

国際高エネルギー量子科学フロンティア：海外施設で展開する QCD 研究

① ビジョンの概要

国際高エネルギー量子科学フロンティアでは、CERN(欧)、BNL(米)、GSI/FAIR(独)などの海外の大型加速器施設を用いた国際共同高エネルギー原子核実験を推進し、クォークやグルーオンの動力学(QCD)の基本原則や初期宇宙や中性子星内部の高温高密度クォーク・グルーオン物質の全容を解明し、新しいQCD物理学を開拓するとともに、QCD研究に関する日欧米の国際連携網を構築する。

② ビジョンの内容

国際高エネルギー量子科学フロンティアは、高エネルギー領域の基本自由度であるクォークやグルーオンの世界を中心に、クォーク・グルーオン、ハドロン、原子核階層を持つ多様な世界を、QCDという基礎理論をもとに解明する。

具体的には、初期宇宙のような高温極限状態で実現されるクォーク・グルーオンプラズマ、中性子星内部のような高密度ストレンジネス核・クォーク物質、高エネルギー核子や原子核内のクォーク・グルーオン構造が研究の対象である。CERN(欧州)、BNL(米)、GSI/FAIR(ドイツ)などの海外の大型加速器施設を用いた国際共同高エネルギー原子核実験を推進し、QCD理論や数値計算QCDとの協働により、QCDが持つ基本的性質やQCD多体系の創発的性質を明らかにする。素粒子階層の物性研究を通じて、素粒子物理学・物性物理学をつなぐ普遍的な自然法則の探求を行う。QCD研究に関する、日欧米の国際ネットワークを構築し、実験技術や知や人の国際循環を活性化し、世界を牽引する国際的な次世代の研究者を育成する。

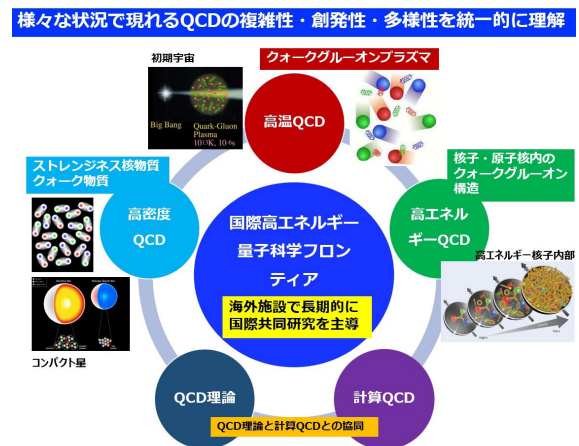


図1 本学術振興のビジョン

③ 学術研究構想の名称

国際高エネルギー量子科学フロンティア：海外施設で展開する QCD 研究

④ 学術研究構想の概要

国際高エネルギー量子科学フロンティアでは、CERN(欧州)、BNL(米)、GSI/FAIR(ドイツ)などの海外の大型加速器施設を用いた国際共同高エネルギー原子核実験を推進する。CERNでは、世界最高エネルギーのLHC加速器を用いたクォーク・グルーオンプラズマの「高温QCD物理」を展開する。LHC加速器を用いたALICE実験にて、2022-2032年の10年間で、これまでの100倍のデータを収集し、クォーク・グルーオンプラズマの精密測定を実現する。日本グループは、クォーク・グルーオンプラズマの更なる高精度測定に向け、前方カロリメータ計画やALICE3計画など、ALICE実験の高度化将来計画を主導する。GSIとその後継で現在建設が進められているFAIR加速器施設において、「高密度QCD物理」を推進する。日本が主軸を担うWASA-FRS HypHI実験の後続計画を実現し、中性子過剰のハイパー核測定によってストレンジネス核物理を飛躍させる。CBM国際共同実験を推進し、高密度クォーク物質を探索し、ストレンジネス核物質からクォーク物質にいたる中性子星最深部の構造解明を進める。「高エネルギーQCD物理」を米国ブルックヘブン国立研究所(BNL)に建設される世界初の偏極電子+偏極陽子および原子核衝突型加速器(EIC)で行う。国際共同ePIC実験を推進し、核子や原子核内のクォーク・グルーオン構造を精密に測定することで、核子の質量やスピンの起源、クォーク閉じ込めの理解や高密度グルーオン物質の性質解明に挑む。

本構想による国際展開を通じて、日・米・欧をつなぐQCD研究や実験技術に関する一大国際連携網を構築する。国際連携網を通じて、人と技術と知の国際頭脳循環を促すことで、国際的に卓越した次世代の研究者・技術者を育成する。また、次世代の量子測定技術や量子計算技術の開発を世界規模で進め、実社会において即戦力となる技術やデータサイエンス技術の開発と実証を達成する。

⑤ 学術的な意義

強い力の基礎理論 (QCD) によれば、強い力の結合定数は低エネルギーで増大し、非常に豊かで創発的な性質が生まれる。核子や原子核内は、QCD が持つ非線形性によって、高密度のグルーオンで満たされた弱結合状態が実現する。高温や高密度という極限状況下では、ストレンジネスクォークの自由度が発現し、クォークやグルーオンの自由度で振舞う新しい物質状態ができる。これは、クォークと反クォークが凝縮した真空の相転移そのものである。CERN-LHC 加速器での「高温 QCD 物理」、GSI/FAIR 加速器での「高密度 QCD 物理」、BNL-EIC 加速器での「高エネルギーQCD 物理」は、QCD の基本原理をもとに、様々な条件で発現する QCD の創発的な現象を包括的に解明するものであり、初期宇宙の物質創生史や中性子星の内部構造、南部理論の実験的な検証など、我々の物質観をもう一歩先に進める意義を持つ。また、高温 QCD と高密度 QCD の理解が進めば、QCD 物質の相構造に対する理解が進み、物性物理との分野融合によって、素粒子物理学・物性物理学をつなぐ新たな学術の創成に繋がる。

我々が推進する国際共同実験は、世界最先端の技術を結集したものである。本構想では、高時間分解能のシリコン検出器、放射線耐性に優れた超薄型モノリシックシリコンピクセル検出器、ハードウェア加速器を用いたヘテロジニアスコンピューティングや AI/ML などによるリアルタイムデータ処理などの最先端の実験技術を開拓し、工学や産業への応用を進める。

⑥ 国内外の研究動向と当該構想の位置付け

CERN 研究所でのクォーク・グルーオンプラズマに関する研究は、NuPECC の長期計画に書かれている通り、ヨーロッパにおける原子核物理の最重要課題である。今後の高統計のデータ収集に期待がかかる。ALICE 実験の様々な将来計画は、原子核コミュニティからの是認を受けている。高温 QCD 物理の進展に伴い、高密度 QCD の物理が注目されている。GSI/FAIR は高輝度実験を可能とする世界で唯一の加速器である。BNL の EIC 計画は、アメリカ原子核物理の最優先将来計画である。EIC ユーザーズグループには、世界中から 1,300 人以上が参加している。2022 年 7 月に ePIC 実験が組織され、日本からは 50 名程度が参加している。

⑦ 社会的価値

高温高密度という極限状況下で顕在するクォーク物質は、ビッグバンから始まる宇宙開闢直後の物質の姿、または中性子星内部の物質の姿として大いに国民の関心を得ており、私たちの物質観に非常に重要な知的価値を与える。EIC 計画によって QCD の非線形動力学が解明すると、核子の質量起源の謎など、多くの基本原理が明らかになる。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。測定器やデータ処理系における新技術の創成は、放射線計測技術や高速イメージング、ロボット工学、自動自動車運転技術などの瞬発性が求められる分野に多大な発展をもたらす。

⑧ 実施計画等について

実施機関は、理化学研究所の研究開発本部を母体として、東大 CNS、筑波大、筑波科学技術大学、広島大、奈良女子大、長崎総合科学大、佐賀大、山形大、神戸大、立教大、岐阜大、東北大、京都大、上智大(理論)、東大(理論)、KEK(理論、計算 QCD)などを中心として進める。CERN、GSI、BNL での実験運用に 1 億円/年、ALICE 実験において日本が主導している FoCAL 検出器に 5 億円、ALICE3 計画に 20 億円、GSI/FAIR 加速器施設における実験高度化に 5 億円、EIC の ePIC 実験にむけた測定器の建設に 20 億円、ALICE 実験に提供する Tier2 計算機資源やデータ収集系のためのヘテロジニアス計算機群の整備に 20 億円、合計 80 億円の予定である。本実施計画は 10 年であり、ALICE 実験は 2032 年までに 100 倍の高精度データを収集する。FoCAL 測定器を 2026-2028 年に ALICE 実験に建設する。GSI/FAIR での WASA-FRS HypHI 実験の高度化を 2026 年頃から行う。ePIC 実験用の開発・量産・建設を 2030 年までに完了し、ePIC 実験を 2032 年から開始する。

⑨ 連絡先

齋藤 武彦 (理化学研究所・研究開発本部)

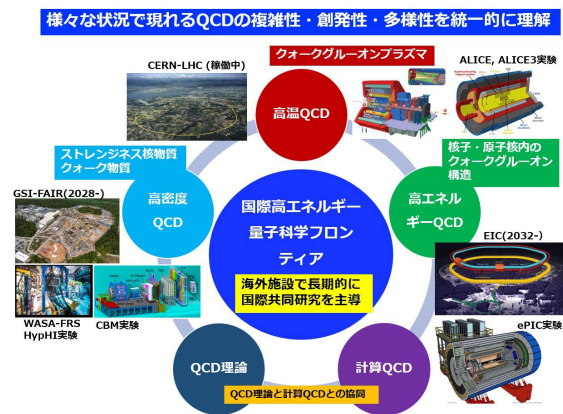


図2 本学術研究が推進する海外実験