

学位論文要旨

Physics Impacts of DAQ and Triggers at Large-Scale Hadron Collider Experiments and a New Detector Control and Monitoring Scheme to Achieve the Impact at ALICE

(大規模ハドロン衝突型加速器実験における
トリガー・データ収集系の物理への影響と ALICE 実験における新規検出器制御監視系)

氏名 山川皓生

20世紀初頭から素粒子・原子物理学は技術的進展、特に加速器の重心系衝突エネルギーの向上によって発展してきた。2009年に世界最大の加速器 LHC が始動した。2022年開始する第3期衝突実験では陽子衝突において重心系衝突エネルギー14 TeV、鉛原子核衝突において核子対あたり 5.5 TeV に達する。現在、加速器高度化の潮流は高輝度化であり、2028年には LHC 加速器の設計輝度を5倍から7.5倍増加した高輝度 LHC が始動予定である。

高エネルギーかつ高輝度な LHC 加速器において推進すべき物理課題として陽子衝突実験による標準模型の検証がある。ヒッグス粒子と標準模型粒子との結合、ヒッグス粒子の自己結合、そして B 中間子および D 中間子の稀崩壊を利用した CP 対称性の破れの測定である。標準模型を超えた物理として、超対称性粒子を代表とする新粒子探索も陽子衝突実験の物理である。LHC 加速器のもうひとつの柱である重イオン衝突実験では、クォーク・グルーオンプラズマの物性解明が行われる。LHC 加速器の高輝度化による利点を最大限活かすには実験側の高度化が不可欠である。そのひとつがトリガー・データ収集系の高度化である。

加速器実験において全衝突事象取得が理想的であるが、技術的に困難であり、トリガー方式のデータ収集系が広く使われていた。最近のデータ転送高速化、高性能かつ安価な CPU、記憶媒体の登場によって連続読出し方式の実現が可能になってきた。しかし依然として取得したデータすべての保存は難しく、実時間データ処理によるデータ量削減が不可欠である。

LHC 加速器における四大実験のうち ALICE 実験および LHCb 実験がトリガー方式から連続読出し方式へ移行する。クォーク・グルーオンプラズマの物性研究を主目的とする ALICE 実験では温度などの検出器状態を用いて、データ較正、不要データ削除および飛跡再構成によってデータ量を削減する。同様に、 CP 対称性の破れの測定を主目的とする LHCb 実験においてもデータ較正、飛跡再構成によってデータ量を削減する。加えて B 中間子、 D 中間子崩壊トポロジーを用いて、衝突点情報と B 中間子、 D 中間子崩壊粒子の飛跡を保存することでデータ量を削減する。対してヒッグス機構の解明および超対称性粒子などの探索を目的とする ATLAS 実験、CMS 実験はトリガー方式を継続し採用する。現在使用しているトリガーに10倍程度の高速化の余地があること。そしてヒッグス粒子、超対称性粒子ともに非常に大きな質量をもち、高エネルギーな信号として検出される。これらの理由によってトリガー方式

を継続採用し、トリガー高度化による衝突事象選択が最適解である。

連続読出し方式では全衝突事象取得が可能である。しかし現状、実時間データ処理で扱うことのできる生データの量には数 TB/s の限度がある。トリガーを継続し採用する ATLAS 実験および CMS 実験が高輝度 LHC において全衝突事象取得をした場合、生データ量は ATLAS 実験では 200 TB/s、CMS 実験では 336 TB/s と非常に多く連続読出し方式は採用できない。一方で、トリガーの高速化も技術的限界に近付いている。今後の技術発展によって、ATLAS 実験や CMS 実験などにおいても連続読出し方式が採用される可能性がある。

連続読出し方式は様々な加速器実験が目指すべき様式であり、ALICE 実験はその先頭を走っている。ALICE 実験における実時間データ処理は読出基板を含めた検出器状態を必要とし、第一段階処理であるデータ校正、不要データ削除はデータ取得直後に行うため、物理データと検出器状態を同じデータパスで読み出す。以前はデータ保存後に処理を実施していたため、物理データと検出器状態は別のデータパスで読み出していた。ゆえに、新たな検出器制御監視系の開発が必要である。新検出器制御監視系に基づき新検出器前方ミュオン粒子飛跡検出器のための制御監視系を設計、開発した。これはすでに導入済みの検出器に先んじて開発した制御監視系であり、モデルケースとなる。開発した前方ミュオン粒子飛跡検出器検出器制御系および ALICE 実験連続読出しデータ収集系の試験を LHC 加速器陽子-陽子衝突を用いて、2021 年 10 月末ごろ実施した。前方ミュオン粒子飛跡検出器検出器では荷電粒子のヒット情報、そしてデータ収集系の実時間データ処理によって荷電粒子の飛跡が得られた。この試験で、前方ミュオン粒子飛跡検出器検出器および ALICE 実験連続読出しデータ収集系が正しく動作することが確認でき、完成した。これによって 2022 年 4 月開始予定の ALICE 第 3 期実験における物理の幕を開けた。