

格子 QCD 計算の新しい手法で探る核子中のグルーオンの担う運動量割合

A new approach to calculate the gluon momentum fraction of the nucleon from lattice QCD

東北大学大学院理学研究科物理学専攻 原子核理論研究室
石山 雄士

核子の内部構造は、3つのクォークから構成されている。これはクォーク模型といわれ、核子の質量、電荷、アイソスピン、磁気能率などの性質を説明することができる。また、核子のスピン $\frac{1}{2}$ という値も構成されているクォークのスピンが $\frac{1}{2}$ であることにより説明可能である。実際には、クォーク間には強い力が働いており、強い力はグルーオンという粒子が媒介となり、クォークを核子の形に束縛している。核子がクォークのみでなく、グルーオンも含めた構成要素から成り立つとすると、今までのクォーク模型では核子のスピンの起源の説明が正しいとはいえなくなる。これは、核子のスピンに対してクォークだけでなく、グルーオンも寄与していることを意味しており、核子構造はグルーオンも重要であるといえる。核子構造をクォークとグルーオンの両方の自由度を用いて考える模型をパートン模型といい、パートン模型を用いた散乱実験の解析により、クォークの核子スピン ($J = \frac{1}{2}$) に寄与する割合 ($2J_q$) はおよそ 20 % であることがわかっている。この事実から、残り約 80 % の核子スピンの構成割合 ($2J_g$) を理解するためには、グルーオンの果たす役割が重要といえる [1,2]。本修士論文において、核子中のグルーオンの担う運動量の割合が核子全体に対しどのくらいを担っているのかを格子 QCD による第一原理計算によって研究を行った。核子中のグルーオンの担う運動量割合を求めることは核子のスピン構造の理解にもつながる。

前述のように核子のスピン構造を理解する上で、グルーオンの運動量割合を知ることが重要である。グルーオンの運動量割合はエネルギー運動量テンソルの核子状態の行列要素により評価することができる [3,4]。

$$\langle p' | T_g^{\{\mu\nu\}} | p \rangle = \bar{u}(p', s') [M_g(\Delta^2) \gamma^{\{\mu} \bar{p}^{\nu\}} + B_g(\Delta^2) \frac{i \bar{p}^{\{\mu} \sigma^{\nu\} \rho} \Delta^\rho}{2m} + d_g(\Delta^2) \frac{\Delta^\mu \Delta^\nu - g^{\mu\nu} \Delta^2}{5m}] u(p, s) \quad (1)$$

ここで、 $T_g^{\mu\nu}$ はエネルギー運動量テンソルのグルーオンが寄与する部分であり、 $\{\}$ は対称であることを表している。核子状態の運動量遷移 (Δ) が 0 のとき、形状因子 $M_g(\Delta^2), B_g(\Delta^2)$ のそれぞれは、

$$\langle x \rangle_g = M_g(0) : \text{グルーオン運動量割合} \quad (2)$$

$$J_g = \frac{1}{2} [\langle x \rangle_g + B_g(0)] : \text{グルーオンの全スピン割合} \quad (3)$$

に対応することが知られている。ただし、

$$\langle x \rangle_q + \langle x \rangle_g = 1 : \text{運動量割合の和則} (\langle x \rangle_q \text{はクォーク運動量割合}) \quad (4)$$

$$J_q + J_g = J = \frac{1}{2} : \text{スピン割合の和則} (J_q \text{はクォークのスピンへの寄与}) \quad (5)$$

という関係が成り立つ。そこで、グルーオンの運動量割合 $\langle x \rangle_g$ はグルーオンの核子に対しての全スピン割合 ($2J_g$) を求める上でも重要となることがわかる。本研究では、形状因子 $M_g(0) = \langle x \rangle_g$ の値をクォークの動的寄与を含まないクエンチ近似の下、格子 QCD の数値計算によって評価する。これまでグルーオンの運動量割合 $\langle x \rangle_g$ についてはいくつかの論文において計算されてきているが、十分な結果が得られていない。実験により、クォークの運動量割合 $\langle x \rangle_q$ は約 50 % であることが予想されているが、グルーオンは格子 QCD では約 30 % 程度の割合として評価されている [5,6]。本修士論文において、従来のグルーオンの運動量割合の計算方法を改善する手法として、ヤン-ミルズ勾配流法 [7,8] という新しい計算手法を応用する。このヤン-ミルズ勾配流法の導入により、従来の手法では扱うことができなかったエネルギー運動量テンソルに対するトレースアノマリーの効果をきちんと扱うことが可能となる [8]。ヤン-ミルズ勾配流法を導入した新しい手法によりグルーオンの運動量割合を求めた結果が図 1 である。

Gluon momentum fraction plot

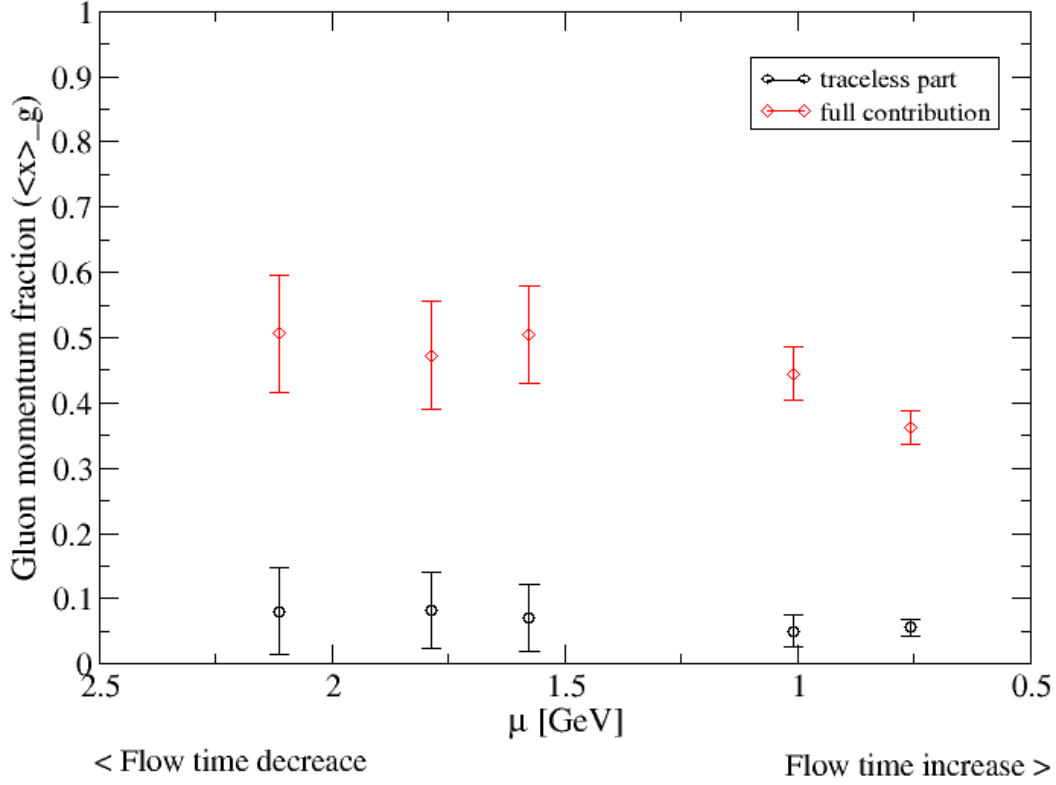


図1 グルーオンの運動量割合の繰り込みスケール (μ) の依存性

新しい手法を用いる計算では、従来の手法では扱えなかったトレースアノマリーの効果が含まれた $\langle x \rangle_g$ の値が得られる。グラフの黒点は新しい手法で求めた値からトレースアノマリーを差し引いた値に対応し、従来の手法での計算に相当する。赤点は新しい手法でのトレースアノマリーを含む全ての寄与を含めた値である。このグラフから、グルーオンの担う運動量割合はおおよそ 50 % であり、実験で知られているクォークの運動量割合と合わせて合計が 100 % という和則を満たしている。また、定性的に重要な点として、グルーオンの運動量割合のその大半が従来の手法では扱えなかったトレースアノマリーからの寄与であることも読みとれる。

結論として、本修士論文において格子 QCD 計算の新しい手法により、核子中のグルーオン運動量割合が約 50 % と和則を満たす程度の大きさが得られ、そのためにトレースアノマリーの寄与がとても重要な役割をしていることが判明した。

参考文献

- [1] B. ポップ et.al, 素粒子・原子核物理入門 (シュプリンガー・ジャパン).
- [2] 大谷宗久 et.al, 核子構造の物理の将来 (核子構造 WG).
- [3] M.V.Polyakov, Phys. Lett. B 555 57-62 (2003).
- [4] Xiangdong Ji, Phys. Rev. Lett V.78,N.4 27 (1997).
- [5] C.Alexandrou et.al, Phys. Rev. D 96, 054503 (2017).
- [6] M.Deka et al, Phys. Rev. D 91, 014505 (2015).
- [7] M.Lüscher, JHEP 1008:071,2010.
- [8] H.Suzuki, PTEP 2013 (2013) 083B03, Erratum:PTEP 2015 (2015) 079201.