

学位論文題名

Multi-open-channel effects on the Ψ spectrum(Ψ の質量準位における開チャネルの効果)

学位論文内容の要旨

ハドロン現象は QCD によって支配されていると考えられている。しかしながら、直接 QCD から低エネルギーにおけるハドロンの特徴や性質を導く方法は確立するには至っていない。そのため、QCD から導かれた性質や現象から得られた法則に基づいた「有効理論」の確立が、ハドロン現象の理解に役立つと考えられる。

ここで重いクォーク・反クォークから成る中間子 (クォークonium) は、非相対論的近似が適用できると期待され、比較的単純で、多くの仮定やパラメーターを導入することなく調べることができる。実際、QCD の近距離と遠距離での振る舞いを取り入れたクォーク間ポテンシャルを用いた素朴な構成子模型において、OZI 許容崩壊の 閾値より下では、質量準位の特徴をよく理解できる。しかしながら、この模型は 閾値より上で観測される質量準位を再現できず、崩壊巾も説明できない。特に、観測から得られている重いクォークonium の S 波の質量差 ($M_n - M_{n-1}$ 、ここで M は質量、 n は主量子数) は主量子数が増すと一旦減少し、閾値が開いたエネルギーの間では増加へ転ずる振る舞いを示すことが知られている。この観測される質量準位の特徴を、素朴な模型は再現できていない。この結果、OZI 許容崩壊による開チャネルの効果の重要性が認識されるようになってきた。開チャネルの効果を取り入れた重い中間子の質量準位の分析は、結合チャネルの枠組みに基づいてこれまでに多くの研究者によって行われてきた。

最近、我々は Kogut と Susskind が提唱した現象論的模型を ψ と Υ に適用した。ここでの分析の大きな特徴は、原子分子や軽い中性子過剰核の研究において大きな成功を収めている複素座標スケーリング法を適用したことである。この方法を用いることで、開チャネルの境界条件を正しく取り込み、結合方程式を正確に解くことができる。加えて、複素座標スケーリング法は共鳴エネルギーや共鳴巾を複素固有値として直接求めることができるので、我々は ψ と Υ の質量だけではなく崩壊巾も議論した。この模型では、 ψ 、 Υ が OZI 許容崩壊で中間子へ崩壊する際の結合ポテンシャルが現象論的に導入されていた。そこでは開チャネルが 1 つである近似が採用された。それを正当化する根拠として、 $\psi(3S)$ の $D^*\bar{D}^*$ チャネルに対する崩壊分岐比が非常に大きいということ、また $\Upsilon(4S)$ の崩壊チャネルは $B\bar{B}$ チャネルだけであるという実験事実が挙げられる。また、崩壊後の中間子-反中間子の中に、One-Boson-Exchange ポテンシャルの類推から現

象論的に設定された exponential 型終状態相互作用が考慮されていた。その模型は観測されている ψ の S 波の質量準位と崩壊巾を再現する結果を得た。その分析の結果に基づいて、観測事実を説明する上で終状態相互作用が重要な役割を果たすこと、また、開チャンネルの閾値エネルギーのすぐ上の準位は開チャンネルとの結合の影響を強く受けることが指摘された。

一方、素朴な構成子模型で用いられたクォーク間ポテンシャルを拡張したクォーク間有効相互作用から軽いクォーク対生成による開チャンネルの効果を取り入れ、重い中間子の質量準位の分析を行ったものもあるが実験値を再現するには至っておらず、未だ十分な理解が得られているとは言えない。それらの分析は、終状態相互作用は取り入れられておらず、開チャンネルの状態はフリーな連続状態として取り扱われていた。そこで、終状態相互作用の効果を検討した微視的な模型による重い中間子の質量準位を調べることは、非常に興味深い問題であると考えられる。

本研究ではこれまでの現象論的分析や微視的な模型による分析を大きく進展させ、(1) クォーク間有効相互作用から微視的に導出したチャンネル間結合ポテンシャルを用いる、(2) 開チャンネルの中間子-反中間子間に One-Pion-Exchange ポテンシャルを基にした終状態相互作用を用いる (3) 複数の開チャンネル ($D\bar{D}$, $D\bar{D}^*$, $D^*\bar{D}^*$, $D_s\bar{D}_s$, $D_s\bar{D}_s^*$, $D_s^*\bar{D}_s^*$) を考慮する立場で、 ψ の質量準位を分析する。この分析を通して、クォーク間有効相互作用の有効性と開チャンネルにおける終状態相互作用の効果をはっきりとすることが目的である。そのために、複素座標スケーリング法を適用することで開チャンネルの境界条件を正しく取り込み、結合方程式を正確に解きあげる。また、複素座標スケーリング法を用いる利点として、開チャンネルの共鳴極についても情報が得られ、重い中間子ならびに共鳴極の崩壊幅が同時に求められることがある。このため、閉じ込められた重いクォーク・反クォークチャンネルと開チャンネルが結合する機構についての一般的な性質を詳細に調べることができる。

分析の結果、終状態相互作用を考慮することで、開チャンネルと閉チャンネル状態との間の結合により、共鳴極が現れることを確認した。この共鳴極の振る舞いから、開チャンネルと閉チャンネルの状態の結合機構についての理解が得られる。すなわち、 ψ の $4S$ 状態より高いエネルギー領域にその共鳴極が現れるとき実験的に観測されている質量と崩壊巾を再現し、先に述べた質量差における定性的傾向が再現されることがわかる。このような結合機構は、以前の現象論的 Kogut-Susskind 模型による分析にも見られたものである。中間子-反中間子の終状態相互作用は複素エネルギー面上における共鳴極の位置を決定し、それらの位置が ψ の閉じ込められた状態との結合の大きさに強い影響を与えることが示された。

これらの結果から、終状態相互作用が開チャンネルに対して重要な役割を果たしているという結論を得た。開チャンネルの終状態相互作用を考慮することによって、ここで仮定されたクォーク間有効相互作用は観測されている質量と崩壊巾を統一的に記述することに成功し、その有効性が確かめられた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 河 本 昇
副 査 教 授 藤 本 正 行
副 査 助 教 授 加 藤 幾 芳
副 査 講 師 大 西 明
副 査 教 授 松 田 康 夫 (北海道自動車短期大学)

学 位 論 文 題 名

Multi-open-channel effects on the Ψ spectrum

(Ψ の質量準位における開チャンネルの効果)

ハドロン現象は量子色力学 (QCD) によって支配されていると考えられている。しかしながら、今だ、直接 QCD から低エネルギーにおけるハドロンの特徴やそれらの性質を導く方法は確立するに至っていない。そのため、QCD から得られる基本的な理解に基づいた現象論的アプローチである「有効理論」によるハドロン現象の研究も重要であり、大きな成功を収めて来ている。

ここで重いクォーク・反クォークから成る中間子 (クォークonium) は、非相対論的近似が適用できると期待され、多くの仮定やパラメーターを導入することなく有効理論を用いて調べることが可能であると考えられている。実際、非摂動論的領域での QCD の理解に基づいた近距離での色クローンポテンシャルと遠距離での閉じ込めポテンシャルからなるクォーク間ポテンシャルを用いた素朴な構成子模型は、Okubo-Zweig-Iizuka (OZI) 許容崩壊の閾値より下の質量準位の特徴をよく説明する。しかし、この模型による質量準位は閾値より上で観測される質量準位から大きくずれ、それらの準位の持つ崩壊巾も説明できない。このことは、OZI 許容崩壊による開チャンネルの効果の重要性を示唆しており、開チャンネルの効果を取り入れた重い中間子の質量準位についての分析が必要であることを示している。

最近、申請者らは Kogut と Susskind が提唱した現象論的模型を ψ と Υ に適用し、質量のずれの問題、崩壊巾について詳細な研究を行った。その分析で、原子分子や軽い中性子過剰核の研究において大きな成功を収めている複素座標スケールリング法が適用された。この方法を用いることによって、開チャンネルの境界条件を正しく取り込み、共鳴エネルギーや共鳴巾を複素固有値として直接求めることが可能となり、 ψ と Υ の質量だけではなく崩壊巾も同時に分析することができるようになった。しかし、そこでは、 ψ 、 Υ が OZI 許容崩壊で中間子へ崩壊する際の結合ポテンシャルが現象論的に導入され、開チャンネルを 1 つとする近似によるものであった。また、崩壊後の中間子—反中間子の間に、One-Boson-Exchange ポテンシャルの類推から指数型終状態相互作用が用いられた。

本論文ではこれまでの現象論的分析や微視的な模型による分析を大きく進展させ、次のことを取り入れた ψ の質量準位の研究を実行した。すなわち、(1) クォーク間有効相互作用から微視的に導出したチャンネル間結合ポテンシャルを用いる、(2) 開チャンネルの中間子—反中間子間に One-Pion-Exchange ポテンシャルを基にした終状態相互作用を用いる、(3) 考慮すべき全ての開チャンネル ($D\bar{D}$, $D\bar{D}^*$, $D^*\bar{D}^*$, $D_s\bar{D}_s$, $D_s\bar{D}_s^*$, $D_s^*\bar{D}_s^*$) を取り入れる、ことを行った。この分析を通して、クォーク間有効相互作用の有効性と開チャンネルにおける終状態相互作用の効果を明らかにすることが可能になった。

分析の結果、終状態相互作用が崩壊メソン間に働き、開チャンネルと閉チャンネル状態との間の結合の結果として共鳴極が現れることを示し、この共鳴極の振る舞いから、開チャンネルと閉チャンネルの状

態の結合機構についての理解が得られることを論じた。すなわち、 ψ の 4S 状態より高いエネルギー領域にその共鳴極が現れる時実験的に観測されている質量と崩壊巾を再現し、素朴な構成子模型における質量のずれの問題が解決されることを示した。

これらの結果から、終状態相互作用が開チャンネルに対して重要な役割を果たしており、そのような開チャンネルの終状態相互作用を考慮することによって、はじめてクォーク間有効相互作用を用いた ψ の質量と崩壊巾の統一的記述ができるという結論を得た。

これを要するに、著者は、クォーク模型による中間子の励起質量、崩壊巾について新たな理解の可能性を示したものであり、ハドロン分光学および原子核物理学の分野の研究に対して貢献するところ大なるものである。

よって審査員一同は、著者が北海道大学博士(理学)の学位を授与される資格あるものと認める。