

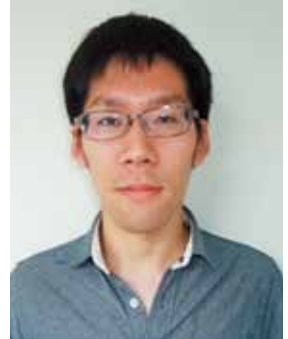
K 中間子原子核の確立を目指して

Towards establishment of kaonic nuclear bound states

橋本 直

ハドロン原子核物理研究グループ

Tadashi HASHIMOTO Research Group for Hadron Nuclear Physics



ハドロン原子核物理研究グループの橋本直です。2017年11月に卓越研究員として着任して以来はやくも2年以上経過しました。それ以前は、2014年に博士号を東京大学大学院理学研究科物理学専攻で取得したのち理化学研究所でポスドクを3年間務め、2017年4月からは日本学術振興会特別研究員 (PD) としてハドロングループに所属させていただいていました。

私は修士学生の頃から一貫して J-PARC ハドロンホールで行っている一連の K^- 中間子ビームを用いた実験を中心に研究を進めてきました。J-PARC で最初の K^- 中間子ビームがハドロンホールで供給されたのは、ちょうど私が修士課程に進学した 2009 年です。以来、年間の半分程度は東海村に滞在する生活を送ってききましたので、もしかしたらユーザーとして最も長くハドロンホールに滞在している 1 人かもしれません。そんなこともあって同じキャンパスにある先端基礎研究センター (ASRC) に職をいただけたことは J-PARC で実験を進めるにあたってこの上ない利点となっています。

さて ASRC ハドロングループでは K1.8 ビームラインでのストレンジクォークを含むバリオンの原子核束縛状態 (ハイパー核) の研究がこれまで主なプロジェクトになっていたわけですが、隣の K1.8BR ビームラインでは私を中心となって、同様にストレンジクォークを含むが中間子である K^- 中間子に着目した実験を行っています。中間子はクォークと反クォークの対からなる複合粒子です。原子核内では湯川博士のノーベル賞受賞研究の頃から核子間の力を媒介する“仮想粒子”として存在することが知られていますし、加速器等を用いて真空中に“実粒子”して取り出すことができることは中間子をビームとして利用する J-PARC を見ても明らかです。それでは“実粒子”として中間子は原子核中に存在できないのでしょうか。もっとも軽い中間子である π 中間子は相互作用が斥力的であると知られているため原子核束縛状態は作りませんが、 K^- 中間子はこれまでの研究により相互作用が引力的であることが知られており、むしろ (実験的に測定可能かどうかは別として) 原子核束縛状態があると考えの方が自然です。そこで私は K^- 中間子が原子核中でどのような振る舞いをするのか、原子核束縛状態を作ることができるのか、原子核媒質中では真空中と比べてどのように性質を変化させるか、

I am Tadashi Hashimoto, a member of the hadron nuclear physics group in ASRC. It's been more than 2 years since I got a position here as a part of the Leading Initiative for Excellent Young Researchers (LEADER) program. I did my Ph. D in the physics department of the University of Tokyo in 2014, and then spent 3 years at RIKEN as a post-doctoral researcher. From April 2017, I joined the hadron group in ASRC receiving the JSPS Research Fellowship for Young Scientist at first, and the present LEADER program started in November 2017.

I have been working on a series of experiments using K^- beam at J-PARC HEF. It was 2009 when J-PARC delivered the first K^- beam to the HEF, which coincided with my first year of research career as a master student. Since then, I have stayed in Tokai as much as half of each year to prepare and perform experiments. Perhaps, I am one of the most active and longest staying users in the HEF. In proceeding with my experiments, it is of great advantage to have a position here in ASRC which is on the same campus as J-PARC.

While the main projects of the group in ASRC have been related to hyper nuclei, nuclear states with baryon(s) containing one or two strange quarks, at the K1.8 beamline in J-PARC HEF, I am working at another beamline K1.8BR, focusing on anti-kaons, which contain a strange quark yet are mesons made of a quark anti-quark pair. They are known to mediate the nuclear force between nucleons as “virtual particles”, as a Nobel prize laureate, Prof. Hideki Yukawa predicted it long before. Mesons can also be created as “real particles” in the vacuum, by using an accelerator as we use a meson beam at J-PARC. What about putting a “real” meson inside a nucleus? Because pions, the lightest meson, interact repulsively with nuclei, they do not have a nuclear bound state. Anti-kaons, on the other hand, are known to interact attractively with nuclei, so it is natural to expect the existence of nuclear bound states, although this does not mean that we can observe the states by an experiment. In this context, I am trying to understand whether or not anti-kaons can form nuclear bound states, how kaons behave in a nuclear medium, and how kaons change their properties in a nuclear medium. More fundamentally, these studies could lead us to reveal “origin of hadron mass”, “equation of state at high

などを研究することで、“ハドロン質量の起源”や“高密度核物質の状態方程式”といった根源的問いに挑戦しています。

我々がとっているアプローチとしては主に二つあります。一つはK中間子の原子核束縛状態を直接探索する方法で、もう一つは負電荷であるK⁻中間子を原子軌道に束縛させてX線分光を行う手法です。原子核束縛状態の探索はもし状態がはっきりと確認されれば直接原子核媒質中をプローブできるため大きな情報をもたらします。しかし状態の幅が広いと予想されるため実験的に同定することは容易ではありません。実際、K中間子原子核については、この20年ほど世界各地で数々の探索実験が行われてきましたが説得力のある結果は得られていませんでした。しかし、ついに最近我々はJ-PARCにおける実験でシンプルな反応を広い運動学領域において測定することで説得力のあるデータを取得することに成功しました[1]。我々が“発見”したのはK⁻中間子が二つの陽子と束縛状態を成す系、“K⁻pp”です。今後この“発見”をより確かなものにするために検出器群を高度化して系統的な実験を展開していくことを目論んでいます。

一方K⁻中間子原子のX線分光は閾値近傍かつ原子核表面で相互作用の情報しか得られませんが、実験としては比較的にはっきりとした測定ができます。精度が高いX線測定を行うことは原子核状態探索と相補的なデータとして重要です。我々は超伝導遷移端型マイクロカロリメータ(Transition Edge Sensor: TES)という極低温X線検出器を導入し、従来の半導体検出器とは一線を画した高分解能でのX線分光を行うことに成功しました[2]。2018年に取得したK⁻中間子ヘリウム原子のX線データはK⁻中間子-原子核相互作用のモデルに制約を課すと期待されます。

上記のTES検出器は米国国立標準技術研究所(NIST)が開発したものを共同研究の元に導入したのですが、実用的なシステムとしては国内でユニークなものです。非常に良いエネルギー分解能だけでなく、広範囲なX線エネルギーに対応可能なこと、システムの可搬性などから応用可能性範囲は広く、原子核物理実験だけにとどまりません。我々はすでにJ-PARC MLFにおけるミュオン原子X線分光(強電場中での量子電磁気学の検証など)や放射光施設SPring-8におけるX線吸収微細構造測定(地球化学・環境化学など)のプロジェクトを開始しており、今後さらなる応用展開を進めていく計画です。

ここまで簡単に説明させていただいた研究は、理化学研究所を中心とした共同研究グループで進行しています。今後はハドロングループを始めとするASRCのみならずとも互いのサイエンスや技術を持ち寄って新しいことに挑戦できればと期待しています。

参考文献 References

- [1] S. Ajimura, et al., Phys. Lett. B789 (2019) 620-625.
- [2] T. Hashimoto, et al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 27(4), 2017.

density”, and so on.

We have two major approaches for the research; one is a direct search experiment of an anti-kaon nuclear bound state, and the other one is X-ray spectroscopy of kaonic atoms which are Coulomb bound states of a negatively charged kaon and an atomic nucleus. The direct search experiment, if one succeeds in observing a nuclear state clearly, it will provide us rather direct information in the nuclear medium. However, it is experimentally difficult to discriminate the state because the decay width is expected to be very large. In fact, there have been many experimental searches of kaonic nuclear bound states all over the world in these 2 decades, resulting in no convincing observation. Recently, in an experiment at J-PARC, we finally obtained convincing signals by using a simple reaction with a wide detector coverage of the kinematical region [1]. We discovered “K⁻pp”, a nuclear bound state of a K⁻ meson and two protons. Now we are planning a major detector upgrade to perform systematic experiments, so that our “discovery” could be established firmly.

X-ray spectroscopy of kaonic atoms proves the interaction at the threshold energy and around the surface of a nucleus only. Its advantages are that analysis of the experimental data is straight-forward and a high precision measurement is possible. Systematic precision measurements are important as complementary data to the kaonic nuclear bound state search experiment. We have developed an experimental technique to use a novel cryogenic X-ray detector, a transition-edge-sensor microcalorimeter (TES) in the hadron beam environment [2]. TES has a more than one order of magnitude better energy resolution compared with a traditional semiconductor X-ray detector. We measured X-rays of kaonic helium atoms in 2018, which is expected to strictly constrain theoretical models of the strong interaction between anti-kaon and nucleus.

Our TES detector system has been developed in National Institute of Standards and Technology (NIST) in the United States. For the moment, our application technique is quite unique. We would like to take advantage of not only the excellent energy resolution, but also a relatively wide dynamic range and a portability of the system for various fields of sciences. We already started new projects using the same TES detector system used in the kaonic atom experiments. They include muonic atom X-ray spectroscopy at J-PARC MLF to study QED under strong electric field, and X-ray absorption fine structure measurements at SPring-8 for geochemistry and environmental chemistry. We will further extend the applications and the interdisciplinary collaboration.

In this essay, I have shortly described my activities, which are ongoing with collaborators mainly from my previous affiliation in RIKEN. From now on, I hope to have more opportunities to work with people in ASRC. It would be great if the synergy of sciences and techniques brought by each could produce something new and exciting.