

ハドロン物理研究グループの主な成果

Highlights of Research Group for Hadron Physics

今井 憲一 グループリーダー
Kenichi Imai Group Leader



概要

J-PARCにおいてストレンジネスをキーワードとしたハドロン物理を推進した。ペンタクォーク、中性子過剰ハイパー核、K中間子原子核などの探索実験を行い、K中間子原子核の候補を見出した。また大強度ビームに対応するTPCなどの検出器開発を行った。高密度天体を構成する原子核物質の性質と構造の理論的研究を行った。

1. 研究の背景・経緯

当初の研究計画ではJ-PARCでの原子核ハドロン物理実験、特にK中間子ビームを用いたストレンジネス $s=-2$ の核物理に力点を置いていた。しかし大震災とJ-PARCハドロンホールでの放射性物質漏えい事故の影響で実験予定が大幅に遅れ、K中間子ビームによる実験はまだ行われていない。その中でこれまでJ-PARCではペンタクォーク、中性子過剰ハイパー核、K中間子原子核の3つのハドロン実験が行われた。それらの実験の発表論文の第一著者はすべて当グループのメンバーであり、J-PARCハドロン物理研究には大きく貢献したといえる。またHダイバリオン探索などの新たな実験提案を行い、そのための科研費も獲得しTPCなどの新しい検出器の開発研究が順調に進んでいる。

当初計画にはなかったが、日米協力事業を活用しながら2010年度よりBNLのRHIC PHENIX実験に参加した。近年2倍の太陽質量の中性子星の発見により高密度極限の核物質の研究が盛んとなっており、当グループとしても理論実験両方から取り組んでいる。最近ではJ-PARCでの重イオン加速と高密度核物質の研究の検討を内外の研究者からなるワーキンググループを組織して行っている。

2. 研究の内容

(1) J-PARCでのハドロン物理実験

(a) ペンタクォーク Θ^+ の探索

ペンタクォーク Θ^+ はその存否について結論に至っておらず、あるとしてもその幅はかなり小さいと思われる。K1.8のビームラインとSKSスペクトロメーターはこのエネルギー領域では世界で最も高いエネルギー分解能を持つ。その性能を生かした高統計、高分解能(1.4 MeV FWHM)の探索実験である。1.92 GeV/cの π ビームを用いて $\pi^-p \rightarrow K^-X$ 反応を測定した。図1のMissing massのスペクトルには Θ^+ に対応するピークは見られず、生

Abstract

At J-PARC, we have studied hadron physics related to strangeness. Three experiments to search for a pentaquark, neutron rich hypernuclei and kaonic nuclei have been performed. We have found a candidate of the kaonic nucleus, K^-pp . We have successfully carried out R&D of detectors for high intensity beams at J-PARC such as TPC. Theoretical studies on the properties and structures of nuclear matter of high density stars were also performed.

1. Background

The major subject of the research proposal at beginning was nuclear and hadronic experiments at J-PARC, specifically $s=-2$ nuclear physics with high intensity kaon beams. However, the damage by the big earth quake and the radiation leak accident at J-PARC Hadron Hall caused a big delay of the schedule of hadron experiments. Therefore, experiments with a kaon beam have not yet been done. At J-PARC, three experiments on hadron physics were performed so far. They are 1) search for a pentaquark 2) neutron rich hypernuclei 3) kaonic nuclei. The results of the three experiments have been published and all the first authors of the papers are the members of our research group. We have made a great contribution to the J-PARC hadron physics. We have proposed new experiments such as a search for an H-dibaryon. We have successfully obtained JSPS Grant-in aid and R&D works and construction of new detectors such as TPC is under progress.

We have participated RHIC-PHENIX experiment at BNL under the US-Japan program for nuclear physics, although it was not in the research plan in the beginnings. The recent discovery of the neutron star of two solar mass have attracted much attention to nuclear matter at high density limit. We have studied the

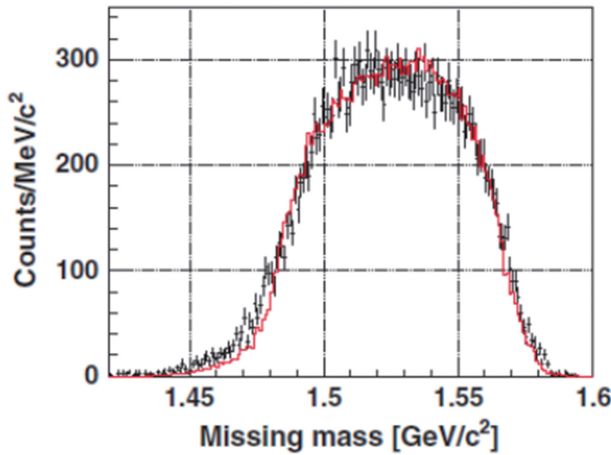


図1 $\pi^-p \rightarrow K^-X$ 反応のmissing massのスペクトル

Fig.1 The missing mass spectrum for $\pi^-p \rightarrow K^-X$

成断面積の上限値を $0.26 \mu\text{b/sr}$ と求めた[1]。これは Θ^+ の存在をほぼ否定するものである。

(b) 中性子過剰ハイパー核 ${}^{\Lambda}_5\text{H}$ の探索

${}^{\Lambda}_5\text{H}$ は水素の同位体として最も重く、陽子と中性子の比が 1 : 4 と中性子過剰ハイパー核であり極めて興味深い。その存在を示唆するいくつかの理論計算があり、3 事象の ${}^{\Lambda}_5\text{H}$ を見つけたとの報告もあり、その確認が求められていた。そこで K1.8 ビームラインと SKS スペクトロメーターを用いて $\pi^- {}^6\text{Li} \rightarrow K^+ X$ 反応により ${}^{\Lambda}_5\text{H}$ を探索する実験を行った。 π^- ビームの運動量は $1.2 \text{ GeV}/c$ である。

この反応はダブルチャージ交換反応のため生成断面積が小さいことが知られていた。そのためビーム強度 $10^7/\text{spill}$ でデータを取ることが求められた。我々は大強度ビームでの動作が難しい wire chamber に代わるものとして Fiber tracker と silicon strip detector (SSD) を開発・製作し、最終的に $1.4 \times 10^7/\text{spill}$ のビーム強度での実験に成功した。また ${}^{12}_{\Lambda}\text{C}$ ハイパー核の生成実験を行い、予定した質量分解能が達成されていることも確認した。2 週間あまりのビームタイムで得られた missing mass のスペクトルを図2に示す。高統計の測定にもかかわらず残念ながら ${}^{\Lambda}_5\text{H}$ に対応するピークは見られなかった。生成断面積の上限値は 1.2 nb/sr という小ささである [2]。

過去の同じダブルチャージ交換反応を用いた ${}^{10}_{\Lambda}\text{Li}$ ハイパー核の生成実験では 10 nb/sr 以上の生成断面積が得られているので、我々の結果は ${}^{\Lambda}_5\text{H}$ の存在に疑問を呈するものである。理論計算は ${}^5\text{H}$ の共鳴状態の測定値を基準として ${}^{\Lambda}_5\text{H}$ が束縛するかどうかを論じている。しかしこの共鳴状態の存在に否定的な実験結果も報告されていて、この共鳴状態の存否は完全には確定していない。我々の結果はこの ${}^5\text{H}$ の共鳴状態の存在にも疑問を呈するものである。

(c) K 中間子原子核 K^-pp の探索

K^- と陽子の相互作用は引力的であることが知られて

nuclear physics at high density both theoretically and experimentally. We have organized a working group and studied a possible plan of the acceleration of heavy ions at J-PARC and experiments on high density nuclear matter.

2. Contents of the study

(1) Hadron physics experiments at J-PARC

(a) Search for a pentaquark Θ^+

The existence of the pentaquark Θ^+ is still controversial. If it exists, its width is considered to be small. The K1.8 beam line and SKS spectrometers provide the best mass resolution in the world. The experiment searched for Θ^+ with the mass resolution of 1.4 MeV (FWHM) and with high statistics. With use of the $1.92 \text{ GeV}/c$ pion beam, we measured $\pi^-p \rightarrow K^-X$ reaction. In the missing mass spectrum (Fig.1), we found no peak structure of Θ^+ and the upper limit of the production cross section was obtained to be $0.26 \mu\text{b/sr}$ [1]. This result strongly suggested non-existence of Θ^+ .

(b) Search for a neutron rich hypernucleus ${}^{\Lambda}_5\text{H}$

A hypernucleus ${}^{\Lambda}_5\text{H}$ is the heaviest hydrogen isotope. It is extremely neutron rich since the proton to neutron ratio is 1:4. Several theoretical calculations suggested that ${}^{\Lambda}_5\text{H}$ is bound or a state very near the threshold and observation of a few events of ${}^{\Lambda}_5\text{H}$ was recently reported. The confirmation was very much awaited. We have performed the experiment E10 to observe ${}^{\Lambda}_5\text{H}$ by using $\pi^- {}^6\text{Li} \rightarrow K^+ X$ reaction with K1.8 beam line and SKS spectrometers at a pion beam momentum of $1.2 \text{ GeV}/c$.

The cross section is very small because it is a double-charge exchange reaction. The beam intensity of $10^7/\text{spill}$ is necessary to obtain sufficient data. We have developed and constructed fiber trackers and silicon strip detectors (SSD) to replace wire chambers which cannot be operated under such high intensity. We have finally succeeded to take data at the pion beam intensity of $1.4 \times 10^7/\text{spill}$. We have also confirmed that the sufficient mass resolution was achieved by measuring the ${}^{12}_{\Lambda}\text{C}$ hypernucleus. The missing mass spectra obtained during about two weeks are shown in Fig.2. In spite of high statistics measurement, no peak structure of ${}^{\Lambda}_5\text{H}$ was observed. The upper limit of the production cross section is as small as 1.2 nb/sr [2].

In the past similar experiment of double-charge reaction to produce ${}^{10}_{\Lambda}\text{Li}$ hypernuclei, the production cross section was found to be more than 10 nb/sr . Therefore, our result is inconsistent with the existence of ${}^{\Lambda}_5\text{H}$. Theoretical calculations on the binding energy of ${}^{\Lambda}_5\text{H}$ are based on the reported value of ${}^5\text{H}$ resonance energy. However, there are also reports which did not find

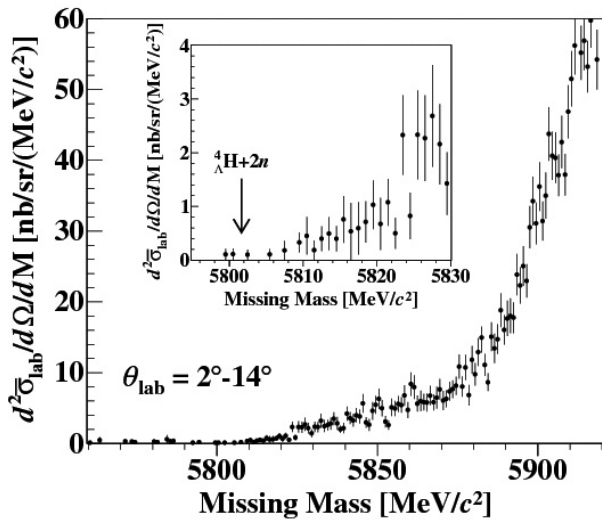


図2 $\pi^- \text{}^6\text{Li} \rightarrow K^- X$ 反応のmissing massのスペクトル

Λ があるはずの矢印のあたりにはイベントがない。

Fig.2 Missing mass spectra for $\pi^- \text{}^6\text{Li} \rightarrow K^- X$ reaction

There is almost no event where Λ is expected as indicated by the arrow.

おり、 $\Lambda(1405)$ というハイペロンは K^- と陽子の束縛状態とも考えられている。ここからK中間子が原子核に束縛されたK中間子原子核の存在が予言された。しかし幅が広く実験的には確認が難しい。そこでもっとも簡単な系である K^-pp 状態の確認が重要となっている。過去に二つの実験がその存在を示唆する結果を報告しているが、幅が異なるなど問題も指摘されている。そこで我々はK1.8のビームラインとSKSスペクトロメーターを用いて $\pi^+ d \rightarrow K^+ X$ 反応により K^-pp 状態を探索する実験を行った。 π^+ ビームの運動量は1.69 GeV/cである。 K^-pp 状態の測定感度をあげるために、標的回りに K^-pp 状態から崩壊する粒子を測定するレンジカウンターを製

any ${}^5\text{H}$ resonance. The existence of ${}^5\text{H}$ is not yet fully confirmed. The present result gives a question about the existence of ${}^5\text{H}$ resonance.

(c) Search for kaonic nuclei K^-pp

The interaction of a K^- meson and a proton is known to be attractive and the $\Lambda(1405)$ hyperon is considered as a K^-p bound state. This fact leads to the prediction of the bound states of a K^- meson and nuclei, so called kaonic nuclei. However, the widths are very large and the experimental confirmation of its existence was very difficult for most nuclei. It is important to study the most simple kaonic nucleus which is the K^-pp state. There are two reports which claimed the observation of K^-pp state in the past. However, the measurements are not consistent and the mass, width and even its existence is still controversial.

We have carried out an experiment to search for the K^-pp state through $\pi^+ d \rightarrow K^+ X$ reaction with use of K1.8 beam line and SKS spectrometers at the pion beam momentum of 1.69 GeV/c. In order to improve the S/N ratio for the K^-pp state, range counters were constructed and located around a deuterium target to detect decay particles from the K^-pp state. The analysis of the inclusive reaction has been completed and recently published [3].

The obtained missing mass spectrum of the inclusive reaction is shown in Fig.3a together with the simulation calculation based on known cross sections of two body quasi-free reactions and Fermi momentum of nucleons in a deuteron. The experimental data are well reproduced by the calculation except in two regions. It is unexpected and very interesting that the observed peak of Y^* production is largely shifted from the calculation. It may

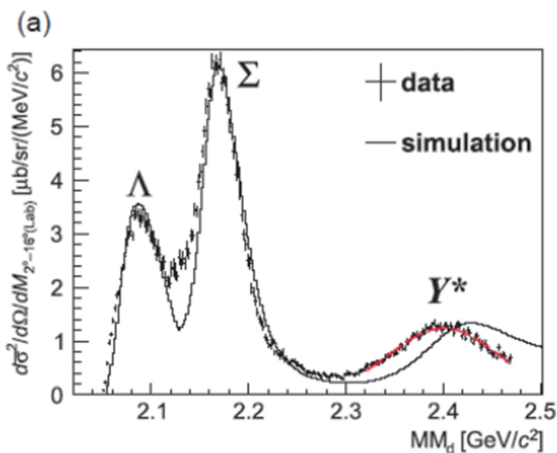


図3a $\pi^+ + d \rightarrow K^+ X$ 反応のmissing massのスペクトル

2か所が準2体反応のsimulationと合わない。

Fig.3a Missing mass spectrum for $\pi^+ + d \rightarrow K^+ X$ reaction

The data cannot be fitted by the simulation based on quasi-free two body reactions at two mass regions.

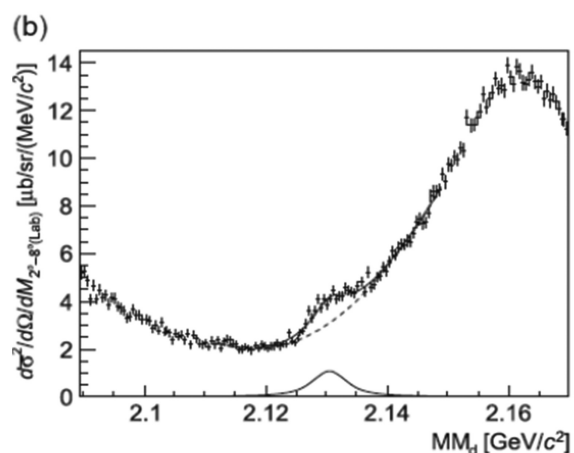


図3b 2130 MeVに見られる“ ΣN カスプ”

Fig.3b “ ΣN cusp” observed at 2130 MeV

作り配置した。Missing massのスペクトルはすでに解析を終えて最近論文発表した[3]。

得られたスペクトルと2体反応の断面積と重陽子中の核子のフェルミ運動を含むシミュレーション計算結果を図3aに示す。計算は2か所を除いて実験結果とよく一致している。ハイペロン共鳴 Y^* のピーク値が計算と大きくズレているのは非常に面白い結果である。 $\Lambda(1405)$ 生成のところで多体効果が効いていることを示唆しているように思える。理論的検討が待たれる。もうひとつは2130MeVに見られる ΣN カスプとして知られるピークである。図3bに拡大図を示す。従来は ΣN のしきい値効果と考えられていたが、最近では束縛状態の可能性も議論されている。この測定はこれまでで最も分解能のよい測定となっている。また包括反応で観測されたのははじめてのことである。ピークの値と幅はそれぞれ $2130.5 \pm 0.4(\text{stat.}) \pm 0.9(\text{syst.})$ MeVと $5.3+1.4-1.2+0.6-0.3$ MeVと求まった。 ΛN と ΣN 相互作用の知見に新たなデータを与える結果である。

K^-pp 状態は Λp または Σp へ崩壊すると考えられるので、この状態の測定感度をあげるには1つまたは2つの陽子をレンジカウンターで測定する必要がある。崩壊の運動学を充たす陽子とコインシデンスしたときのmissing massのスペクトルを解析したところ K^-pp 状態と思われるピークを観測した(図4)。国際会議ですでに報告し、現在論文を執筆中である。

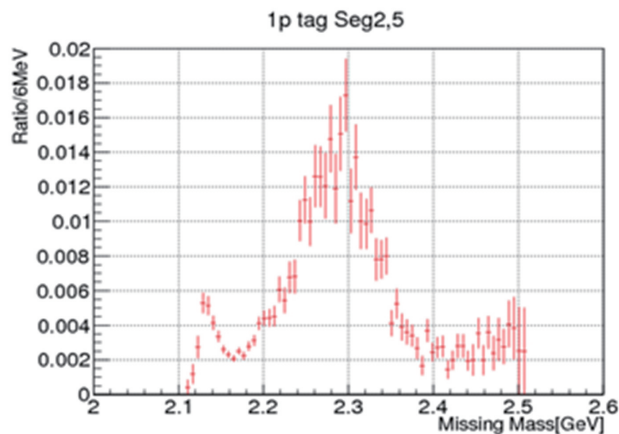


図4 陽子とコインシデンスしたときのmissing massのスペクトル K^-pp 状態のピークが見える。

Fig.4 The missing mass spectrum with proton coincidence The peak is consistent with K^-pp state.

(2) Time Projection Chamber 開発研究

本研究グループでは、大強度ハドロンビームに対応できる検出器開発を研究目標としており、Fiber tracker, Silicon Strip Detector(SSD), Time Projection Chamberの開発研究を行った。Fiber TrackerとSSDについてはすでにE10の実験で実用化された。ここではTPCにつ

suggest the importance of multi-body effect related to the $\Lambda(1405)$ production. Theoretical studies are awaited.

The other region is the existence of a peak structure known as the ΣN cusp at 2130 MeV. An expanded view of the spectrum is shown in Fig.3b. The peak was long considered as a cusp due to the ΣN threshold effect. Recently the possible existence of a ΣN bound state is discussed. The present measurement of the peak was made with the best mass resolution. It should be noted that the peak is observed in the inclusive reaction for the first time. The values of the peak energy and width are obtained as 2130.5 ± 0.4 (sta.) ± 0.9 (syst.) MeV and $5.3+1.4-1.2$ (sta.) $+0.6-0.3$ (syst.) MeV. It provides new input to the study of the ΛN - ΣN coupling interaction.

The K^-pp state decays to Λp or Σp . In order to get high sensitivity to the K^-pp state, it is necessary to detect one or two protons with the range counters. We have analyzed the missing mass spectra in coincidence with one or two protons which satisfy the kinematical condition of the decay from the K^-pp state. The ratio of the missing mass spectrum with one proton and the inclusive reaction is shown in Fig.4. A peak structure which seems consistent with the K^-pp state has been observed. The preliminary results were presented at several international conferences and the paper is under preparation.

(2) R&D of time projection chamber (TPC)

One of the objectives of our group is R&D of new detectors which work properly at high intensity beams at J-PARC. We have carried out R&D works of scintillation fiber tracker (Fiber tracker), silicon strip detector (SSD) and time projection chamber (TPC). The Fiber tracker and SSD were constructed and used successfully in the J-PARC E10 experiment. TPC is described in this session.

TPC was designed to search for the H-dibaryon through its decay to two Λ hyperons together with a superconducting Helmholtz magnet. The detector is suitable to detect hyperons such as Λ , which have mean flight length of a few cm, with high precision and high efficiency. The unique point of this TPC is that a target is placed inside of TPC and beam particles go through TPC. In order to enable this TPC, GEM is employed as the electron multiplier with much less ion feedback.

We constructed a prototype GEM-TPC and performed various test measurements with beta sources, a UV laser as well as electron beams (ELPH) and proton beams (RCNP) to study its performances. Through these tests, we have confirmed that this GEM-TPC can be operated up to 10^6 /sec beam rate, which is an expected rate of the kaon beam at J-PARC, without deteriorating the performance such as position resolution and detection

いて述べる。

TPCは超伝導Helmholtz磁石と組み合わせて、Hダイバリオンへの崩壊による探索を主目的として設計された。数cmの飛程をもつ Λ 粒子などのハイペロンを高精度かつ高効率で測定することができる。TPCの中に標的を置きビームがTPCの中を通るところが他にないユニークなところである。そのためイオンフィードバックの少ないGEMによる電子増幅を行う。我々はテスト用のプロトタイプGEM-TPCを製作し、ベータソースやレーザーによるテストの他、電子ビーム(ELPH)や陽子ビーム(RCNP)を用いたテスト実験を行い。このGEM-TPCの性能を調べた。その結果予想されるJ-PARCのK中間子ビーム強度($10^6/\text{sec}$)までは位置分解能などの性能を落とさず高効率で作動できることを確かめた(図5)。また長期間の動作テストも行った。詳しい内容はすでに論文にまとめられている[4]。これらのテスト結果に基づきフルサイズのTPCの設計・製作を

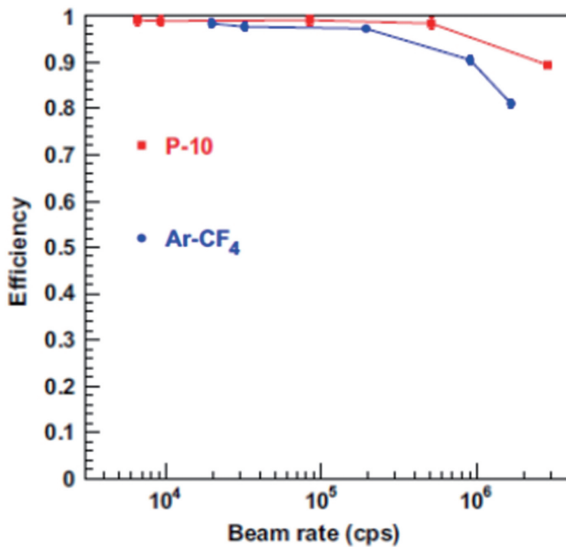


図5 TPC検出効率のビームレート依存性

Fig.5 The beam rate dependence of TPC detection efficiency

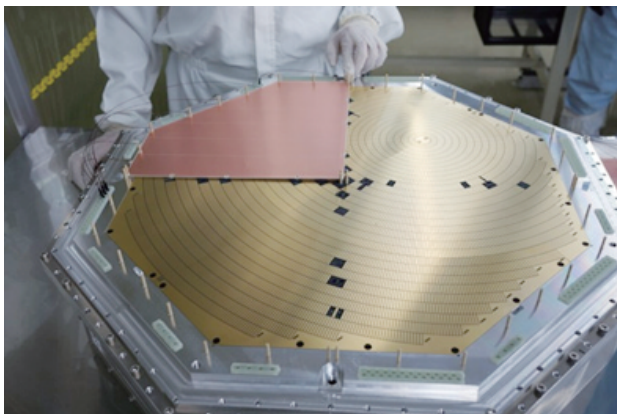


図6 TPCの読み出しpad上のGEM取り付け

Fig.6 A picture of TPC pads and a quarter of GEM

efficiency (Fig.5). We have also performed a long term stability test. The detail of the results of the test measurements are described in the paper [4]. According to the results of the test measurements, we have designed and constructed a TPC of full size. A picture taken when a quarter of GEM was installed just above the 6000 readout pad sheet is shown in Fig.6.

(3) Theoretical studies of nuclear matter in neutron stars.

One of the most important problems in nuclear physics is to understand the phase diagram of matter in the plane of temperature and density. Basically, hadron phase exists at low-temperature and low-density domain, and quark-gluon phase otherwise. Recent studies, however, gave rises to many phases in the precise phase diagram.

Since the first-principle lattice QCD calculation has revealed a smooth crossover between the cold hadron phase and the hot quark-gluon phase, much attention is being paid to nuclear matter in the higher density regime where the LQCD calculation is difficult.

Equation of state (EOS; relation between the pressure and density) of nuclear matter is also a long-standing subject. The correct EOS should be able to reproduce the mass and radius of compact stars, particularly the maximum mass had been known to be around 1.5 times the solar mass (M_{\odot}) until a heavy neutron star with $2M_{\odot}$ was discovered. Since then, hadron or quark matter with stiffer EOS is intensively searched for.

Concerned about the EOS of nuclear matter, the treatment of phase transition is crucial. If one assumes a simple uniform matter, there happens a discontinuity of pressure at the phase transition. Considering the coexistence of two phases makes the pressure continuous. To get a correct EOS, however, it is necessary to take into account the geometrical structures of mixed phase. We have been studying theoretically to understand such structures and their influences.

In the study of inhomogeneous structures of low-density nuclear matter, often used is the Wigner-Seitz approximation where geometrical symmetry is assumed. Without employing this approximation, we have carried out a mean-field calculation in the fully three-dimensional space. First, in the case of nuclear matter of supernovae, we have observed the appearance of “pasta” structures (Fig. 7) [5], i.e., with increase of density, the nuclear shape changes from spherical droplets to cylindrical rod, planar slab, cylindrical tube, and spherical bubble before changing into uniform matter. We have also found that at some density region there appears a face-centered lattice of nuclei [6], which is against the common agreement that only a body-centered lattice appears which minimize the Coulomb energy.

行った。約6000の信号読み出しパッドとGEMの取り付け時の写真を図6に示す。

(3) 中性子星核物質の理論的研究

原子核物理における中心的課題の一つに、原子核物質の相図が挙げられる。基本的に、低温・低密度がハドロン相で、高温や高密度ではクォーク・グルオン相が実現していると思われるが、近年では様々な相が考えられ、より詳しい相図が描かれるようになった。更に第一原理的な格子QCD計算によって、低密度でのクォーク・グルオン相とハドロン相の間が相転移ではなくクロスオーバーであることが分ってくると、今度は格子QCD計算が使えない高密度での物質の振舞いに関心が高まっている。

一方、核物質の状態方程式（密度の関数としての圧力）を決定する事が長年の課題となっている。正しい状態方程式は、中性子星のような高密度天体の質量や半径を計算で再現できなくてはならない。これまで中性子星の最大質量は太陽質量の1.5倍程度とされていた。ところが最近、太陽質量の2倍という重い中性子星が発見されてから、十分な硬さの状態方程式をもつハドロン物質やクォーク物質が求められている。

核物質の状態方程式を考える上で、相転移をどう扱うかが重要となる。単純に一樣物質を仮定すると、相転移が起こった時に圧力が不連続になる。2相の共存を考慮に入れると圧力が連続になるが、熱力学的に正しいやり方で2相の共存を計算するには、共存相の幾何学的構造を取り入れた計算が必要であり、我々はその非一樣構造そのものや、それがもたらす影響を研究した。

低密度物質の非一樣構造の研究では、幾何学的対称性を仮定するWigner-Seitz近似がよく用いられる。我々はこの近似を用いずフルに三次元の計算によって構造を計算した。まず、密度の上昇により球から棒、板、…と変化するいわゆるパスタ構造の出現を、超新星物質において確かめた（図7参照）[5]。また、中性子星表面物質に関しては、低密度の球形原子核が格子状に整列するが、

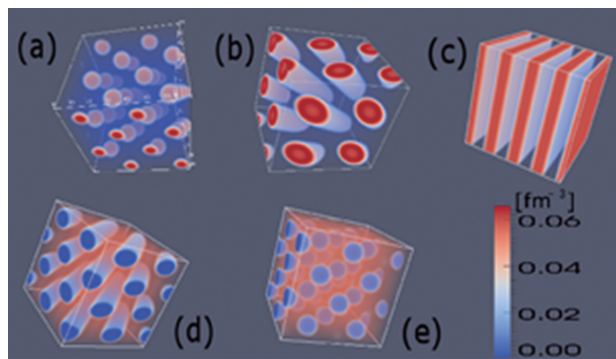


図7 対称核物質の非一樣構造
陽子の密度分布を色であらわす。Phys. Lett. B713, 284 (2012) より転載

Fig.7 Non-uniform structure of symmetric nuclear matter
The proton density distributions are indicated by colors.

We have investigated the inhomogeneous structures of matter in proto-neutron stars with trapped neutrinos. The presence of neutrino was found to enhance the appearance of pasta structures. For higher densities, we have studied the structure and property of matter with kaon condensation, multi-kaonic nuclei, and EOS of quark-hadron mixed phase. We have proposed an EOS of quark matter which sustains heavy neutron stars with twice the solar mass.

3. Importance of the result and its impact

We have obtained the important results from the three experiments at J-PARC. Among them, the evidence of the K^-pp state found in our experiment has a great impact on the existence of the kaonic nuclei. Nuclear matter involving mesons was not established concept and it is a new state of nuclear matter. The existence of kaonic nuclei will provide a new paradigm in nuclear and hadronic physics, if it is established. It is also very much related to the nuclear matter of neutron stars and astrophysics.

The development of TPC which has an internal target and can be operated under a high beam rate was successfully carried out. This TPC makes it possible to increase the detection sensitivity of various reactions by order of 10^6 compared to the bubble chambers which played a major role in particle physics 50 years ago. It will give a new paradigm for J-PARC hadron physics especially that needs to detect hyperons with a flight length of a few cm.

Inhomogeneous mixed phase “pasta” is expected to appear in low-density nuclear matter, meson condensation at higher densities, and quark deconfinement. It is now considered as a very general form of mixed phases and its significance is increasing in obtaining the EOS. In this situation, our calculation of “pasta” structures without any assumption of structure is very important.

4. Perspectives

The schedule of hadron physics experiments at J-PARC is unfortunately long delayed by the big earth quake and the radiation leak accident at the Hadron Hall. However, the studies of $s=-2$ strangeness nuclear physics with kaon beams such as the searches for double hypernuclei and H-dibaryon will start in 2015. They were considered as the high priority programs at the beginning of the J-PARC operation. We try to discover new quark and nuclear matter such as exotic hadrons and $s=-2$ hypernuclei with help of world highest kaon beams of J-PARC and with new detectors such as GEM-

その格子構造は体心立方のみという定説を覆し、一部の密度領域で面心立方が現れる事を示した[6]。

これ以外にはニュートリノがトラップされた原始中性子星物質の非一様構造を調べ、ニュートリノの存在がパスタ構造の出現を促進する事を示した。高密度物質では、K中間子凝縮物質、K中間子が多数含まれる原子核の構造や、クォーク-ハドロン混合相の状態方程式と中性子星の質量などを調べた。太陽質量の2倍ある、重い中性子星を支えることが出来るクォーク物質の模型を示した。

3. 成果の意義と波及効果

J-PARCの三つの実験の成果はそれぞれあるが、とりわけK中間子原子核の存在をうらなう K^-pp 状態の探索実験においてその証拠と思われる結果を得たことである。

中間子を含む核物質は新しい概念であり、新しい核物質である。K-中間子原子核の存在は、もし確立すれば原子核ハドロン物理の新しいパラダイムとなる。中性子星の核物質の問題を通じて宇宙物理とも深く関係する。その意味で大きな意義を持つ。

標的内蔵で高い粒子レートで使用できるTPCの開発に成功した。このことにより50年前素粒子物理の中心的検出器であった泡箱の検出感度よりも 10^6 高い感度を実現できる。特に数cmの飛程をもつハイペロンの測定を必要とするJ-PARCでのハドロン実験に新しいパラダイムをもたらすだろう。

低密度原子核物質をはじめ高密度での中間子凝縮やクォーク非閉じ込め相転移においても「パスタ構造」が予測されており、相転移における混合相の一般的な構造として考えられるようになってきた。さらに、物質の状態方程式を考える上でも無視できないものとなっている。構造を仮定しない数値計算により、低密度原子核物質のパスタ構造の出現が確認されたことは重要である。

4. 今後の予定

これまで残念ながら、大震災やハドロンホールでの放射能もれ事故のためハドロン実験は予定より大きく遅れている。しかし来年度からは本来の重点課題であったK中間子ビームを用いた、ダブルハイパー核やHダイバリオン探索などのストレンジネス $s=-2$ の核物理の研究がはじまる。今後はこれまで開発してきたTPCなどの新しい検出器を駆使して、J-PARCで世界から期待されてきた大強度K中間子ビームを用いて、新しいエキゾチックハドロンやダブルハイパー核などの新しいクォーク物質や原子核の発見を目指す。

近年高密度核物質の問題が中性子星や核物質相図に関連して大きな注目を集めている。我々はJ-PARCでの重イオンの加速により、新たなハドロン物理として高密度核物質の研究を展開すべくその準備研究をさらに進める予定である。

TPC which we have developed in the past five years.

Recently high density nuclear matter has attracted a lot of attention in relation with phase diagram of nuclear/quark matter and neutron stars. We plan to further extend the current preparatory studies on the acceleration of heavy ions and heavy ion collisions at J-PARC. It will open a new field, physics of high density matter, in nuclear and hadronic physics at J-PARC.

参考文献 References

- [1] K.Shirotori *et al.*, Phys. Rev. Lett. **109**, 132002 (2012) .
- [2] H.Sugimura *et al.*, Phys. Lett. **B729**, 39 (2014).
- [3] Y.Ichikawa *et al.*, Prog. Theor. Exp Phys. **2014** 10ID03 (2014).
- [4] H.Sako *et al.*, Nucl. Instr. & Methods **A763**, 65 (2014)
- [5] M.Okamoto *et al.*, Phys. Lett. **B713**, 284 (2012).
- [6] M.Okamoto *et al.*, Phys. Rev. **C88**, 025801 (2013).