

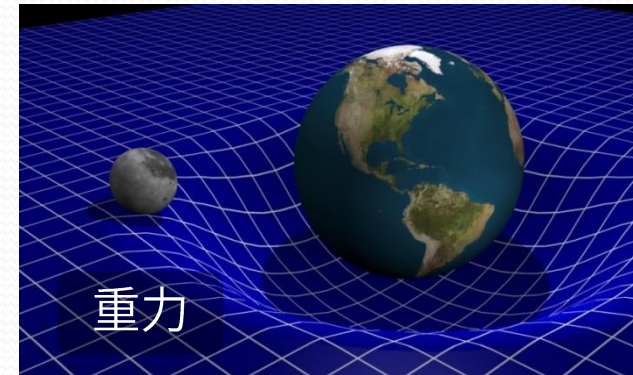
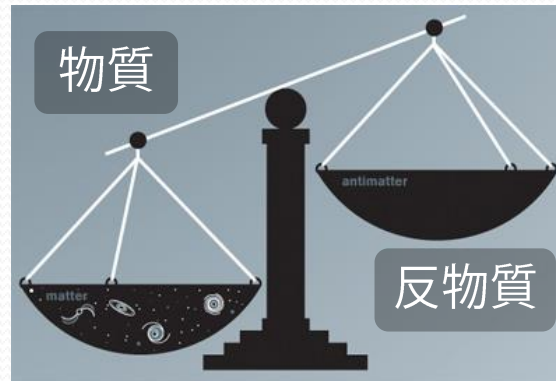
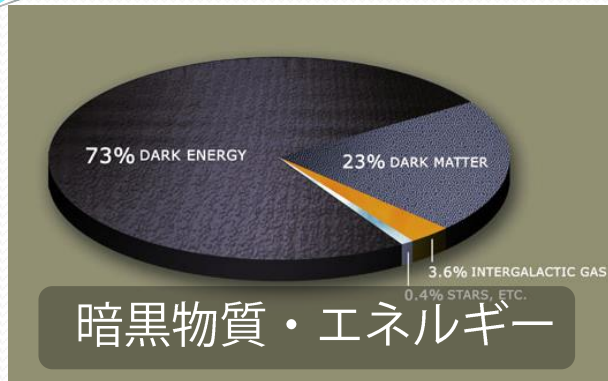


新しい物理の解明と 大規模格子QCDシミュレーション

KEK, 総研大 金児 隆志

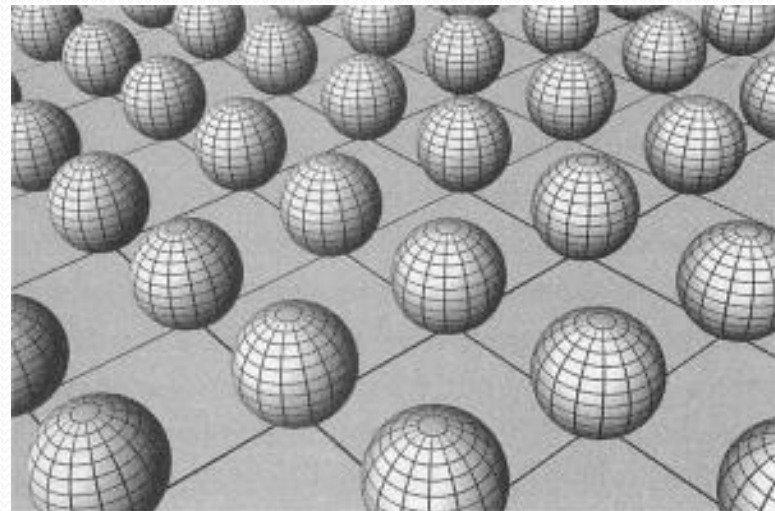
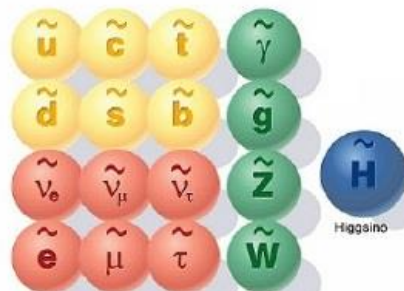
2016年 3月 31日

素粒子標準論の謎と「新しい物理」



標準理論を超える「新しい物理」があるはず...
しかしそのメカニズムさえ不明

SUPERSYMMETRY



...?

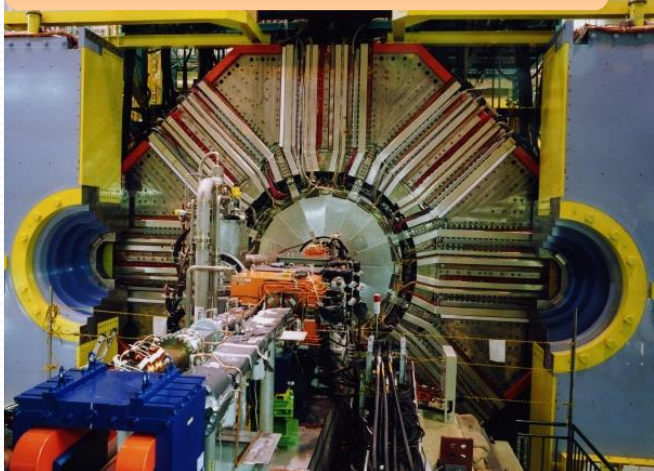
サフ課題A

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

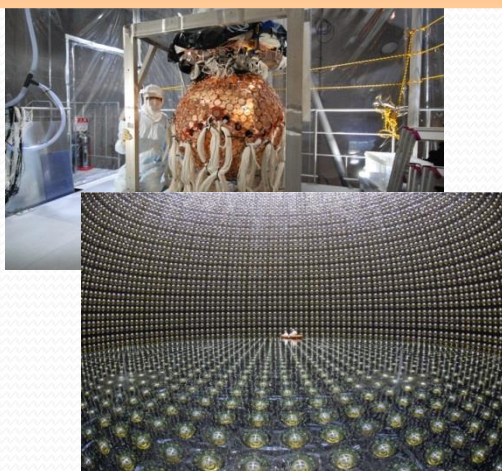
「素粒子現象論」

- 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「新しい物理」の発見と解明を目指す

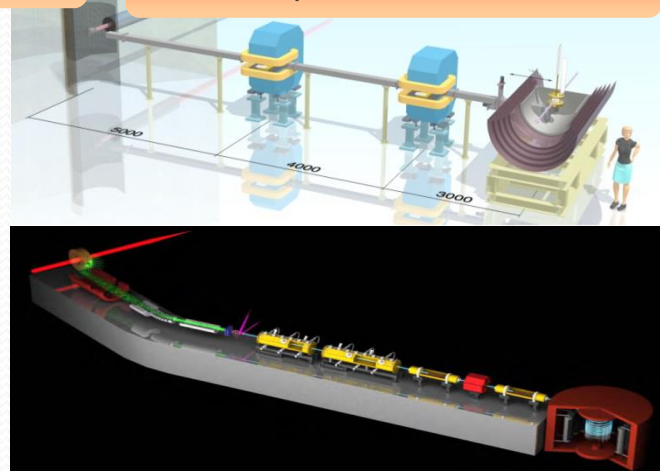
フレーバーファクトリー実験



暗黒物質、ニュートリノ、…



核子・ μ 粒子の精密実験



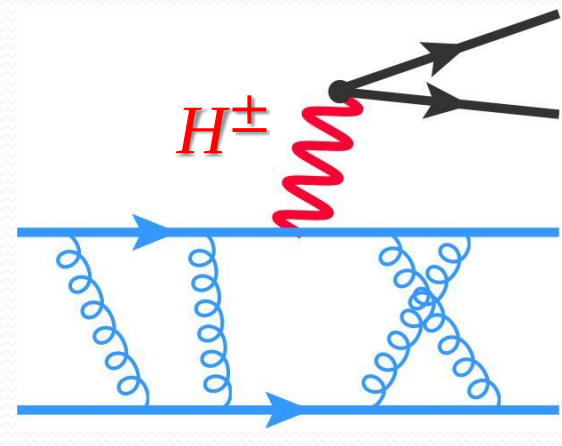
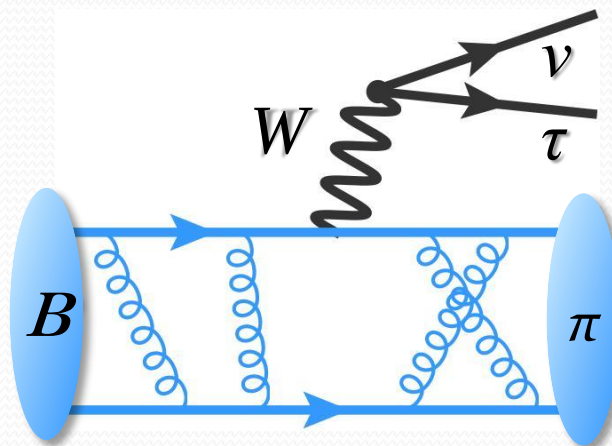
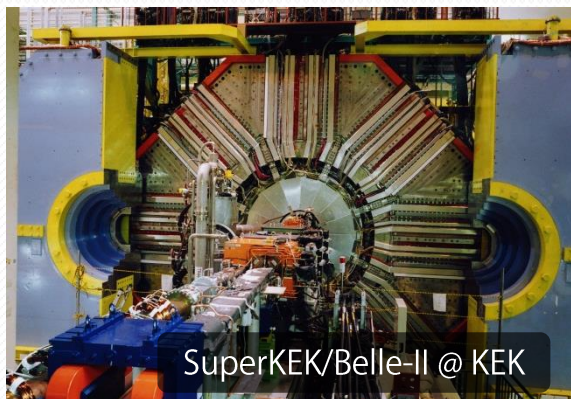


新しい物理の解明

新しい物理の探索

e.g. B中間子のセミレプトニック崩壊 $B \rightarrow \pi l \nu$

実験値 = 標準理論の寄与 + 新物理の寄与



崩壊率, 分岐比など

$$\langle B | V - A | \pi \rangle$$

$$\langle B | S | \pi \rangle, \dots$$

格子QCDの役割 = QCD補正「ハドロン行列要素」の計算

⇒ 新しい物理の探索、メカニズム・パラメタを決定する

理論と実験の密接な連携が不可欠

B中間子の物理

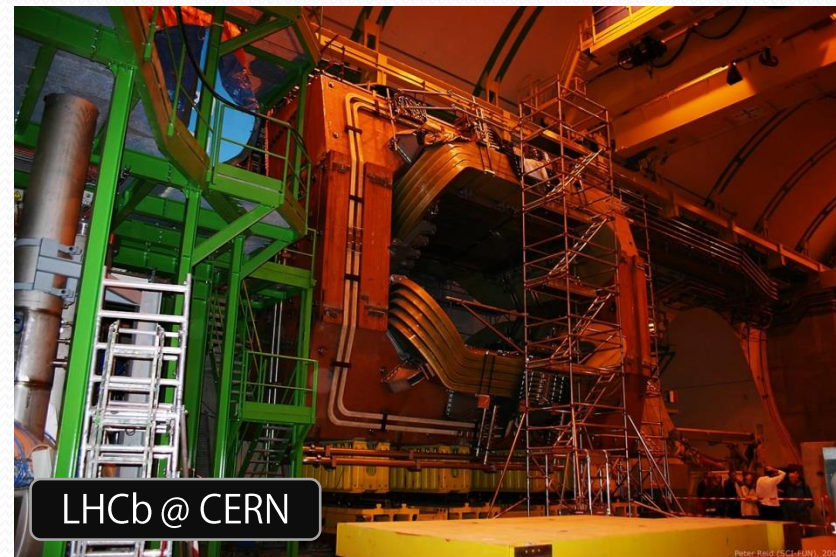
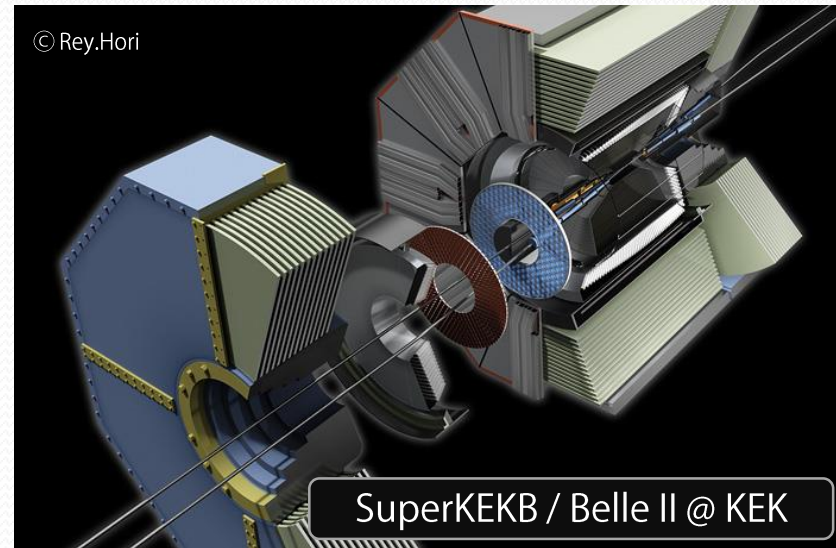
SuperKEKB / Belle-II, ...

SuperKEKB/Belle II @ KEK

- 2017-2020年代初頭 $\Rightarrow$ Belleの50倍の積分ルミノシティー
- B中間子の豊富な崩壊過程で探索
- $B \rightarrow l\nu$: 崩壊定数 (2%)
- $B \rightarrow \pi l\nu, D^{(*)}l\nu$: 形状因子 (1-3%)
- 新物理行列要素 $O(10)\%$

LHCb @ CERN $\Rightarrow$ 相補的な世界的競争

- Run-3 : - 2022
- 稀崩壊行列要素: $B_s \rightarrow ll, B \rightarrow K^{(*)}ll$

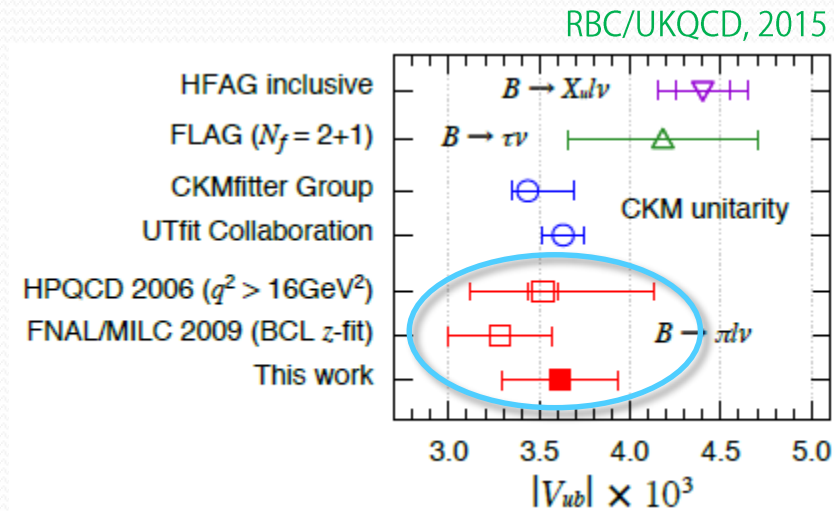


‘20年代前半に要求精度の計算を実現したい

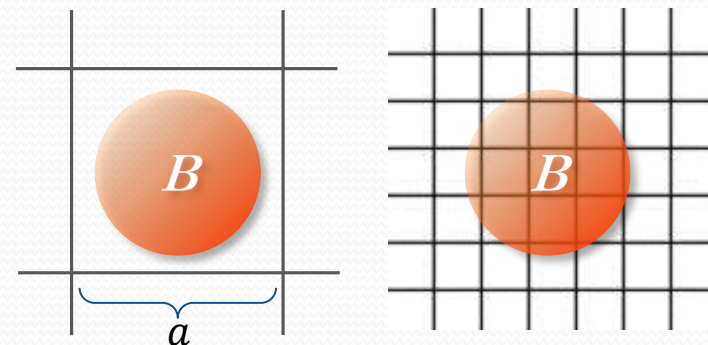
B中間子の物理

格子QCD 計算の現状と課題

- 重点課題実施計画(15/5/29)より
 - 重いbクォークの直接計算を実現
 - $B \rightarrow \pi$ セミレプトニック崩壊に関連する小林・益川行列要素 $|V_{ub}|$ を2%で決定



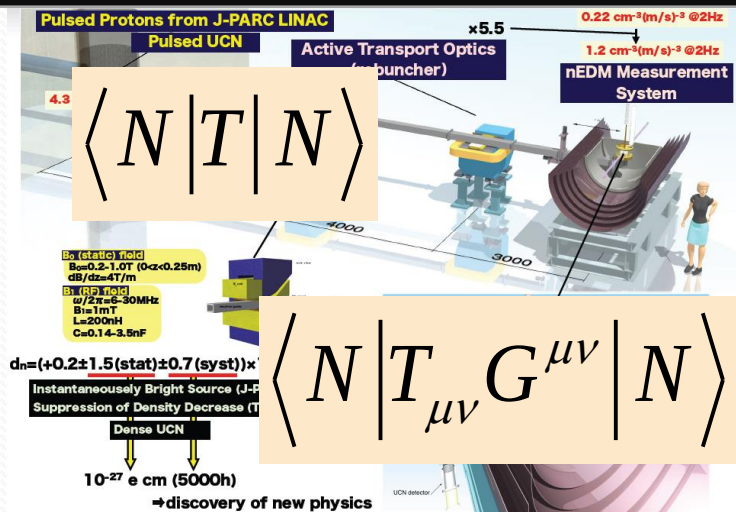
- B 中間子を取り扱える細かい格子が必要!!
 - 計算コストは a^{-6} で急速に増大
($m_b / 2\text{GeV}$)⁶ ~ 100 倍!!! (x10 カイラル)
 - 現状: 有効理論を用いた間接計算($\geq 5\%$ 誤差)



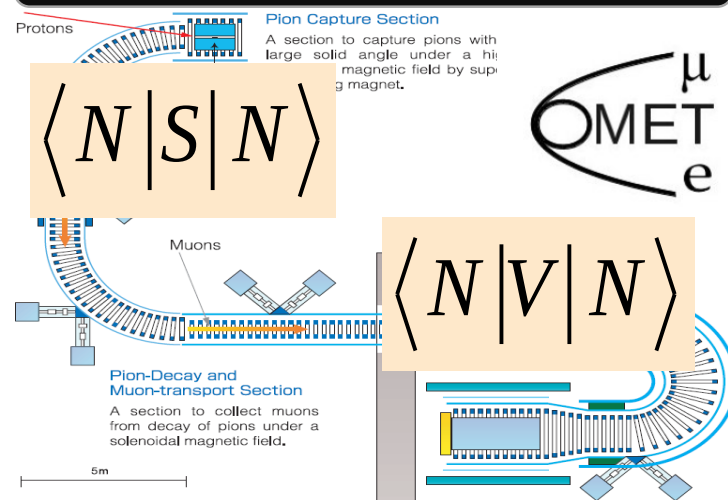
ポスト京でbクォークの直接計算 $\Rightarrow |V_{ub}|$ を含む幅広い物理量の高精度計算

核子行列要素

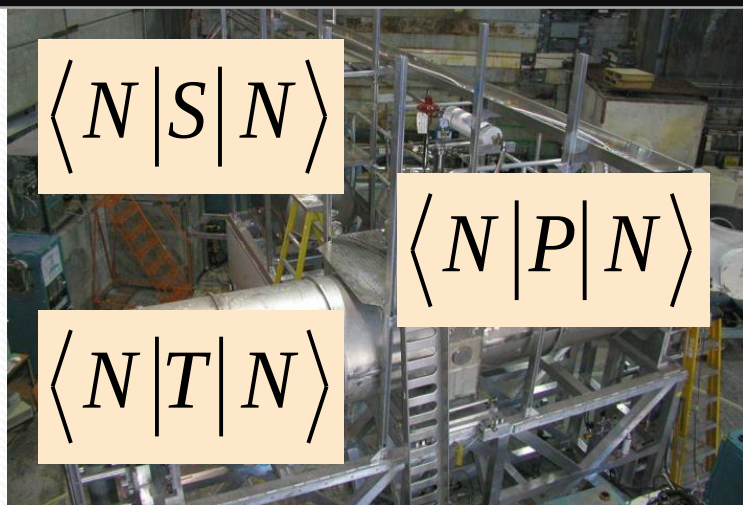
J-PARC P33 : 中性子電気双極子能率



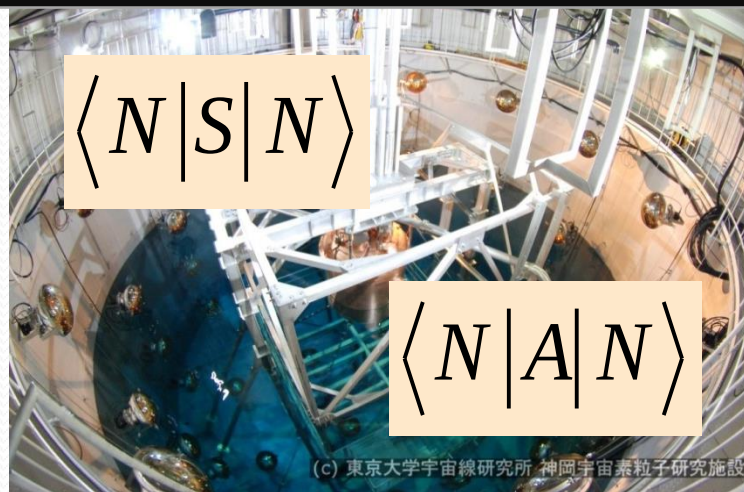
J-PARC COMET : $\mu N \rightarrow e N$ 転換



UCNA @ LANL : 超冷却中性子 β 崩壊



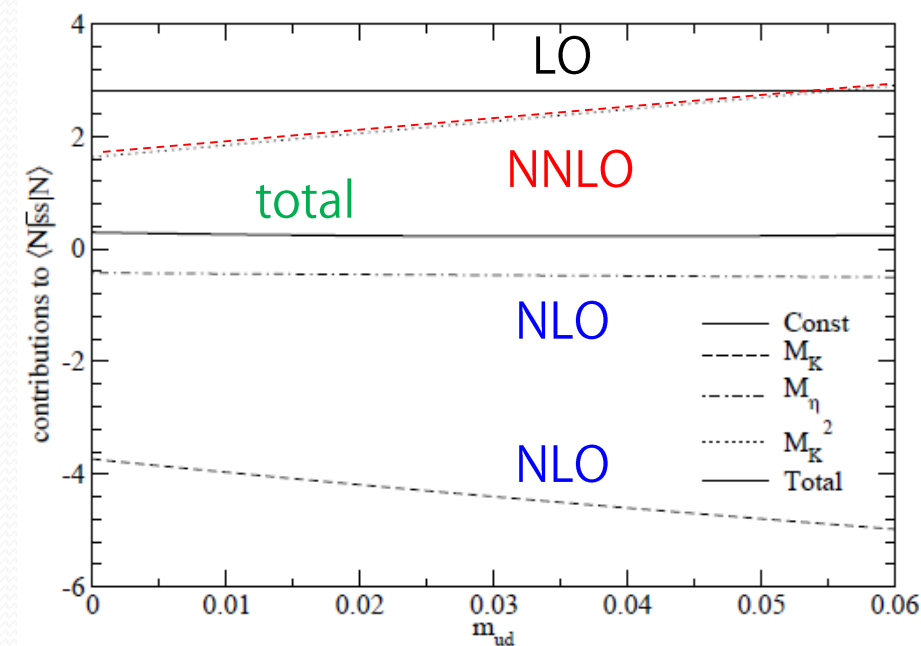
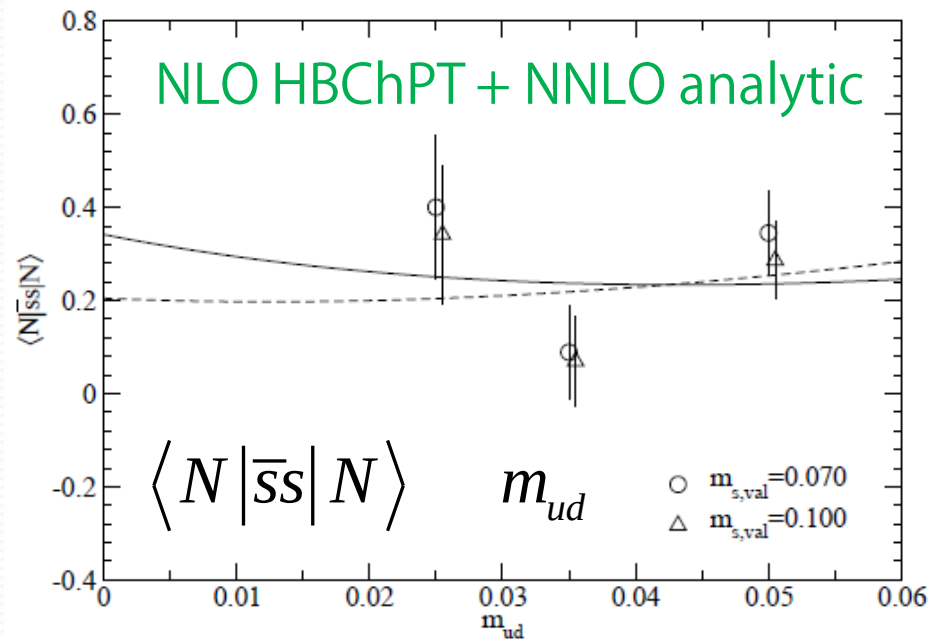
XMASS @ Kamioka : 暗黒物質探索



核子行列要素

lattice QCD 計算の課題 (の1つ)

cf. JLQCD, $N_f = 2$, $\langle N | \bar{s}s | N \rangle$ の計算



- 軽いハドロンの研究では物理点計算が標準になりつつある

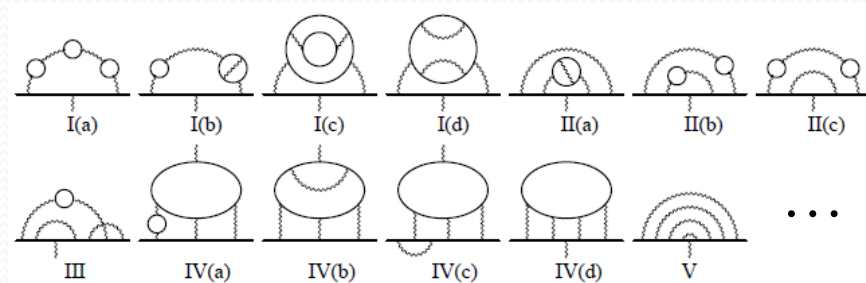
ポスト京で物理点計算 ⇒ カイラル外挿の不定性を取り除いた包括的計算

他にも...

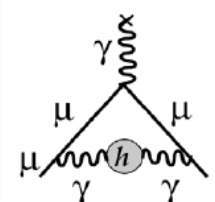
e.g. μ 粒子異常磁気能率 $g-2$

- 理論 $\leftrightarrow$ 実験: 3.3σ のずれ
 - QED 5-loop計算 $\Rightarrow$ 0.42 ppm
 - BNL E81 $\Rightarrow$ 0.54 ppm
- $\Rightarrow$ 大きな注目を集めている

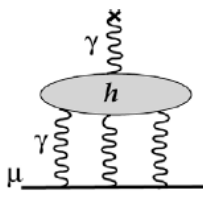
Aoyama-Hayakawa-Kinoshita-Nio, 2012



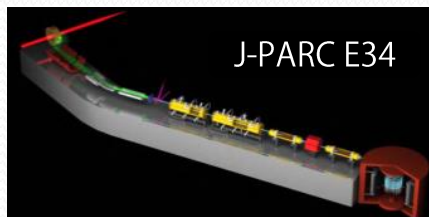
- 2010年代に 実験誤差を0.1ppm に削減
- J-PARC E34 (2017?-), FNAL E989 (2016-)
- 理論精度: QCDの不定性が支配的



Hadronic vacuum polarization (HVP)



Light-by-light scattering (LBL)



(ストレッチ目標)

計算手法のR&Dが必要な挑戦的課題



研究計画と推進状況

研究計画

bクォーク直接計算によるB中間子の物理の精密研究

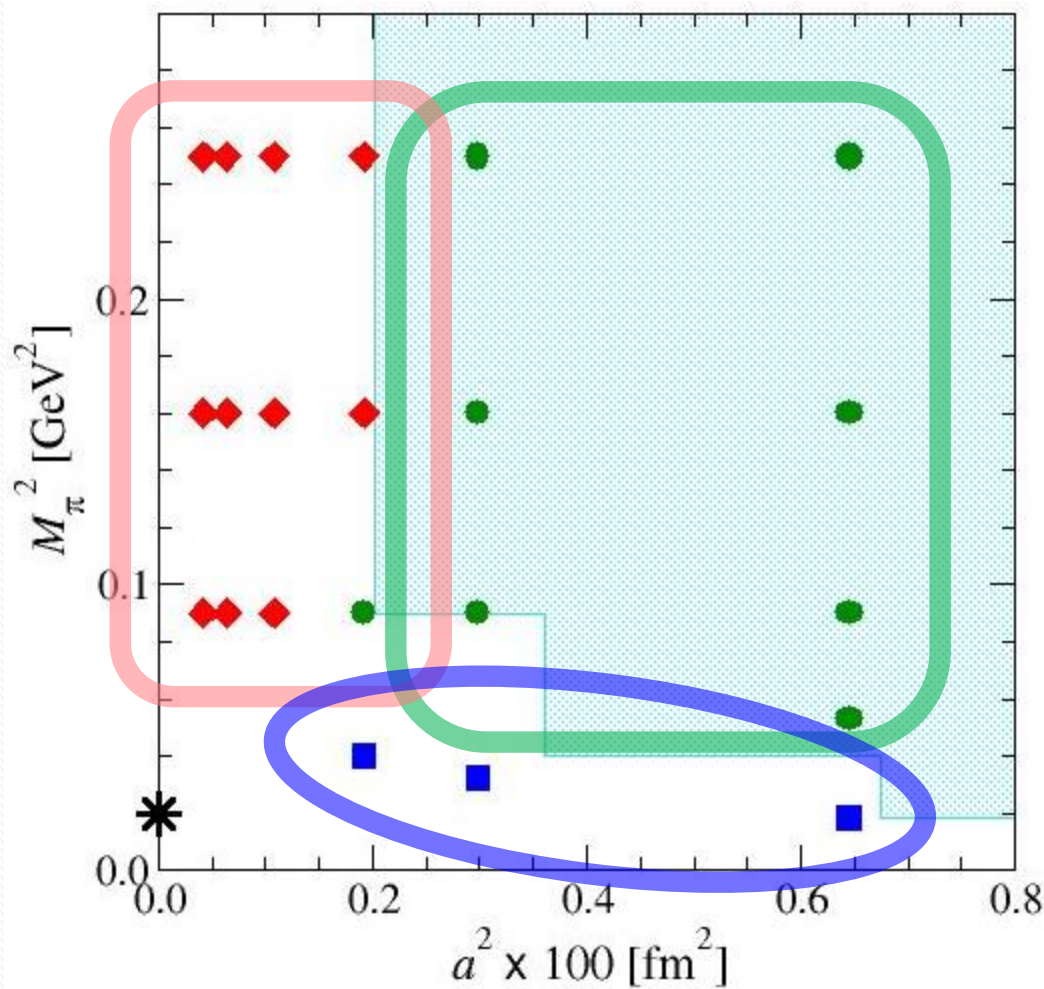
- $\alpha^{-1} \gtrsim 8 \text{ GeV} \gg m_{b'}$, $L \approx 4 / M_{\pi'}$ 20,000 MD time
- $M_{\pi} = 300 - 500 \text{ MeV} \Rightarrow$ カイラル摂動論を指導原理とした外挿
 $\Leftrightarrow \alpha^{-1} \approx 2-3 \text{ GeV}$ で物理点計算も行なう $\Rightarrow$ charm physics でチェック

物理点付近での核子行列要素の包括的研究

- $L \approx 4 / M_{\pi}$ なので精密計算は難しい: $\mathfrak{g}_A \Rightarrow$ サブ課題Bと協力?
- $O(10\%)$ でも意義があるものに集中: nEDM, BSM行列要素

他の重要テーマ (g-2, K中間子崩壊, ...) $\Rightarrow$ 国際協力

研究計画



ポスト京を含め65 PFLOPS・年の計算資源
を想定 $\Rightarrow$ 1/3で配位生成完了+残りで測定

基礎シミュ @ KEK現スパコン

- 配位生成は完了
- c クォークなどの物理計算
- 重いクォークに向けたR&D
- 相関関数の計算手法のR&D

高詳細格子でのBの物理の研究

- $a^{-1} \lesssim 9.6 \text{ GeV} \gg m_b$
- カイラル摂動論を用いて外挿
- 配位生成: 11.10 PFLOPS・年

物理点付近での核子行列要素

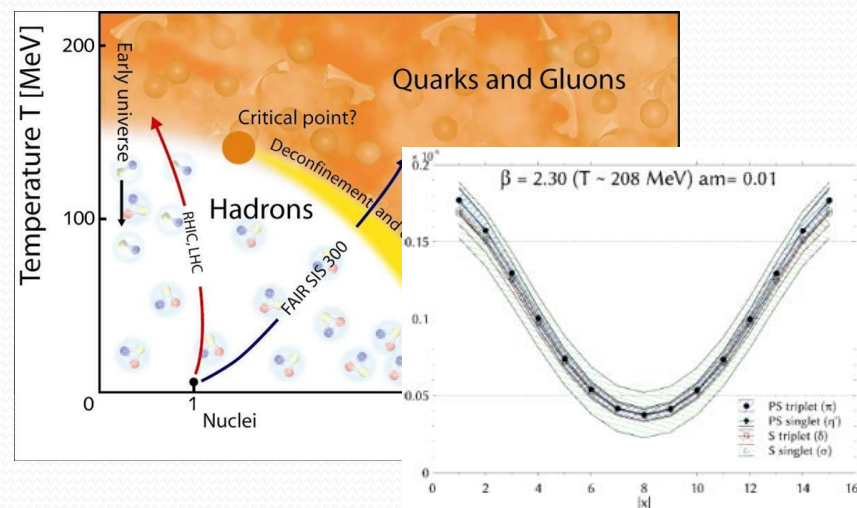
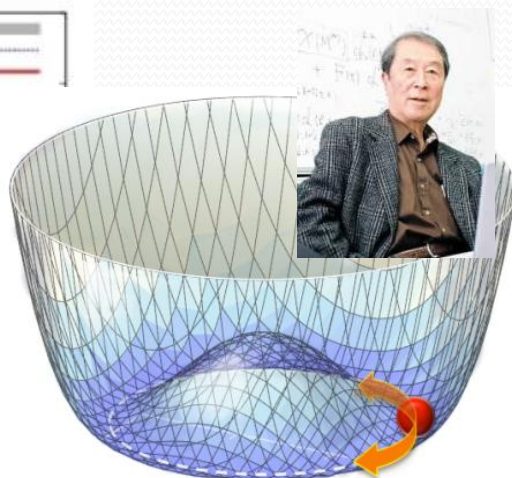
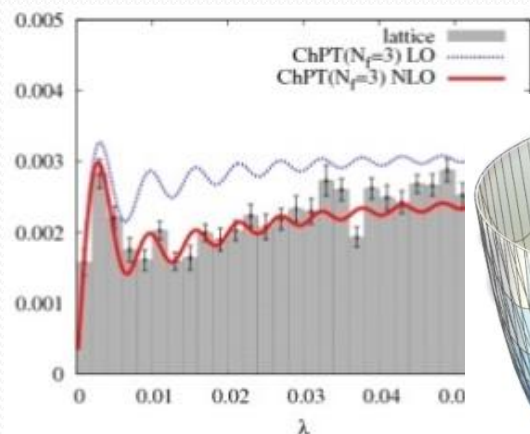
- 2.5 – 4.5 GeVで物理点付近
- 配位生成: 8.75 PFLOPS・年

研究計画

- 定式化: **カイラル対称性を保つ理想的な定式化** (Möbius domain-wall)

- 簡単な繰り込み; nEDM, g-2などの計算で大きな優位性
- QCD相転移の研究との親和性: $U(1)_A$ 対称性の回復,...

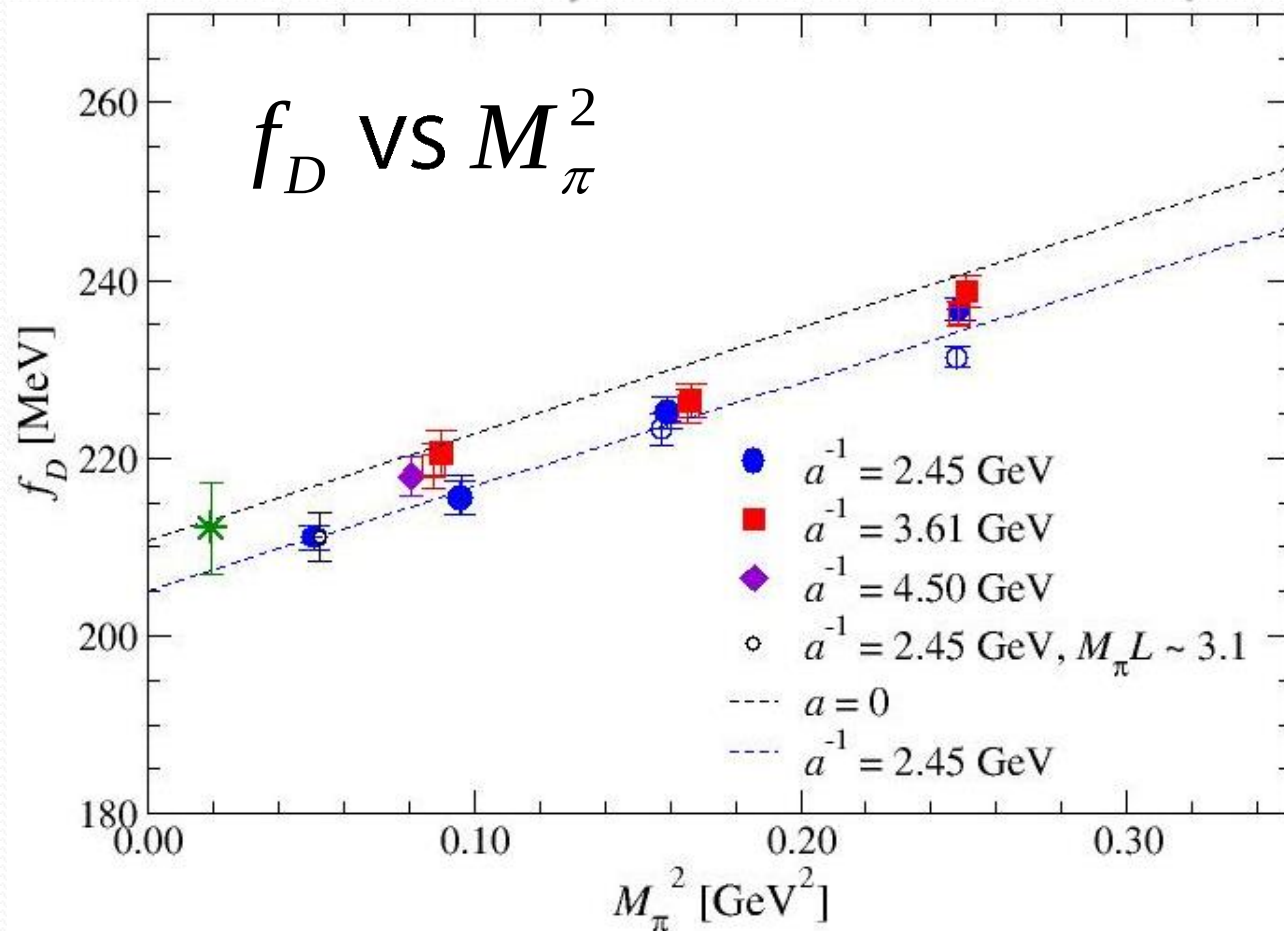
cf. 対称性を壊す定式化 $\Rightarrow$ $\approx 20\%$ 細かい格子 or 軽い π 中間子



理論的にクリーン $\Rightarrow$ 応用範囲の広いシミュレーション

D中間子崩壊の精密研究

Brendan Fahy (KEK), D中間子leptonic崩壊 $D \rightarrow l\nu$



崩壊定数の決定

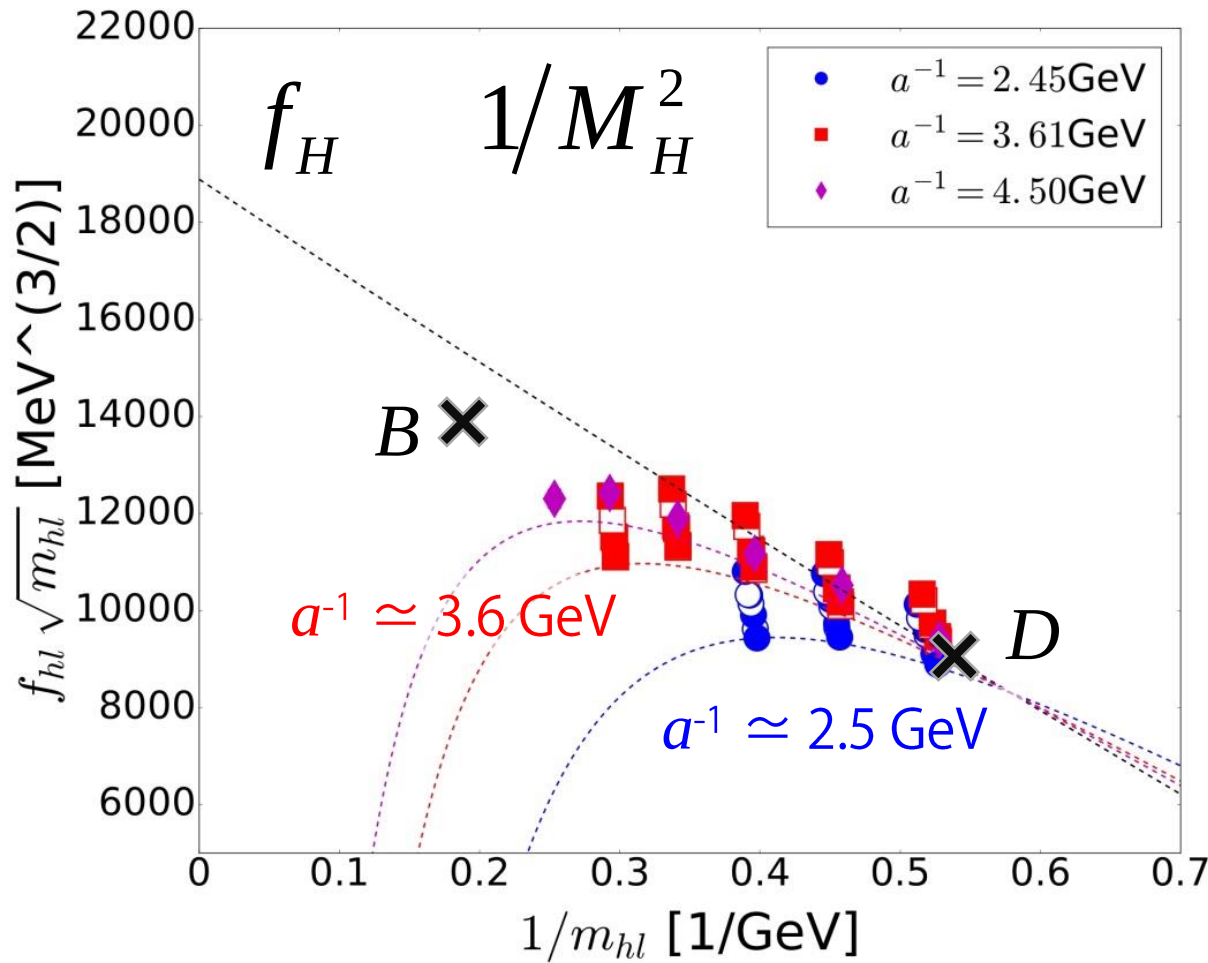
- 連続極限への外挿
 - $\lesssim 2\%$ 離散化誤差
- 有限体積効果
 - ⇒ 実計算で検証
- 物理点への外挿
 - ChPTによる検証
 - 物理点に近い

統計・系統誤差を制御し、1-2%精度で計算

⇒ 小林・益川行列要素の決定、ユニタリ性の検証、新物理の検証

bクォークの研究に向けたR&D

離散化誤差の検証



- m_Q はどこまで上げられるか？

離散化誤差 $\lesssim$ 数%

$$\Rightarrow m_Q \lesssim 0.6 a^{-1}$$

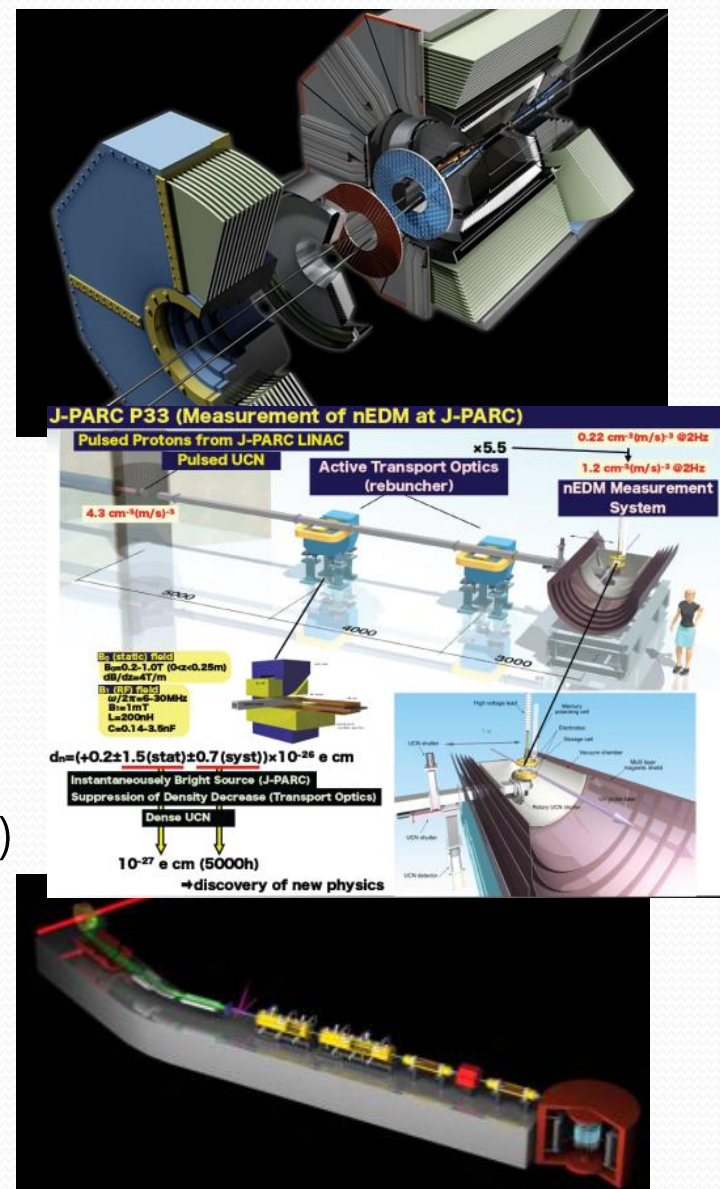
- Bの物理に必要な a^{-1} は？

$$a^{-1} \gtrsim 7-8 \text{ GeV}$$

$\Rightarrow$ パラメタの選定、研究手法のR&D

國際協力

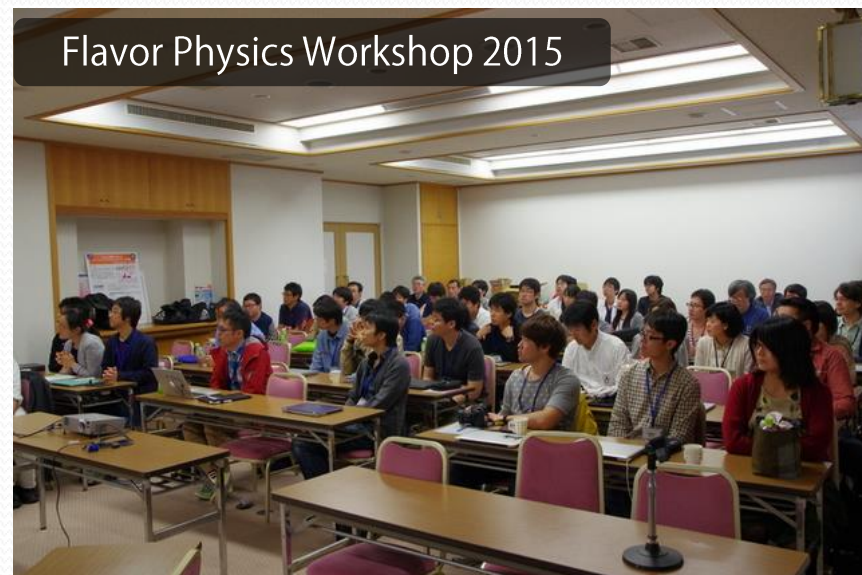
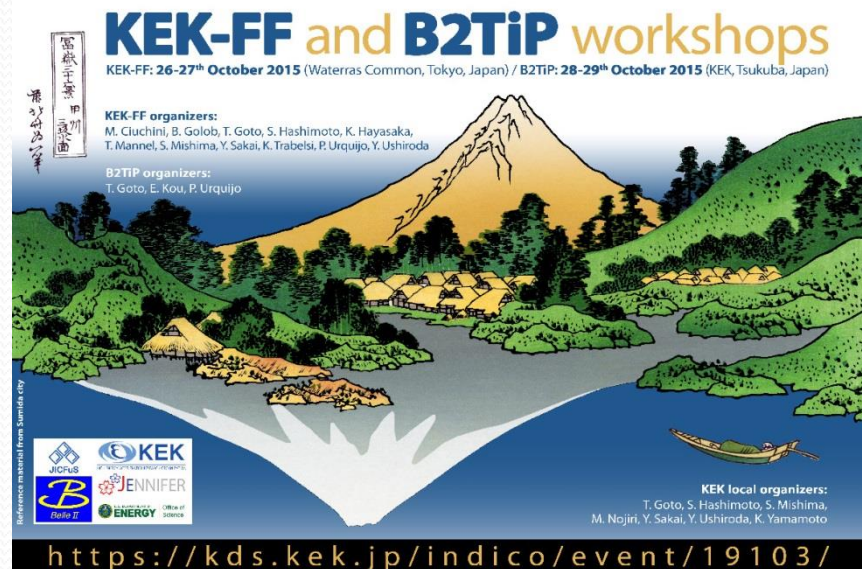
- 新物理を詳細まで解明 $\Rightarrow$ 証拠/ヒントを数多く見つけ出す必要がある
- 国外グループとの国際協力により、幅広い物理を効率的に探る
- 重いクォークの物理：
英国のUKQCDグループと既に開始
 - ・ 効率的なプログラムの開発
 - ・ 重いクォークの定式化のテスト (JHEP 1505,072)
 - ・ 実計算についても相談中
- NEDM, $g-2$ などについても進めたい
RBC $\ni$ 理研BNLセンター (協力機関)



実験との連携

- Belle II実験：
 - B2TiP (Belle II - Theory interface Platform)
理論実験合同のWG, 精度、新物理の感度
 - 国際/国内合同研究会
KEK-FF：国際研究会, 毎年開催, 最新結果
Flavor Physics Workshop：学生/若手向け
 - Bファクトリー物理勉強会 (数回/年)
東北大(5月), 東大IPMU(12月), 次回 新潟大
- J-PARC：調整中

The 5th KEK Flavor Factory Workshop / The 3rd Belle II Theory Interface Platform Workshop



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
 - 基礎シミュレーション @ KEK $\Rightarrow$ charmの物理の精密研究
 - … 細かい格子、軽い π 中間子の2つの方向に大きく拡張
 - Bの物理の直接精密計算 $\Leftrightarrow$ Belle II, LHCb, ...
 - バリオン行列要素の包括的計算 $\Leftrightarrow$ J-PARC, ...
- 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, EDM)
- 実験との連携体制の構築も推進 : B2TIP for Belle-II など