

ハイパー核 γ 線分光実験のための核種同定検出器の研究

東北大学大学院理学研究科 物理学専攻 原子核物理研究室

石川 勇二

1 研究背景と目的

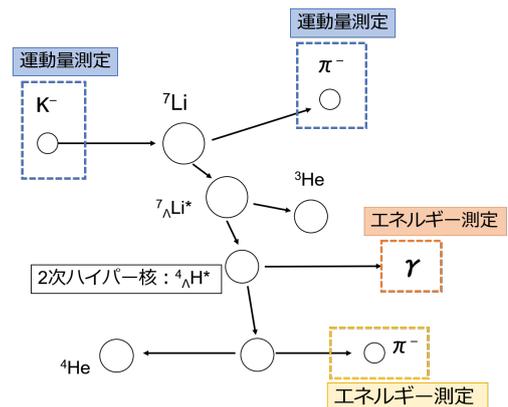
原子核物理学の課題の一つに核力の理解がある。我々は、 s クォークを含んだバリオン、すなわちハイペロンを含んだ原子核であるハイパー核を調べることで核力をハイペロンを含むバリオン相互作用に拡張して統一的に理解することを目指している。 Λ ハイパー核の構造から Λ と核子の相互作用の研究が盛んに行われてきた。特に、ゲルマニウム (Ge) 検出器を用いた Λ ハイパー核の精密 γ 線分光では、 ΛN 間のスピンの依存する相互作用を調べることが出来る。2015 年に我々の実験グループは Ge 検出器を用いた ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ の γ 線分光実験を行い、2 重項間隔を $1.406 \pm 0.002 \pm 0.002$ keV と決定した [1]。この値は過去に NaI 検出器を用いて測定された ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ の 2 重項間隔の値 1.09 ± 0.02 keV [2-4] と大きく異なることから、 ΛN 相互作用における大きな荷電対称性の破れの効果が実証された。しかし、 ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ の 2 重項間隔の 3 つの実験データの中心値にはばらつきがあり、誤差も数十 keV と大きい。4 体系ハイパー核は厳密計算も可能であり、実験データと理論計算を比較してこの荷電対称性の破れの起源を解明するためにはより高精度の実験データが必要である。そこで我々は、 ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ についても Ge 検出器を用いた γ 線分光を行う (J-PARC E63)。一方、3 体系 Λ ハイパーである ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ のアイソスピン $I=1$ の励起状態から $I=0$ への γ 線を観測し、 $\Lambda NN3$ 体力を調べられる可能性がある。そのため、E63 実験では ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ の γ 線遷移探索も行う。E63 実験では ${}^7\text{Li}(K^-, \pi^-){}^7_{\Lambda}\text{Li}$ 反応を用いてハイパー核を生成する。 ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ と ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ は高励起状態の ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ の強い相互作用による ${}^3\text{He}$ 、 α 粒子放出崩壊を経由する 2 次ハイパー核として生成される。E63 実験において ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ 、 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ の生成事象を標識化するためには (K^-, π^-) 反応の同定と 2 次ハイパー核の同定が必要である。本研究では、 (K^-, π^-) 反応同定検出器システムのうちのひとつであるビーム粒子位置測定用ファイバー検出器の製作と性能評価および 2 次ハイパー核同定用検出器システムのデザインを行った。

2 J-PARCE63 実験

E63 実験の反応図を図 1 に示す。 ${}^7\text{Li}(K^-, \pi^-){}^7_{\Lambda}\text{Li}$ 反応を用いて 2 次ハイパー核として ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ や ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ を生成し、それらの γ 線のエネルギーを測定する。また、ミッシングマス法で得られる ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ の励起エネルギーに制限をかけ、 ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ 、 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ の生成領域を選択する。しかし、 ${}^7_{\Lambda}\text{Li} \rightarrow {}^4_{\Lambda}\text{H} + {}^3\text{He}$ や ${}^7_{\Lambda}\text{Li} \rightarrow {}^3_{\Lambda}\text{H} + {}^4\text{He}$ の崩壊閾値の下には、ほかの 2 次ハイパー核の崩壊しきい値があるため、観測した γ 線がどの 2 次ハイパー核

からのものであるかを完全に同定することができない可能性がある。この問題を解決するために、ハイパー核の弱崩壊時に生成される π^- を利用する。 ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ や ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ の 2 体崩壊の場合、単一の運動エネルギーをもった π^- が放出されるため、この π^- のエネルギーも同時に測定し 2 次ハイパー核の同定も行う。

実験は J-PRAC ハドロン実験施設の K1.1 ビームラインで行う。標的上流のビームラインスペクトロメータでは、 K^- の粒子識別および運動量測定、下流の SKS スペクトロメータでは π^- の粒子識別および運動量測定を行う。標的周辺には Ge 検出器群 Hyperbll-J を設置し、 γ 線のエネルギー測定を行う。さらに Hyperbll-J の内部にはハイパー核の弱崩壊 π^- の運動エネルギーを測定し、2 次ハイパー核を同定する検出器システムを設置する。

図 1: E63 実験の反応図 (${}^4_{\Lambda}\text{H}$ の γ 線測定の場合)

3 ビーム位置測定用ファイバー検出器

E63 実験で使用する K^- ビームは 2 次粒子であるため、粒子毎の運動量解析が必要である。運動量は、K1.1 ラインのビームラインスペクトロメータの DQQ 磁石上流での位置情報 (水平方向)、下流での飛跡情報、DQQ の磁石の輸送行列を用いて導出する。DQQ 上流部に設置する位置検出器の計数率は最大で 10M/spill (5 MHz) になることが予想される。このため、ドリフトチェンバーでは電子のドリフト時間による使用可能な計数率の限界があるため使用できない。そのため高い計数率耐性を持ちドリフトチェンバーと同程度の位置分解能をもった検出器が必要である。この要求性能を満たす検出器として実際に K1.8 ビームラインにおいて同様の運動量解析用に使用されているファイバー検出器、Beam line Fiber Tracker (BFT) がある。そこで、この BFT を K1.1 ビームラインでも導入するために本研究で製作を行った。BFT は多数のプラスチックシンチレー

シオンファイバーで構成されている。シンチレーションファイバーのシンチレーション光は Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) で検出し、MPPC の読み出し回路としては多チャンネル MPPC 読み出し用に開発された VME-EASIROC を使用する [8]。BFT の光量と時間分解能を評価するために、宇宙線による性能評価テストを行った。各チャンネルでの宇宙線に対する光量は十分あり、一様性があることが分かった (図 2)。また、時間分解能は 0.880 ± 0.02 ns であり、要求性能を達成した。

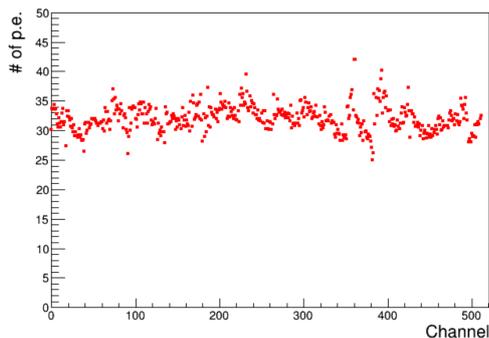


図 2: 各 MPPC チャンネルの宇宙線通過事象に対する平均光電子数

4 2 次ハイパー核同定用検出器システム (弱崩壊 π^- 検出器システム)

2 次ハイパー核同定検出器システムの構成としては、位置検出器と複数層のプラスチックシンチレータから成る飛程検出器を検討している。 ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ と ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ の 2 体の弱崩壊 π^- は単一の運動エネルギーを持っているため、飛程検出器内での飛程を測定することでこれらの識別を行う。実際の実験では γ 線エネルギースペクトル中で ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ と ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ の γ 線のピークと思われるところにゲートをかけ、 π^- エネルギースペクトルを見る。このとき、 π^- エネルギースペクトル中のピークが ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ や ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ のものと分かればよい。そこで、 ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ や ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ の 2 体弱崩壊 π^- のピークの中心値の誤差 ($\pm 3 \times \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$) の範囲に他のピークの中心値がない場合、同定できたと判断する。ここで、 σ は π^- のピークをガウス分布と仮定したときの分散、 N は ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ または ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ の γ -弱崩壊コインシデンス事象の統計量である (予想統計量はそれぞれ 30、55 カウント)。また、 ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ から生成し得る 2 次ハイパー核の弱崩壊 π^- の運動エネルギーは、高いものから ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ 、 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ 、 ${}^6_{\Lambda}\text{He}$ の 2 体崩壊のものである。これらの運動エネルギーはそれぞれ 53.2 MeV、40.9 MeV、37.2 MeV である。以上のことから、 ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ や ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ の π^- エネルギースペクトルのピークの σ はそれぞれ 22 MeV、9.1 MeV 以下でなければならない。GEANT4 コードを用いたモンテカルロシミュレーションを行い、飛程検出器を用いて ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ と ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ の 2 体の弱崩壊 π^- が他のハイパー核からの弱崩壊 π^- と区別できるかを調べた。シミュレーションから得られた π^- エネルギースペクトル (飛程検出器の各層の厚さ : 1cm) は図 3 のよ

うになった。このエネルギースペクトルは (K^- , π^-) 反応点 (弱崩壊 π^- 発生点) と位置検出器の情報から得られる π^- 放出角度による飛程の補正や、標的、位置検出器でのエネルギー損失を補正を行ったものである。また、飛程検出器の各層の厚さを変えたときの π^- エネルギースペクトルの σ は図 4 のようになった。図 4 から予想通りの統計量が実際に得られれば、飛程検出器を用いて ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ と ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ の 2 体の弱崩壊 π^- の識別できることが分かった。

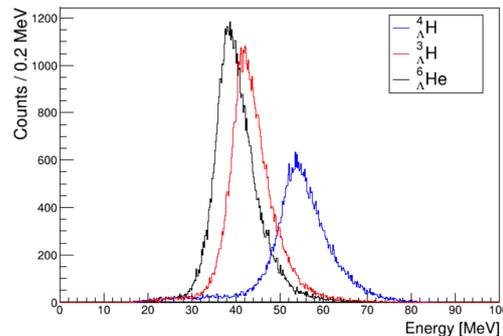


図 3: シミュレーションから得られた π^- エネルギースペクトル (飛程検出器の各層の厚さ : 1cm)。

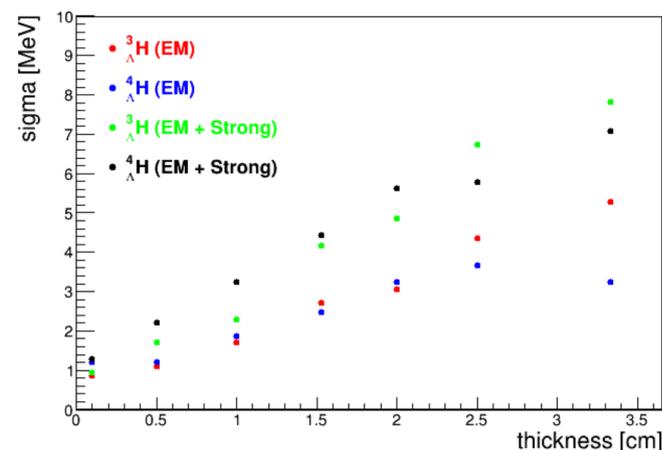


図 4: π^- エネルギースペクトルの σ と飛程検出器の各層の厚さとの関係

5 まとめ

${}^4_{\Lambda}\text{H}$ と ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ の γ 線分光実験を計画している。本研究では、ビーム粒子の運動量測定に必要なシンチレーションファイバー検出器 (BFT) の製作および宇宙線による性能評価テストを行った。光量は各チャンネルで一様性が確認でき、時間分解能は 0.880 ± 0.02 ns を達成した。またシミュレーションを行い、飛程検出器の各層の厚みを 3.3 cm 以下にすることで ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ と ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ の 2 体の弱崩壊 π^- を識別出来ることがわかった。

- [1] T. O. Yamamoto et al., Phys Rev Lett 115(2015)222501.
- [2] M. Bedjidian et al., Phys. Lett. B 62, 467(1976).
- [3] M. Bedjidian et al., Phys. Lett. B 83, 252(1979).
- [4] A. Kawachi, Doctor thesis, University of Tokyo, 1997.
- [5] C. Rappold et al., Phys. Rev. C 88, 041001(R)
- [6] R. Honda et al., Nucl. Instr. Meth. A 787 (2015) 157.
- [7] 松本裕樹、修士論文、東北大学、2013.
- [8] 塩崎 健弘、修士論文、東北大学、2015.