

論文内容の要旨

論文題名 Study of J/ψ -Hadron Interaction from Quenched Lattice QCD

(格子量子色力学に基づく J/ψ -ハドロン相互作用の研究)

氏名 横川 一夫

ハドロン物理の目的は、ハドロン単体の性質を知ることばかりではなく、様々なハドロンの中に働く相互作用を理解することも重要な課題である。そのなかでも特に核子-核子間に働く核力の理解は、原子核物理の基本を支えており、殊に重要な課題である。ハドロンを構成するクォークやグルーオンの間に働く強い相互作用は、量子色力学 (QCD) により支配されていると考えられている。ところが、低エネルギー領域では QCD の非摂動性により、ハドロン間相互作用を QCD から直接的理解は至ってはいない。

現在、非摂動的に QCD を扱う最も有力な手法に格子 QCD が挙げられる。時空の離散化により経路積分の直接評価を可能にし、ハドロン質量スペクトルの十分な精度を持った定量的評価が可能となって来ている。格子 QCD では、時空の離散化に伴い有限体積の箱を想定し、その箱の中でハドロンの性質が数値実験により測定される。この有限体積の箱に2体のハドロンを入れた時、ハドロン間の相互作用により、自由粒子として2体のハドロンが存在する場合の系のエネルギーからのずれが生じる。このエネルギーシフトは、相互作用の到達距離が有限であるならば、連続理論に対応する無限体積の状況下で消失する。

すなわち、このエネルギーシフトは、有限体積の箱に2体のハドロンを閉じ込めた人為的な効果であると言える。この人為的に生じた状況下で発生するエネルギーシフトと、散乱現象での物理量である位相差との間の関係がルッシャーによって導かれた。このエネルギーシフトと散乱位相差の関係により、低エネルギー散乱現象へのQCDの直接適用の可能性が開かれた。

我々は、ハドロン間相互作用の系統的理解のために、最もシンプルであるグルーオンのみによる相互作用、すなわち、価クォーク交換を含まない相互作用に着目した。この相互作用は、軽ハドロンと重クォークoniumの間の典型的な相互作用である。特にここで我々は、 J/ψ -ハドロン相互作用に着目した。 J/ψ -ハドロン相互作用は、クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) 形成の重要な探索指針の一つである J/ψ 抑制機構の理解する上でも、欠くことのできない重要なテーマである。高エネルギーの核子-核子散乱や核子-原子核散乱の散乱断面積は、ハドロン模型や短距離 QCD に基づく解析から定量的な一致を示し、それぞれの描象から理解されている。一方、チャーモニウムの閾値付近での、それぞれの予言は異なる様相を呈しており、QCD に基づく定量的理解が必要である。また、相互作用はグルーオンによって担われるため、パウリの排他律に基づく斥力の不在が予想され、比較的弱い引力であっても J/ψ -原子核束縛状態が形成される可能性も指摘されている。

我々はこの様な背景の下、定量的な J/ψ -ハドロン相互作用の研究をクエンチ近似の下での格子 QCD 数値実験を用いた。散乱過程として、 J/ψ - π 、 J/ψ - ρ 及び J/ψ -N (核子) を取り扱った。結合定数は $\beta = 6.2$ を採用した。格子間隔に換算すると、 $a \sim 0.068$ fm ($a^{-1} \sim 3$ GeV) に対応する。格子体積は $L^3 \times T = 24^3 \times 48$ 、 $32^3 \times 48$ 及び $48^3 \times 48$ の3点を採用した。それぞれ、一辺 1.6、2.1、3.2 fm の箱に対応する。また、ホッピング・パラメータを J/ψ に対し $\kappa = 0.1360$ 、カイラル外挿のために $\kappa = 0.1489, 0.1506, 0.1520$ の3点用意した。それぞれ質量は、 $m_{J/\psi} \sim 3$ GeV、 $m_\pi \sim 1.2, 0.9, 0.6$ GeV に対応する。4点関数の測定から相互作用する2体系をエネルギーを求め、2点関数からハドロン質量を求め、それらの差からエネルギーシフトが得られる。このエネルギーシフトから散乱長が求められる。

4点関数の測定から、 J/ψ - ρ の各スピンチャンネル 0、1、2 及び J/ψ -N の各スピンチャンネル 1/2、3/2、それぞれのスピン間に顕著な変化は観測されなかった。超微細構造の測定を行うためには、更に統計をため統計

誤差を抑制する必要があることが分かった。次に我々はエネルギーシフトの抽出を行った。エネルギーシフトはハドロン質量に比べ値が小さく、統計誤差の影響を強く受ける。そこで、我々は4点間数有効質量に対して、定数フィットの χ^2/DoF が最小となるフィット区間を採用した。これは、箱の中で相互作用するハドロン2体系の基底状態のエネルギースペクトルを引き出すための条件である。その結果、エネルギーシフトは、 $J/\psi - \pi$ 、 $J/\psi - \rho$ 及び $J/\psi - N$ 全てのチャンネルで、相互作用は引力的であることが判明した。

更に我々は、エネルギーシフトに線形の m_π^2 依存性を仮定しカイラル外挿を行い、物理的領域 ($m_\pi = 140 \text{ MeV}$) での値を推定した。各格子体積の物理的領域でのエネルギーシフトは、 $J/\psi - \pi$ と他のチャンネルで異なる振る舞いを示した。 $J/\psi - \pi$ のエネルギーシフトは、 L の増加に伴いその絶対値は減少した。これは、無限体積でエネルギーシフトが消失することから予想される振る舞いである。一方、 $J/\psi - \rho$ 及び $J/\psi - N$ は $L=24$ から $L=32$ の区間でエネルギーシフトの絶対値の増加傾向が確認された。この事実は、 $J/\psi - \rho$ 及び $J/\psi - N$ に対して、箱の体積が小さすぎることを示唆している。従って我々は、 $J/\psi - \rho$ 及び $J/\psi - N$ の $L=24$ でのデータは有限体積効果を強く受けており、 $L=24$ を含むデータからは無限体積で有効な物理量の抽出は困難であると判断し、無限体積での物理量の解析からは除外した。

最終的に我々は、各体積でのエネルギーシフトにルツシャーの位相差の関係式を適用し、散乱長を得た。一方、エネルギーシフトは一般に大きな格子体積では L^{-3} で現れることが知られているため、エネルギーシフトの L^{-3} の係数と大きな L での展開式の比較からも散乱長の評価が可能である。十分大きな L (L^3 の振る舞いを示す) の場合に、両者は一致する。そこで我々は、位相差の関係式 (PSF) と大きな L での展開 (LLE) の両者による評価を行った。その結果、 $J/\psi - \pi$ 散乱長は精度良く測定されることが分かった。一方、 $J/\psi - \rho$ 及び $J/\psi - N$ 散乱長は誤差の範囲で一致はするが、有限体積効果の影響が大きく測定の精度が低下している可能性が高い。また、有限体積効果の振る舞いから、ここで得られた値は、 $J/\psi - \rho$ 及び $J/\psi - N$ 散乱長の上限を与えると考えられる。

PSF より得られた $J/\psi - \pi$ 散乱長は $0.0111(30) \text{ fm}$ である。短距離 QCD による評価とほぼ一致している。パイオンの持つカイラル対称性による性質から、他の散乱長に比べ小さな値となっている。一方、PSF による $J/\psi - \rho$ 散乱長

は、スピン 0、1、2 の順に 0.228(127)、0.159(106)、0.149(98) fm となった。PSF による $J/\psi - N$ 散乱長は、スピン 1/2、3/2 の順に 0.386(407)、0.545(574) fm となった。いずれも統計誤差が大きく、有限体積効果の影響も強く受けている可能性があるため、これらの値は上限値であると考えられる。 $J/\psi - N$ 散乱長は QCD 和則、グルーオン・ファンデルワールス相互作用、QCD 多重極展開により、約 0.1 - 0.4 fm 程度であると評価されている。我々の結果は統計誤差が大きいものの、これらの値と矛盾のない結果が得られた。

より正確な測定をするためには、更なる統計の蓄積が非常に重要である。またより大きな格子体積での数値実験も、 $J/\psi - \rho$ 及び $J/\psi - N$ の測定をする上で欠かすことはできない。また、動的クォークの影響も考慮すべき重要な課題である。