



平成15年度  
地球シミュレータ利用報告会  
平成16年1月10日

# 地球シミュレータによる 素粒子標準模型の研究

---

宇川 彰  
筑波大学計算物理学研究センター

- 研究目的
- 平成15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



## 研究グループ

---

■ 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@rccp.tsukuba.ac.jp	
■ 石塚 成人	筑波大学	ishizuka@rccp.tsukuba.ac.jp	
■ 岩崎 洋一	筑波大学	iwasaki@rccp.tsukuba.ac.jp	
■ 宇川 彰	筑波大学	ukawa@rccp.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@rccp.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

---

- 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



湯川の中間子論(1935)以来の素粒子物理学の基本課題の解決



## 研究目的: 本研究の特色

- 従来の研究:  
軽いクォークの動的効果(対創成・対消滅)の取り扱いが不完全
- 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(完全な第一原理計算への初めての試み)
  - PHMCアルゴリズムの開発
  - ESの計算パワー

*up*    *down*    *strange*

*charm*    *bottom*    *top*

軽いクォーク

近似的取り扱い不可

重いクォーク

quenched approximationで十分



# 平成15年度当初計画と達成度

## 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

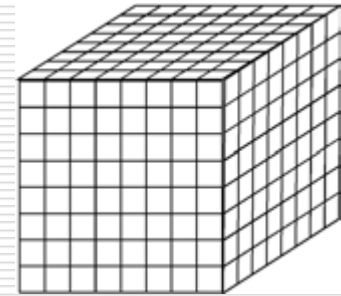
最適化結果・計算時間・計算精度(統計)についての検討に基づきサイズを変更

当初目標を十分に達成



# 格子QCD計算

- 4次元単純立方格子上のクォーク場、グルオン場についての超多重積分
- 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



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

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



# 物理結果: ハドロンの質量スペクトル解析

## □ 計算手続き

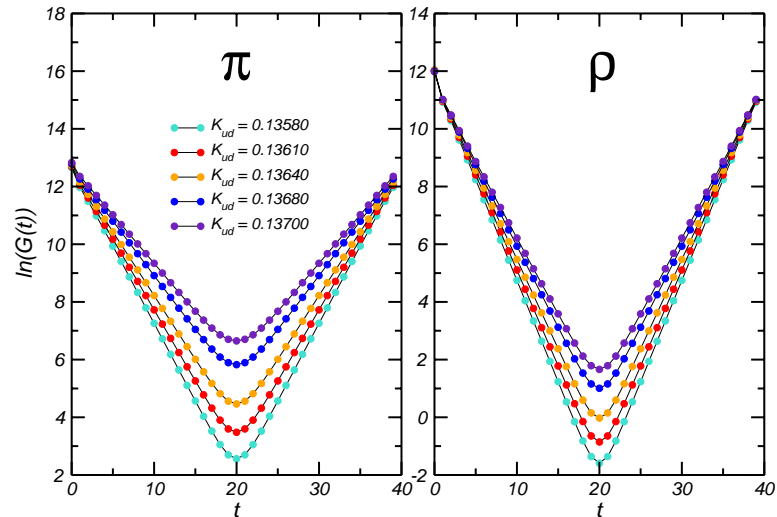
- 基本量: ハドロン伝播関数

- 抽出量: ハドロン質量

ハドロン:  $\pi, \rho, K, K^*, \eta, \phi \dots$

$$G(t) \propto \exp(-m_{hadron} \cdot t)$$

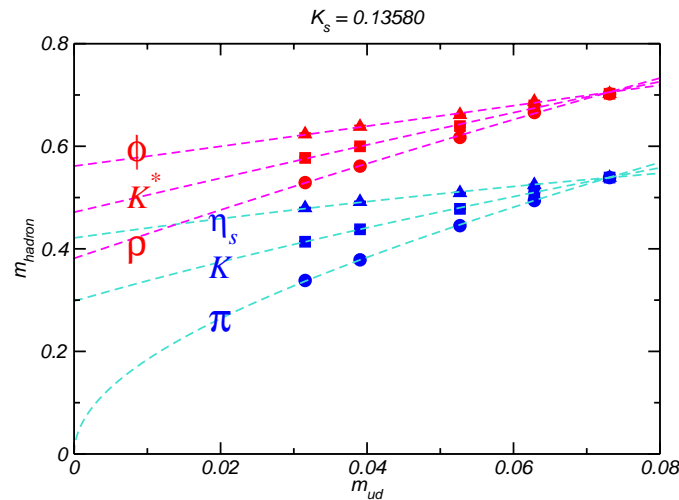
$m_{hadron}$  (クォーク質量の関数)





# 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:  $\pi$ ,  $\rho$ ,  $K$  (又は  $\phi$ ) 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
- Output: 残りすべてのハドロン質量  $K^*$ ,  $\eta$ ,  $\dots$ , 及び他の物理量



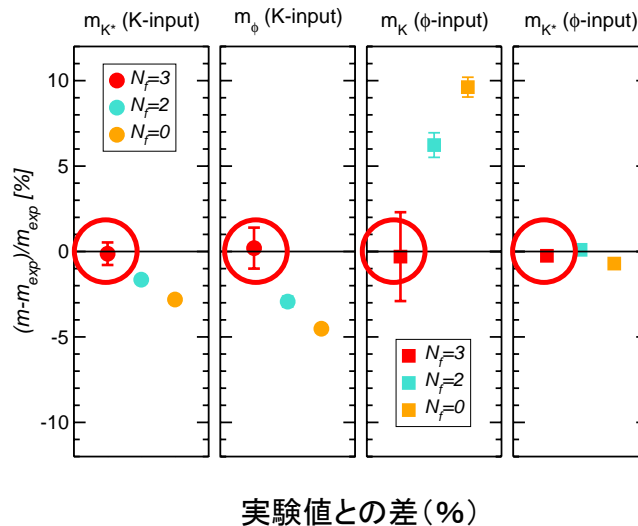
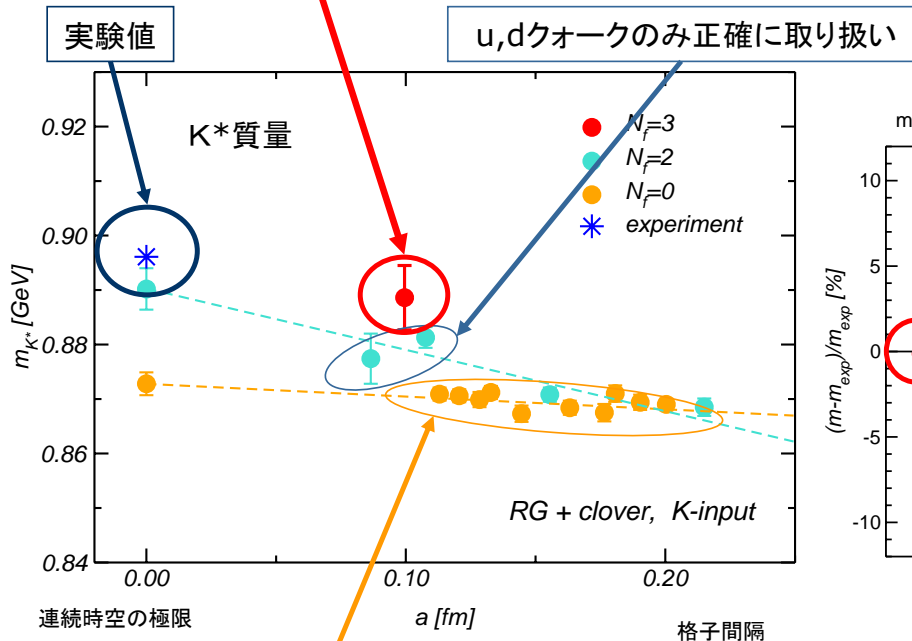


# K\*中間子の質量予言値とクォークの動的効果

- 軽いクォーク全てを近似無く取り扱うことにより、ハドロン質量を1%の精度で検証(クエンチ近似では5-10%の誤差)

近似無しESによる今回の計算結果

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



クォークの動的効果を無視



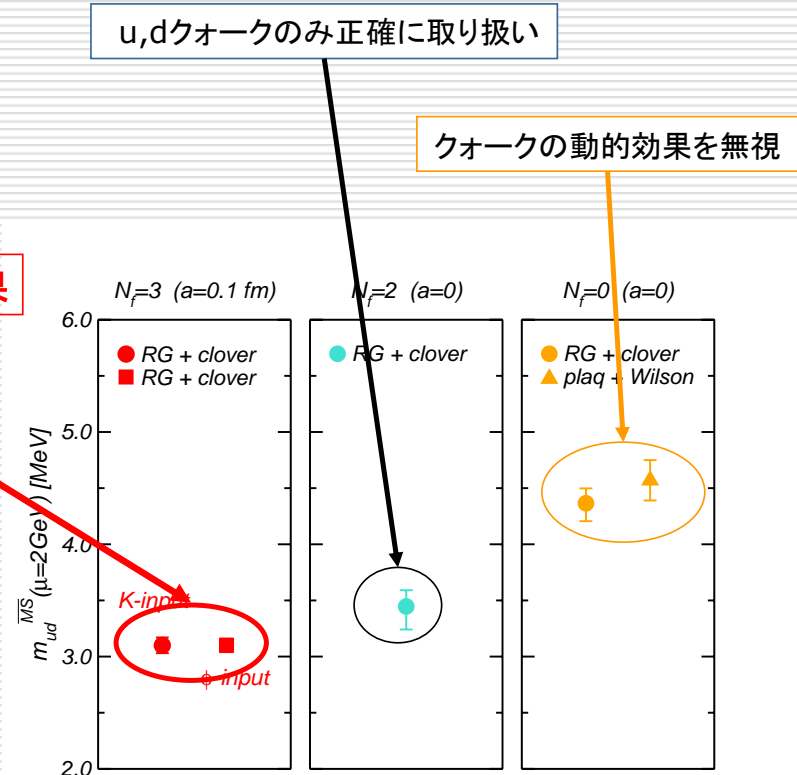
# クォーク質量の決定: up と down クォーク

- 自然界の基本定数の一つ  
Cf. 電子質量と同じ位置づけ
- 実験的に決定不可能(クォークの閉じ込め)

近似無しのESによる今回の計算結果

- 従来のモデルによる推測値  
(5-10MeV)より大幅に軽い値

$$(m_u + m_d) / 2 \approx 3.1 \text{ MeV} / c^2$$



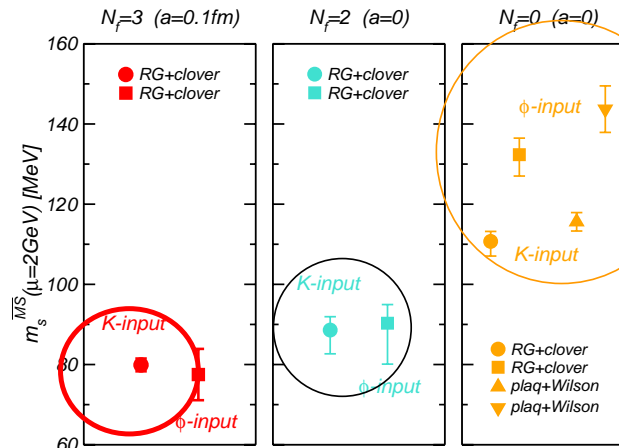


# クォーク質量の決定: strange クォーク

- 従来の近似計算ではインプットの選び方により大きく異なる結果  
(近似計算の不定性 10-20%)
- インputによらない、且つ予想外に小さい値(モデル予想の約半分)

$$m_{strange} \approx 80 \text{ MeV} / c^2$$

近似無しのES  
による今回の計  
算結果



クォークの動的  
効果を見

u,dクォークのみ  
正確に取り扱い



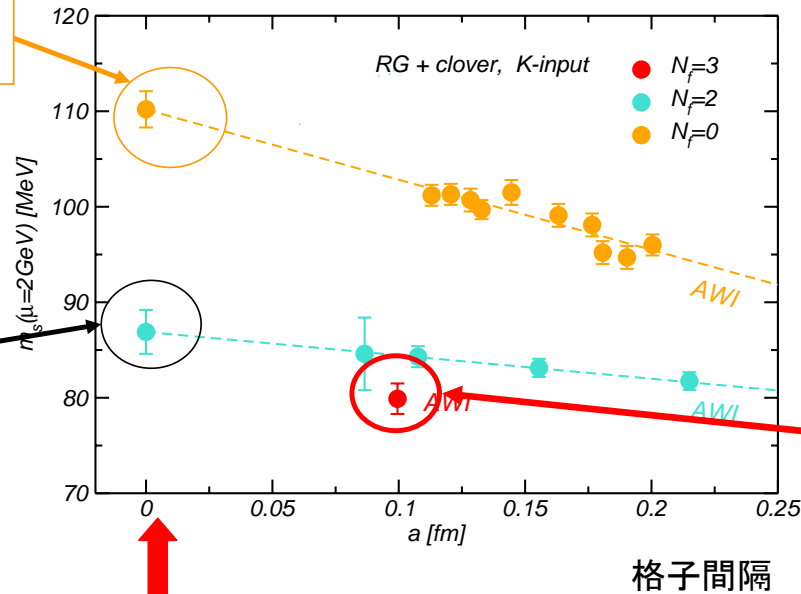
# クォーク質量：格子間隔依存性と連続極限

- 今年度計算の格子間隔  $a \approx 0.10 \text{ fm}$   $20 \times 20 \times 20 \times 40$
- より小さな格子間隔の計算を平成16年1月開始予定  $a \approx 0.07 \text{ fm}$   $28 \times 28 \times 28 \times 56$

$m_s$  strange quark 質量

クォークの動的効果を見視した場合の連続極限

u,dクォークのみ正確に取り扱った場合の連続極限



近似無しのESによる今回の計算結果

連続時空の極限




## 今後の計画

- 20x20x20x40格子上でのハドロン物理量の計算と解析
  - 生成したグルオン配位上では種々の物理量をオフライン解析可能
  - $\eta'$  中間子質量とU(1)問題 (格子QCDの位相構造)
  - exotic粒子の研究
    - グルーボール, ペンタクォーク・ハドロン(多数のクォークからなる粒子)等
  - 重いクォークの物理量(CP非保存)
  
- 28x28x28x56サイズでの計算を平成16年1月に開始
  - 格子間隔を小さくした初めての計算(連続極限)
  - 計算量 約5倍(10パラメータセット 2500トラジェクトリ)
  - 平成16年度に進歩を期待
  
- グルオン配位生成(計算主要部)
  - 地球シミュレータ(ESセンター)
  
- ハドロン物理量オフライン解析等
  - CP-PACS(筑波大学計算物理学研究センター)
  - VPP5000(筑波大学学術情報処理センター)
  - SR8000(高エネルギー加速器研究機構)



# まとめと展望

- QCDに基づく強い相互作用の第一原理計算を進めている
- 平成15年度当初目標の $20 \times 20 \times 20 \times 40$ 格子のグルオン配位生成と基底状態ハドロン質量計算を予定どおり終了
  - 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
- 今後、種々の物理量をオフライン解析すると同時に、 $28 \times 28 \times 28 \times 56$ サイズ計算を進める予定
- 欧米とのcompetition
  - 米国: SciDACプログラムにより10Tflopsクラスの格子QCD専用システムの整備を2004年を目標に推進中
  - ヨーロッパ: EU(イギリス・ドイツ・イタリア)で類似の計画進行中

 現在の優位を保ちできるだけ早期に計算を進行させたい