

HA-PACS を用いた、多フレー バーSU(3)ゲージ理論の共形 場理論探索について

石川健一（広島大学理学研究科）

共同研究者

岩崎洋一（KEK/CCS筑波大）

中山優（Kavli IPMU/Caltech）

吉江友照（CCS筑波大）

Phys.Rev.D89(2014)114503, 87(2013)071503

の研究に基づきます

はじめに

- 素粒子物理学
 - 素粒子標準模型

原子、原子核、クォークの図

さらに小さい構成要素はあるか？

素粒子一覧図

はじめに

- 素粒子物理学
 - 素粒子標準模型

原子、原子核、クォークの図

さらに小さい構成要素はあるか？

量子色力学(Quantum Chromodynamics) QCD

クォークとグルーオンの力学

格子QCDによる計算
スーパーコンピュータの利用

C C S の計算機利用
QCDPAX, CP-PACS, PACS-CS, HA-PACS, ...

素粒子 覧図

はじめに

- 素粒子物理学
 - 素粒子標準模型

原子、原子核、クォークの図

さらに小さい構成要素はあるか？

素粒子一覧図

弱い力と電磁気力の
分化に関与する

素粒子たちに質量を与える

ヒッグス粒子の発見
2013年LHC

はじめに

- 素粒子物理学
 - 素粒子標準模型

原子、原子核、クォークの図

さらに小さい構成要素はあるか？

素粒子一覧図

- ヒッグス粒子だけ、何だか特別すぎる。
 - 理論では、スピン0の素粒子はヒッグス粒子だけ。
 - その他は物質はスピン1/2、媒介粒子はスピン1を持つ。
- この一覧表の起源は？(どのようにしてこのような構造が説明できるか？)

QCDとの関係？

- 標準模型の力学はすべてゲージ原理に基づいている。ゲージ理論（Maxwell 方程式の拡張）
 - ゲージ理論自身はいくらでも作ることができる
 - ゲージ群の種類、物質の表現や数、
 - 現実世界(=標準模型)は
 - $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ ゲージ群、物質は基本表現で3世代コピーがあり、どの電荷を帯びているかは先の表の通り
- ヒッグス粒子が複合粒子である可能性はないのか？
 - 一つの未検証模型
 - テクニカラー模型
 - 未発見のQCDのような相互作用で未発見の素粒子の複合状態？

ヒッグス粒子が複合粒子
のイメージ図

QCDとの関係？

- 標準模型の力学はすべてゲージ原理に基づいている。ゲージ理論（Maxwell 方程式の拡張）
- 多様なゲージ理論の中から標準理論のゲージ理論が選ばれる理由はあるだろうか？
- 近年、QCDの様な理論で、物質の種類を増やしたり、変えたりした理論の性質を詳しく調べることが行われてきている。
 - 先のテクニカラーモデルの候補として
 - 先の理論的考察として

本講演では

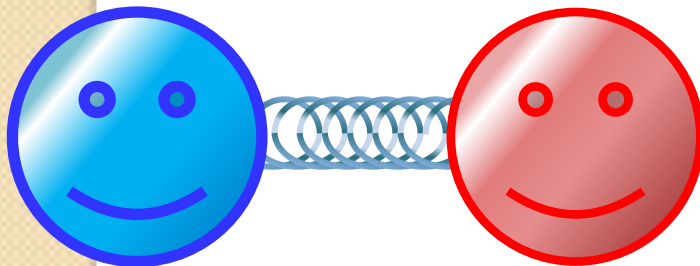
- QCD様理論 = SU(3) ゲージ理論
- 物質の種類数(フレーバー数 N_f)を増やす (QCDでは有効3種類)
=> $N_f=16$ 種類までふやしていくと？

どうなるか？

- に関心がある。
- 理論的にはある数 (N_f^c) より大きくなると、共形場理論というものになると予想されている。
- この N_f^c の厳密な値を知ること、共形場理論自身を実現することが行われてきている。
- フレーバー数の多いシミュレーションのためのGPU利用について紹介する。

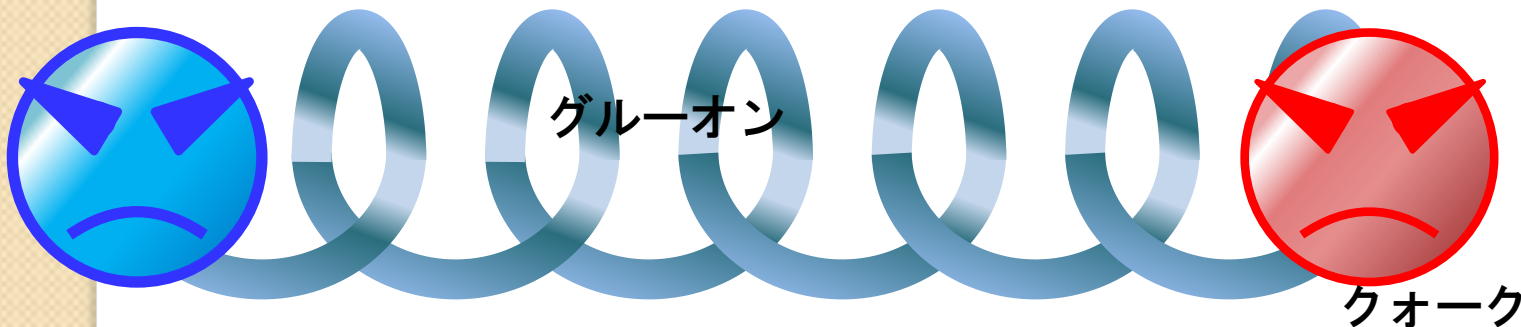
多フレーバーSU(3)ゲージ理論の共形場理論探索

- 共形場理論 = スケール不変な理論
- ある意味QCDと QEDの中間的な理論



クォーク

QCD は短距離で力が弱く ($1/r^2$ 則より弱い) 長距離で強くなり (一定の力)、クォークの閉じ込めがおこる。

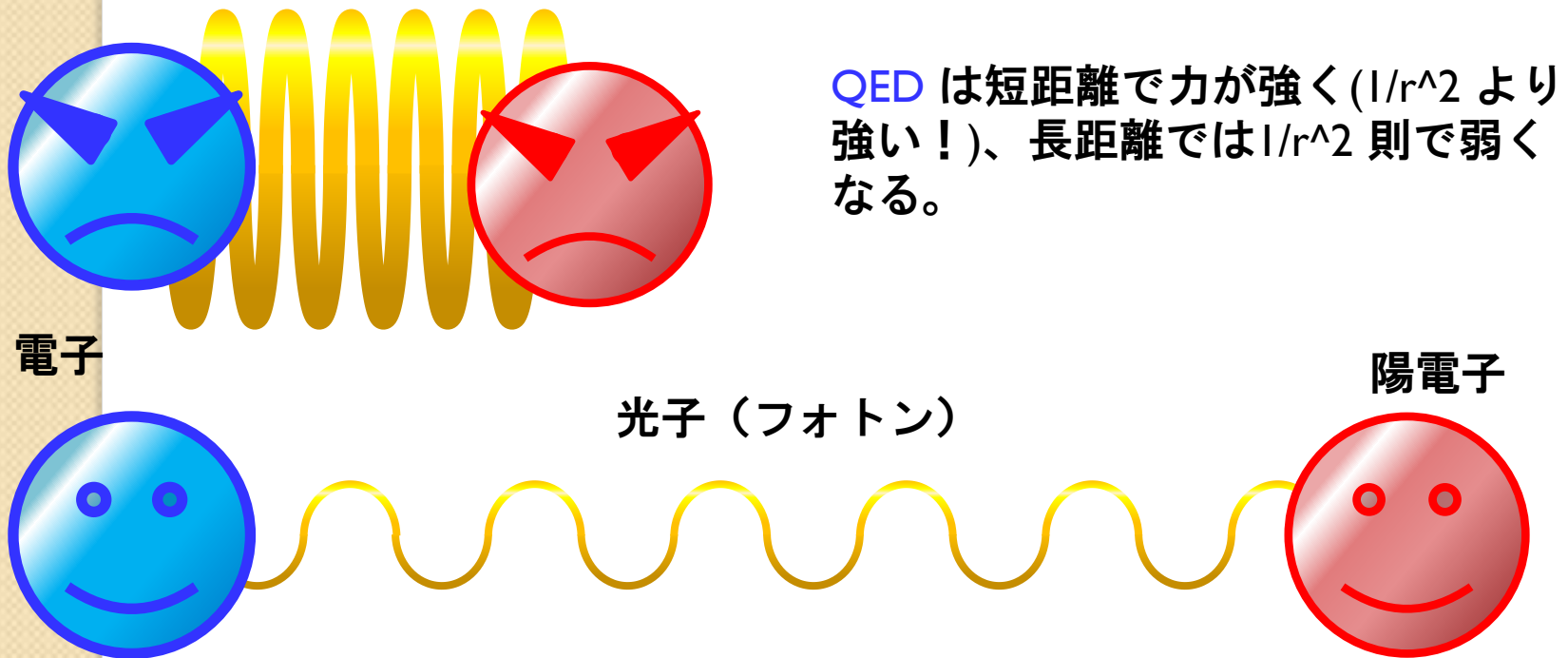


グルーオン

クォーク

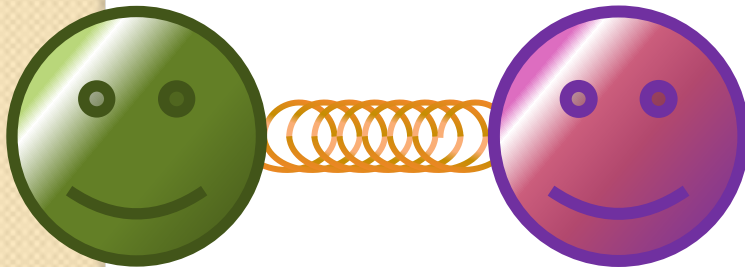
多フレーバーSU(3)ゲージ理論の共形場理論探索

- 共形場理論 = スケール不変な理論
- ある意味QCDと QEDの中間的な理論



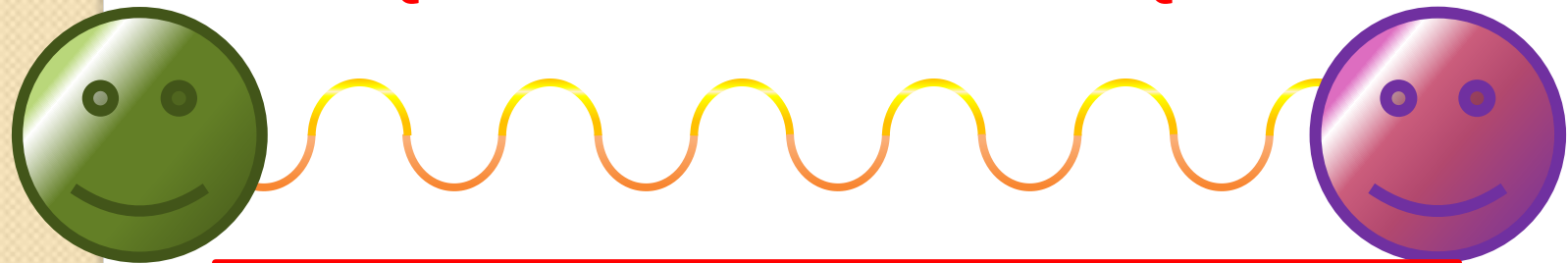
多フレーバーSU(3)ゲージ理論の共形場理論探索

- 共形場理論 = スケール不変な理論
- ある意味QCDと QEDの中間的な理論



共形場的ゲージ理論は短距離で力が弱く ($1/r^2$ より弱い = QCD的)、長距離では $1/r^2$ 則の QED 的振舞い。

短距離で QCD に似ていて長距離で QED 的な力



格子ゲージ理論による第一原理数値計算でこのような理論を探す

多フレーバーSU(3)ゲージ理論の共形場理論探索

数多くの先行研究、関連研究、最新研究（格子計算）

- Y. Iwasaki, K. Kanaya, S. Kaya, S. Sakai, T. Yoshié, Lat92,93,96, Prog.Theor.Pys.Suppl.131(1998), PRD69(2004)
Thomas Appelquist, Anuradha Ratnaweera, John Terning, L. C. R. Wijewardhana, PRD58(1998)
P.H. Damgaard, U.M. Heller, A. Krasnitz, P. Olesen, PLB400(1997)
Simon Catterall, Joel Giedt, Francesco Sannino, Joe Schneible, JHEP0811(2008)
Thomas Appelquist, George T. Fleming, Ethan T. Neil, PRL100(2008), PRD79(2009)
A.Deuzeman, M.P. Lombardo, E. Pallante, PRD82(2010)
Zoltan Fodor, Kieran Holland, Julius Kuti, Daniel Negradi, Chris Schroeder, PLB681(2009)
Anna Hasenfratz, PRD80(2009)
Xiao-Yong Jin, Robert D. Mawhinney, PoS(LAT2009)
Erek Bilgici, Antonino Flachi, Etsuko Itou, Masafumi Kurachi, C.-J. David Lin, Hideo Matsufuru, Hiroshi Ohki, Tetsuya Onogi, Eigo Shintani, Takeshi Yamazaki, PoS(LAT2009)
Yigal Shamir, Benjamin Svetitsky, Thomas DeGrand, PRD78(2008); Thomas DeGrand, Yigal Shamir, Benjamin Svetitsky, PRD79(2009); Thomas DeGrand, PRD80(2009)
Zoltan Fodor, Kieran Holland, Julius Kuti, Daniel Negradi, Chris Schroeder, JHEP0911(2009)
Ari J. Hietanen, Kari Rummukainen, Kimmo Tuominen, PRD80(2009); JHEP0905(2009)
L. Del Debbio, B. Lucini, A. Patella, C. Pica, A. Rago, PRD80(2009)
Francis Bursa, Luigi Del Debbio, Liam Keegan, Claudio Pica, Thomas Pickup, PRD81(2010)
Luigi Del Debbio, Biagio Lucini, Agostino Patella, Claudio Pica, Antonio Rago, PRD82(2010)
Luigi Del Debbio, PoS(Lattice2010)
Kei-ichi Nagai, Georgina Carrillo-Ruiz, Gergana Koleva, Randy Lewis, PRD80(2009)
T. Appelquist, G.T. Fleming, M.F. Lin, E.T. Neil, D.A. Schaich, PRD84(2011)
Yasumichi Aoki, Tatsumi Aoyama, Masafumi Kurachi, Toshihide Maskawa, Kei-ichi Nagai, Hiroshi Ohki, Akihiro Shibata, Koichi Yamawaki, Takeshi Yamazaki, PoS(Lat2011)
M. Hayakawa, K.-I. Ishikawa, Y. Osaki, S. Takeda, S. Uno, N. Yamada, PRD83(2011)
Yasumichi Aoki, Tatsumi Aoyama, Masafumi Kurachi, Toshihide Maskawa, Kei-ichi Nagai, Hiroshi Ohki, Akihiro Shibata, Koichi Yamawaki, Takeshi Yamazaki, PRD86(2012)
Etsuko Itou, PTEP2013(2013)8.
M. Hayakawa, K.-I. Ishikawa, S. Takeda, N. Yamada, PRD88(2013)
M. Hayakawa, K.-I. Ishikawa, S. Takeda, M. Tomii, N. Yamada, PRD88(2013)
.....引用しきれません。

多フレーバーSU(3)ゲージ理論の共形場理論探索

- 基本的に格子QCDのプログラムを使う。
- 物質に対応するフェルミオンの数（フレーバー数）を大きくする。
- 有効結合定数や相関関数の、短距離、長距離での振る舞いを調べる。
- 理論のパラメータは
 - フレーバーの数 (N_f)
 - 結合定数の大きさ ($\beta = 6/g^2$)
 - フェルミオンの質量 (m_q)
 - 4次元の体積の大きさ ($L^3 \times T$)
 - スケール不変性をあらわに破るパラメータ
- スケール不変性の痕跡が見えるパラメータ空間（相構造）はあるか？ => Conformal region の提案と確認
- HA-PACS を用いた計算 (&SRI6000 @ KEK)

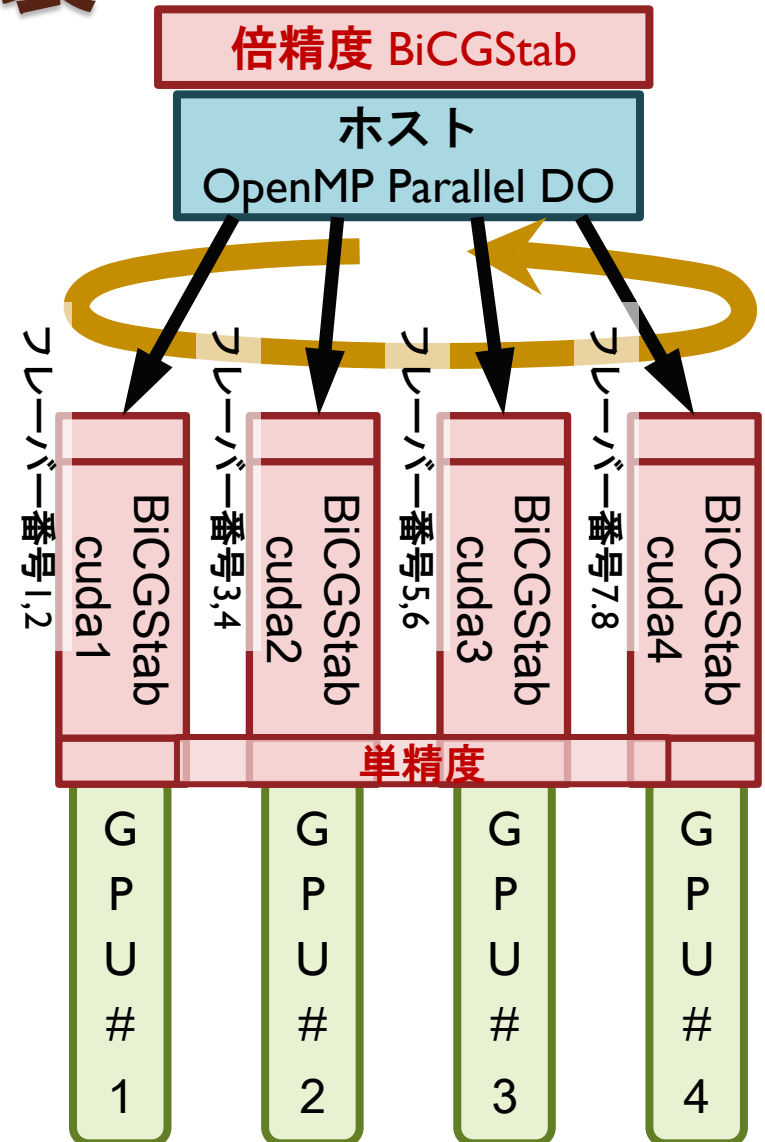
HA-PACS での実装

- 基本的に格子QCDのプログラムを使う。
- 計算の困難さはフレーバー数に大体比例
- QCD では $N_f=2$ や $N_f=3$
- ここでは $N_f=7,8,12,16$ の広い範囲を探索
- 格子点数は $16^3 \times 64$
- HA-PACS の特徴：**1 ノードに4つのGPU**
 - 各フレーバーは2個ずつ独立に扱える
 - 計算コードではフェルミオンを**4つのGPUに分散させて独立に計算**（フェルミオンソルバーのGPUへの分散）
 - ゲージ場の計算は各フェルミオンからの寄与を集約してホスト上で計算

HA-PACS での実装

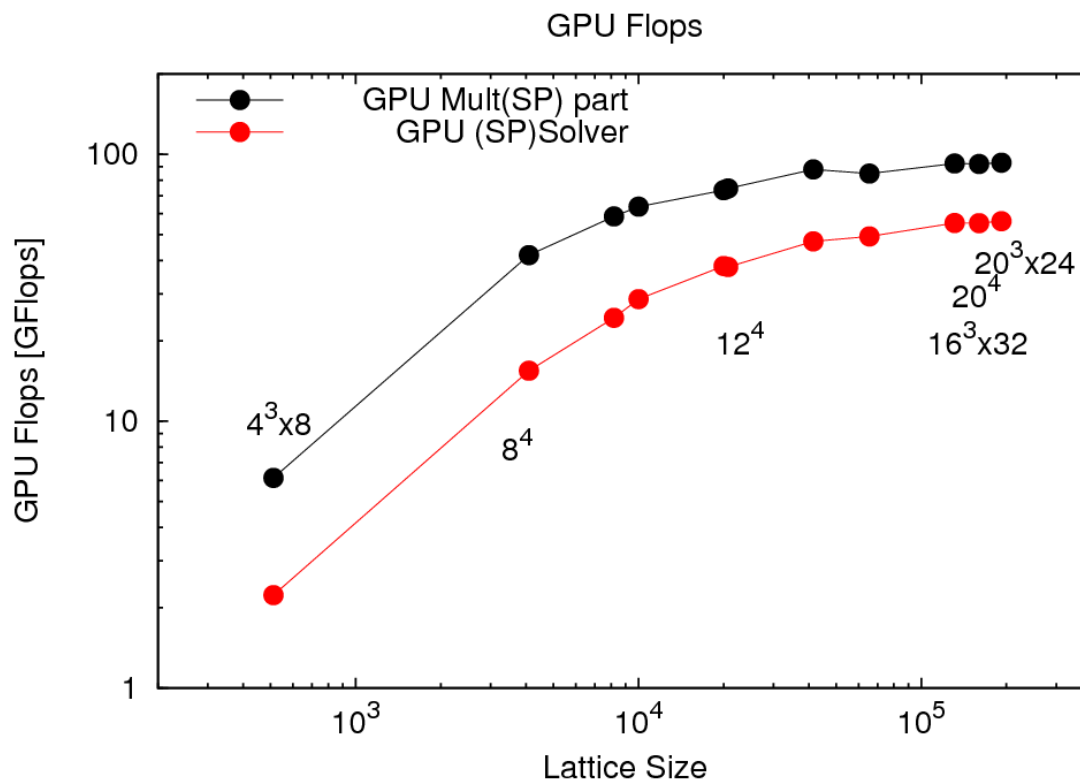
GPUソルバー

- 2008年CUDA2.Xにて開発
- 2010年マルチフレーバー対応
- 現在、CUDA4.2の機能を少し利用
- 単精度加速
- ベクトル化（コアレスアクセス）
データレイアウトの工夫。
- （1スレッド=1格子点）
- Texture fetchingにより読み出し専用
キャッシュ利用
- name space で GPU カード毎に割り当
てるソルバーオブジェクト生成。
- ホスト側で OpenMP で各GPUを並列
呼び出し。サイクリックに2フレー
バーずつ仕事を割り当て。
- ほぼ理想的なスケーリング。ただし
フレーバー数が8の倍数の時。



単体GPU ソルバー性能

- GTX280一枚 (2008年～2009年の開発中に測定)
- 単精度 行列ベクトル積部は100GF
- 単精度BiCGTab 全体は 60GF



一枚での性能を評価

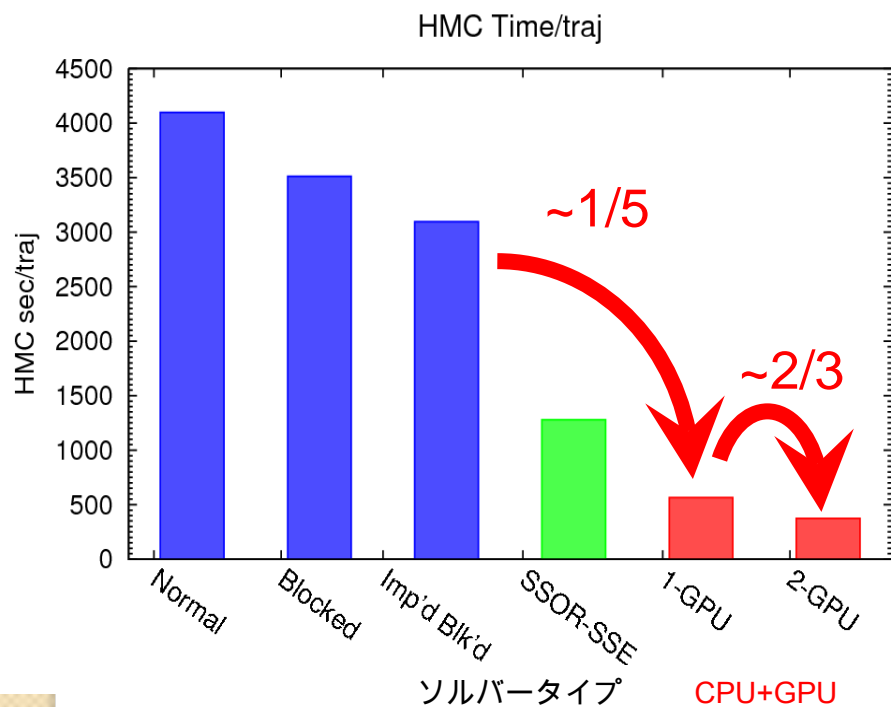
1 格子点に1スレッドを
割り当てる実装

高性能を出すには、ス
レッド数を埋めるために
十分な格子点が必要。

16⁴格子点以上でほぼ一定

マルチGPU

- プログラム全体の実行時間で評価
- GTX280が2枚
- マルチGPU化開発の際の性能測定（2010年）



CPU Fortran DP
Corei7920@2.67GHz,
4core OpenMP

CPU Fortran+C
DP+SP(SSE)
Corei7920@2.67GHz,
4core OpenMP

CPU+GPU
Fortran+CUDA

M. Hayakawa, K.-I.I., Y.Osaki, S.Takeda,
S. Uno, N.Yamada, PoS(Lattice2010)325

ソルバー部分をCPU倍精度
コードからチューンしたGPU
単精度コードにすることで
5倍速くなる

さらにGPUを2枚使うと2/3
に短縮される。

HMC法の中のソルバー部の占
める部分のみ倍速になるので、
全体が倍速になるわけではな
い。

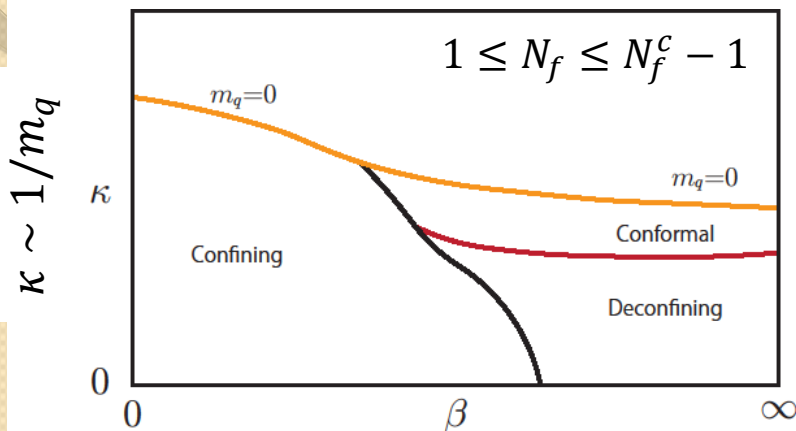
第6回「学際計算科学による新たな知の
発見・統合・創出」シンポジウム

物理の結果

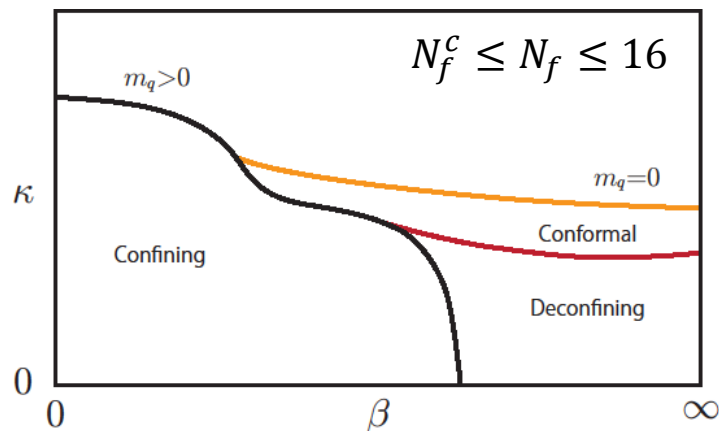
H25 CCS 学際共同利用, KEK大型シミュレーション研究
 K.-I.I., Y.Iwasaki, Yu Nakayama, T.Yoshie, Phys.Rev.D89(2014)114503, 87(2013)071503

- Wilson型フェルミオンの格子SU(3)ゲージ理論の予想される相図(格子点数一定(物理体積有限))

共形場理論にならない場合の予想



共形場理論になる場合の予想



$\beta = 6/g^2, \beta \rightarrow \infty \leftrightarrow a \rightarrow 0$

$$\langle O(t)O(0) \rangle = G(t) \sim \frac{1}{t^{\alpha_H}} \sim \frac{e^{-\tilde{m}_H t}}{t^{\alpha_H}} \sim e^{-m_H t}$$

共形場理論

大きな有限体積、小さな格子間隔、
 軽い質量での共形場理論 (Conformal
 region) 湯川型の振舞

有限体積、格子間隔、質量
 での理論 (Confining region)
 指数型の振舞

- 有限体積のため真の共形場理論はないが、その痕跡のあり領域を conformal region, それ以外では閉じ込め相(confining) と非閉じ込め相(deconfining)があると予想。
- 十分大きい有限体積&軽い質量にある共形場理論の時間2点相関関数は無限体積の2点関数と閉じ込め相の2点関数の中間的振る舞いを予想。

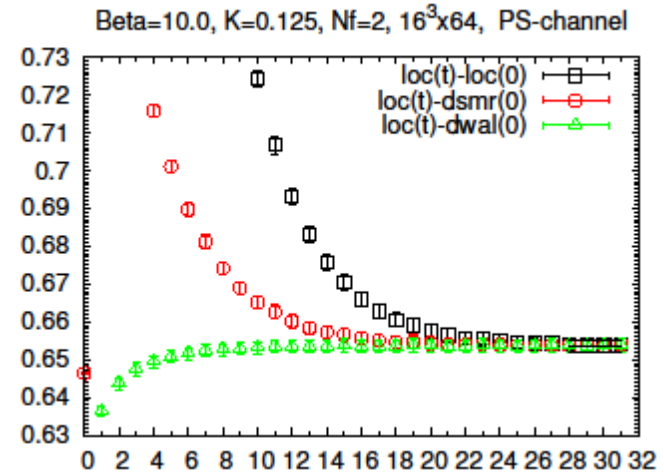
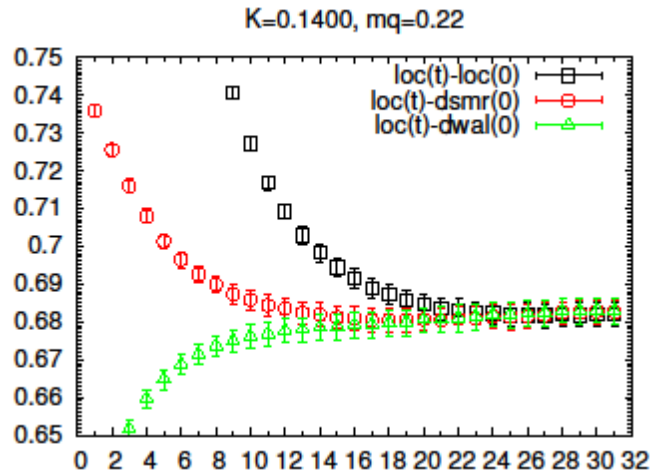
物理の結果

- $N_f=2,7,8,12,16$ で偽スカラー2点関数を計算し、その振る舞いを予想と比較
- β を固定してフェルミオン質量を軽くしていく
- Confining region, Deconfining region, Conformal region を走査

$N_f = 7, \beta = 6.0$, 重い質量

$N_f = 2, \beta = 10.0$, 重い質量

$\text{Log}(G(t)/G(t+1))$



(Confining region)

(Deconfining region)

指数型の振る舞い (長距離で一定)

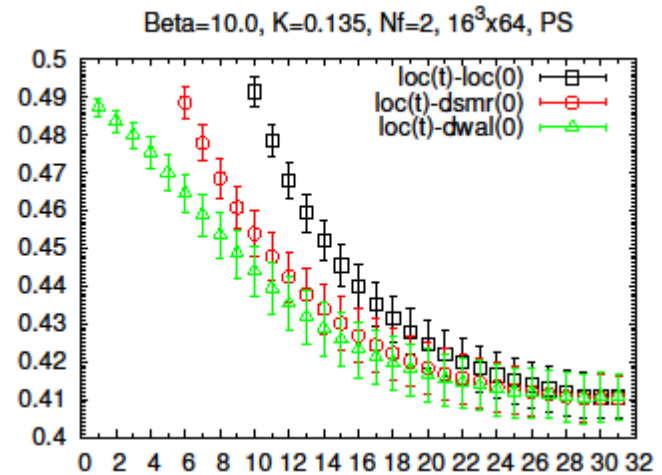
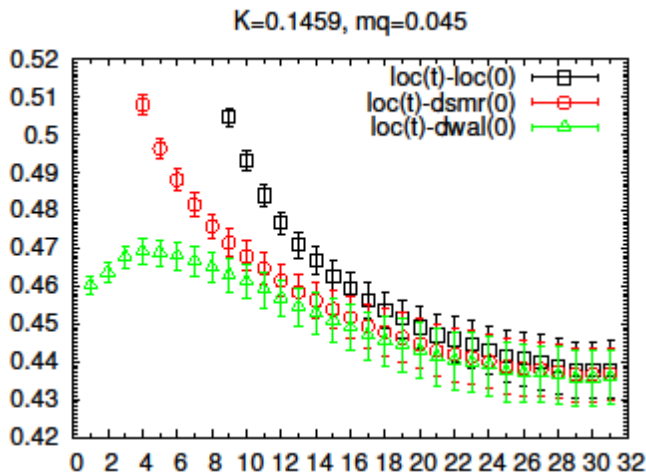
物理の結果

- $N_f=2,7,8,12,16$ で偽スカラー2点関数を計算し、その振る舞いを予想と比較
- β を固定してフェルミオン質量を軽くしていく
- Confining region, Deconfining region, Conformal region を走査

$N_f = 7, \beta = 6.0$, 軽い質量

$N_f = 2, \beta = 10.0$, 軽い質量

Log(G(t)/G(t+1))

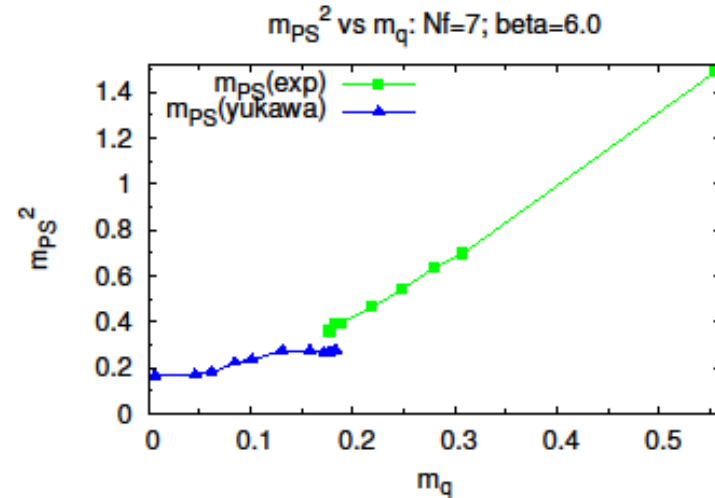
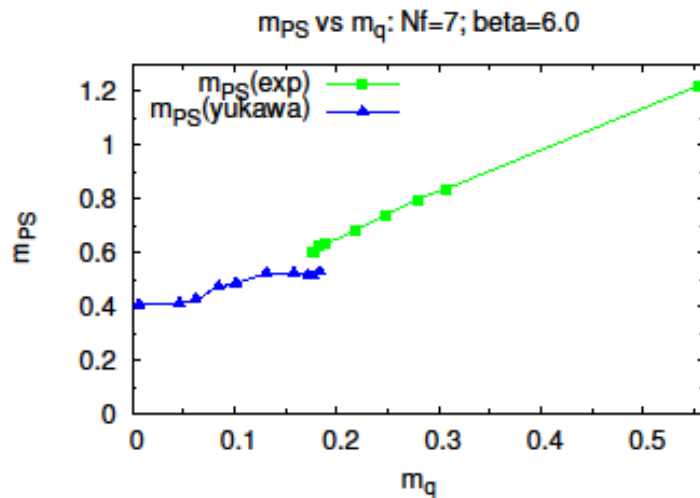


湯川型の振る舞い（長距離で一定にならない）（Conformal region）

物理の結果

- $N_f=2,7,8,12,16$ で偽スカラー2点関数を計算し、その振る舞いを予想と比較
- β を固定してフェルミオン質量を軽くしていく
- Confining region, Deconfining region, Conformal region を走査

$N_f = 7, \beta = 6.0$, 中間子質量フェルミオン質量依存性

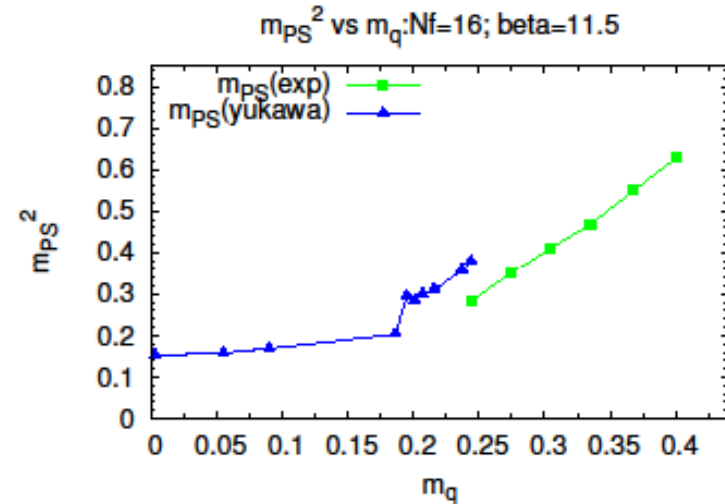
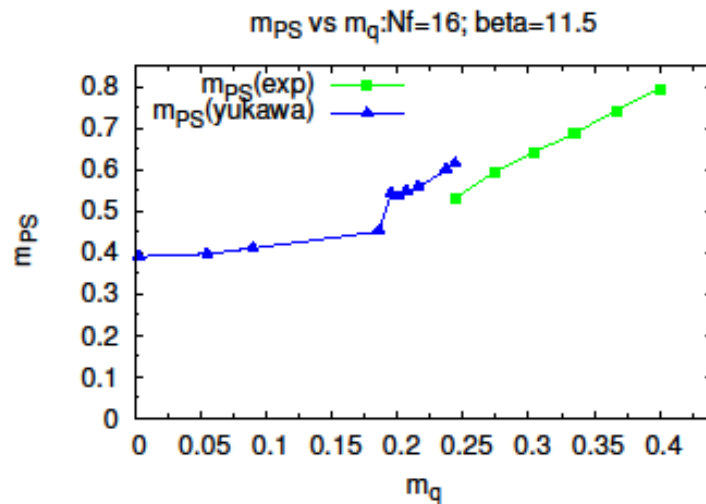


重い質量側（**緑**）は $m_{PS}^2 \sim m_q$ なのでカイラル対称性の破れる閉じ込め型（Confining region）
軽い質量側（**青**）は湯川型（Conformal region）
境界で一次相転移

物理の結果

- $N_f=2,7,8,12,16$ で偽スカラー2点関数を計算し、その振る舞いを予想と比較
- β を固定してフェルミオン質量を軽くしていく
- Confining region, Deconfining region, Conformal region を走査

$N_f = 16, \beta = 11.5$, 中間子質量フェルミオン質量依存性

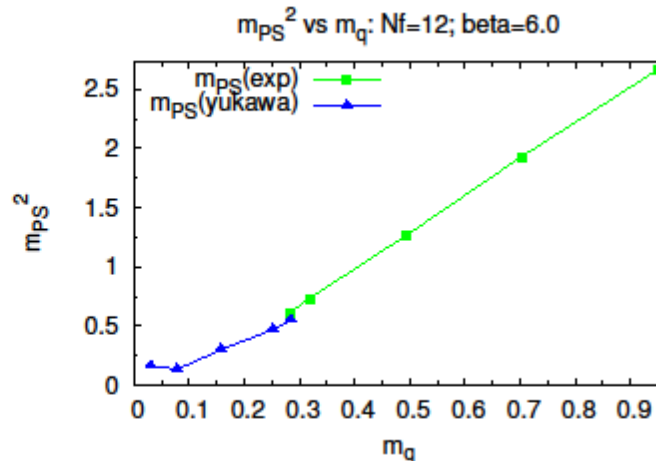
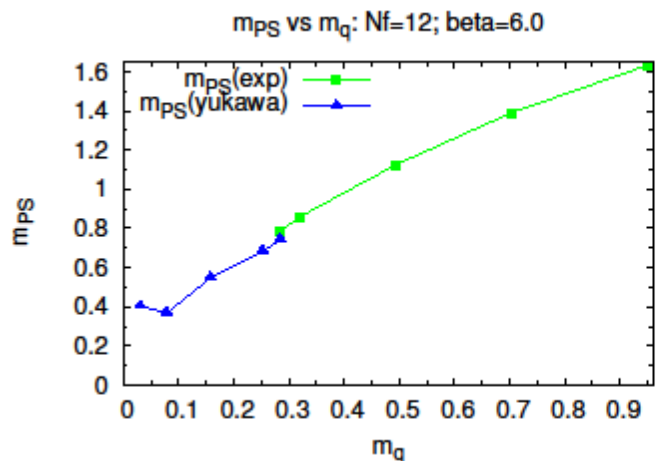


重い質量側（**緑**）は $m_{PS} \sim m_q$ なのでカイラル対称性の破れていない非閉じ込め型（Deconfining region）
軽い質量側（**青**）は湯川型（Conformal region）
境界で一次相転移

物理の結果

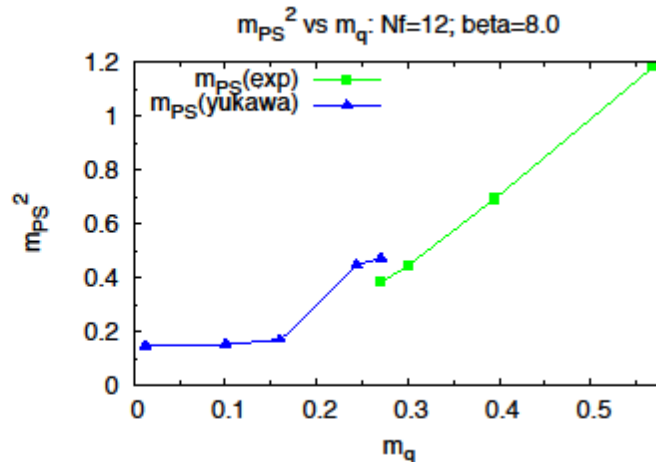
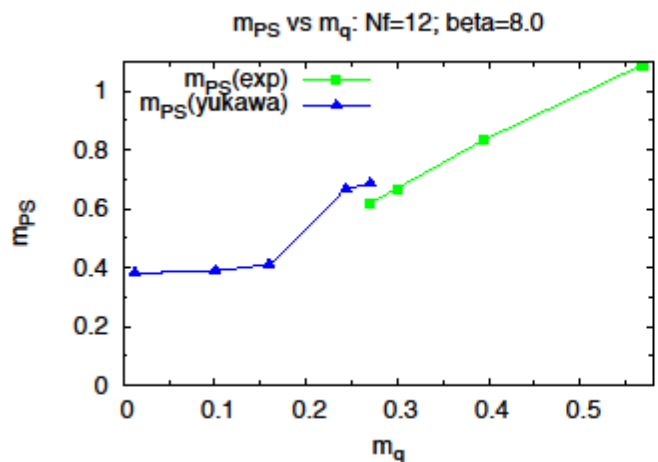
$N_f = 12, \beta = 6.0$, 中間子質量フェルミオン質量依存性

重い質量側 (緑) (Confining region)
 軽い質量側 (青) (Conformal region)



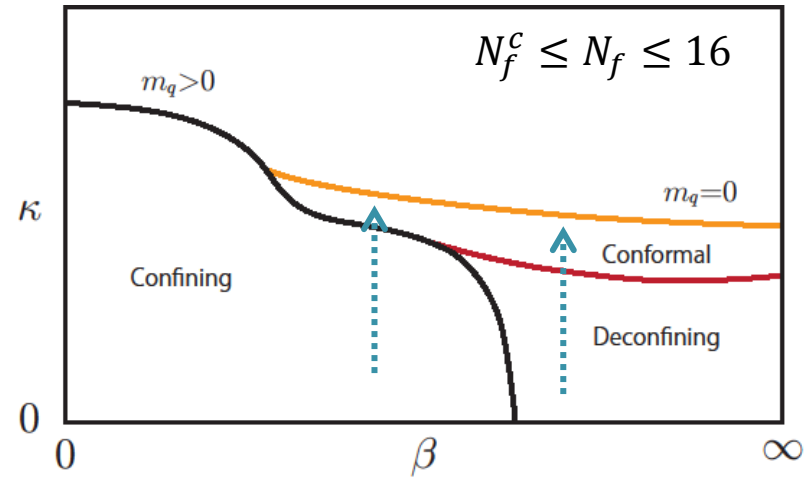
$N_f = 12, \beta = 8.0$, 中間子質量フェルミオン質量依存性

重い質量側 (緑) (Deconfining region)
 軽い質量側 (青) (Conformal region)



まとめ

- 多フレーバーのゲージ理論の共形場理論になるパラメータの探索
- 格子SU(3)ゲージ理論、Wilson 作用での探索
- 2点相関関数が湯川型の振る舞いを示す Conformal region の提唱
- 相図の提案と数値計算による確認を行った。
- Conformal region は一次相転移によりほかの相と分離している。ただししっかり確定するには連続極限をとる必要がある。
- 多フレーバーシミュレーションにマルチGPUを利用することで多くのパラメータ範囲を探索することができた。
- 有限体積、有限質量、有限格子間隔でしか数値計算できないため、Conformal region があるからと言ってそれが共形場理論であるとは限らないため、注意深いパラメータ探索が必要である。



有難うございました。