格子場の理論に基づく核子構造研究

日本のスピン物理学の展望

Ryutaro TSUJI (Tohoku U.) for PACS Collaboration

In collaboration with:Y.Aoki, K.-I. Ishikawa,Y. Kuramashi, S. Sasaki, E. Shintani and T.Yamazaki

NWVERSE NY EQ

MARDOR9

主題の導入&先行研究

- 核子が持つ構造の研究
- 核子構造関数の研究
- 当該研究分野におけるPACSの位置づけ



核子構造の精密な計算によって新物理に制約をかける ② QCDに立脚した原子核の理解



核子構造と量子色力学

高エネルギー量子色力学(QCD)

クォーク・グルーオン 描像



クォークとグルーオンの力学 ? スピン危機 から核子構造(核子の性質)を ? 質量起源 ? 空間分布·運動量割合 理論的に評価できるか? $\Lambda_{\rm OCD} \sim O(10^2) \ ({\rm MeV})$ 強結合・非摂動な物理 O磁気モーメント 0 質量ギャップ 格子QCDでの非摂動的解析 Oカイラル対称性の自発的破れ (第一原理計算) 構成子クォーク 描像

低エネルギー量子色力学(QCD)

*ここでのエネルギーは核子構造を調べる際の分解能に対応する(q~100(GeV) ↔ 分解能~0.002 (fm))。 3

PACS Collaborationの計算

核子軸性電荷の再現 E. Shintani et al., Phys. Rev. D99, 014510(2020).



*格子点数1284の計算…空間体積10 fm3、カットオフa⁻¹ = 2.333 (GeV)

PACS Collaborationの計算

● 中性子崩壊に現れる新物理の寄与 C. Alexandrou et al., Pos LATTICE2019 (2010) 132.





核子構造関数の研究

PDF はパートン分布関数のことを指し、主要項近似で核子内パートンの確率分布を意味する。

7



 $\langle x \rangle_{u-d}^{\text{PDF4LHC}} = 0.155(5) \quad \langle x \rangle_{\Delta u - \Delta d}^{\text{BENCHMARK}} = 0.199(16)$



Santanu Mondal et al., arXiv:2011.12787v1 (2020)、H.-W. Lin et al., arXiv:1711.07916v3(2018)

格子QCD& 誤差の問題

- 格子計算の概観と構成

- 行列要素計算に現れる系統誤差
- くりこみ因子計算に現れる系統誤差

格子計算の概観と誤差の問題 (くりこまれた行列要素) = (裸の行列要素) × (くりこみ因子) 双方の格子計算が必須 モンテカルロ積分(重要サンプリング): $\langle O \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} O[U_i]$ →「誤差」の問題 ● 統計誤差 …[!]All-mode-averaging で改善 系統誤差 … いくつかは計算の設定によって除去済み(PACS 10) しかし、不完全 行列要素とくりこみ因子のそれぞれについて 残る系統誤差の特定と除去が課題

I.T. Blum et al., Phys.Rev. D 88, 094503(2013)、2. 有限体積効果・カイラル外挿



これら不定性を系統誤差としてどのように定量的に評価するか?



12

非摂動くりこみ因子計算と系統誤差

非摂動的に得たくりこみ因子 \rightarrow $\overline{MS}(2 \text{ GeV}) \land$ 摂動的にMatching



→ 理想的にくりこみ因子はMatching スケール: μ に依存しない



1 loop :[2]M. Gockeler et al., Nucl. Phys. B554, 699(1999)、3loops : [3]J. A. Gracey, Nucl. Phys. B667, 242 (2003)

13

FITとIR模型依存性の確認

くりこみ因子に現れるMatching スケール依存性の由来は次の2つ

- IR : 非摂動効果 • UV : 離散化誤差 → $Z_{O}^{\overline{\text{MS}}}(2 \text{ GeV}) = \frac{c_{-1}}{(a\mu)^2} + c_0 + \sum_i c_i (a\mu)^{2i}$
- → FITでMatching スケールに依存しないくりこみ因子を読み取る



2つのFIT TYPE間の違い ~ IR模型依存性の評価 →現れる中心値の差をくりこみ因子計算の系統誤差に計上

*多項式の次数やFIT範囲の上限はいろいろな組み合わせで試し、最も安定なFITを探した結果。

数値計算

- 行列要素の計算
- くりこみ因子の計算
- くりこまれたクォーク運動量・ヘリシティ割合

以降は現状の結果を基にした議論・帰結です。実際のPACS論文とは異なる場合があります。 15

Simulation details - PACS configuration			
		行列要素	くりこみ因子
	Lattice size	128 ⁴ [۱]	64 ⁴ [2]
	Lattice spacing	~ 0.084 fm	
	Pion mass	135 MeV	139 MeV _[3]
	Spatial vol.	$\sim (10.8 \text{ fm})^3$	$\sim (5.4 \text{ fm})^3$
2つの系統誤差を排除した計算 有限体積効果 $g_A^{PACS} = 1.273(24)_{sta.}(5)_{sys.}(9)_{ren.}$			
[1] [カイラル外 最高精度で9 _A を再現	看 した実績 $g_A^{exp.}=$	1.2756(13)

 [1] E. Shintani et al., Phys. Rev. D 99, 014510(2019)[2] K.-I. Ishikawa et al., Phys. Rev. D 99, 014504(2019) The stout-smeared O(a) improved 2+1 flavor Wilson fermions and Iwasaki gauge action.
[3] Finite volume-size effect

行列要素計算と励起状態混合



*時間の都合上、Ratio methodとSummation methodの解析の詳細は省略。

クォーク運動量割合

Renormalization for $\langle x \rangle_{u-d}$



 $\rightarrow Z_{u-d}^{\overline{\text{MS}}}(2 \text{ GeV}) = 0.872(22)_{\text{sta.}}(214)_{\text{sys.}}$

中心値と統計誤差の評価はTYPEA(左)を採用 FIT TYPEによる中心値の違いを系統誤差として計上

クォークヘリシティ割合

Renormalization for $\langle x \rangle_{\Delta u - \Delta d}$



FIT TYPE B Ⅰ次式 2 (GeV) ≤ μ



 $\rightarrow Z_{\Delta u - \Delta d}^{\overline{\text{MS}}}(2 \text{ GeV}) = 0.894(26)_{\text{sta.}}(201)_{\text{sys.}}$

中心値と統計誤差の評価はTYPEA(左)を採用 FIT TYPEによる中心値の違いを系統誤差として計上

くりこまれたクォーク運動量・ヘリシティ割合



- 中心値は実験値の誤差範囲内を捉えている
- ・計算の統計精度は実験精度に比肩する精度を達成
- •行列要素とくりこみ因子双方が持つ大きな系統誤差を顕在化

まとめと展望

- 現状での暫定的な帰結
- 今後の研究の方向性

ベンチマークの達成 →

現状での帰結と今後の展望 「格子OCDによるPDF研究」のためのベンチマークを動機に クォーク運動量割合及びヘリシティ割合を格子QCDで計算 参考值(実験) 物理量 本研究(PACS) クォーク運動量割合 0.155(5) $0.153(4)_{\text{sta.}}(31)_{\text{svs.}}(38)_{\text{ren.}}$ $0.204(11)_{\text{sta.}}(8)_{\text{sys.}}(47)_{\text{ren.}}$ クォークヘリシティ割合 0.199(16) 中心値は実験値を誤差範囲内に捉えている。 計算の統計精度は実験精度に比肩する精度を達成 • 行列要素とくりこみ因子双方が持つ大きな系統誤差を顕在化 → 連続極限と各種不定性の系統的研究が必要(現在進行中) 将来的には

スピン危機、グルーオン飽和、ハドロン3次 元構造の解明などEICでの物理にも貢献 22