

受付 ID	16a8
分野	素粒子

## 物理的クォーク質量における 2+1 フレーバー格子 QCD

### 2+1 Flavor Lattice QCD with the Physical Quark Masses

藏増 嘉伸

筑波大学計算科学研究センター

#### 1. 研究目的

本プロジェクトの歴史は長く、その第一歩は、2006年のPACS-CS稼働開始とともに、領域分割HMCアルゴリズムを用いた物理的なu, d, sクォーク質量での2+1フレーバーQCDシミュレーションを目標とし、それを実現したことにある。その後、物理点計算で用いたreweighting法を応用することによってQED効果を取り入れつつu, dクォーク質量の縮退を解くことができる可能性を見出し、格子間隔約0.1fm、空間体積約 $(3\text{fm})^3$ の格子上で1+1+1フレーバーQCD+QEDシミュレーションを実現した。平成24年秋より京コンピュータの共用が開始され、2+1フレーバーQCDにおける物理点での空間体積 $(8\text{fm})^3$ 超の配位を生成した。これは、従来のものと比較して30倍近く空間体積が大きくなっており、ハドロンの各種形状因子の精密測定やQCDによる原子核の直接構成を可能とする。

#### 2. 研究成果の内容

平成28年度は、京コンピュータで生成した物理点近傍での2+1フレーバーQCDにおける $96^4$ 格子サイズのゲージ配位を用いたハドロン(核子と $\pi$ 中間子)の形状因子計算を遂行するとともに、それと並行して、Oakforest-PACS(OFP)の大規模利用へ向けた準備研究を行った。ここでは、特に核子形状因子計算の成果について報告する。京コンピュータを用いて生成されたゲージ配位の最大の特徴は、従来にない圧倒的な大きさの空間体積である。その最大の利点の一つは、離散化された運動量の刻み幅が細くなることによって、ハドロ形状因子の運動量空間における精密な解析が可能となることである。図1(左)は、核子における電気形状因子 $G_E$ の4元移行運動量( $Q^2$ )依存性を表している。赤い点線は実験値を表しており、実験結果と良く一致していることが確認できる。図1(右)にプロットしたものは、核子の平均二乗半径を呼ばれ、 $Q^2=0$ における $dG_E/dQ^2$ の値によって定義される量であり、核子の電荷分布の広がりを目安となる。比較の対象として、ミュオニック水素原子実験と電子-陽子散乱実験から得られた値が、水平線(グレーと茶色)で表してある。 $G_E$ の $Q^2$ 依存性を3つのフィット方法(z-form, Taylor展開, dipole)を用いて調べた結果、いずれの場合も実験値と矛盾の

ない核子の平均二乗半径を得ることができた。これは世界初の成果であり、その成功のポイントは、物理点に非常に近い配位であることと、圧倒的な大きさの空間体積により従来の計算では到達しえなかった小さな  $Q^2$  での計算を実現できたことによる。

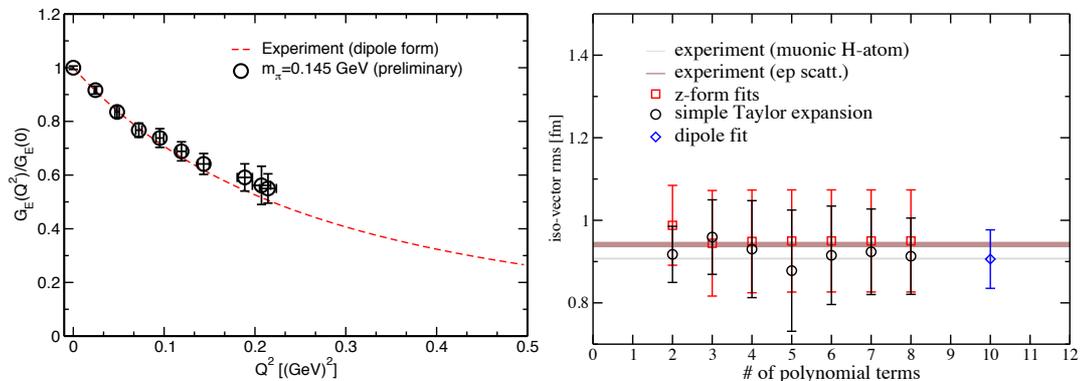


図1: 物理点近傍における  $96^4$  格子サイズのゲージ配位を用いた核子の電気形状因子の4元移行運動量依存性(左)と平均二乗半径(右)。

### 3. 学際共同利用として実施した意義

京コンピュータで生成された配位上での物理量計算は、クォーク伝播関数とハドロン多点関数の計算から構成されるが、クォーク伝播関数の計算は計算コストが重く、HA-PACSのベースクラスタ部/TCA部の12ノード48GPUのジョブを実行する必要がある。また、この計算をCOMAの汎用コア部を用いて同程度の計算時間で行おうとすると、32ノードのジョブを実行することが必要である。日本国内において、これほど大きなジョブを無償で実行できる計算機環境は、本学際共同利用以外には存在しない。

### 4. 今後の展望

本計算において、ハドロン単体の諸性質解明のためには、従来予想よりもはるかに大きな空間体積が必要であることがわかった。今後は、精密計算に向けて、複数の格子間隔における計算を遂行し、格子QCD計算における主要系統誤差の一つである格子間隔依存性を調べるのが重要である。

### 5. 成果発表

#### (1) 学術論文

K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, N. Tsukamoto, S. Sasaki, T. Yamazaki, and A. Ukawa for PACS Collaboration,  
 “Nucleon form factors near the physical point in 2+1 flavor QCD”,  
 Proceedings of Science, LATTICE2016, 158.

J. Kakazu, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura,

Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yamazaki, and T. Yoshié for PACS Collaboration,

“Electromagnetic pion form factor near physical point in Nf=2+1 lattice QCD”,  
Proceedings of Science, LATTICE2016, 160.

(2) 学会発表

[口頭発表]

K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi\*, N. Tsukamoto, S. Sasaki, T. Yamazaki, and A. Ukawa for PACS Collaboration (\*speaker),

“Nucleon form factors near the physical point in 2+1 flavor QCD”,  
34<sup>th</sup> annual International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2016),  
July 24-30, 2016, University of Southampton, UK.

J. Kakazu\*, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura,  
Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yamazaki, and T. Yoshié for PACS Collaboration (\*speaker),

“Electromagnetic pion form factor near physical point in Nf=2+1 lattice QCD”,  
34<sup>th</sup> annual International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2016),  
July 24-30, 2016, University of Southampton, UK.

賀数淳平\*, 石川健一, 石塚成人, 藏増嘉伸, 中村宜文, 滑川裕介, 谷口裕介, 浮田尚哉, 山崎剛, 吉江友照 for PACS Collaboration (\*講演者),

“Strange mass reweighting を考慮した物理点近傍での格子 QCD による  $\pi$  中間しの形状因子の研究”,

平成 29 年 3 月 17 日～20 日, 日本物理学会第 72 回年次大会,  
大阪大学豊中キャンパス, 豊中市.

(3) その他

使用計算機	使用計算機に○	配分リソース*
HA-PACS	○	10040 時間
HA-PACS/TCA	○	3000 時間
COMA	○	4760 時間
※配分リソースについては 32node 換算時間をご記入ください。		