

Ξ ハイパー核探索実験 (J-PARC E05 実験) の成果

— $^{12}\text{C}(\text{K}^-, \text{K}^+)$ 反応の微分断面積の高精度・高統計データの論文出版 —

Ξ ハイパー核の探索実験 (J-PARC E05 実験) では、 $^{12}\text{C}(\text{K}^-, \text{p})$ 反応を解析した論文[1]に続き、 $^{12}\text{C}(\text{K}^-, \text{K}^+)$ 反応について解析した論文[2]を出版しました。今回の活動報告では、この成果を中心に、E05 実験について紹介します。

ストレンジネス核物理では、原子核にストレンジネスを導入し、新しい原子核を生成してその構造と核力 (バリオン間力) を調べる試みが行われています。ストレンジネス核物理の大目標は、原子核物理で研究されている核子 (N) 間力を、ストレンジネスを持つ系におけるバリオン間相互作用へと拡張し、強い相互作用を統一的に理解することです。ストレンジネス-1 の系では、多くの Λ ハイパー核が発見されており、 Λ 粒子に対する中心ポテンシャルの深さが約 30 MeV であることやスピン依存項の大きさが明らかになるなど、 ΛN 相互作用の理解が進展しています。一方、ストレンジネス-2 の系においては、原子核乾板 (エマルジョン) を用いた実験から数例のダブル Λ ハイパー核事象や Ξ ハイパー核事象が見つかったものの、現時点では実験データは限られています。Ξ ハイパー核の場合、 $\Xi\text{N} \rightarrow \Lambda\Lambda$ 反応に起因する有限の崩壊幅が存在する可能性があるため、エマルジョンの数事象のみでは束縛エネルギーの決定が難しく、スペクトロメータを用いた分光実験が不可欠です。

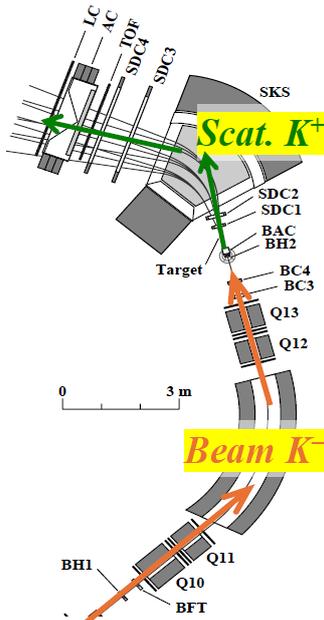


図 1. 実験セットアップの概略図。

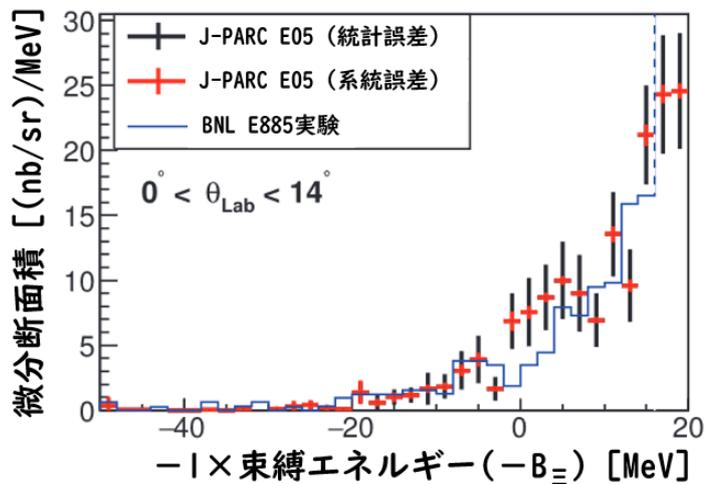


図 2. $^{12}\text{C}(\text{K}^-, \text{K}^+)$ 反応スペクトルの比較。誤差付きの点 (黒: 統計誤差、赤: 系統誤差) が J-PARCE05 実験、青線が BNL E885 実験の結果。

J-PARCE05 実験では、 $^{12}\text{C}(\text{K}^-, \text{K}^+)$ 反応を用いて Ξ ハイパー核 ($^{12}_{\Xi}\text{Be}$) の探索を行いました。図 1 に実験セットアップの概略図を示します。この実験では、入射 K^- ビームを K1.8 ビームラインスペクトロメータで、散乱 K^+ を SKS スペクトロメータで測定し、欠損質量法を用いて $^{12}_{\Xi}\text{Be}$ ハイパー核の Ξ^- 粒子の束縛エネルギーを測定しました。高い運動量分解能が特徴のこれらの磁気スペクトロメータを用いた測定により、8 MeV (FWHM) という分解能を達成し、BNL で行われた過去の実験 (BNL E885 実験)

[3]の 14 MeV (FWHM) と比較して、約 2 倍の分解能を実現しました。

図 2 に E05 実験と BNL E885 実験の比較を示します。横軸は $^{12}\text{C}(K^-, K^+)$ 反応における欠損質量から計算した $^{12}_{\Sigma}\text{Be}$ ハイパー核に対する Ξ -粒子の束縛エネルギー、縦軸は微分断面積です。このように、微分断面積の絶対値は E05 実験と BNL E885 実験の両方で概ね一致していることを確認しました。

図 2 の束縛エネルギースペクトルを理解するために、我々は 5 つのモデルを仮定し、スペクトルのフィッティングを行いました (表 1)。上述の通り、 Ξ ハイパー核の場合、 $\Xi N \rightarrow \Lambda \Lambda$ 反応に起因する有限の崩壊幅が存在する可能性があります。Lattice QCD による量子色力学の第一原理計算[4]では、この $\Xi N \rightarrow \Lambda \Lambda$ 反応の確率は、E05 実験での 8 MeV の分解能に比べて無視できるほど小さいことが示されています。そのため、崩壊幅 $\Gamma = 0$ MeV の場合と、 $\Gamma \neq 0$ MeV の場合の両方を仮定しました。

また、非束縛領域 ($-B_{\Sigma} > 0$ MeV) については、準自由過程における Ξ 生成の背景事象 (QF) が主成分となるため、QF の背景事象を考慮したフィッティングを行いました。表 1 に示しているように、Model (a)と(b)では、幅の狭い ($\Gamma=0$ MeV) Ξ ハイパー核の状態が 1 状態 (Model (a)) または 2 状態 (Model (b)) 存在することを仮定しています。他方、Model (c)では、有限の崩壊幅を仮定し、 Ξ ハイパー核が 1 状態存在するモデルとなっています。Model (d)および(e)は、 Ξ ハイパー核が存在しないという仮定に基づいたモデルです。表 1 に示すように、Model (b)および(c)が、 χ^2/ndf (P-value) において他のモデルよりも優れた値を示していることがわかります。図 2 に、P-value の高い Model (b)および(c)に基づいたスペクトルフィッティングの結果を示します。

表 1. 束縛エネルギースペクトルのフィッティング結果のまとめ

Model	χ^2/ndf (<i>ndf</i>)	P-value	Fitting parameters (MeV)
(a) QF($\Gamma = 0$) + 1Gaus	1.83 (23)	0.00896	$B_{\Sigma^-} = 7.1 \pm 1.5$ (stat.) $^{+2.4}_{-6.1}$ (syst.)
(b) QF($\Gamma = 0$) + 2Gaus	0.849 (22)	0.665	$B_{\Sigma^-}^{\text{1st}} = 8.9 \pm 1.4$ (stat.) $^{+3.8}_{-3.1}$ (syst.) $B_{\Sigma^-}^{\text{2nd}} = -2.4 \pm 1.3$ (stat.) $^{+2.8}_{-1.2}$ (syst.)
(c) QF($\Gamma \neq 0$) + 1BW	0.954 (23)	0.524	$B_{\Sigma^-} = -2.7 \pm 2.2$ (stat.) $^{+0.5}_{-0.7}$ (syst.) $\Gamma = 4.1 \pm 2.1$ (stat.) $^{+1.2}_{-0.7}$ (syst.)
(d) QF($\Gamma = 0$)	2.49 (19)	0.000332	
(e) QF($\Gamma \neq 0$)	1.39 (25)	0.0914	$\Gamma = 8.7 \pm 1.1$ (stat.)

このように、E05 実験の結果から、 Ξ ハイパー核の存在に対して強い示唆を与えることができました。しかし、E05 実験の 8 MeV の分解能では、Model (b)と(c)のどちらが正しいかを判定することはできませんでした。我々は、E05 実験の後継として J-PARC E70 実験を実施する予定です。E70 実験では、標的中のエネルギー損失を補正できる Active Fiber 標的と、SKS スペクトロメータよりもさらに高い運動量分解能を持つ S-2S スペクトロメータを使用することで、2 MeV (FWHM) の分解能を達成することが可能です。

図 4 に示すように、2 MeV の分解能を達成すれば、Model (b)と(c)を判別でき、 Ξ ハイパー核の束縛エネルギーを一意に決定することができます。また、実験で測定した束縛エネルギーと Lattice QCD などの最新のバリオン間相互作用を基にした構造計算を比較することで、 $S=-2$ の系におけるバリオン間相互作用の理解がさらに進展することが期待されます。

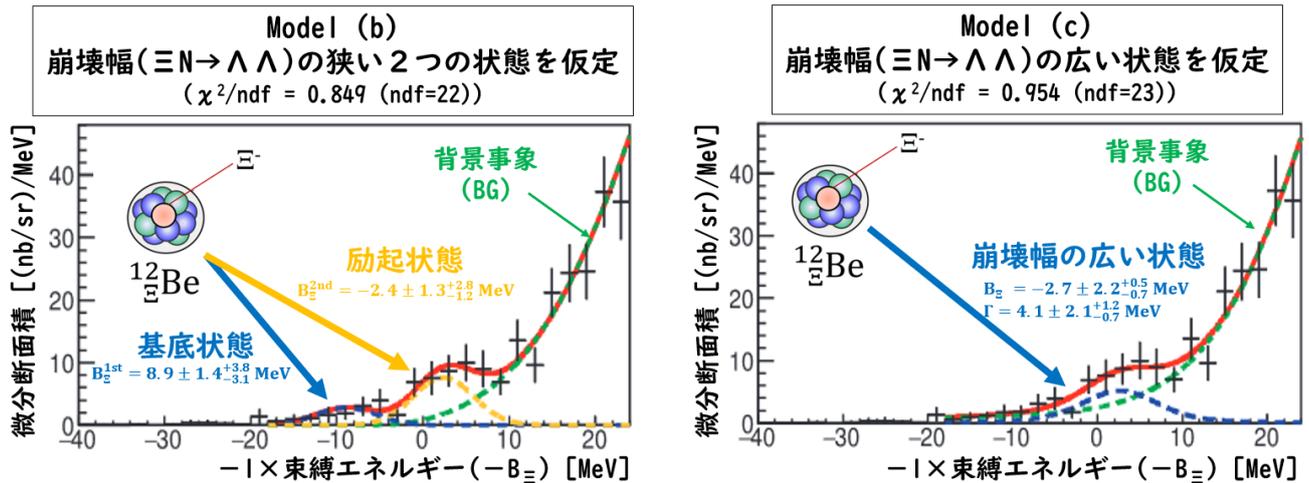


図 3. Model (b)及び(c)におけるスペクトルフィッティングの結果。

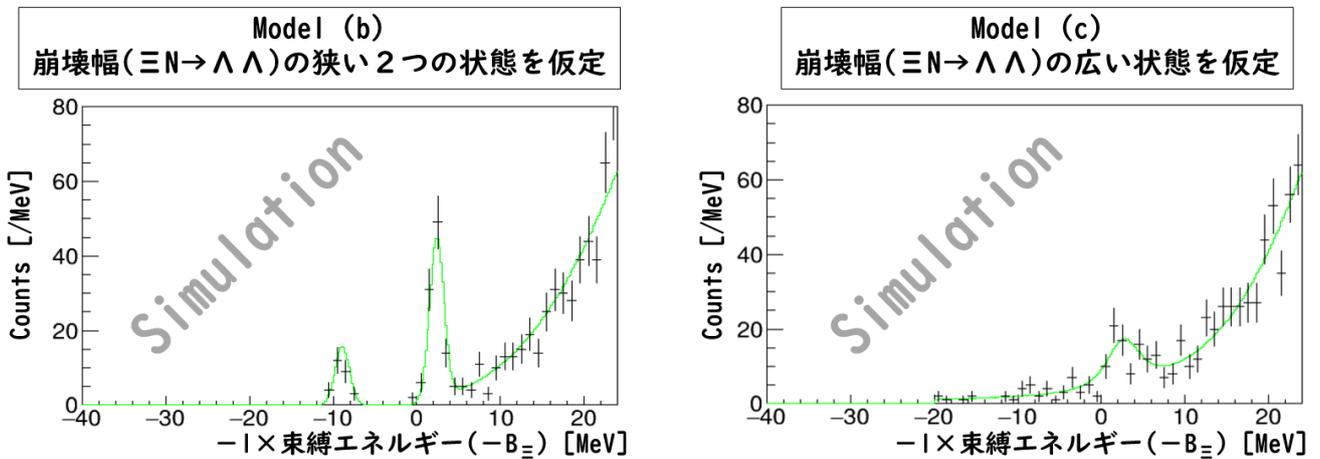


図 4. J-PARC E70 実験における統計と分解能 (2 MeV) を想定した、Model (b)及び Model (c)のフィット結果に基づくシミュレーション。

最後にこの場を借りて、実験をサポートしていただいた加速器グループをはじめとする J-PARC の関係者の皆様、解析等に使用させていただいた KEKCC のサポートスタッフの皆様に感謝します。

[1] Y. Ichikawa *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. **2020**, 123D01 (2020). DOI: 10.1093/ptep/ptaa139

[2] Y. Ichikawa *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. **2024**, 091D01(2024). DOI: 10.1093/ptep/ptae133

[3] P. Khaustov *et al.* [The AGS E885 Collaboration], Phys. Rev. C 61, 054603 (2000).

DOI: 10.1103/PhysRevC.61.054603

[4] K. Sasaki *et al.* [HAL QCD Collaboration], Nucl. Phys. A 998, 121737 (2020).

DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2020.121737