

論文の内容の要旨

論文題目

Quasifree Ξ^- Production in the ${}^9\text{Be}(K^-, K^+)$ Reaction

(${}^9\text{Be}(K^-, K^+)$ 反応を用いた準自由 Ξ^- 生成の研究)

氏名 玉川 徹

核子間 (NN) 相互作用 (核力) は、豊富な散乱実験データを基に、50 年以上に渡って研究が行われてきた。幾つかの現実的な核力ポテンシャルが中間子交換機構を基に構築され、実験事実を良く説明してきた。また、核力にはその短距離領域に強い斥力芯が存在することが位相差解析からわかっており、この起源は核子のより基本的な構成粒子であるクォークの自由度を考えたモデルにより良く説明されている。近年、核力の研究で得られたこれらの知識を、他のバリオン間相互作用に拡張する試みが行われている。今のところ、ストレンジネス量子数 (S) を含んだバリオンであるハイペロンと核子間及び、ハイペロン間の相互作用が活発に研究されている。これらの研究は、ストレンジクォークという新たな自由度が、核力で得た知識にどのような変更を強いるのかを通して、バリオン間相互作用の本質や起源に迫るといえるものである。

実験的にバリオン間相互作用を研究するには、バリオン間の散乱実験を行うことが重要である。しかし、ハイペロンの寿命が非常に短いことから、散乱実験がほとんどおこなわれていないのが現状である。 $S = -1$ 系 (ΛN , ΣN 等) に関しては、最近新たな散乱実験がおこなわれ始め、また、 $\Lambda(\Sigma)$ ハイペロンを原子核中に束縛した $\Lambda(\Sigma)$ ハイパー核の構造を研究することにより、相互作用のスピンの依存性など、徐々にではあるがデータがたまりつつある。一方、さらにストレンジネス量子数を増やした $S = -2$ 系 (ΞN , $\Lambda\Lambda$, $\Lambda\Sigma$ 等) に関しては、実験結果の不足から、その相互作用の性質は全く分っていない。このような状況のもと、 $S = -2$ 系における相互作用の実験的研究の第一歩として、 ${}^9\text{Be}(K^-, K^+)$ 反応を用いた準自由 Ξ^- 生成を通して、 Ξ^- と核子の相互作用を研究することにした。

これまで、素過程で Ξ^- を生成する場合、 $p(K^-, K^+)\Xi^-$ 反応がよく用いられてきた。今回の実験は原子核を標的とするが、素過程における Ξ^- 生成と同じ運動量領域の (K^-, K^+) 反応をとら

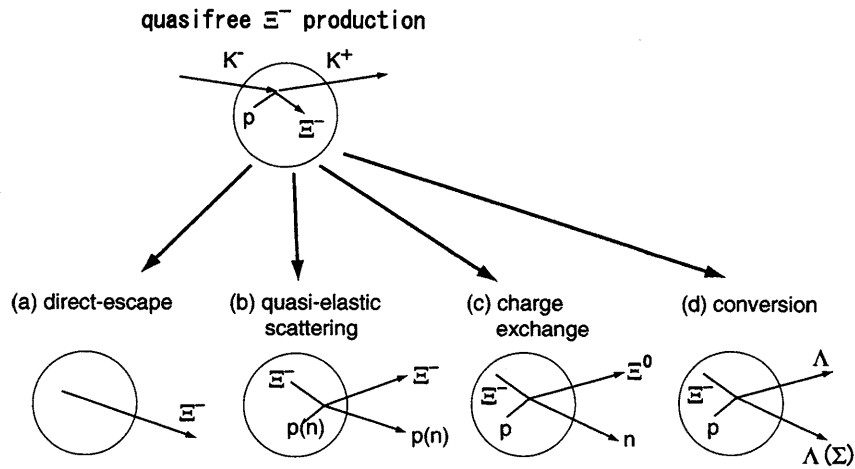


図 1: 古典的なカスケード描像。準自由反応で生成された Ξ^- が、核外に放出されるまでに、核子と相互作用を行う。

えることにより $S = -2$ 系を生成し、そこから放出される Ξ^- をとらえてやる。原子核標的における Ξ^- 生成と、 Ξ^- の原子核中での振る舞いを実験データと比較するために、古典的なカスケード描像が成り立つと考える (図 1)。 Ξ^- が準自由 (K^-, K^+) 反応により原子核中で生成され、その Ξ^- が原子核中を走行する間に核子と相互作用を起こすというモデルである。このようなモデルは、原子核中の核子や Λ ハイペロンの振る舞いを説明するのに成功している。今回我々は、終状態に Ξ^- を含む事象 (図 1.(a), (b)) を取り扱うこととした。

放出された Ξ^- をとらえるために、我々は、大立体角を覆う円筒型検出器系 (CDS) を新たに建設した。 Ξ^- は、その崩壊粒子 ($\Xi^- \rightarrow \Lambda p$, $\Lambda \rightarrow p\pi^-$ で最終的に残る p, π^-, π^-) から不変質量を構成して同定するが、そのためには、崩壊粒子を大立体角で捕まえることが重要である。また、 $S = -2$ 系の生成断面積は数 $10 \mu\text{b}/\text{sr}$ と小さいことから、大強度の K^- ビームを用いた実験を行うことが不可欠である。 CDS は主飛跡検出器にドリフトチェンバを用いていることから、高計数率に耐えることができ、統計量を増やすことができるという特徴がある。

実験は、ブルックヘブン国立研究所 (米国) AGS 加速器の大強度 K 中間子ビームライン (D6) を用いておこなわれた。 D6 ビームラインから供給される、強度 $6.0 \times 10^6 K^-/\text{spill}$ 、運動量 $1.8 \text{ GeV}/c$ (広がり $\pm 3\%$ FWHM) の K^- は、CDS の中心に置かれた標的に当り、 (K^-, K^+) 反応により、 $S = -2$ 系を生成する。 放出された K^+ は、前方に置かれた K^+ スペクトロメータでとらえられる。 K^+ スペクトロメータは、ビームに対して 5° 付近に放出された K^+ を、立体角 20 msr でとらえられるようにセットされている。 入射 K^- はビームに混入している π^- から、飛行時間測定により分離され、 π^- の混入率は 1% 以下に抑えられている。 放出された K^+ は、飛行時間測定と飛行経路測定を用いて粒子質量を求めることにより、 π^+ や p から分離される。 π^+ や p の混入率は 1% 以下に抑えられている。

このように同定された (K^-, K^+) 反応より、 ^9Be 、 ^{12}C 、proton における (K^-, K^+) 反応断面

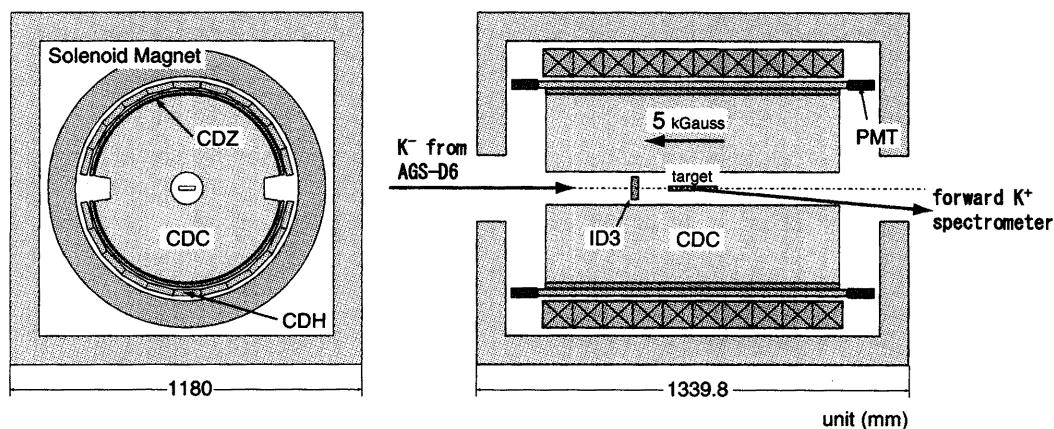


図 2: 円筒型検出器系。粒子飛跡検出用ドリフトチェンバー (CDC)、Z 位置検出用ストリップチェンバー (CDZ)、粒子飛行時間検出用ホドスコープ (CDH) から成る。全測定器は、ビームと逆方向にかけられた 5 kG のソレノイド磁場中に置かれている。

積 (ただし前方; θ_{K^+} に対して 1.5° から 8.5° の平均) が求められた。それぞれ、 $d\sigma/d\Omega = 65.4 \pm 4.2(stat) \pm 3.3(syst)$ 、 $92.7 \pm 10.6(stat) \pm 5.4(syst)$ 、 $30.8 \pm 3.2(stat) \pm 1.8(syst) \mu\text{b}/\text{sr}$ であった。これらの断面積の質量数 (A) 依存性を求めると、 $(d\sigma/d\Omega)_A = A^\alpha \times (d\sigma/d\Omega)_{\text{proton}}$ に対し、 $\alpha = 0.37 \pm 0.06$ という結果を得た。これは、過去により重い原子核に対して測定された依存性 ($\alpha = 0.38 \pm 0.03$) と誤差の範囲内で一致している。

CDS の構成を図 2 に示す。CDC は半径 30cm の円筒中に 12 の粒子位置読み出し層を持つ。中心から数えて第 4 層から 6 層と第 10 層から 12 層の読み出しワイヤーは、ビーム軸に平行に張られており、第 1 層から 3 層と第 7 層から 9 層の読み出しワイヤーは、ビーム軸に対して 3° から 5° の角度を付けて張られている。これにより、CDC はビームに垂直な面内だけでなく、3 次元的に粒子飛跡の再構成を行うことができる。また、低運動量の粒子を精度よくとらえるために、ヘリウム 50%、エタン 50% のガスを用い、物質量を下げることにより、検出器中でのエネルギー損失を抑えている。CDC の空間分解能は $240 \mu\text{m}$ (rms)、角度分解能として $\Delta\theta = 2^\circ$ (rms)、 $\Delta\phi = 1.2^\circ$ (rms)、運動量分解能として、 $dP/P = 3.3\%$ (rms; 100 MeV/c 粒子に対し) が得られた。また、バーテックス分解能として、 $\Delta X = \Delta Y = 3.0 \text{ mm}$ 、 $\Delta Z = 3.3 \text{ mm}$ が得られた。

同定された (K^-, K^+) 事象のうち、同時に CDS で Ξ^- が再構成された事象を選び出すことにより、 ${}^9\text{Be}(K^-, K^+\Xi^-)X$ 反応の断面積を求めた。これにより、(K^-, K^+) 反応で Ξ^- が放出される確率が求められ、 $R_{\text{emit}} = 78.1 \pm 10.1(stat) \pm 7.8(syst)\%$ という値を得た。(K^-, K^+) 反応により Ξ^- が原子核中で生成されると仮定し、この放出確率より、 Ξ^- の原子核中での吸収 ($\Xi^-p \rightarrow \Xi^0n$ もしくは $\Xi^-p \rightarrow \Lambda\Lambda$ による) に対する平均自由行程を求めると、 $\lambda_{\text{abs}} = 3.4^{+3.3}_{-1.8}(stat)^{+2.5}_{-1.1}(syst) \text{ fm}$ という値を得た。ちなみに、今見ている Ξ^- の生成直後の運動量は、中心値が約 550 MeV/c、広がりが約 150 MeV/c(σ) である。

再構成した Ξ^- の角分布をモンテカルロシミュレーションの結果と比較したところ、核子のフェ

ルミ運動から予想される以上の大角度(ビーム軸に対しての極角 θ_{Ξ^-} が大きい部分)に Ξ^- が放出されていることがわかった。古典的なカスケード描像のもとで、これらの Ξ^- は、 (K^-, K^+) 反応で生成された後、原子核中の核子と再度衝突(準弾性衝突)したために大角度に放出されたと解釈することができる。そこで、直接放出された Ξ^- と、準弾性散乱をした Ξ^- の分離を試みた。この分離は、 $p(K^-, K^+)\Xi^-$ 反応を仮定して計算される Ξ^- の方向と、CDSで再構成された Ξ^- の方向のなす角(コリニアリティー)分布を用いておこなった(図3)。

この分離により、 ${}^9\text{Be}(K^-, K^+)$ 反応に対する Ξ^- 直接放出の確率として $R_{\text{escape}} = 63.6 \pm 8.2\%$ を、準弾性散乱の確率として $R_{\text{scat}} = 14.5 \pm 2.6\%$ を得た。 R_{scat} とアイコンナル近似を用いることにより、原子核中での Ξ^- と核子の準弾性散乱断面積として、 $\hat{\sigma}_{\Xi^-N} = 20.9 \pm 4.5(\text{stat})_{-2.4}^{+2.5}(\text{syst})$ mb が得られた。この値を自由空間における弾性散乱断面積に直すために、原子核効果としてパウリブロッキングと Ξ^- -原子核ポテンシャルを考慮し、補正をおこなった。その結果として、 $\sigma_{\Xi^-N} = 30.7 \pm 6.7(\text{stat})_{-3.5}^{+3.7}(\text{syst})$ mb が得られた。この値を他のバリオン-核子弾性散乱断面積と比較してみると、 NN 、 ΛN 、 ΣN 、と同じオーダーであることがわかった。また、 σ_{Ξ^-N} と λ_{abs} から、 Ξ^- の原子核中での平均自由行程が得られ、その値は $\lambda_{\Xi^-} = 1.7_{-0.4}^{+0.6}(\text{stat})_{-0.4}^{+0.6}(\text{syst})$ fm であった。

一方、我々は Ξ^- と p の両方を終状態に含む事象 ${}^9\text{Be}(K^-, K^+\Xi^-p)X$ も測定しており、その起源を Ξ^-p 散乱として、 ${}^9\text{Be}(K^-, K^+)X$ 事象に対する確率を求めた。その結果 $R_{\Xi^-p \text{ scat}} = 5.8 \pm 3.5(\text{stat}) \pm 1.6(\text{syst})\%$ という値を得た。上で求めた R_{scat} は $R_{\Xi^-p \text{ scat}}$ と $R_{\Xi^-n \text{ scat}}$ の和であるはずなので、 $R_{\Xi^-n \text{ scat}} = R_{\text{scat}} - R_{\Xi^-p \text{ scat}} = 8.7 \pm 4.4(\text{stat}) \pm 3.1(\text{syst})\%$ という値が得られた。この結果から、アイコンナル近似を用いて、原子核中における Ξ^-p 、 Ξ^-n 準弾性散乱断面積を求めると、 $\hat{\sigma}_{\Xi^-p} = 19.8 \pm 12.9(\text{stat})_{-5.8}^{+6.0}(\text{syst})$ mb、 $\hat{\sigma}_{\Xi^-n} = 18.5 \pm 10.4(\text{stat})_{-3.7}^{+3.9}(\text{syst})$ mb という値が得られた。原子核効果を補正した結果、 Ξ^-p 、 Ξ^-n の自由空間における弾性散乱断面積は、 $\sigma_{\Xi^-p} = 29.1 \pm 19.0(\text{stat})_{-8.5}^{+8.8}(\text{syst})$ mb、 $\sigma_{\Xi^-n} = 27.1 \pm 15.3(\text{stat})_{-5.5}^{+5.7}(\text{syst})$ mb という値を得た。これから、 σ_{Ξ^-p} と σ_{Ξ^-n} は同程度のオーダーであるという結論が得られた。

以上の結果は、全く実験データの無い $S = -2$ 系において、相互作用断面積に関する初めての情報を与えたという意味で重要である。これらの結果は、 $S = -2$ 系における今後の理論構築に制限を与えるものである。

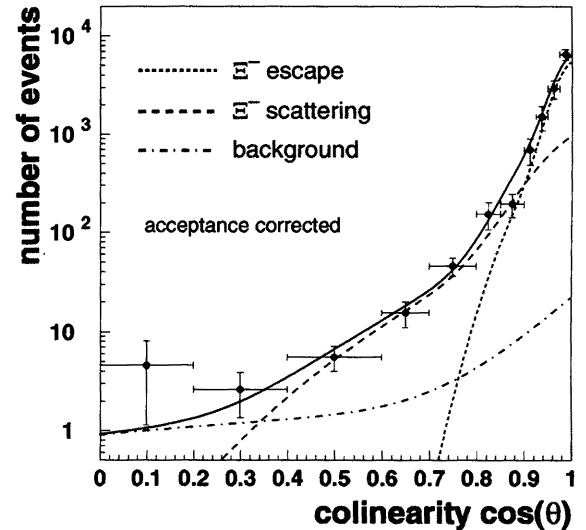


図3: (K^-, K^+) から予想される Ξ^- の方向と、CDSにより再構成された Ξ^- の方向のコリニアリティー分布。実線は、直接放出(点線)と準弾性散乱(破線)及び、バックグラウンド(一点鎖線)によるフィッティングの結果を表している。