

平成 30 年 6 月 26 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2017

課題番号：26707014

研究課題名(和文)超伝導検出器を用いたハドロニック原子X線精密分光

研究課題名(英文)High-resolution hadronic-atom x-ray spectroscopy with cryogenic detectors

研究代表者

岡田 信二(Okada, Shinji)

国立研究開発法人理化学研究所・東原子分子物理研究室・協力研究員

研究者番号：70391901

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,900,000円

研究成果の概要(和文)：近年急速な発展を遂げている超伝導遷移端センサー(TES)マイクロカロリメータX線検出器とその多素子読み出し技術を、世界に先駆けて当該分野に導入し、次世代ハドロニック原子高精度X線分光の開拓する。協力関係にあるアメリカ国立標準技術研究所(NIST)の240ピクセルTES素子を用い、K中間子-原子核間の強い相互作用ポテンシャルの深さに関する長年の謎の解明を目的とした、K中間子原子X線精密分光実験(J-PARC E62)を推進した。

研究成果の概要(英文)：This project aims to pioneer the next-generation high-resolution x-ray spectroscopy of hadronic atoms. We use a novel cryogenic x-ray spectrometer: an array of superconducting transition-edge-sensor (TES) microcalorimeters, offering unprecedented energy resolution of less than 5 eV (FWHM) at 6 keV. The 240 pixel spectrometer array will have a large collecting area of about 20 mm thanks to recent technological advances in multiplexed readout. This will open a new door to investigate kaon-nucleus strong interactions.

In 2014, a pathfinding experiment was conducted by measuring pionic-atom x rays at the PSI, and successfully demonstrated the feasibility of TES-based exotic-atom x-ray spectroscopy in a hadron-beam environment. In 2016, a commissioning experiment at the actual kaon beamline of J-PARC was performed. Based on these results, the proposed experiment (J-PARC E62) for measuring kaonic atom x-rays with TES was accepted, and the beam time was finally assigned in June 2018.

研究分野：ストレンジネス核物理

キーワード：超伝導検出器 マイクロカロリメータ X線分光 エキゾチック原子 ハドロニック原子 K中間子 J-PARC 国際情報交換

1. 研究開始当初の背景

ハドロニック原子とは、負電荷のハドロン (π^- 、 K^- 、 \bar{p} 、 Σ^- 等) と原子核のクーロン力による束縛系である。通常の原子とは異なり、近距離においてハドロン-原子核間に強い相互作用が働く。その影響は、観測可能な最も低いエネルギー準位 (最終準位) において、

(1) 電磁相互作用のみによる計算値からのずれ (シフト) と (2) 崩壊に起因する有限の自然幅として現れる。ハドロニック原子は、ハドロンを原子核標的内に静止させることで生成するが、生成直後は励起状態であるため、X線を放出しながら脱励起していく。最終準位のシフトと幅は、その準位への遷移 X線により観測することができる。

これまで、ハドロン-原子核間の低エネルギー極限における強い相互作用の研究は、ハドロニック原子 X線の様々な核に対する系統的な測定により盛んに行われてきた。この内、比較的長寿命な π^- 原子に関しては、波長分散型結晶分光器による超高精度分光も行われており、これらの実験結果は、近年のカイラル摂動論による理論的記述とよく一致し成功を収めている。

一方、 K^- 中間子原子 (K^- 原子) においては、 π^- 原子の場合と異なり、核子との相互作用が強い引力であることによる (閾値近傍での単純な摂動論の破綻に起因した) 理論記述の困難さと、 π^- Σ^- 及び π^- Λ^- チャンネルへの崩壊に起因する大きな吸収幅と短寿命ゆえの実験的な困難さにより、未だ K^- と原子核のポテンシャルの深さに関して決定的な情報が得られていない。殊に近年、この引力が非常に強い場合、原子核に K^- が強い相互作用で深く束縛する可能性 (K^- 核) が盛んに議論されている。存在すれば、原子核の高密度状態や中性子星の K^- 中間子凝縮の研究の糸口になるため、世界各地で探索実験が実施されている。

この K^- 核の存在に関連し、 K^- -He 原子 $2p$ 準位に、 K^- -原子核間ポテンシャル依存の僅かな変化がみられる可能性は、30年以上前から指摘されている。最近、この系に関して、 $^3\text{He} \cdot ^4\text{He}$ 電荷密度分布精密計算結果 (肥山氏) を用いた、精密な理論計算が行われ (山縣-関原氏・比連崎氏)、代表的な浅い深い光学ポテンシャルを用いて計算した K^- - $^3\text{He} \cdot K^-$ - ^4He の $3d-2p$ X線 (~ 6 keV) のエネルギーシフトの差において、両ポテンシャル間に約 0.6 eV の有意な違いが現れることが分かった。これは、これまでの 10 倍以上の測定精度が必要であることを意味し、分解能向上が待ち望まれていた。

2. 研究の目的

本研究目的は、ハドロニック原子による強い相互作用の研究にブレークスルーを起こすべく、近年急速な発展を遂げている超伝導遷移端 (TES) X線マイクロカロリメータをハドロン加速器実験に導入し、 K^- 原子 X線精密分光実験を実現することである。TES は、物質

の超伝導から常伝導への急激な抵抗変化を利用した X線熱量計で、従来の半導体 X線検出器 (SDD) に比べ 1桁以上良いエネルギー分解能を持つ (~ 5 eV (FWHM) @ 6 keV)。同等の高分解能を実現する波長分散型結晶分光器ではなく、本検出器に着目した理由は、多素子化による大幅な検出効率の増加が可能にある点にある。これは、統計の少ないハドロニック原子の研究には重要な意味を持つ。

SDD を用いた K^- -He 原子 $3d-2p$ X線エネルギーの中心値決定精度は 2 eV が限界であったのに対し、本研究では TES 検出器を用い 0.2 eV の精度での決定を目指す (図 1)。これにより、これまでの K^- -原子核間の強い相互作用ポテンシャルの深さに関する長年の謎を解明を目指す。

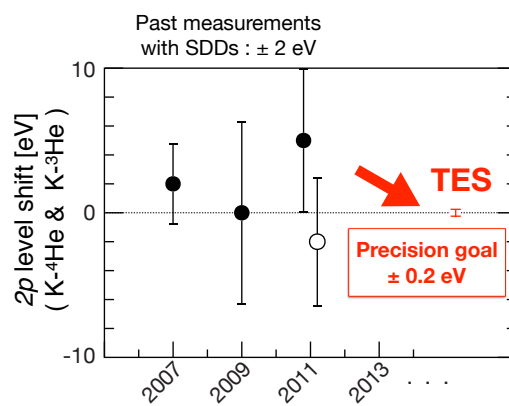


図 1 K^- - $^3\text{He} \cdot K^-$ - ^4He 原子 $2p$ レベルシフト。過去の実験結果と本研究で目指す実験精度

3. 研究の方法

K^- 中間子は、J-PARC (大強度陽子加速器施設) の一次陽子ビームを生成標的に衝突させることで生成し、二次ビームとして実験エリア内まで引き出す。 K^- -He 原子は、 K^- ビームを減速後、液体 He 標的中に静止させて生成する。本研究では、この K^- -He 原子から放出される X線のエネルギーを TES 検出器により精度良く測定し、電磁相互作用のみによる計算値からのシフトと幅を観測することで、強い相互作用の情報を引き出す。

TES システムは、共同研究先のアメリカ国立標準技術研究所 (NIST) が開発した 240 素子 TES と読み出し系を使用する (図 2)。Mo-Cu 二層薄膜の TES 素子に 4 μm 厚ビスマス吸収体を実装し、目的の 6 keV X線に対し 80% 吸収効率を有する。有効面積は、素子当たり $300 \times 320 \mu\text{m}^2$ 、240 素子全体で 23 mm^2 に達する。素子の冷却には、二段式パルスチューブ断熱消磁冷凍機 (ベース温度 60~70 mK) を使用する。本 TES の超伝導臨界温度は ~ 100 mK で、電氣的バイアスによってこの超伝導転移端に温度を保ち、吸収体の温度上昇に起因する急激な抵抗変化を、電流変化として SQUID 電流アンプで読み出す。多素子の信号は、熱流入を最小限に保つため、時分

割 (TDM) 式 SQUID アンプ多重読み出しにより多重化して読み出す [W.B. Doriese et al., J Low Temp Phys 184, 389 (2016)]. 独立した 30 素子の出力を連続的に切り替え 1 本の SQUID アンプで読み込み、これを 8 TDM カラム平行して読むことで、240 素子読み出しを行う。

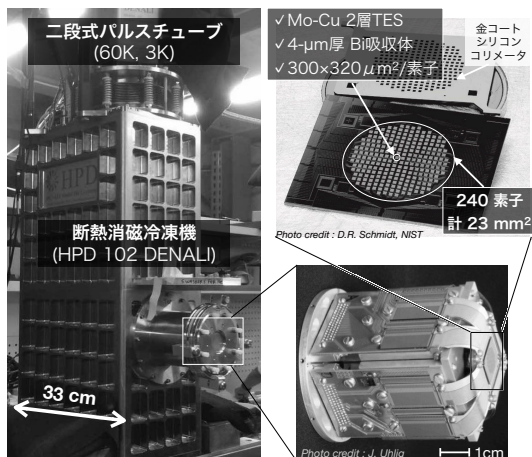


図 2 TES 検出器システム

研究は以下の通り段階的に行ってきた：

(1) π^- 原子実験：TES のビーム環境下における性能を評価するため、 π^- 中間子ビームを用いて π^- 原子 X 線分光実験を行い、エネルギー較正法を含めたフルデモンストレーションを実施 (2014 年)。本成果を元に、J-PARC 実験審査委員会 (PAC) に K 中間子原子実験を提案し、J-PARC E62 実験として、stage-2 採択 (実験意義及び実行可能性の承認) を得る (2015 年)。

(2) K ビームコミッショニング：J-PARC の K ビームラインにて、実験条件最適化や、TES が実際の K ビームラインにて十分な性能で動作することを示す (2016 年)。

(3) K 原子実験：2018 年 6 月に E62 本実験のビームタイムが割り当てられ、本研究期間内 (~2018 年 3 月) においては、TES システムを液体 ^3He / ^4He 標的クライオスタットに組み込んだセットアップでの最終調整を行う。(本稿執筆時 (2018 年 6 月現在) J-PARC にてサイエンスデータの取得中)

4. 研究成果

(1) π^- 原子実験：2014 年 10 月、ポールシェラー研究所 (PSI) の π^- 中間子ビームライン (piM1) にて実施した。 π^- ビームを減速させグラファイト標的に静止させて $\pi^-^{12}\text{C}$ 原子を生成し、放出された X 線を上述の 240 素子 TES 検出器により測定した。過酷な高強度 (1.45 MHz) ハドロンビーム環境の下、 $\pi^-^{12}\text{C}$ $4f-3d$ 及び $4d-3p$ 遷移 X 線起因のイベン

トのクリアな時間-エネルギー相関を確認し、時間分解能 $1.2 \mu\text{s}$ 、エネルギー分解能 $7.3 \text{ eV}(\text{FWHM})@6.4 \text{ keV}$ を実現した (図 3) [発表論文③]。同時に測定した従来型検出器 SDD によるスペクトル (図 3(d)) と比べると分解能は圧倒的である。エネルギー較正は、X 線発生装置による Cr と Co からの特性 X 線 (常時モニター) を用いて行い、絶対精度の評価は、目的の X 線に近い鉄の特性 X 線 (Fe $K\alpha$) を用いて行った (図 4)。詳細な解析の結果、 $\pi^-^{12}\text{C}$ $4f-3d$ 遷移 X 線のエネルギー決定精度は、系統誤差を含め 0.1 eV 以下を達成し、K 原子実験の目標精度より十分良い精度で X 線エネルギー測定が可能である事を実証した [発表論文⑤]。一方、エネルギー分解能は、荷電粒子直接ヒットの計数率に (1 Hz/pixel 以下の範囲で) 比例して低下することが明らかとなり、荷電粒子直撃を抑えるため、鉛ブロック遮蔽が有効であることを示した。

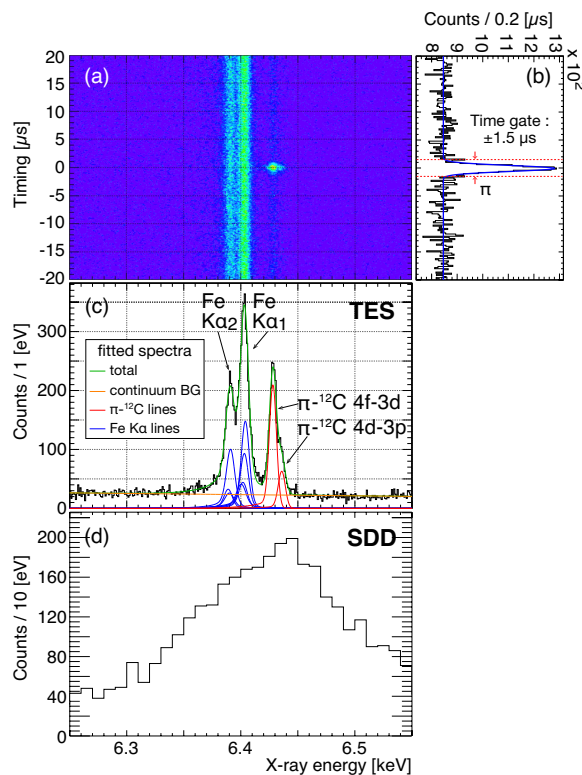


図 3 π^- 原子 X 線分光実験の結果 @ PSI

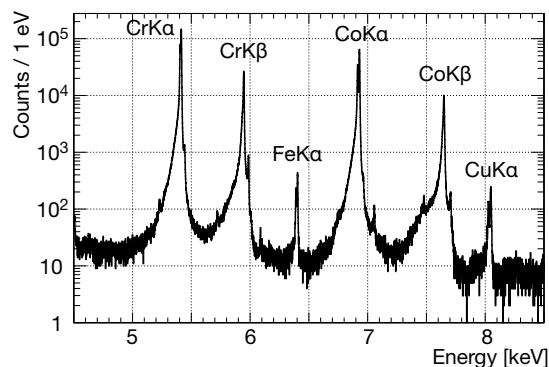


図 4 Cr と Co を標的とした X 線発生装置からのエネルギースペクトル。エネルギー較正に利用

(2) Kビームコミッションング：2016年6月、J-PARCハドロン施設のKビームライン(K1.8BR)にて実施した。Kビーム及び静止させる為のビーム減速材の調整を行うと共に、実際のビーム条件にて、 ^{55}Fe 線源からのMn K α 線を用いてTESのパフォーマンスを確認した。J-PARCにおけるKビームは、約5秒サイクルの時間構造(スピル)をもち、このスピルON/OFF(ビーム有り/無し)でのエネルギー分解能は、それぞれ5 eV / 6.5 eVであった(図5)。このとき荷電粒子直接ヒットの実効計数率は0.2 Hz/spillで、PSIで確認した傾向と矛盾の無い結果を得た(図6)。ビーム起因のバックグラウンドも ~ 0.02 [counts / 20 eV / sec]であることが分かり、現実的なビーム条件にて、分解能・バックグラウンド共に、実験遂行に問題無いレベルであることを確認した。

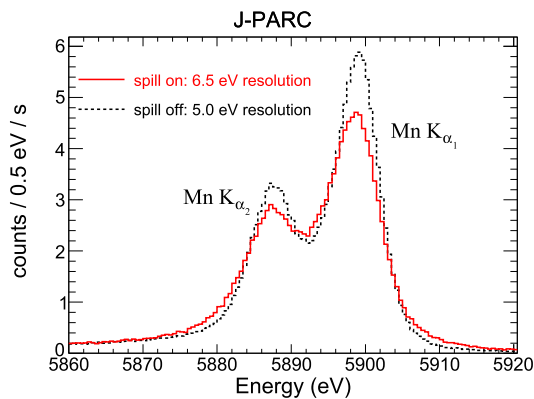


図5 ^{55}Fe 線源からのMn K α 輝線。KビームスピルON・OFF時の比較 @ J-PARC

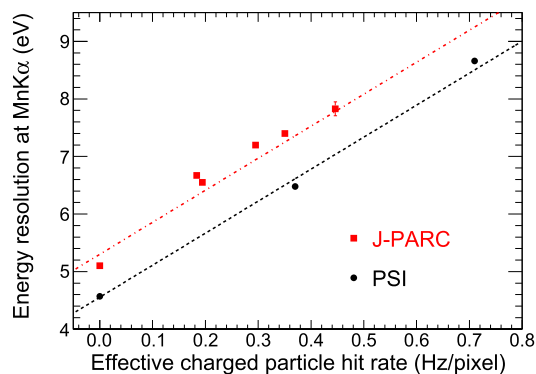


図6 エネルギーFWHM分解能 vs. ビーム起因の荷電粒子ヒット計数率

(3) K原子実験：J-PARC E62本実験のビームタイムが割り当てられ、物理データの収集を行っている(2018年6月現在)。データ収集中に得られた予備的なスペクトルに於いて、既に、ビーム同期の K^{-3}He 原子 $3d-2p$ X線のクリアなエネルギー・時間の相関が確認されており(図7)、順調にデータ収集を続けている。

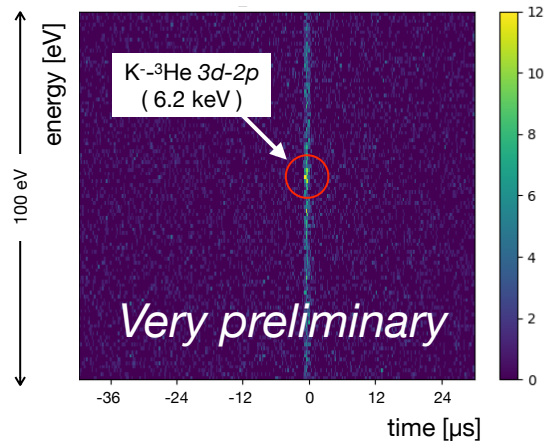


図7 E62本実験のデータ収集中に得られた K^{-3}He X線の時間vs.エネルギー相関(速報)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計6件)

① T. Hashimoto, S. Okada 他 (計51名, 29番目), Beamline Test of a Transition-Edge-Sensor Spectrometer in Preparation for Kaonic-Atom Measurements, IEEE Trans. Appl. Supercond. 27, 2100905 (2017), 10.1109/TASC.2016.2646374, 査読有

② T. Hashimoto, S. Okada 他 (計47名, 25番目), Kaonic-Atom X-ray Spectroscopy with Superconducting Microcalorimeters, JPS Conf. Proc., 17, 72001, (2017), 10.7566/JPSCP.17.072001, 査読有

③ S. Okada 他 (計38名, 1番目), First application of superconducting transition-edge sensor microcalorimeters to hadronic atom X-ray spectroscopy, Prog. Theor. Exp. Phys., 2016, 091D01 (2016), 10.1093/ptep/ptw130, 査読有

④ H. Tatsuno, S. Okada 他 (計32名, 21番目), Future projects of light kaonic atom X-ray spectroscopy, EPJ Web of Conferences, 130, 01018 (2016), 10.1051/epjconf/201613001018, 査読有

⑤ H. Tatsuno, S. Okada 他 (計34名, 21番目), Absolute Energy Calibration of X-ray TESs with 0.04 eV Uncertainty at 6.4 keV in a Hadron-Beam Environment, J Low Temp Phys 184, 930-937 (2016), 10.1007/s10909-016-1491-2, 査読有

⑥ S. Okada 他 (計12名, 1番目), High-Resolution Kaonic-Atom X-ray Spectroscopy with Transition-Edge-Sensor Microcalorimeters, Journal of Low Temperature Physics 176, 1015-1021 (2014), 10.1007/s10909-014-1137-1, 査読有

[学会発表] (計 29 件)

① S. Okada et al., X-ray spectroscopy of kaonic atoms with cryogenic detectors, International Conference on Exotic Atoms and Related Topics (EXA2017), 2017/09/12, Vienna(Austria)

② 岡田信二 et al., 超伝導検出器を用いたハドロニック原子 X 線精密分光, 原子衝突学会第 41 回年会, 2016/12/10, 富山大学(富山)

③ S. Okada et al., Kaonic-atom x-ray spectroscopy with cryogenic detectors, International workshop MIN16 (Meson in Nucleus 2016), 2016/08/02, 京都大学(京都)

④ S. Okada et al., Hadronic-atom X-ray spectroscopy with cryogenic detectors, ECT* workshop - Frontiers in hadron and nuclear physics with strangeness and charm -, 2015/10/21, Trento(Italy)

⑤ S. Okada et al., High-resolution Exotic-Atom x-ray spectroscopy with Transition-Edge-Sensor microcalorimeters, Jagiellonian Symposium on Fundamental and Applied Subatomic Physics, 2015/06/12, Krakow(Poland)

⑥ 岡田 信二 et al., 超伝導遷移端マイクロカロリメータを用いた K 中間子原子 X 線精密分光実験, 日本物理学会 第 70 回年次大会, 2015/03/24, 早稲田大学(東京)

⑦ S. Okada et al., High-resolution hadronic-atom x-ray spectroscopy with cryogenic detectors, What next LNF: Perspectives of fundamental physics at the Frascati Laboratory, 2014/11/10, Frascati(Italy)

⑧ S. Okada et al., High-resolution hadronic-atom x-ray spectroscopy with cryogenic detectors, International Conference on Exotic Atoms and Related Topics (EXA2014), 2014/09/16, Vienna(Austria)

⑨ S. Okada et al., High-resolution hadronic-atom x-ray spectroscopy with superconducting TES microcalorimeters, 20th Particles and Nuclei International Conference 2014 (PANIC2014), 2014/08/26, Hamburg(Germany)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡田 信二 (OKADA, Shinji)

国立研究開発法人理化学研究所・

東原子分子物理研究室・協力研究員

研究者番号 : 7 0 3 9 1 9 0 1