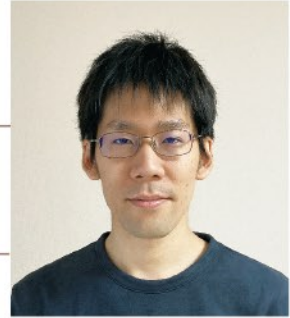


# 超伝導 X 線検出器を用いた X 線分光 によるミュオン原子生成過程の解明

Femto-second dynamics of muonic atom formation  
probed with superconducting X-ray microcalorimeters

橋本 直      ハドロン原子核物理研究グループ  
HASHIMOTO Tadashi    Research Group for Hadron Nuclear Physics



## 概要

我々は通常の原子中の束縛電子1つを負電荷ミュオンに置き換えた「ミュオン原子」の X 線分光を最先端の超伝導 X 線検出器を導入して行いました。従来の半導体検出器と比べて1桁以上良いエネルギー分解能を実現したことにより、ミュオン鉄原子の電子特性 X 線のエネルギースペクトルが、1本の鋭いピークではなく幅広い非対称な構造を持つことが分かりました。この観測したスペクトル構造からミュオン原子形成過程における負ミュオン・束縛電子のフェムト秒スケールでのダイナミクスを解明することに成功しました [1]。

## 1. 研究の背景・経緯

原子は正電荷をもつ原子核と負電荷を持つ電子がクーロン力によって束縛した系ですが、電子を他の負電荷粒子に置き換えた系も存在し、「エキゾチック原子」と総称されています。エキゾチック原子を生成するには加速器などで生成した負電荷粒子を標的物質中に静止させます。エキゾチック原子の軌道エネルギー等は通常原子同様にクーロン力によって計算できますが、負電荷粒子の質量が重い分、電子よりも束縛エネルギーが大きいかつ軌道半径が小さくなります。負電荷粒子のエネルギー軌道準位の精密な計算と X 線分光、レーザー分光などによる実験の結果とを比べることによって、これまで質量、磁気モーメントなど負電荷粒子の性質や原子核半径の測定、量子電磁気学の検証など様々な研究が行われてきました。さらに電子を置き換えた負電荷粒子がハドロンの場合は強い相互作用も働くため、クーロン力のみによる計算値からのずれを測定することで強い相互作用の研究を行うこともできます。K<sup>-</sup>中間子原子や $\Xi^-$ 原子、 $\Sigma^-$ 原子など「ハドロニック原子」の X 線分光はハドロン間相互作用の重要な研究手法であり、ハドロン原子核物理研究グループでも J-PARC において複数の実験を推進しています。

## Abstract

We performed high-precision X-ray spectroscopy of muonic atoms, where one bound electron in a normal atom is replaced with a negative muon. By using a state-of-the-art superconducting detector, an excellent resolution of 5.2 eV in FWHM at 6 keV was achieved with a reasonable collection efficiency. We observed electric *K* X-rays emitted from muonic iron atoms as asymmetrical peaks with a spread of about 200 eV. These spectral shapes provide unique information on the temporal evolution of electron dynamics during the muon cascade process [1].

## 1. Background

An atom is a Coulomb-bound state of a nucleus with positive charges and negatively charged electrons. The bound electron can be replaced with another particle having a negative charge to form an “exotic atom”. An exotic atom can be produced by stopping the negatively charged particle, usually produced in an accelerator facility, in the target material. The energy levels of exotic atoms follow Coulomb’s law as in the case of normal atoms. However, as the negatively charged particle is heavier than electron, the binding energy becomes higher and the orbital radius smaller. Research on exotic atoms has been pursued by the atomic, nuclear, and particle physics communities for many decades by comparing the precise calculation with experimental data, such as X-ray and laser spectroscopies. Some of the examples we can study via exotic atoms are the mass of negatively charged

エキゾチック原子の研究で重要な鍵の一つとなるのが X 線検出器技術です。我々は超伝導転移端マイクロカロリメータ (Transition Edge Sensor: TES) という高分解能 X 線検出器を新たに導入しました [2]。TES 検出器は物質が超伝導転移するときにわずかな温度変化でも抵抗が劇的に変化することを利用したもので 100 mK 程度の極低温まで冷却して運転します。単一光子の微小エネルギーを温度上昇に変換するので検出器の熱容量を小さくする必要があります。そのため 1 素子は小さいですが、多素子化によってそれなりの大きさの有効面積を確保します。TES 検出器はもともと宇宙 X 線観測などに向けて開発されてきた検出器ですが、近年になって多素子アレイの製作技術や多重化読み出し技術が習熟し、地上応用が可能になりました。我々は TES 検出器システムの開発を世界でリードする米国国立標準技術研究所 (NIST) や国内の X 線衛星研究者らとの共同研究で、主として K 中間子原子 X 線分光のために荷電粒子ビームラインでの応用技術を開発してきました。

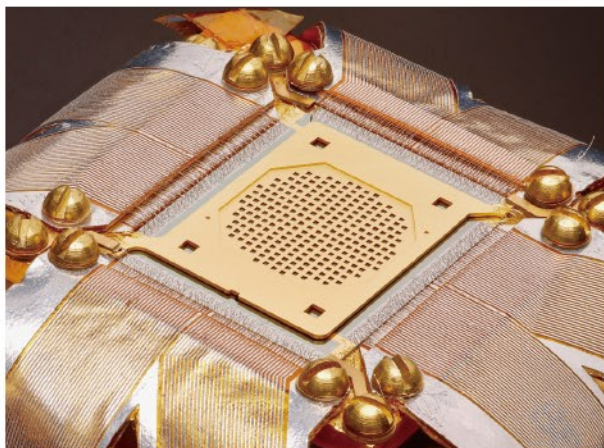


図 1. 本研究で用いた TES 検出器のセンサー部分の写真。中心部の小さな穴は  $300 \times 300 \mu\text{m}^2$  で 240 素子の一つずつに対応する。

Figure 1. Picture of the core part of the TES detector used in the present work. The small holes ( $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ ) in the middle correspond to each 240 pixel. Photo credit: D.R. Schmidt (NIST).

図 1 は実際に使用した検出器の心臓部の写真です。240 素子で構成され、およそ  $23 \text{ mm}^2$  の有効面積を持ちます [3]。TES 検出器は非常に感度が高いため、小さな外乱でもエネルギー分解能が低下します。特にエネルギーの高い荷電粒子の入射に対しては、多素子アレイ全体に熱が拡散することや、システム全体の熱制御が揺らぐなどの課題があり、荷電粒子ビームラインで使用するためにはハードウェア・ソフトウェア両面での様々な工夫が要求されました。2013 年からプロジェクトを開始し、2014 年の  $\pi$  中間子ビームラインでのテスト実験 [4]、2016 年の K 中間子ビームラインでのテスト実験 [5] を経て、2018 年には J-PARC ハドロンホールで K 中間子ヘリウム原子 X 線分光の成功にこぎつけました [6]。これ

particles, nuclear sizes and shapes, and stringent tests of quantum-electro dynamics. Furthermore, if the negatively charged particle replacing the electron was a hadron, the strong interaction effect appears as the energy-level shift from the calculated value with only the Coulomb force. Indeed, to study the hadron-nucleus interaction, our hadron nuclear physics group is promoting multiple projects on X-ray spectroscopy of “hadronic atom” at J-PARC, such as kaonic,  $\Sigma^-$ , and  $\Xi^-$  atoms.

One of the keys in the study of exotic atoms is X-ray detection technology. Recently we succeeded in employing a novel cryogenic detector, a microcalorimeter based on a superconducting transition-edge-sensor (TES) [2], for X-ray spectroscopy of exotic atoms. A TES pixel utilizes the steep temperature dependence of resistance at the superconducting phase transition to achieve an excellent energy resolution. Although one pixel should be kept small for a small heat capacitance, a large collecting area can be obtained with an array of these sensors. The TES detector is originally developed for space missions, and recent developments of the fabrication and multiplexing readout techniques have enabled various terrestrial applications.

We have developed an application technique of a TES spectrometer in a charged-particle beamline, primary for the X-ray spectroscopy of kaonic atoms. This work is done in the collaboration with National Institute of Standards and Technology (NIST) in the US, as a leading developer of quantum sensing devices, and domestic astrophysicists, who plan to use TES detectors in future satellite missions. Figure 1 shows a picture of the actual TES array used in this work. The array consists of 240-pixel individual detectors and the total effective area is approximately  $23 \text{ mm}^2$  [3]. Since TES detectors are very sensitive, even a small change in the operational condition deteriorates the detector performance. Especially, charged-particle hits on the system give heat to the whole detector array and disturb the temperature regulation of the system. To overcome these difficulties, we made many efforts in both hardware and software aspects. Our project started in 2013, and the first demonstration experiment using a pion beam was performed at PSI in 2014 [4]. Then, following a commissioning experiment at the kaon beamline in 2016, we successfully performed

により TES 検出器の荷電粒子ビーム環境での応用技術、特にエキゾチック原子の X 線分光技術を世界に先駆けて確立したと言えます。

本稿で紹介する成果はこのユニークな検出器技術を用いてエキゾチック原子の形成過程を研究したもので、負電荷粒子として第二世代の荷電レプトンであるミュオン（ミュー粒子）を利用しました。ミュオンは電子の仲間ですが、約 200 倍の質量を持ちます。正または負の電荷を持つミュオンが存在し、そのうち負ミュオンをもちいて「ミュオン原子」を生成できます。負ミュオンが原子に近づくと、負ミュオンは原子の励起準位軌道に捕獲されます。続いて、原子内のたくさんの束縛電子をオーグメント過程によって弾き飛ばしながら、あるいはミュオン特性 X 線を放出して励起準位から下の準位へ徐々に脱励起していきます。一方、負ミュオンにより生じた原子内の空の電子軌道は、上の準位の束縛電子や周囲の媒質に含まれる電子により再充填されていきます（図 2）。このようなミュオン原子の形成過程では、負ミュオンや電子が関わる状態遷移が、数十 fs（フェムト秒 =  $10^{-15}$  秒）という短い時間の間に立て続けに起こります。そのため、これまでミュオン原子形成過程のダイナミクスを捉える実験的手法は開発されておらず、具体的に負ミュオンがどのように移動し、それに伴い電子の配置や数がどのように変化していくのか、その全貌は分かっていませんでした。

## 2. 研究の内容

我々はミュオン鉄原子を生成し脱励起の際にミュオン原子が放出する「電子特性 X 線」のエネルギーを TES 検出器によって精密に測定しました。実験は、J-PARC の物質・生命科学実験施設 (MLF) のパルスミュオンビームを用いて行いました。J-PARC では現在世界最高強度の低速ミュオンビームを得ることができます。D2 ビームラインでの 20.5 MeV/c という低運動量のビームを利用することで、ミュオンを 100  $\mu\text{m}$  厚の鉄箔の表面に静止させミュオン鉄原子を生成しました。鉄箔はビーム方向に対して 45 度に傾けてあり TES 検出器はビームと直交した方向から同じ鉄箔表面を見込むように設置しました。これにより鉄箔表面に生成されたミュオン原子から放出される低エネルギー X 線の大部分が鉄箔から出て検出器に達することが可能になります。

実験の結果、図 3 に示すようにミュオン鉄原子から放出される電子特性 X 線スペクトルを測定することに成功しました。Cr  $K\alpha$ , Fe  $K\alpha$ , Co  $K\alpha$  などはエネルギー校正用に照射した通常の特異 X 線です。これらのピーク幅から 6 keV X 線に対して半値幅 5.2 eV の分解能が達成されたことがわかります。これは従来の半導体検出器よりも 1 桁以上高いエネルギー分解能です。加えて観測された 6000 eV 及び 6600 eV 周辺の幅広い構造はミュオン入射に由来するもので、それぞれミュオン鉄原子の  $K\alpha$ ,  $K\beta$  電子 X 線であると同定されました。鉄より原子番号が一つ小さいマンガンの電子特性 X 線のエネルギー位置に近いですが、

the X-ray spectroscopy of kaonic atoms at J-PARC in 2018. With these experiences, we have established the application technique of the TES spectrometer in a charged particle beamline, specifically for the X-ray spectroscopy of exotic atoms.

In this note, we will focus on the recent result of the X-ray spectroscopy of muonic atoms, which revealed the formation dynamics of an exotic atom. A muon is the second-generation charged lepton, having 200 times larger mass than the electron's mass. When a negative muon is captured by an atom, it is normally in a highly excited state. The muon continues to deexcite from the excited level to the lower levels one after another while stripping off the surrounding bound electrons. On the other hand, the empty electronic holes created by the muon are refilled by bound electrons at the upper level, and also by surrounding atoms. The entire muonic atom formation process is over in a few tens of femtoseconds ( $\text{fs} = 10^{-15} \text{ s}$ ), and to date no one knew specifically how the muon moves and how the electron configurations and numbers change accordingly.

## 2. Contents of research

We precisely measured electronic  $K$  X-rays emitted from muonic iron atoms using the TES spectrometer. The X-ray energy reflects the arrangement and number of bound electrons in the muonic atom at the time of the X-ray emission, and the state, such as the muon orbit. Therefore, by comparing the experimental results with the cascade simulations, the muonic atom formation process could be determined from the shape. The experiment was carried out at the D2 beamline of the Materials and Life Science Experimental Facility (MLF) at J-PARC, where the world-highest intensity pulsed muon beam is available. The low-momentum negative muons at 20.5 MeV/c were stopped on a 100  $\mu\text{m}$ -thick Fe foil to form muonic iron atoms. The TES X-ray detector was placed normal to the muon-beam while the Fe foil was tilted by 45° with respect to the muon-beam direction. Indeed, we can measure X-rays only from muonic iron stopped in the region close to the surface because of self-attenuation inside the foil.

The X-ray spectrum is successfully measured as shown in Figure 3. There are characteristic X-ray peaks of Cr, Fe, Co, irradiated for the energy-scale calibration. These peaks are also utilized to evaluate the detector

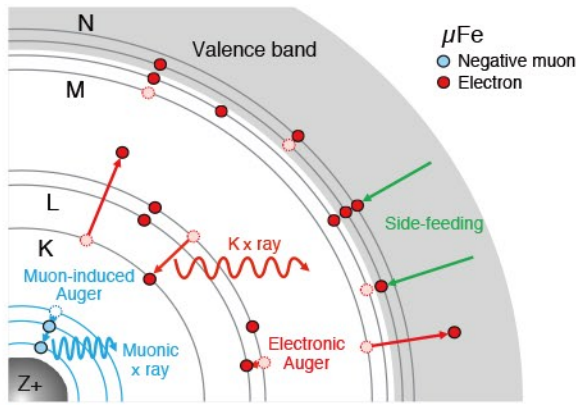


図 2. ミュオン原子生成過程におけるカスケード過程の概念図。  
**Figure 2.** Schematic drawing of the muon cascade process with the electron configuration evolution in the muonic iron atom in Fe metal. Taken from Ref. [1].

これは軌道半径が小さい負ミュオンによる遮蔽効果のためです。このピークは 200 eV 程度の広がりを持つ非対称な形状となっていますが、従来の半導体検出器では分解能でも同程度の幅となってしまう、本来のスペクトル形状が通常原子の特性 X 線のように細いのか、あるいは幅広い分布なのかどうか区別がつかえません。そのため、本研究によって世界で初めて詳細なスペクトル形状を測定できたと言えます。また、ハイパーサテライト ( $K^h a$ ) X 線と呼ばれる電子基底準位に 2 個穴が空いている場合に放出される電子特性 X 線も観測されました。

観測された電子特性 X 線スペクトルの幅広い非対称な構造は、時々刻々と変化していく束縛電子や束縛ミュオンの状態により電子特性 X 線のエネルギーが変化し、それらが重なり合った結果だと考えられます。そこで電子特性 X 線スペクトルをシミュレーションし、ミュオン原子形成過程のダイナミクスの解明を試みました。各状態における電子特性 X 線エネルギーは多配置ディラック・フォック法 [7] により計算できます。図 4 (下) はその一部を示したもので特に L ホールの数によってエネルギーが変わるこ

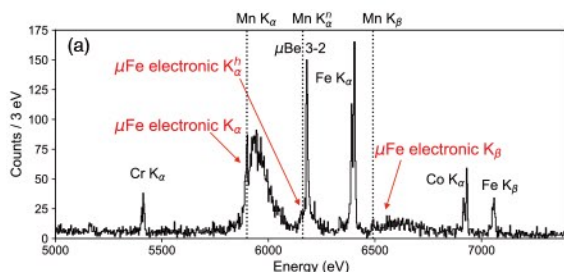


図 3. 超伝導転移端マイクロカロリメータにより測定したミュオン鉄原子の X 線スペクトル。ミュオン鉄原子の電子特性 X 線は、鉄より原子番号が一つ小さいマンガン原子の電子特性 X 線のエネルギー近傍に現れる。  
**Figure 3.** X-ray spectrum of muonic iron measured by the TES detector. Broad electronic  $K\alpha$  and  $K\beta$  X-rays from  $\mu\text{Fe}$  appear just above Mn  $K\alpha$  and  $K\beta$  energies, respectively. Taken from Ref. [1].

energy resolution. The resolution is 5.2 eV FWHM at 6 keV, that is more than one order of magnitude better resolution than conventional semiconductor detectors. The broad structure around 6000 eV and 6600 eV appeared only with muon beams, and assigned to the electronic  $K\alpha$  and  $K\beta$  X-rays emitted from the muonic iron atoms, respectively. They had an asymmetrical shape with a spread of about 200 eV, comparable to the resolution of the conventional detectors. The excellent resolution of the TES spectrometer was crucial to observe these spectral shapes. Electronic characteristic X-rays called hyper-satellite ( $K^h a$ ) X-rays were also observed, which are emitted when there are two holes in the electronic ground level of the K shell.

For the simulated spectrum to be compared with experimental data, first we calculated the electric X-ray energies for various configurations using a Multi Configuration Dirac Fock and General Matrix Elements (MCDFGME) code [7]. **Figure 4 (bottom)** shows some of the calculated energies of muonic iron  $K\alpha$  lines under different muon state ( $n$ ) and electron configurations represented by the number of electron holes in the L shell ( $N_L^{\text{hole}}$ ). The next step is to include the temporal evolution of the muon state and electron configuration. The transition rate of both a muon-induced process and an electronic process was considered. From the comparison with the experimental results, it was found that the M-shell side-feeding rate changes the whole spectrum drastically. Therefore, the observed  $K\alpha$  spectrum was fitted with the one calculated by the cascade simulation, where the M-shell per-hole side-feeding rate  $\Gamma_M$  was treated as a fitting parameter. As a result shown in **Figure 4 (top)**, we obtained the rate to be 0.35 fs<sup>-1</sup>, which means one-electron transfer to the muon iron atom occurs during 2.9 fs.

The entire muonic atom formation process revealed by the present work can be summarized as the following. After being captured by an iron atom, the muon initially deexcites by emitting bound electrons. Of the 26 total bound electrons of the iron atom, 7 to 8 are ejected in the first 6 fs. The majority of the X-rays are emitted between 5 to 20 fs when the muon is in the states from  $n=10$  down to  $n=5$ . The electron holes are refilled relatively slowly from the surrounding iron atoms. In about 30 fs after the muon capture, the muon reaches the lowest state and the atom returns to the electrically

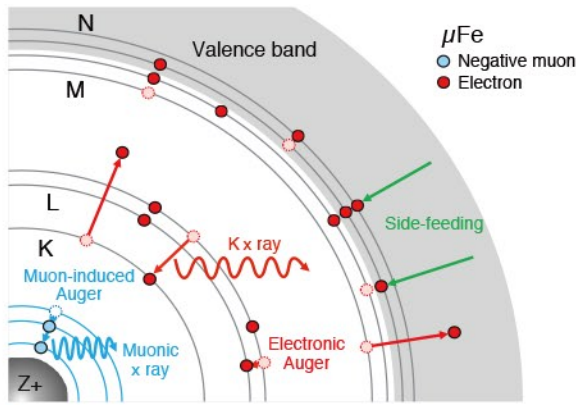


図 2. ミュオン原子生成過程におけるカスケード過程の概念図。  
**Figure 2.** Schematic drawing of the muon cascade process with the electron configuration evolution in the muonic iron atom in Fe metal. Taken from Ref. [1].

これは軌道半径が小さい負ミュオンによる遮蔽効果のためです。このピークは 200 eV 程度の広がりを持つ非対称な形状となっていますが、従来の半導体検出器では分解能でも同程度の幅となってしまう、本来のスペクトル形状が通常原子の特性 X 線のように細いのか、あるいは幅広い分布なのかどうか区別がつかえません。そのため、本研究によって世界で初めて詳細なスペクトル形状を測定できたとと言えます。また、ハイパーサテライト ( $K^h a$ ) X 線と呼ばれる電子基底準位に 2 個穴が空いている場合に放出される電子特性 X 線も観測されました。

観測された電子特性 X 線スペクトルの幅広い非対称な構造は、時々刻々と変化していく束縛電子や束縛ミュオンの状態により電子特性 X 線のエネルギーが変化し、それらが重なり合った結果だと考えられます。そこで電子特性 X 線スペクトルをシミュレーションし、ミュオン原子形成過程のダイナミクスの解明を試みました。各状態における電子特性 X 線エネルギーは多配置ディラック・フォック法 [7] により計算できます。図 4 (下) はその一部を示したもので特に L ホールの数によってエネルギーが変わるこ

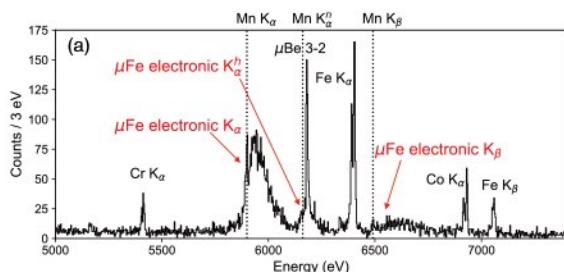


図 3. 超伝導転移端マイクロカロリメータにより測定したミュオン鉄原子の X 線スペクトル。ミュオン鉄原子の電子特性 X 線は、鉄より原子番号が一つ小さいマンガンの電子特性 X 線のエネルギー近傍に現れる。  
**Figure 3.** X-ray spectrum of muonic iron measured by the TES detector. Broad electronic  $K\alpha$  and  $K\beta$  X-rays from  $\mu\text{Fe}$  appear just above Mn  $K\alpha$  and  $K\beta$  energies, respectively. Taken from Ref. [1].

energy resolution. The resolution is 5.2 eV FWHM at 6 keV, that is more than one order of magnitude better resolution than conventional semiconductor detectors. The broad structure around 6000 eV and 6600 eV appeared only with muon beams, and assigned to the electronic  $K\alpha$  and  $K\beta$  X-rays emitted from the muonic iron atoms, respectively. They had an asymmetrical shape with a spread of about 200 eV, comparable to the resolution of the conventional detectors. The excellent resolution of the TES spectrometer was crucial to observe these spectral shapes. Electronic characteristic X-rays called hyper-satellite ( $K^h a$ ) X-rays were also observed, which are emitted when there are two holes in the electronic ground level of the K shell.

For the simulated spectrum to be compared with experimental data, first we calculated the electric X-ray energies for various configurations using a Multi Configuration Dirac Fock and General Matrix Elements (MCDFGME) code [7]. **Figure 4 (bottom)** shows some of the calculated energies of muonic iron  $K\alpha$  lines under different muon state ( $n$ ) and electron configurations represented by the number of electron holes in the L shell ( $N_L^{\text{hole}}$ ). The next step is to include the temporal evolution of the muon state and electron configuration. The transition rate of both a muon-induced process and an electronic process was considered. From the comparison with the experimental results, it was found that the M-shell side-feeding rate changes the whole spectrum drastically. Therefore, the observed  $K\alpha$  spectrum was fitted with the one calculated by the cascade simulation, where the M-shell per-hole side-feeding rate  $\Gamma_M$  was treated as a fitting parameter. As a result shown in **Figure 4 (top)**, we obtained the rate to be 0.35 fs<sup>-1</sup>, which means one-electron transfer to the muon iron atom occurs during 2.9 fs.

The entire muonic atom formation process revealed by the present work can be summarized as the following. After being captured by an iron atom, the muon initially deexcites by emitting bound electrons. Of the 26 total bound electrons of the iron atom, 7 to 8 are ejected in the first 6 fs. The majority of the X-rays are emitted between 5 to 20 fs when the muon is in the states from  $n=10$  down to  $n=5$ . The electron holes are refilled relatively slowly from the surrounding iron atoms. In about 30 fs after the muon capture, the muon reaches the lowest state and the atom returns to the electrically

とがわかります。これと各種遷移確率を組み合わせることで、ミュオンが捕獲される軌道、周囲の鉄原子から電子が再充填する速度などの少数の仮定のもとスペクトルを生成し、実験結果の X 線スペクトルの形状と比較しました。その結果、電子再充填速度をたった一つのパラメータとして基本的なスペクトル形状を決めることができるとわかりました。実験結果をもっともよく再現する電子再充填速度は、**図 4 (上)** のフィットが示すように  $0.35 \text{ fs}^{-1}$  となることがわかりました。つまりミュオン鉄原子への電子移動が 2.9 fs に 1 回の割合で起こることとなります。

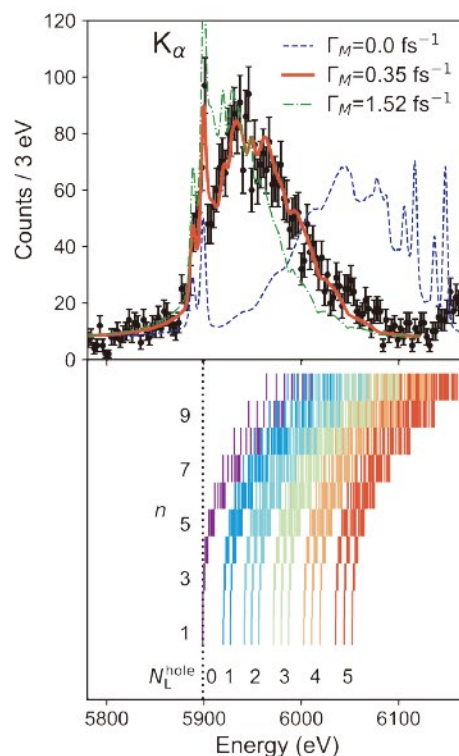
以上の結果を踏まえるとミュオン鉄原子生成過程の全貌は以下ようになります。ミュオンは鉄原子の励起状態に捕獲されると、脱励起過程における最初の 6 fs で鉄原子の全束縛電子 26 個のうち 7~8 個ほどをはじき飛ばします。K 電子 X 線はミュオンの状態が  $n=5 \sim 10$  である 5~20 fs の間に主に放出されます。並行して束縛電子は周囲の鉄原子から比較的ゆっくりと再充填されます。ミュオン捕獲から 30 fs 後にはエネルギーの最も低い基底準位に到達し、電気的に中性な状態に戻ります。最終的にミュオンは原子核に吸収され鉄より原子番号が一つ小さいマンガ原子となって全ての反応を終えることとなります。

neutral state. Finally, the muon is absorbed by the nucleus, changing the element from iron to manganese.

### 3. Significance and impact of research results

We have succeeded in measuring a precise energy spectral shape of electric K X-rays from muonic iron atoms using the TES spectrometer. The entire muonic atom formation process was revealed. Our results could greatly contribute to the development of new research fields including the dynamics of exotic quantum few-body systems, not limited to muonic atoms.

Muonic atoms have also been of great interest for measuring fundamental physics parameters and searching for beyond-Standard-Model physics. In some of such measurements, uncertainty of the electron configuration limits the overall precision. As the temporal evolution of electron dynamics in the formation of muonic atoms has been clarified, our results would contribute to reducing such uncertainties.



**図 4.** (上) 実験データとシミュレートしたスペクトルの比較。(下) 様々なミュオン準位 ( $n$ ) 及び電子配置 ( $L$  ホールの数  $N_L^{\text{hole}}$ ) における  $K\alpha$  X 線エネルギーの計算値。

**Figure 4.** (top) Comparison of the experimental data and simulated  $K\alpha$  X-ray spectrum with three side-feeding rates. (bottom) Calculated  $K\alpha$  X-ray energies under different muon states ( $n$ ) and electron configurations with  $L$  holes ( $N_L^{\text{hole}}$ ). Taken from Ref. [1].

### 3. 成果の意義と波及効果

我々は最先端の検出器である TES 検出器を導入することで、ミュオン鉄原子から放出される電子特性 X 線のスペクトルを従来の 10 倍以上のエネルギー分解能で測定することに成功し、世界で初めて詳細なスペクトル形状を観測しました。そしてこれまで未知であったミュオン原子形成過程の全貌を解明しました。ミュオン原子形成過程は fs スケールの非常に速い現象であり、そのダイナミクスを捉えたのは本研究が初めてです。本成果は、ミュオン原子に限らず様々なエキゾチックな量子少数多体系のダイナミクスという、新たな研究分野の先駆となるものと期待します。

また、ミュオン原子は極限環境下における基礎物理の検証に有用ですが、その際ミュオン原子の束縛電子の有無や個数の不定性が実験精度に直結します。本研究により、ミュオン原子形成過程におけるこれらの時間変化が明らかになったことで、ミュオン原子を用いた実験精度の向上にも寄与すると考えられます。

### 4. 展望

ミュオン原子の電子 X 線分光はさまざまな物質に適応可能であり、得られる電子充填速度は物質の物性に敏感なプローブになり得ると考えられます。今後は鉄以外の金属だけでなく、絶縁体や半導体などに適用することで、新たな物性研究プローブとしての可能性を探索したいと考えています。

実は本稿で紹介した成果は実験の主目的ではなく検出器評価の補助データとして取得したものから得られました。本来の目的はミュオン原子のミュオン特性 X 線のエネルギーを精密に測定することで強電場での量子電磁気学 (QED) 計算を検証することでした。電子より 200 倍重い束縛ミュオンの軌道半径は束縛電子の軌道半径の約 200 分の 1 であり、原子核に極めて接近しています。そのため負ミュオンは電子に比べて約 4 万倍の超強電場を検証できます。データは取得済みで近々論文が出版される見込みです。

本研究で使用した TES 検出器は上限 15 keV 程度までの低エネルギー X 線の測定に特化されていますが、現在 NIST との共同研究で 100 keV 程度まで測定できるものも製作中です。周波数空間を利用した新しい多重化読み出し技術によりさらに多素子を簡易に利用できるようにもなります。エネルギーレンジの拡大および大面積化によって今後ますます TES 検出器の応用の可能性が広がっていくと期待しています。

### 4. Perspectives

The present approach to measure electric X-rays from muonic atoms is applicable to a variety of materials. We plan to measure electric X-rays from muonic atoms with not only metals other than iron, but also semi-conductors and insulators as a target material. The electron refilling rate, extracted in our method, could be a new probe for material science.

The results presented in this note are by-products obtained in the commissioning of the muonic X-ray spectroscopy of muonic neon. The main purpose was to test the quantum electrodynamics in a strong electric field. As their mass is 200 times that of the electron, muons are 200 times closer to the nucleus and thus probe high Coulomb fields by a factor of 40,000. We are almost ready to publish the first result on this topic.

The TES spectrometer used in the present work optimized for low-energy X-rays up to 15 keV. Now, we are developing a new TES system for higher-energy X-rays and gamma-rays to measure up to 100 keV. Furthermore, the number of pixels in one system will be drastically increased with a new multiplexing scheme in the frequency domain in the microwave region. With a wider energy range and a larger effective area, we expect expanding usages of the TES detector in various fields.

### 参考文献 References

- [1] T. Okumura et al., Phys. Rev. Lett. 127, 053001 (2021)
- [2] K. D. Irwin and G. C. Hilton, in Cryogenic Particle Detection, edited by C. Enss (Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2005) pp. 63-150.
- [3] W.B. Doriese et al., Rev. Sci. Instrum. 88, 053108 (2017).
- [4] S. Okada et al., Prog. Theor. Exp. Phys. 2016, 091D01 (2016).
- [5] T. Hashimoto et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 27, 1 (2017).
- [6] T. Hashimoto et al., J. Low Temp. Phys. 199, 1018 (2020).
- [7] P. Indelicato, Phys. Rev. A 87, 022501 (2013).