

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：15401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23654092

研究課題名(和文) ゲージ理論数値実験ツールの開発

研究課題名(英文) Development of Gauge Theory Numerical Experimental Tool

研究代表者

中村 純 (Nakamura, Atsushi)

広島大学・情報メディア教育研究センター・教授

研究者番号：30130876

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円、(間接経費) 840,000円

研究成果の概要(和文)：ゲージ理論は物質の基本的相互作用を記述する理論であり、物性理論などでも有効な記述法になっている。ゲージ理論の解析には数値シミュレーションが強力な手法となっている。しかし、技術の進歩により、数値計算の専門家以外が使いにくいものになってしまっている。本研究計画では、数値計算の専門家ではない研究者が、自分の研究にゲージ理論のシミュレーションを使うことができる環境の構築を目指した。そのために、プログラムの中身はブラックボックスとはせず、またライブラリーの提供ではなく、各研究者が自分で必要なコードを組み立てるためのツールの集合体とした。国内で利用され、利用者の声を聞いて改良を行っている。

研究成果の概要(英文)：Gauge theories describe the interaction of fundamental particles, and it is also a useful technique for the solid state physics. For the analysis of the gauge theories, numerical simulations are very powerful research method. However, due to the rapid progress in computers and related technique, it is now not so easy to employ for those who are not an expert of the numerical analysis. In this project, we have developed the environment in which researchers can use the gauge theory simulations. For this purpose, the whole code is not a black-box. It is not a set of libraries, but a set of tools with which researchers can construct their own program. So far this code (Lattice Tool Kit) is used in and out of Japan. We appreciate user's opinions and improve the code.

研究分野：物理学

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：素粒子 数値シミュレーション QCD

1. 研究開始当初の背景

現在の素粒子の標準理論はすべてゲージ理論の形式で表されている。ゲージ理論のゲージ不変性を保ったまま、時空間を離散化した理論が格子ゲージ理論である。この格子ゲージ理論では、アルゴリズムの発展と相まって、数値シミュレーションが研究のための強力な道具となってきた。特にハドロン物理の研究のための格子 QCD、ゲージ理論の位相的に非自明な構造の物理的意味、中性子星内部の高密度系の研究に大きな力を果たすと期待されている。このため、素粒子論の研究者ばかりではなく、原子核の専門家、宇宙論の専門家も数値シミュレーションを使いこなすことが可能になれば、研究に大きな進展が期待される。

しかし、これまでに数値シミュレーションの経験の無い研究者が数値アルゴリズムを学びゼロからコードを書くのは実質的には不可能である。

特に、計算機の発展は高い並列性によるところが大きく、そのような並列計算機の利用では、プログラムがそのままでは高速な実行は期待できない。しかし、並列プログラムの開発は大きな労力を要する。

一方、これらの研究者は、場の理論についての理解は深く、理論が分かりやすく表現されているコードであれば、比較的短時間で理解することはできる。

2. 研究の目的

上記の状況を踏まえ、本研究では数値計算の専門家ではない研究者が、自己の研究目的のために数値シミュレーションを行える環境を提供することを研究の目的としている。ここでは

1. 数値計算の専門家から見ても十分な品質の結果が得られること
2. ブラックボックスとしてライブラリーを提供するのではなく、利用者がコードを自分で理解し、必要な変更が行えること
3. 解析のためのコードも提供されていること

が必要である。このためには、可読なコードであり、平均的な物理研究者が容易に理解できるものである必要がある。簡単かつ典型的な計算の例があり、その結果が与えられているとユーザーは安心して利用できる。

また、モンテカルロ型のシミュレーションでは乱数が重要な役割を果たすが、コードがポータブルであり、再現性があることのために、乱数も組み込まれている必要がある。

3. 研究の方法

1. 格子ゲージ理論の計算のための「ツ

ールキット」を開発し、提供する。

2. そこではゲージ場、フェルミオン場の含まれたものとする
3. オブジェクト指向の最近の動向を十分に取り込み、基本部品だけでなく、アルゴリズムが明示的に表現された例を提供する
4. 標準的な誤差解析のコードも提供する
5. 利用者からのフィードバックを集め、改善をしていく

具体的には、パッケージを解凍すると

```
GAUGE,
FERMION
HMC
INCLUDE
MODULE
LIBRARY
OTHERS
```

の7つのディレクトリが作られる。INCLUDE は格子のサイズパラメータ、MODULE はゲージ系、フェルミオン系の module、LIBRARY は全てに共通なコード、GAUGE はゲージ系のコード、FERMION はフェルミオンのプロパゲータを求めるセット、HMC はハイブリッドモンテカルロ型でフェルミオンが入ったコード

となっている。OTHERS は解析コードが入っている。

GAUGE, FERMION, HMC が簡単な例の入ったディレクトリで、ここで paraset というファイルを実行すると準備が行われる。それぞれにある Makefile のコンパイルコマンドを各自の環境に合わせた後、make とすると実行ファイルが作られる。

GAUGE の中には標準的なメトロポリス型、ヒートバス型のアップデートが入っている。また通常の作用か、改良された作用かを選べる。

FERMION では、パイ中間子のプロパゲータを計算する。HMC ではフェルミオン入りでモンテカルロ計算をする。

たとえば、HMC は FERMION 中のコードを使う。FERMION 中は共役勾配法で線形方程式を解くルーティンが組み込まれている。

ユーザーはこれらのコードを読むことで、どのコードが何をしているかを理解できる。

格子サイズを与える INCLUDE 中のファイルは、GAUGE, FERMION, HMC 中にある paraset を実行すると書き換えられる。このため、この3つのディレクトリを同時に使用するユーザーはせっかく書いたものが上書きされてしまうという問題がある。次期バージョンではこの点を改良する必要がある。

このような研究支援環境の構築では

「問題解決環境(Program Solving Environment)」という分野で研究が行われており、そこでの知見(ブラックボックス ホワイトボックスなど)も活用した。

4. 研究成果

問題解決環境分野での成果報告を含む次項で示すような論文、発表に加え、理化学研究所、中国 Wuhan 大学等で、開発した格子プログラムキットとその使い方について講習会を行った。国内のみならず、国外からの利用についての問い合わせも多い。

今後の検討課題としては、計算コードの公表方法がある。自由にダウンロードできるようにしていると、次々とこちらの把握できないところで複製が流通してしまい、どのように変更が加えられたのか把握できず、誤ったコードが流通してしまう危険がある。今後はダウンロード時に最低限氏名連絡先を入れてもらう等の検討が必要である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 7 件)

Atsushi Nakamura, Keitaro Nagata, Numerical Approach to Quark-Gluon World from Statistical QCD, Proceedings of the 12th Asia Pacific Physics Conference (APPC12), 査読有, 10.7566,2013, 16002

Junichi Takahashi, Keitaro Nagata, Takuya Saito, Atsushi Nakamura, Color screening potential at finite density in two-flavor lattice QCD with Wilson fermions, Phys. Rev., 査読有, D88, 2013, 114504

K. Nagata; S. Motoki; Y. Nakagawa; A. Nakamura; T. Saito, Towards extremely dense matter on the lattice, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 査読有, 1A103, 2012, 1-40

Keitaro Nagata and Atsushi Nakamura, EoS of finite density QCD with Wilson fermions by Multi-Parameter Reweighting and Taylor expansion, Journal of High Energy Physics, 査読有, 1204-092, 2-12, 2012, 1-40

Y. Nakagawa, A. Nakamura, T. Saito and H. Toki, Scaling study of the gluon propagator in Coulomb gauge QCD on isotropic and anisotropic lattices, Phys. Rev., 査読有, D83, 2011, 114503

M. N. Chernodub, Y. Nakagawa, A.

Nakamura, T. Saito, and V. I. Zakharov, Gluon propagators and center vortices in gluon plasma, Phys. Rev., 査読有, D83, 2011, 114501

Keitaro Nagata and Atsushi Nakamura, Imaginary chemical potential approach for the pseudocritical line in the QCD phase diagram with clover-improved Wilson fermions, Phys. Rev., 査読有, D83, 2011, 114507

[学会発表](計 11 件)

Atsushi Nakamura, Towards Understanding QCD Phase Diagram Lattice and RHIC Experiments, Lattice QCD at finite temperature and density, 20 Jan. 2014 高エネルギー加速器機構

Atsushi Nakamura, Probing QCD phase Structure by Baryon Multiplicity Distribution, Heavy Ion Meeting 2013-11 (HIM 2013), 2 Nov. 2013, 仁荷大学(韓国)

中村純・永田桂太郎, 多重度分布とQCD相転移, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 21 Sep. 2013, 高知大学

中村純, シミュレーション教育のための授業の試み, 第 16 回問題解決環境(PSE)ワークショップ 2013, 18 Sep. 2013, 玉川大学

中村純, 格子 QCD による有限密度ハドロン系の研究, RCNP/九大研究会「ハドロン物理と原子核物理のクロスオーバー」, 6 Sep. 2013, 九州大学

Atsushi Nakamura, Role of Lattice QCD in Future High-Energy Nuclear Collisions, Future Trends in High-Energy Nuclear Collisions, 20 Aug. 2013, 清華大学(中国)

Atsushi Nakamura, What can we learn from RHIC proton multiplicity distributions on QCD phase diagram?, Workshop on QCD under extreme conditions XQCD13, 5-7 Aug. 2013, ベルン大学(スイス)

Atsushi Nakamura, Pursuing QCD Phase Transition with Lattice QCD and Experimental Data, Lattice 2013, 29 July 2013, ヨハネス・グーテンベルク大学(ドイツ)

Atsushi Nakamura, Numerical Approach to Quark-Gluon World from Statistical QCD, The 12th Asia Pacific Physics Conference of AAPPS, 16 July 2013, 幕張メッセ国際会議場

Atsushi Nakamura, Introduction to Lattice Gauge Theories, QCD Structure 1, 8-12 Oct. 2012, 武漢(中国)

Atsushi Nakamura, Finite Density Lattice QCD - a combined approach,

Extreme QCD, 21-23 Aug. 2012, ワシントン大学 (アメリカ)

〔図書〕(計 1件)

中村 純、共立出版、フロー式物理演習シリーズ 18 相対論入門、2013、180

〔その他〕

ホームページ等

Lattice Tool homepage

[http://nio-mon.riise.hiroshima-u.ac.jp/](http://nio-mon.riise.hiroshima-u.ac.jp/~LTK/)

~LTK/

6 . 研究組織

(1)研究代表者

中村 純 (NAKAMURA ATSUSHI)

広島大学・情報メディア教育研究センター

・教授

研究者番号 : 30130876