

jh200030-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

国士舘大学理工学部

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

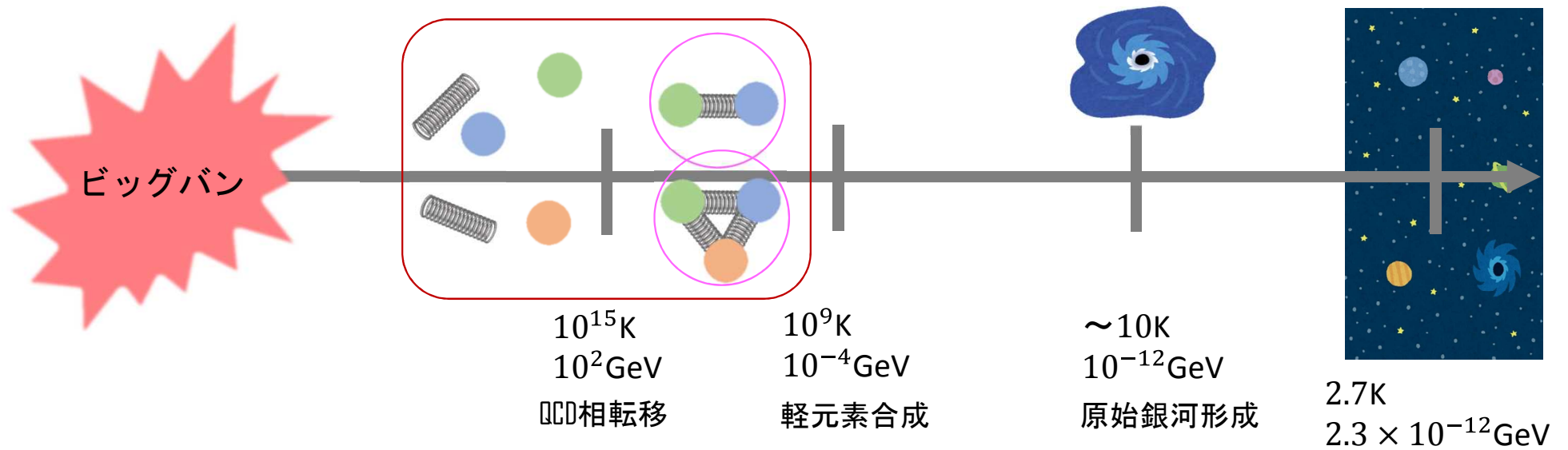
中村純（大阪大学） アルゴリズム・コード開発

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

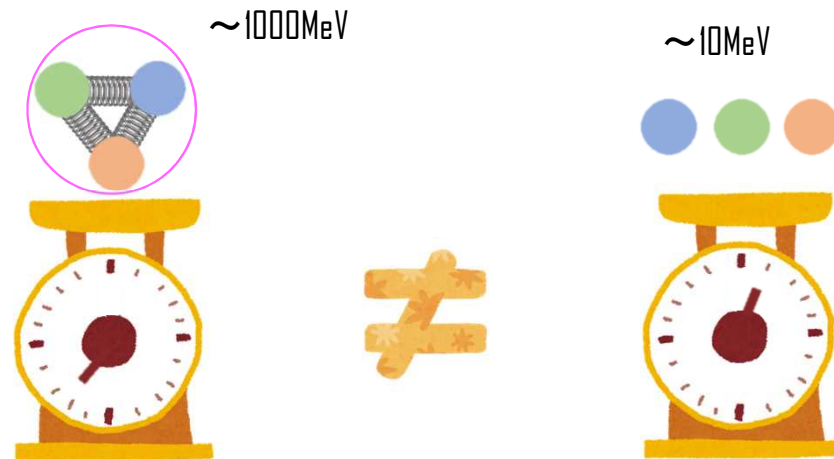


ビッグバン直後、超高温状態から宇宙温度が下がるとき

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

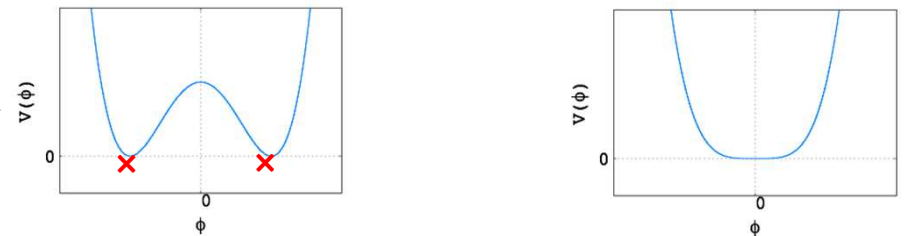


ハドロンはカイラル対称性の自発的破れと呼ばれる現象により質量を獲得する（有効理論）

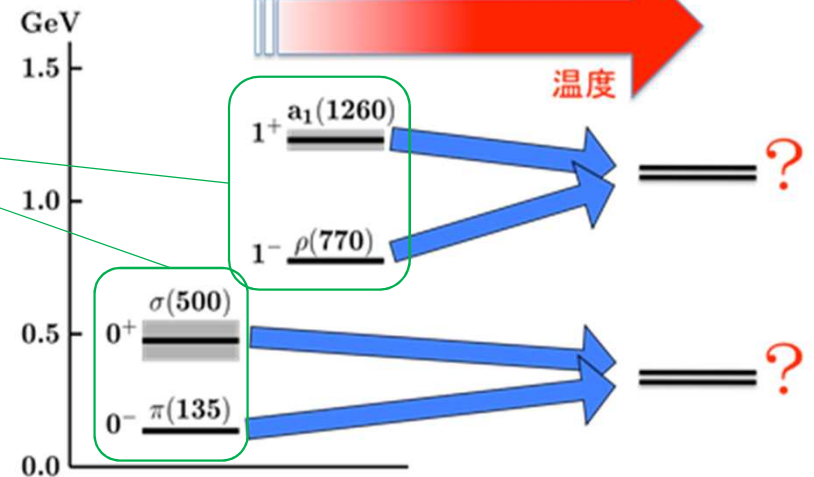
「カイラル対称性の自発的破れによりハドロンが質量を獲得する過程」をシミュレーションで実証できれば、物質の質量起源のメカニズムを明らかにできる

# 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



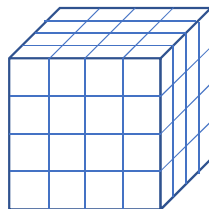
- この過程を第一原理計算で実証できれば、中間子質量の生成機構を説明することができる
- カイラル対称性を持つフェルミオンを計算できるコードの作成が必要

## 研究背景 4 カイラル対称性の導入による計算量の増大

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



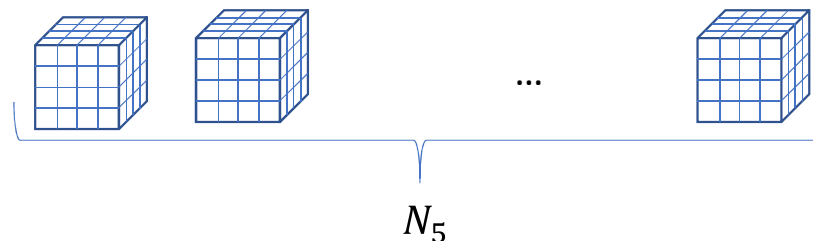
例) 4次元空間座標をそれぞれ4等分した場合、  
ウィルソン作用で解く線形方程式の行列の次数は

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

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

# 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。

# 前年度までの成果

- (1) クォークについてTruncated Overlap Fermion (TOF)作用コードを作成した。
- (2) 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。
- 格子QCDによりはじめて $a_1$ 中間子の第1励起状態を確定し、 $a_1$ 中間子の構成を明らかにした。

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 (2019) 031007 [査読付き].

M. Wakayama, . H. Wada, Y. Murakami, A. Nakamura, M. Sekiguchi, “Spectroscopy of  $a_1$  mesons from lattice QCD with the truncated overlap fermions”, International Journal of Modern Physics A, pp.5 (to be published.) [査読付き].

- 有限温度での中間子質量のテスト計算を実施した。

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(2020) [査読付き].

- (3) 高速シミュレーションコードの作成に着手
- (4) TOF作用コードの高速計算の準備



# 令和2年度の研究課題

- (1)  $\sigma$ 中間子の質量生成機構の研究 (JHPCN計算機リソースを使用)
- (2) Truncated Overlap Fermion (TOF)作用コードの改良 (JHPCNの計算機リソースを使用しない)
- (3) 真空での $\kappa$ 中間子シミュレーションの準備 (2+1コード作成) (JHPCNの計算機リソースを使用しない)

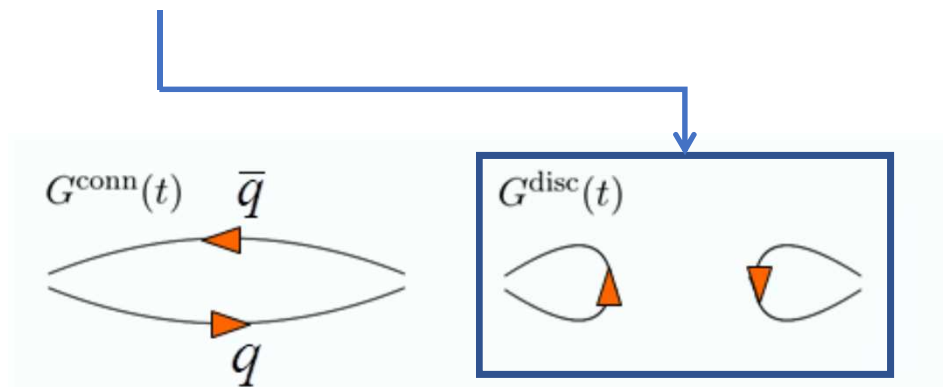
JHPCNの計算機リソースとしては大阪大学CMCのSX-ACEを使用する。

## (1) $\sigma$ 中間子の質量生成機構の研究 (JHPCN計算機リソースを使用)

- 前処理付き共役勾配法[1]を実装したウィルソン・フェルミオン作用のコード (WFコード) (カイラル対称性は破れている) を用いて、現実的なクォーク質量での $\sigma$ 中間子のプロパゲーターをシミュレーションする。

[ 1 ] M. Hasenbusch and K. Jansen, Nucl. Phys. B 659, 299 (2003)  
[hep-lat/0211042]

- $\sigma$ 中間子の量子数は真空の量子数と同じ
- 非連結ダイアグラムの寄与がある



- 今回のクエンチ計算では計算することができない
- 非連結ダイアグラムはフルQCDでの計算が必要。

- 重いクォークWFコードによるフルQCDのシミュレーション人より非連結グラフが、中間の質量生成に大きな役割を果たすことが示されている。

Teiji Kunihiro, Shin Muroya, Atsushi Nakamura, Chiho Nonaka, Motoo Sekiguchi, and Hiroaki Wada (SCALAR Collaboration)

Phys. Rev. D 70, 034504(2004).

- 軽いクォークでは非連結グラフの振舞は検証されていない（計算コストがかかる）。

## (2) TOF作用コードの改良 (JHPCNの計算機リソースを使用しない)

- 前処理付き共役勾配法をTOFコードに実装して、さらにコードの並列化及び高速化を実施する。テスト計算をした後に中間子のシミュレーションを実施する。
- WFコードの計算は顕わにカイラル対称性が破れているが、TOFコードではカイラル対称性を持つ計算になる。これら二つのシミュレーションの結果の相違からカイラル対称性の自発的破れが中間子質量生成に関係していることを明確になると予想される。
- 計算機リソースとしては、2020年度夏に国士舘大学に導入する予定のSX-Aurora TSUBASAを利用する。

### (3) 真空での $K$ 中間子シミュレーションの準備 (2+1コード作成) (JHPCNの計算機リソースを使用しない)

- WFコードとTOPコードをそれぞれ質量が違うクォークと反クォークを同時に計算できるコードに書き換える。これを完成されることにより、 $s$ クォークを含めてカイラル9重項中間子に関するシミュレーションを可能にする。
- 計算機リソースとしては、2020年度夏に国士舘大学に導入する予定のSX-Aurora TSUBASAを利用する。

# 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 ”, XVIII International Conference on Hadron Spectroscopy and Structure, International Journal of Modern Physics A, pp.5 (to be published.) [査読付き].
4. C. Nonaka, T. Kunihiro, S. Muroya, A. Nakamura, M. Sekiguchi, H. Wada and M. Wakayama, “Scalar mesons in lattice QCD,” International Journal of Modern Physics, A 32 , 1747014-1～7, (2017)[査読付き].
5. K.I.Ishikawa, I.Kanamori, Y.Murakami, A.Nakamura, M.Okawa and R.Ueno, “Non-perturbative determination of the  $\Lambda$ -parameter in the pure SU(3) gauge theory from the twisted gradient flow coupling,” Journal of High Energy Physics 1712, 067-1～26, (2017)[査読付き].
6. Y.Murakami and K.I.Ishikawa, “Construction of lattice Möbius domain wall fermions in the Schrödinger functional scheme,” Journal of Modern Physics, A 33 no.01, 1850012-1～38 (2017)[査読付き].
7. M.Wakayama, T.Kunihiro, S.Muroya, A.Nakamura, C.Nonaka, M.Sekiguchi and H.Wada, “Lattice QCD study of four-quark components of the isosinglet scalar mesons: Significance of disconnected diagrams,” Physcal Review D 91 094508-1～10 (2015)[査読付き] .