

Rare + semileptonic decay

2022/11/8

KEK 古賀太一郎

# 自己紹介

-古賀太一郎

-2013-2018: T2K @ 東大

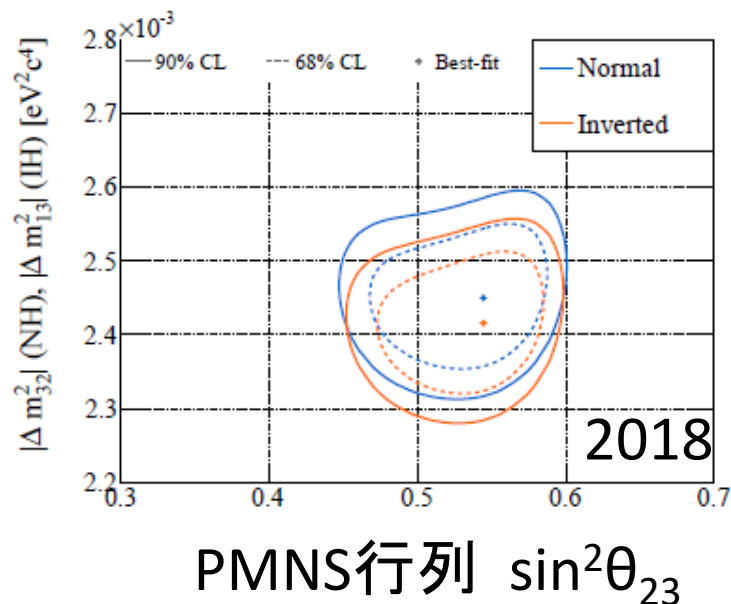
- ニュートリノ振動
- ニュートリノ前置検出器 開発

-2018-2022: BelleII @ KEK

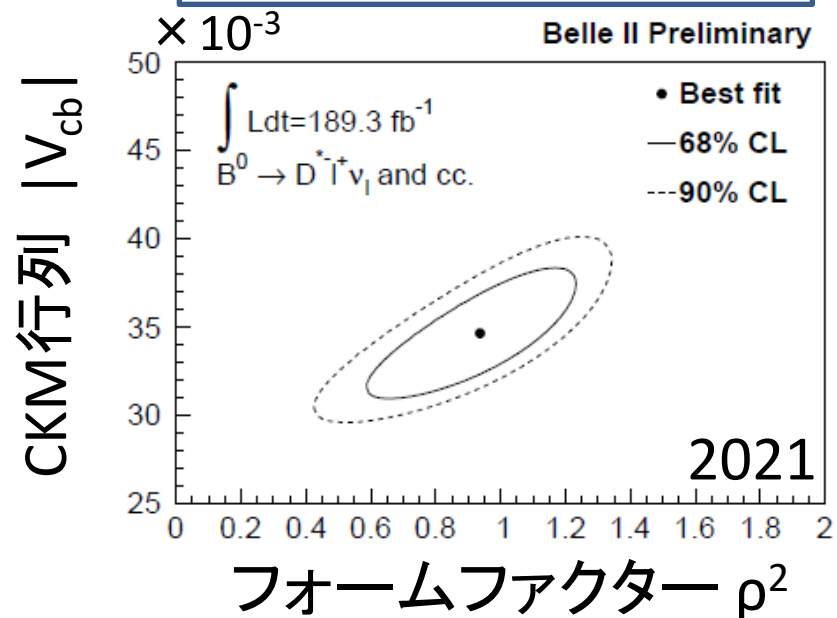
- B中間子のsemileptonic decay
- トリガー 開発

ニュートリノ質量差

## ニュートリノ振動



## B semi-leptonic decay



# 目次

○B中間子のsemileptonic decay ← こっち多めです

- CKM行列要素の測定
- レプトン普遍性の検証

○B中間子のrare decay ← 過去のFPWSに(私より)

- レプトン普遍性の検証

いい資料があります

## -参考文献

- 過去のFPWSの資料
- 最近の結果
- [PDG](#), [HFLAV](#)など

# B中間子のsemileptonic decay CKM行列測定

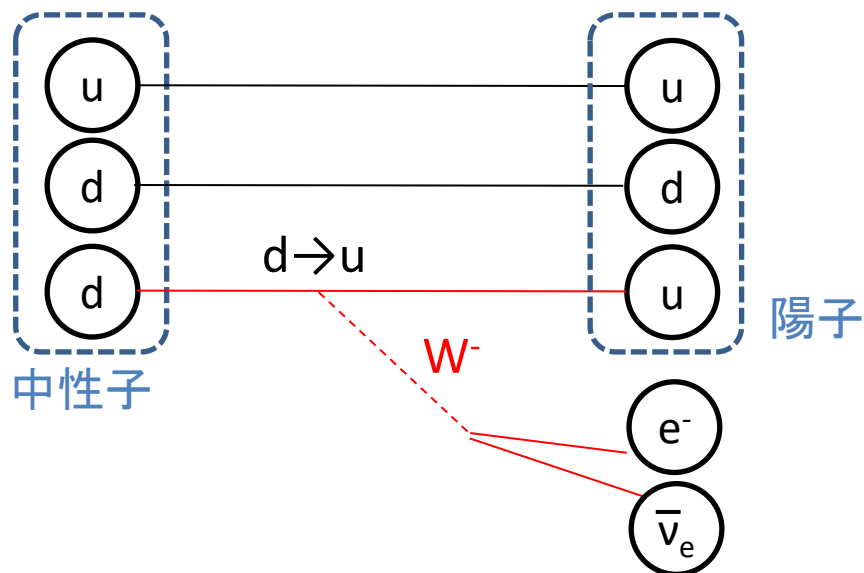
# 素粒子標準模型

- フレーバー: クォーク・レプトンの種類のこと。各6種類。
- 弱い力: 4つの相互作用のうちの1つ。W、Z ボソンを媒介。

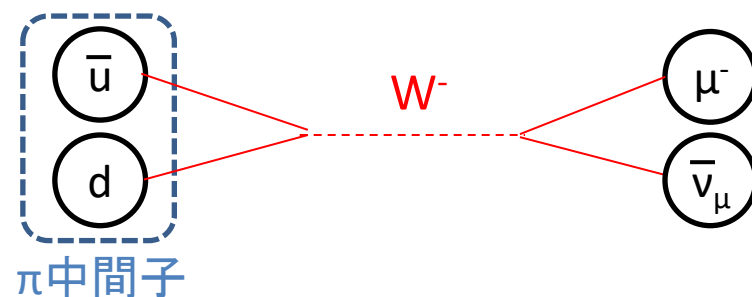


# 弱い相互作用の例

-中性子のベータ崩壊



- $\pi$ 中間子の崩壊



レプトン

$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ $-1$ $1/2$ $e$	$\approx 105.7 \text{ MeV}/c^2$ $-1$ $1/2$ $\mu$	$\approx 1.78 \text{ GeV}/c^2$ $-1$ $1/2$ $\tau$
$< 2 \text{ eV}/c^2$ $0$ $1/2$ $\nu_e$	$< 2 \text{ eV}/c^2$ $0$ $1/2$ $\nu_\mu$	$< 2 \text{ eV}/c^2$ $0$ $1/2$ $\nu_\tau$
電子 ニュートリノ	ミューオン ニュートリノ	タウ ニュートリノ

	I	II	III
質量	$\approx 1.9 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.32 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 172.7 \text{ GeV}/c^2$
電荷	$2/3$	$2/3$	$2/3$
スピン	$1/2$	$1/2$	$1/2$
	$u$	$c$	$t$
	アップ	チャーム	トップ
	$\approx 4.4 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 87 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.24 \text{ GeV}/c^2$
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$
	$1/2$	$1/2$	$1/2$
	$d$	$s$	$b$
	ダウン	ストレンジ	ボトム

クォーク

# 弱い相互作用

-標準模型 クォークとW<sup>+</sup>ボソンの相互作用を表す式

$$\frac{-g}{\sqrt{2}} (\bar{u}_L, \bar{c}_L, \bar{t}_L) \gamma^\mu W_\mu^+ \begin{pmatrix} d_L \\ s_L \\ b_L \end{pmatrix}$$

γ行列  
W<sup>+</sup>ボソン

結合定数

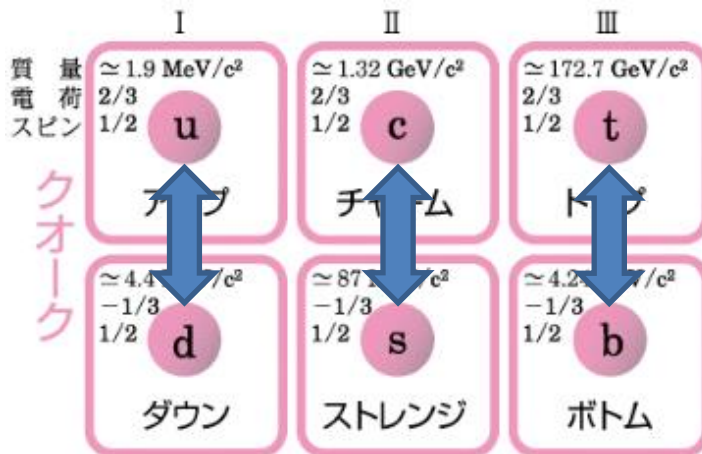
上段のクォーク

下段のクォーク(L:左巻き)  
弱い相互作用の固有状態

-例えばd→uの変化の度合いは  $\frac{-g}{\sqrt{2}} \bar{u}_L \gamma^\mu W_\mu^+ d_L$

-弱い相互作用 荷電カレント反応の特徴:

- W<sup>±</sup>を交換すると、上下段のクォーク、レプトンが入れ替わる。電荷も変わる
- 横方向のフレーバー変化は起きない
- 世代によらず同じ結合定数で作用する



# CKM行列

- 質量の固有状態( $d_L^{(m)}$ など)と、弱い相互作用の固有状態( $d_L$ など)は異なる。
- 3x3のユニタリ行列  $V_L^d, V_L^u$ で基底を変換

$$\begin{pmatrix} d_L^{(m)} \\ s_L^{(m)} \\ b_L^{(m)} \end{pmatrix} = V_L^d \begin{pmatrix} d_L \\ s_L \\ b_L \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} u_L^{(m)} \\ c_L^{(m)} \\ t_L^{(m)} \end{pmatrix} = V_L^u \begin{pmatrix} u_L \\ c_L \\ t_L \end{pmatrix}$$

- 弱い相互作用の式を書きなおすと

$$\frac{-g}{\sqrt{2}} (\overline{u_L^{(m)}} \quad \overline{c_L^{(m)}} \quad \overline{t_L^{(m)}}) \gamma^\mu W_\mu^+ \boxed{V_{CKM}} \begin{pmatrix} d_L^{(m)} \\ s_L^{(m)} \\ b_L^{(m)} \end{pmatrix}$$

- $V_{CKM}$ も3x3のユニタリ行列

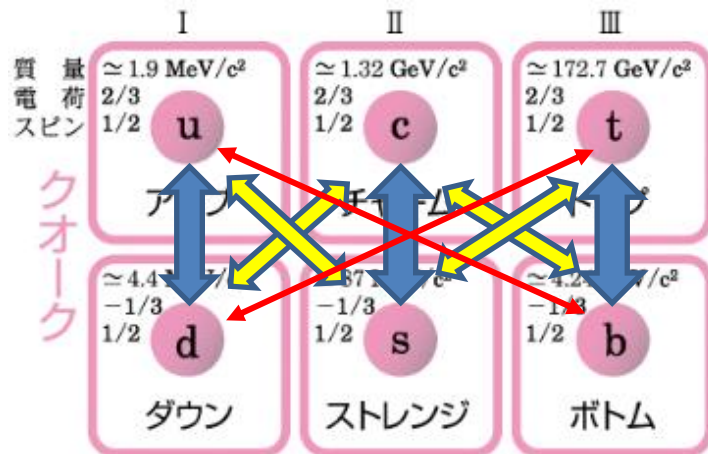
$$V_{CKM} \equiv V_L^u V_L^{d\dagger} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

$V_{xx}$ の値は理論からは決まらず、実験で測る。

- 例えば $d \rightarrow u$ の変化の割合は

$$\frac{-g}{\sqrt{2}} \overline{u_L} \gamma^\mu W_\mu^+ \boxed{V_{ud}} d_L$$

斜めのフレーバー変化が起こる





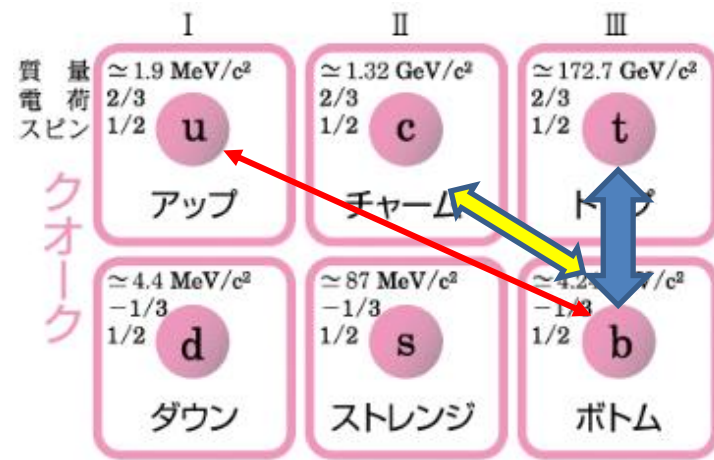
# bクォークの崩壊

-bクォークとWボソンのtree-levelの反応:

-b→t: tの方が重いので崩壊しない

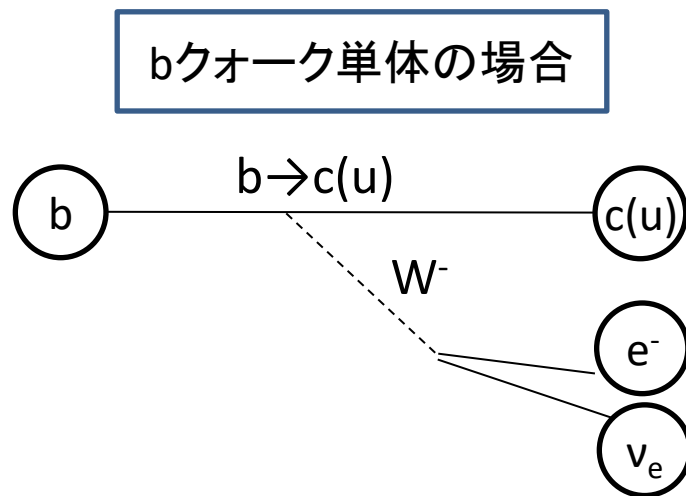
-b→c: 崩壊確率  $\propto \frac{G_F^2}{192\pi^3} |V_{cb}|^2 m_b^2 (m_b - m_c)^3$

-b→u: 崩壊確率  $\propto \frac{G_F^2}{192\pi^3} |V_{ub}|^2 m_b^5$



-終状態にレプトンを含むので、“semileptonic decay” と呼ばれる

-崩壊確率を測ることで、 $|V_{ub}|, |V_{cb}|$ を実験的に求めることが可能



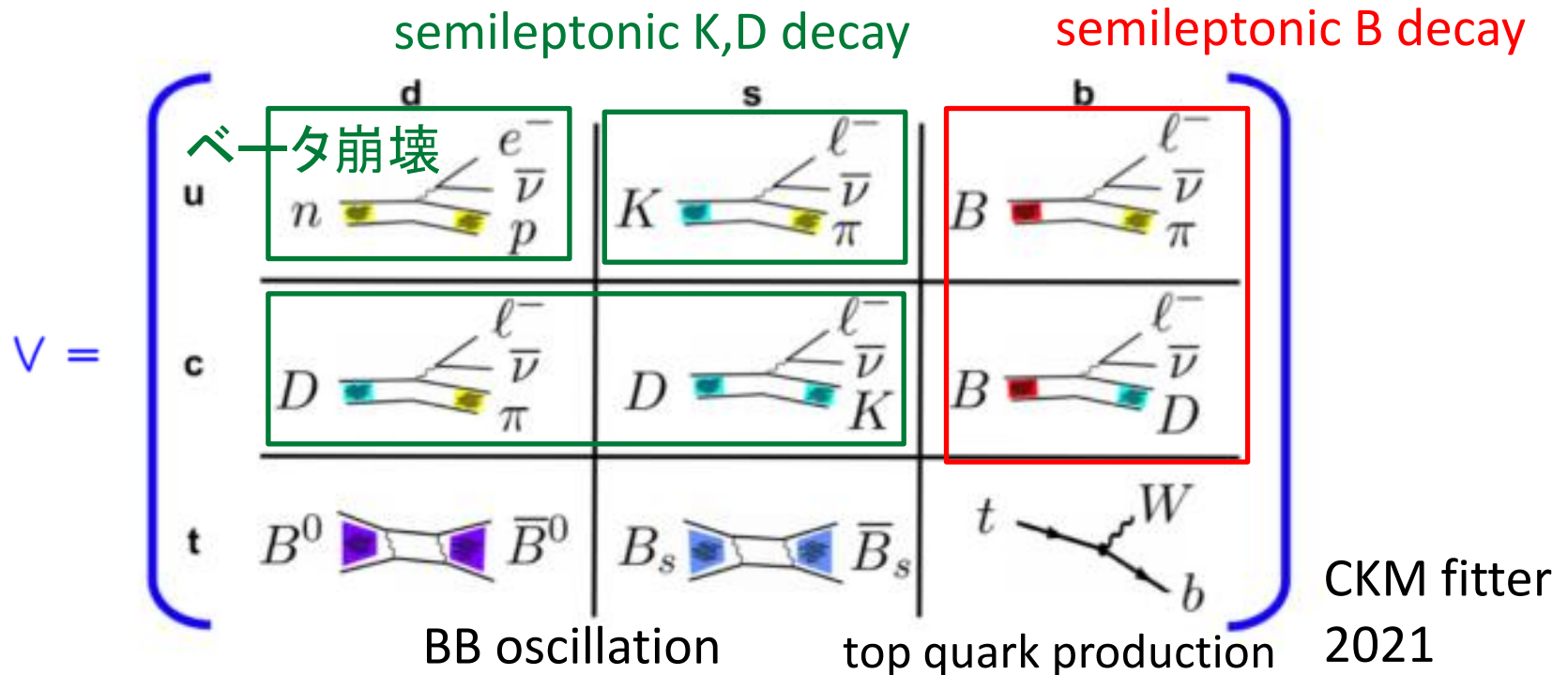
# CKM要素の絶対値の測定

-実験での測定状況

pdg2022

$$|V_{CKM}| \equiv \begin{pmatrix} |V_{ud}| & |V_{us}| & |V_{ub}| \\ |V_{cd}| & |V_{cs}| & |V_{cb}| \\ |V_{td}| & |V_{ts}| & |V_{tb}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.97435 \pm 0.00016 & 0.22500 \pm 0.00067 & 0.00369 \pm 0.00011 \\ 0.22486 \pm 0.00067 & 0.97349 \pm 0.00016 & 0.04182^{+0.00085}_{-0.00074} \\ 0.00857^{+0.00020}_{-0.00018} & 0.04110^{+0.00083}_{-0.00072} & 0.999118^{+0.000031}_{-0.000036} \end{pmatrix}$$

-測定方法



# ユニタリトライアングルと $|V_{cb}|, |V_{ub}|$

-ユニタリー条件:  $V_{CKM}^\dagger V_{CKM} = I = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$  より

$$V_{ud} V_{ub}^* + V_{cd} V_{cb}^* + V_{td} V_{tb}^* = 0$$

6つの式のうちの1つ  
3角形の3つの角度が  
同じオーダー

-様々な測定と比較することで、 $V_{CKM}$ のユニタリー条件を精密に検証

- $|V_{ub}|, |V_{cb}|$ は辺の長さに関係

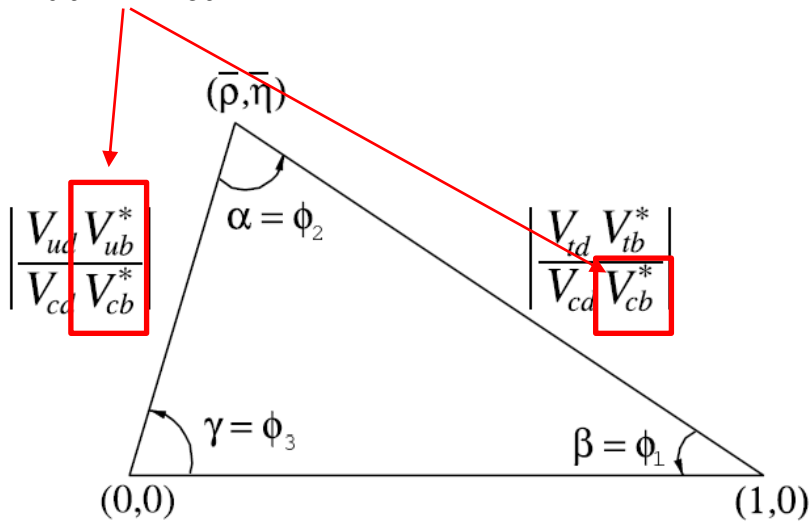
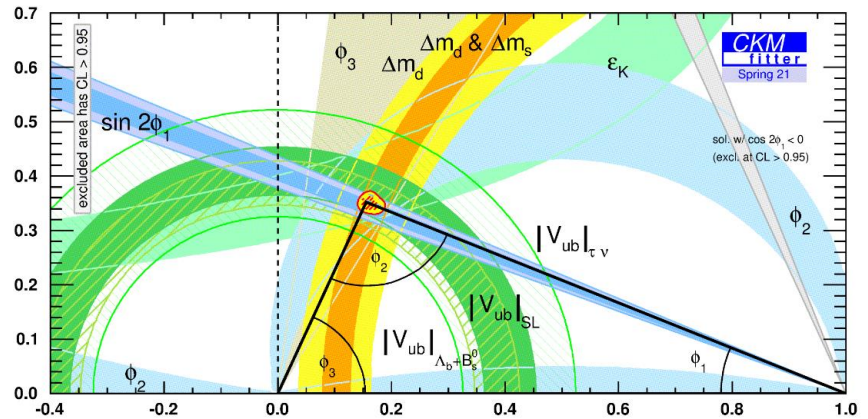


Figure 12.1: Sketch of the unitarity triangle.



semileptonic B decay

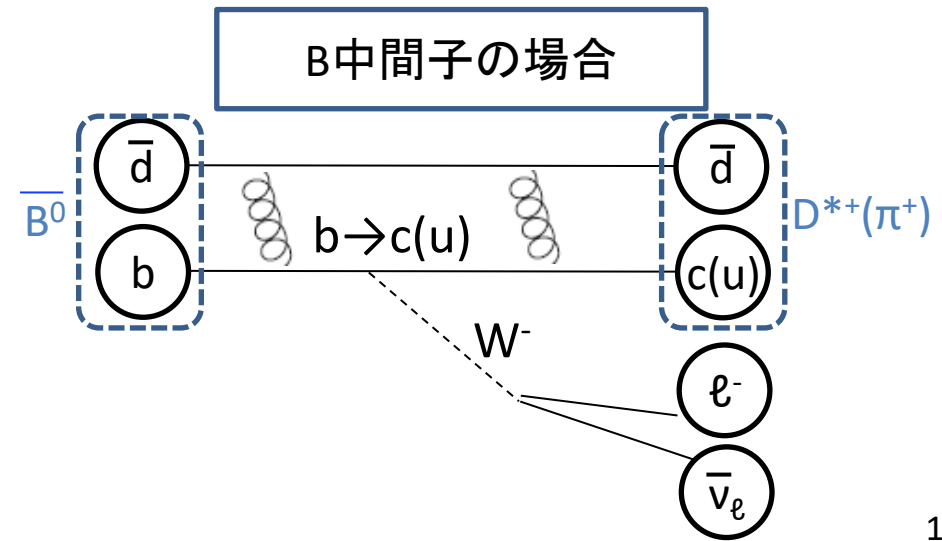
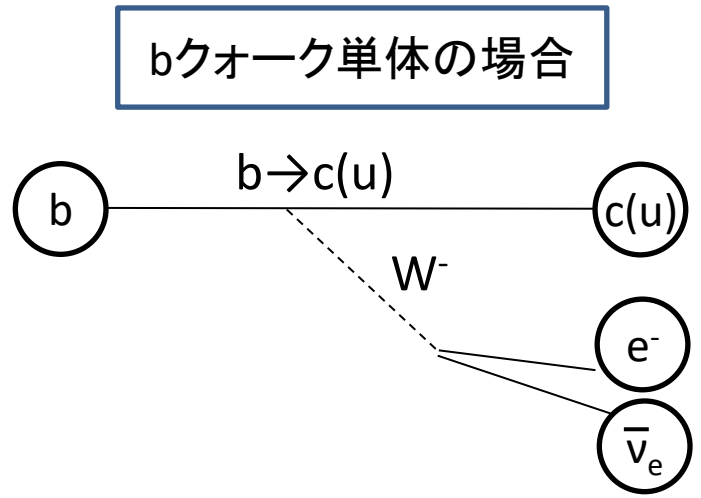
# B中間子のsemileptonic decay

-bクォーク単体だ比較的単純

$$\left[ \begin{array}{l} -b \rightarrow c: \text{崩壊確率} \propto \frac{G_F^2}{192\pi^3} |V_{cb}|^2 m_b^2 (m_b - m_c)^3 \\ -b \rightarrow u: \text{崩壊確率} \propto \frac{G_F^2}{192\pi^3} |V_{ub}|^2 m_b^5 \end{array} \right. \quad b \rightarrow c \text{ の } \sim 1/50$$

-(実験で用いる) B中間子の場合、もうひとつクォークがあり強い相互作用する。  
崩壊確率の補正が必要:  $\Gamma_{had} = \Gamma_{quark}(1 + \underline{QCD_{corr}})$

**$|V_{cb}|$ 測定には邪魔。理論と実験両方で頑張って求める**



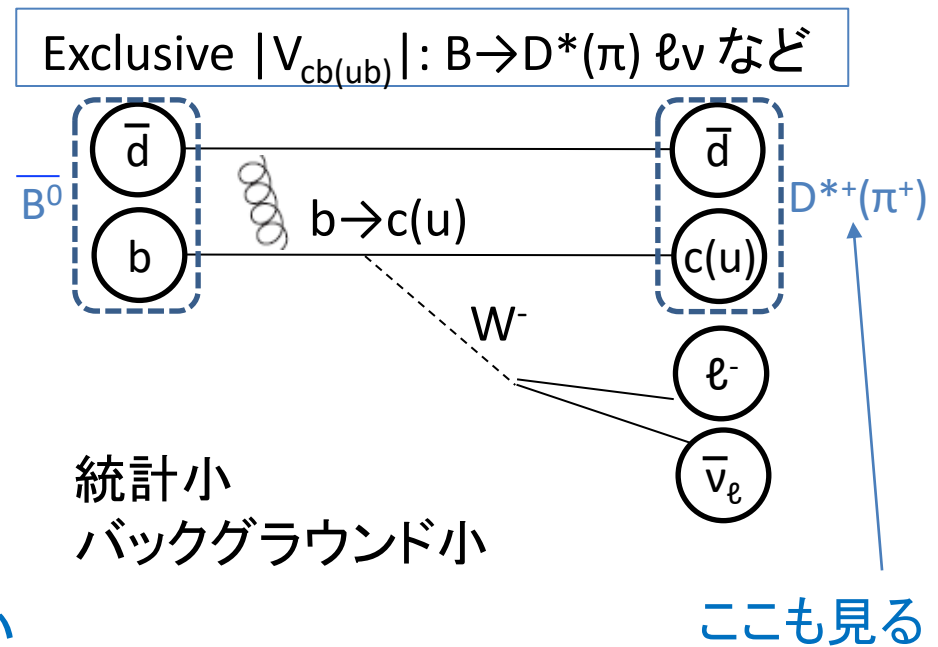
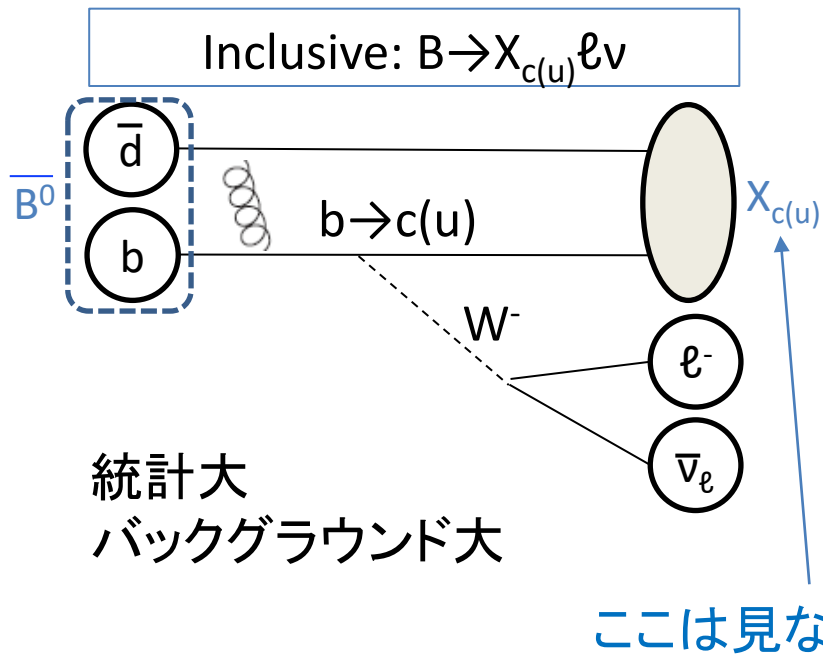
# B中間子のsemileptonic decay 測定種類

-2種類の測定方法:

-Inclusive decay: 任意の $b \rightarrow c(u)\ell\nu$ 崩壊を全部まとめて測定

$X_{c(u)}$ :  $c(u)$ クォークを含んだ任意の粒子  $\ell$ : ミューオンまたは電子

-Exclusive decay: 特定の崩壊モードを選んで測定



# Exclusive測定 の例

-B → D\*ℓνの場合の崩壊分岐比: phase space factor、long-distance EM radiation  
理論計算可能 (η<sub>EW</sub>=1.000662 ± 0.00016)

$$\frac{d\Gamma(\bar{B} \rightarrow D^* \ell^- \bar{\nu}_\ell)}{dw} = \frac{G_F^2 m_{D^*}^3}{48\pi^3} (m_B - m_{D^*})^2 \chi(w) \eta_{EW}^2 \mathcal{F}^2(w) |V_{cb}|^2$$

free quark decay

form factor

$$w = \frac{p_B \cdot p_D}{m_B m_D} = \frac{m_B^2 + m_D^2 - q^2}{2m_B m_D}$$

運動量移行を規格化したもの

理論+実験でおさえる

崩壊分岐比、w分布、D\*,ℓの角度分布

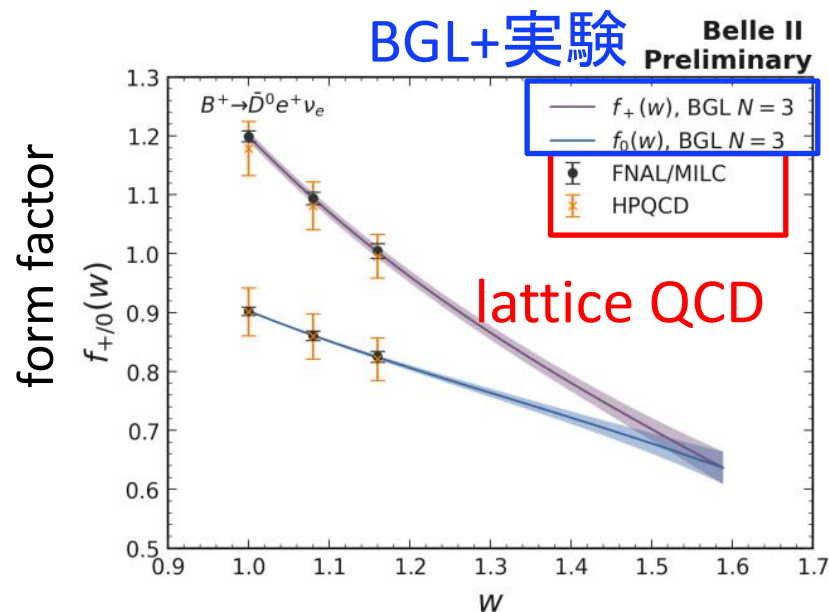
## -Form factorの計算

### -モデル化

-CLN: パラメータ3つでモデル近似  
伝統的に使われてきた

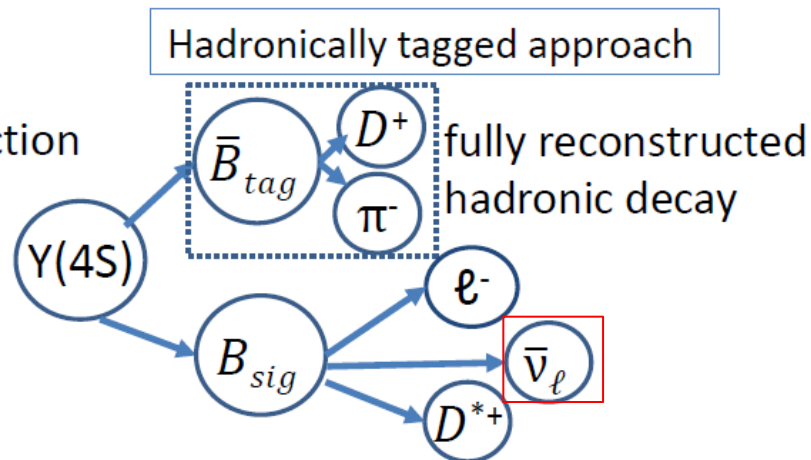
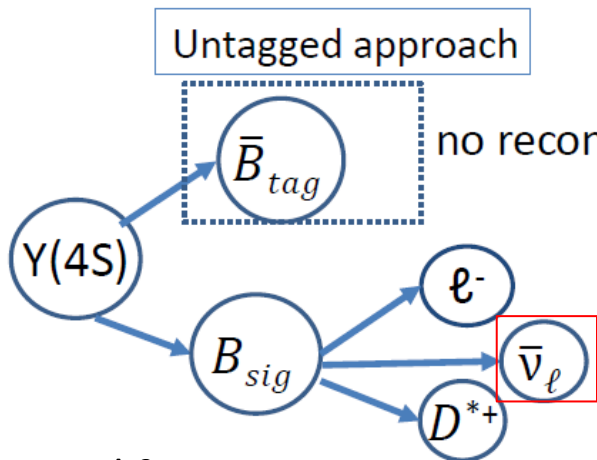
-BGL: パラメータ3 × N (N=1,2,...) で展開  
より一般的な書き方  
最近はこちら

-lattice QCDからのinput

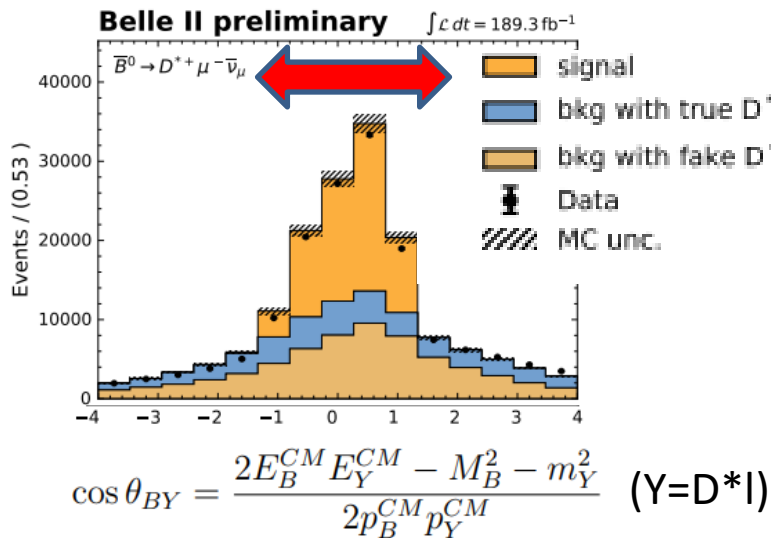


# ニュートリノの再構成

-ニュートリノは検出できないので工夫が必要: 数種類の $B_{tag}$ 再構成アプローチ

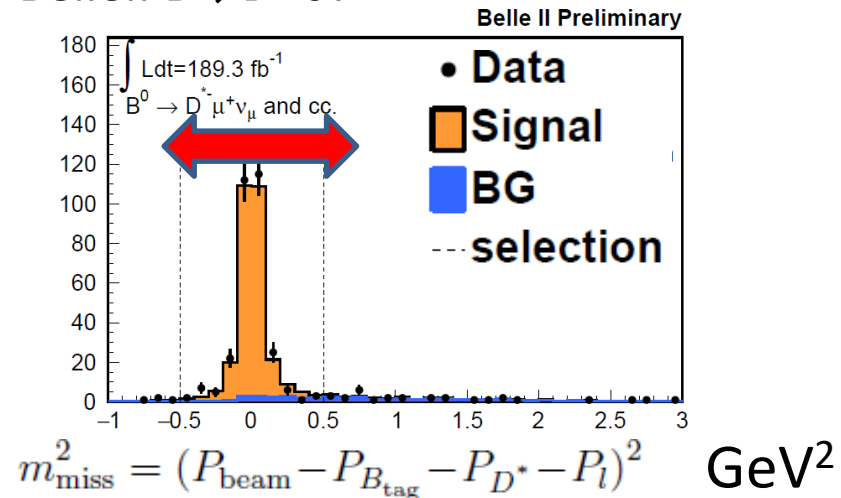


-BelleI  $B \rightarrow D^* \ell \nu$



4元運動量保存:  $P_{B_{sig}} = P_{D^*l} + P_\nu$   
 $B_{sig}$  の運動量をビーム運動量から推定し逆算

-BelleI  $B \rightarrow D^* \ell \nu$



4元運動量保存:  $P_{Beam} = P_{tag} + P_{D^*} + P_l + P_\nu$   
 ニュートリノ以外の運動量全部測って逆算



# $B_{tag}$ 再構成方法: hadronic tag

-ハドロン崩壊する $B_{tag}$ を再構成

-崩壊の種類が多く(数十)、1つ1つ最適化するのは大変

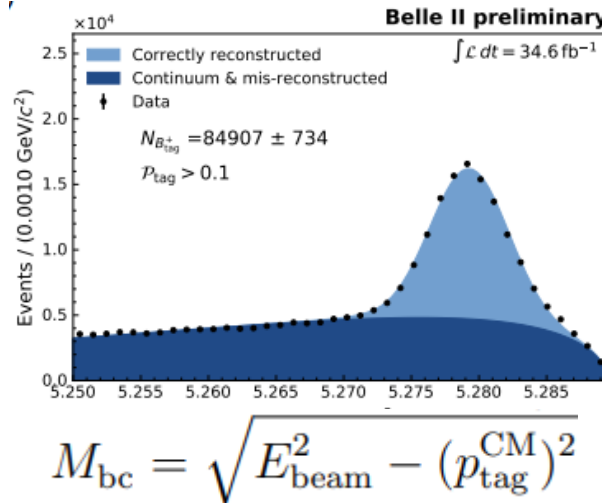
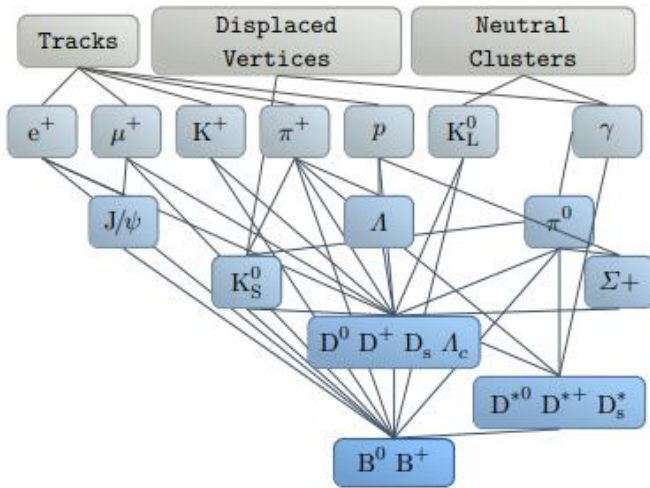
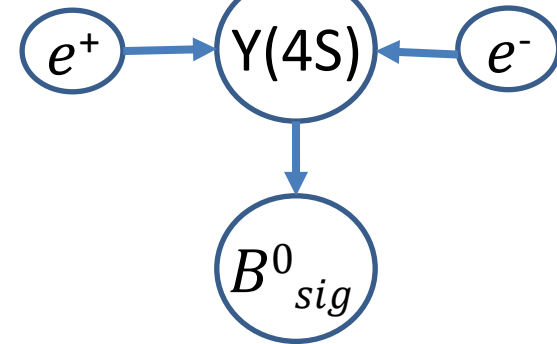
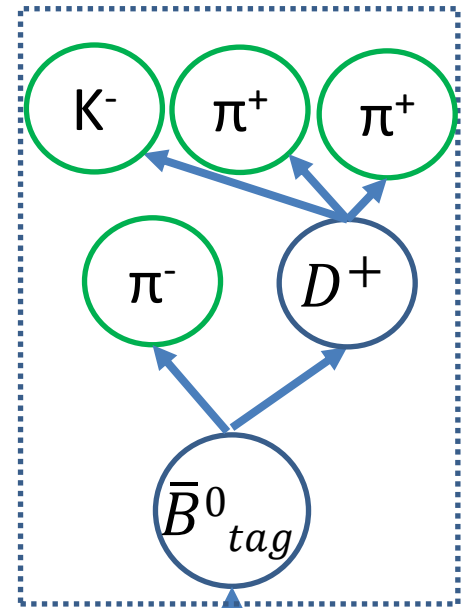
□ ハドロン崩壊(例)

-BelleII: Full Event Interpretation (FEI)アルゴリズム

-娘粒子の組み合わせでB候補を再構成

-Multivariate classifierでBの信号確率を計算

学習の入力情報:娘粒子の生成点, 運動量, 粒子識別



- $B_{tag}$ に対する検出効率  $\sim 0.27\%$ , purity  $\sim 15\%$

-FEIアルゴリズムにより、BelleIIではBelleより2倍検出効率が向上

-ハドロン崩壊の確率が小さいので、どうしても効率は小さくなってしまふ



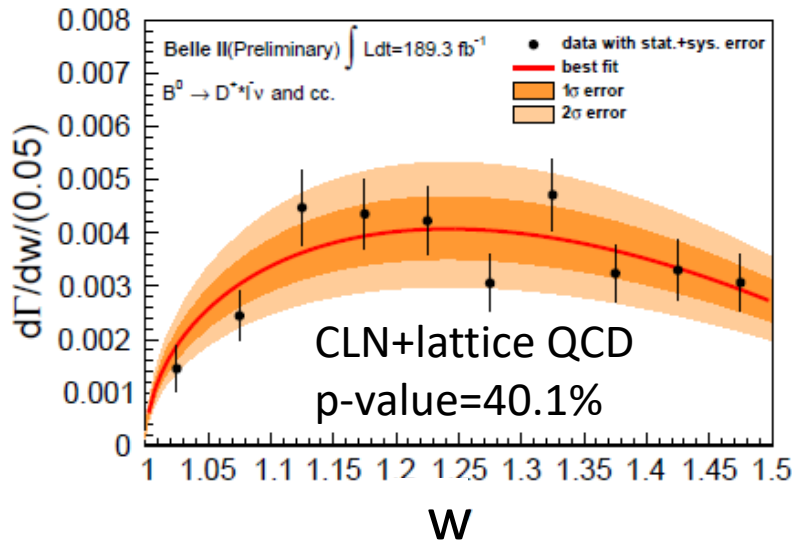
# BelleIIでのexclusive $|V_{cb}|$ 測定: hadronic tag $B \rightarrow D^* \ell \nu$

-2022年3月発表、2021年夏までにとった $189\text{fb}^{-1}$ のデータを解析

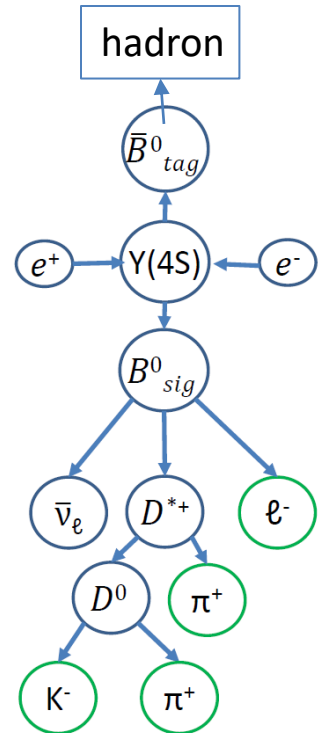
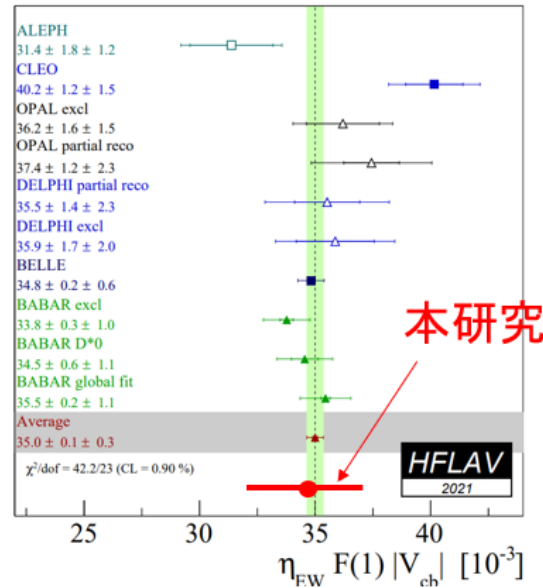
$$\frac{d\Gamma}{dw} = \frac{\eta_{EW}^2 G_F^2}{48\pi^3} m_{D^*}^3 (m_B - m_{D^*})^2 g(w) \underbrace{F^2(w)}_{\text{form factor}} |V_{cb}|^2$$

$$w = \frac{p_B \cdot p_D}{m_B m_D} = \frac{m_B^2 + m_D^2 - q^2}{2m_B m_D}$$

d $\Gamma$ /dw分布



他実験との比較



$$\eta_{EW} |V_{cb}| = (38.2 \pm 1.8 \pm 1.7) \times 10^{-3}$$

=1.00662

統計誤差

系統誤差(コントロールサンプルの統計誤差が主)

# BelleIIでのexclusive $|V_{cb}|$ 測定: untagged tag $B \rightarrow D\ell\nu$

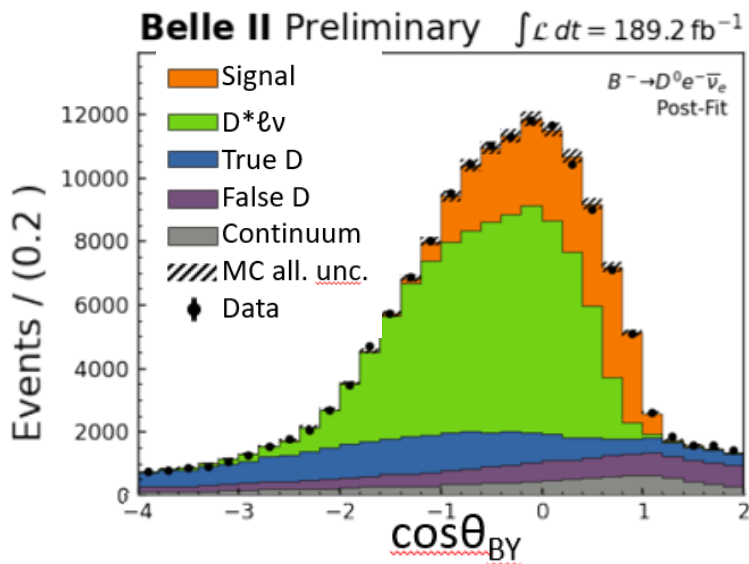
-2022年7月発表、2021年夏までにとった $189\text{fb}^{-1}$ のデータを解析

$$\frac{d\Gamma}{dw} = \frac{G_F^2 m_D^3}{48\pi^3} (m_B + m_D)^2 (w^2 - 1)^{3/2} \eta_{EW}^2 \mathcal{G}^2(w) |V_{cb}|^2$$

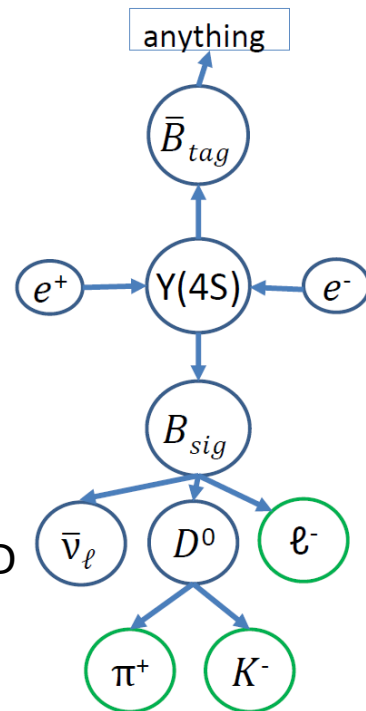
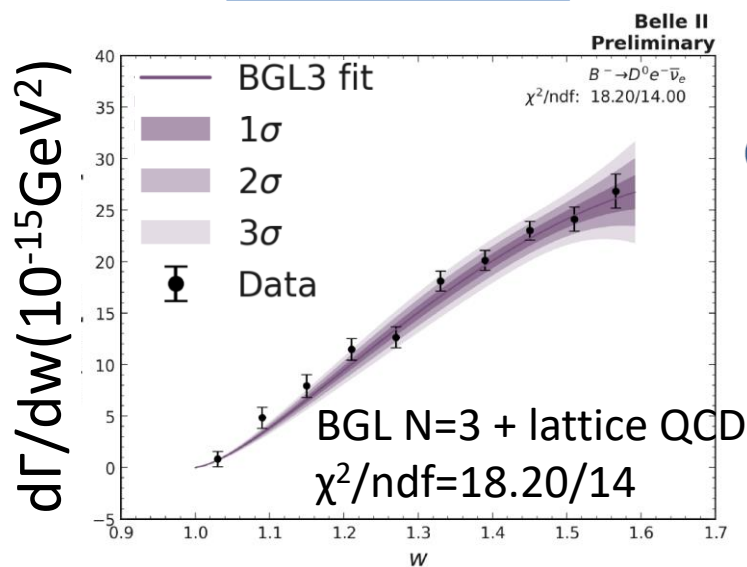
form factor

$$w = \frac{p_B \cdot p_D}{m_B m_D} = \frac{m_B^2 + m_D^2 - q^2}{2m_B m_D}$$

再構成されたイベント



$d\Gamma/dw$ 分布



$$\eta_{EW} |V_{cb}| = (38.53 \pm 1.15) \times 10^{-3}$$

=1.00662

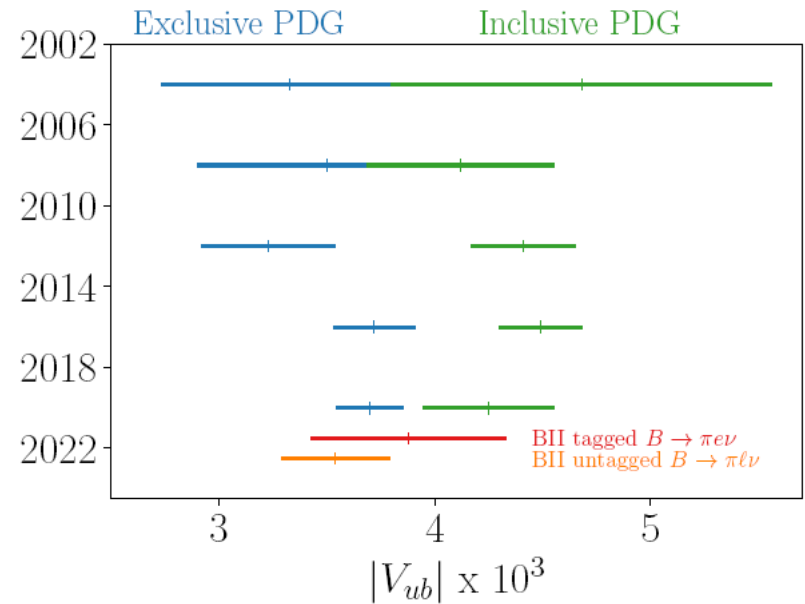
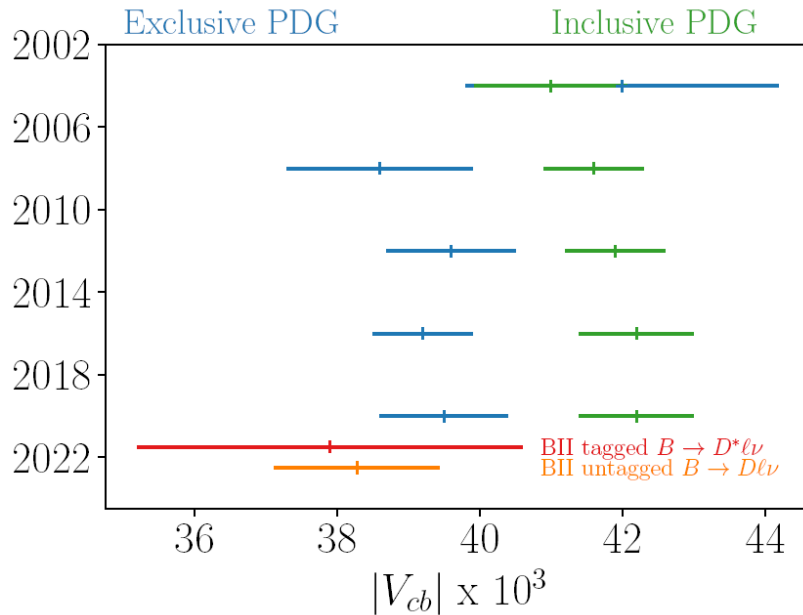
統計+系統誤差

# BelleIIでのexclusive $|V_{ub}|$ , $|V_{cb}|$ 測定

-同じ測定手法のWorld average とコンシステントな結果

-taggedは統計誤差が支配的 今後改善

-Untaggedは統計量が多いので、測定精度もworld recordと同程度



# Inclusive測定 の例

-B → Xℓνの場合の崩壊分岐比

$$\Gamma(\bar{B} \rightarrow X_u \ell \bar{\nu}) = \underbrace{\frac{G_F^2 |V_{ub}|^2 m_b^5}{192\pi^3}}_{\text{free quark decay}} \left[ 1 + \underbrace{\mathcal{O}(\alpha_s)}_{\text{perturbative correction}} + \underbrace{\mathcal{O}(1/m_b^2)}_{\text{non perturbative correction}} + H.C. \right]$$

$$\frac{\Gamma_u}{\Gamma_c} \approx \frac{1}{50}$$

uの場合cからのBGが大

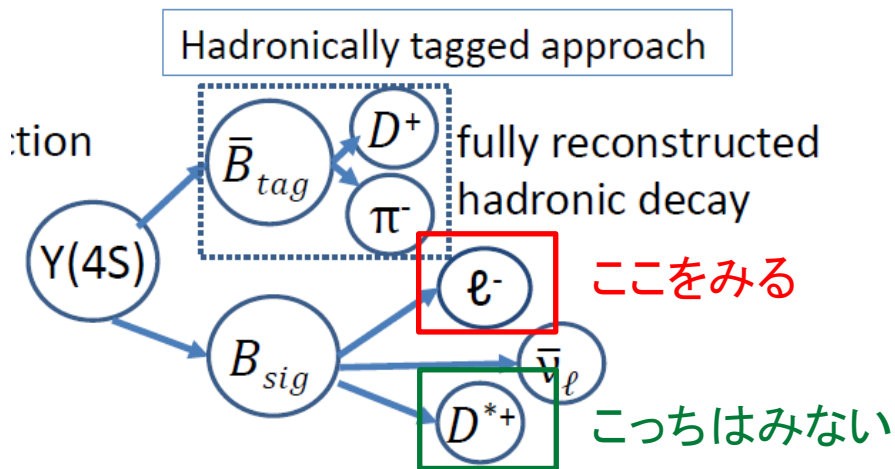
free quark  
decay

perturbative  
correction

non perturbative  
correction

理論+実験でおさえる  
崩壊分岐比、レプトンの運動量分布

-レプトンを再構成し、運動量分布を測定

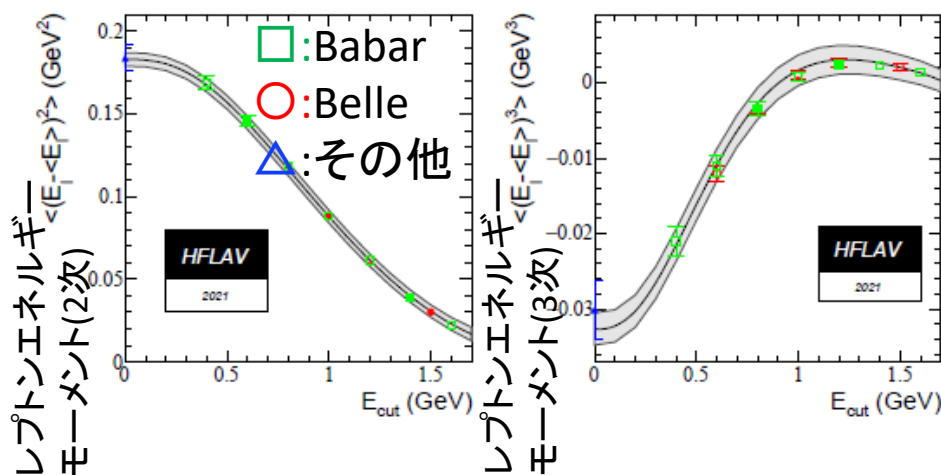
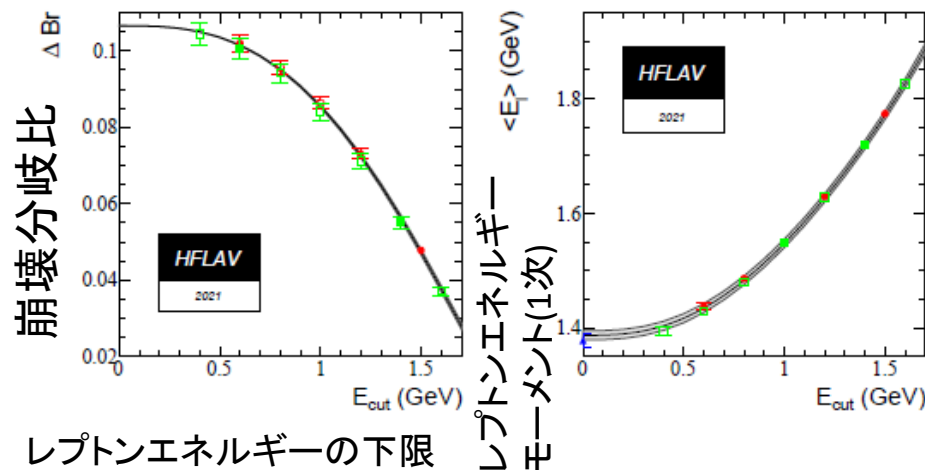


# Inclusive測定 の例

- $B \rightarrow X_c \ell \nu$ のglobal fit結果

-理論誤差が主要

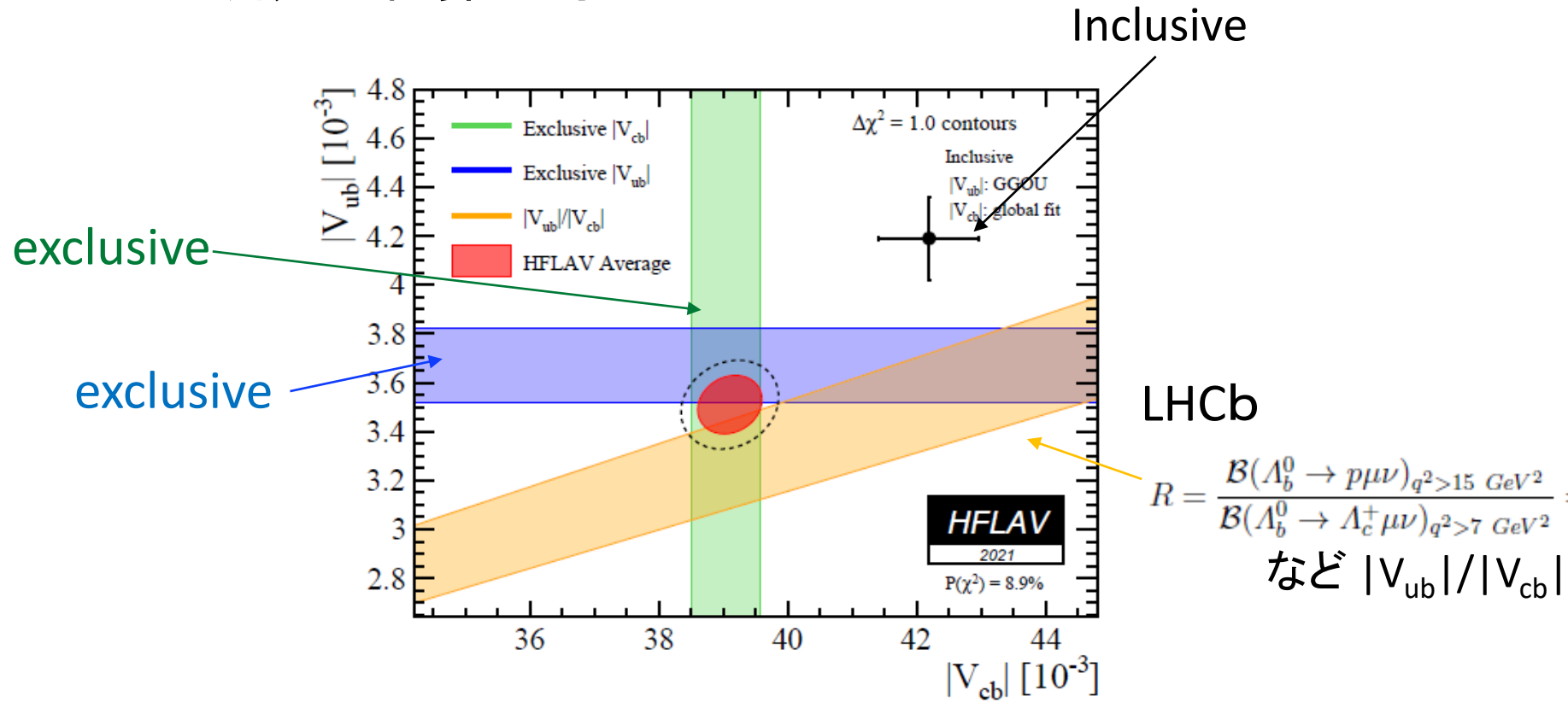
$$|V_{cb}| = (42.19 \pm 0.78) \times 10^{-3}$$



-BelleIIではまだ結果が出ていない解析中.

# $|V_{cb}|, |V_{ub}|$ 測定状況まとめ

-これまでの測定の世界平均のまとめ



-InclusiveとExclusiveの結果に $\sim 3\sigma$ のtensionがある




- 原因はよくわかっていない
- 理論と実験どちらも誤差に効いている Form factor等のモデルも何種類がある

-理論と協力しながら、BelleII, LHCbで信頼性の高い測定を行うのが大事

# B中間子のsemileptonic decay レプトン普遍性の検証

# semileptonic B decay: レプトン普遍性の検証

-標準模型 レプトンとW<sup>+</sup>ボソンの相互作用を表す式

レプトン	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ $-1$ $1/2$  電子	$\approx 105.7 \text{ MeV}/c^2$ $-1$ $1/2$  ミューオン	$\approx 1.78 \text{ GeV}/c^2$ $-1$ $1/2$  タウ
	$< 2 \text{ eV}/c^2$ $0$ $1/2$  電子ニュートリノ	$< 2 \text{ eV}/c^2$ $0$ $1/2$  ミューニュートリノ	$< 2 \text{ eV}/c^2$ $0$ $1/2$  タウニュートリノ

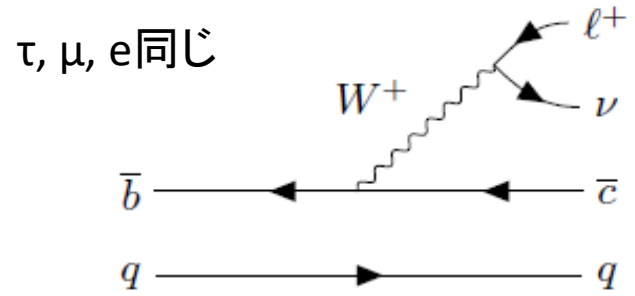
$$-\frac{g}{\sqrt{2}} (\overline{e_L}, \overline{\mu_L}, \overline{\tau_L}) \gamma^\mu W_\mu^- \begin{pmatrix} \nu_{eL} \\ \nu_{\mu L} \\ \nu_{\tau L} \end{pmatrix}$$

γ行列  
 W-ボソン

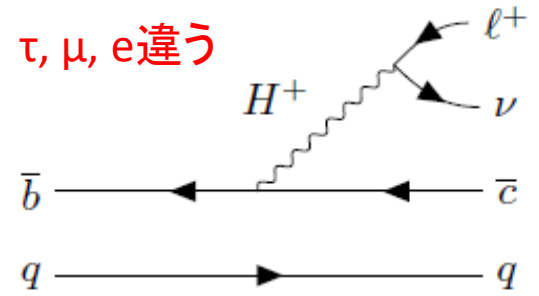
結合定数 上段のレプトン 下段のレプトン(L:左巻き)  
 弱い相互作用の固有状態

-弱い相互作用はレプトンの世代によらず結合定数が同じ(レプトン普遍性).  
 実験で τ, μ, e 反応を比較することで、新物理を探索可能

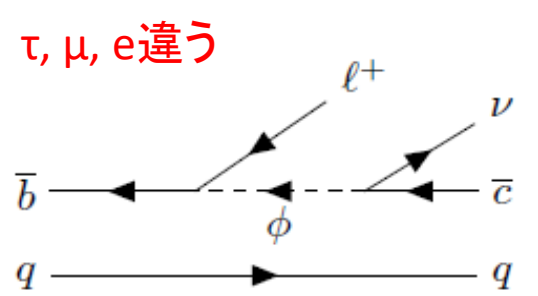
弱い相互作用



荷電ヒッグス



レプトクォーク





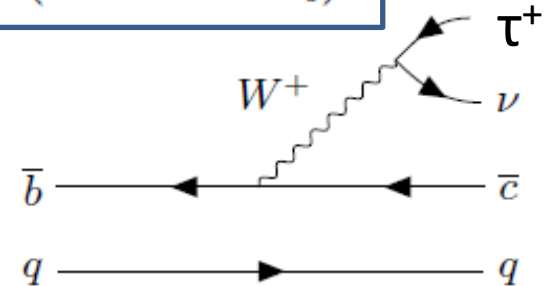
# レプトン普遍性の検証: 実験での測定量

-崩壊分岐比の比:

$\tau$ と $e+\mu$ の比較

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

$$R(X_{e/\mu}) = \frac{\mathcal{B}(B \rightarrow Xe\nu)}{\mathcal{B}(B \rightarrow X\mu\nu)} \quad e\text{と}\mu\text{の比較}$$



- $B \rightarrow D^*\tau\nu$ における $D^*$ の偏極( $F_L^{D^*}$ )と、 $\tau$ の偏極( $P_L^{D^*}$ )  $\tau$ への新物理の寄与

$$P_\tau(D^{(*)}) = [\Gamma^+(D^{(*)}) - \Gamma^-(D^{(*)})] / [\Gamma^+(D^{(*)}) + \Gamma^-(D^{(*)})]$$

+ -:  $\tau$  helicity of  $\pm 1/2$ .

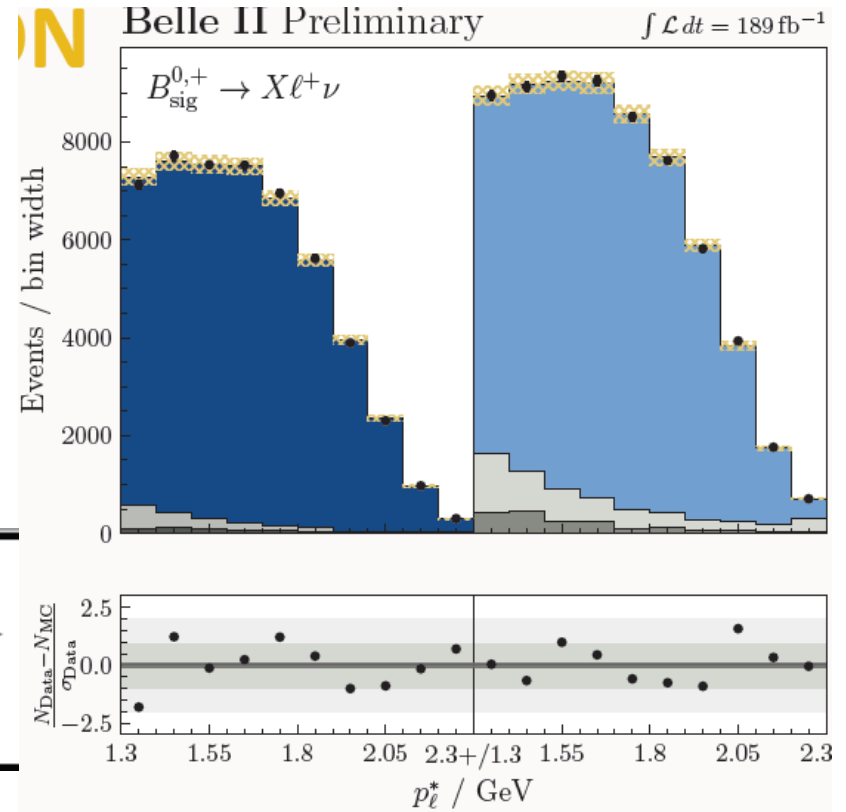
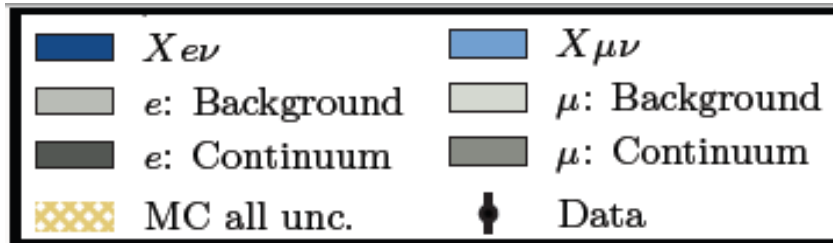
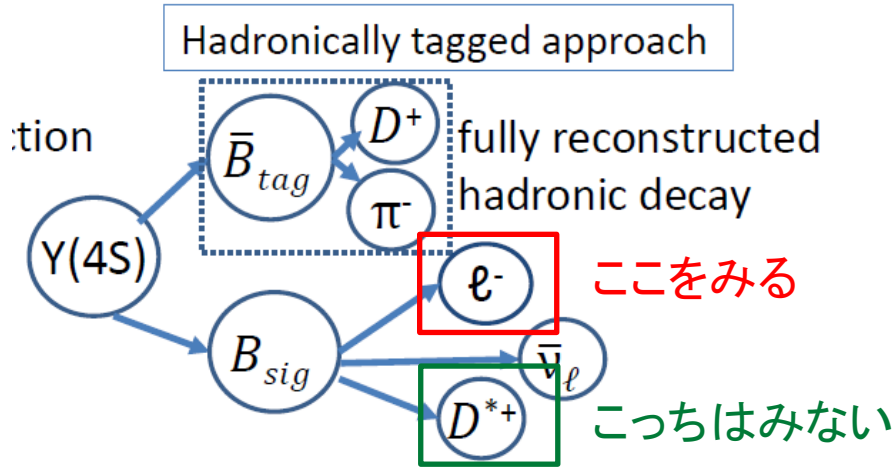
-レプトンの角度分布の比較  $e$ と $\mu$ の比較

$$\Delta A_{FB} = A_{FB}^\mu - A_{FB}^e \quad A_{FB} = \frac{N_F - N_B}{N_F + N_B} \quad \begin{array}{l} N_F = \text{number of events with } \cos(\theta) > 0 \\ N_B = \text{number of events with } \cos(\theta) < 0 \end{array}$$

# $R(X_{e/\mu})$

-2022年7月, BelleIIの測定でworld record

-hadronic tag + leptonの運動量分布からsignal extraction



$$R(X_{e/\mu}) = \frac{\mathcal{B}(B \rightarrow X_{ev})}{\mathcal{B}(B \rightarrow X_{\mu\nu})} = 1.033 \pm 0.010^{\text{stat}} \pm 0.020^{\text{syst}}$$

-Belleの測定、標準模型と一致

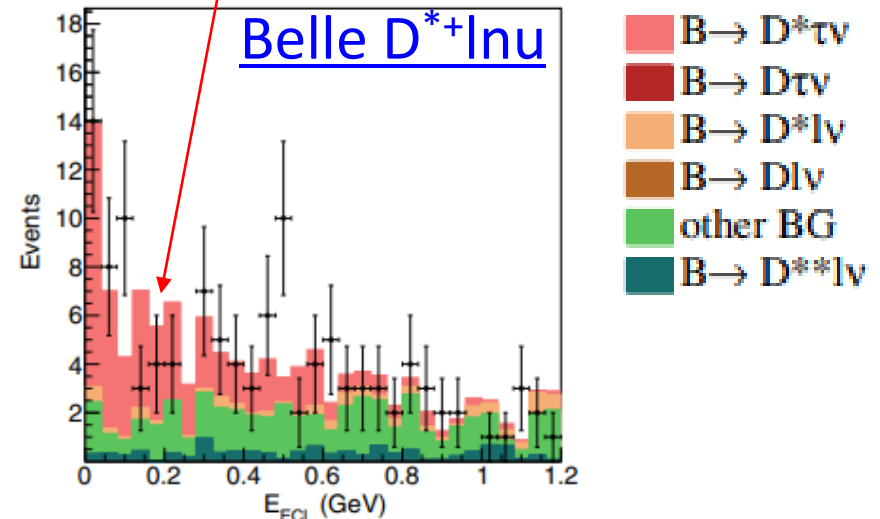
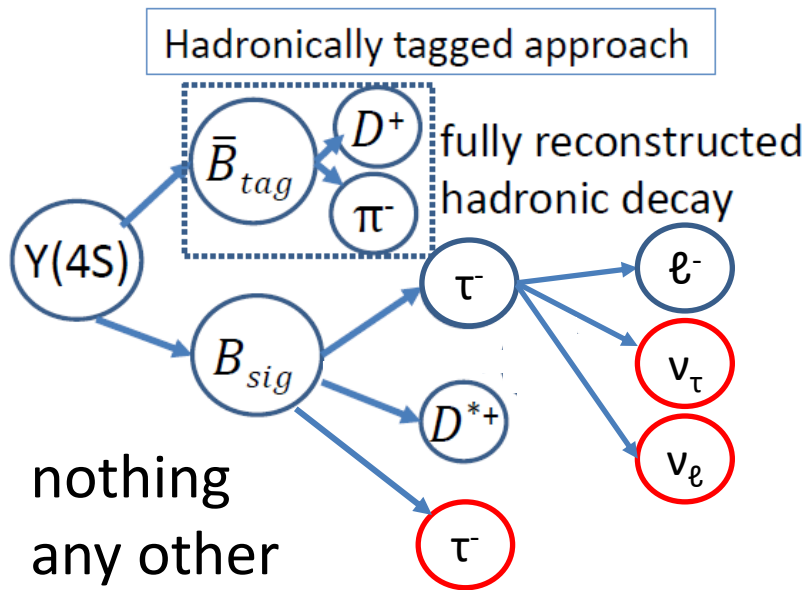
普遍性の破れは見つからず

# R(D),R(D\*): $B \rightarrow D^* \tau \nu$ の再構成 Belle, Babar

- $\tau \rightarrow \ell \nu_\ell \nu_\tau$  (leptonic decay) か  $\tau \rightarrow \pi \nu_\tau, \rho \nu_\tau$  (hadronic decay) などを再構成。  
 やはりニュートリノが検出できない。しかも2~3個でてくる。

-BBの再構成に使われた粒子以外(Rest of event)をみる

- 信号: ビームバックグラウンド、ノイズのみ ECLエネルギー $\sim 0$
- 信号以外の崩壊: 再構成につかわれなかったあまりの粒子 ECLエネルギー $\neq 0$



BB再構成に使われなかった  
 カロリメータのエネルギー

- 主な背景事象:  $B \rightarrow D^{**} \ell \nu$ 、 $B \rightarrow D \ell \nu$
- 詳細は次の見島くんのトークで！

# R(D),R(D\*): LHCb

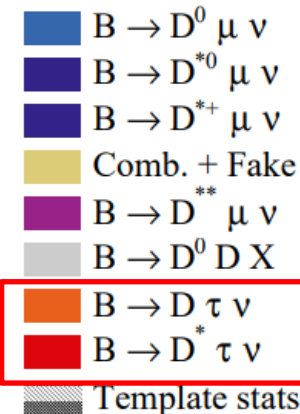
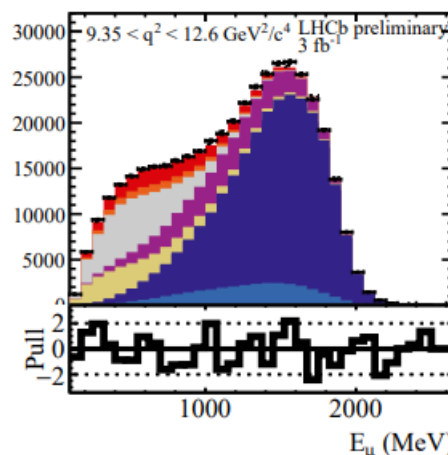
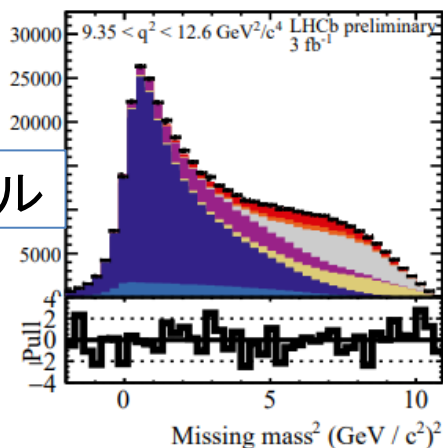
-LHCbではMissing massとレプトンの運動量から信号を測定する

-バックグラウンドの十分な理解が必要:

バックグラウンドをenhanceした領域で詳細にdata/MCを解析

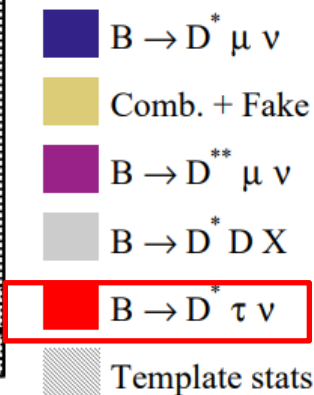
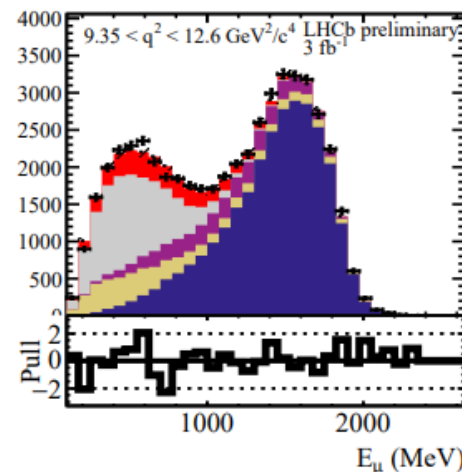
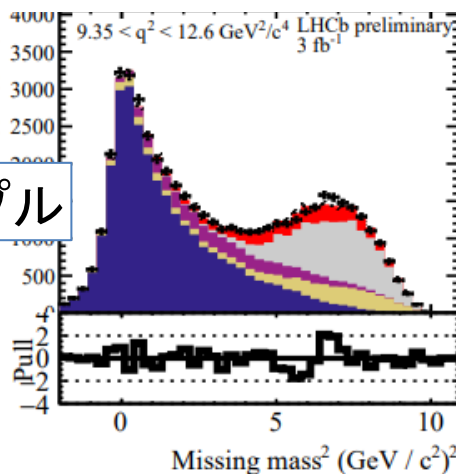
-[https://indico.cern.ch/event/1187939/attachments/2530158/4355180/DTaunu\\_CERNSeminar.pdf](https://indico.cern.ch/event/1187939/attachments/2530158/4355180/DTaunu_CERNSeminar.pdf)

B→Dlv サンプル



信号

B→D\*lv サンプル



信号

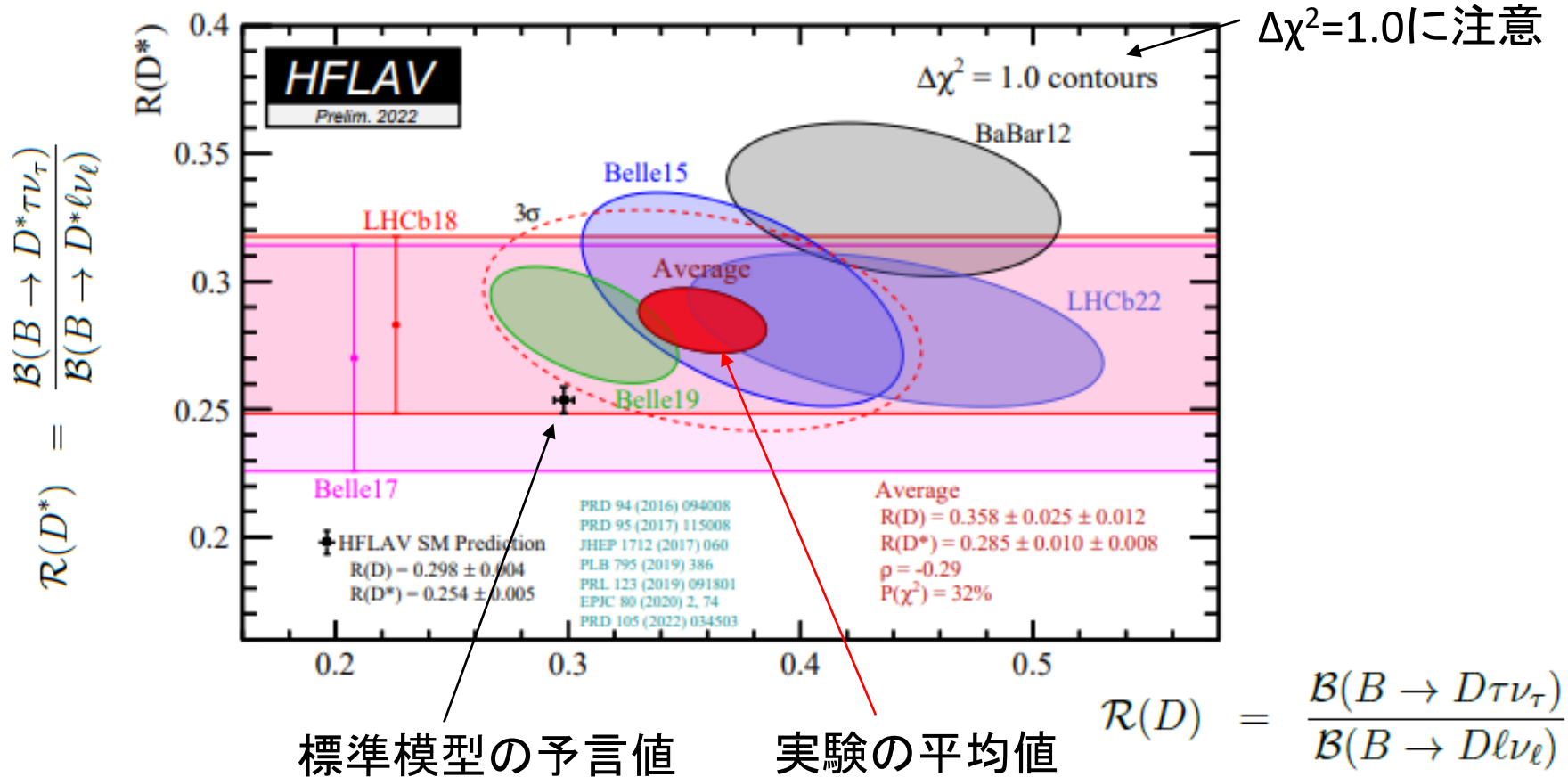
Missing mass    レプトンの運動量

# R(D),R(D\*) anomaly

-R(D) vs R(D\*)の測定結果 (Babar,Belle,LHCb)

- 最近LHCbのR(D)-R(D\*)が加わった
- 標準模型の予言と比べて、世界平均で3.2-4.1σのずれ

-比をとることで系統誤差がキャンセル:統計誤差が支配的



# B → D\* τ ν polarization

-F<sub>L</sub><sup>D\*</sup>: fraction of D\* longitudinal polarization

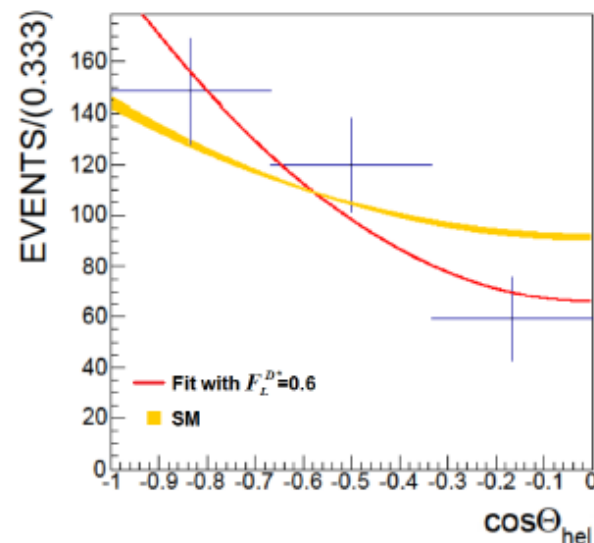
$$\frac{1}{\Gamma} \frac{d\Gamma}{d \cos \theta_{\text{hel}}} = \frac{3}{4} (2F_L^{D^*} \cos^2 \theta_{\text{hel}} + (1 - F_L^{D^*}) \sin^2 \theta_{\text{hel}})$$

θ<sub>hel</sub>: D\* → D<sup>0</sup>πのD<sup>0</sup>と-B<sup>0</sup>の角度@D\*の静止系

-P<sub>τ</sub>(D\*): τ polarization

$$\frac{1}{\Gamma(D^{(*)})} \frac{d\Gamma(D^{(*)})}{d \cos \theta_{\text{hel}}} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \alpha P_\tau(D^{(*)}) \cos \theta_{\text{hel}} \right]$$

θ<sub>hel</sub>: τ had. decayのτνと娘の角度@τの静止系



-Belleが測定 どちらも標準模型と誤差の範囲で一致

-P<sub>τ</sub>(D\*)は特に統計誤差が大きいのでBelleIIの測定で今後改善

	F <sub>L</sub> <sup>D*</sup>	P <sub>τ</sub> (D*)
Belle	0.60 ± 0.08(stat.) ± 0.04(sys.) ( <a href="#">link</a> )	-0.38 ± 0.51(stat.) + 0.21 - 0.16(sys.) ( <a href="#">link</a> )
標準模型	0.441 ± 0.06, 0.457 ± 0.010 など	-0.497 ± 0.013
新物理		type-II 2HDM: ~0.7--1.0 leptoquark: ~-0.5--0.0

# B → D\* ℓ ν angular observables

-レプトン角度の前後対称性:

$N_F$  = number of events with  $\cos(\theta) > 0$

$N_B$  = number of events with  $\cos(\theta) < 0$

$$A_{FB} = \frac{N_F - N_B}{N_F + N_B}$$

$$\Delta A_{FB} = A_{FB}^{\mu} - A_{FB}^e$$

W rest frame

-同様に、他の角度についての前後対称性  $S_i, \Delta S_i$

$S_3: \cos 2\chi$

$S_5: \cos\chi \cos\theta_l$

$S_7: \cos\chi \cos\theta_\nu$

$S_9: \sin\chi \cos\theta_\nu$

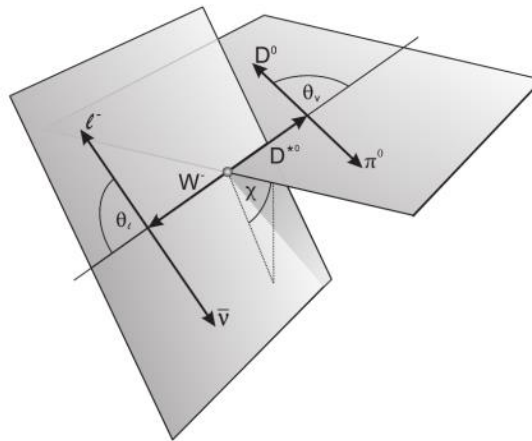
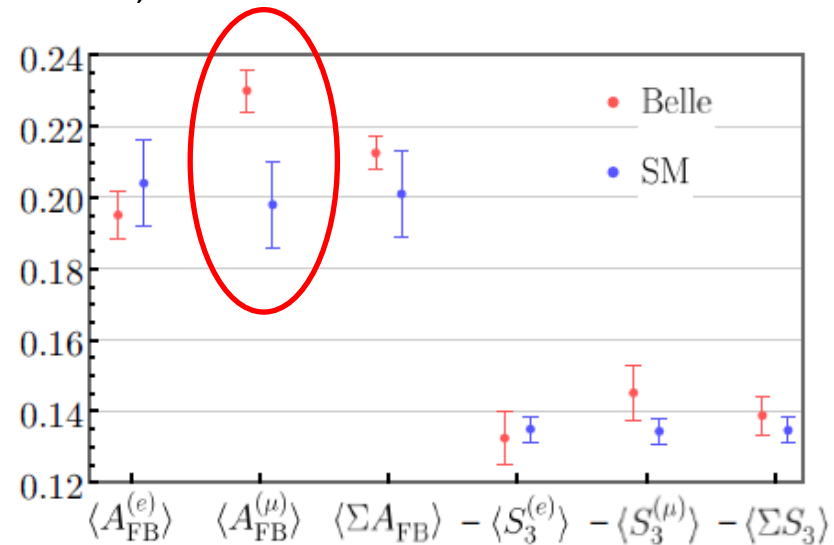


Figure 1: Visualization of the helicity angles



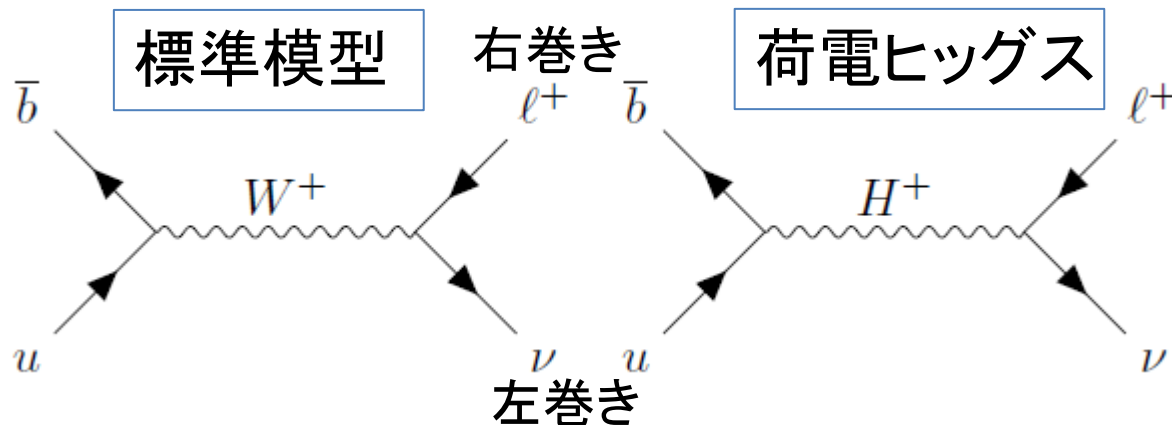
-BelleのB → D\* ℓ ν解析で、 $\Delta A_{FB}$ が標準模型から~4σずれているとの報告

-BelleIIでも今年中の発表を目指して解析中 Hadronic tag

# 純レプトニック崩壊

-Pure leptonic decay (終状態にレプトンのみ)

- $B \rightarrow \tau \nu$ ,  $B \rightarrow \ell \nu$

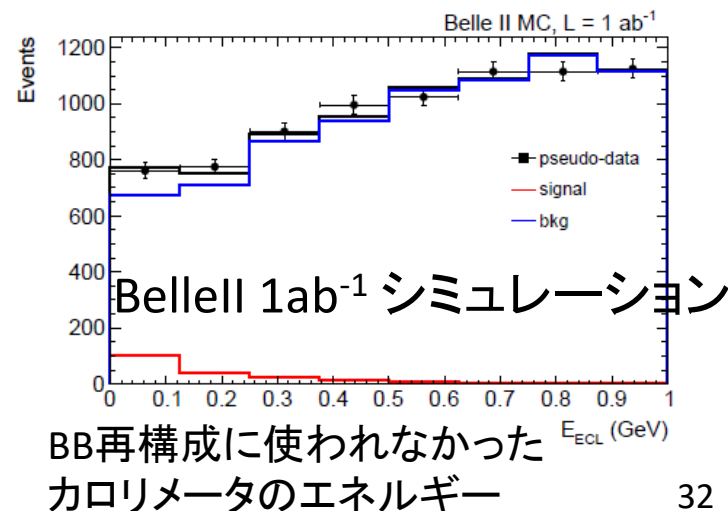
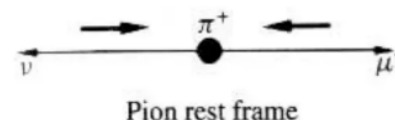


-Tree反応だが、Helicity suppressionのため崩壊分岐比が小さい

標準模型

$$\begin{cases} B_\tau = (7.7 \pm 0.6) \times 10^{-5} \\ B_\mu = (3.5 \pm 0.3) \times 10^{-7} \\ B_e = (8.1 \pm 0.6) \times 10^{-12} \end{cases}$$

Belle+Babar  $B_\tau = (1.06 \pm 0.19) \times 10^{-4}$



-Belle II 単独での5 $\sigma$ の発見には数ab<sup>-1</sup>必要



$$\Upsilon(nS) \rightarrow \tau\tau / \Upsilon(nS) \rightarrow \ell\ell$$

-<https://arxiv.org/pdf/2210.10751.pdf>

- $b \rightarrow c\tau\nu$ で予言されている新物理は、 $\Upsilon(nS)$ の崩壊にもanomalyを起こす可能性がある:

$$R_{\Upsilon(nS)} = \frac{\mathcal{B}(\Upsilon(nS) \rightarrow \tau^+\tau^-)}{\mathcal{B}(\Upsilon(nS) \rightarrow \ell^+\ell^-)}$$

-現在のBabarの結果と標準模型の予言: 28fb<sup>-1</sup> PhysRevLett.125.241801

$$R_{\Upsilon(3S)}^{\text{BaBar}} = 0.966 \pm 0.008_{\text{stat}} \pm 0.014_{\text{syst}}, \text{ where } \ell = \mu.$$

$$R_{\Upsilon(3S)}^{\text{SM}} = 0.9948 \pm \mathcal{O}(10^{-5})$$

-Babarより1桁いい精度で測定ができれば新物理に高感度

-O(0.1%)で系統誤差を抑えるのは BelleIIでも簡単ではない。。  
なにか工夫が必要。

TABLE III. The summary of systematic uncertainties.

Source	Uncertainty (%)
Particle identification	0.9
Cascade decays	0.6
Two-photon production	0.5
$\Upsilon(3S) \rightarrow \text{hadrons}$	0.4
MC shape	0.4
$B\bar{B}$ contribution	0.2
ISR subtraction	0.2
Total	1.4

# BelleIIでの今後のsemileptonic測定

- BelleIIは2022年夏までに BelleIIの約半分の $\sim fb^{-1}$ を取得

-tagged approach: 機械学習により検出効率 $\sim 2$ 倍.

-un-tagged approach: 十分な統計量.

→2023年中に、World record と並ぶ結果を出せるよう解析中.

-進行中の  $|V_{cb}|, |V_{ub}|$  解析  $\sim 10$ 個

(日本からはKEK)

- exclusive  $|V_{cb}|$  with  $B \rightarrow D^* \ell \nu, D \ell \nu, D^{**} \ell \nu$  tagged/untagged

- exclusive  $|V_{ub}|$  with  $B \rightarrow \pi \ell \nu, \rho \ell \nu$  tagged/untagged

- inclusive  $|V_{ub}|$  with  $B \rightarrow X_u \ell \nu$  tagged/untagged

- exclusive  $|V_{ub}| / |V_{cb}|$  with  $B \rightarrow \pi \ell \nu$  semileptonic tagged

-進行中のレプトン普遍性解析  $\sim 10$ 個

(日本からは名古屋+KEK)

- $R(D), R(D^*)$  with hadronic/semileptonic/inclusive tag

- $R(X_{e/\mu}), R(X)$  with hadronic tag

- $\Delta(A_{FB}), S_i$  with hadronic tag

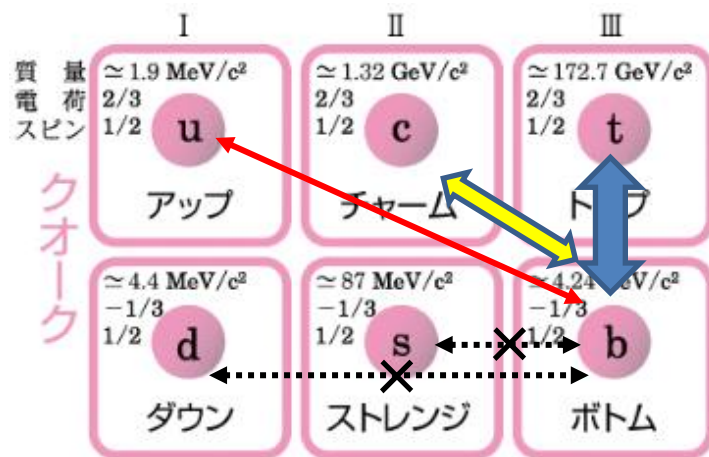
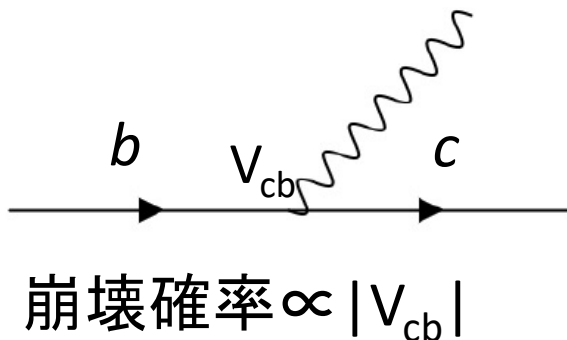
- $B \rightarrow \tau \nu$  with hadronic/semileptonic

# B中間子のRare decay レプトン普遍性の検証

# Rare B decay

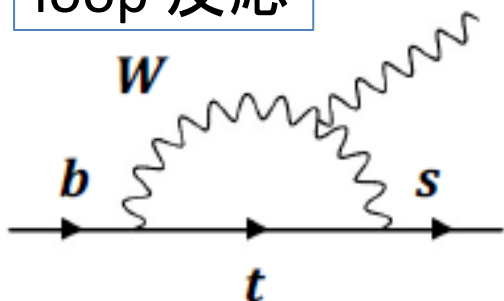
- 横方向のフレーバー変化 ( $b \rightarrow s, b \rightarrow d$ など)はtree levelでは起こらない
- Flavor changing neutral current (FCNC)

tree 反応

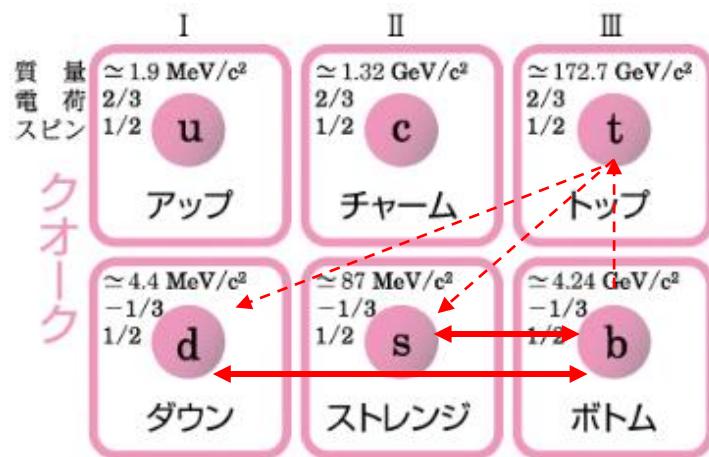
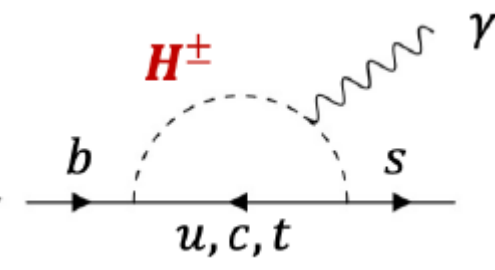


- Loopを介するとFCNCが起こる。標準模型では抑制(=Rare decayと呼ぶ)
- 標準模型の予言を実験と比較し、高エネルギーの新物理を探索。

loop 反応



新物理



崩壊確率  $\propto |V_{tb} V_{ts}^*| \quad |V_{tb}| \sim 1$

# Rare B decayの種類

-多種多様な崩壊と物理:

-チャームクォークを含まない中間子への崩壊

- $B \rightarrow K\pi, \pi\pi$  (擬スカラー),  $\phi K_S$  (ベクトル) など

-輻射(radiative)崩壊

- $b \rightarrow X_s \gamma, K^* \gamma$  など

-電弱ペンギン崩壊

- $b \rightarrow X_s \ell\ell, b \rightarrow K(^*) \ell\ell$  など

← レプトン普遍性と関係が深い  
ここだけカバー

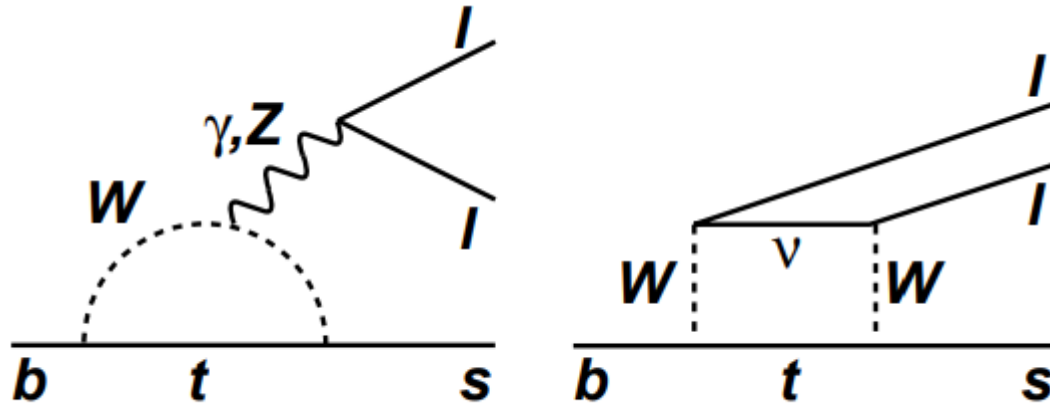
-バリオンへの崩壊

- $B \rightarrow p\rho K$  など

# 電弱ペンギン崩壊

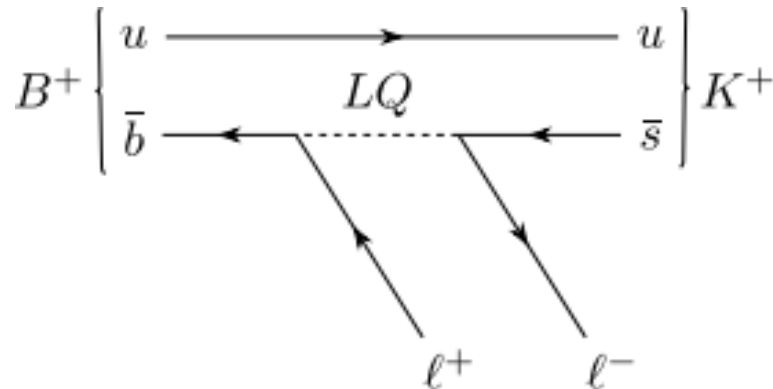
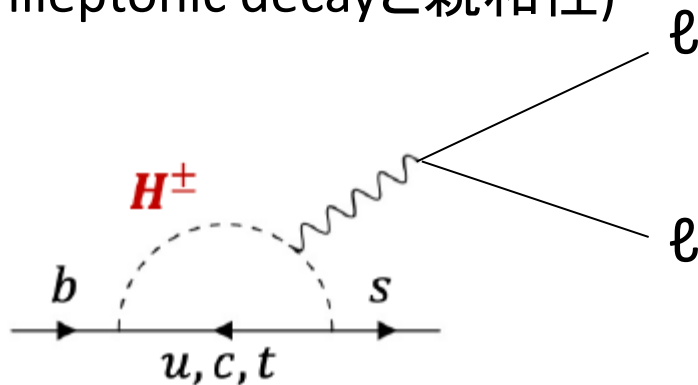
- $b \rightarrow s \ell^+ \ell^-$ ,  $b \rightarrow s \nu \bar{\nu}$  崩壊

-電弱ペンギンダイアグラム、ボックスダイアグラムが関与



-レプトン普遍性の検証が可能

-荷電ヒッグス、レプトクォークなど、 $\tau$ ,  $\mu$ ,  $e$ で反応が違う新物理を探索 (semileptonic decayと親和性)

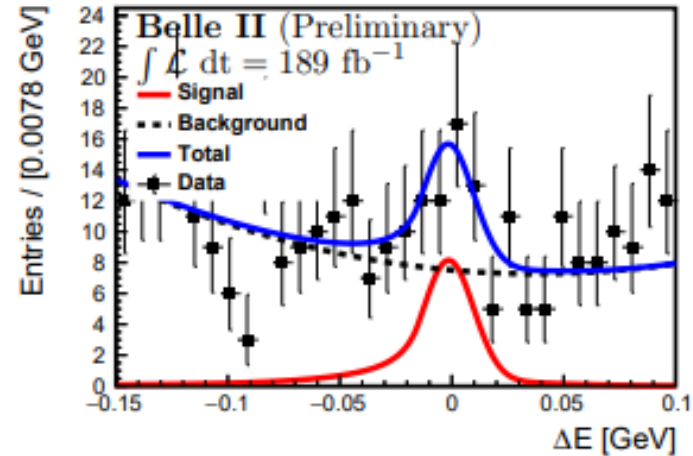
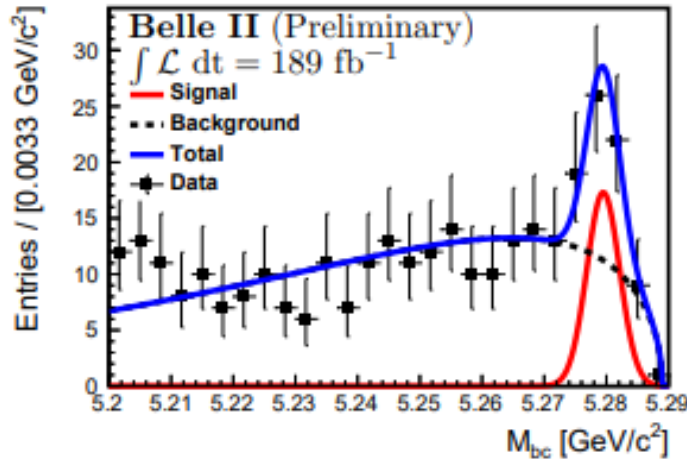


# B → K(\*)ℓℓ測定

- 娘粒子(K(\*),ℓ,ℓ)がすべて再構成できる:  
Bの不変質量,エネルギーを測定可能.

$$M_{bc} = \sqrt{E_{\text{beam}}^2 - \vec{p}_B^{*2}}$$

$$\Delta E = E_B^* - E_{\text{beam}}$$



- BelleIIで189fb<sup>-1</sup>を使った崩壊分岐比測定  
-統計誤差がまだかなり大きい

channel	$N_{\text{sig}}$	$\varepsilon(\%)$	$B (10^{-6})$	pdg ( $10^{-6}$ ) [19]
$B \rightarrow K^* \mu\mu$	$22 \pm 6$	9.32	$1.19 \pm 0.31 \pm_{-0.07}^{+0.08}$	$1.06 \pm 0.09$
$B \rightarrow K^* ee$	$18 \pm 6$	6.39	$1.42 \pm 0.48 \pm 0.09$	$1.19 \pm 0.20$
$B \rightarrow K^* \ell\ell$	$38 \pm 9$	15.35	$1.25 \pm 0.30 \pm_{-0.07}^{+0.08}$	$1.05 \pm 0.10$

# $R_{K(*)}$ anomaly

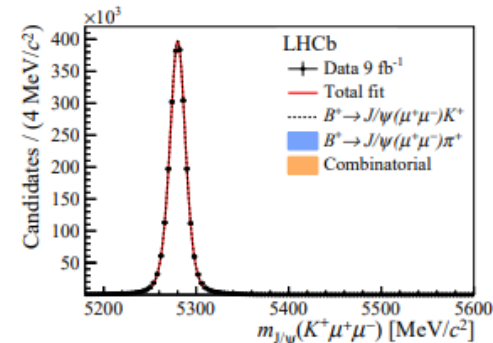
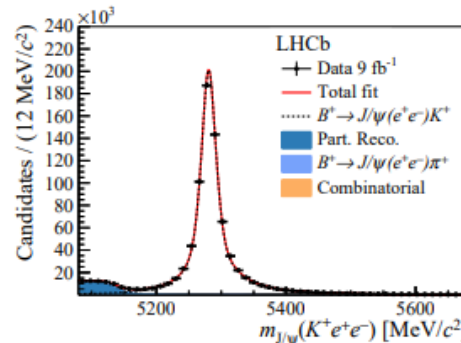
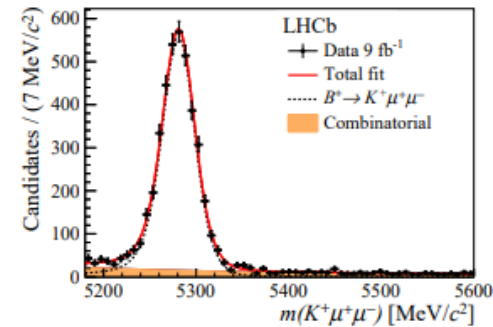
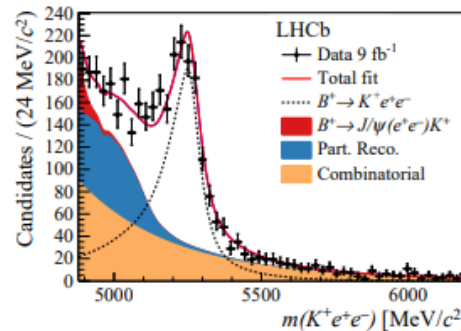
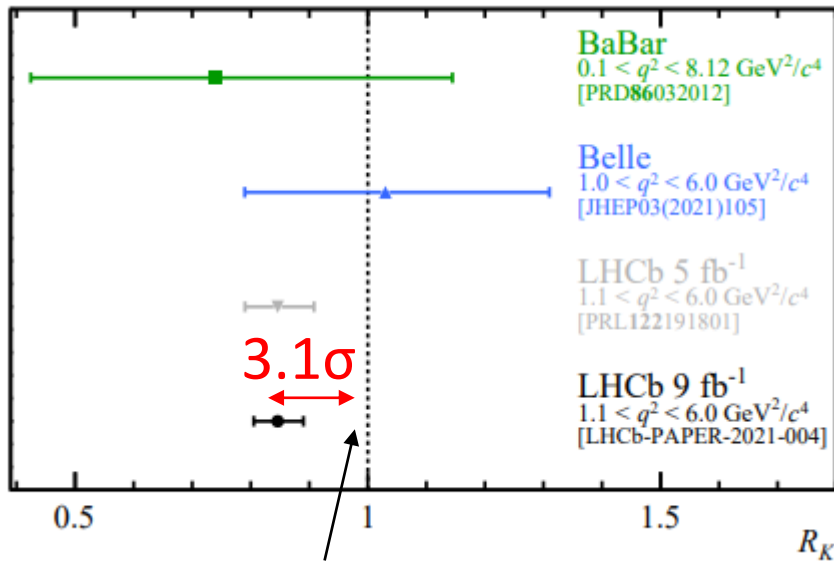
-崩壊分岐比の比

$$R_K = \frac{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-)}{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow J/\psi (\rightarrow \mu^+ \mu^-) K^+)} \bigg/ \frac{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ e^+ e^-)}{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow J/\psi (\rightarrow e^+ e^-) K^+)}$$

eとμの比較

-LHCbの結果が標準模型と~3.1σずれている

$$R_K(1.1 < q^2 < 6.0 \text{ GeV}^2/c^4) = 0.846^{+0.042}_{-0.039} +0.013_{-0.012}$$

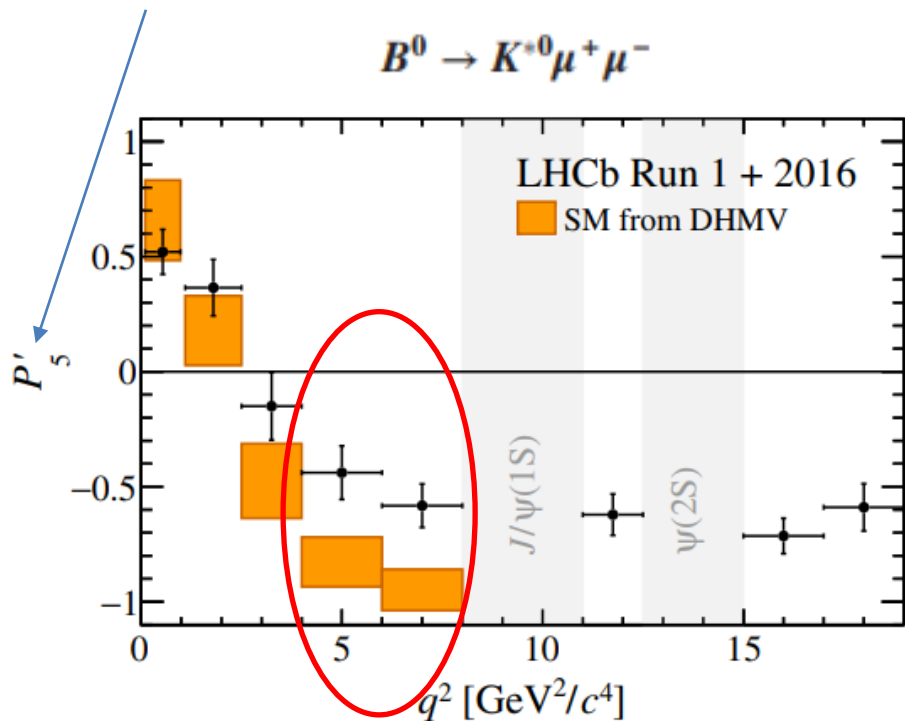




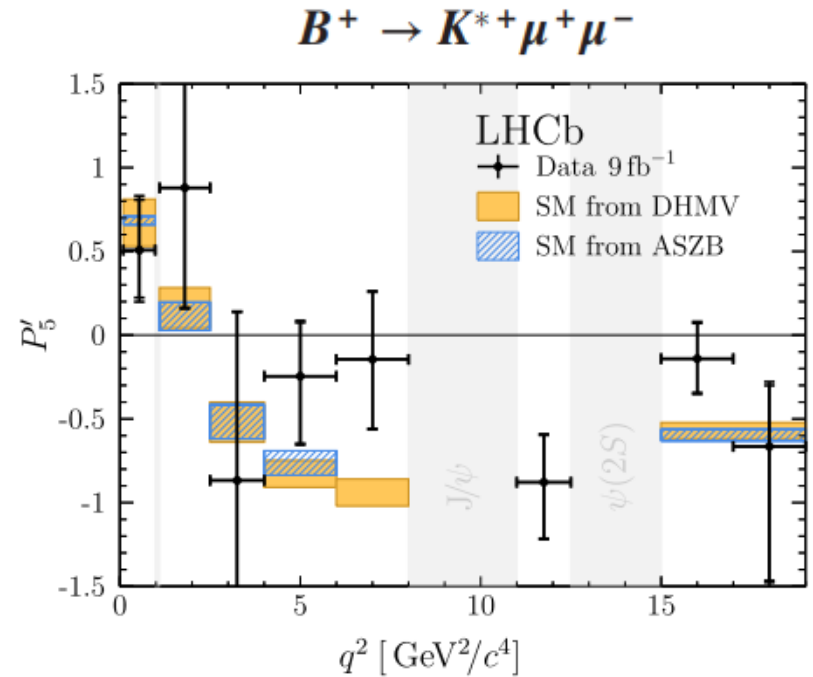
# $R_{K(*)}$ anomaly: 角度分布

- $B \rightarrow K^* \mu \mu$ の角度分布にも最大 $2.5 \sim 2.9\sigma$ のanomalyが見られる

semileptonicのSiみたいなやつ  $K^* \mu \mu$ 角度の対称性



PhysRevLett.125.011802

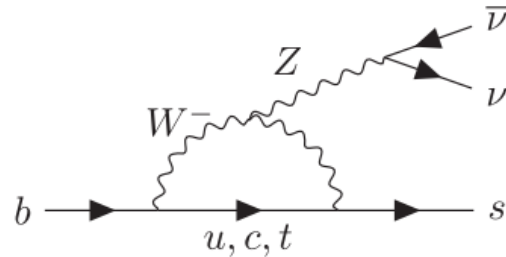


PhysRevLett.126.161802

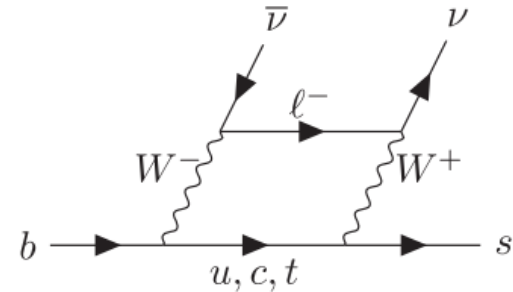
# B→K(\*)νν BelleII 測定状況

-B→K(\*)νν の崩壊分岐比は、標準模型だと  $BF=(4.6 \pm 0.5) \times 10^{-6}$ .  
 まだ発見されていない崩壊。

-B→K\*ℓℓのように  
 アノマリーが見えるか?



(a) Penguin diagram

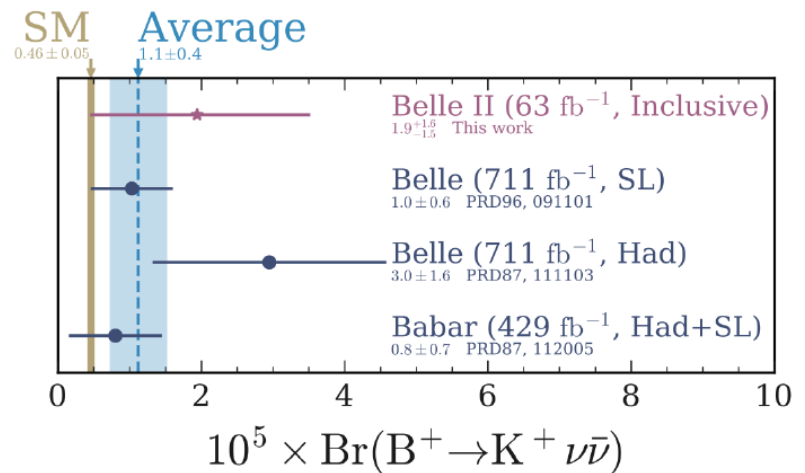


(b) Box diagram

-2021, BelleII  $63\text{fb}^{-1}$  で崩壊を探索

-ニュートリノが2個あるので再構成が難しい。  
 従来はtagging approachを使っていた

-今回はuntagging(inclusive) approach  
 +機械学習を採用。感度が大幅に向上。



-発見はできなかったが、上限値をつけた。  
 今年末か来年あたりにアップデート予定。

# まとめ

## ○B中間子のsemileptonic decay

- $B \rightarrow X_{u,c} \ell \nu$  CKM行列要素の測定

- $B \rightarrow (X_{u,c}) \tau \nu, B \rightarrow (X_{u,c}) \ell \nu$  レプトン普遍性の検証

## ○B中間子のrare decay

- $b \rightarrow s \ell \ell$  レプトン普遍性の検証

-BelleIIでは,2023年中にBelleよりいい(か同程度)の結果を出せるよう解析中.

backup

# 有効理論とWilson係数

-新物理の影響をeffective Hamiltonianとして以下のように書く

$$\mathcal{H}_{\text{eff}} = 2\sqrt{2}G_F V_{cb} \left[ (1 + C_{V_L})O_{V_L} + C_{V_R}O_{V_R} + C_{S_L}O_{S_L} + C_{S_R}O_{S_R} + C_T O_T \right]$$

C:Wilson係数. 標準模型ではC=0

O:オペレータ

$$O_{V_L} = (\bar{c}\gamma^\mu P_L b)(\bar{\tau}\gamma_\mu P_L \nu_\tau),$$

$$O_{V_R} = (\bar{c}\gamma^\mu P_R b)(\bar{\tau}\gamma_\mu P_L \nu_\tau),$$

$$O_{S_L} = (\bar{c}P_L b)(\bar{\tau}P_L \nu_\tau)$$

$$O_{S_R} = (\bar{c}P_R b)(\bar{\tau}P_L \nu_\tau),$$

$$O_T = (\bar{c}\sigma^{\mu\nu} P_L b)(\bar{\tau}\sigma_{\mu\nu} P_L \nu_\tau),$$

$\gamma^\mu$ の代わりに $\sigma_{\mu\nu}$  テンソル

弱い相互作用と同じ形

$P_R$  右巻き

$\gamma^\mu$ がない スカラー

# 有効理論とWilson係数

-新物理の影響をeffective Hamiltonianとして以下のように書く

$$\mathcal{H}_{\text{eff}} = 2\sqrt{2}G_F V_{cb} \left[ (1 + C_{V_L})O_{V_L} + C_{V_R}O_{V_R} + C_{S_L}O_{S_L} + C_{S_R}O_{S_R} + C_T O_T \right]$$

-R(D), R(D\*),  $F_L^{D^*}$  の実験結果を、各  $C_X$  1つずつFitした結果

fit結果 標準模型ではC=0

$\tau$  polarization  
等の予言値

Single WC fit	Pull, $\chi_{\text{best}}^2$	Fitted $C_X$ ( $\Delta\chi^2 = 1$ )	Consistency of $C_X$		Prediction ( $\Delta\chi^2 \leq 1$ )		
			$B_c$ lifetime	LHC bound	$P_\tau^D$	$-P_\tau^{D^*}$	$R_{J/\psi}$
SM	0.0, 21.8	-	-	-	$0.331 \pm 0.004$	$0.497 \pm 0.007$	$0.240 \pm 0.006$
$C_{V_L}$	4.4, 2.8	+0.08(2)	very loose	[-0.32, 0.32]	[0.330, 0.330]	[0.495, 0.496]	[0.251, 0.277]
$C_{V_R}$	1.9, 18.2	-0.05(3)	very loose	[-0.33, 0.33]	[0.330, 0.330]	[0.495, 0.496]	[0.250, 0.277]
$C_{S_L}$	3.0, 13.3	0.17(5)	[-0.94, 1.4]	[-0.55, 0.55]	[0.440, 0.518]	[0.517, 0.533]	[0.236, 0.238]
$C_{S_R}$	3.8, 7.5	0.20(5)	[-1.4, 0.94]	[-0.55, 0.55]	[0.460, 0.527]	[0.453, 0.470]	[0.243, 0.245]
$C_T$	3.4, 10.5	-0.03(1)	-	[-0.17, 0.17]	[0.346, 0.358]	[0.459, 0.476]	[0.265, 0.286]

**Table 4.** Fit results, consistency check, and predictions for the single NP operator scenarios assuming real WCs. Fitted WCs and predictions of the observables are in the range of  $\Delta\chi^2 = \chi^2 - \chi_{\text{best}}^2 \leq 1$ .

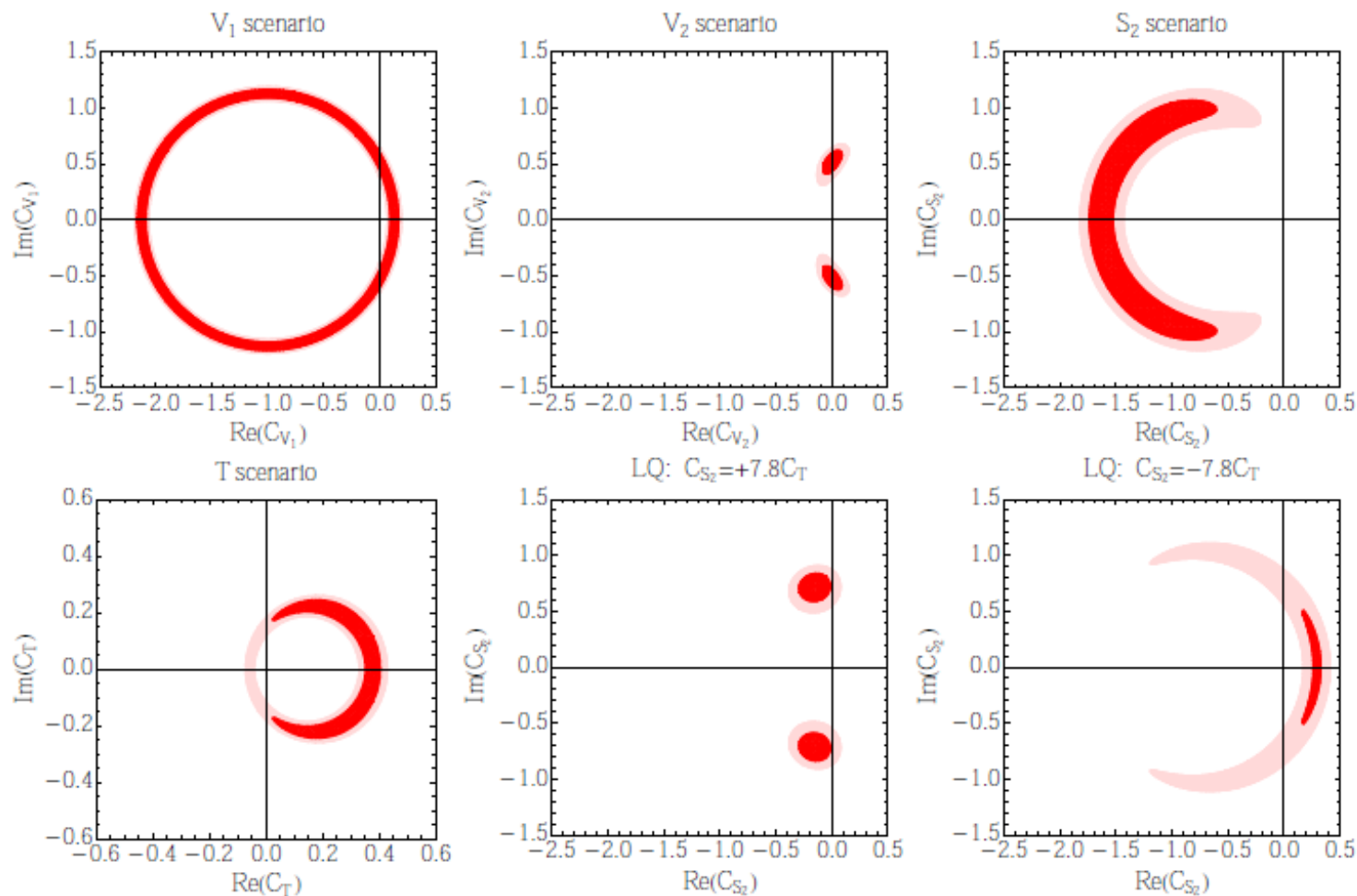
モデルに依存した偏極

# 有効理論とWilson係数

-ちょっと古いですが <https://arxiv.org/abs/1808.10567> より

-68, 95% CL

-(0,0)が標準模型



# 有効理論とWilson係数

-semileptonic decayと同じように、新物理の影響をeffective Hamiltonianとして以下のように書く

$$\mathcal{H}_{\text{eff}}^{\text{SM}} = \frac{4G_F}{\sqrt{2}} \sum_{p=u,c} \lambda_{ps} \left( C_1 \mathcal{O}_1^p + C_2 \mathcal{O}_2^p + \sum_{i=3}^{10} C_i \mathcal{O}_i \right)$$

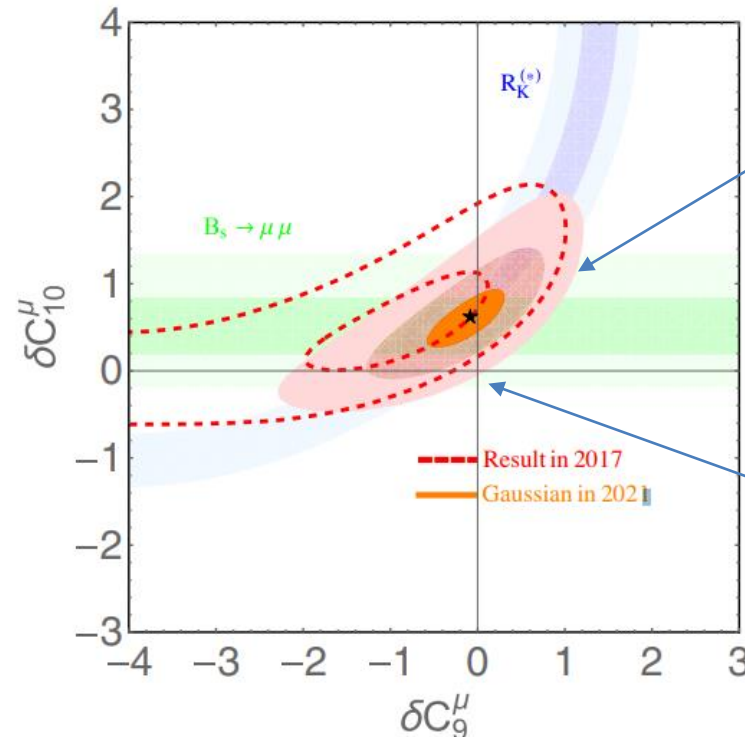
$$\mathcal{O}_7 = \frac{e}{16\pi^2} m_b (\bar{s} \sigma^{\mu\nu} P_R b) F_{\mu\nu},$$

$$\mathcal{O}_9^{\ell} = \frac{e^2}{16\pi^2} (\bar{s} \gamma^{\mu} P_L b) (\bar{\ell} \gamma_{\mu} \ell),$$

$$\mathcal{O}_{10}^{\ell} = \frac{e^2}{16\pi^2} (\bar{s} \gamma^{\mu} P_L b) (\bar{\ell} \gamma_{\mu} \gamma_5 \ell).$$

- $R(K^*)$ ,  $B(B_s^0 \rightarrow \mu\mu)$ の結果を $C_x$ でフィット

-best fit pointは $5\sigma$ で標準模型からずれている



bestfit,  $1\sigma, 3\sigma, 5\sigma$

標準模型(0,0)



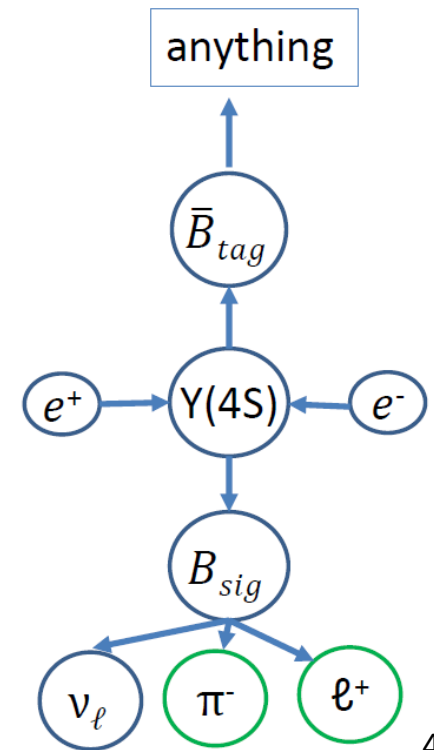
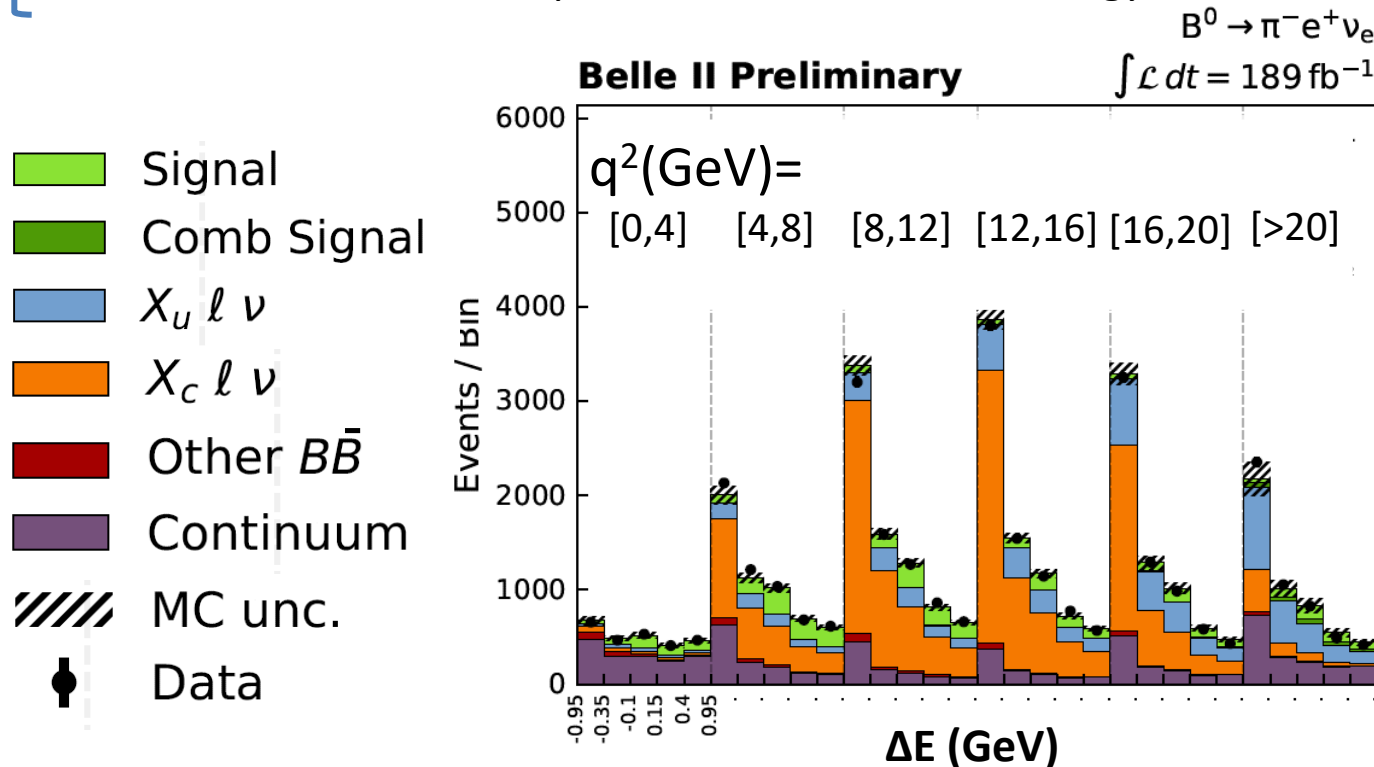
# Untagged $B^0 \rightarrow \pi \ell \nu$ : selection

-Challenge: large background from continuum and B decays

- $B^0 \rightarrow \pi \ell \nu$  ( $\ell=e, \mu$ ) and cc. are reconstructed for  $|V_{ub}|$
- continuum and B background rejection with multivariate classifier (Boosted decision trees)

-Signal is extracted by fitting  $M_{bc}$  and  $\Delta E$  distributions

- $M_{bc}$ : Invariant B candidate mass where energy is replaced by half of collision energy
- $\Delta E$ : difference between expected and observed B energy



# Untagged $B^0 \rightarrow \pi \ell \nu$ : result

-Differential decay width is fitted to extract  $|V_{ub}|$  and form factors

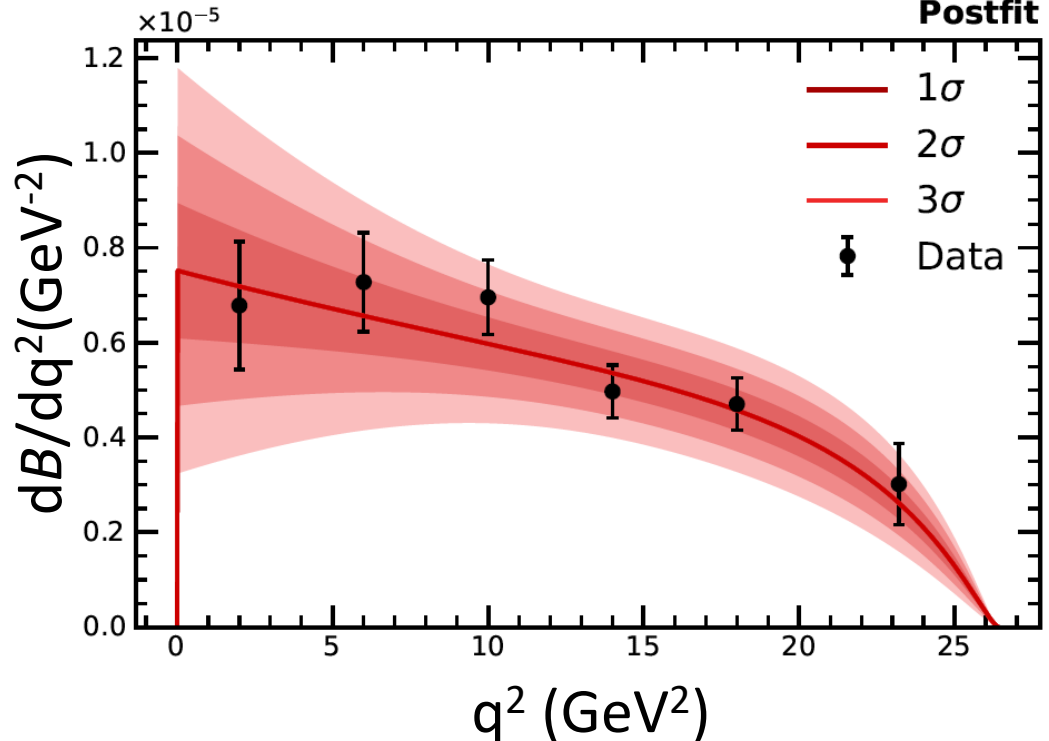
-[BCL](#) parametrization (Phys. Rev. D 79, 013008 (2009)) with lattice QCD calculation by

[FNAL/MILC](#) (Phys. Rev. D 92, 014024 (2015)),

$$\frac{d\Gamma(B \rightarrow \pi \ell \nu)}{dq^2} = \frac{G_F^2 |V_{ub}|^2}{24\pi^3} |p_\pi|^3 |f_+(q^2)|^2$$

$$|V_{ub}|_{B^0 \rightarrow \pi^- \ell^+ \nu_\ell} = (3.54 \pm 0.12_{\text{stat}} \pm 0.15_{\text{sys}} \pm 0.16_{\text{theo}}) \times 10^{-3}$$

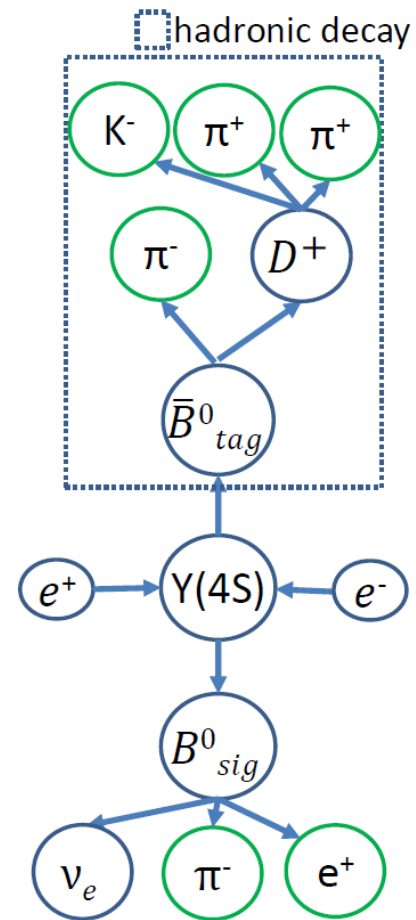
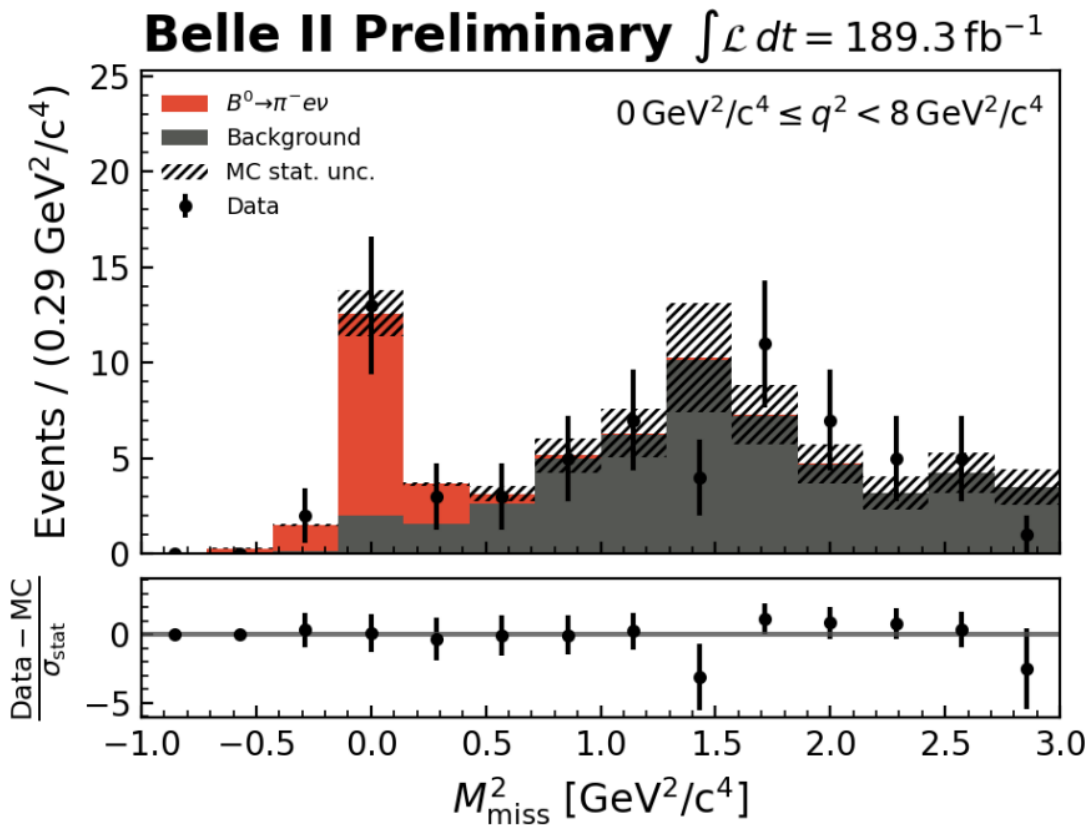
**Belle II Preliminary Postfit**



-consistent with the exclusive world average

# Tagged $B \rightarrow \pi e \nu$ : selection

- $B^0 \rightarrow \pi^- e^+ \nu_e$ ,  $B^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu_e$  and cc. are reconstructed for  $|V_{ub}|$
- $B_{\text{tag}}$  is fully reconstructed with Full Event Interpretation algorithm
- Signal is extracted by fitting missing mass squared distribution



# Tagged $B \rightarrow \pi e \nu$ : result

-Differential decay width is fitted to extract  $|V_{ub}|$  and form factors

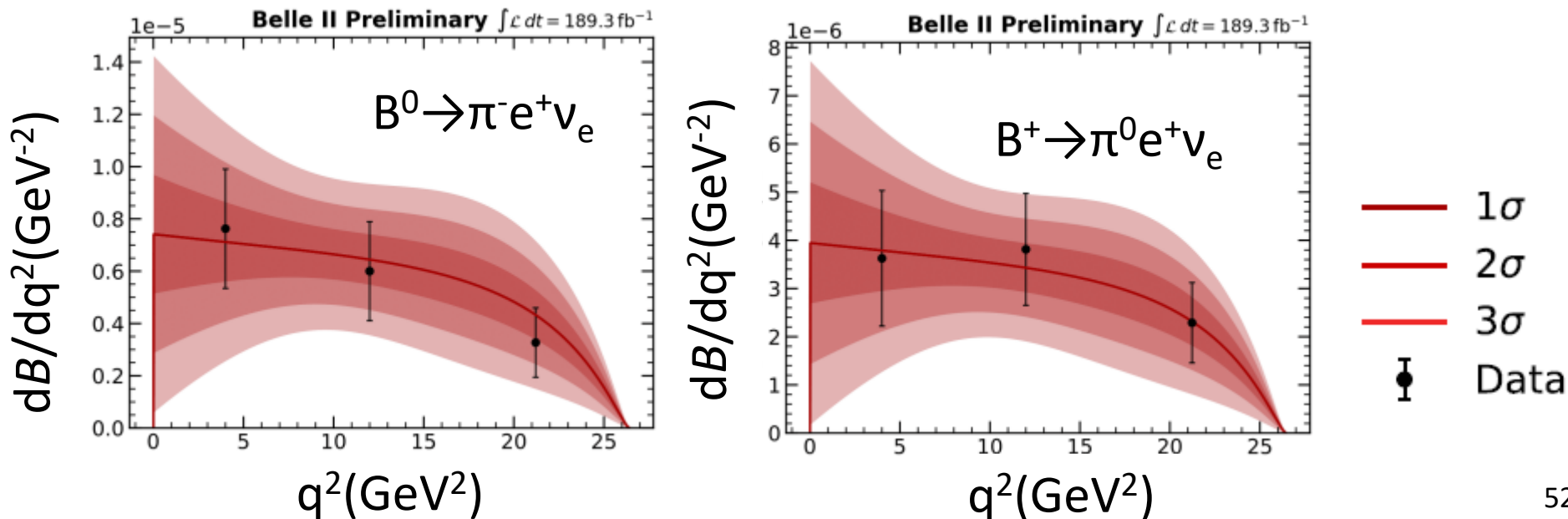
-[BCL](#) parametrization (Phys. Rev. D 79, 013008 (2009)) with lattice QCD calculation by

[FNAL/MILC](#) (Phys. Rev. D 92, 014024 (2015)),

$$\frac{d\Gamma(B \rightarrow \pi \ell \nu)}{dq^2} = \frac{G_F^2 |V_{ub}|^2}{24\pi^3} |p_\pi|^3 |f_+(q^2)|^2$$

$$|V_{ub}| \times 10^3 = 3.88 \pm 0.45 \text{ (stat.+sys.+theo.)}$$

-Consistent with the world average



# BF of $B \rightarrow \rho \ell \nu$

-  $B \rightarrow \rho \ell \nu$  is another channel to measure  $|V_{ub}|$

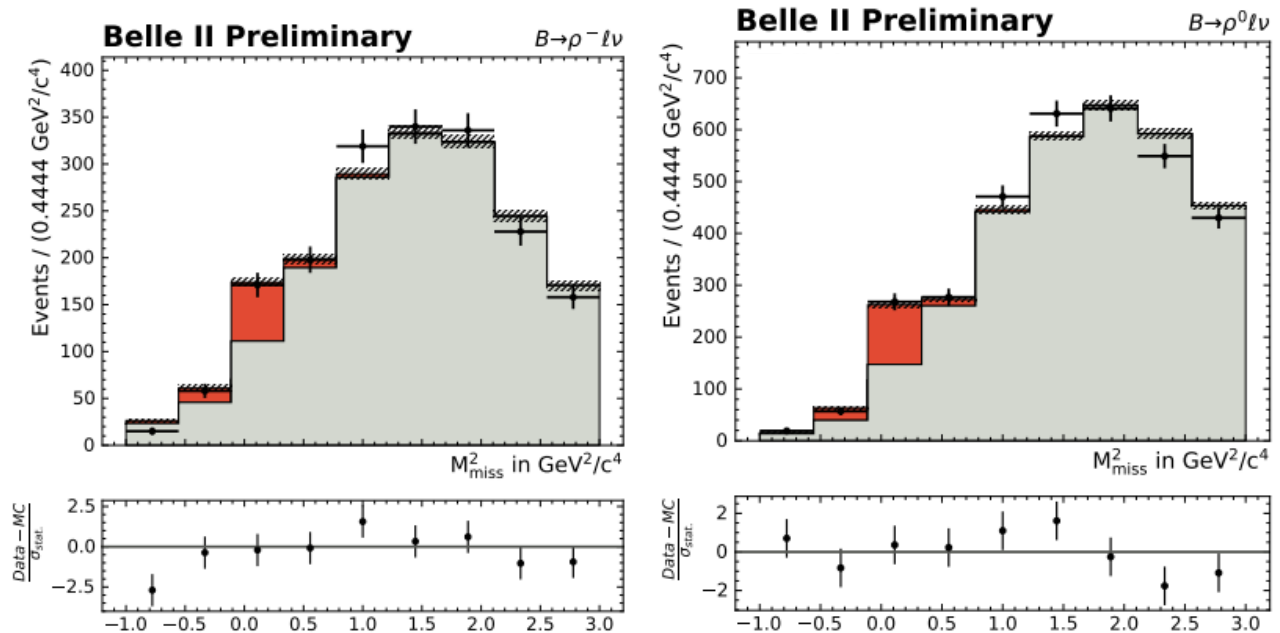
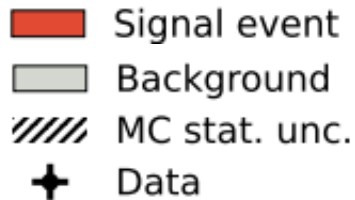
- independent samples from  $B \rightarrow \pi \ell \nu$

- tension observed between measurements of  $B^0 \rightarrow \rho^- \ell^+ \nu$  and  $B^+ \rightarrow \rho^0 \ell^+ \nu$

- BF is measured with the hadronic tag method

- Signal is extracted from missing mass squared and invariant mass of two pions

	$B^0 \rightarrow \rho^- \ell^+ \nu$	$B^+ \rightarrow \rho^0 \ell^+ \nu$
$\mathcal{B}$	$(4.12 \pm 0.64_{\text{stat}} \pm 1.16_{\text{sys}}) \times 10^{-4}$	$(1.77 \pm 0.23_{\text{stat}} \pm 0.36_{\text{sys}}) \times 10^{-4}$
$\mathcal{B}_{\text{PDG}}$	$(2.94 \pm 0.11 \pm 0.18) \times 10^{-4}$	$(1.58 \pm 0.11) \times 10^{-4}$



# Measurement of $|V_{cb}|$ and $|V_{ub}|$ at Belle II

-In this time, Belle II measures  $|V_{cb}|$  and  $|V_{ub}|$  exclusively

$\left[ \begin{array}{l} -|V_{cb}|: B \rightarrow D(^*)l\nu, |V_{ub}|: B \rightarrow \pi l\nu \quad (l=e,\mu) \\ -189 \text{ fb}^{-1} \text{ dataset accumulated in 2019-2021} \end{array} \right.$

- $|V_{cb}|$  and  $|V_{ub}|$  are extracted from differential decay width:

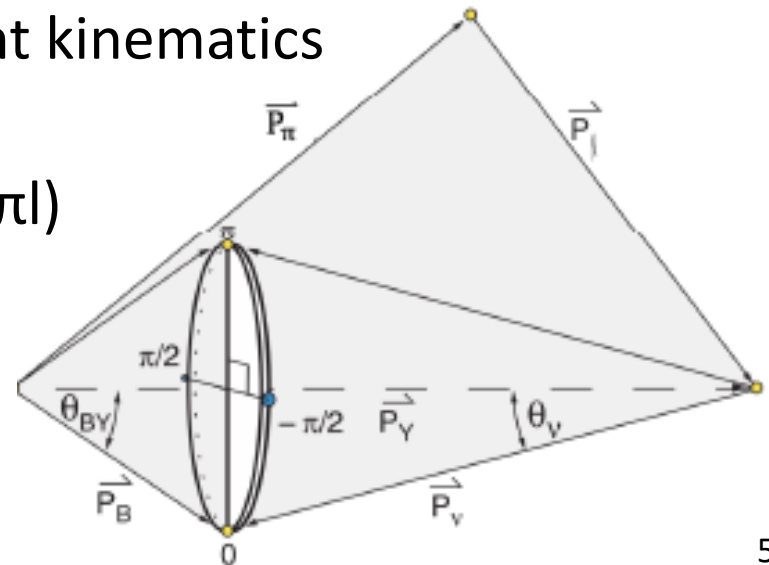
$$\frac{d\Gamma(B \rightarrow \pi l\nu)}{dq^2} \propto |V_{ub}|^2 \times |FF(q^2)|^2$$

FF: Form factor  
 $q^2$ : Momentum transfer

- $q^2$  is reconstructed by daughter and event kinematics

$$\cos \theta_{BY} = \frac{2 E_B^* E_Y^* - m_B^2 - m_Y^2}{2 |p_B^*| |p_Y^*|} \quad (Y=Dl, \pi l)$$

with known initial beam state  
 and clean environment at Belle II



# Exclusive の例

-B → D\* ℓ ν の場合の崩壊分岐比 角度ごと:

$$\frac{d^4\Gamma(B^+ \rightarrow \bar{D}^{*0}\ell^+\nu_\ell)}{dw d(\cos\theta_\ell) d(\cos\theta_V) d\chi} = \frac{6m_B m_{D^{*0}}^2}{8(4\pi)^4} \sqrt{w^2 - 1} (1 - 2wr + r^2) G_F^2 |V_{cb}|^2$$

$$\times \left\{ (1 - \cos\theta_\ell)^2 \sin^2\theta_V H_+^2(w) + (1 + \cos\theta_\ell)^2 \sin^2\theta_V H_-^2(w) \right.$$

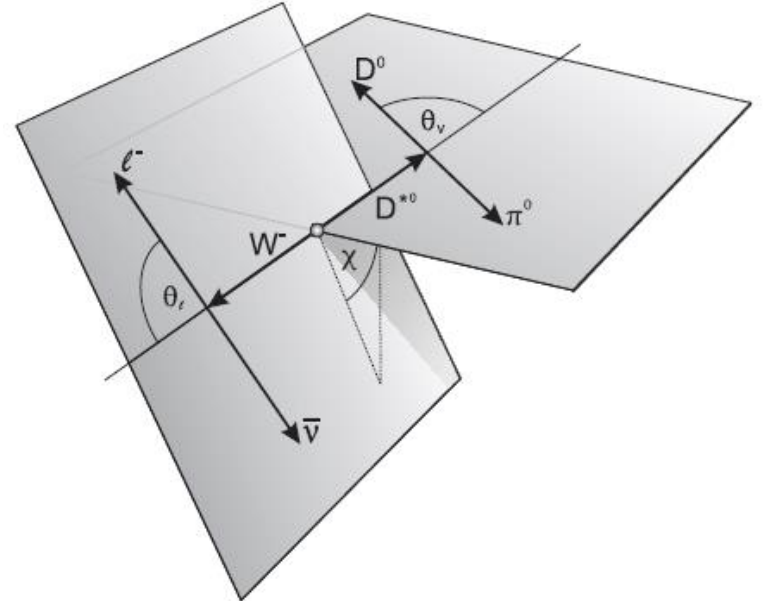
$$+ 4 \sin^2\theta_\ell \cos^2\theta_V H_0^2(w) - 2 \sin^2\theta_\ell \sin^2\theta_V \cos 2\chi H_+(w) H_-(w)$$

$$- 4 \sin\theta_\ell (1 - \cos\theta_\ell) \sin\theta_V \cos\theta_V \cos\chi H_+(w) H_0(w)$$

$$\left. + 4 \sin\theta_\ell (1 + \cos\theta_\ell) \sin\theta_V \cos\theta_V \cos\chi H_-(w) H_0(w) \right\},$$

$$w = \frac{p_B \cdot p_D}{m_B m_D} = \frac{m_B^2 + m_D^2 - q^2}{2m_B m_D}$$

H: D\* helicity amplitude



# $|V_{cb}|, |V_{ub}|$ 測定状況まとめ

- $b \rightarrow c, b \rightarrow u$  の崩壊率の比から  $|V_{cb}|/|V_{ub}|$  を測定可能  
誤差の一部が比をとることでキャンセル

$$R = \frac{\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow p\mu\nu)_{q^2 > 15 \text{ GeV}^2}}{\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+\mu\nu)_{q^2 > 7 \text{ GeV}^2}} : \frac{|V_{ub}|}{|V_{cb}|} = 0.079 \pm 0.004_{\text{exp}} \pm 0.004_{\text{FF}} \quad \text{LHCb}$$

$$\frac{B_s^0 \rightarrow K^- \mu^+ \nu_\mu}{B_s^0 \rightarrow D_s^- \mu^+ \nu_\mu} \quad \frac{|V_{ub}|}{|V_{cb}|} = 0.0607 \pm 0.0021_{\text{exp}} \pm 0.0030_{\text{FF}}, \quad q^2 < 7 \text{ GeV}^2, \quad \text{LHCb}$$

$$\frac{|V_{ub}|}{|V_{cb}|} = 0.0946 \pm 0.0041_{\text{exp}} \pm 0.0068_{\text{FF}}, \quad q^2 > 7 \text{ GeV}^2,$$

