



# 素粒子標準理論を超える 新物理の解明に向けて

KEK 金児 隆志

ポスト京 重点課題(9) キックオフシンポジウム

2015年 3月 12日

# 素粒子標準理論

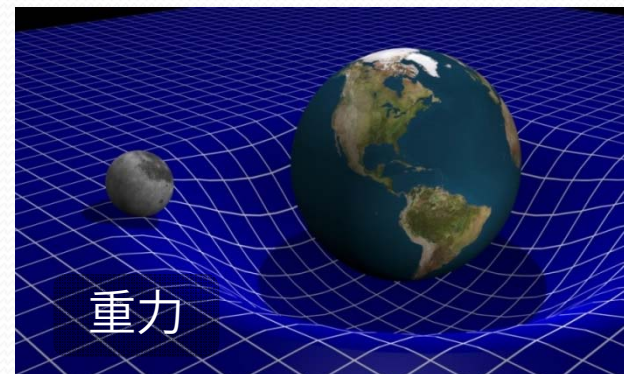
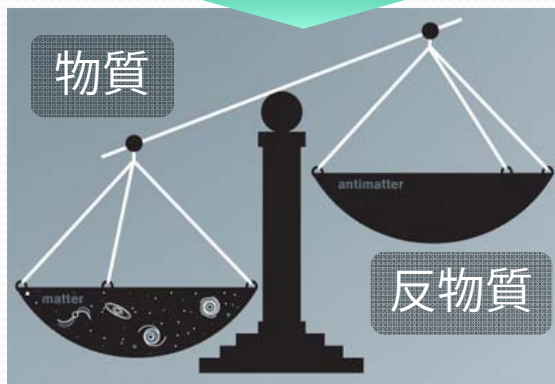
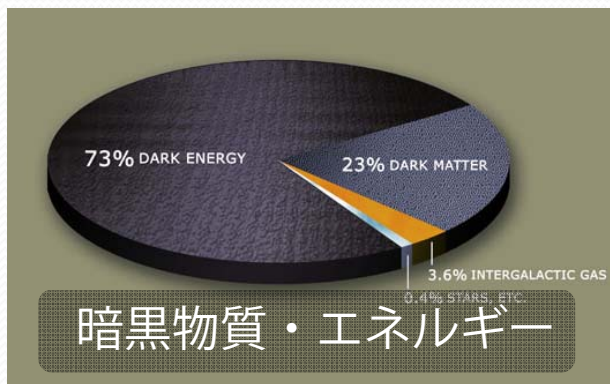
電弱相互作用  
Glashow-Weinberg-Salam理論

$\mathcal{L}(\psi, \phi) = \bar{\psi} \not{D} \psi - \psi^\dagger \phi - \frac{1}{2} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$   
 $D_\mu \phi = \partial_\mu \phi - i e A_\mu \phi$

Peter Higgs

強い相互作用  
量子色力学: QCD

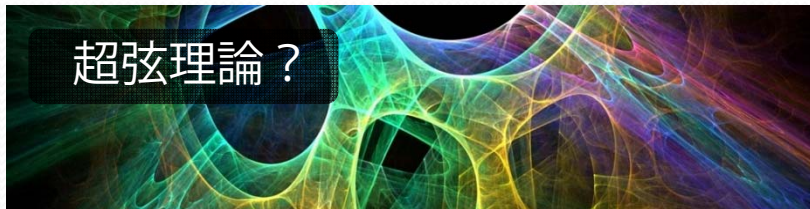
Gross Wilczek Politzer



標準理論を内包する究極の理論があるはず

# エネルギースケールから見た期待

超弦理論？

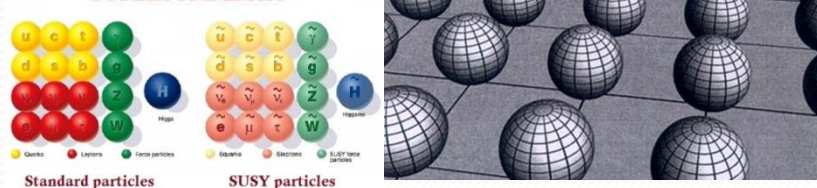


Planckスケール :  $O(10^{19})$  GeV

新物理(?)

超対称性?, 余剰次元? ... or else?

SUPERSYMMETRY

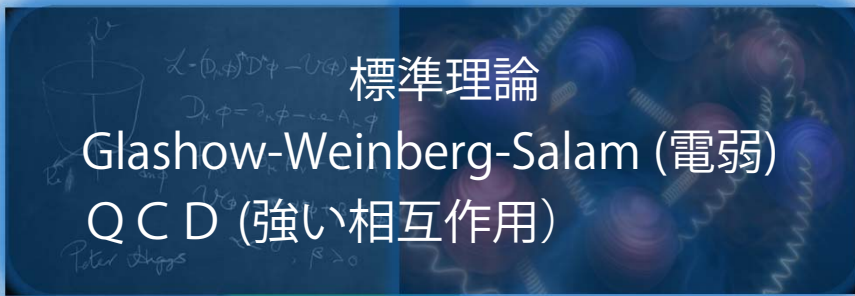


電弱スケール :  $O(100)$  GeV

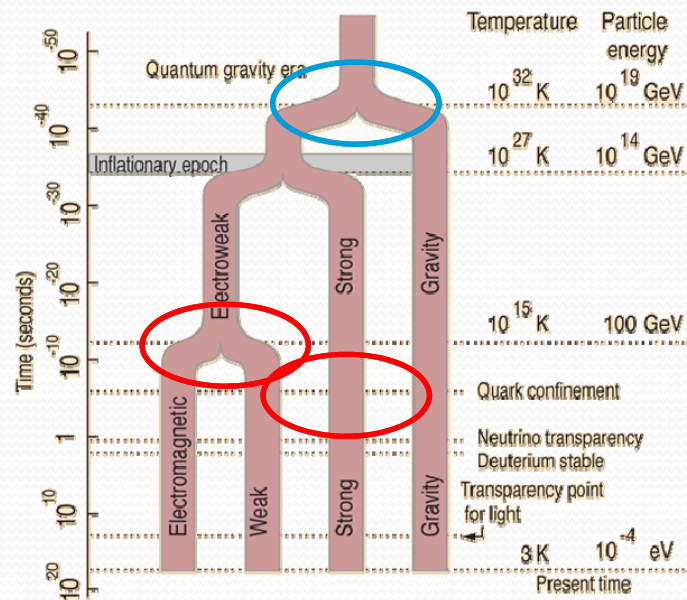
標準理論

Glashow-Weinberg-Salam (電弱)

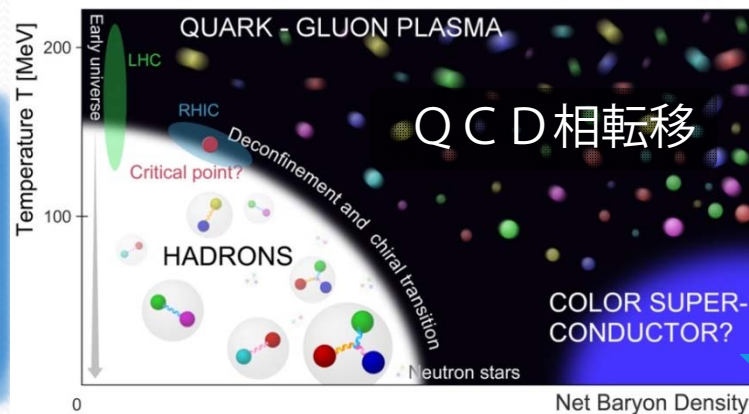
QCD (強い相互作用)



宇宙史と相転移: 電弱  $\leftrightarrow$  バリオン数生成?



宇宙の進化



高エネルギースケール

究極の自然法則と宇宙開闢の解明: 素粒子物理の最重要課題

# サブ課題A：三本柱

## ▶ 素粒子現象論の研究

- 国内外の精密実験プロジェクトと呼応する精密計算を実現し、標準理論を超える物理法則の発見を目指す
- 例： $b \rightarrow u$  遷移を記述する小林・益川行列要素  $|V_{ub}|$  を 5% で決定

## ▶ QCD 相転移の研究

- ビッグバンの過程で起こった相転移現象を定量的に解明
- 例：カイラル対称性を保った詳細研究により相転移次数を決定

## ▶ 超弦理論の研究 ⇒ KEK 西村さんの講演

- 究極理論の候補とされる超弦理論とそれに基づく宇宙開闢の理解を目指したシミュレーション



# 新物理探索と格子QCD計算

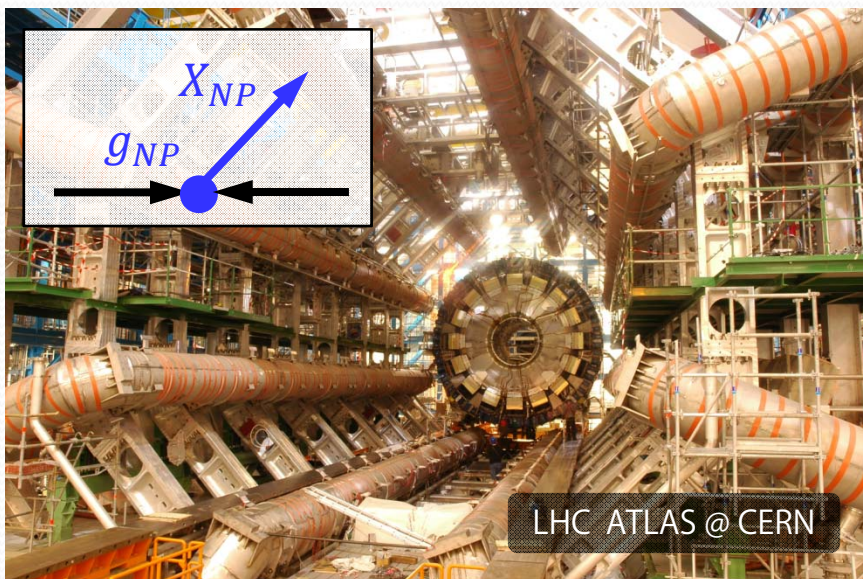
# 新物理は未説明

## エネルギー フロンティア：LHC ATLAS + CMS実験

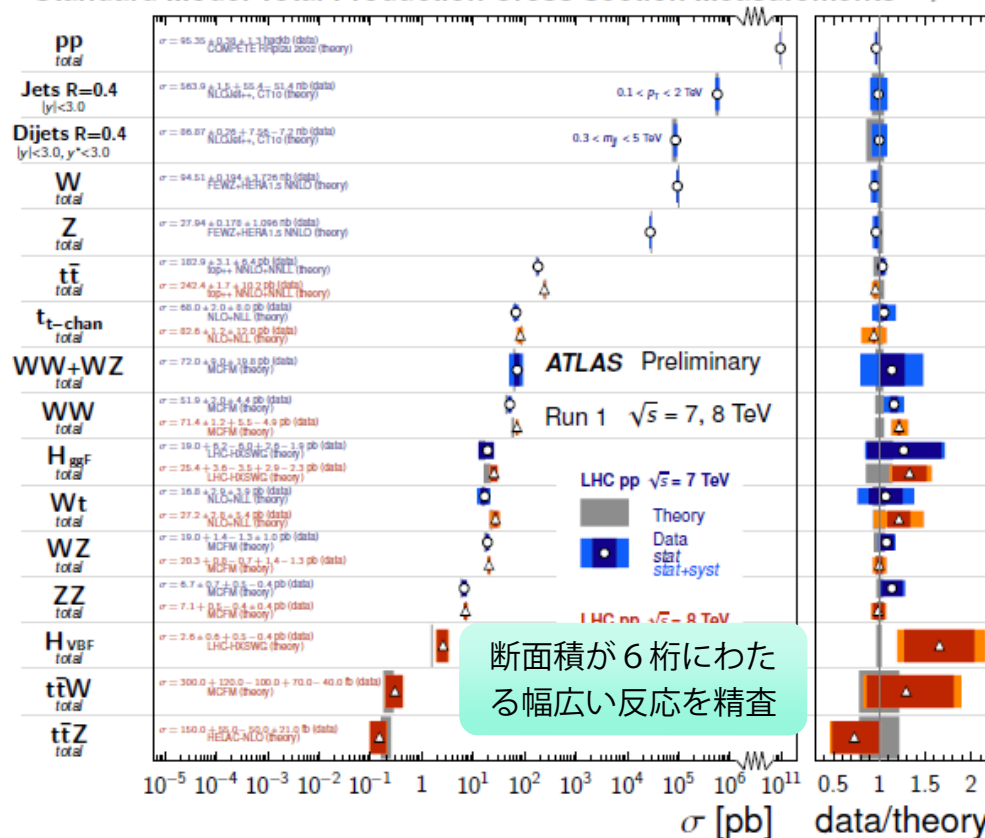
- 高エネルギー陽子の衝突によって新粒子・新現象の直接生成を目指す

Nagano, seminar @ KEK (2014)

Status: July 2014



### Standard Model Total Production Cross Section Measurements



- Run-1 (7-8TeV)
- Higgs粒子の発見！
- 新物理の手がかりなし...

Run-2,3 (13-14TeV, 2015-), HL-LHC (2025-)に期待

# intensity frontier, 間接探索実験

広いエネルギーレンジ、様々なテーマの精密実験

フレーバーファクトリー



SuperKEK/B+ Belle-II @ KEK

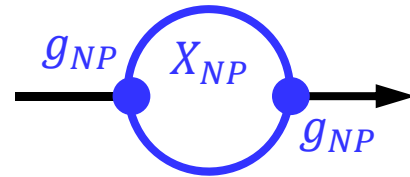
暗黒物質探索実験



XMASS @ Kamikoka

J-PARC E34

極冷  $\mu$  粒子実験



実験値 = 標準理論  
+ 新物理効果

格子 QCD の役割  
= QCD 補正の精密計算

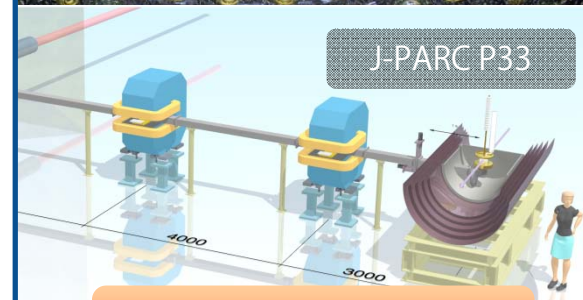
⇒ 新物理の機構を解明し、  
そのパラメタを決定する

ニュートリノ実験



T2K @ J-PARC+Kamioka

J-PARC P33



超冷却中性子実験



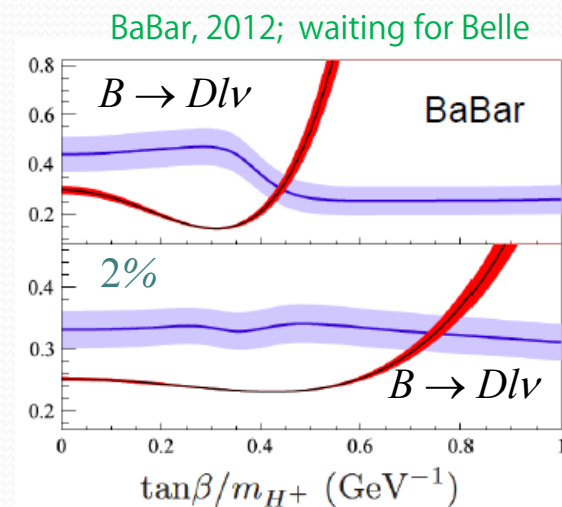
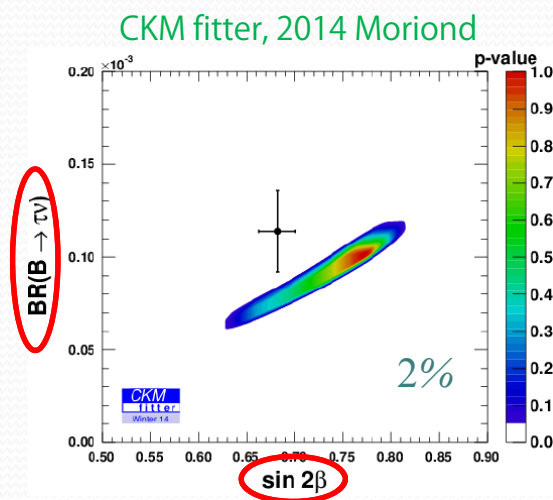
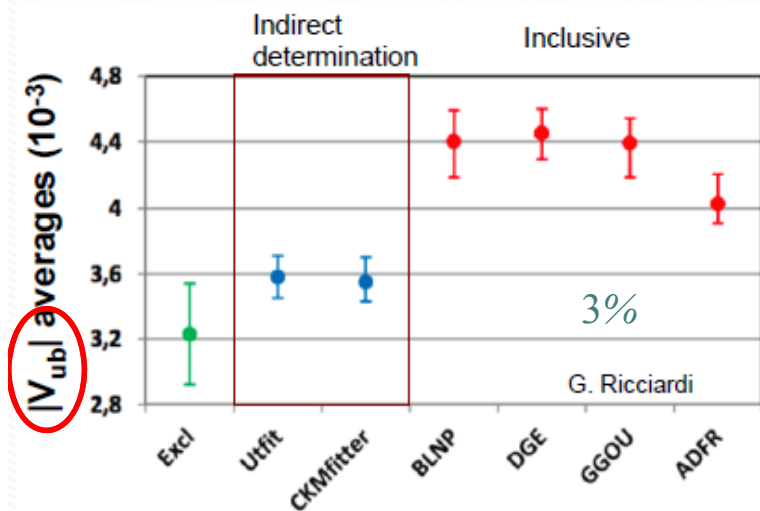
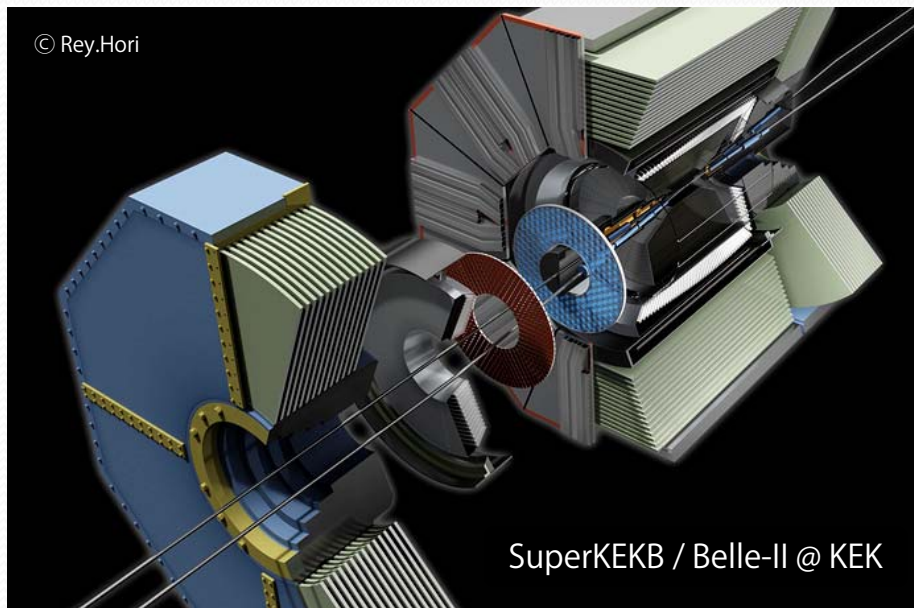
KEK+RCNP+TRIUNF+Winnipeg

国内外の最先端実験と連携してブレークスルーを創出

# フレーバーファクトリー実験

## SuperKEKB / Belle-II @ KEK

- 2017年に物理runを開始
- 2020年代初頭までに50倍の積分ルミノシティを貯める
- 豊富なB崩壊モードで新物理探索
- Belle, BaBarからのヒント有り
- (semi) leptonic崩壊で2-3%精度



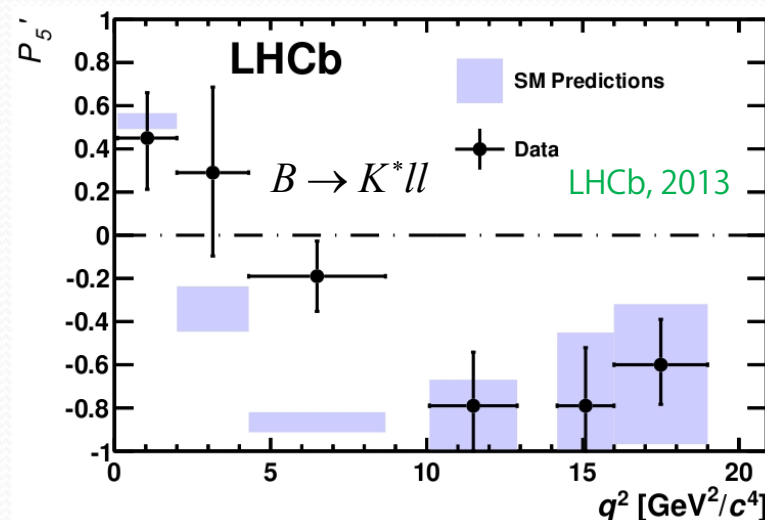
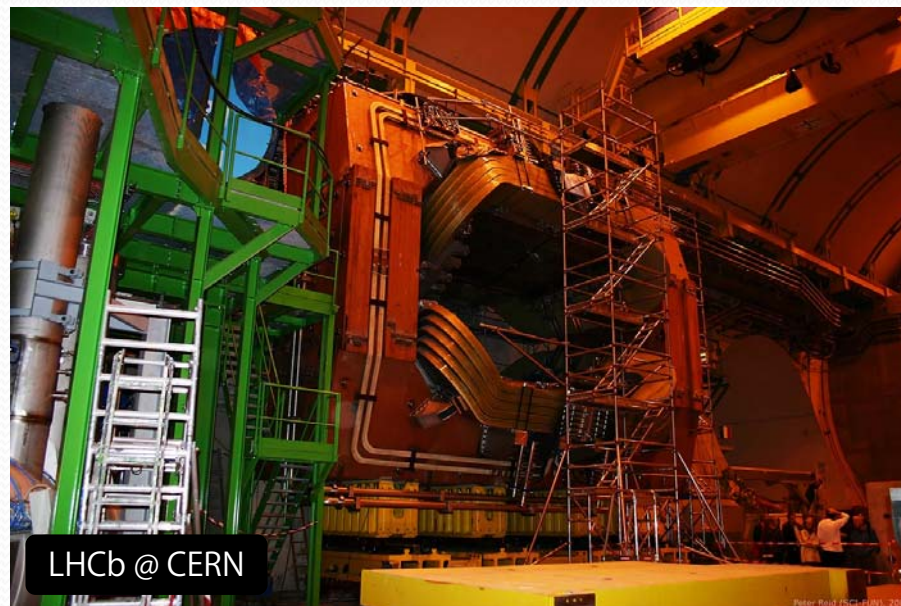


# フレーバーファクトリー実験

## LHCb @ CERN

- エネルギーを14TeVに上げた Run-2, 3を2022年までに行う
- 得意なモードがBelle-IIと異なる
  - ⇔ Belle-II:  $\nu$  を含むモード
  - ⇒ 相補的な国際競争
  - 標準理論の精密検証を大きく進展させると期待
- QCD精密計算は「両方に」必要

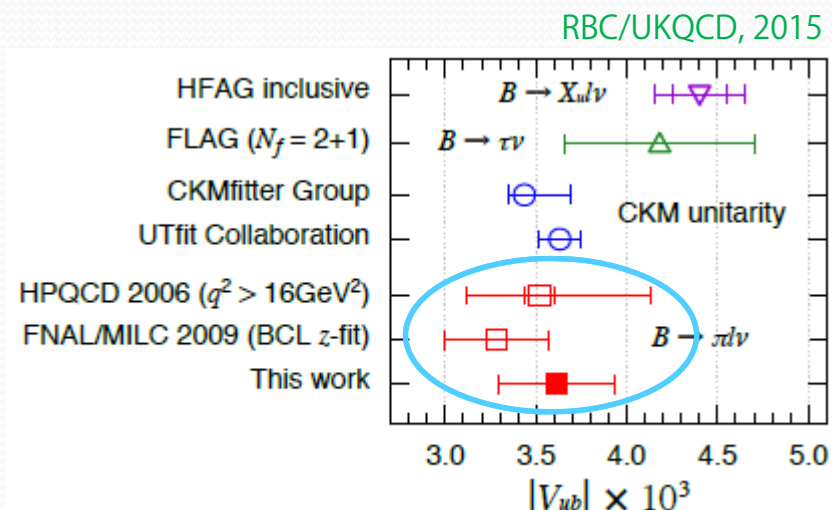
2020年代前半に、Belle-IIが行われる  
日本で、B崩壊行列要素の精密計算  
を行うことには大きな意義がある



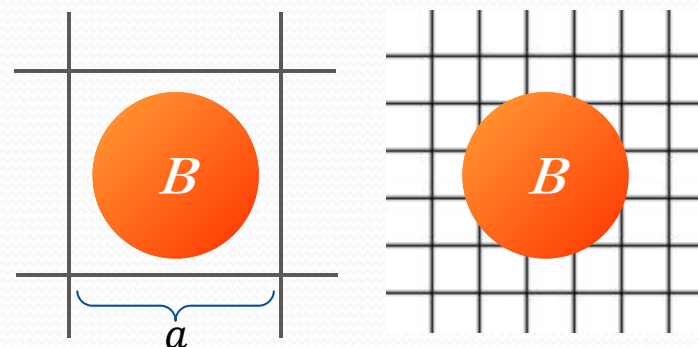
# フレーバーファクトリー実験

## Lattice QCDの現状と課題

- ポスト京応募様式より
  - 小林・益川行列要素  $|V_{ub}|$  を 5% で決定
  - 現状では 10% 程度の大きな不定性
  - 重い b クォークの **直接計算** を実現する



- $B$  中間子を取り扱える細かい格子が必要!!
  - 計算コストは  $a^{-6}$  で急速に増大  
( $m_b / 2\text{GeV}$ )<sup>6</sup>  $\sim$  100倍!!! (x10 カイラル)
  - 現状: 有効理論を用いた間接計算(10%誤差)



ポスト京+作用・アルゴリズムの改良により、bクォークの直接計算を実現

$|V_{ub}|$ を含む幅広い物理量の高精度計算  $\Rightarrow$  新物理解明を推し進める

# フレーバーファクトリー実験

## K中間子の物理：新しい計算の開拓

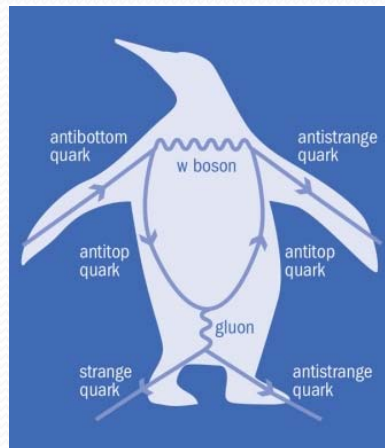
- (semi) leptonic崩壊、混合は既に1%で精査 ⇒ 主戦場は複雑な稀崩壊に

### ▶ $K \rightarrow \pi \pi$

- $\varepsilon'/\varepsilon = 1.66(0.23) \times 10^{-3}$  (PDG 2014)

- FNAL KTeV, E773, E731
- CERN NA48, CPLEAR, NA31

- 実験との競争以前に信頼できる標準理論計算がない!



### ▶ $K \rightarrow \pi \nu \nu, \pi l l$

- latticeではまだ手つかず



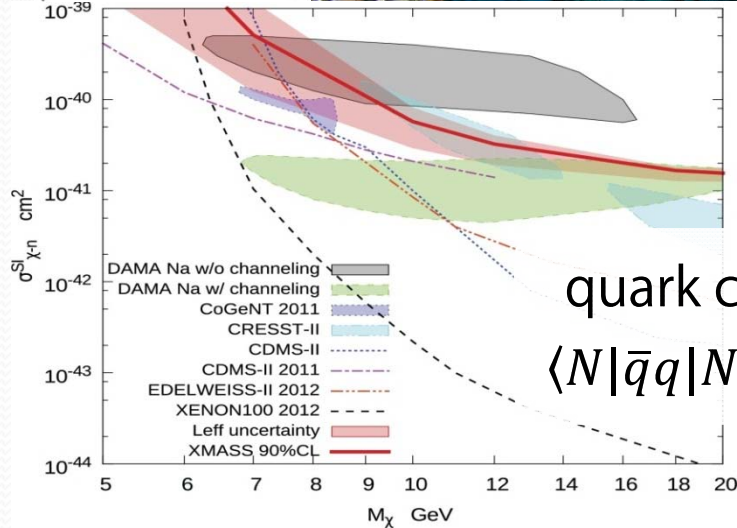
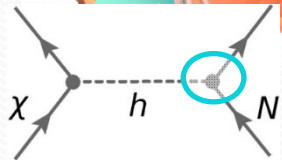
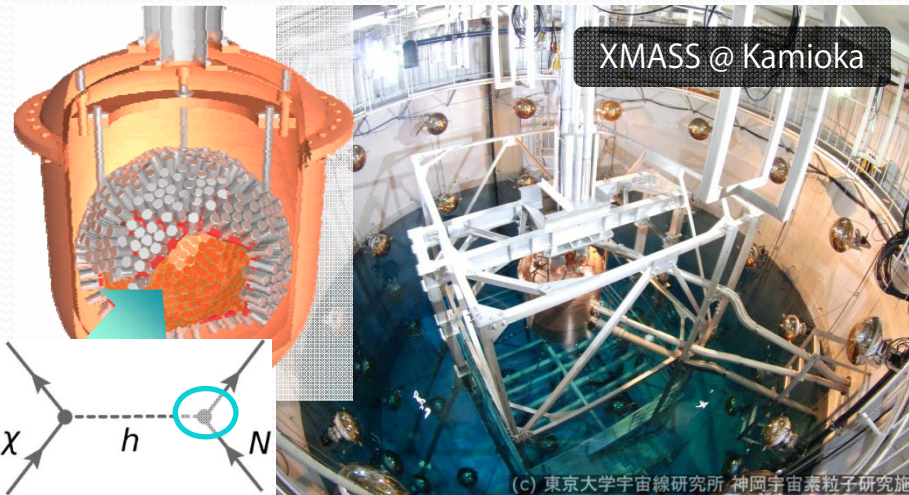
標準理論で抑制 ⇒ 大きな新物理効果(?)

カイラル対称性を保ったクリーンな定式化が有利

# バリオン行列要素

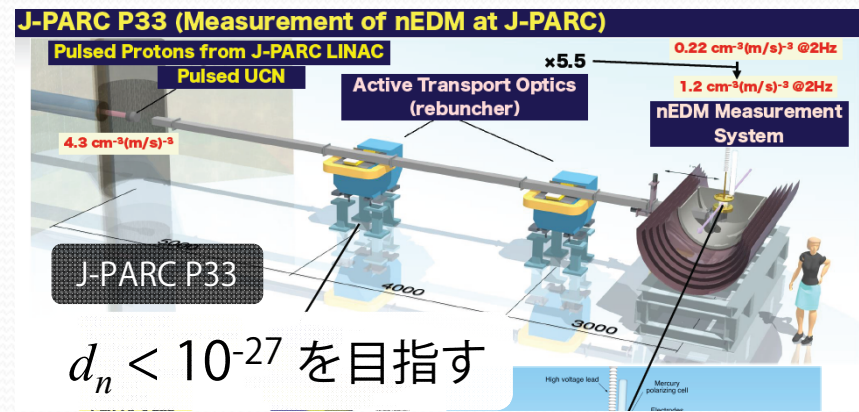
バリオン1体問題も新物理解明において重要

▶ 暗黒物質直接探索実験

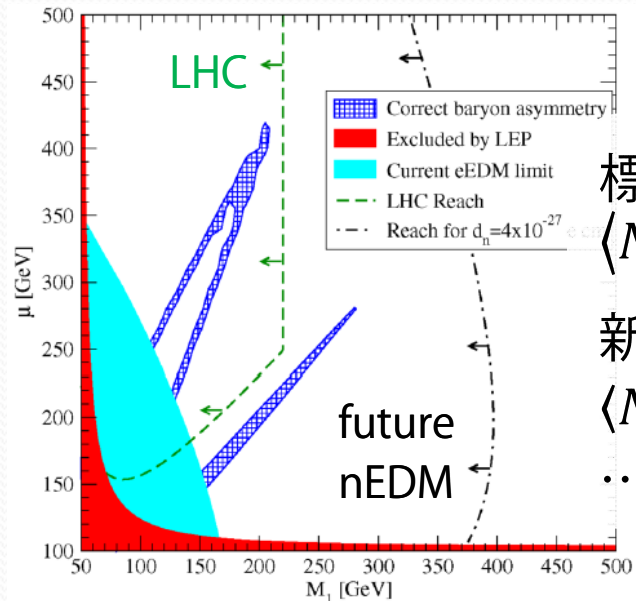


quark content  
 $\langle N | \bar{q}q | N \rangle$ が必要

▶ 中性子EDM精密測定



$d_n < 10^{-27}$  を目指す



Ramey-Musol, 2008

標準理論  
 $\langle N | F \tilde{F} | N \rangle$ ,  
 新物理 MEs  
 $\langle N | \bar{q} F \sigma q | N \rangle$ ,  
 ...が必要

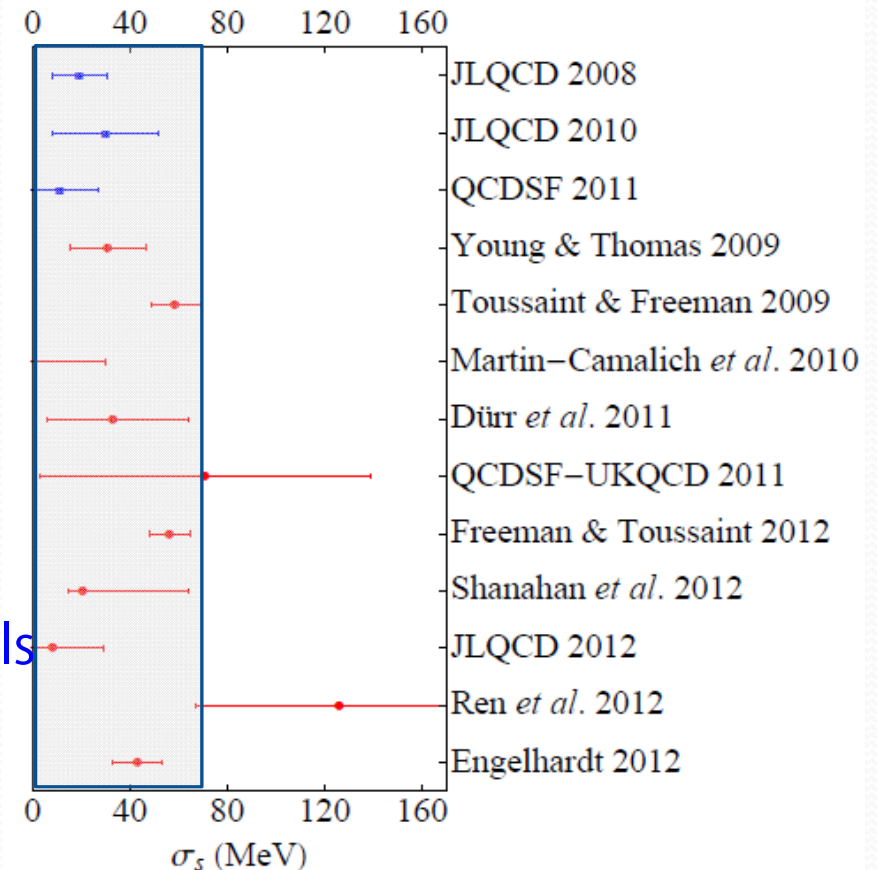
# バリオン行列要素

## nucleon strange quark content

Young @ Lattice 2012

$$y \equiv \frac{\langle N | \bar{s}s | N \rangle}{\langle N | \bar{u}u | N \rangle} = 0.00 - 0.10, \quad \delta y \geq 15\%$$

- $\mu N \rightarrow eN$  conversion
- J-PARC E21 (COMET) (2016-?)
- LFV inside  $N$  (Cirigliano et al., 2009)
- $(\bar{e}\mu)(\bar{q}q), (\bar{e}\gamma_\mu\mu)(\bar{q}\gamma^\mu q) \notin \mathcal{L}_{\text{NP,LFV}}$
- $\delta y \sim 0.05$  to test general BSM models



- $\Phi$ 中間子質量への媒質効果

- KEK E325 : -35MeV @ 核物質密度; J-PARC E16
- Gubler-Ohtani, 2014 : モデル解析  $\Rightarrow y < 0.04 \rightarrow$  実験と逆符号の補正

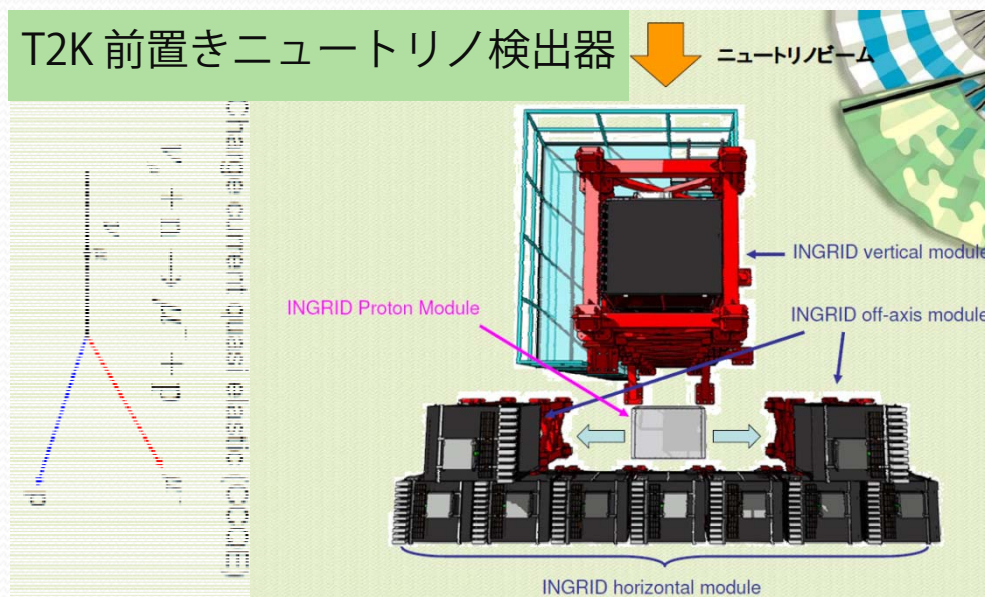
# バリオン行列要素

$\langle N|A|N\rangle, \langle N|T|N\rangle, \langle N|P|N\rangle$  も計算したい...

木河 @特定領域「フレーバー物理の新展開」研究会

## ▶ neutrino 実験

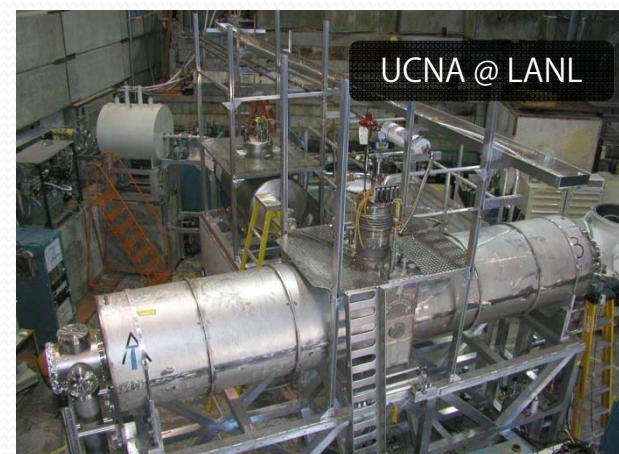
- neutrino検出イベント
  - $\nu n \rightarrow lp$  (CCQE)
  - $\nu X \rightarrow \nu X$  (neutral current)
- 解析に行列要素  $\langle p|A_\mu|n\rangle$  が必要 (特に $q^2$ 依存性)



## ▶ 中性子 $\beta$ 崩壊の精密測定

- 超冷却中性子
- $(\bar{\nu}l)(\bar{u}d), (\bar{\nu}\sigma_{\mu\nu}\mu)(u\sigma^{\mu\nu}d) \notin \mathcal{L}_{\text{NP}, d \rightarrow ul\nu}$
- $g_S, g_T \sim 10\% \Leftrightarrow \text{LHC } 14\text{TeV } 300\text{fb}^{-1}$

ポスト京では包括的な計算を推進すべき



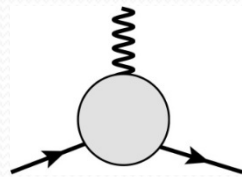
# $\mu$ 粒子異常磁気能率 $g-2$

## 標準理論検証の precision frontier

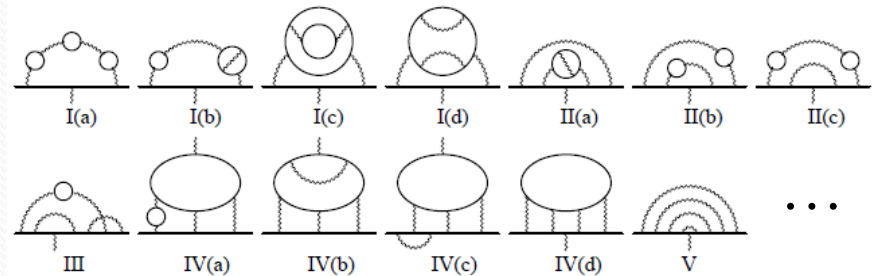
### ▶ 標準理論



=



⇒

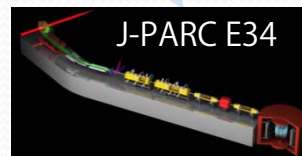
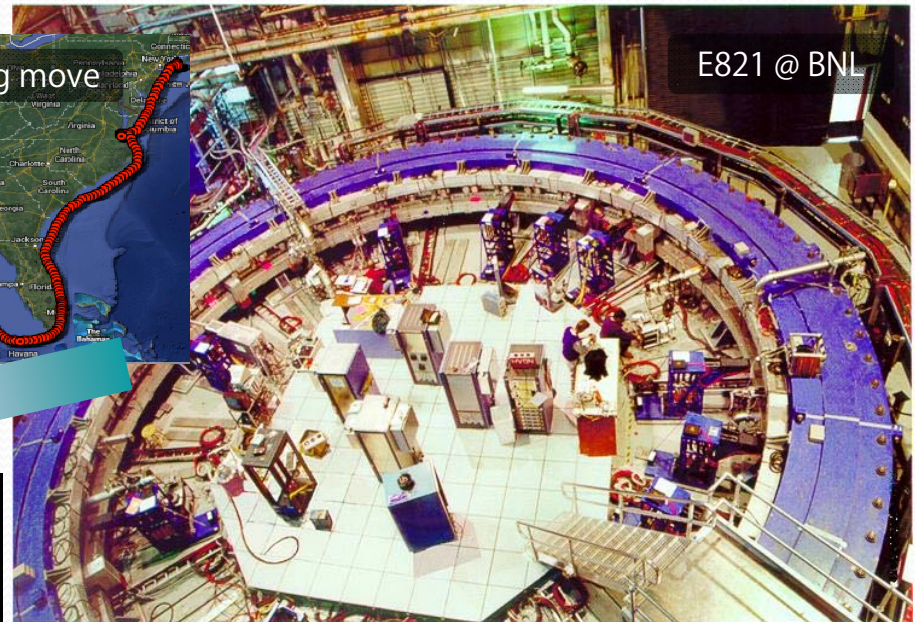
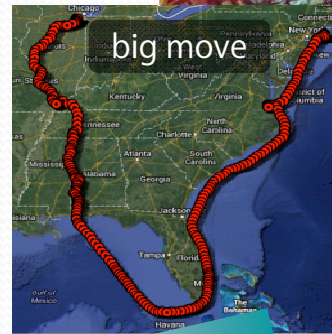


Aoyama-Hayakawa-Kinoshita-Nio, 2012

- QED 5-loop計算 : 0.42 ppm !

### ▶ 実験

- BNL E821 (2006) : 0.54 ppm !
- 2010年代に 0.1ppm に削減
- FNAL E989 (2016-2018?)
- J-PARC E34 (2017-?)



実験と標準理論の間に  $3.3\sigma$  のずれ ⇒ 新物理への示唆

# $\mu$ 粒子異常磁気能率 $g-2$

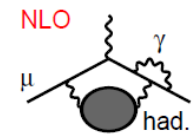
Nomura @ Flavor Phys. Workshop 2013

## ▶ 理論誤差の内訳

- QED : 0.001 ppm
- EW : 0.02 ppm
- QCD : 0.42 ppm

レプトンの精密実験  
なのに、ハドロンの  
不定性が100%!!!!

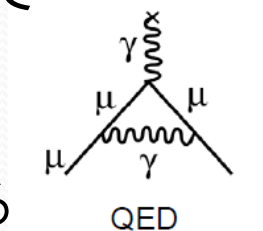
QED contribution	11 658 471.808 (0.015)	Kinoshita & Nio, Aoyama et al
EW contribution	15.4 (0.2)	Czarnecki et al
Hadronic contributions		
LO hadronic	694.9 (4.3)	HLMNT11
NLO hadronic	-9.8 (0.1)	HLMNT11
light-by-light	10.5 (2.6)	Prades, de Rafael & Vainshtein
<b>Theory TOTAL</b>	<b>11 659 182.8 (4.9)</b>	
<b>Experiment</b>	<b>11 659 208.9 (6.3)</b>	world avg
<b>Exp - Theory</b>	<b>26.1 (8.0)</b>	<b>3.3 <math>\sigma</math> discrepancy</b>



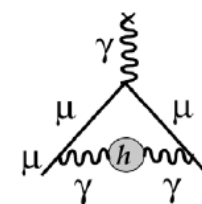
(in units of  $10^{-10}$ . Numbers taken from HLMNT11, arXiv:1105.3149)

## ▶ 0.1 ppm達成に向けて

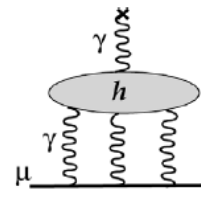
- HVP : 10倍改善
- LbL : まずは信頼できる  
第一原理計算



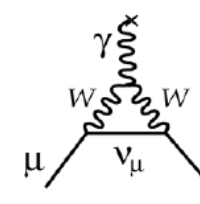
Up to 5-loop leading  
Kinoshita et al



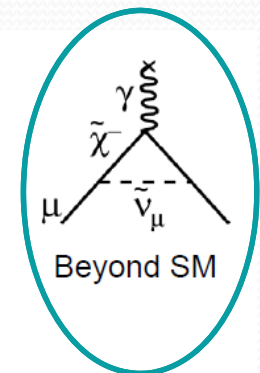
Hadronic vacuum  
polarization (HVP)



Light-by-light  
scattering  
(LBL)



Electroweak  
at two-loop  
level



Beyond SM





# 検討状況

# 研究体制と準備状況

- Q
- シ
- コ
- 超
- Hy
- の
- 実
- 進
- 格
- Be

Belle II				SM or fit	Belle 2014	Babar 2014	Belle II	
Group	Observable	Mode	Expectation				5/ab	50/ab
<a href="#">φ<sub>1</sub>/φ<sub>2</sub> WG page</a>	sin(2φ <sub>1</sub> )	B → J/ψ K <sub>S</sub>		0.667 ± 0.023 ± 0.012(1.4°)			0.7°	0.4°
	S	B → φ K <sub>S</sub> <sup>0</sup>		0.90 <sup>+0.09</sup> <sub>-0.19</sub>			0.053	0.018
		B → η' K <sub>S</sub> <sup>0</sup>		0.68 ± 0.07 ± 0.03			0.028	0.011
		B → K <sub>S</sub> <sup>0</sup> K <sub>S</sub> <sup>0</sup> K <sub>S</sub> <sup>0</sup>		0.30 ± 0.32 ± 0.08			0.100	0.033
		B → ππ,		(85 ± 4)° (Belle + Babar)			2°	1°
		B → ρπ,						
<a href="#">φ<sub>3</sub> WG page</a>	φ <sub>3</sub>						6°	1.5°
Hadronic B <a href="#">WG page</a>	A						0.07	0.04
Semileptonic & Leptonic <a href="#">WG page</a>	V <sub>cb</sub> [10 <sup>-3</sup> ] inclusive			41.6(1 ± 0.024 <sub>stat</sub> )			1.2%	
	V <sub>cb</sub> [10 <sup>-3</sup> ] exclusive	B → D <sup>*</sup> ℓν					1.8%	1.4%
	V <sub>ub</sub> [10 <sup>-3</sup> ] inclusive	B → X <sub>u</sub> ℓν					3.4%	3.0%
	V <sub>ub</sub> [10 <sup>-3</sup> ] exclusive	B → π ℓν					4.4%	2.3%

Decide maximum of s key observable leaving a few spaces for new ideas

Please tell us the responsible person for each process !

Theorists to fill!  
Detailed explanation can be added to the linked page.

Experimentalists to fill!  
Simulation result can be added to the linked page.

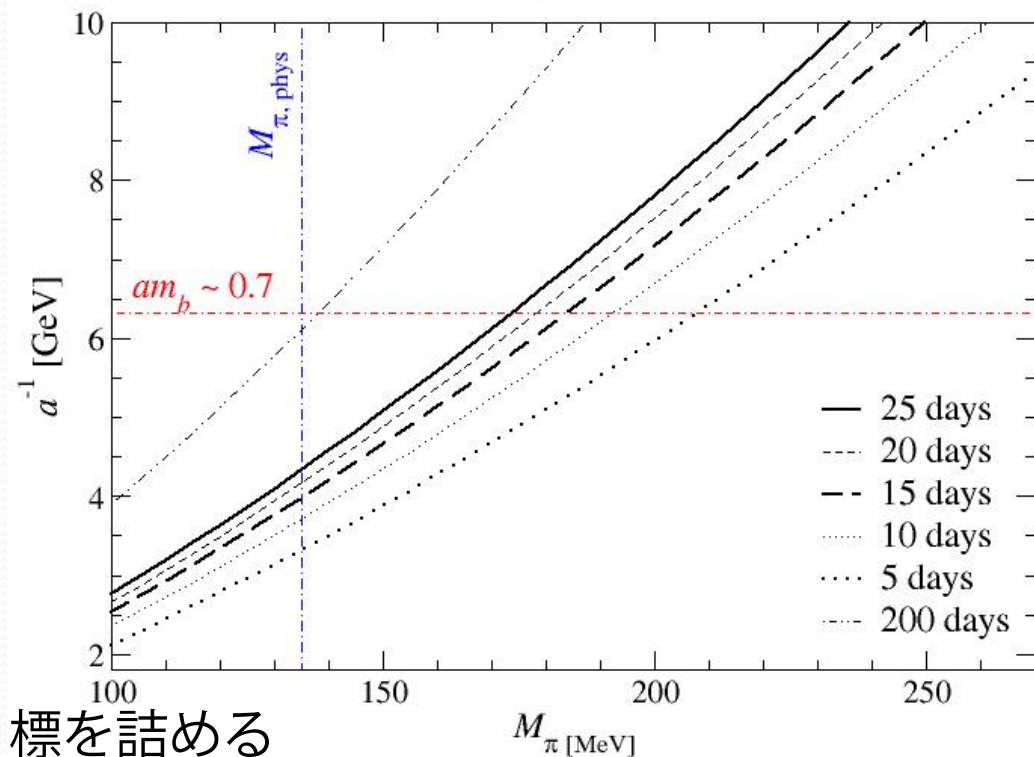
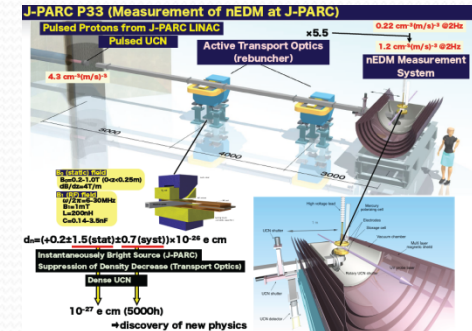
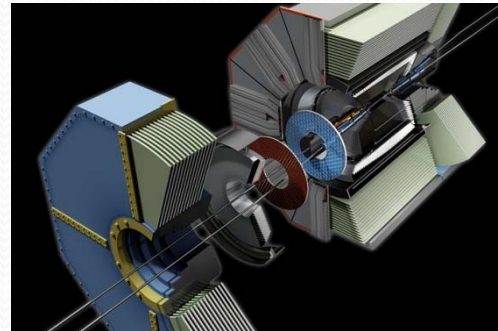
Simulation result can be added to the linked page.

# 研究体制と準備状況

- ▶ キックオフミーティング: 2015/02/16
  - QCD相転移と共同で開催
  - 協力機関の研究者+多数の参加者で半日議論
  - 格子計算の現状と展望、実験計画からの要求、海外の状況と連携可能性
    - KEK 金児：実験計画と連携した素粒子現象論の研究の可能性
    - 理研BNL 出淵：USの将来計画と、US-JP連携の可能性
    - 新潟大 江尻：有限温度密度系 - 新しいアイデアに基づく研究
    - 名大KMI 青木(保)：組織的有限温度計算の可能性
    - 広島大 石川：ポスト京に向けた最適化の計画と課題

# 素粒子現象論の研究

- 国内外の実験計画を調査、国際競争・協力を視野に入れ、鍵となる物理量のリストアップと目標精度の検討
- フレーバーファクトリーとBの物理： $B \rightarrow lv$ の崩壊定数、 $B \rightarrow \pi lv$ の形状因子を5%以下、...
- 現在のシミュレーション性能
  - ⇒ ポスト京での予想・検討
  - どこまで細かくできるか、...
  - アルゴリズム改良の余地有り
- 来年度に具体的計画・定量的目標を詰める



# QCD相転移の研究

新潟大 江尻

- 低密度、高密度領域での  
主要なテーマを議論

## まとめ

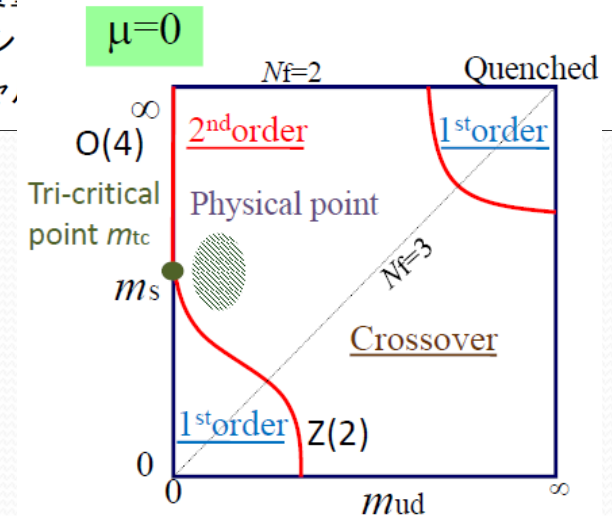
### 狙えそうなターゲット

- 相転移の次数のクォーク質量依存性
  - 2-flavor カイラル極限, 3-flavor 臨界質量
  - 三重臨界点
  - 低密度での臨界質量の変化
- 状態方程式(低密度領域)
  - スタッガードは完了
  - Wilsonも競合相手がすでにある
  - 新しい方法では、Gradient Flowを用いた方法
    - ・ 従来の方法の計算と同時にできる
  - 粒子数揺らぎ、比熱、輸送係数(粘性)など

高密度を狙った研究は、大規模計算の脇で続けたい

## 高密度領域への挑戦

- 臨界点は低密度にはない。(RHICビームエネルギー走査実験)
- Reweighting法
  - オーバーラップ問題、符号問題の解決
- 直接シミュレーションを行う。
  - 複素ランジェバン法
  - Lefschetz thimble
- カノニカル法(クォーク数を固定する方法)
- 周辺から攻める。
  - 相転移のクォーク質量依存性(物理占だけでなく)
  - 純虚数化学ポテンシ
  - 複素化学ポテンシ



# まとめ

## ▶ 素粒子現象論の研究

- 標準理論を超える新物理の探索を通して、究極の自然法則を解明
  - Bの物理の直接精密計算： $\leq 5\%$
  - バリオン行列要素の包括的計算：5-10%
  - カイラルフェルミオンを用いた新しい計算 (K, g-2, EDM)：10-30%
- 包括的研究：新物理の効果が見つからない  $\Rightarrow$  新物理模型への制限
  - 計算手法の改良：汎用的なクォークプロパゲータの再利用
  - KEKの大型シミュレーション等で経験を蓄積中 + 改良 + ポスト京
- 国内外の最先端実験と連携してブレークスルーを創出
- 実験との連携体制の構築も推進：B2TIP for Belle-II など