

論文の内容の要旨

論文題目: Hypernuclear production with
 the heavy ion reaction of
 ${}^6\text{Li}+{}^{12}\text{C}$ at 2 A GeV

(核子あたり 2 GeV における ${}^6\text{Li}+{}^{12}\text{C}$
重イオン衝突反応を用いた
ハイパー核生成)

氏名

中嶋 大輔

ハイパー核の分光学的研究は、フレーバー SU(3) 対称性のもとで核子間力をバリオン間力として、より統一的に理解するために非常に重要な役割を担うものである。これまでのハイパー核分光実験は、主に高エネルギーの中間子や電子ビームを用いて、標的である安定原子核標的内の核子をハイペロンに変換する方法により行われてきており、現在までに約 40 種類のハイパー核が観測されている。しかし、従来の手法では、生成可能なハイパー核は標的原子核の近傍に限られるため、陽子/中性子過剰ハイパー核など β 安定線から離れたハイパー核を生成し研究することは困難であった。

本研究では、重イオンビームと固定標的との衝突反応を用いるという新しい実験手法を用いてハイパー核の分光実験を行った。本手法の大きな特徴は、従来の実験手法とは異なり、生成可能な核種が標的原子核によらず、ビームとして用いる原子核よりも軽い様々なハイパー核の生成が可能なことである。この手法の独創的な点は、入射核のフラグメントとして生成されるハイパー核を観測することが可能な点である。入射核フラグメントとして生成されたハイパー核はビームとほぼ同じ相対論的速度を持つため、ローレンツ因子により寿命が伸びて観測される。この特徴により、ハイパー核の寿命の測定は検出器の時間分解能によらず、崩壊点を測定することで行えるため、高い精度での寿命測定が可能である。またこの特徴のため、将来的には重イオンをより高いエネルギーにまで加速して実験を行うことにより、生成されたハイパー核の磁気モーメントを直接測定することが初めて可能になると期待されている。ハイパー核の磁気モーメントは、ハイペロンの原子核内での波動関数の情報を持つため、ハイパー核物理において最も重要な物理量の一つであるが、現在までには測定されていない。現在ドイツで建設中の加速器施設 FAIR では、重イオンを核子あたり 20 GeV まで加速することが可能である。このエネルギーの重イオンビームを用いた場合、

入射核フラグメントとして生成されるハイパー核は、そのローレンツ因子(約 22.5)により約 4.5 ns の寿命で観測されるため、強い磁場中を飛行するハイパー核のスピンの歳差運動を観測することが可能であると考えられる。このような重要な研究テーマを拓く過程において、まず重要な点は、重イオン反応によるハイパー核の生成機構を正しく理解することである。そのため、本研究では、観測されたハイパー核の運動学領域を検査することによりこれまでに理論的に示唆されている生成過程についての妥当性を検証した。

本研究では、核子あたり 2 GeV の入射エネルギーを持つ ${}^6\text{Li}$ ビームを用いることにより、 ${}^3_\Lambda\text{H}$ および ${}^4_\Lambda\text{H}$ の 2 種類の核種の生成と同定を行った。標的を変えずに複数のハイパー核が観測されたカウンター実験は世界初であり、この観測結果は、従来の手法では困難であった β 安定線から離れたドリップライン近傍のハイパー核など、様々な陽子/中性子比を持つ核種を研究対象とできる可能性を示すものである。実験は、ドイツ国立重イオン科学研究所 (GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH) において、重イオン衝突反応を用いたハイパー核実験計画 (HypHI 計画) の第一段階の実験 (Phase 0) として行った。Phase 0 実験の主な目的は Λ ハイペロン及び ${}^3_\Lambda\text{H}$ 、 ${}^4_\Lambda\text{H}$ 等の最も軽いラムダハイパー核の生成を確認することにより、実験手法を確立するとともに、重イオン反応によるハイパー核の生成過程を解明することである。それぞれのハイパー核の核種の同定は、 π^- 中間子を伴う弱崩壊モード ($\Lambda \rightarrow p + \pi^-$ 、 ${}^3_\Lambda\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + \pi^-$ および ${}^4_\Lambda\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + \pi^-$) の崩壊生成粒子の不変質量を再構成することにより行った。実験 (Phase 0) は GSI/Cave C 実験ホールにおいて、2009 年 10 月に合計 11 日間に渡り、核子あたり 2 GeV の運動エネルギーの ${}^6\text{Li}$ イオンビームおよび炭素標的を用いて行った。この運動エネルギーにおいて、入射核フラグメントとして作られるハイパー核のローレンツ因子は約 3 である。実験のセットアップは 0.7 テスラに励磁された偏向電磁石を用いた前方磁気スペクトロメータシステムである。

観測された荷電粒子はそれぞれの運動量、飛行時間およびプラスチックシンチレータ検出器でのエネルギー損失等の情報を用いて行なった。図 1 は、正電荷を持つ粒子の運動量と電荷の比 (横軸) とプラスチックシンチレータで観測されたエネルギー損失量 (縦軸) の相関図である。それぞれの荷電粒子 (p 、 d 、 t 、 ${}^3\text{He}$ 、 ${}^4\text{He}$ 、 ${}^6\text{Li}$) が分離して観測されていることがわかる。それぞれの粒子の電荷量は最下流のプラスチックシンチレータでのエネルギー損失量を用いて行なった。

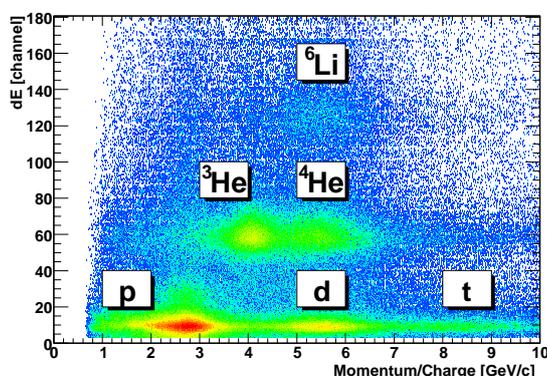


図 1 運動量・電荷比 (横軸) とプラスチックシンチレータでのエネルギー損失量 (縦軸) との相関

図 2 は、電荷が 1 の粒子の運動量と β の相関図である。質量 m を持つ粒子はその運動量 (p) と β の間に $\beta = p / \sqrt{p^2 + m^2}$ という関係がある。図中には、電荷が 1 の粒子 (π^+ 、 K^+ 、 p 、 d) について、その関数も同時に示してある。 p と d については、綺麗に分離できていることがわかる。図 3 には負電荷を持つ粒子の運動量 (横軸) と β (縦軸) の相関が示されている。図中の赤点線で書かれた線が、 π^- 中間子に対応する運動量と β との関係であり、解析では図中の赤線で囲まれた領域を π^- として選択した。

解析では、 π^- および p 、 ${}^3\text{He}$ もしくは ${}^4\text{He}$ が見つかったイベントに対してそれらの飛跡のパーテックスを組み、不変質量を計算した。この際に高い粒子多重度による combinatorial バックグラウンドの寄与を減らすために、幾何学的な解析を行った。これについては本論文中で詳しく述べられている。

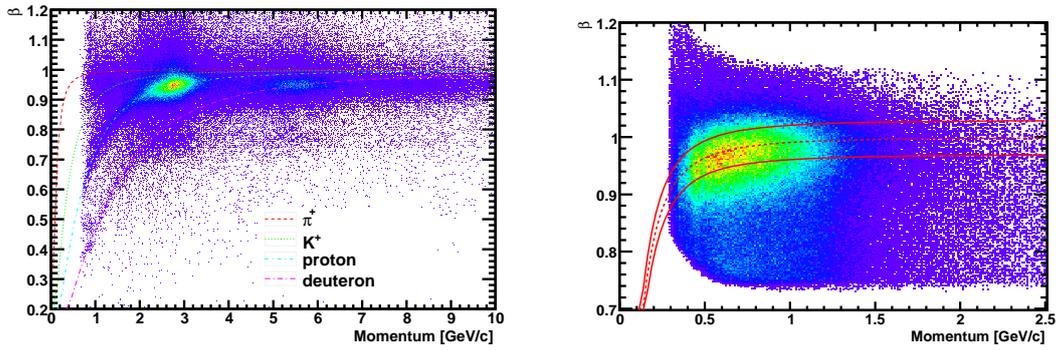


図2 電荷が1の粒子の運動量(横軸)と β (縦軸)の相関 図3 電荷が-1の粒子の運動量(横軸)と β (縦軸)の相関

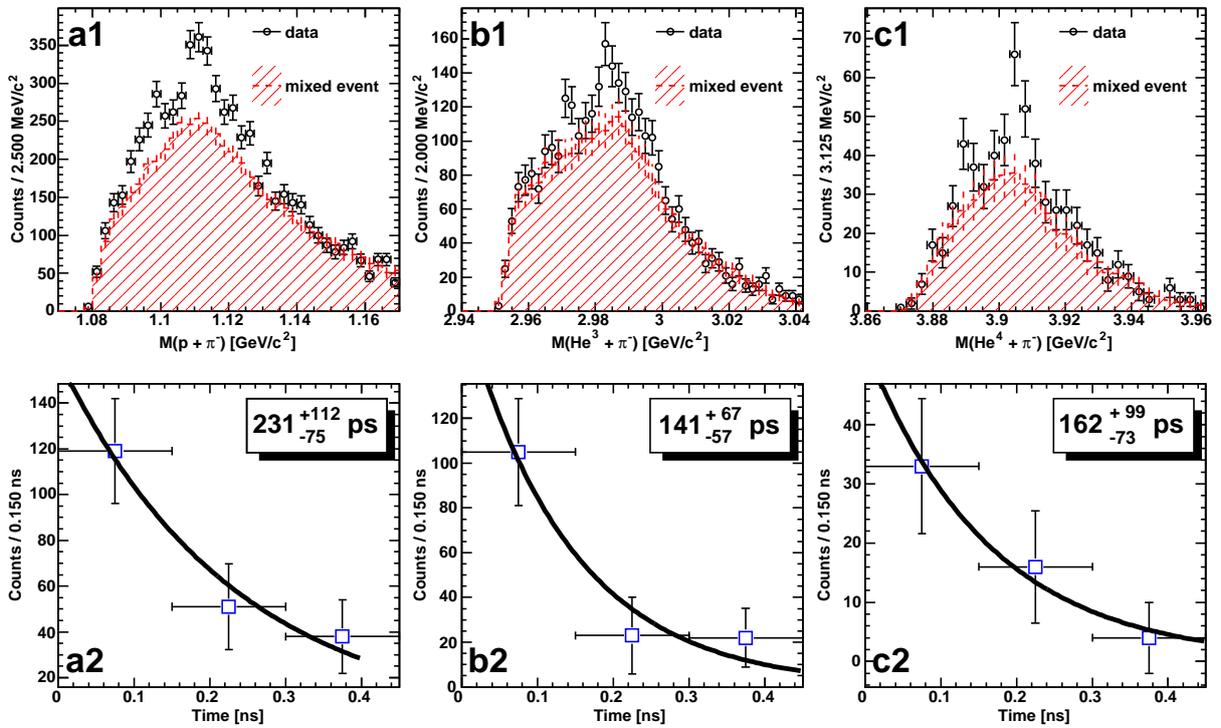


図4 $p+\pi^-$ (a1)、 ${}^3\text{He}+\pi^-$ (b1)、 ${}^4\text{He}+\pi^-$ (c1) の不変質量分布と Λ (a2)、 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ (b2)、 ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ (c2) に対応する崩壊時間分布

図4(a1)、(b1)、(c1)にはそれぞれ、本研究で得られた $p+\pi^-$ 、 ${}^3\text{He}+\pi^-$ 、 ${}^4\text{He}+\pi^-$ の不変質量分布が示してある。図中の斜線で示されている分布は mixed event 法で解析された、予想されるバックグラウンド分布の形である。それぞれの分布には Λ 、 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ 、 ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ に対応するピークが観測されている。ピーク領域にはそれぞれ、 403 ± 41 、 178 ± 31 、 66 ± 14 個のイベント数が観測されており、統計的優位度はそれぞれ 7.1、6.2、5.3 σ である。上で述べたとおり、ビームや標的の種類を変えずに複数のハイパー核が観測された実験は世界初であり、この観測結果は新たな研究テーマを拓くものである。図4(a2)、(b2)、(c2)は Λ 、 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ 、 ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ の崩壊時間分布とその指数関数によるフィッティング結果である。崩壊時間分布からは、それぞれに対応するピークの両側の領域から予想されるバックグラウンド分布が引かれている。フィッティングの結果からそれぞれ、 231^{+112}_{-75} (Λ)、 141^{+67}_{-57} (${}^3_{\Lambda}\text{H}$)、 162^{+99}_{-73} (${}^4_{\Lambda}\text{H}$) ps の寿命が測定された。本研究で観測されたそれぞれの寿

命は、その統計量のために、過去の実験で得られている寿命測定結果と比べて優位に精度が高いものではないが、過去の測定結果と同程度の誤差で、矛盾しない値が得られている。また、 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ の寿命に関しては、 Λ ハイペロンの持つ寿命よりも統計誤差以上に短いことが示された。この結果は ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ の構造を研究する上で、非常に重要な意義を持つ観測である。

本研究で観測された Λ ハイペロン、 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ および ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ についての、観測量、統計的優位度、質量、質量分布のガウスフィッティングの幅、寿命は表 1 にまとめられており、質量と寿命については過去の実験で得られている値と比べられている。

また、 Λ ハイペロンおよび ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ 、 ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ の生成の運動学領域についても研究を行い、ハイパー核は入射核のラビディティ領域で観測されていることを明らかにした。重イオン衝突反応を用いたハイパー核分光実験という新たな実験手法を開拓する上で、その生成機構を理解することは、最も重要な要素の一つである。本研究では、ハイパー核が入射核フラグメントのラビディティ領域で、かつ前方の領域で観測されていることを実験的に明らかにした。これは、理論的に予想されていたように重イオン衝突反応により生成された Λ ハイペロンが入射核フラグメントと coalesce することでハイパー核生成が起こるというモデルを強くサポートするものであり、そのことが実験的に解明された。

本論文中では、観測された Λ 粒子と ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ および ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ の観測量の比から、崩壊の分岐比や飛跡検出器の検出効率、トリガーによる効果などの幾つかの重要な要素を考慮しながら、coalescence factor の見積もりを行った。見積もられた coalescence factor は約 0.024 であり、これも通常の coalescence model と比べて妥当であることが示された。また、 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ と ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ の生成比を崩壊分岐比や粒子識別効率などを考慮しながら ${}^2\text{H}$ と ${}^3\text{H}$ の生成比と比較した。これも、 ${}^2\text{H} + \Lambda \rightarrow {}^3_{\Lambda}\text{H}$ 、 ${}^3\text{H} + \Lambda \rightarrow {}^4_{\Lambda}\text{H}$ という描像の妥当性が誤差の範囲内で示された。

本研究に於いて、重イオンビームと固定標的を用いたハイパー核分光の手法を確立する事が出来、J-PARC 等で計画されている別の手法での実験と相補的な研究を行う可能性だけでなく、ユニークな研究を進展させていく事を証明する事が出来た。

表 1 Λ 粒子、 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ および ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ の観測量、統計的優位度、質量、幅、寿命のまとめ。それぞれの質量と寿命については下の括弧内に過去の実験で知られている値を示してある。

	観測量 [counts]	統計的優位度	質量 [GeV/ c^2]	幅 [MeV/ c^2]	寿命 [ps]
$\Lambda \rightarrow p + \pi^-$ (known)	403 ± 41	7.1	1111.3 (1115.683 \pm 0.006)	7.3	$231^{+112}_{-75} \pm 30$ (263.2 \pm 20.0)
${}^3_{\Lambda}\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + \pi^-$ (known)	178 ± 31	6.2	2984.6 (2991.68 \pm 0.05)	8.6	$141^{+67}_{-57} \pm 30$ (182 $^{+89}_{-45}$ \pm 27)
${}^4_{\Lambda}\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + \pi^-$ (Known)	66 ± 14	5.3	3905.6 (3923.03 \pm 0.06)	5.2	$162^{+99}_{-73} \pm 30$ (194 $^{+24}_{-26}$)