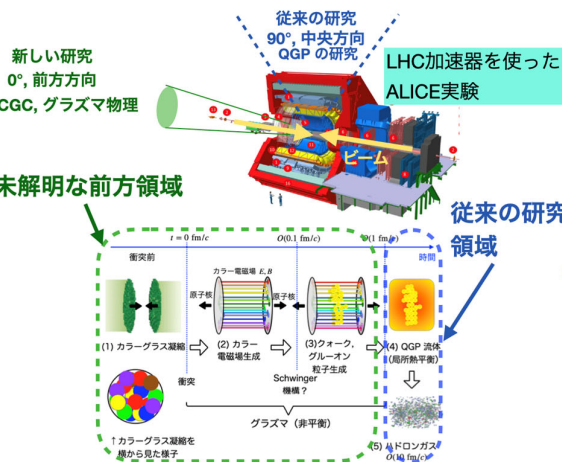
●研究の全体像

ビッグバン理論によれば、宇宙開闢から数10^μ秒後の初期宇宙では、温度が数兆K以上の超高温状態であり、陽子が誕生する前の素粒子のスープ、「クォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)」であったと考えられている。2000年代より、私たち日本の高エネルギー重イオン実験グループは、重イオン衝突実験を行い、QGPの生成を確実なものにし、QGPの性質について数多くの重要な発見に貢献してきた。しかしながら、重要な未解明な点が2つある。1つは、宇宙初期物質QGPはどの様に誕生するのか。もう1つは、QGP生成前の初期状態、高密度グルーオン物質「カラーガラス凝縮 (CGC)」は存在するのか、それはどのような性質を持っているのか、という点である。

これらの点を世界で初めて明らかにするため、私たちは、我が国11機関からなる「FoCal 日本グループ」を組織し、我々が提案・開発した前方カリメータ検出器「FoCal」を新たに建設、LHC 加速器ALICE 実験の超前方に導入する。FoCal は、従来測定されてきたパートン運動量割合 (x) の1/1000 という圧倒的な小さな x 領域における測定が可能で、かつ直接光子、ハドロン、ジェットといった様々なCGCに敏感なプローブを測定できる、世界初の検出器である。この領域には未発見のカラーガラス凝縮の出現が予想されており、宇宙初期物質QGPの生成メカニズムを解く鍵がある。私たちはFoCal でCGC生成のシグナルを世界で初めて明確に捉え、幅広い運動学的領域でその発展を測定し、強い力の基本理論「量子色力学」の新しい世界を切り拓く。当該研究を牽引してきた日本の実験、理論研究者が結集し、私たちの独自性と創造性を発揮しながら、世界に先駆けて宇宙初期物質QGPの生成機構を突き止める。

LHC加速器・超前方で世界初測定

問1) 宇宙初期物質QGPの誕生の謎



問2) カラーガラス凝縮 (CGC) はあるか？

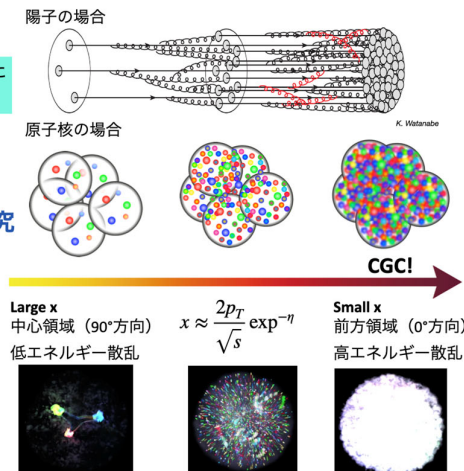


図1 研究全体のイメージ図

●研究の独自性

本研究の独自性は以下の2点である。

- 1) エネルギーフロンティアLHC加速器の超前方を利用し、CGCの証拠・発展を世界初測定すること
- 2) 独自技術；世界最高の直接光子測定能力と多様なプローブ検出能力を有すること

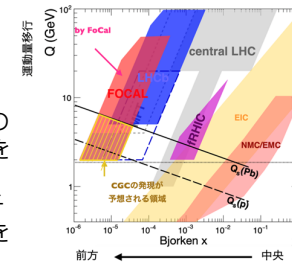


図2 CGCの発見と発展

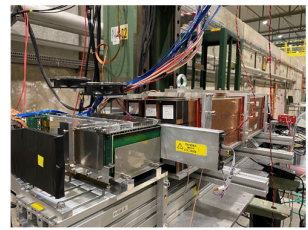


図3 FoCal 試作機の写真 (科研費・基盤(S) 20H05638)

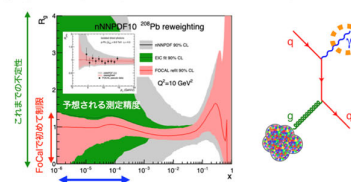
- 1) に関しては、従来のRHIC 加速器を用いた測定では $x = 10^{-2} \sim 10^{-3}$ の領域が限界であったのに対し、世界最高衝突エネルギーを供するLHC 加速器の超前方領域をカバーすることにより、CGC の効果が顕著に現れる $x = 10^{-6}$ の領域の測定が世界で初めて可能となる。さらに、2) の独自技術により、これまで測定が難しかった直接光子と呼ばれる CGC に敏感なプローブを、LHC 超前方で捉えることが可能である。すなわち 1) と 2) を組み合わせることによって、CGC といった新現象の理解、および初期宇宙物質 QGP が如何に作られたのかという根源的な疑問に、今回初めて答えを出すことができる。

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

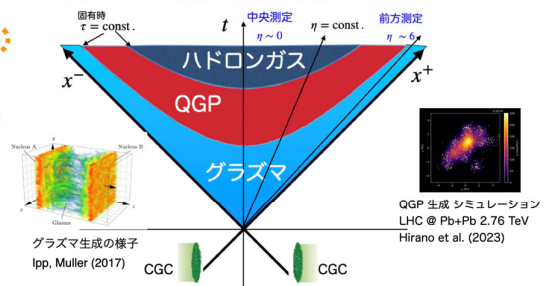
●研究計画

本研究では (1) 原子核内部のグルーオン密度分布の測定、(2) カラーガラス凝縮(CGC) の発見・発展、(3) QGP 生成機構、早期熱化機構の解明、を目標とする。そのため以下の研究を実施する。(I) FoCal 検出器の主要部FoCal-E PAD 検出器を日本チームで製作・導入・運用、(II) 2029-2032 年 LHC 第4 期衝突実験で物理データを取得し、データ解析を実施、結果を公表、(III) 理論研究班を組織し、これまで解明が困難であったカラーガラス凝縮の生成発展、カラー電磁場強度の理論計算、クォーク・グルーオン生成とカラー場の相互作用、QGP 早期熱化機構、グルーオンの物理、QGP 流体生成に関する理論的研究の推進。

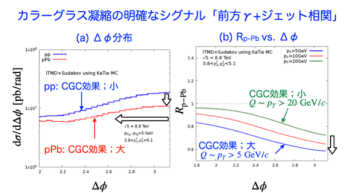
(1) 原子核内部のグルーオン密度分布の測定



(3) QGP 生成機構、早期熱化機構の解明



(2) カラーガラス凝縮(CGC)の発見・発展



前方測定：QGP 生成の影響が少ない「グルーオン」の情報に直接アクセス！

- ・実験：FoCal、ALICE 中央、μ検出器で包括・相関測定
- ・理論1)：CGC からグルーオン生成・発展
- ・理論2)：グルーオンからQGP 流体・ハドロン化

図4 FoCal で新たに分かること

●学術的意義と波及効果

本研究により、強い力の理論、量子色力学(QCD) の本質が明らかになる。カラーガラス凝縮(CGC) の生成はグルーオンの3点相互作用が存在することに起因しており、CGCはこの3 点相互作用がなければ存在し得ない。CGC を見ることは、QCDの最も特徴的な性質を直接見ることになる。また本研究は「強いカラー場」を扱う。中でも Schwinger 機構によるクォークの瞬時生成と早期熱化機構の理解は、初期宇宙物質QGP 誕生の鍵を握る。その他、FoCal 技術を使ったがん診断・治療技術「プロトンCT」や、FoCal 技術を米国EIC 加速器の検出器に応用する計画がある。