

2+1 フレーバー格子 QCD による核子構造関数の研究
(Nucleon structure functions in 2+1 flavor Lattice QCD)

東北大学 理学研究科 物理学専攻

B9SM2056 辻竜太郎

背景

約 100 年前より、Rutherford の実験をはじめ数々の実験成果や理論物理の進展から、身の回りの物質を構成する原子の内部構造が明らかにされてきた。その過程で存在が認められた陽子や中性子(総称して核子)は原子核の構成単位として機能していることが突き止められた。更に現在の素粒子物理学における標準模型によると、核子もまた素粒子(クォークとグルーオン)から構成される安定な複合粒子であり、素粒子間の相互作用は量子色力学(QCD)で定式化されている。それにも関わらず、核子の大きさやスピン起源など基本的な構造ですら QCD による完全な説明は成功していない。これは、理論の持つ強結合性・グルーオンの自己相互作用という性質のために、核子のエネルギースケールでその構造を解析的に予言することが困難となるからである。そこで、核子構造の理論的研究では格子 QCD による数値計算がそのような非摂動領域に最も直接的である。格子 QCD はかつて、非物理的な条件下でのシミュレーションでの半定量的手法に留まっていた。しかし近年では計算アルゴリズムや計算機性能の向上に伴い、より現実的な環境下での第一原理計算が可能となった。その成果として、精度評価の一里塚である核子軸性電荷を再現した [1] ことが挙げられ、現在は核子構造を実験に比肩する精度で研究できる数値実験としての役割を色濃くし始めた黎明期にある。

内容

本修士論文では、核子構造を記述する構造関数の情報に格子 QCD による第一原理計算を用いてアクセスすることを目的とする。具体的にはアイソベクター型のクォーク運動量割合 $\langle x \rangle_{u-d}$ とクォークヘリシティ割合 $\langle x \rangle_{\Delta u - \Delta d}$ の 2 つが対象となり、これらの計算が研究の主題である。これらは、実験及び現象論からも評価されており、格子上でのパートン分布関数の構築に向けたベンチマークとしての動機を持つ。実際の計算は、筑波大学格子 QCD グループ (PACS Collaboration) によって生成された PACS10 配位 [2] を用いて行った。この配位は核子スケール 1 (fm) に対して十分大きな体積 $(10 \text{ fm})^4$ を有し、かつ π 中間子の質量が実験値 135 MeV を再現している大きな利点を持つ。このために、有限体積効果やカイラル外挿に由来する系統誤差を排除でき、その成果として上述の核子軸性電荷を精密に再現した実績を持つ。しかし、現段階では 1 つの格子間隔での計算しか終わっていないため、離散化に由来する不定性は有しており、それらの評価は今後の研究によって明らかにされる。

結果

クォーク運動量割合 $\langle x \rangle_{u-d}$ とクォークヘリシティ割合 $\langle x \rangle_{\Delta u - \Delta d}$ の 2 つについて、PACS 10 配位を用いて評価した本研究の結果と先行研究、実験より得られた結果を図 1 に示した。この物理量はくりこみに依存するため、行列要素とくりこみ因子の双方の計算が必須であり、その積として対象をくりこみ点 2 GeV ($\overline{\text{MS}}$ スキーム) で評価した。本研究では系統誤差への対応として以下に述べる 2 つを主に行った。まず行列要素に現れる励起状態混合の問題については Ratio method と Summation method の 2 つを採用し、一貫性を確認した。また、くりこみ因子に現れる非摂動効果と離散化誤差

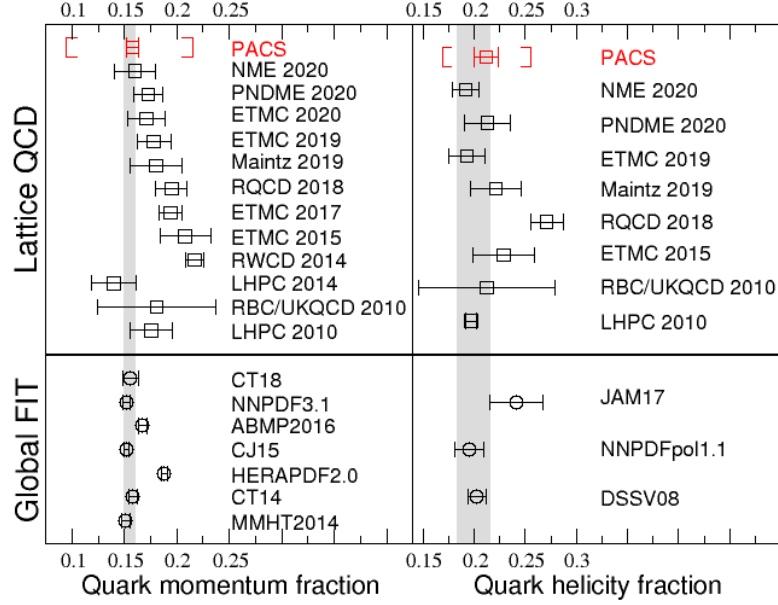


図1 得られた結果と先行研究 (上段)・実験結果 (下段) の比較 [3]。上段最上部が本研究の結果。ここで誤差棒は統計誤差であり、外の括弧は系統誤差を含めた総合的な誤差を表す。灰色の帯は [4] により提供されている参考値で、 $\langle x \rangle_{u-d} = 0.155(5)$ 、 $\langle x \rangle_{\Delta u-\Delta d} = 0.199(16)$ 。

については模型に基づく2種類のフィットを行った。最終的に得られた結果は次の通りである。

$$\langle x \rangle_{u-d}^{\overline{\text{MS}}(2 \text{ GeV})} = 0.158(5)_{\text{sta.}}(45)_{\text{sys.}}(40)_{\text{ren.}}, \quad \langle x \rangle_{\Delta u-\Delta d}^{\overline{\text{MS}}(2 \text{ GeV})} = 0.212(12)_{\text{sta.}}(11)_{\text{sys.}}(40)_{\text{ren.}}$$

中心値と1つ目の括弧は最も安定なフィットを採用した場合での値とその統計誤差に対応し、実験値を良く再現している。続く2つの括弧は、行列要素の解析法とフィット関数の選定に現れる違いを系統誤差として計上した。現状、運動量割合には行列要素の励起状態の除去法に統計誤差内での整合性が認められず、くりこみ因子は双方ともに強い模型依存性を有している。つまり、行列要素の統計誤差は実験値と同等の精度で制御できているが、絶対値の確定に必要なくりこみ因子の計算において大きな系統誤差を排除できず、また行列要素についても同程度の隠れた系統誤差が残っている。

本修士論文では核子内クォークの運動量割合及びヘリシティ割合について、行列要素とくりこみ因子の双方を第一原理的に計算し、実験値と直接比較できる量として評価できた。更に、その統計誤差は実験に比肩する精度を達成することに成功した。しかし結果には解析法や模型依存性を残す現状にある。これを受け今後は連続極限への計算に限らず、励起状態混合の除去に向けた追加の計算や模型に依存しない計算を目的に新規手法を実装したい。後者は当該研究においては全く新しい手法であるが他の類似研究では既に優位性が確認 [5] されており、現状の問題解決に有用であると期待できる。

参考文献

- [1] E.Shintani et al., Phys. Rev. D **94**, 014510(2019).
- [2] K.-I. Ishikawa et al., Phys. Rev. D **100**, 094502(2019).
- [3] Santanu Mondal et al., arXiv:2011.12787v1 (2020).
- [4] H.-W. Lin et al., Progress in Particle and Nuclear Physics, Volume 100(2018), pages 107-160.
- [5] Y. Aoki et al., Phys. Rev. D **78**, 054510 (2008).