

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔令和4（2022）年度 中間評価用〕

令和4年3月31日現在

研究期間：2020年度～2024年度
課題番号：20H05638
研究課題名：LHC 超前方光子測定によるグルーオン飽和と QGP 生成起源

研究代表者氏名（ローマ字）：中條 達也（CHUJO Tatsuya）
所属研究機関・部局・職：筑波大学・数理物質系・講師
研究者番号：70418622

研究の概要：

素粒子に働く「強い力」を記述する量子色力学 (QCD) において、未発見な状態、「カラーグラス凝縮 (CGC)」が存在する。この状態は高密度グルーオン物質であり、高エネルギー重イオン衝突で出現するクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) の初期状態と考えられている。本研究では高精細電磁カロリメータ検出器「FoCal」を日本主導で ALICE の超前方に一部先行して建設し、CGC 等の新現象を世界で初めて測定する。

研究分野：物理学、原子核物理学、素粒子物理学

キーワード：カラーグラス凝縮、グルーオン飽和、クォーク・グルーオン・プラズマ、シリコン検出器

1. 研究開始当初の背景

CGC は「強い力」に対する我々の理解の根源に関わっている。これまで多くの探査が行われてきたが、明確なシグナルは得られていない。これまでの研究において、我々は高粒子密度下でも透過プローブを捉えることができる高精細シリコン電磁カロリメータ検出器「FoCal」を開発した。この FoCal の一部を LHC 加速器 ALICE 実験の前方に先行して建設設置することによって、中性中間子測定と既存の ALICE 検出器を組み合わせ、CGC の存在を実験的に探査することができるのではないかと考えた。

2. 研究の目的

今回導入する FoCal 検出器と、既存の ALICE 検出器群を用いて、主に π^0 中間子とその相関測定から、以下の点を明らかにする。(1) グルーオン密度の飽和がどこで出現するのか (カラーグラス凝縮 CGC の発見)、(2) 小さな衝突系で現れるリッジ構造について、より広範囲な $\Delta\eta$ 領域、かつ透過的なプローブで探査する (QGP 生成の起源、早期熱化機構)、(3) 超前方領域 ($3.5 < \eta < 4.5$) におけるジェット抑制効果の世界初測定 (Pb-Pb)、前方 QGP 流体発展。これらの知見は、重イオン衝突における QGP 生成メカニズムの全容を明らかにし、量子色力学的相図の新展開が期待される。

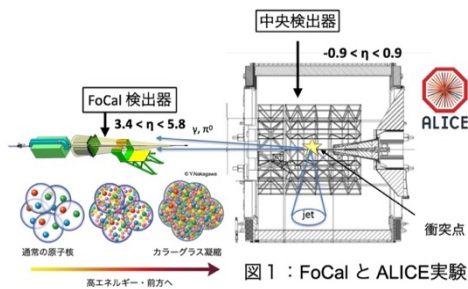


図1：FoCal と ALICE 実験

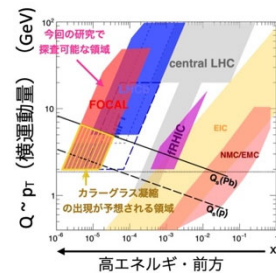


図2：FoCal で探査する新しい領域

3. 研究の方法

CGC の明確なシグナルを得るためには、(1) 超前方 (ビーム軸ゼロ度方向) の測定、(2) 高エネルギーの重い原子核ビームの使用、(3) グルーオン密度に敏感なプローブの識別、の3点が重要である。そこで本研究では、世界最高エネルギーの鉛原子核ビームを供給することができる加速器 LHC (Large Hadron Collider・CERN 研究所 (スイス)) を用い、ALICE 実験の超前方方向に FoCal を設置し、グルーオン密度に敏感なプローブである崩壊光子 (π^0 中間子の相関測定) を世界で初めて捉える。日本がプロジェクトを主導し、FoCal におけるエネルギー測定的主要部である「FoCal-E PAD」検出器を製作する。さらに2025年の LHC 第3稼働機・最終年に、製作した FoCal モジュールの一部を ALICE 実験に先行して導入し、初期物理データを取得、データ解析を行う。

4. これまでの成果

本研究の最初の2年度においては、FoCal 検出器の最終 R&D を行い、技術デザイン書 (Technical Design Report, TDR) 策定に必要な基礎データの取得を行なった。TDR 策定には新たな試作機を製作し、その性能を評価する必要がある。そのため、国内外の加速器施設を用いて試作機のテストビーム実験を行った。1年目の2020年度では、FoCal-E PAD 検出器のP型シリコンセンサーのデザインを新たに行い、発注した。その後、センサーの納品を受けて検出器を製作し、2020年度では東北大学・電子光物理学研究センター (ELPH) の GeV・ガンマ テストビームラインにてテストを行った。その結果、最小電離粒子 MIP のシグナルが確認された。その後、宇宙線を使ったテストを行い、MIP シグナルを測定し、所定の性能を有していることを確認した。中條は FoCal プロジェクトを代表して、ALICE 実験でのプレナリー会合で、本結果を含む現状を報告した (2021年3月)。

2年目の2021年では、FoCal 実機で使用する読出しフロントエンド集積回路「HGCROC」を使った新たな基板を、仏・Grenoble LPSC と協力し、開発・製作を行った。この基板に P 型シリコンセンサーを組み合わせて、CERN SPS 加速器を使ったテストビーム実験を行った。最小電離粒子のシグナルが明確に観測されていること分かり、20~80 GeV/c の電子ビームを照射し、電子シャワーの観測にも成功した。これらの結果と Pixel 検出器、ハドロンカロリメータ検出器の実験結果を合わせて、CERN EP newsletter に記事を投稿し、掲載された。

加えて、これまで我々が開発してきた FoCal 第1号試作機の論文の出版、および2018年に製作した FoCal 第2号試作機 (mini-FoCal) のデータ解析を完了した。放射線耐性を調べるため、理研小型中性子源 RANS を用いて実験を行った。FoCal 日本グループは、筑波大、筑波技術大、理研、奈良女子大、広島大、長崎総合科学大、佐賀大の7機関、18名となり、FoCal 国際コラボレーションの中において、FoCal-E pad 検出器の責任機関であると同時に、読み出しシステム、トリガー開発においても中心的な位置を占めている。

5. 今後の計画

【令和4(2022)年度】

FoCal-E pad 第3試作機を作成し、ビーム試験を行い、性能を評価する。製作するモジュールは計20モジュールであり、そのうち18モジュールを電磁カロリメータ検出器として組み上げ、テストする。まず6月に CERN PS 加速器を用いてテストを行う。KEK PF-AR 加速器でのテストビームラインの利用も検討する。9月および11月には、FoCal-E pad に加えて、pixel, FoCal-H 検出器も合わせた統合試験を CERN SPS テストビームライン (H8, H2) で行う。これが TDR に向けた最終テストとなる。加えて、RANS を用いた放射線耐性テストを継続する。同時に、RHIC 加速器を用いた FoCal テスト計画の策定、5 pad layer の基板作成とテストを実施する。加えて実機用のシリコンセンサーと、タングステン合金板 (5 pad layer 用) を必要分発注する。データ解析に向けた ALICE コンピューティングサイトの構築を筑波大にて行う。

【令和5(2023)年度】

TDR を作成し、LHCC 委員会に提出する。LHCC における TDR の承認を持って、FoCal 建設が認められるため、非常に重要なステップである。5 pad layer モジュール製作の作業工程を定め、製作を開始する。これが FoCal 第4試作機となる。製作後は KEK PF-AR テストビームラインを用いて、各 layer の最小電離粒子シグナルを捉え、ゲインの較正を行う。FoCal 第3試作機を RHIC 加速器に持ち込み、試験読み出しを行う。

【令和6(2024)年度】

FoCal 第4試作機を ALICE 前方、衝突点から7mの位置に設置する。2025年は LHC-Run-3 の最終年にあたる。そこで2024年に ALICE に導入した FoCal を使い、今回初めて中性パイ中間子 (π^0) を再構成し、横運動量分布を測定する。FoCal を用いた最初の物理論文とする。取得したデータは随時解析を行い、 π^0 - π^0 相関から CGC の兆候が見られるかどうか、世界初の測定を行う。これらの初期結果を、国際会議 Hard Probes 2024 会議 (350人規模、議長: 中條、開催地 長崎) にて発表する。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

- T.Awes, *[T.Chujo](#), [M. Inaba](#), [Y. Miake](#), [N. Novitzky](#), [M. Shimomura](#), [T. Sugitate](#) et. al., "Design and performance of a silicon-tungsten calorimeter prototype module and the associated readout," Nucl. Instrum. Meth. A **988**, 164796 (2021), doi:10.1016/j.nima.2020.164796, [arXiv:1912.11115].
- 2021年度 BEST FACULTY MEMBER 受賞、中條達也、筑波大学 (2022年2月)

7. ホームページ等

LHC ALICE 実験日本グループ ホームページ
<http://alice-j.org>