

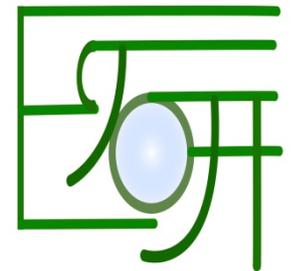
高エネルギー春の学校

Flavor anomalies with 2,3 generations flavor violating G2HDM

名古屋大学素粒子論研究室(E研)

修士2年 井黒 就平

共同研究者 戸部 和弘



僕は原子核三者夏の学校の回し者です

井黒

梶田さん



この研究会は修士1年生向けの発表を求めており、理論の現状を捉えるきっかけになるいい機会になると思います。今年の講師陣も豪華です。村山 斉:東大数物連携宇宙研究機構の初代機構長などよく講演OKもらえたなーと思うような講師陣です。是非

新物理(BSM)は必ずある。

* BSMをどこで見ると問題

- 高エネルギー実験 (LHC etc)
- 精密測定実験 (KEKB etc)

現状、直接探索は難しそう。LHCなど直接探索での制限を用いつつ、標準模型(SM)とのずれを手掛かりに新物理を探っていきたい。

特に今 μ 、 τ レプトンやBmesonなどの**フレーバーの物理**にいくつかSMとのずれが観測されている。

$$\delta a_\mu, h \Rightarrow \mu \tau, R(D^{(*)}), \frac{Br(B^+ \rightarrow K^+ \mu \bar{\mu})}{Br(B^+ \rightarrow K^+ ee)}, \dots$$

ほかには $|V_{ub}|_{inc}, |V_{ub}|_{exc}$ 問題 $\frac{\epsilon'}{\epsilon}$ 問題など

今回の流れ

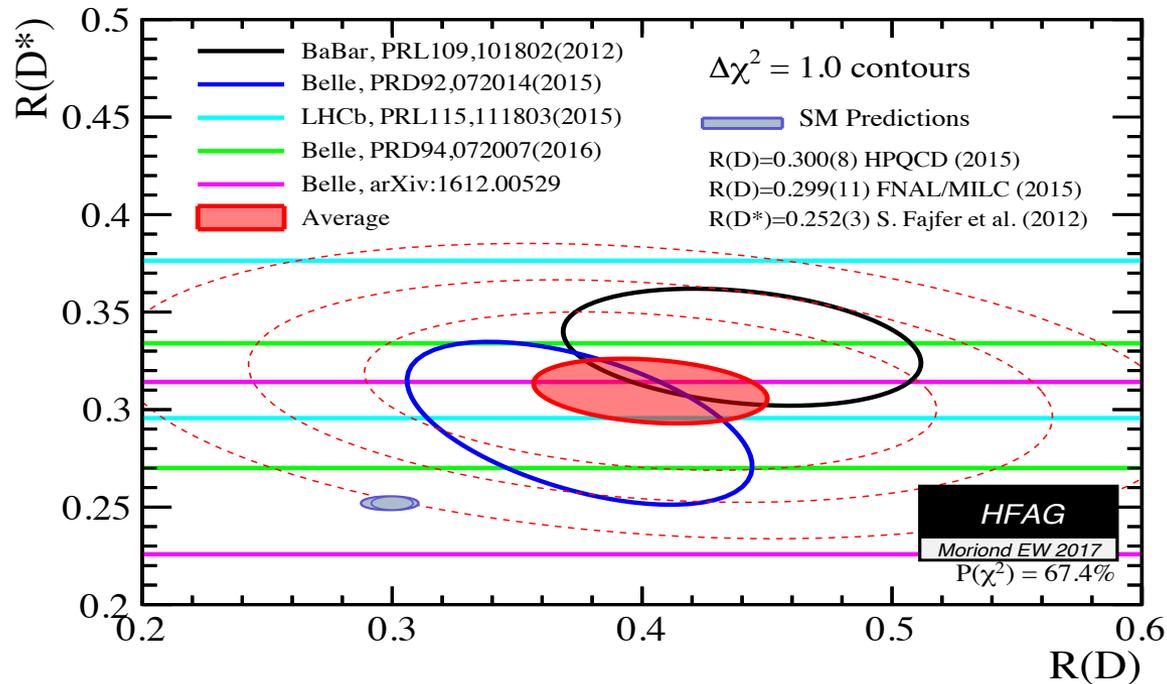
- * ~~なぜ今フレーバーなのか？~~
- * 今回扱うフレーバーアノマリーの紹介
- * モデルの説明
- * 前半戦 δa_μ
- * 後半戦 $R(D^{(*)})$
- * まとめ

扱うアノマリー

ミューオン $g-2$ (e.g. Hagiwara, et al, arXiv: 1105.3149)

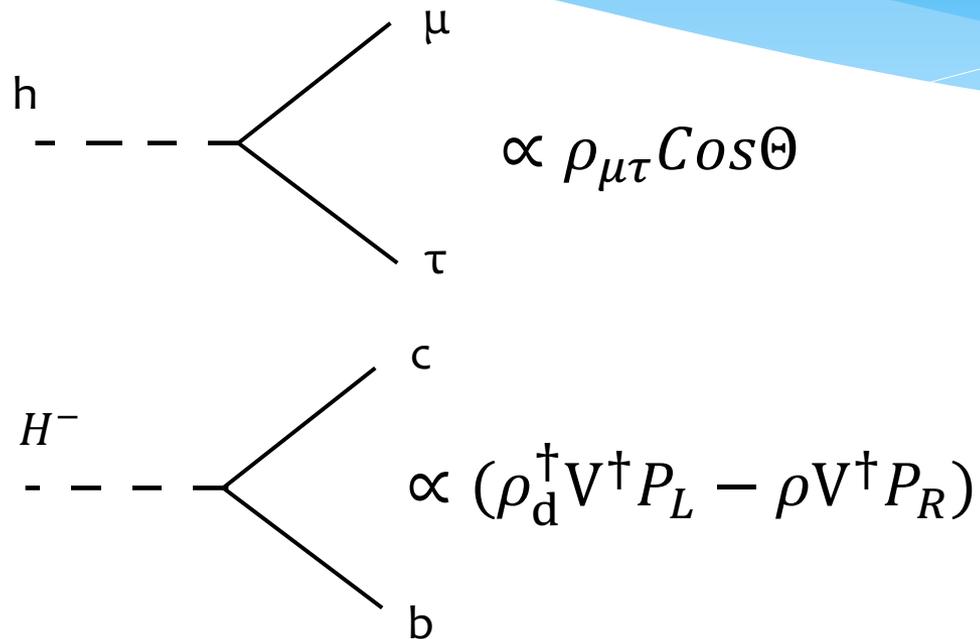
$$\begin{aligned} \delta a_\mu &= a_\mu^{exp} - a_\mu^{SM} \\ &= (2.61 \pm 0.80) \times 10^{-9} \quad [2.4\sigma] \end{aligned}$$

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



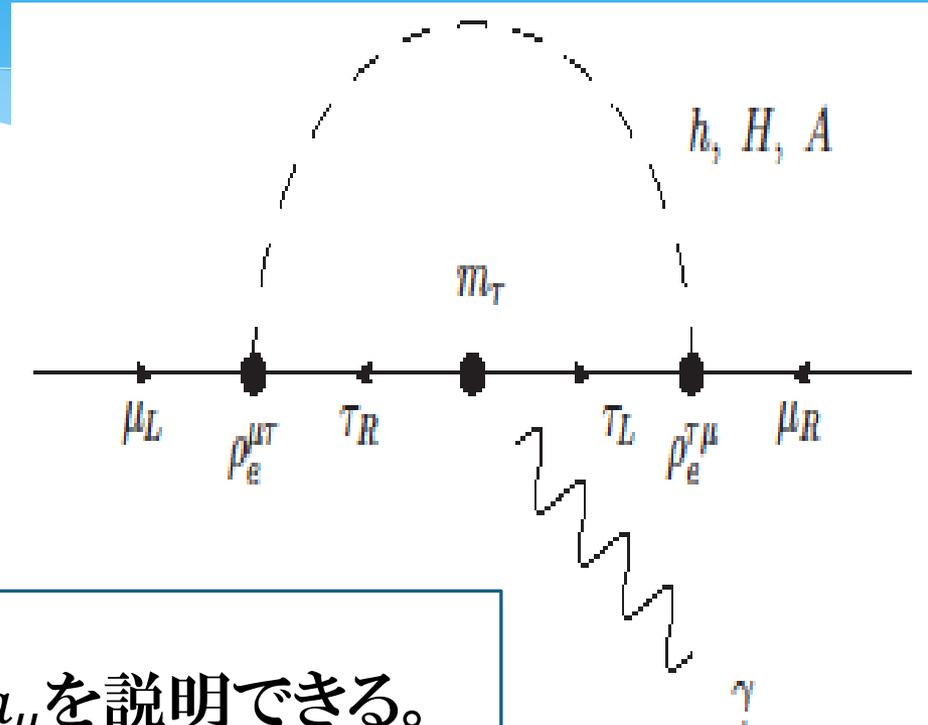
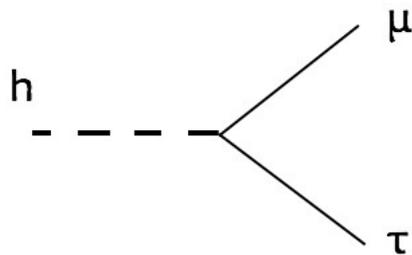
δa_μ と $R(D^{(*)})$ は同時に説明できるのか？

モデル(G2HDM)の持つファインマンルール



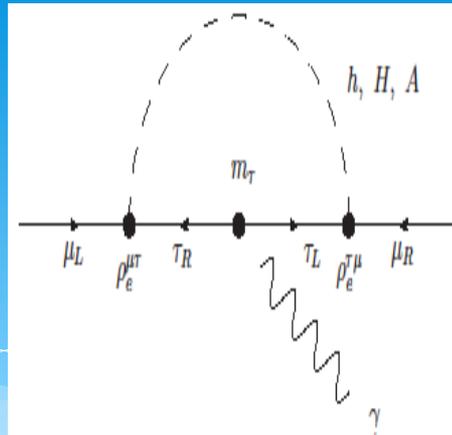
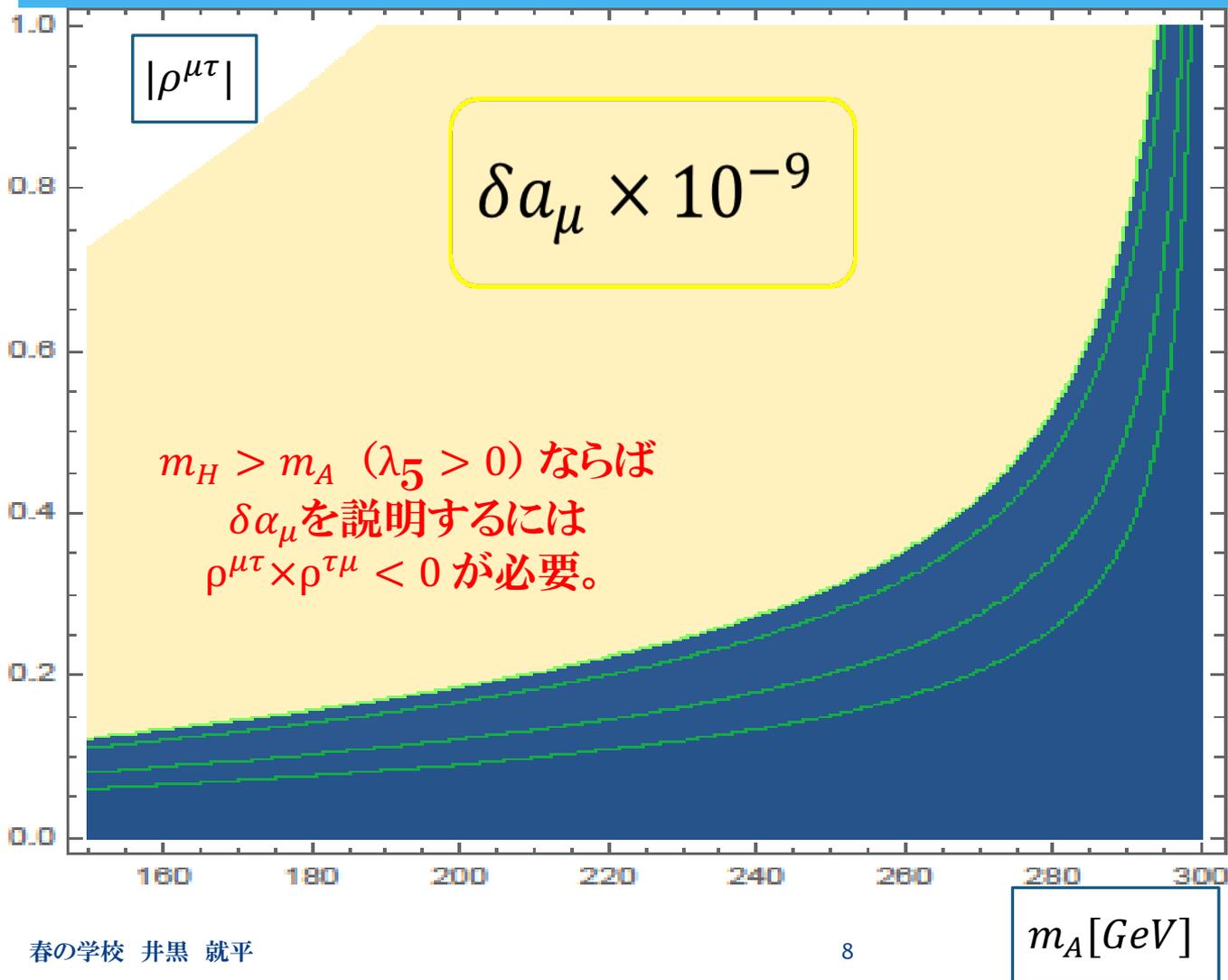
- ρ :湯川結合
- $\text{Cos}\Theta=0$ が標準模型
- V :小林-益川行列
- P_R or P_L はカイラリティの射影演算子
- H^- :荷電ヒッグス

ミューオン異常磁気能率



標準模型とのずれ δa_μ を説明できる。
K. Tobe, et al. PhysRevD. 94.055019

ミューオン異常磁気能率



セットアップ

$$m_H = 300 [\text{GeV}]$$

$$\cos\theta_{\beta\alpha} = 0.001$$

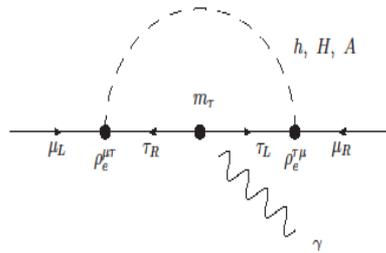
m_τ の持ち上げがある。
 m_H と m_A の差が大きい
 ほど小さい $\rho_{\mu\tau}$ で説明
 できる。

問題点

先行研究では電弱精密測定からの制限としてゲージボゾンの伝播関数への量子補正に関わるSTUパラメータのみを考慮した。

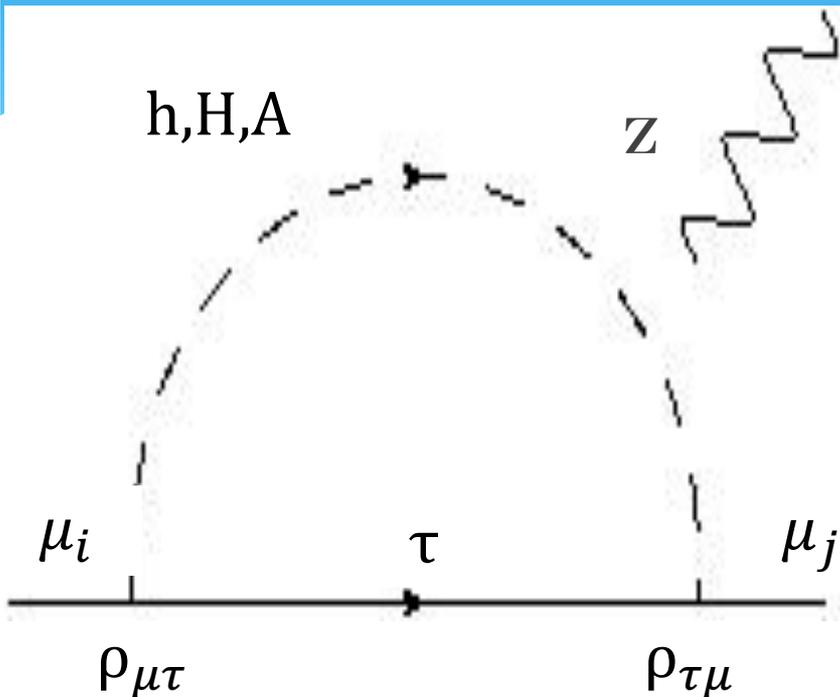
これは頂点関数補正が十分小さいことを暗に仮定している。

この仮定の妥当性を評価した。



左の図も頂点関数補正
の一種

頂点関数補正 $Z \rightarrow \mu\bar{\mu}$



$Z \rightarrow \mu\bar{\mu}$ を1-loopレベルで計算した。

現在の実験的制限は[PDG]により

$$Br(Z \rightarrow \mu\bar{\mu}) = 3.366 \times (1 \pm 0.002)\%$$

$$\begin{aligned} Br(Z \rightarrow \mu\bar{\mu})_{G2HDM} \\ \cong Br(Z \rightarrow \mu\bar{\mu})_{SM} \\ \times (1 + \Delta_{2HDM})\% \end{aligned}$$

頂点関数補正は非常に小さい

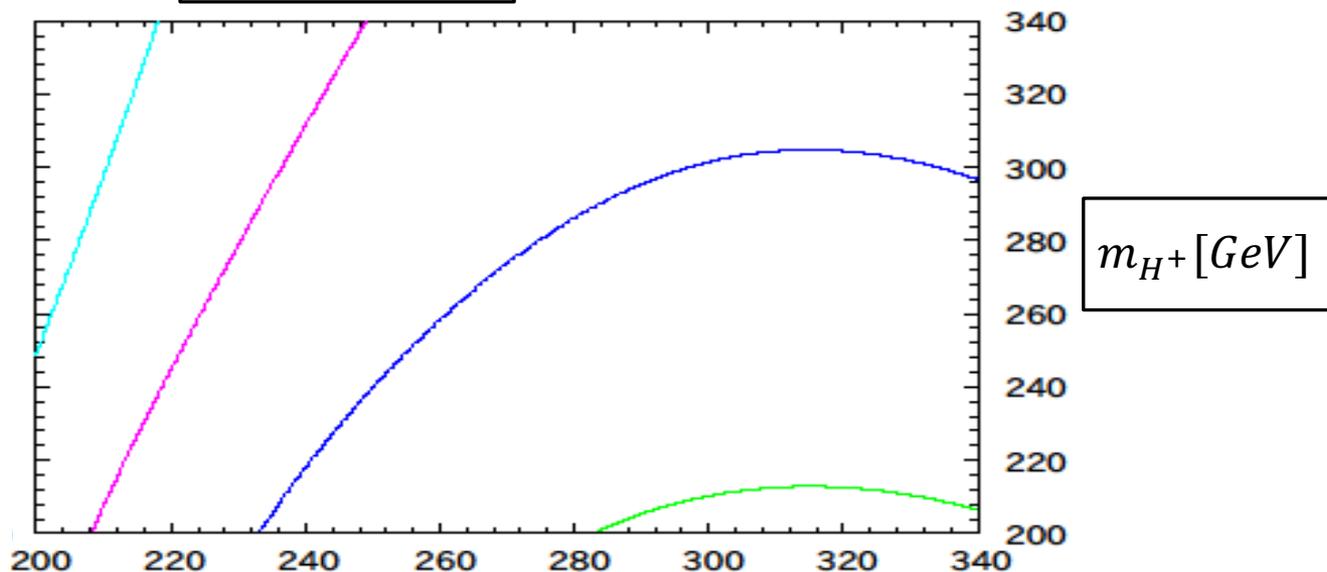
Δ_{2HDM}

3e-05
0
-3e-05
-6e-05

実験精度
0.002

セットアップ

$m_H = 300 [\text{GeV}]$
 $\cos\theta_{\beta\alpha} = 0.001$
 $\rho_{\tau\mu} = 0.3$
 $\rho_{\mu\tau} = -0.3$



$m_{H^+} [\text{GeV}]$

$m_A [\text{GeV}]$

g-2で効くOperatorは $\bar{\mu}\sigma_{\mu\nu}\mu F^{\mu\nu}$ 5次元

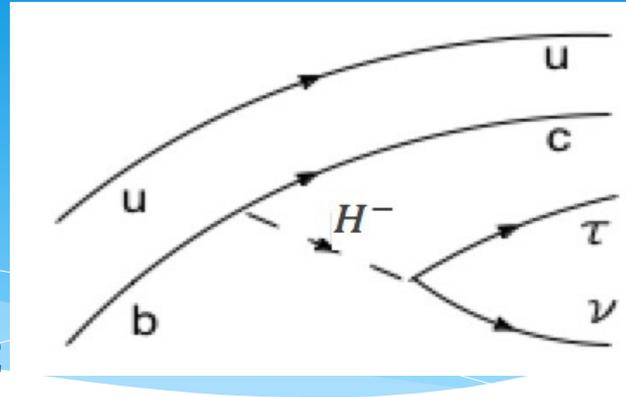
この補正で効くのは $\bar{\mu}\gamma_{\mu}\mu Z^{\mu}$ 4次元

$\sigma_{\mu\nu}$ の寄与はカイラリティを m_{τ} でひっくり返す必要があり γ_{μ} の項に比べて $\frac{m_{\tau}}{m_Z}$ の抑制を受けるので十分小さいことが分かった。

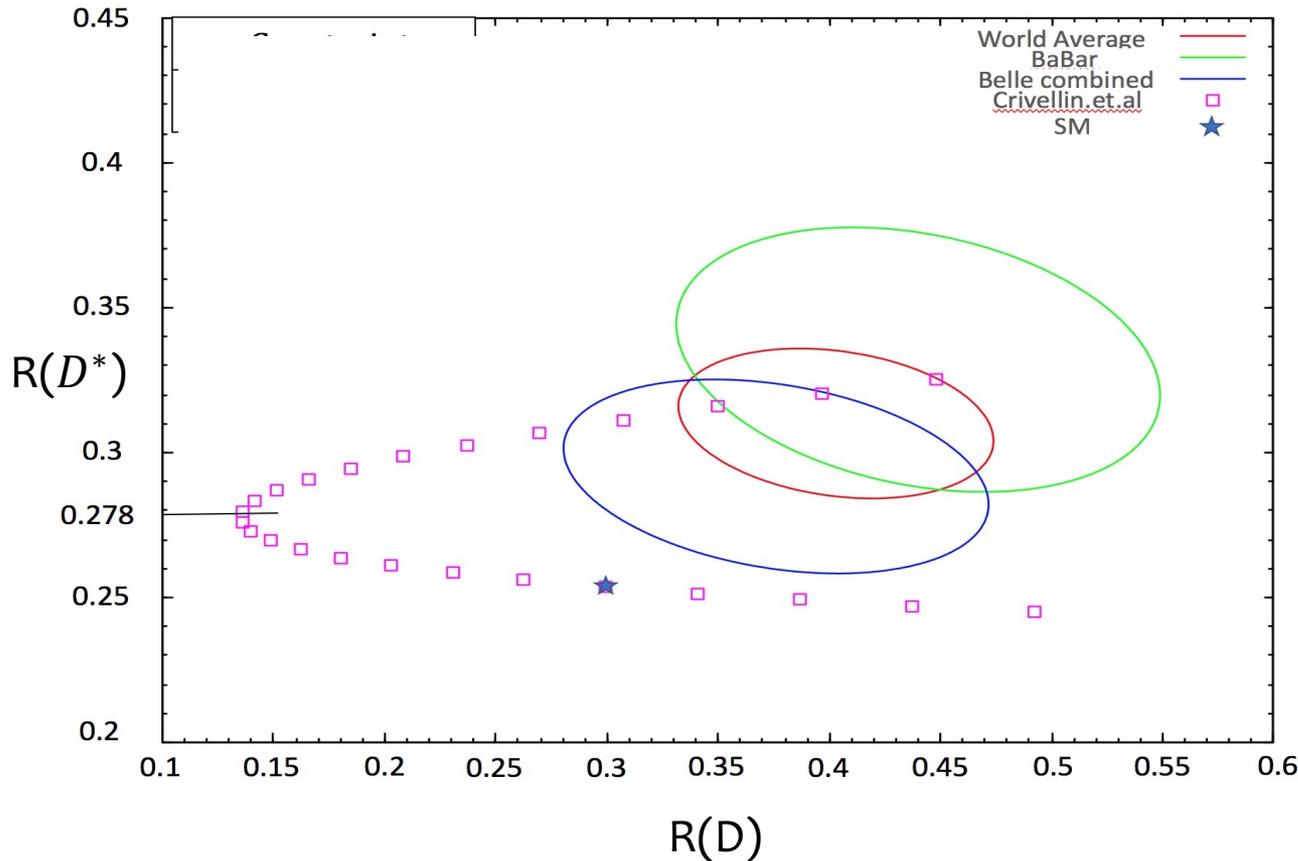
前半をまとめると

μ - τ フレーバーの破れにより
 δa_μ のアノマリーが説明された。

$R(D), R(D^*)$

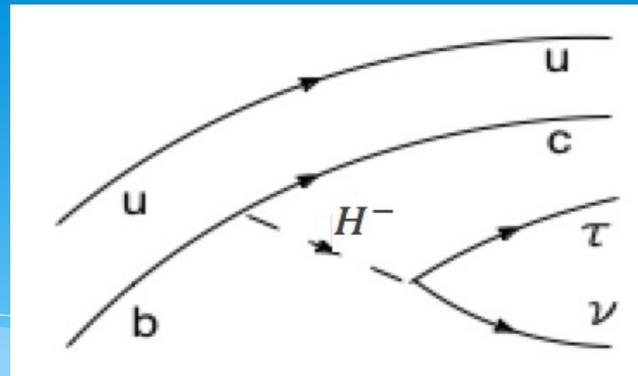


従来の解: A. Crivellin.et.al,arXiv:1206.2634v2

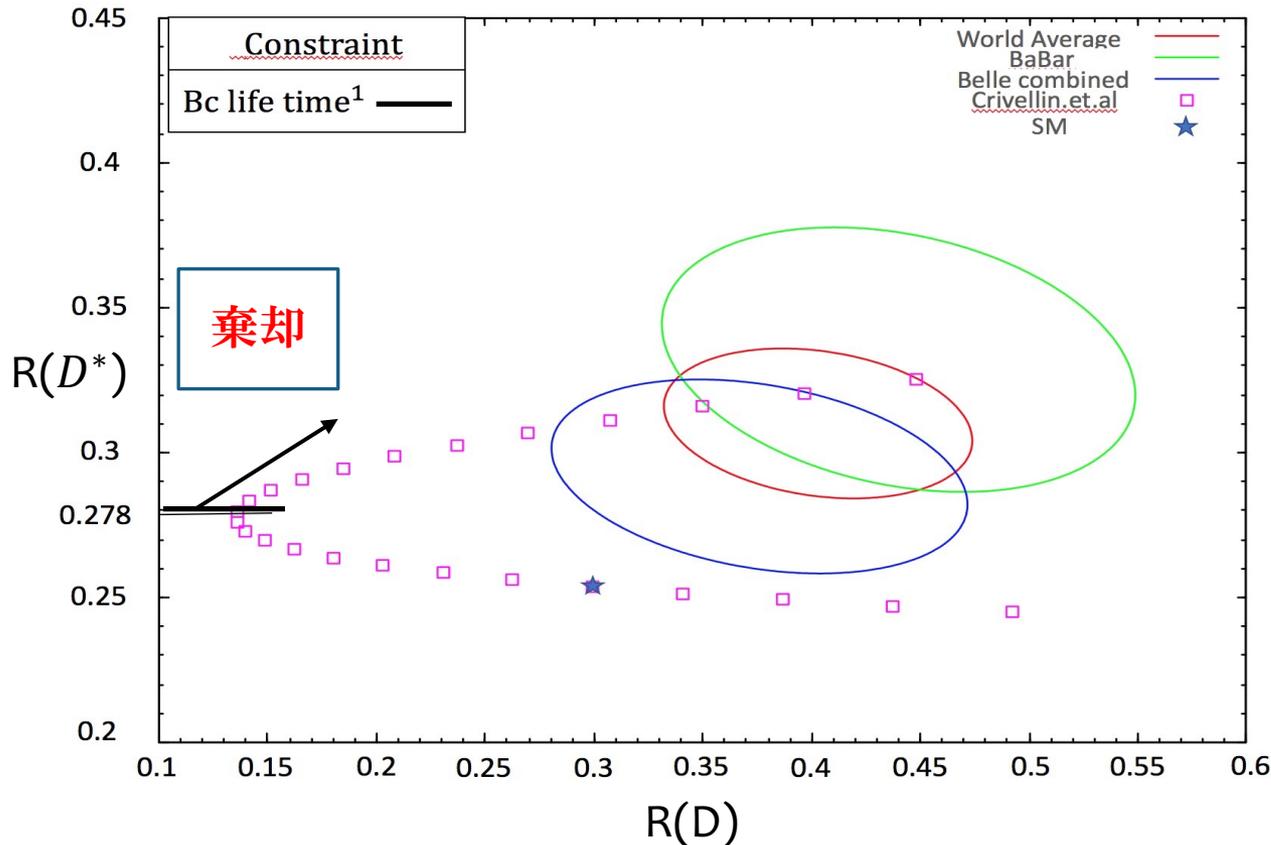


レプトンセクターは
フレーバーの破れ
を仮定せず、
クォークセクターに
t-c間のフレーバー
の破れを仮定する。

$R(D), R(D^*)$



従来の解: A. Crivellin et al, arXiv:1206.2634v2



レプトンセクターは
フレーバーの破れ
を仮定せず、
クォークセクターに
t-c間のフレーバー
の破れを仮定する。

2016年11月Bc中間子の崩壊を用いて強い制限が得られた

1611.06676 R.Alonso,
et al.

ではG2HDM全くだめなのか？

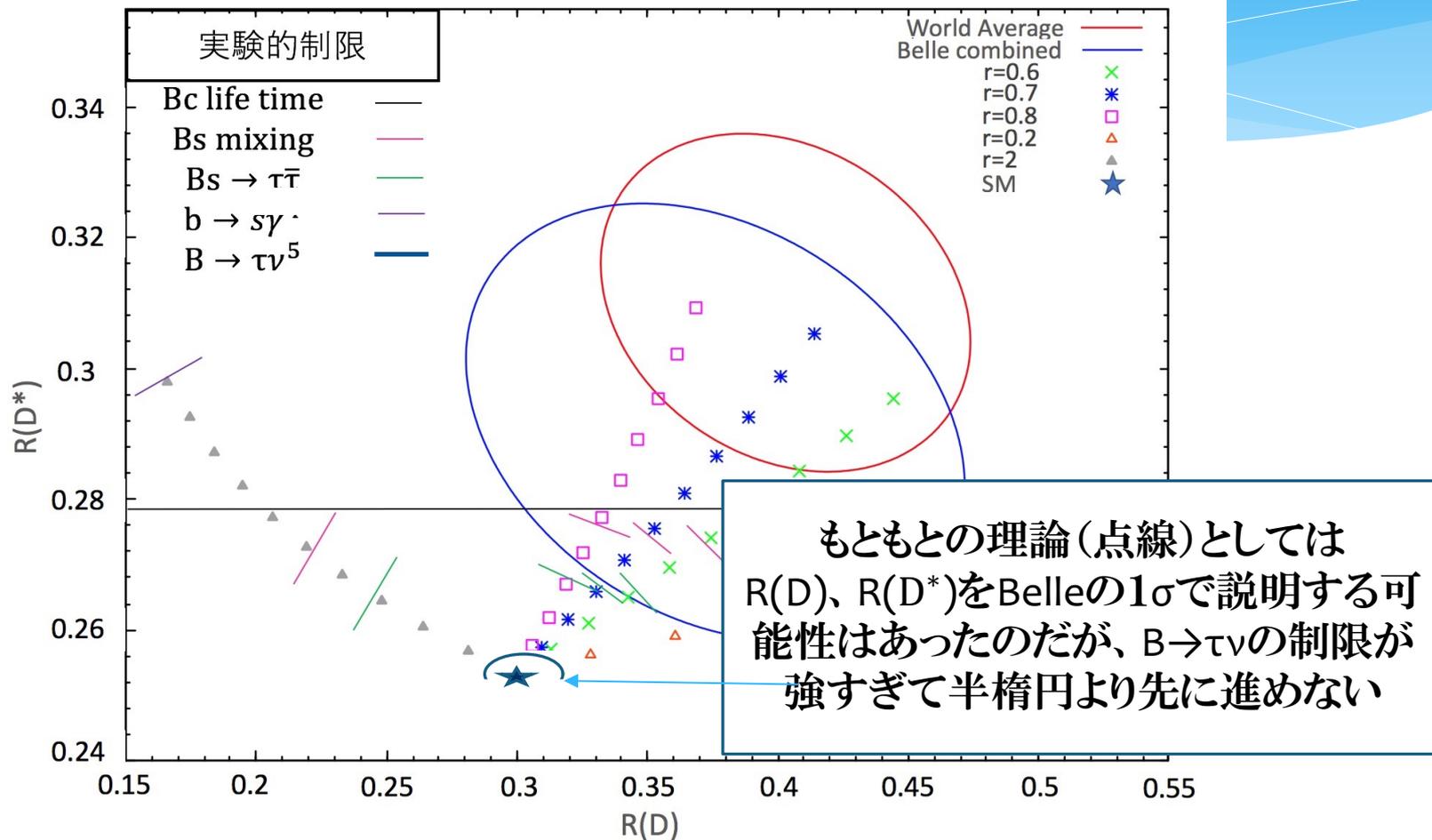
$$R(D^*) \equiv \frac{Br(B \rightarrow D^* \tau \nu)}{Br(B \rightarrow D^* l \nu)}$$

二つの方法がある。

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。
Bs \rightarrow $\tau\tau$ 、Bs混合など

μ - τ 間の破れを考える。
 δa_μ まで両立するのか？

S-b間の破れの場合は制限が強すぎる。



ではG2HDM全くだめなのか？

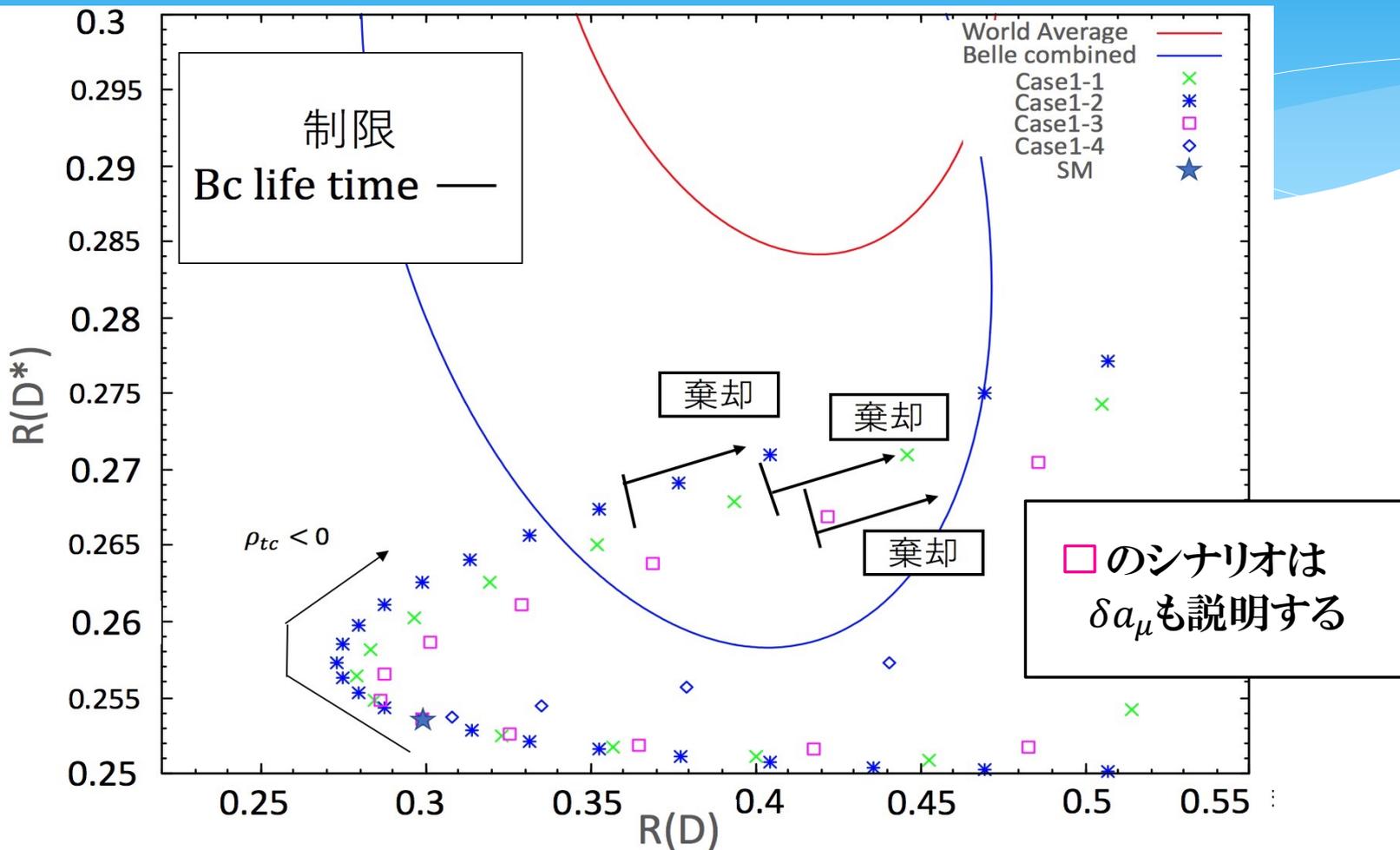
$$R(D^*) \equiv \frac{Br(B \rightarrow D^* \tau \nu)}{Br(B \rightarrow D^* l \nu)}$$

二つの方法がある。

~~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。
Bs \rightarrow $\tau\tau$ 、Bs混合など~~

μ - τ 間の破れを考える。
 δa_μ まで両立するのか？

μ-τ間の破れの場合Belleの1σまでは説明可能。



結論

Bcメソン寿命からの制限が強く、G2HDMにおける従来の解はこの制限を考慮すると $R(D)$ 、 $R(D^*)$ を同時に説明できなかった。G2HDMでは他の解があるのかを調査したところS-b間および μ - τ 間のフレーバーの破れを従来の解に加えることで理論的な改善の可能性があった。

- S-b間の破れは実験的に制限が強く $R(D)$ 、 $R(D^*)$ を改善できないことが示された。
- μ - τ 間の破れの場合はBelleの 1σ レベルまでは行けることがわかった。特に μ - τ 間のフレーバーの破れを加える解は δa_μ も説明しうる。

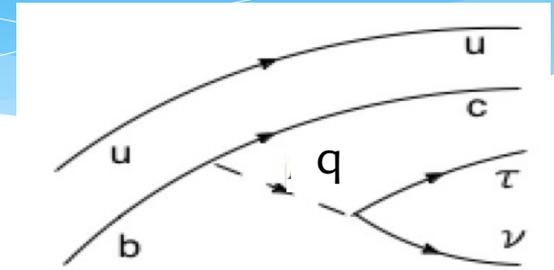
議論・要望

- q^2 依存性からもモデルを識別できるかもしれない。



Belle IIに期待したい。

- $\frac{Br(B \rightarrow D^{(*)} e \nu)}{Br(B \rightarrow D^{(*)} \mu \nu)}$ のデータを公開してほしい。
- イベントジェネレーターを作ってCNLの検証をして欲しい。



面白い研究テーマだと思うのでぜひ解析に加わってください。
RD、RD*は、実験家が理論モデルを仮定して、実験データを
フィットすることで得られる量である。ぜひ我々のシナリオで
フィットしてモデルの判定をして欲しい。

おまけ

μ - τ フレーバーの破れ

- $h \rightarrow \mu \tau$ CMS (arXiv:1502.07400)

ATLAS(arXiv:150803372)

$BR(h \rightarrow \mu \tau) = (0.84 \pm 0.38)\%$ CMS Run1

$BR(h \rightarrow \mu \tau) = (0.53 \pm 0.51)\%$ ATLAS Run1

この結果が先日LHC (Run2) で更新された。

$BR(h \rightarrow \mu \tau) = (0.00 \pm 0.12)\%$ CMS Run2 talk@LHCP2017

このアノマリーがなくなった！

$\text{Br}(h \rightarrow \mu\tau)$ *Tobe, 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 $h \rightarrow \mu\tau$ の崩壊がループなしで起こる。

$$\begin{aligned}\text{Br}(h \rightarrow \mu\tau) &= \frac{\Gamma(h \rightarrow \mu^+ \tau^-) + \Gamma(h \rightarrow \mu^- \tau^+)}{\Gamma_h} \\ &= \frac{\cos^2 \theta_{\beta\alpha} m_h (|\rho_{\mu\tau}|^2 + |\rho_{\tau\mu}|^2)}{16\pi\Gamma_h}\end{aligned}$$

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。

$$|\rho_{\tau\mu}| = 0.26 \left(\frac{0.001}{|\cos \theta_{\beta\alpha}|} \right) \sqrt{\frac{\text{Br}(h \rightarrow \mu\tau)}{0.84 \times 10^{-3}}}$$

$\cos \theta_{\beta\alpha} = 0.001$ を仮定すれば、 $\text{Br}(h \rightarrow \mu\tau)$ を押さえられてしまう。

ラグランジアン type General

このモデルではそれぞれのヒッグスダブレットがすべてのフェルミオンに結合できる。
一般性を失わず片方のダブレットにのみ真空期待値を持たせる基底をとることができる

$$H_1 = \left(\frac{G^+}{\frac{v+\Phi_1+iG}{\sqrt{2}}} \right), H_2 = \left(\frac{H^+}{\frac{\Phi_2+iA}{\sqrt{2}}} \right)$$

G^+ , G : 南部ゴールドストーンボゾン, H^+ : 荷電ヒッグス, A : CP奇ヒッグス, H : CP偶ヒッグス
レプトンセクターの湯川相互作用 (クォークも同様)

$$\mathcal{L} = -\bar{L}_{Li} H_1 y_{ei} e_{Ri} - \bar{L}_{Li} H_2 \rho_{eij} e_{Rj} \quad L = \begin{pmatrix} V_{MNS} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix}$$

中性ヒッグス粒子質量固有状態

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

ヒッグス質量スペクトラム

$$m_{H^+}^2 = m_H^2 - \frac{\lambda_5 + \lambda_4}{2} v^2, \quad m_A^2 \cong m_H^2 - \lambda_5 v^2$$

or

$$m_{H^+}^2 = m_A^2 + \frac{\lambda_5 - \lambda_4}{2} v^2$$

ここで $|\cos\theta_{\beta\alpha}| \ll 1$, $v = 246\text{GeV}$, λ_5 と λ_4 はヒッグス4点結合定数

今回レプトンセクターで用いるパラメーターは $m_H, m_{H^+}, m_A, \theta_{\beta\alpha}, \rho^{\mu\tau}, \rho^{\tau\mu}$

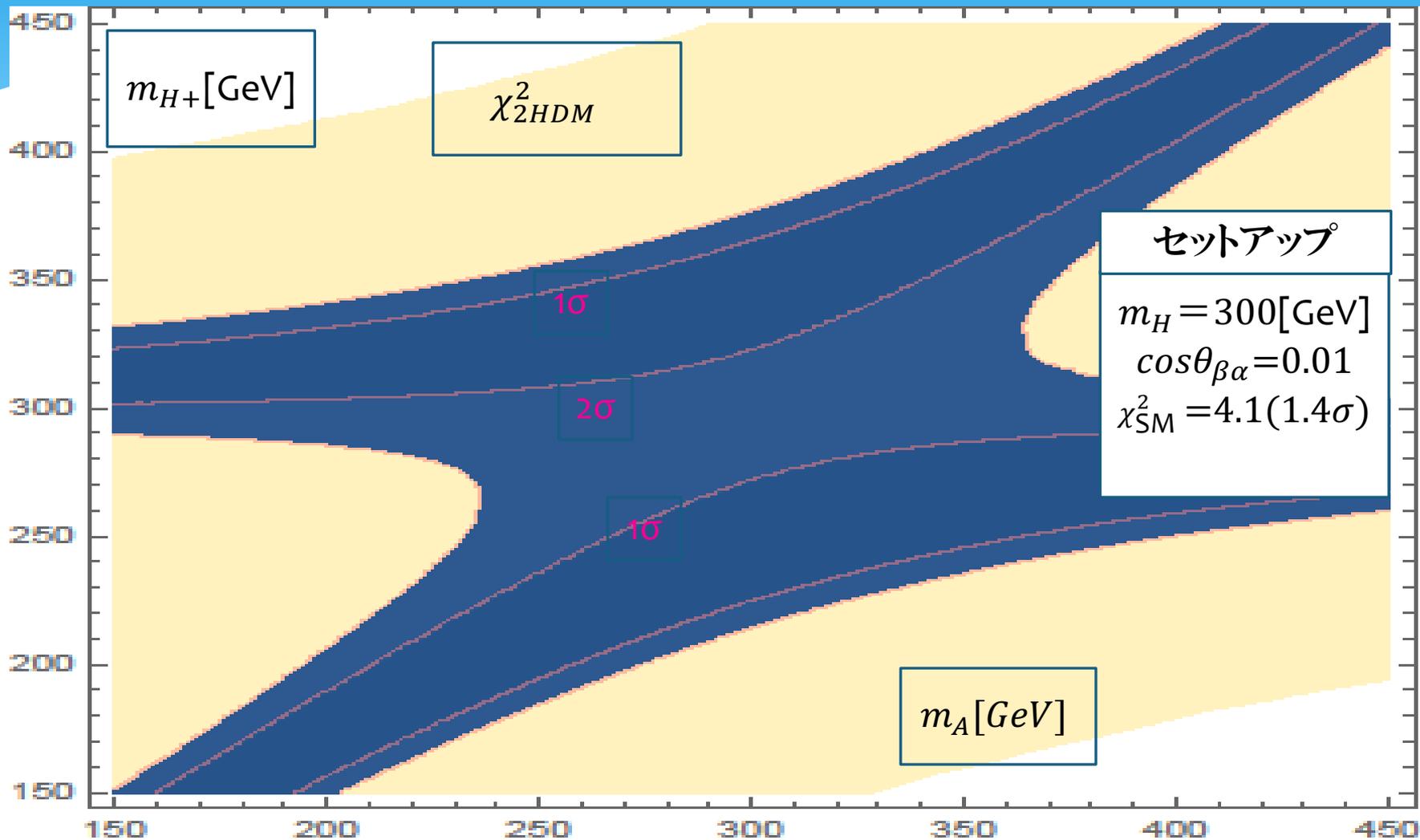
ニュートリノ質量は
シーソーメカニズムを仮定

ヒッグス4点結合

* ヒッグスポテンシャルは以下のように書き下せる。

$$\begin{aligned} * \quad V = & M_{11}^2 H_1^\dagger H_1 + M_{22}^2 H_2^\dagger H_2 - (M_{12}^2 H_1^\dagger H_2 + h.c.) \\ & + \frac{\lambda_1}{2} (H_1^\dagger H_1)^2 + \frac{\lambda_2}{2} (H_2^\dagger H_2)^2 + \lambda_3 (H_1^\dagger H_1)(H_2^\dagger H_2) + \lambda_4 (H_1^\dagger H_2)(H_2^\dagger H_1) \\ & + \frac{\lambda_5}{2} (H_1^\dagger H_2)^2 + \{\lambda_6 (H_1^\dagger H_1) + \lambda_7 (H_2^\dagger H_2)\} (H_1^\dagger H_2) + h.c. \end{aligned}$$

STUパラメータの χ^2



今回はヒッグスポテンシャルの安定性のため $m_A < m_H$ を仮定する。正直なところ m_H - 次第でSTUパラメータはフィットできてしまう。軽くしてしまえばNPの効果が出てきやすくなる。この例としては、 $b \rightarrow s\gamma$, ΔM_{B_s} および $b \rightarrow \mu\bar{\mu}$ など。

B_cメソン寿命からの制限

Γ_{B_c} :1611.06676 R.Alonso et al.

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



4.06

$$\text{Br}(B_c^- \rightarrow \tau \bar{\nu}) =$$

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

$$\text{Br}(B_c^- \rightarrow \tau \bar{\nu})_{SM} = 0.02 \text{ (2\%)}$$

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