

# J-PARC 重イオン計画

## J-PARC-Heavy-Ion Project (J-PARC-HI)

佐甲 博之 ハドロン原子核物理研究グループ  
SAKO Hiroyuki Research Group for Hadron Nuclear Physics



### 概要

J-PARC 重イオン計画 (J-PARC-HI) は、高エネルギー原子核衝突によって、中性子星中心部に存在すると考えられている、宇宙における最高超密度の物質を創り出す計画です。高密度において起こると考えられているハドロン-クォーク物質の相転移現象、状態方程式等の物性を解明することを目指しています。この研究計画の概要、及び加速器と実験の検討状況についてご紹介します。

### 1. 研究の背景・経緯

原子の中心にある原子核は陽子や中性子 (核子) が強い相互作用で結びついたもので、それを仮に  $1\text{cm}^3$  集めることができれば、2000 億 kg というとてつもない重さになります。それ以上密度の高い物質は存在するのでしょうか? 大質量恒星の終焉時に起こる超新星爆発の残骸として生まれる中性子星は、半径 10km の巨大な原子核であり、その中心部の密度は原子核の 5-7 倍、つまり  $10^{14}\text{kg/cm}^3$  の密度に達して、宇宙における最高密度の物質と考えられています。最近始まった重力波観測によって発見された中性子星合体は重元素生成源の有力な候補と考えられています。中性子星中心部には、核子を構成する軽いアップ (u-)、ダウン (d-) クォークに加えて、次に質量が軽いストレンジ (s) クォークが多く存在すると考えられています。スピン  $1/2$  の粒子である核子やクォークは同種の粒子同士はパウリ排他率のため同じ空間に存在できませんが、異種粒子であるストレンジクォーク (s) やそれを持つ重粒子 (ハイペロン) が含まれると、全体のエネルギーは低くなり安定します。このような物質は原子核のようなハドロンから成り立っているのか (ハドロン物質)、それともクォークが構成要素なのか (クォーク物質)、中性子星の半径と圧力を決定する物質の状態方程式はどのようなものであるのか等、多くの謎が残されています。

このような中性子星や中性子星合体と同程度の超高密度物質を人工的に作る唯一の方法と考えられているのが、高エネルギーの原子核・原子核衝突です。J-PARC 重イオン計画 (J-PARC-HI) は、既存の J-PARC のシンク

### Abstract

J-PARC Heavy-Ion project (J-PARC-HI) aims to create the densest matter in the universe through high-energy nucleus-nucleus collisions, which is considered to exist in the core of a neutron star. We aim at unveiling the phase transition from hadron to quark matter, and the properties of the matter such as the equation of state. We describe the overview of the project, and the status of the accelerator and experimental design.

### 1. Introduction

The nucleus in the center of an atom consists of a nucleon (a proton or a neutron) bound with the strong interaction. Its density is huge at  $2\text{ trillion kg/cm}^3$ . Is there any matter whose density is higher than that? A neutron star, which is born at the end of large star's lifetime, is a huge nucleus with the radius of  $\sim 10\text{ km}$ . Its central density is 5-7 times as high as the nuclear density, namely,  $10\text{ trillion kg/cm}^3$ , which is considered to be the densest matter in the universe. A neutron star merger, which was recently discovered in the gravity wave observation, is a strong candidate for the generation of heavy elements. In the core of a neutron star, other than light up (u-) and down (d-) quarks which compose nucleons, many strange (s-) quarks should exist. Since quarks or nucleons have spin  $1/2$ , the same particle species cannot share the space due to the Pauli blocking. However, including different particle species with s-quarks (hyperons) reduces the total energy of the matter, which makes the matter stable. Whether the constituent of the matter is a hadron or a quark, and the equation of state of the matter which determines the relation between the radius and the mass of neutron stars, remains a puzzle.

Currently, the high-energy nucleus-nucleus collision is believed to be the only method to artificially create such matter. J-PARC-HI is the project to create the nuclear matter with the density 5~7 times as high as the nuclear density, in high-energy heavy-ion

ロトロン加速器をそのまま用いて核子当たり 10 GeV の金までの重イオンを加速し、原子核標的に照射して原子核・原子核衝突を起こし、原子核の約 7 倍の超高密度物質を創り出す計画です [1]。LHC や RHIC における超高エネルギー原子核衝突においては、原子核同士はすり抜けてしまいますが、少し低い J-PARC のエネルギーでは原子核同士は止まり圧縮されるため、超高密度の物質が生成されます。衝突では原子核中の多くの核子が粉碎し次々にハドロンへ変換されますが、その過程で核子同士が重なり合うためにクォーク物質への相転移が起こっている可能性があります。そのような相転移の構造(図 1)、及びそのマクロな性質(状態方程式、粘性等)の解明を行うこと、中性子星内部に存在する新粒子・原子核の探索、またクォークの超電導状態(カラー超電導)の探索を行うことが J-PARC-HI の使命です。

このような高密度においては強い相互作用の第一原理(量子色力学(QCD))から出発する理論計算は困難であり、上記の高密度物質についての理論的理解は不十分です。従って超高密度物質の研究は実験研究が主導することができるユニークな分野です。

collisions by accelerating heavy-ion beams to 10 GeV/nucleon using the existing J-PARC synchrotrons, and irradiating them on nuclear targets [1]. In very high-energy collisions at LHC and RHIC, nuclei pass through each other, whereas at J-PARC energy, they are compressed and thereby the dense matter is created. In such a collision, nucleons are destroyed in pieces and converted to other hadrons. In that process, possibly a phase transition to a new state of matter consisting of quarks (quark matter) could occur. The mission of J-PARC-HI is to clarify such phase structures (Figure 1), unveil its macroscopic properties such as the equation of state and viscosity, and search for novel particles and nuclei in neutron stars and the superconducting state called the color superconducting phase. However, there is difficulty in theoretical calculations at such high density from the first principle (Quantum Chromo Dynamics), this research field is unique in that experimental studies can take the lead .

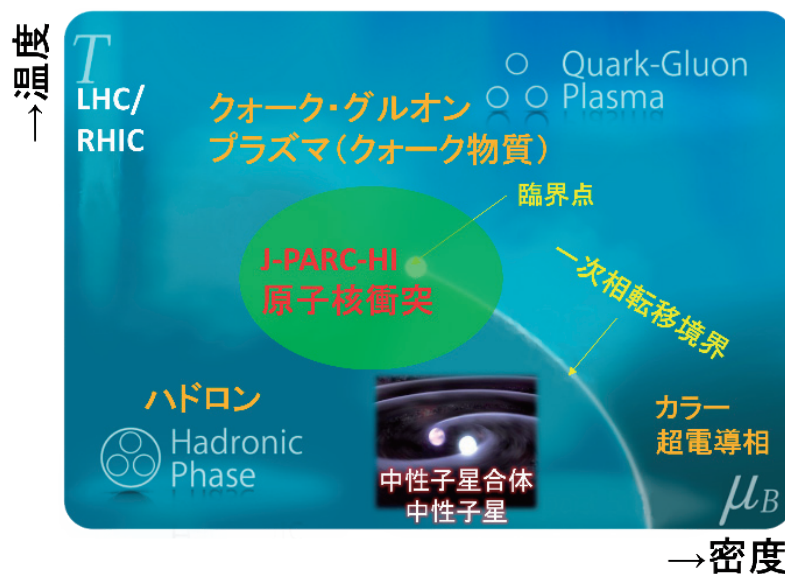


図 1. 強い相互作用の相図  
Figure 1. The phase diagram of the strong interaction

## 2. 重イオン加速と実験計画

J-PARC において重イオンを加速するためには、図 2 のように、リニアックとブースターリングから構成される重イオン入射器の建設が必要です。入射器からの重イオンビームは、既存の 3 GeV (RCS) 及び主リングシンクロトロン (MR) によって最終的に核子当たり 10 GeV まで加速できます。各ビームパルス (= 2 秒) において  $10^{13}$  個の陽子を加速する RCS と MR によって、GSI の FAIR 計画を上回る世界最高強度の  $10^{11}$ /pulse の達成が期待でき、J-PARC-HI は高強度フロンティアの重イオン加速器を目指します。MR から取り出したビームをハドロン実験施設の陽子ビームラインへ輸送し、大立体角ス

## 2. Accelerator and experimental plans

In order to accelerate heavy-ions at J-PARC, we need to build a heavy-ion injector consisting of a linac and a booster ring (Figure 2). The beam from the injector is accelerated with the existing Rapid-Cycling Synchrotron (RCS) and Main Ring Synchrotron (MR) to 10 GeV/nucleon. J-PARC-HI aims to be an intensity-frontier heavy-ion accelerator with the world's highest intensity of  $10^{11}$ /pulse (=2 sec) with RCS and MR which can accelerate proton beams of  $10^{13}$ /pulse.

The beam from MR is transported to the proton beam line and the experiment is performed at a large acceptance magnetic spectrometer [2] in Hadron Experimental Facility. We measure production of

ペクトロメーターにおいてかつてない超高統計の精密実験を行います [2]。様々な粒子(ハドロン、レプトン、光子)の生成と相関を測定することによって、高密度物質の相構造の探索、状態方程式等の物性の解明、及びカラー超電導相や新奇ハドロン・原子核の探索を、超高統計、高精度で行います。

correlations of various observables such as hadrons, leptons, and photons to explore the phase structures, elucidate properties of the matter such as the equation of state, and search for color superconducting phase and new particles and nuclei, with unprecedented high statistics.

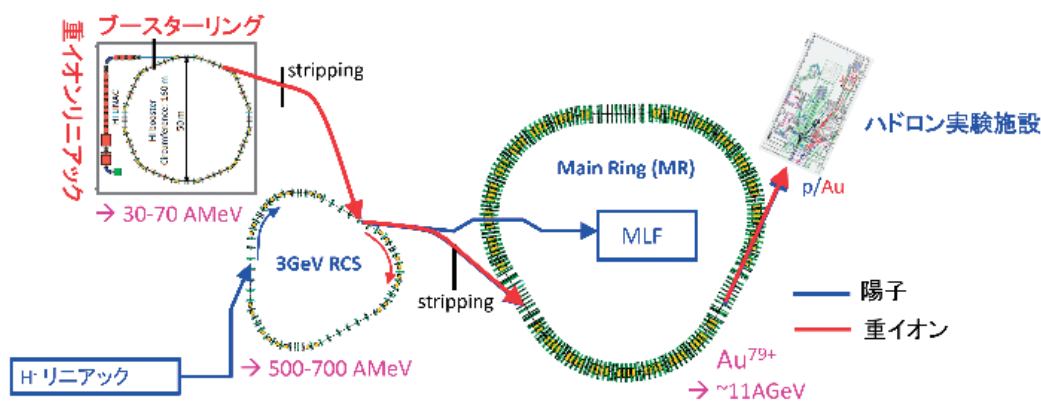


図 2. J-PARC-HI における重イオン加速スキーム  
Figure 2. The heavy-ion acceleration scheme for J-PARC-HI.

### 3. まとめと展望

J-PARC 重イオン計画は、宇宙最高密度の物質を創生し、その物性と相構造の解明を目指す次世代核物理の実験計画です。重イオン加速器と実験の計画に関して詳細な検討を進め、早期実現を目指しています。リニアック用超電導空洞や、高時間分解能飛行時間測定器の研究開発も進めています。また、本計画については J-PARC ハドロン実験施設の実験審査委員会へ Letter-of-Intent を 2016 年に提出し、最初の実験プロポーザルを 2021 年 7 月に提出しました [3]。さらに、日本学術会議マスタープラン 2020 にこの計画は掲載されています。

### 3. Summary and perspectives

J-PARC-HI aims at creating the densest matter in the universe and exploring its properties and phase structures. We are developing detailed accelerator and experimental plans to start the experiment as early as possible. We are doing R&D for such as a superconducting cavity for the linac, and a high-resolution time-of-flight counter. We submitted the Letter-of-Intent in June 2016, and the first experimental proposal in July 2021 [3]. J-PARC-HI was also adopted in Japanese Master Plan of Large Research Projects in 2020 by Science Council of Japan.

### 参考文献 References

- [1] H. Sako, et al., LoI: Letter of Intent for the J-PARC Heavy-Ion Program (July 2016) ([http://j-parc.jp/researcher/Hadron/en/pac\\_1607/pdf/LoI\\_2016-16.pdf](http://j-parc.jp/researcher/Hadron/en/pac_1607/pdf/LoI_2016-16.pdf)),
- [2] H. Sako, Nucl. Phys. A 1005 (2021) 121916.
- [3] T. Gunji, K. Ozawa, H. Sako, et al., P87: Proposal for dielectron measurements in heavy-ion collisions at J-PARC with E16 upgrades (July 2021) ([http://j-parc.jp/researcher/Hadron/en/pac\\_2107/pdf/P87\\_2021-13.pdf](http://j-parc.jp/researcher/Hadron/en/pac_2107/pdf/P87_2021-13.pdf)),