

$^4_\Lambda\text{He}$  ハイパー核精密  $\gamma$  線分光と  $\Lambda\text{N}$  間相互作用における荷電対称性の破れ

K1.8 実験グループは、E13 collaboration として 2015 年、4 月の beam time (J-PARC RUN62) に、ハドロン実験施設 K1.8 beam line において超電導磁気スペクトロメータ SKS を用いて  $^4_\Lambda\text{He}$  ハイパー核  $\gamma$  線分光実験を行い、 $^4_\Lambda\text{H}$  とのレベル構造比較から  $\Lambda\text{N}$  相互作用において荷電対称性が大きく破れている現象を示し、特にスピンの依存することを示した。本結果は、Physical Review Letter 115, 222501 (2015) で発表され、Editor's suggestion に選ばれた。また、E13 collaboration の中核である、東北大、KEK、JAEA、J-PARC 共同でプレスリリースを行った。

陽子と中性子の入れ替えに対して核力が対称であるという荷電対称性は、原子核物理における基本的な概念である。原子核において観測されている荷電対称性のやぶれ(Charge Symmetry Breaking; CSB)の例では、鏡像核  $^3\text{H}$ 、 $^3\text{He}$  の質量はクーロン力の効果を補正して 70 keV 程度の差がある。これらの原子核をコア核としてもつ鏡像ハイパー核  $^4_\Lambda\text{H}$ 、 $^4_\Lambda\text{He}$  は、コア核スピン  $1/2^+$  に  $\Lambda$  粒子がスピン平行、反平行となる図 1 のようにスピン二重項状態 ( $1^+$ ,  $0^+$ ) に分岐する。原子核乾板を用いた実験により決定された  $0^+$  状態の質量と、NaI 検出器を用いて測定された  $1^+$  状態の励起エネルギーから、それぞれの状態の  $\Lambda$  束縛エネルギー差 ( $B_\Lambda(^4_\Lambda\text{He}) - B_\Lambda(^4_\Lambda\text{H})$ ) は、 $\Delta B_\Lambda(0^+) = 0.35 \pm 0.05 \text{ MeV}$ ,  $\Delta B_\Lambda(1^+) = 0.29 \pm 0.06 \text{ MeV}$  と非常に大きな値となり、 $\Lambda\text{N}$  間相互作用において荷電対称性の破れが大きいということが示唆されてきた。しかしながら、このよう

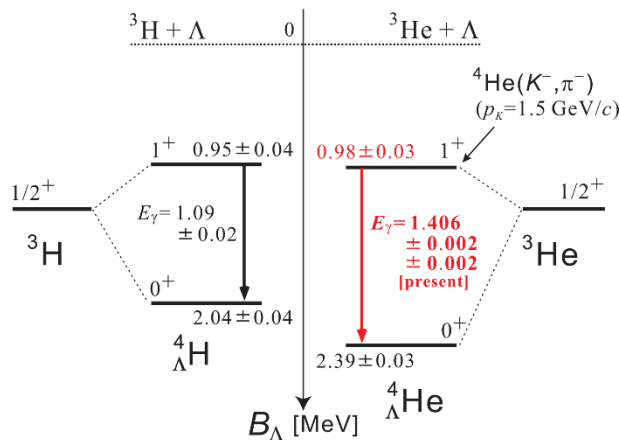


図 1.  $^4_\Lambda\text{H}$  および  $^4_\Lambda\text{He}$  ハイパー核のレベル構造  
 $^4_\Lambda\text{He}$  の励起エネルギーは E13 実験の結果を反映している。

な大きなレベル構造の差を説明できる理論的な枠組みがなかった。一方、ほとんどの実験が非常に古く (~1970 年代) 実験的な再検証も長らく望まれていた。特に、 $^4_\Lambda\text{He}(1^+ \rightarrow 0^+)$  M1 遷移  $\gamma$  線のエネルギー測定は、 $1.15 \pm 0.04 \text{ MeV}$  と報告されていたが統計的な感度が非常に乏しい結果であった。(図 1 の E13 実験の結果を反映させたレベル構造にある通り、 $1.406 \text{ MeV}$  と測定され過去の結果は否定されている。)

1990 年代半ばまでは、 $^4_\Lambda\text{H}$ ,  $^4_\Lambda\text{He}$  を含むハイパー核  $\gamma$  線分光実験では NaI 検出器 (1 MeV に対する分解能 ~10% FWHM) を用いていた。その後、中間子ビームのような  $\gamma$  線検出器に対して高いエネルギー付与率があるよ

うな環境下において動作可能なハイパー核  $\gamma$  線分光実験用の Ge 検出器群(Hyperball-J)が開発され、1998 年に初めて Ge 検出器(分解能 ~0.3% FWHM)を用いたハイパー核  $\gamma$  線を観測し、これまで KEK、BNL において  $p$  shell 領域のハイパー核の精密レベル構造を決定してきた。

He 標的を用いた ( $K^-, \pi^-$ ) 反応による、 $^4_\Lambda\text{He}$  精密  $\gamma$  線分光実験は、E13 実験の一部として 2015 年 4 月に J-PARC ハドロン実験施設 K1.8 beam line において行った。 $\gamma$  線脱励起状態である  $1^+$  状態は、spin-flip ( $\Delta S=1$ ) 過程を必要とする。そのため、ビーム運動量は、spin-flip amplitude が大きく、47 m ある K1.8 beam line 内での Kaon decay による輸送ロス を考慮し  $1.5 \text{ GeV}/c$  を選択した。2015 年 4 月における MR 24 kW において実験標的に輸送される  $K^-$  beam/ all particle 比は  $\gamma$  線ピークの収量が最大となるよう 1 spill 当たり、300 k/ 450 k に調整した。

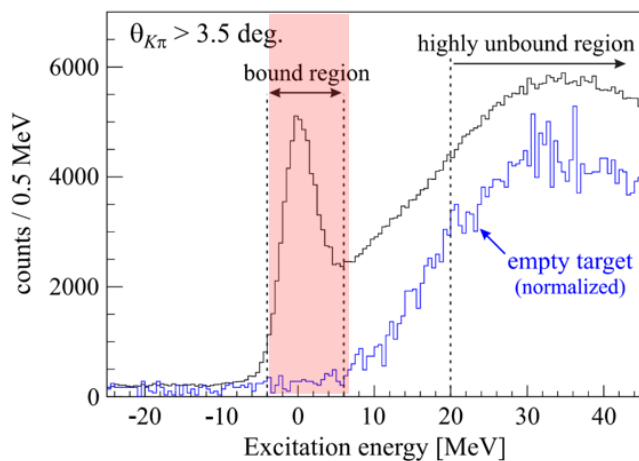


図 2.  ${}^4\text{He}(K, \pi)$  反応によるミッシングマススペクトル

いる。図 3 に示す通り、 $1406 \pm 0.002 \pm 0.002 \text{ keV}$  の  $\gamma$  線ピークが観測され、このピークは  ${}^4_\Lambda\text{He}(1^+ \rightarrow 0^+)$  遷移と同定された。この結果を反映させたレベル図が図 1 である。 ${}^4_\Lambda\text{He}(1^+)$  状態励起エネルギーが  $1.15 \text{ MeV}$  から、 $1.406 \text{ MeV}$  に改定されたことで、 ${}^4_\Lambda\text{H}$  の励起エネルギー ( $1.09 \text{ MeV}$ ) と  $0.3 \text{ MeV}$  もの差があることで大きなスピン状態に依存した CSB があることが示唆される。また、図 1 に示す通り、 $1^+$  状態の束縛エネルギー差は実は  $0.03 \pm 0.05 \text{ MeV}$  と  $0^+$  状態の  $0.35 \text{ MeV}$  と比較して小さいことがわかり、 $0^+$  状態に大きな CSB があることがわかる。

このような現象を解くヒントとして、 $\Lambda\text{N}-\Sigma\text{N}$  結合 ( $\Lambda$  ハイパー核状態と、 $\Sigma$  ハイパー核状態のミキシング) によるレベルエネルギーの変化は、 $0^+$  にのみ大きく影響することがあげられる。現在、この結果をうけて様々な理論計算が活発になされている。

さらなる、 $\Lambda\text{N}$  間相互作用における CSB 研究に向けて  ${}^4_\Lambda\text{H}$  励起エネルギーを、Ge 検出器を用いて精密測定する実験が、E63 の一部として 2016 年 1 月の PAC において採択された。この実験は、K1.1 に SKS と Hyperball-J を移設して行う予定である。

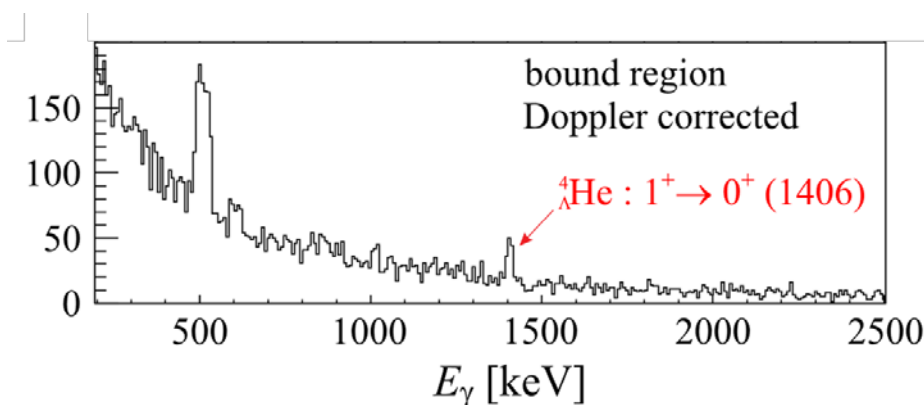


図 3.  ${}^4_\Lambda\text{He}$  束縛状態を選択した時の  $\gamma$  線エネルギースペクトル。

$K, \pi^-$  の運動量からミッシングマスを再構成し、図 2 のスペクトルを得た。黒線が He 標的あり、青線が標的なしのデータである。標的なしのスペクトルに含まれる事象は主に、 $K^-$  ビーム崩壊事象である。図のように、 ${}^4_\Lambda\text{He}$  束縛状態のピークが観測された。ミッシングマス分解能は、 $5.4 \text{ MeV}(\text{FWHM})$  であったため、 $1 \text{ MeV}$  程度の  $1^+, 0^+$  状態をミッシングマス上分離することはできない。束縛状態事象を選択したときの  $\gamma$  線スペクトルを図 3 に示す。図 3 は、 $K, \pi^-$  運動量から計算される生成ハイパー核の反跳による  $\gamma$  線エネルギーのドップラーシフト効果の補正を入れた