

重いハイパー核 $^{19}_{\Lambda}\text{F}$ の準位構造の決定と ΛN スピン・スピン相互作用の距離依存性

2015年6月にJ-PARCハドロン施設K1.8ビームラインでデータ取得を行ったE13実験の結果が最近出版され[1]、それに関してプレスリリース[2]を行った。その内容について報告する。

スピン J を持つ原子核（コア原子核と呼ぶ）に Λ 粒子を加えた Λ ハイパー核では、 $J \pm 1/2$ のスピン二重項に分離する。この分離の大きさは ΛN 相互作用のスピン依存項の大きさによっており、 ΛN 相互作用を反映して小さく「ハイパー核微細構造」と言われる。我々は、ゲルマニウム検出器による数 keV という高分解能・高精度の γ 線分光法によって、この「ハイパー核微細構造」を調べることにより、直接の散乱実験が困難な ΛN 相互作用のスピン依存性を軽い Λ ハイパー核、主として p 殻 Λ ハイパー核の系統的測定により調べてきた。今回、初めて重い sd 殻の Λ ハイパー核 $^{19}_{\Lambda}\text{F}$ で γ 線分光を行い、その準位構造を決定した。

$^{19}_{\Lambda}\text{F}$ ハイパー核（の励起状態）

は、J-PARCハドロン施設K1.8ビームラインからの $1.5\text{ GeV}/c$ の K^- ビームを液体 CF_4 標的に照射し、散乱した π を測定する (K^-, π) 反応で生成した。ビーム K^- 及び散乱 π は、それぞれ、ビームスペクトロメータ、SKS スペクトロメータで運動量解析し、欠損質量法によりハイパー核生成を同定し、放出される脱励起ガンマ線を Hyperball-J 検出器で同時計測した。（図1）

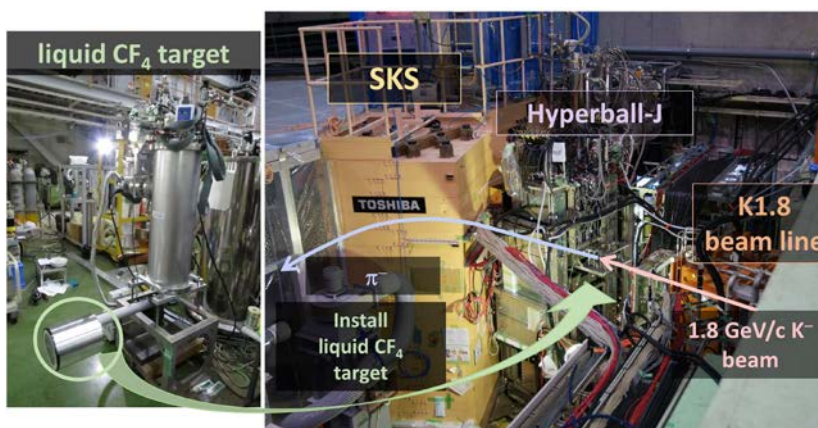


図1 実験セットアップ

Hyperball-J 検出器は、27 台の Ge 検出器（結晶サイズ $70\text{mm } \phi \times 70\text{mm}$ ）とコンプトン散乱事象や $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ からのバックグラウンド事象の抑制のための PWO 検出器からなる。スペクトロメータ系の欠損質量分解能は、 $20\text{g}/\text{cm}^2$ という厚い標的を用いたため、 8.7 MeV (FWHM) であるが、 $^{19}_{\Lambda}\text{F}$ の高励起状態や $^{12}_{\Lambda}\text{C}$ からのバックグラウンドを排除するには充分である。また、Hyperball-J 検出器は、 ^{232}Th 線源や既知のガンマ線による較正により、 $0.1\text{--}2.5\text{ MeV}$ の領域で 0.5 keV の確かさと 1 MeV の γ 線に対して、 4.5 keV (FWHM) の分解能を得ている。

図2は $^{19}_{\Lambda}\text{F}$ の低励起状態領域を選んだ γ 線スペクトルである。図中に示した4本の γ 線が観測・同定された。

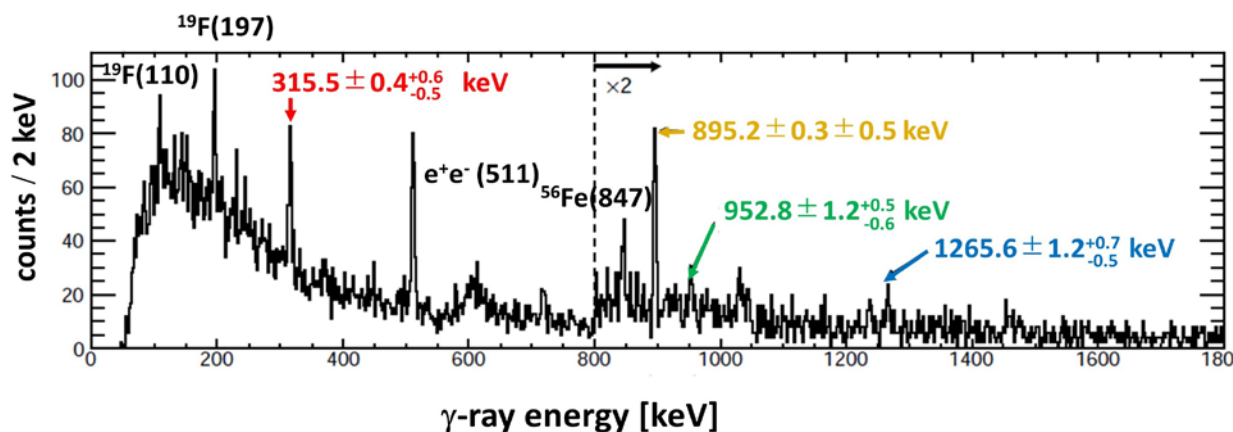


図2 測定した、 $^{19}_{\Lambda}\text{F}$ の γ 線スペクトル。図に示す4本の γ 線を同定した。

Λ とコア原子核間の弱結合を仮定し、また、各状態の生成断面積の予想値を考慮して、 $^{19}_{\Lambda}\text{F}$ の準位構造及び γ 遷移が図3のように再構成できた。316 keVのピークはドップラー効果によって幅が広く、その他のピークの幅は測定の分解能程度に細いということは、各状態の寿命の予想値と矛盾しない。

今回の測定で特に興味深いのは、 316 ± 0.4 (stat.) $^{+0.6}_{-0.5}$ (syst.)と決定した基底状態二重項のエネルギー間隔である。このエネルギー間隔は、主に、コア原子核最外殻の核子とs状態の Λ 間の相互作用のスピン・スピン項の大きさによって決まる。同様な二重項のエネルギー間隔をハイパー核の大きさ、すなわち、核子と Λ 間の距離を変えて測定すれば、 ΛN のスピン・スピン項の大きさの距離依存性の情報が得られることになる(図4)。

この316 keVという値は、2つの独立な殻模型計算の結果と良い一致を示した。Millenerはp殻 Λ ハイパー核データから決めた現象論的なスピン依存 ΛN 有効相互作用を用いて、このエネルギー間隔を305 keVと予想している[3]。一方、梅谷&元場による殻模型計算では、Nijmegen SC97eおよびSC97f相互作用からG行列法で求めた有効相互作用を用いて、245 keVおよび419 keVとの結果を得ている[4]。p殻 Λ ハイパー核である $^7_{\Lambda}\text{Li}$ の基底状態二重項の間隔が348および942 keV(実測値は、692 keV)、s殻 Λ ハイパー核 $^4_{\Lambda}\text{H}$ と $^4_{\Lambda}\text{He}$ の平均が0.89および1.25 MeV(実測値の平均は、1.25 MeV)という結果を考慮すると、この計算も実験を良く再現していると言える。これらの結果から、現在の理論モデルのフレームワークは、軽い Λ ハイパー核のみならず、p殻を超えた重い Λ ハイパー核の構造を記述するのにも極めて有効であることを示しており、今後、更に重い Λ ハイパー核構造を詳細に調べることによって、バリオン間相互作用の密度依存性などを調べる有効な手段となると期待される。

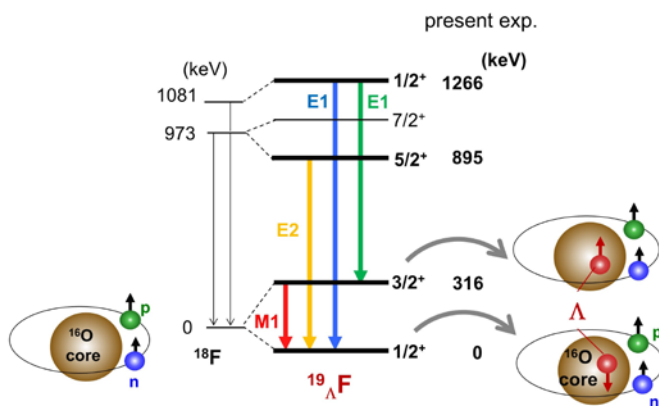


図3 再構成されて $^{19}_{\Lambda}\text{F}$ の準位構造と γ 遷移。

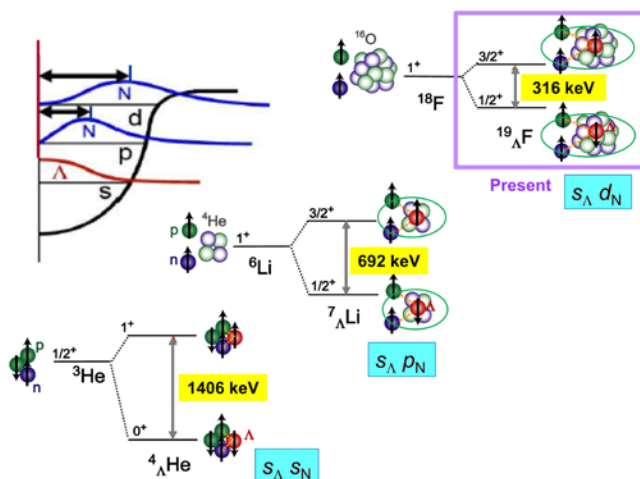


図4 基底状態二重項のエネルギー間隔と ΛN 間相互作用の距離依存性。

References

- [1] S. B. Yang *et al.*, Phys. Rev. Lett. **120**, 132505 (2018).
- [2] 重いハイパー核の構造解明に成功 —中性子星の内部構造を理解する手がかりに—
<https://www.kek.jp/ja/newsroom/2018/04/03/1000/>
- [3] D.J.Millener, Nucl. Phys. **A914**, 109 (2013)
- [4] A.Umeya and T.Motoba, Nucl. Phys. **A954**, 242 (2016).