

研究種目：基盤研究 (S)

研究期間：2006～2010

課題番号：18104005

研究課題名 (和文) 超並列クラスタ計算機による計算素粒子物理学の展開

研究課題名 (英文) Computational Particle Physics with Massively Cluster Computer

研究代表者

宇川 彰 (UKAWA AKIRA)

筑波大学・大学院数理物質科学研究科・教授

10143538

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：標準模型、格子量子色力学、クォーク、数値シミュレーション

1. 研究計画の概要

素粒子標準模型の検証と予言の抽出には、QCD を中心として、大規模数値シミュレーションが重要な役割を果たしてきた。特に筑波大学を中心とする我々のグループでは、超高速計算機の開発・製作にまで踏み込む研究手法により、格子 QCD 全般にわたって大きな成果を挙げてきた。

本研究課題においては、この研究を一層進め、格子 QCD の最大の課題である、軽いクォーク (u, d, s) 全ての真空偏極効果 (対生成・対消滅効果) を取り入れた「完全な格子 QCD シミュレーション」を実現し、これによって 1980 年代以来追求されて来た QCD 第一原理に基づく強い相互作用の解明と素粒子標準理論の確立に大きな区切りとなる成果を目的とする。さらに、ハドロン単体の解明を超えて、ハドロンの多体系即ち原子核自体を格子 QCD を基礎として研究する方向など、将来を展望した研究を開拓することを目指す。

従来のシミュレーションでは π 中間子質量を 500MeV 程度まで軽くすることが限界であり、物理的質量 135MeV までの外挿の不定性が、信頼性の高い結果を確立する上で重大な問題であった。本課題では筑波大学計算科学研究センターにおいて開発・製作された超並列クラスタ PACS-CS の計算能力と、Luescher 等による最新の領域分割 HMC 計算アルゴリズムの適用による計算効率の高度化により、現実に近い極めて軽い u, d, s クォークによるシミュレーションを行うことにより、QCD の第一原理に基づく強い相互作用の深い理解を達成する。

2. 研究の進捗状況

(i) 物理点での格子 QCD 計算の実現

本研究開始後、領域分割 HMC 計算アルゴリズムに対して、考えうる殆ど全てのアルゴリズム改善と PACS-CS 上での実計算チューニングを重ねた結果、現在世界的に使われている典型的な問題規模 (格子間隔 $a=0.1\text{fm}$, 空間物理サイズ $L=3\text{fm}$, 格子サイズ $32^3 \times 64$) において、物理点にほぼ等しい π 中間子質量 $m_\pi=155\text{MeV}$ のシミュレーションを世界で初めて実現した。

(ii) 格子 QCD における物理成果

(1) QCD の精密検証

上記計算により生成されたグルオン配位を用いて、格子間隔 $a=0.1\text{fm}$ において up, down, strange クォークからなる中間子・重粒子の基底状態の質量を求めた。現時点では格子間隔 $a=0.1\text{fm}$ であるがそれ以外の近似を一切含まない結果であり、実験との良い一致を示している。この計算を通じて得られたクォーク質量依存性の検討により、従来頻用されて来たカイラル摂動論が strange クォーク領域では適応できないことを明らかにした。

(2) 強い相互作用基本定数の決定

QCD 結合定数 α_s は自然界の基本定数の一つである。Schroedinger 汎関数の方法を up, down, strange クォーク ($N_f=3$) の場合に対して適用し α_s を求める計算を進め、完全に非摂動的な方法で現実的な 2+1 フレーバー格子 QCD において、世界で初めて α_s の値を求めた。結果は実験から定めた値と整合するだけでなく、大幅に不定性が減じており、また摂動論を用いた HPQCD グループによる結果

とも一致する。

(3) 重いクォークの物理

重いクォークの物理は標準模型の基本である CKM 行列の決定に重要である。相対論的な重いクォーク作用を用いて、実験的にも注目されているチャームクォークを含む D 中間子の崩壊定数等を求めた。

(iii) グルオン配位の国際共有

本課題生成グルオン配位は、グリッド技術を用いたデータ国際共有の仕組み International Lattice Data Grid (ILDG) に逐次登録され、世界の格子 QCD 研究者に提供されている。

3. 現在までの達成度

当初の計画以上に進展している。

[理由]

① 物理点計算の実現

本計画当初は、 π 中間子質量を 200MeV 程度まで軽くすること、且つ格子サイズ $L=2.4\text{fm}$ (格子間隔 $a=0.1\text{fm}$ で $24^3 \times 48$, $a=0.07\text{fm}$ で $32^3 \times 64$) を予定していた。しかしながら、計画 3 年目で物理点にほぼ等しい 155MeV の π 中間子質量を既に達成し、且つ格子サイズは既に $32^3 \times 64$ となっている。

物理点計算を実行することは長年にわたる格子 QCD 計算の最大の目標の一つであり、世界に先駆けて物理点計算に到達したことは、当初目標を超える成果である。

② 空間サイズ $L=6\text{fm}$ と原子核の研究

計画 3 年目後半からは、空間サイズ $L=6\text{fm}$ 計算を実施している。これは軽い原子核を直接 QCD に基づいて、且つ物理点で研究することを可能とするサイズであり、素粒子を超えた予定以上の成果が見込まれる。

4. 今後の研究の推進方策

現在までの研究成果に基づき、研究目標を一段高く設定しなおし、空間サイズ $L=6\text{fm}$ で且つ物理点での計算をターゲットとする。この規模の計算は、ハドロン単体に対する有限体積効果の検証等、QCD の精密検証に重要なだけでなく、さらに、標準模型における CP 非保存の大きな課題である $K \rightarrow \pi\pi$ 崩壊振幅の計算や、ハドロン単体を超えて、原子核の性質を直接 QCD 第一原理に基づいて研究する等、大きな展開が期待される。

5. 代表的な研究成果

[雑誌論文] (計 10 件)

- ① “2+1 Flavor Lattice QCD toward the Physical Point”, S. Aoki, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, T. Izubuchi, D. Kadoh, K. Kanaya, Y. Kuramashi, Y. Namekawa, M. Okawa, Y. Taniguchi, A.

Ukawa, N. Ukita, T. Yoshie, Phys. Rev. D79, 034503, 2009.

- ② “Light quark masses from unquenched lattice QCD”, T. Ishikawa, S. Aoki, M. Fukugita, S. Hashimoto, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneko, Y. Kuramashi, M. Okawa, Y. Taniguchi, N. Tsutsui, A. Ukawa, N. Yamada, T. Yoshié, Phys. Rev. D78, 011502, 2008.
- ③ “Lattice QCD Calculation of the rho Meson Decay Width”, S. Aoki, M. Fukugita, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, K. Kanaya, Y. Kuramashi, Y. Namekawa, M. Okawa, K. Sasaki, A. Ukawa, T. Yoshié, Phys. Rev. D76, 094506, 2007.

[学会発表] (国際学会計 32 件)

- ① “PACS-CS results for 2+1 flavor lattice QCD simulation on and off the physical point”, Y. Kuramashi, Proc. XXVI Int. Symp. on Lattice Field Theory, PoS LATTICE2008, 018, 2008
- ② “Recent algorithm and machine developments for lattice QCD”, K.-I. Ishikawa, Proc. of XXVI Int. Symp. on Lattice Field Theory, PoS LATTICE2008, 013, 2008
- ③ “Lattice QCD: Status and prospect”, A. Ukawa, Proc. of XXV Physics in Collision, AIP Conf. Proc. 815, 243, 2006

[その他]

ホームページ

<http://www.ccs.tsukuba.ac.jp/PACS-CS/LQCD/>