

## J-PARC における重イオン加速による超高密度ストレンジネス核物質の研究

### ① 計画の概要

中性子星中心部や、重力波によって観測された中性子星合体においてのみ存在する、原子核密度をはるかに超える宇宙最高密度物質の研究は、現代原子核物理学の最重要課題の一つとなっている。一方、核子・核子衝突エネルギー5-20 GeVにおける高エネルギー原子核衝突においても、これらの密度に匹敵する高密度物質が生成可能であり、RHIC Beam Energy Scan、FAIR、NICA 計画等が進行中または予定されている。また、中性子星合体は元素合成の源と考えられており、原子核構造や核反応研究にも密接に関連する。

本 J-PARC 重イオン計画(J-PARC-HI) では、J-PARC において重イオンビーム加速を行い、重イオン衝突実験において原子核密度の5-10倍の宇宙最高密度物質を生成する。この超高密度物質の状態方程式等の性質を研究し、QCD 相図の高密度領域における一次相転移や QCD 臨界点等の相構造の発見を目指す。また、複数のストレンジクォークを含む様々な新しいハドロンや原子核の発見及びそれらの性質の研究を行う。

本計画は筑波大を中心として核物理コミュニティが提案するものであり、重イオン入射器を新設し、世界最高レベルの大強度陽子加速を達成している 3GeV シンクロトロン (RCS) と主リングシンクロトロン (MR) を利用して世界最高強度の重イオンビームを実現し、MR から重イオンビームをハドロン実験施設へ輸送して重イオン衝突実験を行う計画である。予算として重イオン入射器の新設費 150 億円、運転経費 40 億円、実験整備・準備研究費 10 億円を計上する。重イオン加速器の建設・調整期間は6年間であり、その後4年間にハドロン実験施設において重イオン衝突実験を行い超高密度物質の研究を推進する。

### ② 学術的な意義

本計画の中心的な研究課題として以下の2つを挙げる。

#### 1. 宇宙最高密度物質の生成

本計画の重イオン衝突実験は、地上で行うミニ中性子星合体とみなすことができる。重イオン衝突時の圧縮によって中性子星中心部に存在する原子核密度の5倍以上の超高密度物質を短時間ではあるが人工的に創り出し、中性子星構造・合体の理解に欠かせない核物質の状態方程式 (EOS) 等の性質を研究する。これらは重力波による中性子星合体の観測とともに中性子星の構造の解明を格段に進める。また超高密度状態下では、「物質がその置き場所である真空を破壊する」一次相転移や、QCD 臨界点、カラー超伝導などの新しい物性現象が予想され、本計画が実現する超高統計実験によりこれらの世界初の観測が期待され、QCD 物質の相図を明らかにする。

#### 2. 新ストレンジネス粒子探索

J-PARC における重イオン衝突は、他のエネルギーに比べてストレンジクォークの生成比が最大になることが知られており、複数のストレンジクォークを含む希少なハドロンや原子核を生成できる新粒子生成工場でもある。これらの新粒子探索には膨大な衝突事象数を必要とし、世界最高強度ビームを作り出す本計画が最適である。例えば、原子番号が負のハイパー核やスーパーコンピュータ「京」で予言されたダイオメガ等の新粒子の発見が期待できる。

本計画の波及効果として、本研究で得られるストレンジネスを含む高密度核物質の EOS を、RIBF の低エネルギー原子核衝突によって得られる低密度の EOS や、重力波による中性子星合体観測からの EOS の制限と組み合わせることによって、低密度から超高密度にいたる EOS の全貌解明が期待される。

### ③ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

今回のマスタープランに提出予定の LHC/RHIC における「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」計画は、J-PARC における高バリオン密度物質を研究する本計画とは相補的である。理研 RIBF では J-PARC より低エネルギーの重イオンビームを用いて不安定核や原子核密度の2倍程度までの核物質の研究を行うのに対し、本計画ではより高密度の核物質を研究する。また、現在 J-PARC の陽子ビームを用いてハドロン・ストレンジネスに関する研究を行っているが、本計画ではこれらの研究をさらに高密度、多ストレンジネスの物理へと展開することができる。

高密度物質を研究する重イオン加速器計画は世界各地で進展し、国際競争が加熱している。RHIC で 2019 年から Beam Energy Scan II 計画が始動するほか、2021 年にロシア JINR の NICA 加速器が、2025 年にはドイツ GSI の FAIR SIS-100 加速器が始動

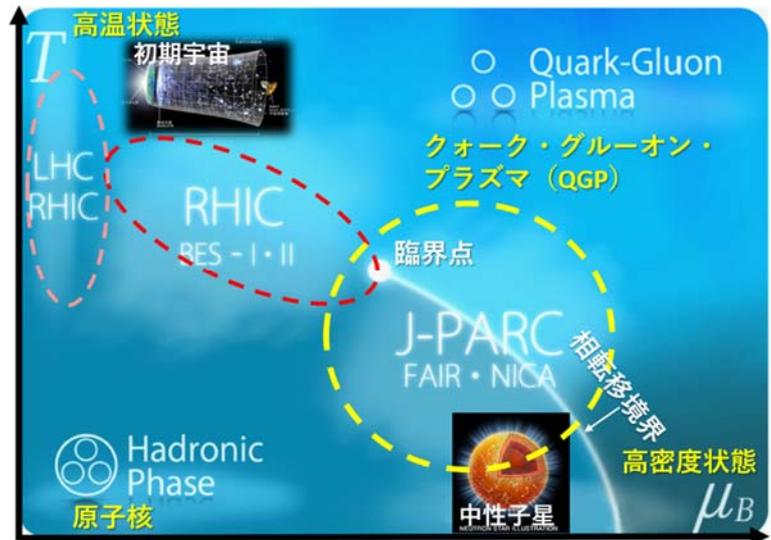


図 1 QCD 物質の相図

する予定である。本計画は世界最高のビーム強度によって最も高統計の精密測定、より稀な粒子や事象の探索によって国際競争のトップに立つことが期待できる。

#### ④ 実施機関と実施体制

本計画は、原子核物理コミュニティが最優先課題の一つとして推進することを決定した研究計画であり、筑波大と原子力機構先端基礎研究センター（先端研）を中心とするコミュニティが、実施機関と想定するJ-PARCに対して重イオン加速器の建設と実験施設の整備を要望する。

大強度陽子ビーム加速の実績を持つ J-PARC の加速器研究者が開発を行う。入射器に使用する超伝導加速空洞は、J-PARC の核変換計画の陽子リニアック用加速空洞と共同で開発する。

実験では、クロスアポイントメント制度で連携

した筑波大と先端研が実験グループを統括し、研究計画策定・検出器建設を行う。重イオン実験グループ（広島大、東京大 CNS、長崎総合科学大、奈良女子大）と J-PARC のストレンジネス・ハドロン実験グループ（東北大、京都大、大阪大 RCNP）と連携し、さらに海外研究機関とも連携して検出器開発と実験を実施する。また実験データの物理解析のため、高温・高密度 QCD、ハドロン・ストレンジネスの理論研究グループ（大阪大、京都大基研、名古屋大、上智大、国際教養大）と連携する。

#### ⑤ 所要経費

本計画の経費総額は200億円で、重イオン入射器の建設費、運転経費、及び実験整備・準備研究費からなる。重イオン入射器の建設費150億円は原子力機構が負担することを想定し、内訳は施設設備（建屋、冷却系、空調等）：47億円、重イオンリニアック（イオン源、電磁石、加速空洞、モニタ・真空系等）：51億円、重イオンブースターリング（電磁石、加速空洞、モニタ・真空系、荷電変換システム等）：45億円、輸送・接続ビームライン（電磁石、モニタ・真空系、荷電変換システム、入射キッカー等）：7億円である。運転経費の40億円は、計画期間の5-10年目における重イオン入射器と主リングシンクロトロン（RCS、MR）の電気代、機器保守費、人件費を含み、原子力機構と KEK の分担を想定する。実験整備・準備研究費の10億円は筑波大と先端研が分担し、検出器開発と重イオン衝突先駆実験のための遮蔽体等の整備、海外研究機関における準備研究を含む。先駆実験後に建設する大立体角実験装置は国際共同研究機関で分担して建設する。

#### ⑥ 年次計画

本計画の実施期間は、2020年から2029年までの10年間である。

加速器建設のスケジュールは、新たな重イオン入射器（リニアック、ブースターリング）の建設とビーム調整に5年、既存の RCS、MR との接続とビーム調整に1年の計6年を予定している。2年目から建設を開始することを想定し、7年目からビーム調整・供給開始を予定している。

重イオン衝突実験に関しては、1年目から陽子・原子核実験（J-PARC E16 実験）をはじめとする予備実験・準備研究を開始する。重イオン衝突実験用の検出器を開発し、その一部を E16 実験に導入して試験を行うとともに、ハドロン生成等、重イオン衝突実験のためのベースラインデータを取得する。高速データ収集など大強度ビームに向けた技術開発も重要な課題である。それと並行して、ハドロン実験施設拡張エリア（建設予定）において、高強度ビームに対応した大立体角の重イオン衝突実験スペクトロメーターの建設を行う。重イオンビームの供給が開始される7年目より、E16 実験装置を使用する重イオン衝突先駆実験を行い、9年目より高強度ビームを用いた大立体角スペクトロメーターによる本実験を開始する。

期間終了後は、重イオン加速器と実験設備の本格運用により長期にわたり実験を行い、大学院生等の若手研究者を育成する。

#### ⑦ 社会的価値

中性子星中心部にのみ存在する宇宙の最高密度物質の性質を明らかにすることは、私たちの物質の概念に新たな知見をもたらすと期待できる。また、2017年に重力波観測によって発見された中性子星合体は社会の大きな関心を引き、その観測結果から中性子星内部の高密度物質を調べる手法が得られた。本計画は、重イオン衝突という異なる人工的なアプローチにより、中性子星内部の高密度核物質を研究する新たな分野を切り拓き、重力波観測と共同で中性子星の構造を解明するという壮大な夢の実現への道筋を作る。

世界最高強度の重イオン加速器の開発は加速器科学の発展と加速器科学者の育成のためにも極めて重要である。本計画で建設される重イオン研究施設は、実験・理論物理の国際共同研究拠点として若手研究者育成のために重要な機会を提供する。

#### ⑧ 本計画に関する連絡先

三明 康郎（国立大学法人筑波大学 数物理学系）



図2 J-PARCにおける重イオン加速