

超並列クラスタ計算機による計算素粒子物理学の展開

Computational Particle Physics with Massively Parallel Cluster Computer

宇川 彰 (UKAWA AKIRA)

筑波大学・数理物質科学研究科 (計算科学研究センター)・教授



研究の概要

素粒子の強い相互作用を記述する格子 QCD の基本課題である、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」を推進する。特に、現実に近い軽い u, d, s クォーク質量を用いたシミュレーションを実現することにより高い信頼度と新たな結果を生み出し、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区切りとなる成果を目指す。

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. 研究開始当初の背景

素粒子とその相互作用に関する我々の描像を集約した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。

2. 研究の目的

本研究課題においては、この研究手法を一層進め、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。

3. 研究の方法

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い、それによって生成されるグルオン配位上で多様な物理量を計算・分析することにより、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。

4. これまでの成果

(i) 物理点での格子 QCD 計算の実現

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

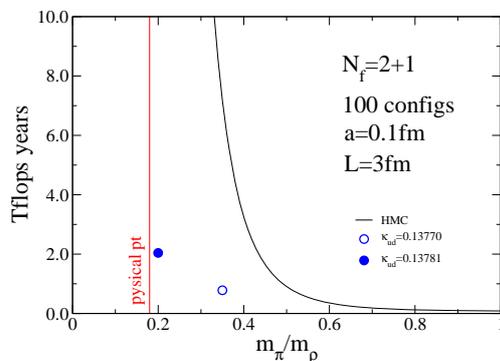


図1 演算量の改善結果

図1に、研究開始当初に単純HMCで予想されていた、物理点(赤縦線)に向かっての計算量の急激な増大(実線)と、本課題で実現した劇的な改善(青丸及び白丸)を示す。縦軸の単位 Tflops * year は実効1Tflopsの計算機を用いて1ヵ年かかる計算量。

(ii)格子QCDにおける物理成果

(1) QCDの精密検証

図2に 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結果を示す。棒が実験値、赤丸が格子QCDの予言である(黒丸はインプットとして使用)。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、格子QCD計算の一つの到達点を示している。

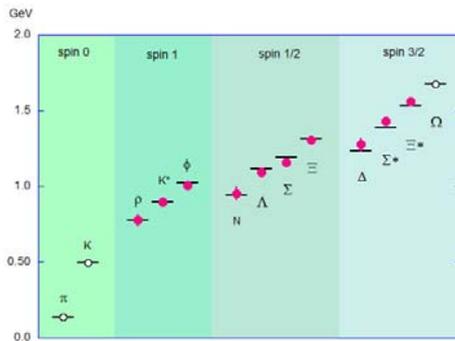


図2 ハドロン質量スペクトル

(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 (Nf=3) の場合に対して適用し α_s を求める計算を進めた。図3に様々な実験による値と格子QCDによる値を示す。HPQCDによる結果は staggered quark 作用を用いたもの、PACS-CSの結果(赤丸)は格子間隔 $a=0.1\text{fm}$ における予備的な結果である。

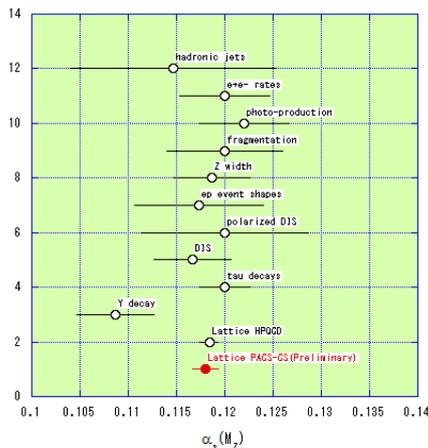


図3 強い相互作用結合定数

(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。

5. 今後の計画

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。

6. これまでの発表論文等

- “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. Yoshié, Phys. Rev. D79, 034503, 2009.
- “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.
- “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.

ホームページ等

[http:// www.ccs.tsukuba.ac.jp/PACS-CS/LQCD/](http://www.ccs.tsukuba.ac.jp/PACS-CS/LQCD/)