

ハドロン原子核物理研究グループの紹介 Researches in Hadron Nuclear Physics Group

田村 裕和 ハドロン原子核物理研究グループ
Hirokazu TAMURA Research Group for Hadron Nuclear Physics



概要

ハドロン原子核物理研究グループでは、おもにストレンジクォークを含む原子核やハドロンを実験的に調べて、クォークからハドロン、ハドロンから原子核が生まれた仕組みを理解することを目指している。主に J-PARC のハドロン施設において様々な実験を主導し、理論研究者とともにこの問いに答えようと研究を進めている。

1. はじめに

この宇宙にはさまざまな原子核が存在し、それがあらゆる物質のもととなっているが、その原子核はなぜ存在するのだろうか？ 素粒子クォークが強い相互作用によって結合し、陽子・中性子などのハドロン (= 複数クォークの束縛系) となり、それらがさらに束縛して原子核となることはわかっているが、その仕組みには謎が多く、クォークの世界を記述する基礎理論 QCD (量子色力学) に基づいてクォークから原子核までを一貫して記述し理解するには至っていない。図 1 のように核子 (= 陽子・中性子) の構成要素は u (アップ)、 d (ダウン) クォークだが、当グループでは通常の物質に含まれない s (ストレンジ) クォークをもつハドロンや原子核の性質を調べることにより、ハドロンと原子核をクォークレベルから理解することを目指している。

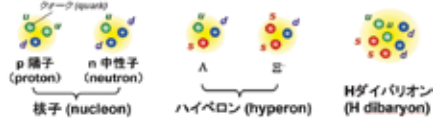


図 1 核子とハイペロンの成り立ち。核子は u, d クォークのみから成るが、ハイペロンはストレンジ (s) クォークを含む。我々が探索する H ダイバリオンは 2 個ずつの u, d, s クォークから成る。(色の表示はカラー荷とは無関係)

Fig. 1 Composition of nucleons and hyperons. Nucleons are made of u and d quarks while hyperons contain s quarks. The H dibaryon we are searching for has two u, d , and s quarks each. (Colors in the figure have nothing to do with the color charge.)

s クォークを含んだ原子核はハイパー核とよばれ、ハイペロン (核子の u, d クォークの一部を s クォークで置き換えたもの) といわれる Λ 粒子や Ξ 粒子 (図 1) を、核子とともに含んだ原子核である。ハイパー核は、中性子数、陽子数を軸にとった 2 次元の核図表には収まらないので、我々は s クォークの数を第 3 軸にとった「3 次元核図表」を使っている (図 2)。このように原子核の世界を 3 次元的に広げ、物質の世界を拡大することが我々の目標である。

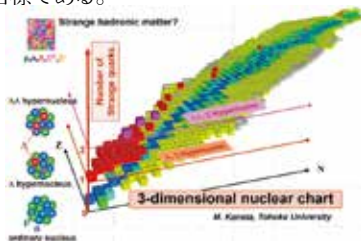


図 2 第 3 軸にストレンジクォーク数をとった 3 次元核図表。2 階部分に Λ, Ξ ハイパー核、3 階部分に $\Lambda\Lambda, \Xi\Xi$ ハイパー核が配置される。さらに上には核子とハイペロンが混合した準安定物質 (strange hadronic matter) の存在が予想されており、これが重力で圧縮され安定化したものが中性子星内部にあるかもしれない。

Abstract

Hadron Nuclear Physics group aims to understand how hadrons are produced from quarks and then atomic nuclei are formed from hadrons mainly through experimental studies of nuclei and hadrons containing strange quarks. In order to answer these questions, we are conducting research by leading various experiments mostly at the Hadron Experimental Facility (HEF) in J-PARC, as well as by collaborating with theorists.

1. Introduction

All the matter in the universe is originated from various atomic nuclei. Why do those nuclei exist? We know that elementary particles called quarks are combined via strong interaction to create hadrons (bound systems of quarks) such as protons and neutrons, which are then bound together to form nuclei. However, there are many questions in this mechanism, and consistent description and understanding from quarks to nuclei based on QCD (Quantum Chromo Dynamics), the fundamental theory describing the world of quarks, has not been given yet. Our group aims to understand hadrons and nuclei from the level of quarks by investigating properties of hadrons and nuclei containing s (strange) quarks, which do not exist in ordinary matter in contrast to u (up) and d (down) quarks forming nucleons (=protons and neutrons) (see Fig. 1).

The nuclei containing s quarks are called hypernuclei. In addition to nucleons, they are made of hyperons such as Λ and Ξ particles (Fig. 1), in which one or more u, d quarks in the nucleons are substituted with s quarks. Hypernuclei cannot be accommodated in the nuclear chart with the axes of the neutron and the proton numbers. We use the “3-dimensional nuclear chart” (Fig. 2), introducing the third axis for the number of s quarks. Our motivation is to extend the world of nuclei 3-dimensionally and to update our concept of matter.

Although hyperons decay in lifetimes of $\sim 10^{-10}$ s, we can produce hypernuclei by creating hyperons and embedding them into nuclei, and then experimentally investigate their properties and structure. Hadron Experimental Facility (HEF) in J-PARC is one of the most suitable laboratories for such studies, because hyperons are efficiently created from intense K or π meson beams produced from high-intensity proton beams.

Studies of hypernuclei have some particular significance. By studying hyperon-nucleon and hyperon-hyperon interactions we can elucidate the origins of

Fig. 2 Three-dimensional nuclear chart with the third axis of the number of strange quarks. Λ and Σ hypernuclei are plotted in the first floor, while $\Lambda\Lambda$ and Ξ hypernuclei are placed on the second floor. Going up farther, we expect metastable matter made of nucleons and hyperons (strange hadronic matter). Such matter may exist in neutron stars stably due to compression by gravity.

ハイペロンは 10^{10} 秒程度の寿命で崩壊するが、これらを生成し原子核に埋め込んでハイパー核を作り、その性質や構造を実験的に調べることができる。こうした実験に特に適しているのが大強度陽子加速器J-PARCである。陽子ビームから作られる大強度のK, π 中間子ビームを使うとハイペロンを効率よく生成できる。

ハイパー核の研究にはいくつかの重要な意義がある。一つは、ハイペロンと核子、ハイペロンとハイペロンの間に働く力を調べることで、原子核を形作る「核力」(核子間の力)の起源を明らかにできることである。核力のもとである強い相互作用は、クォークのもつ「カラー荷」の間に働く力である。核子などのハドロンは複数クォークのカラー荷が中和した「白色」状態であり、それら同士に働く力は複雑である。距離が離れたところでは π 中間子の交換により引力が生ずる(湯川理論)が、近距離での核力の強い斥力の起源はわかっていない。クォークに基づく理論模型では、核子の u, d クォークを s クォークに変えると近距離の相互作用は大きく様変わりすると予想されており、ハイペロン・核子、ハイペロン・ハイペロンの相互作用を調べると理論模型の可否をテストすることができる。さらに、最近可能になったQCD理論による核力のシミュレーション(格子QCD計算)を検証するという重要な使命もある。

もう一つは、 s クォークを含む物質の理解は、中性子星内部の高密度物質の解明に不可欠なことである。宇宙に浮かぶ巨大原子核というべき中性子星は、中心部分の密度が原子核密度の数倍以上にもなる。ここでは、重力で閉じ込められた中性子のフェルミエネルギーが極めて高いため、中性子一部は、質量が重く本来不安定なハイペロン(Λ や Ξ)に自発的に転換して安定に存在しているはずである。しかし、こうした予想はハイペロン・核子、ハイペロン・ハイペロンの間の力に強く依存する。さらに、ハイペロンを含む理論計算が、最近観測された極めて重い中性子星の質量を説明できないという問題も生じ、そもそも現在の原子核理論が通常の核密度を超えた物質を記述できないことも判明した。我々は「ミニ中性子星」というべきハイパー核を地上で作る、ハイペロンの力を詳細に調べ、中性子星を解明したいと考えている。そこに s クォークが安定に存在するならば、「現在の宇宙にある物質は u, d クォークと電子の3種類の素粒子からなる」という常識が覆える。最近、中性子星連星の合体が重力波で捉えられ、観測からも中性子星内部の物質の情報が得られる可能性が出てきた。様々な天体観測や理論・実験研究と連携して、我々の物質観にかかわるこの重要な問いに答えたい。そして、クォークからハドロン、原子核、中性子星までを一貫して理解して、物質とは何か、という根本的な問いに答えたい。

2. 研究の内容と最近の成果

当グループの活動の中心は、我々JAEA先端研と同じ敷地にあるJ-PARCハドロン施設で行う s クォークを含むハドロン・原子核の研究である。また、J-PARCで重イオンを加速し、高密度核物質を調べる計画を提案・検討している。

(1) ストレンジクォーク2個の系

我々が今特に力をいれている研究対象は、 s クォーク2個の系である。実験データが極めて少なく、世界でもJ-PARCハドロン施設でのみ研究が可能な分野である。

● Hダイバリオンの探索 (J-PARC E42)

中でも特に重要なテーマが、Hダイバリオン探索である。Hダイバリオンは、理論的に存在が予言されている u, d, s クォーク2個ずつからなる6クォーク束縛状態(図1右)である。複数クォークの束縛系=ハドロンには、3個のクォーク束縛系(核子やハイペロン)と、2個のクォーク束縛系(中間子)があるが、それ以外のハドロンが存在するのかわかはいまだ明らかでない。クォーク6個のハドロンが発見されれば、ハドロン物理の新しい地平が拓かれる。また、これは2つの核子やハイペロンが短距離の強い引力で一体化した状態であり、核力の起源解明にもつながる。

我々の実験は、当ハドロングループを創設した今井憲一氏が2012年に提案した高感度H探索である。最近の格子QCD計算は $\Lambda\Lambda$ より上の質量にHが存在する可能性を指

す“nuclear force”(the interaction between nucleons), which is responsible for formation of nuclei. The nuclear force stems from strong interaction operating between “color charges” in quarks. Since nucleons are multi-quark systems with neutralized color charge (in “white” color), the interaction between these white objects is complicated; at a large distance the attractive force appears by exchanging π mesons (Yukawa theory), while the origin of the strong repulsive force at a short distance is not yet understood. According to theoretical models based on quark picture, the short-range interactions are predicted to be drastically changed when one or more u, d quarks in the nucleons are substituted to s quarks. Thus, study of the hyperon-nucleon and hyperon-hyperon interactions allows us to test validity of those theoretical models. Verification of the recently-developed lattice QCD simulations of the nuclear force is also an important mission of the hypernuclear studies.

Another significant aspect is that understanding matter with s quarks is indispensable for elucidation of the high-density matter in neutron stars. A neutron star, a sort of a giant nucleus floating in the space, has a density at the center several times larger than the nuclear density. The neutrons confined there by gravity have a large Fermi energy, and thus some of them convert to hyperons (Λ, Ξ) with heavier masses and become stable. Such a scenario strongly depends on hyperon-nucleon and hyperon-hyperon interactions.

In addition, theoretical calculations including hyperons fail to explain recently-observed very massive neutron stars, which shows that the present nuclear theories cannot describe the matter with density exceeding the normal nuclear density. We artificially produce hypernuclei, to be called as “mini-neutron stars” on the earth, and investigate hyperon interactions in order to unveil the mysteries in neutron stars. Confirmation of the existence of s quarks there would update our conventional view that the matter in the universe is made from elementary particles of u, d quarks and electrons. Recent observation of gravitational waves from a neutron star merger showed a possibility to obtain information on the matter inside neutron stars from observations. We wish to answer this important question, in collaboration with various researches on astronomical observations as well as theoretical and experimental studies, and answer the ultimate question “what is the matter” by understanding consistently from quarks to hadrons, nuclei, and neutron stars.

2. Our research and recent results

The main activities of our group are experimental studies on hadrons and nuclei containing s quarks at J-PARC HEF located on the same campus as JAEA ASRC. We are also proposing and examining a future project of accelerating heavy ion beams at J-PARC to investigate high density nuclear matter.

(1) Nuclear systems with two strange quarks

The main project in our group is studies of systems with two s quarks. Their experimental data are particularly sparse. They can be investigated only at J-PARC HEF in the world.

● Search for H dibaryon (J-PARC E42)

Our most important subject is search for H dibaryon. The H dibaryon is a theoretically predicted six-quark bound state with two u, d, s quarks each (Fig.1 right). Hadrons (bound states of multi-quarks) are classified into the three-quark states (nucleons and hyperons) and the two-quark states (mesons), but whether other types of hadrons exist or not is still unclear. The existence of a six-quark hadron would open a new path for hadron physics research. Since it is regarded as two nucleons/hyperons

摘しており、我々は大強度 K⁻ ビームで H を生成し H → Λ Λ の崩壊を測定する。当グループはこの国際共同実験を主導し、崩壊粒子測定用スペクトロメータとその飛跡検出器 (HypTPC) (図 3) など様々な実験装置を開発した [1]。現在、2020 年度の実施を目指して準備を進めている。



図 3 当グループが開発した H ダイバリオン探索実験用の (a) 崩壊粒子測定用磁気スペクトロメータ、および (b) その内部の飛跡検出器 (HypTPC) の概念図。

Fig. 3 Schematic view of (a) the magnetic spectrometer for decay particles and (b) its tracking detector (HypTPC) inside the spectrometer, developed by our group for the H dibaryon search experiment.

● 原子核乾板によるダブルハイパー核研究 (J-PARC E07)
 ダブルハイパー核 (s クォークを 2 つ含む核、ΛΛ 核と Ξ 核) は、これまで数個の観測例しかなく、ΛΛ 間および Ξ N 間 (N は核子) の相互作用を調べるために多数の ΛΛ 核と Ξ 核のデータが待ち望まれていた。我々は岐阜大・仲澤氏らとともに、前回の KEK での原子核乾板実験を改良しその 10 倍のデータを取るべく本実験を行った。K⁻ ビームで生成した Ξ⁻ 粒子を原子核乾板に入射した。Ξ⁻ の生成反応を磁気スペクトロメータで同定し、乾板の手前にシリコンストリップ検出器を設置して Ξ の乾板への入射位置を 1 事象ごとに記録して、その情報をもとに現像後の乾板を顕微鏡で自動画像解析した。ビーム照射は 2016、17 年に実施し、現在当グループと岐阜大で画像解析を進めている [2]。これまでの解析で 35 事象のダブルハイパー核を観測した。その一つが ${}_{\Lambda\Lambda}^{\text{Be}}$ と考えられる明確な Be の ΛΛ ハイパー核事象 (MINO event, 図 4) で、束縛エネルギーから ΛΛ 間の引力エネルギーの定量的な値が得られた [3]。
 また、Ξ が乾板中の ${}^{14}\text{N}$ 核に束縛して吸収され、2 個の Λ ハイパー核が放出された事象 (IBUKI event) では、Ξ⁻ と ${}^{14}\text{N}$ の間の束縛エネルギーが 1.1 MeV と大きく、強い相互作用で束縛された Ξ 核であることがわかった。過去の KEK の実験でも同じ Ξ⁻ ${}^{14}\text{N}$ 束縛状態が見つかったが、そのデータでは Ξ⁻ の束縛エネルギーに不定性があった。今回の事象は、Ξ 原子核間引力の初めての明確な定量的データとして極めて重要である。

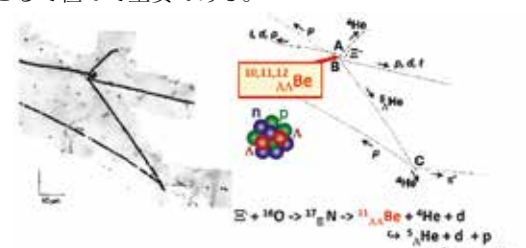


図 4 J-PARC E07 実験で発見した新種の ΛΛ ハイパー核。 ${}_{\Lambda\Lambda}^{\text{Be}}$ である可能性が高い。

Fig. 4 A new type of ΛΛ hypernucleus observed in J-PARC E07 experiment. Most likely it is assigned as ${}_{\Lambda\Lambda}^{\text{Be}}$.

● Ξ 原子 X 線の研究 (J-PARC E07、E03)
 Ξ 原子核間の強い相互作用の情報を得る別の方法として、Ξ⁻ が原子軌道に束縛した Ξ 原子の X 線エネルギーを測定し、そのエネルギーのクーロン力だけの予想値からのずれを測る方法がある。この実験は難しく、これまでに実験例がなかったが、E07 実験では原子核乾板の周囲に Ge 検出器を設置し Ξ 原子 X 線の測定にも挑戦した。X 線を放出する Ξ⁻ 静止事象を選ぶべく、乾板の画像解析を進めている。さらに、Ξ を生成した標的物質 (Fe 等) 自身に Ξ を止めて Ξ 原子を作り、X 線を測定する実験 (E03) も準備している。最初のビームタイムが 2020 年度に予定されている。

fused together via attractive short-range force, it also helps us understand the nuclear force.

Our experiment is a highly-sensitive H search proposed in 2012 by Dr. K. Imai who initiated our hadron group. We produce H dibaryons with intense K⁻ beams and measure H1 ΛΛ decay events, given that recent lattice QCD calculations have predicted the H mass above the ΛΛ threshold. Our group has been leading an international team for this experiment and developed various pieces of apparatus including the magnetic spectrometer for decay particles with a tracking detector (HypTPC) (Fig.3) [1]. Our preparation is in progress toward the beam time scheduled in FY2020.

● Double hypernuclei with nuclear emulsion (J-PARC E07)

Only a few events of double hypernuclei (nuclei containing two s quarks such as ΛΛ and Ξ hypernuclei) have been observed, and many data samples for double hypernuclei have been awaited to extract information on the ΛΛ and ΞN interactions. In collaboration with Prof. Nakazawa (Gifu Univ.) and others, we carried out an updated emulsion experiment at J-PARC (E07) to collect 10 times more events than the previous KEK experiment. We injected Ξ⁻s produced with K⁻ beams into nuclear emulsion. We identified Ξ⁻ production events with the magnetic spectrometers and recorded the positions of the Ξ⁻ injection points on the emulsion for each event. Based on this information we automatically analyzed the image of the developed emulsion with microscopes. Beam exposure was done in 2016 and 17, and now we are continuing the image analysis together with Gifu University [2].

Up to now, 35 double hypernuclear events have been observed. Among them is a clear beryllium/ΛΛ hypernucleus, assigned most likely as ${}_{\Lambda\Lambda}^{\text{Be}}$ (MINO event, Fig. 4). We obtained a quantitative value of the ΛΛ interaction energy from its mass [3].

We also observed another important event in which a Ξ⁻ is absorbed by a ${}^{14}\text{N}$ nucleus followed by emission of two Λ hypernuclei (IBUKI event). The binding energy between the Ξ⁻ and ${}^{14}\text{N}$ was found to be 1.1 MeV, indicating that this state is a Ξ⁻ hypernucleus bound via strong interaction. An event of the Ξ⁻ ${}^{14}\text{N}$ bound state was also observed in the past KEK experiment but the binding energy was not uniquely determined. The present event is of great significance providing the unambiguous quantitative value of the Ξ⁻-nucleus attraction for the first time.

● Study of Ξ atomic X-rays (E07, E03)

Another way of studying Ξ-nuclear strong interaction is to measure energies of X-rays from the atom with a Ξ⁻ in atomic orbits and investigate the energy shift from the value expected for Coulomb interaction only. There has been no attempt of this measurement due to experimental difficulties. In the E07 experiment we installed germanium detectors around the emulsion and tried this measurement. We are analyzing the emulsion image to select stopped Ξ⁻ events which emit X-rays.

In addition, we are preparing for another experiment (E03) for Ξ⁻ atomic X-rays in which we stop Ξ⁻ in the Ξ production target such as Fe. The first beam time is schedule in 2020.

(2) Nuclear systems with a single strange quark

We also study nuclear systems with a single strange quark, Λ hypernuclei and K-mesonic nuclei/K⁻ atoms. High-quality Λ hypernuclear data are necessary in order to understand Λ-nucleon interactions in nuclear matter and to apply it to neutron stars. In addition, the existence of K-mesonic nuclei is still a puzzle to be clarified

● Hypernuclear γ-ray spectroscopy (J-PARC E13)

From level structure of Λ hypernuclei via precise γ-ray

(2) ストレンジクォーク 1 個の系

s クォーク 1 個をもつ Λ ハイパー核や K 中間子核・K 中間子原子の研究も行っている。核内での Λ 核子相互作用を理解し中性子星に適用するには、高精度のハイパー核データが必要であり、また K 中間子核の存在は未決着である。

● ハイパー核ガンマ線分光実験 (J-PARC E13)

様々な Λ ハイパー核のレベル構造を精密 γ 線測定で調べると、 Λ 核子相互作用が研究できる。東北大とともにゲルマニウム検出器を用いて γ 線分光実験 (E13) を行った。

${}^4_{\Lambda}\text{He}$ (p,p,n, Λ) では、図 5 (赤線) に示す励起状態から基底状態への γ 遷移を観測した [4]。このエネルギーは、鏡像核 (陽子と中性子を入れ替えた核) である ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ (p,n,n, Λ) の対応する γ 遷移のエネルギーと大きく異なり、荷電対称性がハイパー核で大きく破れることを示している。荷電対称性は、陽子と中性子の性質がほぼ同じことからくる原子核の基本的性質で、鏡像核の束縛エネルギーやレベル構造はほぼ同じはずである。 Λ 粒子を入れるとこれが破れる理由は理論で説明できず、この謎の解明が待たれる。

また、初めて重い領域 (*sd* 殻) のハイパー核 ${}^{19}_{\Lambda}\text{F}$ の γ 線も測定した [5]。4 つの γ 遷移から求めた ${}^{19}_{\Lambda}\text{F}$ の構造が理論計算でほぼ正確に再現され、我々の ΛN 相互作用と Λ ハイパー核構造の理解が重い核にも通用することがわかった。

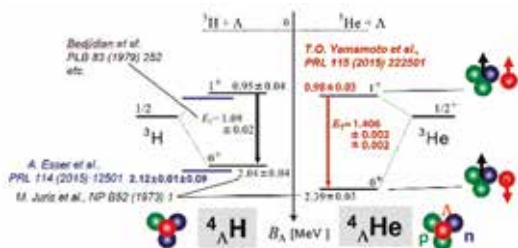


図 5 鏡像ハイパー核 ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ と ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ のレベル図 (縦軸は Λ の束縛エネルギー (MeV))。J-PARC E13 実験で観測した γ 遷移を赤で示す。両者のレベルエネルギーは大きく異なり、荷電対称性の大きな破れの存在が明らかになった。

Fig. 5 Level schemes of mirror hypernuclei, ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ and ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ (Vertical axis is the Λ 's binding energy (MeV)). Red arrow shows the γ -ray observed in J-PARC E13. From the large difference of the level energies between them, existence of a large charge symmetry breaking effect is confirmed.

● K⁻中間子原子核の研究 (J-PARC E27, E15)

s クォークをもつ中間子である K^- (反 K 中間子) と陽子との間には強い引力が働くことから、 K^- を含んだ核、特に K^-pp が深く束縛すると予想されていた。中性子星の中心部に K^- が存在する可能性もある。我々は、京大グループとともに π^- ビームを重陽子標的に当てて K^-pp 束縛状態を探索する実験 (E27) を行い、約 100 MeV の極めて深い K^-pp 束縛状態の存在を示唆するスペクトルを得た [6]。

一方、理研グループとともに実施した K^- ビームと ${}^3\text{He}$ 標的による実験 (E15) では、束縛エネルギー 47 MeV の K^-pp 状態と解釈できる明確なピークが最近観測された [7]。さらに当グループの理論家がスペクトルを計算し、このピークが K^-pp 束縛状態であることを示した [8]。ただ、E27 データとの関連は不明で、さらなる研究を進めつつある。

● K⁻中間子原子 X 線分光 (J-PARC E57, E62)

Ξ^- 原子と同様、 K^- が軌道を回る K^- 原子の X 線を測定し K^- と核子や原子核との相互作用を調べる実験も重要である。我々は、極めて高分解能の検出器 Transition Edge Sensor (TES) を用いて $K^-{}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 原子の X 線を測定した (E62) [9]。一方、別の検出器を用いて K^- と重陽子の原子 X 線を測定して、 K^-p 、 K^-n 相互作用を分けて (K^-n のアイソスピニングごと) に決定する実験 (E57) も準備している。

(3) ハドロンの研究

● HypTPC を用いたハドロン実験 (J-PARC E45, E72)

ハドロンの基底状態は qqq や $q\bar{q}$ のクォーク模型でよく記述されるが、ハドロンの励起状態は、クォークの内部運動の励起という描像のみでは説明できないことが多い。複数のハドロンの束縛状態・共鳴状態や、4 個以上のクォークの結合状態との重ね合わせで理解する必要があるであろう。こうした複雑なハドロンの励起状態を理解するため、より詳しい実験データが求められている。

1 ~ 2 GeV/c の π 中間子ビームを陽子に当てると核子の

measurement the Λ -nucleon interaction can be studied. In collaboration with Tohoku group we carried out a γ -ray spectroscopy experiment (E13) with germanium detectors.

For ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ (p,p,n, Λ) hypernucleus, we observed a γ -transition from the excited to the ground state as shown in red in Fig. 5 [4]. This energy was largely different from the corresponding transition energy in the mirror nucleus (the nucleus with the numbers of protons and neutrons interchanged), ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ (p,n,n, Λ), confirming a large charge symmetry breaking effect in hypernucleus. Charge symmetry is a basic property in nuclei resulted from similarity between protons and neutrons and predicts almost the same level schemes between mirror nuclei. The reason why $a\Lambda$ breaks down this symmetry is not theoretically explained. Solution of this puzzle is awaited.

In addition, we first observed γ -rays from a hypernucleus in a heavier mass number region (*sd*-shell), ${}^{19}_{\Lambda}\text{F}$ [5]. The level scheme determined from four observed γ -transitions is found to be reproduced quite well with theoretical calculations, indicating that what we have understood on the ΛN interaction and hypernuclear structure is widely applied to heavier hypernuclei.

● K⁻mesonic nuclei (J-PARC E27, E15)

Because of a strong attractive force between a proton and a K^- meson (anti K meson) containing an s quark, a nucleus with a K^- , a K^-pp cluster in particular, is expected to be deeply bound to a nucleus. K^- s may possibly exist at the core of neutron stars. We searched for K^-pp with π^- beams and a deuterium target (E27) with Kyoto group and obtained a spectrum suggesting the existence of a deeply bound state with -100 MeV bound [6].

On the other hand, our recent experiment carried out with K^- beams and a ${}^3\text{He}$ target in collaboration with RIKEN group (E15) observed a clear peak structure which is interpreted as a K^-pp state bound by 47 MeV bound [7]. A theorist in our group made a theoretical calculation of the spectrum and confirmed that his peak is attributed to a K^-pp bound state [8]. However, relation with the E27 data is not understood yet and further experimental studies are planned.

● K⁻atomic X-rays (J-PARC E57, E62)

Similar to Ξ^- atoms, X-ray measurement from K^- atoms with a K^- orbiting a nucleus is also important to investigate K^- -nucleon and K^- -nucleus interactions. By employing Transition Edge Sensors (TES) with an extremely high resolution for the first time, we successfully measured $K^-{}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ atomic X-rays (E62) [9]. On the other hand, we are planning an X-ray measurement (E57) of K^- -deuterium atoms in order to determine the interaction of K^-n and K^-p separately (for each isospin of K^-n).

(3) Study of hadrons

● Experiments with HypTPC (J-PARC E45, E72)

Ground states of hadrons are well described by quark models in terms of qqq and $q\bar{q}$, while many of their excited states cannot be explained as excitation of internal quark motion. They need to be described as superpositions of bound or resonance states of two or more hadrons and bound states of more than four quarks. To understand such complicated excited states of hadrons, more detailed experimental data are required.

Although various excited states of the nucleon are produced from a proton bombarded by 1-2 GeV/c pion beams, states decaying into several pions or into a hyperon and a kaon have not experimentally investigated well. Employing our HypTPC detector developed for the H dibaryon search we plan to perform an experiment (E45) to investigate various nucleon excited states precisely [10]. On the other hand, we found a hint of a new hyperon

様々な励起状態が作られることが知られているが、複数の π へ崩壊する状態やハイペロンとK中間子に崩壊する状態はこれまであまり調べられていない。我々はダイバリオン探索用に開発したHypTPCを用いて様々な核子励起状態を精密に調べる実験(E45)を予定している[10]。一方、我々はBelleデータの解析で、新たなハイペロン励起状態 $\Lambda^*(1665)$ の存在の可能性を示した。その存否を明らかにスピン・パリティを決定するため、 K^- ビームとHypTPCを用いた実験(E72)を提案し、採択されている。

● 核内ハドロンの質量変化 (J-PARC E16)

カイラル対称性の自発的破れにより、極めて質量の小さい u 、 d クォークが約100倍の質量を獲得して核子などのハドロンの質量が生じたと考えられている。そのメカニズムが正しければ、原子核媒質中ではカイラル対称性が部分的に回復し、ハドロンの質量が軽くなると予想されている。 ϕ 中間子の質量スペクトルの核内での変化としてこれを系統的に調べるのがE16実験である。ハドロン施設では、高運動量の1次陽子ビームを直接取り出すビームラインがまさに完成し、これを用いたE16実験が2020年春から予定されている。理研・KEK・京大等のメンバーと実験装置の開発・製作や実験準備を進めている。

● J-PARC以外での実験

当グループのメンバーの一部は、KEK BファクトリーのBelle実験によるハドロンの研究[11]や、高エネルギー重イオン衝突実験であるRHIC PHENIX/STAR実験およびLHC ALICE実験による高温・高密度物質の研究にも関わっている。これらの研究は、J-PARCでの研究プログラムと密接に関連している。前者は、J-PARCでのハイペロン励起状態 $\Lambda^*(1665)$ の確認実験(E72)につながり、後者は、後述するJ-PARC-HI計画へと発展している。

(4) J-PARC-HI 計画の推進

原子核同士の衝突では、ビームエネルギーが核子あたり数10 GeV (固定標的の) のところで最も高密度の物質が生成できるとされている。大強度ビームがあれば大量のデータから高密度物質の性質とクォーク物質への相転移の可能性を調べることができる。このエネルギーでの実験は昔AGS加速器で行われたが、ビーム強度が全く足らなかった。J-PARC主リングでウラン等の重イオンを加速すると、このエネルギーで大強度のビームが得られる。AGSより5桁強く、同様の計画であるドイツのFAIRよりも1桁強い $10^{11}/s$ のビームが期待される。

当グループは、加速器の専門家とともに、J-PARCの重イオン加速プロジェクトJ-PARC-HIを提案した[12]。新たに建設する入射器(超伝導線形加速器とブースターリング)で重イオンビームを加速し、3 GeV加速器に入射し加速、さらに主リングで加速し、ハドロン施設にビームを取り出す。それを用いて高密度物質の研究とともに、 s クォークを多数含むハイパー核やエキゾチック粒子の探索も行う。中性子星中心部の解明につながるデータが期待される。

3. おわりに

我々ハドロン原子核グループは、同じ敷地にあるという地の利を生かし、J-PARCハドロン施設での研究を強力に進めている。Hダイバリオン探索などのハドロン物理の鍵となる基幹実験を推進するとともに、各メンバーは、各自の興味や専門に応じて実験を自ら提案・主導し、あるいは他施設での共同実験を進めている。当グループでは多くの学生や若いスタッフが協力し競い合っており、活気あふれた研究生活を送っている。この恵まれた環境を生かして、ハドロンの原子核の根本的な理解をめざしたい。

参考文献 References

- [1] S. H. Kim et al., Nucl. Instrum. Meth. A940 (2019) 359.
- [2] J. Yoshida et al., AIP Conf. Proc. 2130 (2019) 020016
- [3] H. Ekawa et al., Prog. Theor. Exp. Phys. 2019 (2019) 021D02.
- [4] T. O. Yamamoto et al., Phys. Rev. Lett. 115 (2015) 222501.
- [5] S. B. Yang et al., Phys. Rev. Lett. 120 (2018) 132505.
- [6] Y. Ichikawa et al., Prog. Theor. Exp. Phys. 2015 (2015) 021D01.
- [7] S. Ajimura et al., Phys. Lett. B789 (2019) 620.
- [8] T. Sekihara, et al. E. Oset, A. Ramos, Prog. Theor. Exp. Phys. 2016 (2016) 123D03.
- [9] T. Hashimoto et al., JPS Conf. Proc. 17 (2017) 072001.
- [10] H. Sako et al., PoS INPC2016 (2017) 266.
- [11] S. B. Yang, K. Tanida et al., Phys. Rev. Lett. 117 (2016) 011801.
- [12] H. Sako et al., Nucl. Phys. A 956 (2016) 850.

resonance, $\Lambda^*(1665)$. In order to confirm this resonance and determine its spin-parity, we proposed an experiment (E72) employing K^- beams and HypTPC, and it has been approved.

● Shift of hadron mass in a nucleus (J-PARC E16)

The mass of hadrons including nucleons is considered to be generated by spontaneous breaking of chiral symmetry, which effectively makes the u and d quark mass 100 times larger than their tiny original masses. According to this mechanism, it is predicted that hadron mass should be lighter in nuclear matter due to partial restoration of chiral symmetry. The J-PARC E16 experiment will systematically study it by measuring change of the mass spectrum of ϕ mesons in nuclei. It employs the primary proton beam line (High-p line) which has been just constructed in HEF, and the experiment is scheduled from 2020. We have been preparing the apparatus with collaborators in RIKEN, KEK, Kyoto University, and so on.

● Experiments at facilities other than J-PARC

Some of our group members are also partly working for study of hadrons in the Belle group at KEK B-Factory and for study of high temperature and high density matter with high-energy heavy ion collision experiments, PHENIX and STAR at RHIC as well as ALICE at LHC. Those activities are connected with our research program in J-PARC; the former has led to the $\Lambda^*(1665)$ experiment at J-PARC (E72), and the latter is being developed to the J-PARC HI project.

(4) J-PARC HI project

Nucleus-nucleus collisions are expected to create the highest density matter at the beam energy of several 10 GeV per nucleon (for a fixed target). Large amount of data obtained with high intensity beams would allow us to investigate properties of the high density matter and possible phase transition to quark matter. Experiments in this energy were done at AGS in the past, but the beam intensity was totally insufficient for this purpose. High intensity uranium and other beams will be available by accelerating them with the J-PARC Main Ring. We expect to achieve intensity of $10^{11}/s$, by 5 orders of magnitude larger than AGS and by one order than FAIR, a similar on-going plan in Germany.

Together with accelerator experts, our group has proposed the J-PARC HI project, a plan to accelerate heavy ions at J-PARC [12]. According to our plan, we accelerate heavy ions by newly-constructed injectors (a superconducting linear accelerator and a booster ring), inject and accelerate them in the 3 GeV synchrotron, and then in the Main Ring. The accelerated beams are extracted to J-PARC HEF. The beams will be used to study high density nuclear matter as well as hypernuclei and exotic particles with multiple strange quarks. We expect to obtain data relevant to understand the core of neutrons stars.

3. Closing remarks

Hadron Nuclear Physics group is strongly pushing forward experimental research at J-PARC HEF by taking advantage of being at the same site. Our group is leading key experiments such as the H dibaryon search, and each member is also proposing and leading his/her own experiments according to his/her interest and expertise, or carrying out collaborative experiments at facilities other than J-PARC. In our group many students and young staff are actively working in cooperating and competing with each other. By making best use of the ideal environment for research, we wish to reach fundamental understanding of hadrons and nuclei.