



Spectroscopy of Heavy Quarkonia and Fine and Hyperfine Structures

森下, 淳也

(Degree)

博士 (学術)

(Date of Degree)

1984-03-31

(Date of Publication)

2007-10-11

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲0464

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1000464>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏名・（本籍） ^{もり}森 ^{した}下 ^{じゅん}淳 ^や也 （高知県）
 学位の種類 学 術 博 士
 学位記番号 学博い第 35 号
 学位授与の要件 学位規則第 5 条第 1 項該当
 学位授与の日付 昭和 59 年 3 月 31 日
 学位論文題目 **Spectroscopy of Heavy Quarkonia and Fine and
 Hyperfine Structures**
 （重クォークoniumの分光学と微細及び超微細構造）

審 査 委 員 主査 教授 川 口 正 昭
 教授 若 林 信 生 教授 位 田 正 邦

論 文 内 容 の 要 旨

重クォークoniumはハドロンの構造を調べる上での恰好の研究対象となっている。又、重クォークoniumの中で、未だ発見されていないトッポニウムの分光学を研究することは現在計画されている実験の観測や理論的解析を助ける意味で重要である。本論文では重クォークoniumであるチャーモニウム、ボトモニウム及びトッポニウムの分光学を、従来手強い手段として用いられる非相対論的ポテンシャル模型に基いて調べる。その際、相対論的補正を一次の摂動の範囲で考慮し、特に、微細及び超微細の分離を引き起すスピン依存項について詳しく調べる。

今までの多くのチャーモニウムとボトモニウムの研究から重いクォークとその反クォークの間のポテンシャルに対して一つの統一的なポテンシャルが示唆されている。従来提案されたポテンシャルは、どれもその束縛状態の有効半径近傍で、非常に良く一致している。これらのポテンシャルは束縛状態の微細、超微細構造を無視した重心系のレベルを予言することによって成功を収めた。本論文では、より正確なポテンシャルを決定するためにチャーモニウムとボトモニウムの微細、超微細構造について詳細な研究を行ない、その結果得られたポテンシャルを用いてトッポニウムの分光学を議論する。

微細、超微細構造を調べる際に問題となるのは、ポテンシャルのローレンツ変換性である。ベクトル・ポテンシャルだけではチャーモニウムのP状態をうまく説明できないことは以前よりよく知られている。又、閉じ込めポテンシャルがベクトル型である場合、ディラック方程式では束縛状態にならないことが、クライン・パラドックスと関連して判っている。そのため、Eichten 他によって提案された線型閉じ込め+クーロンポテンシャルを閉じ込めポテンシャルはスカラー型であると仮定して、離型

として採用する。しかしながら、この模型を用いてチャーモニウムとボトモニウムのスペクトラムを再現しようとした結果、チャーモニウムのS状態における超微細分裂とP状態における微細分裂を同時には再現できないことがわかった。

微細、超微細構造は相対論的效果から出てきたもので、ポテンシャルの短距離における振舞いによって決定される。上記の困難を解消するためにはポテンシャルの短距離の部分に何等かの変更を加えなければならない。その場合、変更されるべきなのは、微細構造であるか、或いは、超微細構造であるかの二つの立場が考えられる。前者については、以前より多くの研究がなされ、例えば、クォークのカラー異常磁気モーメントの導入などが考えられた。本論文では、後者の立場を取り、大きすぎる超微細分裂を改善するには、どうすれば良いかを考える。

強い相互作用を司るものとして、我々には量子色力学(QCD)がある。当然、重クォークoniumもQCDに従って決定されるべきであるが、残念ながら、未だ技術的に難しい点が多く細かい議論が可能な方法がない。しかし、QCDの持つ漸近的自由性から高エネルギー領域では(即ち、短距離の領域では)摂動展開が可能でその極限におけるポテンシャルの形がわかっている。従って、超微細構造を改善する為にそのポテンシャルを取り入れることを考える。

摂動論的QCDの取り入れ方には二通り考えられる。一つはRichardsonによって考察されBuchmullerとTyeによって具体的に計算されたもので、短距離におけるQCDポテンシャルが長距離における閉じ込めポテンシャルに滑らかに接続するように作られたポテンシャルである。これは非常に短距離($\sim 0.051/\text{GeV}$)でしかQCDポテンシャルに近づかないため、重クォークoniumのスペクトラムにQCDポテンシャルはほとんど影響を与えない。又、もし全体のポテンシャルがベクトル型であるとすれば、上で述べたように、チャーモニウムのP状態を説明できない。これらの難点のために、本論文ではもう一つの見方を取る。それは短距離におけるQCDポテンシャルを1・グルーオン・交換のクーロンポテンシャルに長距離において滑らかに繋がるように取るものである。具体的にはQCDポテンシャルの形は、そのままは、使えないので、適当な函数形を仮定して近似する。これにスカラー型の線形閉じ込めポテンシャルを加えた模型を用いて、チャーモニウムとボトモニウムのスペクトラムを調べる。

上記の変更を加えた模型によってチャーモニウムとボトモニウムは非常によく再現される。又、この模型を用いてトッポニウムを調べた場合、そのレベル構造は変更の影響を大きく受け、変更されないままの雛形の模型と比較して大きな違いを示す。それは、トッポニウムの有効半径が非常に小さくポテンシャルの変更を受ける領域にトップクォークが入るからである。計算された波動函数を用いて消滅過程の崩壊を計算することができる。 I' (ボトモニウム)の崩壊は、今まで以上に良く実験を再現している。トッポニウムについては、変更しない従来の場合と比べて著しい違いを示す。最後に、ポテンシャルのスケール A と I' の崩壊によって決まる A の違いについて議論する。

論文審査の結果の要旨

約 20 年前に、陽子や中間子は、より基本的な粒子クォークの複合系であるというクォーク模型が提案された。その中で中間子の一種、重クォークコニウムの分光学は、ハドロンの構造を調べる上で大変興味深い研究対象となっている。また、トッポニウムは、現在、高エネルギー物理学の分野で大きな関心を集めている対象の一つであり、その分光学を研究することは、その分野の流れに沿ったものとして、大変有用である。重クォークコニウムの分光学を調べる手段としては、古くから用いられている非相対論的ポテンシャル模型がある。それによれば、今までのチャーモニウムとボトモニウムの分光学の研究より一つの統一的なポテンシャルが示唆されている。しかし、微細および超微細構造を含めた詳細な議論はまだ充分になされていない。森下は、相対論的補正を一次の摂動として考慮し、微細超微細構造を含めた重クォークコニウムの分光学の詳細な解析を行った。まず、従来良くチャーモニウムを記述できると考えられる Eichten 他によって提唱された「Linear plus Coulomb」模型に基づいて、チャーモニウムの微細、超微細構造を調べ、実際には、微細分離と超微細分離を同時には再現し得ないことを数値実験によって示した。そして、この困難は、従来多くの研究によって問題とされた微細構造ではなく、超微細構造に起因するものであるという見方を示唆した。これに基づいて、ポテンシャルの短距離領域に摂動論的量子色力学 (QCD) による修正を加えた模型を提案した。この修正は、チャーモニウムやボトモニウムの超微細構造に大きな影響を与える。上記の困難が、これによって克服されることを、チャーモニウムとボトモニウムのスペクトラムにおいて数値的に示した。また、この修正は、トッポニウムにおいては、そのレベル構造にも大きな影響を与えることが判った。このように、元来、非摂動論的な効果に専ら因るものと考えられた重クォークコニウムの分光学に、摂動論的 QCD が無視できない寄与をすることを例証したものである。この模型により計算された波動関数を重クォークコニウムの遷移と崩壊に適用することによって、ボトモニウムの崩壊が今まで以上に実験を再現すると期待できること、トッポニウムでは、特に消滅過程において、従来の模型と比較して、大きく異なる振舞いが予言されること等、重要な結果が得られた。そして、ポテンシャルから決定されるスケールパラメータ Λ と崩壊によって決まる Λ の違いについて、若干の興味深い考察がなされた。

以上のように、本研究は、重クォークコニウムの微細構造、超微細構造、崩壊の諸問題を同時に解決する一つの方法を見出したものであり、クォークの従う力学の解明について重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。

本研究は、物理情報処理論はもとより、応用物理的計測論、基礎・数理、物質科学の分野にも関係する総合的研究であり、これら諸分野に寄与するところが大きく、よって論文提出者、森下淳也は学術博士の学位を得る資格があると認める。