

## 別紙 4

報告番号	※ 甲 第 号
------	---------

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目 ヘビークォークスピン対称性に基づく

エキゾチックハドロンのスピン多重項構造の研究

氏 名 清水 勇希

## 論 文 内 容 の 要 旨

原子核の構成要素である陽子や中性子、核力の起源の一つであるパイ中間子等はクォークと呼ばれる素粒子の複合粒子であり、それらを総称してハドロンと呼ぶ。クォーク間の相互作用からハドロンを記述するクォークモデルにおいて、陽子や中性子は3個のクォークから構成され、バリオンと呼ばれる。また中間子は1個のクォークと1個の反クォークから構成され、メソンと呼ばれる。多くのハドロンはバリオンまたはメソンに分類され、その質量やスピンなどの性質を説明することができる。しかしハドロンを構成するクォークの数について理論的な制限はなく、バリオンやメソンよりも多くのクォークを含むハドロンが存在しても良い。そのような粒子は通常のバリオンやメソンとは異なるハドロンとして、エキゾチックハドロンと呼ばれている。

近年、エキゾチックハドロンの候補とされる複数の粒子が実際に実験的に観測されている。2003年に Belle 実験（高エネルギー加速器研究機構）で発見された  $X(3872)$  は2個のクォークと2個の反クォークで構成されたテトラクォークの候補である。これ以降も次々とテトラクォークと考えられる粒子が発見され、 $X, Y, Z_c, Z_b$  等と呼ばれている。また2015年には LHCb 実験（CERN）にて4個のクォークと1個の反クォークからなると思われる  $P_c$  ペンタクォークが発見された。

本論文ではヘビークォークスピン対称性に基づいてペンタクォークやテトラクォークのヘビークォークスピン多重項構造を解析した。 $X, Y, Z$  テトラクォークや  $P_c$  ペンタクォークの多くは、陽子や中性子を構成するクォークよりも質量が大きいクォーク1個とその反クォーク1個を組成に含む。そのようなクォークはヘビークォークと呼ばれる。クォーク質量が無限大の極限ではヘビークォークスピン対称性が存在し、強い相互作用の範囲内ではヘビークォークのスピンが保存される。それによりヘビークォークを含むハドロンでは異なるスピンを持つハドロン同士の質量が縮退する多重項構造が生まれる。特にヘビークォークを1個のみ含むメソンやバリオンでは2種類のハドロン質量が

縮退するヘビークォークスピン(HQS)二重項の構造があることが知られている。

ところが、 $X, Y, Z$ テトラクォークや $P_c$ ペンタクォークはヘビークォーク1個と反ヘビークォーク1個、合わせて2個のヘビークォークを含んでいる。このように複数のヘビークォークを含むエキゾチックハドロンの HQS 多重項構造はこれまで系統的に調べられてはいない。従来のヘビークォークスピン対称性は1個のヘビークォークに対して適用される。本研究ではこの対称性を複数のヘビークォークを持つ系へも適用するためにライトクラウドスピン基底 (LCS 基底) を定義し、エキゾチックハドロンの HQS 多重項構造について調べた。

初めにペンタクォークの HQS 多重項構造を解析した。 $P_c$ ペンタクォークはヘビーマesonとヘビーバリオンがゆるく束縛したハドロン分子状態だとするハドロン分子描写に基づき、内部のスピン状態の組み合わせから HQS 多重項を議論した。ハドロン間の相対的な軌道角運動量が S 波の場合、2つの一重項、1つの二重項、1つの三重項が存在することを示した。またハドロン間の相互作用としてパイ中間子交換力を用いた場合のポテンシャルの振る舞いを調べた。LCS 基底ではポテンシャル行列が自動的に対角化され、HQS 多重項ごとに分かれる。つまり系の固有状態は HQS 多重項ごとに分離し、ヘビークォークの質量が無限大の極限では異なる多重項の混合が起こらないことを示した。同様の解析を軌道角運動量が P 波の場合でも行い、5つの一重項、2つの二重項、3つの三重項の存在を示した。この時のポテンシャル行列は完全な対角化はされず、ブロック対角になる。各ブロックの非対角成分は有限の軌道角運動量が原因で発生するテンソル力になっており、内部スピン状態が異なる成分同士を結びつけている。

次にヘビーマesonと反ヘビーマesonの分子状態としてのテトラクォークに対してもヘビークォークスピン対称性を適用し、HQS 多重項構造を調べた。ここでは全角運動量 3 以下で可能な状態をすべて考慮し、多重項構造の解析と LCS 基底でのポテンシャル行列の導出を行った。固有状態が HQS 多重項によって分類されることや、テンソル力によるポテンシャル行列のブロック対角化など、ペンタクォークの解析と同様の性質が得られた。

エキゾチックハドロンをヘビークォークスピン対称性に基づいて分類することで、そのエネルギーの縮退の様子や固有状態の物理的意味が明確に議論できる。それらに加え、ヘビークォークのスピンが保存されることからエキゾチックハドロンの崩壊モードへの制限をつけることができた。