

1.3 格子ゲージ理論シミュレーション

松古 栄夫

1.3.1 はじめに

素粒子であるクォークの間に働き、原子核を形作る核力の源である強い相互作用は、量子色力学 (Quantum Chromodynamics, QCD) によって記述される。QCD はその結合の強さが距離とともに増大するという特徴を持つため、結合定数によって展開する摂動論的手法は、高エネルギー、即ち近距離では有効であるが、低エネルギー領域では破綻し、解析的な計算が困難となる。このため、ハドロンの性質や粒子衝突におけるハドロン散乱振幅などを定量的に調べるには、なんらかの非摂動的手法が必要である。格子 QCD は場の理論としての QCD を 4 次元立方格子上で定式化したもので、経路積分を数値的に実行することにより、第一原理である QCD に基づいた計算を摂動展開によらずに実現できる。

近年の理論的進展、計算機の発達、アルゴリズムの改良などによって、格子 QCD シミュレーションの精度や信頼性は大きく向上した。動的なシミュレーションが一般的になり、数パーセント精度でのハドロン行列要素の決定や、核子間に働く力の解明など、素粒子・原子核物理の現象を理解する上でなくてはならない手法となっている。シミュレーションによって生成されたゲージ場配位データを共有するための枠組みも国際的に議論され、ILDG (International Lattice Data Grid) として 2006 年より正式運用が始まった。

また格子ゲージ理論は、標準理論を構成する QCD のみならず、他の場の理論の解析にも適用できる。標準理論を超えた物理として LHC 実験でも注目されている、超対称性理論やテクニカラー理論に対しても、非摂動的な解析を行うことができる手法として注目されている。

以上のような状況において、我々は次のような観点から研究を進めている。

- (1) 格子上の厳密なカイラル対称性を持つ理論による大規模シミュレーション
- (2) 標準理論を超えた物理の探索のためのゲージ理論の構造の解析
- (3) 計算科学のためのアルゴリズムとシミュレーション手法の研究

これらによって標準理論の検証とそれを超えた物理の探索や、素粒子・原子核・宇宙物理の計算科学的研究に貢献することを目指している。以下ではそれぞれについて詳しく述べる。

1.3.2 格子上の厳密なカイラル対称性を持つ理論による大規模シミュレーション

この研究は KEK を中心とした JLQCD コラボレーションに参加して行っている。計算には KEK で運用しているスーパーコンピュータシステムを中心に用いている。

近年の格子 QCD の大きな発展として、長い間困難とされてきた、カイラル対称性を厳密に持つ格子フェルミオン作用が可能になったことがある。特に我々の採用したオーバーラップ・フェルミオン(Neuberger, 1998 年)はエレガントな理論的構造を持ち、種々の物理量の計算やその解析の見通しが良くなるという大きなメリットを持つ。一方で計算に必要なコストは、従来のフェルミオン作用に対し 100 倍のオーダーで大きいため、アルゴリズムの改良が大規模計算プロジェクト成功の鍵となる。我々は理論的な改良、アルゴリズムの高速化、および強力なスーパーコンピュータによって、オーバーラップ・フェルミオンのシミュレーションを可能にし、クォークの真空偏極の効果を含む大規模計算プロジェクトを 2006 年に開始した。

2011 年度には、これまでに生成した 2 フレイバー及び 2+1 フレイバーでのゲージ場配位を利用した物理量の測定を行いつつ、今後の計画のための準備研究を行った。これは、2006 年 3 月に運用を開始した前 KEKSC システムが 2011 年 1 月末に運用を終了し、2011 年 9 月より新システムのシステム A の運用が開始したことにより、2012 年度以降にシステム B で行う大規模シミュレーションを策定ためである。オーバーラップ演算子と同等のカイラル対称性を持ち、計算コストが少ない最適化ドメインウォール作用についてのコード開発と準備的研究を行った。

参考サイト：<http://jlqcd.kek.jp/>

1.3.3 標準理論を超えた物理の探索のためのゲージ理論の構造の解析

稼働が始まった LHC 実験では、標準理論を超えた物理の発見が期待されているが、それには現象の背後にある物理の理論的理解が不可欠である。標準理論におけるヒッグス粒子のセクターは、高エネルギーではテクニカラー模型と呼ばれる未知のゲージ理論で記述されている可能性があり、どのような形の模型が可能かについて盛んに議論されている。この模型では、基本表現や高次の表現のフェルミオンが、QCD と同じタイプのゲージ場を介して相互作用しており、その理論構造を調べるためには格子 QCD の手法が適している。

我々はこのような模型の可能性を検討するために、様々なゲージ理論において相構造や結合定数のスケール依存性などを調べている。2011 年度においては、以下のような研究を行った。

- SU(3) ゲージ理論において 12 フレイバーの質量ゼロフェルミオンの動的シミュレーションを行い、結合定数のスケール依存性を調べた。この理論は赤外固定点が存在する可能性があり注目を集めているが、まだ確定した結論に至っていない。我々はツイストした境界条件でのポリヤコフループによって結合定数を定義する手法を用いている。レター論文を投稿中であり、更に高精度の結果を得るために、現在も計算を継続中である。
- オーバーラップ演算子を用いて、SU(2) ゲージ理論のフレイバー依存性を調べる研究を進めた。フェルミオンとしては基本表現および随伴表現の場合を考えている。2011 年度

においては、特に基本表現の場合について、オーバーラップ演算子を定義できるパラメータ領域を確定し、2、4 フレイバーでの計算を継続しつつ、6 フレイバーの計算を開始した。随伴表現の場合の一つの応用として、 $N=1$ 超対称理論への応用も行っている。

1.3.4 計算科学のためのアルゴリズムとシミュレーション手法の研究

2008 年度より、新学術領域研究「素核宇宙融合による計算科学に基づいた重層的物質構造の解明」（領域代表者・青木慎也（筑波大学））に参加し、計画研究「分野横断アルゴリズムと計算機シミュレーション」における研究代表者となっている。この計画研究では、数値計算アルゴリズムの分野横断的応用・開発、種々のアーキテクチャの計算機の性能を十分に引き出すための手法の開発、また計算科学に必要なデータグリッドなどの環境整備などを目標にしている。そのために、素粒子・原子核・宇宙のそれぞれの分野で培った技術を分野横断的に応用することや、計算機科学や応用数学の専門家と連携・協同して計算手法を発展させてゆくことが重要である。2011 年度においては、以下のような研究に進展があった。

- (1) 超新星爆発シミュレーションの並列化と応用数学研究者との連携した線形アルゴリズムの改良。ニュートリノ輸送効果を含む超新星爆発シミュレーションコードが並列化され、KEKSC システムでのテストとチューニングを進めている。また並列環境に適した線形アルゴリズムの研究に進展があった。
- (2) GPGPU を用いた各物質状態方程式計算の高速化。OpenCL を用いた実装により、計算時間の大幅な短縮を実現した。
- (3) 格子 QCD 共通コードの開発。共通コードの実装が大きくすすみ、基本的な機能が揃いつつある。2012 年度前半の公開を目指して開発を進めている。線形方程式解法の改良のために、応用数学で一般的に用いられるフォーマットで行列の要素を書き出す機能を実装した。また GPU を用いて演算を高速化するための仕組みを開発中である。

参考サイト：<http://bridge.kek.jp/>

資料

投稿中論文（実績報告に入っていないもの）

- [1] “Conformal fixed point of $SU(3)$ gauge theory with 12 fundamental fermions,” T. Aoyama et al., e-Print: arXiv:1109.5806.