

論文の内容の要旨

論文題目 Formation and Decay of Light Hypernuclei
in ${}^4\text{He}$ (Stopped K^- , π^\pm) Reactions

${}^4\text{He}$ (静止 K^- , π^\pm) 反応を用いた
軽いハイパー核の生成と崩壊の研究

氏名 応田治彦

静止 K^- 反応による Σ ハイパー核研究

YN(ハイペロン核子) 相互作用の研究は、核子間の相互作用の描像をバリオン – バリオン間に拡張するもので、現代の原子核物理学の最も重要な主題の一つである。然しながら、ハイペロン – 核子の低エネルギーでの散乱実験は極めて困難であり、ハイパー核の構造から、ハイペロン – 原子核間の相互作用についての知見を得て、それを、ハイペロン – 核子間の相互作用と結びつけていくという手法が有効であると考えられる。 Λ ハイパー核については、豊富な実験データが蓄積されて、 Λ 核ポテンシャルの深さや、スピン軌道力に関するデータから多くの知見が得られた。一方で、 Σ ハイパー核については、その実験的研究は極めて不満足な段階にある。主に p 殻の標的を用いた (in-flight K^- , π) 反応による研究で、幅の狭い Σ 核状態の存在の可能性が次々と報告された。 Σ 核は、 $\Sigma N \rightarrow \Lambda N$ の転換過程の存在のために、その幅は一般に非常に大きなものになると考えられていたために、幅の狭い状態の報告は、“ Σ ハイパー核の puzzle” として長年に渡り混乱を招いた。いずれも、極端に低いスペクトルの統計からのやや強引な導出を行っており、近年の統計を上げた再測定では確認されていない。これらの実験は、 p 殻標的を用いて、無反跳 (recoilless) 法による測定を行っているために、 Σ が、 s 軌道に入った状態を生成することができず、 Σ ハイパー核の束縛状態を研究することができないという問題があった。

(静止 K^- , π) 反応を用いたハイパー核の生成は、貴重な K^- ビームを効率的に利用できるために、高統計のスペクトルを得やすいほか、特に、 Σ ハイパー核の生成においては、170 MeV/c 程度となる反応の運動量移行が、 Σ ハイパー核の基底/束縛状態の生成に適していることから、上記の “in-flight” 反応法における実験的困難を除くことが可能である。

特に 4 体系以下の軽い s -shell 核を標的とした場合、直接生の ΣN 相互作用をもとにした理論計算との比較が可能になることから、我々のグループは ${}^4\text{He}$ 標的を用いた静止 K^-

法による Σ ハイパー核の束縛状態の探索実験を行うこととした。

実験の概要

スピン・アイソスピンに依存した Σ^- 核子間の相互作用について調べるためには、特に軽い核を標的とした、 Σ ハイパー核の研究が有効である。4体系の Σ ハイパー核の束縛状態の存在を探索するため、液体 ^4He 標的に、 K^- 中間子を静止させ、(静止 K^-, π^\pm)反応によって放出される荷電 π^\pm 両方の中間子の運動量スペクトルが、偏向電磁石を用いたスペクトロメータ系によって測定された。実験(KEK-PS E167)は、高エネルギー加速器研究機構(KEK)の12GeV-PSのK3ビームラインで行われた。使用されたスペクトロメータは、100 MeV/c–300 MeV/cに渡る広い運動量アクセプタンスを有するために、 Σ ハイパー核の生成の研究と同時に、 Λ ハイパー核(本実験では、 $^4_\Lambda\text{H}$ 及び、 $^4_\Lambda\text{He}$)の生成と崩壊についても同時に測定を行うことができる。この目的のため標的の周りには、NaI(Tl)シンチレータと、薄いプラスチックシンチレータからなる同時計測のためのカウンター系が配置され、ハイパー核の生成・崩壊時に標的から放出される π^0, π^\pm , 陽子を同定することができる。低密度のヘリウム標的を使用した本実験では、 K^- 中間子が、標的中で減速中に標的核と反応を起こしたり、崩壊したりする“in-flight 反応/崩壊”によるバックグラウンドの低減が、正しく静止した K^- からの荷電 π 中間子事象を選別するために極めて重要であった。このため、入射 K^- と、放出 π^\pm 両方の軌跡から反応点を事象毎に再構成して、ヘリウム標的起因の事象を選別するとともに、標的中の π^\pm のエネルギー損失の補正を行った。また、静止した K^- からの反応であることを保証するために、1) K^- のビームライン最下流のカウンターでのエネルギー損失が静止 K^- を仮定して計算されるものと一致することを要請し、さらに2) K^- の入射時間と、 π^\pm の放出時間の差を飛行時間計測(TOF)法で直接測定することによって、(in-flight K^-, π^\pm)反応/崩壊から来るバックグラウンド事象の94%以上を除去することができた。 ^4He (静止 K^-, π^\pm)スペクトル上には、各種の校正用のピークが存在する。これとの比較によって、運動量スペクトルの全域にわたって、2 MeV(FWHM)以下の高いエネルギー分解能が、0.1 MeV以下の絶対精度で実現されていることが確認された。

Σ ハイパー核の束縛状態の発見

^4He (静止 K^-, π^-)スペクトル上で、 Σ の束縛領域にハイペロンの生成や、崩壊など既知のバックグラウンドプロセスでは説明のできない隆起が観測された。一方で、 ^4He (静止 K^-, π^+)スペクトル上では Σ^- の束縛領域には対応する構造は見出されなかった。 Σ の束縛の閾値を揃えた、ハイペロンの生成段階で放出された π^- スペクトル(黒点)と、 π^+ スペクトル(白抜きの点)の比較を図1に示す。 (K^-, π^-) 反応では、Isospin=1/2, 3/2の状態が励起されうるが、 (K^-, π^+) 反応で生成されうる状態は、Isospin=3/2の状態に限られる。さらに、 (K, π) 反応は、始状態のSpinを変えない性質をもっているために、 π^- スペクトル上でのみ観測されたこの状態は、Isospin=1/2, Spin=0の ^4_5He の基底状態の生成のためであると結論できる。これは Σ ハイパー核の束縛状態の存在の最初の発見である。また、 π^- と π^+ のスペクトルの比較から、 Σ^- 核の相互作用が、非常に強いアイソスピン依存性を有することが実験的に初めて確定した。

この実験に先立って、原田等北大のグループによる理論計算が行われており、この分野

で標準的なものとして用いられてきた、Nijmegen の Model D と等価な、 ΣN 相互作用からの 4 体系の変分計算から、 $I=1/2, S=0$ の基底状態が、 (K^-, π^-) スペクトル上のみ現われることが予言されていた。本実験の結果を、定性的によく説明できる理論となっている。ここで見出された、 ${}^4_{\Sigma} \text{He}$ の状態は、 $\Sigma N \rightarrow \Lambda N$ 転換過程のため、束縛エネルギーに比較してより大きな幅を有する。このような状態は、左右非対称な形をスペクトル上で示すことが予想されるため、ピークパラメータを、Breit-Wigner 型のピークの形を仮定して複素エネルギーとして与えるのは妥当でなく、複素波数平面 (complex- k_{Σ^+} plane) 上でのポールの位置として与えるべきである。本実験で得られた π^- スペクトルに関する解析は原田等によって精力的に進められ、 K^- 吸収が主に K^- 原子の s -波吸収によって起こっている場合には、 $k_{\Sigma^+} = -0.335 + 0.399i \text{ fm}^{-1}$ また主に p -波吸収によって起こっている場合には、 $k_{\Sigma^+} = -0.435 + 0.377i \text{ fm}^{-1}$ の状態を仮定したときに、スペクトル全体の形をよく再現できることが判明した。どちらも、Dalitz 等によって批判された “threshold cusp” の状態ではなく、束縛状態に対応するポール位置となっている。本実験の後で BNL で行われた (in-flight K^-, π) 反応によって確認された ${}^4_{\Sigma} \text{He}$ のピークと無矛盾な解釈となるのは後者の場合だけである。この場合の理論計算による、スペクトルのフィットの結果を、図 2 に示す。0⁺ と書かれた非対称な形で示された線が、 ${}^4_{\Sigma} \text{He}$ 状態の生成に対応している。

s/p -波いずれからの吸収を仮定した場合でも、最初に原田等が Nijmegen Model D と等価な ΣN 相互作用を元に作った、 Σ -核の potential に対してその引力強度を 20% ほど弱くし、またその吸収項を 1.6–2.2 倍ほど大きくしないと、観測された π^- スペクトルは再現することができない。一方、 ${}^4 \text{He}$ (静止 K^-, π^+) スペクトルの形の詳細な理論的解析から、引力的な $\Sigma^- - {}^3 \text{H}$ 相互作用は否定されることが判明した。

${}^4_{\Lambda} \text{H}$ 及び ${}^4_{\Lambda} \text{He}$ ハイパー核の弱崩壊

スペクトロメータの広い運動量アクセプタンスのおかげで、 ${}^4 \text{He}$ (静止 K^-, π^-) スペクトル上に、 ${}^4_{\Lambda} \text{He}$ の生成と、 ${}^4_{\Lambda} \text{H} \rightarrow {}^4 \text{He} + \pi^-$ 2 体崩壊に伴うピーク (各々 255 MeV/c, 133 MeV/c) が明瞭に観測されたので、その弱崩壊機構に関する解析を行った。 K^- の静止時間と、弱崩壊によって生じる π^- /陽子の放出時間差を直接 TOF 法で測定することによって、 ${}^4_{\Lambda} \text{H}$ と、 ${}^4_{\Lambda} \text{He}$ の寿命が各々 194^{+24}_{-26} ps, 256 ± 27 ps と何れも初めて高精度で測定された。また、標的の周囲のカウンター群との同時計測の結果から、 ${}^4_{\Lambda} \text{He}$ が、 π^0/π^- を放出して崩壊する確率をおのおの $51.5 \pm 3.5\%$, $32.2 \pm 3.4\%$ と高い精度で決定できた。

これら、寿命と、 π 崩壊分岐比から得られた ${}^4_{\Lambda} \text{H}$ 及び ${}^4_{\Lambda} \text{He}$ の π 中間子崩壊幅は、元場・布施等による理論計算と比較した結果、 Λ -($A=3$) 核間のポテンシャルが、中心斥力を持っており、 Λ が核の外側に押し出されていると考えないとその大きさが説明できないことが示された。

また、新たに高精度で得られた π 中間子崩壊に関するデータをもとに、 ${}^4_{\Lambda} \text{H}$ と、 ${}^4_{\Lambda} \text{He}$ の非中間子崩壊幅に関する過去の実験データも用いた再検討を行った。誤差は大きいものの、両者の非中間子崩壊幅はほぼ等しいという結果が新たに得られた。これは、 Λ ハイパー核の非中間子崩壊において、 $\Delta I=1/2$ 則が成り立っているとする仮定と無矛盾な結果である。さらに本実験では、 ${}^4_{\Lambda} \text{He}$ の非中間子崩壊が圧倒的に、 $\Lambda p \rightarrow np$ 崩壊モードから起こっていることが判明した。 ${}^5_{\Lambda} \text{He}$, ${}^{12}_{\Lambda} \text{C}$ ら他のハイパー核に対する過去の実験データと、今回の結果を同時に無矛盾に説明するためには、非中間子崩壊は圧倒的に、 ${}^3 \text{S}_1$ の ΛN 始状態から起こると仮定しなければならない。

Comparison of π^- and π^+ Spectra

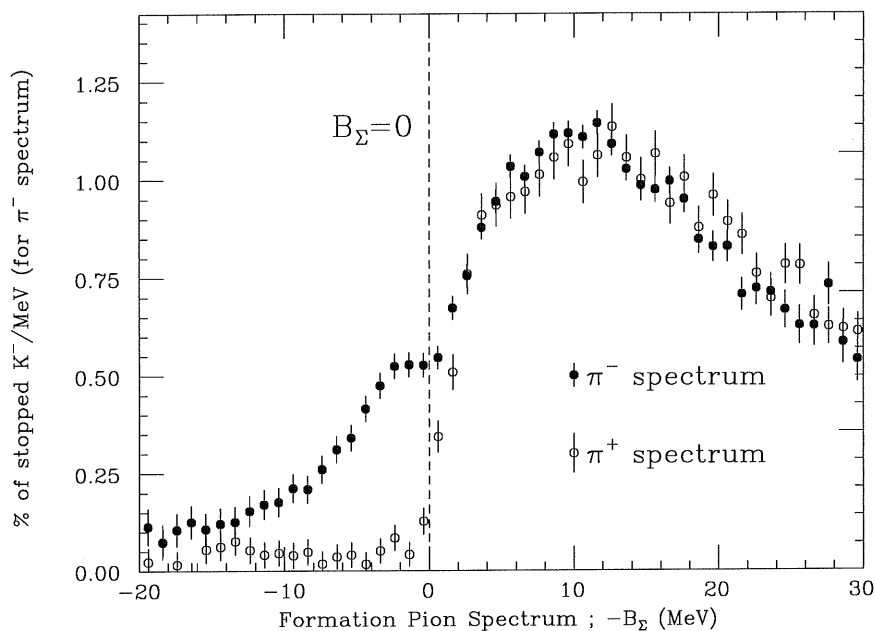


Figure 1: 4 (静止 K^- , π^-) スペクトル (黒点) と、 4 (静止 K^- , π^+) スペクトル (白抜きの点) の、 Σ 領域の比較。直接比較を行うために、 Σ の束縛の閾値を合わせてプロットしてある。

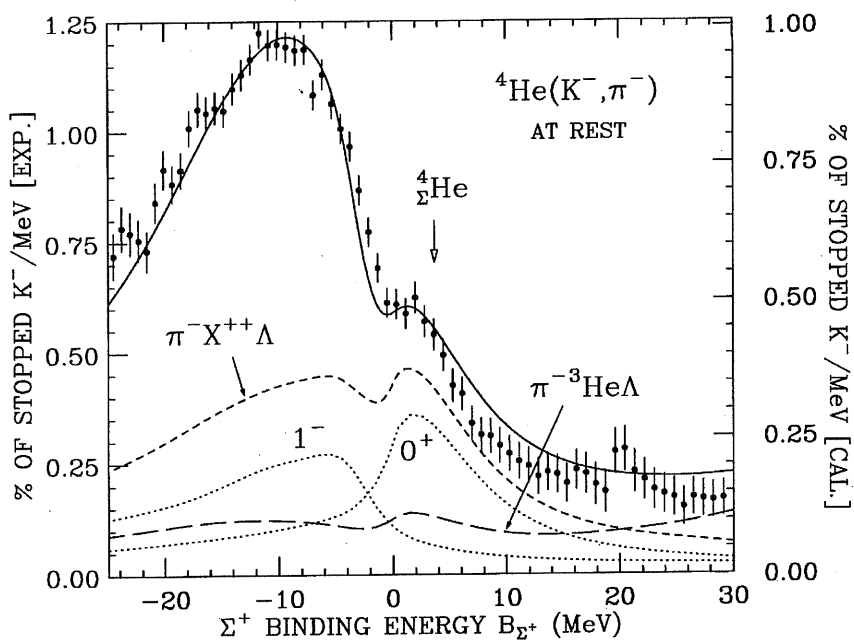


Figure 2: 原田の理論計算による、 π^- スペクトルのフィットの様子。 K^- 吸収は主に p^- 状態から起こると仮定し、複素波数平面上でのポールの位置を $k_{\Sigma^+} = -0.435 + 0.377i \text{ fm}^{-1}$ と仮定している。 0^+ と書かれた線に対応するのが、 ${}^4_{\Sigma}$ He 状態に対応する寄与である。