

論文内容の要旨

論文題目 Decay Asymmetry in Non-mesonic Weak Decay of Light Λ
Hypernuclei

(軽いラムダハイパー核の非中間子弱崩壊における非対称度の研究)

氏名 丸田 朋史

本研究では、 Λ ハイパー核における非中間子弱崩壊 (NMWD) の反応機構の解明を目的として、スピン偏極した Λ ハイパー核の崩壊モードにおける陽子の非対称度パラメータを測定した。 Λ 粒子を含む原子核である Λ ハイパー核の基底状態は弱い相互作用により崩壊する。この Λ 粒子は、真空中では中間子崩壊モード ($\Lambda \rightarrow \pi N$) により崩壊する。この崩壊ではいわゆる $\Delta I = 1/2$ 則が現象論的に成り立っていることが知られている。これは崩壊において $\Delta I = 1/2$ の振幅が $\Delta I = 3/2$ の振幅に比べて 20 倍程度大きいと言う経験則である。このため Λ ハイペロンの崩壊において、 $\Lambda \rightarrow p\pi^-$ と $\Lambda \rightarrow n\pi^0$ の分岐比は 2 : 1 となる (実験的には 63.9 % : 35.8 %)。しかしこの崩壊モードでは運動量移行が少ないため ($\Delta q \sim 100 \text{ MeV}/c$)、原子核中ではパウリの排他律によりこの崩壊モードは強く抑制され、代わりに運動量移行の大きい NMWD モード ($\Delta q \sim 400 \text{ MeV}/c$) が主となる。この崩壊モードでは $\Delta I = 1/2$ 則が成り立っているかどうかも含め、反応機構がまだ良く理解されていない。この研究では、 s -殻 Λ ハイパー核である ${}^5_{\Lambda}\text{He}$ についてこれまでに無い高統計で精度良く非対称度パラメータを測定し、初めて陽子と中性子の同時計測条件下でこれを決定することに成功した。また s -殻の ${}^5_{\Lambda}\text{He}$ と p -殻 (${}^{12}_{\Lambda}\text{C}$, ${}^{11}_{\Lambda}\text{B}$) の測定結果について比較を行い、反応機構に差があるかどうかを調べた。

Λ ハイパー核の非中間子弱崩壊の前後でストレンジネス量子数が変化するため、強い相互作用の影響を受けずに、バリオン-バリオン間の弱い相互作用における、パリティ保存項と非保存項を同時に測定することが可能である。これは、核子・核子間では強い相互作用のために、弱い相互作用におけるパリティ保存項の研究が困難である事情と大きく異なる点である。

本実験 (E462、E508) は、高エネルギー加速器研究機構にある 12-GeV 陽子シンクロトロン の K6 ビームラインで行った。これらの実験では ${}^5_{\Lambda}\text{He}$ (E462) 及び ${}^{12}_{\Lambda}\text{C}/{}^{11}_{\Lambda}\text{B}$ を (π^+ , K^+) 反応によ

り生成し、過去の実験に比べて 10 倍近いデータを収集することに成功した。また高い精度で基底状態のハイパー核を同定するために、 (π^+, K^+) 反応により放出された K^+ 中間子の運動量を、100 msr の大立体角、2 MeV(FWHM) の高分解能を誇る SKS スペクトロメータにより測定した。 (π^+, K^+) 反応で生成されたハイパー核は大きく偏極することが知られており、これにより崩壊幅のみならず、非対称度の測定を同時に行うことが可能である。本実験では Λ ハイパー核の偏極軸となる実験標的の上下方向と、これから外れた 90° 方向 (右側) に、崩壊粒子検出器群を配置し、中性粒子と荷電粒子の同時測定を行った。この検出器群は全立体角の約 30 % を覆っている。

実験で得られた ${}^5_{\Lambda}\text{He}$ と ${}^{12}_{\Lambda}\text{C}$ の励起エネルギースペクトルを図 1 に示す。どちらの場合にも基底状態がピークとなって観測され、容易に同定することが出来る。また、 ${}^{12}_{\Lambda}\text{C}$ のスペクトルにある励起エネルギー 10 MeV のあたりのピークは Λ が p -軌道にいる状態で、強い相互作用で陽子を放出し、 ${}^{11}_{\Lambda}\text{B}$ に崩壊することが知られている。したがって、このピークを選ぶことにより ${}^{11}_{\Lambda}\text{B}$ の測定も行った。図 2 及び図 3 に ${}^5_{\Lambda}\text{He}$ の基底状態から放出された、中性粒子と荷電粒子の粒子識別の様子を示す。非中間子崩壊からの陽子と中性子を小さい混入率で同定した。更に NMWD を測定する実験では初めて、重陽子を測定することに成功した。

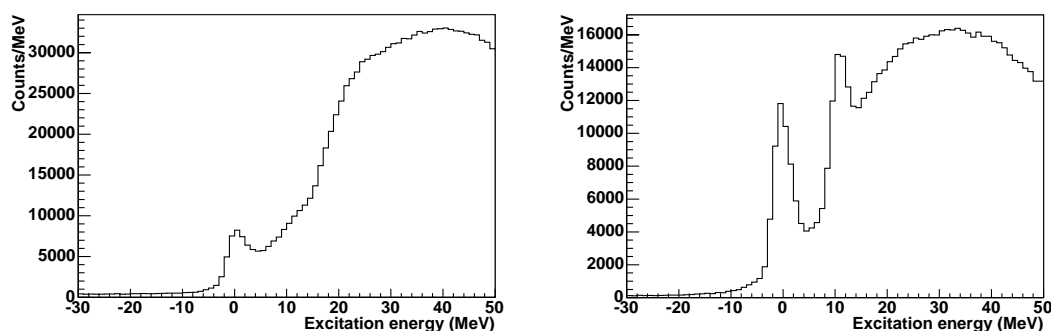


図 1: ${}^5_{\Lambda}\text{He}$ (左) と ${}^{12}_{\Lambda}\text{C}$ (右) の励起エネルギースペクトル。それぞれ基底状態のピークが良く識別されている。 ${}^{12}_{\Lambda}\text{C}$ のスペクトルで励起エネルギー 10 MeV の辺りにあるピークは Λ が p -軌道にいる状態で、陽子を放出して ${}^{11}_{\Lambda}\text{B}$ に崩壊する。

崩壊粒子の解析では、まず初めにハイパー核の崩壊により放出された、陽子と π 中間子の非対称度を求めた。この量は粒子が Λ の偏極方向に対してどの程度偏って放出されたかを示す量であり、上下それぞれの崩壊粒子検出器群で測定された崩壊粒子数と、 (π^+, K^+) 反応により散乱された K^+ 中間子が左右に散乱された数から、四重積により求められる。この方法では、粒子の放出方向による検出効率やアクセプタンスの違いが相殺される。確認のため (π^+, p) 反応により放出された、陽子と中間子の非対称度を求めた。この反応は強い相互作用による反応なので、非対称度はゼロになることが期待される。陽子及び中間子どちらの場合においても、偏りは 0.3% 以下と非常に低いことが確認できた。

非対称度 (A) と非対称度パラメータ (α)、 Λ の偏極 (P_{Λ}) の間には $A = \alpha P_{\Lambda}$ という関係がある。 ${}^5_{\Lambda}\text{He}$ は Λ が $J^P = 0^+$ の ${}^4\text{He}$ に束縛された系であるため、中間子弱崩壊における中間子の非対称度パラメータ ($\alpha_{\pi^-}^M$) は、自由空間におけるそれと、ほぼ同じであると考えることが出来る。自由空間での中間子の非対称度パラメータは良く知られているので ($\alpha_{\pi^-}^M = -0.642 \pm 0.013$)、この値を用いて偏極の大きさを中間子弱崩壊から求めた。一方、 ${}^{12}_{\Lambda}\text{C}$ に関しては励起状態から γ 線を放出して、基底状態に遷移する場合に減偏極が起こるので、糸永氏らによる理論計算の値を用いた。

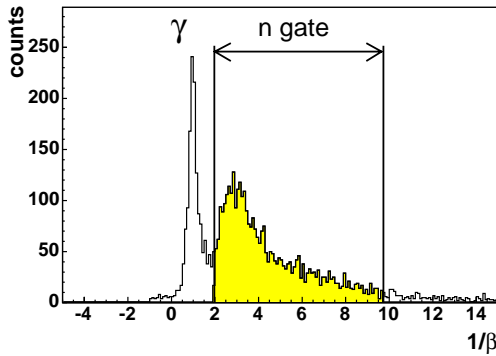


図 2: 中性粒子の粒子識別: 中性子と γ 線が良く分離できている。中性子のエネルギーは 5~150 MeV に相当する範囲を選択した。

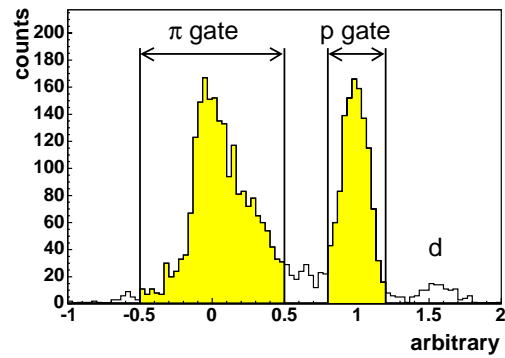


図 3: 荷電粒子の粒子識別: 陽子と π 中間子、重陽子がよく分離できている。

図 4 に ${}^5_{\Lambda}\text{He}$ の測定で得られた 3 つの散乱角における陽子の非対称度を縦軸、偏極の大きさを横軸に示す。散乱角が小さいデータは Λ の偏極方向の分解能が悪いと考えられるので、 $6^\circ \sim 15^\circ$ の結果をフィットして非対称度パラメータを求めた。実線はフィットの結果、黄色の領域は誤差の範囲であり、それぞれ $\alpha_p^{NM}({}^5_{\Lambda}\text{He}) = 0.07 \pm 0.08^{+0.08}_{-0.00}$ となった。また、NMWD は二体崩壊であるので、陽子と中性子は反対方向に放出されると思われる。従って中性子と陽子が反対方向に放出された事象のみを選んだ場合、 α_p^{NM} は 0.30 ± 0.26 となり、いずれの場合においてもゼロに近い値を示唆している。一方、図 5 に ${}^{12}_{\Lambda}\text{C}$ 測定結果を示す。青いデータは ${}^{12}_{\Lambda}\text{C}$ の結果、赤いデータは ${}^{11}_{\Lambda}\text{B}$ の結果である。二つのハイパー核において、反応機構が大きく異なるとは考えにくいので、平均をとり $\alpha_p^{NM}({}^{12}_{\Lambda}\text{C}/{}^{11}_{\Lambda}\text{B}) = -0.16 \pm 0.28^{+0.18}_{-0.00}$ を得た。この値は ${}^5_{\Lambda}\text{He}$ と近い値を示しており、 s -殻、 p -殻核における反応機構に差は無いと考えられる。

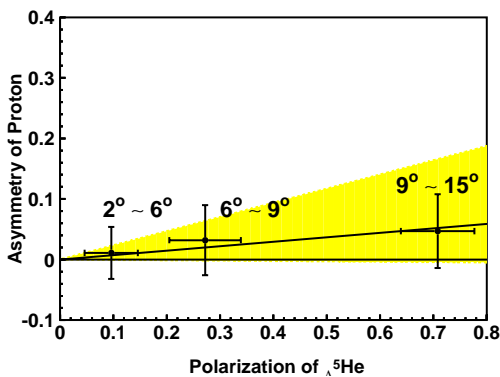


図 4: ${}^5_{\Lambda}\text{He}$ に対する陽子の非対称度の測定結果。実線はフィットの結果、黄色の領域は誤差の範囲を示す。

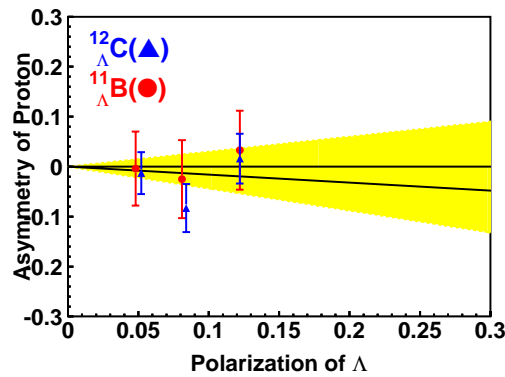


図 5: p -殻核に対する陽子の非対称度の測定結果。青いデータは ${}^{12}_{\Lambda}\text{C}$ 、赤いデータは ${}^{11}_{\Lambda}\text{B}$ の結果を示す。

もう一つの重要な測定量に Γ_n/Γ_p 比がある。これは NMWD の二つの崩壊モード ($\Lambda n \rightarrow nn/\Lambda p \rightarrow np$) の崩壊幅の比を取った値である。本実験では ${}^5_{\Lambda}\text{He}$ 及び ${}^{12}_{\Lambda}\text{C}$ において、それぞれ $0.45 \pm 0.11 \pm 0.03$ 、 $0.51 \pm 0.13 \pm 0.04$ を得た。この結果はバリオン間の相互作用を π, K, ρ, ω 等の中間子が担っているという中間子交換模型や、短距離においてクォーク間で直接相互作用するダイレクトクォーク模型で良く再現できる。しかしながら、これらの模型では α_p^{NM} は大きなマイナスの値を示しており ($-0.6 \sim -0.7$)、我々の結果を再現することが困難である。最近では、 Γ_n/Γ_p 比と α_p^{NM} の実験値を同時に再現する π, K 中間子交換模型+DQ 模型に σ 中間子を取り入れた模型等が提唱されている。