

$b \rightarrow s\bar{\nu}\nu$ の理論

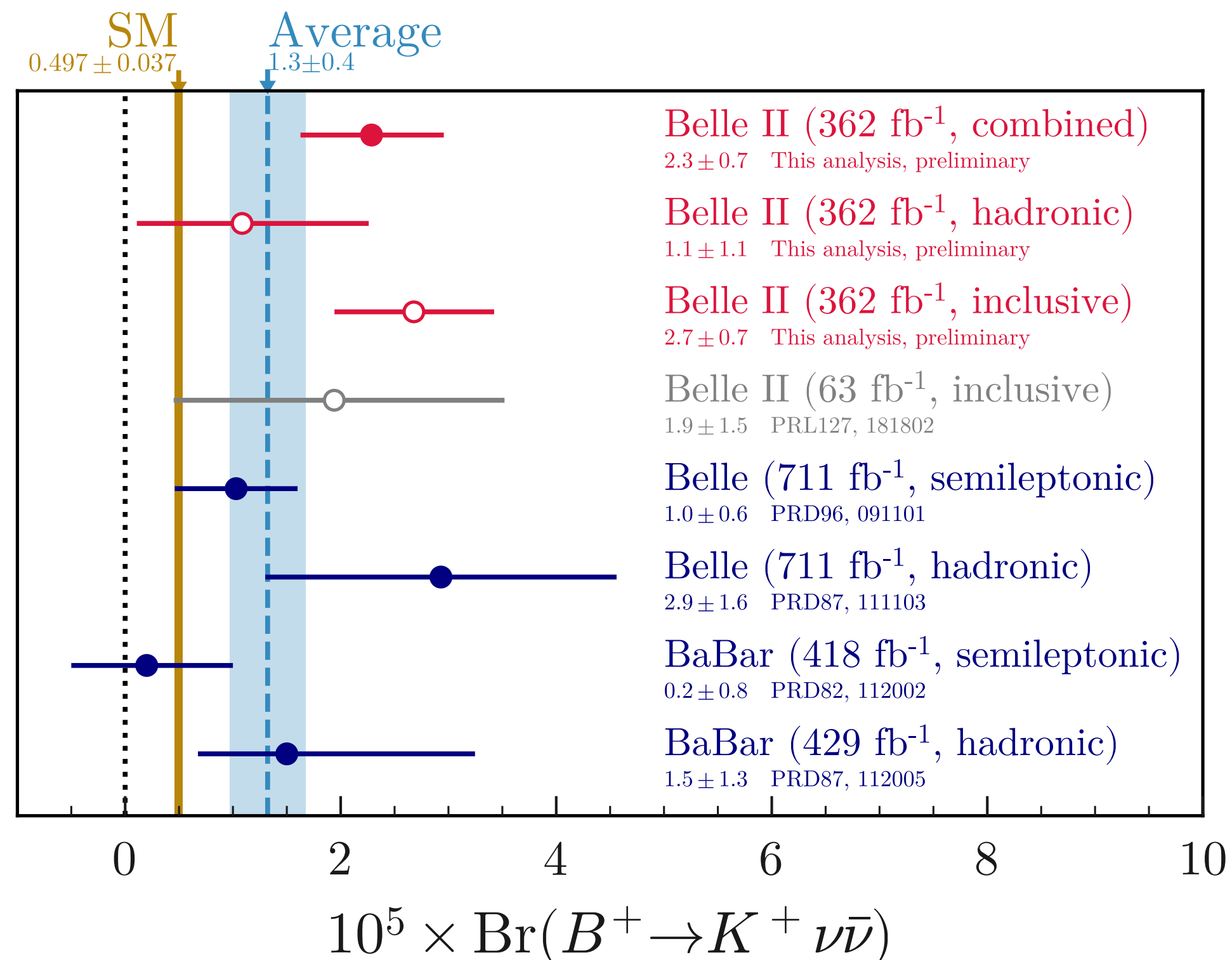
Kohsaku Tobioka [飛岡 幸作]

Florida State University フロリダ州立大学



文献 Fridell, Ghosh, Okui, KT [2312.12507]など

$B \rightarrow K \nu \nu$ 2.7σ excess



KEK postdocのKareくんが話題をFSUへ持ってきた
(2023年秋-年末)

Clean SM calculation

SM rate is suppressed

-> Invisible particles also probed

Plan

- Inclusive Tagging Analysis/Kinematicsを紐解く
- 2体崩壊の解釈、ほかの関連データ
- 3体崩壊の解釈
- $B \rightarrow K^* + \text{Inv}$ からの示唆
- 暗黒物質などのシナリオ
- まとめ展望

Inclusive Tagging Analysis

- 比較的新しい方法、従来HTA, Semileptonic
Inclusive→統計多い

- 結果、 2.7σ ほどSMより大きい

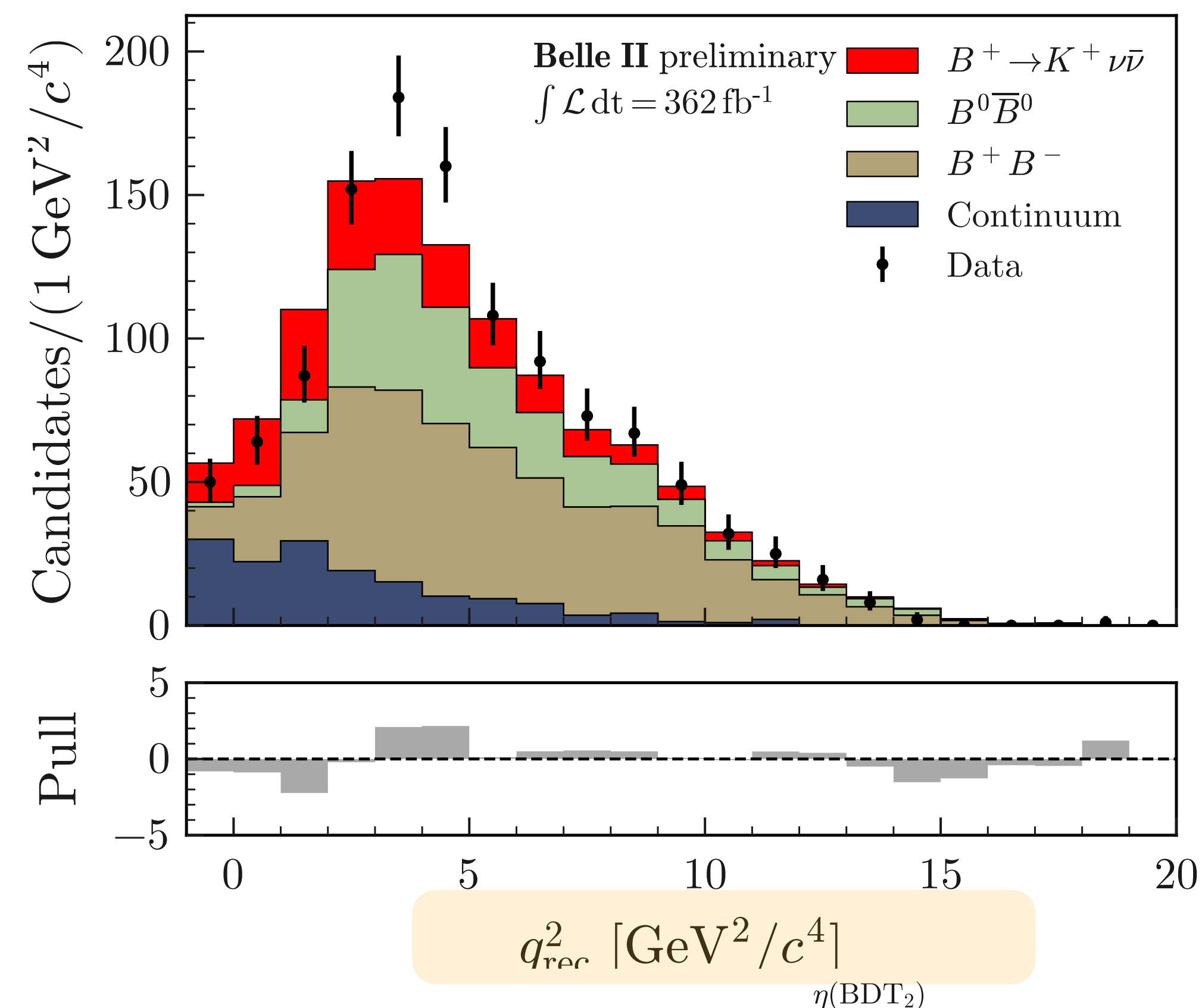
$$(2.3 \pm 0.7) \times 10^{-5} \quad B(B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu})_{\text{SM}} = (5.58 \pm 0.37) \times 10^{-6}$$

BSMとして解釈するための障壁

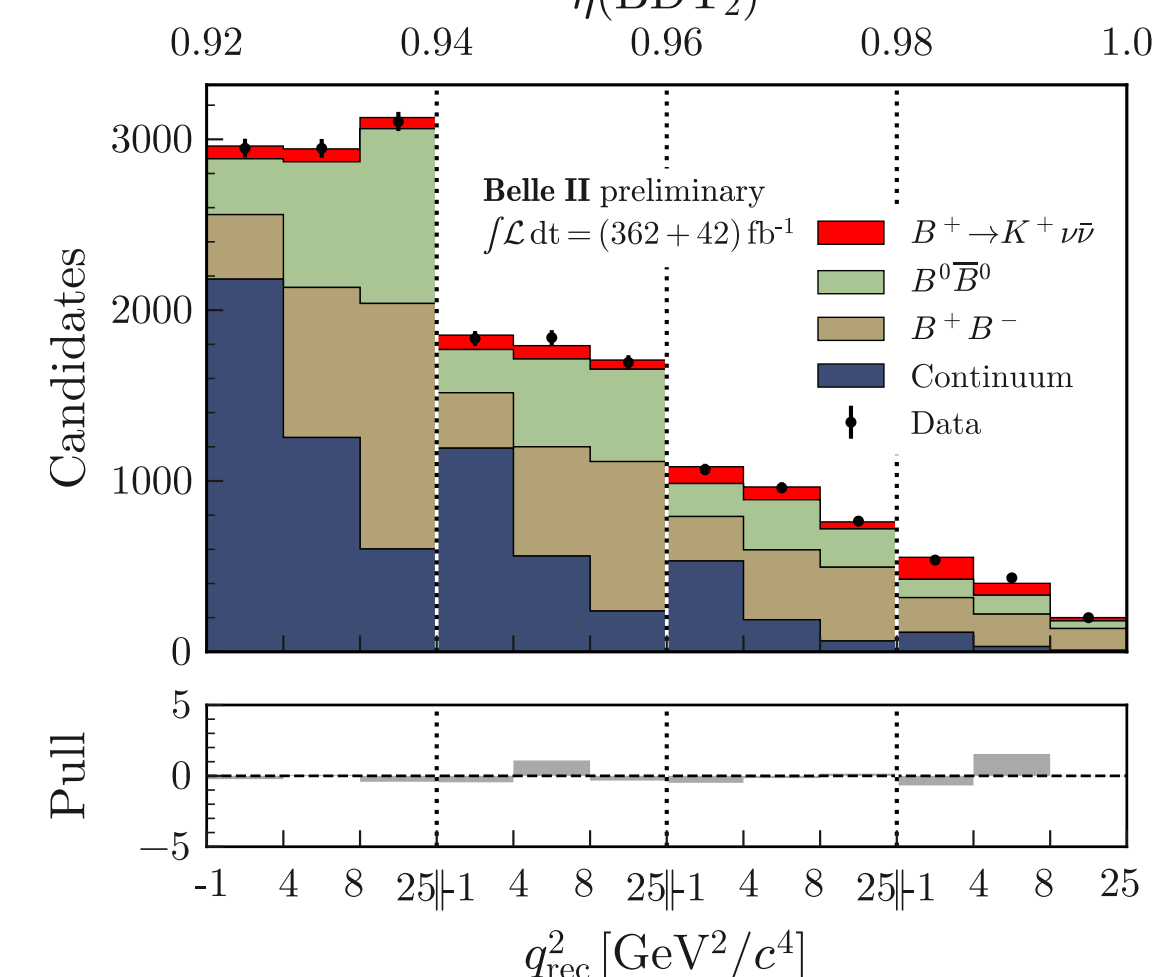
- q_{rec} とは？ (先行の理論論文では無視)

$$\begin{aligned} q_{\text{rec}}^2 &\equiv E_B^2 + m_K^2 - 2E_B E_K \\ &= q^2 + (E_B^2 - m_B^2) - 2\vec{p}_K(q^2) \cdot \vec{p}_B, \end{aligned}$$

- Signal efficiencyがわからない (同上)



ずれが顕著なBin
 $\eta(\text{BDT}_2) > 0.98$



Kinematics を紐解いていく①

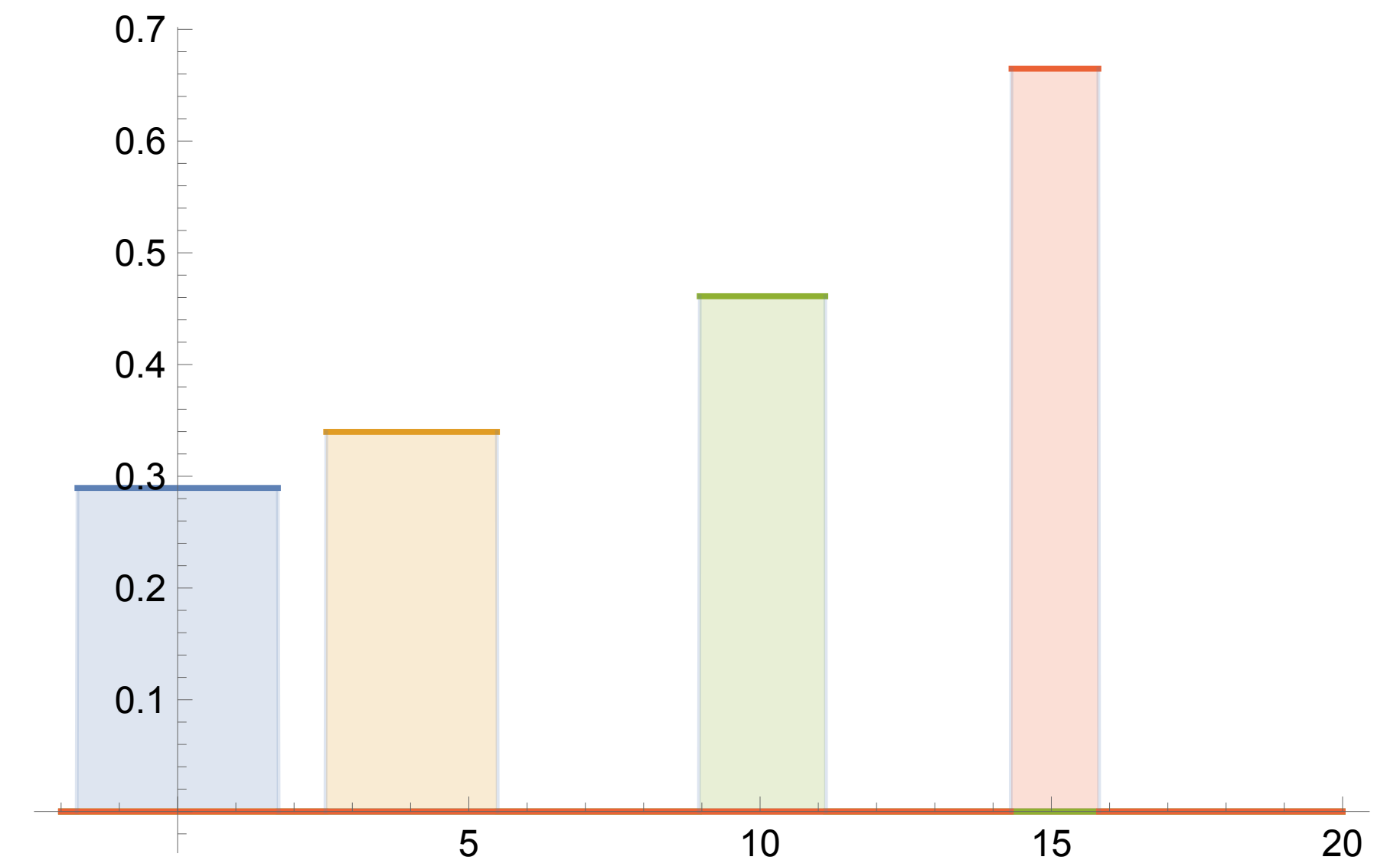
- q_{rec}^2 は,欲しい $q^2=(p_B-p_K)^2$ から少しズレる

$$\begin{aligned} q_{\text{rec}}^2 &\equiv E_B^2 + m_K^2 - 2E_B E_K \\ &= q^2 + (E_B^2 - m_B^2) - 2\vec{p}_K(q^2) \cdot \vec{p}_B, \end{aligned}$$

- ほぼフラットに広がるので、以下の近似が可能

$$f_{q^2}^{\text{rec}}(q_{\text{rec}}^2) = \begin{cases} (\Delta_+ - \Delta_-)^{-1} & \text{if } \Delta_- < q_{\text{rec}}^2 - q^2 < \Delta_+ \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (4)$$

$$\Delta_{\pm} = (E_B^2 - m_B^2) \pm 2 \left(1 \pm \frac{|\vec{p}_B|}{E_B} \right) |\vec{p}_K^*(q^2)| |\vec{p}_B| \quad (5)$$



q_{rec}^2 の広がり方

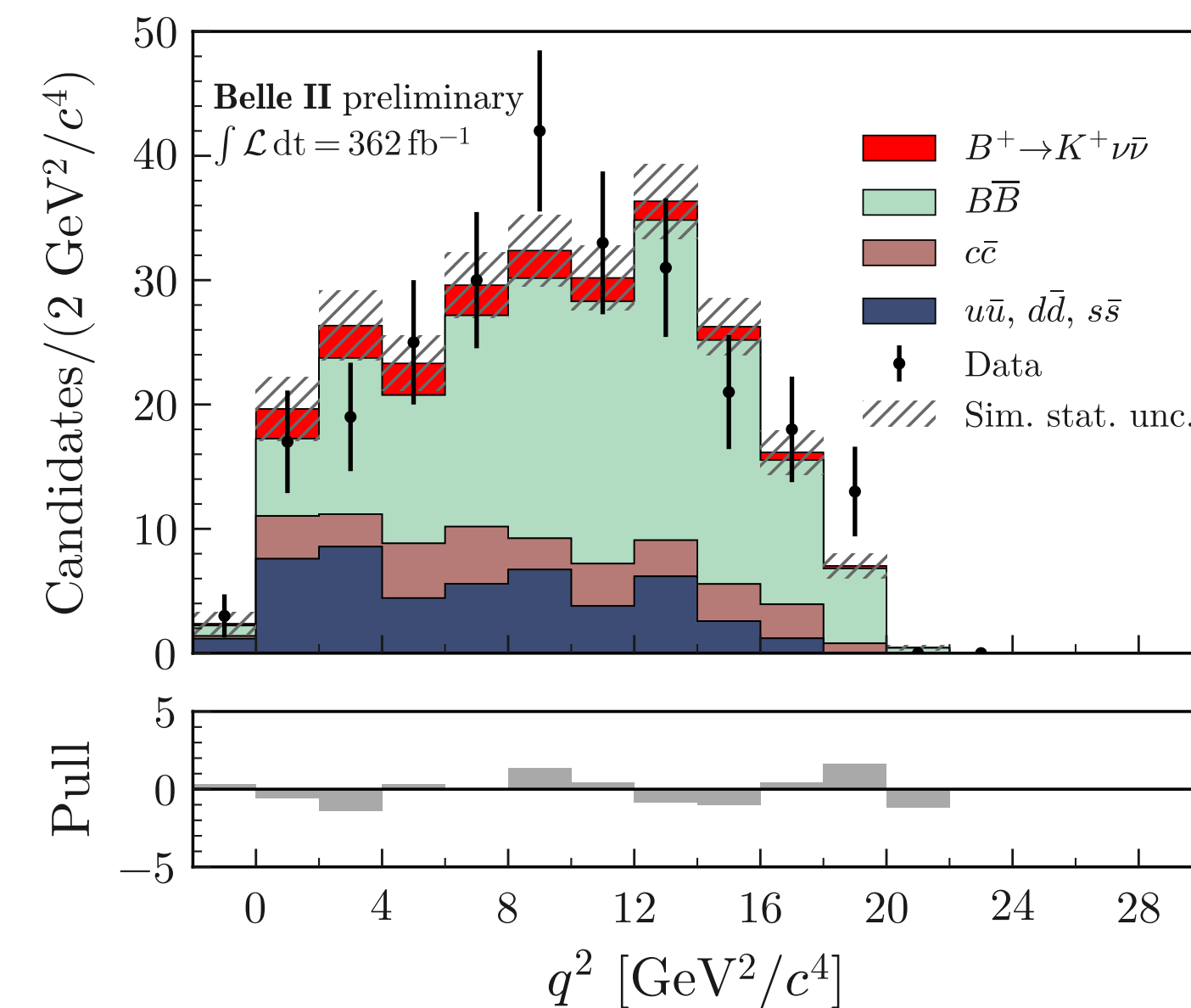
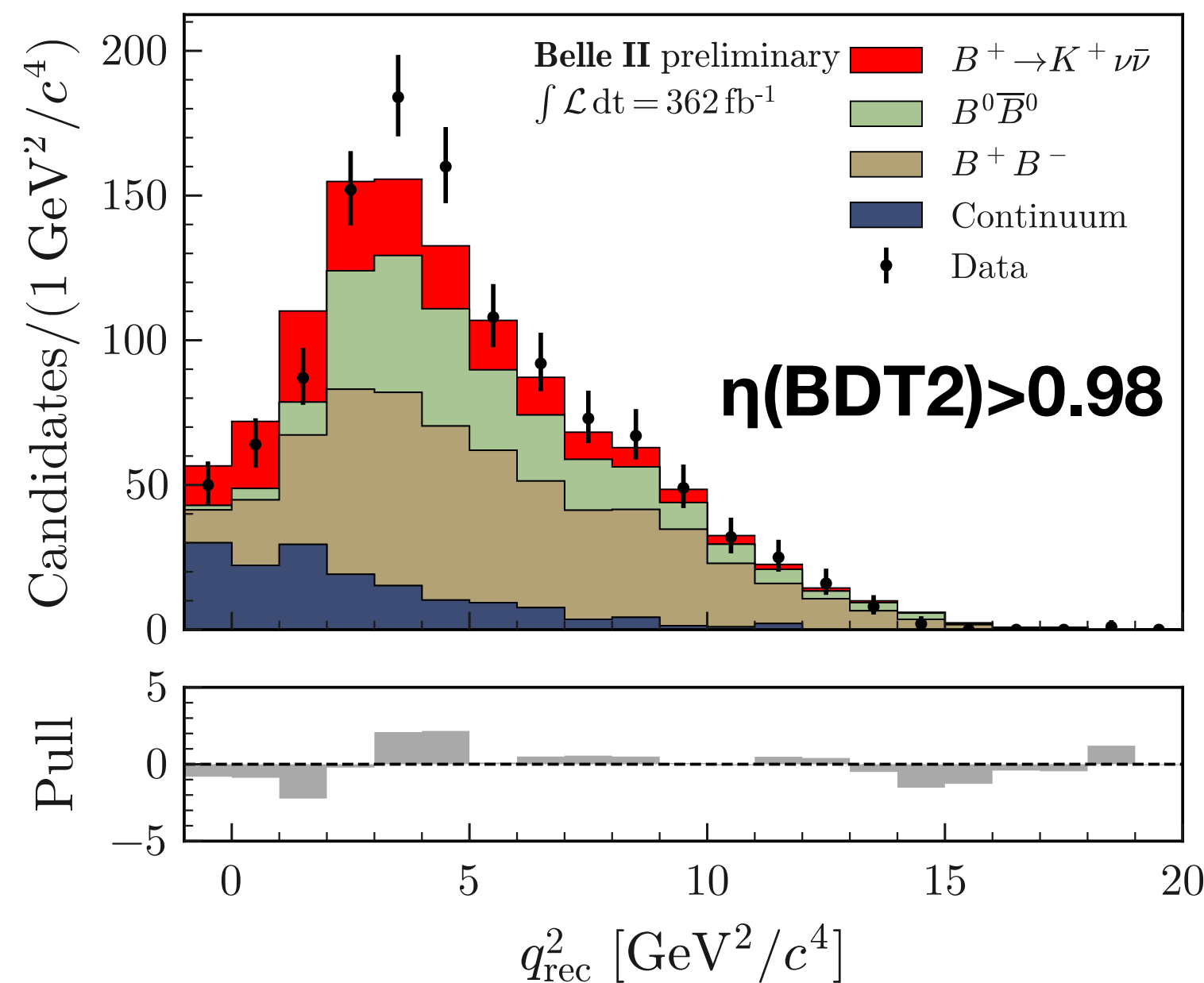
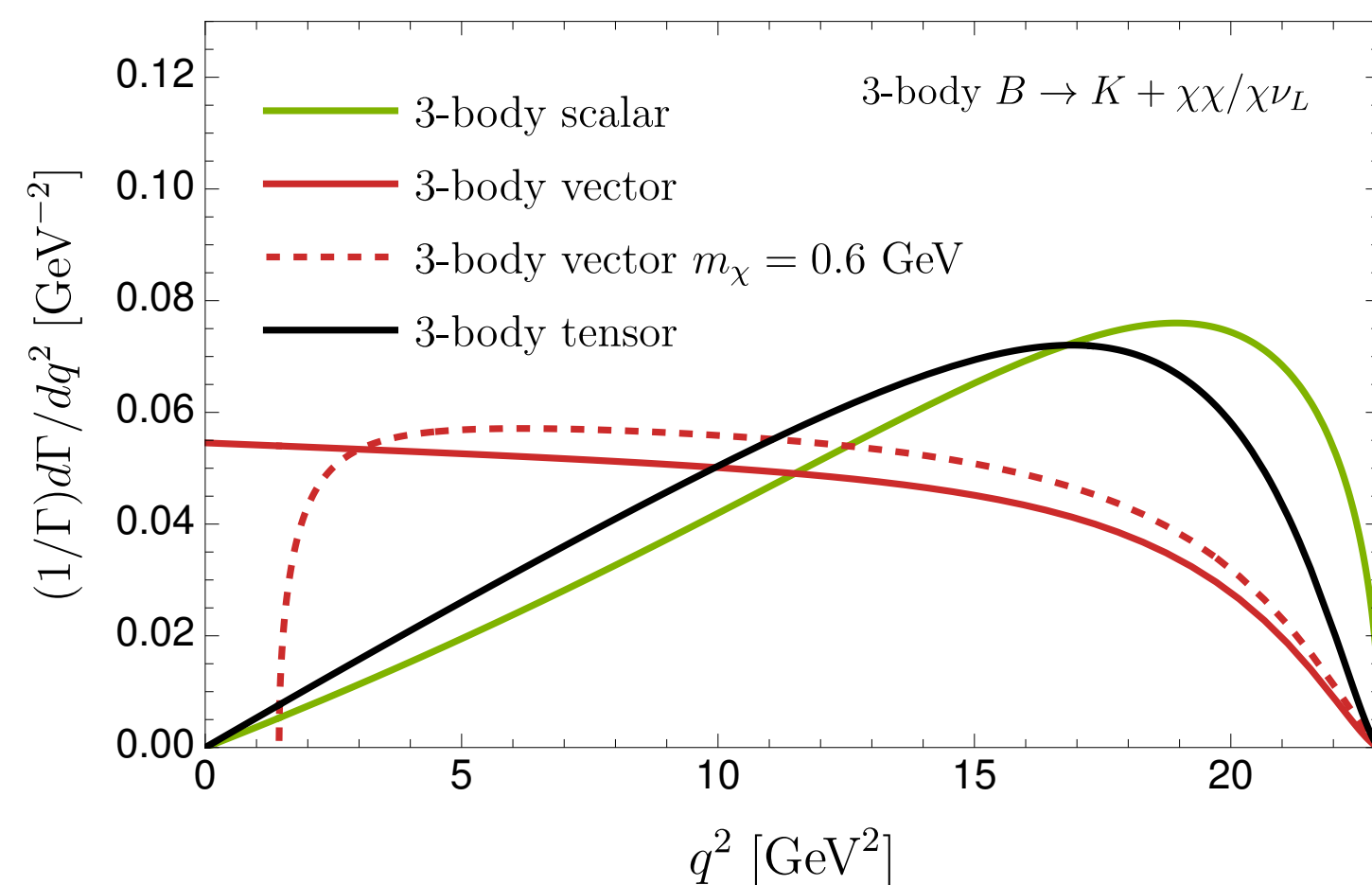
$q_{\text{r}}^2=0,4,19,15$

Kinematics を紐解いていく②

- q_{rec}^2 - q^2 対応関係が得られたので、次はEfficiency

- HTAとITAで依存性が違う？

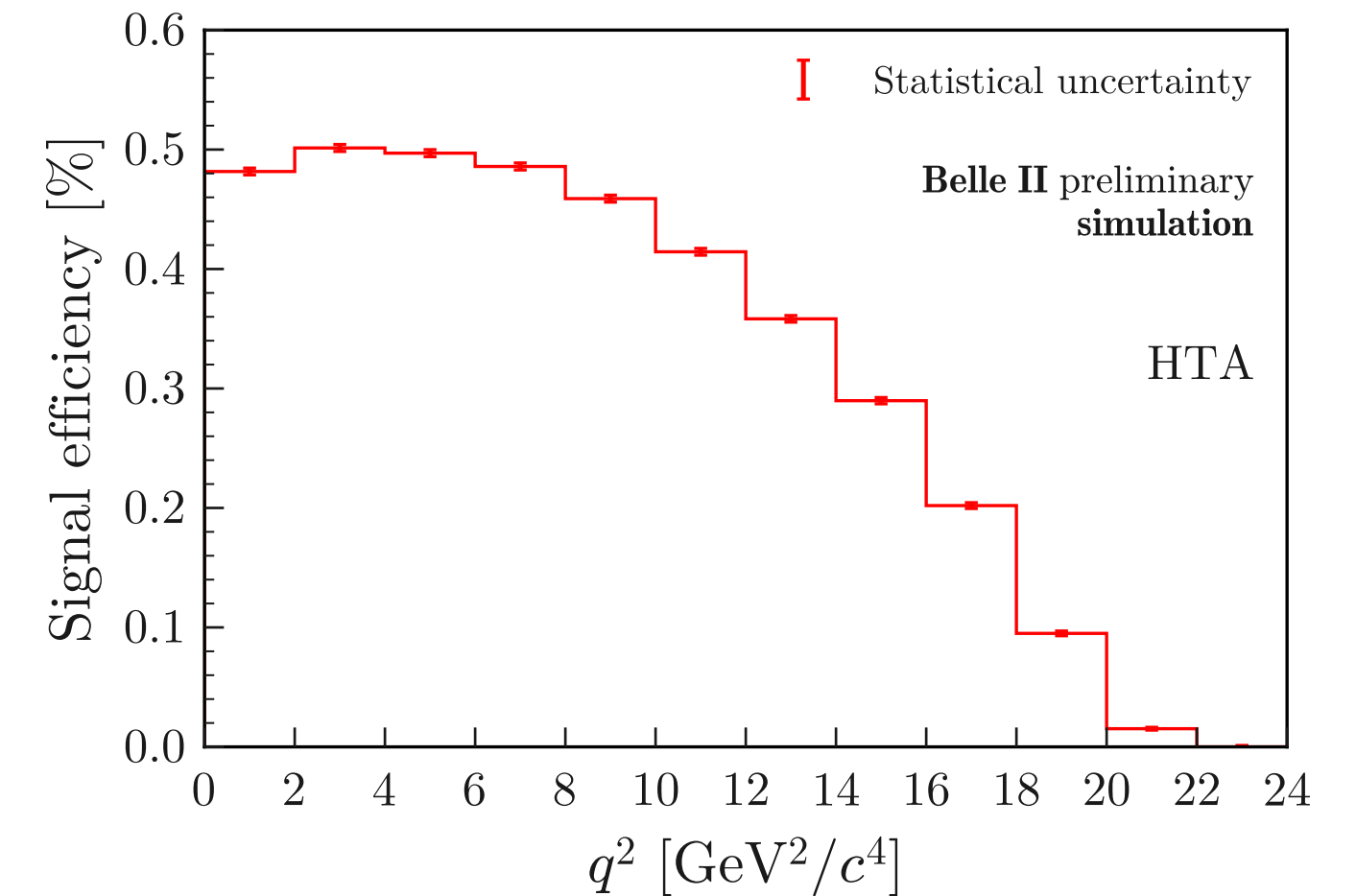
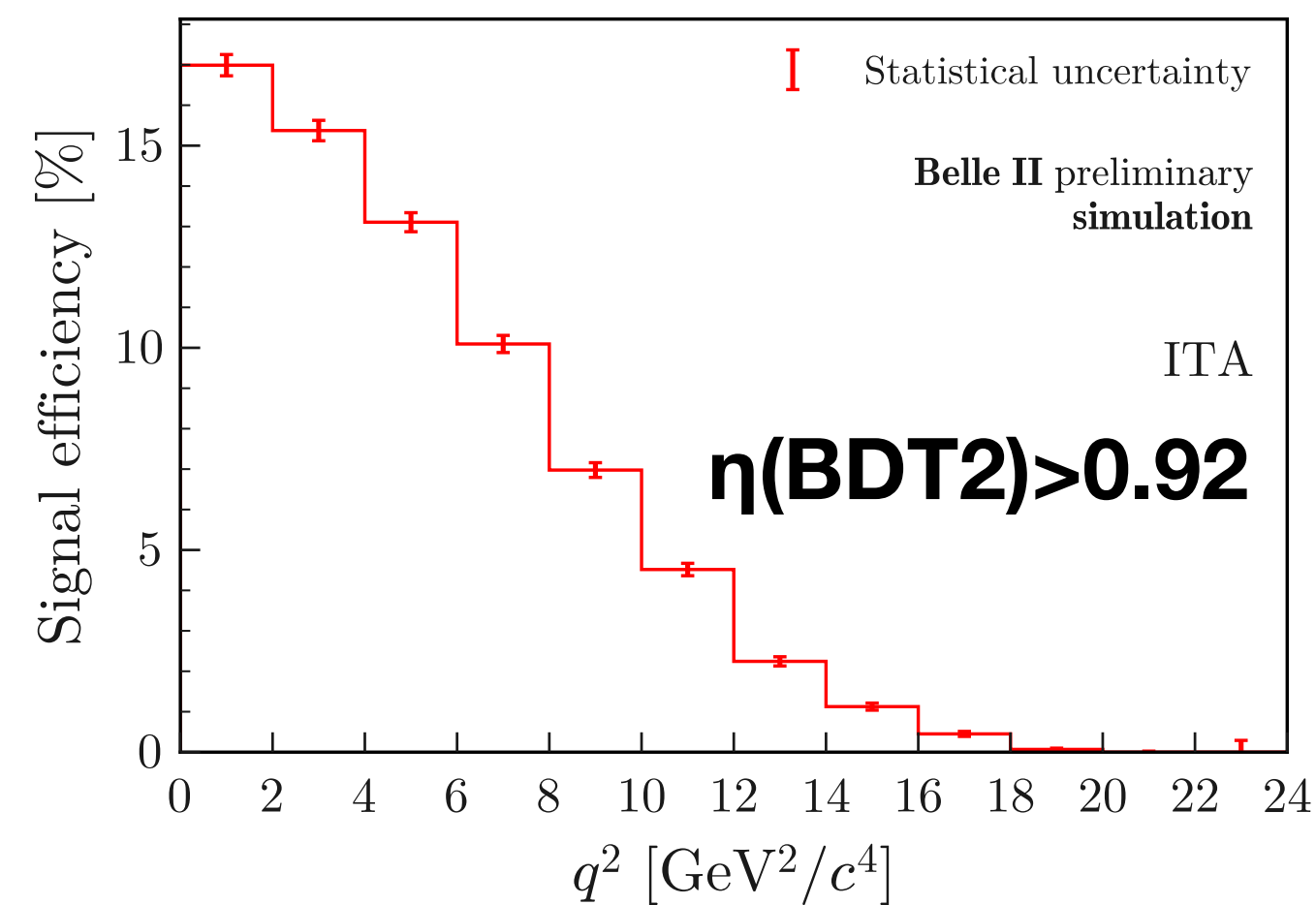
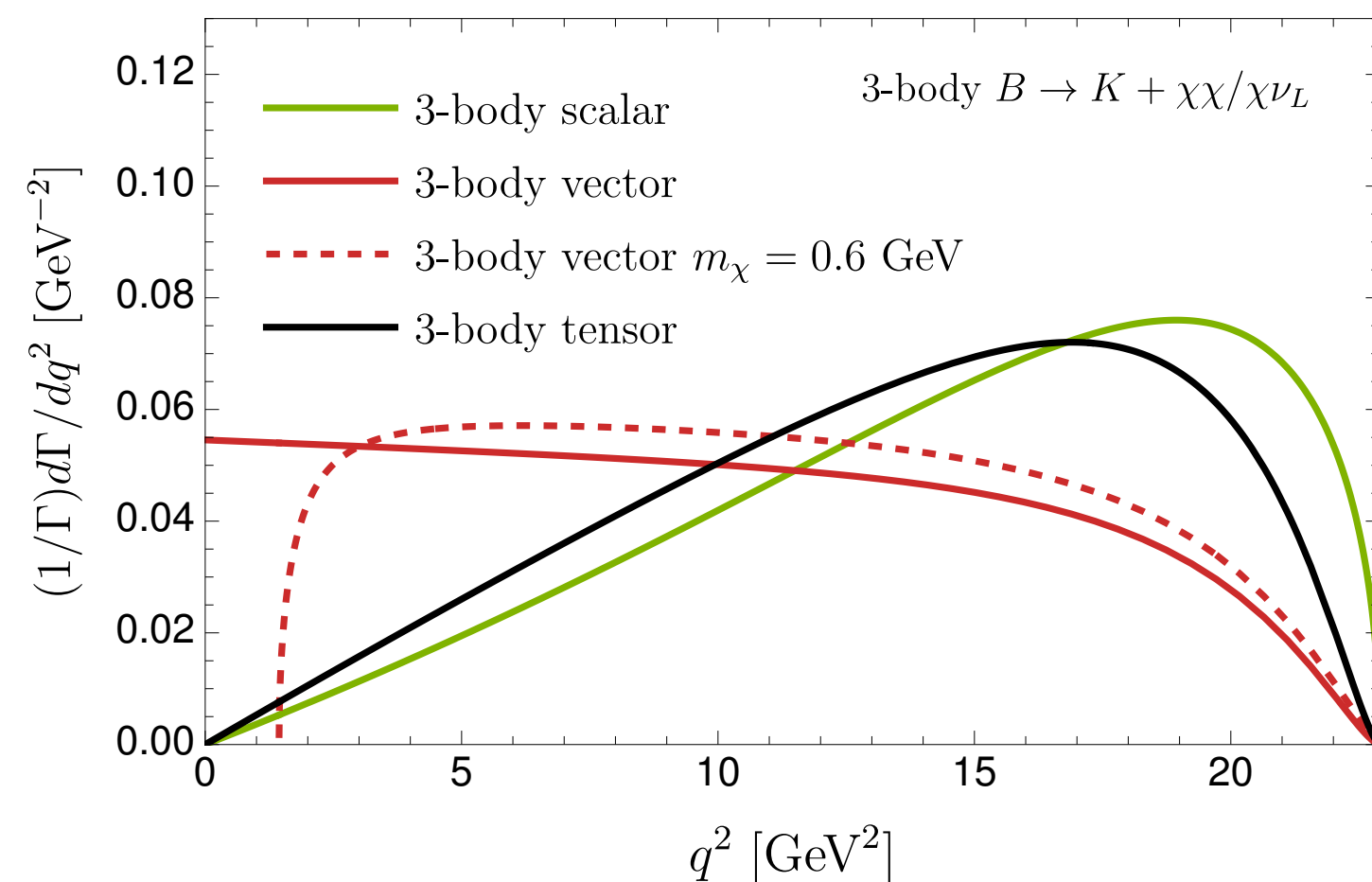
SM(赤)はカット前の分布は $q^2 < 15 \text{ GeV}^2$ までフラット



ITAの方が q^2 の大きい方のシグナルが削れている

Kinematics を紐解いていく②

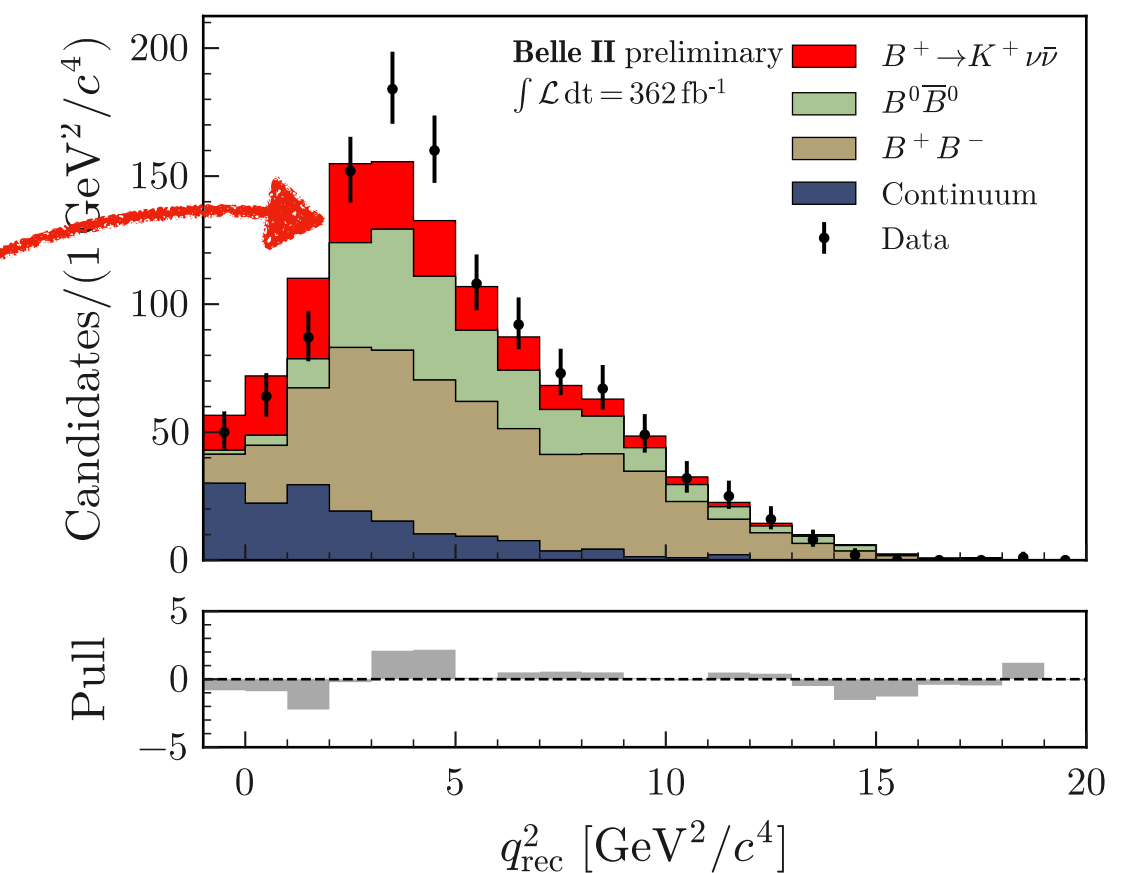
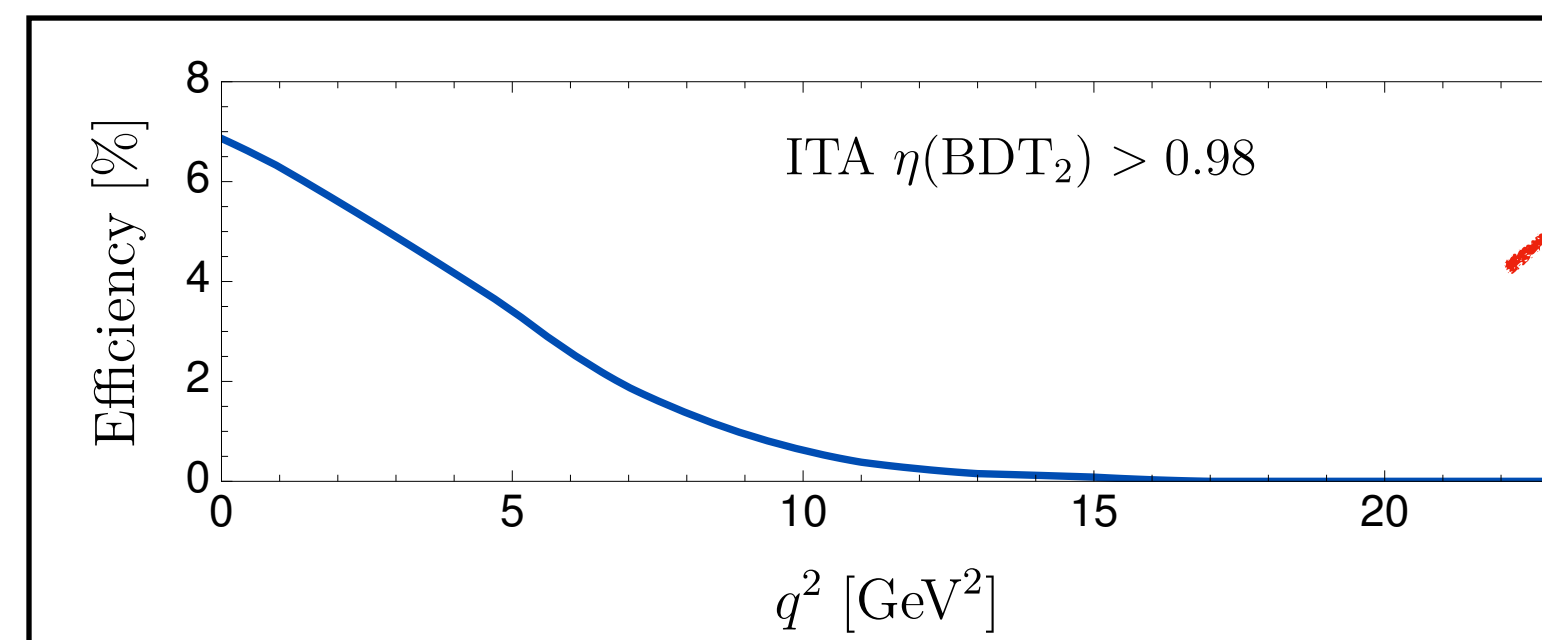
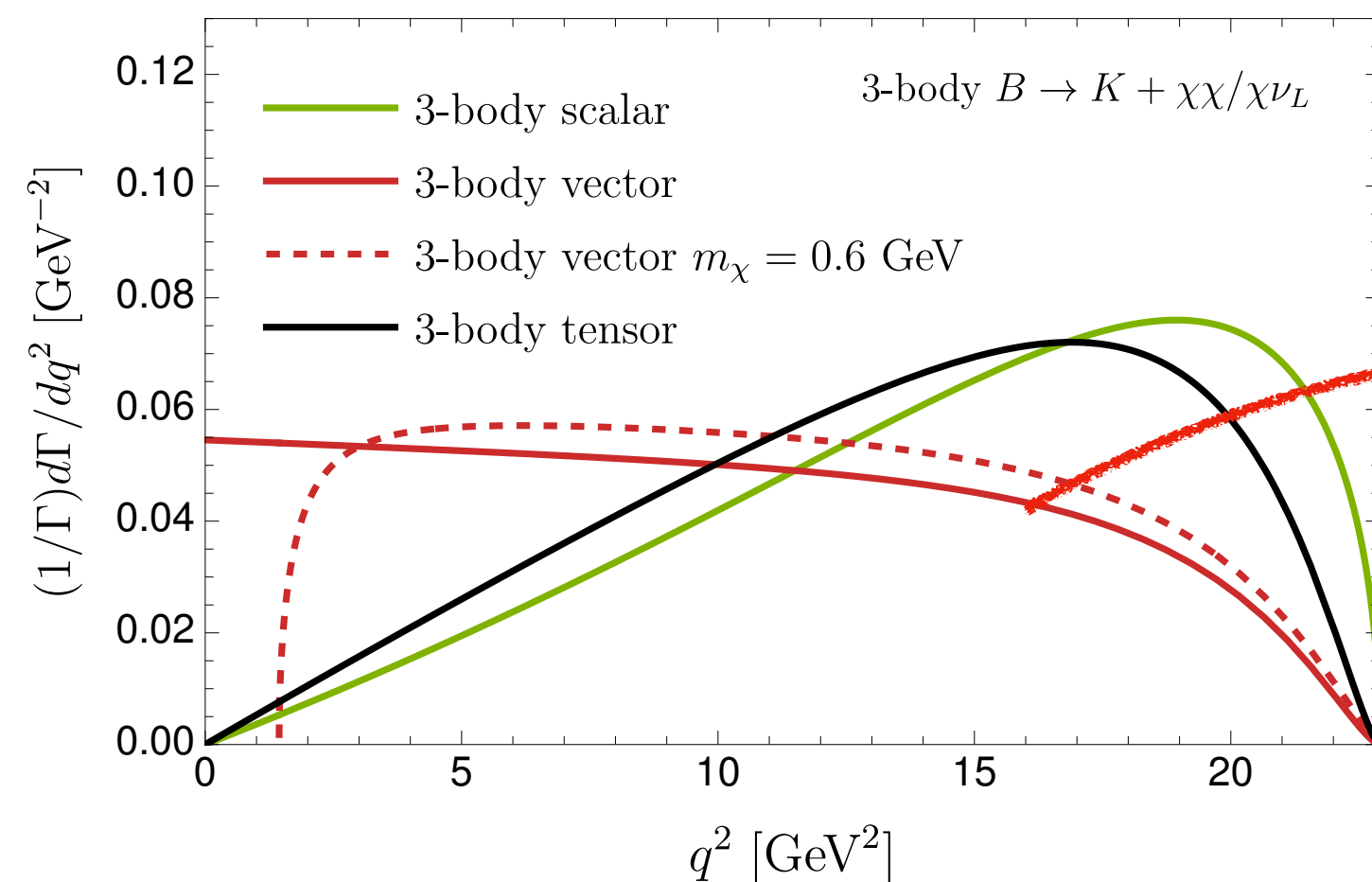
- q_{rec}^2 - q^2 の対応関係が得られたので、次はEfficiency
- HTAとITAで依存性が違う？ SM(赤)はカット前の分布は $q^2 < 15 \text{ GeV}^2$ までフラット
- ITAのほうは、欲しいBDTカットと若干違う



ITAの方が q^2 の大きい方のシグナルが削れている

Kinematics を紐解いていく②

- q_{rec}^2 - q^2 の対応関係が得られたので、次はEfficiency
- HTAとITAで依存性が違う？ SM(赤)はカット前の分布は $q^2 < 15 \text{ GeV}^2$ までフラット
- ITAのほうは、欲しいBDTカットと若干違う



- 自前でEfficiencyを推定 (SMの分布を再現するように) → 信号分類に重要

好まれる理論、そうでない理論

- Efficiencyと q_{rec}^2 - q^2 の対応関係から実験データに理論をのせる

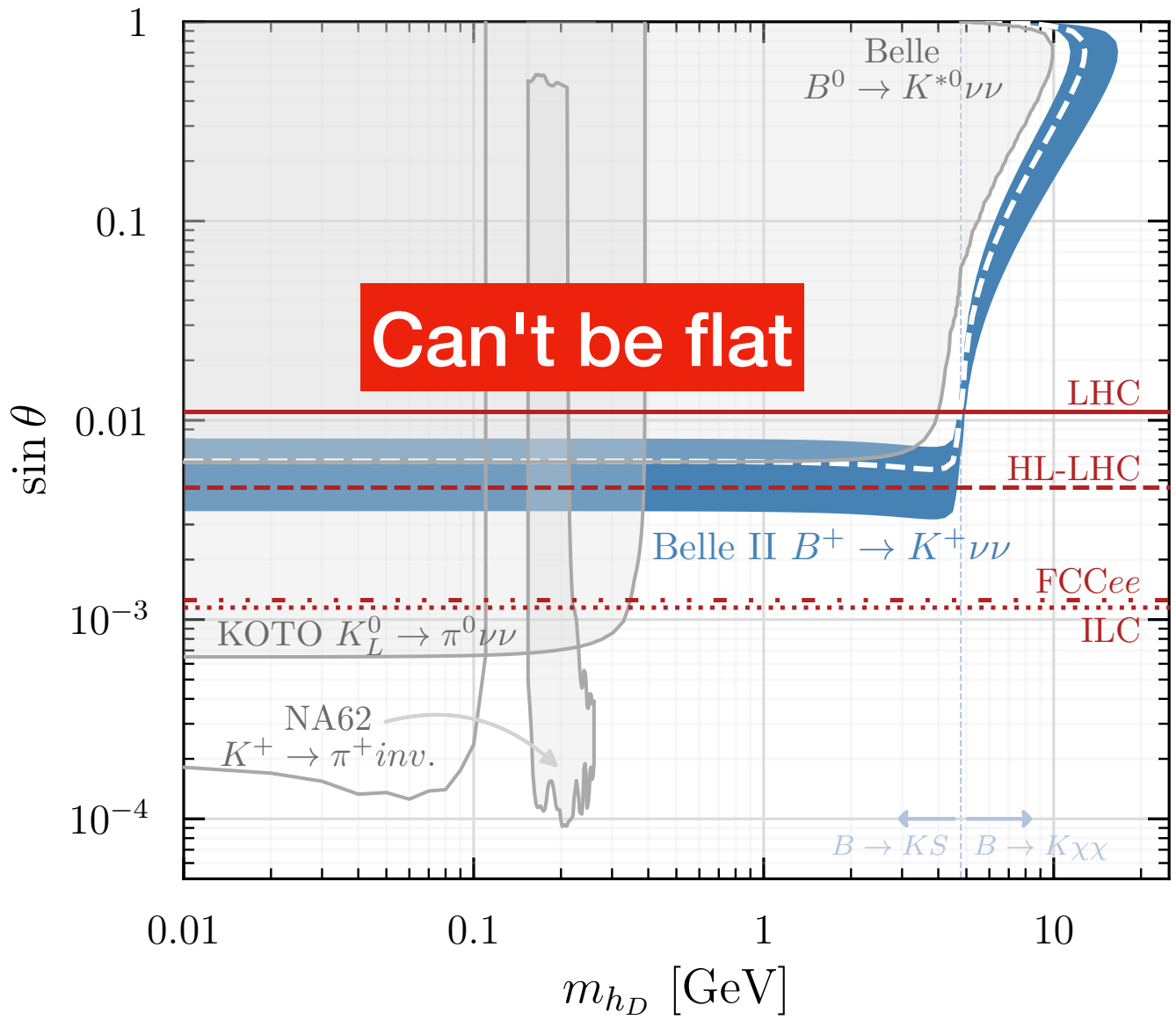
この時点で多くの先行研究が的外れであることがわかった

- SMと観測のBRの差、この数字1つだけ合わせにしている

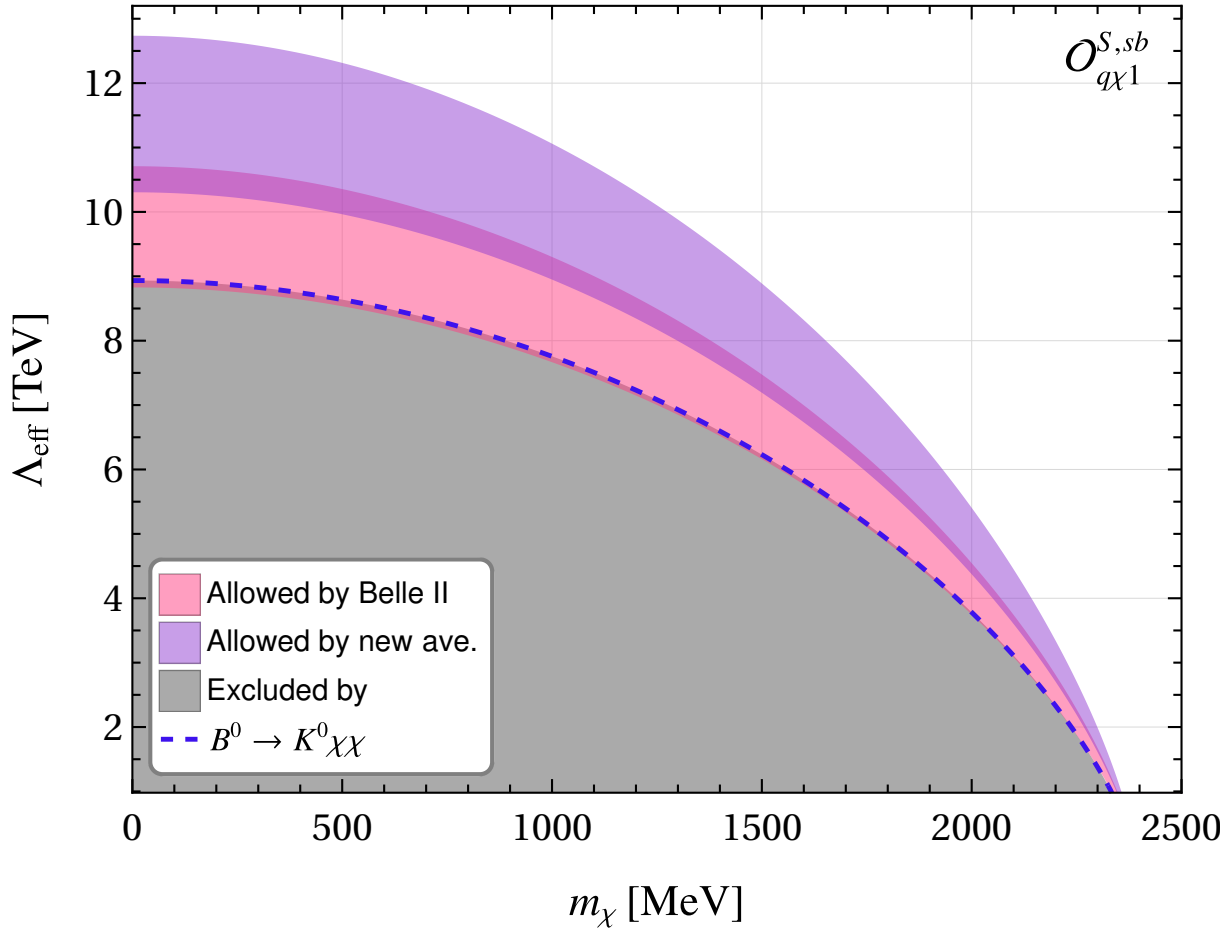
$$\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ + invisible)_{\text{NP}} \equiv \mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu})_{\text{exp}} - \mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu})_{\text{SM}} = (1.9 \pm 0.7) \times 10^{-5}$$

例：b->s X_{inv} の二体崩壊でX質量依存性を無視

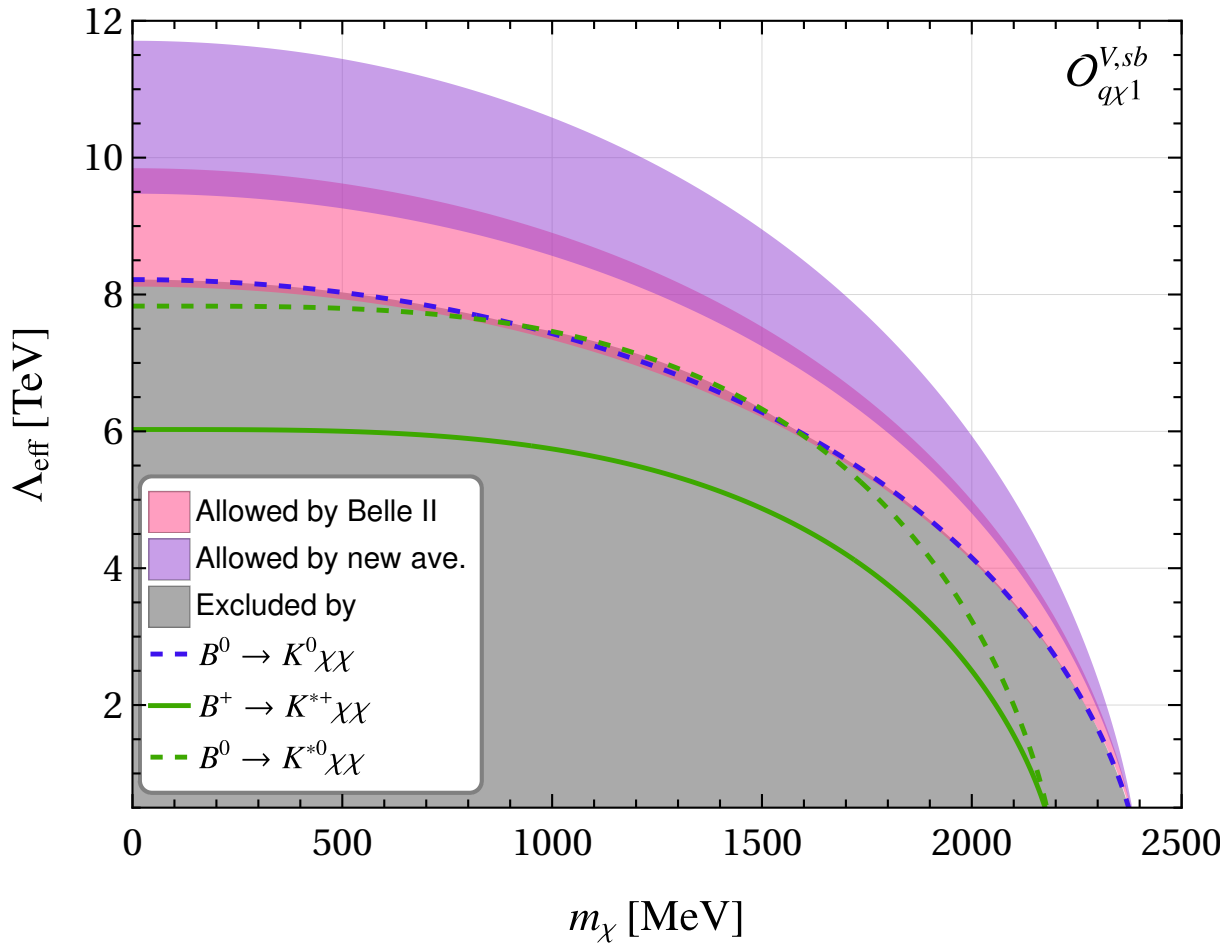
例：b->s XX の3体崩壊でX質量依存性とbs側のオペレータの q^2 分布も無視



Higgs Portal Scalar [2312.00982]



Actually disfavored



2309.12741

Plan

- Inclusive Tagging Analysis/Kinematicsを紐解く
- 2体崩壊の解釈、ほかの関連データ
- 3体崩壊の解釈
- $B \rightarrow K^* + \text{Inv}$ からの示唆
- 暗黒物質などのシナリオ
- まとめ展望

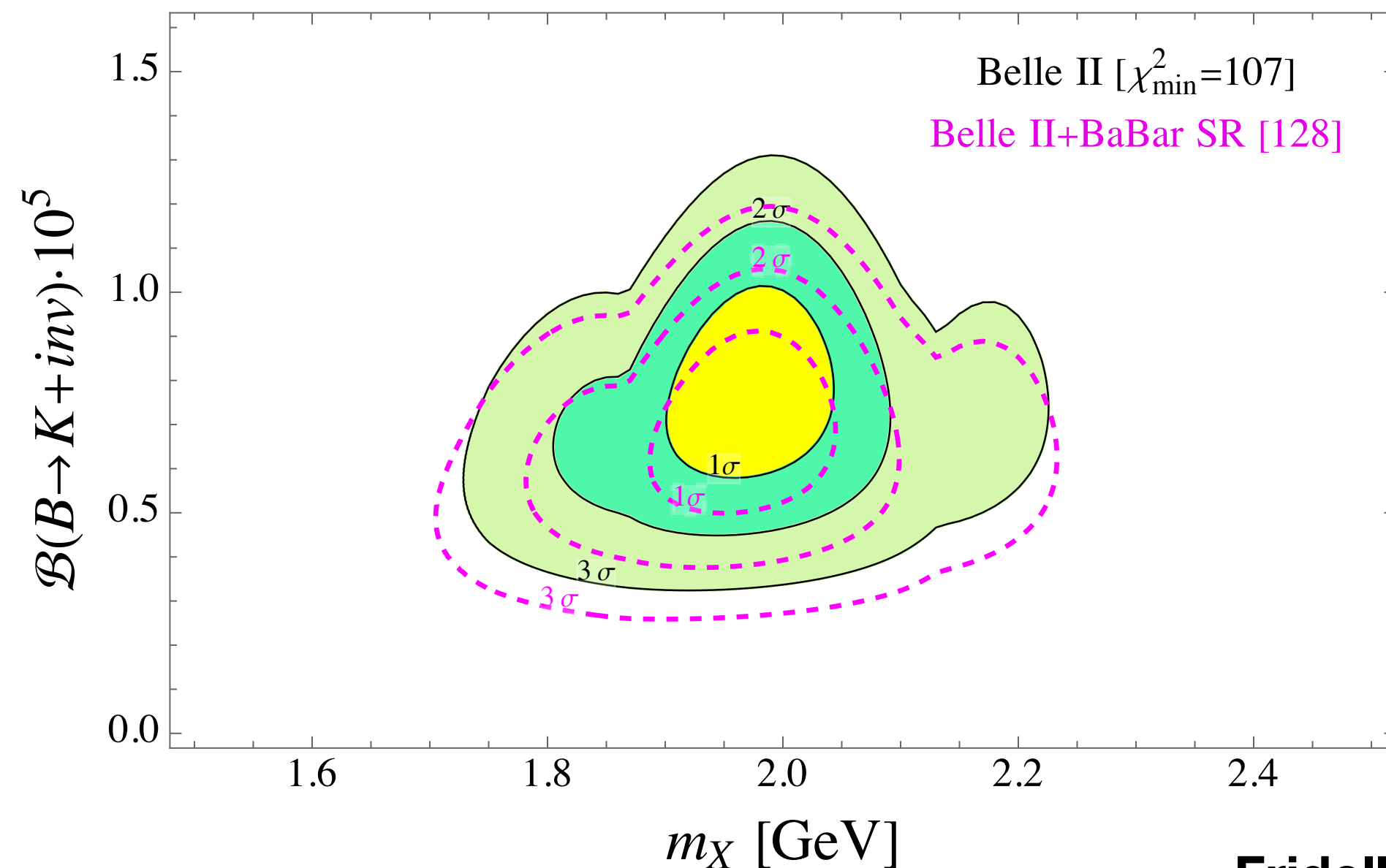
Binned likelihood analysis

$$N_i^{\text{NP}} = N_{B^\pm} \int_{q_i^2}^{q_{i+1}^2} dx \int dq^2 f_{q^2}^{\text{rec}}(x) \epsilon(q^2) \frac{d\mathcal{B}_{\text{NP}}}{dq^2}$$

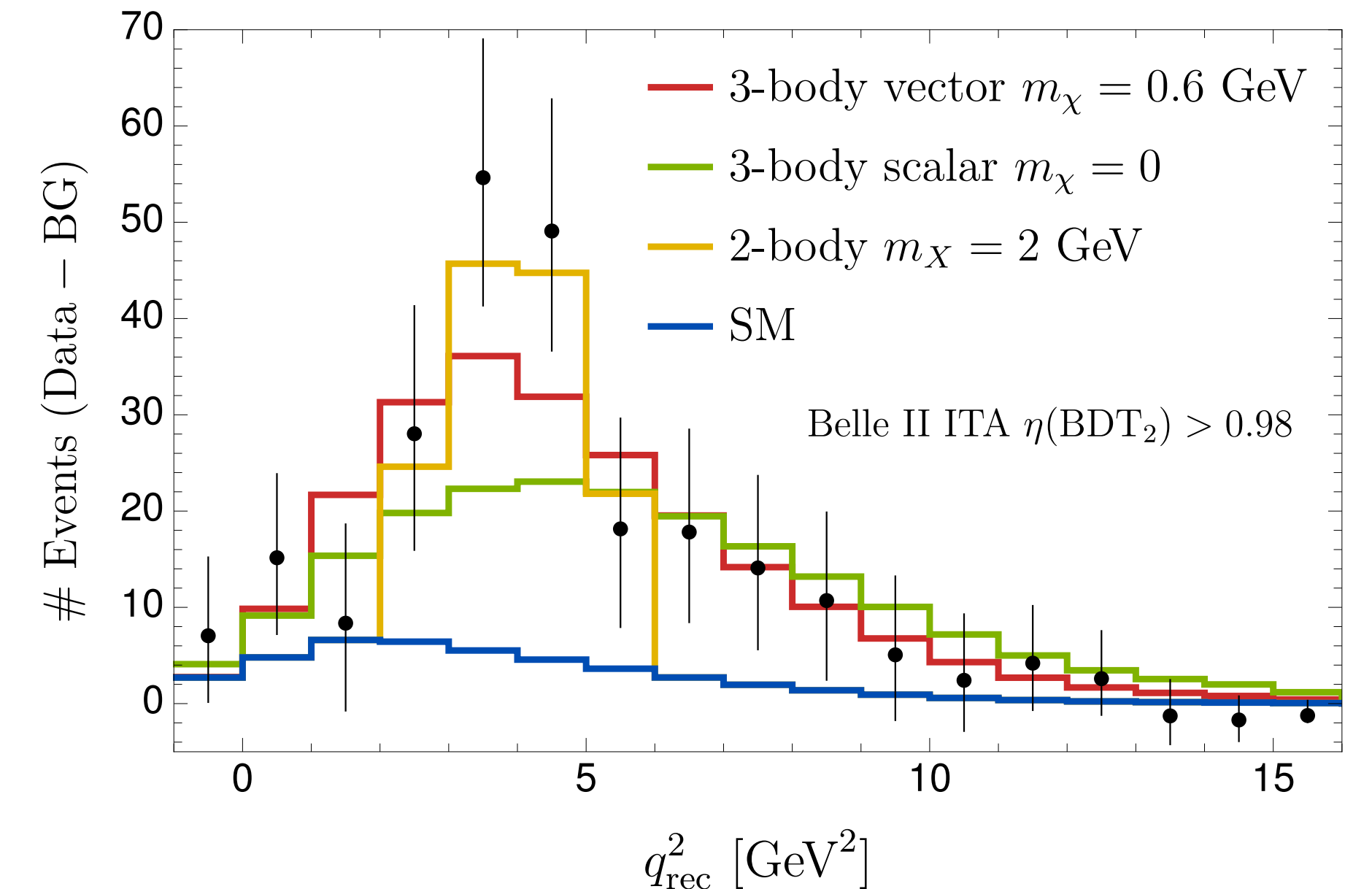
q_{rec}^2 のbinごとにLikelihood、統計エラーのみ。

● 2体崩壊($B \rightarrow K\chi$)の場合を解析

$B \rightarrow K\chi$



Fridell, Ghosh, Okui, KT [2312.12507]



● データを良くフィット

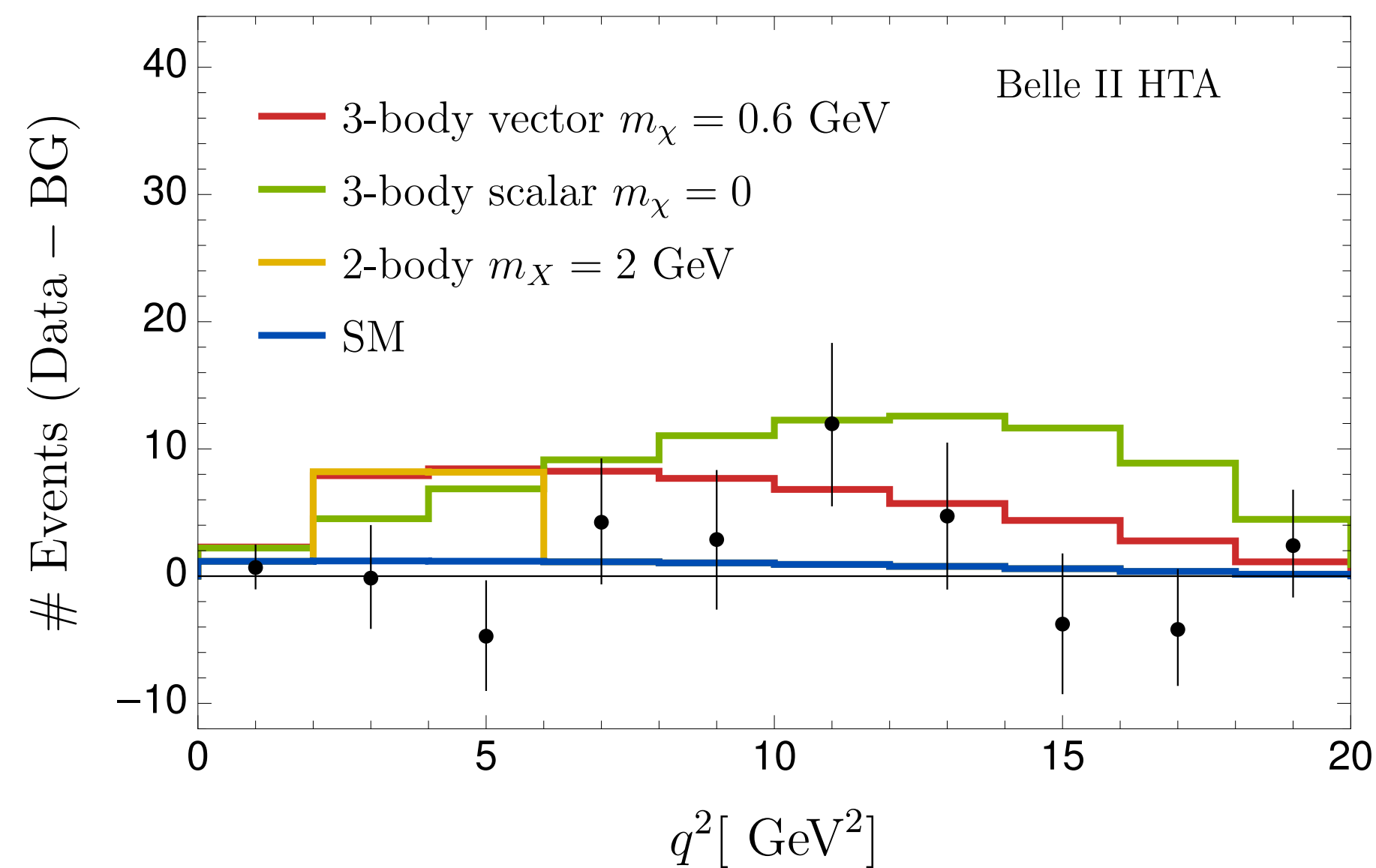
● Best fit

$m \sim 2 \text{ GeV}$

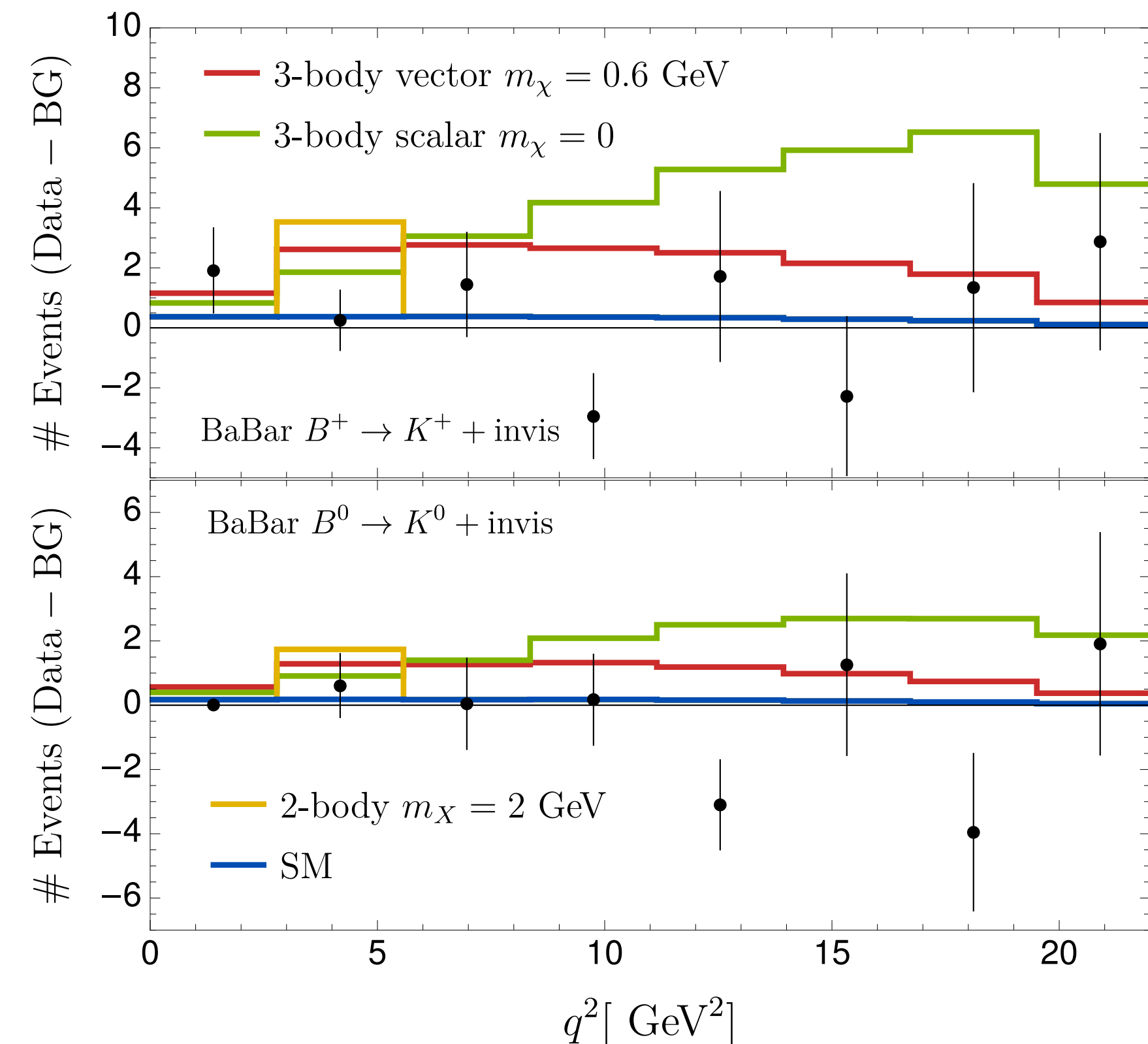
$$\mathcal{B} = (0.79_{-0.13}^{+0.16}(\text{stat})) \times 10^{-5}$$

他のB実験のデータ

- Belle IIのHTA(左)はデータオーバーラップがあり断念
- BelleのSemileptonic/hadronic-tag(1702.03224)、軸が違い断念(E_{ECL})
- **Babar**(semileptonic, 1009.1529)は軸が違うが対応可能、Combine。



- 2体崩壊($m \sim 2$ GeV[黄色])は悪くない



3体崩壊の場合

- オペレータ3種類 (B->Kvvに関連するもの)
- Low q2を切るfermionの質量も考慮

- Vector(SM like)

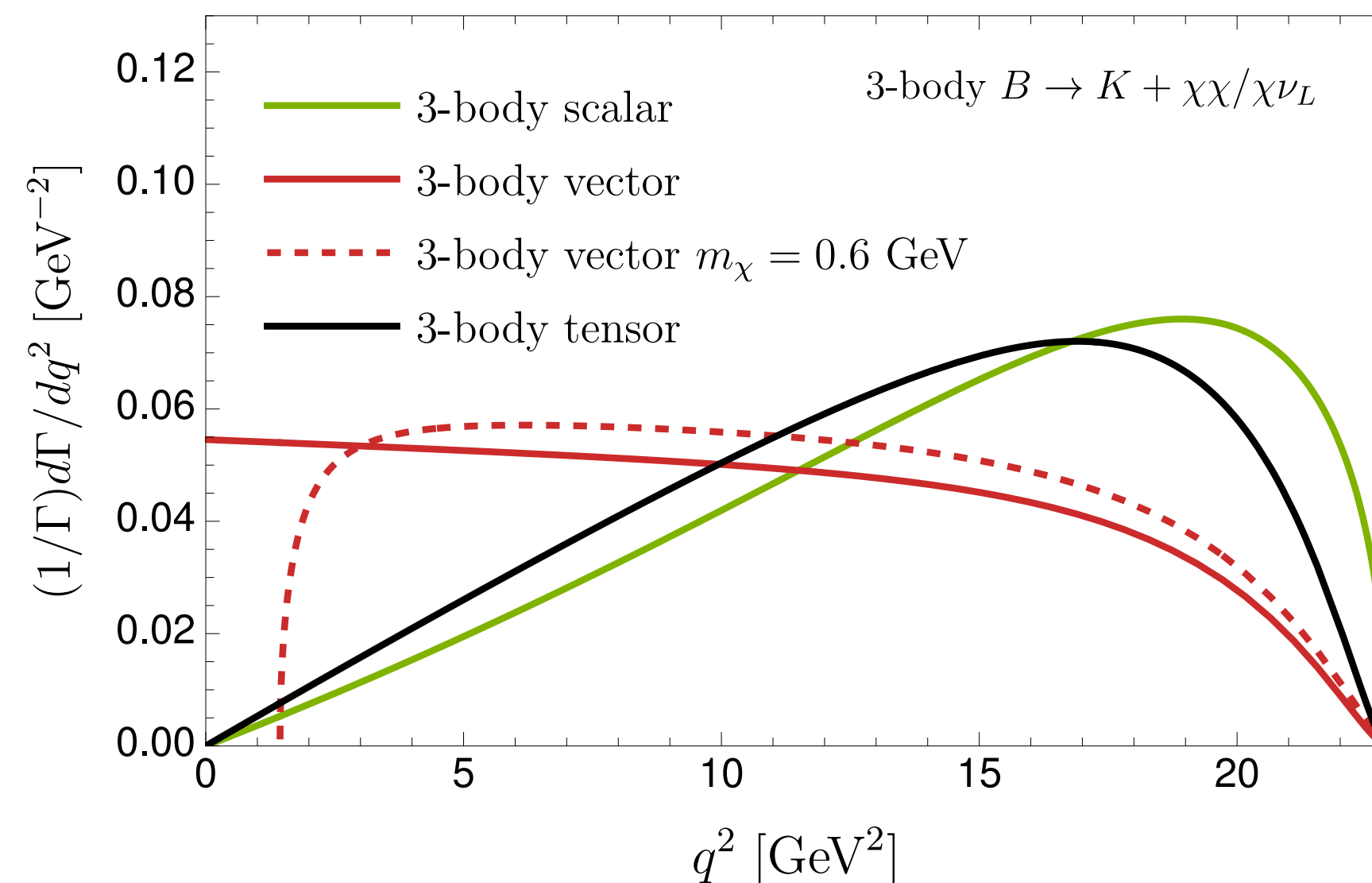
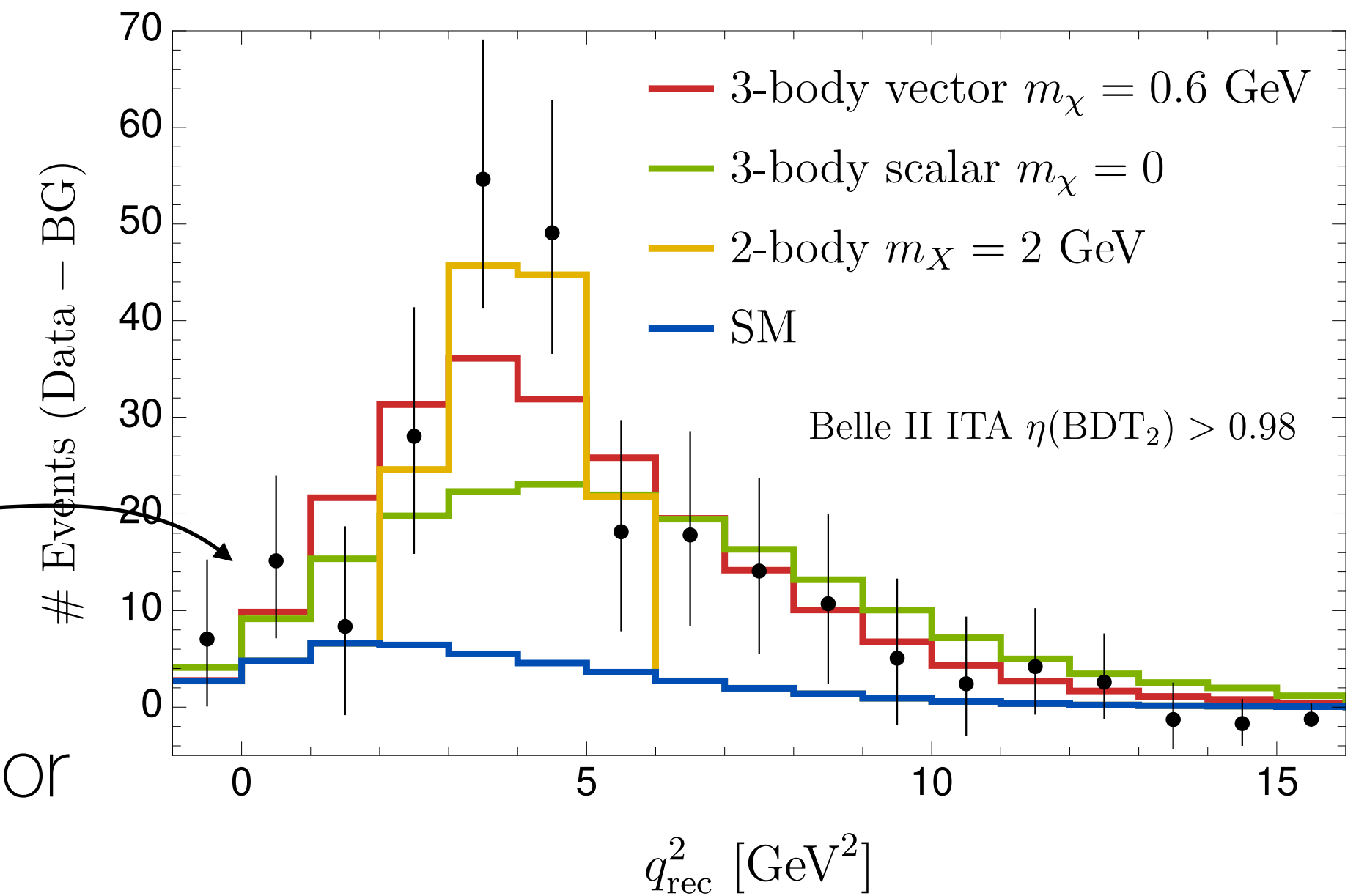
$$\mathcal{L} \supset \frac{1}{\Lambda_V^2} (\bar{b} \gamma^\mu s) (\bar{\chi}_1 \gamma_\mu \chi_2)$$

- Scalar

$$\frac{1}{\Lambda_S^2} (\bar{b} s) (\bar{\chi}_1 \chi_2)$$

- Tensor

$$\frac{1}{\Lambda_T^2} (\bar{b} \sigma^{\mu\nu} s) (\bar{\chi}_1 \sigma_{\mu\nu} \chi_2)$$

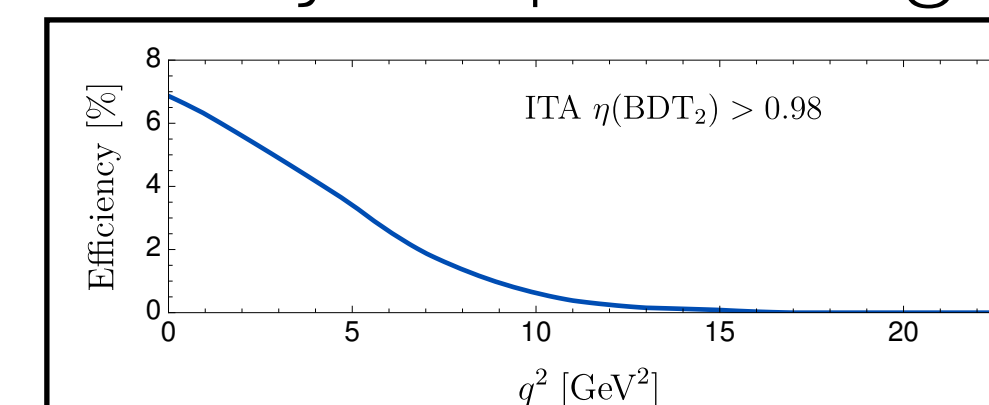


- **Scalar dist.~Tensor dist.**

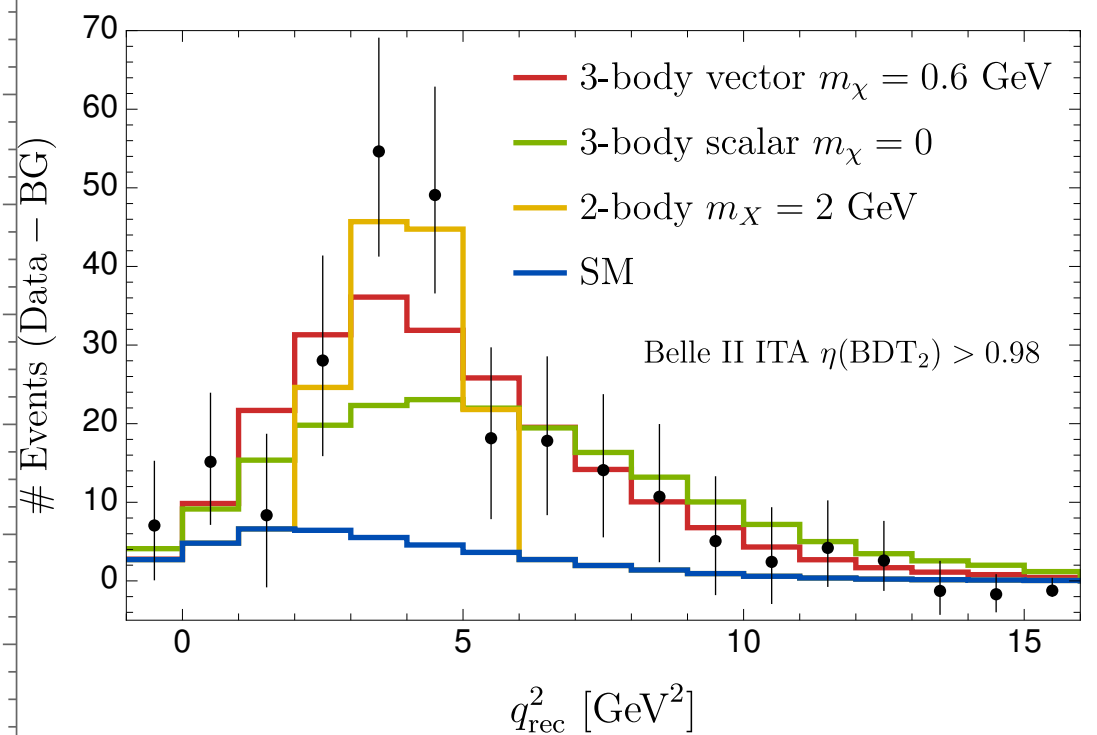
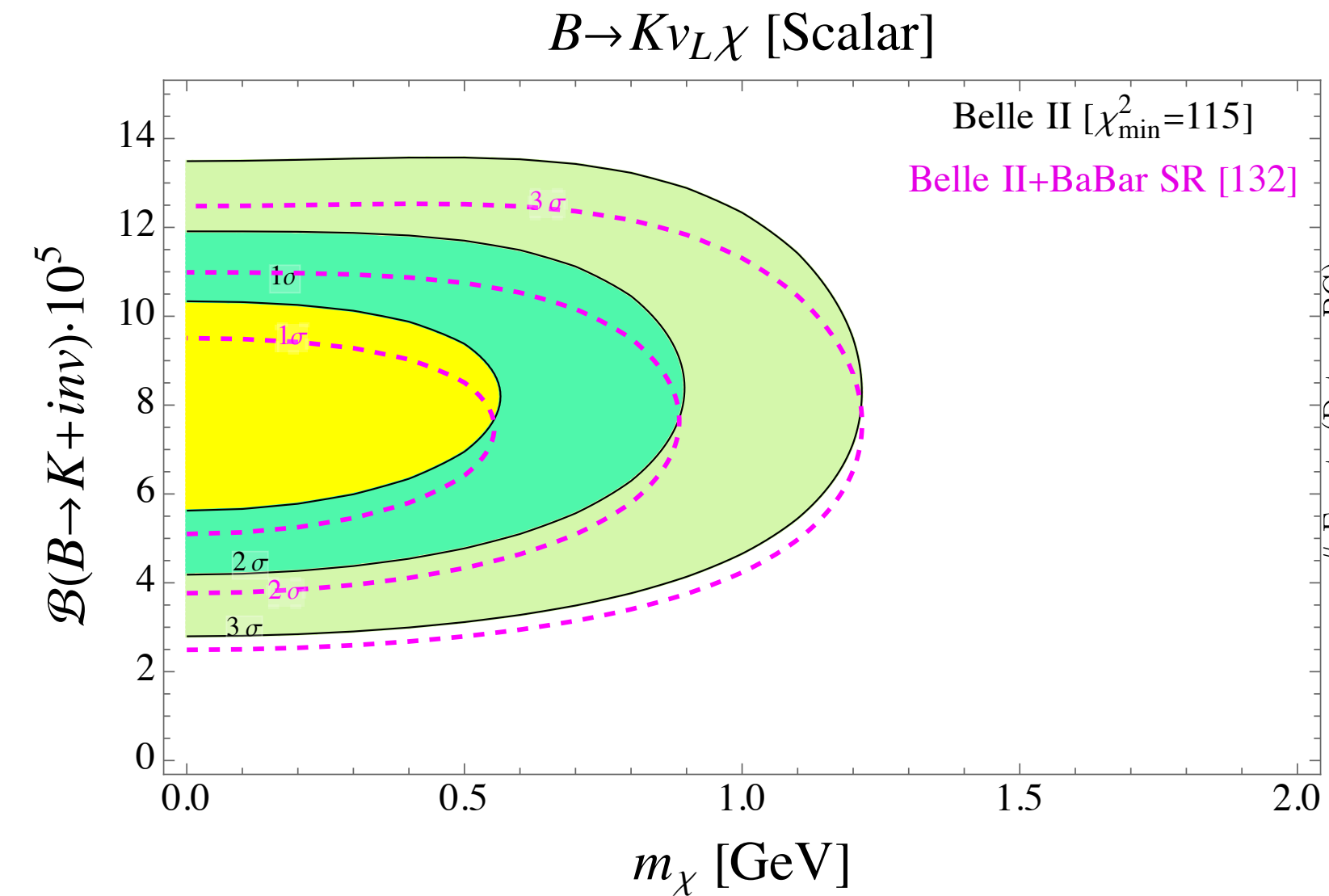
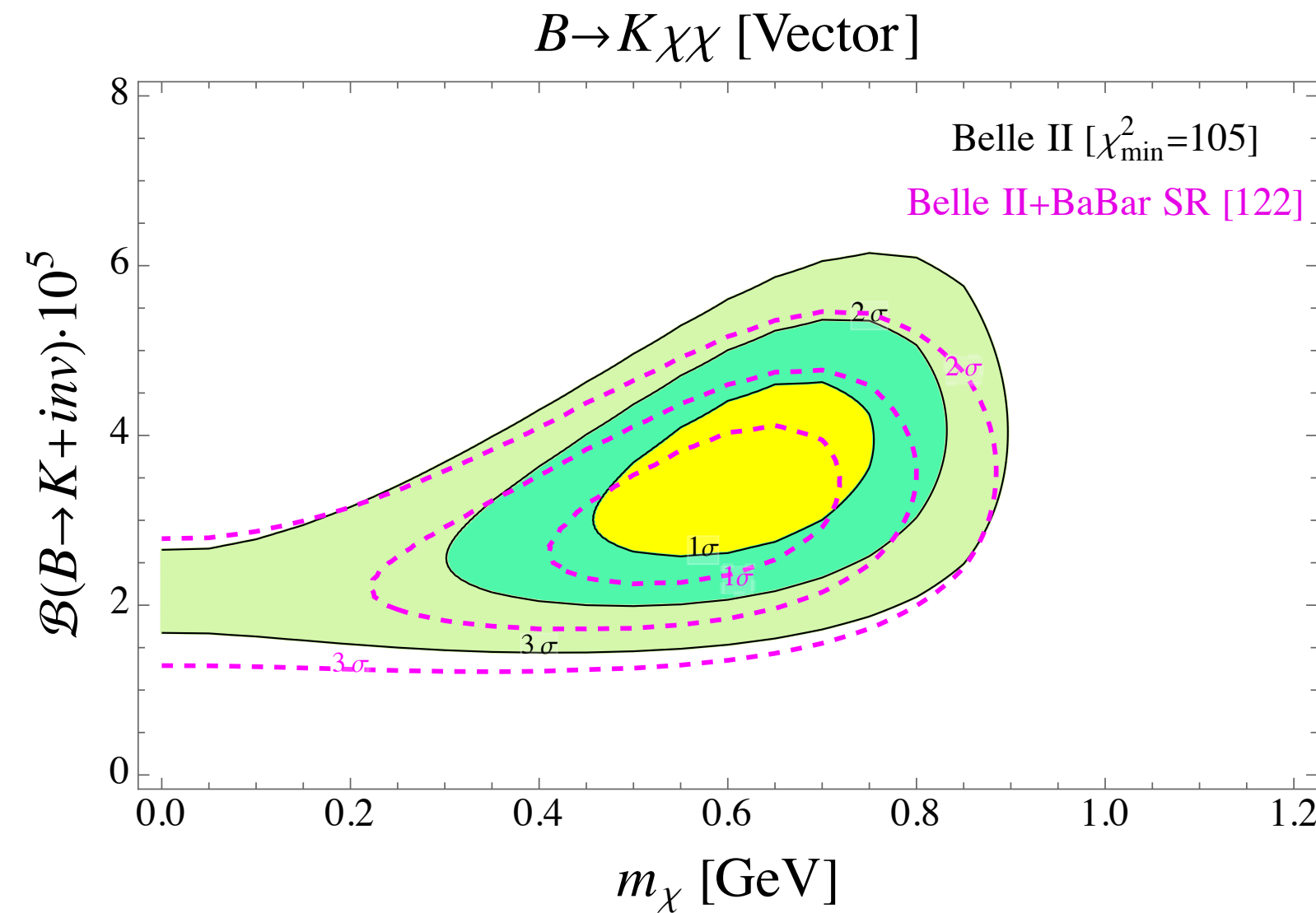
- Scalar/Tensorはhigh-q2 dominate

→q2~4GeV²ピークたいしては効率悪い

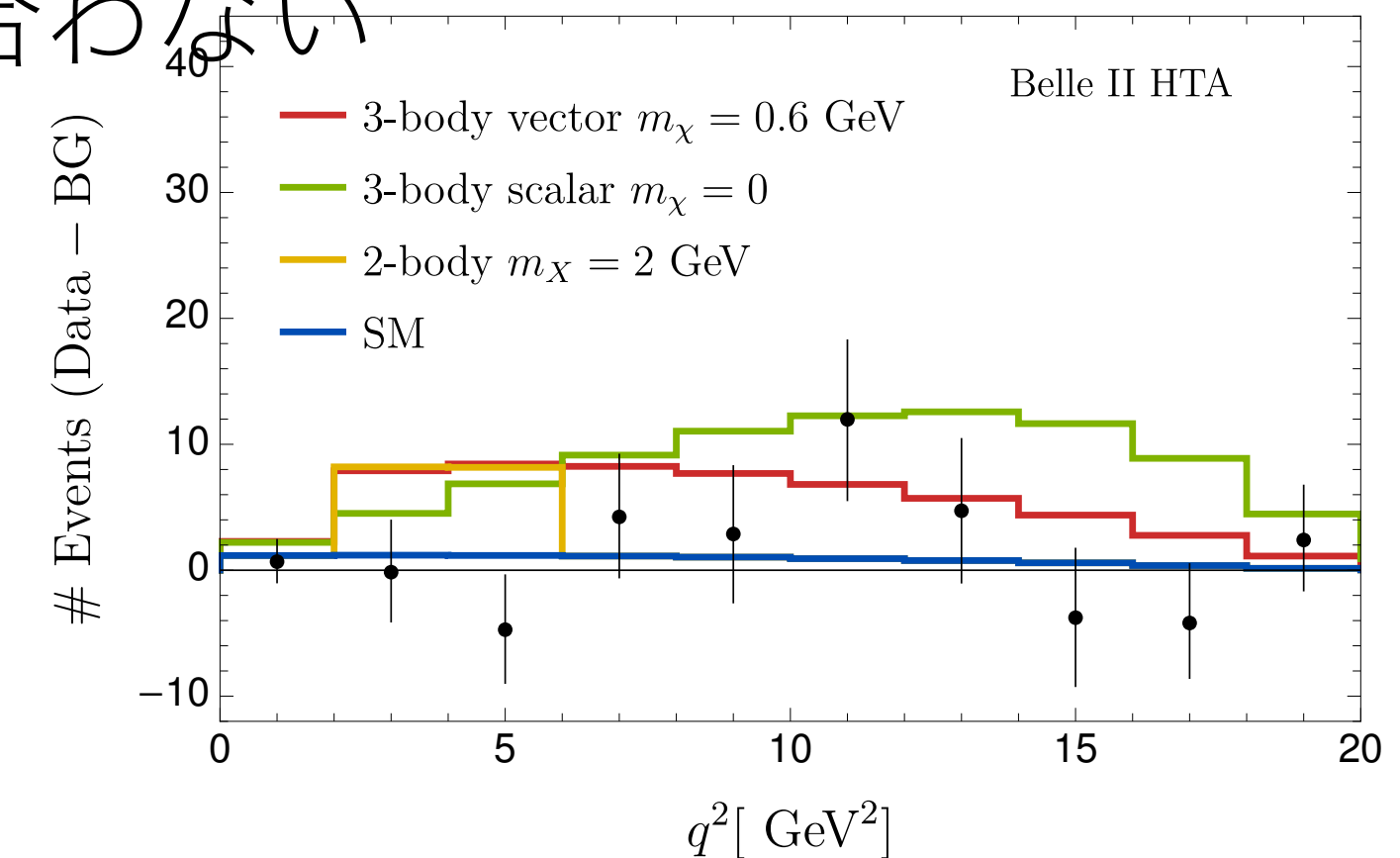
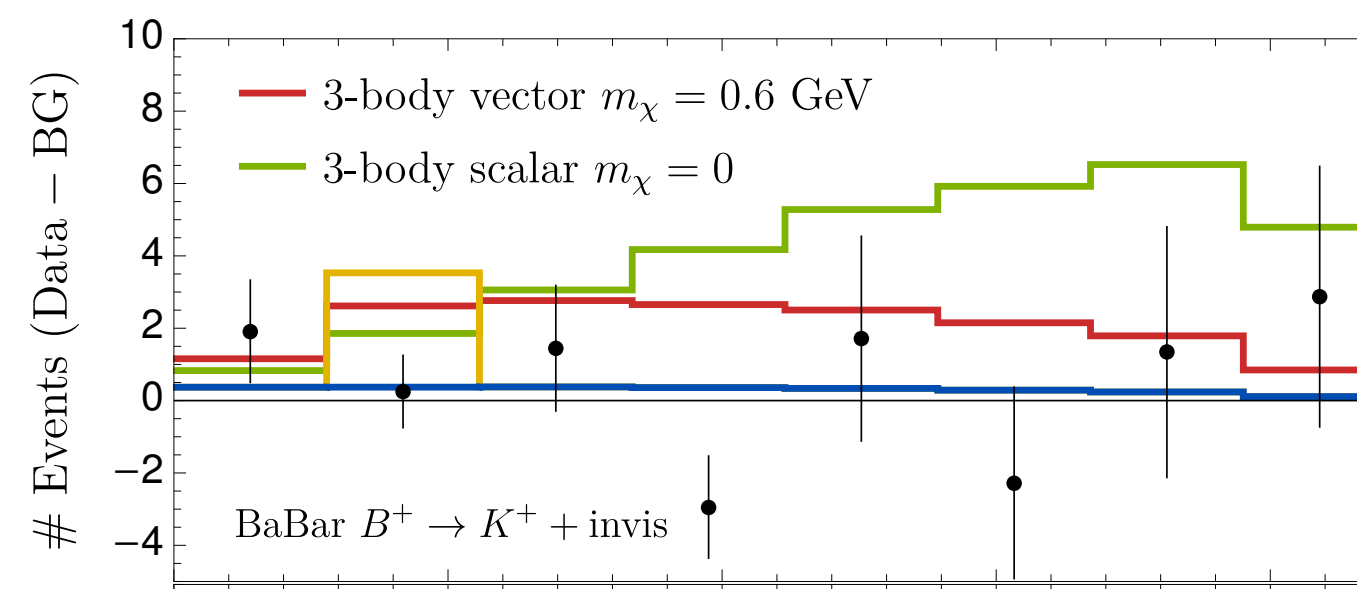
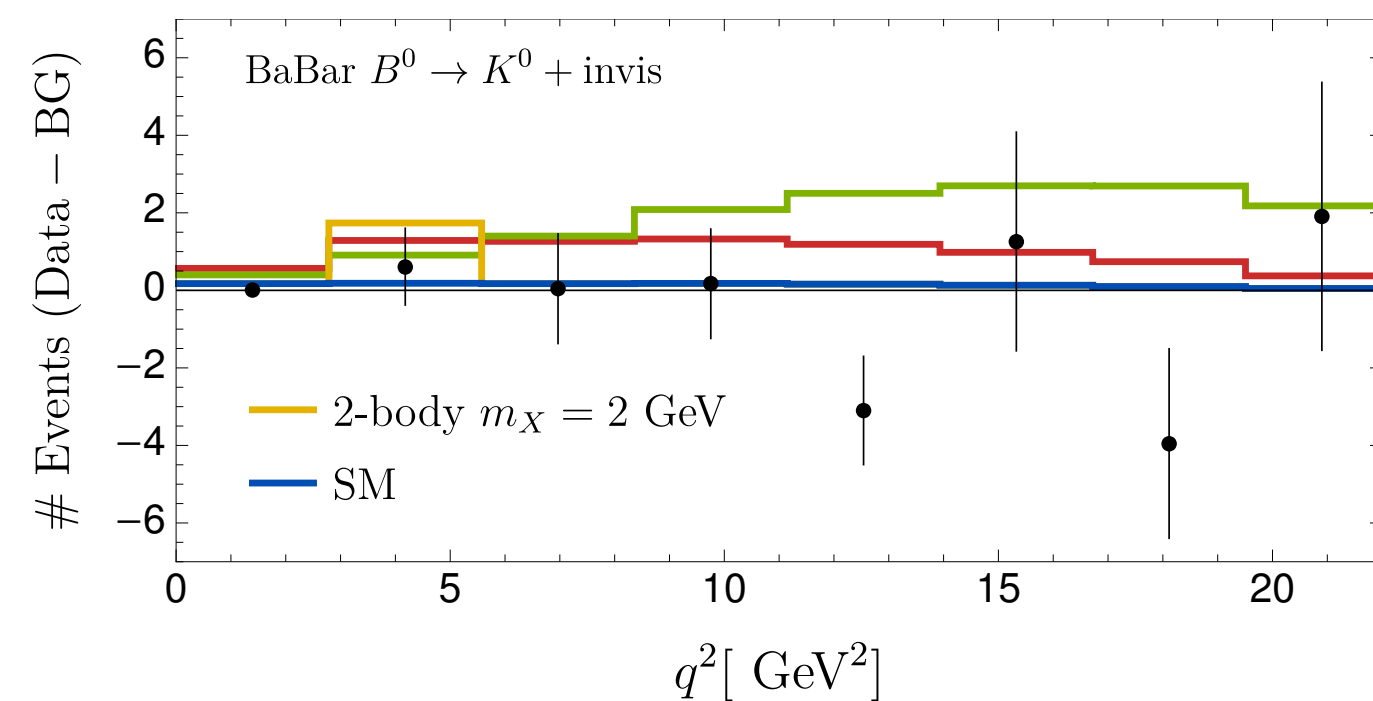
Note: efficiency drops for higher q2 in ITA.



3体崩壊の場合



- Vector(SM like)：赤
- ほかのデータとも一致
- Xは質量あったほうが良いフィット(HTAも)
- Scalar(~Tensor)：黄緑
- Belle II：q2ピーク以外は合う
- BabarとHTAに合わない



他の統計解析

- 後追い論文2403.13887では、 $B_s \rightarrow \text{Inv}$ や $B \rightarrow K^* \text{ inv(Babar)}$ なども見る。
共通して見えるオペレータも多い
- Belle II公式の解析 2507.12393 (Babar無しでも) も3体崩壊では
Scalar/tensorよりVector(SM like) が良い
- 2体崩壊との比較は不明 (次のトーク?)

Table I. The mode of the posterior, and HDI at 68% and 95% for the (sums of the) WET Wilson coefficients in Eq. (9), derived from the posterior in Fig. 3.

Parameters	Mode	68% HDI	95% HDI
$ C_{VL} + C_{VR} $	11.3	[7.8, 14.6]	[1.9, 16.2]
$ C_{SL} + C_{SR} $	0.0	[0.0, 9.6]	[0.0, 15.4]
$ C_{TL} $	8.2	[2.3, 9.6]	[0.0, 11.2]

Plan

- Inclusive Tagging Analysis/Kinematicsを紐解く
- 2体崩壊の解釈、ほかの関連データ
- 3体崩壊の解釈
- $B \rightarrow K^* + \text{Inv}$ からの示唆
- 暗黒物質などのシナリオ
- まとめ展望

B→K*+Invからの示唆



B→K*



B→K



Both

$$\mathcal{H}_{\text{eff}}^V \supset \bar{s}\gamma_\mu b \left[h_V V^\mu + \frac{g_{VV}}{\Lambda^2} i\phi^\dagger \overleftrightarrow{\partial}^\mu \phi + \frac{f_{VV}}{\Lambda^2} \bar{\psi}\gamma^\mu\psi + \frac{f_{VA}}{\Lambda^2} \bar{\psi}\gamma^\mu\gamma_5\psi \right]$$

$$\mathcal{H}_{\text{eff}}^S \supset \bar{s}b \left[g_S \phi + \frac{g_{SS}}{\Lambda} \phi^\dagger \phi + \frac{h_S}{\Lambda} V_\mu^\dagger V^\mu + \frac{f_{SS}}{\Lambda^2} \bar{\psi}\psi + \frac{f_{SP}}{\Lambda^2} \bar{\psi}\gamma_5\psi \right]$$

$$\bar{s}\gamma_\mu\gamma_5 b \left[h_A V^\mu + \dots \right]$$

$$\bar{s}\gamma_5 b \left[g_P \phi + \frac{g_{PS}}{\Lambda} \phi^\dagger \phi + \dots \right]$$

2403.13887

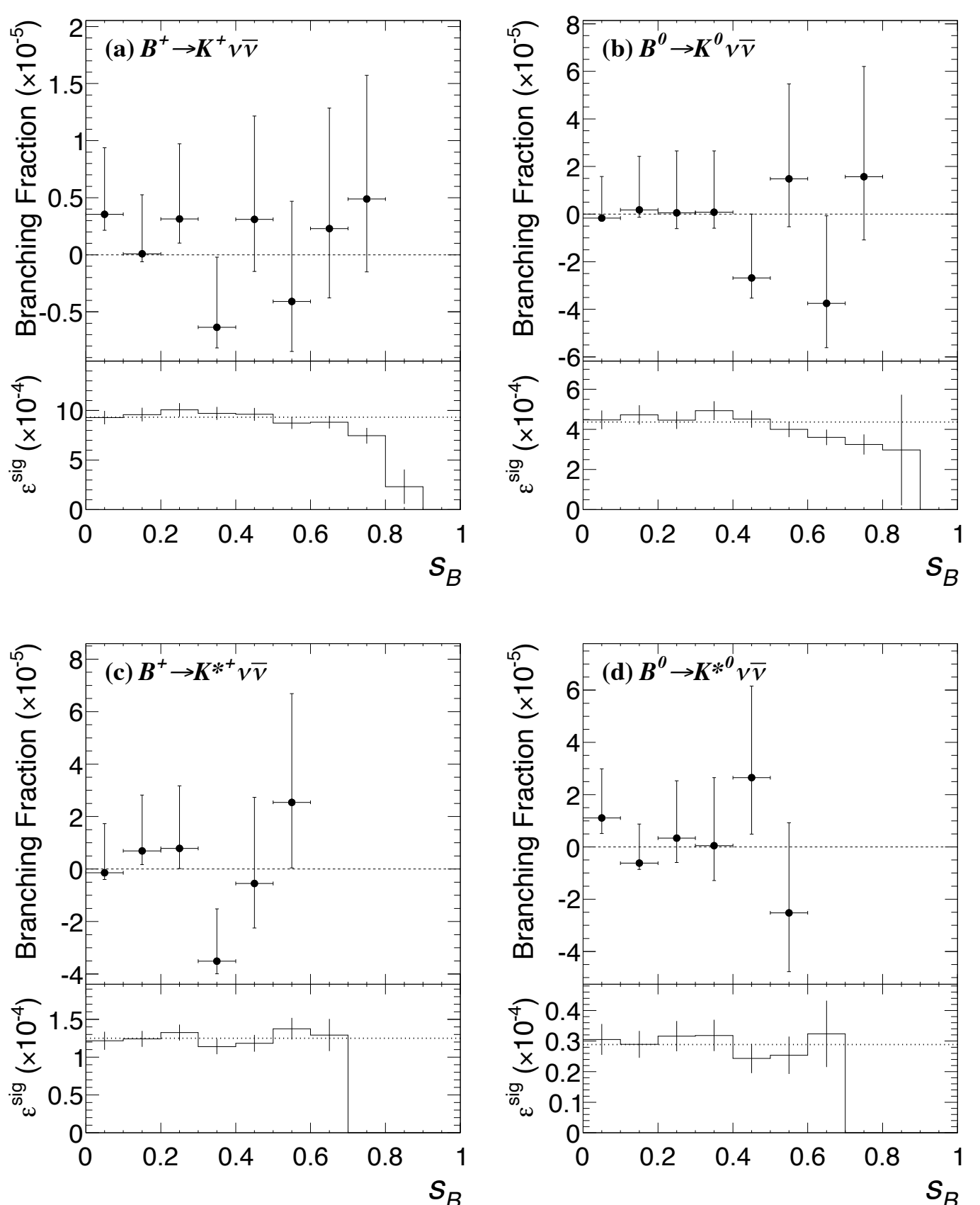
- Axionへ崩壊する場合、自然なオペレータは

$$C_{bs} \frac{\partial_\mu a}{f_a} \bar{s}_L \gamma^\mu \gamma_5 b_L$$

[例、2102.04474 2loop計算from (a/f)GG~ excessあうのは $f_a \sim 100\text{GeV}$ 、コレじゃなさそう]

Flavor violationはSM-W bosonから来るので、KもK*の両方が関連

- Dark photonなど由来の場合も→2body(h_V, h_A), $f_W, f_{AV} \rightarrow K$ と K^*
- Babar search は K^{*+}/K^{*0} を探索、SMと矛盾なし→制限



$$s_B \equiv q^2/m_B^2$$

$$\mathcal{B}(B^0 \rightarrow K^{*0} \nu \bar{\nu}) < 9.3 \times 10^{-5}$$

$$\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^{*+} \nu \bar{\nu}) < 11.6 \times 10^{-5},$$

暗黒物質系のシナリオ • 2502.04900

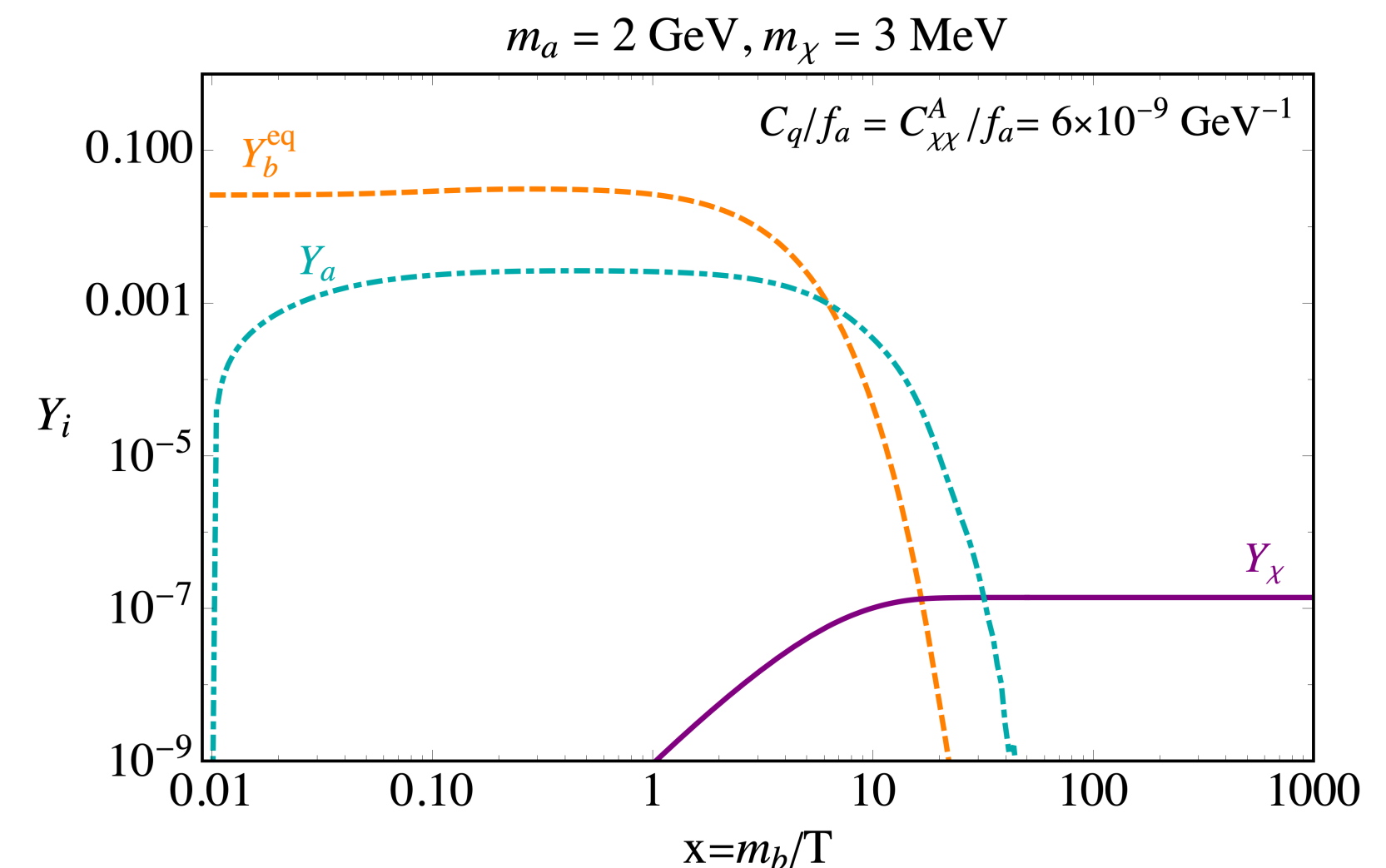
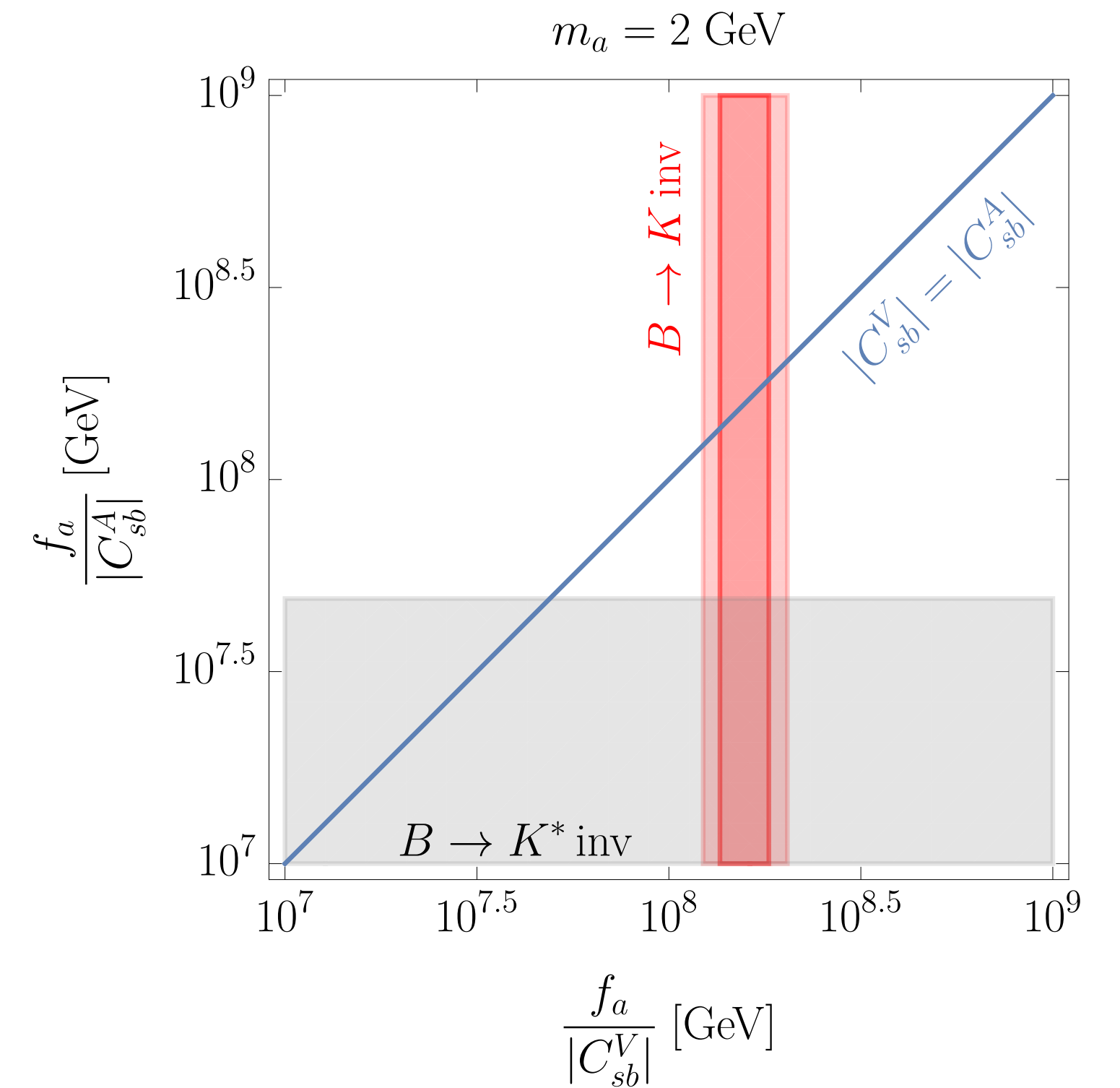
• ALP (2GeV) への2体崩壊、 $\mathcal{L}_{aff} = \frac{\partial_\mu a}{2f_a} \bar{f}_i \gamma^\mu (C_{f_i f_j}^V + C_{f_i f_j}^A \gamma_5) f_j$

- ▶ K^* の制限は充分回避できる
- ▶ $c\tau \sim 60m$ なのでEffectively invisible

• ALPはDM(χ) portal

b-s-a couplingでFreeze-inができる

- ▶ MeV scale DM
- ▶ Axionはbを経由して熱浴に、
bがNon-relativisticになるとFreeze-in



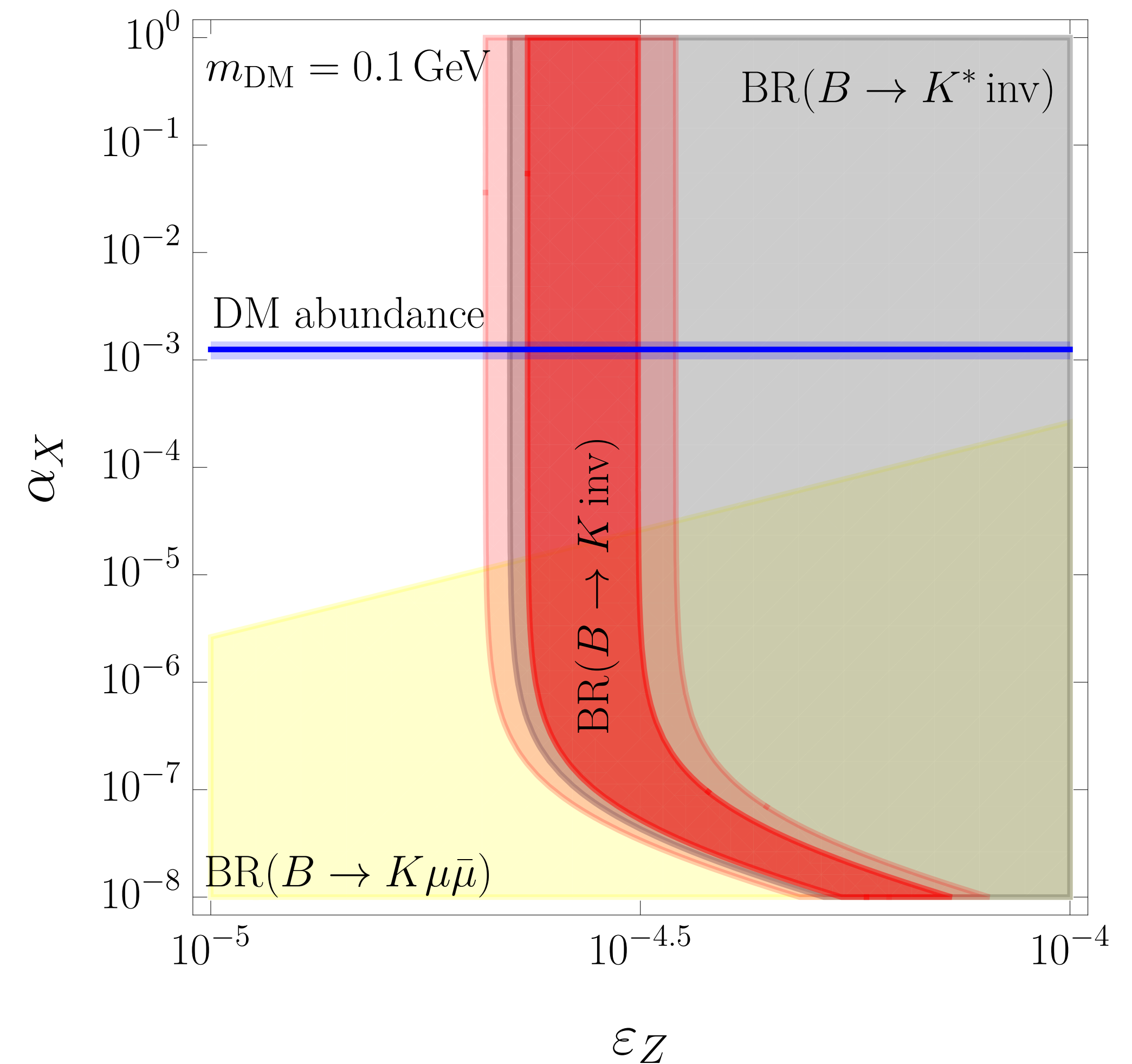
暗黒物質系のシナリオ • 2502.04900

- **Dark photon portal (B→K+DPへ崩壊)**

- ▶ Z-DP mixing too suppressed
- ▶ $m_X=2\text{GeV}$ で $B \rightarrow K + \text{inv}$ を出すのは厳しい
- ▶ DMもAbundanceは非常にややこしい
- ▶ $B \rightarrow K^*$ に予言がある→ほぼ棄却 (正直!)

$$\Gamma(B \rightarrow K^* X) \approx 1.9 \Gamma(B \rightarrow K X)$$

- ▶ Belle $\mathcal{B}(B \rightarrow K^* \nu \bar{\nu}) < 2.7 \times 10^{-5}$,
- ▶ Dark sector coupling小さいとき
→LHCbの**B→Kμμ**探査も関連



まとめ・展望

- Belle IIの $B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu}$ 超過を**BRではなく分布のレベル**で解釈
- 2体崩壊はデータをよく再現。3体崩壊の場合VectorのほうがScalar/Tensorより好まれる。(Efficiencyを正しく考慮しないと間違う)
- BaBar(semilep)やBelle II(HTA)も見ても、2体崩壊or3体Vectorが良さそう
- $B \rightarrow \mathbf{K}^* \nu \bar{\nu}$ は現実的なシナリオでは出るので、精度向上と解析が重要。
Belleで q^2 の結果がないが、**これからのBelle IIに期待**
- 2 GeV ALP+Dark matterのようなシナリオもある。
- ◎ 2体崩壊の公式見解？ $B \rightarrow K \nu \bar{\nu}$ の更なるアップデート
- ◎ 他の測定との関連($B_s \rightarrow \text{Invis}$), Flavor model・MFV経由で $b \rightarrow s \pi \pi$ 、 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$?