

中性子星核物質を探る 2 つの実験

KEK 素核研 高橋俊行

中性子星内部のような中性子を主とする高密度の核物質では、中性子のフェルミエネルギーが Λ 粒子などのハイペロンと中性子の質量差を超えるため、ハイペロンなどストレンジクォークを含むハドロンが出現すると考えられる。最近 2 倍の太陽質量をもつ中性子星が発見され^[1]、ハイペロンが出現する状態方程式 (EOS) ではこの質量を支えられないなど上記と矛盾する議論もあり EOS への関心が高まっている。ストレンジネスが出現する EOS の構築には、ハイペロンの相互作用、特に中性子過剰な核物質中での相互作用ポテンシャルの情報が必要不可欠である。最近 J-PARC ハドロン施設 K1.8 ビームラインで行われた 2 つの実験は、中性子星核物質に関する実験である。データ解析が進み、興味深い結果が出つつある。今回はこれらの Preliminary な結果について報告する。

2012 年 12 月～2013 年 1 月にデータを取得した E10 実験 (Study on Λ -Hyper nuclei with the Charge-Exchange Reactions, 実験責任者 阪大理 阪口篤志) は、1.2 GeV/c のビームを用いての ${}^6\text{Li}(\pi^-, K^+)$ 反応による中性子過剰 Λ ハイパー核 ${}^6_\Lambda\text{H}$ の分光実験である。 ${}^6_\Lambda\text{H}$ は非束縛 (共鳴状態) の中性子過剰核 ${}^5\text{H}$ に Λ 粒子を加えた原子核で、中性子星中心部の核物質のミニチュア版である。 Λ 粒子の引力効果 ("glue-like role" と呼ぶ) により束縛し、更に、中性子過剰環境でコヒーレントに効く $\Lambda\text{N}-\Sigma\text{N}$ 混合による三体力効果によって更に束縛すると理論予想^[2]がある (図 1)。また、最近 FINUDA グループによって、 ${}^6\text{Li}(\text{stopped-}K^-, \pi^+)$ 反応とその後の弱崩壊からの π^- の同時測定で 3 事象の候補が見つかり、その束縛エネルギーからは $\Lambda\text{N}-\Sigma\text{N}$ 混合による三体力効果の寄与は小さいと報告^[3]されている。FINUDA 実験の結果の解釈にはまだ議論があり、更に詳細な情報を得るには他の反応での確認や束縛エネルギーの測定が重要である。二重荷電交換 (π^-, K^+) 反応は、 Σ^- を doorway とし、 $\Lambda\text{N}-\Sigma\text{N}$ 混合により Λ 状態を生成する反応で、過去の KEK での実験^[4]から、その生成断面積は、直接反応である (π^+, K^+) 反応の 1/1000 の 10nb/sr 程度と予想されている。

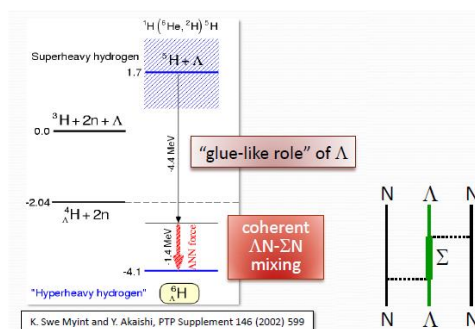


図 1 ${}^6_\Lambda\text{H}$ の質量と $\Lambda\text{N}-\Sigma\text{N}$ 混合による三体力

測定した欠損質量スペクトルを図 2 に示す。横軸スケールの不定性は 1–2 MeV/c²、分解能は 3 MeV/c² である。 Σ^- の準自由生成の山 ($\Sigma^- \text{ QF}$) の左側に Λ による連続状態が観測された。 Λ の束縛閾値付近を拡大したものが右図であるが、束縛領域に有意な構造は見られない。生成微分断面積の上限値は現在評価中であるが、 2° から 14° で平均した値で 1 nb/sr 程度である。今回の測定では、ピークが観測できなかったが、束縛状態が存在しないのか、束縛状態が存在しても生成断面積が予想よりかなり小さいのかは今のところ分からない。今後、更なる解析によって、感度を向上させる計画である。

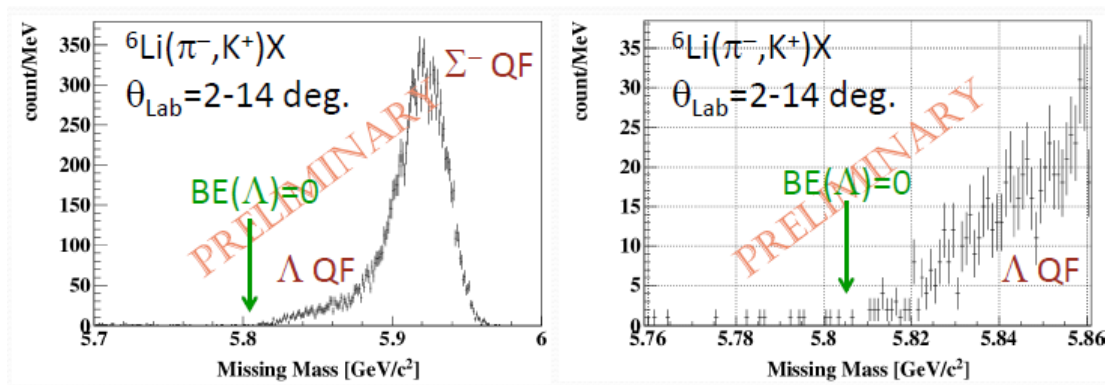


図 2 ${}^6\text{Li}(\pi^-, K^+)$ 反応の欠損質量 (Missing Mass) スペクトル。

ストレンジネスを含む核物質という観点では、ハイペロンと同様に(反)K 中間子もその構成要素となりうる。反 K 中間子と核子間の強い引力によって(反)K 中間子は原子核に束縛すると考えられ、その束縛が強い場合には原子核密度を超える密度が実現されるかもしれない。E27 実験 (Search for a nuclear Kbar bound state K^-pp in the $d(\pi^+,K^+)$ Reaction, 実験責任者 京大理 永江知文) は、 Λ^* を doorway とする反応を用いてもっとも軽い K 中間子原子核である K^-pp 束縛状態を生成・探索する実験である。 $\Sigma, \Lambda^*, \Sigma^*$ の準自由生成反応による大量のバックグラウンド (BG) を抑制するため、標的周囲にレンジカウンター (RCA) を設置し 1 つあるいは 2 つのエネルギーの高い陽子を同時計測する。2012 年 6 月に、総計 7.6×10^9 の π^+ ビームを 1.7 g/cm^3 の液体重水素標的に照射し、詳細が知られていないこの反応のスペクトルを測定・BG を理解し、また、陽子の同時計測による BG 除去の効果を調べるパイロット実験を行った。

Inclusive スペクトルを図 3 左に示す。エラーバー付の赤点が測定データで、色付の実線は、ハイペロンの準自由生成反応や三体生成反応の寄与 (シュミレーションによる)、黒実線がその和である。まずわかることは、 $2.4 \text{ GeV}/c^2$ 付近の Y^* (Λ^*, Σ^*) の位置が $30 \text{ MeV}/c^2$ ほどシフトしていることである。光生成反応を用いた LEPS 実験では、 $\Sigma(1385)$ の質量シフトは見えていない⁵⁾ ので、 $\Lambda(1405)$ の質量が変化しているのかも知れない。2 点目として、 $2.13 \text{ GeV}/c^2$ に有意な盛り上がりがあることである。これは、 $\Sigma^+n\Lambda p(^3S_1\text{-}^3D_1, I=1/2)$ 結合によるカusp構造であり、スペクトルの解析からこの相互作用の詳細が分かる。さて、 K^-pp の束縛状態は、 $2.3 \text{ GeV}/c^2$ 付近に期待されるが、Inclusive スペクトルでは大量の BG に隠されて分からない。そこで今回の解析では、RCA でエネルギーの高い陽子を 1 つ同時計測したスペクトルと Inclusive スペクトルの比 (Proton coincidence rate) を取ってみた (図 3 右)。まず、先ほどの $2.13 \text{ GeV}/c^2$ のカusp構造が強調されて見える。また、 $2.3 \text{ GeV}/c^2$ の少し下に有意な構造が見える。我々は、これは K^-pp 束縛状態のシグナルではないかと考えており、より詳細な解析が進行中である。

この構造が K^-pp 束縛状態であるとすれば、 Λ^* を doorway とする生成反応は有望であり、高エネルギー陽子を同時計測する手法も有効そうである。この成果をもとに今後の実験計画を検討している。ハドロン実験施設では、 $^3\text{He}(K^-,n)$ 反応を用いた K^-pp 束縛状態の探索実験 (E15) が K1.8BR ビームラインでデータ取得が進行中である。この実験では、欠損質量法、不変質量法、及びその同時解析も可能な実験であり、その結果が期待される。また、 $\Lambda(1405)$ の構造を調べる実験として、E31 実験が K1.8BR ビームラインで予定されている。

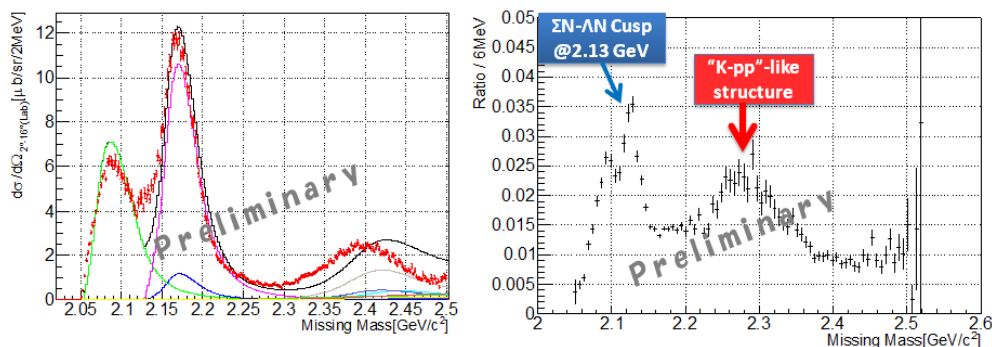


図 3 (左) $d(\pi^+,K^+)$ 反応の Inclusive スペクトル。(右) RCA でエネルギーの高い陽子を検出した場合のスペクトルと Inclusive スペクトルの比のスペクトル。

References

- [1] P.B. Eemorest et al. Nature 467, 1081-1083 (2010).
- [2] K.Swe Myint and Y.Akaishi, PTP supplement 146, 559 (2002).
- [3] M.Agnello et al., FINUDA Collaboration PRL 108 042501 (2012).
- [4] P.K. Saha et al., Phys. Rev. Lett. 94, 052502 (2005).
- [5] A.O.Tokiyasu et al., LEPS Collaboration, arXiv:1306.5320 [nucl-ex] (2013).