

J-PARC で生成させる、 ハイペロン原子・ハイパー核の研究

Study of the hyperon atom and hypernucleus, created by J-PARC

山本 剛史 ハドロン原子核物理研究グループ
YAMAMOTO Takeshi Research Group for Hadron Nuclear Physics



2018年11月に卓越研究員として先端基礎研究センターハドロン原子核物理 Gr に着任しました。着任して2年になります。私が行っている大強度陽子加速器施設(J-PARC)における実験研究を推進する上で、オンサイトの研究所でサポートを受けながら研究に集中できる恵まれた環境を提供していただき大変感謝しております。

私は、東北大学理学研究科で修士・博士号を取得し、高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所で2年間ポスドクを務めた後に先端基礎研究センターに着任いたしました。修士学生の頃から J-PARC ハドロン実験施設におけるハドロン・原子核の実験研究に携わっており、同施設でビーム利用が始まった2009年から今日まで実験を続けている最古のユーザーの一人だと思っています。世界に誇る大強度の陽子加速器 J-PARC の現場で研究が続けられていることを幸運に感じながら、今日も研究活動に勤しんでいます。

私の研究では、陽子や中性子を構成するアップ、ダウンクォークに加えて、この二つのクォークの次に小さな質量を持つストレンジクォークを原子や原子核に加えた系を研究対象としています。原子核中で核子(陽子・中性子)同士を結びつける強い核力には、短距離で反発し合う斥力芯があること、スピン・軌道力が強いこと、陽子・中性子を入れ替えても性質が変わらないこと(荷電対称性)などの特徴があります。これらの特徴は、現在の物質を形作る上でとても重要なものですが、その起源については十分には理解されていません。そこで、私たちの研究では、新たにストレンジクォークを含む核子の仲間(クォーク3個で構成されるバリオンの中でも、特にハイペロンと呼ばれる)を実験室で作り出し、ハイペロンと核子の間やハイペロン同士の間で働く力を調べることで、核力をバリオン間力に拡張して理解し、核力の

I started research work at the hadron nuclear physics group in ASRC in December 2018 supported by the leading initiative for excellent young researchers program. My research work is based on experimental studies at J-PARC. I appreciate giving me opportunities to work at an on-site laboratory in a favorable environment, which allows me to concentrate on research work.

After getting my PhD at the Tohoku University, I worked at KEK IPNS before coming to ASRC. Because I started experimental research at the J-PARC hadron experimental facility (HEF) from 2009 when the facility started beam operation. So I can say I'm one of the oldest users of the facility. I feel happy to be allowed to continue my research work at the world's highest level proton intensity accelerator, J-PARC.

My research subject is atomic and nuclear systems containing the strange quark which is the third lightest quark of all quarks, in addition to up and down quarks. Protons and neutrons (nucleons) form a nucleus by the strong nucleon force, which has features of the existence of repulsive core, the strong spin orbit interaction and "the charge symmetry" (a symmetry where protons and neutrons are treated as the same). The origin of these features is not well understood so far, while these play quite important roles in forming matter. With the aim of understanding the origin of these features, by extending "the nucleon force" to "the baryon-baryon interaction", hyperons (baryons having strange quarks) are generated in the laboratory to study the forces between hyperon and nucleons or between hyperons each other.

特徴の起源に迫りたいと考えています。

私の主な研究手法は、ハイペロンを原子核に束縛させたハイパー核や、ハイペロンを原子軌道に束縛させた系(ハイペロン原子)を実験室で作り出して、ガンマ線・X線分光を通してハイペロン注入前後の系の変化を調べるといったものです。どちらの系も、J-PARC ハドロン実験施設で供給される大強度のK-中間子(ストレンジクォークを含む中間子) ビームを利用することで効率的に生成できるため、これまで観測できなかったようなガンマ線・X線の測定が可能になってきました。J-PARC ハドロン実験施設からの実験データが報告されるようになり、我々の研究分野が盛り上がりを見せていますが、この勢いをさらに加速させるべく、後述の2つのアプローチで研究を推進しています。

アプローチの一つ目は、ストレンジクォークを含む最も軽いハイペロンであるラムダ粒子を原子核に束縛させた、ラムダハイパー核のガンマ線分光です。核子とラムダ粒子のスピンの組み合わせにより生じる原子核準位の励起エネルギーをGe検出器で数keVの精度以上で測定します。この励起エネルギーから核子とラムダ粒子間のスピンに依存する力の大きさが調べられてきました。この他にも、精密ガンマ線分光が強力なプローブとなる例があり、私が以前行った“ヘリウム4ラムダハイパー核”のガンマ線分光実験では、測定した第一励起エネルギーが陽子・中性子を入れ替えた鏡像ペアである“水素4ラムダハイパー核”より約300 keVも異なることを発見しました[1]。これは、陽子・中性子だけで構成される原子核では荷電対称性が良く成り立っているが、ラムダ粒子を入れるとその対称性が破れるという面白い現象です。この発見はハイパー核構造研究を行う研究者に驚きを持って迎えられ、この実験データを基に、これまで考えられてきたラムダ粒子と核子間の力の性質の見直しが進められています。この事象のキーとなると考えられる“原子核内でのラムダ粒子と Σ 粒子の混合効果”は、ラムダ粒子と核子間の力の性質の中で今後理解を進めるべき課題となっており、ハイパー核の荷電対称性の破れに着目した研究がそのためのプローブとして重要な役割を担うと考えています。今後は、4体系の以外の鏡像ペアのハイパー核についてもガンマ線分光を進めて行く考えですが、鏡像ペアのうち生成反応の同定が困難な中性子過剰ハイパー核のガンマ線分光の手法確立を目指して装置開発などを進めています。

Main methods of my research work are gamma- and X-ray spectroscopy of hypernuclei (hyperons bound nucleus) and hyperon atoms, to measure differences of the system before and after putting hyperons. Because these systems can be generated effectively using high intensity kaon- (a meson which has a strange quark) beams available in the J-PARC HEF, it becomes possible to apply gamma- and X-ray spectroscopy methods to these systems. Recently, our research field is gaining momentum by increased experimental data reported from J-PARC HEF. I will accelerate these this momentum with the two approaches described below.

The first approach is gamma-ray spectroscopy of hypernuclei in which a lambda particle, the lightest hyperon, is bound. We can extract the strength of spin dependent force between a nucleon and lambda, from the excitation energy of hypernuclear states generated by combination of spins of the nucleon and lambda. This method was successfully applied to the system with the energy accuracy of better than a few keV by using Ge detectors. Furthermore, the gamma-ray spectroscopy is powerful tool to study “the charge symmetry”. In my previous study of gamma-ray spectroscopy of “4 lambda He”, we found 300 keV difference in the first excitation energy from the mirror pair, “4 lambda hydrogen” [1]. It is interesting that the charge symmetry is broken by introducing a lambda while the symmetry keeps well in a normal nucleus. This experimental result has surprised researchers studying on hypernuclear structures and has promoted reconsideration in understanding of the lambda-nucleon interaction. The effect of “lambda particle - sigma particle” mixing in nuclear matter, may be the key to the mechanism about the charge symmetry breaking, and is therefore the important subject to be understood. Studies focused on the charge symmetry breaking will provide important probes for this purpose. In future, we will apply gamma-ray spectroscopy for mirror pairs other than the (number of baryons) $A = 4$ system, by introducing a new technique to generate and identify neutron rich hypernuclei. A note is that the identification methods for such neutron rich hypernuclei are more difficult than those for proton rich hypernuclei. In present, I'm working on developing apparatus for the such next measurements.

アプローチの二つ目は、負電荷のハイペロンを原子軌道に束縛させた系の X 線分光です。ハイペロンと原子核の距離が近くなる原子軌道では、電磁相互作用のみならず、ハイペロンと原子核（核子）の間の力の寄与が準位エネルギーの変動として現れます。このような実験データからは原子核表面付近のバリオン間力の情報を引き出せるため、ハイペロンを原子核深部束縛させたハイパー核の実験データと組み合わせることでバリオン間力の全体像が見えるようになります。私が現在着目しているのはハイペロン原子の中でも特に、ストレンジクォークを2つ含む負電荷のグザイ粒子を束縛させたグザイ原子です。このようなストレンジクォークを複数含む系を実験室で作り出すのは困難であり、これまでグザイ原子が放出する X 線の測定報告はありません。そこで我々は、J-PARC の大強度 K- 中間子を利用した大統計の測定を 2021 年に計画しており、グザイ原子 X 線の世界初測定を目指して準備を進めています。

今回紹介した研究は、ASRC と共に J-PARC の研究を推進する、国内外の大学の研究グループや KEK の研究者などの 50 人程度の規模のコラボレーションにより進められています。私は、これまでの大学や KEK での経験、そして ASRC での研究実績を活かして、今後の研究の発展を目指してコラボレーションの中で中心的な役割を引き続き果たしていきたいと思っています。

参考文献 References

[1] T.O.Yamamoto et. al., Phys. Rev. Lett. 115 (2015) 222501.

The second approach is X-ray spectroscopy of “hyperon atom”, in which a negative charged hyperon is bound in atomic orbits. In the orbit with a short distance between hyperon and nucleus (nucleons), not only an effect of the Coulomb interaction, but also of the hyperon-nucleon strong interaction appears as an energy shift in the atomic level. Because such X-ray spectroscopic technique of “hyperon atom” enables to extract information of baryon-baryon interaction around nuclear surface, the overall picture of the “baryon-baryon interaction” will be understood by combining the X-ray data of “hyperon atom” and the “hypernuclear” data (in which hyperons bound in deep inside the nucleus). In my research, Xi-atom, in which a negative charged Xi particle (having two strange quarks) would be bound, is focused on. No experimental report of X-ray measurement on Xi-atom exists so far, because of the difficulty in generating a system containing multi strange quarks. We are aiming for the world’s first measurement of X-ray from Xi-atom with high statistics, taking advantage of the high intensity kaon beams at J-PARC. I’m now working on preparation for the measurement which will be realized in 2021.

These experimental studies have been carried out with collaboration of about 50 researchers from research group of international universities, KEK and JAEA-ASRC, for promoting researches at J-PARC. I want to play a key role in such collaborations for the future measurement, with utilizing my former experiences at the university, KEK, and ASRC.