

エマルジョンハイブリッド法を用いたダブルストレンジネス原子核の研究

2019年1月の活動報告で紹介した、ダブルストレンジネス原子核の研究（J-PARC E07 実験）におけるエマルジョンの解析の一巡目が完了し、新しいダブルストレンジネス原子核事象を報告したので紹介します。

J-PARC E07 実験は、ストレンジクォーク 2 つを含むダブルストレンジネス原子核をエマルジョン検出器で精密観測し、 $\Lambda\Lambda$, ΞN 間などストレンジネス -2 ($S=-2$) のバリオン間相互作用を研究する実験です。1998 年から KEK-PS で実施した E373 実験の 10 倍のダブルストレンジネス原子核事象を得ることを目標としています。実験の詳細については 2019 年 1 月の[素核研究の活動報告で報告](#)しているため、本報告では解析の進行状況と、最近公開した新しいダブルストレンジネス原子核を中心に報告します。

E07 実験は、J-PARC のハドロン実験施設の K1.8 ビームラインで実験を行われました。 K^- 粒子とエマルジョン検出器の手前に設置したダイヤモンドターゲットによる準自由反応 $p(K^-, K^+) \Xi^-$ からの Ξ^- 粒子をエマルジョン中で静止させ、 $\Xi^- + p \rightarrow \Lambda + \Lambda + 28 \text{ MeV}$ 反応を通して 2 つの Λ 粒子を生成します。 Λ 粒子が 2 つ同じ原子核に吸収・束縛された事象はダブル Λ ハイパー核と呼ばれ、その質量から $\Lambda\Lambda$ 間相互作用の大きさの情報が得られます。一方、 Λ 粒子がそれぞれ別の原子核に吸収・束縛された事象はツインシングル Λ ハイパー核（ツインハイパー核）と呼ばれます。多くのシングル Λ ハイパー核はその質量が精度良く測定されているため、終状態のツインハイパー核の不変質量を再構成できれば、始状態である Ξ^- 粒子と原子核の束縛の強さ、すなわちその元となる ΞN 間相互作用の情報が得られます。

E07 実験の最初の解析は、ハイブリッド法と呼ばれるカウンターの情報を用いて Ξ^- 粒子を同定し、エマルジョン検出器に入射する Ξ^- 粒子を専用の顕微鏡ステージを用いて自動探索し、静止するまで自動追跡する手法で行いました。ハイブリッド法による解析は、2020 年 4 月までに解析可能な全てのエマルジョンに対して完了しました（図 1）。カウンターで同定された Ξ^- 粒子候補からの σ -stop（静止した場所に核フラグメントが付随する事象）を約 2200 例検出し、そのうちダブルハイパー核（ダブル Λ ハイパー核とツインハイパー核）は 33 例検出しました。

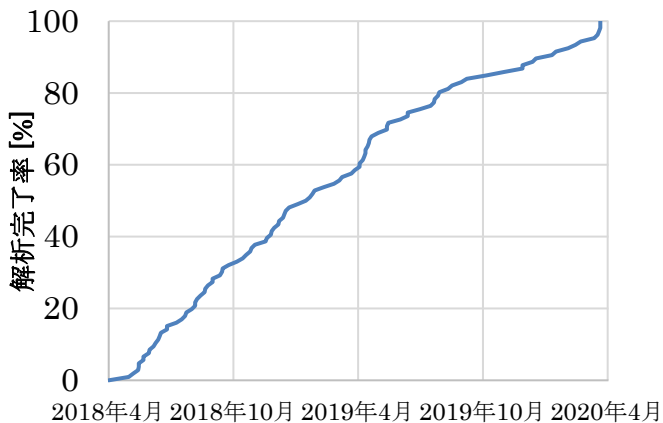


図 1 E07 実験のハイブリッド法によるエマルジョン解析完了率

既に報告したダブル Λ ハイパー核である MINO イベントは、ベリリウム (Be) をコア核とするダブル Λ ハイパー核です。E373 実験で見つかった ^4He をコア核とする NAGARA イベントとは異なる核種での $\Lambda\Lambda$ 間相互作用の情報が得られました。尤もらしい核種である ^{11}Be の場合、2 つの Λ 粒子が ^9Be に束縛するエネルギーが $19.07 \pm 0.11 \text{ MeV}$ と得られました。2019 年 2 月に Prog. Theor. Exp. Phys.[1]に掲載された論文は、第 26 回（2021 年）日本物理学会論文賞を受賞しました。

ツインハイパー核については、生成崩壊モードが一意に決定できた事象のうち 4 例の解析が行われました。IBUKI イベント（詳細は 2019 年 1 月の報告を参照）から、 Ξ^- 粒子の ^{14}N に対する束縛エネルギー B_{Ξ} が $1.27 \pm 0.21 \text{ MeV}$ と測定されました。これは E373 実験から報告された KISO

イベントと同じ生成崩壊モードであり、2つの B_{Ξ^-} のうち小さい $B_{\Xi^-}=1.03\pm 0.18\text{ MeV}$ に近いことが分かりました。この2イベントより、 Ξ^- 粒子と ^{14}N で構成される Ξ ハイパー核 $^{15}_{\Xi}\text{C}$ において、クーロン力に支援された nuclear $1p$ 状態が1 MeV付近に存在することを示唆し、2021年2月に Phys. Rev. Lett.[2]に掲載されました。

図2で示す IRRAWADDY イベントは、 Ξ^- 粒子の静止点から3本の飛跡が検出されました。このうち2本はさらに崩壊したため、ツインハイパー核であると同定できました。運動力学的な解析により、生成崩壊モードは $\Xi^- + ^{14}\text{N} \rightarrow ^5_{\Lambda}\text{He} + ^5_{\Lambda}\text{He} + ^4\text{He} + n$ と決定し、全ての娘核には励起状態がないため $B_{\Xi^-}=6.27\pm 0.27\text{ MeV}$ と一意に決定できました。IRRAWADDY イベントの B_{Ξ^-} は、KISO や IBUKI イベントで観測した $1p$ 状態の B_{Ξ^-} よりも有意に大きく、 Ξ^- 粒子がより深く原子核に束縛した異なる状態であること示唆しています。

E373 実験のエマルジョンで見つかった KINKA イベント(図3)の解析も最近完了し、生成崩壊モードは $\Xi^- + ^{14}\text{N} \rightarrow ^9_{\Lambda}\text{Be} + ^5_{\Lambda}\text{He} + n$ であると決定できました。娘核の一つの $^9_{\Lambda}\text{Be}$ には励起状態が存在するため $B_{\Xi^-}=8.00\pm 0.77\text{ MeV}$ または $4.96\pm 0.77\text{ MeV}$ の2通りの可能性があります。いずれの場合でも $1p$ 状態より有意に深い事象です。

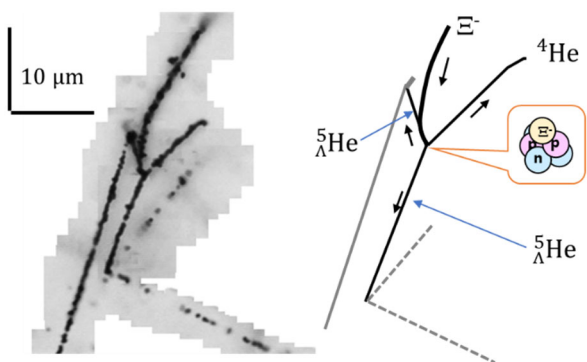


図2 E07 実験の IRRAWADDY イベント

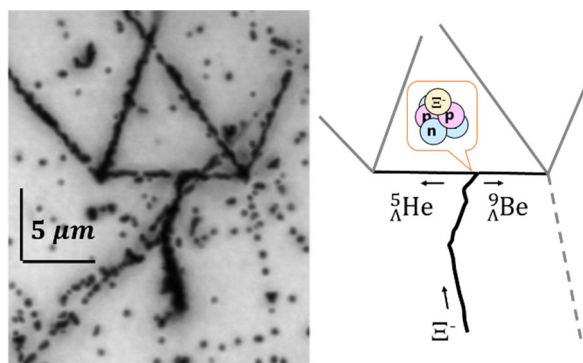


図3 E373 実験の KINKA イベント

IRRAWADDY と KINKA イベント以外にも、 Ξ^- 粒子が原子核にクーロン力で束縛されたと説明できるツインハイパー核の2例を含め計4例を arXiv[3]で報告しました。図4にこれまでエマルジョンから見つかった ^{14}N に吸収された Ξ^- 粒子の B_{Ξ^-} の一覧を示します。検出したツインハイパー核が増えるにつれ、 $\Xi^- + ^{14}\text{N}$ 系のレベル構造が明らかになりつつあります。

今後は、カウンターでの $p(K^-, K^+)\Xi^-$ 反応の選別条件を緩めた2週目を行うことで、 Ξ^- 粒子静止からの σ -stop候補を増やし、 Ξ 原子からのX線解析を行う予定です。さらに、エマルジョン全面からダブルストレンジネス原子核を直接探索する全面探査法の準備も進めています。対象となる事象はこれまでの約10倍もあるため、探索が進むとさらに多くのダブルストレンジネス原子核の情報が見られ、 $S=-2$ のバリオン間相互作用の理解がさらに進むでしょう。

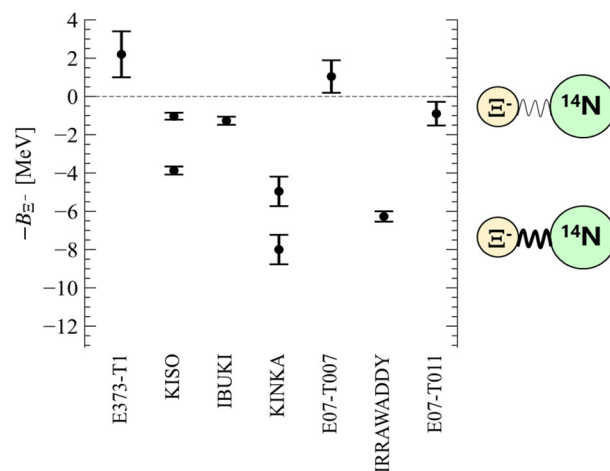


図4 実験で見つかったツインハイパー核事象より求めた Ξ^- 粒子の ^{14}N に対する束縛エネルギー (B_{Ξ^-})

[1] H. Ekawa et al., Prog. Theor. Exp. Phys. 2019, 021D02 (2019).

[2] S.H. Hayakawa et al., Phys. Rev. Lett. 126, 062501 (2021).

[3] M. Yoshimoto et al., arXiv:2103.08793 (2021).