

課題名(タイトル):

カイラルクォーク作用を用いたミュオン異常磁気能率の精密決定

利用者氏名:

Thomas Blum (1,2), Masashi Hayakawa (3), ○Taku Izubuchi (1,4), Chulwoo Jung (1,4), Christoph Lehner (1,4), Meifeng Lin (1,5)

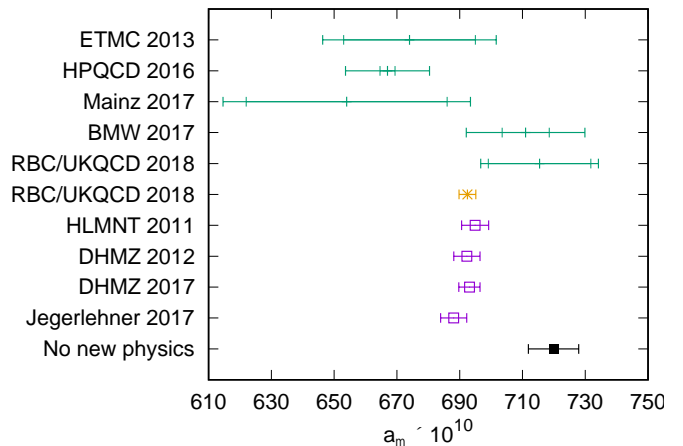
理研における所属研究室名:

- (1) 理研仁科加速器科学研究センター・理研 BNL 研究センター・計算物理研究グループ
- (2) 理研仁科加速器科学研究センター・初田量子ハドロン物理学研究室
- (3) ブルックヘブン研究所・物理学科
- (4) コネチカット州立大学・物理学科
- (5) 名古屋大学・物理学科

1. 本課題の研究の背景、目的、関係するプロジェクトとの関係

電子や、電子の 200 倍の質量を持つミュオン粒子(ミュオン)の磁場中でのスピン歳差運動から異常磁気能率 $g-2$ を実験的に求めることは 1940 年代から行われたが、当時は正しいと信じられていた電子・ミュオンの電磁場中での運動方程式(ディラック方程式)から求められる理論値($g=2$)からずれがあり、0.1%程度大きいという発見がされた。ファインマン・朝永・シュウィンガーの量子電磁力学(QED)によると電子やミュオンが短い時間に光子を放出したり吸収したりするが、この効果が粒子と磁場の歳差運動を 0.1%だけずらしたという理解がされ、量子場の理論という革命的な理論が正しいという確かな証拠のひとつとなった。異常磁気能率 $g-2$ は実験的に非常に精度良く測定でき、それ以来、新たな理論や次々に発見されていった様々な種類の素粒子の確証として盛んに研究され続けてきており現在では実に電子の場合で 12 桁、ミュオンの場合で 9 桁という超高精度の実験結果が得られている。特にミュオンの異常磁気能率はこれらの新粒子の影響が大きく出る(電子の場合の約 4 万倍)が、2004 年までに米国ブルックヘブン研究所で行われた実験結果と理論値が見積もられた理論・実験の誤差の 3 倍以上ずれており、これが本当ならば未知の相互作用や新粒子の発見を意味するので大きく注目された。これを受けて、米国フェルミ研究所では 2017 年から新たに 4 倍高い精度を目指した実験を遂行中であり、また日本の J-PARC でも異なる方法で同程度の精度の実験

が計画されている。これに対応する信頼できる理論計算を行うためには、理論誤差の主要部を占めているクォーク・反クォークとそれらを強い相互作用(量子色力学 QCD)でつなぐグルーオンの寄与を計算する必要があるので HOKUSAI で行った。



現在までの図のようなミュオン異常磁気能率の理論計算(ハドロン真空偏極寄与)。緑が純粋な第一原理計算で、紫が電子・陽電子対消滅実験から得られた結果に比べて精度がまだ足りない。これを HOKUSAI で特に誤差の大きい、クォークと反クォークが長距離にわたり運動する寄与を正確に決めるために行った。また同じ寄与を μ 粒子より 17 倍重い τ レプトンのクォーク・反クォークへの崩壊実験にクォークの質量や電荷の寄与を正確に取り入れたアイソスピン補正と呼ばれる重要な量をも計算した。同じ寄与を様々な独立な方法で決めることによって、結果の信頼度をあげることができる。

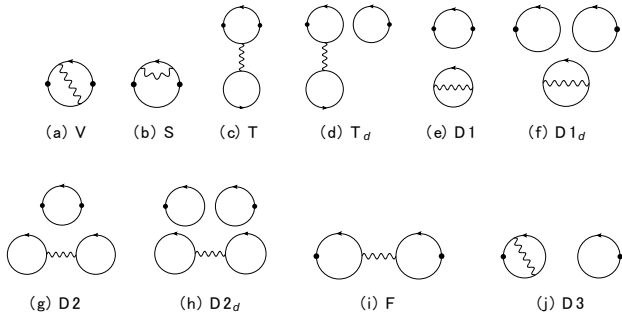


図: ハドロン真空偏極寄与へのアイソスピン補正のファインマン図

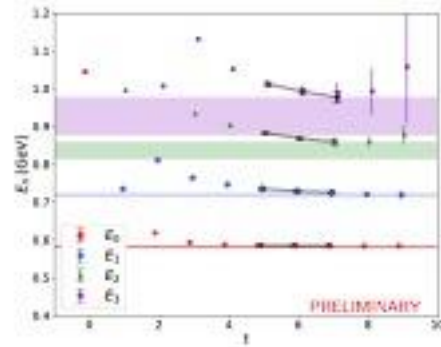
2. 具体的な利用内容、計算方法

クォーク・反クォークが長距離にわたり伝搬する過程の寄与を精度良く計算するために、クォーク・反クォークの波動関数を複数用意し、それら異なった「形」の波動関数の間の伝搬を HOKUSAI 上で時空を格子に切ってクォークとグルーオンの場の量子論を計算する第一原理計算、格子量子色力学 (Lattice QCD) によって計算した。カイラル対称性と呼ばれるクォークにとって重要な性質を計算機上に実現した計算を、3種類の格子の感覚と、2種類の格子体積で行った。クォーク質量は自然界のそれと同じであり、クォークの電荷の影響と最軽量の2種類のクォーク(アップ・ダウンクォーク)の質量の違いも取り入れ、自然界の QCD に忠実な計算を行った。異常磁気能率の計算に必要な波動関数は時空の一点でのみ非ゼロとなる関数(デルタ関数)であるが、敢えて1点だけではなく広がりをもった関数(正規分布関数)やクォーク・反クォークのが複数存在する波動関数(例えば2つの中間子に対応する波動関数)も用いて、それら間の伝搬関数を計算することによって、最低エネルギーを持つ状態(基底状態)だけでなく高いエネルギーをもつ状態(励起状態)をより精度良く求めることができ、これらの結果を通して最終的に必要な2点間の伝搬関数を精度良く行うことができる。計算効率化のためにクォークの伝搬関数の固有値、固有ベクトルの低エネルギー部分をランチョス法で別に解いておく、固有値固有ベクトルを用いた近似値とその補正を別々に計算する AMA 法、クォーク・反クォークの波動関数の様々な形を平面波のような関数規定で展開するディステーション法などを駆使した。

3. 結果

以下の図がクォーク反クォークの点状波動関数に加えて、2つのパイ中間子の波動関数をも加えた複数の波動関数間の伝搬関数を一般化固有値によって得られた、基底状

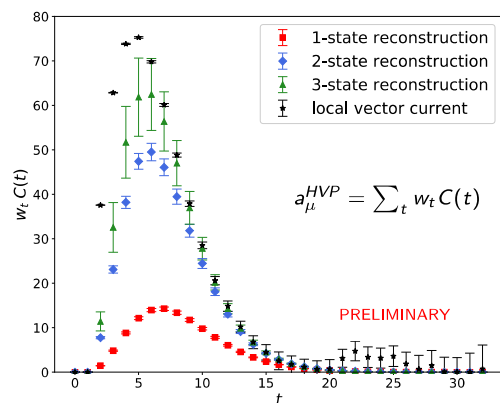
態および励起状態のエネルギーの計算結果である。この例では2つのパイ中間子の重心は静止しており、相対的に3つの異なる運動量を持たせた場合、つまり合計で3つの励起状態を得た計算である。横軸が伝搬する距離で、縦軸が各エネルギーとその誤差を表している。



高い励起状態では誤差が大きいですが、最終的な結果への高励起状態の寄与は比較的小さくなるっているので、この方法によって精度が高まっている。

4. まとめ と 今後の計画・展望

精度の良い第二励起状態までの3つの状態を用いて、ミュオン異常磁気能率を計算した場合の結果を以下に示す。図の曲線の下部の面積が異常磁気能率になっているが、今までの方法(黒)に比べて特に長距離部分では新しい方法(青、緑)の誤差が小さいことが分かった。全体として、今までの方法と比べて採取的な誤差を半分以下に抑えることに成功した。



現在本手法を完成させ、クォーク電荷の効果、ゆわげん体積効果などを全て取り入れた完全な第一原理計算を完成させ、進行中の実験結果と比べる事が今後の計画と展望である。

平成 30 年度 利用研究成果リスト

【口頭発表】

Hadronic Contributions to muon $g-2$ - LQCD confronting the most precise experiments-

Taku Izubuchi. April 26, 2018, Invited seminar, Tata Institute of Fundamental Research, Mumbai, India

Lattice QCD studies of Muon $g-2$ and related topics

Taku Izubuchi. May 21, 2018, Workshop “Frontiers in Lattice Quantum Field Theory”, Institute of Fundamental Theory, Madrid Spain

Status of HVP calculation by RBC/UKQCD

Christoph Lehner. July 27, 2018, Lattice2018, Michigan, USA

Exclusive Channel Study of the Muon HVP

Aaron Meyer. July 27, 2018, Lattice2018, Michigan, USA

On isospin breaking in tau decays for $(g-2)$ from Lattice QCD

Mattia Bruno. July 27, 2018, Lattice2018, Michigan, USA

$|V_{us}|$ from taus

Taku Izubuchi. September 18, 2018, CKM2018, Heidelberg, Germany

Precise calculation of muon $g-2$ based on lattice QCD

Taku Izubuchi, November 16, WPI-next mini-workshop “Hints for New Physics in Heavy Flavors”, Nagoya, Japan

Precise calculation of muon $g-2$ based on lattice QCD

Taku Izubuchi, January 16, Massively Parallel Programming for Quantum Chemistry and Physics 2019

【その他(著書、プレスリリースなど)】

Brookhaven National Laboratory, Press Release, “Theorists Publish Highest-Precision Prediction of Muon Magnetic Anomaly” July 13, 2018, <https://www.bnl.gov/newsroom/news.php?a=112744>