

(別紙 1)

論文の内容の要旨

氏名	絹谷 すずな		
論文題目	(外国語の場合は、日本語で訳文を()を付して記入すること。) Study of the excitation spectra of single-heavy baryons in a quark-diquark model (クォーク・ダイクォーク模型による重いバリオンの性質)		
審査委員	区分	職名	氏名
	委員長		
	委員		
	委員		
	委員		
	委員		
	委員		
内容の要旨			
<p>原子核を構成する陽子および中性子は、6種類あるクォークの中で、軽いクォークである up クォークと down クォークで構成されている。クォークで構成される粒子を総称してハドロンと呼び、強い相互作用で結合した複合粒子である。ハドロンは、陽子や中性子のように、3つのクォークで構成されたバリオンと、クォークと反クォーク対で構成されたメソンとに分類される。</p> <p>バリオンは、長寿命の陽子・中性子(まとめて核子と呼ばれる)の他に、現在までに百種類以上の励起状態(短寿命の共鳴状態)が確認されているが、その内部構造の完全理解には至っていない。これはクォーク間相互作用の特徴のひとつであるクォークの閉じ込めという性質に由来する困難であり、ハドロンを分解してクォークを一つだけ取り出して見ることが出来ないためである。したがって、ハドロンの内部構造は、その生成反応や系統的な質量スペクトル、相互作用、および崩壊幅(寿命)などの間接的な情報から推察していく必要がある。本学位論文は、重い charm および bottom クォークをひとつ含むバリオン Λ_c および Λ_b バリオンの質量スペクトルに注目し、ハドロンの性質を決定づける為に重要な有効自由度を理論的に探るものである。</p> <p>強い相互作用の基礎理論である量子色力学(Quantum Chromodynamics (QCD))は、低エネルギー領域では非摂動的効果が大きく、QCD を直接解くことでクォークの力学からハドロンの性質を理解することは容易ではない。これを理論的に解く方法として現在二つの柱がある。一つ目は、スーパーコンピュータ等を用いて第一原理計算を行う格子 QCD アプローチであり、もう一つの柱が有効模型計算である。本学位論文では、QCD が持つ特徴を備えた構成子クォーク有効模型を用いて、ハドロンの性質を決定づける重要な有効自由度を探っている。</p> <p>本論文では、その有効自由度のひとつの候補として、diquark 相関(二つの軽いクォークペア)に注目している。様々な量子数を持つ diquark のうち、反対称の color charge (色荷), flavor, spin を持つクォークペアは good diquark と呼ばれ、最も引力的な相関を持ち、バリオン内で重要な自由度となる可能性があることが指摘されている。しかし、核子は3つの軽いクォークから出来ているため、どのペアが good diquark の量子数を持っているかを特定することができない。そこで、本学位論文で注目しているのが、重いクォーク</p>			

(charmもしくはbottomクォーク)を一つだけ含む single-heavy baryon と呼ばれるバリオンの一種である。この粒子は、重いクォークと軽いクォークの質量差が大きいため、diquark に関する研究に適した系になっている。特に、 $\Lambda_c(2595)$ と $\Lambda_c(2625)$ は、軽いクォーク対が good diquark の量子数を持ち、charm と軽いクォーク対との相対的波動関数の軌道角運動量が $L=1$ (p-wave)であるような励起状態、つまり diquark と charm の束縛状態として記述できる可能性がある。charm と diquark 間の閉じ込め相互作用は、color charge にのみ依存するため、charm と anti-charm の束縛状態であるチャーモニウムと同じ相互作用をしていると考えるのが妥当である。しかしこの同一性にも関わらず、先行研究において p-wave の励起エネルギーの計算の結果、quark-diquark 間の閉じ込めポテンシャルは、quark-antiquark のポテンシャルの半分にしなければならないことが指摘された。これを本論文では、string tension puzzleと呼んでいる。本学位論文では先行研究で用いられていたポテンシャルを一から見直し、相対論的な効果を取り入れたポテンシャルを2種類導出し、重いクォークを一つ含むバリオンの質量スペクトルを求め、この puzzle の解明に挑んでいる。

以下、論文の構成とその内容について述べる。

まず第1章ではハドロンを支配する強い相互作用の基礎理論である QCD の概要と、上記に示したような本研究の背景について述べている。

第2章では、先行研究であまり詳しく議論されていなかった有効模型が持つパラメータの不定性について詳しく調べている。ここで用いられているクォーク有効模型では、構成子クォークの質量や、diquark の質量は実験的に決められたものではなく、現象論的に導出された典型的な値でしかない。そこでハドロンのスケールに比して妥当と考えられる値の範囲でパラメータを変化させ、有効模型のもつ不定性を考慮に入れた計算を行った。しかし、それでもなお string tension puzzle は解消され得ないことを示している。

第3章では、相対論的な効果を取り入れたポテンシャルを導出している。そこで2種類の構成法を導入している。一つは、diquark を完全にひとつのスカラー粒子と考え、スカラー粒子と charm の間の one-gluon exchange を考えている(以下、S-Q タイプと呼ぶ)。もう一つは、まずクォーク間の one-gluon exchange を独立に考えたのち、2つの軽いクォーク間距離を0に固定し、さらに good diquark の量子数を持つように状態を組んで、diquark と charm 間のポテンシャルを導出している(以下、q-Q タイプと呼ぶ)。これは、diquark をひとつのスカラー粒子と考えるか、2つのフェルミオンの複合状態として考えるか、の違いに対応する。さらに、チャーモニウムの質量スペクトルを計算するための、quark-antiquark 間ポテンシャルも同様の方法で導出している。そこで Coulomb 項、Darwin 項、spin-orbit 項、orbit-orbit 項の導出を行っている。この導出の結果、S-Qタイプとq-Qタイプとでは、diquark の内部カラー構造の考慮の有無の差がポテンシャルの係数の違いとして現れることを示している。

第4章では、これらのポテンシャルを用いて、シュレディンガー方程式をガウス展開法で数値的に解き、励起エネルギーを計算している。はじめに、チャーモニウムの系について計算をおこない、実験値と合わせることでモデルの自由パラメータを決定している。その決定されたパラメータを用いて、 Λ_c および Λ_b の励起エネルギーの計算を行っている。

まず、S-Qタイプのポテンシャルを用いた計算を行っている。様々な詳細な議論の結果、S-Qタイプでは、相対論的な効果は小さく、閉じ込め力をクォーモニウムの系より小さくする必要のあることを示している。

次に、q-Qタイプのポテンシャルを用いて、同様の計算を行っている。このポテンシャルを用いた場合、先行研究に比べて、実験結果の再現が良いことを発見した。その理由を解明するべく、各項の効果を詳細に検証し、特に Darwin 項の効果が大きいと結論づけている。S-Qタイプとq-Qタイプの Darwin 項には、diquark の内部カラー構造の考慮の有無の差がポテンシャルの係数の違いとして現れており、これが puzzle の解明の一部となり得ることが述べられている。しかし、依然として、実験値を完璧には再現することはできず、このことは、 Λ_c や Λ_b の構造として good diquark 以外の量子数をもつ状態が混合している可能性も指摘している。また、同様のポテンシャルを用いて、異なる flavor のクォークを含む Ξ_c バリオンについても計算を行い、このモデルの一般性についても検証を行っている。

第5章において、本学位論文で得られた成果がまとめられ、その意義が述べられている。

(別紙2)

論文審査の結果の要旨

氏名	絹谷 すずな		
論文題目	(外国語の場合は、日本語で訳文を()を付して記入すること。) Study of the excitation spectra of single-heavy baryons in a quark-diquark model (クォーク・ダイクォーク模型による重いバリオンの性質)		
審査委員	区分	職名	氏名
	委員長		
	委員		
	委員		
	委員		
	委員		
	委員		
要旨			
<p>本学位論文は、ハドロンの内部構造の解明というハドロン物理分野にとって最も重要なトピックに取り組んだものである。「論文の内容の要旨」で書かれているように、クォークの閉じ込めという QCD がもつ性質により、ハドロンは、これをさらにバラバラに分解して調べることが不可能なシステムである。このことから、ハドロンの内部構造やその成り立ちは、ハドロンの質量、ハドロン間相互作用、崩壊幅(寿命)といった間接的な情報から組み立てていく必要がある。このようなハドロンの実験的性質を決定する本質的な自由度は何であるかを特定することが現在のハドロン物理学の重要な課題である。</p> <p>本学位論文は、その中で、diquark 関連に注目している。diquark 関連のうち、good diquark と呼ばれる量子数を持つクォークペアは、他の量子数をもつペアに比べて、最も引力的な相関をもち、バリオン内部において重要な有効自由度のひとつとして理論的に注目されてきたものである。しかし、これまでの軽いバリオンの研究においては、様々な量子数をもつ状態が同程度の重みで混合していることが考えられ、実験的に得られるハドロンの性質のうち、何が diquark 関連に大きく影響を受けるのかについての確定的な同意には至っていなかった。ところが近年、charm という重いクォークを含むバリオンの励起状態が実験的に次々と発見されるに至り、diquark 関連の重要性が議論可能となってきた背景がある。特に、軽い2つのクォークと、それらに比べはるかに重い質量を持つ charm クォークを一つだけ含む Λ_c バリオンは、その質量差から、軽いクォーク対と重いクォークのダイナミクスを分けて議論が可能であると期待されている。</p> <p>そこで先行研究において、Λ_c バリオン内部において、good diquark が一つの有効自由度として振る舞っていると考え、Λ_c バリオンを quark-diquark の束縛状態として記述することが試みられた。しかし、その模型では、Λ_c バリオンの励起状態のエネルギーを再現することが出来なかった。このことは、閉じ込め相互作用が、color charge にのみ依存するという QCD 基礎理論の根本に矛盾する結果にみえる。</p>			

そこで本学位論文では、まず **diquark** という相関が重要であるという観点に立ち、先行研究のポテンシャルに組み込まれていない相対論的効果を取り入れる計算を行っている。この研究の意義は、**diquark** の取り扱いに関して、2 種類のポテンシャルを組み立てた点にあると言える。「論文の内容の要旨」に記した **S-Q** タイプと **q-Q** タイプのポテンシャルを同時に比較した計算はこれまで全く行われてこなかった。特に、**q-Q** タイプのポテンシャルの導出の際に、まずクォーク間のポテンシャルを導出したのち、2 つの軽いクォークでスカラーの量子数を組む方法で **quark-diquark** 模型を組み立てたのは本研究が初めてである。これまでは、そのような計算の結果として **S-Q** タイプと同じポテンシャルが導き出されるだろうという単純な予想がなされていた。本学位論文によるこの 2 つのポテンシャルの比較により、**diquark** 内部のカラー構造を考慮に入れることが重要であることが判明した点が大きく評価される。

本学位論文で、この 2 つのポテンシャルを同等の取り扱いで導き、この 2 つには明確な差があることが示された。さらに詳細な計算により、特に **Darwin** 項が重要な役割を果たしていることも示した。**Darwin** 項は、相対論的な方程式で初めて出てくる効果であるが、**S-Q** タイプと **q-Q** タイプでは、その係数に違いがある。**S-Q** タイプで出てくる **Darwin** 項は、 $1/m_Q^2$ (m_Q は charm quark の質量) に比例し、**q-Q** タイプでは、 $1/m_d^2$ (m_d は **diquark** の質量) に比例する項が出てくることが示された。前者は、heavy quark limit (重いクォークの質量を無限大にとった極限) において消滅する項であり、後者は、heavy quark limit でも消えない項となる。この係数の差は、**diquark** を 1 つのスカラー粒子と考えるか、内部カラー構造をもつものとするかの違いから出てくるものであることが示された。特に heavy quark limit における振る舞いの違いは、 Λ_c と Λ_b の質量スペクトルの違いにも反映される重要な結論である。

これらの違いがあるポテンシャルを用いて励起エネルギーの計算を行った場合、**S-Q** タイプでは、依然として実験値との差異が残ったが、**q-Q** タイプのポテンシャルを用いた場合、実験値と計算値の差異が改善されたことが示された。これは、single-heavy baryon の質量スペクトルにおいて、**diquark** の内部カラー構造を考慮することが重要であり、これを考慮に入れることにより、**quark-diquark** 模型が有効に働きうることを示したものであり、高く評価される結果である。また、同じ模型を用いて、別の flavor のクォークを含む Ξ バリオン計算も行い、この理論的取り扱いが特定の系だけではなく、一般性を持つものであると示した点も評価される。

本学位論文は、詳細な計算により、これまで軽い核子の系では議論が困難だった **diquark** 相関の重要性を、重いクォークを含むバリオン質量スペクトルを見る事で議論可能であることを示した点、特に、そのような議論の際には **diquark** の内部カラー構造を考慮に入れることの重要性を指摘した点において、ハドロンの内部構造の解明に貢献するものである。

本学位論文の重要な内容である第 3 章、第 4 章の骨子、第 5 章の結論については、既に学位申請者が第一著者となり、American Physical Society 発行の Physical Review D 誌に 2023 年に原著論文として掲載され、出版されている。これは、自然科学専攻・数物科学講座・物理学分野において、学位申請に先行して公表すべき論文の必要条件として明示されている選択肢の内、『査読付き欧文学術誌に掲載された論文 1 本以上』という基準を満たすものである。

よって、本学位申請論文は、奈良女子大学博士(理学)の学位を授与されるに十分な内容を有していると判断した。