$\mathrm{R(D^{(*)})}$ in General Two Higgs Doublet Model

arXiv:1708.06176 accepted by Nuclear Physics B

井黒　就平 [1]　共同研究者 戸部　和弘 [1,2]
1:名古屋大学　2: KMI

この論文でやったこと

General Two Higgs Doublet Model を使って$\mathrm{R(D^{(*)})}$ をどこまで説明できるか、及び　そのときどうやって他の物理量で見えうるかを調べた。

代表的な先行研究: Y.Okada, et.al Prog. Theor. Phys. 114, 179 (2005)
M.Tanaka, et.al Phys. Rev. D 82, 034027 (2010)
A. Crivellin, et al Phys. Rev. D 86 054014 (2012)

合計70ページの論文なので読むのは大変!!
読まないという手もありますが、
聞いてもらえれば、いくらでも答えます。

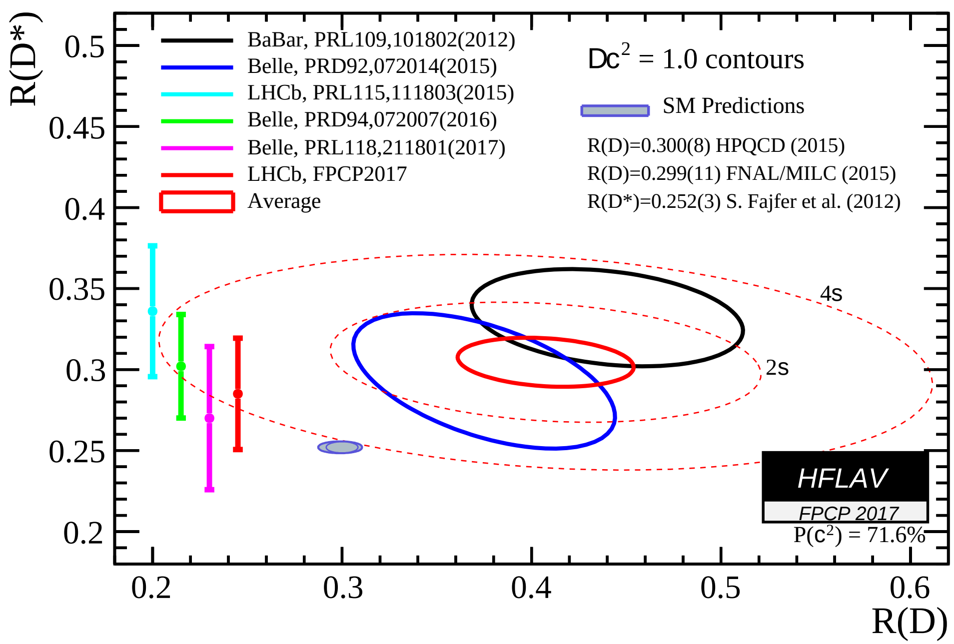
トークプラン

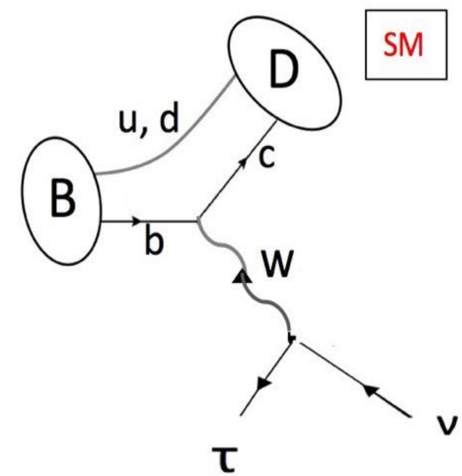
まずは、モデル(G2HDM)の紹介 ★ 2分

- 1, $R\left(D^{(*)}\right)$がどこまで説明できるか？ ★ 4分
- 2. Belle IIで見るには？ ★ 1分
- 3, LHC 実験で何を見れば良いのか? ★ 2分
- 4, まとめ ★ 残り時間

R(D$^{(*)}$)とは?

$$R_D \equiv \frac{Br(B \to D\tau\nu)}{Br(B \to Dl\nu)} \quad , \quad R_{D^*} \equiv \frac{Br(B \to D^*\tau\nu)}{Br(B \to D^*l\nu)} \; , \quad l = \mu, \mathrm{e}$$





ここで、$\frac{Br(B \to D^* e\nu)}{Br(B \to D^* \mu\nu)}$には良いレプトンフレーバー普遍性がある。

モデル(G2HDM)の説明

対称性を課さないG2HDMでは、１つのダブレットにVEVを押し付けることができる。

$$H_1 = \begin{pmatrix} G^+ \\ \frac{v+\Phi_1+iG}{\sqrt{2}} \end{pmatrix},\quad H_2 = \begin{pmatrix} H^+ \\ \frac{\Phi_2+iA}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

G^+,G: N-G ボゾン, H^+：荷電ヒッグス, A : CP奇なヒッグス

中性ヒッグス混合を解いてやる。　質量固有状態

$$\begin{pmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_{\beta\alpha} & \sin\theta_{\beta\alpha} \\ -\sin\theta_{\beta\alpha} & \cos\theta_{\beta\alpha} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H \\ h \end{pmatrix}$$

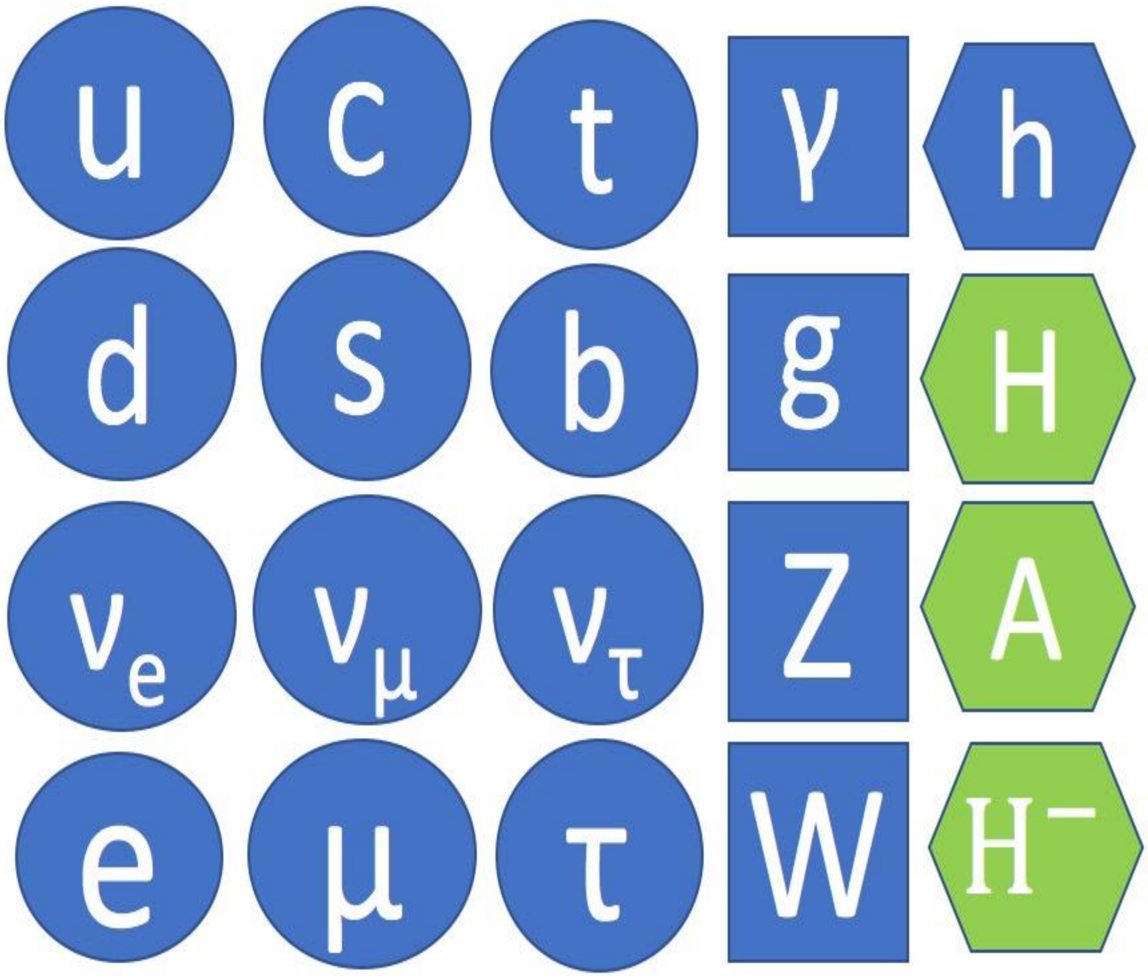
新しいヒッグスとフェルミオンの結合。

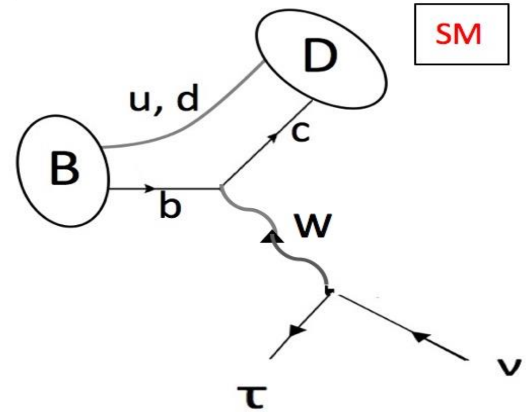
$$\begin{aligned} L= & -\sum_{f=u,d,e}\sum_{\Phi=h,H,A} y^f_{\Phi ij}\overline{f_{Li}}\,\Phi f_{Rj} + \text{h.c.} \\ & -\overline{\nu_{Li}}(V^\dagger_{MNS}\rho_e)^{ij}H^+ e_{Rj} + \text{h.c.} \\ & -\overline{u_i}(V_{CKM}\rho_d P_R - \rho_u^\dagger V_{CKM}P_L)^{ij}H^+ d_j + \text{h.c.}, \end{aligned}$$

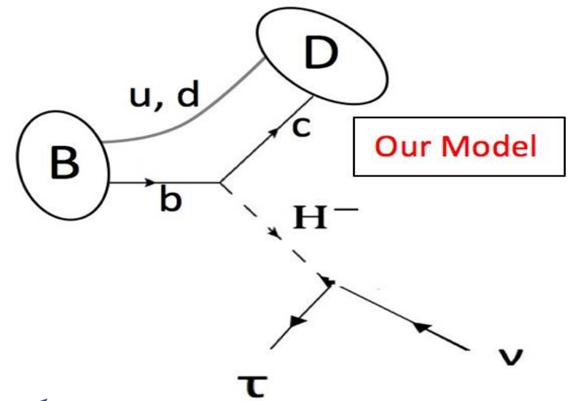
$\cos\theta_{\beta\alpha}$=0, $\sin\theta_{\beta\alpha}$=1が標準模型のヒッグスの相互作用を再現

$$y^f_{hij} = \frac{m^i_f}{v}s_{\beta\alpha}\delta_{ij} + \frac{\rho^{ij}_f}{\sqrt{2}}c_{\beta\alpha},\quad y^f_{Aij} = \begin{cases} -\frac{i\rho^{ij}_f}{\sqrt{2}} & \text{for } f=u \\ +\frac{i\rho^{ij}_f}{\sqrt{2}} & \text{for } f=d,e, \end{cases}\quad y^f_{Hij} = \frac{m^i_f}{v}c_{\beta\alpha}\delta_{ij} - \frac{\rho^{ij}_f}{\sqrt{2}}s_{\beta\alpha}$$

モデルで登場する粒子







この発表での主人公

- 今回の論文のモチベーション

後述する$B_C \to \tau\nu$の制限 (R.Alonso et al. 1611.06676) が出た後もAligned Two Higgs Doublet Model などTwo Higgs Doublet Modelを使って$\mathrm{R}(D^{(*)})$にアタックする論文が出されている。

↓

最も一般的な2HDMであるG2HDMを使って$\mathrm{R}(D^{(*)})$がどこまでできるのかを明らかにしたい。

- 論文の特徴

これ以上2HDMを使った解析が必要のない現象論的に、包括的な仕事。

G2HDMのいいところ

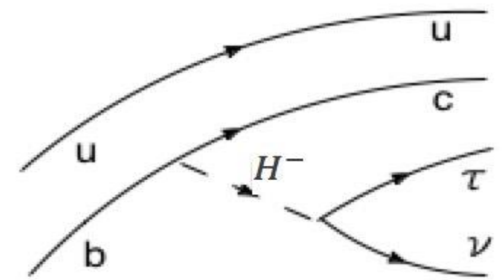
新しいヒッグスとSMフェルミオンの湯川結合が自由なパラメータなので、様々な現象論が期待できる。

G2HDMの厄介なところ

フレーバーアノマリーを信じない人たちからすれば、FCNCを抑える対称性がない変なモデル。
彼らに頷いてもらえる良さがあれば良い。
例えば、 muon g-2 Y. Omura ,et al. JHEP 1505, 028 (2015)

自由なパラメータが多いので、なんでもできるように思えるが、、、
湯川はLHCなどから制限がかかることを考えると、もはや自由なパラメータではなく説明できないアノマリーもある。

$\mathrm{B_C}$メソンからの強い制限



- $L_{eff} = -\frac{4G_F}{\sqrt{2}} V_{cb}[(\bar{\tau}\gamma_\mu P_L \nu)(\bar{c}\gamma^\mu P_L b) + S_L(\bar{\tau}P_L\nu)(\bar{c}P_L b) + S_R(\bar{\tau}P_L\nu)(\bar{c}P_R b)]$+ h.c.

スカラーには大きな係数がある。

4.06

$\mathrm{Br}(B_c^- \to \tau\bar{\nu})$=

$$\tau_{Bc} \frac{m_{Bc} m_\tau^2 f_{Bc}^2 G_F^2 |V_{cb}|^2}{8\pi} \left(1 - \frac{m_\tau^2}{m_{Bc}^2}\right)^2 \left| 1 + \frac{m_{Bc}^2}{m_\tau (m_b + m_c)} (S_R - S_L) \right|^2$$

$\mathrm{Br}(B_c^- \to \tau\bar{\nu})_{SM} = 2\%$

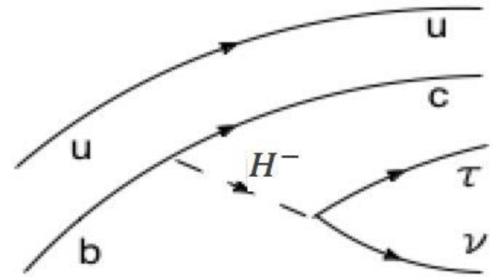
上限 $\mathrm{Br}(B_c^- \to \tau\bar{\nu})$ =1-Br(Bc the other decay) = 30%

最近10%を上限とする論文も出たが議論が必要。

A.G.Akeroyd.et al. 1708.04072

G2HDM全くだめなのか？

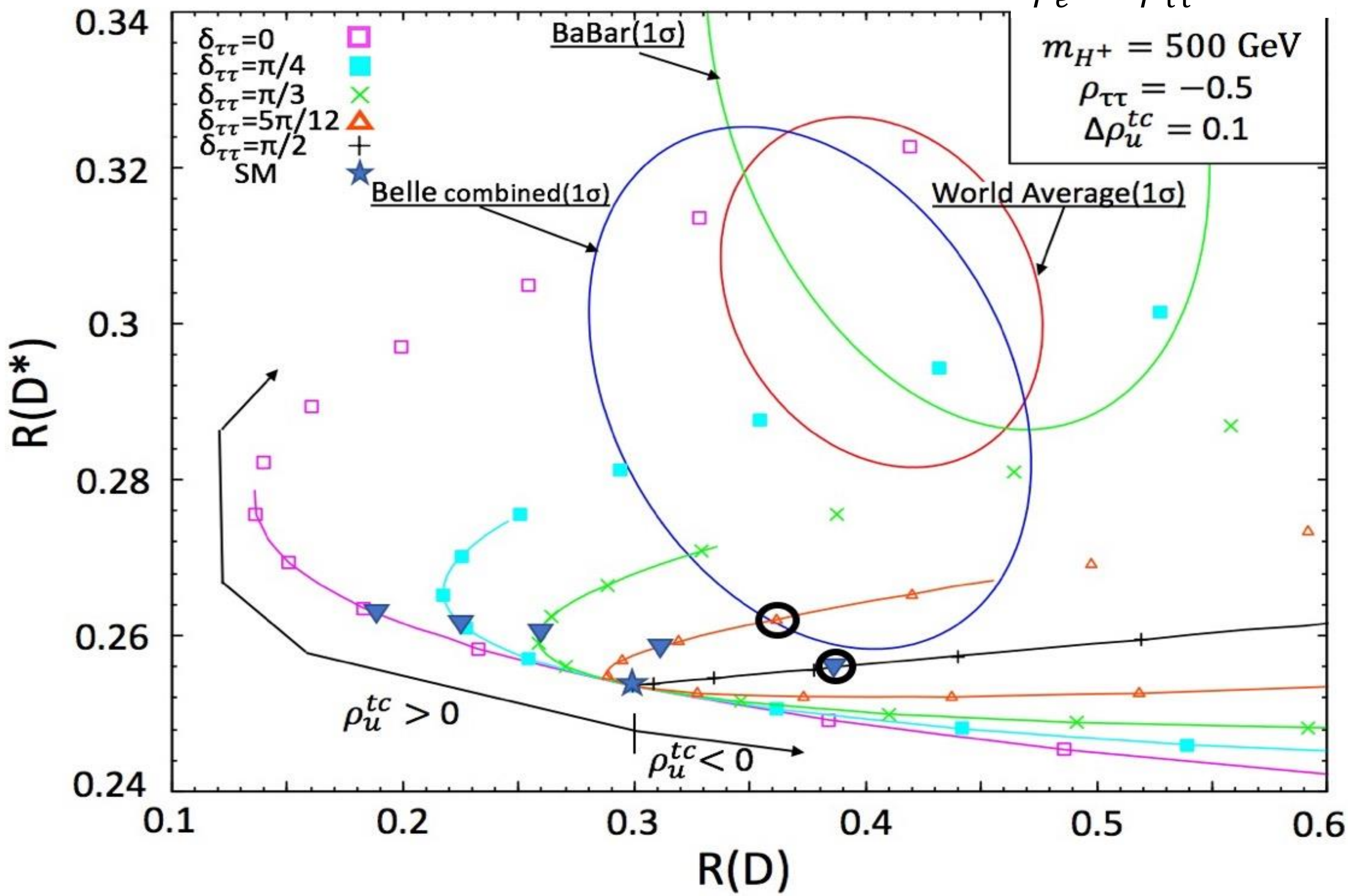
$$R_{D^*} = \frac{Br(B \to D^*\tau\nu)}{Br(B \to D^* l\nu)}$$



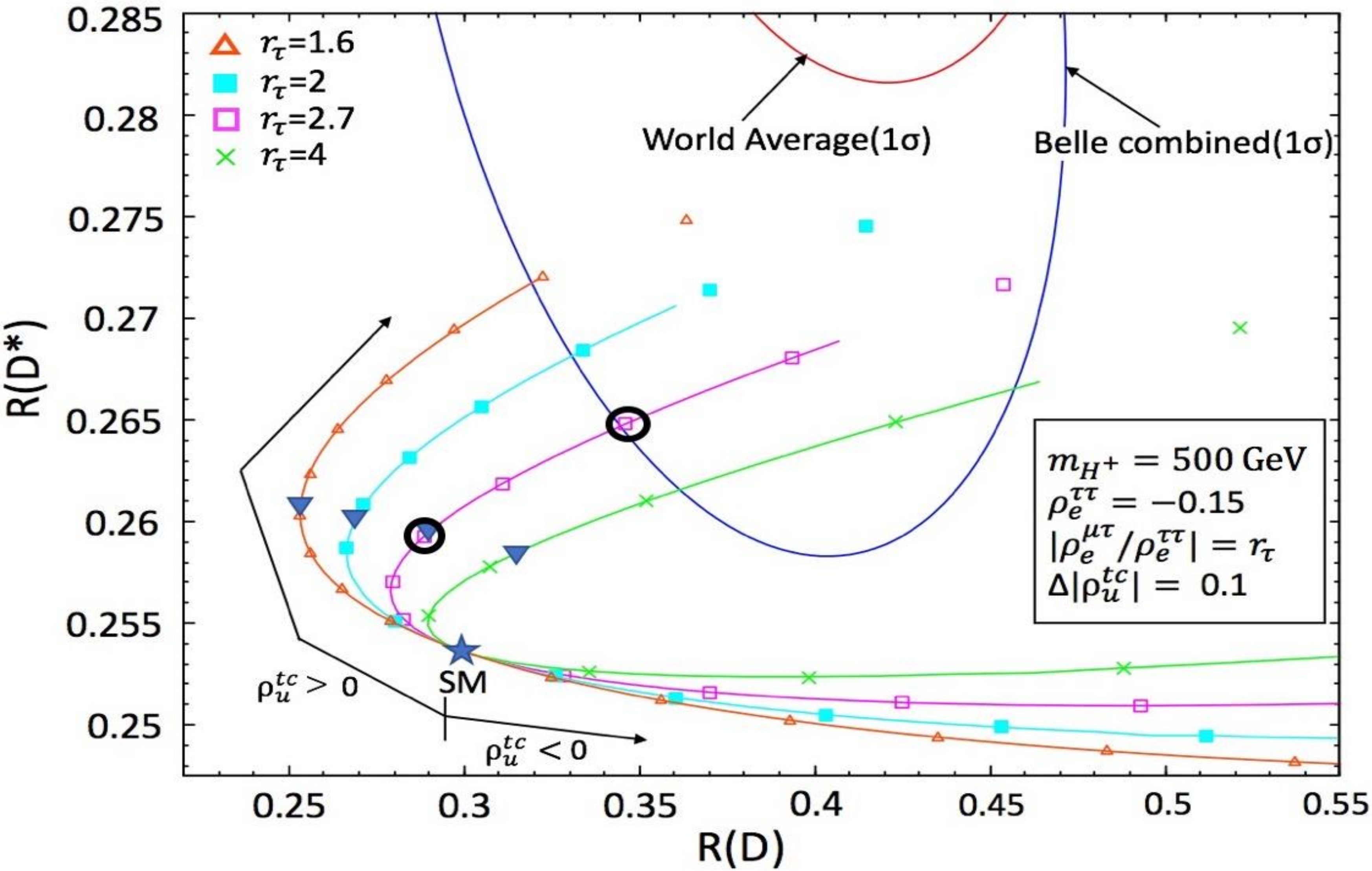
2HDMでは3つのシナリオがあるが。		
S-b間の破れを考える。 他のフレーバーの制限を考えなくてはならない。 FCNCからの強い制限 Bs→ττ、Bs混合など。 ⇩ 説明できない。(割愛)	t-c間の破れを考える。	t-c間の破れに加えて、μ-τ間の破れを考える。

t-c間の破れを考える場合。$B_c \to \tau\nu$からの制限以内30%(10%)でBelleの1σなら説明できる(説明できない)。

$\rho_e^{\tau\tau} = \rho_{\tau\tau} \times e^{i\delta_{\tau\tau}}$

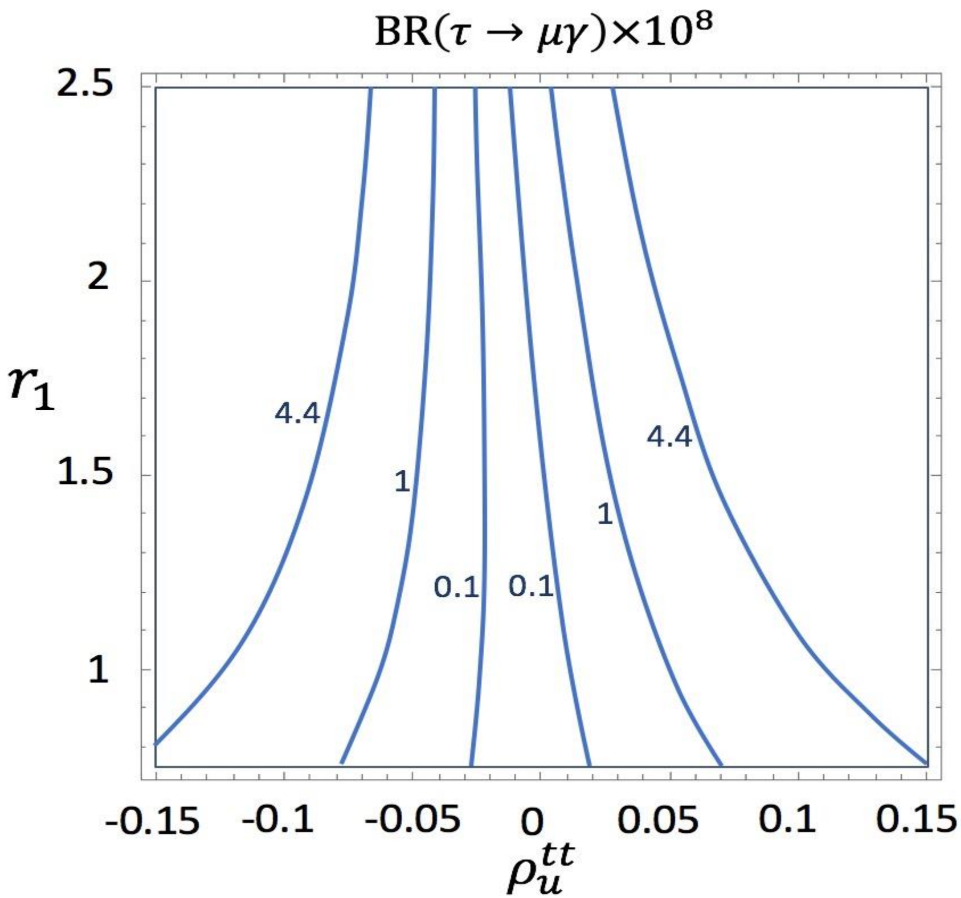


t-c間に加えてτ -μ間の破れを考える場合。B_c→τνからの制限以内30%(10%)でBelleの１σなら説明できる(説明できない)。



Belle Ⅱで見るには？

$\tau \to \mu\gamma$: 2-loop Bar-Zee diagram が効く。



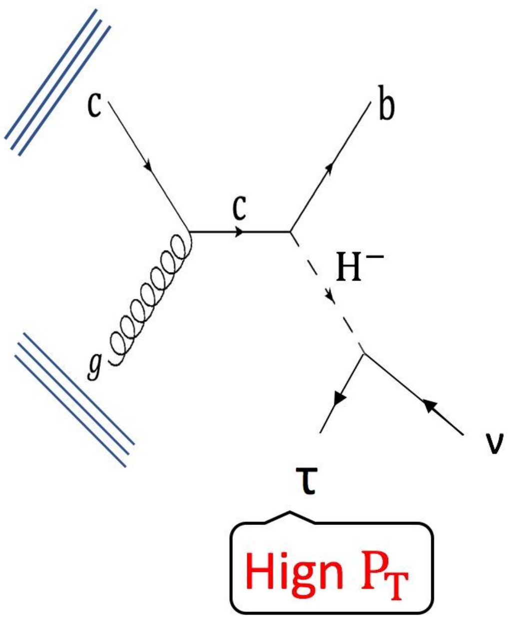
$$r_1 = \frac{\rho_e^{\mu\tau}}{-0.27} = \frac{\rho_e^{\tau\tau}}{-0.1}$$

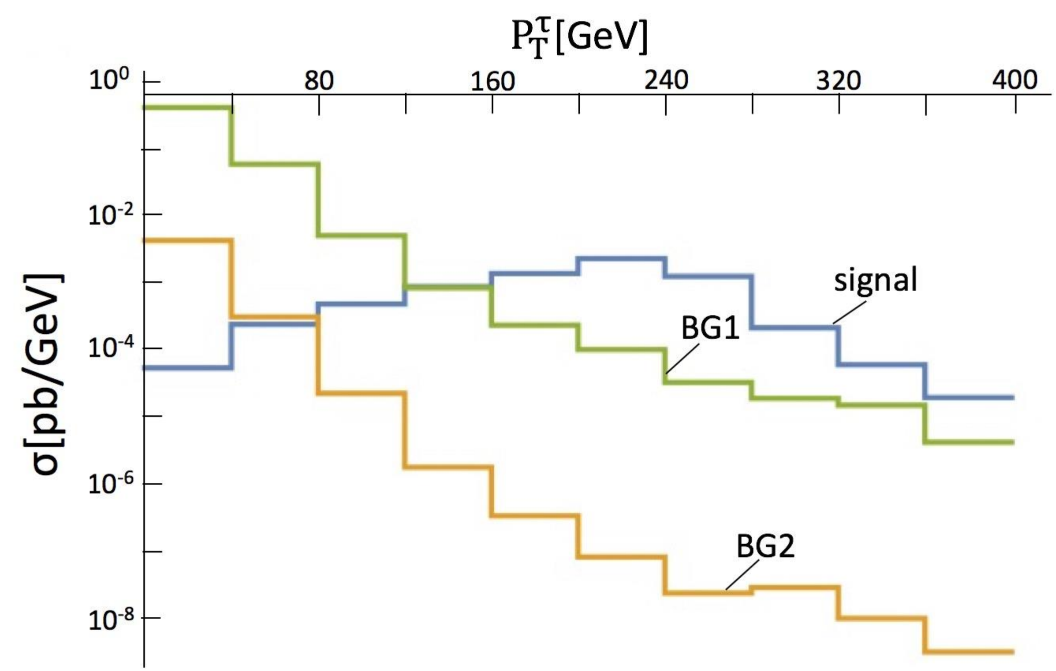
ρ_u^{tt}があれば、$\tau \to \mu\gamma$が出る。
ρ_u^{tt}はR(D$^{(*)}$)には影響を与えない。

$\frac{\mathrm{Br}(\tau\to\mu\nu\bar{\nu})/f(y_\mu)}{\mathrm{Br}(\tau\to e\nu\bar{\nu})/f(y_e)}$に対する補正は小さい。

LHC実験からの制限

アノマリーが大きいために、新粒子のスケールが重くてもTeVなのでLHCがとても強力な探索ツールとなり得る。
時間の都合上今回は多くは触れられないが、決定的なのはH^-が崩壊するτレプトンのPtの分布(A.Soni, et.al 1704.06659v2) 。

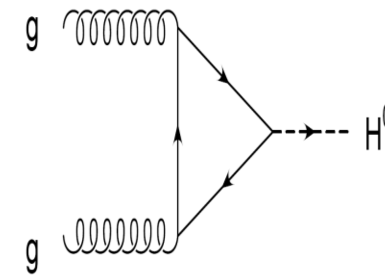


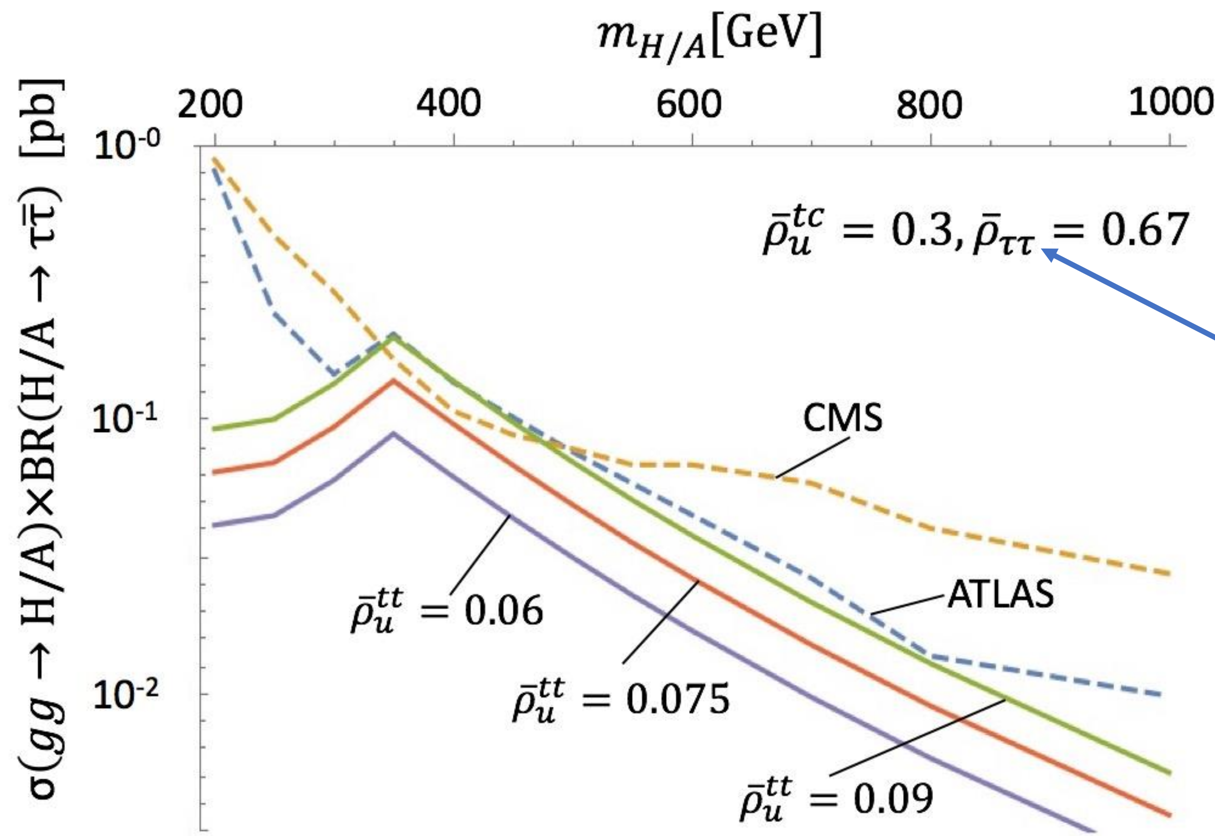


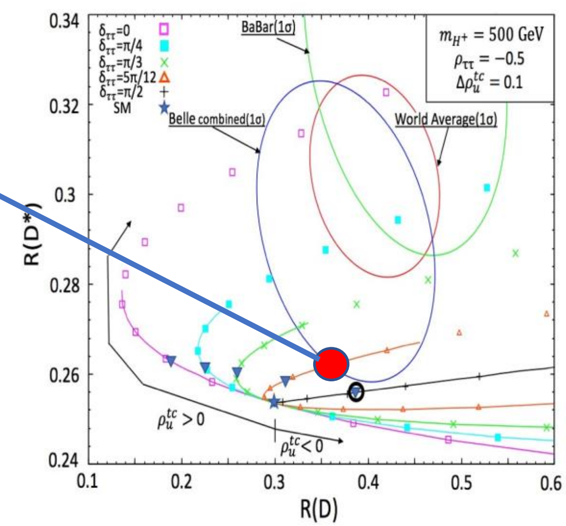
BGはSMのイベント
BG1: W mediated, light quark misID as b
BG2: W mediated, light quark with one b

LHC実験からの制限

さらににρ_u^{tt}がある場合ggF(右図)で重いヒッグスが生成される。$\mathrm{pp} \to \mathrm{H/A} \to \tau\bar{\tau}$ は実験で制限がある。







まとめ

やはり、G2HDMであっても様々なフレーバー(特に$B_c \to \tau\nu$)からの制限が強くBelleの1σの説明でさえ厳しくなってきた。
LHCもRun2で頑張っており変な崩壊モードをちゃんと探せば、Belle II よりも先に実験的に白黒がつけられる。
特に$R(D^{(*)})$ に関しては崩壊モードを工夫すればフレーバー物理の方がLHCより感度があるというフレーバー屋さんのうたい文句は必ずしも正しくない時代に入った。

Flavor Physics と Collider Physics の架け橋がとても重要。

ご静聴ありがとうございました。

おまけ

結果のスライドの前に

μ-τ フレーバーの破れ

- h → μ τ CMS (arXiv:1502.07400)

  ATLAS(arXiv:150803372)

  BR(h→μτ) =(0.84 ± 0.38)% CMS Run1

  BR(h→μτ) =(0.53 ± 0.51)% ATLAS Run1

この結果が先日LHC（Run2）で更新された。

BR(h→μτ) =(0.00 ± 0.12)% CMS Run2 talk@LHCP2017

このアノマリーがなくなった！

ATLASでのRun2の結果は公開されていない。

Br(h→μτ) $Omura, et\ al. PhysRevD. 94.055019$

μ-τフレーバーの破れを起こす湯川結合があるのでh→$\mu\tau$の崩壊がループなしで起こる。

$$\mathrm{Br}(\mathrm{h}\to\mu\tau) = \frac{\Gamma(\mathrm{h}\to\mu^{+}\tau^{-})+\Gamma(\mathrm{h}\to\mu^{-}\tau^{+})}{\Gamma_{h}}$$

$$= \frac{Cos\theta^{2}_{\beta\alpha} m_{h}(|\rho_{\mu\tau}|^{2}+|\rho_{\tau\mu}|^{2})}{16\pi\Gamma_{h}}$$

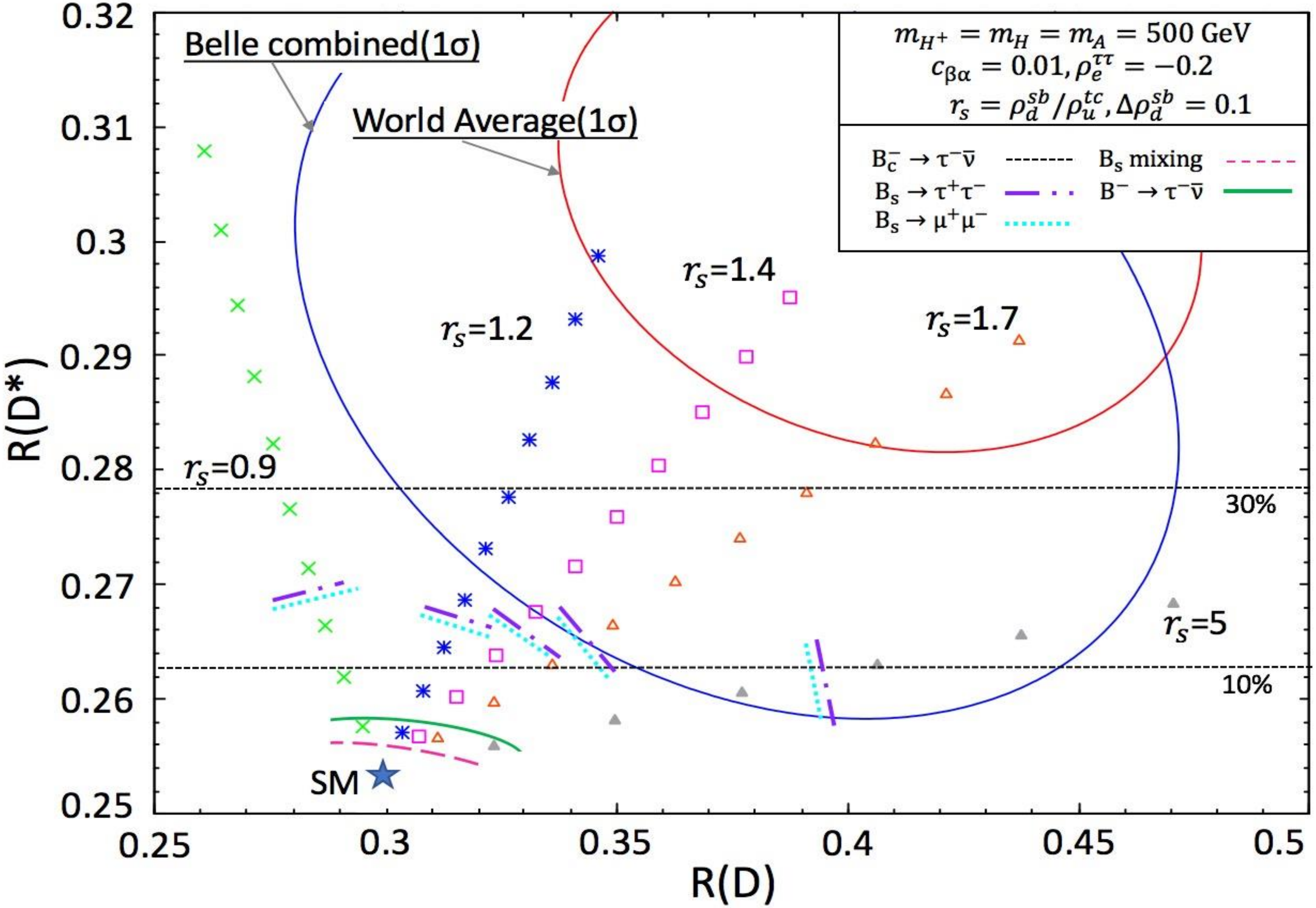
ここでは簡単のため$\rho_{\mu\tau}$=-$\rho_{\tau\mu}$を課す。相対符号はδa_{μ}のため。

これは以下のように書き直せる。

$$|\rho_{\tau\mu}| = 0.26\left(\frac{0.001}{|cos\theta_{\beta\alpha}|}\right)\sqrt{\frac{Br(h\to\mu\tau)}{0.84\times10^{-4}}}$$

$cos\theta_{\beta\alpha} = 0.001$を仮定すれば、Br(h→$\mu\tau$) は抑えられてしまう。

S-b間の破れを考える場合。B_s混合からの制限などが強く$R(D^{(*)})$ を改善できない。



$B_c \to \tau\nu$ はR(D^*)と強く相関し、R(D^*)の上限を与える。