

In-flight (K^-,n)反応を用いた K^-pp 束縛状態探索実験

今回、K1.8BR ビームラインで行っている in-flight (K^-,n)反応を用いた K^-pp 束縛状態探索実験(E15 実験)について、理化学研究所の佐久間史典氏に紹介していただいた。1st-stage physics-run として 2013 年に取得したデータに関する結果報告である。

— \bar{K} 中間子原子核—

過去数十年間精力的に行われてきた $\bar{K}N$ 散乱実験や \bar{K} 中間子原子の精密測定により、 $\bar{K}N$ 相互作用は強い引力である事が実験的に明らかになった。この強い引力である $\bar{K}N$ 相互作用の帰結として、 \bar{K} 中間子と原子核から構成される \bar{K} 中間子原子核の存在が理論的に強く示唆され、中性子星内部のような原子核密度を越える状態を理解する上で \bar{K} 中間子の役割が重要な鍵となっている。特に最も単純な構造を持つ K^-pp 束縛状態に対しては、その束縛エネルギーや崩壊幅に対して理論的・実験的に様々な結果が報告されており、統一的な理解が強く望まれている状況である。このような下で、in-flight (K^-,n)反応を用いた K^-pp 束縛状態探索実験がE15 実験として提案され、2006 年からの準備を経て、ついに 2013 年に 1st-stage physics-runが行われた。

—E15 実験—

E15 実験は、図 1 に示すように、1GeV/c の K^- ビームを用いて ${}^3\text{He}(K^-,n)$ 反応の質量欠損及び予想される Λp 崩壊の不変質量を測定することにより、生成過程と崩壊過程の両面から K^-pp 束縛状態の存否及び性質を詳細に調べることを目的とする。特に、in-flight (K^-,n)反応を用いることにより大部分のバックグラウンド事象が運動学的に分離可能となることが、これまでの実験にない大きな利点である。E15 実験は K1.8BR beam-line において行われ、用いるスペクトロメータは K^-pp 束縛状態探索に特化してデザインされた。K1.8BR グループはこれまで、ビームライン検出器群/液体 ${}^3\text{He}$ 標的システム/中央飛跡検出器群(CDS)/前方中性子検出器の開発および建設を行い(図 2)、2009 年からの commissioning において全ての検出器が予想通りの性能を達成していることを確かめた[1]。予想される K^-pp 束縛状態の崩壊幅、数 10MeV/c²~100MeV/c² に対して、 ${}^3\text{He}(K^-,n)$ 質量欠損と Λp 崩壊不変質量に対する分解能はどちらも約 10MeV/c²(σ)を達成しており、十分な分解能を持って K^-pp 束縛状態の探索が可能である。

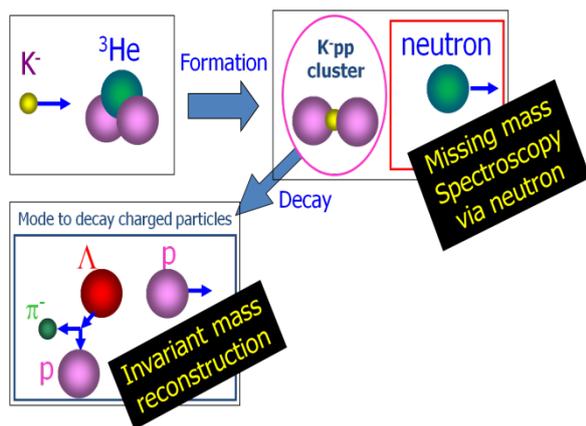


図 1 : E15 実験原理

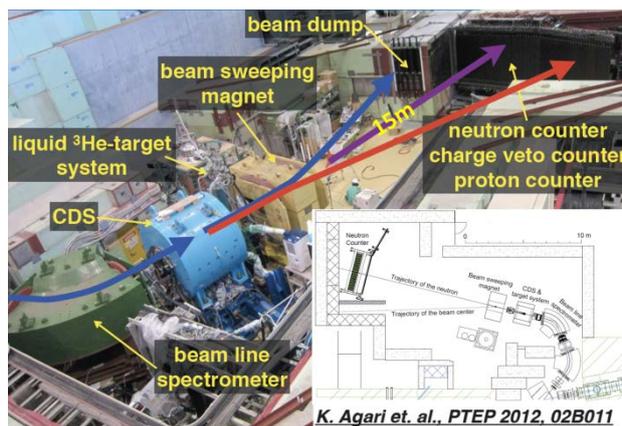


図 2 : K1.8BR スペクトロメータ

—E15 1st-stage physics-run—

E15 1st-stage physics-run は 2013 年 3 月 5 日に行われ、それぞれ $1.1 \times 10^9 / 5.3 \times 10^9$ の K^- ビームが液体 ${}^3\text{He}$ 標的に照射された。これは PAC で認められた E15 実験全体の約 1%のビーム量に相当する。このデータを解析した結果得られた ${}^3\text{He}(K^-,n)X$ 質量欠損分布、及び終状態を Λpn に特定した場合の Λp 不変質量分布を図 3 に示す。なお後者においては、 ${}^3\text{He}(K^-,\Lambda p)X$ 質量欠損を用いて中性子の識別を行った。これらより、以下の興味深い結論を見いだした。

(1) ${}^3\text{He}(\text{K}^-,n)\text{X}$ 質量欠損による、生成過程測定 :

・深い束縛状態の存在に関しては有意なシグナルは得られず、その生成断面積の上限値を与えた[2]。これは $2.4\text{GeV}/c^2$ 付近に見える quasi-free 反応に対して数%の上限値に相当する。静止反 K^- 中間子実験(FINUDA 実験等)で報告されている生成断面積/上限値と比べ、このような特定の反応と比較した値は理論的にも非常に明快であり、今後の理論計算の進展が期待される。

・ K^-pp 生成閾値の近傍では、検出器の分解能やよく知られている通常の K^-N 反応では説明が非常に困難な生成事象の過剰を観測した。この過剰は未だ良く知られていない $\Lambda(1405)p$ 等の 2 核子吸収反応からの寄与の可能性も有り、さらに高統計なデータを用いた崩壊過程($\pi\Sigma p$ 等)の同時解析が必要である。

(2) 終状態を Λpn に特定した場合の Λp 不変質量による、崩壊過程測定 :

・ K^-pp 生成閾値の近傍において収量の増加を示唆する結果を得た[3]。このチャンネルでは終状態を Λpn に特定しているため上述の $\Lambda(1405)p$ 等の寄与は考えられず、また、 Λpn 位相空間崩壊を用いたシミュレーションではこの過剰を説明することは出来ないことが分かった。

これらの結果は、もし K^-pp 状態が存在するのであれば、過去の実験結果に反してその束縛エネルギーが浅いということを強く示唆する。一方、最近 E27 グループにより、 $d(\pi^+, \text{K}^+)$ 反応を用いた 2-陽子コインシデンス測定においてその質量欠損分布に FINUDA 実験や DISTO 実験と同程度の束縛エネルギー/崩壊幅を持つ状態の報告がなされている[4]。その反対に、HADES 実験は DISTO 実験と同様の $p+p$ 反応において、また LEPS 実験は $\gamma+d$ 反応において最近それぞれ null-result を報告しており[5,6]、 K^-pp 束縛状態に関する実験的な解決の糸口は未だ見えてこない。したがって、 K^- induced という最も単純な E15 実験において K^-pp 束縛状態の生成過程と崩壊過程を同時に測定することにより、その存否に関して決着を付ける事がよりいっそう望まれる状況となりつつある。

—今後—

上述のように様々な実験結果が出つつある K^-pp 束縛状態探索であるが、E15 実験は 2015 年度に予定されている 2nd-stage physics-run において 1st-stage の 10 倍の統計収集を行い、まずは Λp 崩壊チャンネルでの K^-pp 束縛状態の存否を明らかにすることを目指す。理論的には K^-pp 束縛状態は $\Lambda(1405)p$ の door-way 反応から生ずるとも考えられているため、 $\Lambda(1405)$ の精密測定を目的とする E31 実験($d(\text{K}^-,n)$ 反応、E15 実験とほぼ共通のセットアップ/コラボレーター)も E15 2nd-stage と共に進めていく予定である。

最後に、加速器グループをはじめとするサポートスタッフの皆様に感謝いたします。

References

[1] K.Agari *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. (2012) 02B011.
 [2] T.Hashimoto *et al.*, arXiv:1408.5637 [nuc-ex] (submitted to PLB)
 [3] Y.Sada, MESON2014 conference
 [4] Y.Ichikawa, EXA2014 conference
 [5] G.Agakishiev *et al.*, arXiv:1410.8188 [nuc-ex]
 [6] A.O.Tokiyasu *et al.*, Phys. Lett. B728 (2014) 616.

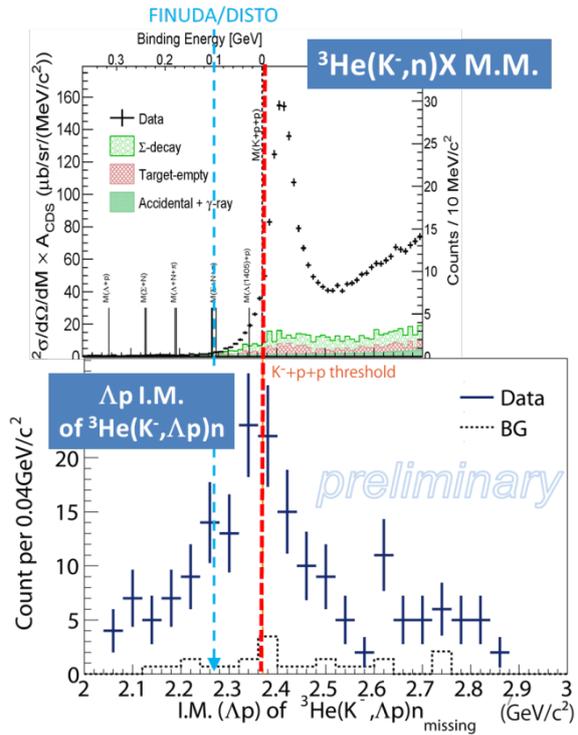


図 3 : E15 1st-stage physics-run で得た結果。(上) ${}^3\text{He}(\text{K}^-,n)\text{X}$ 質量欠損分布、及び(下) Λp 不変質量分布。横軸のスケールは揃えてある。