

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	宮原 建太
論文題目	Analysis of $\Lambda(1405)$ based on chiral SU(3) dynamics		
(論文内容の要旨)			
<p>近年のハドロン物理において最も注目を集めているテーマの一つとして、通常のハドロンとは異なる内部構造を持つエキゾチックハドロンの探索が挙げられる。$\Lambda(1405)$はその有力な候補であり、反K中間子(Kbar)と核子(N)の分子的状態がπ中間子(π)とΣ粒子(Σ)に崩壊するメソン・バリオン準束縛状態であると期待されている。さらに、この描像は原子核中に反K中間子を含むKbar原子核の予言の基礎を与える。近年行われた精密なK中間子原子分光実験はこれらの状態の定量的な議論を可能にするが、理論計算の土台となる現実的な2体相互作用は構築されていなかった。本論文の目的は$\Lambda(1405)$を構成しているメソン・バリオン間のポテンシャルを定量的に信頼できる形で構築し、$\Lambda(1405)$の構造の解明を目指すことである。</p> <p>本論文の前半では、ポテンシャルの構築法が議論された。量子色力学のもつカイラルSU(3)対称性及びS行列のユニタリー性を尊重したカイラルユニタリー法を用い、Kp閾値以上の実験データを閾値以下で実験的に直接測定することが困難な$\Lambda(1405)$のエネルギー領域へと外挿する。次に、この散乱振幅を等価に再現するような、シュレディンガー方程式で用いられる局所ポテンシャルを構築する。実エネルギー軸上のみならず複素エネルギー平面でも定量的な再現性を実現することにより、$\Lambda(1405)$の本質的情報を反映した共鳴極までも再現する手法を確立した。この手法を用い、Kbar N 1チャンネル系及びKbar N-π Σチャンネル結合系において、複素エネルギー平面でも信頼しうる現実的ポテンシャルが構築された。</p> <p>構築した1チャンネルポテンシャルはKbar原子核の3体系から7体系までの厳密な少数計算に応用され、準束縛状態が存在することが示された。核子数が大きい系ではπ Σ閾値近くに状態が現れることから、π Σチャンネルをあらわに扱ったポテンシャルでの計算の必要性が示唆された。また、重イオン衝突におけるKp相関関数を計算し、アイソスピンの組み合わせが通常のKp散乱振幅とは異なることから、Kbar N相互作用に対して散乱実験と相補的な情報が得られる可能性を示した。</p> <p>本論文前半で得られたポテンシャルはエネルギーに依存するが、そのような系では量子力学において本質的なノルムの保存や状態の直交性といった条件が満たされない。ハミルトニアン固有状態として得られた$\Lambda(1405)$の構造を解析するためには、共鳴などの不安定な状態を記述する非エルミートな系で、エネルギー依存ポテンシャルに対する規格化条件を導出する必要がある。論文後半では、このような系の規格化条件を連続の式に基づき導出した。さらに、有効的にチャンネルを消去するフェッシュバッハ射影の観点から同じ規格化条件を導き、規格化条件の各項が状態の「複合性」や「一粒子性」と直接対応することを明らかにした。また、一般の演算子に対する行列要素の消去されたチャンネルからの寄与は、射影された空間では表現できないことも示された。この新たな規格化を用いることで、$\Lambda(1405)$の複合性や空間構造を解析し、$\Lambda(1405)$がKbar Nの分子的状態であることを検証した。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文の研究対象である $\Lambda(1405)$ は、通常のハドロンと異なる構造を持つことが古くから示唆されているが、 $K-p$ 閾値よりエネルギーが低いことから直接の散乱実験ができず、チャンネル結合系での共鳴状態であることから格子QCDでの計算も困難であり、現在でも活発な理論・実験研究の対象となっている。理論的には、エネルギーの近い散乱状態が複数存在し、標準的な構成子クォーク模型による3クォーク状態も同じ量子数を持ちうるので、様々な模型空間が混在する複雑なハドロン系となっている。

本論文では、 $\Lambda(1405)$ の構造がハドロン間ポテンシャルの構築という観点から議論された。ポテンシャルを構築すると、有効場の理論の手法では解析が困難な空間構造の解明が可能になり、すでに確立された計算手法と組み合わせることで少数系へ応用できるなど、応用上の波及効果も大きい。論文前半ではQCDの対称性に基づいたカイラル有効理論とハドロン間ポテンシャルの散乱振幅をマッチングさせてポテンシャルを構築するという手法が用いられた。特に、共鳴などの不安定状態は複素エネルギー平面に解析接続された散乱振幅の極で表現されるので、複素エネルギーでの再現性を確立した点は重要である。これまでに提案されたハドロン間相互作用と本質的に異なり、本論文では最新の実験データを高精度で再現する現実的相互作用をメソン・バリオン系で初めて構築した。これは $\Lambda(1405)$ に関する相互作用の決定版であり、高く評価できる。

論文後半は構築されたポテンシャルを用いて計算した $\Lambda(1405)$ の波動関数の解析が主題である。ここでは $\Lambda(1405)$ が $\pi\Sigma$ へ崩壊する不安定状態であること、及びポテンシャルの強度がエネルギーに依存していることにより、波動関数の規格化や物理量の期待値の計算で通常と異なる扱いが必要となる。本論文では連続の式と不安定状態の適切な境界条件を用いて、このような場合の規格化条件が導出されている。これによるとポテンシャルのエネルギー依存性に起因して、規格化条件に付加項が現れる。付加項の物理的解釈を明らかにするために、完全な模型空間のフェッシュバッハ射影を用いてポテンシャルのエネルギー依存性を再定式化することで、付加項が消去されたチャンネルのノルムに対応することが世界で初めて示された。これは複合性の概念は現在ハドロンの内部構造を指定する指標として注目を集めており、主に散乱振幅の留数から計算する方法が知られているが、フェッシュバッハ射影を用いた定式化は見通しがよく、一般的な演算子形式で導出された意義は大きい。この結果に基づき、正しく規格化された $\Lambda(1405)$ の波動関数から状態ノルムおよび平均2乗半径が計算され、現実的ポテンシャルによる計算で $\Lambda(1405)$ が $K\bar{p}n$ 分子的状态であることが示された。

このように、本論文は十全な理論的手法に則ったものであり、ストレンジネス核物理学およびハドロン構造の物理学について新たな知見をもたらすとともに実験への示唆に富む研究成果である。よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成30年1月15日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降