



地球シミュレータによる 素粒子標準模型の研究

宇川 彰
筑波大学計算科学研究センター

- 研究目的
- 平成16年度当初計画と達成度
- 物理結果
- 今後の計画
- まとめと展望



研究メンバー

- | | | | |
|----------|--------|--|-------|
| ■ 青木 慎也 | 筑波大学 | saoki@het.ph.tsukuba.ac.jp | |
| ■ 石川 健一 | 広島大学 | kishika@het.ph.tsukuba.ac.jp | |
| ■ 石川 智巳 | 筑波大学 | tomomi@ccs.tsukuba.ac.jp | |
| ■ 石塚 成人 | 筑波大学 | ishizuka@ccs.tsukuba.ac.jp | |
| ■ 岩崎 洋一 | 筑波大学 | iwasaki@ccs.tsukuba.ac.jp | |
| ■ 宇川 彰 | 筑波大学 | ukawa@ccs.tsukuba.ac.jp | 申請代表者 |
| ■ 大川 正典 | 広島大学 | okawa@sci.hiroshima-u.ac.jp | |
| ■ 大野木 哲也 | 京都大学基研 | onogi@yukawa.kyoto-u.ac.jp | |
| ■ 金谷 和至 | 筑波大学 | kanaya@het.ph.tsukuba.ac.jp | |
| ■ 金児 隆志 | KEK | takashi.kaneko@kek.jp | |
| ■ 蔵増 嘉伸 | KEK | yoshinobu.kuramashi@kek.jp | |
| ■ 中島 日出雄 | 宇都宮大学 | nakajima@is.utsunomiya-u.ac.jp | |
| ■ 橋本 省二 | KEK | shoji.hashimoto@kek.jp | |
| ■ 古井 貞隆 | 帝京大学 | furui@umb.teikyo-u.ac.jp | |
| ■ 松木 孝幸 | 東京家政大学 | matsuki@tokyo-kasei.ac.jp | |
| ■ 吉江 友照 | 筑波大学 | yoshie@ccs.tsukuba.ac.jp | |

格子場理論フォーラム(全国44名 23組織)より参加



研究目的: 全体目標と本研究の特色

- 素粒子標準模型において、強い相互作用を記述する量子色力学(QCD)の大規模シミュレーションによる解明
 - ハドロン質量スペクトルの計算によるQCDの検証
 - クォーク質量及びQCD結合定数の決定(自然界の基本定数)
 - 高温・高密度下でのクォーク・グルオン・プラズマのシミュレーション
 - 物質・反物質の非対称性(CP非保存)等、素粒子標準模型の懸案の解決
- 本研究:
 - 軽いクォーク(up,down,strange)全てを近似無く扱ったQCDの完全なシミュレーション
 - PHMCアルゴリズムの開発
 - ESの計算パワー



当初計画と平成15年度の状況

当初計画

- 平成14年度(12月～3月)
 - コード移植及び最適化

- 平成15年度
 - **コード最適化**
 - **24x24x24x48サイズ
物理計算の実施**
 - **32x32x32x64サイズ
物理計算の開始**

- 平成16年度
 - 32x32x32x64サイズ
物理計算の完了

平成15年度実施事項

平成15年4月～5月実施・完了

- 20x20x20x40(10ノード), 24x24x24x48, 32x32x32x64(16ノード)
- 実効効率 25%～40%
- 課題:計算と通信のオーバーラップ

平成15年6月～12月実施・完了

- 20x20x20x40にサイズ変更
- 10のパラメータセットで計算実行
- 各セット7000トラジェクトリ(当初予定の倍の統計)
- 物理量:ハドロン質量・クォーク質量の解析first round終了

平成16年1月開始予定

- **28x28x28x56にサイズ変更**

最適化結果・計算時間・計算精度(統計)についての検討に基づきサイズを変更



平成16年度の状況

年度当初計画

□ 平成16年度

- 計算と通信のオーバーラップ・プログラム作成と実用化

- 20x20x20x40格子のハドロン質量・クォーク質量の最終解析

- 28x28x28x56計算の推進
平成16年度目標2500トラジェクトリ

最小サイズ16x16x16x32格子については、CP-PACS等の他の計算資源を活用(20x20x20x40の約1/4の計算量)

平成16年度実施事項

平成16年4月～5月実施・完了

- プログラム作成・テスト
- 28x28x28x56格子において、実効効率40%→46%へと向上

平成16年4月～6月実施・完了

- 平成15年度の予備的解析結果を確認
- 平成16年度格子場理論国際会議等で発表

平成16年4月～進行中

- 10パラメータ実行中
- 1500-2000トラジェクトリ生成済み
- 1000トラジェクトリ分予備解析終了
- 年度末までに2500トラジェクトリ生成と解析を目標

当初目標を十分に達成の見込み

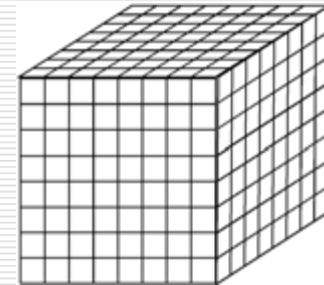


格子QCD計算

- 4次元単純立方格子上的クォーク場、グルオン場についての
超多重積分

$$S_{QCD} = \frac{1}{\alpha_s} \sum_P \text{tr}(UUUU) + \sum_f \bar{\psi}_f (\gamma \cdot U + m_f) \psi_f$$

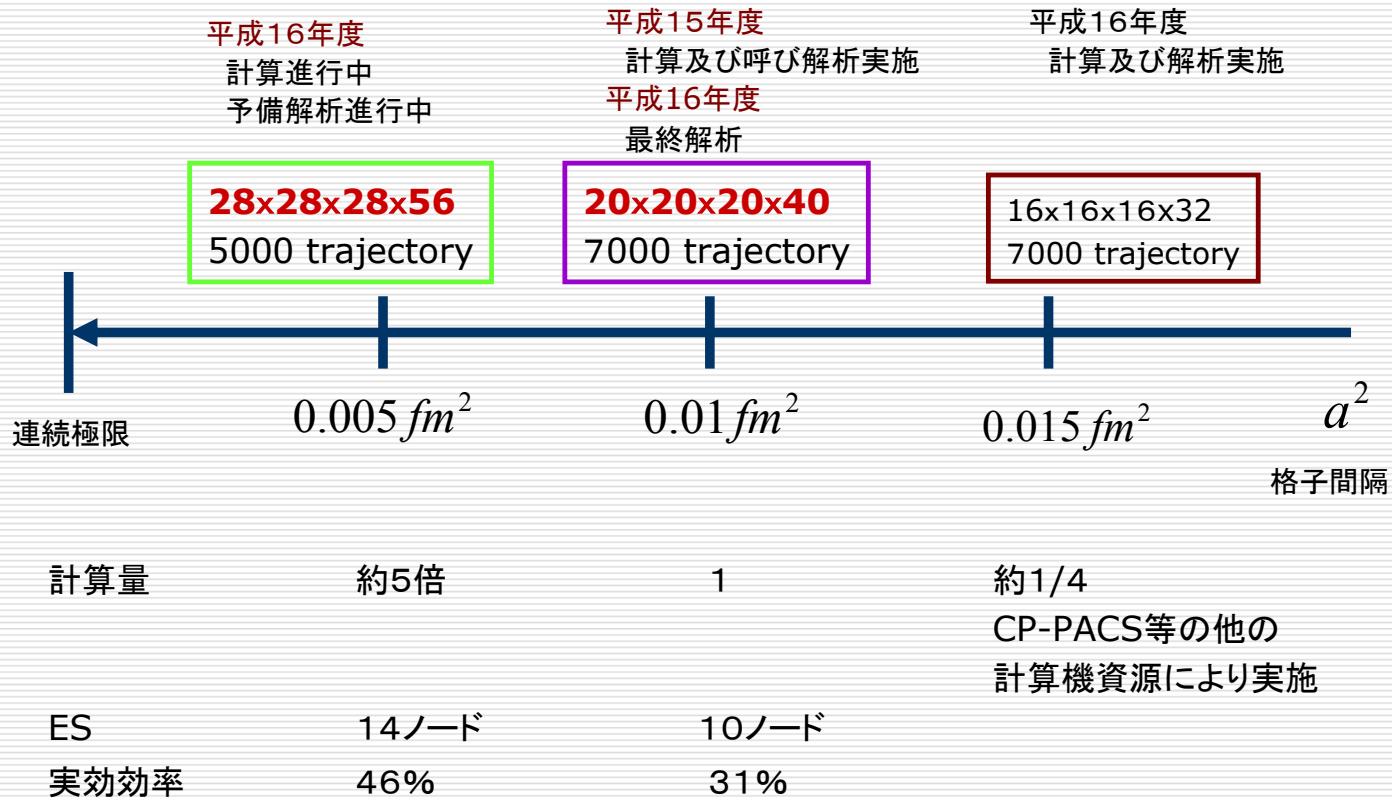
$$\langle O(U, \bar{\psi}, \psi) \rangle = \frac{1}{Z} \int \prod_{\ell} dU_{\ell} \prod_n d\bar{\psi}_n d\psi_n O(U, \bar{\psi}, \psi) e^{-S_{QCD}}$$



- Polynomial hybrid Monte Carlo (PHMC) 法:
分子動力学法 + メトロポリス棄却
- 格子間隔 $a \rightarrow 0$ の連続極限が必要



計算パラメータの概要





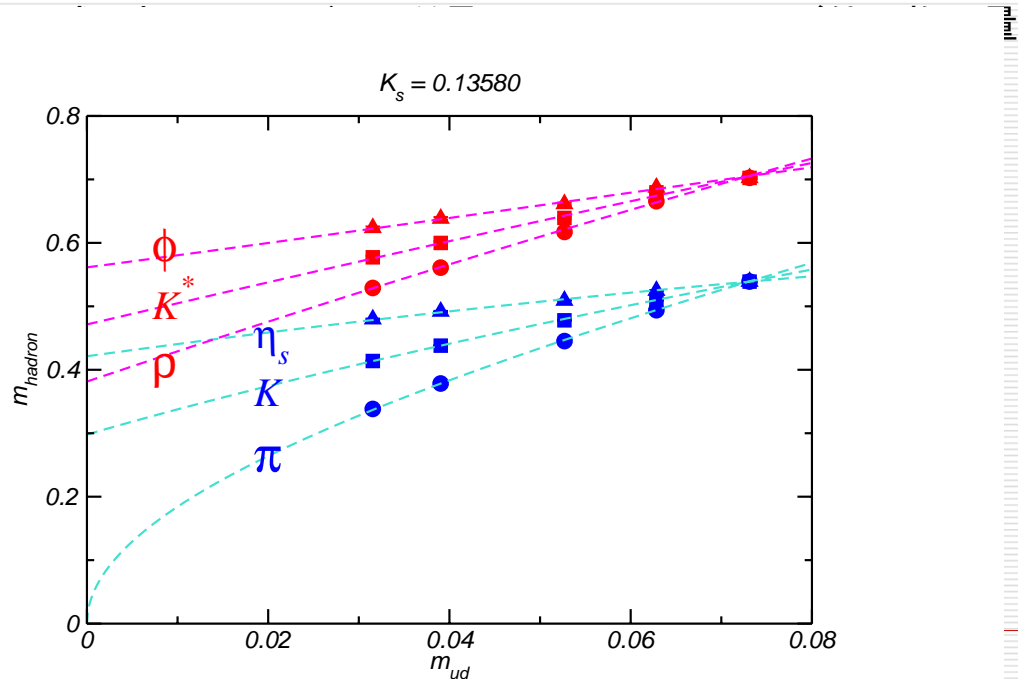
物理結果: ハドロン質量のクォーク質量依存性

□ hadron = $\pi, \rho, K, K^*, \eta, \phi$ etc (基底状態中間子)

□ Input: π, ρ, K (又は ϕ) の質量の実験値 $m_{hadron} = f(m_{ud}, m_s, a)$

→ クォーク質量と格子間隔が決まる

□ Out





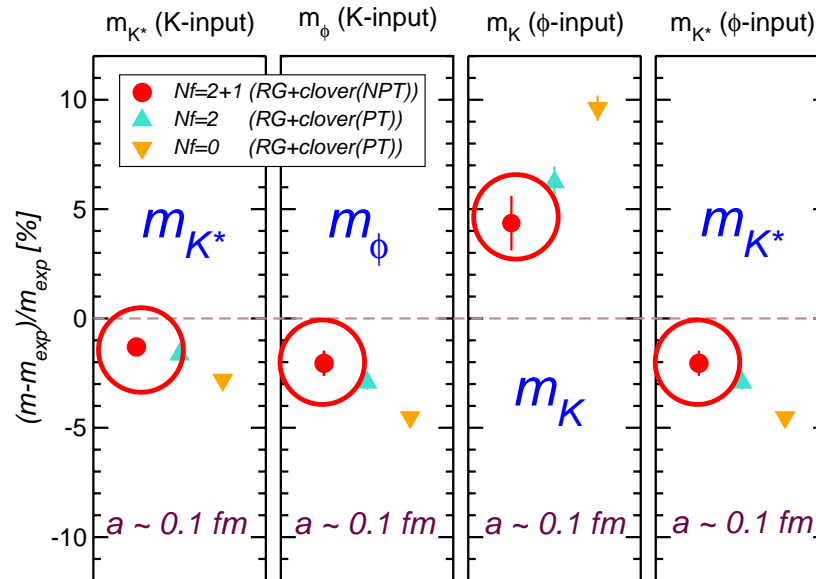
中間子に対する質量予言値とクォークの動的効果

平成15年度生成20x20x20x40格子(a~0.1fm)最終解析結果

- 動的に扱う軽いクォークの種類を自然界に近づける(Nf=0→Nf=2→Nf=2+1)ことにより、QCD計算値と実験値との一致の傾向を確認(格子間隔a~0.1fmでの計算)
- 残るところの差は、格子間隔 a をゼロとすることにより消失を検証

$$\frac{m - m_{\text{exp}}}{m_{\text{exp}}} [\%]$$

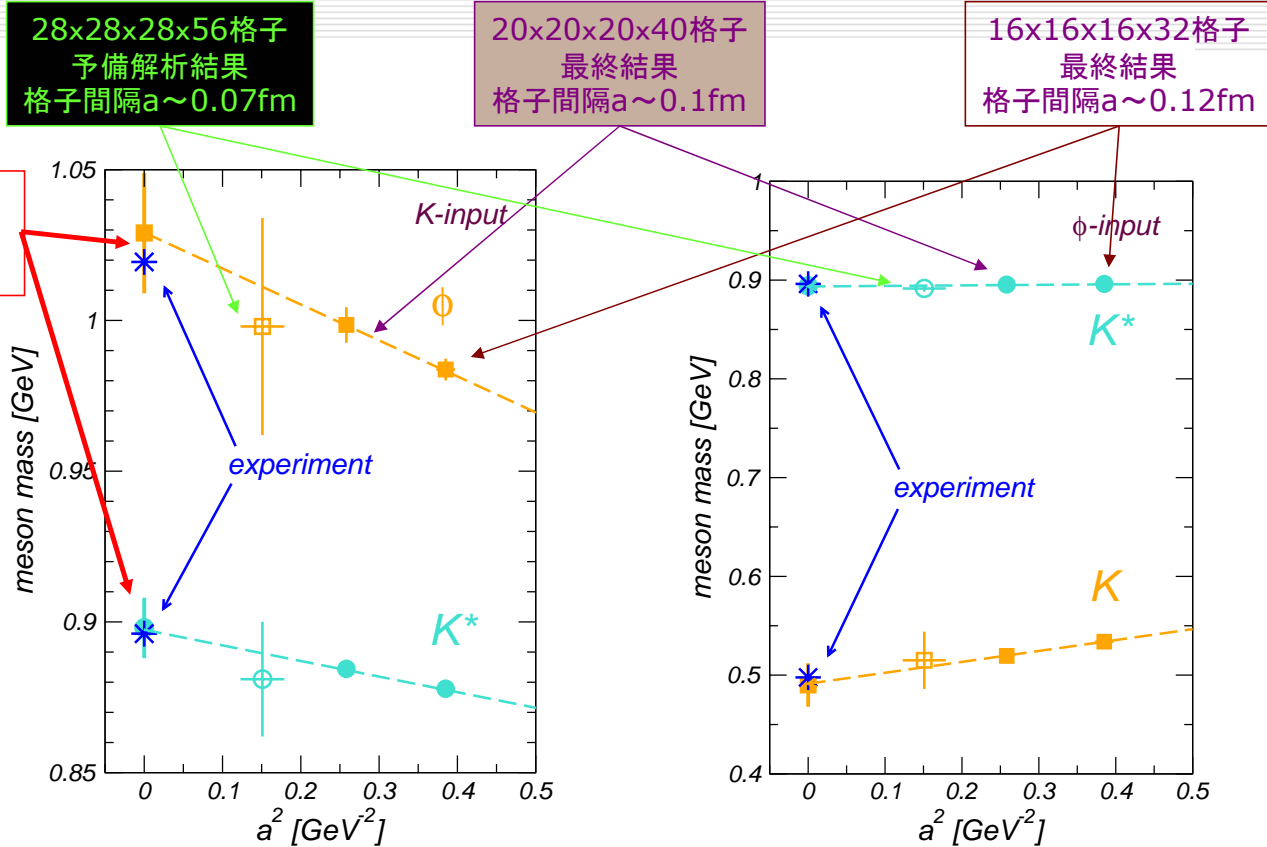
実験値との差(%)





中間子に対する質量予言値とクォークの動的効果

平成16年度進行中の格子間隔依存性と連続時空への外挿



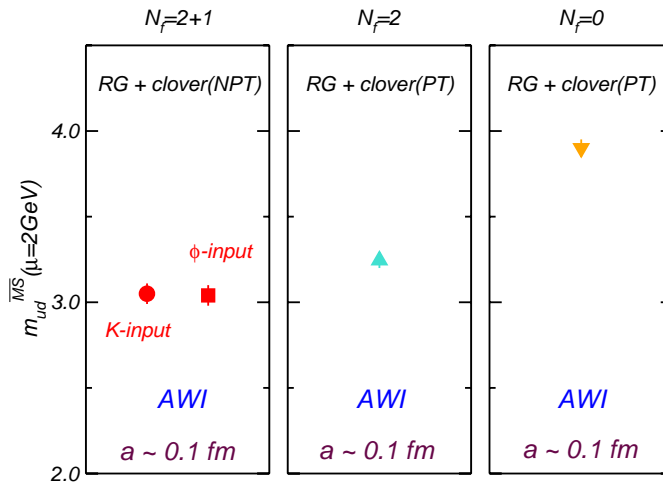


up,down, strangeクォーク質量の決定

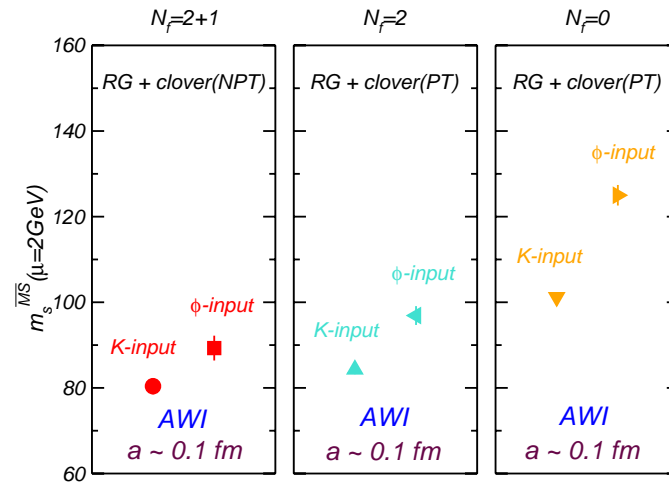
20x20x20x40格子 ($a \sim 0.1 \text{ fm}$) 最終結果

- 自然界の基本定数の一つ(Cf. 電子質量と同じ位置づけ)だが実験的に決定不可能
- 従来のモデルによる推測値より大幅に軽い値(2/3から1/2の値)
- 連続極限值: 解析中

up,downクォークの平均質量



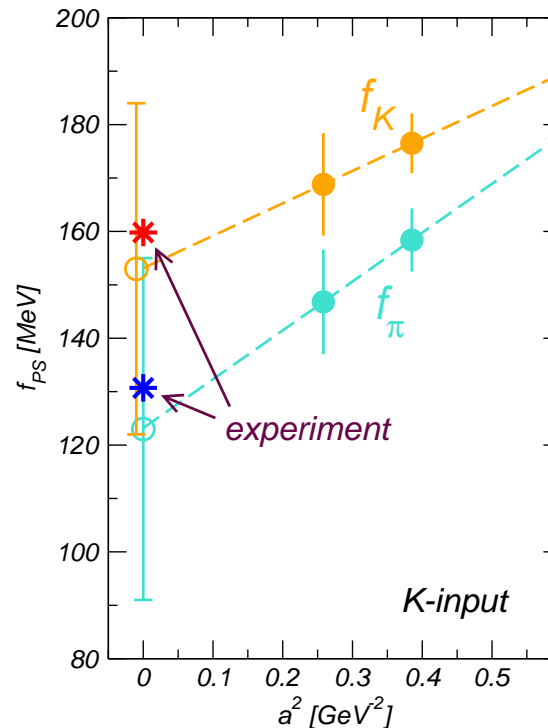
Strangeクォーク質量





新たな物理量の計算例：中間子の崩壊定数

- 質量に続く物理量の基本量
- クォークの動的効果の確認に重要
- 実験と一致、しかし統計誤差大
改善が必要





今後の計画

□ 平成16年度

- 28x28x28x56格子計算当初目標の達成
(10パラメータセット 2500トラジェクトリ)
- ハドロン質量・クォーク質量の数%精度での計算と解析
- 重いクォークの物理量の計算開始(準備完了)

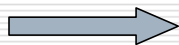
□ 平成17年度

- 28x28x28x56格子のトラジェクトリ数を5000に増加(統計精度上必要)
- 連続極限でのハドロン質量・クォーク質量の1%精度での検証・計算
- 重いクォークの物理量等、種々の物理量のオフライン解析
- 生成データの国際公開
 - International Lattice Data Grid上で公開予定
<http://www.lqcd.org/ildg/>
<http://www.lqa.ccs.tsukuba.ac.jp/>



まとめと展望

- 当初計画にほぼ沿ったスケジュールでQCD第一原理計算進行中
 - 20x20x20x40格子(平成15年度)、28x28x28x56格子(平成16年度)
 - 基底状態の中間子質量: QCDの正しさを1%精度で検証
 - up, down, strangeクォーク質量: 従来値より大幅に小さいことを発見
- 計画を17年度まで延長を希望
 - 28x28x28x56格子計算の精度を上げる
 - 種々の物理量をオフライン解析(CP-PACS等で実行予定)
- 欧米とのcompetition
 - 米国: SciDACプログラムにより10Tflopsの格子QCD専用システム(QCDOC)を整備、2005年より稼動
 - ヨーロッパ: 英国でQCDOCを導入、2005年稼動予定



できるだけ早期に計算を進行させたい
アルゴリズムの改善を検討中