

Scrutinizing final-state interactions in charmed hadronic B decays

Satoshi Mishima (KEK)

Flavor Physics Workshop, Sep. 27, 2021

M. Endo, S. Iguro and S. M., arXiv:2109.10811

Anomaly?

- ◆ B中間子のハドロニック崩壊（D中間子を終状態に含むもの）の分岐比の理論値が実験データよりも大きいということが報告されている。

	Data	SM 2109.10811		
$10^3 \mathcal{B}(\bar{B}_s^0 \rightarrow D_s^+ \pi^-)$	3.00 ± 0.23	4.09 ± 0.21	3.5σ	Bordone et al., 2007.10338
$10^3 \mathcal{B}(\bar{B}_s^0 \rightarrow D^+ K^-)$	0.186 ± 0.020	0.303 ± 0.015	4.7σ	Cai et al, 2103.04138
$10^3 \mathcal{B}(\bar{B}_s^0 \rightarrow D_s^{*+} \pi^-)$	2.0 ± 0.5	4.46 ± 0.22	4.5σ	Fleischer & Malami, 2109.04950
$10^3 \mathcal{B}(\bar{B}_s^0 \rightarrow D^{*+} K^-)$	0.212 ± 0.015	0.327 ± 0.016	5.3σ	Endo, Iguro & S.M., 2109.10811

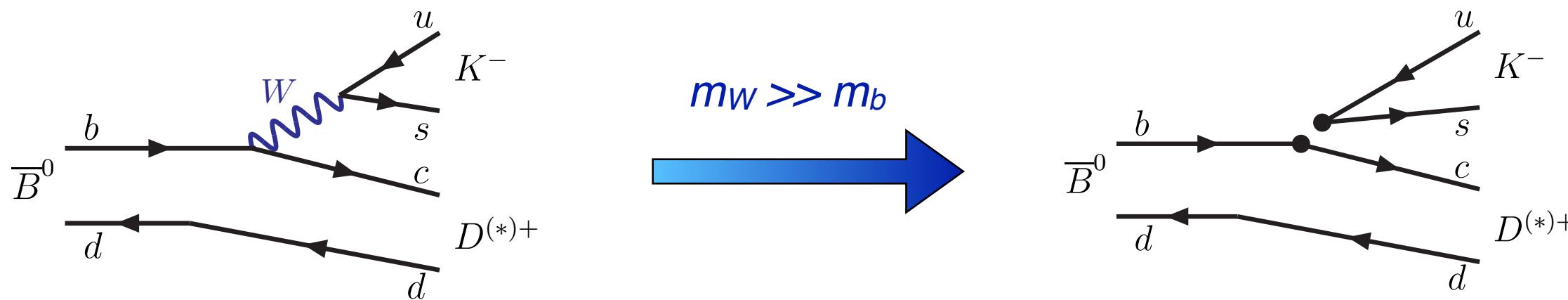


- ◆ この理論値はどのようにして計算されたのか？ 誤差の評価は信頼できるのか？ 考慮されていない重要な寄与は存在しないのか？

Calculation of $B \rightarrow MM$ decays

- ◆ 一般的に, $B \rightarrow MM$ ($M=$ 中間子) の崩壊振幅の計算は困難.
- ◆ QCD の非摂動効果を含めた計算が必要.
- ◆ Lattice QCD で計算すれば解決? $B \rightarrow D^{(*)}$ form factors @ low recoil は精度よく計算できるが, $B \rightarrow MM$ については困難.
- ◆ $1/m_b$ 展開や factorization を駆使して近似的に計算する.
- ◆ 問題となっている $B \rightarrow D^{(*)}M$ 崩壊では, factorization が良い精度で成り立つと考えられている.

Color-allowed $B \rightarrow D^{(*)} M$ decays



$$\mathcal{L}_{\text{eff}} = -\frac{G_F}{\sqrt{2}} V_{uD}^* V_{cb} (C_1 Q_1 + C_2 Q_2) + \text{h.c.} \quad (D = d, s)$$

$$Q_1 = [\bar{c}\gamma^\mu T^a(1-\gamma_5)b][\bar{D}\gamma_\mu T^a(1-\gamma_5)u]$$

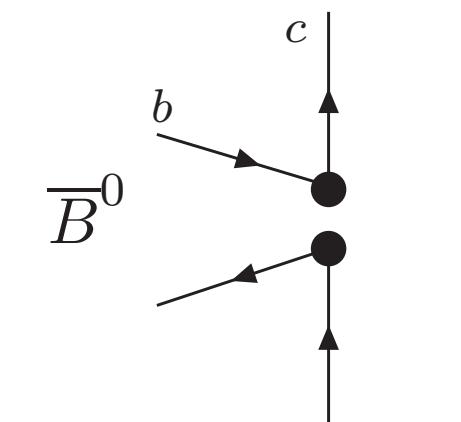
$$Q_2 = [\bar{c}\gamma^\mu(1-\gamma_5)b][\bar{D}\gamma_\mu(1-\gamma_5)u]$$

SM values:

$$C_1(m_b) \sim -0.3$$

$$C_2(m_b) \sim 1.0$$

- ◆ Wボソンと結合している4つのクォークが全て異なるため、低エネルギー演算子は「ツリー演算子」のみで、「ペンギン演算子」は寄与しない。
- ◆ Annihilation (exchange) タイプの振幅も寄与しない。
- ◆ Color-allowed tree 崩壊と呼ばれる。



Factorization

- ♦ubar-s は $1/m_b$ 程度しか離れておらず、定性的には K と BD の間の soft gluon 交換の寄与は小さいと考えられる. *Bjorken (89)*
- ♦ 実際、Soft-Collinear Effective Theory (SCET) により $1/m_b$ の **leading power** では soft/collinear gluon 交換の寄与がないことが示されている.

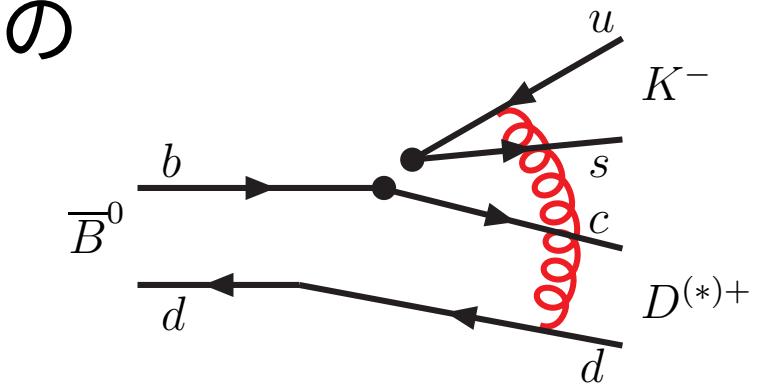
Bauer, Pirjol, Stewart, hep-ph/0107002

$$\begin{aligned} \mathcal{A}(\bar{B}^0 \rightarrow D^+ K^-) &= \frac{G_F}{\sqrt{2}} V_{us}^* V_{cb} \left[C_1(m_b) \langle D^+ K^- | [\bar{c}\gamma^\mu T^a(1-\gamma_5)b][\bar{s}\gamma_\mu T^a(1-\gamma_5)u] |\bar{B}^0 \rangle(m_b) \right. \\ &\quad \left. + C_2(m_b) \langle D^+ K^- | [\bar{c}\gamma^\mu(1-\gamma_5)b][\bar{s}\gamma_\mu(1-\gamma_5)u] |\bar{B}^0 \rangle(m_b) \right] \end{aligned}$$



$$\mathcal{A}(\bar{B}^0 \rightarrow D^+ K^-) = i \frac{G_F}{\sqrt{2}} V_{us}^* V_{cb} (m_B^2 - m_D^2) a_1(D^+ K^-) f_K F_0^{\bar{B} \rightarrow D}(m_K^2)$$

$$a_1(D^+ K^-) = \sum_{i=1}^2 C_i(m_b) \int_0^1 du T_i^I(u) \Phi_K(u)$$



青: m_b より上のスケール
赤: m_b より下のスケール

Inputs

$$\mathcal{A}(\bar{B}^0 \rightarrow D^+ K^-) = i \frac{G_F}{\sqrt{2}} V_{us}^* V_{cb} (m_B^2 - m_D^2) a_1(D^+ K^-) f_K F_0^{\bar{B} \rightarrow D}(m_K^2)$$

$$a_1(D^+ K^-) = \sum_{i=1}^2 C_i(m_b) \int_0^1 du \ T_i^I(u) \Phi_K(u)$$

青: m_b より上のスケール
赤: m_b より下のスケール

- ◆ 崩壊定数 f_K は Lattice QCD で計算可能. 誤差は 0.2% 程度.
- ◆ K の運動量分布関数 $\Phi_K(u)$ は light-cone QCD sum rules (LCSR) で計算.
- ◆ a_1 の pQCD の NNLO での予言値の誤差は 1% 程度 (QED補正は更に小さい).

$$a_1(D^+ K^-) = 1.025 + [0.029 + 0.018i]_{\text{NLO}} + [0.016 + 0.028i]_{\text{NNLO}}$$

$$= (1.069_{-0.012}^{+0.009}) + (0.046_{-0.015}^{+0.023})i$$

*Huber et al., 1606.02888
Beneke et al., 2107.03819*

- ◆ $V_{cb} F_0(m_K^2)$ はセミレプトニック崩壊の実験値 + 理論 (Lattice, LCSR) から制限.
誤差は数%程度.

$$\langle D(p') | \bar{c} \gamma^\mu b | \bar{B}(p) \rangle = \left(p^\mu + p'^\mu - \frac{m_B^2 - m_D^2}{q^2} q^\mu \right) \mathbf{F}_1^{\bar{B} \rightarrow D}(q^2) + \frac{m_B^2 - m_D^2}{q^2} q^\mu \mathbf{F}_0^{\bar{B} \rightarrow D}(q^2) \quad q = p - p'$$

SM predictions

	Data	SM 2109.10811	<i>uncertainties</i>	Data	SM
$10^3 \mathcal{B}(\bar{B}_s^0 \rightarrow D_s^+ \pi^-)$	3.00 ± 0.23	4.09 ± 0.21	3.5σ	7.7 %	5.1 %
$10^3 \mathcal{B}(\bar{B}^0 \rightarrow D^+ K^-)$	0.186 ± 0.020	0.303 ± 0.015	4.7σ	10.8 %	5.0 %
$10^3 \mathcal{B}(\bar{B}_s^0 \rightarrow D_s^{*+} \pi^-)$	2.0 ± 0.5	4.46 ± 0.22	4.5σ	25.0 %	4.9 %
$10^3 \mathcal{B}(\bar{B}^0 \rightarrow D^{*+} K^-)$	0.212 ± 0.015	0.327 ± 0.016	5.3σ	7.1 %	4.9 %

- ◆ 主要な理論誤差は V_{cb} と $B \rightarrow D^{(*)}$ form factors に起因.
- ◆ 表の全てのモードで理論値が実験値よりも大きい.
- ◆ 新物理? [Bordone et al., 2007.10338; Cai et al, 2103.04138; Iguro & Kitahara, 2008.01086; Bordone et al., 2103.10332; Fleischer & Malami, 2109.04950](#)
- ◆ $O(10\%)$ の新物理は、他のフレーバー物理量 ($\Gamma_{B_q}, \tau_{B_s}/\tau_{B_d}, \dots$) からの制限と矛盾しない.
- ◆ これは本当に新物理の兆候を捉えているのか?

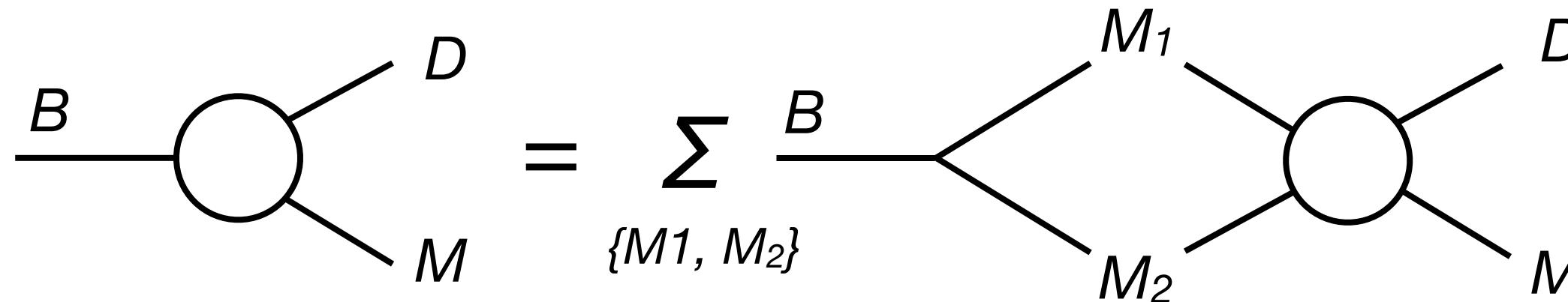
新物理以外の可能性

- ◆ 実験データの問題？ (BABAR, BELLE & LHCb の結果は consistent)
- ◆ V_{cb} , $B \rightarrow D^{(*)}$ form factors ? (cf. inclusive vs. exclusive V_{cb} puzzle)
- ◆ 理論計算で無視している $O(\Lambda/m_b)$ の subleading power 補正？
 - no chirally-enhanced contribution at Λ/m_b *Bordone et al., 2007.10338*
 - twist-3 two-particle light-cone distribution amplitude (LCDA) of light meson $\rightarrow O(\alpha_s \Lambda/M)$ は キャンセル $\rightarrow O(\alpha_s \Lambda^2/m_b^2)$
 - heavy quark (b, c) と light meson の間の hard-collinear gluon 交換 \rightarrow three-particle LCDA + (V-A) structure \rightarrow twist-4
 - BD と light meson の間の soft gluon 交換 \rightarrow LCSR による estimate
- これらは $O(0.1\%)$ と見積もられているが, $O(10\%)$ となることはあるか?
- ◆ そもそも factorization は $1/m_b$ の **leading power** でしか示されていない.
上記以外の subleading power の補正が効いている可能性は?
- ◆ 我々の論文では終状態の meson-meson rescattering の寄与について調べた.

Endo, Iguro & S.M., 2109.10811

Quasi-elastic rescattering

- ♦ Bの崩壊で2つの中間子が作られ、それらが rescattering する寄与を考える。



- ♦ Rescattering は m_b スケールなので、U(3) フレーバー対称性 (u,d,s) を仮定。
(擬スカラー中間子については U(1)_A アノマリーがあるので SU(3) 対称性)
- ♦ 同じ量子数をもつ状態間で rescattering が起こる.

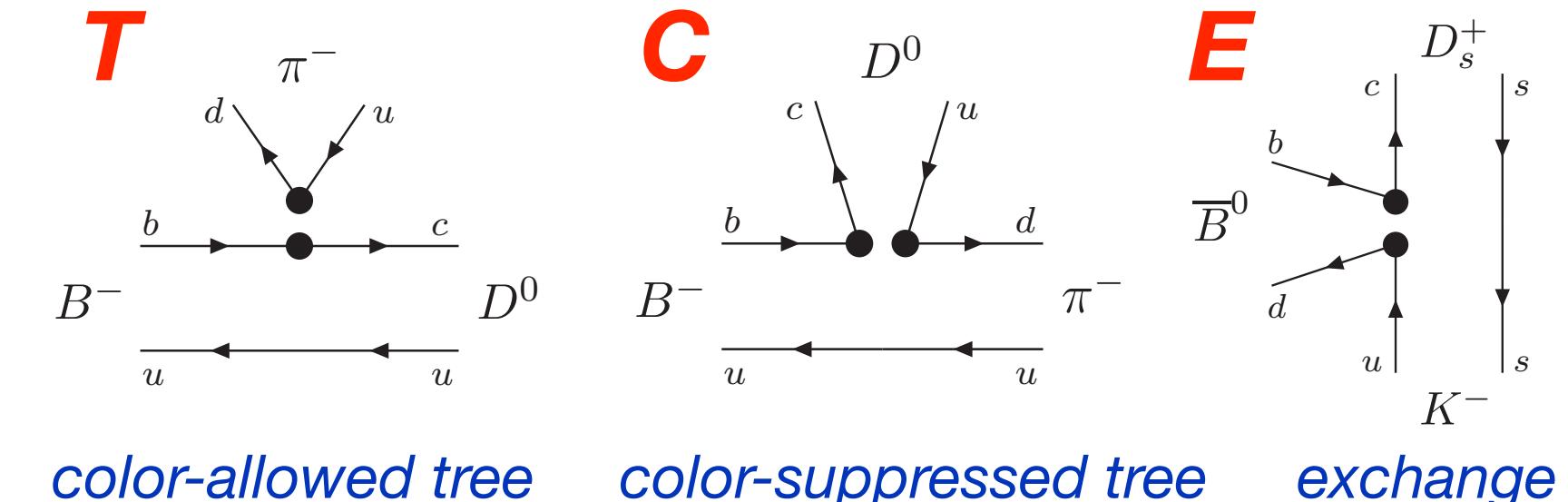
*Chua, Hou & Yang, hep-ph/0112148
Chua & Hou, hep-ph/0504084, 0712.1882*

$$S_{\text{res}} = e^{i\delta_{\bar{15}}} \sum_{a=1}^{15} |\bar{15}; a\rangle \langle \bar{15}; a| + e^{i\delta_6} \sum_{b=1}^6 |6; b\rangle \langle 6; b| + \sum_{m,n=\bar{3},\bar{3}'} \sum_{c=1}^3 |m; c\rangle U_{mn}^{1/2} \langle n; c|$$

- ♦ B→DP, B→D^{*}P, B→DV それぞれについて調べる。

B \rightarrow DP decays

Transition	$\{S, I_z\}$	Mode	Amplitude	Data
$b \rightarrow c\bar{u}d$	{1, -1}	$\overline{B}_s \rightarrow D_s^+ \pi^-$	T_D	30.0 ± 2.3
		$\overline{B}_s \rightarrow D^0 K^0$	C_P	4.3 ± 0.9
{0, -3/2}		$B^- \rightarrow D^0 \pi^-$	$T_D + C_P$	46.8 ± 1.3
{0, -1/2}		$\overline{B}^0 \rightarrow D^+ \pi^-$	$T_D + E$	25.2 ± 1.3
		$\overline{B}^0 \rightarrow D^0 \pi^0$	$\frac{1}{\sqrt{2}}(-C_P + E)$	2.63 ± 0.14
		$\overline{B}^0 \rightarrow D^0 \eta$	$\frac{c_\phi}{\sqrt{2}}(C_P + E)$	2.36 ± 0.32
		$\overline{B}^0 \rightarrow D^0 \eta'$	$\frac{s_\phi}{\sqrt{2}}(C_P + E)$	1.38 ± 0.16
		$\overline{B}^0 \rightarrow D_s^+ K^-$	E	0.27 ± 0.05
		$\overline{B}^0 \rightarrow D^+ K^-$	T_D	1.86 ± 0.20
		$\overline{B}^0 \rightarrow D^0 \overline{K}^0$	C_P	0.52 ± 0.07
$b \rightarrow c\bar{u}s$	{-1, 0}	$B^- \rightarrow D^0 K^-$	$T_D + C_P$	3.63 ± 0.12
		$\overline{B}_s \rightarrow D_s^+ K^-$	$T_D + E$	$2.27 \pm 0.19^\dagger$
		$\overline{B}_s \rightarrow D^0 \eta$	$-s_\phi C_P + \frac{c_\phi}{\sqrt{2}}E$	—
		$\overline{B}_s \rightarrow D^0 \eta'$	$c_\phi C_P + \frac{s_\phi}{\sqrt{2}}E$	—
		$\overline{B}_s \rightarrow D^0 \pi^0$	$\frac{1}{\sqrt{2}}E$	—
		$\overline{B}_s \rightarrow D^+ \pi^-$	E	—



- ◆ T は factorization により計算.
- ◆ C と E は計算できないので, パラメーターとする. (SU(3) breaking effects は decay constants や form factors の比を用いて取り入れる)

- ◆ 理論と実験にズレがあるのは黄色の崩壊過程.
Rescattering は T と C だけを考えればよい.

e.g., $\overline{B}_s \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} D_s^+ \pi^- \\ D^0 K^0 \end{array} \right\} \rightarrow D_s^+ \pi^-$

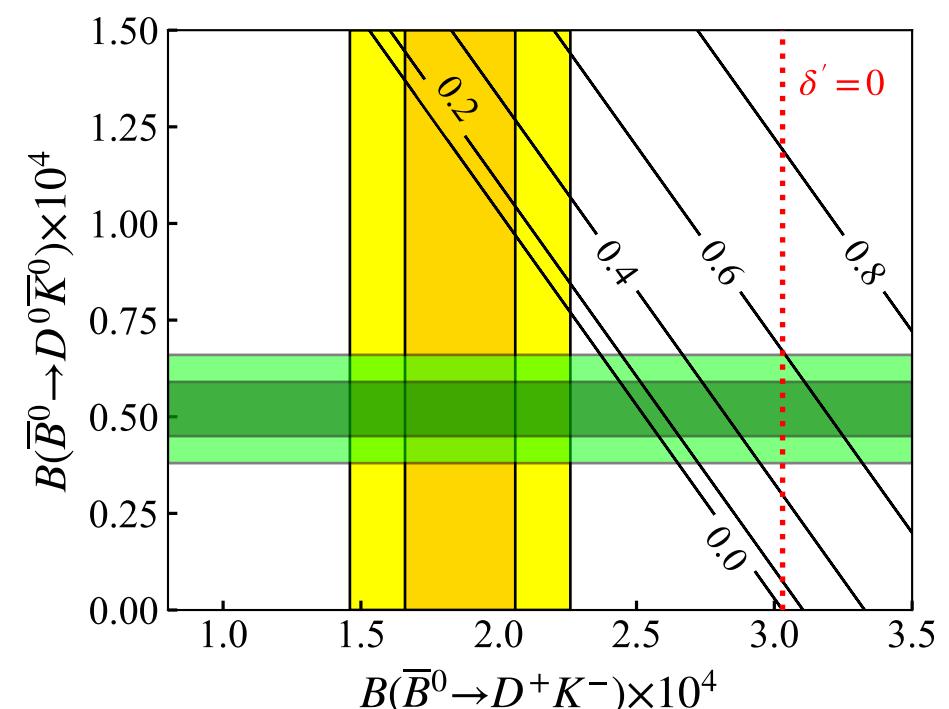
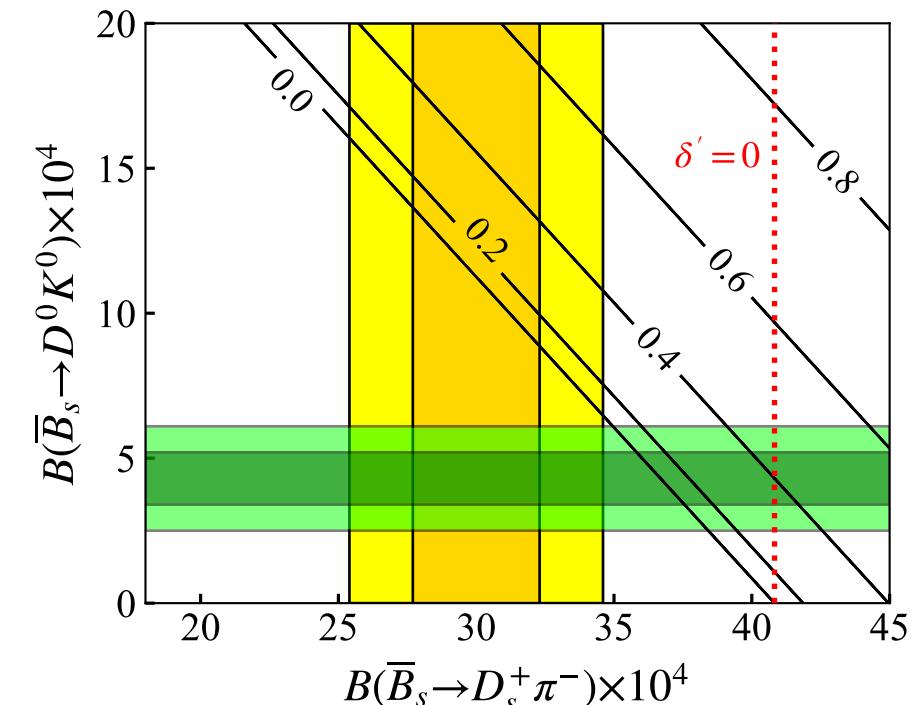
Tensions in $B \rightarrow DP$

Transition	$\{S, I_z\}$	Mode	Amplitude	Data
$b \rightarrow c\bar{u}d$	$\{1, -1\}$	$\bar{B}_s \rightarrow D_s^+ \pi^-$	T_D	30.0 ± 2.3
		$\bar{B}_s \rightarrow D^0 K^0$	C_P	4.3 ± 0.9
$b \rightarrow c\bar{u}s$	$\{-1, 0\}$	$\bar{B}^0 \rightarrow D^+ K^-$	T_D	1.86 ± 0.20
		$\bar{B}^0 \rightarrow D^0 \bar{K}^0$	C_P	0.52 ± 0.07

- ◆ *Rescattering* の寄与は (非物理的な overall 位相を除くと)
1つのパラメーター δ' で表せる。

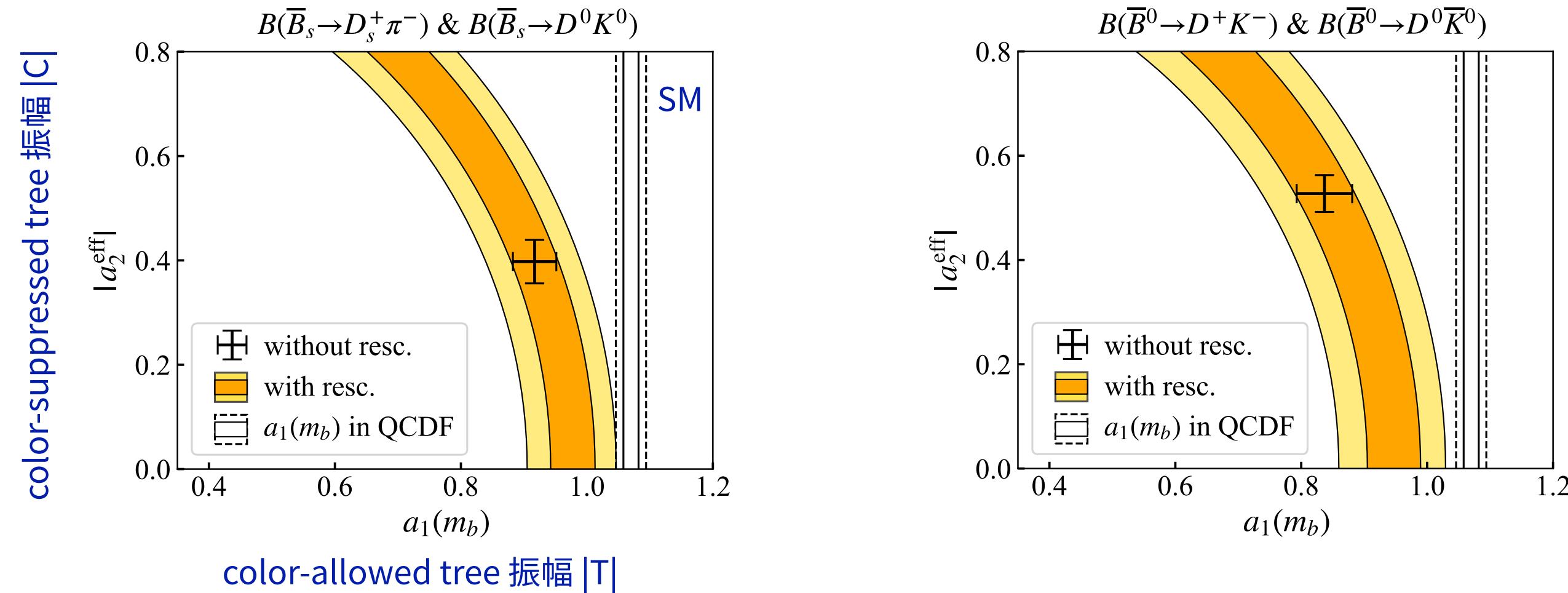
$$\mathcal{S}_{1,-1}^{1/2} = \mathcal{S}_{-1,0}^{1/2} = \frac{e^{i\delta_{15}}}{2} \begin{pmatrix} 1 + e^{i\delta'} & 1 - e^{i\delta'} \\ & 1 + e^{i\delta'} \end{pmatrix}$$

- ◆ 位相 δ' および複素振幅 C を任意のパラメーターとしても,
2つの崩壊の実験値を同時に説明することはできない。
(図中の等高線の数値は $|C|$ に相当するパラメーターの値. δ' と C の位相は0から 2π まで
変化させている)



NP in $a_1(m_b)$

- ◆ Color-allowed tree 振幅 T への新物理の寄与があると仮定する。
→ 係数 $a_1(m_b)$ が SM の値 $a_1^{SM}(m_b) \sim 1.07$ からずれる。
- ◆ 実験値でフィットすると、 $a_1(m_b) < a_1^{SM}(m_b)$ を得る。



- ◆ $a_1(m_b)$ を更に制限するために、他の崩壊過程も含めてグローバルフィットする。

Global fit

- ♦ SU(3) フレーバー対称性を仮定してグローバルフィット → $a_1(m_b)$ に $O(10\%)$ の新物理

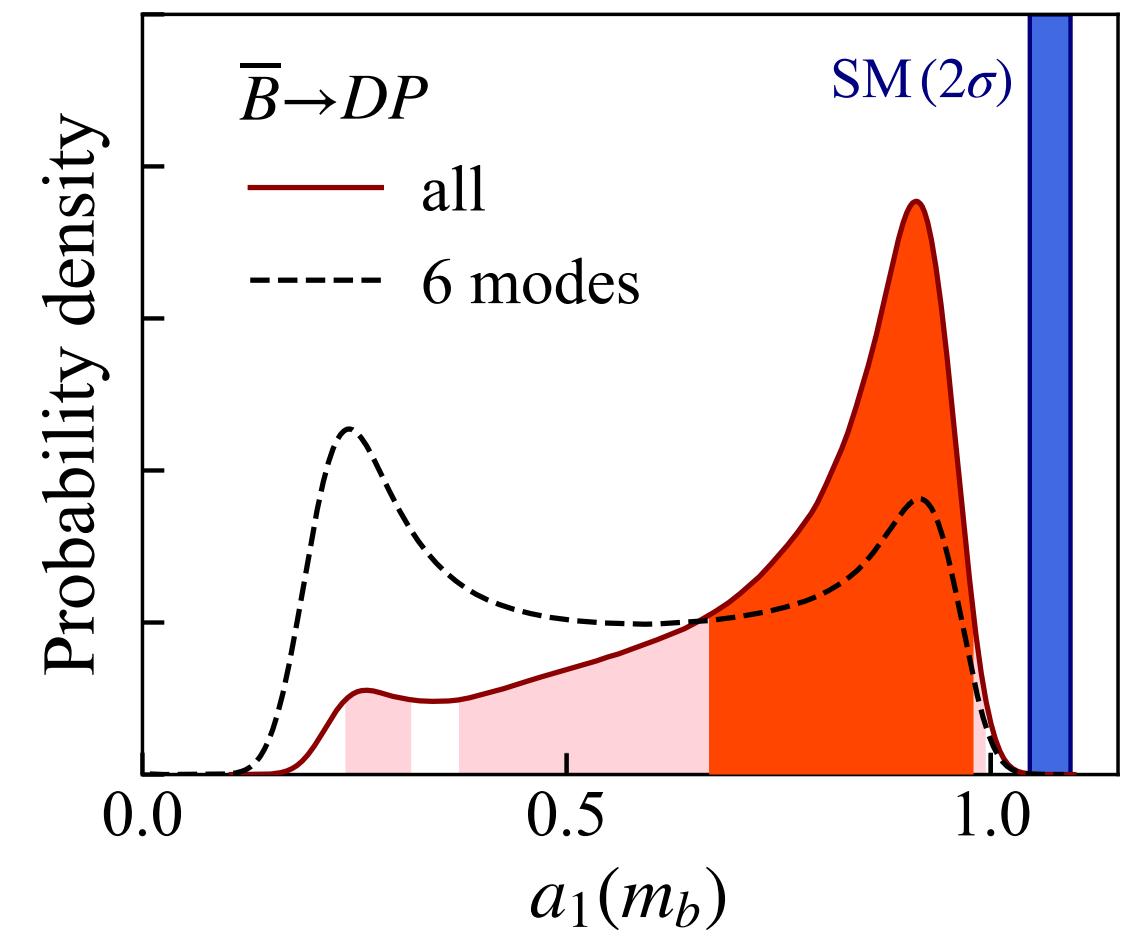
Transition	$\{S, I_z\}$	Mode	Amplitude	Data
$b \rightarrow c\bar{u}d$	{1, -1}	$\overline{B}_s \rightarrow D_s^+ \pi^-$	T_D	30.0 ± 2.3
		$\overline{B}_s \rightarrow D^0 K^0$	C_P	4.3 ± 0.9
	{0, -3/2}	$B^- \rightarrow D^0 \pi^-$	$T_D + C_P$	46.8 ± 1.3
	{0, -1/2}	$\overline{B}^0 \rightarrow D^+ \pi^-$	$T_D + E$	25.2 ± 1.3
		$\overline{B}^0 \rightarrow D^0 \pi^0$	$\frac{1}{\sqrt{2}}(-C_P + E)$	2.63 ± 0.14
		$\overline{B}^0 \rightarrow D^0 \eta$	$\frac{c_\phi}{\sqrt{2}}(C_P + E)$	2.36 ± 0.32
		$\overline{B}^0 \rightarrow D^0 \eta'$	$\frac{s_\phi}{\sqrt{2}}(C_P + E)$	1.38 ± 0.16
		$\overline{B}^0 \rightarrow D_s^+ K^-$	E	0.27 ± 0.05
$b \rightarrow c\bar{u}s$	{-1, 0}	$\overline{B}^0 \rightarrow D^+ K^-$	T_D	1.86 ± 0.20
		$\overline{B}^0 \rightarrow D^0 \overline{K}^0$	C_P	0.52 ± 0.07
	{-1, -1}	$B^- \rightarrow D^0 K^-$	$T_D + C_P$	3.63 ± 0.12
	{0, -1/2}	$\overline{B}_s \rightarrow D_s^+ K^-$	$T_D + E$	$2.27 \pm 0.19^\dagger$
		$\overline{B}_s \rightarrow D^0 \eta$	$-s_\phi C_P + \frac{c_\phi}{\sqrt{2}}E$	—
		$\overline{B}_s \rightarrow D^0 \eta'$	$c_\phi C_P + \frac{s_\phi}{\sqrt{2}}E$	—
		$\overline{B}_s \rightarrow D^0 \pi^0$	$\frac{1}{\sqrt{2}}E$	—
		$\overline{B}_s \rightarrow D^+ \pi^-$	E	—

6 modes all

}

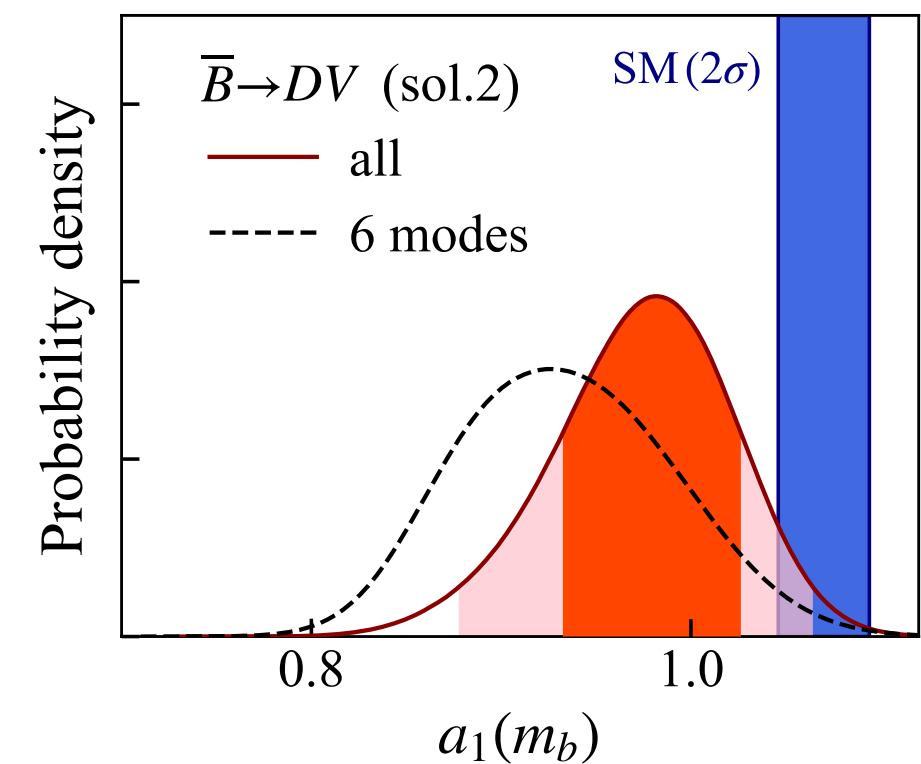
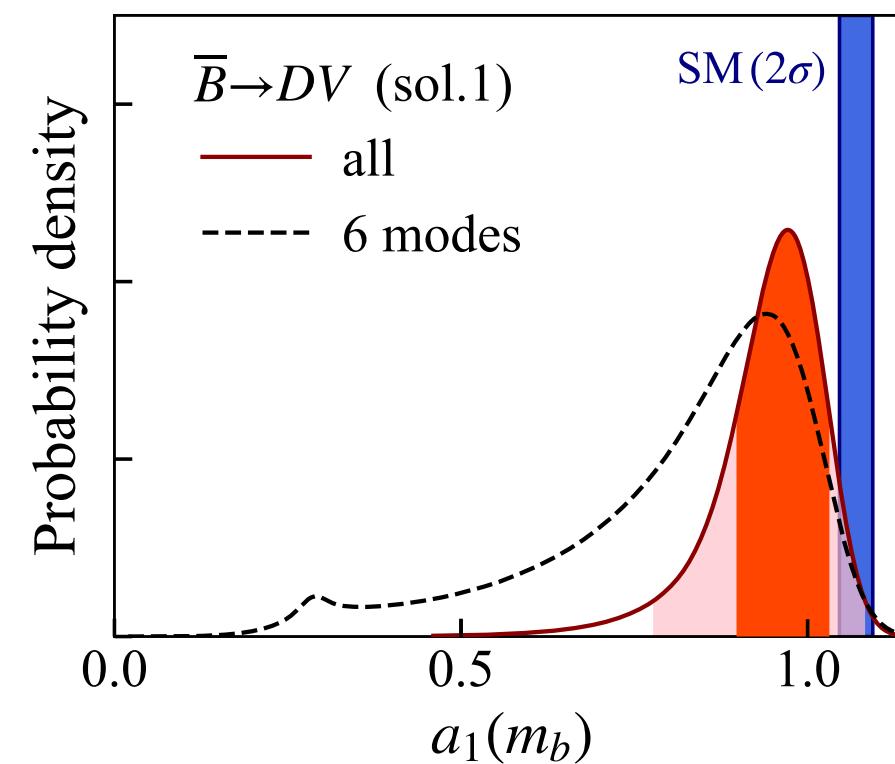
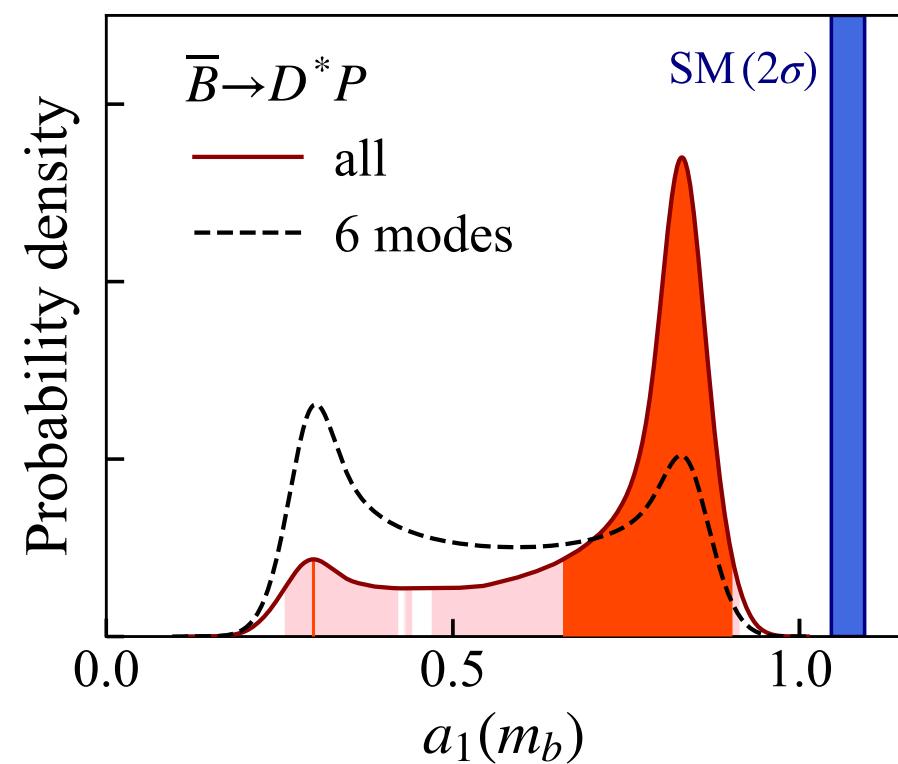
}

}



$B \rightarrow D^*P$ & $B \rightarrow DV$ decays

- ◆ $B \rightarrow D^*P$ と $B \rightarrow DV$ 崩壊についても同様の結果が得られた.
- ◆ $B \rightarrow DV$ については SU(3) ではなく U(3) 対称性を課すため, rescattering パラメーター間に関係が付く. 2つの場合が考えられる (sol. 1 & sol. 2).



Summary

- ◆ Color-allowed 崩壊 ($\bar{B}^0 \rightarrow D^{(*)+} \bar{K}^-$, $\bar{B}_s \rightarrow D_s^{(*)+} \pi^-$) の崩壊分岐比の実験値と QCD factorization による理論値の間にズレがあると議論になっている。
- ◆ Factorization (in large m_b limit) では無視している quasi-elastic rescattering によって、このズレを説明できるかどうかを調べた。
- ◆ Quasi-elastic rescattering では、color-allowed 崩壊と color-suppressed 崩壊の両方を同時に説明することができないことを示した。
- ◆ もし新物理を仮定するならば、係数 $a_1(m_b)$ を $O(10\%)$ 減らす寄与が必要である。
- ◆ 新物理の可能性を追求すると同時に、標準模型における他の $1/m_b$ 補正や form factors (@ large recoil) についての更なる研究が重要である。