

1. 研究開始当初の背景

本領域研究は、中性子星の表面から中心に至る核物質全体を支配する状態方程式 (EOS) を決定し、中性子星内部構造に現れる核物質の正体を解き明かすことである。本計画研究で担当する密度領域での EOS や現象の理解には、通常原子核密度の 3 倍程度で出現するといわれる Ξ 粒子と核子との間の相互作用や高密度でますます重要となる $\Lambda\Lambda$ 間の相互作用など、ストレンジネス量子数 (S) $=-2$ のバリオン間相互作用を詳しく知る必要がある。このうち 3S_0 状態の $\Lambda\Lambda$ 間相互作用が、NAGARA event とよばれる ${}^6_{\Lambda\Lambda}\text{He}$ の発見とその質量により弱い引力である[①]ことがわかっていたのみであり、その他の相互作用についてよくわかっていない。

Ξ ハイパー核の欠損質量分光法による過去の実験研究では、測定分解能や統計が十分でなく Ξ ハイパー核状態は観測できず、そのスペクトル形状から引力的な Ξ の相互作用が示唆される[②]ものの確定的ではない。また、 $S=-2$ のバリオン間相互作用のフレーバー SU(3) の一重項 ($\Lambda\Lambda$, ΞN , $\Sigma\Sigma$ の量子力学的な混合状態) は斥力芯がなく大きな引力となると考えられ、古くは、R. Jefferies により、6 クォーク状態である H ダイバリオンが予言[③]され、また、最近の格子 QCD 計算[④]でも、その存在が強く示唆されている。しかし、長年の研究にもかかわらず、実験でその存在は確認されていない。

一方、日本では大強度陽子加速器施設 J-PARC が稼働し、大強度かつ高純度の 2 次 K 中間子ビームが得られるようになりつつある。これまでその生成率の低さから困難であったダブルストレンジネス系の高精度・高統計での実験研究が実現可能な状況になりつつあった。

2. 研究の目的

J-PARC ハドロン実験施設 K1.8 ビームラインにおいて、以下のダブルストレンジネス (原子核) 系研究の実験、(1) エマルジョンによるダブルストレンジネス系事象の測定 (E07 実験)、(2) 大立体角ハイペロンスペクトロメータによる H ダイバリオン探索・ $\Lambda\Lambda$ 関連の測定、(3) (K^- , K^+) 反応による Ξ ハイパー核分光実験 (E05 実験) を行い、これまで殆ど知られていない $\Lambda\Lambda$, ΞN , および $\Xi N \rightarrow \Lambda\Lambda$ のダブル・ストレンジネス ($S=-2$) のバリオン間相互作用の大きさを測定し、中性子星中心部の高密度核物質における状態方程式 (EOS) の決定に重要な情報を与える。それによって、高密度における EOS の信頼性を向上させ、高密度核物質に出現するといわれるストレンジ・ハドロンマターの性質を解明する。本研究により、これまでデータが乏しく、定性的な議論にとどまっていた $S=-2$ の系の研究を飛躍的にすすめ、 $S=-2$ におけるバリオン間相互作用と高密度核物質の性質に関して、実験データに基づく定量的な議論

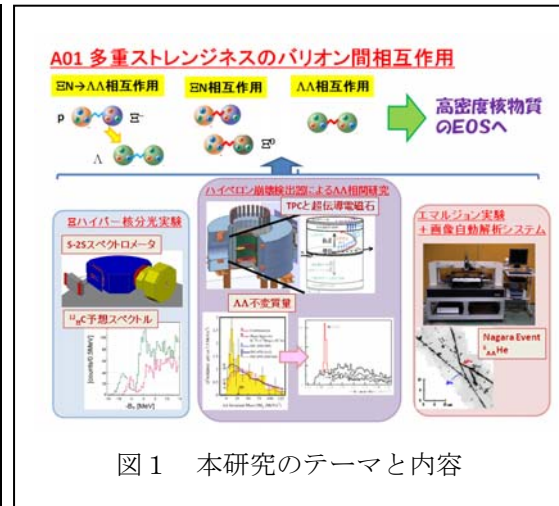


図1 本研究のテーマと内容

を可能にする。

3. 研究の方法

(1) エマルジョン実験

これまで我々が開拓し、多数のダブル Λ ハイパー核を発見してきたカウンターとエマルジョンのハイブリッド法を更に発展させ、これまでの 10 倍を超える 100 事象を取得し、ダブル Λ ハイパー核、まだ存在が確立していない Ξ ハイパー核や H ダイバリオンなどのダブル・ストレンジネス多体系の研究を進展させる。この実験では、(K^- , K^+) 反応で生成、ビーム及び KURAMA スペクトロメータ系で同定した Ξ 粒子をエマルジョン中に 10^4 個静止させる。これは、J-PARC の大強度かつ高純度の K^- ビーム、また、大強度ビーム下で Ξ 粒子の入射位置を精度良く測定する SSD 検出器とエマルジョンに記録された粒子飛跡を自動追尾する高速画像解析システムの導入により実現可能となる。

また、これまで開発を続けてきた高速画像解析システムをさらに発展させたカウンターのデータを一切用いない全面スキャン法を完成させ、過去にビーム照射したエマルジョンや新しい実験にも適用する。この方法では更に 10 倍の事象の発見が期待される。

(2) 大立体角ハイペロンスペクトロメータによる H ダイバリオン探索・ $\Lambda\Lambda$ 関連測定

エマルジョン実験に対して観測事象数を更に増やすため、高いビーム強度の下で効率的にダブル・ストレンジネス系からの崩壊を測定するため、タイムプロジェクションチェンバー (TPC) を用いたハイペロンスペクトロメータを新規に開発・建設し、ビーム及び KURAMA スペクトロメータでの (K^- , K^+) 反応との同時計測により、ダブル・ストレンジネス系からの崩壊事象を測定する。ハイペロンスペクトロメータは、外部トリガーが可能な TPC 内部に標的を設置し、TPC を 1T 程度の一様磁場を作るヘルムホルツ型超伝導電磁石内に設置することにより、大強度ビーム下で動作可能な大立体角かつ高分解能な検出器を目指す。束縛 H を $H \rightarrow \Lambda\pi$, $\Lambda \rightarrow p\pi$

モードで、共鳴 H を H \rightarrow $\Lambda\Lambda$ モードで探索するほか、 $\Lambda\Lambda$ 相関の測定から低エネルギーの $\Lambda\Lambda$ 相互作用の情報を得る。

(3) (K $^-$,K $^+$) 反応による Ξ ハイパー核分光別に建設を進めている高分解能 S-2S スペクトロメータを用いて 3MeV(FWHM)という高分解能かつ高統計で ^{12}C を標的として $^{12}_{\Xi}\text{Be}$ の束縛状態を観測する。そのエネルギーから Ξ の原子核ポテンシャルの深さ及び ΞN 相互作用の大きさを決定する。また、束縛状態の幅から $\Xi\text{N}\rightarrow\Lambda\Lambda$ 相互作用の大きさの導出も期待される。

4. 研究成果

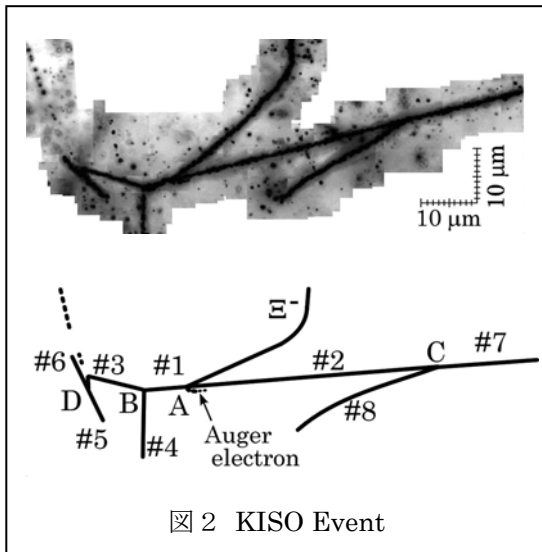


図2 KISO Event

(1) KISO Event — 世界初の Ξ ハイパー核存在の証拠 — の発見

エマルジョン実験 E07 に向け開発を行った全面スキャン法を昔の実験 (KEK-PS E373) でビーム照射を行ったエマルジョンに試験適用したところ、KISO Event と命名した、**世界初となる Ξ ハイパー核の証拠**となる事象を発見した。詳しい解析の結果、この事象は、一意的に次の反応であると同定できた (図2)。 $\Xi^- + ^{14}\text{N} \rightarrow ^{10}_{\Lambda}\text{Be} (\#1) + ^5_{\Lambda}\text{He} (\#2) (\text{A})$, $^{10}_{\Lambda}\text{Be} \rightarrow ^8\text{Li} (\#3) + \text{p} (\#4) + \text{n} (\text{B})$, $^5_{\Lambda}\text{He} \rightarrow \text{p} (\#7) + \text{d} (\#8) + 2\text{n} (\text{C})$, and $^8\text{Li} \rightarrow ^8\text{Be}^* (2^+) + \text{e}^- + \text{v}_{\text{e}}^{\text{bar}}$, $^8\text{Be}^* (2^+) \rightarrow 2\alpha (\#5, 6)$ 。ただし終状態の $^{10}_{\Lambda}\text{Be}$ については基底状態か励起状態かの不定性は残る。当時知られていた $^{10}_{\Lambda}\text{Be}$, $^5_{\Lambda}\text{He}$ の質量やそれらの飛程から始状態の Ξ^- の束縛エネルギーを求めると $^{10}_{\Lambda}\text{Be}$, $^5_{\Lambda}\text{He}$ ともに基底状態であるとする 4.38 ± 0.25 MeV、励起状態 (そのエネルギーは測定されておらず、理論予想を用いる) の可能性を考慮しても、 1.11 ± 0.25 MeV 以上であり、 Ξ^- の3D原子軌道のエネルギー0.17 MeV に対して有意に深く、 Ξ^- が強い相互作用で束縛した Ξ ハイパー核状態であることを結論づけた (成果: 雑誌論文⑥) また、この論文の後に報告された $^{10}_{\Lambda}\text{Be}$ のデータ [⑤]を用いても 1.03 ± 0.18

MeV以上と Ξ ハイパー核状態である結論は変わらない (成果: 学会発表②)

この発見の結果、 **Ξ ハイパー核の存在が確立し、その大きさの不定性は残るものの Ξ の原子核ポテンシャル及びその源となる ΞN 相互作用は引力であることが確定した**。このことは、高密度の中性子星核物質中で Ξ^- 粒子は出現することを示唆し、EOSの軟化をもたらすことになる。太陽質量の2倍の質量を持つ中性子星の存在と矛盾を意味するハイペロンパズルの謎は深まったともいえる。

この事象発見の論文は、2017年3月、第22回日本物理学会論文賞を受賞した[⑥]。

(2) $^{12}\text{C}(\text{K}^-, \text{K}^+)$ 反応スペクトルの測定

E05 実験のパイロットランとして、 $^{12}\text{C}(\text{K}^-, \text{K}^+)$ 反応スペクトルを既存の SKS スペクトロメータを用いて 6 MeV(FWHM)の分解能で測定した。その結果、 Ξ の束縛領域に Ξ の準自由生成反応からの分解能や Ξ 原子核ポテンシャルの虚部の影響によるテールの染み出しや一様に分布するバックグラウンドでは説明できない事象が存在した (図3)。分解能が以前の実験[②の後半の論文]の 14 MeV(FWHM)から各段に向上したにもかかわらず、束縛領域のスペクトルの形状は良く似ている。束縛状態のピーク構造は観測できなかったが、このデータからも Ξ ハイパー核の存在が強く示唆される (成果: 雑誌論文①)。

また、このパイロットランでは、 CH_2 標的を用いて、 Ξ^- 生成素過程反応 $\text{K}^- \text{p} \rightarrow \text{K}^+ \Xi^-$ 反応を K^- ビーム運動量 1.6–1.9 GeV/c の領域で測定して、その生成断面積やビーム強度から **1.8 GeV/c を用いるのが最適**であるということも確認された。

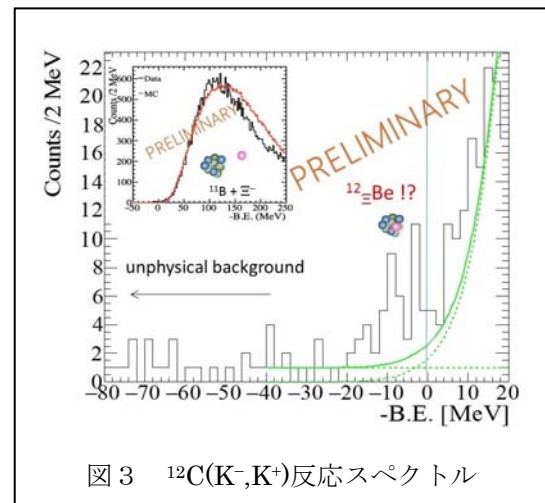


図3 $^{12}\text{C}(\text{K}^-, \text{K}^+)$ 反応スペクトル

(3) エマルジョン実験 E07 実験の開始

2016年5月に **E07 実験を開始**した。これまで設置されていた SKS スペクトロメータをホール南側に移設して K1.8 ビームラインに新たに設置された KURAMA スペクトロメータのコミッショニングの後に、用意したエマルジョン 118 モジュールのうちの 18 モジ

ジュールへのビーム照射を行った。KURAMA スペクトロメータは、E07 実験や H ダイバリオン探索実験の他、様々な実験で今後使用される予定であり、コミッションでその基本性能を確認し、将来に実験でも基本的に問題なく使用できることが確認できた。

ビーム照射後にスペクトロメータ系の解析およびエマルジョンの先行解析を行い、ハイブリッド法において、測定した Ξ 粒子の位置とその角度情報からエマルジョン中の Ξ 粒子を正しく追いかけることができ、 Ξ 粒子が崩壊した事象や静止した事象を確認できた。解析できたエマルジョンに入射する Ξ 粒子の数から見積もったところ、この実験で用意したエマルジョンモジュール全てにビーム照射を行えば、計画した 10^4 個の以上の Ξ 静止事象収集を達成できるとの確証が得られた。これらの結果により、2017 年 1 月の J-PARC PAC (課題採択委員会) では、2017 年のビーム運転では、E07 実験に優先的にビームを割り当てることが決められた。2017 年 4 月からのビーム利用で残りの 100 モジュールのエマルジョンへのビーム照射を行う。(2017/6/25 の状況 87 モジュールの照射完了。6 月中に照射を完了する見込みである。)

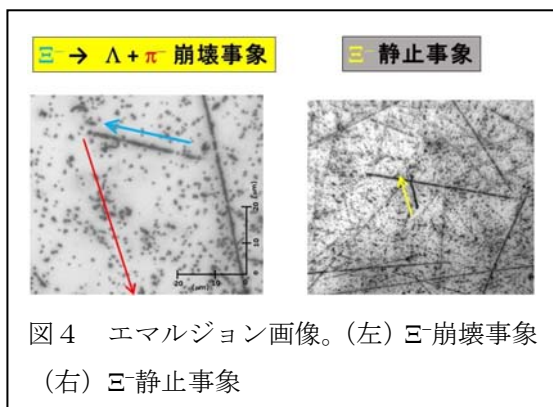


図4 エマルジョン画像。(左) Ξ 崩壊事象 (右) Ξ 静止事象

(4) H ダイバリオン探索実験と大立体角ハイペロンスペクトロメータの建設

2012年1月のPACに提案したHダイバリオン探索実験(E42 実験、実験責任者 J.K.Ahn 高麗大教授)は、2012年7月のPACにおいて、物理的意義を認めるという stage-1 採択を得た。

ハイペロンスペクトロメータの詳細な検討・設計および具体的な開発を進めた結果、次のような構成となった。

- ヘルムホルツ型超伝導電磁石
最大磁場 1.5T (E42 実験では 1.0T)
検出器設置領域 800mm ϕ \times 1250mm
一様磁場領域 500mm ϕ (\times 500mm)
GM 冷凍機による伝導冷却方式
- 八角柱型 TPC
有感領域 586mm ϕ \times 550mm
GEM3 層によるガス増幅
GET システムを用いた読出し回路
- MPPC 読出しプラスチックシンチレー

タホドスコープ (TOF)

2016 年度には、これらの製作が完了した。テストなどで見つかった今後対処すべき些細な問題はあつたものの大立体角ハイペロンスペクトロメータは完成した。

E42 実験は、2017年1月のPACにおいて、ビーム割り当ての対象となる stage-2 採択を答申された。

<引用文献>

- ① H.Takahashi et al. Phys. Rev. Lett. 87, 212502 (2001); J.K.Ahn et al. Phys. Rev. C88 014003 (2013)
- ② T.Fukuda et al. Phys. Rev. C58, 1306 (1998); P.Khaustov et al. Phys. Rev. C61, 054603 (2000)
- ③ R.L.Jaffe, Phys. Rev. Lett. 38, 195 (1997)
- ④ T.Inoue et al. (HAL collaboration) Phys. Rev. Lett. 106 162002 (2011); S.R.Beane et al. (NPLQCD collaboration) Phys. Rev. Lett. 106 162001 (2011) など
- ⑤ T.Gogami et al. Phys. Rev. C93 034314 (2016)
- ⑥ <http://www.jps.or.jp/activities/awards/ronbunsyo/ronbun22-2017.php>

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]

- ① T.Nagae, M.Naruki (6 番目), S.Hasegawa (7 番目), K.Imai (10 番目), H.Sako (11 番目), S.Sato (12 番目), T.Takahashi (30 番目), M.Ukai (31 番目), J.K.Ahn et al (43 名), Search for a Ξ bound state in the $^{12}\text{C}(K^-, K^+)X$ reaction at 1.8 GeV/c Proceedings of Science, in press 掲載決定、査読有
- ② J.Yoshida, S.Kinbara, A.Mishina, K.Nakazawa, M.K.Soe, A.M.M.Theint, K.T.Thint, "A new scanning system for alpha decay events as calibration sources for range energy relation in nuclear emulsion", Nucl. Instr. Meth. A847 86 (2017), 査読有、DOI:10.1016/j.nima.2016.11.044
- ③ M.K.Soe, R.Goto, A.Mishina, Y.Nakanishi, D.Kakashima, J.Yoshida, K.Nakazawa, "Automatic track following system to study double strangeness nuclei in nuclear emulsion exposed to the observable limit", Nucl. Instr. Meth. A848 66 (2017), 査読有、DOI:10.1016/j.nima.2016.12.046
- ④ 仲澤和馬、高塚龍之、「超巨大ハイパー核としての中性子星：混在ハイペロンの謎」パリティ Vol.32-04 12-18 (2016)、査読有
- ⑤ S.H.Kim, J.K.Ahn, K.Imai (8 番目), H.Sako (13 番目), T.Takahashi (14 番目),

K.Tanida (15 番目) et al. (15 名), “Cosmic-ray test of a time-of-flight detector for double- strangeness experiment at J-PARC”, Nucl. Instr. Meth. A795 39 (2015), 査読有、DOI:10.1016/j.nima.2015.05.046

⑥ K.Nakazawa (1 番目), K.Imai (5 番目), H.Takahashi (19 番目), T.Takahashi (20 番目) et al. (24 名), “The first evidence of a deeply bound state of $\Xi^{-14}\text{N}$ system”, Prog. Theor. Exp. Phys. 2015 033D02 (2015) 査読有、DOI:10.1093/ptep/ptv008

⑦ H.Sako (1 番目), J.K.Ahn, S.Hasegawa (5 番目), K.Imai (8 番目), S.Sato (11 番目) et al (12 名), “Development of a prototype GEM TPC with a gating grid for an H-dibaryon search experiment at J-PARC”, Nucl. Instr. Meth. A763 65 (2014) 査読有、DOI:10.1016/j.nima.2014.06.007

⑧ J.K.Ahn, K.Imai (15 番目), K.Nakazawa (36 番目), H.Takahashi (58 番目), T.Takahashi (59 番目), K.Tanida (62 番目), M.Ukai (69 番目) et al. (79 名) “Double- Λ hypernuclei observed in a hybrid emulsion experiment” Phys. Rev. C88 014003 (2013) 査読有、DOI:10.1103/PhysRevC.88.014003

⑨ K.Agari, T.Nagae, M.Naruki (24 番目), H.Takahashi (36 番目), T.Takahashi (37 番目), M.Ukai (43 番目) et al. (46 名), “Secondary charged beam lines at the J-PARC hadron experimental hall”, Prog. Theor. Exp. Phys. 2012 02B009 (2012) 査読有、DOI:10.1093/ptep/pts038

⑩ T.Takahashi (1 番目), T.Nagae, M.Naruki (43 番目), H.Takahashi (59 番目), M.Ukai (71 番目) et al. (75 名), “Beam and SKS spectrometers at the K1.8 beam line”, Prog. Theor. Exp. Phys. 2012 02B010 (2012) 査読有、DOI:10.1093/ptep/pts023

[学会発表]

- ① T.Takahashi et al. “Experimental Progress in Strangeness Nuclear Physics – Report from Group A01 & A02–”, International Symposium on Neutron Star Matter (NSMAT2016) 2016 Nov. 21–24, Sendai, Japan 東北大学 (宮城県・仙台市)
- ② K.Nakazawa, “Reaffirmation of a deeply bound $\Xi^{-14}\text{N}$ system, KISO event with a recent experimental result”, International Nuclear Physics Conference 2016 (INPC2016), 2016 Sep. 11–16, Adelaide Australia
- ③ K.Nakazawa “Experimental status of $S=-2$ hypernuclei”, 12th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2016), 2016 Sep. 7–12, Sendai, Japan 東北大学 (宮城県・仙台市)
- ④ K.Nakazawa “Experimental progress to

study double strangeness systems”, 2nd International Symposium on Science at J-PARC (J-PARC2014) 2014 July 12–15 Tsukuba Japan つくば国際会議場 (茨城県・つくば市)

- ⑤ Toshiyuki Takahashi “Strangeness Physics using $\sim 2\text{GeV}/c$ beam line at J-PARC” 日本物理学会年会 2014/3/27–30 東海大学 (神奈川県・平塚市)
- ⑥ Toshiyuki Takahashi “Overview of Hypernuclear Physics Program at K1.8 and K1.1 Beamlines at J-PARC”, XI International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2012), 2012 Oct. 1–5, Barcelona, Spain
- ⑦ Hitoshi Takahashi “ $S=-3$ Physics at J-PARC”, XI International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2012), 2012 Oct. 1–5, Barcelona, Spain