

## 高エネルギー重イオン衝突実験によるクォークグルーオンプラズマ相の解明

### ① 計画の概要

我々を取り巻くハドロン物質は、超高温・高密度の極限状況下では、ハドロン内部にあるクォークが閉じ込めから解放され、クォークとグルーオンからなるクォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)に転移する。この QGP を実験的に生成する唯一の手法が高エネルギー重イオン衝突である。現在は、RHIC 加速器(米国 BNL 研究所)および LHC 加速器(CERN 研究所)が稼働しており、これまで「高温度・高密度クォーク物質」「完全流体のクォーク物質」「小さいサイズのクォーク物質」など、従来の予想を覆す多くの成果を上げてきた。

本計画は、この RHIC と LHC の二大重イオン加速器を用いて、高エネルギー重イオン衝突実験を国際協力の下で推進する。さらに、ドイツの GSI 研究所に新規建設中の FAIR 加速器を用いた重イオン衝突実験への参加を検討する。RHIC、LHC、そして FAIR の高輝度重イオンビームを生かして、QGP の物性(輸送特性や状態方程式)と QCD 物質の相構造及び相転移機構(臨界点、クロスオーバー・一次相転移)を、温度や密度の関数として初めて精密に測定し、極初期宇宙のような高温状態や中性子星内部のような高密度状態における物質の存在形態と性質に関する知見を得る。LHC-ALICE 実験及び RHIC-sPHENIX 実験は、高温度領域における QGP の物性研究を展開する。QGP の精密研究を実現するための主要測定装置の高度化や新規建設を日本グループが先導する。RHIC-STAR 実験及び FAIR-CBM 実験は、高密度領域における QCD 相構造の研究を推進する。さらなる研究の進展を目指し FAIR-CBM 実験への参加を検討する。

LHC、RHIC、FAIR での膨大な重イオン衝突のデータ解析と、QGP 物性や QCD 相構造の決定に不可欠な理論・現象論的計算を実行する大規模なコンピューティングセンターを設立し、日本の先導性をさらに高める。

### ② 学術的な意義

クォーク・グルーオンの単体としての運動は、強い相互作用の基礎理論である量子色力学(QCD)により記述される。QGP は、高温・高密度下で実現し、多くのクォークとグルーオンが互いに相互作用することによって特異な性質が発現する創発性に富む物質である。極限状況下で姿を見せる様々な臨界・相転移現象(超電導や超流動など)と同様に、QGP の性質や QCD 物質の相構造を解明することで、強い相互作用に支配された系のもつ普遍的性質が明らかになる。

超高温 QGP はビッグバンによる宇宙開闢直後の宇宙の姿である。QGP の性質研究は、初期宇宙の物質構造と物質創成の謎を明らかにする。また、QGP は、クォークがハドロン閉じ込めから解放され、裸の質量を持つ相(カイラル対称性の回復した相)でもある。この研究は、QCD の基本問題である「クォークの閉じ込め・ハドロン質量獲得」という物質生成と質量の謎に迫る。

高密度側においては、臨界点や一次相転移境界があることが予想されているが、理論的確定は困難を極める。通常の核密度の 5-10 倍程度に到達するには、この高エネルギー重イオン衝突しか方法がなく、実験結果に期待がかかる。そしてこの研究は、中性子星の内部構造の解明に直結する。

QGP が持つ流体的な性質は、QGP が非常に強く結合した系であることを示す。強結合系という横糸で、半導体中の高密度電子ホール系や超低温フェルミガス系+AdS/CFT 対応理論を含んだ、原子核物理と物性物理を融合した新領域の創生に繋がる。

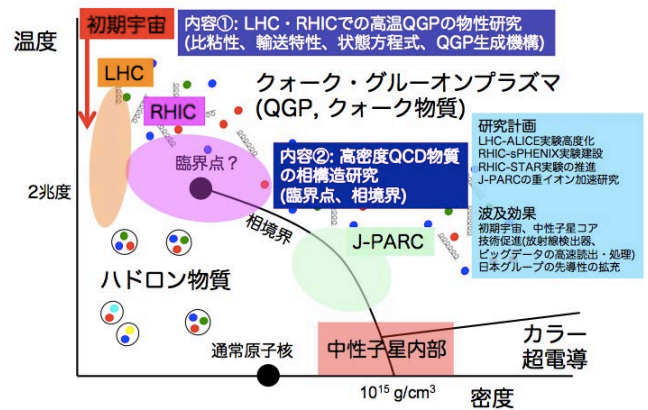
ALICE 実験高度化は様々な最先端技術の結集である。高放射線耐性を持つガス検出器や数マイクロメートル角に細分化されたシリコンピクセル検出器、FPGA や GPU を用いた大容量の高速データ収集・処理系がその例である。特に、FPGA や GPU による超広帯域リアルタイムデータ処理は、自動運転や識別といった即時性が求められる大容量データ処理技術の発展に繋がる。

### ③ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

高エネルギー重イオン衝突による QGP 物性の精密研究や QCD 物質の相構造研究は、原子核物理における最も重要な研究課題の一つである。それを実現する LHC-ALICE 実験高度化や RHIC-sPHENIX 新実験、RHIC-STAR 実験や FAIR-CBM 新実験は最優先事項であり、米国 NSAC や欧州の NuPECC が策定する原子核物理に関する長期計画レポートにも纏められている。

日本グループは 1980 年代から、高エネルギー重イオン実験の最先端を走ってきた。RHIC-PHENIX 実験や LHC-ALICE 実験においても、測定器建設から物理解析にいたるまで日本グループの寄与は非常に大きく、LHC-ALICE 実験高度化、RHIC-sPHENIX 新実験、RHIC-STAR 実験や FAIR-CBM 実験においても大きな貢献と牽引的役割が期待されている。また、膨大なデータ量を効率的に解析するための大規模なコンピューティングセンターの設立が急務となっている。これまでの経験を生かし、主要な測定器の建設から大規模なコンピューティングセンターの設立を完遂することは、日本グループが引き続き世界を先導することに繋がる。

ハドロン物質・クォーク物質 (QGP) の相構造



#### ④ 実施機関と実施体制

大型国際共同実験(LHC-ALICE、RHIC-sPHENIX、RHIC-STAR、FAIR-CBM 実験)を主導的に継続するにあたり、研究基盤組織の形成は必須である。本研究は、長崎総合科学大学・新技術創成研究所が研究母体となり、国内外研究機関や関連分野と連携しながら、各実験の物理成果が最大となるような研究基盤の形成や研究計画の立案に責任を担う。また、実験の最前線にて関連研究を推進すべく、CERN 研究所などに当研究所の海外拠点を設置し運用する。さらに、大規模コンピューティングセンターの立案や設立に責務を担う。本計画の参加機関との間で計画の立案や実施、運営に関する議論を行い、国際的学術コミュニティと緊密な連携をもって計画を推進する。LHC-ALICE 実験日本グループ代表である大山健氏(同研究所基礎科学部門長ならびに長崎総合科学大学副学長)が、本研究計画において主導的役割を果たす。

筑波大学は、LHC-ALICE 実験高度化において、前方カロリメータの建設を主導する。前方での光子の測定を高精度で行い、QGP の初期条件や QGP の生成機構を解明する。東京大学原子核科学研究センターと長崎総合科学大学や原子核機構は、中央ガス飛跡検出器の高度化と大容量実験データのリアルタイム処理系の開発を完遂する。重クォークや熱的電子対やベクトル中間子の高精度測定から、QGP の詳細研究を進める。広島大学と奈良女子大学は前方シリコンピクセル検出器の建設を進め、ミュオン対測定によるカイラル対称性回復に関する研究を展開する。理化学研究所と奈良女子大学は RHIC-sPHENIX 実験のシリコン飛跡検出器の量産と建設を主導し、その後の物理解析を主導する。筑波大学は RHIC-STAR 実験を展開し、揺らぎなどの測定から QCD 相構造の研究を進める。

#### ⑤ 所要経費

本研究の総額は60億円である。

LHC-ALICE/RHIC-sPHENIX/RHIC-STAR/FAIR-CBM 実験の遂行費と国内外における研究拠点の設置・運営費、研究者の雇用、海外研究における旅費・滞在費として、1億円/年を計上する。

LHC-ALICE 実験高度化において、中央飛跡ガス検出器と FPGA を用いた大容量データの処理システム、前方のシリコン検出器、前方カロリメータ検出器の量産と建設を進めるために、合計10億円(主に設備費)を見込む。また、2030年以降のALICE実験に向けた次世代シリコンピクセル測定器の開発費(合計5億円、主に設備費)を計上する。

RHIC-sPHENIX 実験用のシリコン飛跡検出器の量産と建設に合計5億円(主に設備費)を計画する。RHIC-STAR 実験では不足分のコンピューティング資源をBNLに設置する。これに5億円(設備費)を見込む。

コンピューティングセンターの設立と運用に合計25億円を見込む。設置場所(既に検討済み)であり、インフラの整理、計算機・ストレージ・ネットワークの整備に20億円を要し、その後運用費に5億円/年を見込む。

#### ⑥ 年次計画

本計画の実施期間は、H31年(2019)からR11年(2029)の10年間である。

LHC-ALICE 実験高度化を2019-2020に進める。ガス電子増幅器を使った中央飛跡ガス検出器の高度化、大容量のデータ処理ボードの量産と導入、前方シリコン飛跡検出器の量産と建設をCERNにて主導する。また、2024-2026に、新たな高度化計画として議論中である前方カロリメータの量産と建設を主導する。2021-2023及び2026-2029にALICE実験高度化による重イオン衝突データ収集を行い、高度化によって初めて高精度測定が可能となる重クォーク・レプトン対・フォトンを中心にQGPの物性研究を展開する。さらに、2030年以降のALICE実験に向けた次世代シリコンピクセル検出器の基礎・応用開発を2023年から進める。RHIC-sPHENIX 実験のシリコン飛跡検出器の量産と建設を2022年まで完遂する。2023-2028年に重イオン衝突を行い、sPHENIX 実験で初となるジェットや重クォーク・クォークoniumの高精度測定を通じてQGPの物性研究を展開する。RHIC-STAR 実験では、早急にコンピューティング資源をBNLに導入し、2019-2021年に行われる衝突エネルギー走査実験を遂行し、データ解析を効率的に進め、QCD物質の相構造研究を展開する。FAIR-CBM 実験への参加計画を議論・立案し、2020年頃の実験参加を目指す。LHC-ALICE 実験やRHIC-sPHENIX 実験のデータ解析拠点やQGP物性研究やQCD相構造研究の理論・現象論計算拠点となる新しいコンピューティングセンターを設立する。2020年までに仕様を策定し、2023年の完成と運用開始を目指す。

国内研究拠点の形成やCERN 研究所などに当センターの海外研究拠点を設置し、最前線基地として関連研究を推進する。

#### ⑦ 社会的価値

日本グループが主導してきたRHIC-PHENIX 実験では、高温QGPの生成とその性質に関する学術成果を、マスメディア、新聞、科学雑誌を通じて国民へ発信してきた。

高温高密度という極限状況下で顕在するQGPは、ビッグバンから始まる宇宙開闢直後の物質の姿として大いに人々の関心を得ており、また固体・液体・気体・プラズマに次ぐ新しい物質状態として、私たちの物質観に非常に重要な知的価値を与える。高密度領域におけるQCD物質の相構造研究は、中性子星の内部構造や中性子星合体の時空発展や重元素合成の理解に必須である。

新技術を基にした測定器開発は、汎用的・特殊用途的な放射線計測技術の発展に繋がる。シリコンピクセル検出器や放射線ガス検出器の開発は、各種放射線測定機器、放射線治療機器、非破壊検査機器の技術促進に繋がる。大容量データの高速読出・処理系の開発は、高解像度の高速イメージング、ロボット工学、自動運転技術などの瞬発性が求められるIT分野に多大な発展をもたらす。

また、国際共同実験、海外拠点における研究活動を通じて、国際的に活躍できる若手研究者を輩出する点も重要である。

#### ⑧ 本計画に関する連絡先

田中 義人(長崎総合科学大学・新技術創成研究所)