

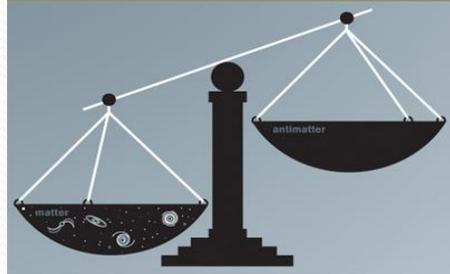
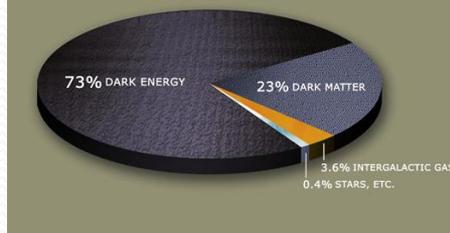
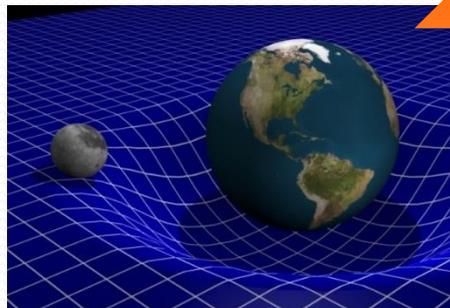
格子QCDシミュレーションと 新物理探索

サブ課題A：素粒子現象論

KEK, 総研大 金児 隆志

「京からポスト京に向けて」シンポジウム、2017年 2月 16日

素粒子現象論への応用



暗黒物質
反物質の消失
...

高エネルギー



「超弦理論」

Planckスケール : $O(10^{19})$ GeV



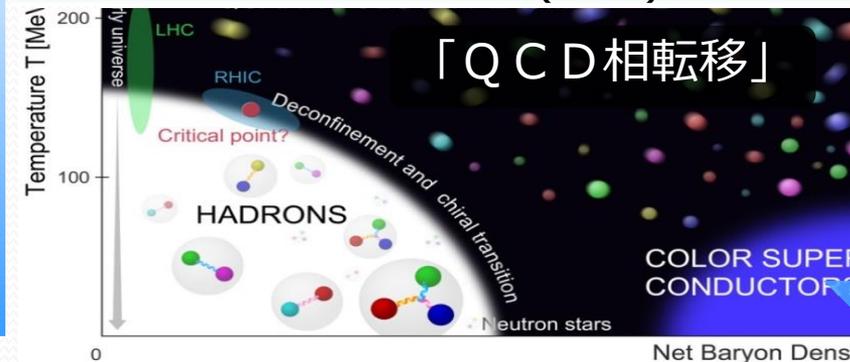
SUPERSYMMETRY

新物理

Standard particles

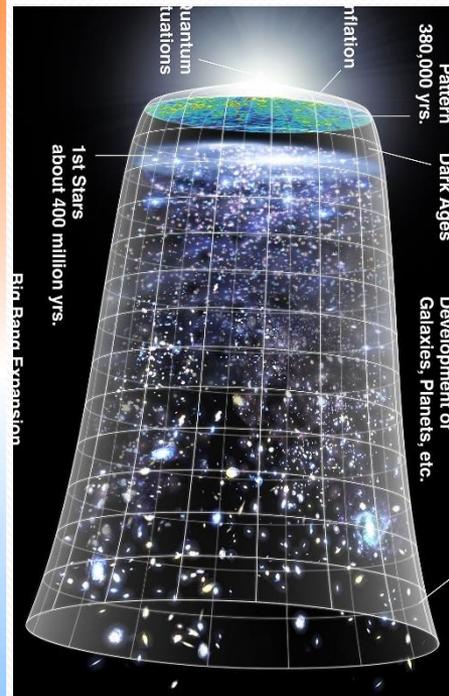
「素粒子現象論」

電弱スケール : $O(100)$ GeV



「QCD相転移」

インフレーション



バリオン数生成
QCD相転移

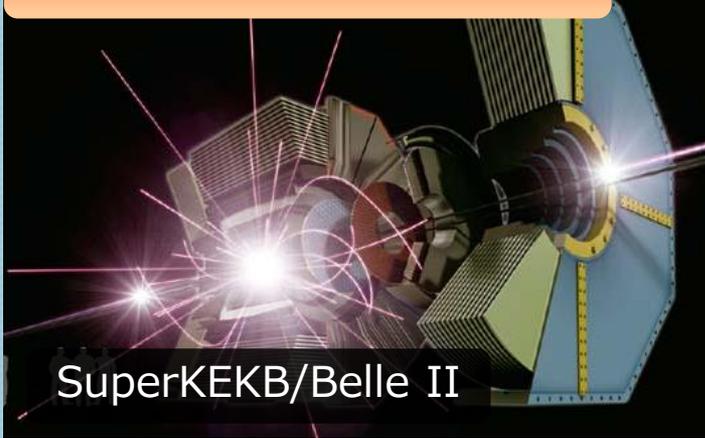
宇宙の進化

連携して「究極の自然法則と宇宙開闢の解明」を目指す

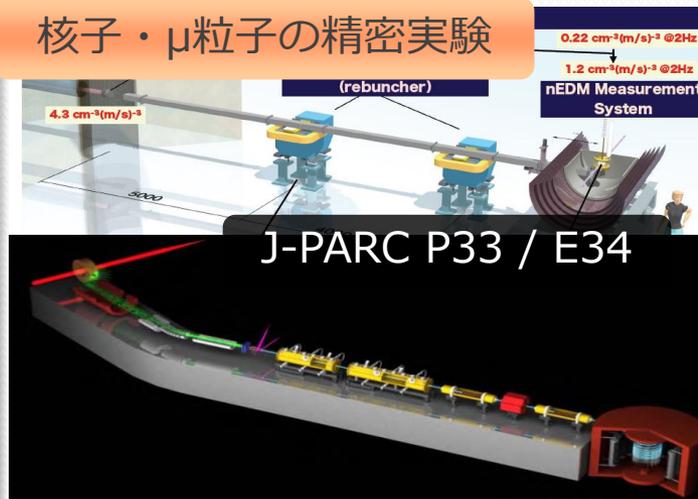
インテンシティ・フロンティア

様々な素粒子・ハドロンの反応・性質の精密測定実験

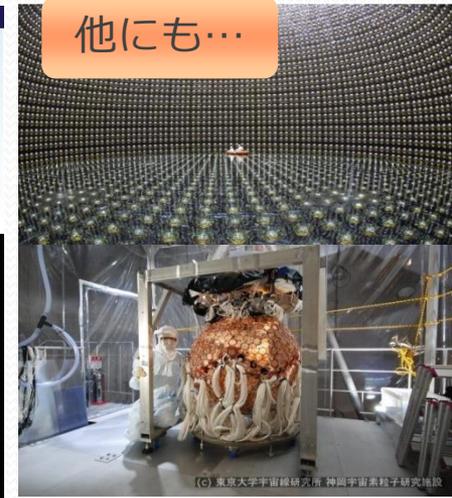
フレーバーファクトリー実験



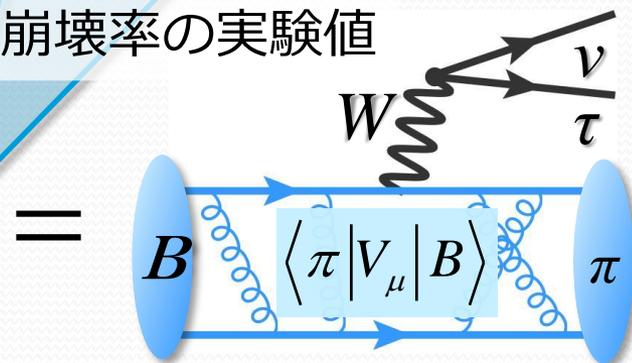
核子・ μ 粒子の精密実験



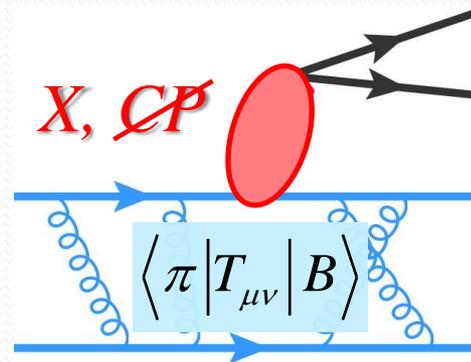
他にも...



e.g. 崩壊率の実験値



+



格子QCD：
強い相互作用の効果
を記述するハド
ロン行列要素の非
摂動論的計算

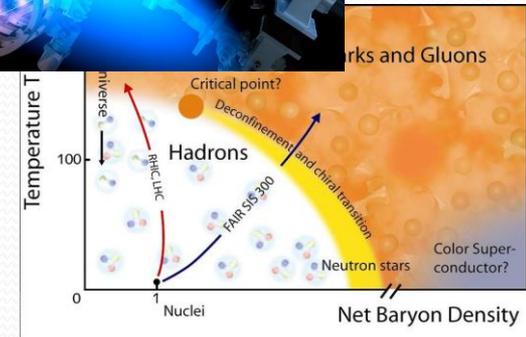
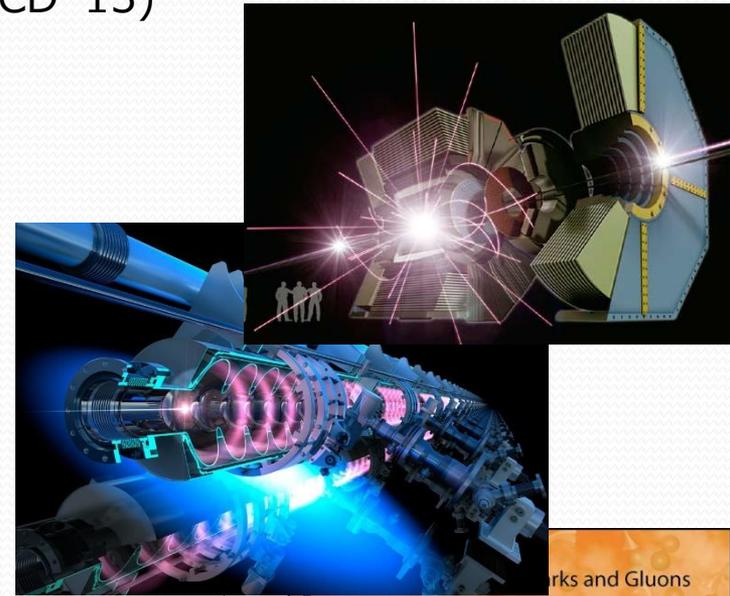
実験に見合う高精度計算・包括的計算を目指す

長期的な研究計画

カイラル対称性を保つ理論的にクリーンな定式化を採用

軽い π 中間子, ...; 格子上で保つのが困難 (Nielsen-Ninomiya '81)

- 高速化したMöbius domain-wall 作用 (JLQCD '13)
- 離散化誤差の制御
 - 奇数次誤差 $O(a^{2n+1})$ を禁止
- 広い応用範囲
 - 非物理的な演算子混合 \Rightarrow nEDM, ...
 - 摂動計算@ $a=0$ とのマッチング $\Rightarrow \alpha_s, m_q$
- QCD相転移の研究との親和性
 - ユニバーサリティ、 $U(1)_A$ 対称性の回復
- カイラル対称性を破る作用 \Rightarrow 20%小さい a, M_π

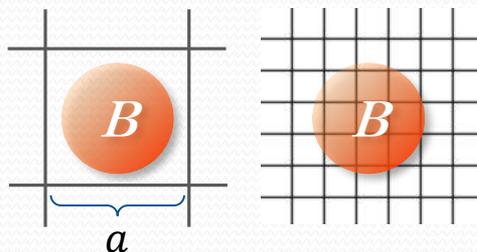


様々な実験と協力可能な包括的な精密計算

長期的な研究計画

進行中のシミュレーション: $a^{-1} \lesssim m_b, M_\pi > M_{\pi, \text{phys}}$

- 配位生成は完了
- チャームの物理
- m_b への外挿

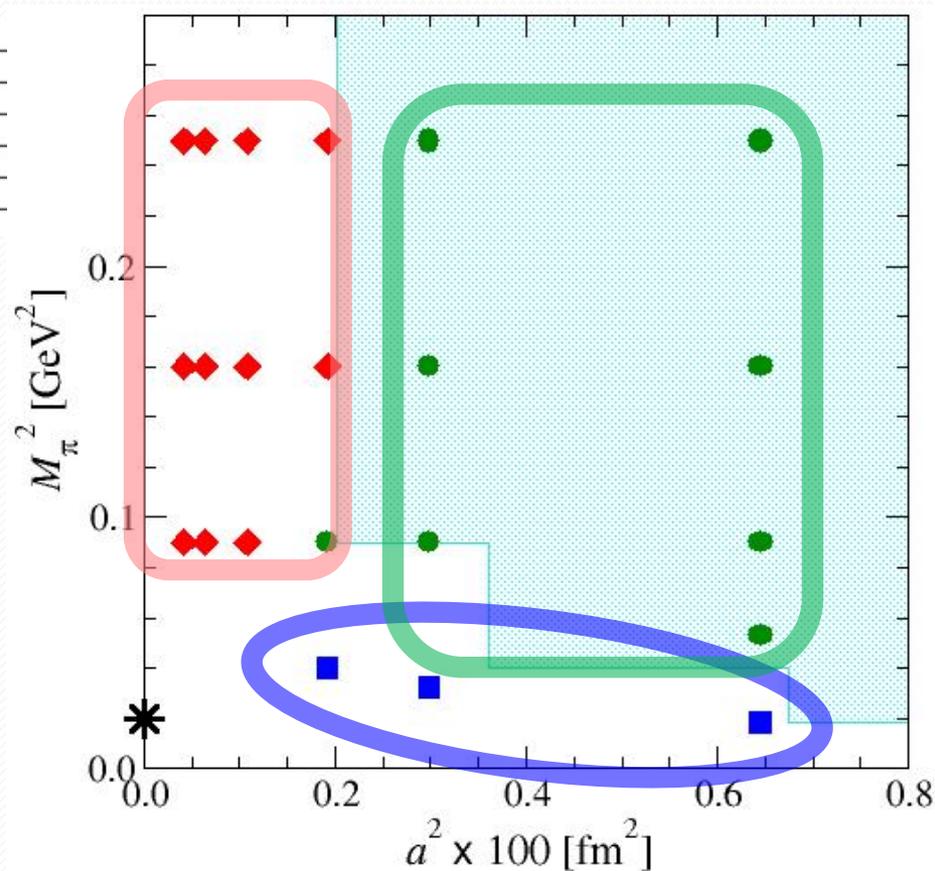


bクォーク直接計算: $a^{-1} \lesssim 9.6 \text{ GeV} > m_b$

- Bの物理の高精度計算
- 配位生成: 11.1 PFLOPS・年

物理点シミュレーション: $M_\pi \gtrsim M_{\pi, \text{phys}}$

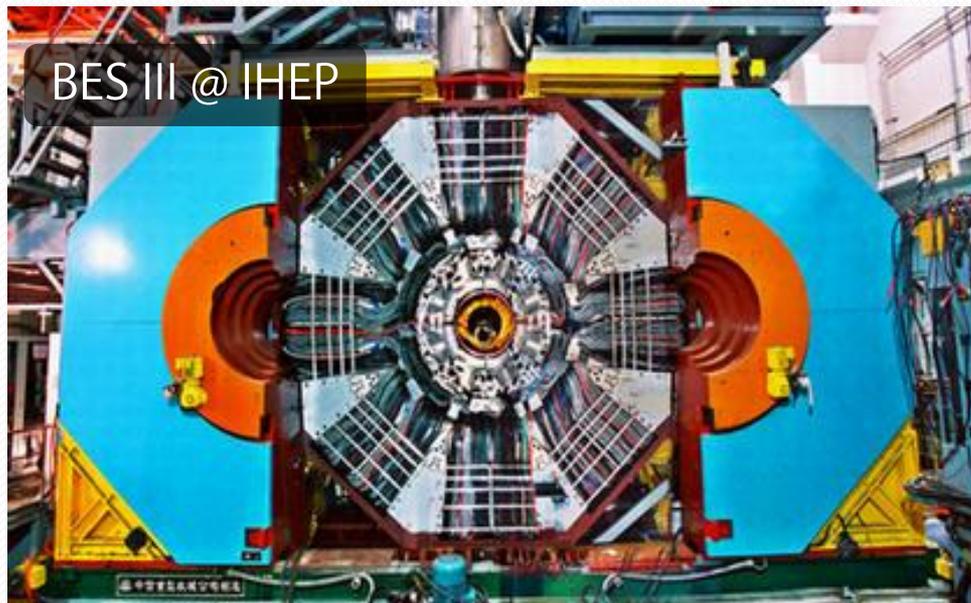
- 核子行列要素などの包括的計算
- 配位生成: 8.75 PFLOPS・年



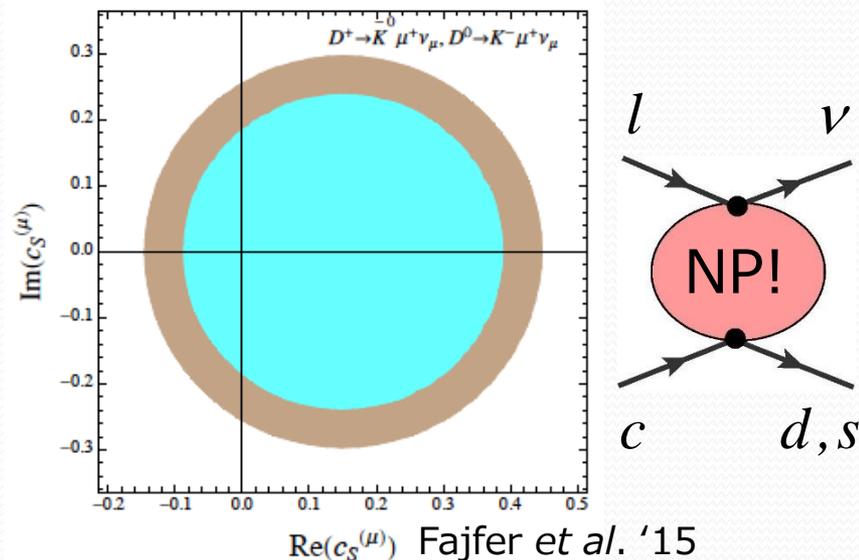
ポスト京 50PFLOPS・年 \Rightarrow 1/2で配位生成完了 + 残りで物理量計算 + HPCI

D中間子崩壊の研究

Bの物理への第一歩? \Rightarrow これ自身、重要なテーマ



$D \rightarrow K \mu \nu \Rightarrow$ NP scalar op.



崩壊率は c, B ファクトリーで精密に測定
(CLEO-c, BES III, BaBar, Belle (II))

新物理相互作用の結合定数の評価

CKM 2016

- レプトニック崩壊 $D_{(s)} \rightarrow l \nu$: LQCD ($f_{D_{(s)}}$) $< 1\%$ \Leftrightarrow exp $\sim 2\%$
- セミレプトニック崩壊 $D \rightarrow \pi, K l \nu$: LQCD ($f_+(0)$) $\sim 4\%$ \Leftrightarrow exp $\sim 1\%$

D中間子崩壊の研究

崩壊定数・形状因子の計算 ⇒ 小林・益川行列要素の決定

TK @ Lattice 2016

レプトニック崩壊 $D \rightarrow lv$ ($l=e, \tau, \mu$)

- 計算完了、2%精度

$$f_D = 218.0(1.7)(3.6) \text{ MeV}$$

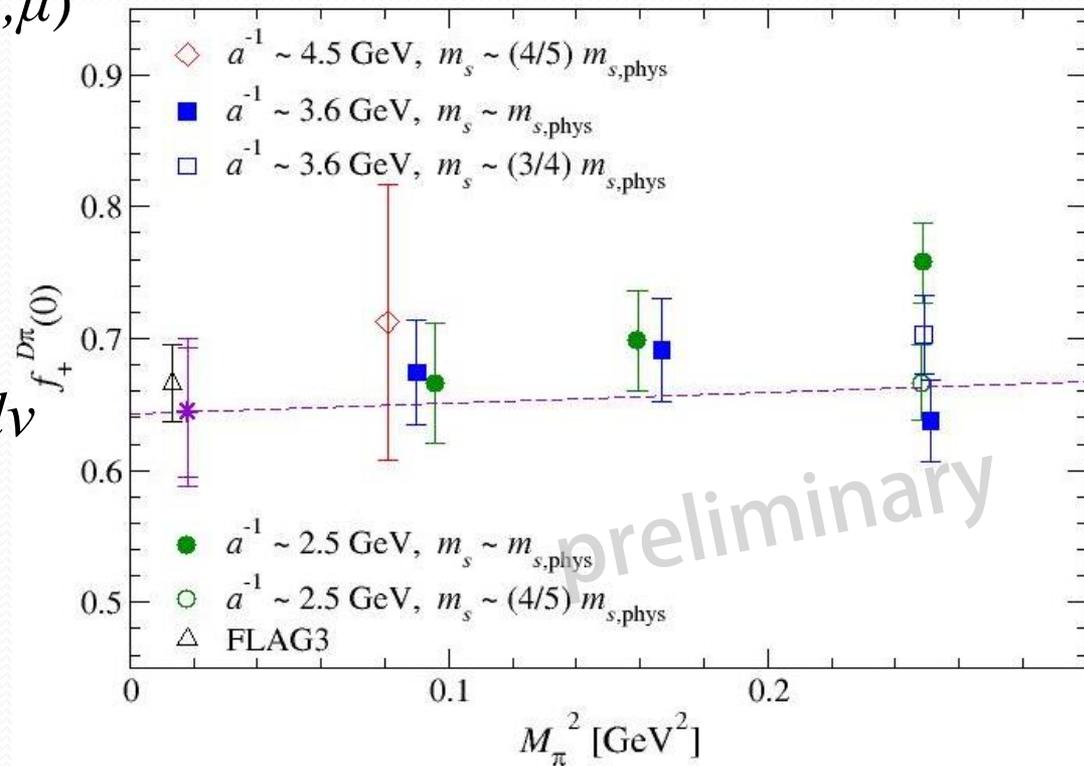
$$\Rightarrow |V_{cd}| = 0.211(4)_{\text{th}} (5)_{\text{ex}}$$

セミレプトニック崩壊 $D \rightarrow \pi, Kl\nu$

- 進行中、最も小さい a, M_π

$$f_+^{D\pi}(0) = 0.644(49)(45)$$

$$\Rightarrow |V_{cd}| = 0.221(23)_{\text{th}} (3)_{\text{ex}}$$



レプトニック(P,A), セミレプトニック(S,V,T)は両方とも重要
チャームクォーク質量で離散化誤差は小さく制御 ⇒ Bの物理

B中間子の物理

Bファクトリー実験

SuperKEKB/Belle II @ KEK

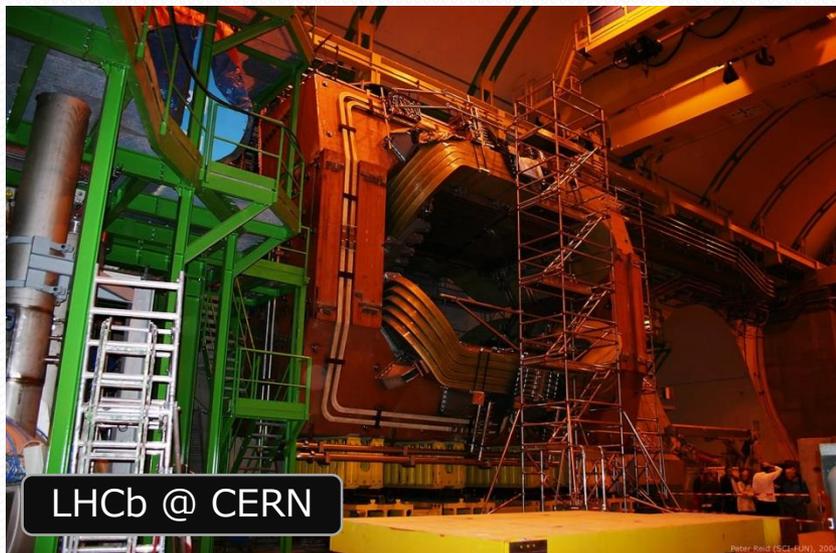
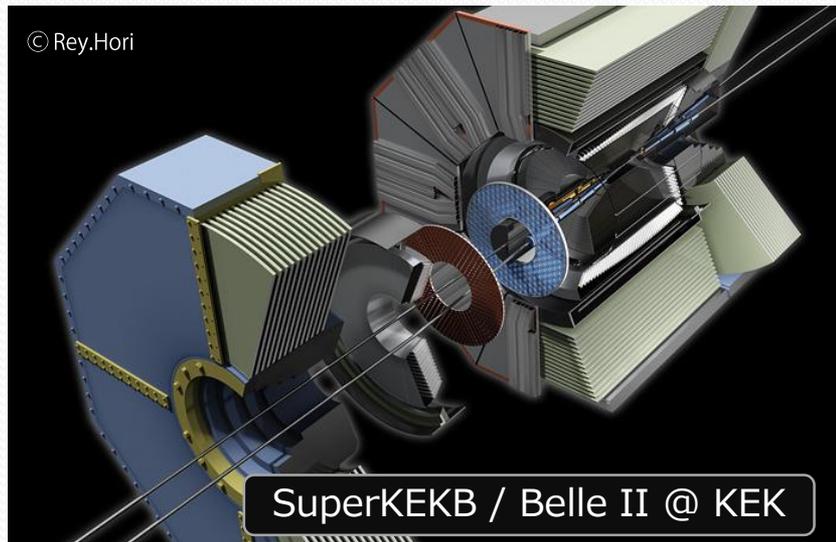
- '17-'20初頭 ⇒ ルミノシティ x50
- ニュートリノを含む崩壊モード
- $B \rightarrow \pi l \nu$: inclusive vs exclusive 2.5σ
- $B \rightarrow D^{(*)} l \nu$: τ vs e, μ mode 3.9σ

LHCb @ CERN ⇒ 相補的な世界的競争

- Run-2: -'18, Run-3: -'22, 14TeV, x2
- $B \rightarrow K l l$: μ vs e mode 2.6σ
- $B \rightarrow K^* \mu \mu$: 角度分布 3.7σ

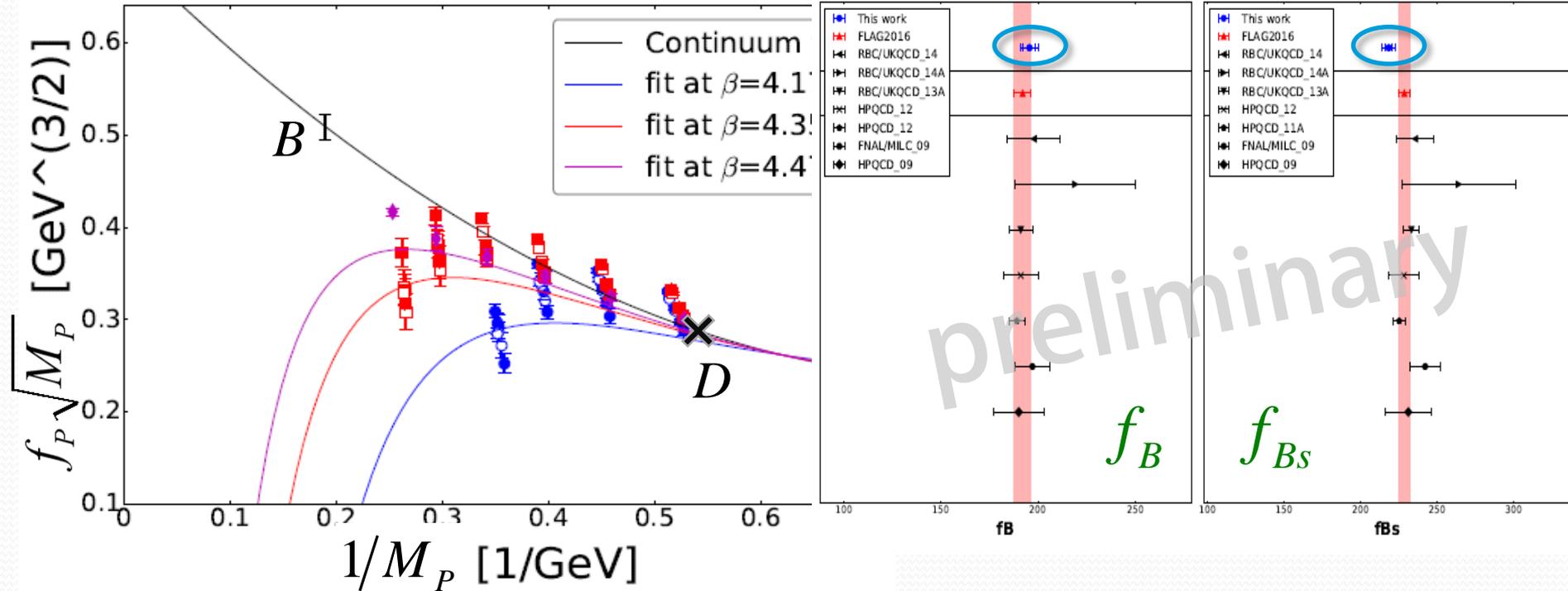
LQCDで貢献できる / 豊富な崩壊モード

'20年代前半に要求精度の計算を実現したい



B中間子の物理

Fahy @ Lattice 2016



● $am_Q \lesssim 0.7$, $a^{-1} \lesssim 4.5\text{GeV} \Rightarrow m_Q \lesssim 3.2\text{ GeV} < m_b$

● m_b への外挿 $\Rightarrow f_B = 195.5(3.2)_{\text{stat}}(3.3)_{\text{scale}}(?.?)_{\text{extrap}}$

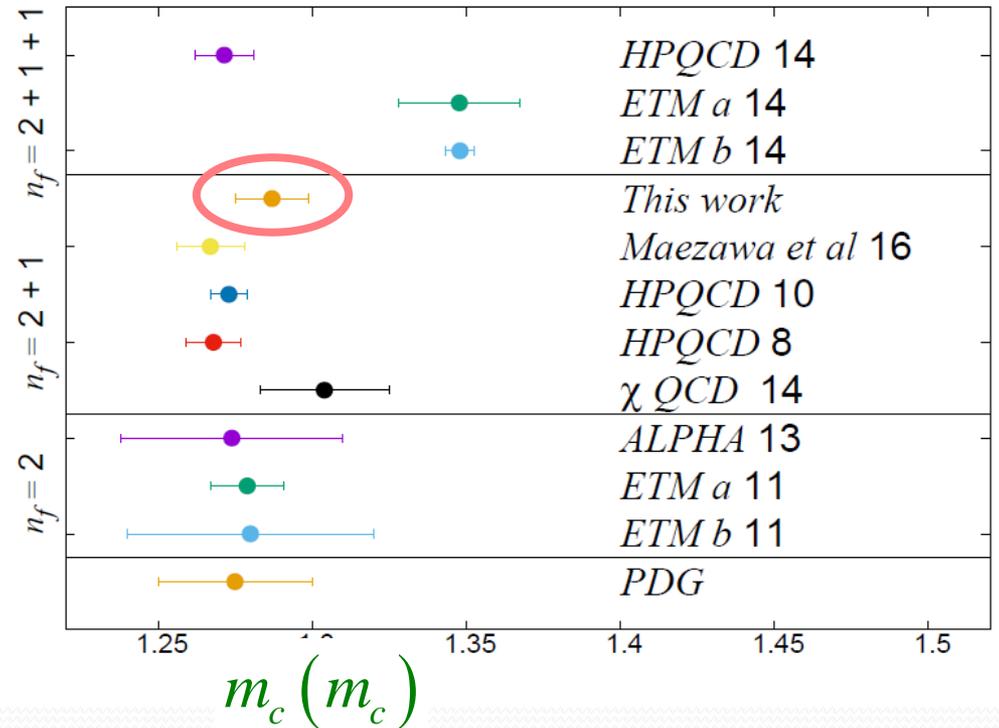
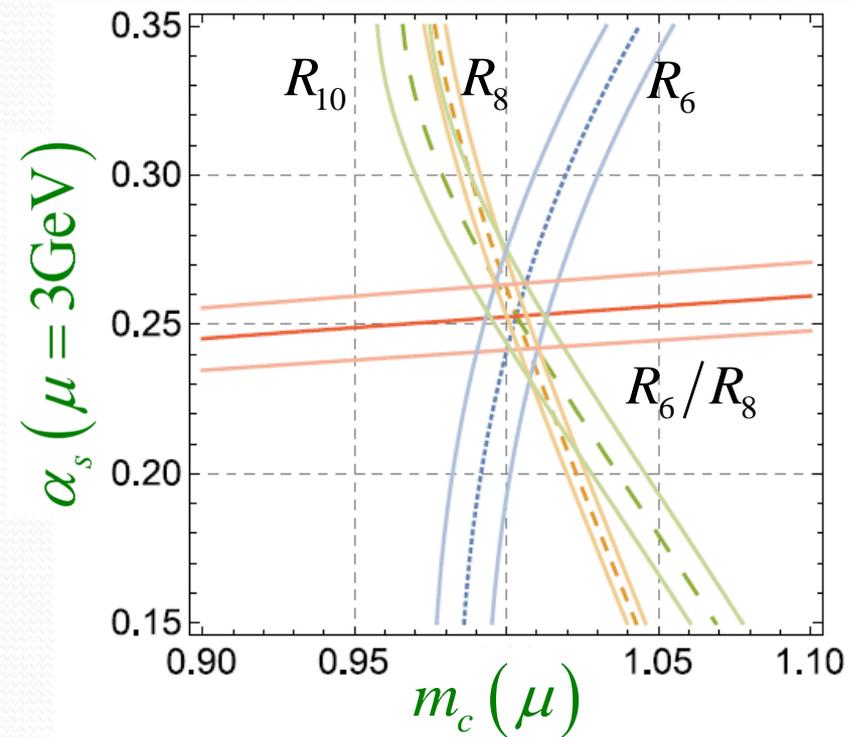
次の数年 : $B \rightarrow \{\pi, D, D^*\} l \nu$ 崩壊の同様の計算 (統計, m_{ud} ...)

ポスト京 : m_b 直上の計算 @ $a^{-1} \gg m_b$

QCDの基礎パラメタの決定

強結合定数 α_s とクォーク質量 m_c の高精度決定

Nakayama et al., PRD('16)



最高レベルの計算精度を達成 : e.g. $m_c(3\text{GeV}) = 1.003(10) \text{ GeV}$

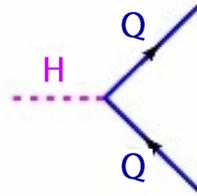
摂動の高次補正の不定性が支配的 (70-80%)

国際リニアコライダー計画 (ILC)

- e^-e^+ の最高エネルギーコライダー
 - クリーンなエネルギーフロンティア
 - '20後半(?) @ 岩手県北上山地

- Higgs粒子の精密研究

- *e.g.* ヒッグス結合定数



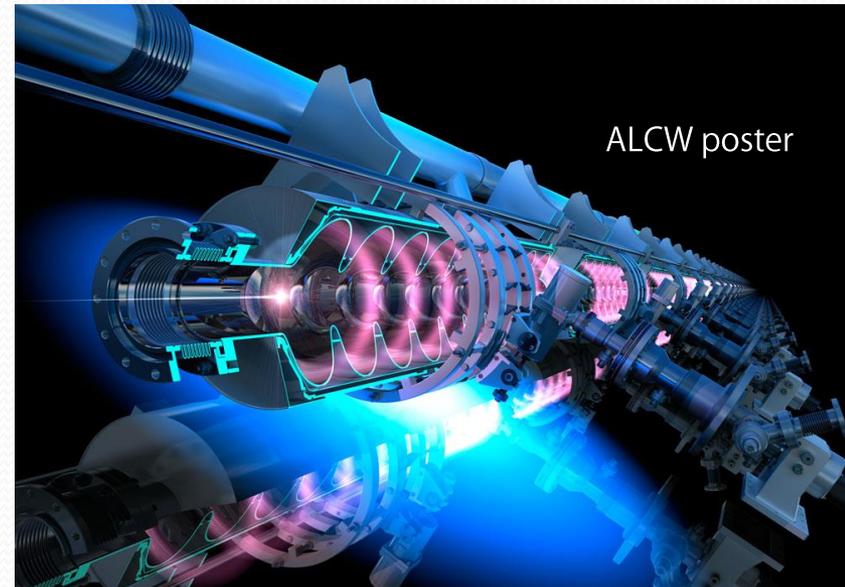
- ILC測定精度 (Higgs White Paper '13)

⇒ QCDパラメタの精度
(Lepage-Mackenzie-Peskin '14)

$$\delta m_b \sim 0.3\%, \delta m_c \sim 0.6\%, \delta \alpha_s \sim 0.5\%$$

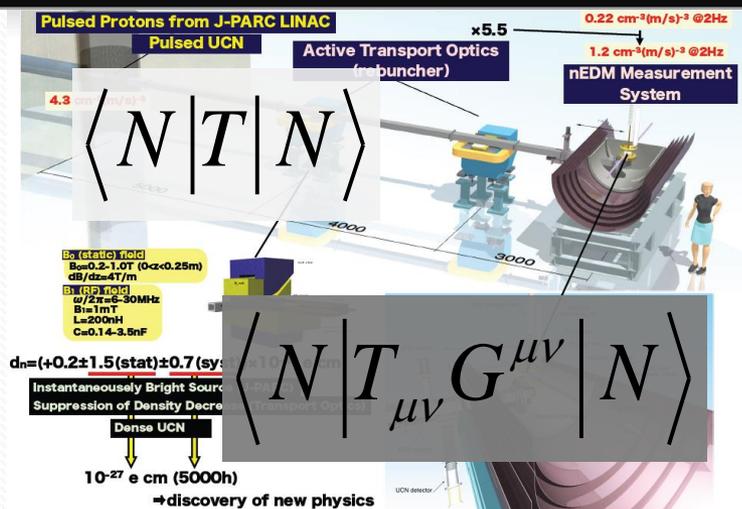
高次摂動計算 ⇒ $\delta \alpha, \delta m_c$

小さい格子間隔 ⇒ δm_b

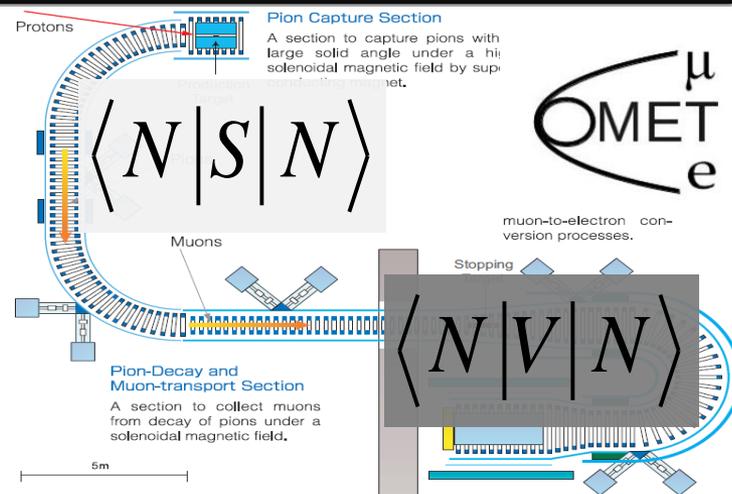


核子行列要素

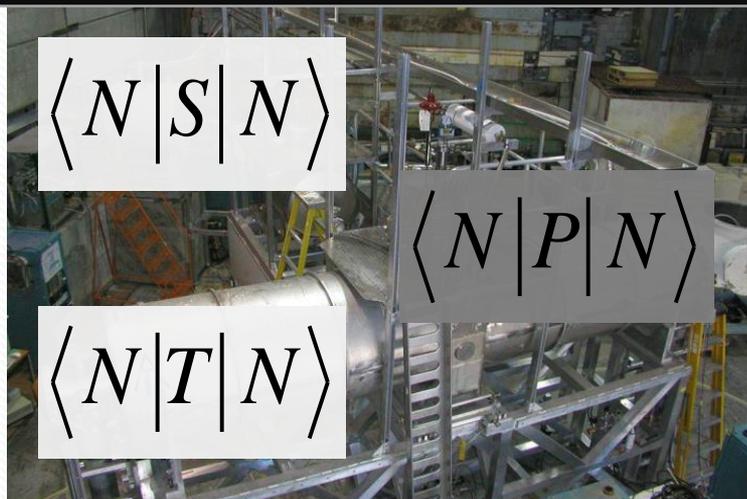
J-PARC P33 : 中性子電気双極子能率



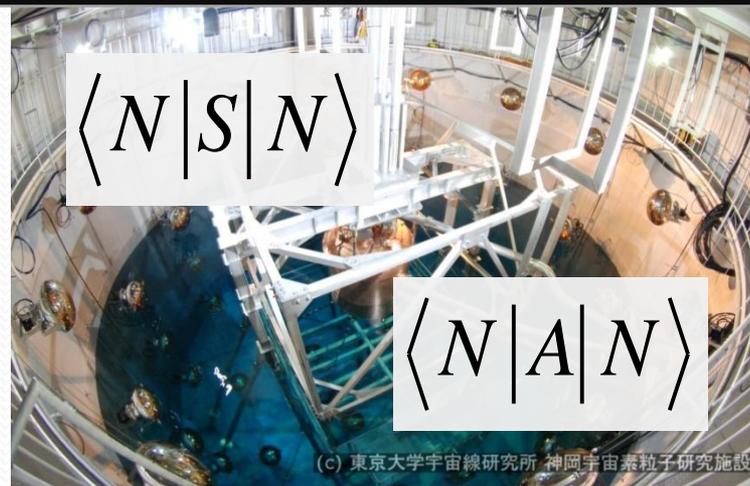
J-PARC COMET : $\mu N \rightarrow e N$ 轉換



UCNA @ LANL : 超冷却中性子β崩壊

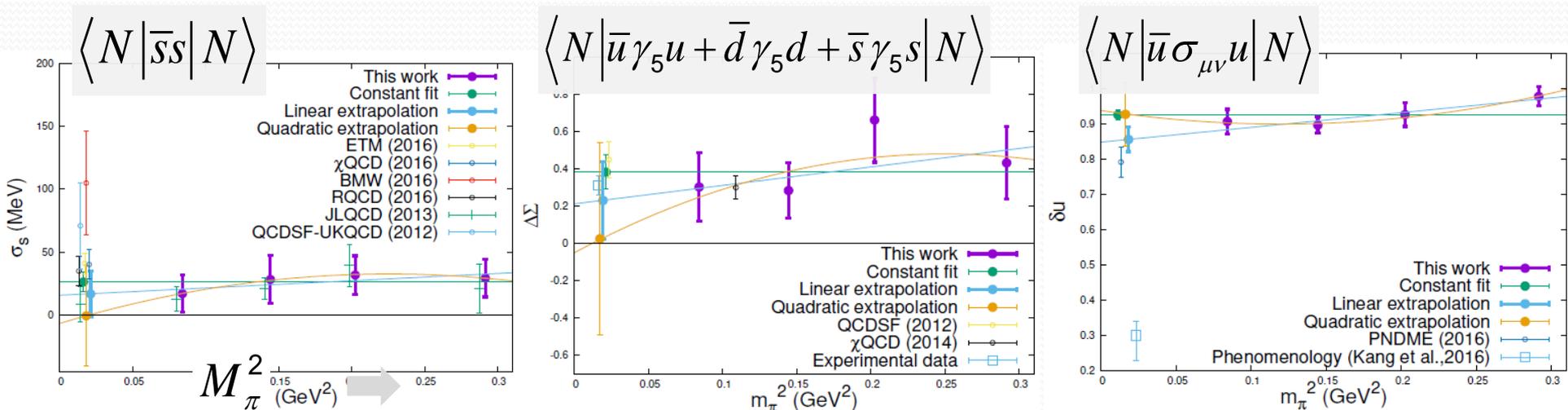


XMASS @ Kamioka : 暗黒物質探索



核子行列要素

スカラー、軸性ベクトル、テンソル荷電の包括的計算



$$\langle N | \bar{u}u - \bar{d}d | N \rangle \quad \langle N | \bar{u}u + \bar{d}d | N \rangle \quad \langle N | \bar{u}\gamma_5 u - \bar{d}\gamma_5 d | N \rangle \quad \langle N | \bar{s}\gamma_5 s | N \rangle \quad \langle N | \bar{d}\sigma_{\mu\nu} d | N \rangle \quad \langle N | \bar{s}\sigma_{\mu\nu} s | N \rangle$$

Yamanaka et al., in preparation

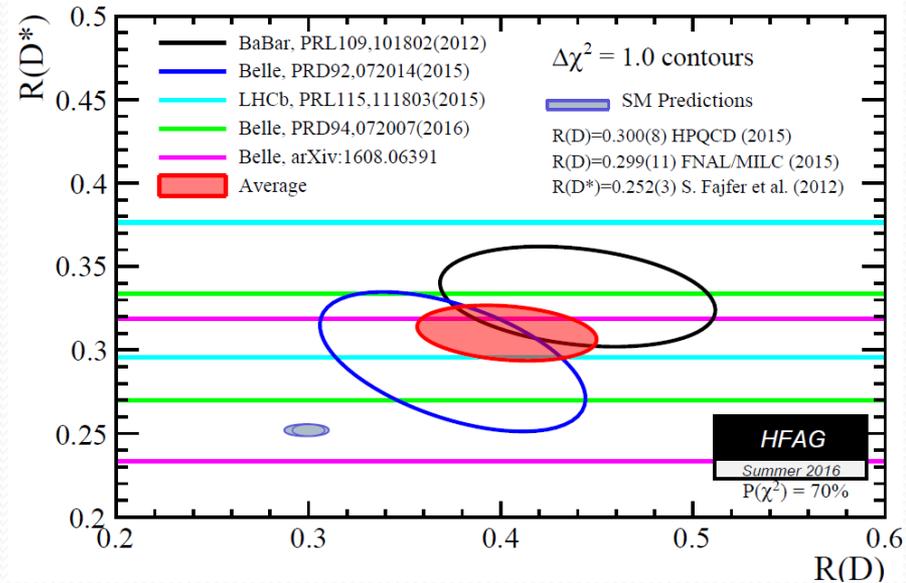
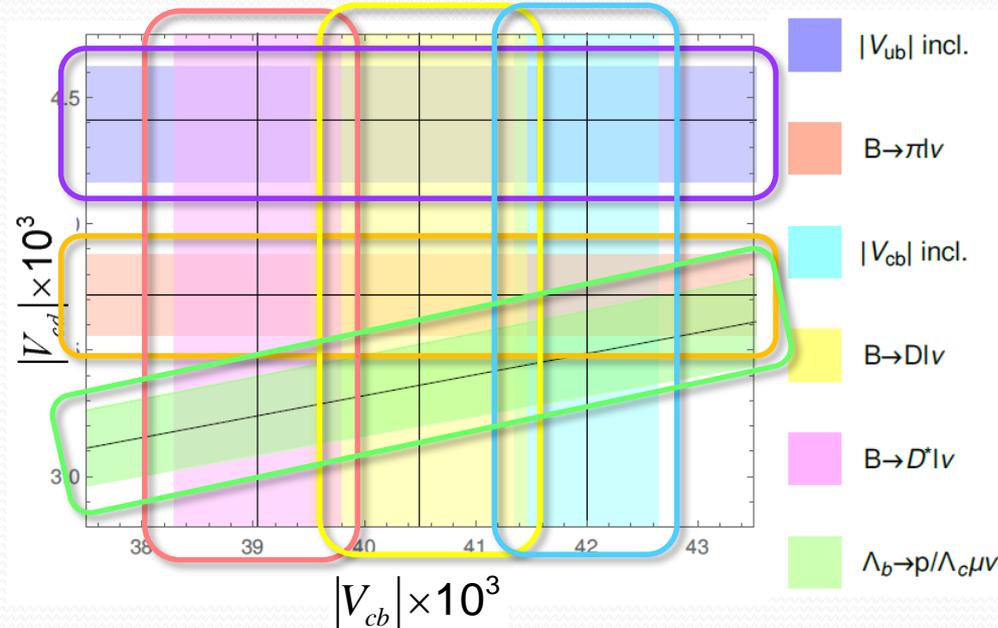
- 以前の格子データ (JLQCD '06-'10) を再利用した低コストのテスト計算
- 新物理の寄与、sea quarkの効果の議論にはreasonableな精度 $O(10-20\%)$
- 格子間隔 1 点 \Rightarrow 離散化誤差が主要誤差の一つ \Rightarrow 現在の格子データ
- カイラル摂動論 \Leftrightarrow 小さい M_π^2 依存性 \Rightarrow ポスト京での物理点計算

来年度(以降)の研究計画

B中間子セミレプトニック崩壊

Blanke @ Lattice '16

HFAG '16 $R(D^{(*)}) = \Gamma(B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu) / \Gamma(B \rightarrow D^{(*)} l \nu)$

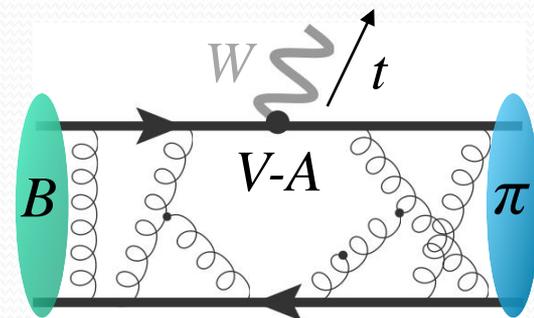


- $B \rightarrow \pi l \nu, B \rightarrow D^{(*)} l \nu \Rightarrow$ 標準理論の不定パラメタ $|V_{ub}|, |V_{cb}|$ の独立決定
 \Leftrightarrow inclusive $B \rightarrow X_{u(c)}$, baryon崩壊とのずれ
- $B \rightarrow D^{(*)} l \nu \Rightarrow$ LFU比 $R(D^{(*)}) = \Gamma(B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu) / \Gamma(B \rightarrow D^{(*)} \{e, \mu\} \nu)$
 \Leftrightarrow 標準理論から 3.9σ のずれ \Rightarrow 2HDM(?)

来年度(以降)の研究計画

$B \rightarrow \pi l \nu, D^{(*)} l \nu$ 崩壊の研究

- 標準理論の寄与を記述する形状因子 $f_+(t), f_0(t), h_V(t), h_{A_i}(t)$ を5%精度で計算
- 新物理の寄与を記述し得る形状因子 $f_T(t), \dots$ も同精度で計算
 - ⇒ ずれを確立するだけでなく、新物理模型の特定を推進
- $\alpha^{-1} \lesssim m_b \Rightarrow m_b$ への外挿; 統計精度, カイラル外挿の制御
 - ⇒ ポスト京での直接計算で数%以下を目指す \Leftrightarrow Belle II
 - ⇒ 手法は新物理に感度の高い希崩壊 $B \rightarrow K^{(*)} l l$ にも応用可能
- 複数モード, 様々な相関関数, 運動量遷移 x4点
 - ⇒ 高演算量: 170 PFLOPS \cdot days (20%実効効率)
 - ⇒ KEKスパコン + 筑波大共同利用で遂行
(1.2PFLOPS) (Oakforest-PACS)



国際協力

新物理の探索 = 数多くのヒントが必要

⇒ 国際協力により幅広い物理を探る

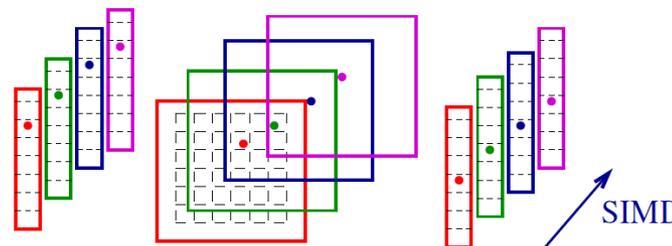
RBC/UKQCDグループ (米国, 英国)

- 同じようなカイラル対称な定式化を使用
- 重いクォークの物理 (UKQCD)
 - 定式化のテスト (JHEP '15) ⇒ 実計算の相談中
- g-2 (RBC)
 - 共同研究の可能性を相談
- コードセットの開発 (UKQCD)
 - Grid



Grid: Boyle et al. '15

Many vectors = many matrices x many vectors



Flavor Lattice Averaging Group (青木(慎), 青木(保), 金児, 橋本, 深谷)

- 現象論応用への格子計算の世界平均を提供 ⇒ 2016年夏に第3版を出版

実験との連携

Belle II実験

- B2TiP (Belle II - Theory interface Platform)
理論実験合同のWG ⇒ yellow report
- Bファクトリー物理勉強会 (数回/年)
第18回@新潟大、第19回@KEK



第19回Bファクトリー物理勉強会



HINT2016

J-PARC実験

- g-2/EDM measurement @J-PARC
世界12ヶ国 54名 (海外から24名)
- HINT 2016
144名、幅広いテーマをカバー

まとめ

サブ課題A「素粒子現象論」の研究

- 標準理論を超える「新しい物理」を明らかにし、ブレークスルーを創出
 - Belle II実験
 - チャームの物理の研究（崩壊定数、形状因子、 m_c ）
⇒ B の物理（崩壊定数） ⇒ 来年度：セミレプトニック崩壊
 - J-PARC実験
 - 核子行列要素の包括的計算
- 海外グループとの国際協力を推進（重いクォークの物理, $g-2$)
- 実験との連携体制の構築も推進：B2TIP for Belle-II など