

jh190048-NAH

カイラルフェルミオンを用いた格子 QCDによる中間子質量生成機構の研究

国土館大学 理工学部
課題代表者 関口 宗男

共同研究に関する情報

拠点名 大阪大学

超大規模数値計算系応用分野

参加研究者（所属）役割分担

関口宗男（国士舘大学） 代表 研究統括・理論的考察・データの分析

若山将征（大阪大学） 副代表 コード開発・演算の実行・データ解析

伊達 進（大阪大学サイバーメディアセンター）

アルゴリズム・コード開発

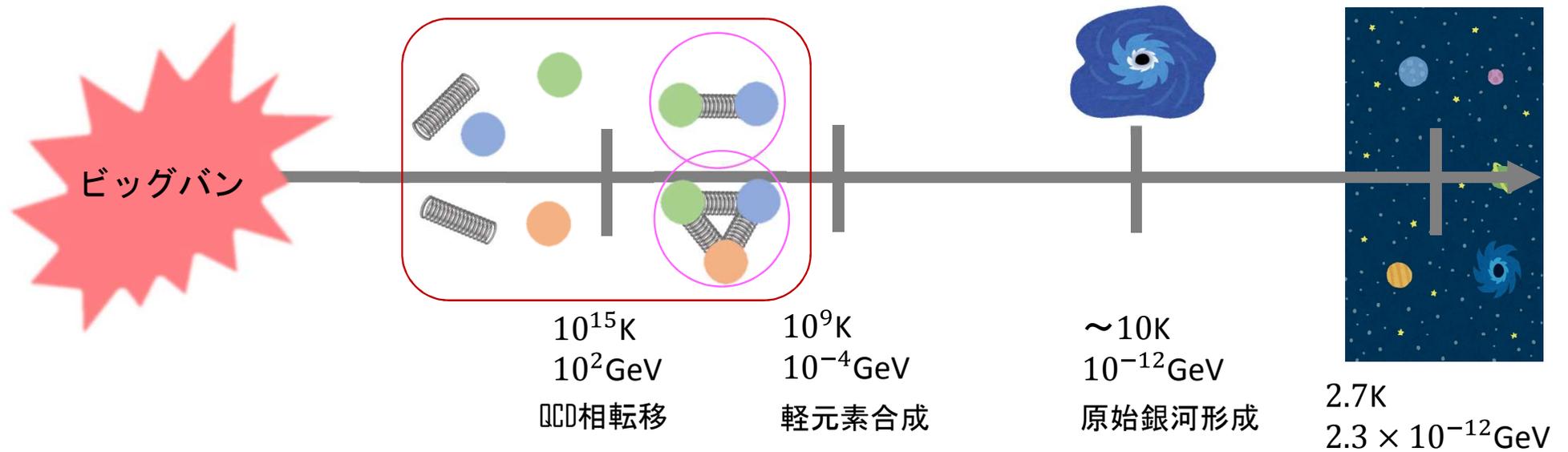
中村純（大阪大学） アルゴリズム・コード開発

村上祐子（国士舘大学） アルゴリズム・コード開発

和田浩明（国士舘大学） コード開発・演算の実行

研究の背景 1

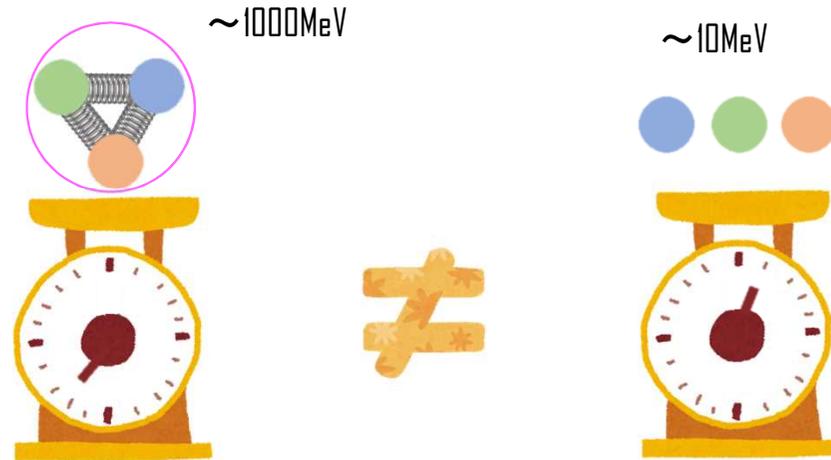
なぜ物質は質量を持つのか？ → 物質の構成に注目



ビッグバン直後、超高温状態から宇宙温度が下がるとき
素粒子のクォークから陽子や中性子が生み出される

研究の背景 2 ハドロンの質量生成機構

ハドロンの質量 > 構成するクォークの質量

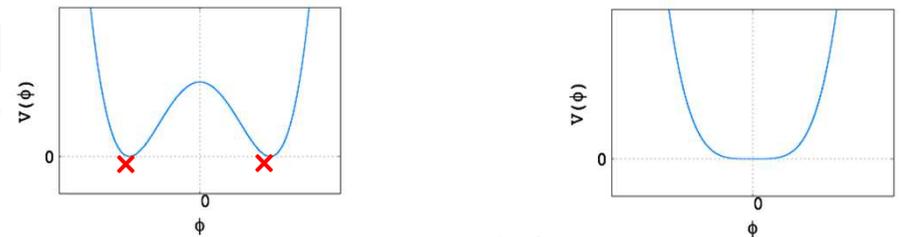


ハドロンはカイラル対称性の自発的破れと呼ばれる現象により質量を獲得する（有効理論）

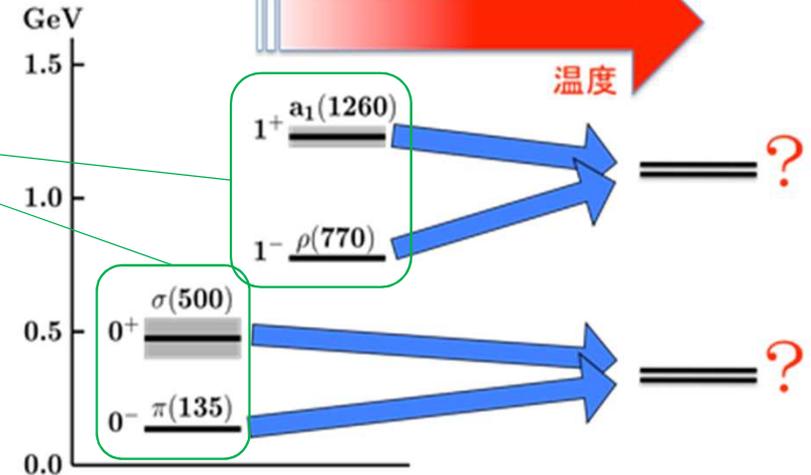
「カイラル対称性の自発的破れによりハドロンが質量を獲得する過程」をシミュレーションで実証できれば、物質の質量起源のメカニズムを明らかにできる

研究の背景3 カイラル対称性の回復

- 有限温度では、カイラル対称性の自発的破れの状態から、一部のカイラル対称性が回復する
- このとき、対になっている中間子の質量が縮退する



カイラル対称性の回復



カイラルパートナー

- この過程を第一原理計算で実証できれば、中間子質量の生成機構を説明することができる
- カイラル対称性を持つフェルミオンを計算できるコードの作成が必要

研究課題

- 中間子の質量を求める計算は第1原理（格子量子色力学（QCD））による大規模シミュレーションが必要。しかし従来のシミュレーションでは質量の起源に関係のあるカイラル対称性は考慮されていない。格子カイラル対称性は仮想の5次元を使うことに実現できるが、計算量が膨大になりすぎて現実的なシミュレーションができない。本研究では高速の計算ができるコードの開発をする。
- 開発したコードを使った「シミュレーション」により質量の起源の解明に近づく。

平成31年度の研究課題

- (1) 第1原理計算による a_1 中間子励起状態の質量の確定
- (2) 第1原理計算による有限温度における中間子質量変化のシミュレーション (JHPCNの計算機リソースを使用する)
- (3) シミュレーションコードの高速化
- (4) Truncated Overlap Fermion (TOF) 作用の高速計算の準備 (JHPCNの計算機リソースを使用する)

(1) 第1原理計算による a_1 中間子励起状態の質量の確定 (JHPCNの計算機リソースを使用)

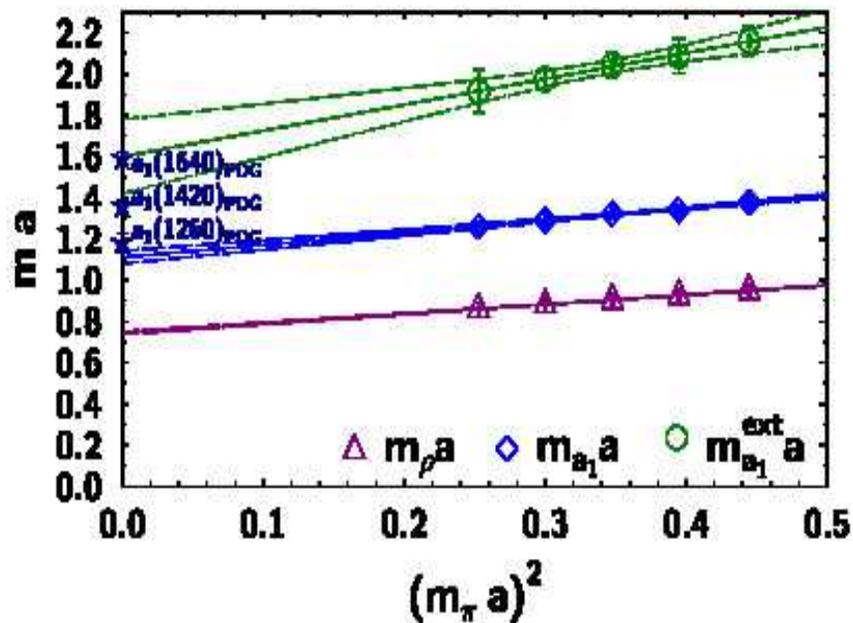
- JHPCNの共同研究で開発したクォーク作用に関するTOFコードを真空での中間子質量のシミュレーション使用して、確立している中間子の質量を再現することによりコードの性能の確認をする。いままでのコードでは結果が得られていない中間子を計算し物理的な結果を引き出す。
- a_1 中間子は最終的には有限温度でのシミュレーションを計画している。
- a_1 中間子は、その構成等が明らかでない中間子である。
- 時間の格子サイズを24、空間の格子サイズを $8 \times 8 \times 8$ とした。カイラル対称性を近似的に実現するための5次元目の格子サイズを $N_5=32$ とし、5次元の質量を $m_5=1.65$ とした。ゲージ結合定数を指定する β を5.7とした。

- m_{fa} : クォーク質量
- $m_{\pi a}$: π 中間子質量
- $m_{\rho a}$: ρ 中間子質量
- Number of configurations:
ゲージ場の配位の数

生成したゲージ場（グルーオン場）を使ってそれぞれのクォーク質量に関して中間子の伝搬関数を計算して、その質量を求める。

m_{fa}	$m_{\pi a}$	$m_{\rho a}$	m_{π}/m_{ρ}	Number of confs.
0.08	0.6668(7)	0.9496(18)	0.702(2)	3000
0.07	0.6283(7)	0.9249(21)	0.679(2)	3000
0.06	0.5895(8)	0.94042(24)	0.652(3)	3000
0.05	0.5478(8)	0.8816(27)	0.621(3)	3600
0.04	0.5028(6)	0.8614(24)	0.584(2)	7864

赤字部分が今回のJHPCNリソースを使用



左図は、 ρ 中間子(紫)、基底状態 a_1 中間子(青)、第1励起状態 a_1 中間子の質量(緑)の π 中間子質量2乗依存性を示す。
 $(m_\pi a)^2=0$ のところは真空の各中間子の質量の値で実験値と比較できる数値となる。濃い青がそれぞれの実験値の範囲。

a_1 中間子第1励起状態を確定したはじめてのシミュレーションである。

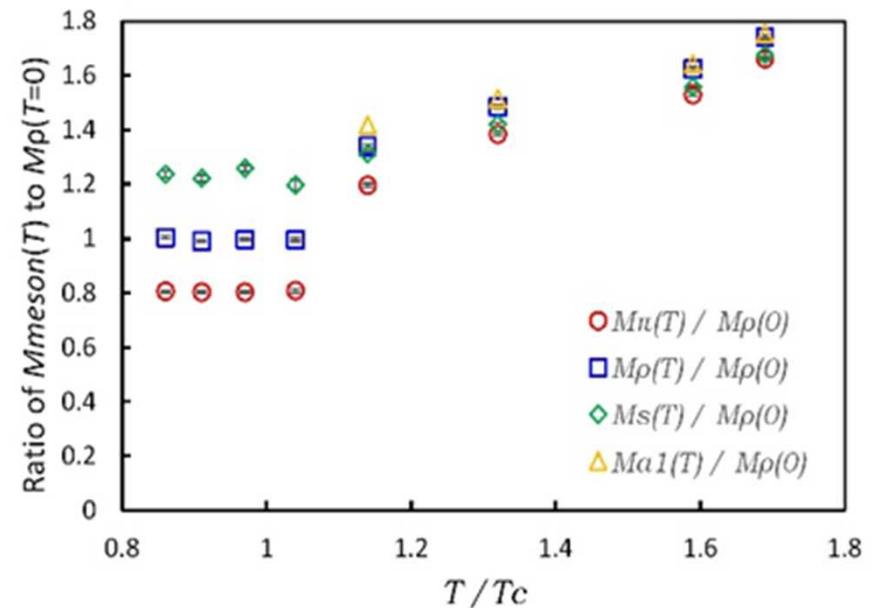
TOF作用によるコードが実際に物理的な結果を出すことが可能で、いままでに開発されている他のグループと同等以上の性能を持つ。

	Our results	実験値
基底状態	1158(42)MeV	1230(40)MeV
第1励起状態	1667(22)MeV	1655(16)MeV

a_1 中間子はクォーク模型で予言されている状態よりも実験で発見されている $a_1(1260)$ 、 $a_1(1420)$ 、 $a_1(1640)$ の3つの状態が何から構成されているかは確定していない。今回のシミュレーションはクエンチ近似を用いているためクォーク・反クォークの2体で構成される状態をシミュレーションしたことになる。我々の結果は、 $a_1(1260)$ と $a_1(1640)$ はクォーク・反クォークで構成されているとこと確定したといえる。

(2) 第1原理計算による有限温度における中間子の質量変化のシミュレーション

- 有限温度での中間子質量のシミュレーションを最終目標としているが、現状のTOF作用を使いクエンチ近似で質量の重いクォークの領域で計算するとどのような結果になるか確かめるために行ったテストシミュレーションである。この研究は平成30年度のJHPCNの計算機リソースと阪大RCNPの計算機リソースを使用している。データの解析を平成31年度に実施した。
- 格子は空間及び時間のサイズを格子サイズ $N_s \times N_t$ として、 $N_s \times N_t \times N_5 = 16^3 \times 16 \times 32$



- 臨界温度を超えるあたりから中間子が縮退するようすがシミュレーションできている。すべての中間子が同じ質量に縮退するように見える。有効理論による予測とは合わない。理由に関しては明確ではない。また a_1 中間子については臨界温度以下ではシグナルがかなり不明瞭であり、データをもっと増やす必要がある。この計算でのスカラー中間子はクエンチ近似を使用しているため非連結ファインマンダイアグラムを省略して不完全なシミュレーションになっている。非連結ダイアグラムは動的クォークを入れたフルQCDシミュレーションでないと正しく計算することができない。この部分が高コストの計算になる。

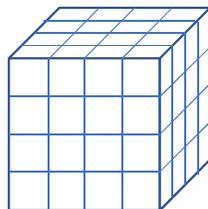
- 二

(3) シミュレーションコードの高速化 (JHPCNの計算機リソースを使用しない)

カイラル対称性を取り入れたことにより計算量は増加する。阪大との共同研究によりチューニングをすすめて高速化を実現している。さらなる高速化が必要である。

従来:ウィルソンフェルミオン作用

- クォークのもつカイラル対称性を再現しない
→シミュレーションできる物理現象に制限あり



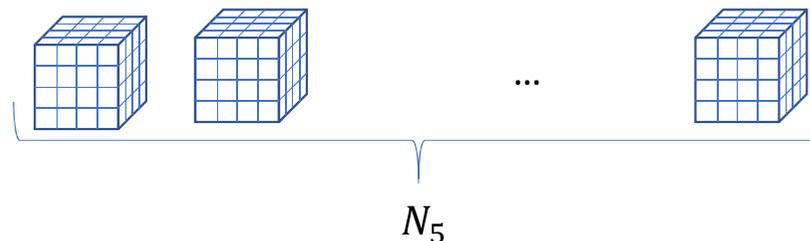
例) 4次元空間座標をそれぞれ4等分した場合、ウィルソン作用で解く線形方程式の行列の次数は

$$3 \times 4 \times 4^4$$

クォークがもつ自由度 ↑ ↑ 4次元座標離散化における
行列要素

新規:Truncated Overlap Fermion作用

- クォークのもつカイラル対称性を近似的に再現



- 左の作用にさらにパラメータ N_5 が一つ追加
例) $N_5 = 32$ のとき、線形方程式の行列次数は

$$3 \times 4 \times 4^4 \times 32$$

- 計算コストが莫大になる

- Hasenbusch-Jansen (Nucl.Phys.B 659, 299 (2003)) による前処理法付き共役勾配法を取り入れたコード開発を実施したが、年度内に完成することができなかった。
- 次年度には完成させウィルソンフェルミオン (WF)作用と Truncated overlapフェルミオン (TOF) 作用の両方のコードに実装し、テストシミュレーションを実施することを予定している。

(4) TOF作用の高速計算の準備 (JHPCNの計算機リソースを使用)

- TOF作用は大阪大学サイバーメディアセンターによる2度のチューニングにより、高速化を実現しているが、カイラル対称性を実現するために4次元時空間にさらに5次元目の N_5 次元を加えている。このため計算量が多くなっている。我々のコードで N_5 の依存性を検討し、 π 中間子と ρ 中間子の質量でどのような影響があるか検討するシミュレーションを実施した。平成31年度のJHPCNのリソースを使って

mf=0.040 $N_5=8$ 2400conf.

Mf=0.060 $N_5=48$ 1200conf.

Mf=0.080 $N_5=48$ 1200conf.

のゲージ場を生成し、 π 中間子と ρ 中間子の伝搬関数のシミュレーションをした。データの解析をまだ終了していない。

まとめと今後の展望

まとめ

- クォークについてTruncated Overlap Fermion (TOF)作用コードを導入したシミュレーションを実施し、物理的に意味のある結果を出せた（（１）、（２））。
- 高速シミュレーションコードの作成（未完成）（（３））
- TOF作用の高速計算の準備（平成31年度分の計算は終了）（（４））

今後の課題

- Hasenbusch-Jansenによる前処理法付き共役勾配法を実装の完成し、現実的な軽いクォークのシミュレーションを実現する。
- コード並列化及びGPUへ移植。

研究業績

学術論文、会議プロシーディングス

1. Y. Murakami, S. Muroya, A. Nakamura, C. Nonaka, M. Sekiguchi, M. Wakayama, H. Wada, “Mass of a_1 meson from lattice QCD with the truncated domain wall fermion” JPS Conference Proceedings **26** 031007-1~4 (2019) [査読付き].
2. H. Wada, Y. Murakami, A. Nakamura, M. Sekiguchi, M. Wakayama, “Lattice study of meson properties at fine temperature using the truncated overlap fermions”, Proceedings of Science **363** 045-1~7 (2020) [査読付き].
3. M. Wakayama, . H. Wada, Y. Murakami, A. Nakamura, M. Sekiguchi, “Spectroscopy of a_1 mesons from lattice QCD with the truncated overlap fermions ”, Journal of Modern Physics A, pp.5 (to be published.) [査読付き].

国際会議発表

1. H. Wada, Y. Murakami, A. Nakamura, M. Sekiguchi, M. Wakayama, “Lattice study of meson properties at fine temperature using the truncated overlap fermions”, The 37th International Symposium on Lattice Field Theory (2019年6月).
2. M. Wakayama, . H. Wada, Y. Murakami, A. Nakamura, M. Sekiguchi, “Spectroscopy of a_1 mesons from lattice QCD with the truncated overlap fermions ”, XVIII International Conference on Hadron Spectroscopy and Structure (2019年8月)