

論文内容の要旨

論文題目 格子 QCD による中間子-中間子散乱長の計算
(Calculation of meson-meson scattering lengths from lattice QCD)

氏名 矢木 拓也

我々の住む世界は主に原子によって構成されている。そして原子は、その中心に位置する原子核とその周囲に束縛された電子によって特徴付けられる。原子核は中性子・陽子といった核子によって構成されており、核子間に働く相互作用は原子間に働く電磁気力とは全く異質の核力によって記述される。核力の源は、核子を構成する素粒子であるクォーク間に働く強い相互作用をその源とし、強い相互作用はクォークを特徴付けるカラー量子数についての対称性、 $SU(3)$ ゲージ不変性によって決定される。これを量子色力学 (Quantum Chromo Dynamics : QCD) と呼ぶ。QCD は、その代表的な性質である漸近的自由性によって、高いエネルギー領域では結合定数は減少し、摂動論的手法によって物理量の計算を行うことが出来る。一方で、低いエネルギー領域ではゲージ場の結合が発散し、摂動展開による物理の記述は破綻する。摂動論に頼らない手法は、少数だが存在し、中でも近年の計算機の実進に伴って注目を集めているのが、格子 QCD シミュレーションである。本論文においては、格子 QCD シミュレーションを用いて、粒子間の相互作用を特徴付ける散乱長の計算を行い、QCD の非摂動論的な側面が本質的な役割を果たすハドロン相互作用の物理を、第一原理から明らかにすることを目標とした。

本論文に於いては、まず格子 QCD シミュレーションを理解する上で不可欠な基礎を説明する。その後、本論文の根幹部分である、格子 QCD シミュレーションによる中間子間の散乱長の計算についての議論を、2 章に分割して行った。実際に計算を行った系は、以下で説明するように、カイラル対称性によって相互作用が決定される軽い中間子の系と、チャームクォークを含む重い中間子の系に大別できる。

中間子の中でも特にパイ中間子のような軽いハドロンの目を向けると、粒子間の相互作用が、クォークの対称性、所謂カイラル対称性によって完全に決定されていることが知られている。もちろん QCD で記述されるグルーオンの交換が相互作用の起源では有るが、そこからカイラル対称性のみを切り出し、有効ラグランジアンを構築すれば、QCD そのものに頼らずとも散乱振幅は記述できる。

一方で格子 QCD シミュレーションにおいては、その黎明期以来、有限の格子上でカイラル対称性を持つフェルミオンを作ることは出来無いとされてきた。この問題に対するブレイクスルーが格子上での厳密なカイラル対称性であるギンスバーグ・ウィルソン関係式とそれを満たすオーバーラップフェルミオンである。このフェルミオンは非常に計算機コストが掛かることが問題であったが、近年の計算機の進歩や、数値計算の技術的な発展を通じて、主に JLQCD コラボレーションによって現実的な計算が成されるようになった。

そこで、このオーバーラップフェルミオンを用いて、JLQCD コラボレーションによって生成された、2 フレーバーの動的な約 200 個のゲージ配位の下で、アイソスピン $I = 2$ のチャンネルのパイ中間子散乱 ($\pi^+ + \pi^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+$) の散乱長の計算を行った。ゲージ配位は、格子単位 $a \simeq 0.12$ [fm] であり、空間方向の体積を V 、時間方向の長さを T とすると、 $V \cdot T = 16^3 \times 32$ の格子点を有した有限空間である。シミュレーションで得られた物理量を現実世界の物理量へと外挿するためには、 $m_\pi \sim 140$ [MeV] へのカイラル外挿が必要となる。十分信頼できる精度の外挿を行うために、クォーク質量は現実世界でのストレンジクォークの質量を m_s として $m_s/6$ から m_s に渡る 6 点で計算を行った。計算により得られた相関関数には、時間方向の境界条件に由来する余分な項が存在し、エネルギー固有値の読み取りを妨げる。また、パイ中間子のコンプトン波長が箱の大きさに対して無視できない場合には、物理量に対する有限体積効果が有意に存在する可能性がある。このため、時間方向の境界条件に由来する項や、有限体積効果の影響を評価し、注意深く取り除いた。最終的に、得られた散乱長にカイラル摂動論による第 3 主要次数 (NNLO) の記述を用いてカイラル外挿を行った。外挿の結果、NNLO での記述と整合性が良く取れていること、また外挿された散乱長や、フィッティングにより得られるカイラル摂動論の低エネルギー定数の値は、実験より得られた現象論的な値と非常に良い精度で合うことが解った。

このチャンネルは格子 QCD を用いて散乱長を計算する上で最もシンプルなチャンネルであり、試験場としての側面も有る。格子 QCD を用いてハドロンの相互作用を計算する際の基礎的な方法論をこの研究から学び、より一般の系に対して研究を行う上での礎とした。

次に、チャームクォークを含むような重い中間子の系に目を向ければ、パイ中間子のようにカイラル対称性の議論から相互作用が完全に記述されるのではなく、QCD の異なった側面によってハドロンの相互作用は記述されている。従って、格子 QCD シミュレーションの様な、QCD による第一原理計算による相互作用の理解が不可欠なものとなる。

チャームを含む中間子系において、近年特に注目を集めているのが、主に KEK の Belle コラボレーションによって発見されてきた、エキゾチックハドロンと呼ばれる豊かな構造を持ったハドロンの群である。その中でも、2007 年に同コラボレーションによって発見された $Z^+(4430)$ は、その崩壊チャンネルより \bar{c}, c, u, \bar{d} の 4 つのクォークにより構成されていると期待される、とりわけ重要なエキゾチックハドロンである。

$Z^+(4430)$ が、中間子の分子状態として記述される可能性を調べるため、2 つの D 中間子 $D_1 D^*(I^G(J^P) = 1^+(0^-))$ の散乱長と、 $Z^+(4430)$ と結合するその他のチャンネルの散乱長の計算を行った。ゲージ配位には、自分たちで生成した、クエンチ近似を施した $a \simeq 0.07$ [fm] の 2000 個の $V \cdot T = 24^3 \times 48$ のゲージ配位と 3000 個の $V \cdot T = 16^3 \times 48$ のゲージ配位を用いた。そしてクォーク伝搬関数には、チャームクォーク、アップ、ダウンクォークいずれにもウィルソンフェルミオンを用いて計算を行った。計算の結果、 $D_1 D^*$ を含めた D 中間子散乱のチャンネルには、束縛状態を作り得ることを示唆する程の強い引力が観測され、軽い中間子とチャーモニウムのチャンネルにも引力的な散乱状態が確認された。とりわけ、 D 中間子散乱は軽いクォークの質量依存性が

顕著にあらわれることがわかった。

これらの研究を通して次の知見が得られた。軽いパイ中間子の系とチャームクォークを含む重い中間子の系では、得られた散乱長の振る舞いに顕著な違いがある。パイ中間子散乱に対して得られた散乱長は、物理的極限近傍では $a_{\pi\pi}^{I=2} \sim -0.06$ [fm] と非常に小さく斥力的であった。これは、カイラル対称性を反映したカレント代数から理解することができて、 m_π^2 に比例すると考えられる。それに対して、チャーム中間子散乱においては引力的であり、その大きさはパイ中間子散乱よりずっと大きい。 $\chi_{c1}(1P)\rho$ や $J/\psi a_1$ のチャンネルでは、束縛状態は作らないが $a \sim 1$ [fm] で、統計精度の範囲ではパイ中間子の質量に対する依存性もほとんど見られなかった。さらに D 中間子散乱のチャンネルに至っては、束縛状態を作りうるほどの強い引力が見られた。このことは、ハドロン間の相互作用においては QCD の非摂動論的效果が重要であるが、軽い中間子間の相互作用と重い中間子間の相互作用を特徴付ける、非摂動論的效果の側面、すなわち物理が異なることを意味する。軽い中間子間の相互作用ではカイラル対称性がその物理であるのに対して、重い中間子間の相互作用では、我々はまだその物理を十分に理解していない。重い中間子の相互作用は、強い相互作用の新しい存在形態であるエキゾチックハドロンと密接に関係しているように、豊かな物理が潜んでいる可能性が存在する。重要なことは、軽い中間子の系と重い中間子の系に対して、それぞれ異なる有効理論やモデルを適用するのではなくて、同じ枠組み、すなわち第一原理である QCD に基づいた、非摂動論的なアプローチを行うことによって初めてその違いを明らかにしたことである。本研究を通して学んだことを糧とし、さらに発展させ、ハドロンの相互作用の統一的理解へと迫っていくことが今後の課題である。