

平成 23 年 5 月 24 日現在

研究種目： 特定領域研究
 研究期間： 2005 ～ 2009
 課題番号： 17070001
 研究課題名（和文）
 ストレンジバリオン多体系のガンマ線分光
 研究課題名（英文）
 Gamma-Ray Spectroscopy of Strange Baryon Systems
 研究代表者
 田村 裕和（TAMURA HIROKAZU）
 東北大学・大学院理学研究科・教授
 研究者番号： 10192642

研究成果の概要（和文）：

$^{12}_{\Lambda}\text{C}$, $^{11}_{\Lambda}\text{B}$ ハイパー核の精密 γ 線分光実験を KEK で行い、基底状態二重項などの構造を解明して ΛN 間のスピン依存相互作用の強さを確定させた。ハイパー核 γ 線分光を J-PARC でさらに発展させるため、高計数率用の Ge 検出器群 Hyperball-J を建設した。その際、放射線損傷に強い冷凍機式低温 Ge 検出器と高速のバックグラウンド抑止用 PWO カウンターを開発した。J-PARC K1.8 ラインの SKS スペクトロメータの検出器も製作し、ビームでスペクトロメータの性能を確認した。

研究成果の概要（英文）：

We carried out an experiment of precision γ -ray spectroscopy of $^{12}_{\Lambda}\text{C}$ and $^{11}_{\Lambda}\text{B}$ hypernuclei at KEK and successfully revealed their structures, particularly their ground state doublets, which enables us to establish the ΛN spin-dependent interaction strengths. In order to extend our study on hypernuclear γ -ray spectroscopy at J-PARC, we developed and constructed a new Ge detector array (Hyperball-J) which is tolerant of higher counting rates. Here, we successfully developed a low-temperature Ge detector cooled with a mechanical refrigerator and fast background suppression counters using PWO scintillator. We also fabricated detectors for the SKS spectrometer system at the J-PARC K1.8 beam line and confirmed the performance of the spectrometer with pion beams.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005 年度	13,900,000	0	13,900,000
2006 年度	96,400,000	0	96,400,000
2007 年度	117,700,000	0	117,700,000
2008 年度	94,400,000	0	94,400,000
2009 年度	15,600,000	0	15,600,000
総計	338,000,000	0	338,000,000

研究分野：物理学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：ハイパー核、ガンマ線分光、ストレンジネス、ゲルマニウム検出器、PWO 検出器、 ΛN 相互作用

1. 研究開始当初の背景

我々は、1998 年に特殊な Ge 検出器群 Hyperball (その後 Hyperball2 へとアップグレードした) を開発し、これを用いてハイパー核の精密ガンマ線分光実験に初めて成功

した。その後、KEK および BNL (米国) でのいくつかの実験によって、 $^7_{\Lambda}\text{Li}$ から $^{16}_{\Lambda}\text{O}$ までの p 殻ハイパー核の多くについてその構造を明らかにした。その結果から、 Λ -核子間のスピン依存相互作用について、スピン-スピ

ン力、2種類のスピン軌道力、テンソル力のそれぞれの強さが求められ、これらを用いて多くのハイパー核のレベルがほぼ再現された。ただ、 $^{10}_{\Lambda}\text{B}$ および $^{11}_{\Lambda}\text{B}$ の実験データは、これら4つの相互作用の強さパラメータでは説明できず、さらなるデータの蓄積によって、 ΛN - ΣN 結合の効果の解明などさらなる ΛN 相互作用の研究が必要であるとされた。

また、我々は遷移確率 $B(E2)$ の測定によってハイパー核の収縮現象を初めて実証した。同様にスピン反転の $B(M1)$ 値の測定によって Λ の核内磁気モーメント(g 因子)を求めるべく、いくつかの実験がKEKで行われたが、いずれも精度が悪く、意味のある値はいまだに得られていない。

一方、大強度陽子加速器施設 J-PARC が完成し、2009年以降、大強度ビームが使えるようになることが期待された。そこで我々は系統的に様々なハイパー核のガンマ線分光実験を行うことを計画し、実験提案 E13 を行うとともに、さらに大型の Ge 検出器群 Hyperball-J の建設を計画した。

2. 研究の目的

ハイパー核の精密 γ 線分光法により、 Λ ハイパー核の精密構造のデータを系統的に測定し、そこから以下の3つを明らかにする。

(A) バリオン間相互作用 Λ 核子間のスピン依存力(spin-spin, LS, tensor 力)を実験的に完全に解明し、 ΛN - ΣN 結合力、 ΛN 間力の荷電対称性の破れも明らかにする。

(B) バリオン自身の性質変化 Doppler shift 減衰法によりハイパー核の Λ スピン反転 M1 遷移確率 $B(M1)$ をいくつかのハイパー核について測定して Λ の g 因子を求め、核内でのバリオンの性質変化を明らかにする。

(C) バリオン多体系の性質変化 Λ が原子核に入ることによって、核の収縮などの構造変化がおこるが、これを様々なハイパー核のレベル構造や $B(E2)$ から調べる。

3. 研究の方法

まず KEK-PS において現有の Ge 検出器群(Hyperball2)を用いた $^{12}_{\Lambda}\text{C}$, $^{11}_{\Lambda}\text{B}$ の実験(E566)を行い、 ΛN 相互作用のスピン依存性を確立するとともに、 $B(M1)$ 測定による核内 Λ の g 因子を調べる。

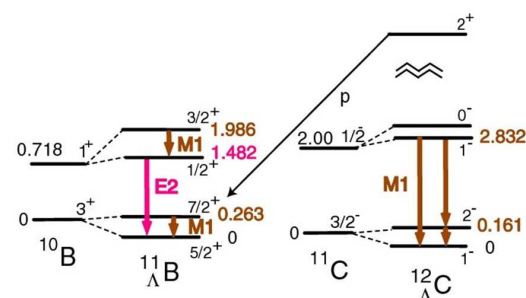
また、超高計数率用大規模 Ge 検出器群(Hyperball-J)を建設し、J-PARC において大強度K中間子ビームを用いて様々なハイパー核のガンマ線分光実験を系統的に行う。そのため、J-PARC の大強度ビームに対応できるような超高計数率用大規模 Ge 検出器群(Hyperball-J)を開発する。さらに磁気スペクトロメータ系(K1.8/SKS)の準備も行う。その後、

これらを用いてハイパー核分光実験、とくに J-PARC 最初のガンマ線分光実験である E13 実験を行う。

4. 研究成果

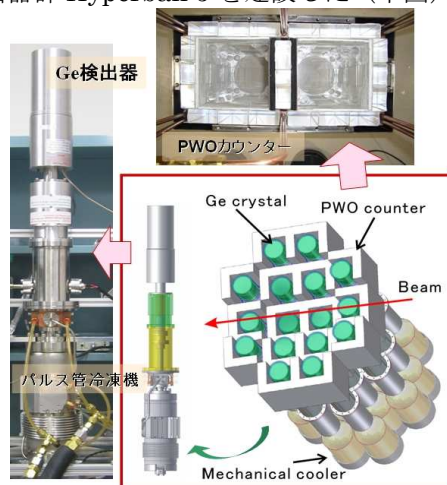
(1) KEK K6 ビームラインにおいて、超伝導磁気スペクトロメータ SKS と大型 Ge 検出器群 Hyperball2 を用いて、 $^{12}_{\Lambda}\text{C}$, $^{11}_{\Lambda}\text{B}$ ハイパー核の精密ガンマ線分光実験を行った。ハイパー核は ^{12}C を標的とした(π^+, K^+)反応によって生成した。実験の結果、 $^{11}_{\Lambda}\text{B}$ については3本、 $^{12}_{\Lambda}\text{C}$ についても3本のガンマ線が観測され、それにより下図のようなレベル図が得られた。とくに、両者の基底状態二重項の間隔やコア核第一励起状態に対応するハイパー核準位のエネルギーが明らかになった。その結果、他のハイパー核データともあわせて、 ΛN 間のスピン依存相互作用の大きさが確立した。特にスピン-スピン相互作用の強さについては、以前 $^7_{\Lambda}\text{Li}$ のデータから $\Delta = 0.43$ MeV と決められていたが、より重い核では $\Delta = 0.33$ MeV であることが確立した。

さらに、 $^{11}_{\Lambda}\text{B}$ の基底状態二重項間の M1 遷移について、 $B(M1)$ 値を求めるためのデータ解析を行った。予想に反してレベル間隔が小さかったため Doppler シフト減衰法の条件に

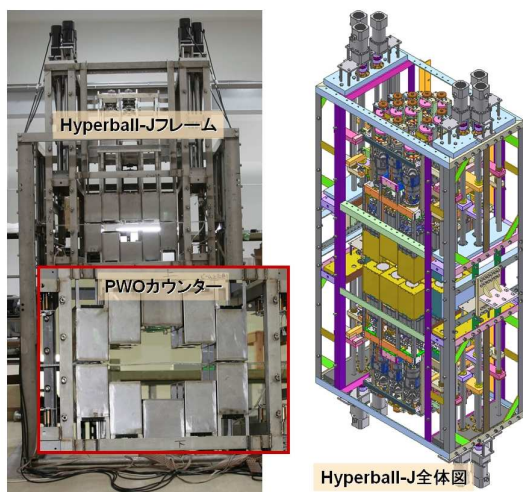


合わず、 $B(M1)$ 値の上限値のみが得られた。

(2) J-PARC でのハイパー核 γ 線分光実験のため、高計数率に対応できるゲルマニウム(Ge)検出器群 Hyperball-J を建設した(下図)。



まず、パルス管冷凍機を本目的のためにメーカーと開発した特殊な Ge 検出器に接続し、除振対策やノイズ対策を組み込んで、実用的な Ge 検出器を開発した。これによって従来より低温で検出器を使用できるため、放射線損傷に強くなった。また、バックグランド抑止カウンターとして高速の PWO シンチレータを用いたカウンターの開発に成功した。PWO シンチレータはきわめて光量が少ないため核ガンマ線のような低エネルギー実験では使われたためしがない。しかし我々は、特殊なドープを施した光量の多い PWO 結晶を 0°C 以下に冷却して用いることで、従来の BGO カウンターとほぼ同じバックグランド抑止能力を達成した。一方、Ge 検出器の出力信号の波形解析による読み出し法の開発も行った。すべての検出器を一体化して実験条件にあわせて可動できるようにした検出器架台を設計・製作した(下図)。また、Ge 検出器の冷凍機や温度、高圧電源などをコントロールするためのシステムも作成した。最後に検出器を架台に設置して、性能テストを行った。



(3) 実験に用いる J-PARC K1.8 ラインの磁気スペクトロメータ系の準備を行い、基本設計、大型 drift chamber の製作、粒子識別用の TOF カウンター、 π^0 カウンター、 μ 粒子フィルター、エアロゲルチェレンコフカウンターの設計や製作を行った。最後に検出器を K1.8 ラインに設置し、1.8 GeV/c の π ビームを用いて、K1.8/SKS スペクトロメータ系全体の性能(質量分解能、立体角、検出効率等)が十分良いことを確かめた。また、最初に行うハイパー核ガンマ線分光実験として採択されている E13 実験について、詳細な simulation による検討や準備を行った。

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 24 件)

(1) T. Koike, “Gamma-ray spectroscopy of Λ hypernuclei at J-PARC”, *Int. J. Mod. Phys. E19* (2010) 2505~2513, 査読有.

(2) H. Tamura, “ Λ hypernuclei via γ -ray spectroscopy”, *Prog. Theor. Phys. Suppl.* 185 (2010) 315~334, 査読有.

(3) Y. Ma, T. Koike, K. Miwa, H. Tamura et al., “Updated results on the $^{11}_{\Lambda}\text{B}$ and $^{12}_{\Lambda}\text{C}$ γ -ray spectroscopy study”, *Nucl. Phys. A* 835 (2010) 422~425, 査読有.

(4) H. Tamura, T. Koike, K. Miwa et al., “Gamma spectroscopy of hypernuclei: a decade of Hyperball project and future plans as J-PARC” *Nucl. Phys. A* 835 (2010) 3~10, 査読有.

(5) H. Tamura, “Gamma-Ray Spectroscopy of Λ Hypernuclei”, *Lecture Notes in Physics* 781, “Particle and Nuclear Physics at J-PARC”, Ed. T. Sato et al., Springer, p.105-138 (2009), 査読有.

(6) H. Tamura, “Present Status and Future Prospects of Hypernuclear Physics”, *Int. J. Mod. Phys. A* 24 (2009) 2101~2109, 査読無.

(7) H. Tamura, “Strangeness at J-PARC”, *Hyperfine Interactions*, 194 (2009) 115~121, 査読無.

(8) M. Ukai, H. Tamura, et al., “ γ -ray spectroscopy of $^{16}_{\Lambda}\text{O}$ and $^{15}_{\Lambda}\text{N}$ hypernuclei via the $^{16}\text{O}(K^-, \pi^-\gamma)$ reaction”, *Phys. Rev. C* 77 (2008) 054315-1~20, 査読有.

(9) H. Tamura, “Experimental studies of hypernuclear structure and the ΛN and ΛNN interactions”, *AIP Conference Proceedings* 1011, (2008) 119~128, 査読無.

(10) H. Tamura, T. Koike, K. Miwa et al., “Hypernuclear γ -ray spectroscopy: present status and perspectives”, *Nucl. Phys. A* 805 (2008) 384~391, 査読有.

(11) H. Tamura, T. Koike, K. Miwa, et al., “Gamma-ray spectroscopy of hypernuclei: recent results and future plans”, *Nucl. Phys. A* 804 (2008) 73~83, 査読有.

(12) H. Tamura, “Hypernuclear spectroscopy

with hadron beams: From KEK, BNL to J-PARC", AIP Conference Proceedings 870 (2008) 466~470, 査読無.

(13) H. Tamura,

"Hypernuclear γ -Ray Spectroscopy at KEK, BNL and J-PARC", Proc. Int.

Workshop on Strangeness Nuclear Physics (SNP2006), Ed. S.H. Zhou et al., China Institute of Atomic Energy, (2007) 82~92, 査読無..

(14) Y. Ma, T. Koike, H. Tamura, K. Miwa et al., " γ -ray spectroscopy study of $^{11}_{\Lambda}B$ and $^{12}_{\Lambda}C$ ", Eur. Phys. J. A 33 (2007) 243~246, 査読有.

(15) M. Ukai, H. Tamura et al. "Observation of the 7-MeV excited spin-flip and non-spin-flip partners in $^{16}_{\Lambda}O$ by γ spectroscopy", Eur. Phys. J. A 33 (2007) 247~250, 査読有.

(16) T. Koike, H. Tamura et al., "Next generation hypernuclear γ -ray spectrometer: Hyperball-J", Proc. 9th Int. Conf. on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2006), October 10-14, 2006, Mainz, Ed. by J. Pochodzalla and Th. Walcher, Springer, 2007, p.25~28, 査読有.

(17) H. Tamura, "Spins in Hypernuclear Physics", AIP conference proceedings 915 (2007) 70~75, 査読なし.

(18) O. Hashimoto, H. Tamura, "Spectroscopy of Λ hypernuclei", Progress of Particle and Nuclear Physics, 57 (2006) 564~653, 査読有.

(19) M. Ukai, H. Tamura et al., "Cascade γ Decay in the $^7_{\Lambda}Li$ Hypernucleus", Phys. Rev. C73 (2006) 012501-1~5, 査読有.

(20) K. Miwa, H. Tamura et al., "High-resolution γ -ray spectroscopy of hyper-fragments produced from stopped K", Nucl. Phys. A754 (2005) 80~85, 査読有.

(21) Y. Miura, Y. Fujii, H. Tamura et al., " γ Spectroscopy of $^{11}_{\Lambda}B$ ", Nucl. Phys. A754 (2005) 75~79, 査読有.

(22) M. Ukai, H. Tamura et al. "Observation of hypernuclear fine structure in $^{16}_{\Lambda}O$ ", Nucl. Phys. A754 (2005) 70~74 査読有.

(23) H. Tamura, Y. Fujii et al., " γ -ray spectroscopy in Λ Hypernuclei" Nucl. Phys. A754 (2005) 58~69 査読有.

(24) H. Tamura, "Baryon Baryon Interactions

with Strangeness Studied from Hypernuclei", Nucl. Phys. A752 (2005) 155~164 査読有.

[学会発表] (計 24 件)

(1) H. Tamura, "Spectroscopy of hypernuclei - experiment" 招待講演, 22nd Indian Summer School on Strangeness Nuclear Physics, 2010.9.7, Prague, Czech Republic.

(2) H. Tamura, "J-PARC and beyond" 招待講演, Joint SPHERE and JSPS Core-to-Core Seminar, 2010.9.6, Prague, Czech Republic.

(3) T. Koike, "Hypernuclear γ -ray spectroscopy at J-PARC", 2nd GCOE Symposium on "Weaving Science Web beyond Particle-Matter Hierarchy", 2010.2.19, Tohoku University, Sendai.

(4) H. Tamura, "Nuclear and Hadron physic program at J-PARC" 招待講演, Int. Conf. on Strong Interaction In The 21st Century, 2010.2.10, Tata Institute of Fundamental Research, Mumbai, India.

(5) H. Tamura, "Overview of hypernuclear spectroscopy by the hadronic beams and γ -ray spectroscopy", 2nd JSPS Core-to-core seminar on Strangeness Nuclear Physics by Electron Beams, 2009.12.15, Rome, Italy.

(6) H. Tamura, "Spectroscopy of $S=-1$ Hypernuclei at KEK, BNL and J-PARC" 招待講演, Third Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and JPS, 2009.10.14, Waikoloa, Hawaii, U.S.

(7) H. Tamura, "Hypernuclear Physics at J-PARC" 招待講演, Int. Conf. on Nuclear Fragmentation --from Basic Research to Applications--, 2009.9.30, Kemer, Turkey.

(8) H. Tamura, "Hypernuclear physics: Present status and perspectives" 招待講演, 5th Int. Conf. on Quarks and Nuclear Physics, 2009.9.22, Beijing, China.

(9) H. Tamura, "Gamma spectroscopy of hypernuclei: a decade of Hyperball project and future plans as J-PARC" 招待講演, 10th Int. Conf. on Hypernuclear and Strange Particle Physics (Hyp-X), 2009.9.14, Tokai, Japan.

(10) T. Koike, "Gamma-ray spectroscopy of Λ hypernuclei at J-PARC" 招待講演, Sendai Int. Symp. on Strangeness in Nuclear and Hadronic

Systems (SENDAI 08), 2008.12.16, Sendai.

(11) H. Tamura, “Strangeness Nuclear Physics” 招待講演, 18th Int. Conf. on Particles And Nuclei (PANIC08), 2008.11.13, Eilat, Israel.

(12) H. Tamura, “Present Status and Future Prospects of Hypernuclear Physics” 招待講演, KGU Yokohama Autumn School of Nuclear Physics, 2008.10.10, Kanto Gakuin University, Yokohama.

(13) H. Tamura, “Strangeness at J-PARC” 招待講演, Int. Conf. on Exotic Atoms and Related Topics (EXA2008) and Int. Conf. on Low Energy Antiprotons (LEAP2008), 2008.9.18, Vienna, Austria.

(14) H. Tamura, “World of matter with strange quarks”, COE Symposium on “Exploring New Science by Bridging particle-Matter Hierarchy”, 2007.12.21, Tohoku University, Sendai.

(15) H. Tamura, “Magnetic moment of a Λ in a nucleus”, International workshop on Chiral symmetry in hadrons and nuclei (CHIRAL07), 2007.11.13, Osaka University, Suita.

(16) H. Tamura, “Experimental studies of hypernuclear structure and the ΛN and ΛNN interactions” 招待講演, Int. Sym. on New Facet of Three Nucleon Force -50 years of Fujita-Miyazawa Three Nucleon Force- (FM50) 2007.10.30, University of Tokyo, Tokyo.

(17) H. Tamura, “Studies of Hypernuclei at J-PARC” 招待講演, 3rd Japanese-German EFES(JSPS) -DFG/GSI Work-shop on Nuclear Structure and Astrophysics, 2007.10.1, Frauenworth im Chiemsee, Germany.

(18) H. Tamura, “Gamma-Ray Spectroscopy of Λ Hypernuclei at KEK, BNL and J-PARC”, Hall C Meeting, 2007.8.10, Thomas Jefferson Lab., Newport News, Virginia, U.S.

(19) H. Tamura, “Hypernuclear γ -ray spectroscopy: present status and perspectives” 招待講演, International Nuclear Physics Conference (INPC2007) 2007.6.6, Tokyo.

(20) H. Tamura, “Gamma-ray spectroscopy of hypernuclei: recent results and future plans” 招待講演, 9th Int. Conf. on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2006), 2006.10.10, Mainz, Germany.

(21) H. Tamura, “Spins in Hypernuclear Physics” 招待講演, 17th Int. Spin Physics Symposium (SPIN2006), 2006.10.4, Kyoto.

(22) H. Tamura, “Hypernuclear γ -Ray Spectroscopy at KEK, BNL and J-PARC” 招待講演, Int. Workshop on Strangeness Nuclear Physics (SNP2006), 2006.9.5, Zhang Jia Jie, China.

(23) H. Tamura, “Hypernuclear spectroscopy with hadron beams: From KEK, BNL to J-PARC” 招待講演, 9th Conf. on the Intersections of Particle and Nuclear Physics (CIPANP 2006), 2006.5.30, Westin Rio Mar Beach, Puerto Rico.

(24) H. Tamura, “Spectroscopy of Λ Hypernuclei” 招待講演, Second Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and JPS, 2005.9.20, Kapalua, Hawaii, U.S.

[図書] (計 1 件)

Proceedings of the Sendai International Symposium “Strangeness in Nuclear and Hadronic Systems”, Edited by K. Maeda, S. N. Nakamura, H. Tamura, O. Hashimoto, World Scientific, Singapore, 2009 (445 pages).

[その他]

ホームページ等

<http://nexus.kek.jp/Tokutei/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田村 裕和 (TAMURA HIROKAZU)
東北大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：10192642

(2) 研究分担者

小池 武志 (KOIKE TAKESHI)
東北大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：70396422
(H18 年度まで)

藤井 優 (FUJII YU)

東北大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：30302079
(H20 年度からは連携研究者)

神田 浩樹 (KANDA HIROKI)

東北大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：40321971
(H20 年度からは連携研究者)

三輪 浩司 (MIW KOZI)
東北大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：50443982
(H20年度からは連携研究者)

(3)研究連携者 ()
研究者番号：