

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	鈴木 一輝
論文題目	Search for the $nn\Lambda$ state via the ${}^3\text{H}(e, e' K^+)X$ reaction at JLab JLabにおける ${}^3\text{H}(e, e' K^+)X$ 反応を用いた $nn\Lambda$ 状態の探索		
(論文内容の要旨)			
<p>2013年、ドイツGSI (重イオン科学研究所) のHypHIコラボレーションにより、束縛エネルギーが約0.5 MeVである$nn\Lambda$束縛状態の存在が報告された。アイソシングレット状態 ($I=0$) であるハイパートライトンの束縛エネルギーが約130 keVと非常に小さいことを考慮すると、これまでに得られたハイパー核物理の知識からすると$nn\Lambda$ ($I=1$) 束縛状態の存在を説明することは難しいと考えられる。一方、いくつかの理論計算では、閾値付近における$nn\Lambda$共鳴状態の存在が示唆されている。そのため、束縛領域から共鳴領域まで幅広く探索ができる$nn\Lambda$状態探索実験が待ち望まれていた。電子線を用いたハイパー核生成では、トリチウム標的(pnn)の陽子をΛ粒子に変化させることにより$nn\Lambda$状態を探索することができる。そこで、米国ジェファーソン研究所の実験ホールAにおいて${}^3\text{H}(e, e' K^+)X$反応を用いた$nn\Lambda$状態の探索実験を行った。</p> <p>実験は4.32 GeVの電子ビームを用いて行った。散乱電子とK^+の運動量は既存のスペクトロメータであるHRS-LとHRS-Rを使って測定された。散乱電子とK^+の中心運動量は、$nn\Lambda$生成の運動量領域をカバーするように設定され、それぞれ2.22、1.82 GeV/cであった。また、断面積解析に必要な検出効率やアクセプタンス補正係数などを見積もるために、Geant4を用いて実験データを再現するモンテカルロ・シミュレーションプログラムを新たに開発した。</p> <p>実験の結果、${}^3\text{H}(\gamma^*, K^+)X$反応の微分断面積スペクトルを得ることに成功した。$nn\Lambda$状態の束縛閾値近傍には、いくらかの超過イベントが確認されたが、明確なピーク構造は観測されなかった。そこで、ピーク位置(B_Λ)と崩壊幅(Γ)を理論模型で予想されている値を仮定したスペクトルフィッティングを行い、期待されるバックグラウンド分布以上の過剰量の有無について定量的に議論した。典型的な理論予想値として、$(-B_\Lambda, \Gamma) = (0.25, 0.8), (0.55, 4.7)$ MeVを採用した。フィッティングの結果、3σを超える統計的有意度を持つピーク構造は観測されなかった。そこで微分断面積の上限値を求めた。$(-B_\Lambda, \Gamma) = (0.25, 0.8), (0.55, 4.7)$ MeVを仮定したとき、90%信頼レベルでの上限値はそれぞれ21, 31 nb/srとなった。また、理論予測に依存しない上限値を得るために、様々なB_Λ, Γを用いた場合の断面積上限値も求めた。</p> <p>今回の実験により$nn\Lambda$生成断面積の上限値を初めて得ることに成功した。このことは、$nn\Lambda$という3粒子束縛系が存在しないことを強く示唆する結果となった。この得られた上限値は、Λn相互作用の理論モデルの採り方や小数系計算手法の採り方の是非に、強い制限を与えることが期待される。今後、本実験の結果と直接比較するために$nn\Lambda$生成断面積の理論計算が行われることが強く望まれる。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

原子核と Λ ハイペロン粒子との束縛状態をハイパー核と呼ぶ。その存在は1953年から知られており、約40種類の Λ ハイパー核が見つまっている。その存在限界を調べることは、 Λ 粒子と核子との相互作用のモデルの良い試金石となっている。これまでに知られている Λ ハイパー核には、2粒子の束縛状態は存在せず、3体系において陽子、中性子と Λ 粒子との束縛系として、 $pn\Lambda$ のハイパートライトン(${}_{\Lambda}^3\text{H}$)の存在が知られているのみであった。その束縛エネルギーは、約130 keVと小さい。ところが、2013年、ドイツのGSI研究所のHypHIコラボレーションにより、束縛エネルギーが約0.5 MeVもある $nn\Lambda$ 束縛状態の存在が示唆された。アイソシングレット状態($I=0$)であるハイパートライトンの束縛エネルギーが約130 keVと非常に小さいことを考慮すると、現在のハイパー核物理で $nn\Lambda$ ($I=1$)束縛状態の存在を説明することは困難である。これは、上記の常識を覆すものであった。一方、いくつかの理論計算では、束縛閾値付近における $nn\Lambda$ 共鳴状態の存在が示唆されている。そこで、本研究では、束縛領域から共鳴領域にわたる幅広いエネルギー範囲において、 $nn\Lambda$ 状態の探索実験を行うこととした。(e, e' K⁺)反応による電子線を用いたハイパー核生成の特徴として、トリチウム標的(pnn)を用いることにより、トリチウム中の陽子を Λ 粒子に転換して、 $nn\Lambda$ 状態を生成できるというメリットがある。

そこで、米国ジェファーソン研究所の実験ホールAにて ${}^3\text{H}(e, e' K^+)X$ 反応を用いた $nn\Lambda$ 状態の探索実験を行った。入射電子ビームのエネルギーは4.32 GeVであり、散乱電子とK⁺の運動量は既存の磁気スペクトロメータであるHRS-LとHRS-Rを用いて測定した。散乱電子とK⁺の中心運動量は、 $nn\Lambda$ 生成の運動量領域をカバーするように、それぞれ2.22、1.82 GeV/cとした。また、断面積解析に必要な検出効率や補正係数を見積もるために、Geant4をベースとして実験データを再現するモンテカルロシミュレーションコードを新たに開発した。

実験結果として、 ${}^3\text{H}(\gamma^*, K^+)X$ 反応の励起エネルギー断面積スペクトルを得ることに成功した。 $nn\Lambda$ 状態の束縛閾値近傍でいくらかの超過イベントが確認されたが、明確なピーク構造は観測されなかった。そこで、理論モデルのうちで、ピーク位置(B_{Λ})と崩壊幅(Γ)を与えるようなモデルについてスペクトルフィッティングを行い、予想されるバックグラウンド分布を越えるような過剰量を定量的に議論した。典型的な理論予想として上記の2つのモデルを採用した。フィッティングの結果、 3σ を超える統計的有意度を持つピーク構造は観測されなかった。これより生成微分断面積の上限値として、 $(-B_{\Lambda}, \Gamma) = (0.25, 0.8), (0.55, 4.7)$ MeVを仮定した場合に、それぞれの状態の90%信頼レベルでの生成上限値として、それぞれ21, 31 nb/srという値を得た。また、理論予測に依存しないデータを得るために、様々な B_{Λ} 、 Γ を用いた断面積上限値も評価した。

今回の実験により $nn\Lambda$ 生成断面積の上限値を初めて得ることに成功した。 $nn\Lambda$ 共鳴状態の存在は、 Λn 相互作用のモデルや計算方法に強く影響を与える。今回の結果を用いることで、これらの相互作用モデルや計算方法を制限することが期待できる。本実験の結果と直接比較するための、 $nn\Lambda$ 生成断面積に対する理論計算が強く望まれる。

よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和4年1月14日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降