

次世代の素粒子物理と シミュレーション

橋本省二(高エネルギー加速器研究機構)

@「計算科学の戦略と次世代スーパーコンピュータ」
エポカルつくば、2006年4月5日





高エネルギー加速器研究機構

新スーパーコンピュータシステムを稼動
(2006年3月1日)

素粒子原子核物理を中心とする高エネルギー加速器科学のシミュレーション研究

2つのシステムから構成

- 日立製作所 SR11000 モデルK1, 16ノード, 理論演算性能 2.15 TFlops
- 日本IBM BlueGene, 10ラック, 理論演算性能 57.3 TFlops

- 格子ゲージ理論
- 原子核構造理論
- 加速器設計
- 物性理論

公募研究を通じた全国共同利用

旧システムのおよそ50倍の計算能力





格子QCD

- 量子色力学 (QCD)
= 強い力の基礎理論
- クォークとグルーオンを結びつけて陽子、中性子や中間子を形成

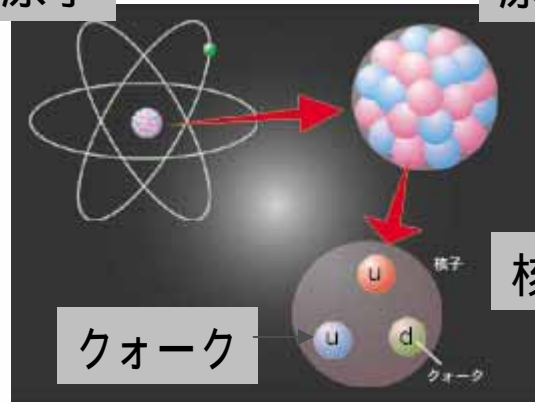
- カイラル対称性の自発的破れにより物質の質量の98%を生成

相互作用が非常に強くて非線形なので通常の方法では計算不能

⇒ 格子QCDシミュレーション

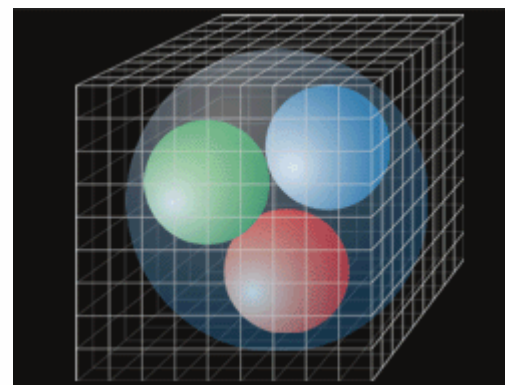
原子

原子核



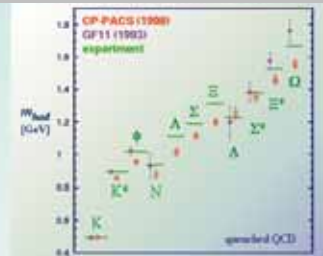
クォーク

核子



格子QCDシミュレーション

ケッチ近似での質量スペクトル、CP-PACS (1998)



Hadrons are the constituents of atomic nuclei. The computation of their mass spectrum from the dynamics of their fundamental quarks and gluons has been a principal subject of interest in particle physics.
In this figure, the results from the CP-PACS and from a previous computation are compared with experiment. Experimental results are reproduced to within about 5-10%. With the precise data from the CP-PACS, we further clarify a limitation of the widely adopted "quenched" approximation, showing

$\beta = 10.0$
 $A = 0.02$
 $K = 0.8$

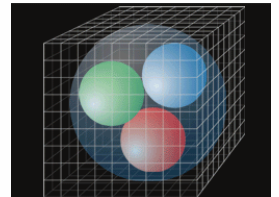
QCDの精密検証



QCD の検証を超えて

次世代の素粒子物理のなかで、
格子QCDの課題は？

- 素粒子物理の現状
- 未解決の問題
- 次世代の素粒子実験
- フレーバー物理
- 格子QCDの課題



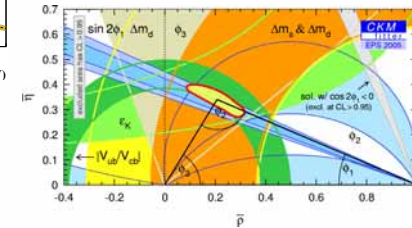
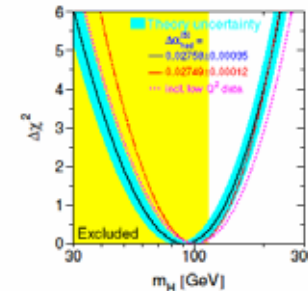
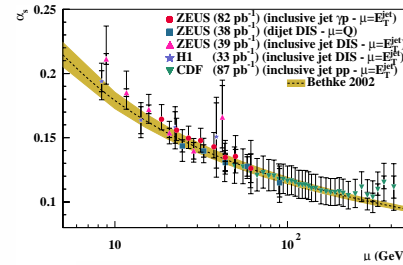
素粒子物理学の現状

「物質を構成する基本的要素は何か？」
 「それらの間に働く力は何か？」

素粒子の標準模型

(70年代～)

- ゲージ対称性
- 3世代のフレーバー構造 (小林益川理論)
- 電弱対称性の自発的破れによる質量獲得機構 (ヒッグス機構)



多くの実験事実を説明、
 妥当性を確立



小林益川行列の測定

Inputs:

$$\left| \frac{V_{ub}}{V_{cb}} \right|$$

$$\Delta m_d$$

$$\Delta m_s$$

$$B \rightarrow \tau \nu$$

$$|\varepsilon_K|$$

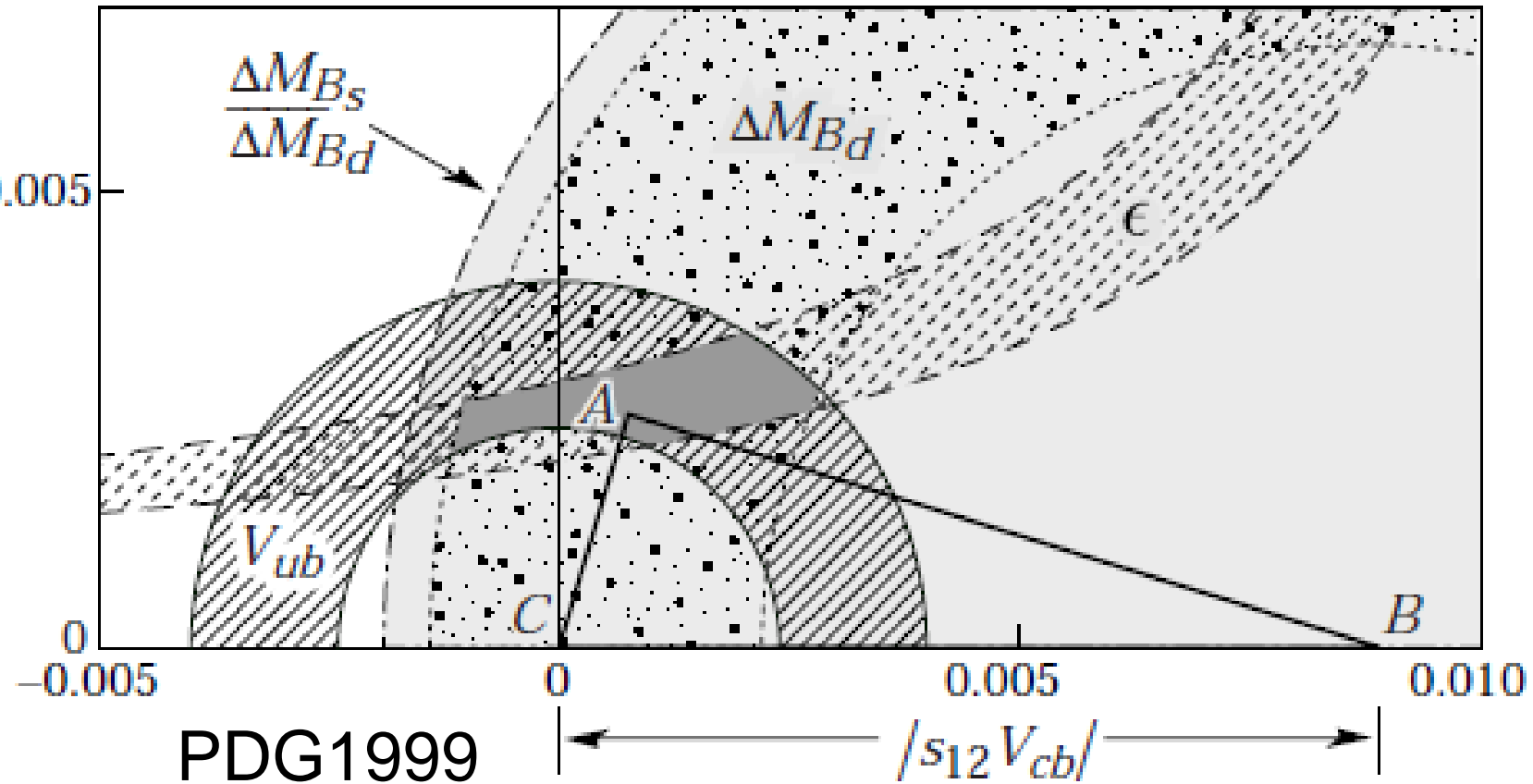
$$\sin 2\beta$$

&

$$\cos 2\beta$$

$$\alpha$$

$$\gamma$$



Bファクトリー実験による成果



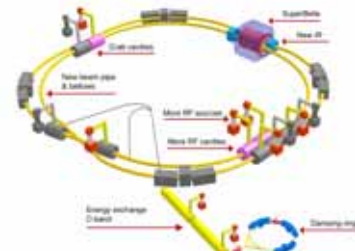
未解決の問題

1. ヒッグス粒子が未発見：電弱対称性の自発的破れの機構は実験的に未検証
2. 階層性の問題：標準模型は「究極の理論」ではない。TeV領域に新しい物理が必要。
3. 世代の問題：なぜ3世代あるのか？
4. ニュートリノ質量
5. 暗黒物質・暗黒エネルギー
6. 宇宙のバリオン数：なぜ粒子ばかりで反粒子がないのか？ CP対称性の破れ

標準模型を超える枠組みが必要



次世代の素粒子実験



LHC: 14TeV 陽子陽子衝突型
(2007後半から)

SuperKEKB: KEK Bの2.5倍のルミノシ
ティー、実験を提案中。

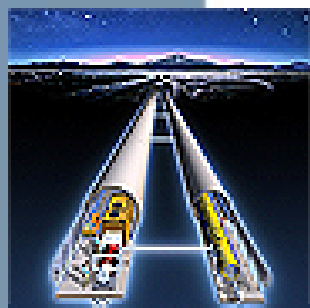
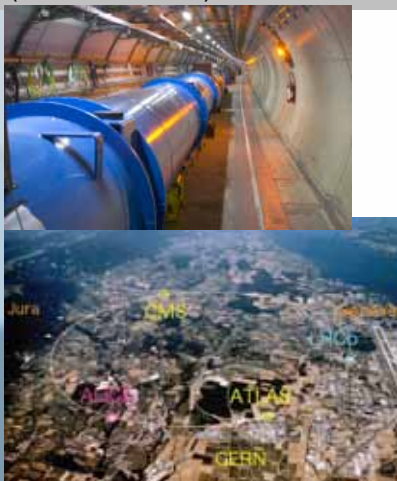
より高いエネルギー

より精密な測定

- **新粒子の発見**
ヒッグス粒子
超対称性粒子？
- **大加速器の建設**
LHC (Large Hadron Collider)
ILC (International Linear Collider)

- **素粒子の相互作用**
フレーバー間遷移
稀崩壊
ニュートリノ
- **中規模加速器**
J-PARC
SuperKEKB

新たな発見の時代へ



ILC: 電子陽電子衝突型線形加速器
500+ GeV, 国際共同プロジェクトとして計画中

J-PARC (KEK-原研): 東海村に建設中、
2008年実験開始

- ニュートリノ実験
- K中間子ビームによる素粒子原子核物理





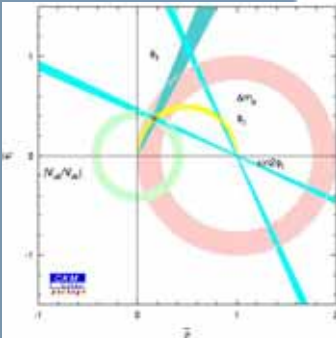
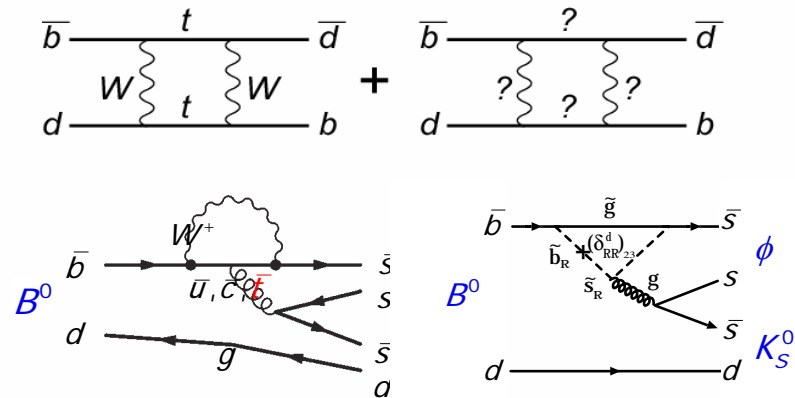
フレーバー物理

物質粒子			ゲージ粒子	
	第1世代	第2世代	第3世代	
クォーク	アップ クォーク	チャーム クォーク	トップ クォーク	強い力 グルーオン 電磁力 光子 弱い力 W ボソン Z ボソン
	ダウン クォーク	ストレンジ クォーク	ボトム クォーク	
レプトン	ニュートリノ	ミューオン ニュートリノ	タウ ニュートリノ	
	電子	ミューオン	タウ	
ヒッグス場に伴う粒子 (未発見)			ヒッグス粒子	

精密測定によって輻射補正に寄与する未知の重い粒子の寄与を探る。

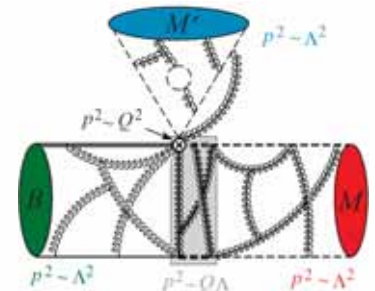
- B中間子、K中間子の粒子反粒子混合
- B中間子、K中間子の崩壊

TeVスケールの物理にも同様なフレーバー構造？



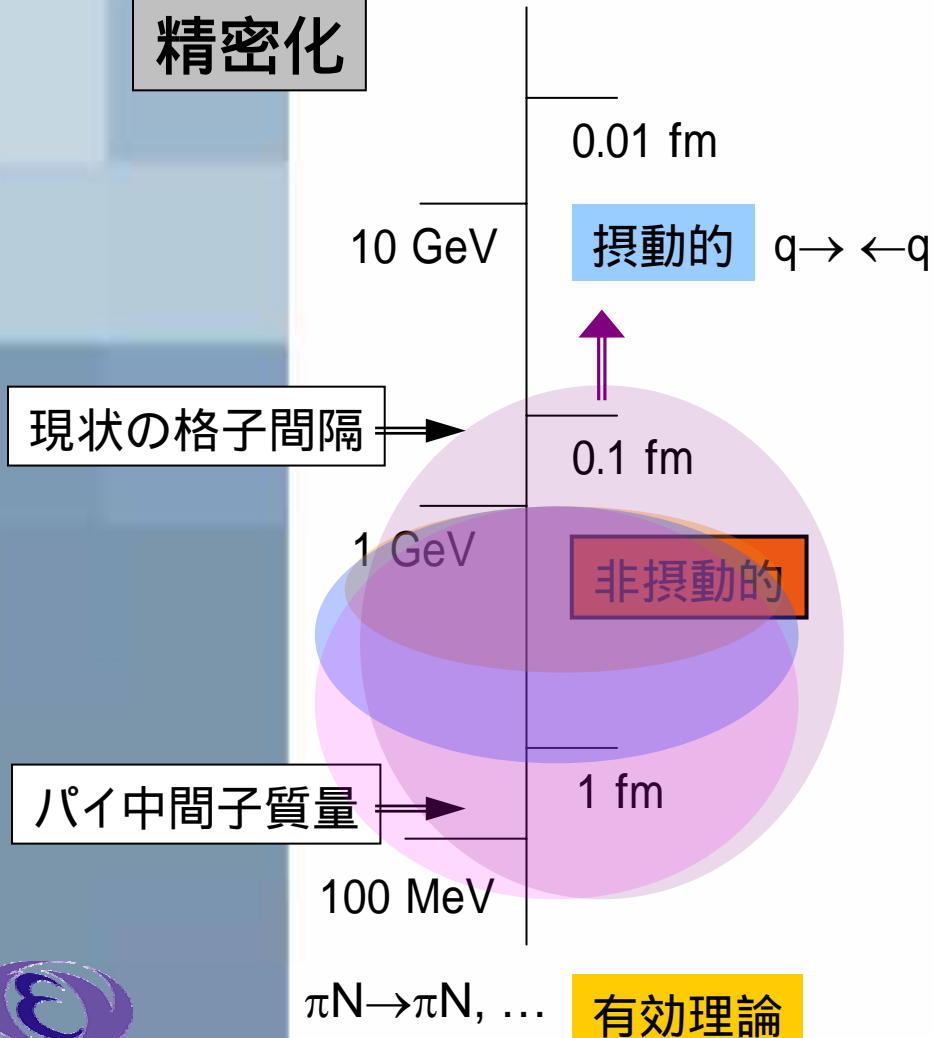
QCDの寄与を“精密に”評価できなければ実験との比較はできない。

実験 + 格子QCD ⇒ 新しい物理の探索



格子QCDの課題

精密化



単一スケールから マルチスケールへ

- 過去 (~ 1 TFlops): QCD のスケール 500~1000 MeV
クォーク質量に関する外挿
- 現在 (~ 50 TFlops): パイ中間子のスケールまでカバー
パイ中間子のループ効果
厳密なカイラル対称性
- 未来 (~ 10 PFlops) : 単一ハドロンを越えて
ハドロン間相互作用、崩壊



京速計算機への要請・期待

- 単純な「弱いスケールリング」ではない。格子点あたりの計算量が増大。
 - 厳密なカイラル対称性
 - 軽いクォーク(現実のパイ中間子質量)
- 個々のコアの性能があまり上がらないなら、より粒度が小さくなる。コアあたり 2^4 (あるいはそれ以下)の格子点。データ量は比較的少ない。
 - QCDOC/BlueGene 的なものは一つの解。キャッシュに載ることを前提。非常に速い通信(バンド幅 + 低レイテンシ)。
 - 4次元格子のマップ。
- コスト性能比での最適解は？
- 汎用計算機は高くて買えない??

