

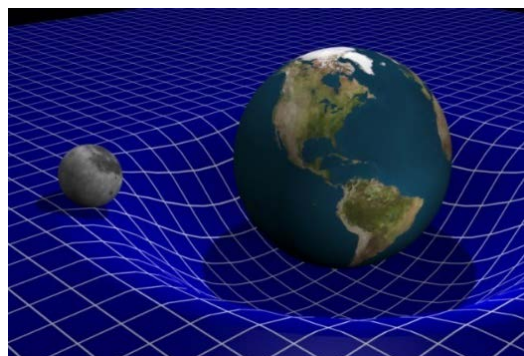
格子QCDの 素粒子現象論への応用

サブ課題A： 金児 隆志 (KEK, 総研大)

シンポジウム「京からポスト京にむけて」, 2019年1月9-10日

サブ課題 A: 素粒子現象論への応用

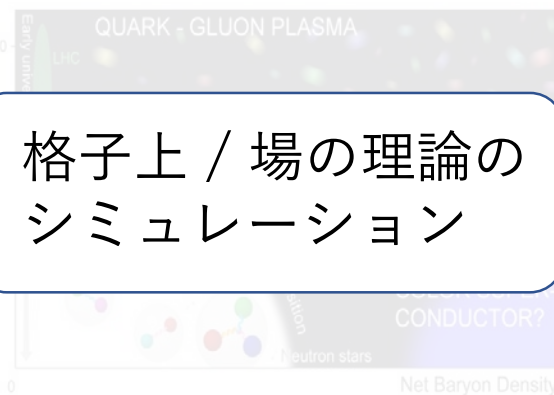
「究極の自然法則と宇宙開闢の解明」に向けて



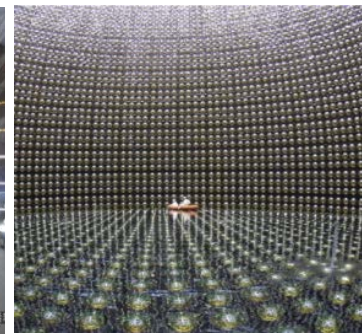
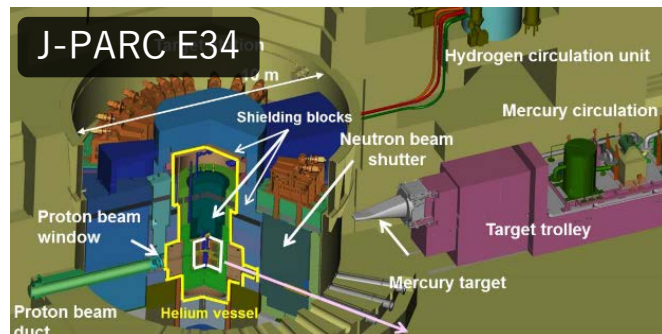
「超弦理論」～ 究極の理論?

「素粒子現象論」: 標準理論
を超える物理法則の探求

「QCD相転移」 \Leftrightarrow 宇宙初期



大型実験と協力して標準理論を超える「新物理」を探索



フレーバーファクトリー実験 μ 粒子、核子の物理 などなど

幅広く精密なインプットを格子 Q C D 計算により提供

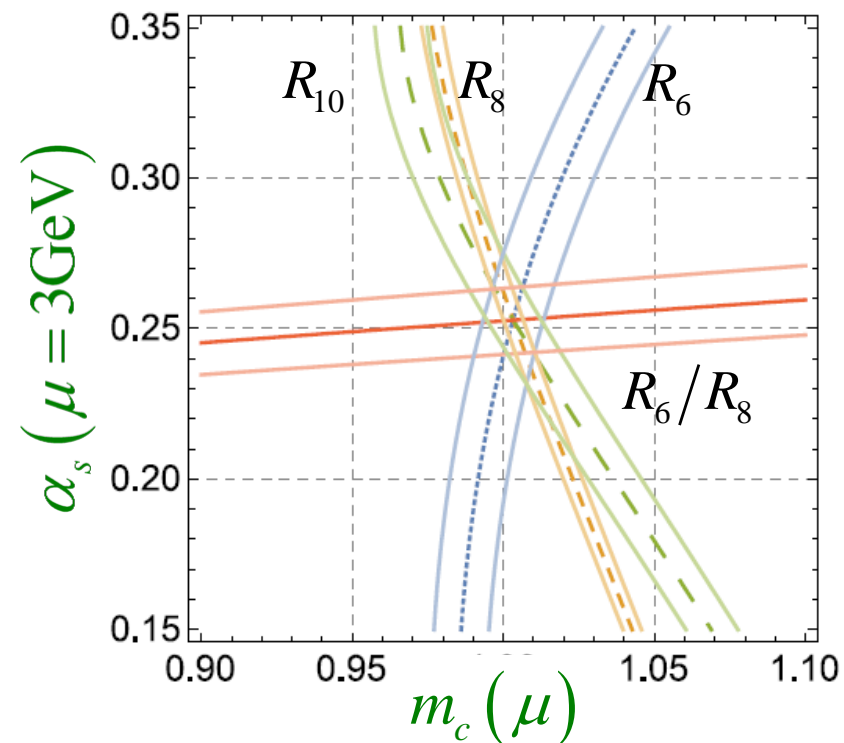
格子QCDシミュレーション

応用範囲が広く・高精度の計算手法

カイラル対称性を保ち、高速な定式化 (Mobius DWF, JLQCD)

- 広い応用範囲
 - 高精度なくりこみ
⇒ ハドロン行列要素全般
 - 連続理論とのマッチング
⇒ α_s, m_c の決定
- ⇔ 対称性が禁止する非物理的効果
- 系統誤差の制御
 - $O(a)$ 誤差の禁止 ⇒ Bの物理
- 「QCD相転移」との親和性

Nakayama et al., PRD('16)

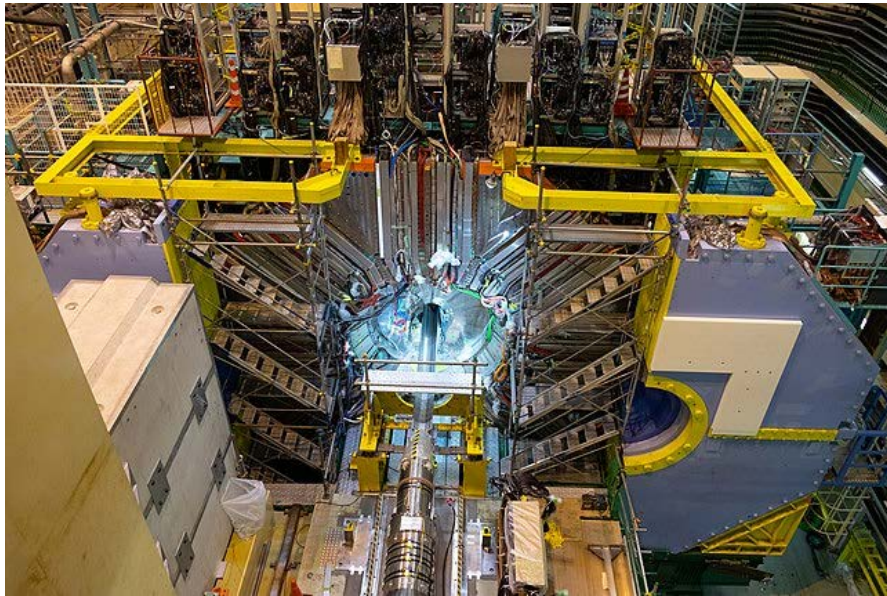


ポスト京につながる応用計算を推進 (本格実行フェーズ)

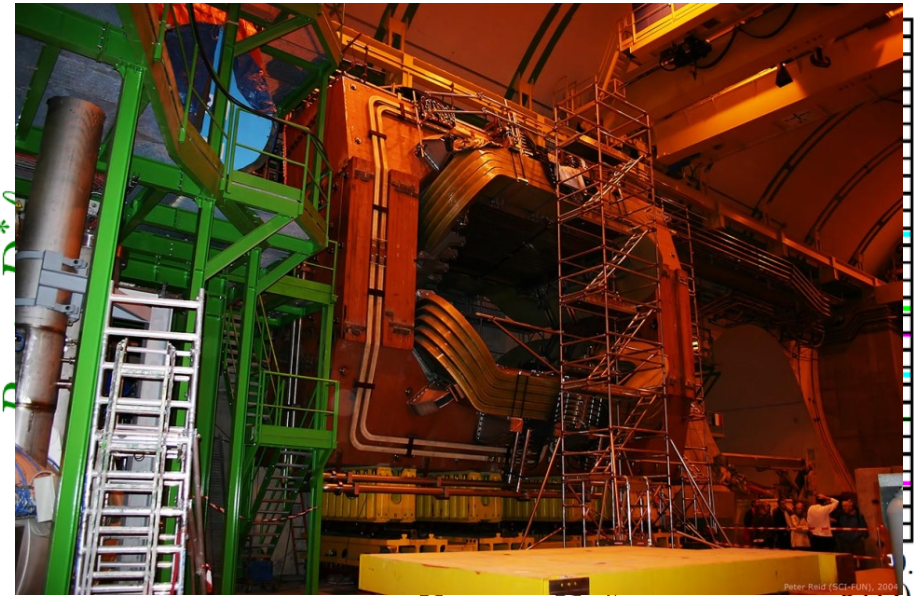
Bファクトリー実験

重いB中間子の豊富な崩壊モードで新物理を探索

SuperKEKB/Belle II @ KEK



BHQ @ CERN Bar, Belle, LHCb



- -2024年: Belleの50倍のデータ
- Phase III (2019/3) ⇒ 物理ラン
- セミレプトニック崩壊 $B \rightarrow X\ell\nu$, ...

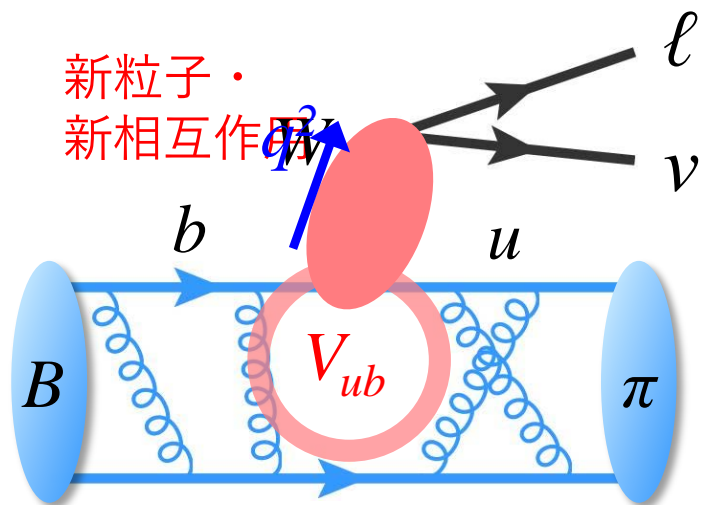
- 2021-2023年: Run3
- 稀崩壊 $B \rightarrow X\ell\ell$, ...

これらの実験にタイムリーにインプットを提供

セミレプトニック崩壊

小林・益川行列の決定 / 新物理探索

e.g. $B \rightarrow \pi \ell \nu$ 崩壊



- 小林益川行列の決定

$$\begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

物質と反物質の
非対称性の源
新物理による
に新たな源？

- 新物理探索

⇔ 標準理論と実験の精密比較

QCDの非摂動効果

$$\langle \pi(p') | V_\mu | B(p) \rangle = (p + p')_\mu f_+^{B\pi}(q^2) + (p - p')_\mu f_-^{B\pi}(q^2)$$

格子QCD ⇒ 形状因子を実験に見合う精度で決定

シミュレーションセットアップ

カイラル対称性な作用

カットオフ $a^{-1} \simeq 4.6 \text{ GeV} \sim m_b$

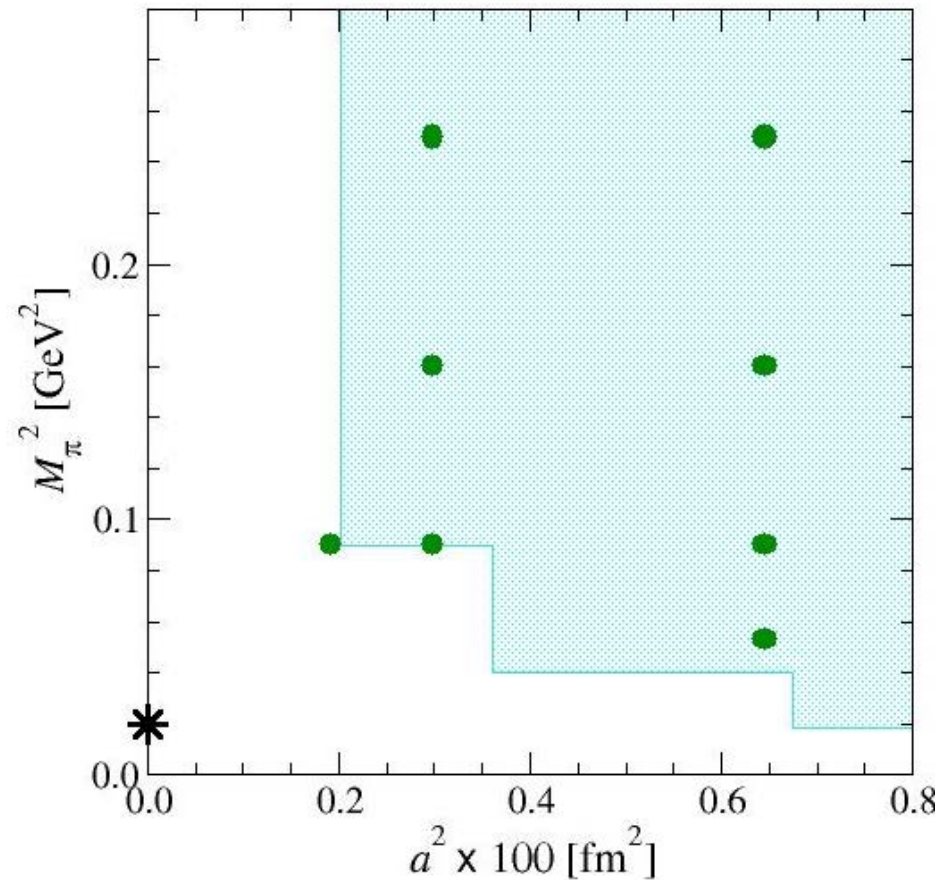
- charm: $m_c \ll a^{-1}$: OK!
- bottom: 現実よりも軽い質量 m_Q
 $\Rightarrow m_Q \rightarrow m_b$ への外挿が必要

現実より重い $M_\pi \gtrsim 230 \text{ MeV}$

- 高統計精度を達成
- カイラル摂動論で外挿を制御

先行研究では

- 大きく変わらないパラメタ: *e.g.* $B \rightarrow \pi \ell \nu$
- 有効理論のボトムクォーク作用 \Rightarrow くりこみ・マッチングの不定性

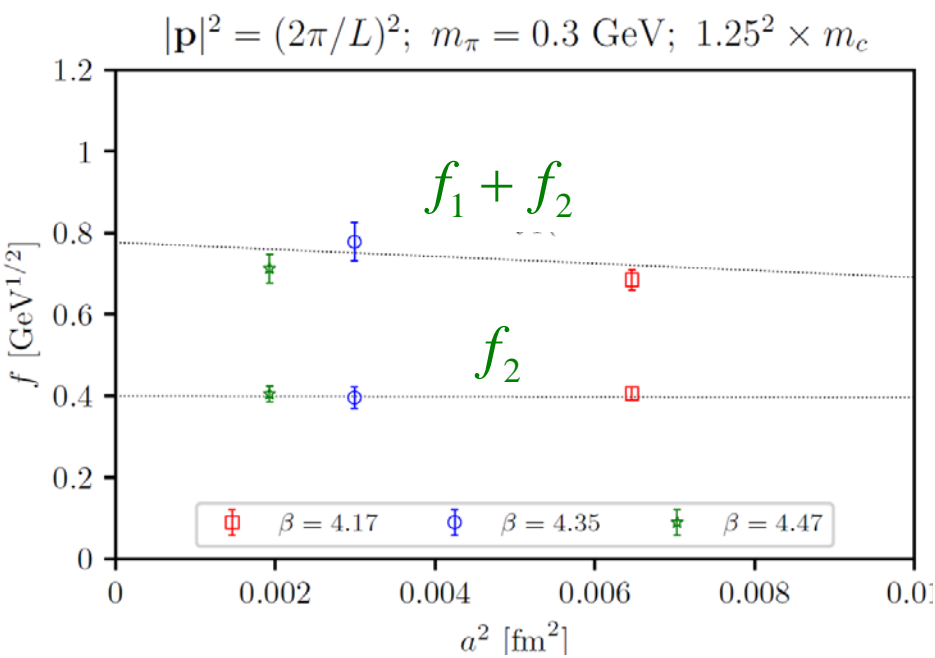


確かな QCD 計算 \Rightarrow 物理点計算 @ ポスト京

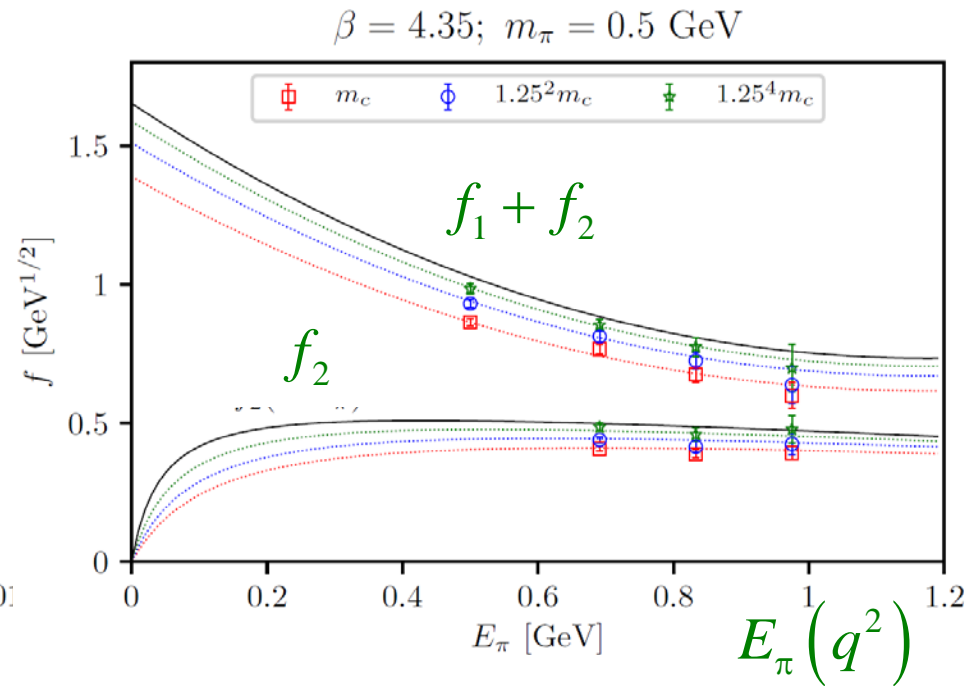
$B \rightarrow \pi \ell \nu$ 崩壊の研究

格子間隔とボトムクォーク質量の外挿の制御

B. Colquhoun @ Lattice 2018 → J. Koponen



$f_1 + f_2, f_2 \text{ vs } a^2$



$m_Q = m_c, 1.6m_c, 2.4m_c \Rightarrow m_b \sim 4.5m_c$

$m_Q < a^{-1} \Rightarrow$ 小さい $O((am_Q)^2)$

重クォーク有効理論の関数形

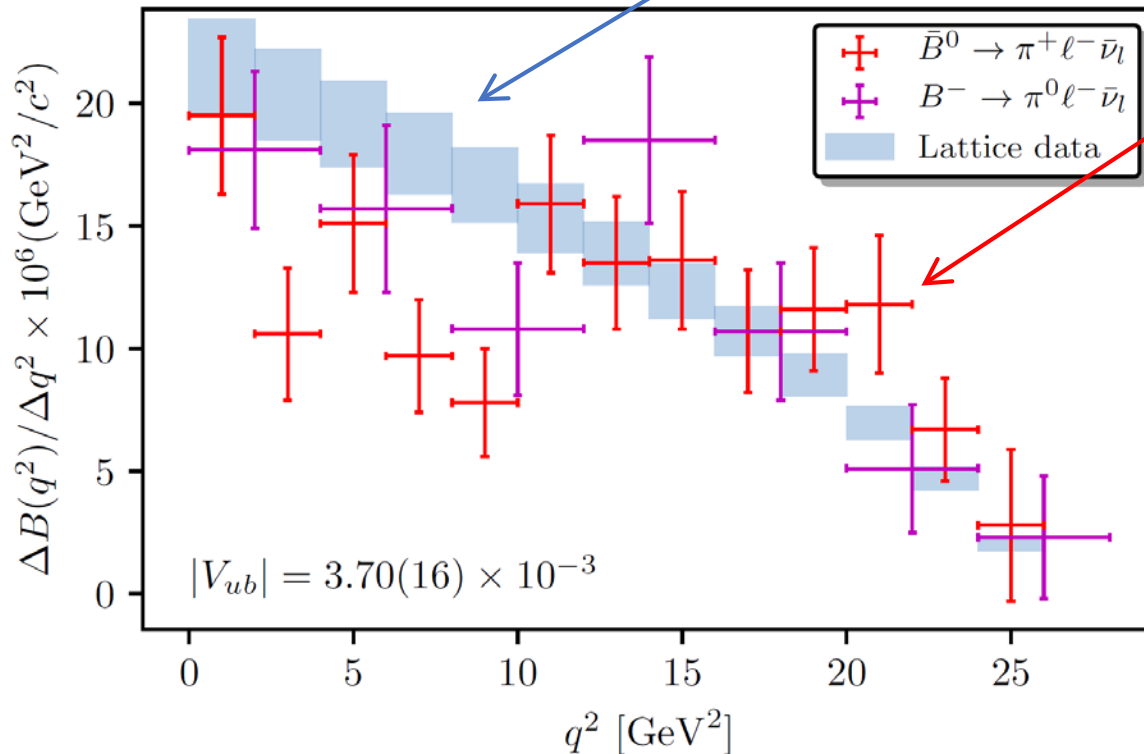
~5% 統計精度 + 系統誤差 (確認中) < 10% @ 本格実行フェーズ

$B \rightarrow \pi \ell \nu$ 崩壊の研究

実験との比較検証

e.g. 微分分岐比の比較

格子QCDデータ：形状因子² $\otimes |V_{ub}|^2$



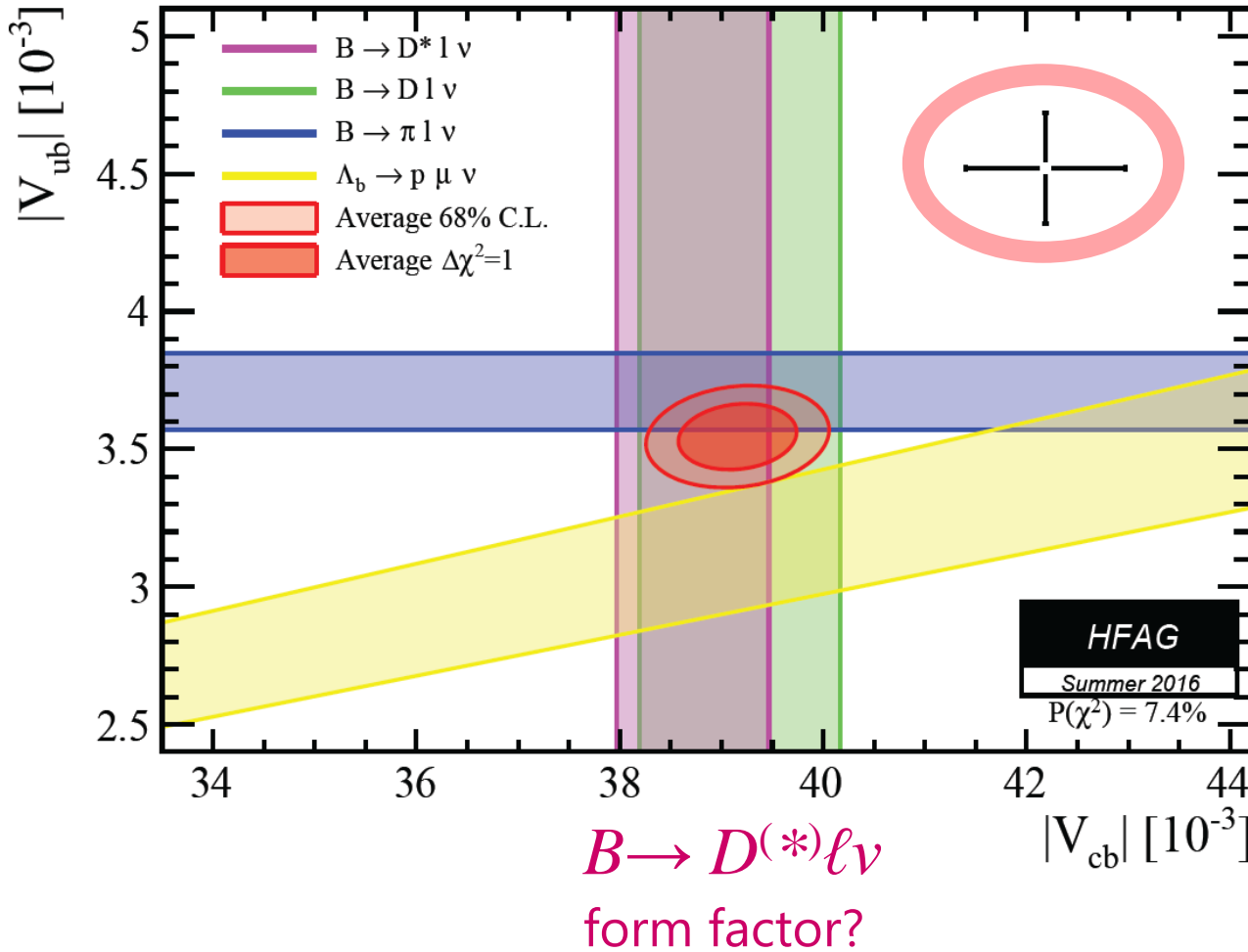
実験データ: Belle測定値

- 両者が合うように $|V_{ub}|$ を決定
- $|V_{ub}|$ をインプット
⇒ 新物理の寄与の検証

- Belle → Belle IIによって精度は格段に向上 (20%→5%)
- 見合う精度で形状因子を計算@ポスト京

小林益川行列の矛盾

HFLAV '16



インクルーシブ崩壊
= 終状態のハドロン
を指定しない

$$B \rightarrow X_u \ell \nu$$

$$= \pi \ell \nu + \rho \ell \nu + \dots$$

エクスクルーシブ崩壊

$$B \rightarrow \pi \ell \nu$$

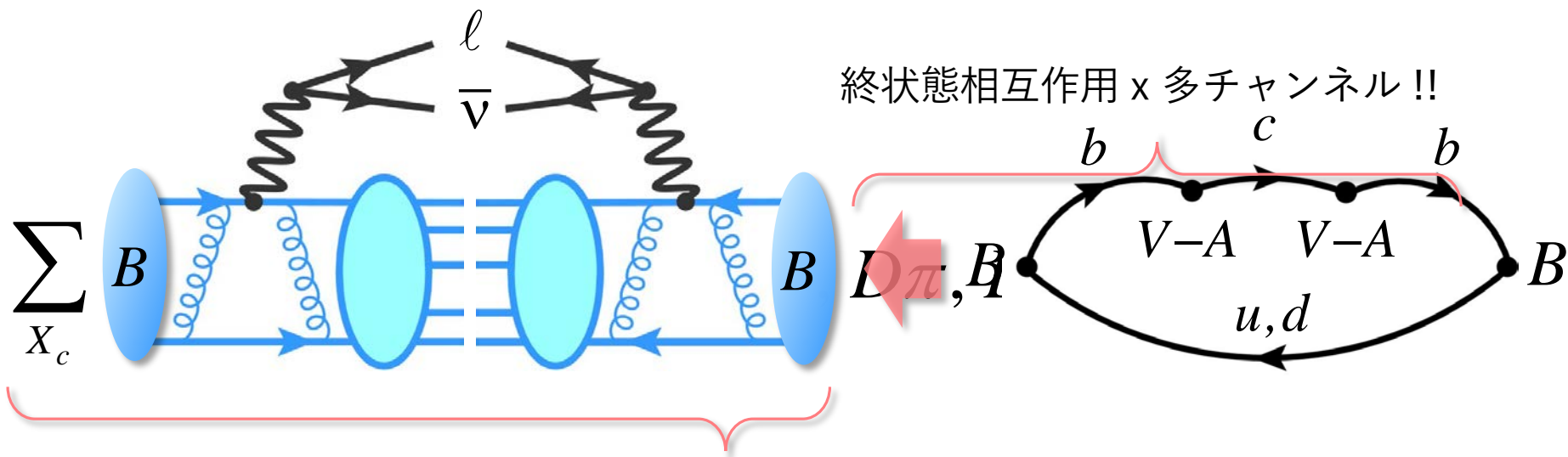
$b \rightarrow c$ background?

矛盾は未解決、さらなる調査が必要

インクルーシブ崩壊の研究

橋本 '17: 格子QCDによる研究手法の開発

e.g. $B \rightarrow X_c \ell \nu$



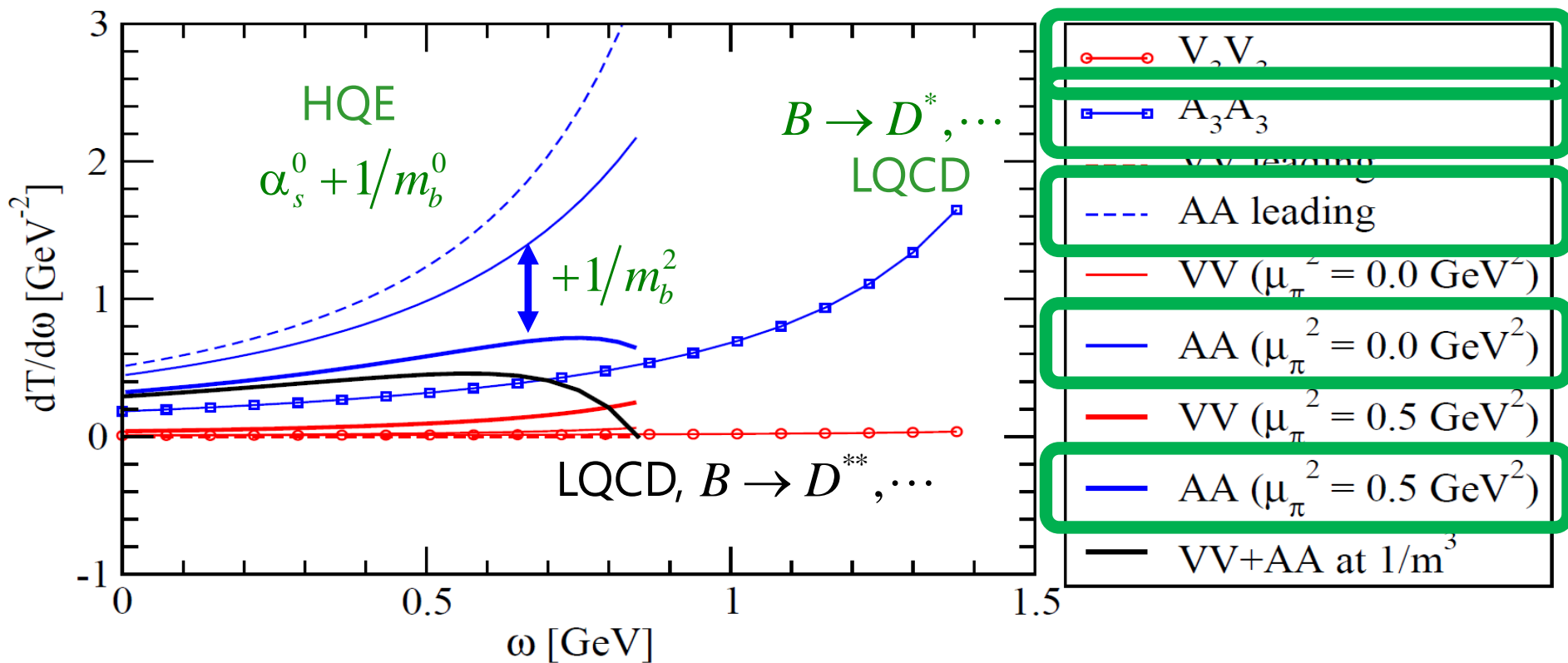
$$\Gamma(B \rightarrow X_c \ell \nu) \propto |V_{cb}|^2 L^{\mu\nu} H_{\mu\nu}$$

- 従来の解析的計算: 重クォーク展開 ($\alpha_s, 1/m_b$ の 2 重展開)
- $H_{\mu\nu}$ の格子計算 $\Rightarrow |V_{cb}|$ のより確かな決定
- 解析的計算, $B \rightarrow D, D^*$ との比較 \Rightarrow ずれの原因の追究

インクルーシブ崩壊の研究

従来の解析的計算との比較

Hashimoto @ Lattice 2018

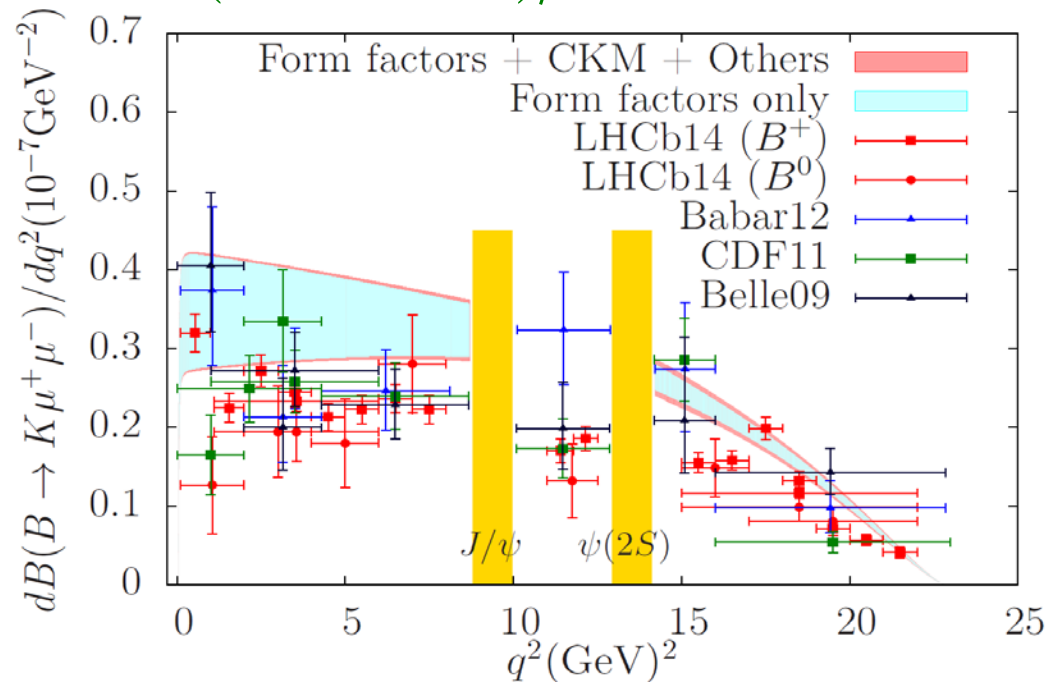
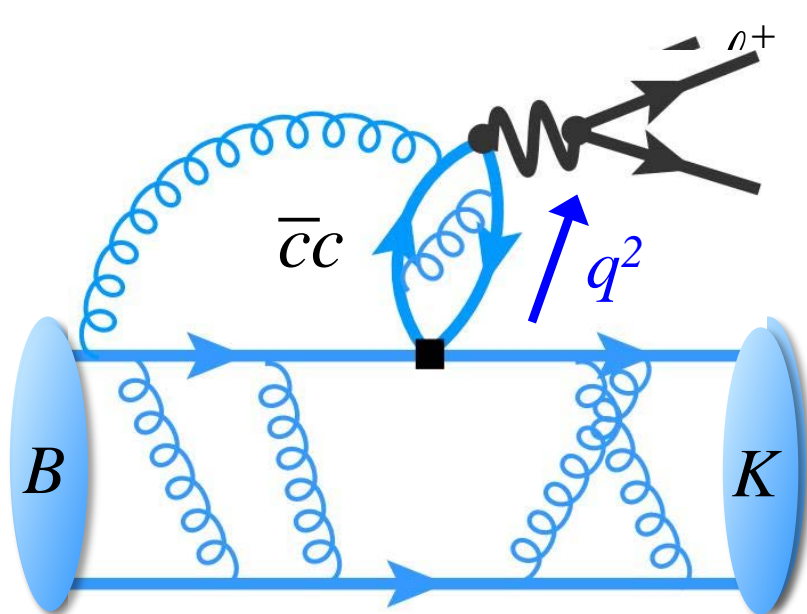


- 摂動高次補正： Gambino氏 (INFN Torino) との国際協力
- 解析的計算の信頼性 ⇒ 小林益川行列のずれを理解・解決

稀崩壊 $B \rightarrow K\ell\ell$ の研究

新物理の有望なプローブ

$dB(B \rightarrow K\mu\mu)/dq^2$ Fermilab/MILC '16

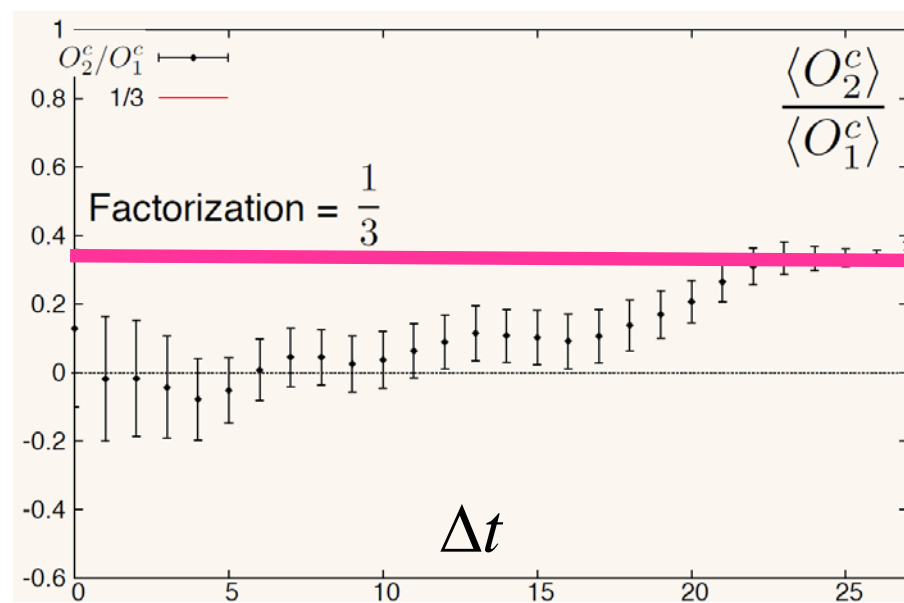
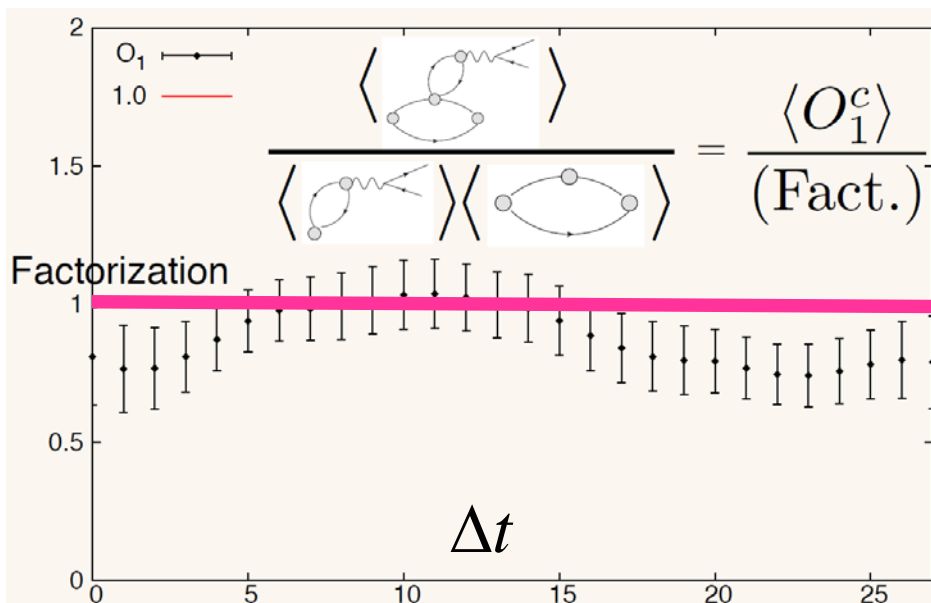


- 標準理論の寄与: ループ抑制 \Rightarrow 新物理の有効なプローブ
- ハドロンの効果: $B, K, \bar{c}c (J/\psi, \dots)$ + 長距離効果
- 因子化近似: 4点関数 = “ $B \rightarrow K$ 3点関数” \otimes “ $\bar{c}c$ 2点関数”

稀崩壊 $B \rightarrow K\ell\ell$ の研究

因子化近似の検証

Nakayama @ Lattice 2018



- $K \rightarrow \pi\ell\ell$: RBC/UKQCD '12、 B の稀崩壊では初の検証
 - 因子化近似の破れを示唆 \Rightarrow より系統的な計算が必要
- \Rightarrow 従来の理論計算の問題点 / 確かな理論計算

ポスト京での計画

運用開始5年後： $B \rightarrow \pi \ell \nu$ 形状因子を2%精度で計算

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

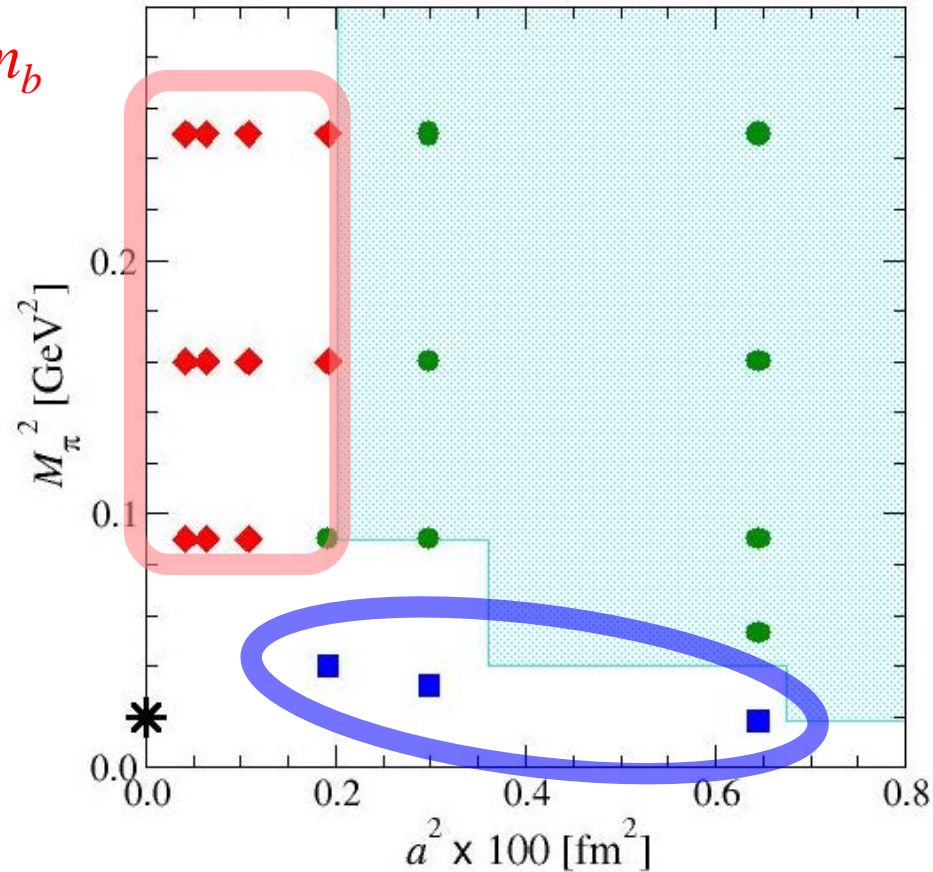
- 配位生成: 11.1 PFLOPS・年

物理点計算： $M_\pi \gtrsim M_{\pi,\text{phys}}$, $L \sim 6 \text{ fm}$

- 配位生成: 8.75 PFLOPS・年

既に連続時空への外挿は制御
クォーク質量に関する外挿を排し
目標精度を達成

50PFLOPS・年の $\frac{1}{2}$ で配位生成完了
+ 残りで物理量計算



+ インクルーシブ崩壊や稀崩壊などの定量的研究

Belle IIなどと協力して幅広い崩壊モードで新物理を探索

実験との連携

Belle II Theory Interface Platform (B2TiP)

Belle II Physics Book (arXiv:1808.10567, 約700ページ!!)

- Belle II実験の新物理探索へのインパクトをまとめたレポート
- 実験・理論精度を評価、有望な崩壊モードの測定を提案

Process	Observable	Theory	Sys. limit (-	vs LHCb	vs Belle	Anomaly	NP
● $B \rightarrow \pi l \nu_l$	$ V_{ub} $	***	10-20	***	***	**	*
● $B \rightarrow X_u l \nu_\ell$	$ V_{ub} $	**	2-10	***	**	***	*
● $B \rightarrow \tau \nu$	$Br.$	***	>50 (2)	***	***	*	***
● $B \rightarrow \mu \nu$	$Br.$	***	>50 (5)	***	***	*	***
● $B \rightarrow D^{(*)} l \nu_\ell$	$ V_{cb} $	***	1-10	***	**	**	*
● $B \rightarrow X_c l \nu_\ell$	$ V_{cb} $	***	1-5	***	**	**	**
● $B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu_\tau$	$R(D^{(*)})$	***	5-10	**	***	***	***
● $B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu_\tau$	P_τ	***	15-20	***	***	**	***
● $B \rightarrow D^{**} l \nu_\ell$	$Br.$	*	-	**	***	**	-

- 格子計算の現状と展望の章
- 格子計算の精度を予想 ⇒ 理論精度の評価の重要なインプット

研究会共催

国際研究会

Belle II Physics Week (KEK, 10/22-26)

- 若手を主対象とした講義、ハンズオン
- “Dark sector”, “LFUV”

KEK-FF 2019 (第6回、KEK, 2/14-16)

- 国内外の専門家が最近の進展を議論



国内研究会

Flavor Physics WS (IPMU, 10/30-11/2)

Bファクトリー物理勉強会 (KEK, 7/20)



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物理を探索し、ブレークスルーを創出

- 重いクォークの物理

本格実施フェーズ： 計算手法の確立とポスト京に向けた計算

✓ FY'16: チャーム質量 [1%]、D中間子崩壊定数 [2%]

✓ FY'17: D中間子形状因子 [4%]

- FY'18: B中間セミレプトニック崩壊の定量的研究
インクルーシブ崩壊、稀崩壊の研究手法の開発

⇒ 最終ベース目標の達成、新しい応用が可能に

- 協力体制の構築 ⇒ ポスト京： Belle IIと協力した新物理探索

- μ 粒子の物理、他？