

J-PARC での高強度重イオンビームによる超高密度物質の研究

① ビジョンの概要

加速器 J-PARC の次世代実験計画「J-PARC 重イオン計画 (J-PARC-HI)」を実現し、世界最高強度での重イオン衝突実験を通じて、中性子星内部に匹敵する超高密度物質を実験室で生成する。超高密度物質の相構造、超高密度物質が真空構造を破壊する相転移、人類の物質観を転換する研究のフロンティアを開拓する。

② ビジョンの内容

近年、水の 1000 兆倍という途方もない高密度環境の性質解明が重要な研究課題となっている。このような高密度が実現する中性子星に関する研究は、過去 5 年ほどの間に立て続けに実現した重力波・X 線観測により進展を遂げた。しかし、その内部構造は未だわかっていないことが多く、超高密度下における物質の存在形態の解明が課題となっている。このような超高密度物質中では真空を特徴づける「クォーク凝縮」が物質によって破壊される「量子色力学 (QCD) 真空の相転移」が理論的に予想されている。本ビジョンは、我が国の加速器 J-PARC における次世代実験計画「J-PARC 重イオン計画プログラム (J-PARC-HI)」を中心としてこのような超高密度物質の研究を推進し、超高密度



図 1 量子色力学 (QCD) の物質相図

極限という科学のフロンティアを開拓することを目指す。J-PARC-HI は、地上における最高密度状態である原子核を加速器 J-PARC で加速し衝突させることで、超高密度状態を生成する実験計画である。中性子星観測と相補的な役割を担うこの地上実験で、これらの物質の状態方程式や、ハドロン・クォーク物質への量子色力学 (QCD) の相構造を解明することを目指す。この QCD 相構造 (図 1) はその高温領域が宇宙初期のクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) 状態に相当し、高エネルギーの原子核衝突実験や大型並列計算機を用いた格子色力学による計算により、その相転移の様子がなめらかなクロスオーバー相転移であると分かりつつある。その高密度領域には QCD 臨界点や 1 次相転移があると期待されているが、その全貌は未開拓である。本研究のビジョンはこの超高密度物質の相構造を、加速器 J-PARC の次世代実験計画により解明することである。

③ 学術研究構想の名称

J-PARC での高強度重イオンビームによる超高密度物質の研究

④ 学術研究構想の概要

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とされ、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である。核子・核子の衝突エネルギーを 5-20 GeV にした高エネルギー原子核衝突において、これらの密度に匹敵する高密度物質が生成可能である。この「J-PARC 重イオン計画 (J-PARC-HI)」は、J-PARC において重イオンビーム加速を実現し、世界最高強度の重イオン衝突実験を遂行することで、中性子星内部の超高密度物質を実験室で生成する。超高密度下で起こる量子色力学 (QCD) 相転移、QCD 臨界点の探索、超高密度クォーク物質の性質や状態方程式、固体における超伝導のクォーク版であるカラー超伝導相の探索など、QCD 真空構造や高密度 QCD に関する最先端の研究が推進できる。また、この衝突エネルギーでは、ストレンジネスを含む新粒子・新物質を生成しやすい。高輝度の重イオン衝突を使ってこれらの稀な粒子や事象の生成を測定し、世界に発信する。

⑤ 学術的な意義

本計画の中心的研究課題・学術的な意義として、以下の 3 つを挙げる。

1. J-PARC にて、重イオン入射用リニアックと重イオン用ブースターリングを設置し、高強度重イオン加速を実現する。重イオン衝突実験のための国際共同実験グループの結成、衝突により生成する粒子測定検出器やデータ収集のため測定システムの開発・製作・導入により、加速器技術、実験遂行技術、ビッグデータ解析技術などの発展と次世代の人材育成に繋がる。
2. 本計画の重イオン衝突実験は、重イオン衝突時の圧縮によって中性子星中心部に匹敵する原子核密度の

5倍以上の宇宙最高高密度物質を創り出し、その状態の輸送特性や状態方程式（EOS）を明らかにする。RIBFの低エネルギー原子核衝突、重力波やX線観測による中性子星合体の観測、そして本計画によって、低密度から超高密度にいたる高密度核物質やクォーク物質の全貌解明が期待される。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、本計画が目指す超高統計実験により、これらの世界初の観測が期待され、素粒子物理学と物性物理学をつなぐ新しい学術の創生に繋がる。

3. J-PARC における重イオン衝突のエネルギー領域では、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なハドロンや原子核を生成できる新粒子生成場でもある。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、多重ハイパー核、ストレンジレット、スーパーコンピューター「京」で予言された新粒子などの発見が期待できる。次世代のストレンジネス核物理の世界的拠点になる。

⑥ 国内外の研究動向と当該構想の位置付け

CERN・BNLにおいてはLHC・RHIC加速器による高エネルギー重イオン衝突を用いた宇宙初期に相当する高温状態の物質相の研究が進められている。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、本計画ではさらに高密度の核物質を研究する。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、図2に示すように重イオン入射器などを追加・移設し、重イオン衝突実験を可能にすることにより、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。アメリカのRHICでは2019年からエネルギー走査実験により前駆的なデータが収集され、2025年には中国のHIAF加速器が、2029年にはドイツのFAIR加速器が始動する予定である。世界最高のビーム強度によって、カラー超伝導相やその前駆状態の特定、高密度側の探索を、希な粒子や事象の測定によって実現し、国際競争のトップに立つことが期待できる。

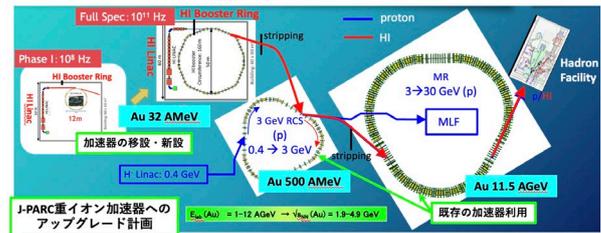


図2 既存のJ-PARC施設を重イオン加速器へ

図2に示すように重イオン入射器などを追加・移設し、重イオン衝突実験を可能にすることにより、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。アメリカのRHICでは2019年からエネルギー走査実験により前駆的なデータが収集され、2025年には中国のHIAF加速器が、2029年にはドイツのFAIR加速器が始動する予定である。世界最高のビーム強度によって、カラー超伝導相やその前駆状態の特定、高密度側の探索を、希な粒子や事象の測定によって実現し、国際競争のトップに立つことが期待できる。

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呼び、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く。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のためにも重要である。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機会を提供する。

⑧ 実施計画等について

実施機関は、筑波大学、日本原子力研究機構（JAEA）、高エネルギー加速器研究機構（KEK）を中心として、重イオン実験グループ（東京大CNS、広島大、長崎総合科学大、奈良女子大など）、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、理研）、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、広島大）と連携する。施設設備40億円、重イオン入射器50億円、KEKブースターの改修10億円、輸送・接続15億円、運転経費・実験準備15億円、ビームの高強度化のための新規ブースターリングの建設70億円、計200億円の予定である。本計画実施期間は約10年間であり、1年目から陽子・原子核実験（J-PARC E16実験）による準備研究を開始し、実施期間の半ばよりKEKブースターを用いた重イオン衝突の先駆実験を始め、本計画の最終年度から本格的に高強度重イオン加速器を運用し、衝突実験を開始する。

⑨ 連絡先

服部 利明（筑波大学 数理物質系）、江角 晋一（筑波大学 数理物質系）