素粒子物理学の進展2012 @ 基研 2012/07/19

Polarization in $\bar{B} \to D^{(*)}\tau\bar{\nu}$ as a probe for new physics

"Work in progress"

渡邉諒太郎（大阪大学）

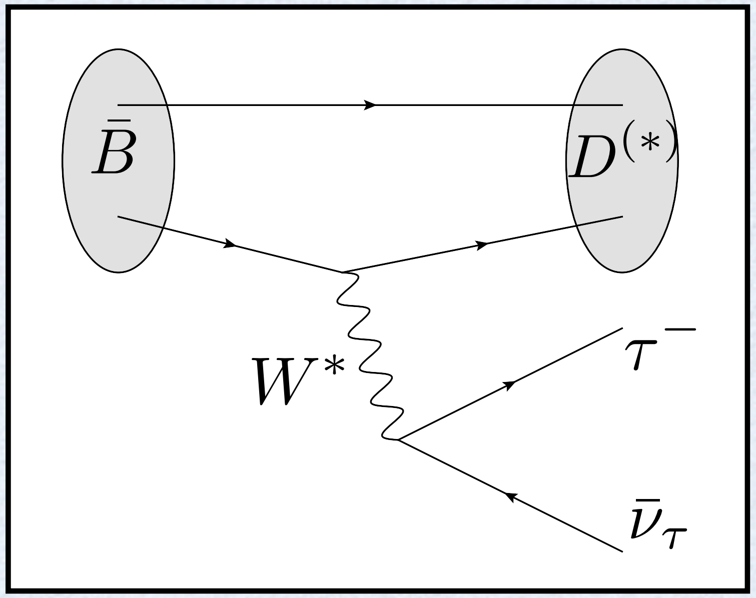
共同研究者：田中実（大阪大学）

まずはじめに・・・$\bar{B} \to D^{(*)}\tau\bar{\nu}$ って・・・

（1）そもそもどういうプロセスだっけ？

標準模型では、

ダイアグラム：



有効ラグランジアン：

$$\mathcal{L}_{\rm eff} = -2\sqrt{2} G_F V_{cb}\, \bar{c}_L \gamma^\mu b_L\, \bar{\tau}_L \gamma_\mu \nu_L$$

中間子の種類：

D＝擬スカラー　D*＝ベクトル

特徴としては、

B factoryでしか測定出来ない（終状態にニュートリノが二つ以上）

ハドロンの不定性が結構小さい (a few % in SM)

(２)何か問題あったっけ？

$b \to \tau$ 系のプロセスは実験値がなんか標準模型より大きい

b→cτν

	SMの予言	測定値
$\bar{B} \to D\tau\bar{\nu}$	0.302 ± 0.015	0.43 ± 0.06
$\bar{B} \to D^*\tau\bar{\nu}$	0.254 ± 0.005	0.33 ± 0.04

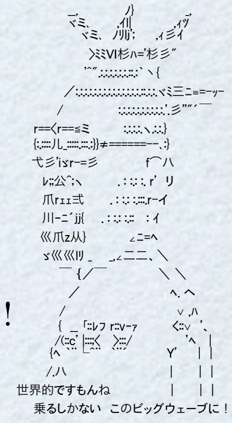
b→uτν

$\bar{B} \to \tau\bar{\nu}$ の $|V_{ub}|$ 問題

※ICHEP2012で
さがったとのほうこくがががが

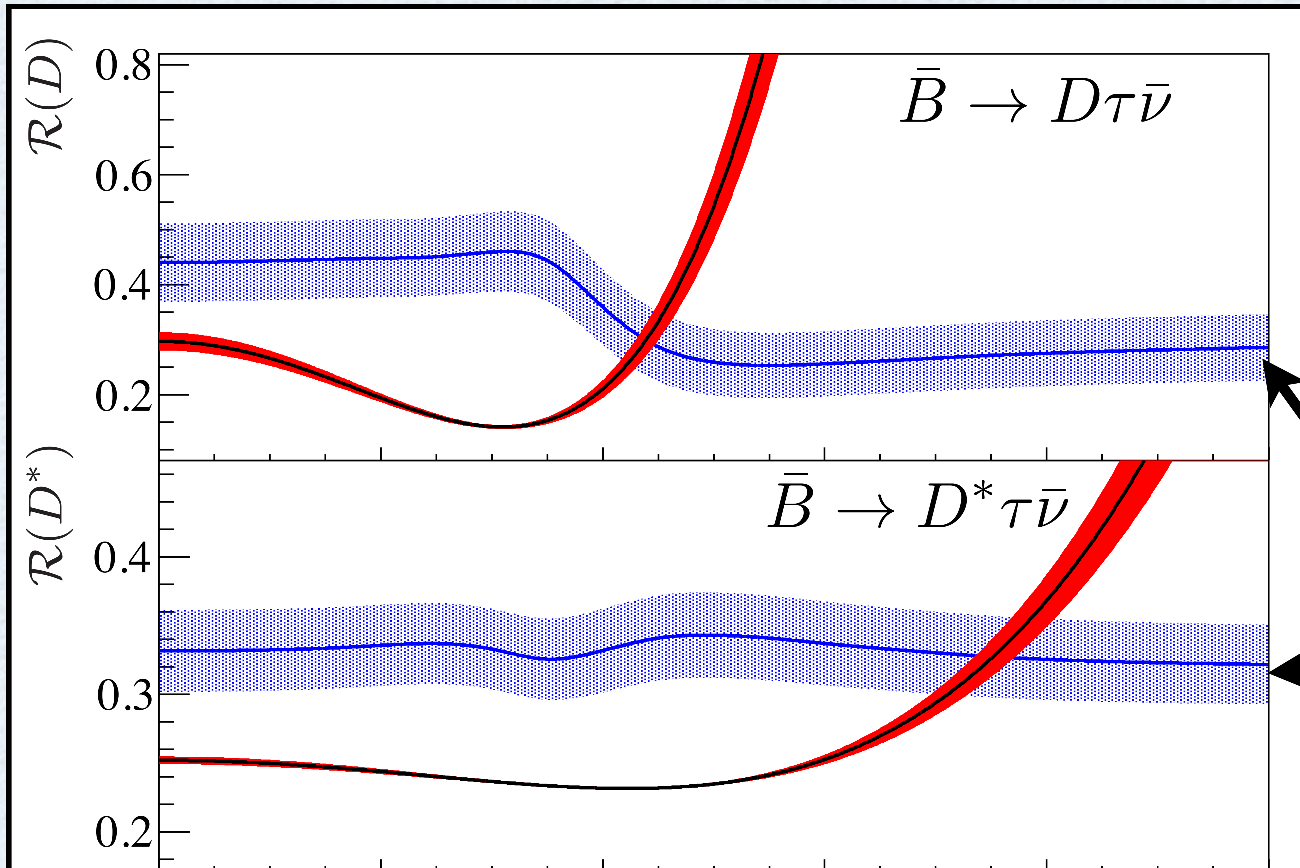
じゃあ荷電ヒッグスの効果が見えてるんじゃね？（嬉）

乗るしかない、
このビッグウェーブに!



荷電ヒッグスはSMと負の干渉を起こすので分岐比は下がってしまう

最新の解析結果　@BABAR, ArXiv:1205.5442



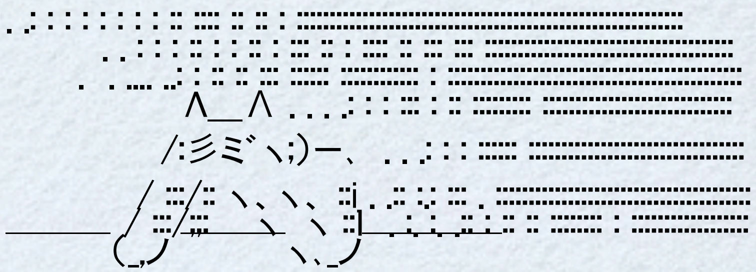
$$R(D) = \frac{\Gamma(\bar{B} \to D\tau\bar{\nu})}{\Gamma(\bar{B} \to Dl\bar{\nu})}$$

$$R(D^*) = \frac{\Gamma(\bar{B} \to D^*\tau\bar{\nu})}{\Gamma(\bar{B} \to D^*l\bar{\nu})}$$

測定値の誤差
（$\pm 1\sigma$）

単純な荷電ヒッグスのモデルは窮地に立たされている（悲）

The measured values of $\mathcal{R}(D)$ and $\mathcal{R}(D^*)$ match the predictions of this particular Higgs model for $\tan\beta/m_{H^+} = 0.44 \pm 0.02$ and $\tan\beta/m_{H^+} = 0.75 \pm 0.04$, respectively. However, the combination of $\mathcal{R}(D)$ and $\mathcal{R}(D^*)$ excludes the type II 2HDM charged Higgs boson with a 99.8% confidence level for any value of $\tan\beta/m_{H^+}$.



この現状を受けて、ここでは何を議論するか

どんな相互作用があれば説明できるか？

1. 模型に依らないセットアップから考えてみる

2. 実際の模型に当てはめて考えてみる

新物理の特徴がもっと分かりやすく現れる物理量はあるか？

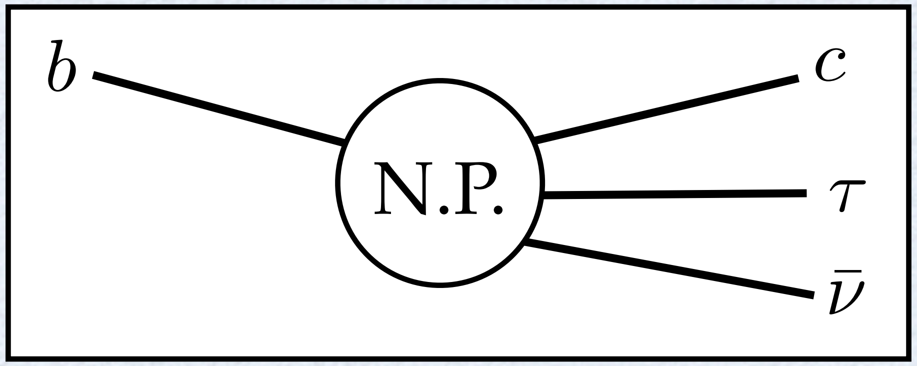
3. タウ粒子やD*粒子の偏極について注目してみる

4. 偏極を用いて何が出来るかを紹介してみる

どんな相互作用があれば説明できるか？

1. 模型に依らないセットアップから考えてみる

セットアップ



$$-\mathcal{L}_{\mathrm{eff}} = 2\sqrt{2}G_F V_{cb}\Big[(1+C_{V_1})\mathcal{O}_{V_1} + C_{V_2}\mathcal{O}_{V_2} + C_{S_1}\mathcal{O}_{S_1} + C_{S_2}\mathcal{O}_{S_2} + C_T\mathcal{O}_T\Big]$$

四点フェルミオン演算子（右巻きニュートリノは無視）

ベクトル１（SMと同じ）	$\mathcal{O}_{V_1} = \bar{c}_L\gamma^\mu b_L\,\bar{\tau}_L\gamma_\mu\nu_L$
ベクトル２（右巻きクォーク）	$\mathcal{O}_{V_2} = \bar{c}_R\gamma^\mu b_R\,\bar{\tau}_L\gamma_\mu\nu_L$
スカラー１	$\mathcal{O}_{S_1} = \bar{c}_L b_R\,\bar{\tau}_R\nu_L$
スカラー２	$\mathcal{O}_{S_2} = \bar{c}_R b_L\,\bar{\tau}_R\nu_L$
テンソル	$\mathcal{O}_T = \bar{c}_R\sigma^{\mu\nu} b_L\,\bar{\tau}_R\sigma_{\mu\nu}\nu_L$

Wilson係数

・SMとの大きさの比として定義

・一般的に議論するために複素数としておく

$$C_X = |C_X| e^{i\delta_X} \quad (X = V_{1,2},\ S_{1,2},\ T)$$

それぞれの演算子がどのような寄与を与えるかを見たい

とりあえず、

$$\boxed{\text{SMの演算子 + 新しい演算子一つ}}$$

で考えていく

分岐比への影響

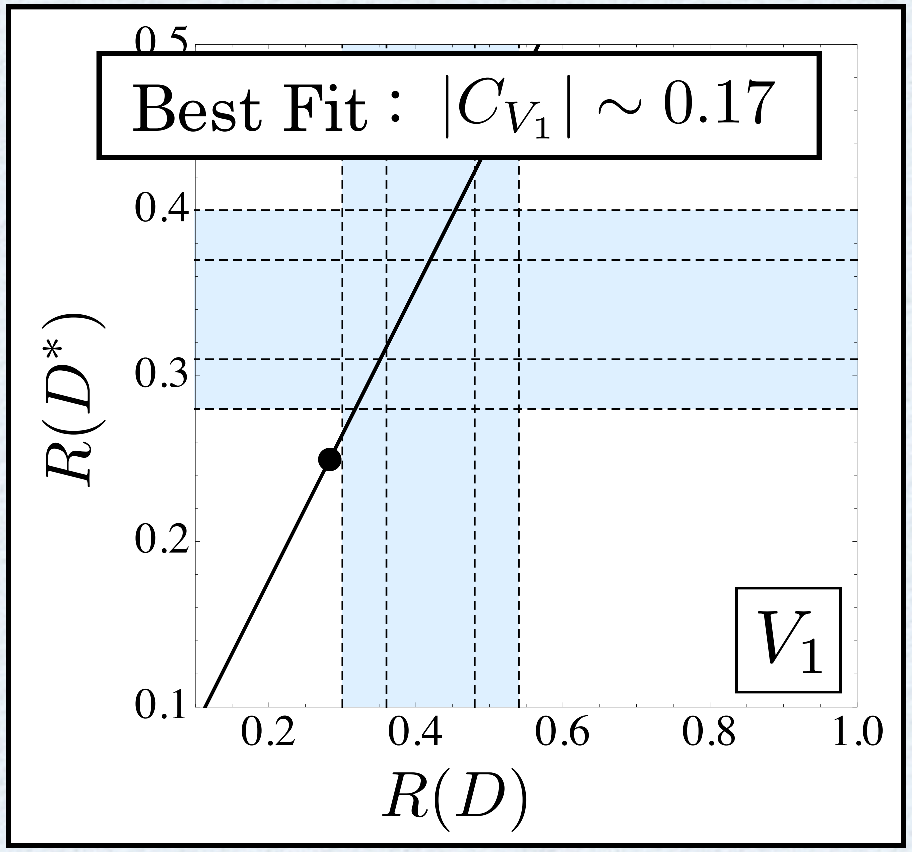
D＝擬スカラー　D*＝ベクトル　だったので、

$\bar{B} \to D$ と $\bar{B} \to D^*$ へ影響を与える度合いが演算子の種類ごとに異なる

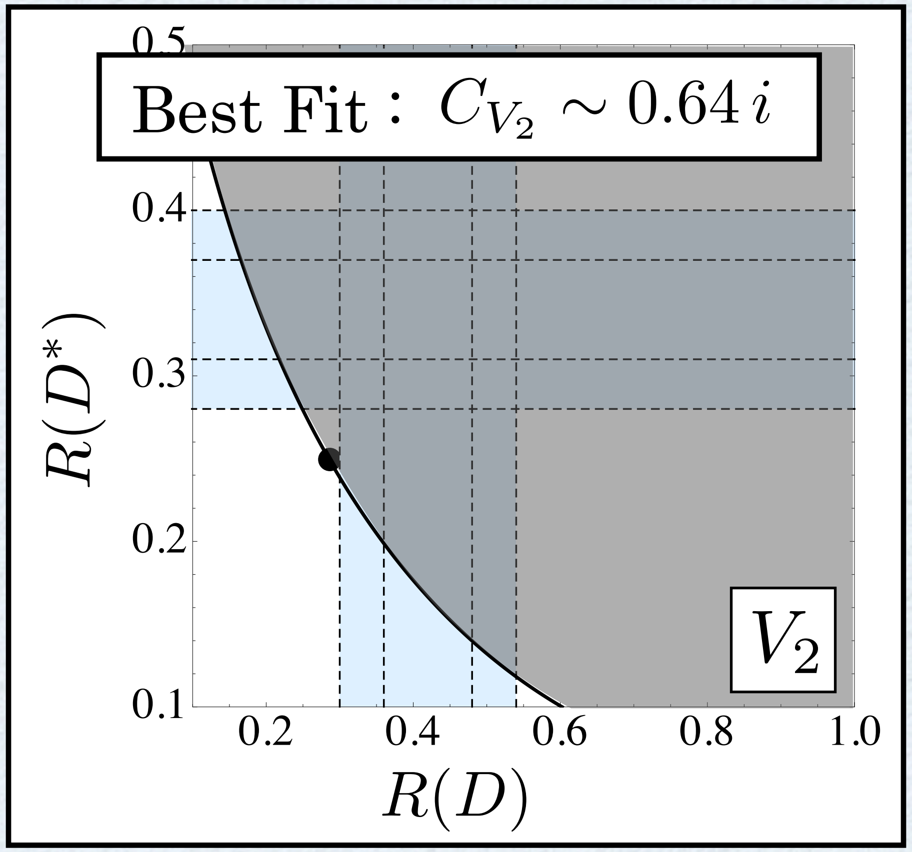
SM + ベクトル

● : SM prediction

$\mathcal{O}_{V_1} = \bar{c}_L \gamma^\mu b_L \, \bar{\tau}_L \gamma_\mu \nu_L$



$\mathcal{O}_{V_2} = \bar{c}_R \gamma^\mu b_R \, \bar{\tau}_L \gamma_\mu \nu_L$



分岐比への影響

D＝擬スカラー　D*＝ベクトル

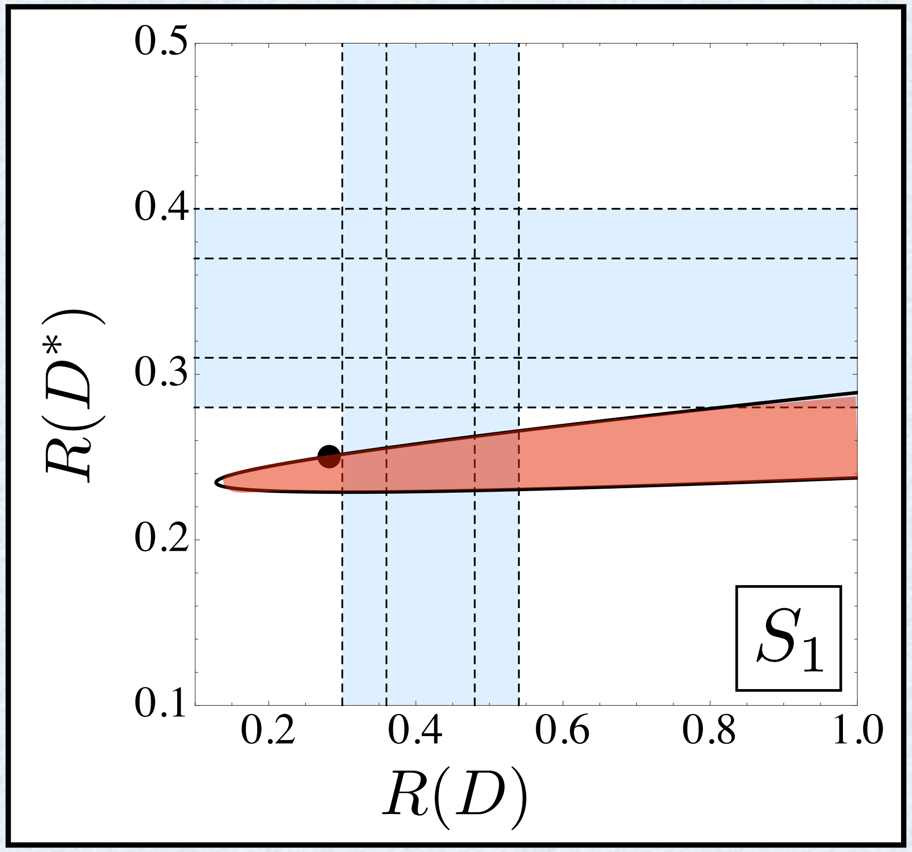
だったので、

$\bar{B} \to D$ と $\bar{B} \to D^*$ へ影響を与える度合いが演算子の種類ごとに異なる

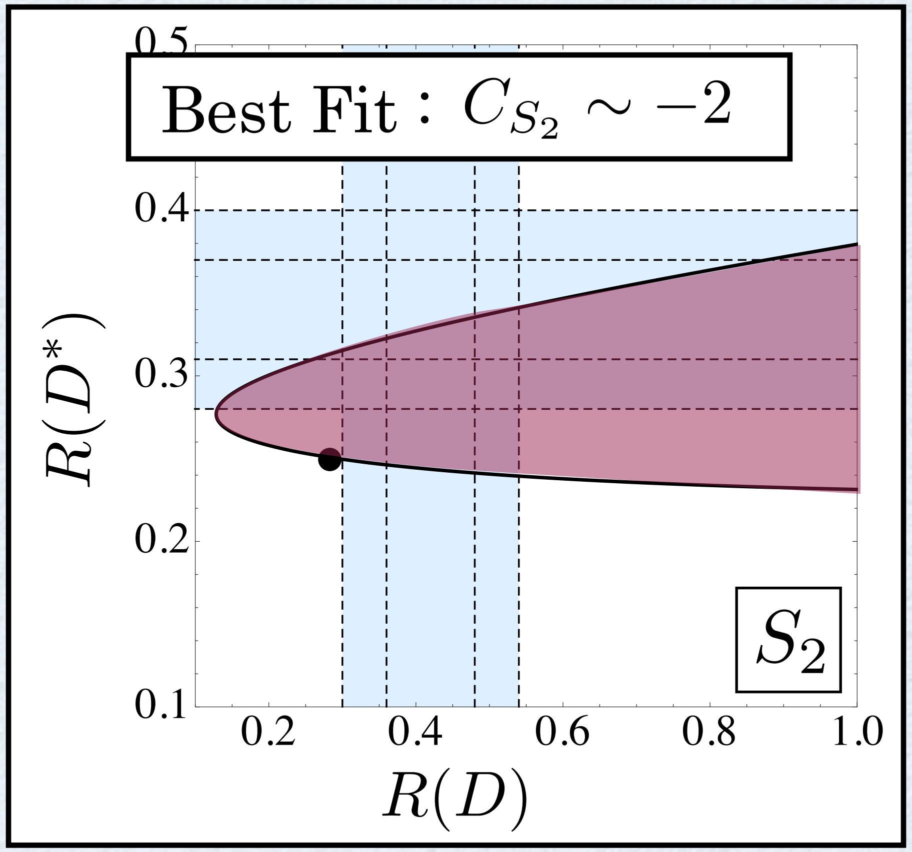
SM + スカラー

● : SM prediction

$\mathcal{O}_{S_1} = \bar{c}_L b_R \, \bar{\tau}_R \nu_L$



$\mathcal{O}_{S_2} = \bar{c}_R b_L \, \bar{\tau}_R \nu_L$



分岐比への影響

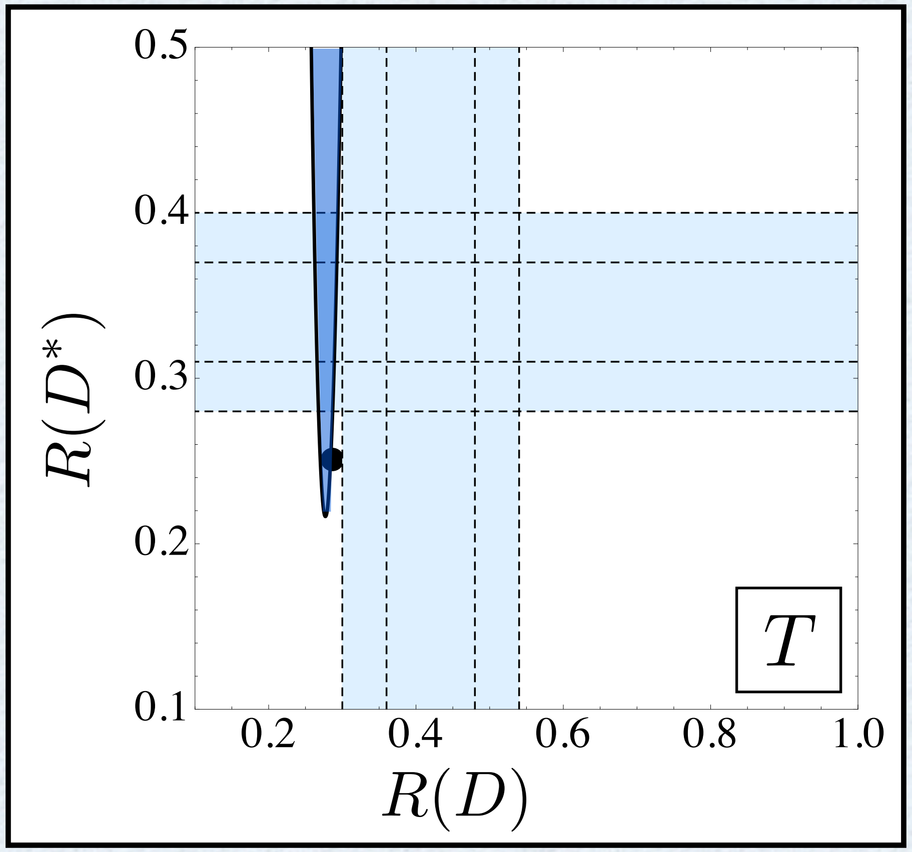
D＝擬スカラー　D*＝ベクトル　　だったので、

$\bar{B} \to D$ と $\bar{B} \to D^*$ へ影響を与える度合いが演算子の種類ごとに異なる

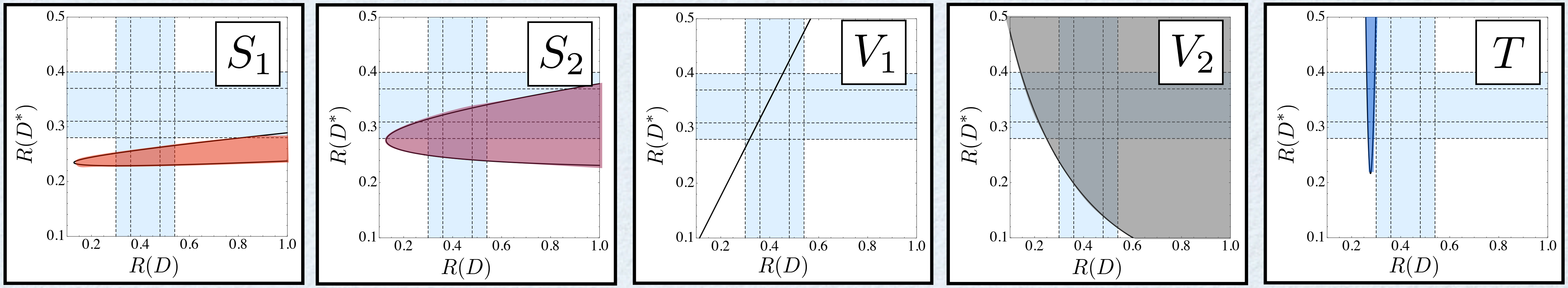
SM + テンソル

● : SM prediction

$$\mathcal{O}_T = \bar{c}_R \sigma^{\mu\nu} b_L \, \bar{\tau}_R \sigma_{\mu\nu} \nu_L$$



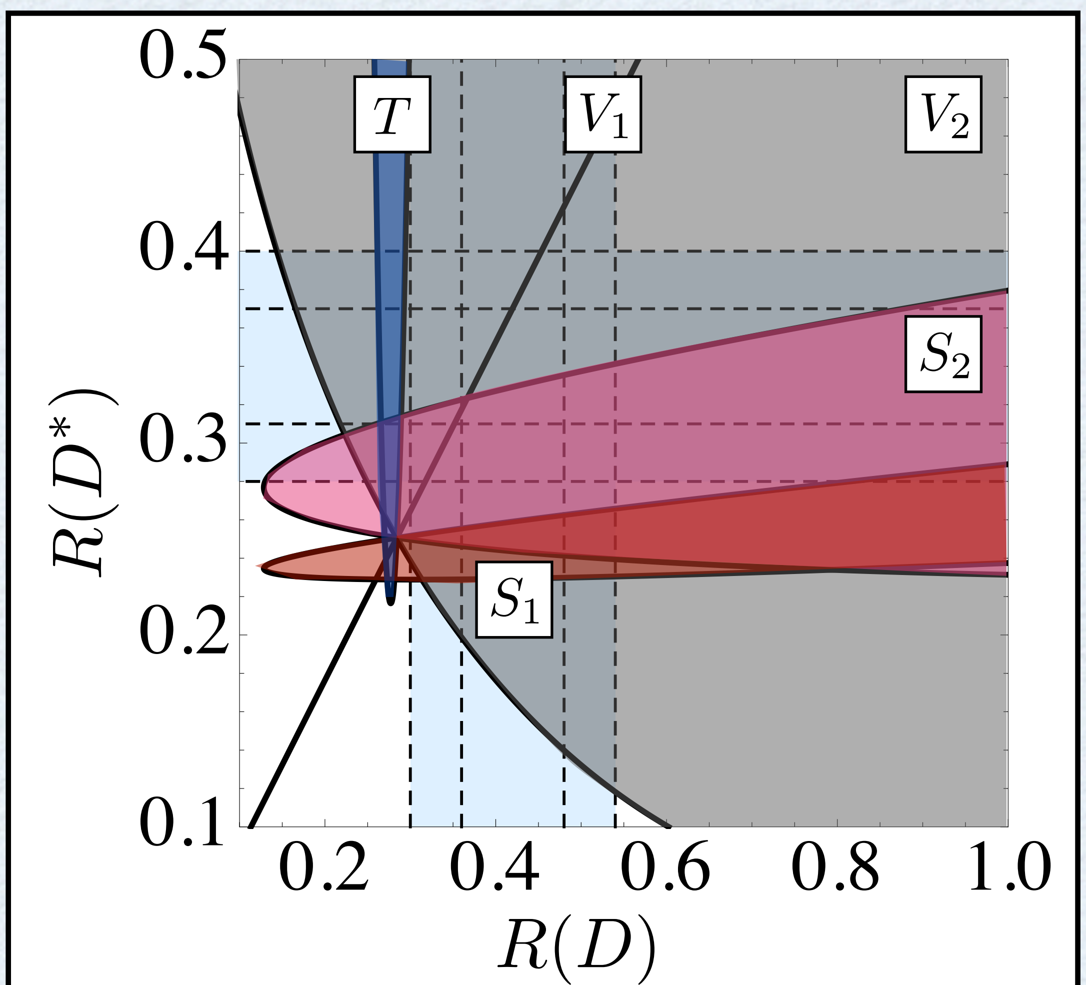
分岐比への影響（まとめ）



$R(D)$ に影響大

$R(D)$ と $R(D^*)$ で同程度

$R(D^*)$
に影響大



分かったこと

- ベクトル系なら両方いい感じ
- スカラーはS2なら頑張れる
- テンソルとS1は厳しい

どんな相互作用があれば説明できるか？

2. 実際の模型に当てはめて考えてみる

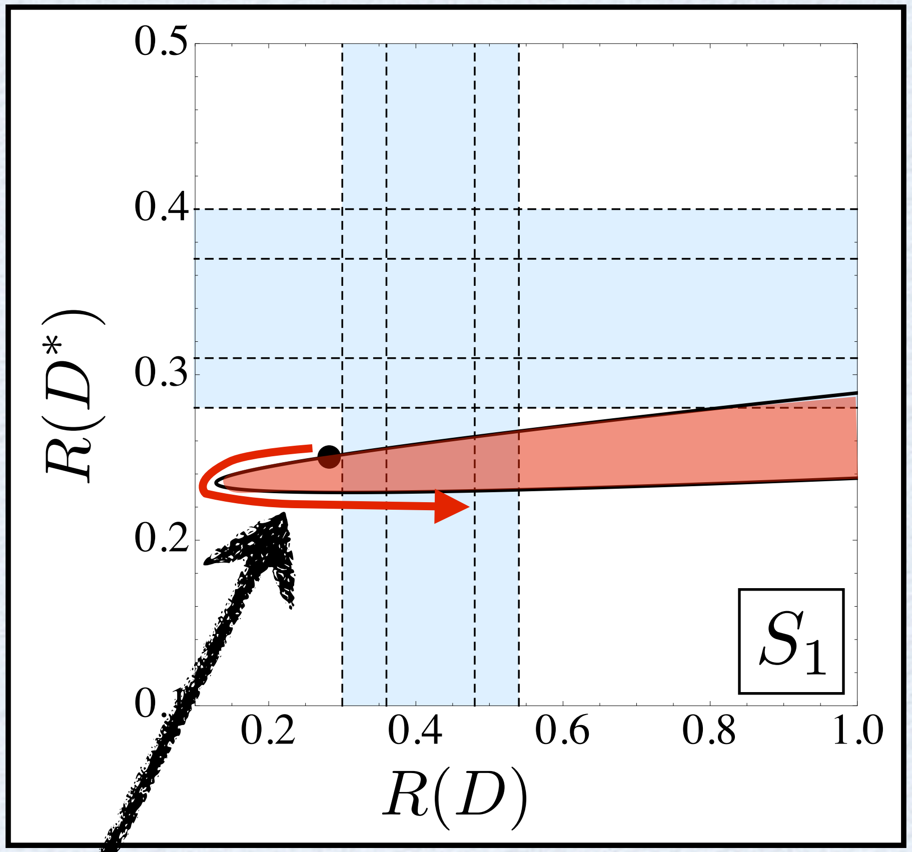
考えられる模型

2 Higgs Doublet Model (2HDM)

$$C_{S_1} = -\frac{m_b m_\tau}{m_{H^\pm}^2}\xi_d \qquad C_{S_2} = -\frac{m_c m_\tau}{m_{H^\pm}^2}\xi_u$$

Aoki, Kanemura, Tsumura, Yagyu(2009)

	Type I	Type II	Type X	Type Y
ξ_d	$\cot^2\beta$	$\tan^2\beta$	-1	-1
ξ_u	$-\cot^2\beta$	1	1	$-\cot^2\beta$



トップ湯川の制限により $\cot^2\beta$は大きくなれない

トップ湯川の制限により $\cot^2\beta$は大きくなれな

可能なのはS1が効く場合 だが、実験値とは合わない

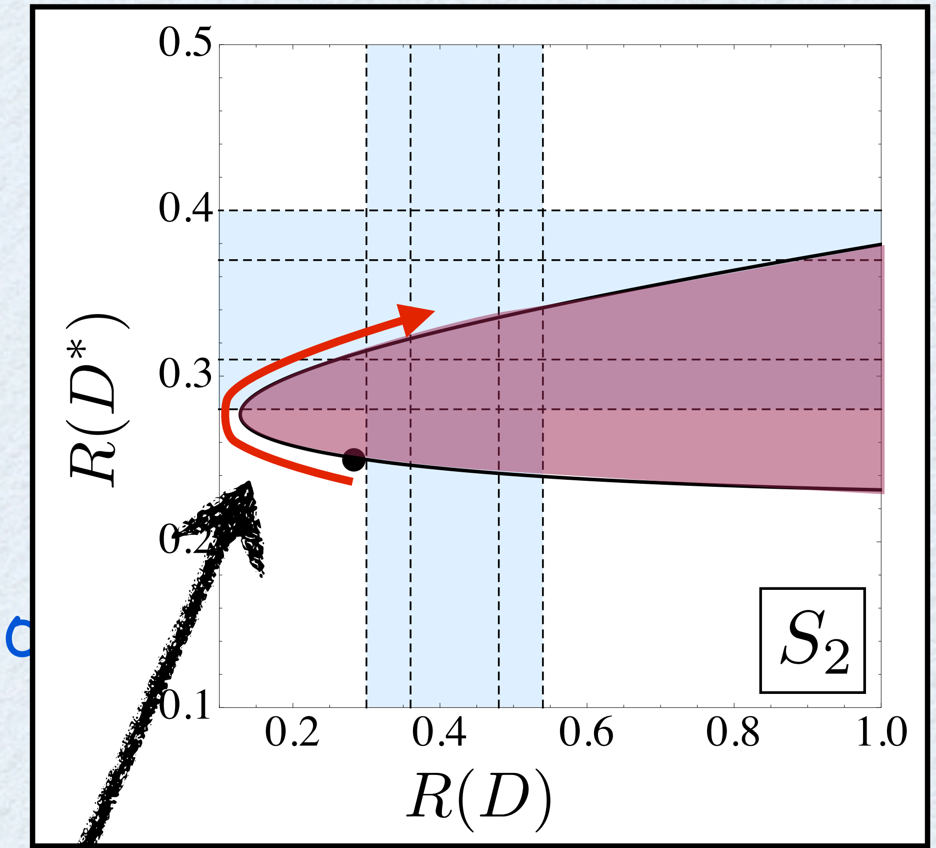
実験値を再現するには 荷電ヒッグスの質量が あまりにも小さすぎる

MSSM　　※ツリーでは2HDMのtype II

$$C_{S_1} = -\frac{m_b m_\tau}{m_{H^\pm}^2} \cdot \frac{\tan^2\beta}{(1+\Delta_e \tan\beta)(1+\Delta_d \tan\beta)}$$

$$C_{S_2} = -\frac{m_c m_\tau}{m_{H^\pm}^2} \cdot \frac{1}{1+\Delta_e \tan\beta}$$

Itoh, Komine, O



Δ_e, Δ_d：SUSY粒子のループ補正項（GluinoやBinoなど）

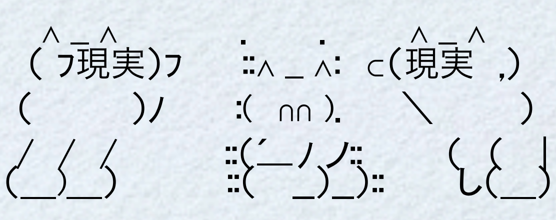
↓

すぐできる妄想：凄く奇抜な補正ならS2がメインに効いてきて説明できる

($\tan\beta \sim 1$ かつ $\Delta_e \tan\beta \gtrsim -1$ かつ $\Delta_d \tan\beta \gg 1$)

すぐわかる現実： 普通のMFVとかじゃ当然無理

(Soft breaking項を自由にすればあるいは)

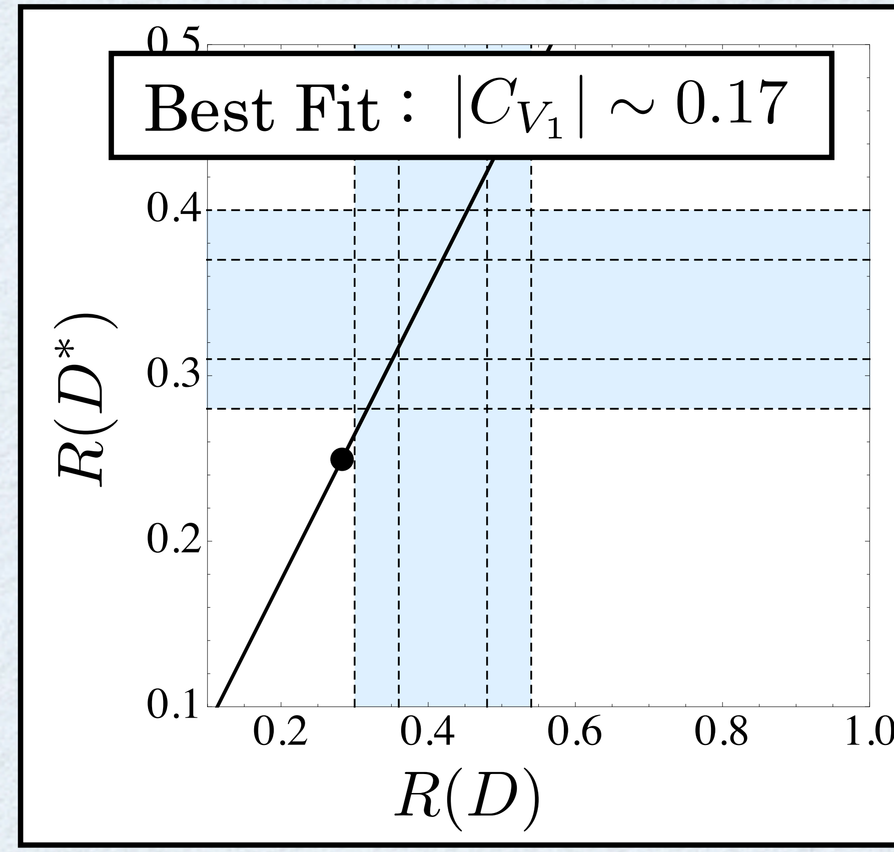


MSSM with R parity violation

$$W_{\mathrm{RPV}} = \frac{1}{2}\lambda_{ijk} L_i L_j E_k^c + \lambda'_{ijk} L_i Q_j D_k^c$$

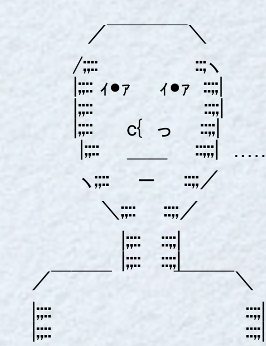
$$2\sqrt{2} G_F V_{cb}\, C_{S_1} = \sum_{j=1}^{3} \frac{\lambda_{3j3}\lambda'^{*}_{j23}}{2m^2_{\tilde{l}^j_L}}$$

$$2\sqrt{2} G_F V_{cb}\, C_{V_1} = -\sum_{j=1}^{3} \frac{\lambda'_{33j}\lambda'^{*}_{32j}}{16m^2_{\tilde{d}^j_R}}$$



V1が出る！が、C_{V_1} のbest fit値を λ' の言葉で読み替えると

$$\left|\sum_{j=1}^{3} \lambda'_{33j}\lambda'^{*}_{32j}\right| \sim 3.9 \quad (\, m_{\tilde{d}_R} = 1\mathrm{TeV}\text{ のとき})$$



かんたんなのまとめ

2 Higgs Doublet Model (2HDM)

S2が大きく効きそうなものは無い
Type IIだとS1の寄与が大きくなり得るが測定値とは合わない

MSSM

超対称粒子のループ補正が鍵になるかも？
ただし単純なSoft breakingでは無理そう

MSSM with R parity violation

V1が出てくるが、測定値を再現するには
大きなRPVのcouplingが必要（他の実験からの制限は無い）

Other model....

V2やS2の寄与が大きく出るような模型があれば教えて下さい

第一部・完

他の物理量を用いて新物理を見る

3. タウ粒子やD*粒子の偏極について注目してみる

謎のズレの原因を特定したい

タウ粒子の偏極

$$P_\tau(D) = \frac{\Gamma^+(D) - \Gamma^-(D)}{\Gamma^+(D) + \Gamma^-(D)} \qquad P_\tau(D^*) = \frac{\Gamma^+(D^*) - \Gamma^-(D^*)}{\Gamma^+(D^*) + \Gamma^-(D^*)}$$

$\Gamma^\pm(D)$: Decay rate of $\bar{B} \to D\tau\bar{\nu}$ with Tau helicity $\pm\frac{1}{2}$

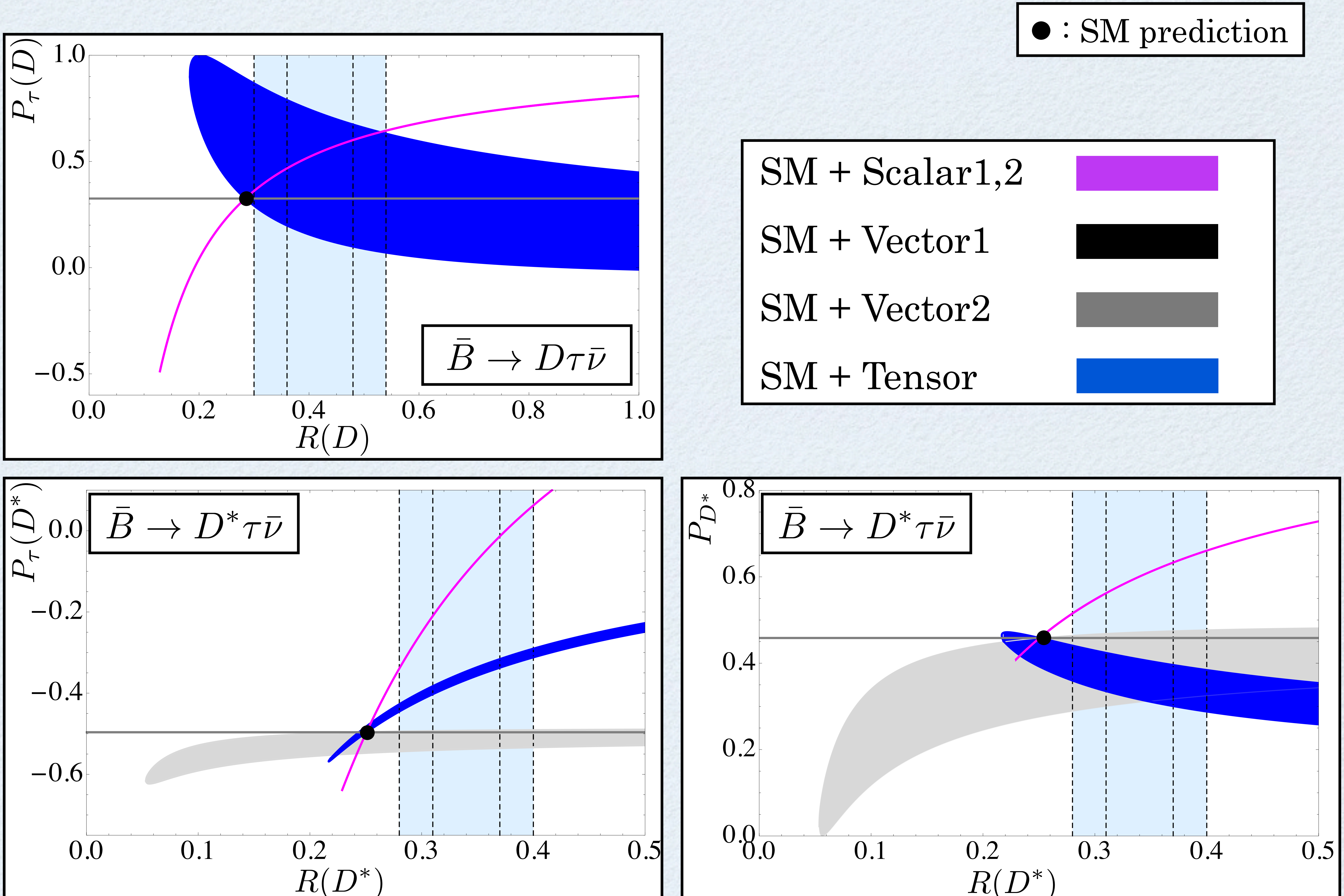
測定可能な量（詳細略）　Tanaka, Watanabe (2010)

D*粒子の偏極

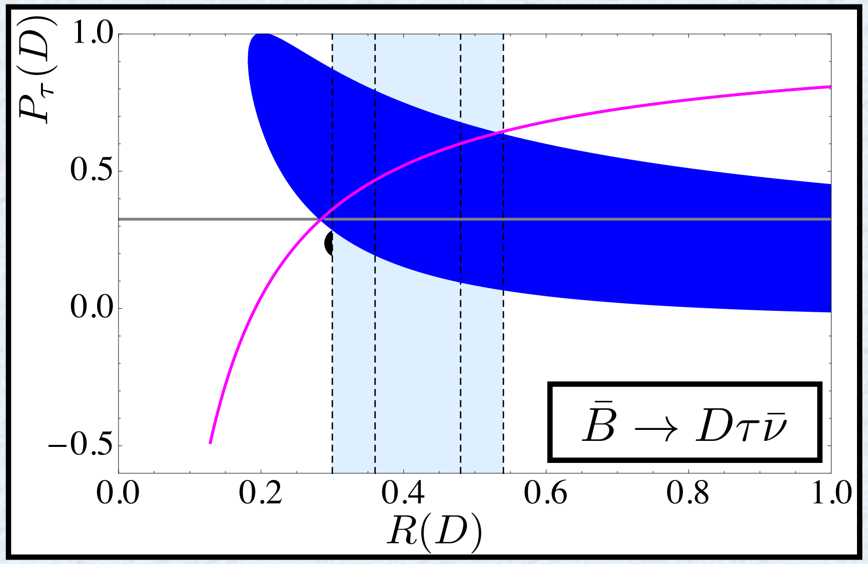
$$P_{D^*} = \frac{\Gamma_L(D^*)}{\Gamma_T(D^*) + \Gamma_L(D^*)}$$

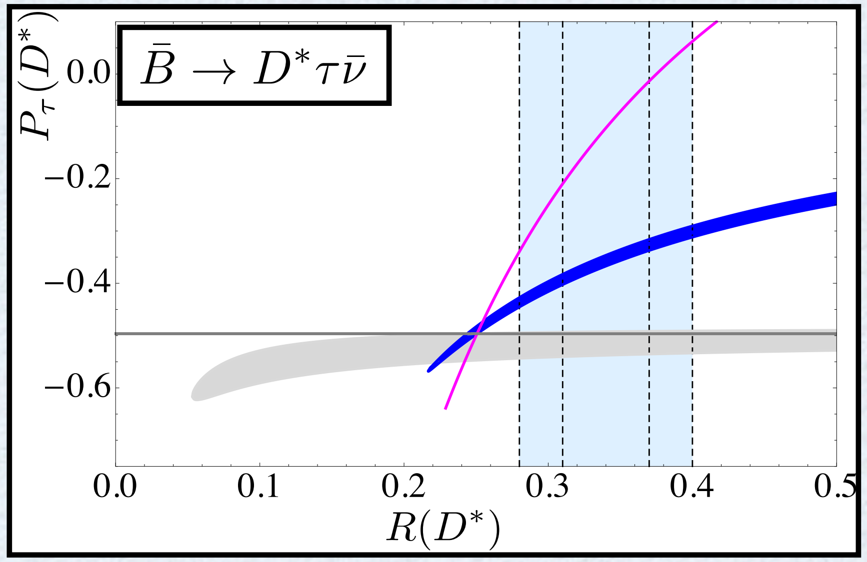
$\Gamma_{T/L}(D^*)$: Decay rate of $\bar{B} \to D^*_{T/L}\tau\bar{\nu}$

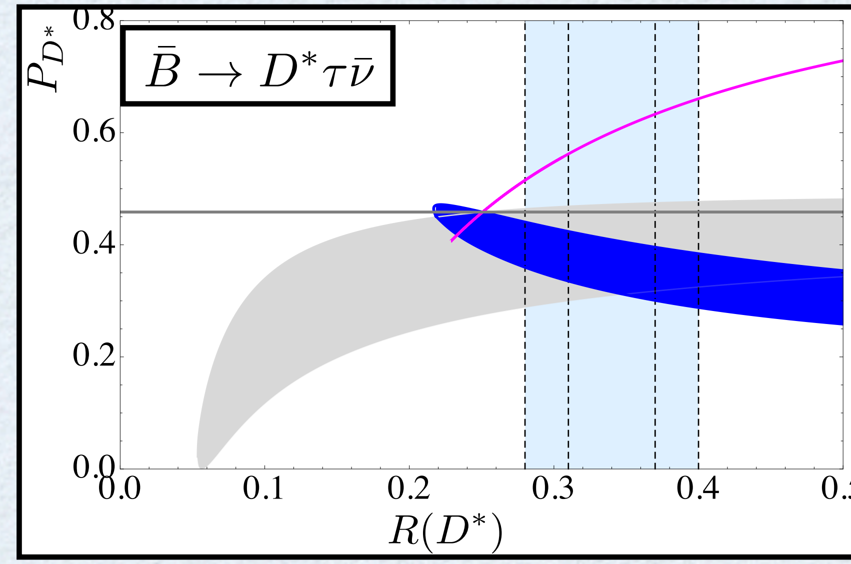
分岐比と偏極の間の関係



振る舞いを考察してみる







SM + Scalar1

SM + Scalar2

$\Gamma^-(D),\ \Gamma^-(D^*),\ \Gamma_T(D^*)$: スカラーの寄与が無い

→ $$R \propto \frac{1}{1-P}$$

SM + Vector1

SM + Vector2 $(\bar{B} \to D\tau\bar{\nu})$

$\Gamma^\pm(D),\ \Gamma^\pm(D^*),\ \Gamma_{T/L}(D^*)$: 全体の係数が変わるだけ

→ 偏極は標準模型と同じになる

SM + Vector2 $(\bar{B} \to D^*\tau\bar{\nu})$

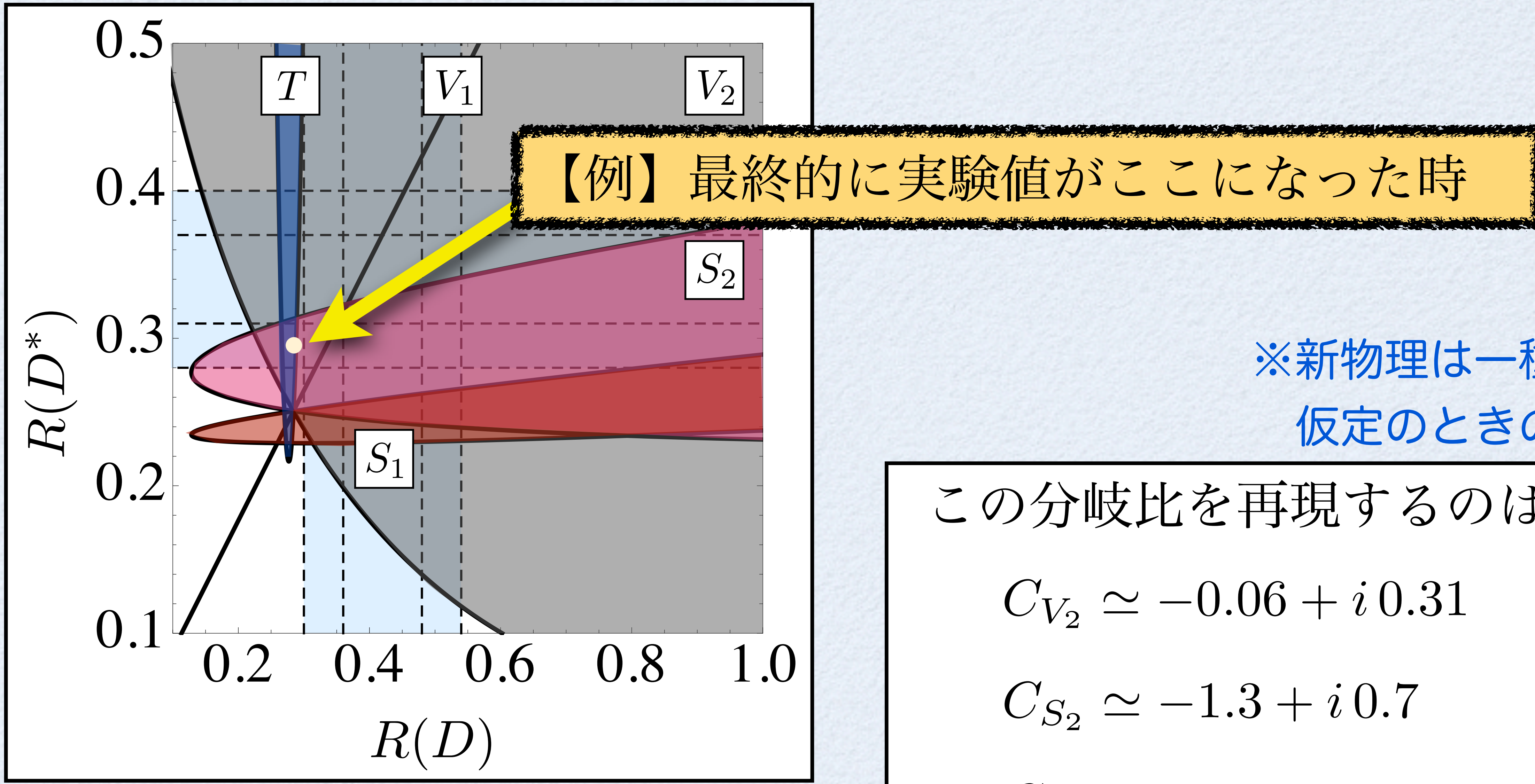
SM + Tensor

特になし

他の物理量を用いて新物理を見る

4. 偏極を用いて何が出来るかを紹介してみる

分岐比だけを見ていても出来ない事



※新物理は一種類という
仮定のときのお話です

この分岐比を再現するのは、

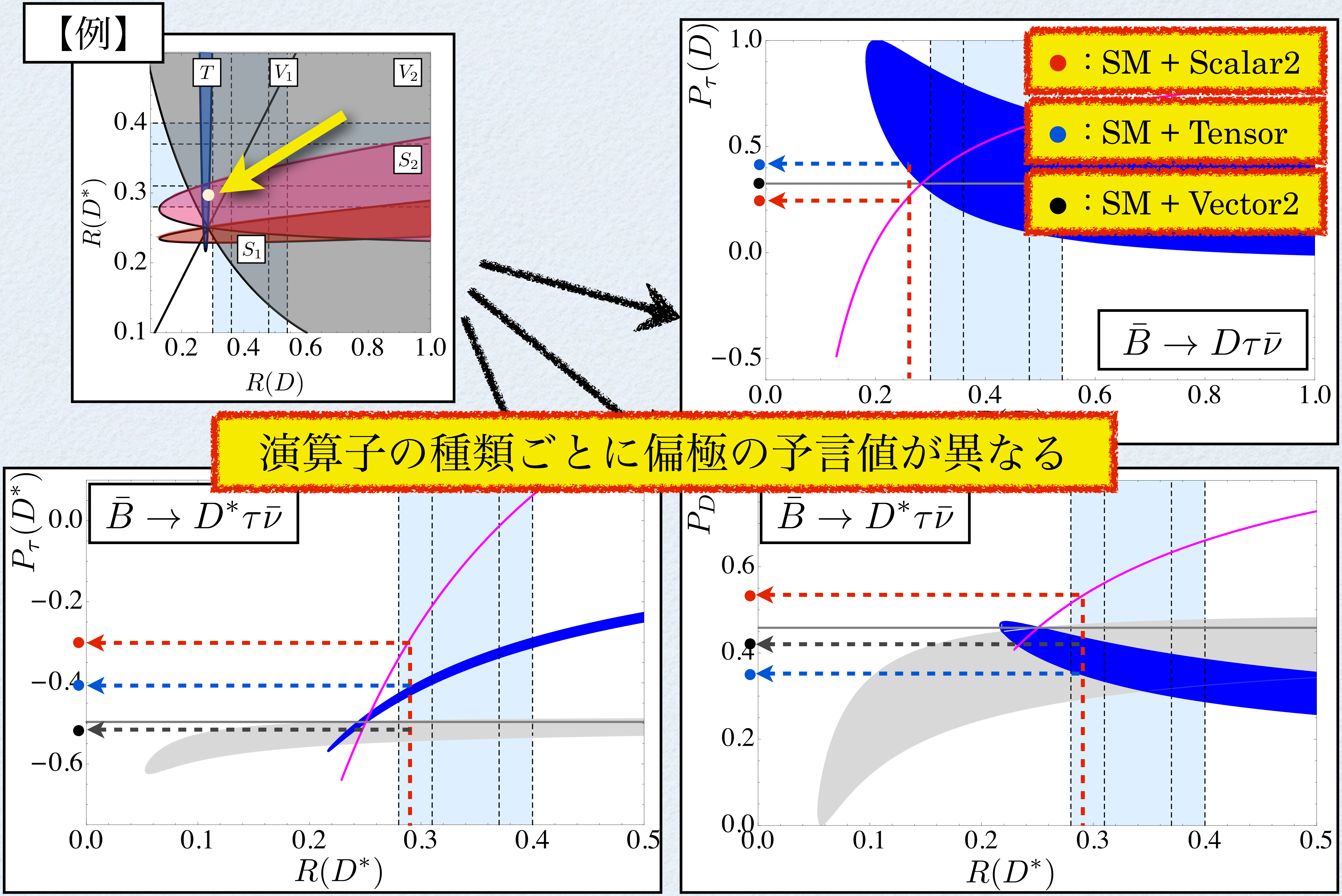
$$C_{V_2} \simeq -0.06 + i\,0.31$$

$$C_{S_2} \simeq -1.3 + i\,0.7$$

$$C_T \simeq -0.015 + i\,0.036$$

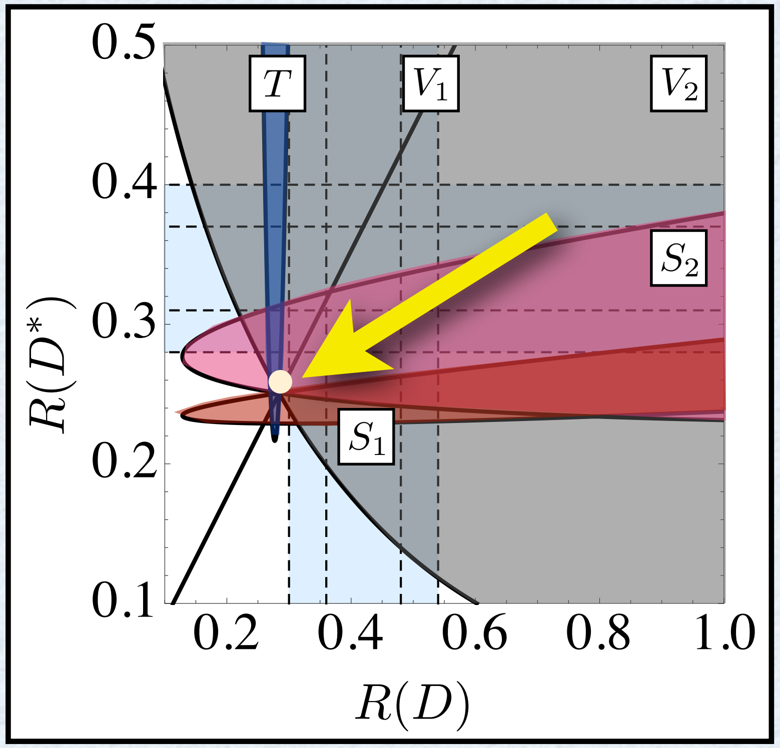
のどれか、までしか分からない

効いてる演算子を見分ける！



かんたんなのまとめ

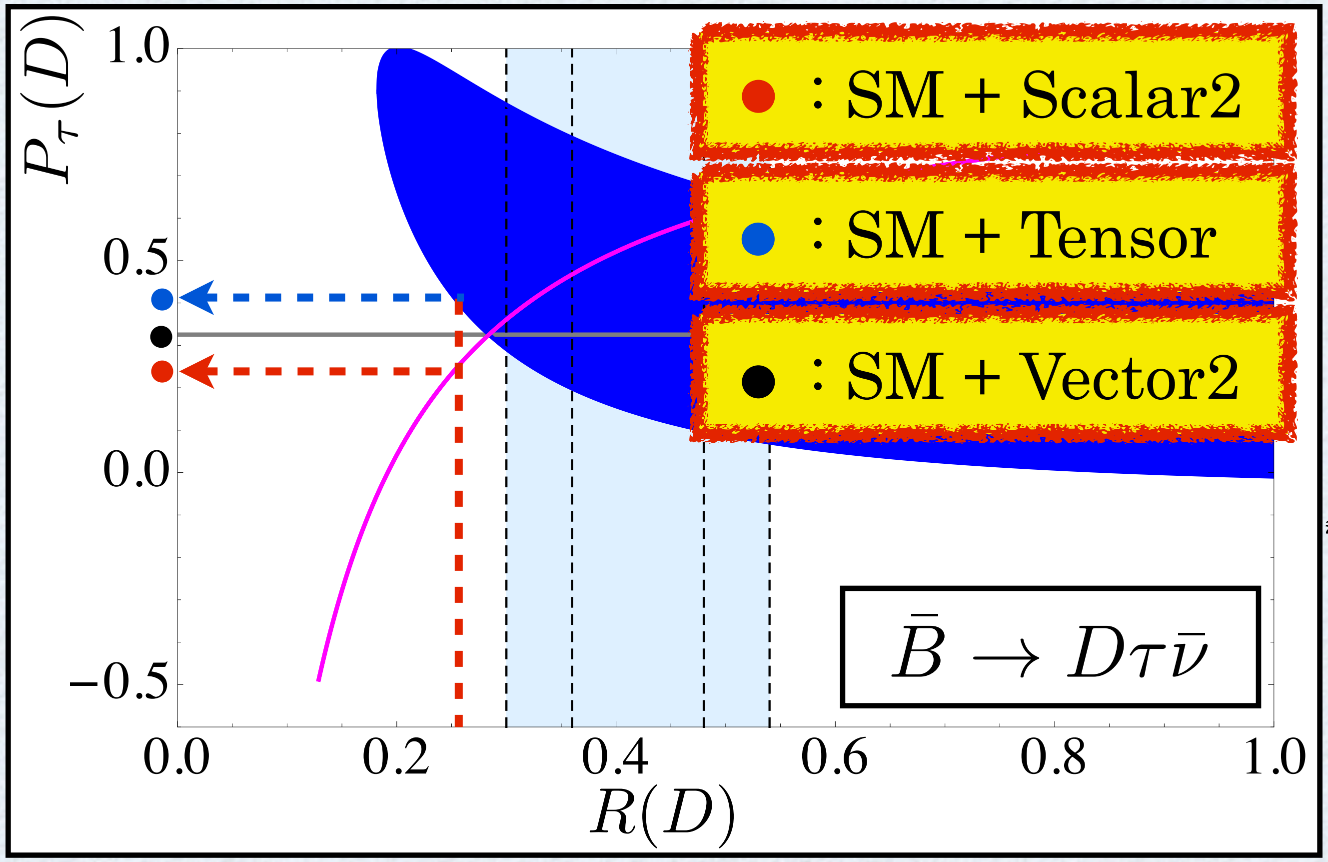
偏極を見れば、効いてる演算子を見分ける事ができるかも？



$$C_{V_2} \simeq -0.06 + i\,0.31 \ \text{ or}$$

$$C_{S_2} \simeq -1.3 + i\,0.7 \ \text{ or}$$

$$C_T \simeq -0.015 + i\,0.036 \ ?$$

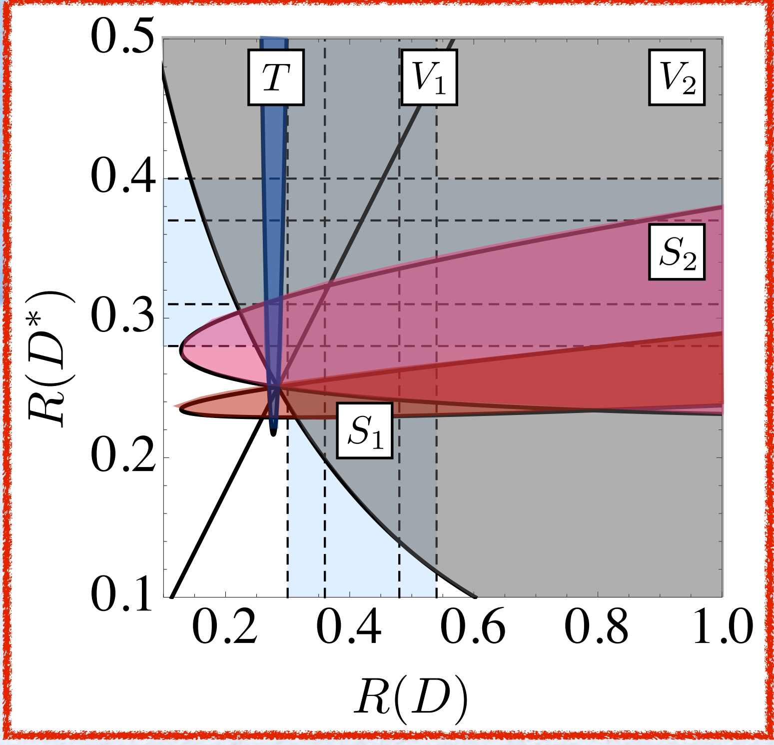


偏極測ればOK

結論・まとめ

どんな相互作用があれば説明できるか？

1. 模型に依らないセットアップから考えてみる



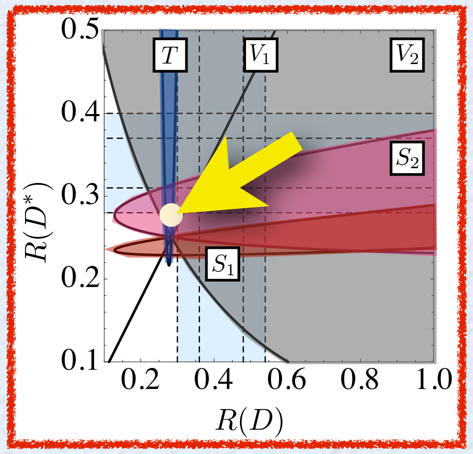
2. 実際の模型に当てはめて考えてみる

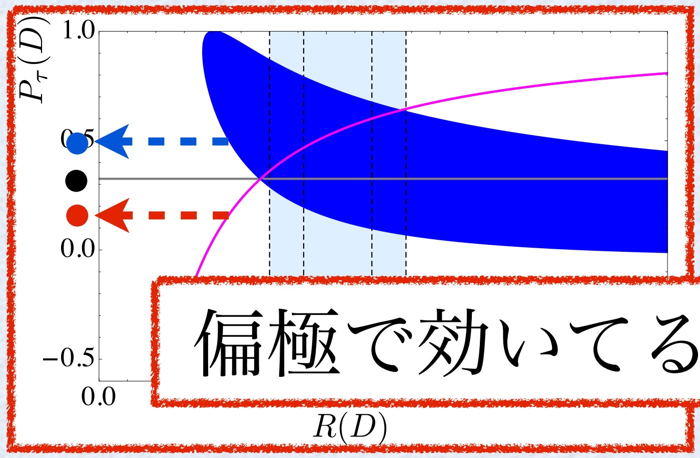
しっくりくる模型が無さそう？

新物理の特徴がもっと分かりやすく現れる物理量はあるか？

3. タウ粒子やD*粒子の偏極について注目してみる

4. 偏極を用いて何が出来るかを紹介してみる





偏極で効いてる演算子の区別がつくかも

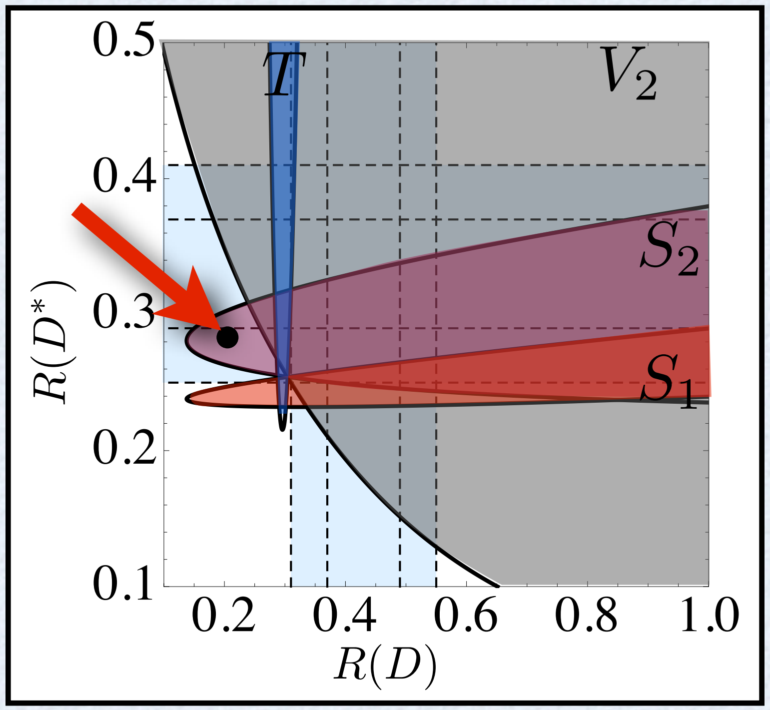
糸冬

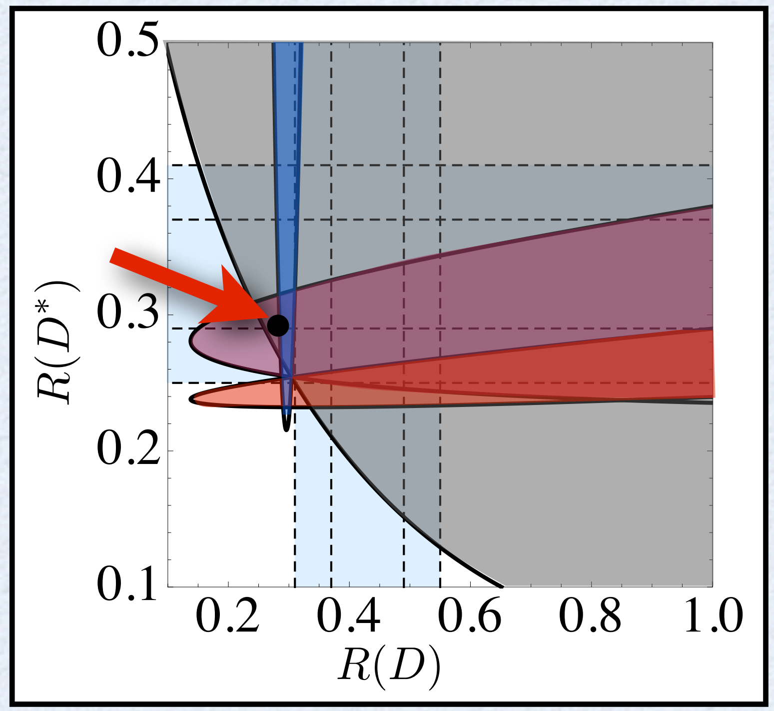
制作・著作 NABE

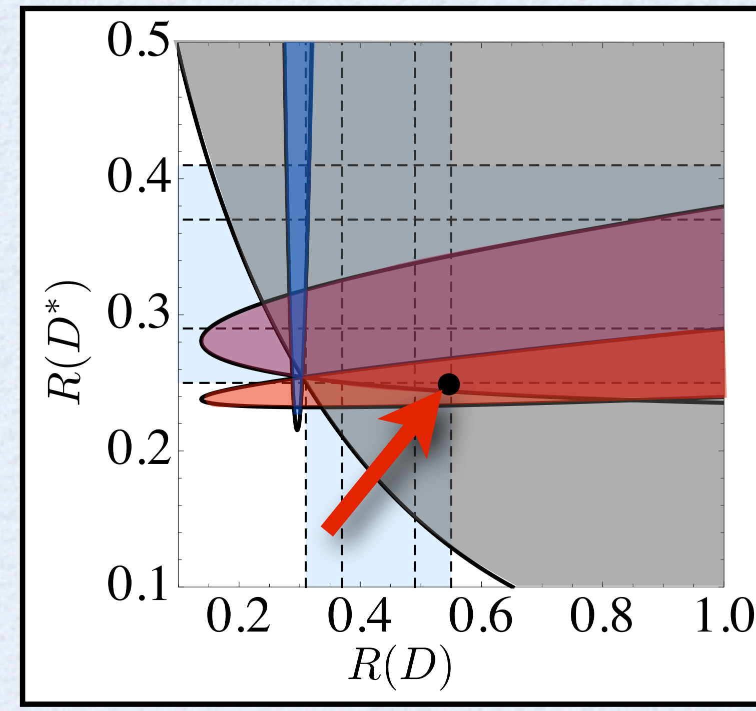
Back up

Analysis : summary (1) + (2)

Three particular situations







Completely distinguished

This can be the case for S2

Partly distinguished (1)

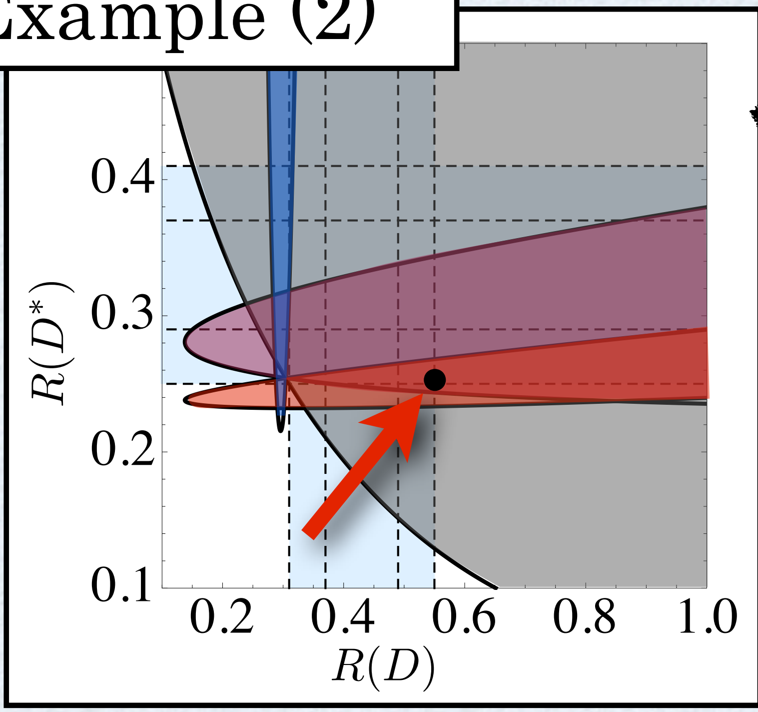
This can be the case for S2, V2, or T

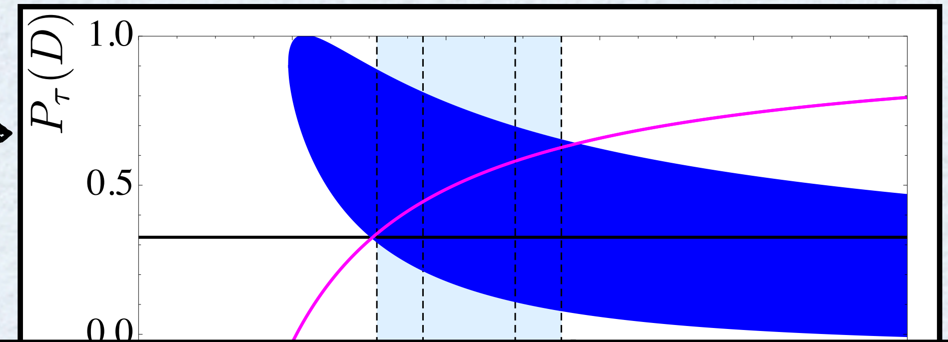
Partly distinguished (2)

This can be the case for S1, S2, or V2

Partly distinguished by R(D) and R(D*)

Example (2)

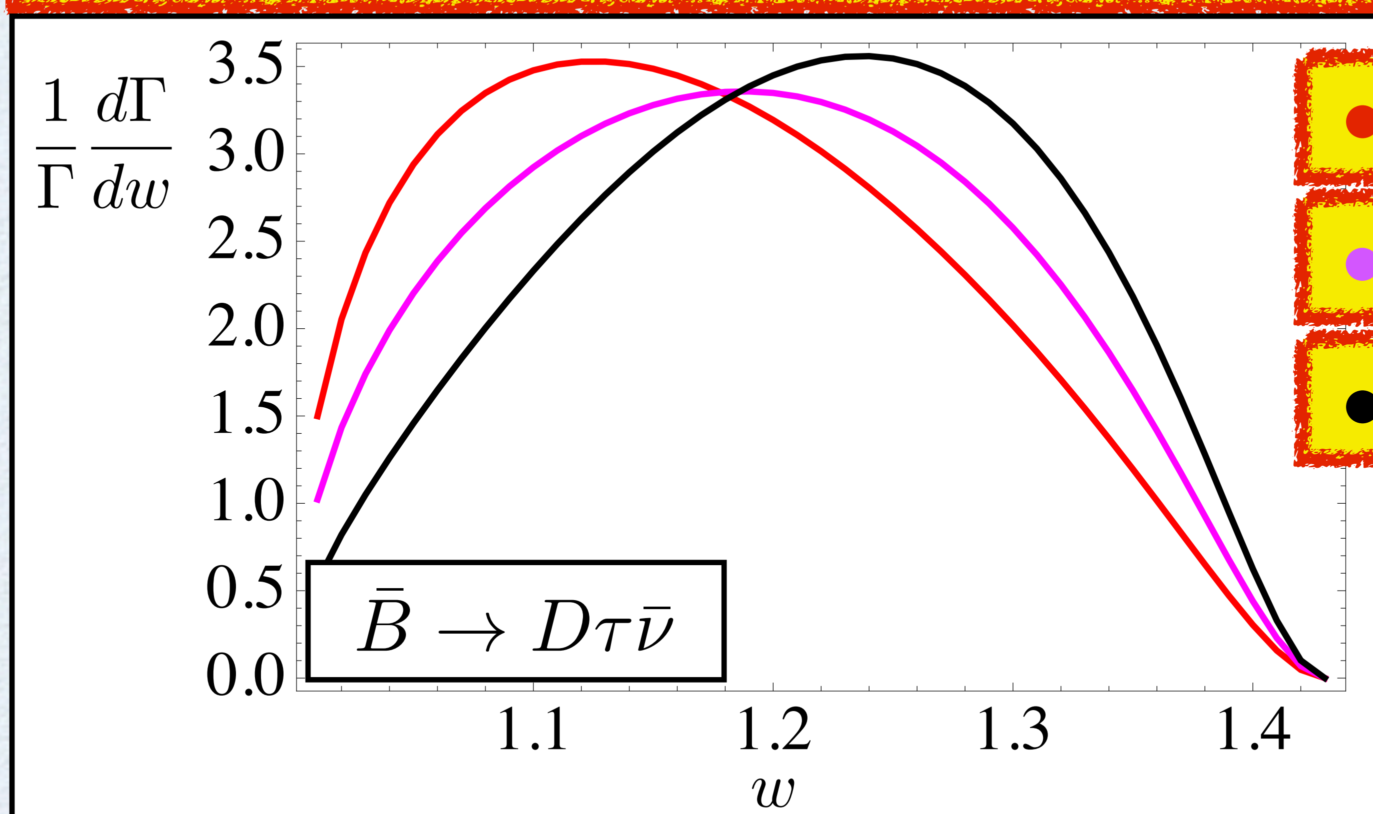




$|C_{S_1}| \simeq 1.6,\ \delta_{S_1} \simeq 2.2$ | $|C_{S_2}| \simeq 0.7,\ \delta_{S_2} \simeq 1.1$

But, Wilson coefficients are different in the case between S1 and S2

Therefore, decay distribution have different shape between them



● : SM + Scalar1

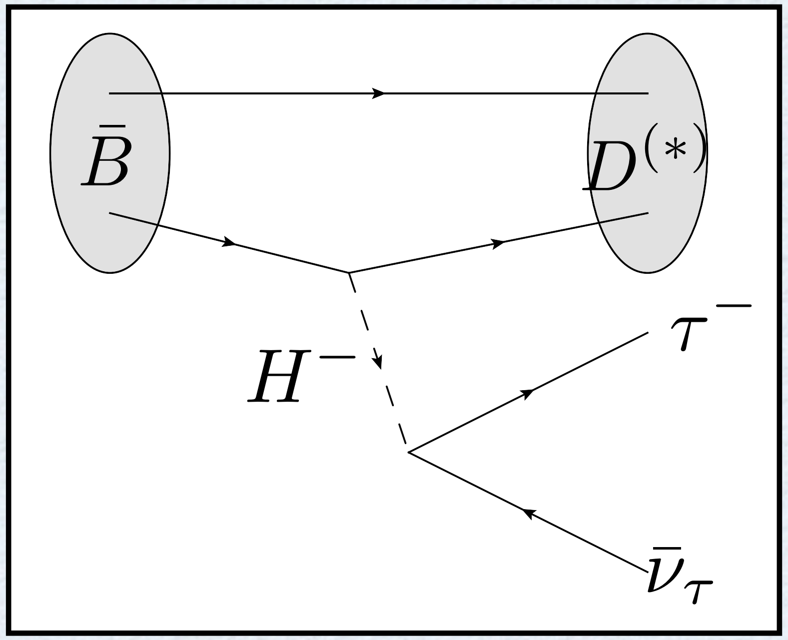
● : SM + Scalar2

● : SM + Vector2

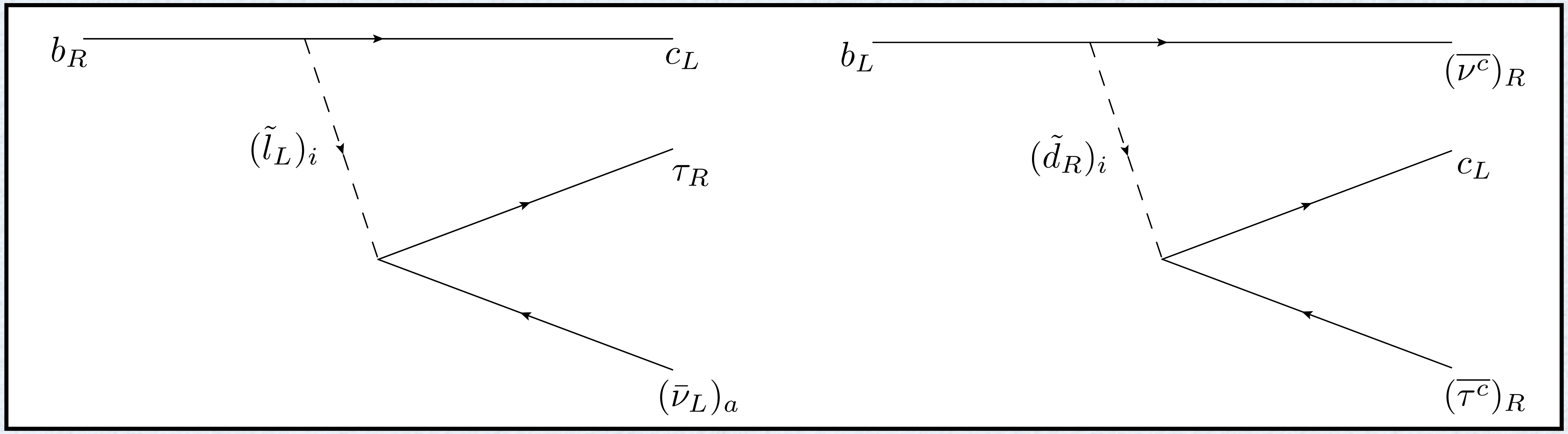
$$w = \frac{p_B \cdot p_D}{m_B m_D}$$

Possible new physics models

Ex.1 : Charged Higgs



Ex.2 : MSSM with R parity violation



MSSM　　※ツリーでは2HDMのtype II

$$C_{S_1} = -\frac{m_b m_\tau}{m_{H^\pm}^2} \cdot \frac{\tan^2\beta}{(1+\Delta_e \tan\beta)(1+\Delta_d \tan\beta)}$$

$$C_{S_2} = -\frac{m_c m_\tau}{m_{H^\pm}^2} \cdot \frac{1}{1+\Delta_e \tan\beta}$$

Itoh, Komine, Okada (2010)

$$\Delta_e = \frac{m_Z^2 - m_W^2}{4v^2\pi^2}\, \mu M_{\tilde{B}}\, f(M_{\tilde{B}}, M_{\tilde{L}_L}, M_{\tilde{L}_R})$$

$$\Delta_d = \frac{2\alpha_s}{3\pi}\, \mu^* M_{\tilde{g}}\, f(M_{\tilde{g}}, M_{\tilde{D}_L}, M_{\tilde{D}_R})$$

$$f(a,b,c) = \frac{a^2 b^2 \ln\frac{a^2}{b^2} + b^2 c^2 \ln\frac{b^2}{c^2} + c^2 a^2 \ln\frac{c^2}{a^2}}{(a^2-b^2)(b^2-c^2)(c^2-a^2)}$$

Vector operators

$\mathcal{O}_{V_1} = \bar{c}_L \gamma^\mu b_L \, \bar{\tau}_L \gamma_\mu \nu_L \qquad \mathcal{O}_{V_2} = \bar{c}_R \gamma^\mu b_R \, \bar{\tau}_L \gamma_\mu \nu_L$

$\boxed{\bar{B} \to D\tau\bar{\nu}}$

$$\langle D | \bar{c}\gamma^\mu \gamma^5 b | \bar{B} \rangle = 0 \longrightarrow \boxed{\langle D\tau\bar{\nu} | \mathcal{O}_{V_1} | \bar{B} \rangle = \langle D\tau\bar{\nu} | \mathcal{O}_{V_2} | \bar{B} \rangle}$$

$\boxed{\bar{B} \to D^*\tau\bar{\nu}}$

$$\langle D^* | \bar{c}\gamma^\mu \gamma^5 b | \bar{B} \rangle \gg \langle D^* | \bar{c}\gamma^\mu b | \bar{B} \rangle$$

$$\longrightarrow \boxed{\langle D^*\tau\bar{\nu} | \mathcal{O}_{V_1} | \bar{B} \rangle \sim -\langle D^*\tau\bar{\nu} | \mathcal{O}_{V_2} | \bar{B} \rangle}$$

<u>Scalar operators</u>

$\mathcal{O}_{S_1} = \bar{c}_L b_R \, \bar{\tau}_R \nu_L$ $\qquad$ $\mathcal{O}_{S_2} = \bar{c}_R b_L \, \bar{\tau}_R \nu_L$

$\boxed{\bar{B} \to D\tau\bar{\nu}}$

$$\langle D|\bar{c}\gamma^5 b|\bar{B}\rangle = 0 \quad \longrightarrow \quad \boxed{\langle D\tau\bar{\nu}|\mathcal{O}_{S_1}|\bar{B}\rangle = \langle D\tau\bar{\nu}|\mathcal{O}_{S_2}|\bar{B}\rangle}$$

$\boxed{\bar{B} \to D^*\tau\bar{\nu}}$

$$\langle D^*|\bar{c}b|\bar{B}\rangle = 0 \quad \longrightarrow \quad \boxed{\langle D^*\tau\bar{\nu}|\mathcal{O}_{S_1}|\bar{B}\rangle = -\langle D^*\tau\bar{\nu}|\mathcal{O}_{S_2}|\bar{B}\rangle}$$

Tau polarization is useful but,

- How is it measured ?
- Capability of new physics search ?

Identification of tau

τ in $\bar{B} \to D\tau\bar{\nu}_\tau$ is identified by $\tau \to \pi\nu$ or $\tau \to l\nu\bar{\nu}$

$\longrightarrow$ $\tau \to \pi\nu \;:\; N \sim 70$

$\tau \to l\nu\bar{\nu} \;:\; N \sim 100$

@B factory

BABAR(2008), Belle (2009)

How to measure tau polarization

$$\frac{d\Gamma}{dq^2 dz}(\bar{B} \to D\tau\bar{\nu} \to \cdots) = \frac{d\Gamma}{dq^2}(\bar{B} \to D\tau\bar{\nu}) \times \underline{F(\cdots)}$$

$$\boxed{\begin{array}{l} \tau \to \pi\nu \\ \tau \to l\nu\bar{\nu} \end{array}}$$

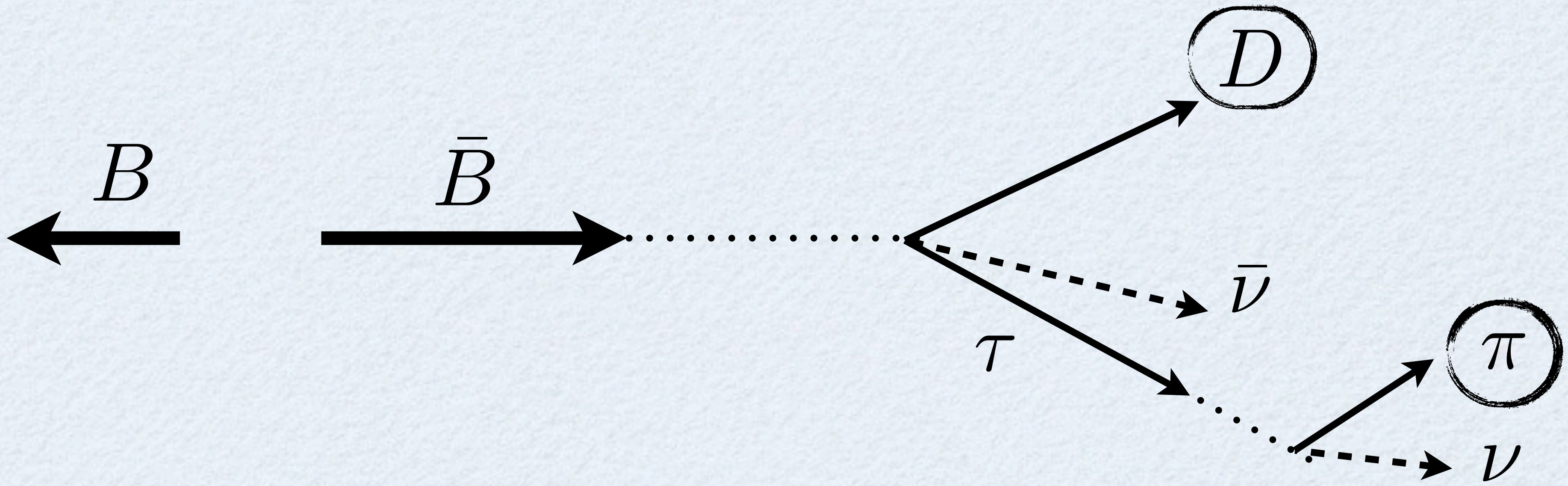
$$q^2 = (p_B - p_D)^2$$

$$z = \frac{E_{\pi(l)}}{E_\tau}$$

We know it in rest frame of q^2

$$\underline{F(\cdots)} = Br(\cdots)\Big[f(z,q^2) + P_\tau(q^2)g(z,q^2)\Big]$$

$$\boxed{\int f(z,q^2)dz = 1, \quad \int g(z,q^2)dz = 0}$$



- In rest frame of q^μ
- $p^\mu_{\bar{B}},\ p^\mu_D \ \rightarrow\ q^2,\ E_\tau$
- $E_\tau,\ E_{\pi(l)} \ \rightarrow\ z$

$\Downarrow$

Tau polarization can be determined by pion (or lepton) energy distribution of the decay rate of this chain.

Estimation of statistical error of tau polarization

$$\delta P_\tau = \frac{1}{S\sqrt{N}} \qquad P_\tau = P_{\tau 0} \pm \delta P_\tau$$

N : # of event for $\bar{B} \to D\tau\bar{\nu} \to \cdots$

$N_{(\pi)} \sim 70, \quad N_{(l)} \sim 100$ ⟵ B factory

$N_{(\pi)} \sim 2000, \quad N_{(l)} \sim 3000$ ⟵ super B factory

S : "sensitivity"

$$S^2 = \int dz \frac{g^2}{f + P_\tau g}$$

$$\boxed{S_{(\pi)} \sim 0.6, \quad S_{(l)} \sim 0.2}$$

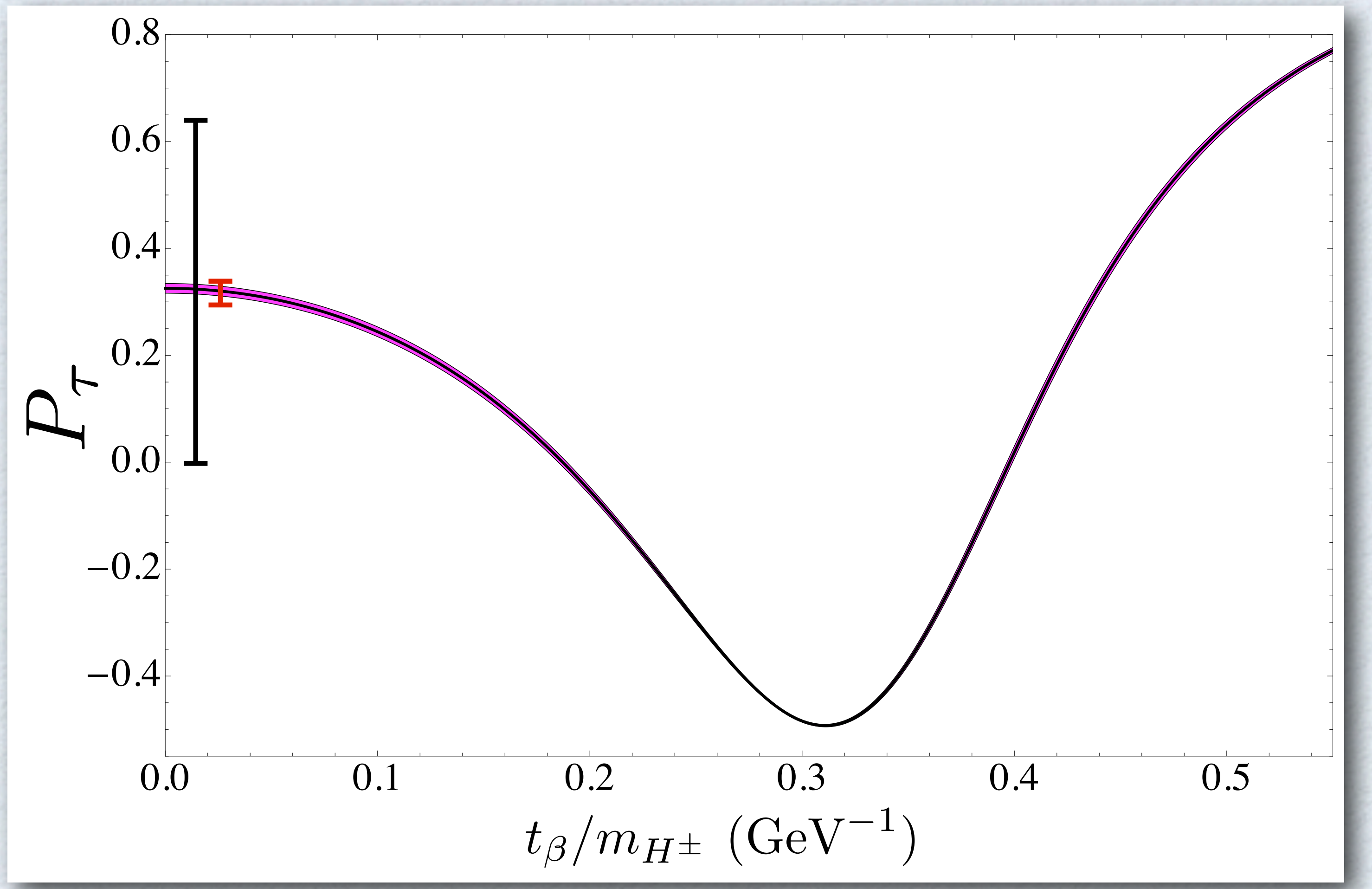
Estimation of statistical error of tau polarization

$$\delta P_\tau = \frac{1}{S\sqrt{N}} \qquad P_\tau = P_{\tau 0} \pm \delta P_\tau$$

Super B factory :

$\delta P_{\tau(\pi)} \sim 0.04,\ \delta P_{\tau(l)} \sim 0.08$

We may see $H^\pm$ effect



: Error @ B factory

: Error @ super B factory

Form Factors (Tensor)

$\bar{B} \to D\tau\bar{\nu}$

$$\langle D(p_D)|\bar{c}\sigma^{\mu\nu}b|\bar{B}(p_B)\rangle = iT(q^2)(p_B^\mu p_D^\nu - p_B^\nu p_D^\mu)$$

$$\langle D(p_D)|\bar{c}\sigma^{\mu\nu}\gamma^5 b|\bar{B}(p_B)\rangle = T(q^2)\epsilon^{\mu\nu\alpha\beta}p_{D\alpha}p_{B\beta}$$

$\bar{B} \to D^*\tau\bar{\nu}$

$$\begin{aligned}\langle D^*(p_D)|\bar{c}\sigma^{\mu\nu}b|\bar{B}(p)\rangle = \epsilon^{\mu\nu\alpha\beta}[&T_1\varepsilon^*_\alpha p_{B\beta} \\ &+T_2\varepsilon^*_\alpha p_{D\beta} + T_3(\varepsilon^*\cdot p_B)p_{B\alpha}p_{D\beta}]\end{aligned}$$

$$\langle D^*(p_D)|\bar{c}\sigma^{\mu\nu}\gamma^5 b|\bar{B}(p)\rangle = \cdots$$

EOM

$$i\partial_\mu\Big\{\bar{c}[\gamma^\mu,\gamma^\nu]b\Big\} = -2(m_b+m_c)\bar{c}\gamma^\nu b - 2(i\partial^\nu\bar{c})b + 2\bar{c}(i\partial^\nu b)$$

$$\Big\downarrow$$

$$T(q^2) = \frac{2\sqrt{r}}{q^2}\Big\{m_B^2\frac{1-r}{m_b-m_c}(w+1)S_1(q^2) - \frac{m_b+m_c}{1+r}2V_1(q^2)\Big\}$$