

令和元年6月13日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17718

研究課題名(和文)大強度ハドロンビーム実験で用いる超伝導X線検出器技術の基礎研究

研究課題名(英文) Basic study of a superconducting X-ray detector system for a high-intensity hadron-beam experiment

研究代表者

橋本 直 (Hashimoto, Tadashi)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 先端基礎研究センター・任期付研究員

研究者番号：20732952

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：ハドロンと原子核間の強い相互作用の研究における強力な手法の一つであるハドロンニック原子X線分光の精度を向上させるため、優れたエネルギー分解能を持つ超伝導遷移端型マイクロカロリメータ(TES)を大強度ハドロンビーム環境下で応用する手法の確立を目指した。特に荷電粒子直撃による分解能悪化及び背景事象の増加という問題や、限られた検出器を立体角を最大限活かすインテグレーション手法に関する研究をすすめ、J-PARCでのK中間子ヘリウム原子X線分光実験の成功へ繋がった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超伝導遷移端型マイクロカロリメータ(TES)は近年開発の進展が著しい高分解能なX線検出器であるが荷電粒子が多数飛び交う環境での利用は難しいと考えられていた。本研究ではそれらを克服して既存の加速器実験装置群と組み合わせて実験を遂行する応用手法を確立した。我々はこれにより従来にない高精度のX線測定でK-中間子の原子核中でのポテンシャルを検証することに貢献しようとしている。本研究の成果であるTES検出器応用技術は他の加速器環境やX線衛星でも利用可能であり幅広いサイエンスへの展開が期待される。

研究成果の概要(英文)：The present research project aims at establishing an application technique of a transition-edge-sensor microcalorimeter (TES) in a high-intensity hadron-beam environment. TES X-ray detectors have excellent energy resolution, however, they are suffering from some difficulties specific to such an application. One is the energy resolution degradation caused and background signals by charged particles hit on the TES array. Another one is a small solid angle, while TES is highly sensitive to the external environment, which makes the integration of the TES system and other experimental apparatus rather difficult. We overcame these difficulties and successfully obtained X-ray data from kaonic helium atoms at J-PARC.

研究分野：原子核物理実験

キーワード：X線検出器 超伝導検出器 K中間子原子 J-PARC

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

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^- ; Σ^- ; 反陽子など)がクーロン力によって原子核に束縛された状態であり、ハドロンを原子核標の中に静止させることで生成する。高励起状態で生成されるハドロニック原子は脱励起過程で X 線を放出するが、原子核と近距離となると強い相互作用の影響を受けて、エネルギー準位が電磁相互作用による計算値からずれ(シフト)原子核への吸収による幅をもつ。このシフトと幅を X 線分光から決定することで強い相互作用の情報を引き出すことができるため、現在までに多くのハドロニック原子 X 線が測定されており、特に、 π^- 中間子原子のデータに関してはカイラル摂動論による理論的記述とも一致し、手法の強力を示している。

一方、ストレンジネスを含むハドロン(K^- ; Σ^- ; Ξ^- など)については、ビーム強度が限られることもあり X 線の測定データは質、量とも満足のできるものではない。比較的データが多い K^- の場合でも、多くのデータが 1970,80 年代に取得されたもので、近年の再測定でその過去の結果が否定されているものもあり、精度・信頼性が十分ではない。そもそも従来の半導体検出器の分解能より一桁以上小さいシフトや幅を持つ X 線の場合、有意な測定は事実上不可能であった。現在までに K^- と原子核の間に強い引力が働くことはわかっているが、ポテンシャルの実部で 50 MeV から 200 MeV と幅広い深さが許容されており、定量的な理解にはほど遠い。近年、 K^- 中間子が強い相互作用で束縛された原子核状態をつくる可能性が盛んに議論されており、我々は J-PARC で遂行飛行 K^- 反応による実験で" K^-pp "束縛状態が発見した[PLB789, 620-625(2019)]。このような状態は原子核密度中での反 K^- 中間子の相互作用に関する重要な情報をもたらすだけでなく、新しい形態の物質として非常に興味深いため、相補的な情報をもたらす K^- 中間子原子 X 線原子の精密測定の重要性も増している。

そこで我々はハドロニック原子 X 線実験に革新を起こすべく、超伝導遷移端型マイクロカロリメータ(TEs)を導入することを目指してきた。TEs は超伝導遷移点付近で小さな温度変化で急激に抵抗が変化する"温度計"であり、吸収体で熱に変換された X 線のエネルギーを最高で 2 eV FWHM@6 keV という高分解能で測定できる。これは従来の半導体検出器が典型的には 150 eV 程度の分解能であるのに対し圧倒的な分解能である。我々はすでに π^- 中間子ビームライン(スイス PSI)でのテスト実験で π^-C 原子 X 線の測定に成功しハドロンビーム中でもある程度 TEs 検出器が使用可能であることを証明した[JLTP184(3),930-937(2016)]。同時にハドロンビーム中でより高い性能を発揮するためにはハードウェア、ソフトウェア両面でのさらなる改善が望まれることも分かった。

2. 研究の目的

本研究ではハドロンと原子核間の強い相互作用の研究における強力な手法の一つであるハドロニック原子 X 線分光の精度を向上させるため、高いエネルギー分解能を持つ超伝導遷移端型マイクロカロリメータ(TEs)を大強度ハドロンビーム環境下で応用する手法の確立を目指す。すでに行ったテスト実験で明らかとなった問題も含めて、ハードウェア及びソフトウェアの両面から研究する。特に以下の課題について研究を進めた。

- (1) 荷電粒子が TEs のシリコン基盤に直撃すると熱的クロストークを起こし、結果としてエネルギー分解能が悪化すること。
- (2) 荷電粒子が通過した時に TEs の吸収体に落とすエネルギーが興味ある X 線エネルギー領域と重なり主要なバックグラウンドイベントとなること。
- (3) 実験標的や他の実験装置とのインテグレーション。特に限られた検出器有効面積を活かすことやビーム検出器とのデータ同期手法の開発。

これらの検出器基礎研究は特に J-PARC で行う K^- 中間子 He 原子 X 線分光実験を念頭に行った。この実験では $K^-^3\text{He}$ 及び $K^-^4\text{He}$ 原子 $3d \rightarrow 2p$ 遷移 X 線 (約 6 keV) を測定し $2p$ シフトを 1 eV を十分に下回る精度で決定する。また 2-5 eV と予想される吸収幅の測定も目指す。この実験により原子核中の K^- のポテンシャルに強い制約を課すことで K^- 中間子原子核の理解等に貢献する。さらには将来の Σ^- 原子、 Ξ^- 原子の X 線分光実験などへの幅広い TEs 検出器応用の可能性を広げたい。

3. 研究の方法

本研究で用いた超伝導遷移端型マイクロカロリメータ(TEs)は冷凍機から読み出しまで米国標準技術研究所にて開発されたシステムである[RS188, 053108(2017)]。図 1 に概要図を示す。冷凍機は 2 段式のパルスチューブ冷凍機に加えて断熱消磁冷凍機を備えたものであり、一度のサイクルで検出器センサー部を 70mK 程度に 1 日ほど保持することができる。心臓部の TEs センサーは Mo-Cu の 2 層薄膜であり、超伝導状態と常伝導状態の間にバイアスされているため、わずかな温度変化でも大きく抵抗が変化し高精度で検出できる。入射した X 線は TEs 上に生成されたビスマスの吸収体で熱エネルギーに変換されることで検出される。本研究で用いた TEs アレイは有効面積 $300 \times 320 \mu\text{m}^2$ の素子が 240 ピクセルあるもので計 23mm^2 、吸収体のビスマスは $4 \mu\text{m}$ で 6 keV の X 線に対する阻止能は 85%程度である。なお有効面積は検出器チップ上の配線部分を保護するために直上に設置するコリメータの開口サイズで決まっている。TEs センサー部で検出されたシグナルは同じ 70 mK 部に設置された超伝導量子干渉計(SQUID)により増幅されさらに 1K ステージの SQUID アンプ、常温部のアンプで増幅されて

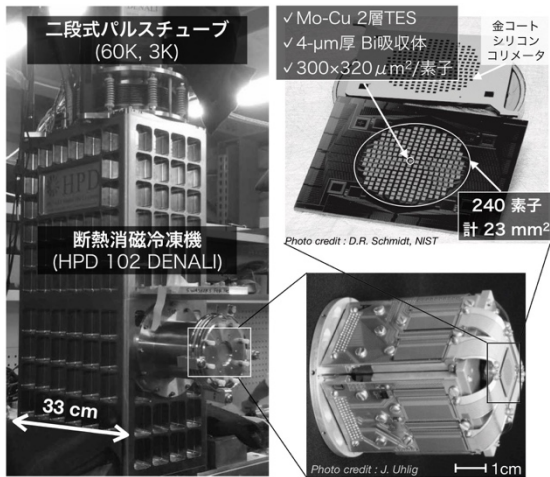


図 1: 本研究で用いた TES 検出器システムの概要。米国 NIST による開発。

専用のエレクトロニクスに入力される。ここでは信号入力とバランスするようなフィードバック量が計算されそれが信号波形としてコンピュータ(PC)に記録される。240 チャンネルは SQUID を利用した時間分割多重読み出し(TDM)で 30 チャンネルずつ 8 系統に分けて読み出される。チャンネルの切り替えは 240 ns 毎に行われるため 1 チャンネル内でのサンプリング間隔は約 7 μs ほどである。信号データは全て PC にストリーミングされるが通常パルスの立ち上がりをソフトウェア的に検出してその前後の波形データのみ記録する。

本研究の初期の段階においては 2016 年 6 月に行った J-PARC K1.8BR での K-ビーム環境下での動作検証に加えて X 線源(⁵⁵Fe), β 線源(⁹⁰Sr)などを用いて TES 検出器システム単体での性能評価を行った。その後 X 線発生装置と Cr, Co, Cu などの 2 次標的を用いた測定も可能となり、必要なソフトウェアハードウェアの開発を反映した上で 2018 年 6 月には K-He 原子 X 線測定実験のデータ取得を行った。ビームデータ取得中も線源や X 線発生装置を利用して常時エネルギー校正用の X 線データを同時に取得した。K-He 実験は J-PARC K1.8BR 実験エリアで行われ、ビームラインスペクトロメータ等を利用した[PTEP2012,02B011]。標的システムは K 中間子原子核探索実験に使用したものを改造し、TES システムと接続して使用した。TES データとビーム検出器のデータの同期照合には FPGA ボード(Hadron Universal Logic board)を利用した。

また、TES 検出器の検出器立体角やビームバックグラウンドの評価等には Geant4 tool kit を使用したモンテカルロシミュレーションを行った。シミュレーション手法の妥当性の検証には本研究に先立ってほぼ同等の TES システムを使用して行われた π-ビーム試験のデータも用いた。

4. 研究成果

(1) ハドロンビーム環境下でのエネルギー分解能悪化の抑制

本研究では J-PARC K1.8BR ビームラインの K-ビームを利用したが J-PARC では約 5 秒周期のスパルビームを提供するため検出器への熱流入が一定ではなく当初熱浴の温度制御に問題が生じた。しかしビームライン上に鉛ブロックによるシリコメータを設置するなどしてビームハローを抑えることで改善した。依然残る熱浴の温度変動はシグナルのベースラインの変化となって現れるが、オフラインでの波形解析による補正で十分なエネルギー分解能(7 eV FWHM@6 keV)を達成することができた。ビームなしでの分解能 5 eV と比較した悪化は、荷電粒子がシリコン基板に当たることで多数生じる熱的なクロストークによる小さなパルスのパイルアップで理解される。一般的には解析に十分な長さの波形を用いたほうが良いことが知られているが、我々の環境では解析する領域を短くすることでパイルアップの可能性を小さくするほうが有用であることがわかった。図 2 に解析する波形領域を最適化した時の分解能の改善の様子を示す。典型的には 0.5 eV ほど分解能を改善することに成功した。

(2) 荷電粒子によるバックグラウンド事象の除去

荷電粒子は上記のようにエネルギー分解能を悪化させるだけではなく、吸収体を通過した時に与えるエネルギーがちょうど興味ある X 線のエネルギー領域と重なるため深刻なバックグラウンド源となる。我々は研究を進める中でこのようなバックグラウンドのイベントの時には、周辺のピクセルにも小さな信号を生じさせている可能性が高いことがわかった。図 3 に ⁹⁰Sr 線源による電子照射時の例を示す。そこで任意のトリガーされたピクセルの隣接ピクセルも同時に波形を取得できるようデータ取得システムのソフトウェア、ファームウェアの改造を行った。さらには取得したデータの解析手法を開発し荷電粒子バックグラウンドをほぼ半減させることに成功した。

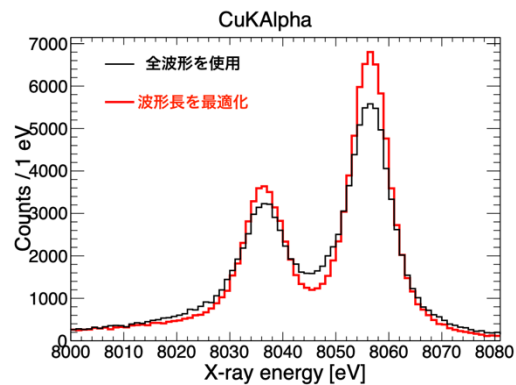


図 2: Cu 特性 X 線スペクトルにおける、解析に用いる波形長の最適化による分解能の改善。

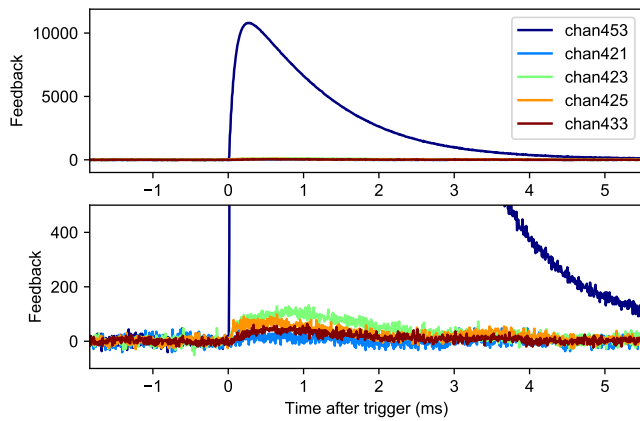


図 3：電子入射による TES 検出器のシグナル波形 (chan453) と周辺ピクセルの波形。下段は上段の Y 軸拡大図。

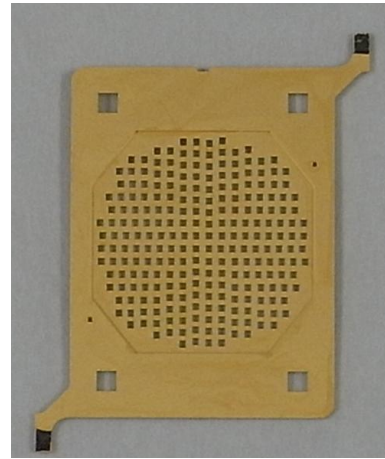


図 4：新規にデザイン、製作したコリメータアレイ。

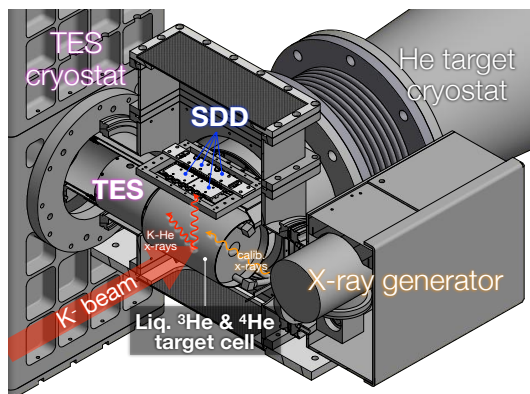


図 5：J-PARC E62 実験における標的周辺のセットアップ。

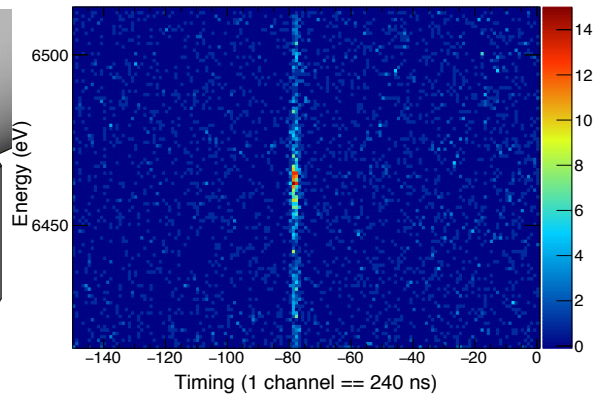


図 6：J-PARC E62 実験における K ビーム入射タイミングと X 線エネルギーの相関 (K⁴He データ)。

(3) 標的システムやビーム検出器等とのインテグレーション

①検出器直上のコリメータアレイの設計を見直すことで検出器立体角を約 50% 向上させた。図 4 が製作したコリメータで標準のものより薄くすることで立体角を稼ぐ一方、表面に金を 10 μ m ほどメッキすることで X 線に対する阻止能を維持している。

②検出器立体角や X 線透過率を最大化するために 70mK, 3K, 50K それぞれの温度ステージの磁気シールドのデザインを最適化した。TES は磁気に対して敏感であるが常温部にも磁気シールドを追加することによって 3K, 50K については標的に対して十分に大きな開口確保することができた。また、70mK の X 線窓には通常の Al に変えて Be を採用したが、マイスナー効果による磁気シールドが重要であることがわかり、アルミナイズドマイラーを加えることで磁気シールドと X 線透過率を両立した。今後は磁場シミュレーション等により定量的に磁場の影響を検証できることが望ましい。

③液体ヘリウム標的システムやシリコン X 線検出器と同じ真空容器での安定動作を確立した。図 5 にセットアップの概要を示す。熱輻射シールドや磁気シールドの形状は複雑になったが標的側、検出器側ともに要求を満たすことができた。標的システムからの振動を抑制する必要や、標的用の一部計器類のノイズを絶縁カップリングで遮断する必要があったが最終的に TES 検出器の性能に影響が見えない程度まで落とし込めた。

④TES 検出器システムは独自の DAQ システムで動くため、ハドロン実験の通常の DAQ システムに直接組み込むことはできない。そこで我々は TES システムのクロックを FPGA ボードで取得してビームデータに書き込むとともにビームのトリガー情報を TES システムに埋め込むことでオフライン時間同期をすることとした。この手法は安定的に動作し 100% の効率で 2 つのシステムのデータ照合に成功した。

以上の成果の集大成として我々は K He X 線の測定に成功した。図 6 にその初期の解析結果を示す。K ビームに同期したイベントが横軸 -80 付近に見られ、特に縦軸 6465 eV 周辺に明らかに多くのイベントが集中しており、これが K⁴He 3d \rightarrow 2p 遷移 X 線に相当する。

本研究によりハドロンビームでの実際的な TES 検出器の応用技術が確立された。この技術を生かして今後は K ビームだけでなく様々な加速器ビーム環境下での従来にない超高分解能での X 線・ γ 線測定が行われ、サイエンスに革新を起こしていくことが期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 3 件)

- ① T. Hashimoto et al. (計 51 名, 1 番目), Beamline test of a transition-edge-sensor spectrometer in preparation for kaonic-atom measurements, IEEE Trans. Appl. Supercond., 27(4), 2100905 (2017), DOI:10.1109/TASC.2016.2646374, 査読有
- ② T. Hashimoto et al. (計 47 名, 1 番目), Kaonic-Atom X-ray Spectroscopy with Superconducting Microcalorimeters, JPS Conf. Proc. 17, 072001 (2017), DOI:10.7566/JPSCP.17.072001, 査読有
- ③ S. Okada, T. Hashimoto et al., (計 38 名, 8 番目), First application of superconducting transition-edge-sensor microcalorimeters to hadronic-atom x-ray spectroscopy, Prog. Theor. Exp. Phys., 2016, 091D01 (2016), DOI:10.1093/ptep/ptw130, 査読有

〔学会発表〕 (計 7 件)

- ① T. Hashimoto et al., Kaonic atom experiments at J-PARC, 8th International Conference on Quarks and Nuclear Physics (QNP 2018), Tsukuba, Japan, November 14th, 2018.
- ② 橋本直 et al., J-PARC における K 中間子 X 線分光, ELPH 研究会 C023 「原子核中におけるハドロンの性質とカイラル対称性の役割」, 東北大学電子光理学研究センター, 2018 年 9 月 11 日.
- ③ T. Hashimoto et al., Kaonic nuclei studied via K^- induced reactions at J-PARC, International Conference on Exotic Atoms and Related Topics (EXA2017), Vienna, Austria, September 12th, 2017.
- ④ T. Hashimoto et al., TES application to kaonic atom X-ray spectroscopy in a charged-particle beamline, 17th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD2017), Kurume, Japan, July 21st, 2017.
- ⑤ T. Hashimoto et al., Application of X-ray microcalorimeters to hadronic atom spectroscopy, NSMAT2016, Sendai, Japan, November 21st, 2016.
- ⑥ 橋本直 et al., J-PARC における K ビームを用いた超伝導遷移端マイクロカロリメータの性能評価, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学, 2016 年 9 月 21 日.
- ⑦ T. Hashimoto et al., High-resolution kaonic atom X-ray spectroscopy with transition-edge sensors, Applied superconductivity conference 2016 (ASC2016), Denver, CO, from 4th to 9th September 6th, 2016.

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。