

論文内容の要旨

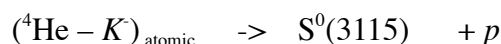
論文題目 An Experimental Search for Deeply Bound Kaonic Nuclear States

(K 中間子の原子核による深束縛状態の探索)

氏名 鈴木 隆敏

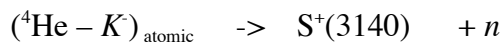
本論文は、高エネルギー加速器研究機構の陽子加速器を用いて行われた、反 K 中間子の原子核における深束縛状態の探索実験、KEK-PS E471 実験の全容とその結果の記述に当てられる。各章の内容に言及する前に、実験結果とその解釈をまとめておく。本実験においては反 K 中間子の深束縛状態に関する世界で初めての探索として、超流動液体 ${}^4\text{He}$ 標的上における静止 K 反応から生ずる陽子、及び中性子のエネルギー分布を飛行時間測定の方法によって得た。結果は事前の理論予測を遥かに超えており、それらは測定の詳細と共に論文中で議論される。実験結果は二つの主な部分 - 即ち、 ${}^4\text{He}(K_{\text{stopped}}, p)$ スペクトルと ${}^4\text{He}(K_{\text{stopped}}, n)$ スペクトルの二つの部分に分けられる。

${}^4\text{He}(K_{\text{stopped}}, p)$ スペクトルにおいては、非常に有為で狭いピーク構造が観測され、議論の結果、電荷 0、ストレンジネス-1、アイソスピン 1、バリオン数 3、質量約 $3117 \text{ MeV}/c^2$ を持つ、既知の如何なるハドロンあるいはクォーク状態（ハイパー核、メソン原子、ハドロン原子、等々）の範疇にも分類されない奇妙な新状態 - $S^0(3115)$ 状態 - の、二体反応



による形成と判断された。

一方、実験の本来の目的である ${}^4\text{He}(K_{\text{stopped}}, n)$ スペクトルにおいては、少なくとも一つの狭いピーク構造の示唆が得られた。最も有為なピークの構造は、電荷+1、ストレンジネス-1、バリオン数 3、質量約 $3140 \text{ MeV}/c^2$ を持つ、新状態 $S^+(3140)$ の、二体反応



による形成と判断されたが、この新状態のアイソスピンは 0 又は 1 で、この測定のみでは確定するのは困難であり、また、その $25 \text{ MeV}/c^2$ の質量差から陽子側で発見された $S^0(3115)$ (T=1) 状態のアイソバリックアナログ状態とは考えにくい。一方、観測されるべき $S^0(3115)$ (T=1) 状態のアイソバリックアナログ状態 $S^+(3115)$ (T=1) の中性子スペクトル上での示唆は弱い。検出効率と生成率を考慮に入れた議論の結果、本実験の全統計を持ってしても、有為なカウント数は得られないことが説明可能であり、 $S^0(3115)$ (T=1) 状態の大きな統計的有意性での観測とは矛盾しない。これらの新状態、 $S^0(3115)$ と $S^+(3140)$ が赤石-山崎の予言した反 K 中間子の原子核における深束縛状態に対応するのか否かは現在の所不明である。

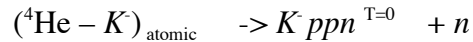
引き続き、各章の内容について要約する。

第 1 章は導入部である。低エネルギーにおける強い相互作用の振る舞いは、現在の所構成子クォーク模型とクォーク間相互作用から説明することに完全には成功していない一方、ハドロンの自由度において相互作用がよく記述され、その自由度における相互作用の解明は低エネルギー QCD のより深い理解につながる。また、真空、あるいは核媒質中に於いてはカイラル対称性の自発的破れとハドロンの質量の間には密接な関係があり、中間子原子、あるいは原子核の形成においては核媒質中における中間子質量の変化の観測が可能であることから、その研究により真空の構造についての情報を得ることが出来る。中間子原子核相互作用は短距離で強く働く性質を持つため、それらの平均距離の小さな系、すなわち、中間子の原子核による深い束縛状態の研究は相互作用の決定に対し感度が良く、特に π 中間子原子に対して既に幾つかの核に対し深い束縛状態（深い原子状態）の形成と観測がなされている。その他の中間子に対してもその原子核への深い束縛状態を調べることは非常に意義深い。が今までのところ観測の例は存在しなかった。特に反 K 中間子は s クォークまで含めた意味でのカイラル対称性の自発的破れに対応する南部-Goldstone ボゾンであると解釈出来るために、その強い相互作用による束縛状態の研究は極めて興味深い。

反 K 中間子が原子核に対し深い束縛状態を持ち、準安定に存在できるのではないかと、いう予想は 1985 年に既に成されている。近年、反 K 中間子水素原子における $2p \rightarrow 1s$ 遷移に伴う X 線 (K_α) の信頼性の高い測定結果が得られ、低エネルギー反 K 中間子-核子散乱とのよい一致が示された (KEK-PS E228)。その結果として、その強い相互作用が強く引力的であることが示唆され、その特異な性質から 3 構成子クォークによる理解が困難な共鳴状態 $-\Lambda(1405)-$ は反 K 中間子-核子の束縛状態と解釈され得ることが判明した。赤石、山崎は、 $\Lambda(1405)$ 状態を全アイソスピン $I=0$ の反 K 中間子核子間の準束縛状態とみなし、さらに低エネルギー KN 散乱の情報を援用してそれらの 2 体の相互作用ポテンシャルを構成し、 g 行列の方法によって幾つかの軽い原子核に対して反 K 中間子-

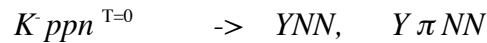
原子核間の有効相互作用を求め、その結果、 ${}^3\text{He}$ 、 ${}^8\text{Be}$ 等の幾つかの軽い原子核に対して 100 MeV 程度の束縛エネルギーと 30 MeV 程度の幅を持つ反 K 中間子の深い束縛状態が存在することを示した。

彼らの一連の予言において、3 バリオン系である $Kppn$ 系に対し、特別な注意が払われ、この場合特に系の全アイソスピン $T=1$ の場合には束縛は浅く幅が広い一方で $T=0$ の場合に深い束縛と狭い幅を与え、



の反応により、静止 K あたり約 2% の割合で生成されることが示された。

その予言に基づき、 ${}^4\text{He}$ における静止 K 反応から生ずる中性子の飛行時間測定を、状態の強崩壊



又は引き続いて起こるハイパロンの弱崩壊 $Y \rightarrow N\pi$ から生ずる二次の荷電粒子の同時計測条件の下で行い、そのエネルギー分布を得る目的で KEK E471 実験が計画された。中性子と全く同様に飛行時間測定される陽子スペクトル上にはアイソスピン 1 の状態のみが現れ得るが、束縛が浅く、幅の非常に広い状態 $Kppn^{T=1}$ のアイソバリックアナログ状態を除いては何らかの状態の出現の予言は存在せず、従って陽子スペクトル上における幅の狭いピーク構造の出現は期待されてはいなかった。

第 2 章は実験施設、装置、及びトリガー条件とデータ取得系の記述に当てられる。実験は KEK 陽子シンクロトロン K5 ビームラインにおいて行われた。K5 に於いて我々は 660 MeV/c の K を引き出し、減速して、15 cm 厚の超流動液体 ${}^4\text{He}$ 標的中に静止させ、入射 K 、二次荷電粒子、及び陽子または中性子の同時計測を行った。実験においては、トリガー条件として、中性子-陽子検出器系における粒子検出と二次荷電粒子検出器系における粒子検出が要求されているため、得られる中性子及び陽子のエネルギースペクトルは inclusive なものではない。

第 3 章において各実験装置のデータの準備的な解析を記述する。実験装置は主に入射 K の同定及び軌道決定を目的とするビームライン検出器系と、二次荷電粒子の同定及び軌道決定を目的とする二次荷電粒子検出器系、及び中性子、陽子の検出を行う中性子検出器系に分類されるが、それらにおける軌道決定の手順、粒子識別、飛行時間-飛行距離決定等を順を追って議論する。semi-inclusive なエネルギースペクトルの構成には必ずしも必須では無いが、ピーク構造の起源、あるいは状態の崩壊モードの議論に関連して重要な役割を果たす二次荷電粒子の PID と運動量の決定、及び入射 K 軌道と二次荷電粒子軌道間の「ずれ」ベクトルの検出核子の運動方向への射影 ($\mathbf{V}_{ca} \cdot \mathbf{V}_N$) に関する議論が本章の最後に展開される。

第4章においては、 ${}^4\text{He}(K_{\text{stopped}}, p)$ スペクトル及びそれに関連した議論を行う。第1章に於ける議論により、我々は ${}^4\text{He}(K_{\text{stopped}}, p)$ スペクトル上に不連続なピーク構造が現れることを全く予想していなかった。しかしながら、予想を裏切る形で非常に有為なピーク構造が陽子運動量 $500 \text{ MeV}/c$ 付近に現れた。その付近にピーク構造を作る可能性としては ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ ハイパー核の二体崩壊 ${}^4_{\Lambda}\text{He} \rightarrow {}^3\text{H} + p$ が考えられるが、その可能性は二次荷電粒子の運動量、及び $\mathbf{V}_{\text{ca}} \cdot \mathbf{V}_p$ による事象選択の結果等の考察により結局排除され、ピーク構造はストレンジネス-1、バリオン数 3、電荷 0、アイソスピン 1、質量約 $3117 \text{ MeV}/c^2$ を持つ、今までに観測例の無い新状態、ストレンジトライバリオン $S^0(3115)$ の形成に割り当てられた。ピークの統計的有為性はバックグラウンドの不定性から $8\sim 12\sigma$ と考えられ、ピークの存在そのものには疑いが無い。二次荷電粒子による事象選択を用いて崩壊モード、生成率の議論を行い、結果主な崩壊モードは ΣNN であることと生成率は1%を大きくは超えないことが理解される。

第5章においては、 ${}^4\text{He}(K_{\text{stopped}}, n)$ スペクトル及びそれに関連した議論が成される。中性子測定においては、semi-inclusive なスペクトルには顕著なピーク構造は見られなかったため、我々は $\Sigma \rightarrow N\pi$ 起源の π と $\Lambda \rightarrow p\pi$ 起源の π を選別し、そのおのおのと同時計測のなされた中性子のスペクトルを調べた結果、前者にのみ中性子運動量 $465 \text{ MeV}/c$ 付近にピーク構造の示唆を得た。このピーク構造を $\mathbf{V}_{\text{ca}} \cdot \mathbf{V}_n$ による選択を用いて調べ、結果としてこのピーク構造は質量約 $3140 \text{ MeV}/c^2$ 、電荷+1 を持つ別種のストレンジトライバリオン $S^+(3140)$ の形成に割り当てられた。状態の統計的有為性は、アイソバリックアナログ状態 $S^+(3115)$ の位置と幅を $S^0(3115)$ と同様と仮定した上で 3.7σ である。この状態の質量は本来の赤石-山崎による $Kppn^{T=0}$ の予言値よりも 50 MeV 以上小さく、状態のアイソスピンも不定であるために、 $Kppn^{T=0}$ と見なすことは直ちには出来ない。その発見の過程から明らかのように、主な崩壊モードは ΣNN であるが、生成率の正確な評価は困難である。 $S^+(3115)$ に関する統計的有意性は小さいが、 $S^0(3115)$ の大きな計数とは、生成率と検出効率の観点からは矛盾しない。

第6章においては、実験結果の要約及び観測された二つのストレンジトライバリオン状態に関する可能な解釈に関する議論が展開され、第7章において論文の結論を述べる。