

背景

原子核を構成する要素である陽子、中性子 (2 つを総称して核子と呼ぶ) の発見からすでに 100 年ほど経った。その間に核子の構造は飛躍的に進み、核子がさらに小さい単位であるクォークとグルーオンによって構成されていることがわかった。さらにはクォークとグルーオンが従う第一原理たる量子色力学 (Quantum ChromoDynamics, 以降 QCD) までもが定式化され、多数の実験的事実から QCD が基礎理論であることは間違いないとされている。その一方で、クォークから構成される粒子の静的な性質を第一原理から導くことは非常に難しく、数値シミュレーションに頼らざるを得ない上、その数値シミュレーションですら現実的なセットアップが実現可能となったのは最近の話である。その意味で我々の核子に関する知見はまだ十分とは言い難い。

核子はそれ自体が興味のある対象であるし、近年の実験精度の向上を鑑みると標準模型を超えた物理のプローブとしての役割も期待できる。中性子 β 崩壊の精密実験や核子の電気双極子モーメント (Electric Dipole Moment, 以降 EDM) の測定はまさにそれを目指したものであり、通常の核子の結合定数と合わせて、 β 崩壊に寄与するスカラー、テンソル型の結合のエネルギースケールや、クォークが持ちうる EDM の大きさに制限を与えることができる。当然のことながらこれには核子の結合定数の精密な測定が必須となっていて、スカラー、テンソル型の結合定数は実験的に精密に測る方法が存在しないため理論計算の助けを借りなければならない状況にある。その第一候補は格子 QCD の方法による数値シミュレーションである。

計算機の演算能力の限界からこれまで格子 QCD シミュレーションは重いクォーク質量での計算を余儀なくされてきたが、近年ようやく現実のクォーク質量での計算が実現してきている。しかし現在のところ信頼できるデータは少なく、まだ新しい計算を行う必要がある。

内容

本博士論文では Domain-wall fermion と Wilson-clover fermion の 2 つの格子上のフェルミオンの形式を使った現実的な格子 QCD 計算が主題となる。前者の Domain-wall fermion はカイラル対称性をよく保ったフェルミオンで、さらには異なる格子間隔での計算も行って連続極限をとった。クォーク質量の重い計算ではあるが、理論的に見通しがよい。後者の Wilson-clover fermion の計算はカイラル対称性を多少犠牲にしているがクォーク質量が現実のものと一致する物理点直上の計算であり、精度も非常に高いところが強みとなる。しかし今の段階では一つの格子間隔での計算までしか終わっていないために連続極限をとることはしていない。それでもなお物理点直上での精度の高い計算は価値のあるものであり、本論文のメインの成果となる。離散化誤差は評価できないが、前者の Domain-Wall fermion の結果がそれがどの程度かの指標となる。その意味ではこの 2 つの計算は別個のものではなくむしろ相補的になっている。これらの内容の一部はすでに文献 [2, 3] にて発表済である。

結果

Wilson-clover fermion を使った計算ではメインにつかった PACS10 配位の他に HPCI 配位も使っている。後者のゲージ配位はややクォーク質量が重いものの、未だに有用なゲージ配位である。本論文において DWF, PACS10, HPCI のそれぞれのゲージ配位を用いて得られた核子の軸性ベクトル、スカラー、テンソル型の結合の理論計算の結果を図 1 に示す。どのゲージ配位を使った計算でも先行研究とエラーの範囲内で一致する結

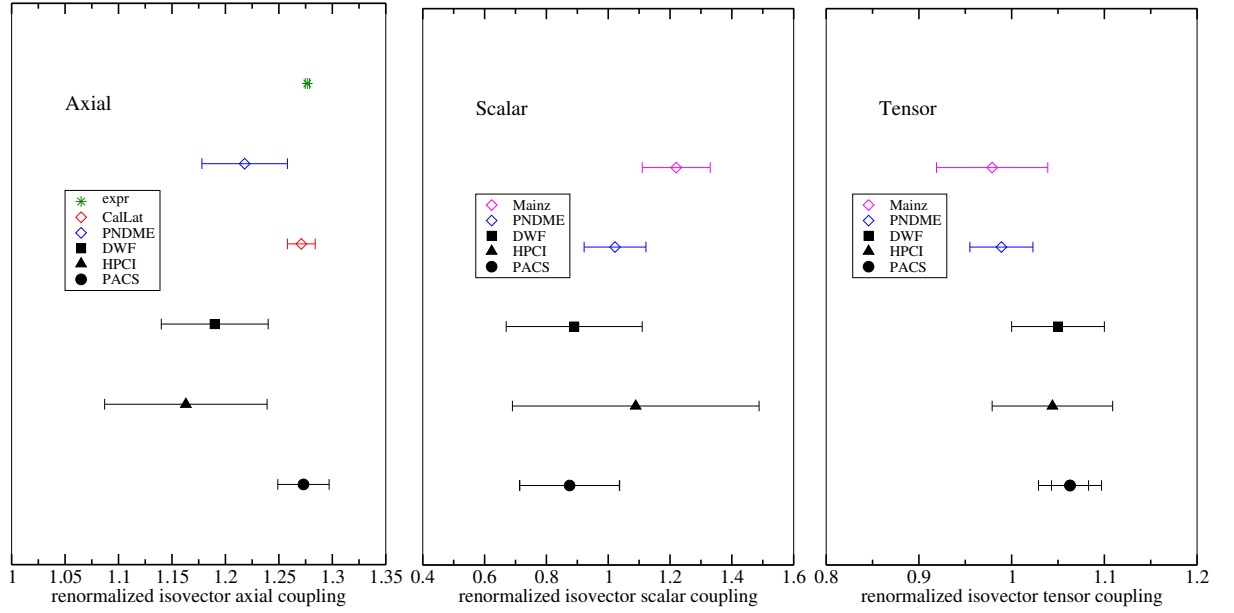


図 1 得られた結果と先行研究との比較。黒丸が PACS10 配位での結果、黒三角が HPCI 配位での結果、黒四角が DWF の結果であり、白抜き図形は他のグループ (PNDME Collaboration, CalLat Collaboration, Mainz のグループ) であり、緑の星型は実験値に対応する。

果が得られている。特に注目すべきことは PACS10 配位では軸性ベクトル型結合において実験値を統計誤差 2% で完全に再現できていることで、実験結果のないスカラー、テンソル結合の理論予想の精度をこのレベルで保証しているといえる。本研究の結果は系統的な誤差が大きいことにより、先行結果と比べて精度においては一步譲る形になったものの、PACS10 の結果は今後計画している別の格子間隔の計算により系統誤差が排除されることが期待できる。そのため統計誤差のみの値を内側のエラーバーとして図示してある。さらに本論文においてこれらのスカラー、テンソル型の結合定数の結果をインプットとして、標準理論を超えた物理に関わるパラメータに制限をつけた。

発表論文

- [1] K. I. Ishikawa, Y. Kuramashi, S. Sasaki, N. Tsukamoto, A. Ukawa and T. Yamazaki, Phys. Rev. D **98**, 074510 (2018), [1807.03974].
- [2] N. Tsukamoto and S. Sasaki, JPS Conf. Proc. **26**, 031011 (2019).
- [3] N. Tsukamoto, Y. Aoki, K. I. Ishikawa, Y. Kuramashi, E. Shintani, S. Sasaki and T. Yamazaki, PoS LATTICE 2019, 132 (2020), [1912.00654].