

格子QCDを用いた標準模型の検証と新物理探索

代理発表：藏増 嘉伸(筑波大)

共同研究者：新谷 栄悟(代表)(RIKEN-AICS)、青木 保道(KEK)、出淵 卓(BNL)

平成30年度学際共同利用申請ヒアリング、筑波大計算科学研究センター、2018年3月2日

研究背景

▶ 高強度物理

- ▶ LHCに代表される高エネルギー物理とは別の潮流
- ▶ 測定感度の劇的な向上と理論計算の精密化
- ▶ 標準模型と実験値との差 ⇒ 標準模型の検証と新しい物理

▶ 格子QCDを用いた第一原理計算

- ▶ QCD: 強い相互作用を扱う理論体系、非摂動計算の必要性。
- ▶ 新しい物理探索にとってQCDを起源とする理論不定性がネック。
 - ▶ ミュー粒子異常磁気能率($g-2$)
 - ▶ 陽子崩壊過程における行列要素
- ▶ 格子QCDを用いた第一原理計算によって、理論不定性を排除することが重要。

本課題で対象とする物理量 (その1)

▶ ミュー粒子異常磁気能率(g-2)

- ▶ 量子電磁力学(QED)が主要的な寄与
- ▶ 10次の摂動論によってQED以外の項(QCD,EW)が必要
- ▶ 実験値(BNL、2004年)と標準模型計算

$$a_{\mu}^{\text{exp}} = 11659209.1(5.4)(3.3) \times 10^{-10} \quad a_{\mu}^{\text{SM}} = 11659180.3(0.1)(4.2)(2.6) \times 10^{-10}$$

$$\Delta a_{\mu} = a_{\mu}^{\text{exp}} - a_{\mu}^{\text{SM}} = 28.8(6.3)(4.9) \times 10^{-10} \quad \text{3シグマの差}$$

実験誤差、次期実験計画(JPARC, FNAL)
で3分の1まで減少

理論誤差、QCDを起源とするハドロンの寄与の不定性が9割以上を占める

- Δa_{μ} が5 σ を超えて非ゼロであれば、新しい物理の兆候として確立。
- そのためには、実験だけでなく理論計算、特にQCDの寄与を精確に評価することが求められる。
⇒ 格子QCD計算の必要性

本課題で対象とする物理量（その2）

▶ 陽子崩壊過程に関する行列要素

- ▶ 陽子崩壊、 $p \rightarrow \pi^0 e^+$ etc, は標準模型の範疇では起こらない物理現象。
- ▶ 新しい物理として、バリオン数保存の破れの導入が必要。
 - 陽子崩壊の観測は新しい物理の証左
 - 大統一理論(GUT)の確立
- ▶ SuperKamiokandeによる観測では発見できず。

陽子寿命の下限値: $\tau_p > 1.4 \times 10^{34}$ 年

- ▶ GUT予言では 10^{35} 年 → HyperKamiokande計画で到達可能
- ▶ 低エネルギー($\ll 1\text{GeV}$)での行列要素に関する理論不定性が、すべてのモデルでネック⇒ QCDを厳密に扱う必要性
- ▶ 格子QCDの計算結果がGUT計算に関する基本的情報を与える。

研究計画

- ▶ OFPを利用した大規模な格子QCD計算によって、ミュー粒子 $g-2$ と陽子崩壊の行列要素を決定する。
- ▶ 日本の研究機関の次期実験計画(JPARC,HyperKamiokande)と並行して進めることで、新しい物理探索を目指す。
- ▶ 筑波大の格子QCDグループ:PACSが生成したゲージ配位を用いる。
 - ▶ ウィルソン型フェルミオン+stoutゲージ作用。
 - ▶ 物理点上の3フレーバー動的クォークを含む。
 - ▶ これまでにない物理サイズ、一辺10fm以上。
 - ▶ 有限体積効果を排除した、無限体積の結果が得られる。
 - これまでの格子QCD計算と比べて、劇的な精度向上。
- ▶ 高速化のため、AMAアルゴリズムの適用とそのチューニング。
 - ▶ 低精度演算を導入して、バイアスを含まない全体的な高速化を実現。
 - ▶ SAP deflationを用いた最適化。
 - ▶ 2つの物理量の計算に共通するアルゴリズム。

研究方法と成果(ミュー粒子 g - 2)

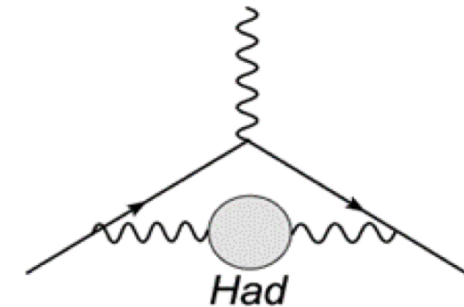
- ▶ ハドロンの寄与のleading項に集中。
- ▶ QCD寄与のうち9割を占め、全体の誤差に影響。
- ▶ 真空偏極関数積分の2つの表現法

運動量表示

- 運動量空間における $Q^2=0 \rightarrow \infty$ への積分。
- ベクトル型相関関数のフーリエ変換から真空偏極関数を抜き出す。
- ゼロ運動量への外挿と格子運動量間の内挿。⇒ 系統誤差
- $Q^2 \gg 1$ では摂動論で記述

時間依存表示

- 座標空間における $t=0 \rightarrow \infty$ への積分。
- ゼロ運動量のベクトル型相関関数の時間積分。
- 格子時間間の内挿と無限時間への外挿。⇒ 系統誤差



研究方法と成果(ミュオン粒子 $g-2$)

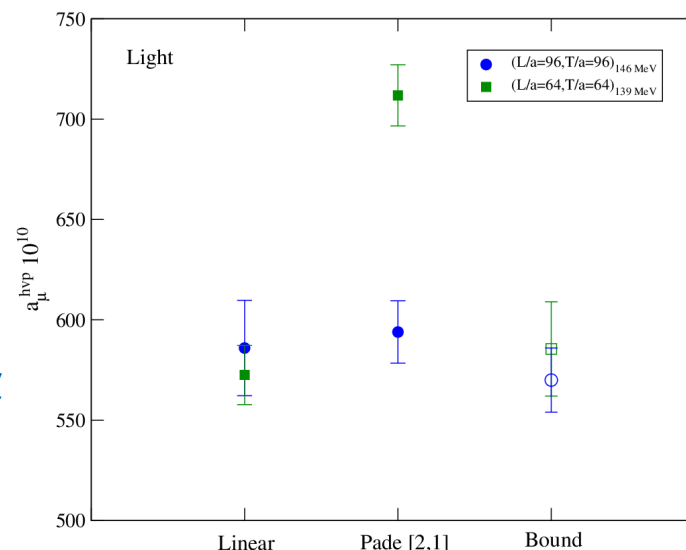
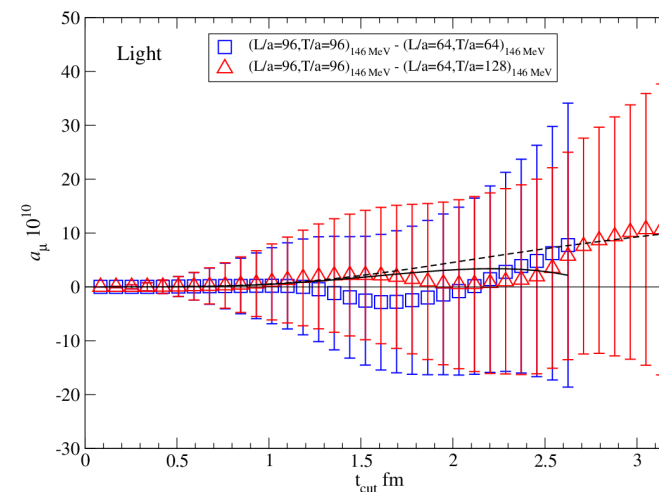
▶ 有限体積効果の評価

時間依存表示

- ▶ 145MeVパイ中間子
- ▶ 一辺5fmと8fm格子体積の比較。
- ▶ 時間積分 ($t_{\text{cut}}=3$ fm) では、 $1 \pm 4\%$ の有限体積効果。カイラル摂動論と同程度

運動量表示

- ▶ 運動量積分を2通り試行。
 1. Pade関数を仮定したフィット。
 2. 線型関数を用いた近似。
- ▶ 8fm格子では一致するが、5fmでは差が見える。
 - ⇒ 有限体積効果の現れ方が異なる。
 - ⇒ 高統計化と10fmの格子サイズを用いた詳細な計算の必要性。



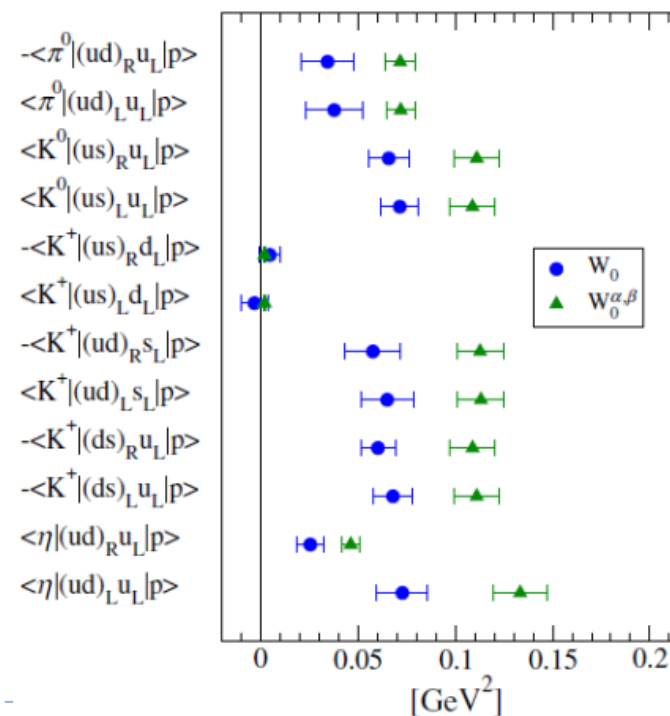
研究方法と成果(陽子崩壊)

- ▶ 遷移行列要素: 陽子→中間子
 - ▶ 陽子→中間子+反レプトンの崩壊過程におけるQCD寄与。
 - ▶ バリオン数の破れを表す3クォーク演算子が陽子・中間子間に入る。
 - ▶ 12種類の既約行列要素を独立して求める。
→ すべての崩壊チャンネルを網羅できる。

▶ ドメインウォールフェルミオンを用いた これまでの結果

- 300MeVのパイ中間子から外挿。
- 3fmの格子サイズ。
- カイラル摂動論と比べて、全体的に小さくなる傾向。

物理点上で10fm格子サイズを用いることで最終的な結果を提供。



準備状況

- ▶ Columbia Physics System(CPS)の改良
 - ▶ RBC-UKQCDグループが開発した格子QCDライブラリ。
 - ▶ OpenQCDライブラリをCPSに組み込むことで、SAP deflationが利用可能。
 - ▶ KNL上で最適化するために、ディラック行列とベクトル積にAVX繰り込み関数を用いたSIMD化。
 - ▶ AMA法を用いるため、ハドロン構成部分の高速化も必要。
- ▶ 利用実績
 - ▶ 平成29年度CCS学際共同利用では、OFP上で 64^4 格子を用いたミュオン粒子 $g-2$ 計算を実施。
 - ▶ 64^4 におけるAMAパラメータチューニングと高統計化が得られた。

性能評価

▶ OFP上の性能

- ▶ 64⁴格子上16ノード(4096プロセス、flat MPI)を用いた場合
 - ▶ ディラック行列とベクトルとの内積: ~10% ピーク性能
 - ▶ 逆行列(SAP + deflation): ~5% ピーク性能
- ▶ 全体的には ~2% ピーク性能 となっている。

平成30年度の計算方針

▶ 計算時間の割合

▶ ミュー粒子g-2

- ▶ 256ノードを用いた 128^4 格子の計算、20,000統計:0.42 Mノード時間
- ▶ 512ノードを用いた 160^4 格子の計算、10,000統計:0.5 Mノード時間
- ▶ 合計で 0.92 Mノード時間

▶ 陽子崩壊に関する遷移行列要素

- ▶ 256ノードを用いた 128^4 格子の計算、10,000統計:0.89 Mノード時間

▶ 優先度

- ▶ ミュー粒子g-2をメインとして、遷移行列要素はサブ課題。
- ▶ 申請時間を減らされた場合、遷移行列要素の統計量を減らして対応。