

学 位 論 文 題 名

Pionic Weak-Decay of Light Λ -Hypernuclei
—Pauli Suppression and Enhancement Effects—

（軽い Λ ハイパー核のパイオン放出弱崩壊
—パウリ原理による抑制と促進の効果—

学位論文内容の要旨

最近の核物理学は、その研究対象を安定核領域から遠く離れた様々な核に拡げている。その対象の拡がりの一つとして、核子だけではなく、ハイペロン (Λ 、 Σ 、 Ξ 粒子などのストレンジ粒子)を構成要素として持つハイパー核の研究が挙げられよう。ハイパー核研究の目的は、核子多体系とバリオン多体系（ハイパー核）の同質性、異質性を通して、原子核全体の理解を深めることにある。

ハイペロンの寿命は 10^{-10} 秒程と非常に短い。従ってハイパー核の研究は、どのように作るか、また、どのような構造を持ち、崩壊していくかという三つの側面を包括的に理解することが大切である。本報告では、その中の崩壊という側面に焦点をあてる。

自由な Λ 粒子の崩壊と比較するため、ここでは Λ ハイパー核のパイオン放出弱崩壊に注目する。自由な Λ 粒子の崩壊と原子核中に束縛された Λ 粒子の崩壊との違いは、後者が原子核中で多体効果を受けることにある。最近、軽い Λ ハイパー核の崩壊幅に対する実験が精密に行われるようになり、自由な Λ 粒子の π^- 幅に比べ、 $^5_\Lambda\text{He}$ の π^- 幅が約0.7倍である一方、 $^4_\Lambda\text{H}$ の π^- 幅は約1.6倍であることが分かった。つまり、 Λ 粒子は原子核中で受ける多体効果のため、 $^5_\Lambda\text{He}$ では崩壊が抑制され、逆に $^4_\Lambda\text{H}$ では崩壊が促進されるわけである。

多体効果のうち、この逆の作用を引き起こす最も可能性のあるものはパウリ効果である。ここで言うパウリ効果とは、ハイパー核内では Λ 粒子にパウリ原理が働かないのに対し、弱崩壊により Λ 粒子が変化した核子にはパウリ原理が働くために生ずる効果を指す。 Λ 粒子は既に核子が詰まっている状態へ壊れられないため、パウリ効果は崩壊を抑制するとナイーブには考えられるが、Dalitzらはこの効果が崩壊を促進する可能性を定性的に議論した[Phys. Rev. 116 (1959) 1312]。しかし彼らの枠組みでは、 $^4_\Lambda\text{H} \Rightarrow ^4\text{He} + \pi^-$ のような二体に壊れるモードにしかこの効果を取り入れられず、また、他の多体効果については全く考

慮されていない。最近の元場氏らの計算では、他の多体効果の考慮はなされているが、パウリ原理による促進の効果については考えていない[Nucl. Phys. A534 (1991) 597]。いづれにせよ、パウリ効果を含めた多体効果を適切に取り入れたパイオン放出弱崩壊幅の計算は現在までないと言える。

最近の実験の進展に伴い、これらの多体効果は十分に議論できる現状にある。また、多重のハイペロンを含む核の研究を進める上で、弱崩壊を定量的に理解することは不可欠である。本報告の目的は、軽い(特に $A=4$ 及び 5 の) Λ ハイパー核のパイオン放出弱崩壊におけるパウリ効果を分析し、その幅を定量的に理解することである。パウリ効果を正確に扱うため、終状態の核子-核間の相対波動関数は共鳴群法[Phys. Rev. 52 (1937) 1083,1107]を用いて求める。共鳴群法と歪曲波インパルス近似を組み合わせることにより、崩壊幅 Γ は以下のように書くことができる。

$$\begin{aligned}\Gamma &\propto \int dE_x k_x \left\langle \mathcal{A} \left(\frac{1}{\sqrt{\hat{N}}} [\phi_N \phi_{3N(^4\text{He})}]^{ST} \phi_{\text{rel}}^{(f)} \right) \left(s_x + ip_x \frac{\sigma \cdot \nabla_x}{k_x^{(0)}} \right) \chi_x^{(-)} \hat{O}_{\Lambda \rightarrow N} \left[\phi_\Lambda \phi_{3\text{H}(^4\text{He})} \right]^S \phi_{\text{rel}}^{(i)} \right\rangle^2 \\ &= \int dE_x k_x \left\langle \phi_{\text{rel}}^{(f)} \left| \sqrt{\hat{N}} \left(s_x + ip_x \frac{\sigma \cdot \nabla_x}{k_x^{(0)}} \right) \chi_x^{(-)} \right| \phi_{\text{rel}}^{(i)} \right\rangle^2.\end{aligned}\quad (1)$$

通常の一問題的な取り扱いでは、ここで現れた $\hat{N}$ は1に置き換えられるが、(1)式では、共鳴群法のノルムである $\hat{N}$ に依存しており、これがパイオン放出弱崩壊におけるパウリ効果を表す。

表1で、ノルムの固有値 γ をまとめる。(1)式から、もし γ が0であれば崩壊は禁止され、もし1であればパウリ効果は崩壊に影響しないことがいえる。従って表1は、核の終状態に依存して、崩壊が抑制(或いは禁止)されたり、促進されたりすることを示す。特に、 $^4_\Lambda\text{H}$ と $^4_\Lambda\text{He}$ の二体崩壊では $N=0$ の固有値が4と非常に大きいことから、崩壊が強く促進される一方、 $^5_\Lambda\text{He}$ では $N=0$ の固有値が0であり、崩壊が禁止される。三体崩壊においても同様の議論ができ、崩壊の促進と抑制が複雑に絡み合う。これらのパウリ効果を正確に取り扱うことにより、 $A=4$ 及び 5 の Λ ハイパー核のパイオン放出弱崩壊幅の計算結果は、現在ある実験値を系統的に再現する(表2)。

まとめると、 $^5_\Lambda\text{He}$ で崩壊を抑制し、 $^4_\Lambda\text{H}$ で崩壊を促進させる主原因はパウリ効果である。本報告では、そのパウリ効果が共鳴群法のノルムとして記述でき、二体、三体崩壊に関わらず同じ枠組みで議論できることを示した。この方法はここで扱った軽い系だけに留まら

ず、もう少し重い系やダブル Λ ハイパー核のパイオン放出弱崩壊にも容易に拡張できるパワフルな方法である。また、ここでは触れなかったが、放出するパイオンの原子核による歪曲効果を考慮し、斥力芯のある現実的な ΛN 間の有効相互作用を使用することがパイオン放出弱崩壊幅を定量的に理解する上で重要であることを示した。

表1.共鳴群法のノルムの固有値。全量子数 N が最も小さい許容状態が基底状態の主成分である。

全量子数 N	0	1	2	3
$^3\text{H } (^3\text{He})\text{-p(n) } (S,T)=(0,0)$	4	0	1.333	0.889
$^3\text{H } (^3\text{He})\text{-p(n) } (S,T)\neq(0,0)$	0	1.333	0.889	1.037
$^4\text{He-p (n)}$	0	1.25	0.938	1.016

表2.質量数 $A=4$ 及び 5 の Λ ハイパー核のパイオン放出弱崩壊幅。単位は自由な Λ 粒子の全崩壊幅である。表中の計算値はパイオンを歪曲波[平面波]で扱ったものである。実験値は、 $^4_\Lambda\text{H}$ に対しては応田氏らのデータ[to appear in Proc. of HYP94 (Vancouver, 1994)]、 $^4_\Lambda\text{He}$ に対してはSchmacherら [JSPS-NSF Joint Seminar (1994) preprint]と応田氏らのデータ、また、 $^5_\Lambda\text{He}$ に対しては、Szymanskiらのデータ[Phys. Rev. C43 (1991) 849]を用いている。

$^4_\Lambda\text{H}$	Ours	Exp.	$^4_\Lambda\text{He}$	Ours	Exp.
$^4\text{He}+\pi^-$	0.62[0.75]	0.69 (+0.12,-0.10)	$^4\text{He}+\pi^0$	0.35[0.43]	0.34 (± 0.11) 0.55 (± 0.07)
$^3\text{H}+\text{p}+\pi^-$	0.20[0.18]		$^3\text{He}+\text{n}+\pi^0$	0.09[0.09]	
$^3\text{He}+\text{n}+\pi^-$	0.08[0.06]		$^3\text{H}+\text{p}+\pi^0$	0.05[0.04]	
π^- total	0.90[0.98]	1.00 (+0.18,-0.15)	π^0 total	0.49[0.55]	0.34 (± 0.11) 0.55 (± 0.07)
$^3\text{H}+\text{n}+\pi^0$	0.19[0.16]	0.69(± 0.02)	$^3\text{He}+\text{p}+\pi^-$	0.30[0.24]	0.34 (± 0.07)
$\Gamma_{\pi^0}/\Gamma_{\pi^-}$	0.21[0.16]		$\Gamma_{\pi^0}/\Gamma_{\pi^-}$	1.66[2.31]	1.00 (± 0.38) 1.6 (± 0.3)
$\Gamma_{\alpha\pi^-}/\Gamma_{\pi^-}$	0.70[0.76]		$\Gamma_{\alpha\pi^0}/\Gamma_{\pi^0}$	0.71[0.77]	
$^5_\Lambda\text{He}\rightarrow^4\text{He}+\text{p}+\pi^-$	0.39 [0.27]	0.44 (+0.11,-0.11)			
$\rightarrow^4\text{He}+\text{n}+\pi^0$	0.20 [0.16]				

学位論文審査の要旨

主査	教授	石川健三
副査	教授	河本昇
副査	助教授	加藤幾芳
副査	助教授	岡部成玄
副査	講師	大西明

学位論文題名

Pionic Weak-Decay of Light Λ -Hypernuclei —Pauli Suppression and Enhancement Effects—

(軽い Λ ハイパー核のパイオン放出弱崩壊
—パウリ原理による抑制と促進の効果—)

最近の原子核物理学は、安定な原子核から不安定な原子核へとその研究対象が拡大しつつある。核子以外に Λ 、 Σ 、 Ξ 粒子などのハイペロンを含む原子核であるハイパー核の研究も、近年大きな発展を遂げてきた新しい研究分野である。安定な原子核が持っていないストレンジネスを持つハイパー核は、人工的に創られなければならないと共に、ハイペロンがおよそ 10^{-10} 秒程度の短い寿命である為に極めて短い時間に崩壊する。しかし、ハイパー核は安定な核にはない新たな構造・存在様式を持つと考えられ、強い相互作用する多体系の構造を解明する上で非常に興味深い研究対象となっている。そこで、ハイパー核の研究は、どのように創るか、また、どのような構造を持ち、崩壊していくかという三つの側面から包括的に行われることが重要な課題となる。

申請者は、実験データが得られつつある軽いハイパー原子核について、これまで生成・構造・崩壊の三つの側面から理論的に研究を行ってきた。本学位論文は、 Λ 粒子を含むハイパー核 ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ 、 ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ 、 ${}^5_{\Lambda}\text{He}$ について、原子核に束縛された Λ 粒子の崩壊を理論的に分析し、原子核における多体効果によって自由な Λ 粒子の崩壊と比べ著しい違いが生ずることを論じたものである。

最近の実験によって、 ${}^5_{\Lambda}\text{He}$ 、 ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ 核の π^- 粒子放出崩壊巾と自由な Λ 粒子の π^- 粒子を伴う崩壊巾の比がそれぞれ約0.7倍と約1.6倍であることが観測され、原子核によって崩壊がある場合は抑制され、ある場合には促進されるという非常に興味深い事実が明らかにされた。理論的には、これまで、原子核の中で崩壊する場合核子間に働くパウリ原理によってその崩壊が抑制されるという議論とともに、量子力学的に粒子の区別ができないことからそれが促進されるというDalitzらによる議論があった。また、原子核内の崩壊では π 粒子の放出と共に核子の放出を伴う三体崩壊の機構も考慮されるべきであり、 π 粒子放出弱崩壊の定量的な理論的分析が待たれていた。

申請者は、共鳴群法を用いて、核内核子と Λ 粒子が崩壊して生成する核子の間に働くパウリ原理の効果を厳密に扱うと同時に、崩壊後の状態が π 粒子-残留核であるという二体過程だけでなく、 π 粒子-放出核子-残留核となる三体崩壊過程をも考慮した歪曲波インパルス近似のもとで π 粒子放出弱崩壊の巾を定量的に導出することを行った。

その結果、原子核多体効果としてのパウリ原理が ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ および ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ 核の二体崩壊では崩壊を促進させる方向に働き、 ${}^5_{\Lambda}\text{He}$ 核では逆に抑制する方向に働くことを厳密に示すことに成功した。さらに、同様な効果が三体崩壊でも働き、 $A=4$ および5の Λ ハイパー核の π 粒子放出弱崩壊について現在得られている実験値を系統的に説明することに成功した。さらに、本研究を通じて、 Λ 粒子と核子との間の相互作用における短距離斥力が π 粒子放出崩壊巾を定量的に理解する上で重要であることを示した。

申請者の研究は、 Λ 粒子を含むハイパー核の弱崩壊現象を記述する上で、パウリ効果を厳密に扱う共鳴群法による計算方法を確立し、より重いハイパー核や二つの Λ 粒子を含むダブルラムダ・ハイパー核の π 粒子放出弱崩壊の研究に重要な足掛かりを与えるものとして国際会議等における招待講演に選ばれるなど既に高く評価されている。本学位論文の内容の一部は既に学術誌に掲載されることが決定しており、残りの部分についても近く学術誌に投稿される予定である。

以上の研究業績により、審査員一同は、申請者が博士（理学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。