

格子量子色力学による核力の解明とその発展



京都大学 基礎物理学研究所 教授

青木 慎也

(お問い合わせ先) TEL : 075-753-7001 E-MAIL : saoki@yukawa.kyoto-u.ac.jp

研究の背景

宇宙の物質の大部分を占める核子（陽子や中性子の総称）は、相互作用（核力）により原子核を構成しています。湯川博士は、パイ中間子の交換で核力の起源を説明しましたが、現在はより複雑な構造をもっていることがわかってきました（図1）。一方、核子はクォークの束縛状態であり、クォークの運動は量子色力学（QCD）によって記述されますが、摂動展開のような解析的な手法では解くことができません。

そこで、QCDを離散的な格子空間上に定義した格子QCDが提案され、大規模数値シミュレーションを駆使し、核子質量の計算などで成功してきました。次の目標は、格子QCDを用いて複雑な核力を導くことですが、なかなかうまくいきませんでした。その理由は、単に計算が複雑で難しいだけでなく、QCDのような場の量子論で力（ポテンシャル）をどのように定義するかという根本的な問題があるためでした。

研究の成果

私たち（青木、石井、初田）は、QCDから核力を導くという難問に挑み、2007年に格子QCDにより世界で

初めて核力ポテンシャルを計算しました（図2）。計算上の制約による様々な系統誤差のため定量的には不十分ですが、定性的には、湯川が予言した遠距離での引力、中間領域でのより強い引力、近距離での斥力（斥力芯）など、核力ポテンシャルの複雑な構造を再現しています。

この研究のブレークスルーは、核子2体の波動関数が散乱位相差の情報をもっていることに注目し、その散乱位相差を正しく再現するポテンシャルを定義したことです。通常は、原因（ポテンシャル）から結果（散乱位相差）を計算するのですが、ここではそれを逆転させ、結果から原因を定義したわけです。

今後の展望

私たちが開発した方法は一般的なもので、核子間だけでなく一般のハドロン間の相互作用にも適用できます。現在は、HAL (Hadron to Atomic nuclei in Lattice) QCD Collaborationという研究グループを作り、様々なハドロン間の相互作用を調べています。例えば、 Ω 粒子間のポテンシャルは核力に比べて引力がより強く（図3）、その結果、束縛状態が存在することがわかってきました。

この状態はストレンジ（奇妙な）クォークの6つの状態なので、「もっとも奇妙な6クォーク状態」と呼んでいます。将来の実験で発見されるのでは期待しています。これからも私たちの方法をさらに発展させ、エキゾチックハドロンと呼ばれる様々な共鳴状態の解明を目指していきます。

関連する科研費

2008-2012年度 新学術領域研究（研究領域提案型）「素核宇宙融合による計算科学に基づいた重層の物質構造の解明」

2008-2010年度基盤研究（B）「格子量子色力学による核力の研究」

2013-2016年度基盤研究（B）「格子QCDによる核力ポテンシャルの方法の理論的拡張とその応用」

2016-2019年度基盤研究（B）「格子QCDによるハドロン間ポテンシャルの研究の発展」

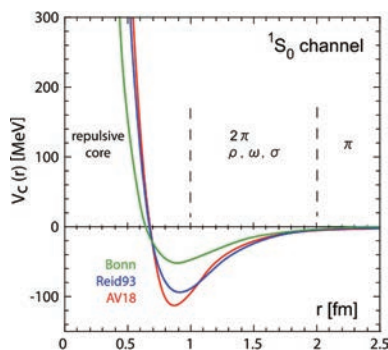


図1 実験をもとに決定された核力ポテンシャルの例。横軸は核子間の距離 ($\text{fm}=10^{-13}\text{cm}$)、縦軸は全スピンが0の状態の場合のポテンシャルエネルギー ($\text{MeV}=10^6\text{eV}$)。

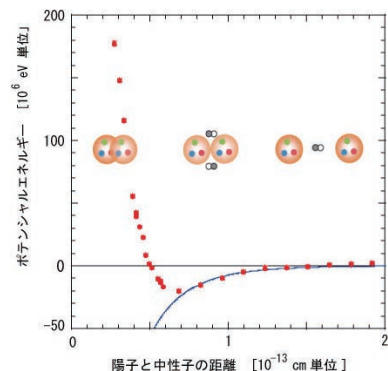


図2 格子QCDで初めて計算された核力ポテンシャル。全スピンがゼロで陽子と中性子に対するもの。実線はパイ中間子交換の寄与を表す

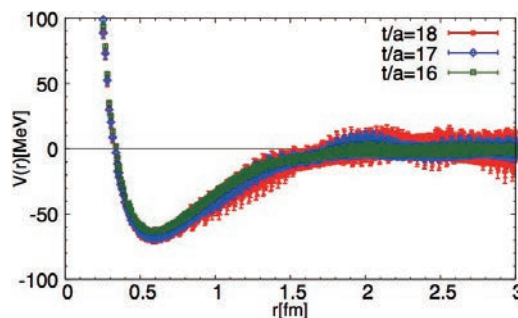


図3 Ω 粒子間に働くポテンシャル。3つの異なるデータから計算して整合性をチェックしている。