



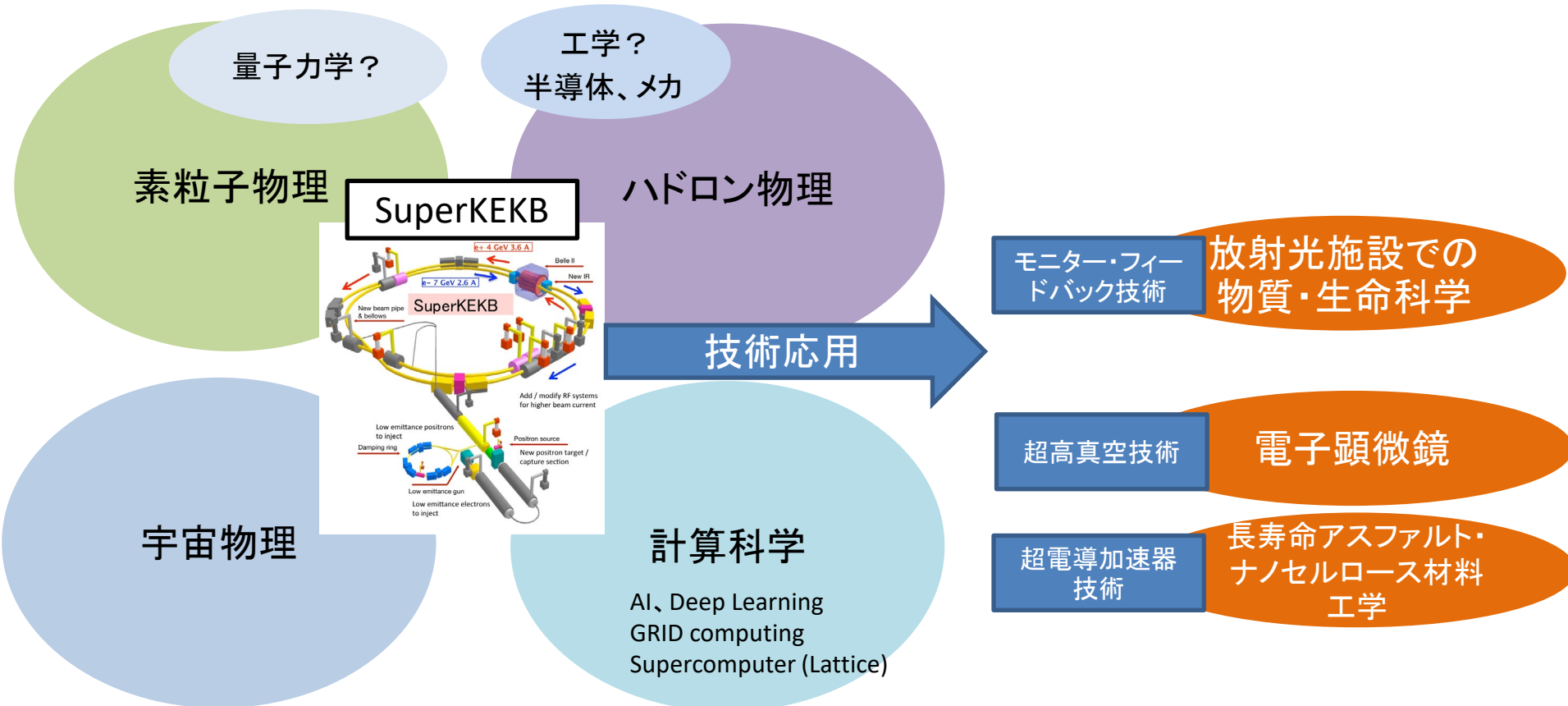
SuperKEKB/Belle II

石川 明正
(KEK)

居波さん、早坂さん、谷田さん、瀧澤さん、後田さんには情報を頂きました。
ありがとうございます。

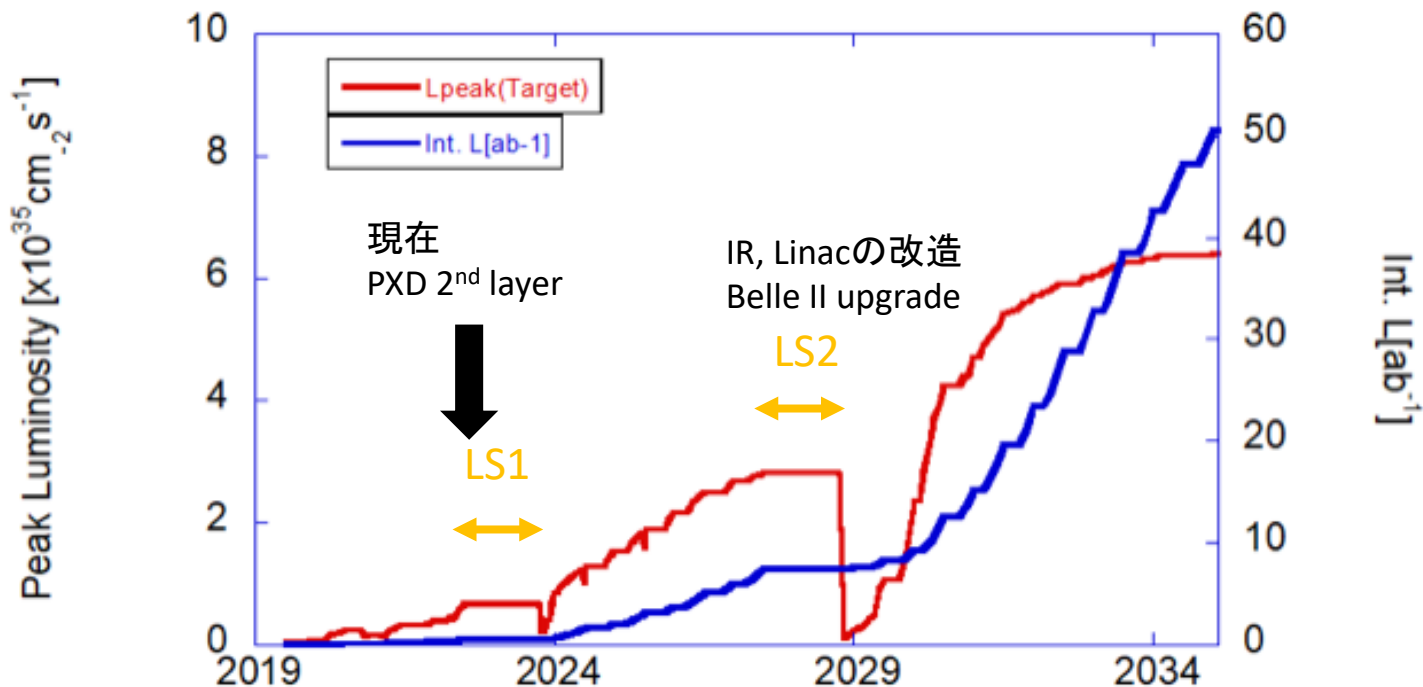
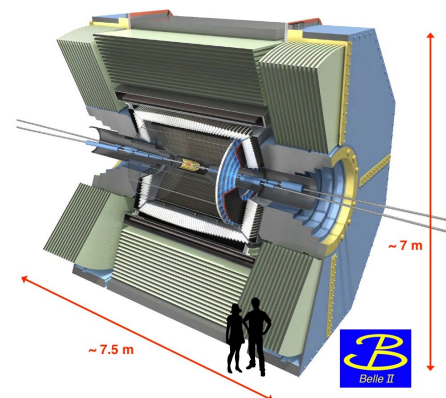
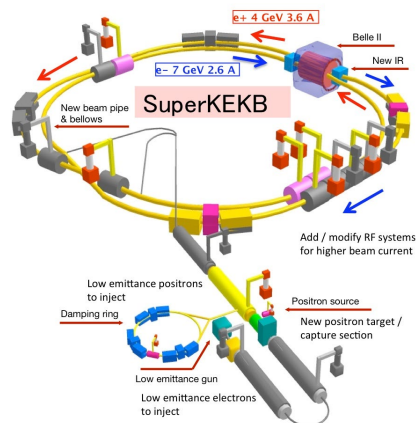
ビジョン

- サイエンス
 - 「SuperKEKB加速器を用いた初期宇宙の謎の解明」
- 他分野との融合・応用
 - 「SuperKEKB加速器を核とした素粒子物理・ハドロン物理・宇宙物理・計算物理の学際的研究と他分野への応用」



SuperKEKB/Belle II の予定とUpgrade

- 現行の予定 (~2034年頃)
 - 2回の Long Shutdown を行い $50ab^{-1}$ の取得
 - LS2の時期は検討中
- Upgrade Options (議論中)
 - ルミノシティを5倍にし $250ab^{-1}$ を取得
 - エネルギーを上げる
 - 電子偏極を導入



Belle II の物理 1

新物理の探索

B、Bs、D、 τ 粒子での量子効果による新物理探索

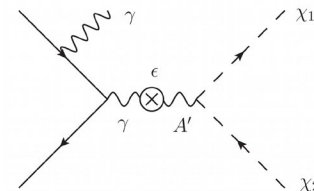
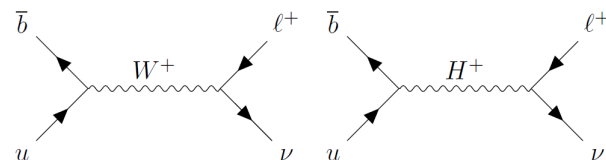
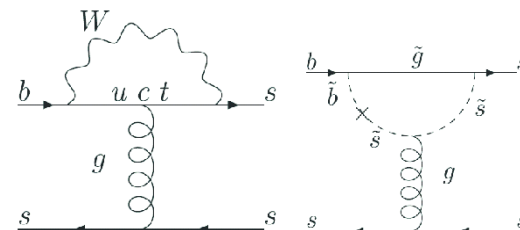
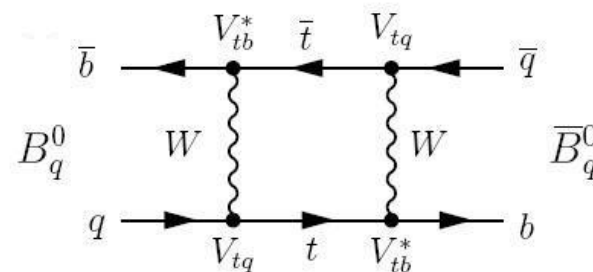
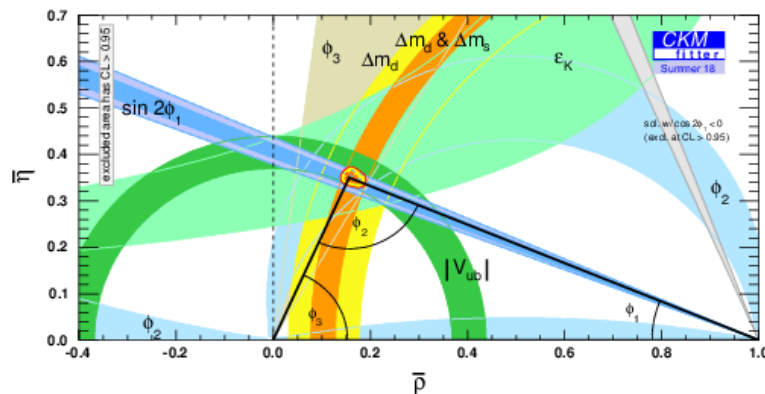
- ループの中には重い新粒子が回りやすい
- 重い粒子の崩壊では新しいヒッグスの影響が見えやすい
- B中間子ではレプトン普遍性の破れの Anomaly が見えている
- 主な新物理ターゲット
 - 新たなCP Violation と拡張ヒッグス模型の探索による宇宙の物質創生の謎 (消えた反物質の謎) の解明
 - サハロフの3条件の2番目と3番目
 - SUSY、拡張ヒッグス模型、レプトクォーク、 W' 、 Z' 、etc.

LHC による直接探索より高い質量スケールにも到達可能

軽い新粒子探索 MeV-GeV領域

- 宇宙の暗黒物質と関連する粒子
- レプトンや光子に結合しやすい新粒子
- 長寿命粒子

他の加速器では探しにくい領域をカバーする
10GeVというエネルギーはユニーク



Belle II の物理2

標準模型の理解

標準模型測定

– Radiative return $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$ (真空偏極)

- Muon g-2 の理論計算に重要

- 実験と理論は 4.2σ のズレ

- 実験、理論、Lattice QCDの全ての理解が重要

- Higgs 質量の理論計算にも重要

– 電弱パラメータの測定

– QCD結合定数の測定

Hadron 物理 (原子核と素粒子のcross over)

– 新しいハドロン分類の確立

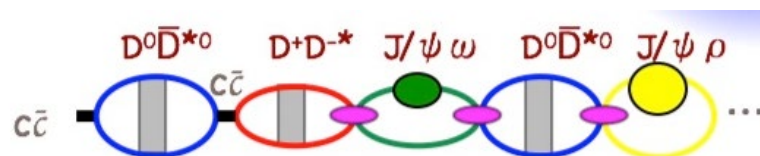
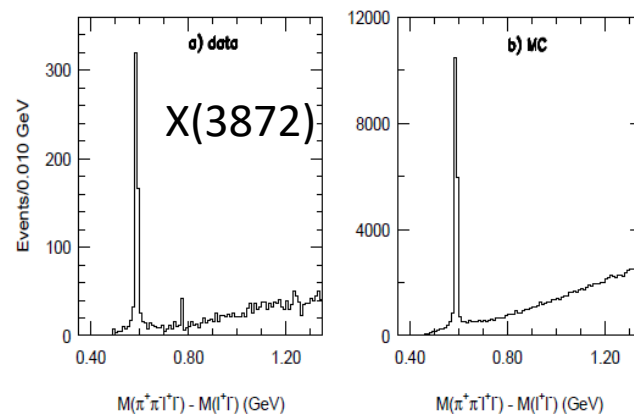
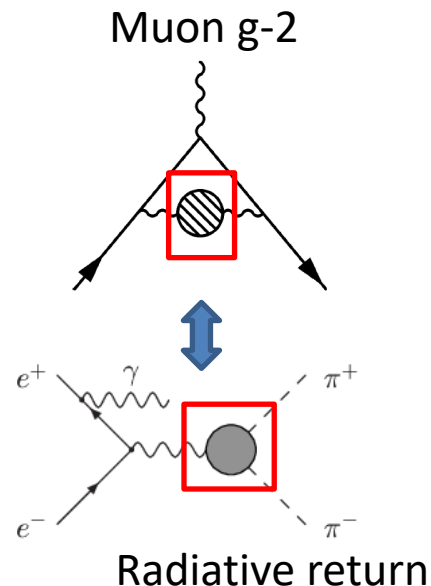
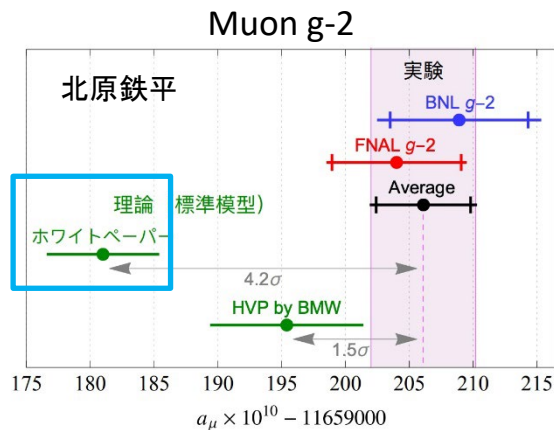
- Quark 4つや5つの state, X(3872)

- Hybrid state

- Glue ball

- もっと新しい物?

– LHCb では出来ない電磁生成崩壊の理解



X(3872) は mixed state?

分野融合や応用

- 計算科学

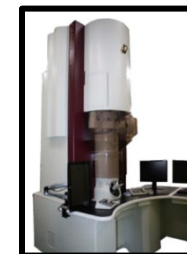
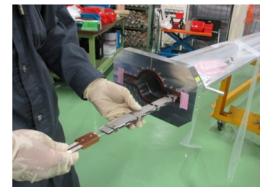
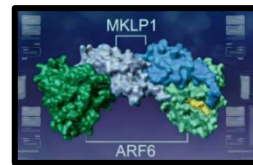
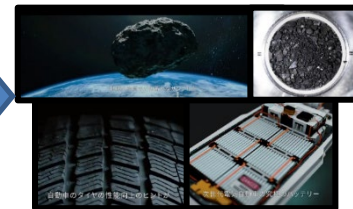
- 機械学習: 素粒子実験、加速器制御
- スーパーコンピューター: Lattice QCD
- GRID computing: 事象再構成、物理解析

- 量子力学

- B meson system での EPR paradox の検証
- Etc.

- 加速器工学

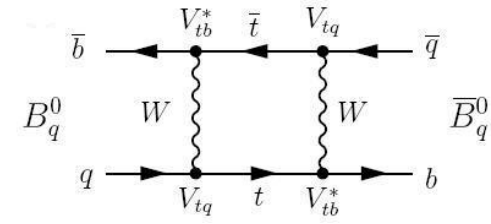
- モニター・フィードバック技術: 放射光施設 → 物質・生命科学
- 超高真空技術: 電子顕微鏡
- 超電導加速器技術: 材料、長寿命アスファルト・ナノセルロース材料工学



50ab⁻¹ での代表的な物理

- Unitarity Triangle
 - Lepton Flavor Universality Anomaly の検証
 - Tau LFV
 - Dark sector and radiative return
 - Hadron physics
-
- 他にも重要な物理は多数ありますが、時間の都合上割愛します

Unitarity Triangle Before/After Belle II

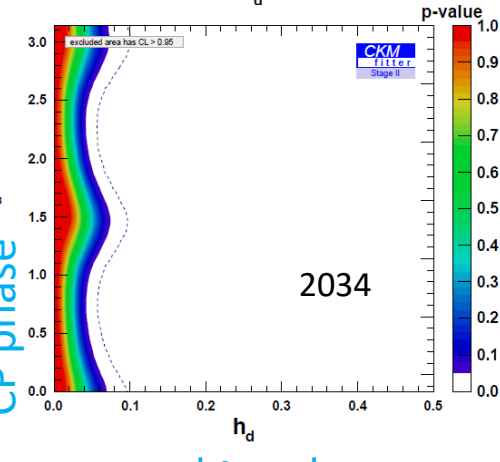
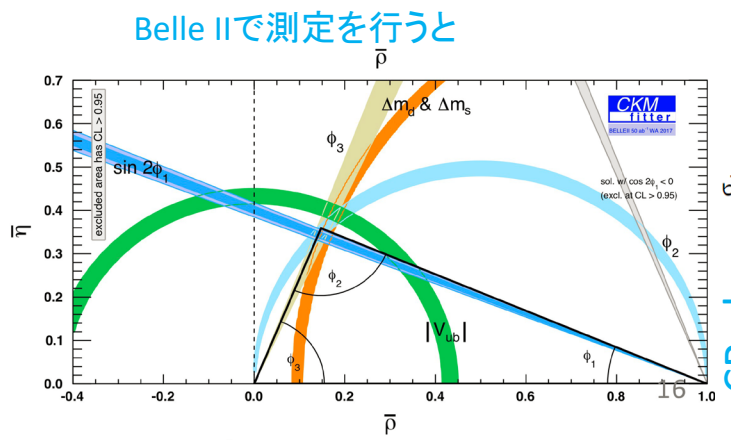
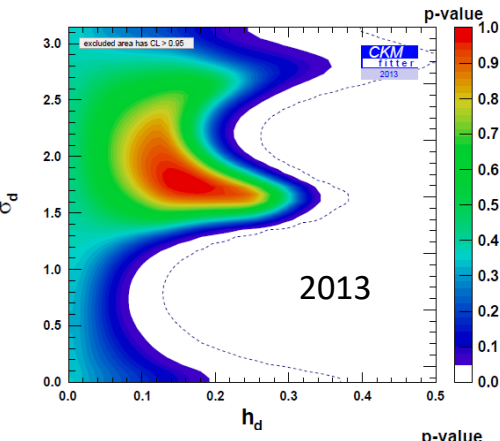
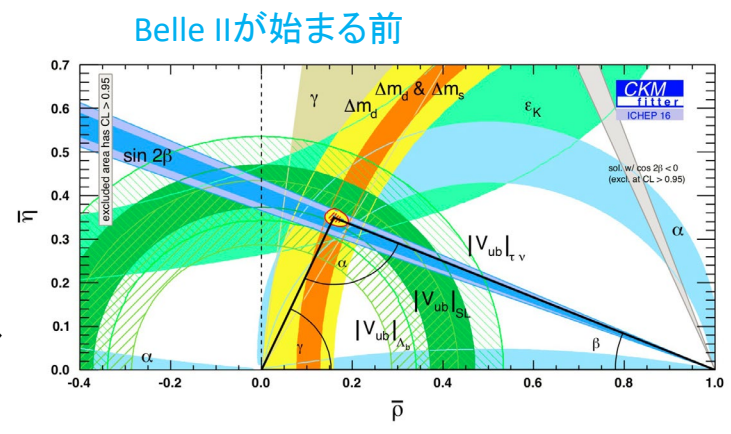


新たなCPV → 宇宙の物質創成

$$M_{12}^{d,s} = (M_{12}^{d,s})_{\text{SM}} \times (1 + h_{d,s} e^{2i\sigma_{d,s}})$$

- $B^0-\bar{B}^0$ Mixing 中の新物理
- Belle IIが始まる前は標準模型 mixing amplitude に対して35%の新物理が可能
- Belle IIが50ab⁻¹収集した後は、新物理は7%以下に制限、もしくは新物理を発見出来る
 - |Amp| と CP phase の両方に制限
- 有効場理論から計算すると ~7000TeV の新物理まで探れる
- SUSY だと 10TeV 程度

Tanimoto and Yamamoto 2014, 2015



B中間子崩壊でのレプトン普遍性

- 標準模型では3種類のレプトンは質量を除いて全く同じ性質
- 二つの崩壊 $b \rightarrow c\tau\nu$ and $b \rightarrow sl^+\nu_l$ でレプトン普遍性の破れの徴候

- $b \rightarrow c\tau\nu$ は Belle, Babar, LHCb

- $b \rightarrow sl^+\nu_l$ は LHCb

$\sim 4\sigma$

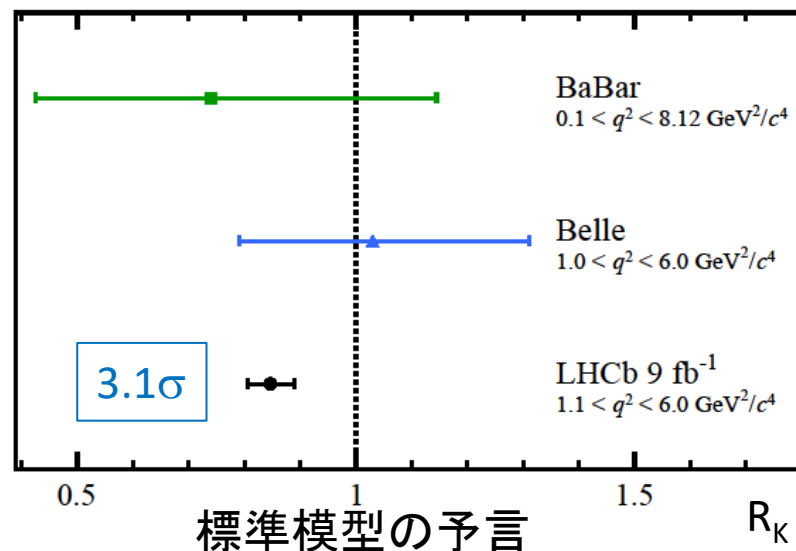
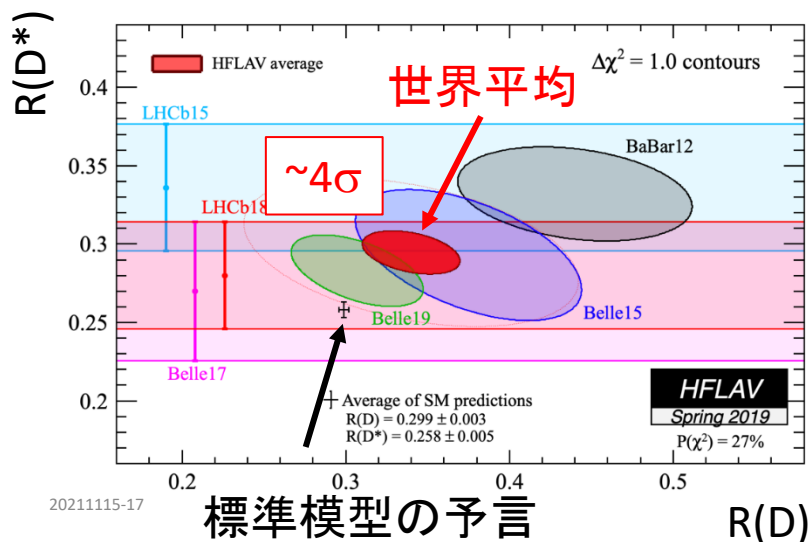
単純な平均を R_K と R_{K^*} とすると $\sim 4\sigma$

$$R(D^{(*)}) = \frac{BF(B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu_\tau)}{BF(B \rightarrow D^{(*)} l \nu_l)} \quad l=e, \mu$$

$$R_H = \frac{B(B \rightarrow H \mu^+ \mu^-)}{B(B \rightarrow H e^+ e^-)}$$

$$H = K, K^*, X_s, \dots$$

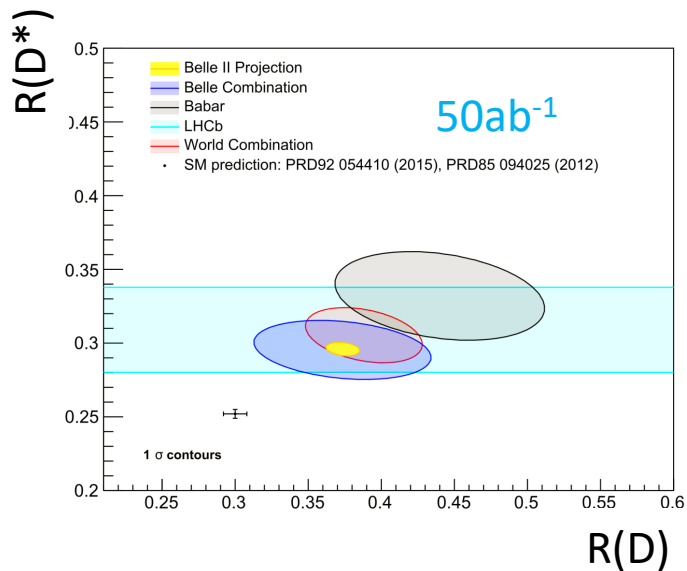
- Leptoquark や flavorful W'/Z' などの新物理で説明出来る



レプトン普遍性の破れ $b \rightarrow c\tau\nu$ and $b \rightarrow sl^+\bar{l}$

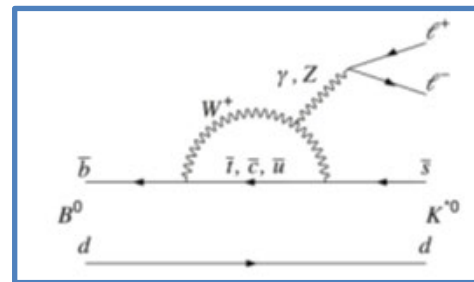
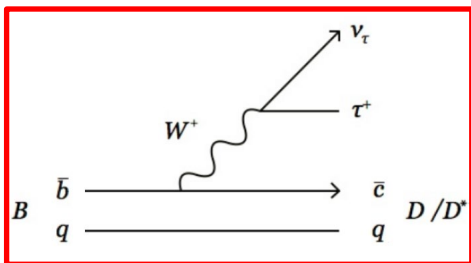
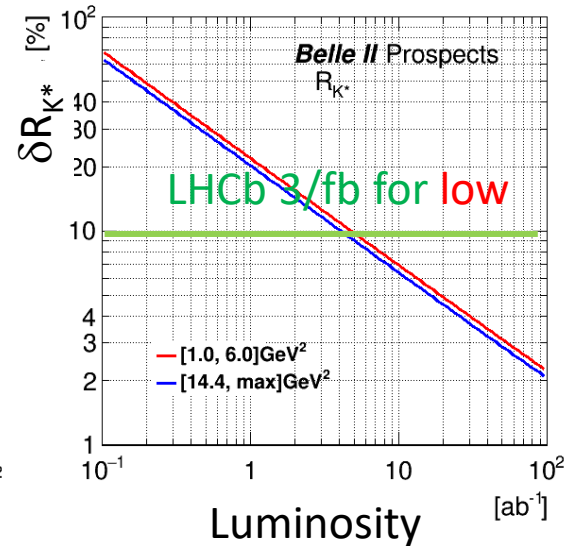
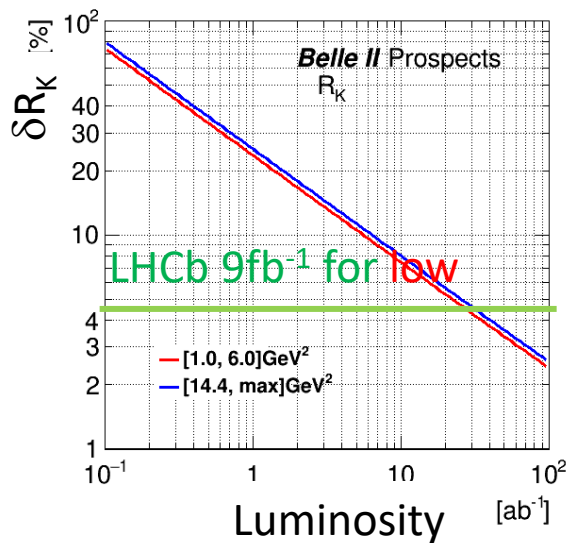
• $b \rightarrow c\tau\nu$

– 現在の Belle の中心値であれば $\text{約} 3\text{ab}^{-1}$ で 5σ 以上で新物理を発見できる



• $b \rightarrow sl$

– 現在の LHCb の中心値であれば $\text{約} 10\text{ab}^{-1}$ で新物理を発見できる

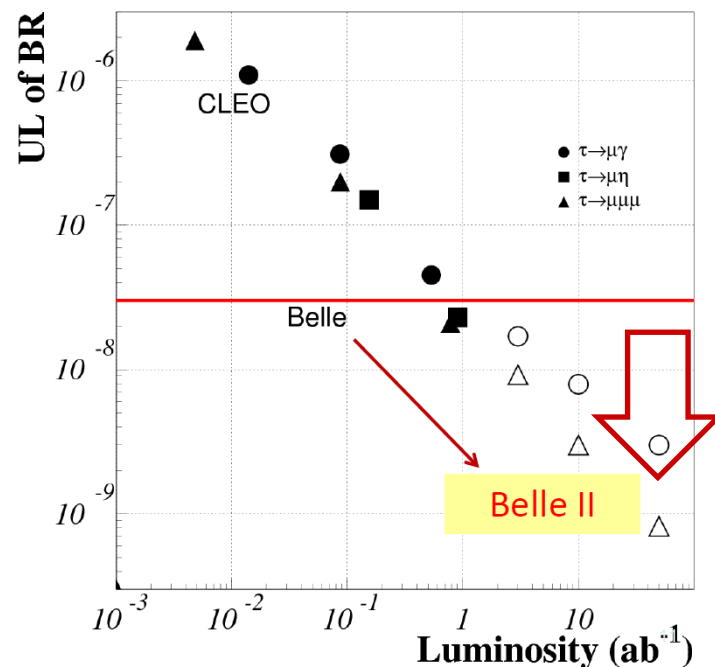
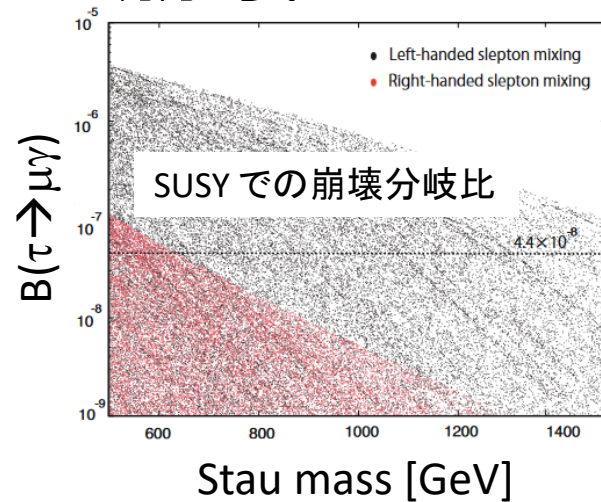


レプトンフレーバーを破るtau崩壊

禁止過程の探索 → SUSY, etc

- ニュートリノを放出しない崩壊
- 標準模型で禁止
 - ニュートリノ混合を考慮に入れても $B(\tau \rightarrow \mu\gamma) \sim O(10^{-54})$
- 見つかったら clear な新物理
- 現状 Belle II でしかできない物理

- 50ab^{-1} のデータを収集
 - ○ $BR(\tau \rightarrow \mu\gamma) \sim 3 \times 10^{-9}$
 - △ $BR(\tau \rightarrow \mu\mu\mu) \sim 8 \times 10^{-10}$



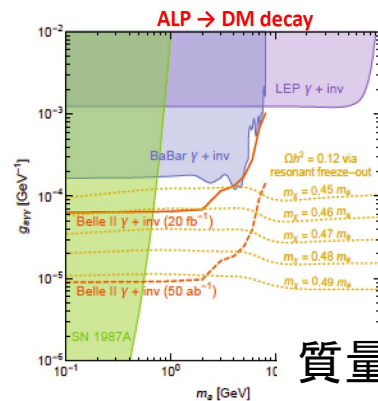
Dark Sector と Radiative Return

暗黒物質

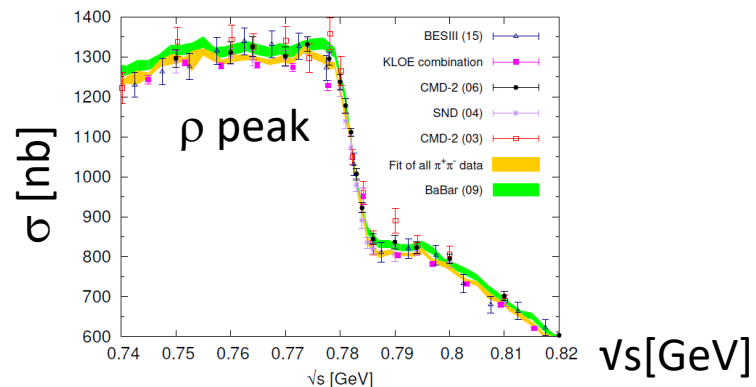
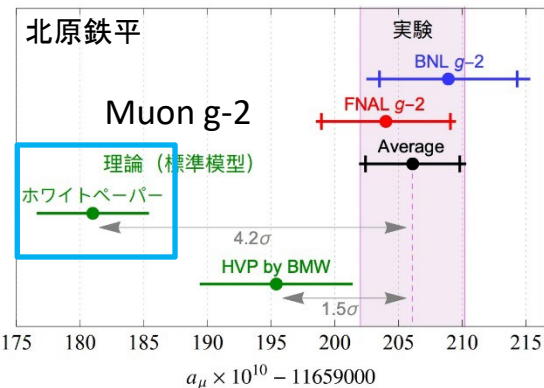
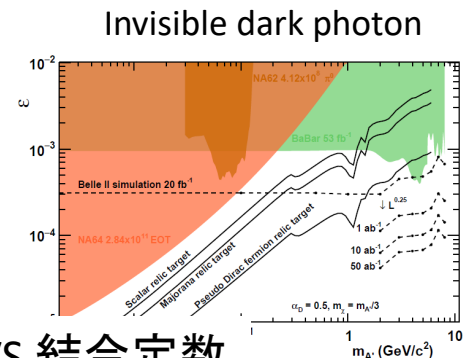
- Dark Sector
 - MeV-GeV 領域に存在すると、**宇宙の暗黒物質密度**を説明可能なモデルが多数存在し、Belle II で探索可能
 - ALP→DM decays
 - Invisible Dark photon
 - etc

Anomalyの検証

- Radiative return ($e^+e^- \rightarrow \gamma\pi^+\pi^- \dots$)
 - Low mass; **muon g-2 理論計算**への input
 - Lattice QCD との比較
 - ρ peak で KLOE と Babar でテンションがある
 - Belle II は BaBar と同程度の精度で測定し決着をつける
 - 系統誤差が主要な解析であるが、すでに BaBar と同程度のデータを取得している
 - High mass; Higgs mass 理論計算への input



質量 VS 結合定数



ハドロン物理

核物理懇談会のHPより

- 大目標：新しいハドロン分類の確立

- 普通のハドロン

- エキゾチックハドロン？：

- コンパクトなマルチクォーク状態
 - ハドロン分子(束縛/バーチャル)、
 - グルーボール
 - ハイブリッド...

- ダイクォークの自由度？

- 新しい「色電荷」の組み合わせ

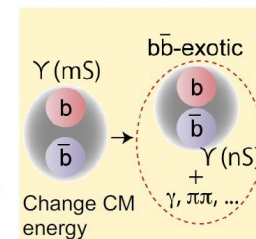
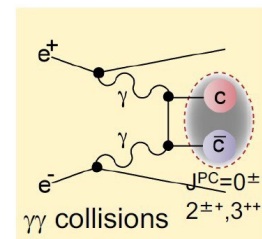
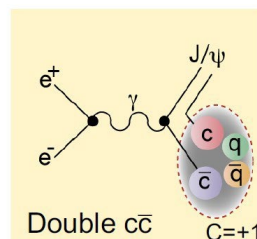
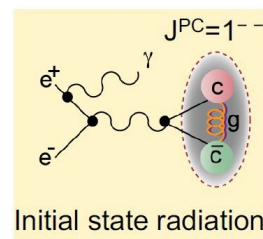
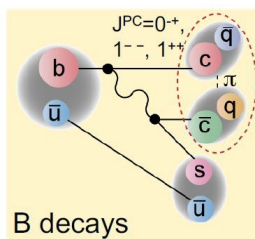
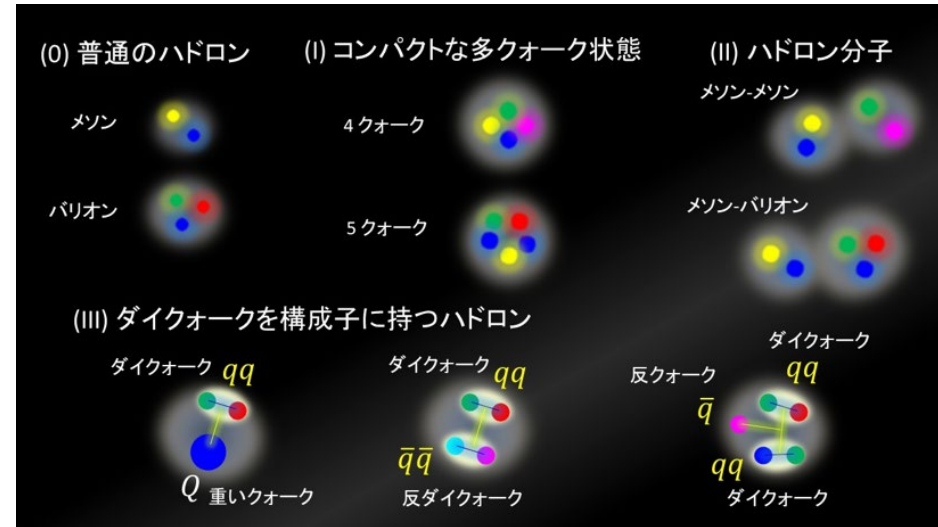
- その間の閉じ込め力はどう働く？

- Belle IIではX(3872)をはじめ、

多種多様なエキゾチックハドロン候補の性質を精度よく調べられる。

- Charm quark と bottom quark を含む新ハドロン

- 様々な方法での生成と崩壊による量子数決定が可能



Upgrade

SuperKEKB加速器の3つのUpgrade案

- ルミノシティを5倍にし 250ab^{-1} を取得

- 加速器と検出器の大改造

- エネルギーを上げる

- 現行は 11.24GeV が限界

- $B^0, B^+, B_s, Y(6S)$ までしか作れない

- Linac、beam transport 磁石、RF、Final Focus Q 磁石の増強と改造により高エネルギーに $\sim 13\text{GeV}$

- 加速器の実現性も含めて検討中

- B_c pair や B Baryon ($\Lambda_b, \Sigma_b, \Xi_b, \Omega_b$ とその励起状態) pair の threshold を超える

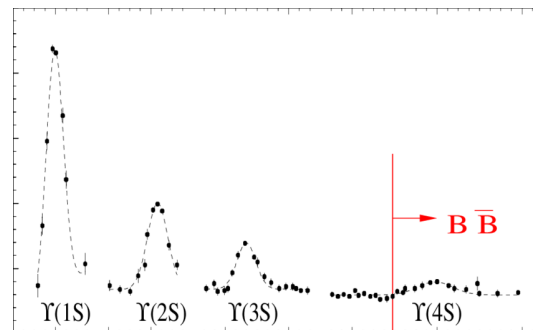
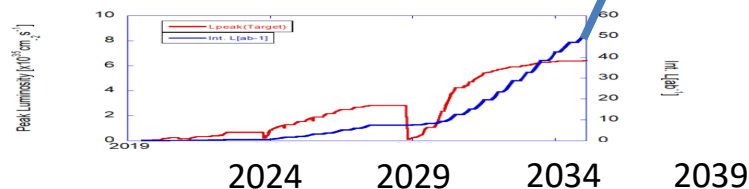
- $Y(6S)$ より上の共鳴

- 偏極電子ビームを導入

- 70%の偏極電子ビーム (80%の偏極電子ガン)

- SLCは75%の偏極電子ビームを達成

- Spin rotator と polarimeter も導入



B Physics

• 高統計

– ざっくりsqrt(5)の改善

– Mixing 中の新物理

- ϕ_3 の精密測定 0.75度 SUSY
- D^0 mixing での CP violation SUSY

– Penguinでの新物理

- $b \rightarrow s\gamma, b \rightarrow (s+d)\gamma$ での CP violationの測定 SUSY 荷電ヒッグス
- $B \rightarrow K^*\gamma$ での時間に依存した CP Violation の測定 SUSY 右巻きW
- $B \rightarrow \rho\gamma$ での時間に依存した CP Violation の測定 SUSY 右巻きW
- $b \rightarrow sl+l^-$ と $b \rightarrow sv\nu$ 過程での角分布測定と LFU 測定 Extra dimension LQ

• Leptonic B 崩壊

- $B \rightarrow \mu\nu$ 荷電ヒッグス
 - $B \rightarrow \tau\nu$ と比較 LQ

• 高エネルギー

– 新たな probe

- $\Lambda_b \rightarrow \Lambda\gamma$: 光子の偏極 右巻きW
- $B_c \rightarrow \tau\nu, \mu\nu$ 荷電ヒッグス LQ

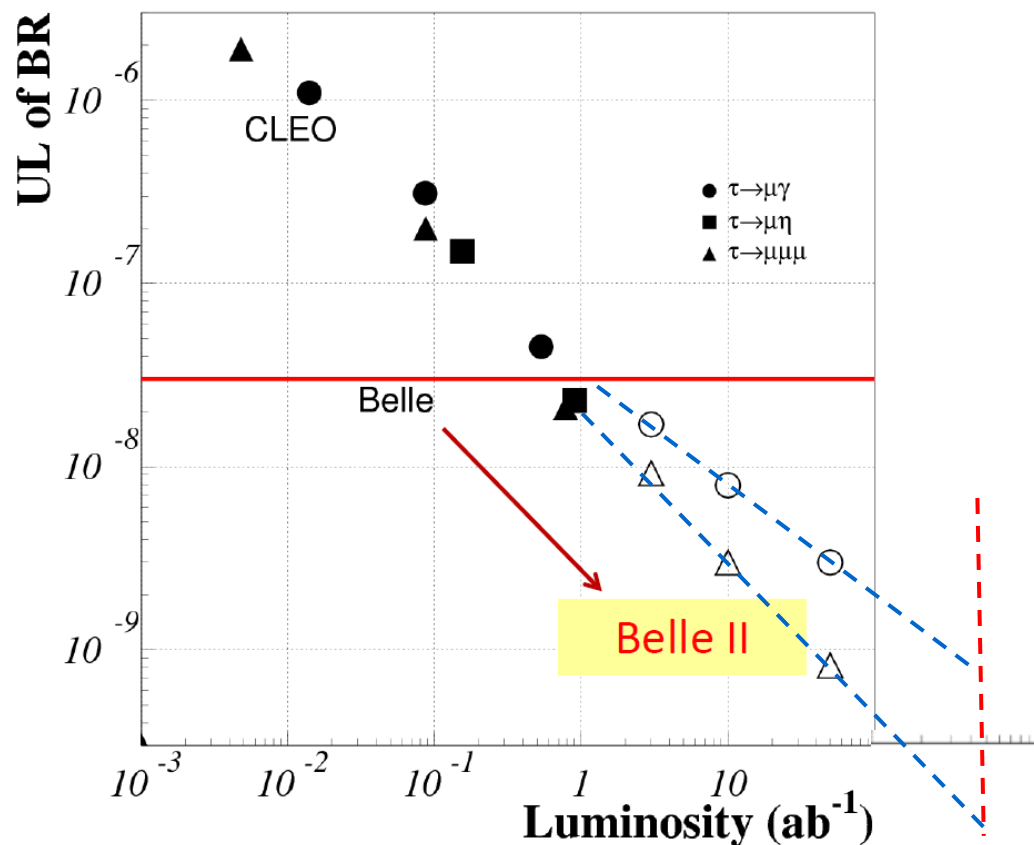
Tau Physics Prospects

高統計

- $BR(\tau \rightarrow \mu\gamma) \sim 1 \times 10^{-9}$ SUSY
- $BR(\tau \rightarrow \mu\mu\mu) \sim 2 \times 10^{-10}$ Z'
- 解析の向上によつては
 - $BR(\tau \rightarrow \mu\gamma) \sim O(10^{-10})$
 - $BR(\tau \rightarrow \mu\mu\mu) \sim O(10^{-11})$

電子ビーム偏極

- MDM a_τ : $O(10^{-5})$ の精度 SUSY
- EDM: 1×10^{-19} ecm $\rightarrow 10^{-20}$ ecm SUSY



電弱パラメータ測定@電子ビーム偏極

- 電弱パラメータ

- NuTeV の $\sin^2\theta_w$ がズレてる
- LEPとSLCの測定で 3σ の開きがある。

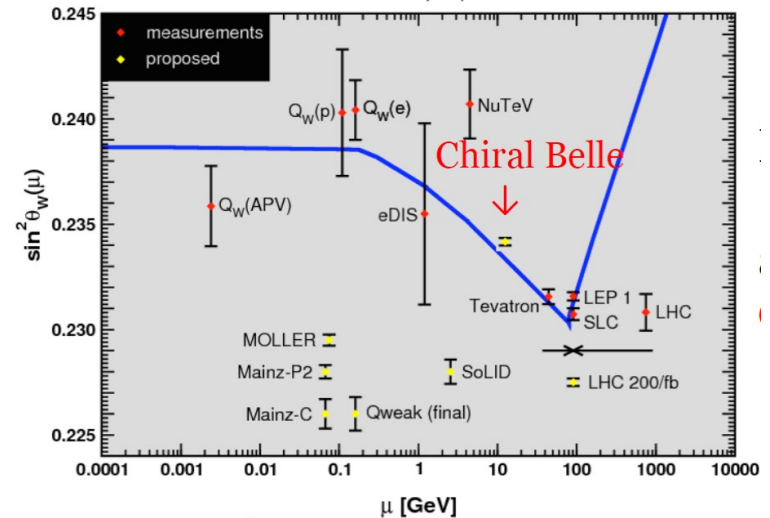
- 電子ビーム偏極

- Left-Right Asymmetry による vector 結合 g_V の改善

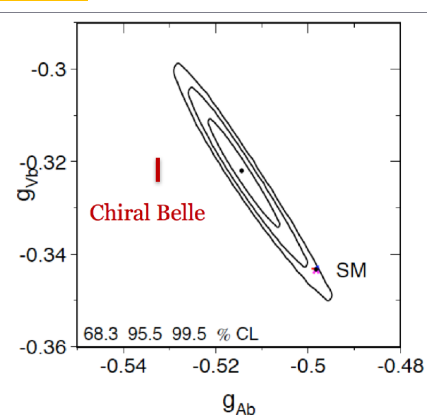
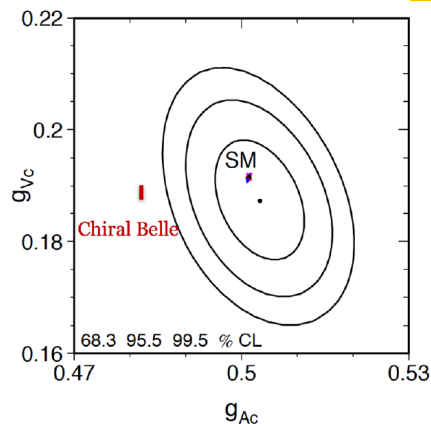
$$A_{LR} = \frac{\sigma_L - \sigma_R}{\sigma_L + \sigma_R} = \frac{4}{\sqrt{2}} \left(\frac{G_{FS}}{4\pi\alpha Q_f} \right) g_A^e g_V^f \langle Pol \rangle$$

$$\propto T_3^f - 2Q_f \sin^2\theta_w$$

Running weak mixing angle
results and prospects



with 20/ab



Hadron 物理

- 高統計(250 ab^{-1}):
 - アンプリチュード解析 → スピン・パリティの決定
 - 電磁生成・崩壊の観測 → 内部構造の決定
 - ダブルチャーム状態 ($\Xi/\Omega_{cc}, T_{cc}, \dots$)
- 高エネルギー($\sqrt{s} \sim 13 \text{ GeV}$):
 - ボトムバリオンの励起状態 → チャームとの比較
 - ボトムとチャーム双方を含む粒子 (B_c, \dots)
- 偏極電子ビーム
 - バリオンのパリティ決定
 - クォーク → バリオン偏極移行測定によるバリオンのスピン構造研究

まとめ

「SuperKEKB加速器を用いた初期宇宙の謎の解明」

「SuperKEKB加速器を核とした素粒子物理・ハドロン物理・宇宙物理・計算物理の学際的研究と他分野への応用」

- SuperKEKB/Belle II は2034年頃までに 50ab^{-1} を取得する事を目標として2回の Long shutdown を行う

– 多彩な物理

- B, Bs, D, tau
- Dark sector
- Radiative return (計算科学 Lattice QCDとの)
- Hadron physics (原子核と素粒子の cross over)

– 多様な新物理模型を探索

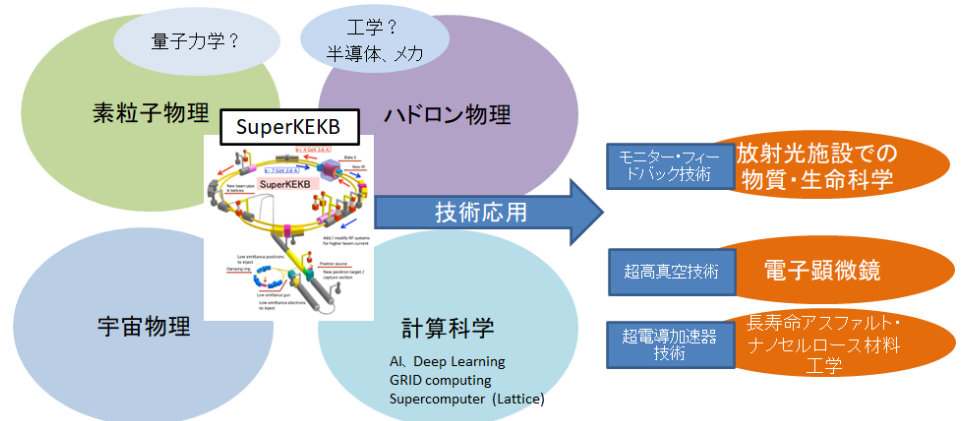
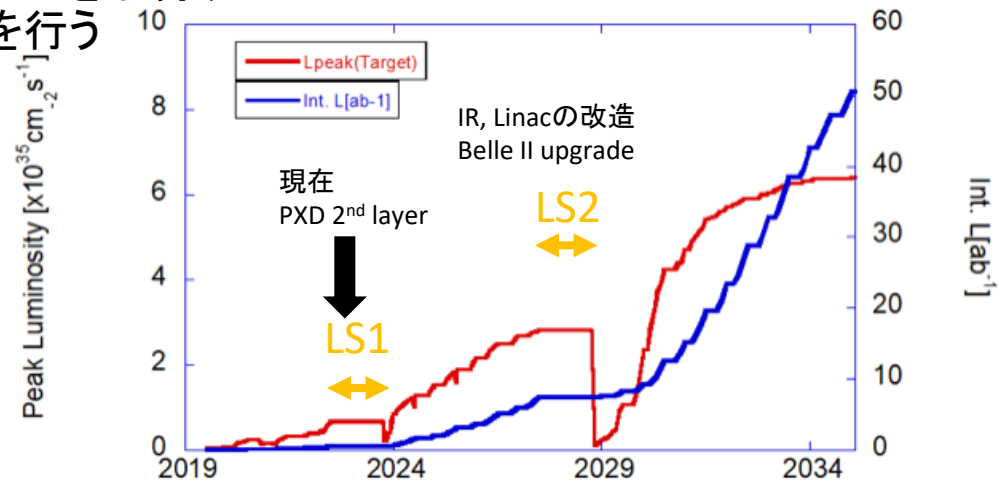
- SUSY
- 拡張ヒッグス模型
- レプトクォーク
- W', Z'

– 宇宙の謎の解明に繋がる

- 物質創生の謎(消えた反物質の謎)
- 暗黒物質の素粒子的理解

- Upgrade案

- ルミノシティ5倍
- エネルギー増強 $\sim 13\text{GeV}$
- 電子ビーム偏極 70%



backup

$\Delta A_{CP}(B \rightarrow X_s \gamma)$ と電弱バリオジェネシス

新たなCPVと拡張ヒッグス模型→バリオジェネシス

- General 2HDM (no Z_2 symmetry) だとadditionalな湯川結合 ρ 。自己結合は自由に取れる

$$y_{hij}^f = \frac{\lambda_i^f}{\sqrt{2}} \delta_{ij} s_{\beta-\alpha} + \frac{\rho_{ij}^f}{\sqrt{2}} c_{\beta-\alpha},$$

$$y_{Hij}^f = \frac{\lambda_i^f}{\sqrt{2}} \delta_{ij} c_{\beta-\alpha} - \frac{\rho_{ij}^f}{\sqrt{2}} s_{\beta-\alpha},$$

$$y_{Aij}^f = \mp \frac{i\rho_{ij}^f}{\sqrt{2}},$$

– ρ に複素位相があればCPVの種になり、電弱バリオジェネシスの条件の一つを満たす

– ΔA_{CP} は ρ_{bb} の位相に敏感である。

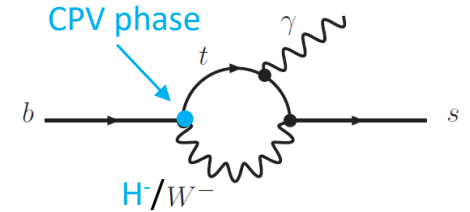
- ILC の $H \rightarrow bb$ coupling と ACME の electron EDM と合わせて ρ_{bb} を調べることができる

– Belle ΔA_{CP} , ACME EDM : $\text{Im}(\rho_{bb})$

– Belle BF : $|\rho_{bb} + x|$

– ILC : $|\rho_{bb}|$

ΔA_{CP}
BF($B \rightarrow X_s \gamma$)
ACME Electron EDM
ILC $H \rightarrow bb$ coupling



$$\begin{aligned} \Delta A_{CP} &= A_{CP}(B^+ \rightarrow X_s^+ \gamma) - A_{CP}(B^0 \rightarrow X_s^0 \gamma) \\ &= 4\pi^2 \alpha_s \frac{\tilde{\Lambda}_{78}}{m_b} \text{Im} \left(\frac{C_8}{C_7} \right), \\ &\approx 0.12 \left(\frac{\tilde{\Lambda}_{78}}{100 \text{ MeV}} \right) \text{Im} \left(\frac{C_8}{C_7} \right), \end{aligned}$$

