

成果報告書

KEK 肥山 詠美子

研究題目：軽いハイパー核の弱崩壊機構の解明

派遣期間：平成 14 年 5 月 1 日～10 月 31 日

研究機関：高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所

研究指導者：赤石 義紀

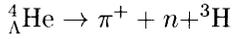
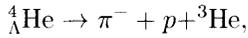
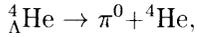
研究課題の内容

ハイパー核原子物理学の中心課題の一つは、ハイペロン核子間 (YN)、ハイペロンハイペロン (YY) 間相互作用を統一的に理解することである。この目的は、核力を含むバリオン間相互作用の統一的理解につながり、核力の理解だけに絞られた通常原子核物理学の研究とは大いに異なるところである。しかしながら、 YN 、 YY 散乱データの極端な少なさのために、これまで提案されてきた YN 、 YY 相互作用は多くの不定性を含んでいる。そこで、この相互作用の解明のためにも、ハイパー核の構造の研究が重要であり、不可欠となる。近年、Ge 検出器を用いた γ 線分光技術の急速な発展のおかげで、ハイパー核の詳細な構造の研究、それに基づくバリオン間相互作用の解明が可能になった。今や、ハイパー核の構造とハイペロン核子相互作用を直結させた研究は、ハイパー核分野において最前線の課題の一つとなっている。

ハイパー核物理のもう一つの中心課題は、陽子・中性子・ハイペロンという多種類からなる新しいバリオン多体系集団の存在様式・運動形態の研究の場をハイパー核が提供することである。ハイペロンそのものの性質が原子核内で、どのように変化するかを調べることが、ハイパー核では非常に興味を持たれている。その研究として、ハイパー核の弱崩壊の研究が活発に行なわれているが、未解決の部分が多い。その中でも、 ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ 、 ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ ハイパー核の弱崩壊の解明が最前線の課題の一つである。この解明のために、KEK や TJLAB で近年実験が行なわれ解析中である。従って、理論的側面からの実験データの解釈が最重要課題となっている。この理論的研究のためには、始状態である ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ 、 ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ を異粒子変換相互作用を用いる 4 体計算に基づいて波動関数を算出すること、そして、終状態である ${}^4\text{He}$ を厳密 4 体問題に基づいて束縛状態だけでなく、散乱状態も含めてその波動関数を算出する必要がある。しかし、これらの 4 体計算の困難さのために、この理論的研究は途上のままであった。報告者は自身で開発した厳密 4 体計算理論を活用して、 ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ 、 ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ の弱崩壊の研究に取り組んだ。以下は、具体的な研究内容である。

具体的な研究内容

以下の崩壊モードの研究を行った。



${}^4_{\Lambda}\text{He}$ から放出される π^- と π^+ の数の比に関して、実験値と簡単な模型による理論値が大幅に異なることが知られており、早期の解決が望まれている。この崩壊モードの研究のためには、始状態である ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ の粒子変換相互作用を用いた 4 体計算による波動関数、及び終状態である ${}^4\text{He}$ である ${}^4\text{He}$ の 4 体計算による波動関数の算出が必要である。まず、始状態の ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ の波動関数と終状態の ${}^4\text{He}$ の波動関数の算出に取り組んだ。

[1] ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ の波動関数の算出

現存する $\Lambda N - \Sigma N$ 結合相互作用を含む現実的 YN 相互作用を用いて、 ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ を $(3N + \Lambda)$ と $(3N + \Sigma)$ の結合 4 体計算を行い、波動関数を算出した。この ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ の 4 体計算は、核子ハイペロン多体系の特徴である粒子変換現象 ($\Lambda N - \Sigma N$) の解明の糸口となる計算である。報告者は、波動関数を算出すると同時に、この 4 体計算から、 $(3N + \Sigma)$ チャネルが ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ を束縛状態として存在させるために重要な役割を担っていることが、確認された。

[2] ${}^4\text{He}$ の波動関数の算出

上記 3 つの崩壊モードの研究を行なうためには、終状態の ${}^4\text{He}$ の基底状態だけでなく、さまざまな励起状態の波動関数を算出することが重要である。そのため、報告者は、 ${}^4\text{He}$ の基底状態、及び励起状態の 4 体計算による波動関数の算出に取り組んだ。この研究の進行中に、非常に興味深い課題に遭遇した。 ${}^4\text{He}$ には、second 0^+ という第一励起状態が実験で観測されている。この第一励起状態の構造は、例えば、4 つの核子がどのような構造を持つのか (breathing modo か、もしくは $3N + N$ 的構造か?)、などの問題が未だに未解決のままである。この構造の解明のためには、4 体問題に基づく研究が要求されるが、励起状態の 4 体問題に基づく研究は困難なために、なされないままであった。しかし、報告者の計算法によってこの未解決の問題を解決に導くことが予想された。また、 ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ の弱崩壊のために、 ${}^4\text{He}$ の第一励起状態の波動関数も必要であるので、弱崩壊の研究と共に、この ${}^4\text{He}$ の第一励起状態の構造研究についても同時に行なうこととした。

現実的 NN 相互作用と現象論的 NN 3 体力を用いて、 ${}^3\text{H}$ 、 ${}^3\text{He}$ 、 ${}^4\text{He}$ の基底状態のエネルギーが実験値を再現するようにする。そして、 ${}^4\text{He}$ の第一励起状態であ

る second 0^+ の 4 体計算を行い、このエネルギーが実験値を再現することを確めた。同時にこの波動関数を算出し、この波動関数を用いて、2 体間 correlation function, 1 粒子 density distribution, 第一励起状態と基底状態間の transition density を算出した。また、この transition density から求めた電子非弾性散乱 form factor の計算を行い、実験値をほぼ再現することを確めた。

この ${}^4\text{He}$ の励起状態の 4 体問題に基づく研究は、報告者によって世界で初めてなされたことになる。この研究を、8 月と 9 月の少数系物理の国際会議の招聘講演で、この 4 体計算における重要性を主張した。現在、この研究については、論文を執筆中であり、1 月末には Physical Review C に投稿予定である。

また、報告者の計算方法で、算出困難とされてきた ${}^4\text{He}$ の励起状態の波動関数も算出できることが分かった。現在、始状態である ${}^4_\Lambda\text{He}$ と終状態の ${}^4\text{He}$ の波動関数を用いて、 ${}^4_\Lambda\text{He} \rightarrow \pi^0 + {}^4\text{He}$ の弱崩壊に取り組んでいる最中である。

[3] 計算法の review 論文の投稿

上記 [2] のように、報告者の計算法は、原子核の基底状態だけでなく、励起状態までにも適用可能であることが明らかになった。この計算法を "Progress Particle Nuclear Physics" にレビュー論文として、投稿中である。

ロスアラモス研究所滞在中の業績

(1) 本人による国際会議講演

- ・ 題名 : Few-body aspects of hypernuclear physics (招聘講演)
会議名 : Second Asia-Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics
場所・期日 : Shanghai, China, August, 2002
- ・ 題名 : Few-body aspects of hypernuclear physics (招聘講演)
会議名 : 18th European Conference on Few-Body Problems in Physics
場所・期日 : Bled, Slovenia, September, 2002
- ・ 題名 : Four-body structure of double Λ hypernuclei
会議名 : APS DNP Fall meeting
場所・期日 : Michigan, U.S.A., October, 2002

(2) 共同研究者による国際会議講演

- ・ 題名 : Four-body structure of $A = 7 \sim 10$ double- Λ hypernuclei
講演者 : 上村正康 (九大・教授)
会議名 : The XVI Particles and Nuclei International Conference (PANIC02)

場所・期日 : Osaka, Japan, Sep. 30 -Oct. 4, 2002

(3) 論文リスト

- "Few-body aspects of hypernuclear physics"
E. Hiyama, M. Kamimura, T. Motoba, T. Yamada and Y. Yamamoto
Few-Body Systems Supplements (Proceedings on the 18th European Conference on Few-Body Problems in Physics), 印刷中.
場所・期日 : Bled, Slovenia, September, 2002
- "Few-body aspects of hypernuclear physics"
E. Hiyama, M. Kamimura, T. Motoba, T. Yamada and Y. Yamamoto
Modern Physics Letter A (Proceedings on the Second Asia-Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics), 印刷中
- "Four-body structure of $A = 7 \sim 10$ double- Λ hypernuclei"
E. Hiyama, M. Kamimura, T. Motoba, T. Yamada and Y. Yamamoto
Nuclear Physics A (Proceedings on the XVI Particles and Nuclei International Conference)、印刷中
- "Coupled-Rearrangement-Channel Gaussian-Basis Variational Method for Precision Few-Body Calculations"
M. Kamimura, E. Hiyama and Y. Kino
Progress Particle Nuclear Physics, 投稿中