

# 計算素粒子物理学の現状と展望

CCS Sympo-04

T.Yoshie @ CCS,Tsukuba

- 1.素粒子物理学
- 2.格子QCD計算の目指すもの
- 3.格子QCD計算
4. QCDシミュレーションの歴史と現状
- 5.格子QCD計算の展望
- 6.格子QCDとデータグリッド

# 計算素粒子物理学

素粒子物理学： 物質を構成する基本粒子

クォーク  $u, d, s, c, b, t$

レプトン  $e, \nu_e, \mu, \nu_\mu, \tau, \nu_\tau$

と、その相互作用 (標準理論)

強い相互作用 (QCD)

電弱相互作用 (Weinberg-Salam 理論)

標準理論の、検証、基礎パラメータの決定、予言

標準理論を超える理論の模索

計算素粒子物理： **格子QCDの数値シミュレーション**

# 格子QCD計算の目指すもの

低エネルギー領域のQCD: 相互作用がきわめて大  
摂動計算が適応できない

第一原理QCDに基づく研究、格子QCD計算が唯一

クォークはハドロン中に閉じこめられている  
メソン ( $qq$ )、バリオン ( $qqq$ )

$$m_{ud} = 3\text{MeV}, \quad m_{\rho} = 770\text{MeV}, \quad m_N = 940\text{MeV}$$

質量スペクトラム: non-trivial      QCDの検証

## QCDの基礎パラメータ

クォークは単体では取り出せない

クォーク質量 物理量をクォーク質量の関数として

強い相互作用の結合定数

## QCDの予言

メソンでもバリオンでもないハドロ

glueball, penta-quark, dibaryon, hybrid ..

実験に対する示唆 発見 QCDの検証

有限温度密度QCD

初期宇宙のクォーク・グルーオン プラズマ

元素合成

# 格子QCDと電弱相互作用

電弱相互作用の基礎パラメータの決定

CKM 行列要素中の CP 非保存パラメータ

宇宙の物質・反物質の非対称性

標準理論を超える理論の発見

$B - \bar{B}$  混合  $K_0 - \bar{K}_0$  混合

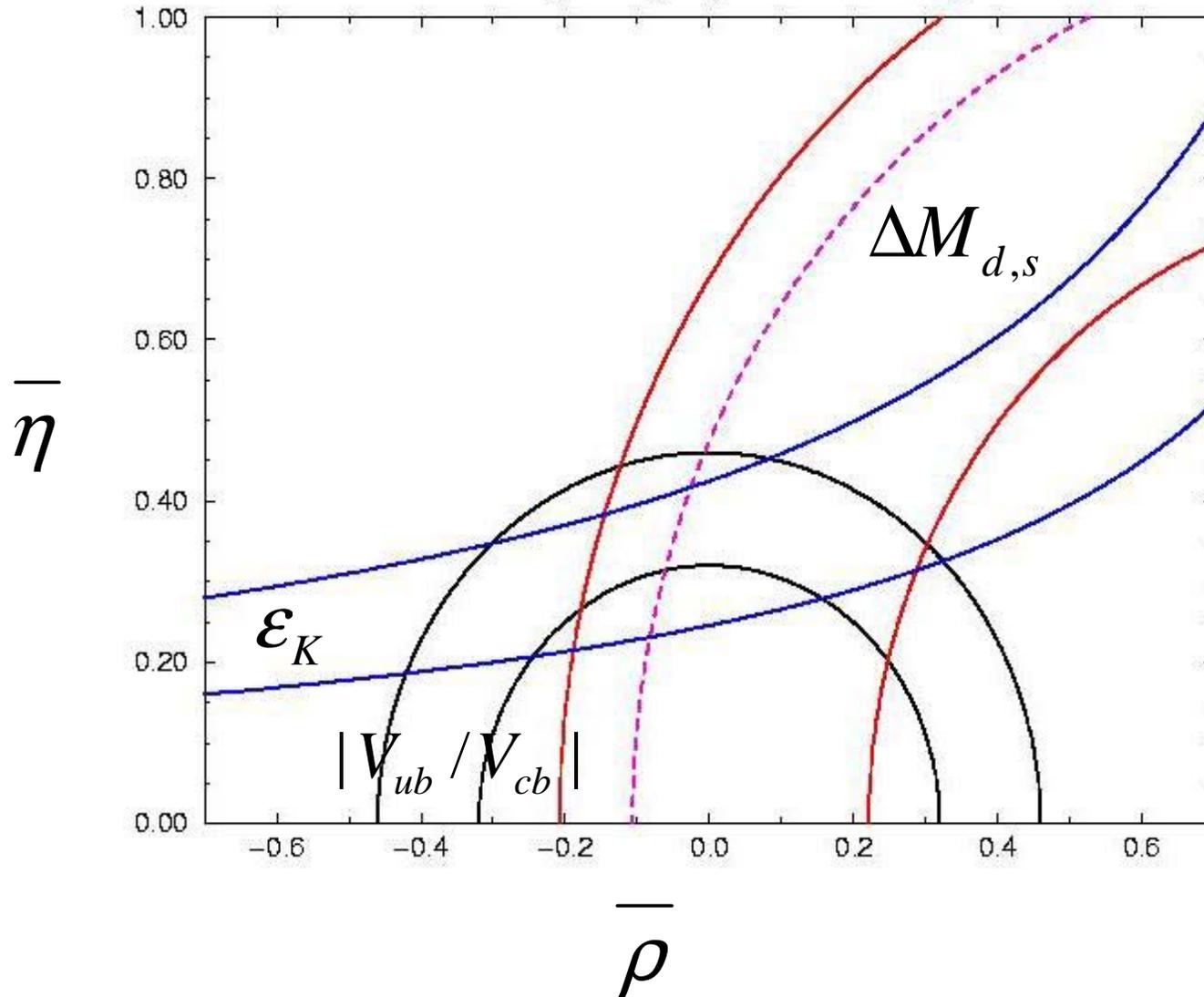
$$\Delta M_d = |V_{td}|^2 C_{pert} \langle \bar{B}_d | (\bar{b}d)(bd) | B_d \rangle$$

$$\langle * \rangle = \frac{8}{3} F_B^2 B_B m_B^2$$

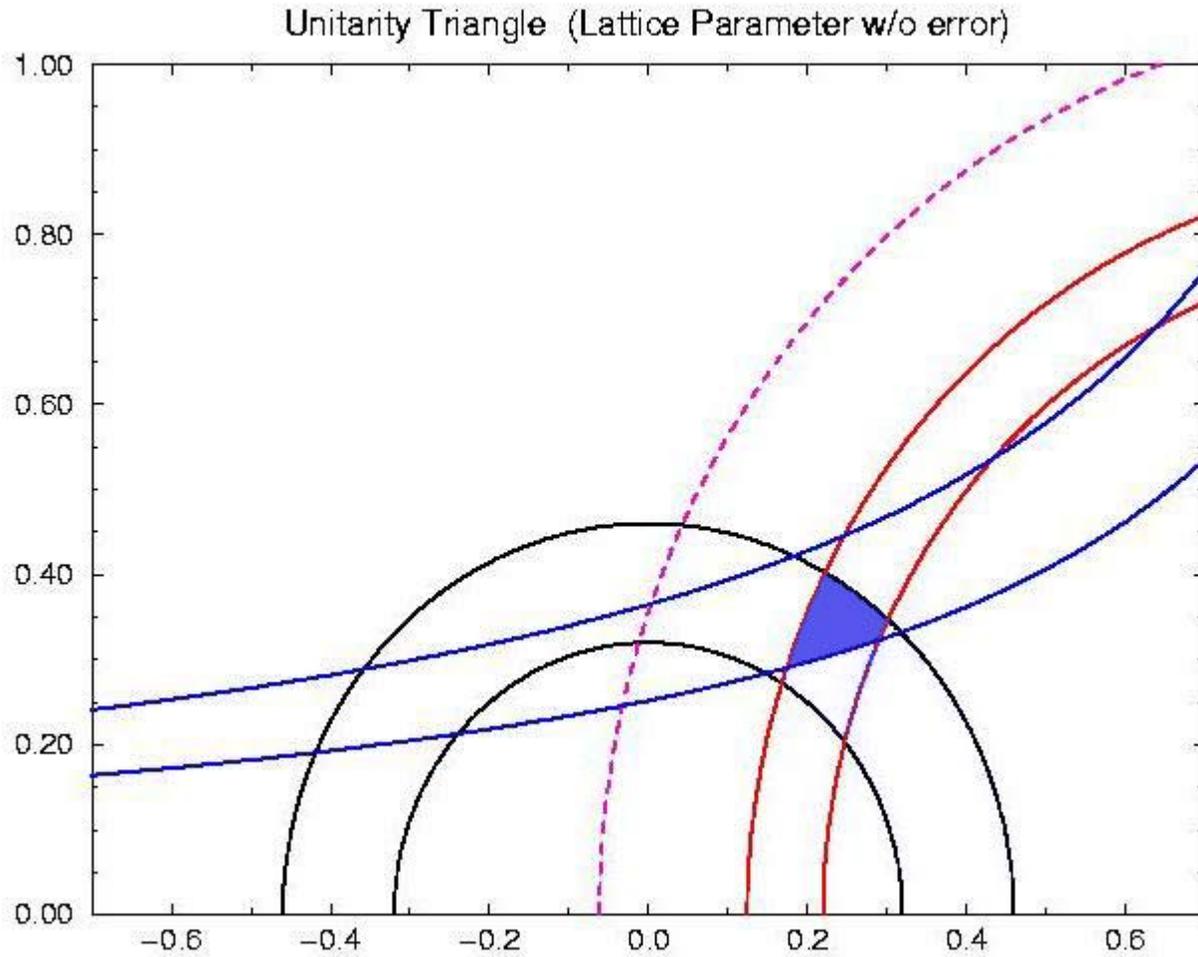
電弱相互作用行列要素

# CP非保存パラメータ

Unitarity Triangle (Buras Parameter)

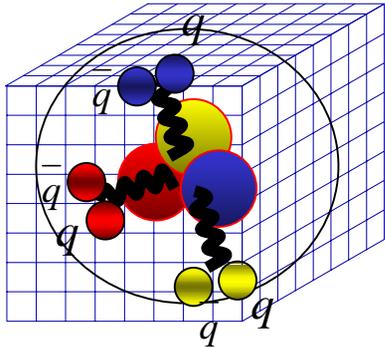


# 格子QCD計算、誤差ゼロ



# 格子QCD計算

4次元の場の理論QCDを格子で離散化



$$S_{qcd} = S_{gluon} + \bar{q} D q$$

$\bar{q} \text{ --- } q$

$U$

$$\langle O \rangle = \frac{1}{Z} \int dU d q d \bar{q} O \exp(-S_{gluon} - \bar{q} D q)$$

経路積分を分子動力学モンテカルロで評価

$D$   $12V \times 12V$  大規模疎行列

$q = (u, d, s, \dots)$  クォーク場 グラスマン数

$$\langle O \rangle = \frac{1}{Z} \int dU O \det(D_{ud})^2 \det(D_s) \cdots \exp(-S_{gluon})$$

$u, d$  クォーク (3MeV, ほぼ縮退)

$s$  クォーク (80MeV)

$\det(D)$

クォークの対生成・消滅効果

評価に膨大な計算時間

$$\det(D_{ud}) = \det(D_s) = 1 ; N_f = 0$$

クエンチ近似

クォークの対生成・消滅を完全に無視

Heat-bath 1981 ~ 1998年一段落

$$\det(D_{ud}) \neq 1 \quad \det(D_s) = 1 ; N_f = 2$$

u,d クォークの対生成・消滅効果

Hybrid MC 1987 ~ 2001年一段落

$$\det(D_{ud}) \neq 1 \quad \det(D_s) \neq 1 ; N_f = 2 + 1$$

u,d,s クォークの対生成・消滅効果

Polynomial Hybrid MC 2002 ~ 現在

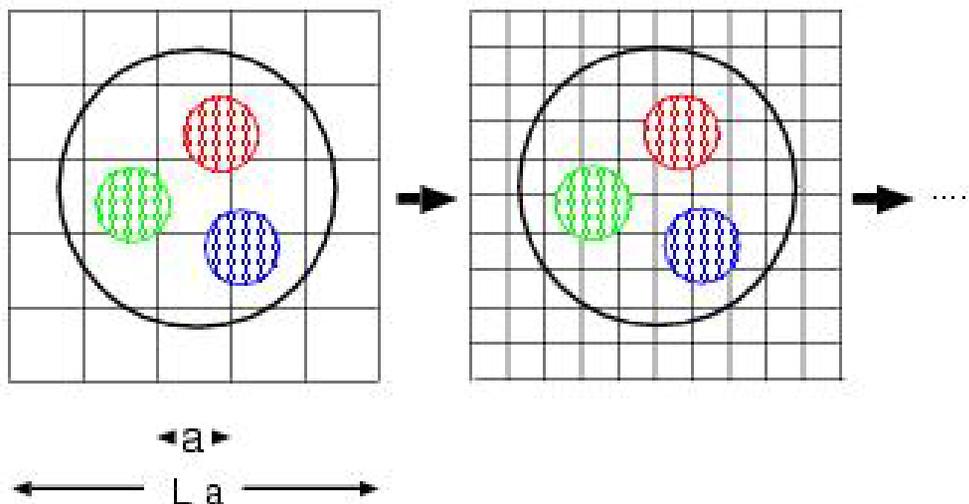
**Nf=2+1は最終計算**: より重いc,bの対生成消滅効果<sup>10</sup>小

# 格子QCD計算の系統誤差

格子サイズ  $La$  ハドロンより十分大きく

2 fm : メソン    3 fm : バリオン    5 fm : 散乱

格子間隔  $a$     0    3つ程度の格子間隔で計算外挿



軽い  $u, d$  クォーク質量に関する外挿

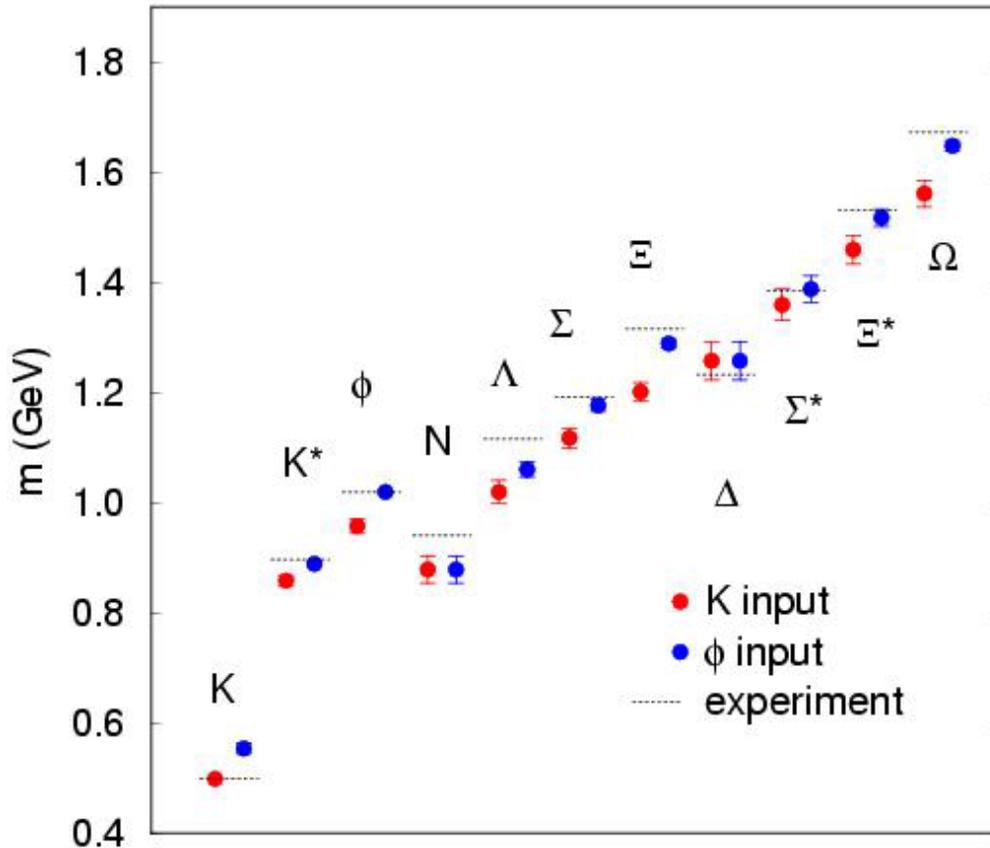
$$\det(D) \rightarrow D^{-1}, T(D) \quad \text{cond}(D) \propto \frac{1}{m_q} \quad 11$$

# QCDシミュレーションの歴史と現状

## クエンチQCD 質量スペクトラム計算

year	1981	1985	1988	1993	1998
La (fm)	0.8	1.2	1.7	2.5	3
a (fm)	0.1	0.1	0.1	0.07	0.05
m <sub>q</sub> (MeV)	100	100	40	40	25
mPS/mV	0.7	0.7	0.5	0.5	0.4
#conf	20	20	50	220	800
cost	1	10	80	7000	500000
				GF11	CP-PACS

## 1998年、CP-PACS



- 全ての系統誤差を制御、誤差2 - 3%
- メソン、バリオン  
スペクトラム  $L a = 3 \text{ fm}$
- 実験値と0(10%)  
の系統的ズレ  
(クエンチ近似効果)

目標:  $N_f = 2, N_f = 2 + 1$  full QCD の同程度の  
クオリティの計算

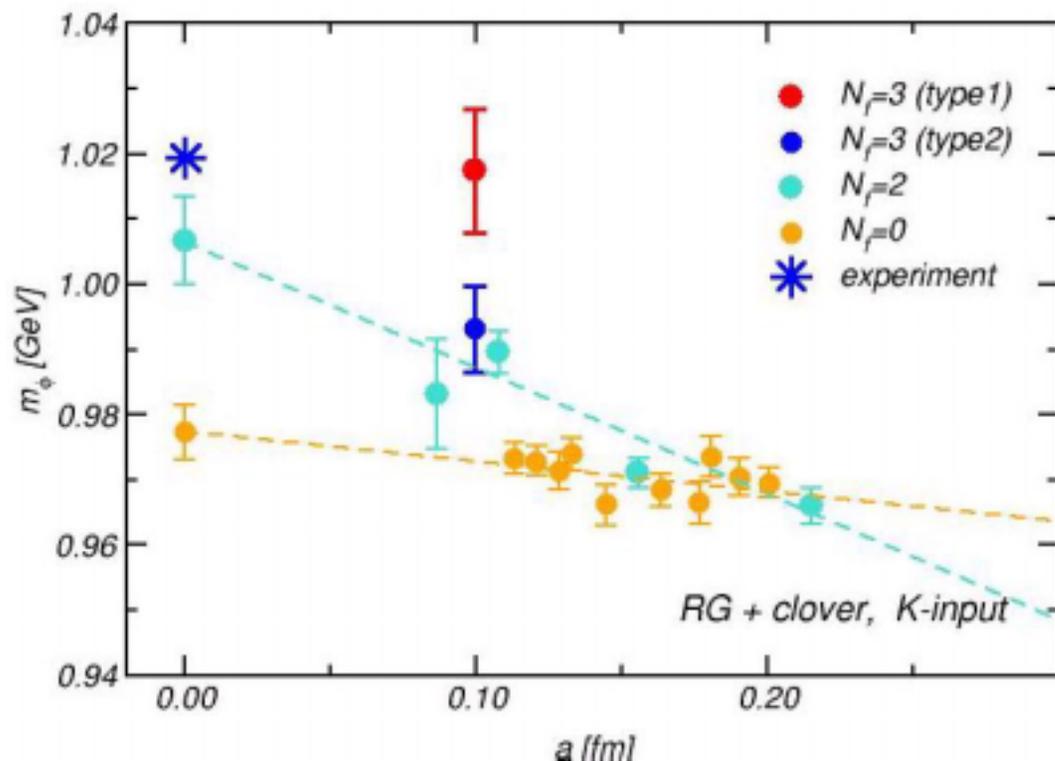
## Nf=2 full QCD 計算

La=2.5 fm 格子間隔3点、連続極限

## Nf=2+1 full QCD計算

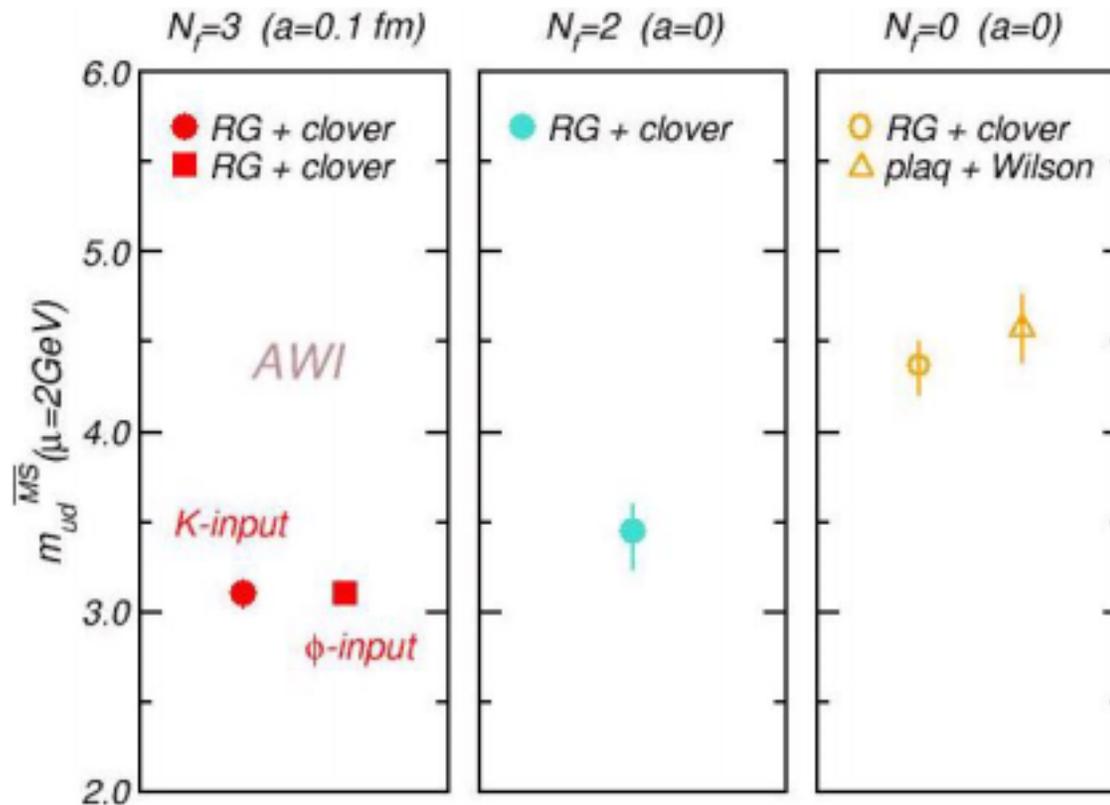
La=2.0 fm 格子間隔1点

## メソンの物理



- メソンスペクトラムの実験値からのズレは u,d クォーク対生成消滅効果で格段に小さくなる
- u,d,s クォークの対生成消滅効果を入れた計算で、メソンスペクトラムを完全に再現する可能性

# クォーク質量のフレーバ数依存性



$$m_{ud} \approx 3\text{MeV}, m_s \approx 80\text{MeV}$$

(現象論で用いられる値より) かなり小さい  
標準理論内での direct CP violation の理解

# 格子QCD計算の展望

## Nf=2+1 QCD シミュレーション

Machines:

CP-PACS (Tsukuba), SR8000 (KEK, Tsukuba)

VPP5000(Tsukuba), Earth Simulator (Jamstec)

計算規模:

( $a=0.01\text{fm}$ ,  $L_a=2\text{fm}$ , ud クォーク5点、sクォーク2点)

約9ヶ月 実効 約 0.4 Tflops x year

(効率 20 - 50%)

計算機性能 vs. 格子QCD計算の進展

# 1. メソンの物理計算の最終結果

$L_a=2\text{fm}$ , 格子間隔3点で連続極限

**実効** 1.3 Tflops x year

メソンスペクトラム (U(1)問題含む)

QCD基礎パラメータの決定

重いクォークの電弱相互作用行列要素

**等の最終結果が、現有の計算機で約2年**

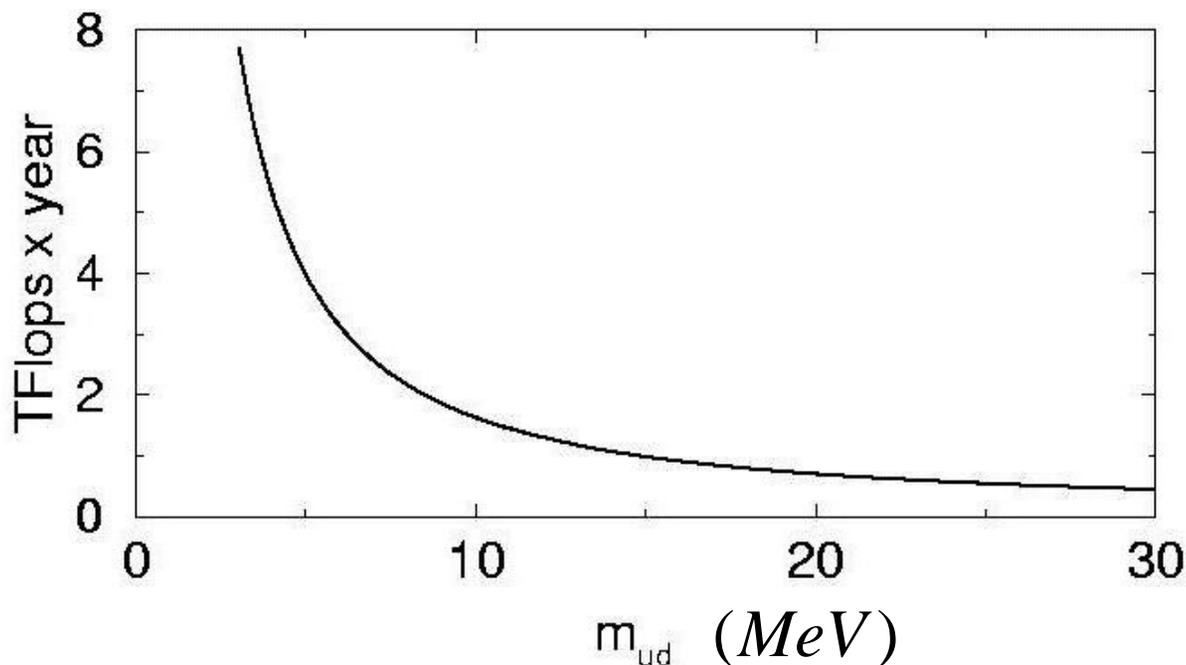
## 2. (pessimistic scenario)

### クォーク質量に関する外挿: 最も制御が困難

(格子)カイラル摂動論が有効な範囲に  
格子QCD計算のクォーク質量が到達しているか？

u,dクォーク質量(現シミュレーション、30MeV)

を遙かに小さくする必要がある可能性



O(20)TFlops  
計算機で、現実  
のu,dクォーク  
質量での計算が  
可能 (La=2fm)

### 3. (more pessimistic scenario)

格子QCD(のある定式化)ではカイラル対称性が厳密には保たれていない為非常に軽いクォークに対しては、algorithmが破綻する可能性がある。

Ginsparg-Wilson 関係式を満す別の格子フェルミオン

Overlap, Perfect, Domain-wall,,,,,

20 - 50 倍の計算時間 O(100) TFlops 計算機

### 4. バリオン物理、散乱

計算時間の体積依存性  $\propto L^{5-6}$

バリオン factor 10倍

# 格子QCDとデータグリッド

## 1. 必要性

生成したQCD真空配位は貴重

生成に多くの計算機資源 (CPU time) が必要

配位上で多様な物理量が計算できる

今日までは、一つの Collaboration 内で、配位生成から物理量計算まで

**配位を世界規模で共有し、有効利用する**

International Lattice Data Grid 構想

## ◆経緯（経過）

Lat02 (June 24-29, 2002),

R.Kenway (EPCC,Edinburgh)により提案

ILDG1 (Dec. 19-20, 2002)

スタートアップワークショップ (Edinburgh)

ILDG2,ILDG3,ILDG4, Lat03

## ◆目標

- a. 配位共有の為の、規約の策定、技術の確立
- b. 物理量の共有（測定データ）
- c. 将来は、計算機資源の共有（未確定）

- 各国に 1-2 の拠点 (Grid)  
拠点を結ぶ、Grid of Grids の構築

Fermi Lab, USA

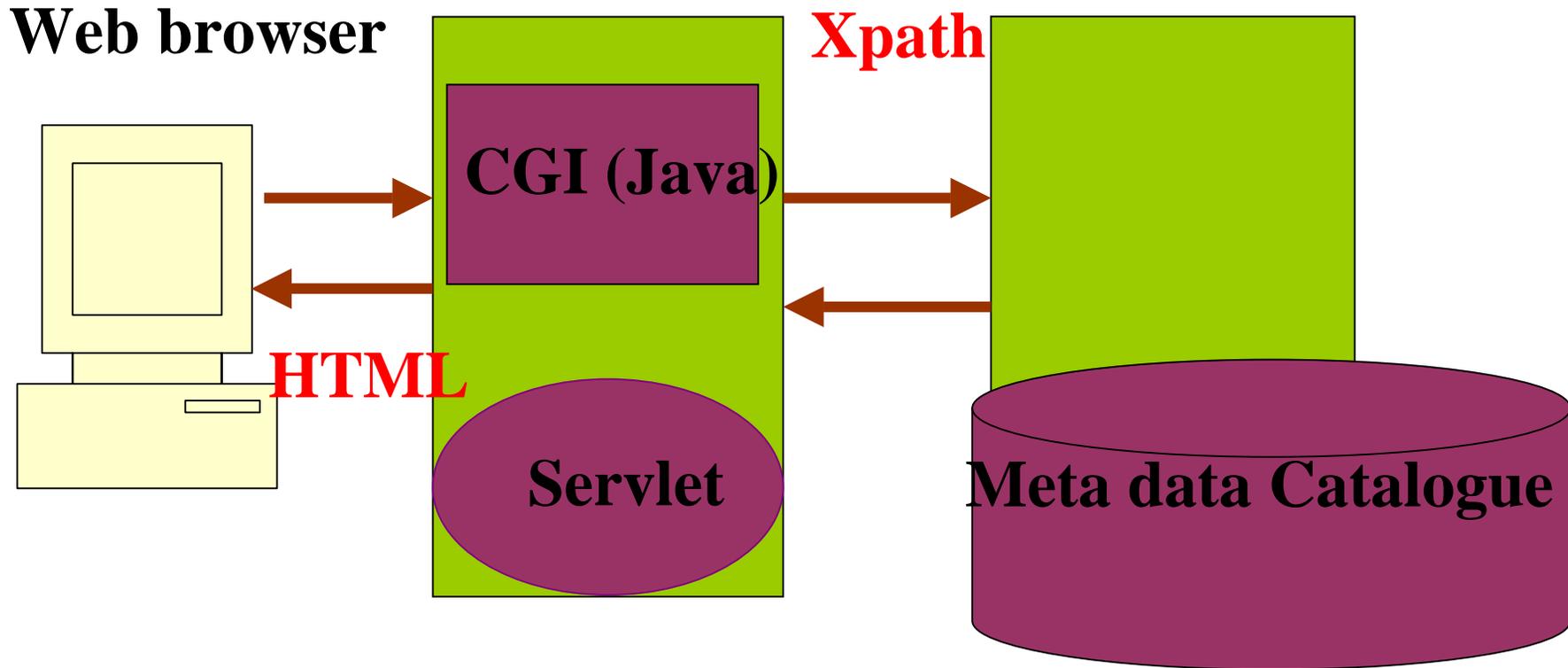
EPCC, Edinburgh, UK

CCS, Tsukuba, Japan

JLab

SciDAC





## QCDML (QCD Markup Language)

XML (eXtensible Markup Language) を用いた配位情報  
(サイズ、カップリング等の物理パラメータ) の記述規則  
実ファイル (配位) へのポインターを含む

## Metadata Catalogue Web service

search engine からの要求と各拠点のデータベースを仲介する、共通インターフェース

### ILDG Middleware WG

#### ◆ Time schedule (個人的見解含む)

Lattice2004 (June21-28, Fermilab, USA)

QCDML ver1.0 release

- 2004.12 MDCWS の完成

拠点のグリッドの準備

2005.1 - ILDG稼働開始

# Summary

- 格子QCDがK.Wilsonによって提唱されて後約30年経過し、近似無しのQCDシミュレーションが現実のものとなりつつある。
- メソン物理研究のためのシミュレーションは、既存計算機で到達可能
- バリオン物理には、次世代(次次世代?)計算機が必要
- 格子QCD研究のための、データグリッドが形成されつつあり、今後の研究に大いに資するところがあると思われる