

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H01237

研究課題名(和文) K中間子重水素原子のX線分光

研究課題名(英文) X-ray spectroscopy of kaonic deuterium atoms

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・研究職

研究者番号：20732952

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：我々は世界初のK中間子重水素原子X線分光を行うことで、反K中間子と核子の相互作用をアイソスピンを分離して決定することを目指している。本研究ではまず実験の鍵となる大立体角シリコンX線検出器ユニットについてビーム試験で十分な性能を確認した。続いて低温高圧ガス標的システムにX線検出器を組み込んだ上でビームを用いた総合試験を行い、K中間子ヘリウム及びK中間子水素X線の検出に成功した。これらのテスト実験の結果をふまえて実験装置を改良、ビームラインの向上も検討することで、K中間子重水素原子X線分光の実現の目処が立った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

K中間子重水素のX線測定は幅が広くX線収量が少ないため困難な実験である。本研究ではJ-PARCの大強度K中間子ビームの利用に加え、大立体角X線検出器を開発、さらに円筒型検出器によるバックグラウンド低減を行うことでこの実験の実現が可能であることを示した。K中間子重水素のX線測定が実現すると、既存のK中間子水素データと合わせて反K中間子と核子の相互作用をアイソスピンを分離して決定することができる。これは低エネルギーQCDの重要な基礎データとなり、近年発見されたK中間子の原子核束縛状態や中性子星の構造研究への寄与も期待される。

研究成果の概要(英文)：We are aiming at the first measurement of kaonic deuterium X-rays to resolve the isospin-dependent antikaon-nucleon interaction. First, we tested large-acceptance silicon X-ray detectors, which is key instruments in our experiment, to demonstrate good performance in the beamline. Next, we installed the X-ray detector system into the cryogenic gas target system, and together with cylindrical detectors for background reduction, we performed a commissioning experiment. We successfully observed X-rays from kaonic helium and hydrogen. Based on these test experiments, we upgraded detector systems and also considered beamline upgrade, confirming the feasibility of the near future measurement of kaonic deuterium X-rays.

研究分野：原子核・ハドロン実験

キーワード：K中間子原子 KbarN相互作用 J-PARC X線分光

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

反 K 中間子 ($K^-, K^{0\text{bar}}$) はストレンジクォーク(s)とアップ(u)またはダウン(d)の反クォークで構成される粒子であるが、低エネルギーでの散乱実験および K 中間子水素原子の X 線分光によって、核子との $K^{\text{bar}}N$ 相互作用が強い引力であることが定性的に確立している [PRL 78, 3067 (1997)]。また、 $\Lambda(1405)$ はハイペロン励起状態であるが、単純な 3 クォーク状態では説明できないことが昔から知られており、現在では K と陽子(p)の準束縛状態であると考えられている [PPNP67(2012)55]。 $\Lambda(1405)$ が $K^{\text{bar}}N$ の束縛状態だとすると束縛エネルギーは 10–30 MeV となり、核子 2 体系である重陽子の束縛エネルギーが 2 MeV であることと比較する $K^{\text{bar}}N$ 相互作用は非常に強い引力である。

強い引力的相互作用は K が原子核状態を持つ可能性の盛んな研究へと繋がっている [PRC65(2002)044005]。反 K 中間子原子核 (K 核) は通常の原子核とは異なり中間子が原子核の構成粒子となる全く新しい物質であり、強い引力により通常核密度を超える高密度が実現されることも予想される [PLB590(2004)51]。反粒子が核内にあらわに含まれる (K^{bar} 中の u^{bar} あるいは d^{bar}) このような系が存在する可能性自体が興味深いだけでなく、核物質中での中間子の性質の変化や超高密度を実験室で生成可能になることで新しい領域の物理への発展が期待される。また巨大な中性子過剰原子核である中性子星での反 K 中間子の役割も注目されている。K は負電荷であり、かつ核子とのパウリ排他律の影響を受けないため相互作用が十分に大きな引力であれば高密度環境下で現れる可能性がある。特にアイソスピン 1 の Kn チャンネルの定量的理解を向上させることが重要である。

そのためには現在データが存在しない K-重水素原子(K-d)X 線の測定が必要である。K-原子は K-中間子がクーロン力で原子核に束縛した系であるが、内殻軌道においては強い相互作用の影響も顕著になり、軌道エネルギーがクーロン力のみで計算した値からシフトし原子核吸収による幅をもつ。実験的には K-ビームを標的に静止することで高励起状態の K-原子を生成し、内殻軌道 (K-d 原子の場合 1s 軌道) へ脱励起するとき放出する X 線を測定することで強い相互作用シフト及び吸収幅を決定する。K-原子の X 線分光は運動量がほぼ 0 における散乱実験に相当し、高品質な低エネルギーのビームを得ることが難しい K-中間子等の短寿命粒子にとっては、低エネルギー相互作用を高精度で測定するユニークな手法である [PhysRep287(1997)385]。K 中間子水素原子(K-p)については既にデータがあり 1s 軌道のエネルギーシフト及び幅から Deser 方程式 [PR96(1954)774]によって K-中間子と陽子間の複素散乱長に直接結びつけられている。K-p 原子はアイソスピン 0 と 1 の平均であり、アイソスピン 0 と 1 の複素散乱長を独立に決定するためには同様に線形結合で表される K-d 原子の測定が不可欠である。しかし K-d 原子の X 線測定は 1s 軌道の自然幅が広く、さらには X 線収量が静止 K 中間子あたり 0.1%程度と少ないと予想されるため非常に挑戦的な実験であった。

2. 研究の目的

本研究では K 中間子重水素原子 (K-d 原子)の 1s 軌道へ X 線(6–10 keV, 幅約 1 keV)の初測定を行い 1s 軌道エネルギーの強い相互作用シフト及び幅について相対エラー 10%程度の精度で決定することを目指す。それにより、既存の K 中間子水素原子(K-p 原子)のデータと合わせることで、アイソスピン 0 と 1 の成分を分離して基礎的な $K^{\text{bar}}N$ 相互作用を定量的に決定する。 $K^{\text{bar}}N$ 相互作用の決定は、前述のように豊かな学術的背景を持つ反 K 中間子に関わる物理の飛躍的発展のために不可欠である。具体的には我々が提案している J-PARC ハドロンホールでの E57 実験における K-d 原子 X 線測定を推進することが目的となる。まず、鍵となる X 線検出器を中心とする装置開発を行い、K-ビームを用いたテスト実験によって必要な高感度測定法を確立することを中心に研究を進めた。

3. 研究の方法

本研究での、K-d 原子 X 線測定実現へ向けた実験的なアプローチは以下のような戦略をとる。

- J-PARC の大強度 K-ビームを用いることで静止 K 数=K 中間子原子生成数を稼ぐ。ビームラインとしては比較的低運動量の K-ビームが利用可能なハドロンホールの K1.8BR ビームラインを利用する。
- シュタルク効果による X 線収量の減少を抑えるためガス標的を用い、密度に比例する静止 K 数とのバランスを考えて低温高圧とする。
- シリコンドリフト X 線検出器(SDD)で標的周りを大立体角で覆うとともに、検出器を 100K 程度まで冷却することによって良い時間分解能(数 100 ns()程度)で静止 K に時間同期した X 線事象を選択する。
- 標的周辺を円筒型飛跡検出器(CDC)で囲むことにより、X 線放出後の K 吸収反応で生成される荷電粒子を検出し、K-ビーム飛跡と組み合わせることで標的由来の事象のみを選択する。

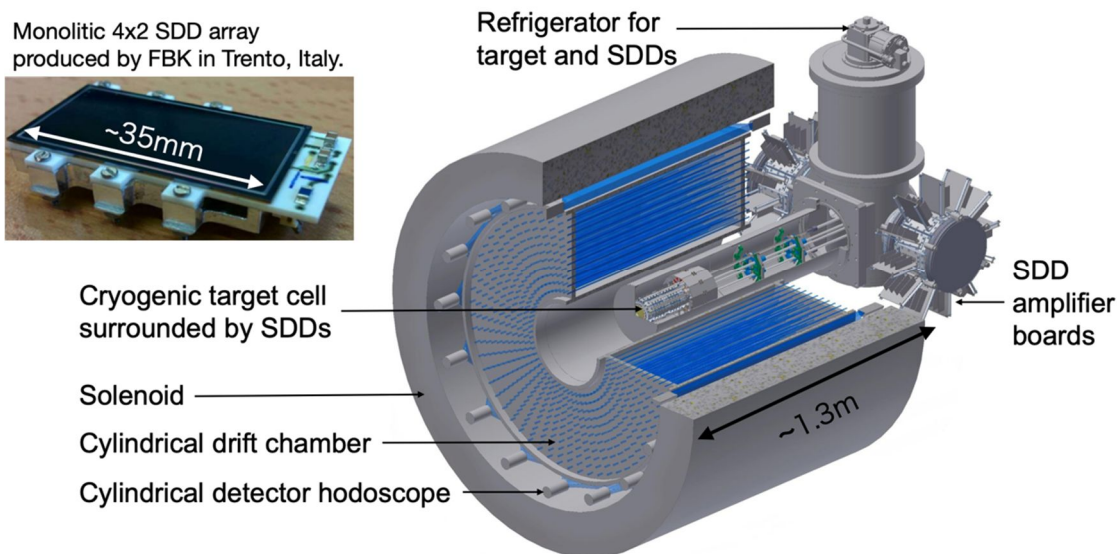


図 1 J-PARC E57 実験のセットアップ及び、X 線検出器の 1 ユニットの写真。

- データ取得効率を向上するために既存の TKO(Tristan KEK Online)モジュールを中心としたシステムをアップグレードする。

図 1 に当初想定の実験セットアップ図を示す。低温高圧ガス標的は 4K GM 型冷凍機を用いて 30K 程度まで冷却する。標的容器周囲には熱伝導を調整してシリコンドリフト X 線検出器 (Silicon Drift Detector; SDD) を 100K 程度で設置する。図 1 中の写真は我々が使用する SDD の 1 ユニットの共同研究先のオーストリア及びイタリアの研究所が中心となって開発したものである。1 ユニットには 1 チャンネルあたり 64mm² の SDD が 8 チャンネル搭載されており、計 48 ユニット用いる。プリアンプはすぐ裏面の基盤に設置されており、フィードスルーを通して真空容器外にオーストリアの研究所が製作した整形アンプ及びトリガー生成回路がある。アナログ信号は波高型 ADC (CAEN V785) でデジタル変換し記録される。K 中間子ビームラインについては 2016 年に静止調整済みであり、円筒型検出器は K 中間子原子核探索実験用に開発したソレノイド電磁石、飛跡検出器、トリガーカウンターから構成されるものを使用する。

本研究では特に以下の項目について研究を進めた。

- (1) シリコンドリフト X 線検出器 (SDD) の動作検証。
- (2) 低温高圧標的システムの開発と SDD の組み込みなどのセットアップの構築。
- (3) 実験装置全体のビーム試験による実験手法検証。
- (4) K 中間子重水素実験に向けた実験最適化。

4. 研究成果

- (1) シリコンドリフト X 線検出器 (SDD) の動作検証。

まず液体窒素冷却による小型のテスト真空容器を整備し、標準線源を用いて SDD の動作条件の最適化を行い、6 keV に対して 200 eV FWHM 以下の分解能を安定して達成した。続いて先行して 2018 年に行われた K 中間子ヘリウム原子実験 (J-PARC E62) でビーム試験を行った。この実験は比較的 X 線収量が多い遷移に対し 1 eV 程度の小さなシフト、幅を区別するためにエネルギー分解能が非常によい超伝導 X 線検出器がメインの実験であった。ただ有効面積は計 20 mm² と小さいため、SDD を 4 ユニット (有効面積約 2000 mm²) 同時に使用することで実験中の K 中間子原子生成をモニターした。SDD は分解能の劣化もなくビーム中で動作し、K 中間子ヘリウム原子 X 線の観測に成功した。超伝導 X 線検出器による測定結果については論文出版済みで [PRL128, 112503(2022)]、SDD による測定からは X 線収量に関する論文を準備中である。

- (2) 低温高圧標的システムの開発と SDD の組み込みなどのセットアップの構築。

標的容器は円筒型検出器の中心に設置するためコールドヘッドからは 4 本の 10mm 純アルミロッドによる伝導で冷却を実現した。標的容器の円筒部は X 線窓を兼ねたカプトンフィルムで耐圧 3.5 気圧以上となるように製作し、冷却、耐圧試験を行った。SDD の組み込みは温度調整やユニット間の信号クロストークを試行錯誤の上に解決し、30 ユニットの組み込んで安定動作させることに成功した。ビームライン及び円筒型検出器は既存ではあるが、データ取得システムを更新した。汎用 FPGA モジュール (HUL) でタイミングを取得し、VME モジュールによって電荷・波高情報を取得することで不感時間を 1/10 以下になり、数 kHz の静止 K トリガーを 90% 以上の効

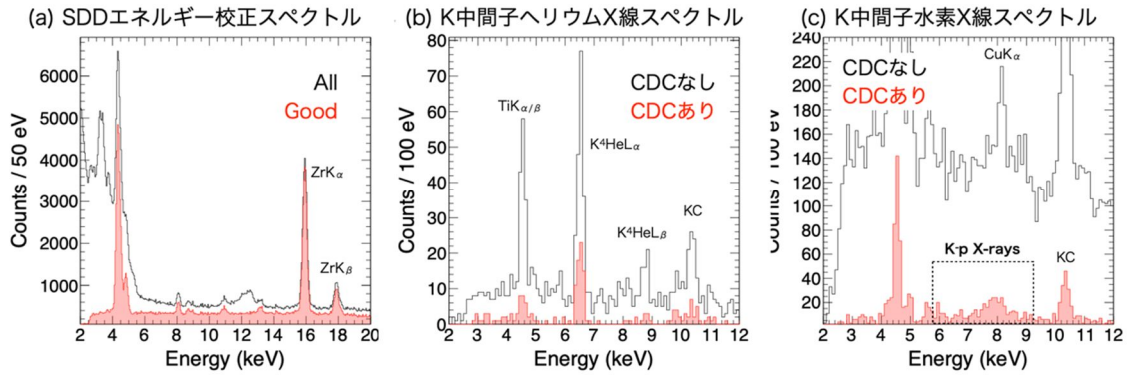


図 2 テスト実験で得られた(a) シリコン X 線検出器(SDD)エネルギー校正スペクトル。(b) K 中間子 X 線スペクトル。(c) K 中間子水素 X 線スペクトル。
率でデータ取得できるようにした。

(3) 実験装置全体のビーム試験による実験手法検証。

2019年にビームタイムを得て図1に示す実験装置全体のテスト実験を行った。(1)のビーム試験ではSDDはビームを上から覗くように設置したが、このテスト実験ではビームの広がりが多い水平方向にもSDD検出器を設置する必要がある。そのため図2(a)のSDDデータが示すようにビーム直撃によるノイズが増えた(All)。しかし同一ユニット中の1チャンネルのみにヒットを要求する(Good)などでほぼX線信号(ここではエネルギー校正用のTiとZr特性X線ピークが見えている)を失うことなく平坦なバックグラウンドに抑えることに成功した。次に比較的X線収量の多いK中間子ヘリウム原子の測定を行った。図2(b)はK中間子ビームとのタイミング同期を取ったものである。6.5 keVあたりがK He原子3d 2p遷移に相当し、薄いガス標的にK中間子を止めてK中間子原子の生成に成功したことがわかる。さらに円筒型飛跡検出器(CDC)を用いてHeガス位置に由来する事象を選択することでS/Nを3倍向上させることに成功した。

続いて標的を水素ガスに変えて約4日間の測定を行った。その結果得たスペクトルが図2(c)である。K p原子X線は6から9 keVにわたって広い構造をつくる。8 keVあたりに3p 1s, 4p 1sなどの遷移が重なった幅広いピークがはっきりと見えておりK p原子X線の観測に成功した。バックグラウンドレベルもほぼ想定通りであることがわかり、我々の実験アプローチの有効性が確認された。

(4) K 中間子重水素実験に向けた実験最適化

テスト実験の結果いくつかの改善点も判明した。まず想定よりもK p原子2p 1s遷移X線の強度が弱いことがわかったため標的密度をやや下げて先行実験で実績のある設定することとした。さらにK中間子原子生成数も当初予定より少ないことが判明した。その間に我々と同程度の質のデータが期待されるK d原子X線実験がイタリアDAFNEで始まった。そこで我々はイタリア実験を凌駕するために、1sへの遷移に加えて2p軌道への遷移X線も同時に測定することでK中間子が2p軌道まで到達したことを保証し、バックグラウンドを大幅に低減する方針をとることとした。2pへのX線は1.5から2 keV程度で減衰が大きいため、SDDは標的ガス中に設置することにした。これは図2(c)で除去しきれなかった標的容器由来のバックグラウンド(K C など)の除去にも貢献する。我々は既にガス中での動作に成功、低エネルギーX線の検出が可能であることもJ-PARC MLFでのミュオン原子実験で確認済みであり図3に示すようなセットアップの構築の最終段階にある。さらにK中間子ビームラインを短縮することでビーム強度を約2倍にする計画を進行させている。これらの改善により約1ヶ月のビームタイムでK中間子重水素の初測定が当初予定よりもさらに高感度で実現できる見込みとなった。

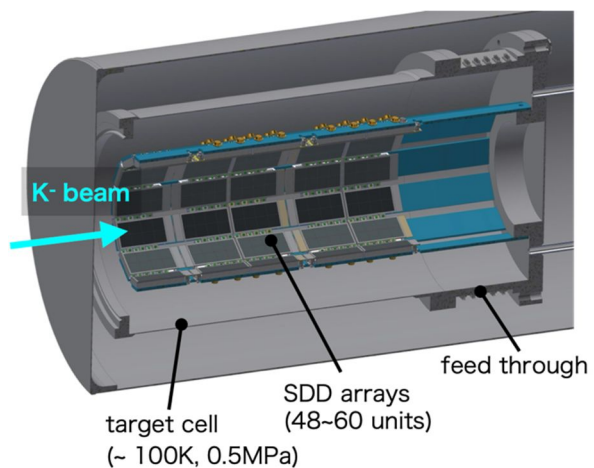


図 3 改良した実験セットアップ(標的周辺)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 8件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 T. Hashimoto et al.	4. 巻 26
2. 論文標題 Kaonic Atom Experiments at J-PARC	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 23013
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSCP.26.023013	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 M. Iwasaki, T. Yamaga, F. Sakuama, T. Hashimoto, et al. (J-PARC E15 collaboration)	4. 巻 789
2. 論文標題 "K-pp", a Kbar-Meson Nuclear Bound State, Observed in 3He(K-, p)n Reactions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Lett. B	6. 最初と最後の頁 620-625
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.physletb.2018.12.058	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 C. Trippel, J. Zmeskal, S. Aikawa, T. Hashimoto, S. Ishimoto, M. Iwasaki, Y. MaH. Outa, F. Sakuma, M. Sato, et al.	4. 巻 1138
2. 論文標題 A New Silicon Drift Detector System for Kaonic Atom Measurements	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012013-012013
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/1138/1/012013	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 T. Hashimoto, F. Sakuma, et al., (J-PARC E62 Collaboration)	4. 巻 128
2. 論文標題 Measurements of Strong-Interaction Effects in Kaonic-Helium Isotopes at Sub-eV Precision with X-Ray Microcalorimeters	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 112503
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.128.112503	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 T. Yamaga, T. Hashimoto, F. Sakuma, et al. (J-PARC E15 Collaboration)	4. 巻 102
2. 論文標題 Observation of a KbarNN bound state in the $^3\text{He}(K, p)n$ reaction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 44002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.102.044002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 T. Hashimoto et al.
2. 発表標題 Kaonic atom experiments at J-PARC
3. 学会等名 Hadron in Nucleus 2020 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Hashimoto et al.
2. 発表標題 Status and plan of E57
3. 学会等名 Kaon Physics at DA NE, J-PARC, and SPring-8 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Hashimoto et al.
2. 発表標題 Kaonic atom experiments at J-PARC
3. 学会等名 STRANEX: Recent progress and perspectives in STRANgE EXotic atoms studies and related topics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Hashimoto for J-PARC E62/E57 collaborations
2. 発表標題 Kaonic atom experiments at J-PARC
3. 学会等名 8th International Conference on Quarks and Nuclear Physics (QNP 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 橋本直
2. 発表標題 J-PARCにおけるK中間子原子X線分光
3. 学会等名 ELPH研究会C023「原子核中におけるハトロン ⁺ の性質とカイラル対称性の役割」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Hashimoto
2. 発表標題 Kaonic atom experiments at J-PARC
3. 学会等名 Second International Workshop on the Extension Project for the J-PARC Hadron Experimental Facility (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Hashimoto
2. 発表標題 Kaonic atom X-rays at J-PARC
3. 学会等名 INTERNATIONAL CONFERENCE ON EXOTIC ATOMS AND RELATED TOPICS (EXA 2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 橋本直
2. 発表標題 J-PARCにおけるK中間子原子X線分光の進展
3. 学会等名 ELPH 研究会 C031「多彩なビーム実験と多様な理論的手法で迫るハドロン間相互作用」(招待講演)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	佐久間 史典 (Sakuma Fuminori) (10455347)	国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・専任研究員 (82401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関