

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 7 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2009～2012

課題番号：21684011

研究課題名（和文） Ξ 原子の X 線測定による Ξ 粒子と原子核の相互作用の研究研究課題名（英文） Study of interaction between nucleus and Ξ particle via measurement of Ξ atomic X rays.

研究代表者：

谷田 聖 (TANIDA KIYOSHI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・客員研究員

研究者番号：00360587

研究成果の概要（和文）： Ξ 原子 X 線測定実験（J-PARC E03 実験）のための準備を行った。不幸にして、J-PARC が東日本大震災の影響によりほぼ 1 年の間停止を余儀なくされたため、ビーム照射を行うことはできなかったが、実験の準備を整えることはできた。本実験も J-PARC 本体と同様、震災の影響を受けたが、その復旧も完了し、いつでも現場作業にかかれる体制を再び整えることができた。

研究成果の概要（英文）：Preparation of an experiment to measure Ξ atomic X ray (J-PARC E03) was performed. Unfortunately, due to the damage from the Earthquake in northeastern Japan, we were not able to have actual beam time. Still, we overcame the damages of the Earthquake and are now ready to start area work at the K1.8 beam line of J-PARC.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	12,400,000	3,720,000	16,120,000
2010 年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
2011 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2012 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
総計	19,100,000	5,730,000	24,830,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：エキゾチック原子、ストレンジネス核物理、X 線分光

1. 研究開始当初の背景

ストレンジネス $S = -2$ を持つ原子核の物理は非常に魅力的であり、茨城県東海村にある大強度陽子加速器(J-PARC)における原子核実験の中心課題として挙げられている。現状においては、実験データはほとんどなく、未開の荒野が広がっているが、申請者は Ξ 粒子を含む系に目をつけた。この系からは ΞN 間の(有効)相互作用に関する貴重な情報が得られる。特に $\Xi N \rightarrow \Lambda\Lambda$ の強さは $S = -2$ のハイパー核において、 $\Lambda\Lambda$ と ΞN のカップリ

ングがどれだけ強いか直接反映されるものであり、測定が待ち望まれている。また、 Ξ 粒子のポテンシャルの深さは Ξ 粒子が中性子星においてどれだけ重要な役割を果たすかとも関連している。 Ξ 粒子は負電荷を持つため、より軽い Λ 粒子よりも沢山存在する可能性があり、その観点からも、質量依存性まで含めて原子核中における Ξ 粒子のポテンシャルの深さの測定が重要となっている。

2. 研究の目的

(1) 研究の最終目標は、 Ξ 原子からの X 線を系統的に測定することで、原子核中の Ξ^- 粒子のポテンシャルを明らかにすることである。本研究では、 Ξ 原子 X 線測定の最初として、実験のしやすさを第一に考え、 Ξ -鉄を選んだ。ここでは、世界で初めての Ξ 原子 X 線測定を成功させることで、実験手法を確立させることが最大の目標である。

(2) 測定精度の目標は、X 線のエネルギーシフトについては 0.05 keV、幅については 1 keV である。これらの精度は practical に観測可能な最大のシフト・幅(数 keV 程度)と比べると十分に良い。これによって、 Ξ 粒子の光学ポテンシャルの深さに関して精度の良い情報が初めて得られることになり、その意義は大きい。

(3) 最初の実験では鉄をターゲットに選択したが、鉄が適切なターゲットである保証はなく、エネルギーシフトが小さすぎて有意な結果が得られないといったことは起こりうる。(ただし、理論計算によれば、鉄が適切なターゲットである可能性は高い。) その場合には、得られる情報は限定的なものになってしまうが、 Ξ 粒子-原子核間の相互作用に関する実験的情報の少なさを考えると、それでも十分に意味のある結果であると考えている。さらに、この場合には、次の実験でターゲットを変えることで対応が可能である。例えば、シフトが小さすぎる場合は銅などのより重いターゲットを用いればよい。このあたりを見極めるのに必要なデータを得ることも最初の実験の目的の1つである。

3. 研究の方法

(1) 測定の原理は、 Ξ^- が原子軌道にあるとき、強い相互作用を無視すれば、その波動関数やエネルギーが精密に計算可能であることに拠っている。つまり、X 線のエネルギーを測定し、それを強い相互作用を無視した計算と比較すれば、強い相互作用による効果を知ることができる。強い相互作用の効果は、通常光学ポテンシャルを用いて表すが、ポテンシャルの実部 (X 線エネルギーのずれから得られる) は ΞN 相互作用の強さに、虚部 (X 線のエネルギー幅から得られる) は、 $\Xi N \rightarrow \Lambda \Lambda$ という変換の強さにそれぞれ対応している。また、X 線の強度を測ることで、X 線放出の親準位における吸収の強さも知ることができ、これからもポテンシャルの虚部の深さがわかる。さらに、多数の Ξ 原子の測定データを合わせることで、ポテンシャルの深さだけでなく、その形に関する情報を得ることができる。

(2) 実験は J-PARC の K1.8 ビームラインにて遂行する。(K⁻, K⁺) 反応によって Ξ^- を生成し、それを静止させることで Ξ 原子を作り出して、放出される X 線をゲルマニウム検出器によって測定する。(K⁻, K⁺) 反応の測定手法自体は既に確立しており、実験装置についても、K⁻ 側は K1.8 ビームラインの実験で共用のものを、K⁺ 側は既存の KURAMA スペクトロメータを使うことで効率よく実験を遂行することができる。 Ξ 原子から放出される X 線を測定するためには、Hyperball-J と呼ばれる検出器システムを用いる。これはハイパー核の γ 線分光実験 (J-PARC E13 実験) のために建設されたもので、合計 32 台のゲルマニウム検出器および、各ゲルマニウム検出器をとりかこむコンプトンサプレッサーからなっている。

4. 研究成果

(1) J-PARC および K1.8 ビームラインのコミッションングについてはおおむね順調に進んだ。J-PARC のビーム強度は当初は設計値 (平均ビーム出力 270 kW) の 1% 程度と非常に弱かったものの、順調に強度を上げることに成功し、2013 年 3 月のビームタイムでは、平均出力 20 kW で安定的に運転し、30 kW までのテストが完了している。また、当初の懸案であったビーム構造の問題についても、2013 年のビームタイムでは大幅に改善された。

(2) 一方で K1.8 ビームラインではビーム取り出しの調整、共通検出器の動作確認などを行い、所定の性能が得られていることを確認した。特に、ビームラインスペクトロメータで良い運動量分解能 ($\delta p/p \sim 0.1\%$ 以下) が得られていること、K 中間子分離のための TOF 検出器 (要求時間分解能 150 ps FWHM に対して 130 ps 程度)・エアロジェルチェレンコフ検出器 (π 中間子を 96% 以上の割合で棄却) で所定の性能が得られていることが確認できた。

(3) 本実験で専用を用いる検出器としては、以下のものを開発・製作した。

① ターゲット下流で使うドリフトチェンバーは KURAMA でこれまで使っていた 10 mm ピッチのものに替えて 6 mm ピッチのものを製作し、より高いビームレートまで動作できるようにした。このドリフトチェンバーは現在 E31 実験に貸し出して使用中であり、所定の性能が得られていること、安定に動作することが確認されている。

② より高いビーム強度に耐える検出器として、この実験のために開発したシリコンストリップ検出器の実機を製作した。また、このシリコンストリップ検出器の読み出しの高速化を行い、ゼロサプレッションがフロントエンドレベルで正常に実行されていることを確認した。これにより、5 kHz での読み出しが可能になり、本実験で使えるようになった。この検出器は E10 実験に貸し出して実際に使用し、所定の性能が得られていることが確認できた。ただし、数時間に一度初期化をやりなおす必要があることなど、安定性に関して多少の問題があることが見つかり、今後これを改善していく予定である。

③ 既存の他の検出器についても動作確認、補修などを行った。光電子増倍管などには故障していたものがあったので、一部を交換した。

④ X 線検出用のゲルマニウム検出器については、E13 実験において実際に J-PARC での動作試験を行い、問題がないことを確認できた。

(4) 実験準備は順調に進んでいたが、2011 年 3 月 11 日の東日本大震災により、本研究は大幅に影響を受けた。幸い、実験装置に対する被害はさほど大きなものではなく、機器の再設置・再調整で済むものがほとんどであり、時間がかかったものの、なんとか復旧にこぎつけることができた。加速器側も状況は同様であり、2012 年 1 月には実験を行う K1.8 ビームラインに再度ビームが無事取り出された。その後 2 月に行われたビームタイムでは、まず機器類が正常に動作しているかどうかの確認を行い、その後設定の調整などを行った。その結果、ほとんどの実験機器は震災前とほぼ同等の性能を取り戻すことができた。しかしながら、この影響で、J-PARC の運転計画には 1 年以上の遅れが出ており、本研究が実際のビームタイムを持つことはできなかった。

(5) 東日本大震災の影響もあって J-PARC のビーム強度が上がらないことの対策として、一部の検出器を改造してアクセプタンスを広げることと決め、その設計を行った。これにより、アクセプタンスはおよそ 1.5 倍になることが見込まれる。問題はトリガーレートであるが、ビーム強度が弱いうちは運動量トリガーの改良で対応できることがわかった。これらの改良は半年から 1 年程度の時間を必要とし、現在その作業を行っている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① M. J. Kim, Hong Joo Kim, H. Park, K. Tanida, Sunghwan Kim, J. K. Cheon, and K. B. Lee, Scintillation Properties of CsI:Na, ¹³³Ba Crystal, IEEE trans. Nucl. Sci. 60, 1049-1052 (2013). 査読有
DOI:10.1109/TNS.2013.2251898
- ② Toshiyuki Takahashi, Satoshi Adachi, ..., Kiyoshi Tanida et al., (合計 75 名、研究代表者は 65 番目), Beam and SKS spectrometers at the K1.8 beam line, Prog. Theor. Exp. Phys. 2012-1 (2012) 02B010. 査読有
DOI: 10.1093/ptep/pts023
- ③ K. Tanida, Experimental Program at J-PARC, Nucl. Phys. A835, 75-80 (2010) 査読無
DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2010.01.177
- ④ K. Tanida for the XiX collaboration, Towards more exoticness — X-ray spectroscopy of Ξ^- atoms at J-PARC, Hyperfine Interact. 193, 81-87 (2009). 査読有
DOI 10.1007/s10751-009-0061-2

[学会発表] (計 18 件)

- ① (招待講演) K. Tanida, “Hadron physics experiments at J-PARC”, Hadron production and J-PARC physics (韓国浦項工科大学、2013 年 4 月 12 日)
- ② (招待講演) K. Tanida, “Strangeness Nuclear Physics in J-PARC: initial results and recovery from the Earthquake”, VIII Tours Symposium on Nuclear Physics and Astrophysics (ドイツ Lenzkirch-Saig, 2012 年 9 月 6 日).
- ③ (招待講演) K. Tanida, “Korean activities in nuclear and hadron physics at J-PARC”, The 3rd Scienceweb GCOE International Symposium on Weaving Science Web beyond Particle-Matter Hierarchy (東北大学、2011 年 2 月 17 日)
- ④ (招待講演) Kiyoshi Tanida, “Experimental Program at J-PARC”, 10th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (東海村、2009 年 9 月 14 日)

〔その他〕

ホームページ等

実験提案書：

http://j-parc.jp/NuclPart/pac_0606/pdf/p03-Tanida.pdf

6. 研究組織

(1) 研究代表者

谷田 聖 (TANIDA KIYOSHI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・

先端基礎研究センター・客員研究員

研究者番号：00360587

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

木内 隆太 (KIUCHI RYUTA)

ソウル国立大学・物理・天文学科・研究員