# PACS-CSにおける素粒子物理

筑波大学　数理物質科学研究科　物理学専攻
青木　慎也

# 素粒子物理の現状

## 素粒子物理の目標

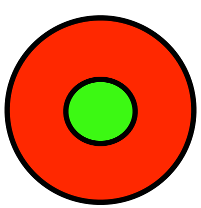
４つの力の統一的理解

重力
電磁気力
弱い力（$\beta$ 崩壊）
強い力（核力）

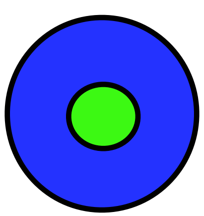
物質の存在形態の理解

クォーク (u, d, s, c, b, t)
レプトン（電子、$\nu$ など）

物質は力を媒介する粒子（ゲージ粒子）を交換して相互作用する



クォーク、レプトン



クォーク、レプトン

# 素粒子の標準模型

強い相互作用(QCD)

$$SU(3) \otimes \underbrace{SU(2) \otimes U(1)}$$ ゲージ理論

弱電磁相互作用(Weinberg-Salam Model)

| | |
|---|---|
| 物質　３世代 | １世代＝２つのクォークと２つのレプトン |
| ゲージ場 | グルーオン（強い力）<br>ウィークボソン（弱い力）<br>光子（電磁気力） |
| ヒッグス粒子 | 未発見<br>物質やゲージ場に質量を与える |
| 理論のパラメタ | ３つのゲージ結合定数<br>質量<br>湯川結合定数 |

# 素粒子論に残された課題

- 
- 標準理論の精密検証、パラメタの決定
- 標準理論を超えた現象の探求
- ３つの力の統一（大統一理論）
- 物質の存在形態の理解（世代とは？など）
- 重力の量子化
- すべての力、及び物質の統一（超弦理論？）

# 強い相互作用の重要性

標準模型の精密検証やそれを超えた現象の探究には
理論計算と実験結果の比較が必要

弱電時相互作用：結合定数に関する摂動展開が有効

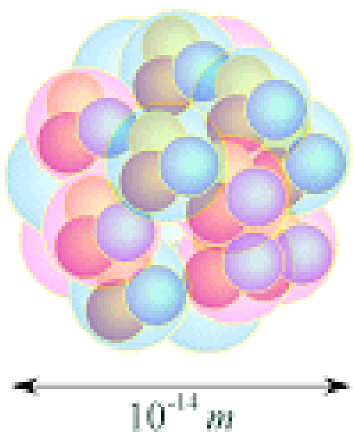
強い相互作用：低エネルギーでは結合定数が大きく
摂動論が使えない

クォークは観測できない（クォークの閉じ込め）
実験で観測できるのは陽子や中間子などのハドロン
＝クォークの束縛状態 ⇒ 摂動展開は破綻

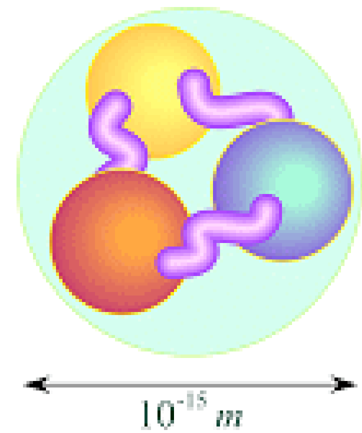
新しい計算方法が必要

# 量子色力学(Quantum ChromoDynamics)

QCD(強い相互作用の理論)＝SU(3)カラーゲージ理論




原子核




核子（陽子・中性子）

高エネルギーで結合定数が小（漸近的自由性）
低エネルギーで結合定数が大 ⇒ クォークの閉じ込め

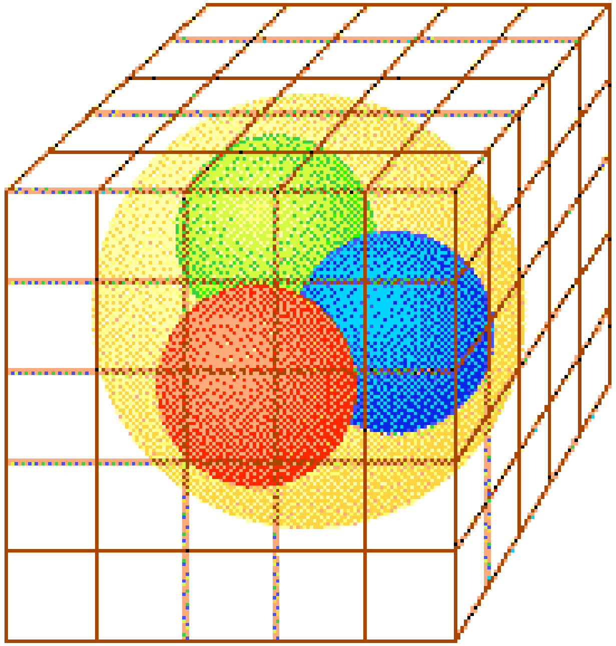
# 格子QCD

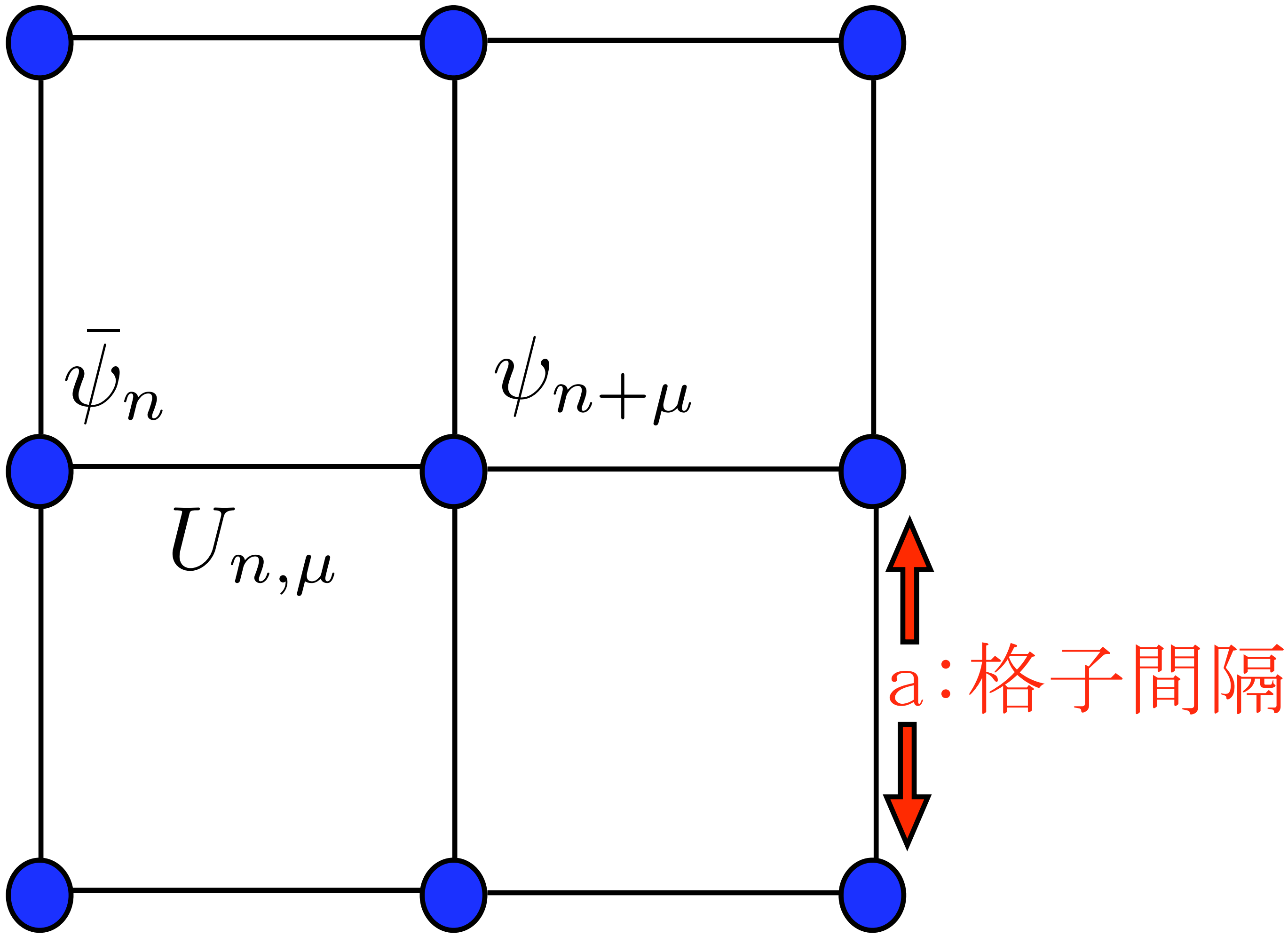
QCDを離散時空（格子）上に定義

摂動展開に依らない場の理論の定式化

強結合展開($\simeq$ 高温展開)が可能

モンテカルロ法を使った数値計算が可能






$\psi_n, \bar{\psi}_n$ クォーク場(グラスマン数)

$U_{n,\mu} \in \mathrm{SU}(3)$ ゲージ場

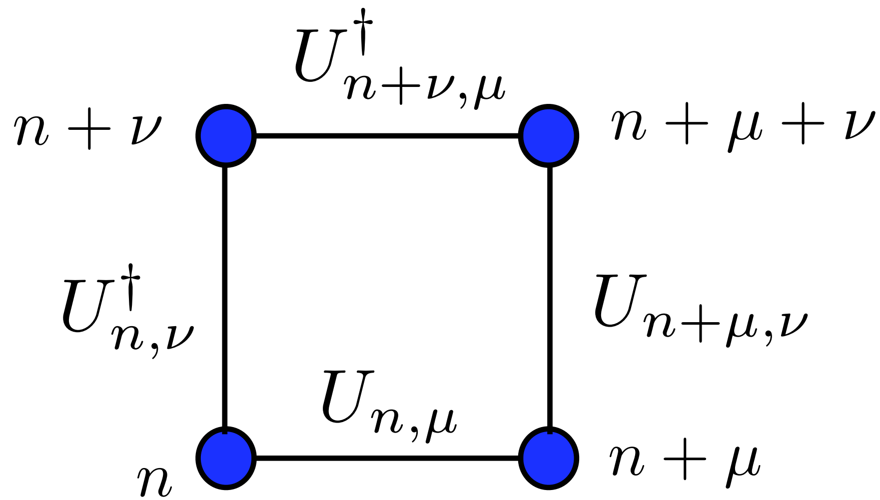
# 経路積分による格子QCDの分配関数

$$Z = \prod_n \int d\psi_n \, d\bar{\psi}_n \prod_\mu dU_{n,\mu} \exp[\bar{\psi} D(U)\psi + S_G(U)]$$

$$S_G(U) = \frac{1}{g^2} \sum_{n,\mu\neq\nu} \mathrm{tr}\, U_{n,\mu} U_{n+\mu,\nu} U^\dagger_{n+\nu,\mu} U^\dagger_{n,\nu}$$

ゲージ作用

$g^2$ 結合定数




$D(U)_{n a \alpha, m b \beta}$ クォークのディラック演算子

$(12V)\times(12V)$ 大規模疎行列

クォーク場（グラスマン数）の積分を実行

$$Z = \int \mathcal{D}U \det D(U) \exp[S_G(U)]$$

ここで

$$P(U) \equiv \det D(U) e^{S_G(U)} = e^{\mathrm{tr}\log D(U) + S_G(U)}$$

を $U$ に対する確率分布と考え、モンテカルロ法により $U$ を生成し、物理量を計算する

格子QCDのモンテカルロ・シミュレーション

ハドロン質量などの計算：QCDの検証

核力やフェイズシフトの計算：QCDの力学的性質

ハドロン行列要素の計算：標準模型のパラメタの決定、精密検証

有限密度、有限温度での計算：QCDの相構造：

エキゾチック粒子（ペンタクォークなど）の研究：新現象の予言

# 格子QCDのシミュレーションの特徴

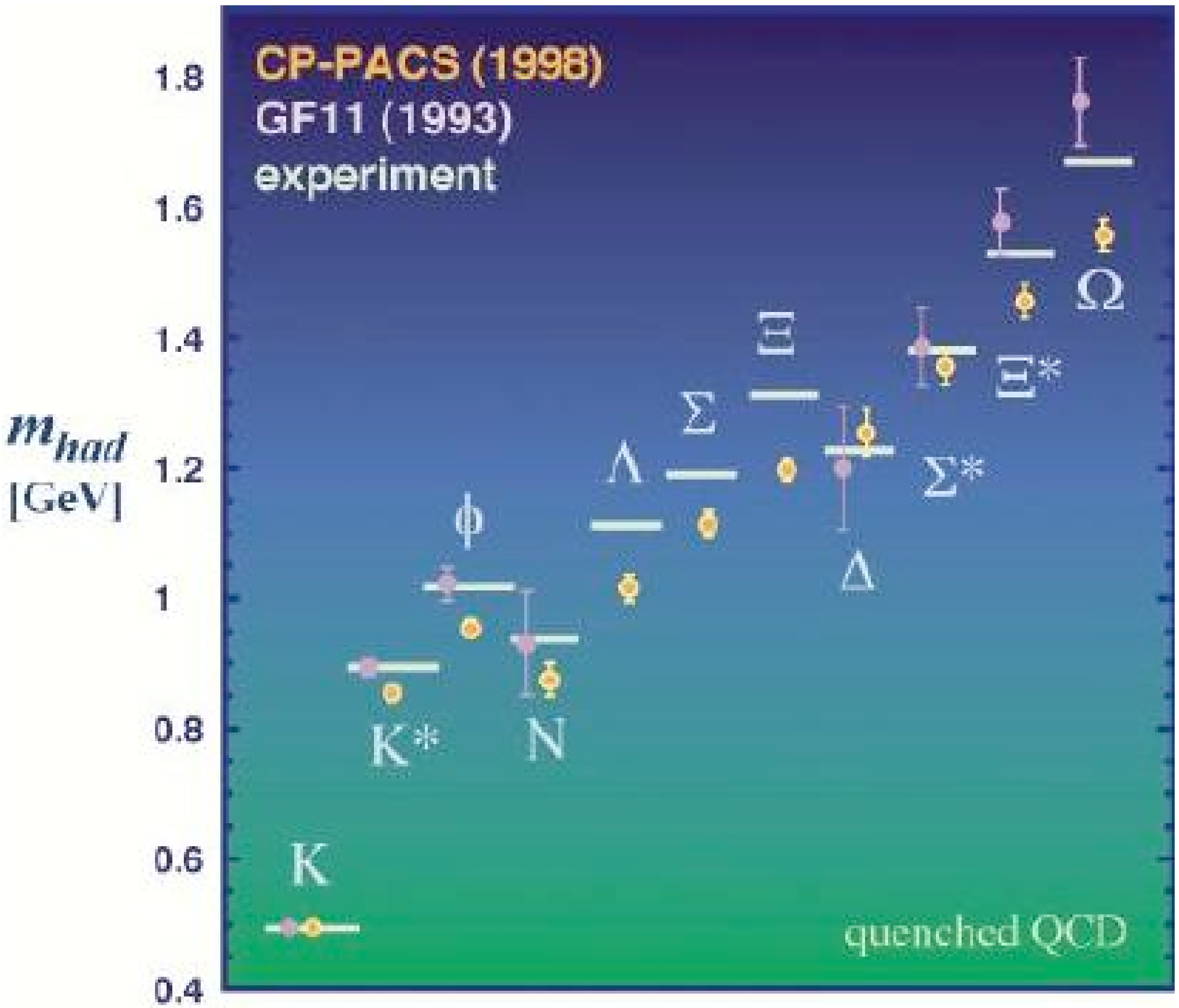
- 完璧な第一原理計算（理論は決まっている）
- 少ないパラメタ（結合定数、クォーク質量のみ）
- 膨大な計算時間(特に $\det D(U)$ )が必要
  - $\det D(U) = 1$ と置き簡単化（クエンチ近似）

    クォークの対生成を無視、（経験的に）10%程度の誤差？
- モンテカルロ法による統計誤差
- 種々の系統誤差
  - 格子体積、格子間隔
  - クォーク質量に対する外挿（軽いクォークは計算コスト大）

# CP-PACSによる研究成果

CP-PACS(ピーク性能 614GFlops,主記憶128Gbyte)
2048PU(300Mflops,64Mbyte,擬ベルトル機能)
３次元ハイパークロスバー・ネットワーク
1996年から稼働開始

# 成果I ハドロン質量の高精度計算 クエンチ近似




連続極限への外挿$(a \to 0)$済

フリーパラメタは３つのみ

$$g^2, m_u = m_d, m_s$$

質量のパターンをほぼ再現

詳細に見ると10%程度のずれ

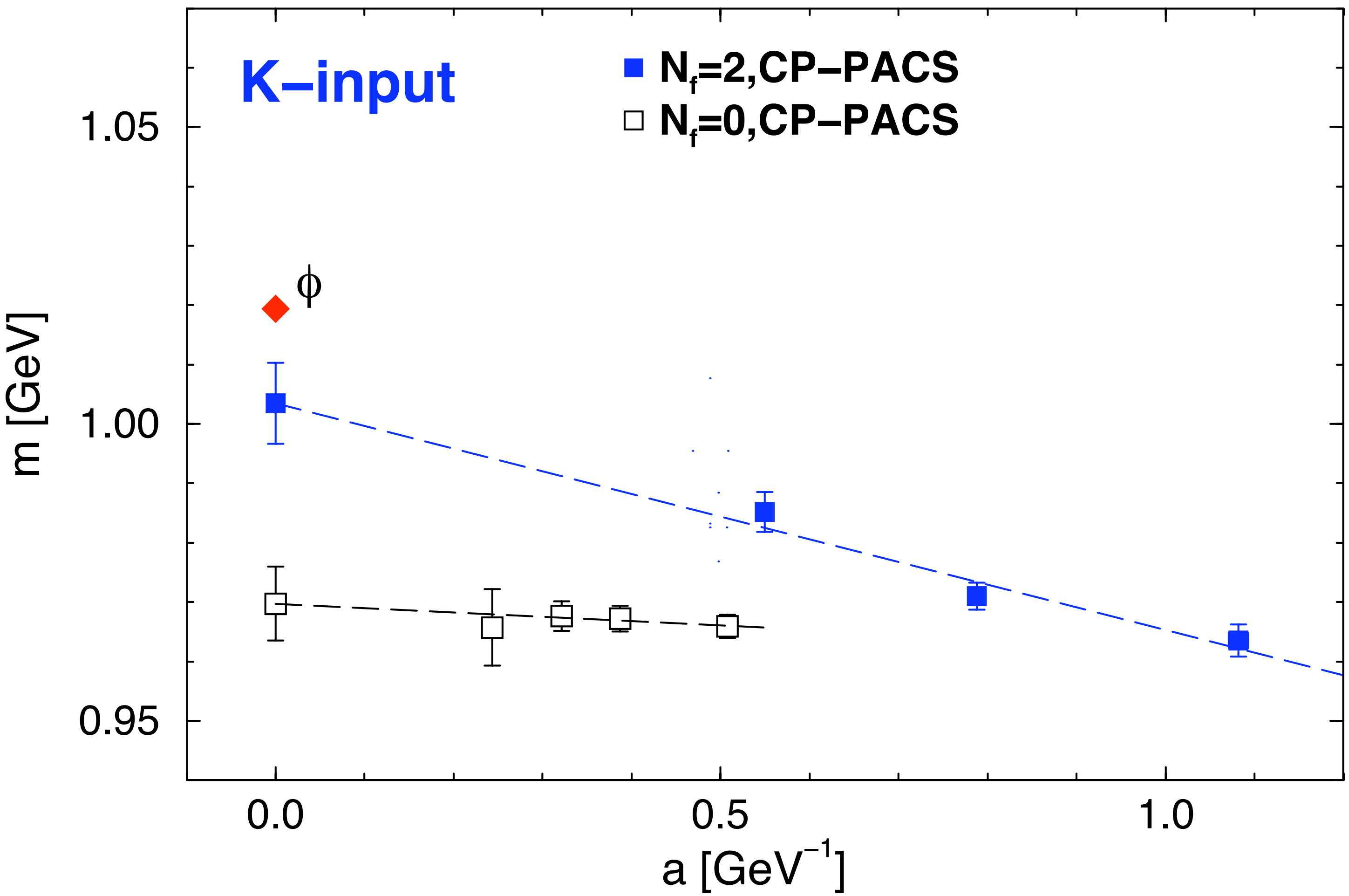
クエンチ近似の限界

$\det D(U)$(力学的クォーク)を取り入れた計算が必要!

# 成果II 力学的クォークを含んだ計算

ただし、up, down quarkのみ、strangeはクエンチ

$\phi$ 中間子の質量の連続極限への外挿




クエンチ近似に比べてより実験値に近い値が得られた

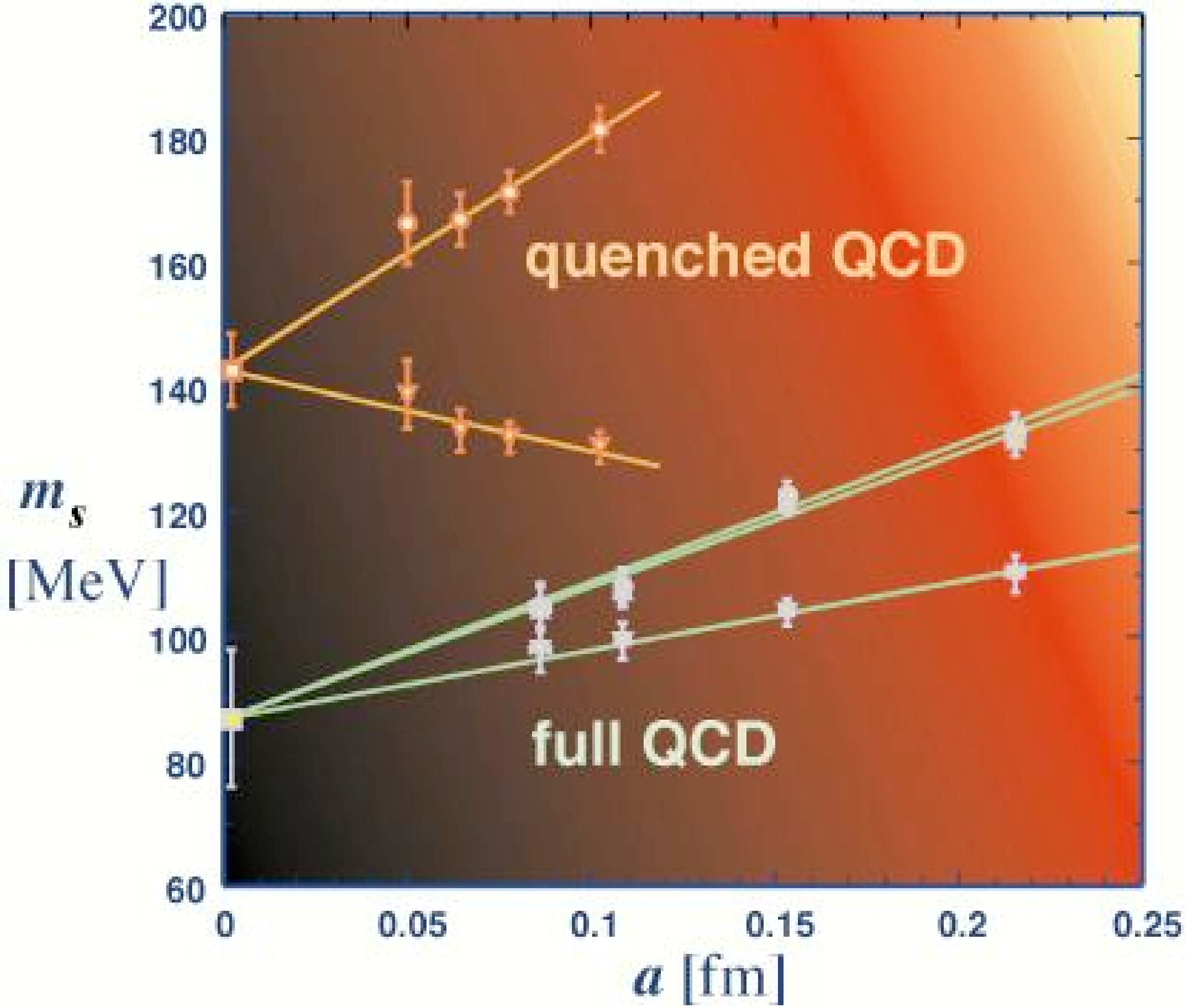
力学的クォークの寄与

わずかな差は力学的ストレンジクォークのため!?

力学的クォークの寄与は重要であり、計算可能
近似のないQCD計算の実現へ！

# 成果III 標準理論のパラメタの決定

ストレンジクォークの質量　　　閉じ込めのため実験では測れない



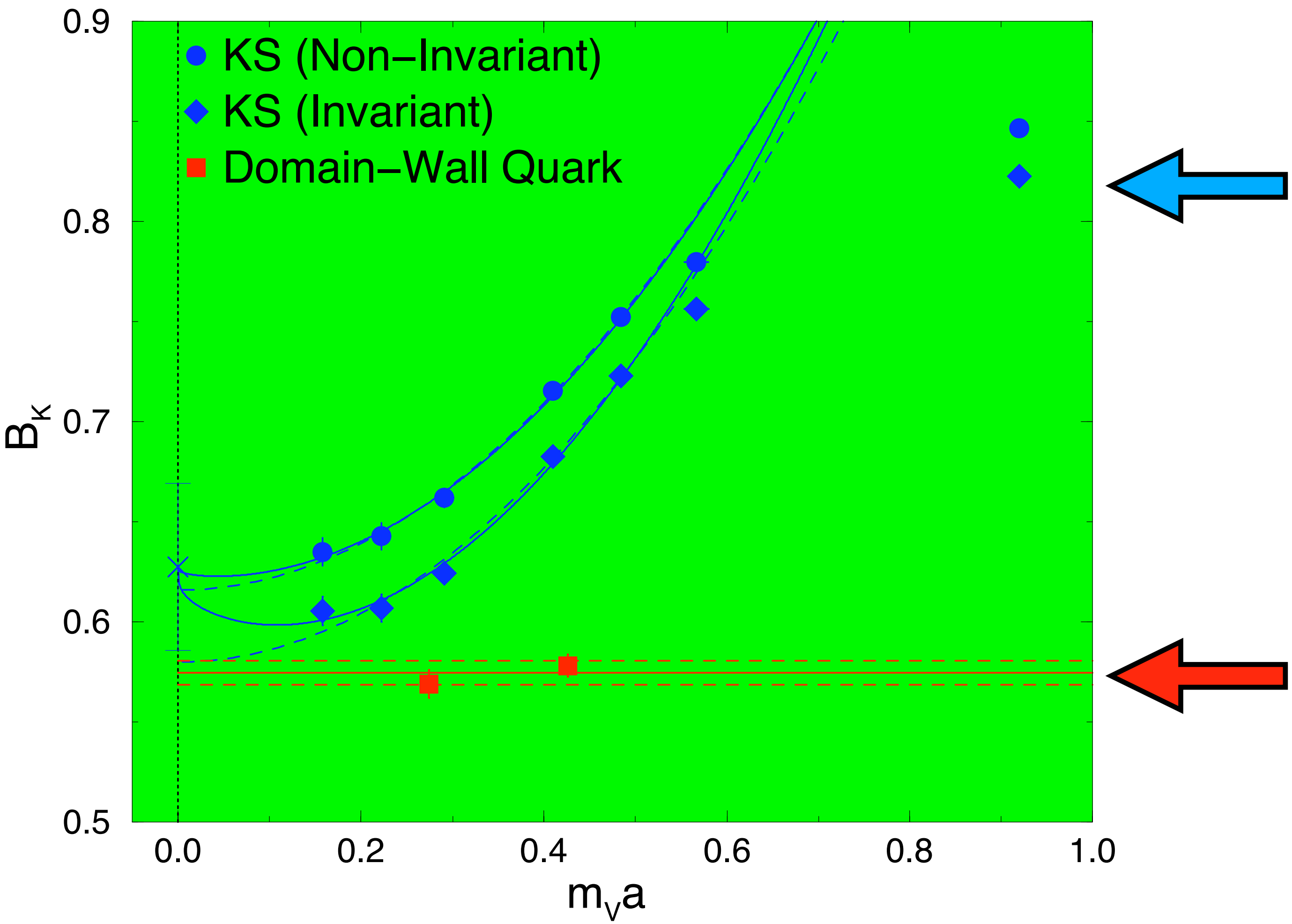

力学的クォークの効果が大
今までの予想よりかなり小さめの値

# 成果IV ハドロンの弱電時行列要素

中性K中間子の混合パラメタ $B_K$

CPの破れに関する重要な行列要素

クエンチ近似での連続極限




従来のクォーク作用による計算

対称性のよい新しいクォーク作用による計算

高精度の計算が可能
力学的クォークを取り入れた計算が今後の課題

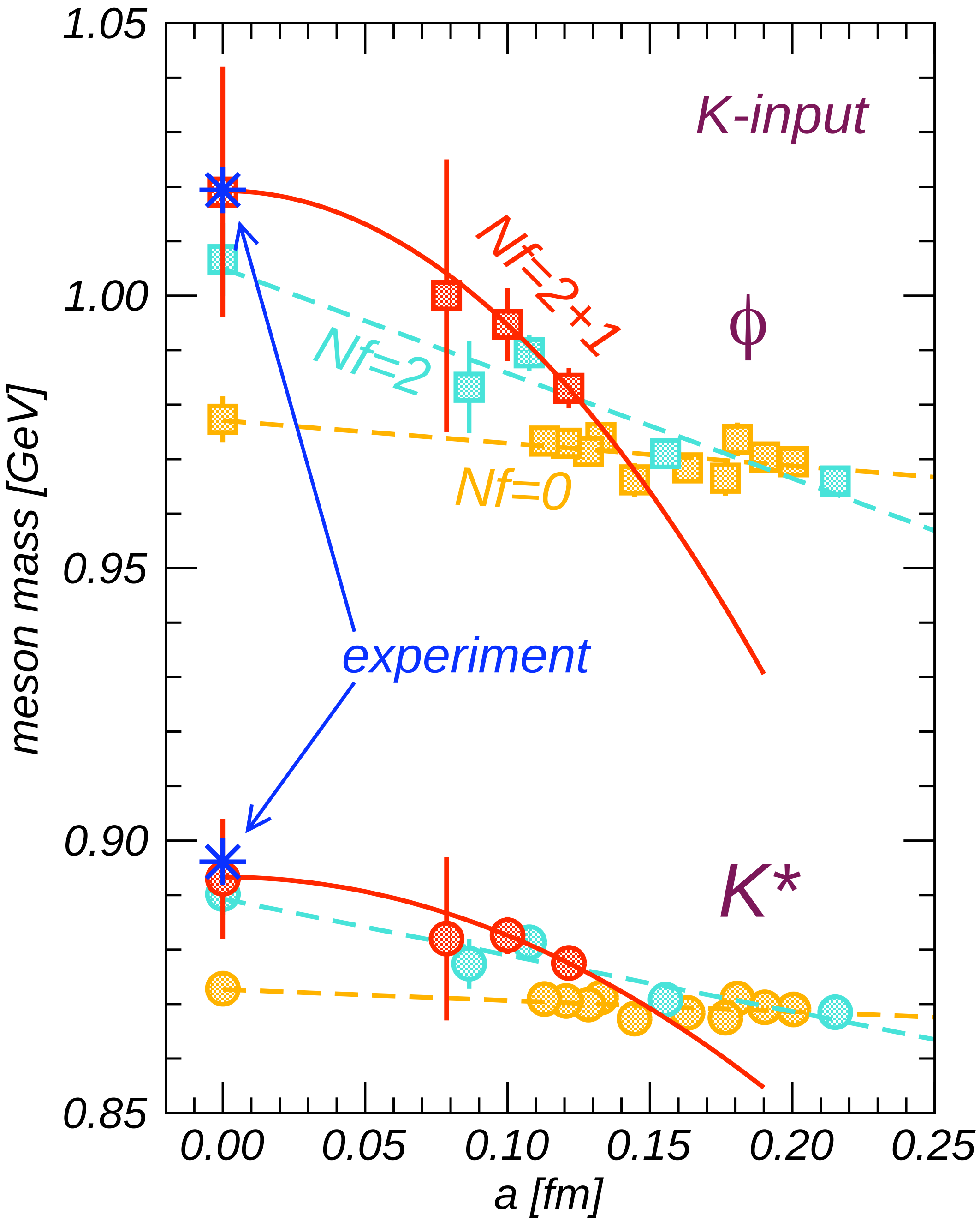
# PACS-CSで目指す研究

## CP-PACSの研究で不十分、不満足な点

- 力学的ストレンジクォークの寄与がない
- u, dクォークの質量が十分軽くない
  - 実験では数MeV程度、計算では10-20MeV程度
  - 外挿が必要、理論的な振る舞いが見えていない
- 有限体積効果
  - １辺2.4fm（クエンチでは3fm）
  - メソンには充分、バリオンには小さい？

# ストレンジクォークの寄与を入れた計算

$K^*$, $\phi$ 中間子の質量の連続極限




CP-PACS, SR8000, VPP5000 (Tsukuba)
SR8000 (KEK), 地球シミュレータ

より実験値に近い結果を示唆、

ただし

統計精度は不充分

体積(2.0fm)も小さい

u, dクォーク質量も重い

研究・計算の方向性はOKだが、
質の改善が必要！

# u, dクォーク質量に関する外挿の問題

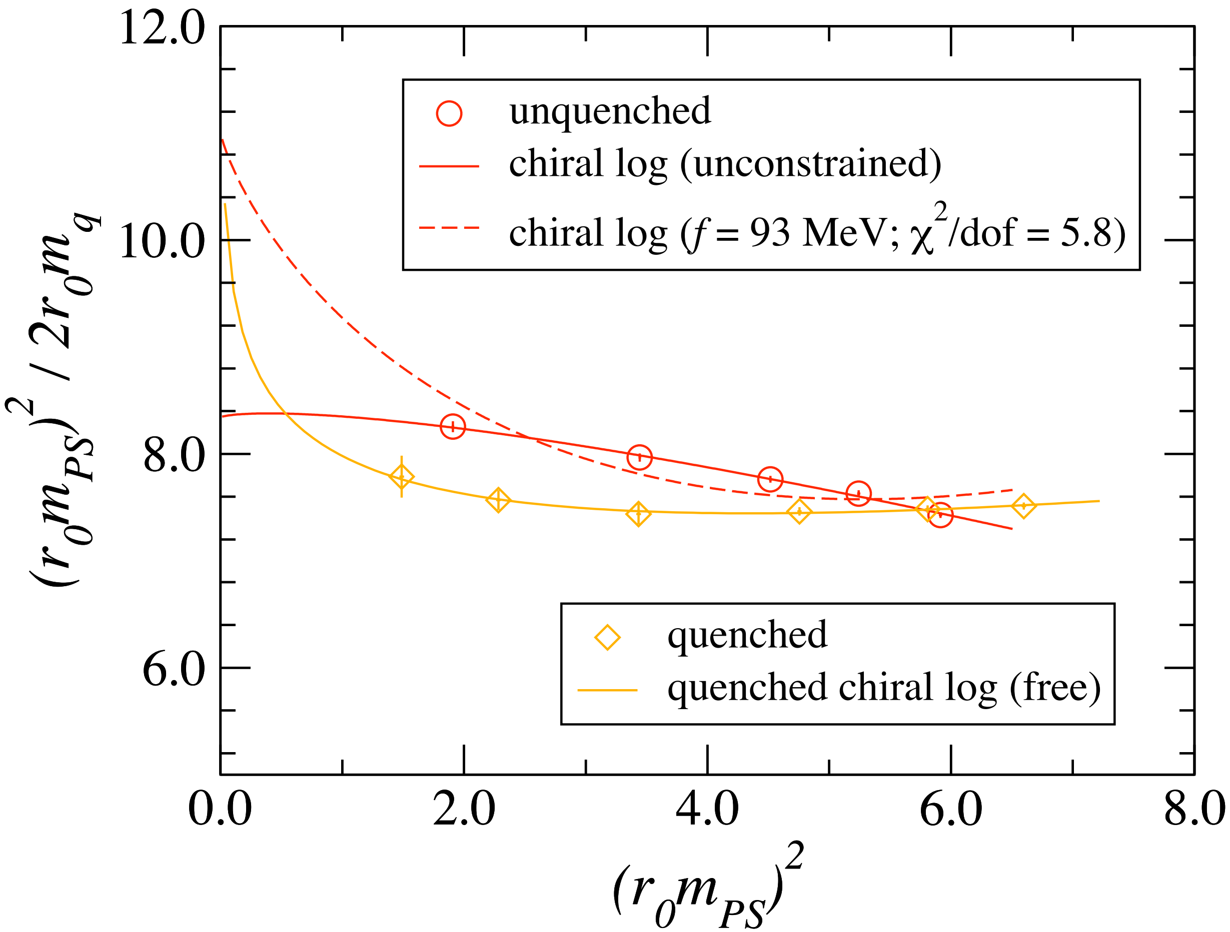
カイラル摂動論（連続理論）による予言

$$m_\pi^2 = Am_q\left[1+\frac{Am_q}{16\pi^2N_f f^2}\log(Am_q/\Lambda^2)\right]$$

π 中間子の質量

クォーク質量

JLQCD Collaboration




計算結果は理論的な振る舞いを再現していない

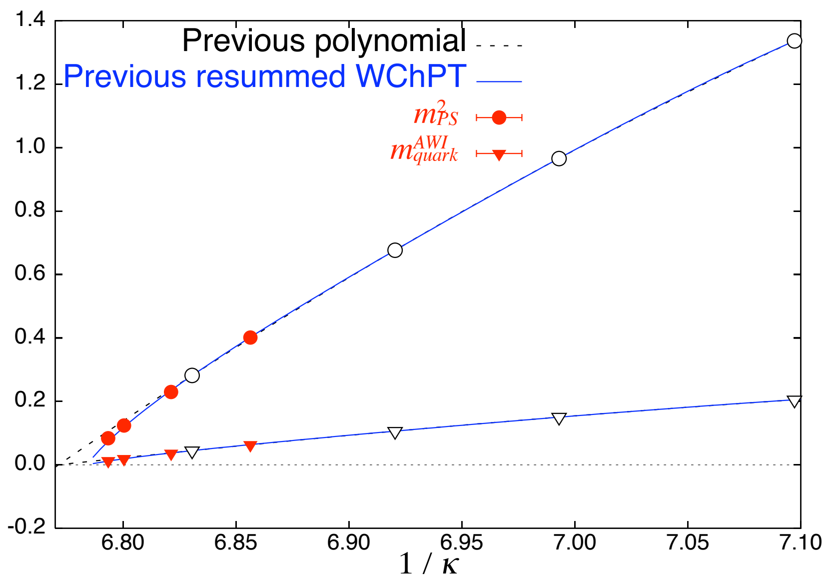
# 問題点

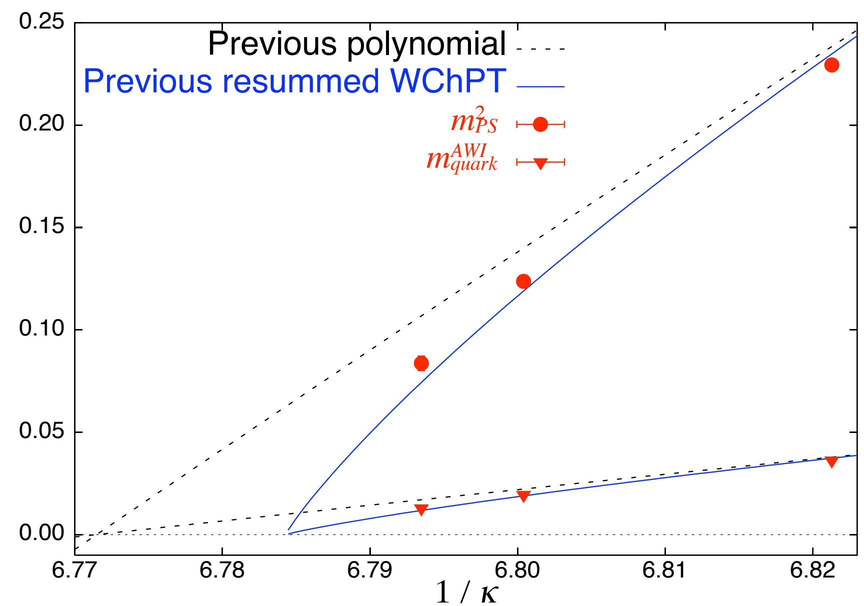
- 格子QCDのカイラル摂動論の計算が必要

$$m_\pi^2 = Am_R\left[1 + \frac{m_R(A + w_1 a)}{32\pi^2 f^2}\log\frac{Am_R}{\Lambda^2} + \frac{w_0 a^2}{32\pi^2 f^2}\log\frac{Am_R}{\Lambda_0^2}\right]$$

- より軽いクォーク質量での計算が必要

Namekawa et al. (CP-PACS)




後者の計算を高精度で行い、前者を確認し外挿をすることが重要！

# PACS-CSでの計算可能性の評価

## 通常のHybrid MonteCarlo(HMC)法

統計数は1000程度(10000 HMC軌道)

クォーク質量: $m_\pi/m_\rho$ で表わす(実験値は0.18, 前の計算では約0.6)

計算コストは $m_q^{-2}$ 以上で増大

実行速度 1TFlops

$a = 0.12\mathrm{fm} \quad (2.8\mathrm{fm})^3 \times 5.6\mathrm{fm}(24^3 \times 48)$

| $m_\pi/m_\rho$ | 0.7 | 0.6 | 0.5 | 0.4 | 0.3 | 0.2 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $m_q$(MeV) | 79 | 44 | 26 | 15 | 8 | 3 |
| 日数 | 20 | 46 | 109 | 292 | 948 | 6357 |

$a = 0.09\mathrm{fm} \quad (2.8\mathrm{fm})^3 \times 5.6\mathrm{fm}(32^3 \times 64)$

| $m_\pi/m_\rho$ | 0.7 | 0.6 | 0.5 | 0.4 | 0.3 | 0.2 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $m_q$(MeV) | 79 | 44 | 26 | 15 | 8 | 3 |
| 日数 | 99 | 239 | 586 | 1592 | 5241 | 35522 |

# 新アルゴリズム

## 領域分割HMC法

Luescher

- 小さな領域( $< (1\mathrm{fm})^4$ ) に分割し、領域毎に計算
  - 通信が不要でクラスターに適している
  - 軽いクォークでもコストの増大が緩やか
- 詳細釣り合いを満たすために時々全体の計算を行う
  - 通信が必要だが回数はHMC法よりはるかに少ない
- HMC法と比べた全体の加速率は２０倍以上と予測
  - PACS-CS完成までに詳細なテストが必要

# 再評価（１０倍の加速率を仮定）

$a = 0.12\mathrm{fm} \quad (2.8\mathrm{fm})^3 \times 5.6\mathrm{fm}(24^3 \times 48)$

| $m_\pi/m_\rho$ | 0.7 | 0.6 | 0.5 | 0.4 | 0.3 | 0.2 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $m_q(\mathrm{MeV})$ | 79 | 44 | 26 | 15 | 8 | 3 |
| 日数 | 2 | 5 | 11 | 29 | 95 | 636 |

$a = 0.09\mathrm{fm} \quad (2.8\mathrm{fm})^3 \times 5.6\mathrm{fm}(32^3 \times 64)$

| $m_\pi/m_\rho$ | 0.7 | 0.6 | 0.5 | 0.4 | 0.3 | 0.2 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $m_q(\mathrm{MeV})$ | 79 | 44 | 26 | 15 | 8 | 3 |
| 日数 | 10 | 24 | 59 | 159 | 524 | 3552 |

PACS-CSで１年以内に計算可能！

# 素粒子研究計画（まとめとして）

- PACS-CS完成までに領域分割HMC法の詳細なテスト
- ハドロンの質量などの計算( $m_\pi/m_\rho = 0.3 \sim 0.4$)
  - メソン:2.4fm a=0.075/0.1/0.015fm(連続極限)
  - バリオン: 3.2fm以上 a=0.1/0.15fm(連続極限)

近似なし計算によるQCDの検証

- 生成されたゲージ配位による重いクォークの物理
- 弱電磁行列要素の計算
- 格子QCDによるハドロン物理
  - 核力、ハドロン散乱・崩壊
  - グルーボール、エキゾチック粒子（ペンタクォークなど）