

CP-violating Higgs model canceling the electric dipole moment

久保田 充紀 (阪大理)

共同研究者: 兼村 晋哉 (阪大理)

柳生 慶 (阪大理)

Based on JHEP 08 (2020) 026



大阪大学
OSAKA UNIVERSITY

Contents

- Introduction
- Our model
- Numerical analysis
- Summary

Introduction

[Sakharov (1967)]

[Kuzmin, Rubakov, Shaposhnikov (1985)]

[Huet, Sather (1995)]

[Kajantie, Laine, Rummukainen, Shaposhnikov (1996)]

- 2012年のヒッグス粒子の発見により標準模型は $O(100)\text{GeV}$ 以下の低エネルギー有効理論として確立した。しかしながら、標準模型を越えた現象が解かれずに残っている。
- 例えばバリオン数非対称性問題は、
 - ・ Bの破れ
 - ・ CとCPの破れ
 - ・ 熱平衡からの逸脱のサハロフの3条件を要求する。
- 標準模型の枠内では 小林益川位相は十分なバリオン数を生成できず、1次相転移も起こらないため、電弱バリオン数生成が起こらない。よって何らかの拡張が必要とされる。

良い候補としてCPを破る拡張ヒッグス模型が考えられる。

Introduction

- CPを破る拡張ヒッグス模型が良い候補となる。
- しかしながら、ヒッグスセクター拡張によるCPの破れは電気双極子モーメント(EDM)の探索実験により強く制限されている。

$$H_{\text{EDM}} = -d \frac{\mathbf{S}}{|\mathbf{S}|} \cdot \mathbf{E} \xrightarrow{\mathcal{T}} +d \frac{\mathbf{S}}{|\mathbf{S}|} \cdot \mathbf{E}$$

$$d \neq 0 \Rightarrow \cancel{\mathcal{T}} \quad (\cancel{CP})$$

現在の制限（電子EDM）：

$$|d_e| < 1.1 \times 10^{-29} \text{ [e cm]}$$

[ACME collaboration (2018)]

$$\text{cf. } |d_e(\text{SM})| \sim \mathcal{O}(10^{-38}) \text{ [e cm]}$$

[Hoogeveen (1990), ...]

電弱バリオン数生成とEDM制限を両立できるシナリオはないか？

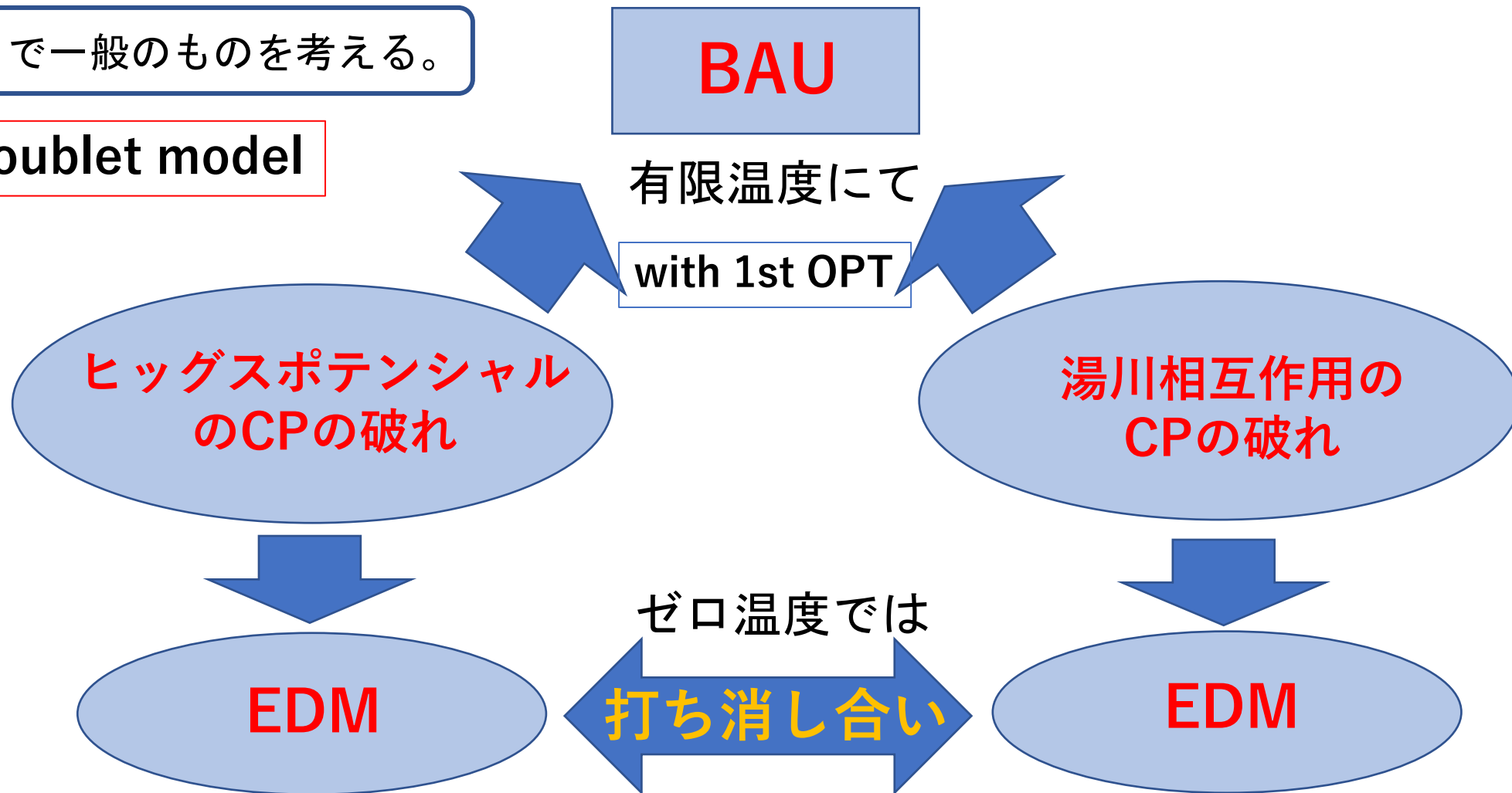
本講演では、これを実現するアイデアと具体的なモデルを提案する。

Our idea

BAU: Baryon number asymmetry of the Universe

SMの対称性のもとで一般のものを考える。

Two Higgs doublet model



Contents

- Introduction
- **Our model**
- Numerical analysis
- Summary

Model (1/3) -Higgs Potential-

$$\Phi_1 = \begin{pmatrix} G^+ \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(v + h_1 + iG^0) \end{pmatrix}$$
$$\Phi_2 = \begin{pmatrix} H^+ \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(h_2 + ih_3) \end{pmatrix}$$

• Potential: $V = -\mu_1^2|\Phi_1|^2 - \mu_2^2|\Phi_2|^2 - \left\{ \mu_3^2(\Phi_1^\dagger\Phi_2) + h.c. \right\}$ (Higgs basis)
[Davidson, Haber, PRD72, 035004 (2005)]

$$+ \frac{1}{2}\lambda_1|\Phi_1|^4 + \frac{1}{2}\lambda_2|\Phi_2|^4 + \lambda_3|\Phi_1|^2|\Phi_2|^2 + \lambda_4|\Phi_2^\dagger\Phi_1|^2$$
$$+ \left\{ \left[\frac{1}{2}\lambda_5(\Phi_1^\dagger\Phi_2) + \lambda_6|\Phi_1|^2 + \lambda_7|\Phi_2|^2 \right] (\Phi_1^\dagger\Phi_2) + h.c. \right\}$$

停留条件:

$$0 = \frac{\partial V}{\partial h_j} \Big|_{\Phi_{1,2}=\langle\Phi_{1,2}\rangle} \rightarrow \begin{cases} \mu_1^2 = \frac{1}{2}v^2\lambda_1 \\ \mu_3^2 = \frac{1}{2}v^2\lambda_6 \end{cases}$$

複素数は3つ:

$$\lambda_{5-7} = |\lambda_{5-7}|e^{i\theta_{5-7}}$$

Model (2/3) -Higgs Potential-

位相の再定義 により $\theta_5 = 0$ と選ぶ。

仮定 $\lambda_6 = 0$ を課す。

• Mass matrix: $\mathcal{M}^2 = v^2 \begin{pmatrix} \lambda_1 & \cancel{|\lambda_6| \cos \theta_6} & \cancel{-|\lambda_6| \sin \theta_6} \\ & \mathcal{M}_{22} & \cancel{-\frac{1}{2} |\lambda_5| \sin \theta_5} \\ & & \mathcal{M}_{33} \end{pmatrix} \begin{matrix} h_1 = H_1^0 \\ h_2 = H_2^0 \\ h_3 = H_3^0 \end{matrix}$

Mass eigenstate

この時 h_1 は他の中性スカラーと混合しない。

At tree level, $\frac{g_{H_1^0 X X}^{2\text{HDM}}}{g_{h X X}^{\text{SM}}} = 1$

$\begin{cases} X : \text{SM particle} \\ H_1^0 : 125 \text{ GeV Higgs} \end{cases}$

→ ヒッグスポテンシャルには、 λ_7 の位相 θ_7 が残る。

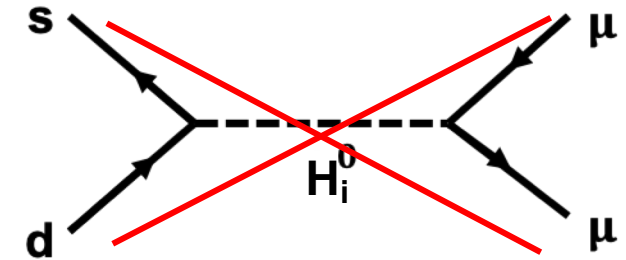
Model (3/3) -Yukawa int.-

$$\Phi_1 = \begin{pmatrix} G^+ \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(v + h_1 + iG^0) \end{pmatrix}$$
$$\Phi_2 = \begin{pmatrix} H^+ \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(h_2 + ih_3) \end{pmatrix}$$

• Yukawa: $\mathcal{L}_Y \supset -\frac{\sqrt{2}}{v} \bar{Q}_L^i \left(M_d^{ij} \Phi_1 + Y_d^{ij} \Phi_2 \right) d_R^j + h.c.$

危険なFCNCを引き起こす。

FCNC: Flavor changing neutral current



仮定 $Y_f^{ij} = \zeta_f M_f^{ij}$ を課す。 -> No FCNC

[A. Pich, P. Tuzon, PRD80, 091702 (2009)]

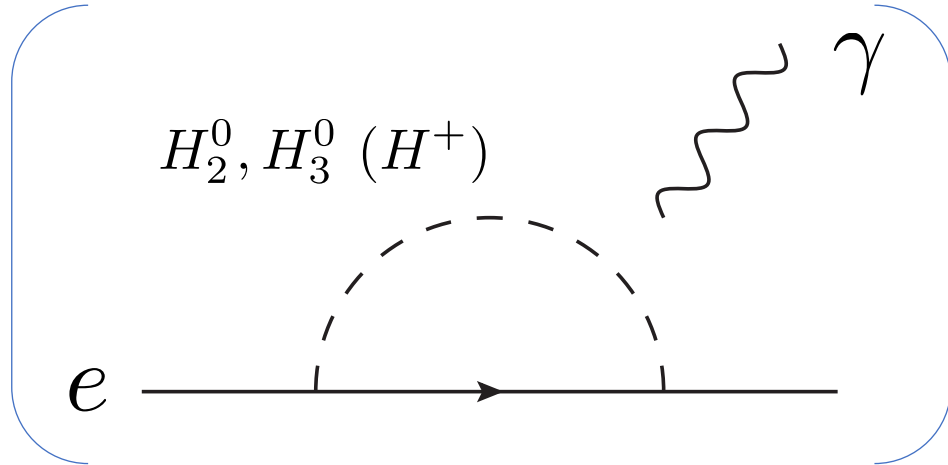
$$\zeta_f = |\zeta_f| e^{i\theta_f} \quad f = u, d, e$$

→ 3つの位相 θ_f が湯川相互作用項から生じる。

Contribution to the EDM

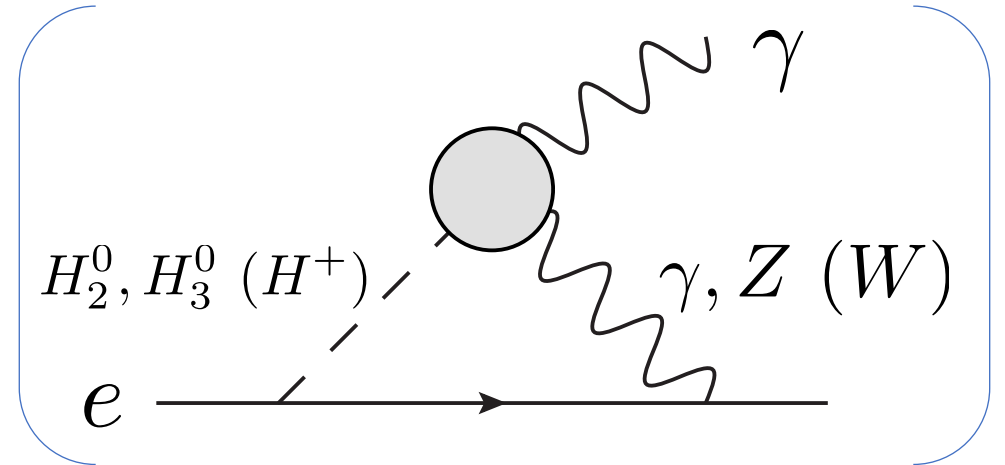
$$\mathcal{L}_{EDM} = -i \frac{d}{2} \bar{\psi} \sigma^{\mu\nu} \gamma^5 \psi F_{\mu\nu}$$

- Barr-Zee ダイアグラム (2-loop) がリーディングな寄与を与える。
[Barr, Zee, PRL (1990)]



$$\propto \frac{1}{(4\pi)^2} y_e^3$$

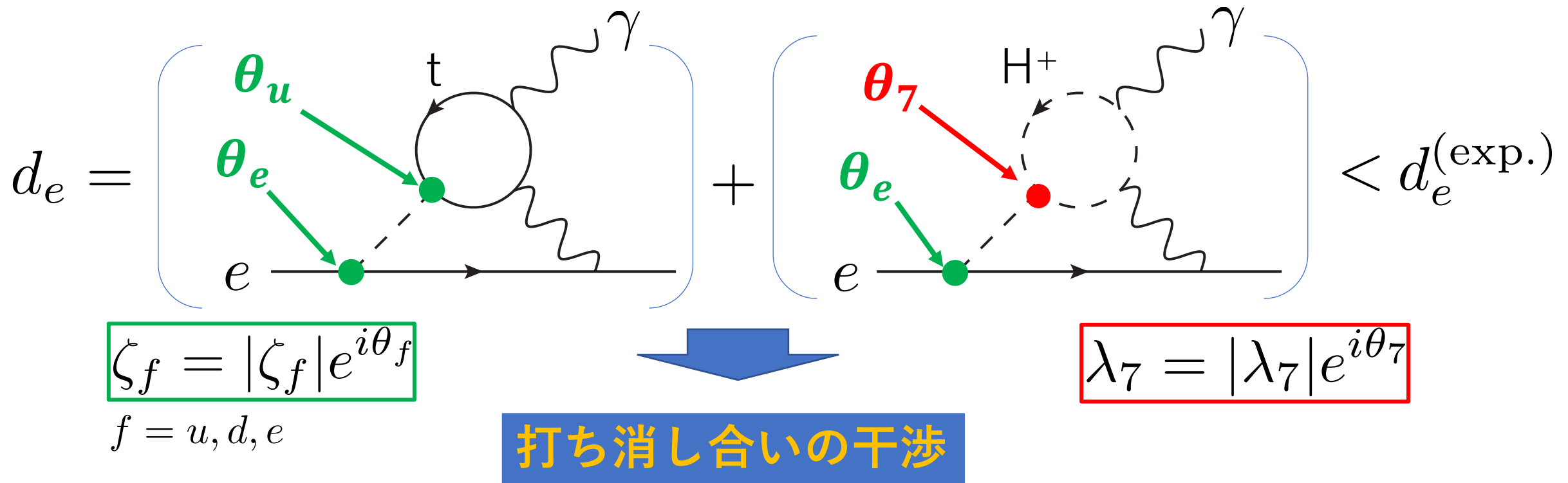
<



$$\propto \frac{1}{(4\pi)^4} y_e$$

Destructive interference of the EDM

- 電子 EDM は以下のように分解できる。



Contents

- Introduction
- Our model
- **Numerical analysis**
- **Summary**

Numerical result: Electron EDM

• Input: $(\theta_u, \theta_d, \theta_e, \theta_7) = (2, 0, \pi/2, 1)$

$$|\zeta_u| = 0.01, |\zeta_d| = 0.1,$$

$$|\zeta_e| = 0.5, |\lambda_7| = 0.3$$

• Output:

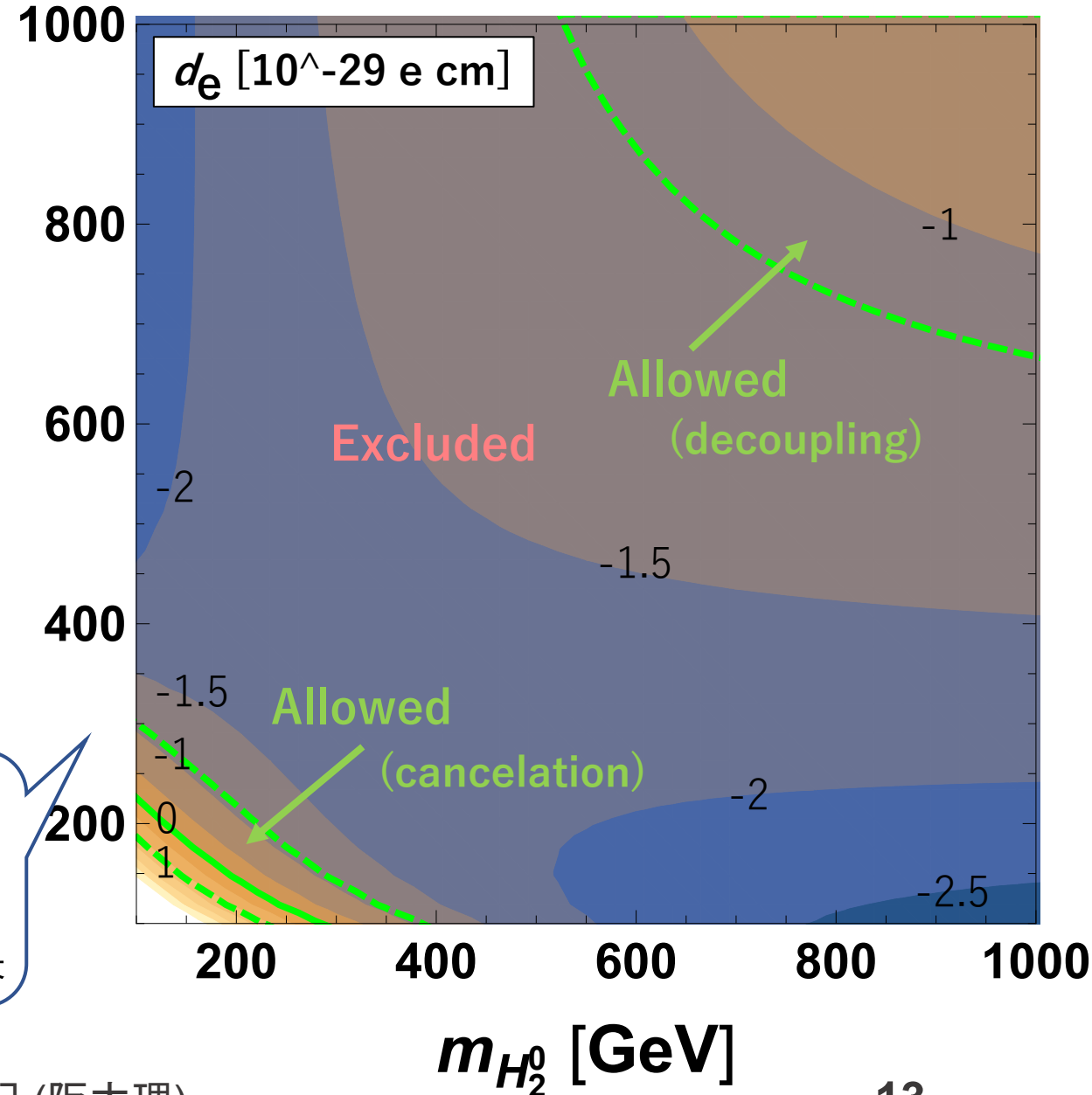
— : $d_e = 0$
 - - - : Latest EDM bound

EDM は以下の領域で小さくなる。

Masses ~ 200 GeV : 打ち消し合いの効果

Masses ~1000 GeV : デカップリングの効果

$m_{H^\pm} (= m_{H_3^0})$ [GeV]



$\theta_d=0, \theta_e=\pi/4$

Numerical result: Electron EDM

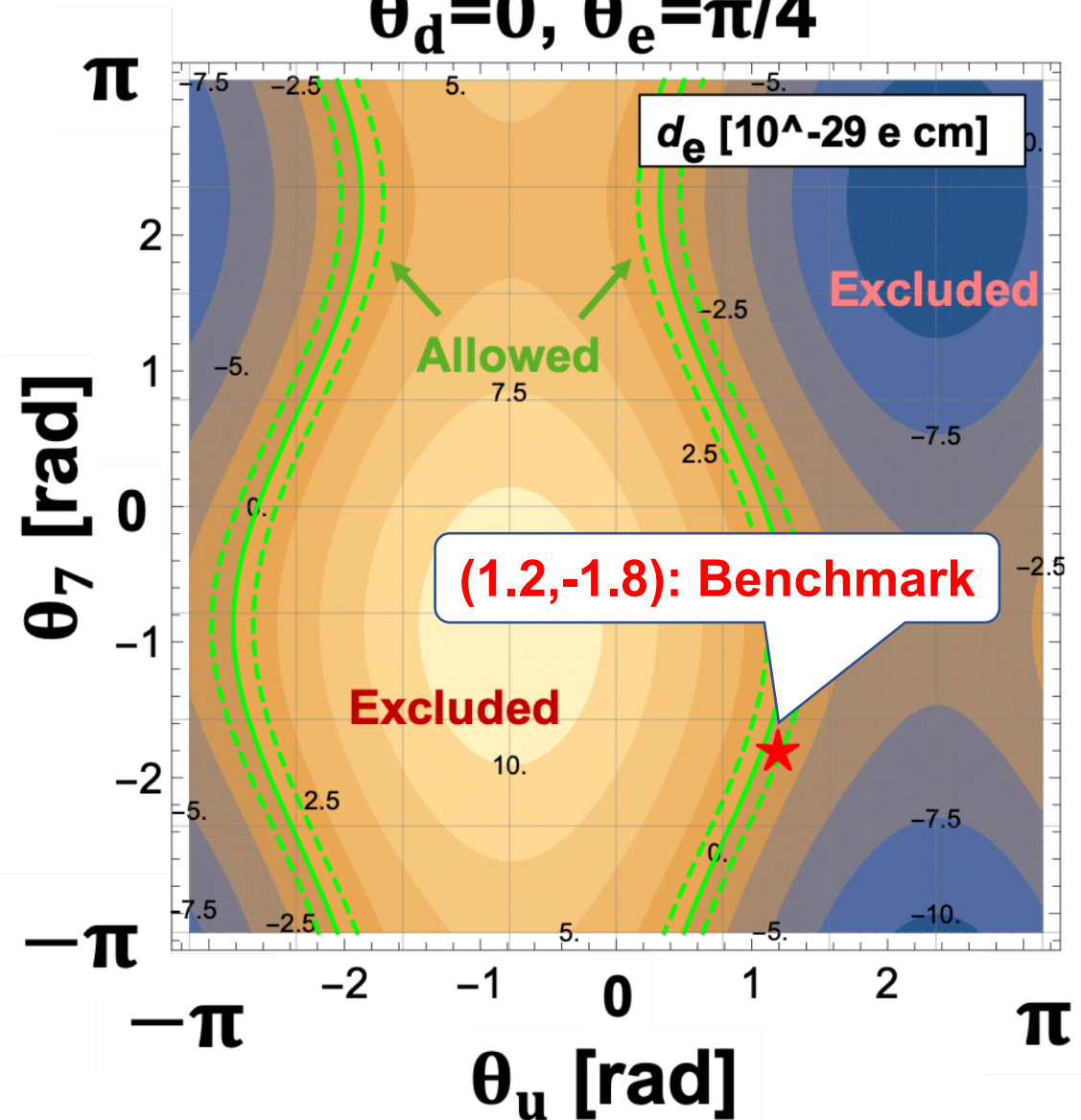
- Input: $m_{H^+} = 230[\text{GeV}]$
 $|\zeta_u| = 0.01, |\zeta_d| = 0.1, m_{H_2^0} = 280[\text{GeV}]$
 $|\zeta_e| = 0.5, |\lambda_7| = 0.3, m_{H_3^0} = 230[\text{GeV}]$

- Output:
 — : $d_e = 0$
 - - - : Latest EDM bound

ベンチマークポイント(1.2, -1.8)では:

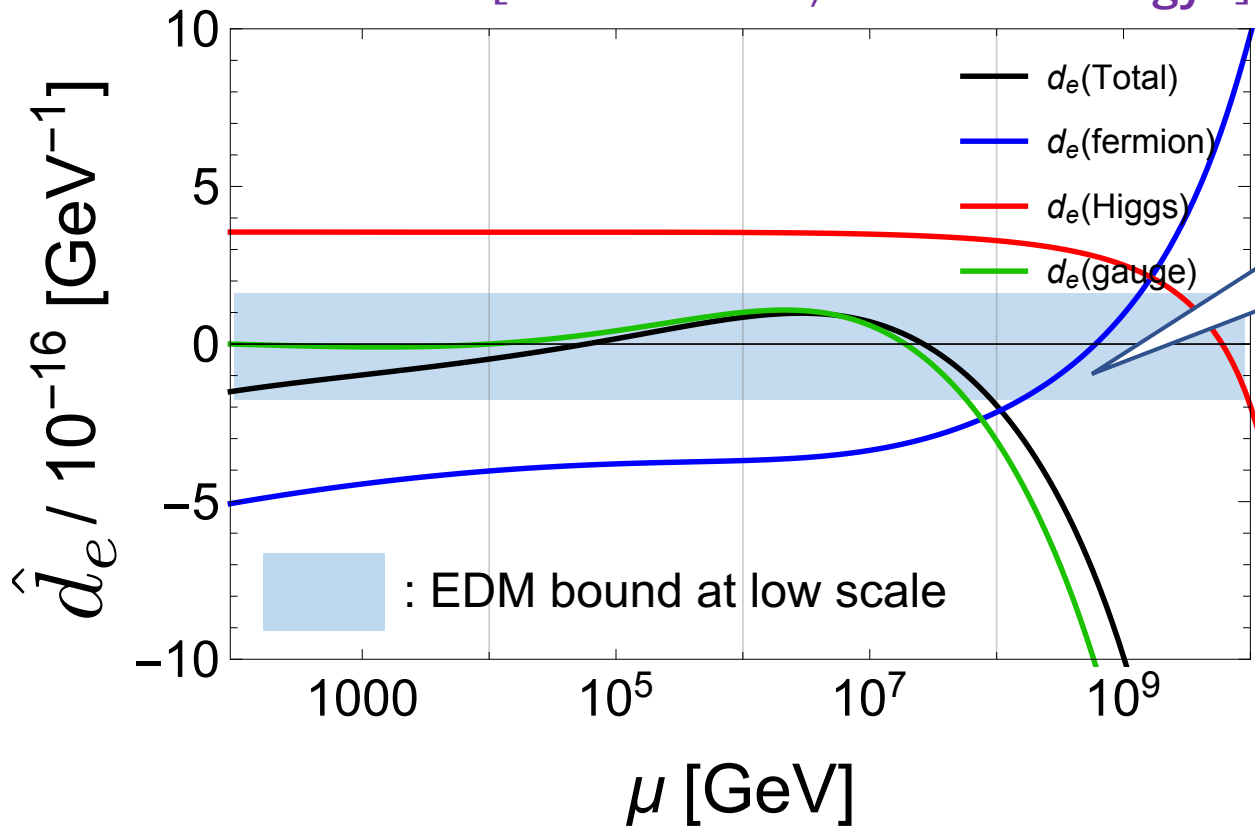
$d_e = -0.95 [10^{-29} \text{ e cm}]$
 $|d_e^{\text{exp.}}| < 1.1 [10^{-29} \text{ e cm}]$
 [ACME collaboration, Nature (2018)]

→ CP位相が $O(1)$ を獲得する一方でEDMの制限を満たすことができる!



RGE analysis: Scale dependence of the EDM

[S. Kanemura, MK and K. Yagyu]



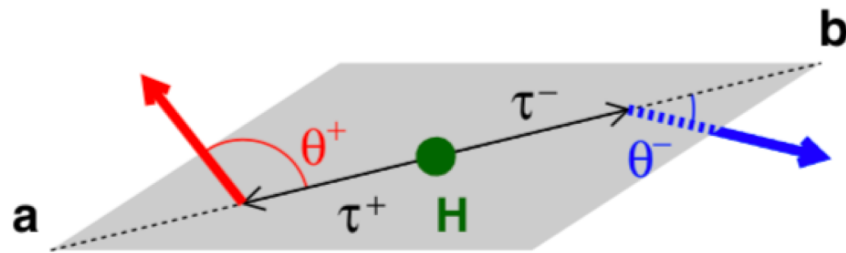
エネルギースケールが少なくとも約 10^8 GeV までは、EDMの打ち消し合いが保たれる。

これは、低いエネルギースケールにおいてEDMの打ち消し合いを安定して実現させている対称性や理論などの何らかの存在を示唆しているかもしれない。

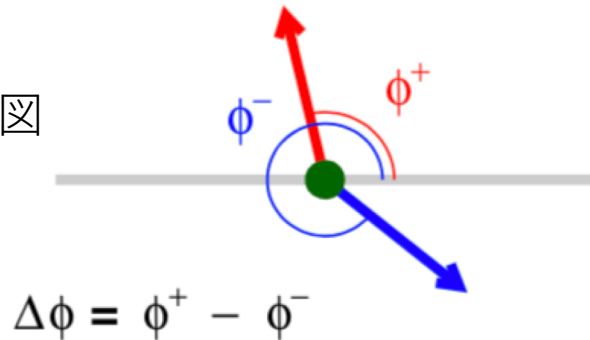
Beta functions: the general 2HDM at 1-loop level

Angular distribution

追加のヒッグス粒子の崩壊

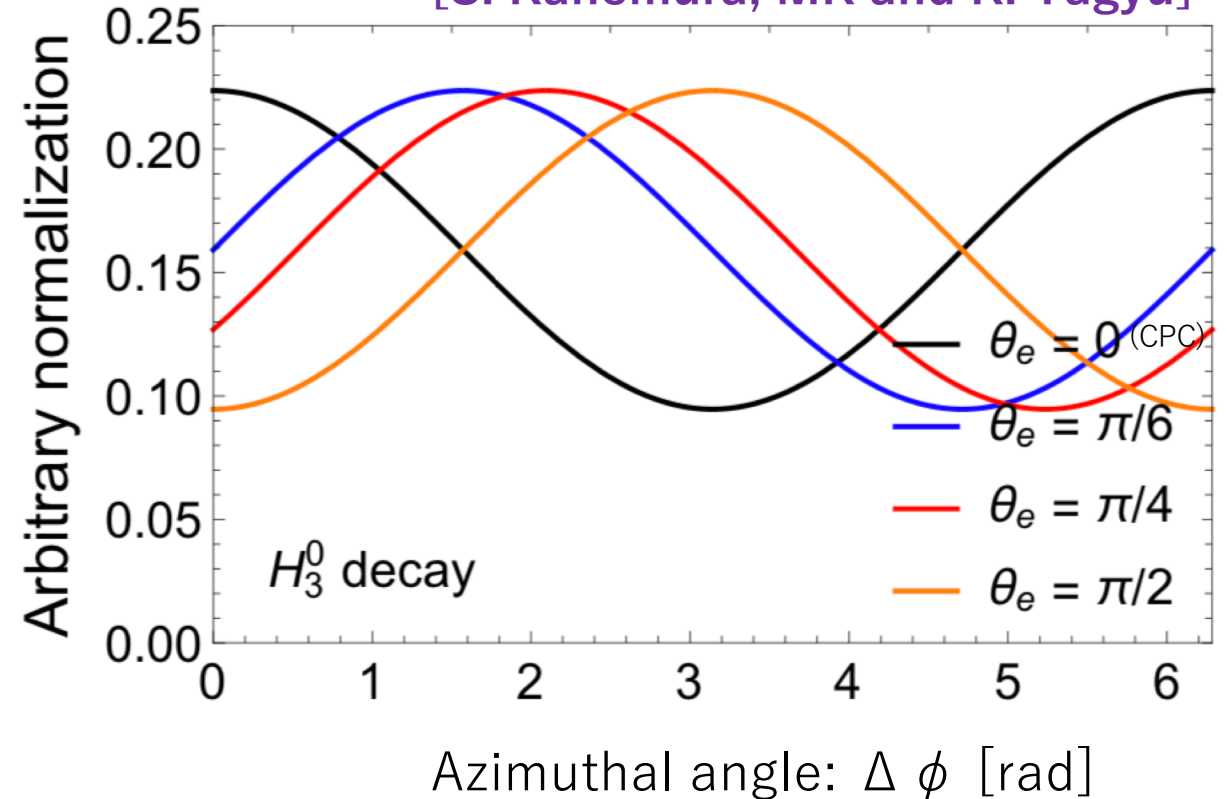


a から b の向きにみた図



Picture by [Jeans, Wilson, PRD98, 013007 (2018)]

[S. Kanemura, MK and K. Yagyu]



このようなCP位相は、将来の加速器実験でテストできるだろうか？

追加のヒッグス粒子の生成やバックグラウンドの観点から、LHCでは難しい。

ILCにおける角度分布のテストに注目する。

Angular distribution

[S. Kanemura, MK and K. Yagyu]

注目する過程： $e^+ e^- \rightarrow H_2 H_3$,

$$H_2 \rightarrow b \bar{b}, H_3 \rightarrow \tau^+ \tau^-$$

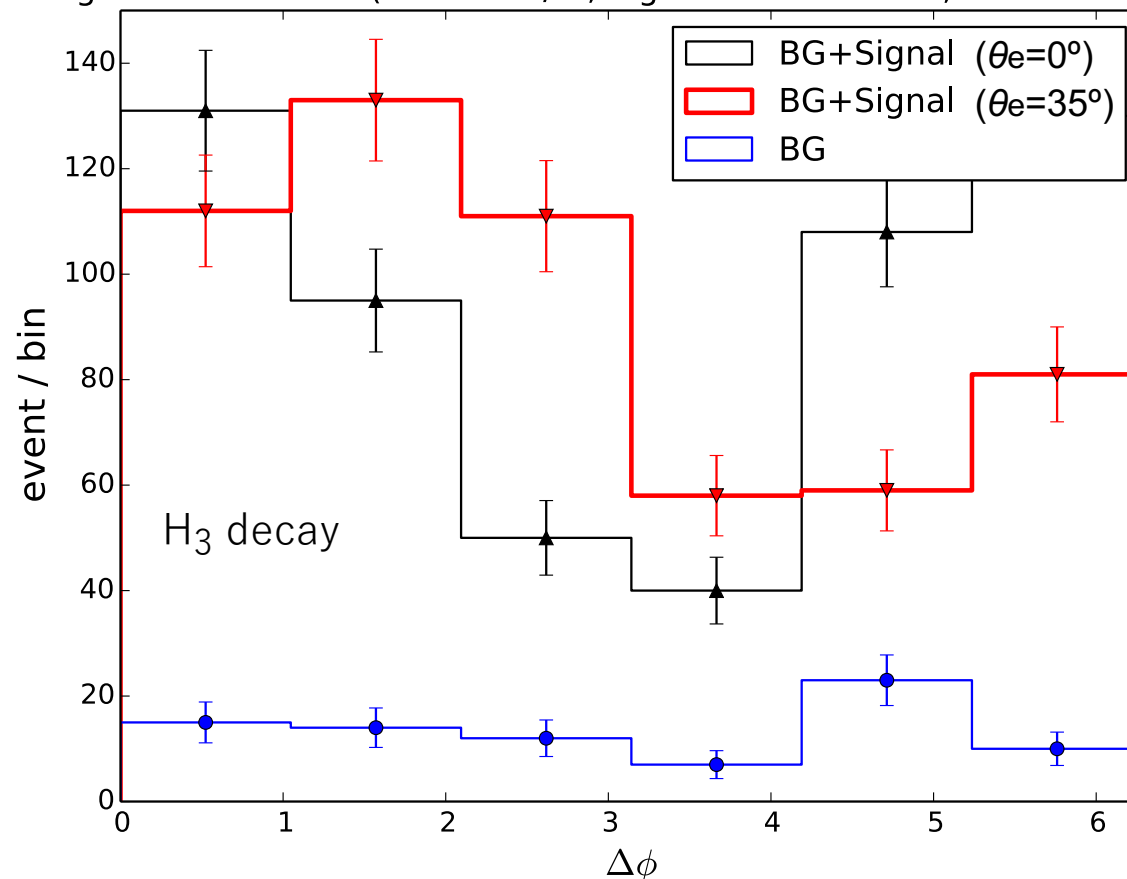
- Input: $\theta_e=35^\circ$, $m_{H^+}=170[\text{GeV}]$
 $|\zeta_u|=0.01, |\zeta_d|=0.1, m_{H_2^0}=150[\text{GeV}]$
 $|\zeta_e|=1, |\lambda_7|=0.3, m_{H_3^0}=170[\text{GeV}]$
- Output: $d_e = -0.62 [10^{-29} \text{ e cm}]$

角度分布の計算には、計算は MadGraph5 と TauDecay を用いた。 $\tau \rightarrow \pi \nu$ と $\tau \rightarrow \rho \nu$ を考慮。b tag 能率を考慮。ILC $\sqrt{s}=500 \text{ GeV}$ を仮定。

[Alwall, Herquet, Maltoni, Mattelaer, Stelzer (2011)]

[Hagiwara, Li, Mawatari, Nakamura (2013)]

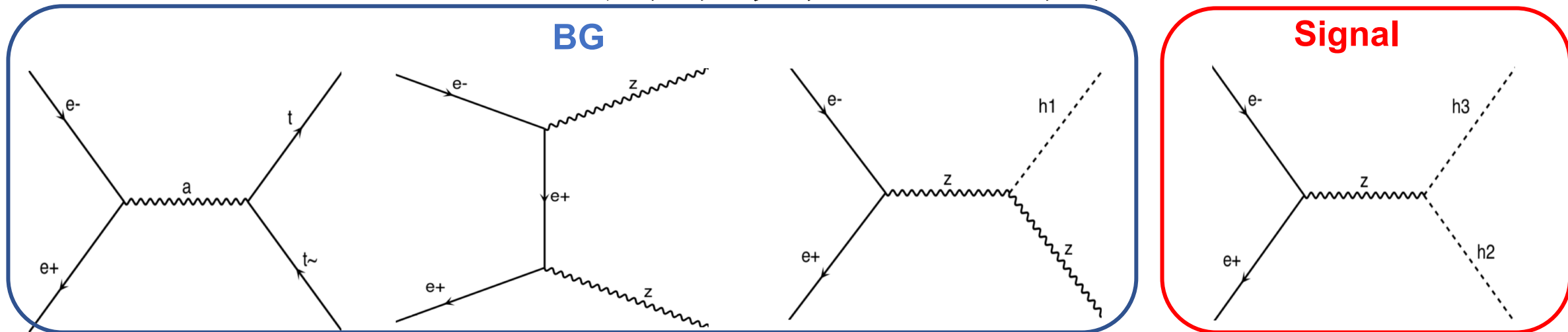
Angular distribution (L = 3000 /fb, Signal = 473 events, BG = 81 events)



θ_e が 35° から 55° であれば 5σ を超えて、ILC で CP の破れが見える可能性がある！

Angular distribution

• $e^+ e^- \rightarrow b \bar{b} \tau^+ \tau^-$ のバックグラウンドとシグナル



$\sqrt{s} = 500 \text{ GeV}$, $L = 3000 \text{ fb}$ を仮定。b tag 能率を考慮。

	$t\bar{t}$	ZZ	ZH_1	H_2H_3	$S/\sqrt{S+B}$
no cut	8356	5531	2566	4827	31.9
$140 \leq m_{b\bar{b}} \leq 160 \text{ (GeV)}$	719	0	0	4827	64.6

$b \bar{b}$ の不変質量カット ($m_{H_2} \pm 10 \text{ GeV}$) によりほとんどのBGをカットできる。
 ここから、 $\tau \rightarrow \pi \nu$ と $\tau \rightarrow \rho \nu$ の分岐比を考慮するとイベント数は約1/10になる。

Contents

- Introduction
- Our model
- Numerical analysis
- **Summary**

Summary

1. 湯川結合とヒッグスポテンシャルにCPの破れを持つ Two Higgs doublet model に注目した。
2. 複数の $O(1)$ のCP位相の寄与による打ち消し合いにより、この模型はEDMからの厳しい制限を満たすことができる。
3. 打ち消し合いは高いスケールまで維持され得る。
4. 追加のヒッグスボソンの崩壊における角度分布に注目することで、このシナリオのCP位相が将来のILCで検出できる可能性が高いことが示された。
5. 今後はこのシナリオをさらに発展させて、既存の実験を満たしつつ BAUを解決し、かつ将来実験で検証可能な新しいシナリオを提案したい。

Back up

Destructive interference of the EDM

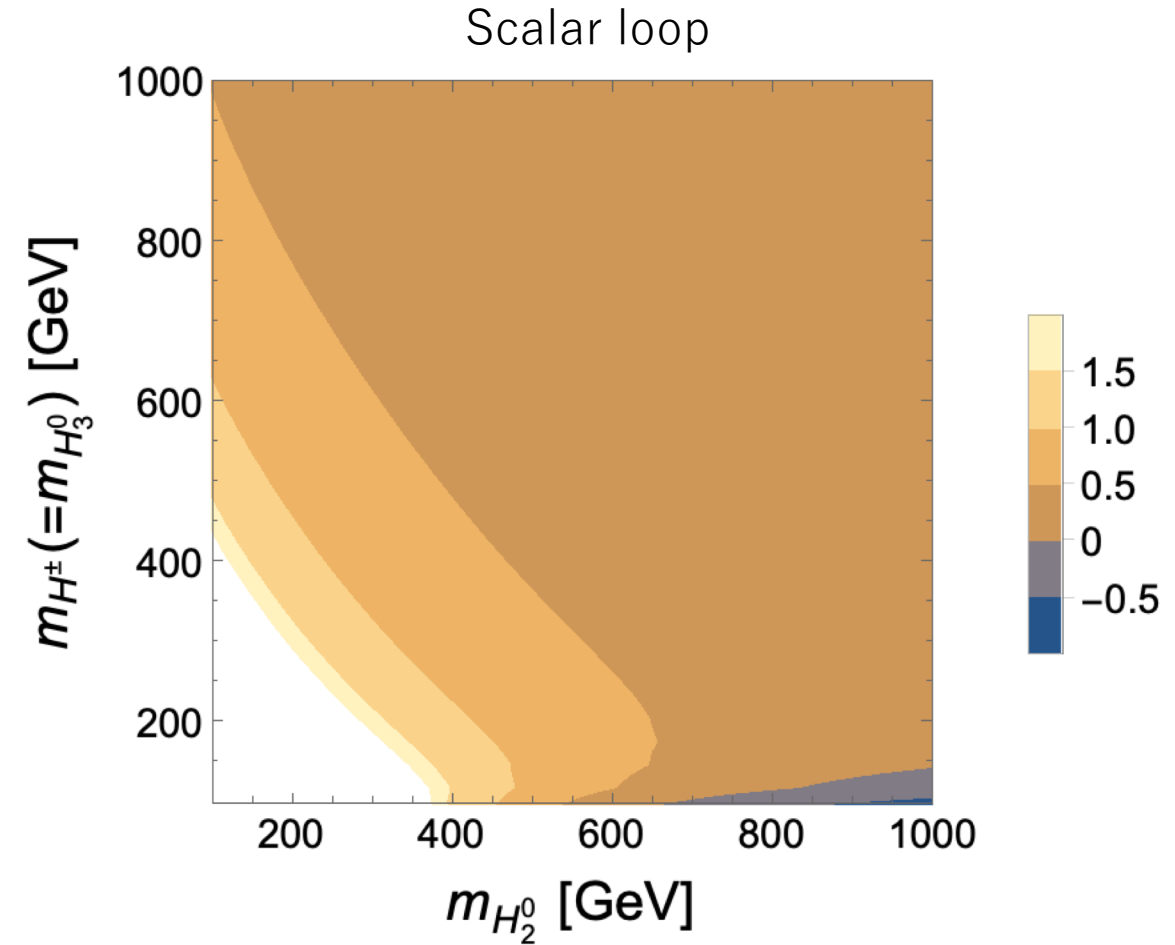
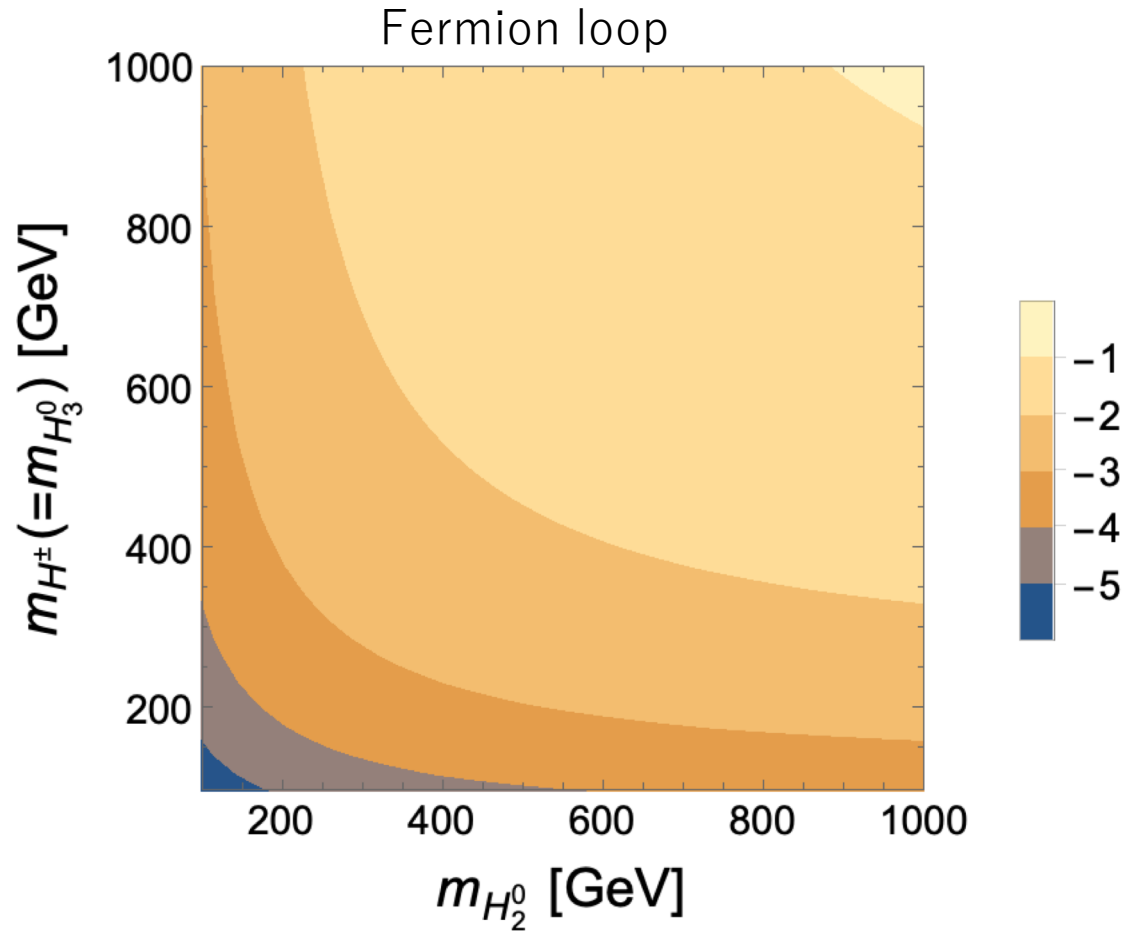
- Leading contributions to the electron EDM are decomposed as

$$d_e = \left(\text{Diagram 1} \right) + \left(\text{Diagram 2} \right) < d_e^{(\text{exp.})}$$

The diagram shows two Feynman diagrams for the electron EDM. The first diagram (left) shows an electron (e) interacting with a top quark (t) loop, with angles θ_u and θ_e . The second diagram (right) shows an electron (e) interacting with a top quark (t) loop that is connected to a proton (H+) via a dashed line, with angles θ_7 and θ_e .

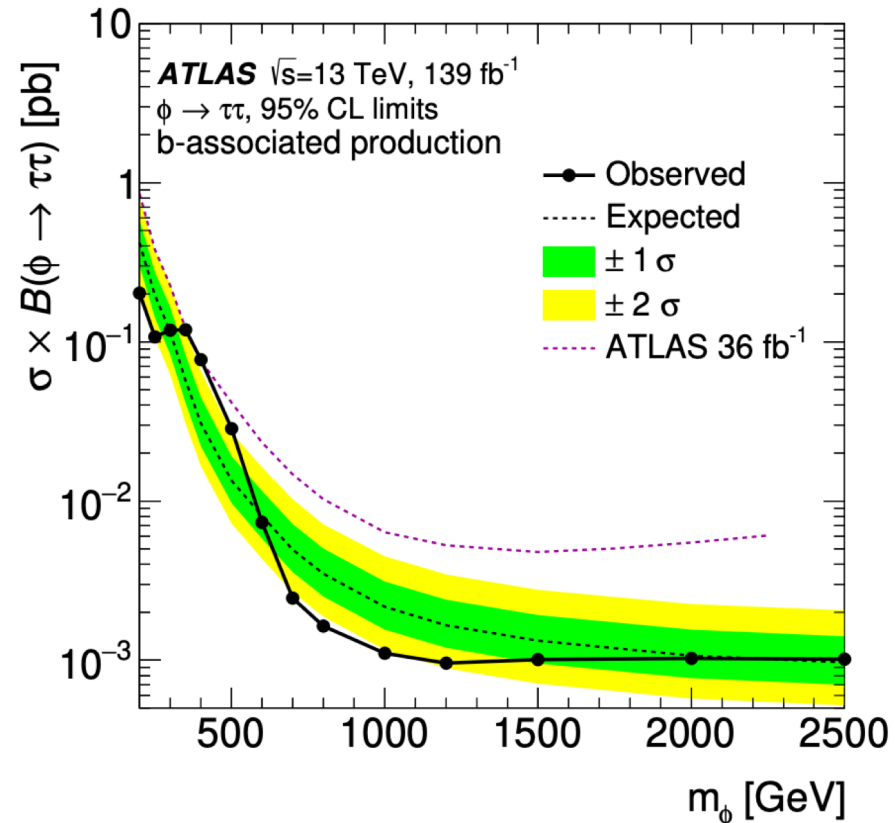
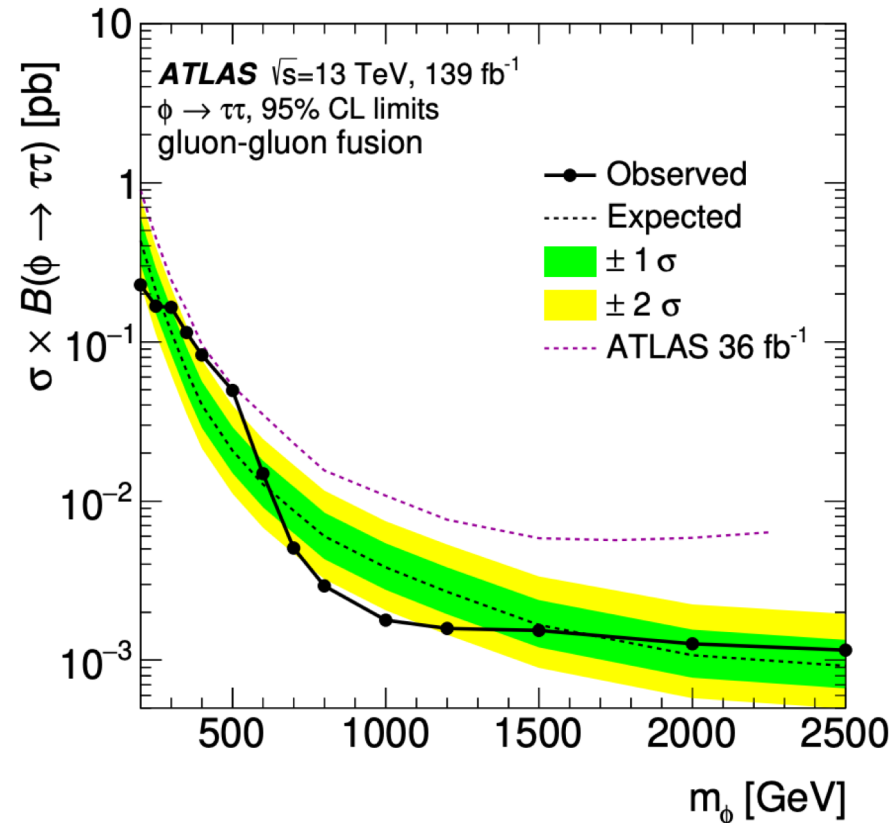
$$(A^\gamma I^\gamma + A^Z I^Z + A^W I^W) |\zeta_u| \sin(\theta_u - \theta_e) \simeq - (B^\gamma J^\gamma + B^Z J^Z + B^W J^W) |\lambda_7| \sin(\theta_7 - \theta_e),$$

Numerical result: Electron EDM



Productions

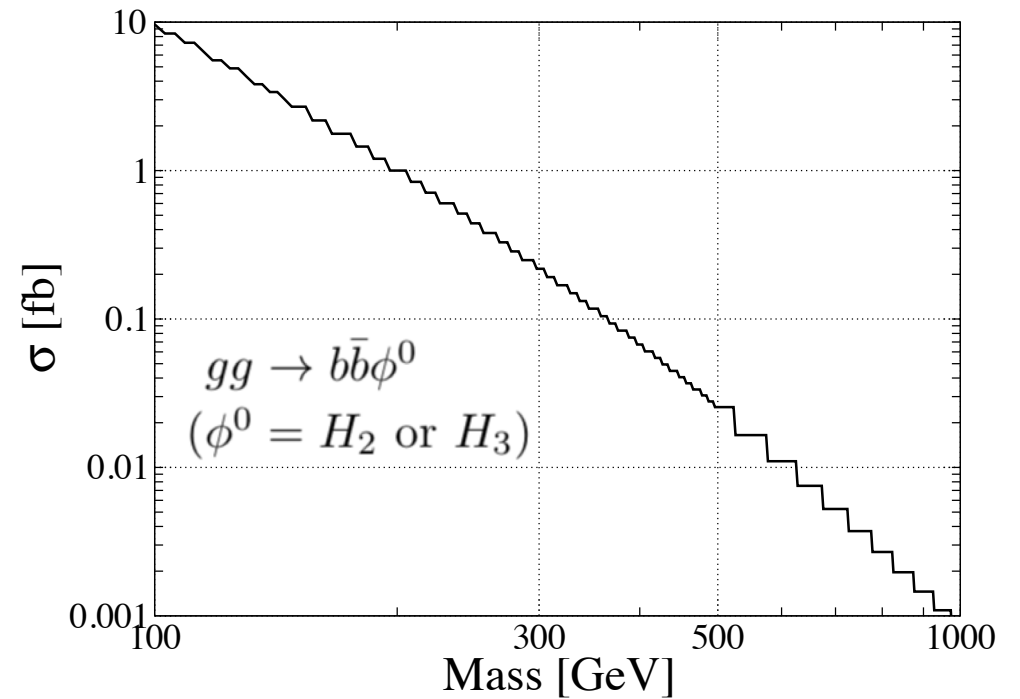
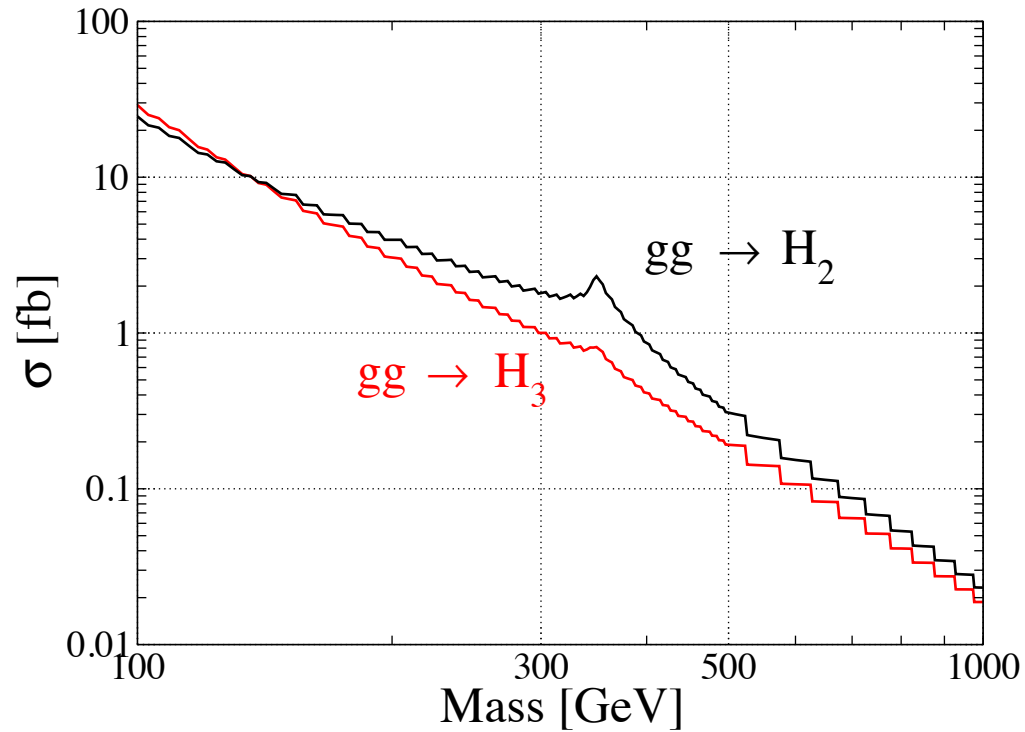
[arXiv:2002.12223]



The observed and expected 95% CL upper limits on the production cross section times branching fraction for a scalar boson (ϕ) produced via (left) ggF and (right) b-associated production.

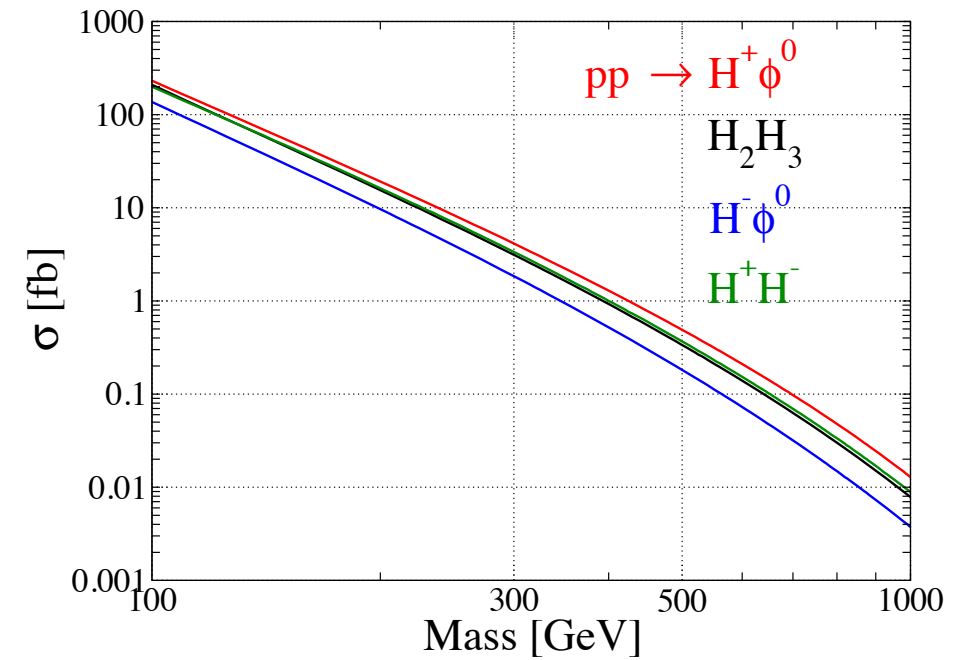
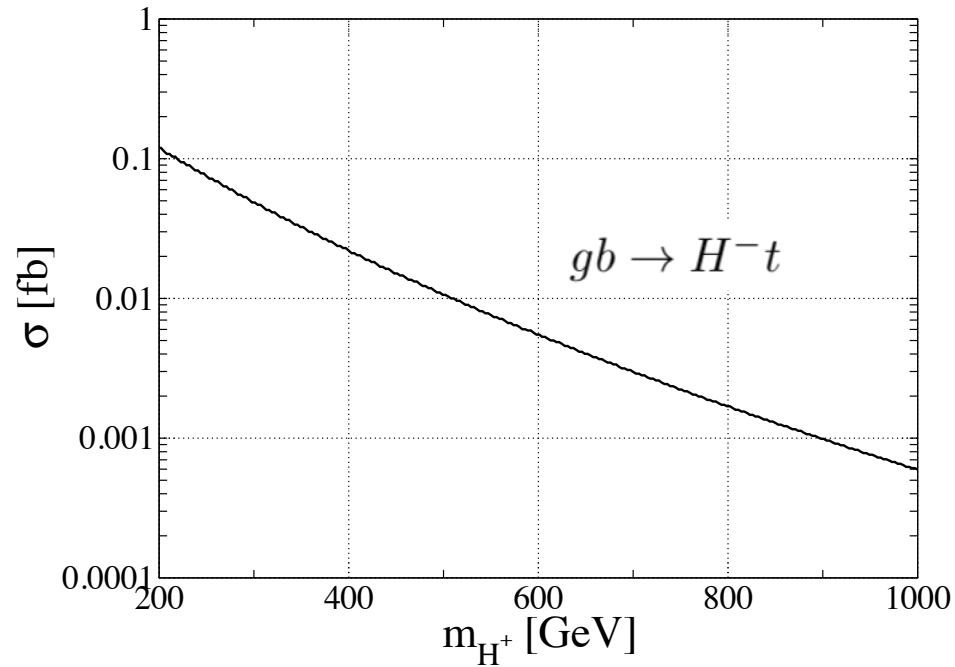
Productions (1/4)

at $\sqrt{s} = 13$ TeV

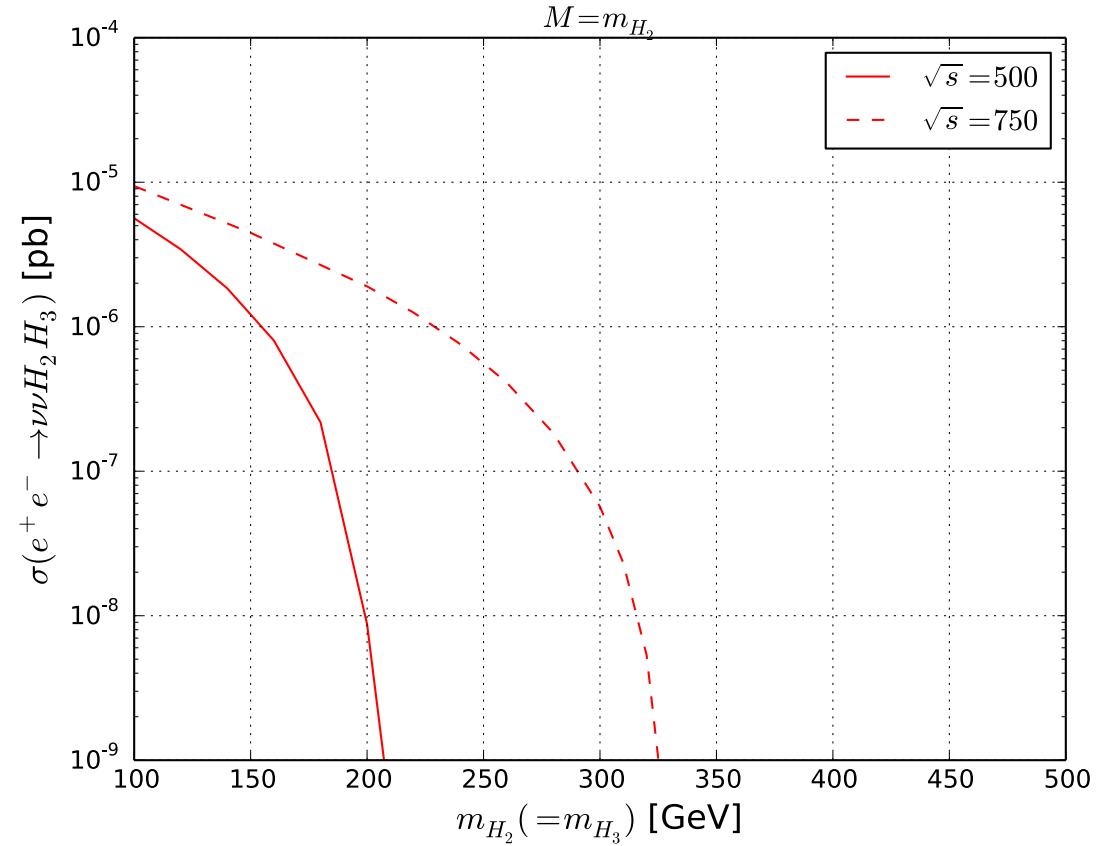
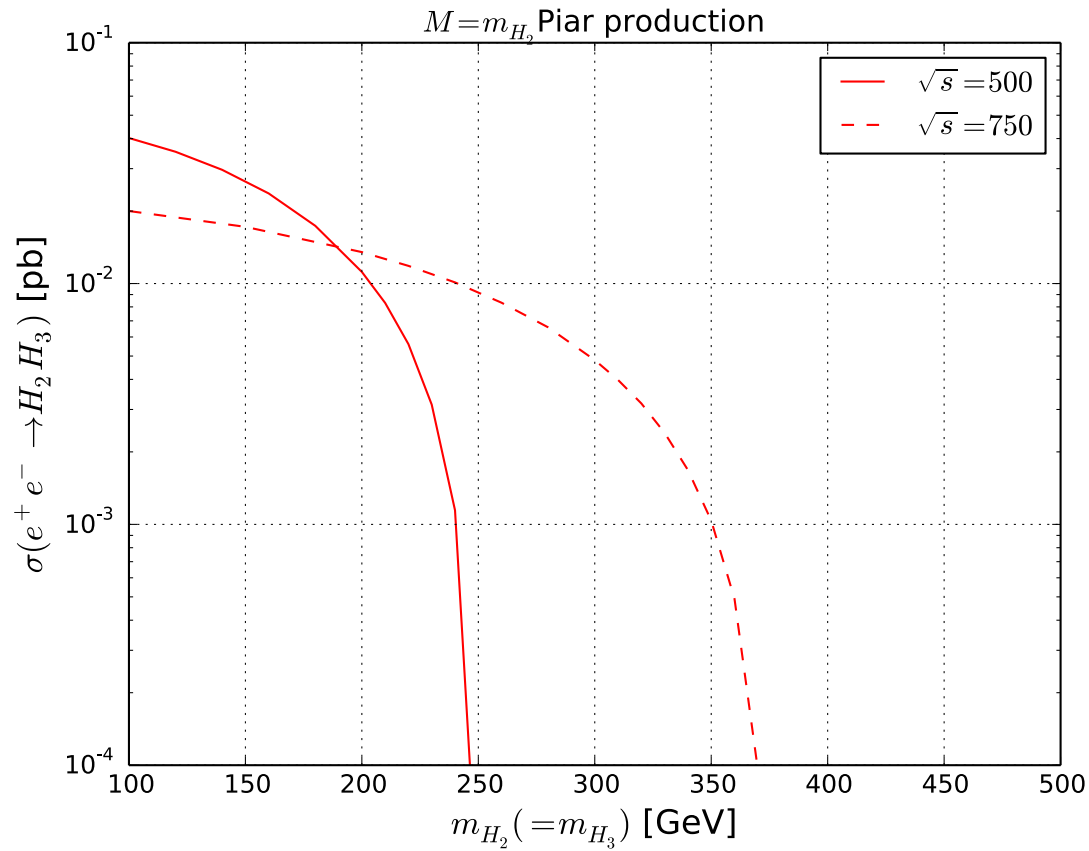


Productions (2/4)

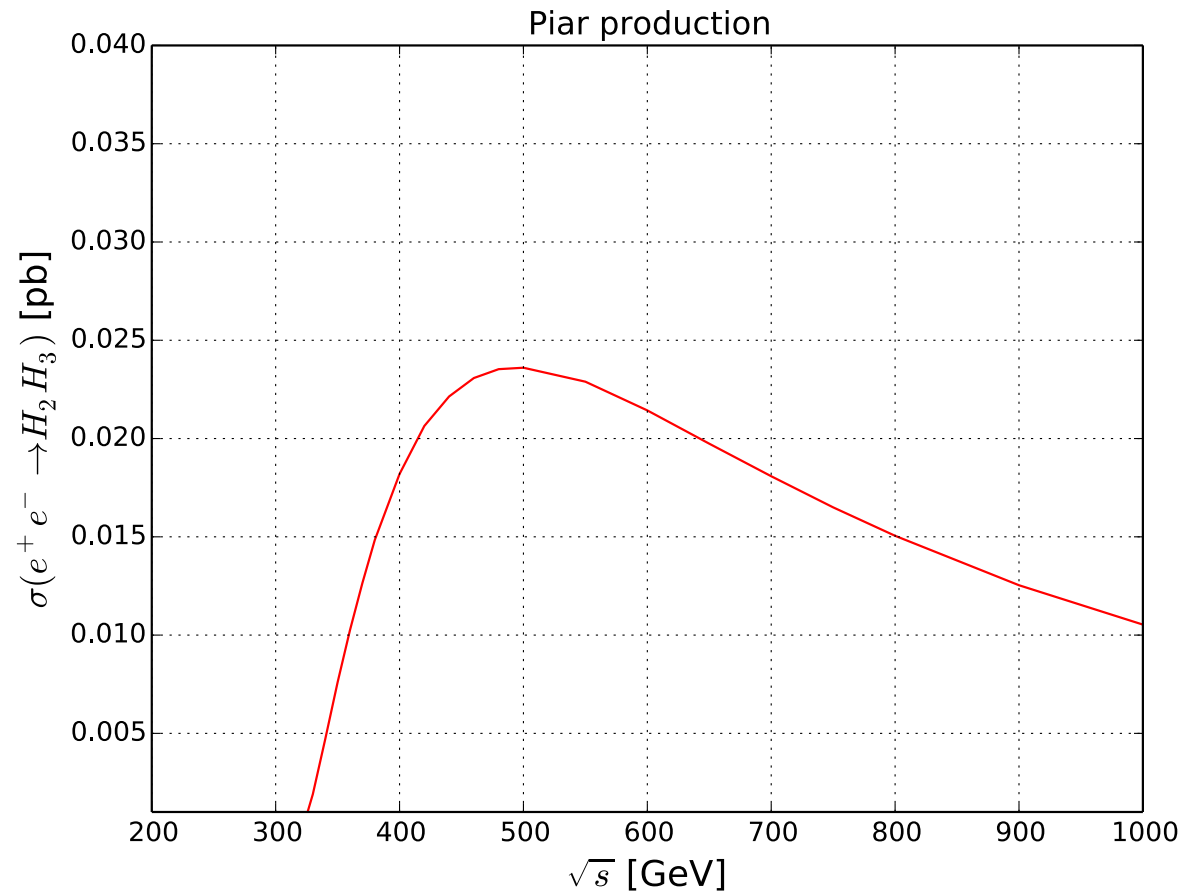
at $\sqrt{s} = 13$ TeV



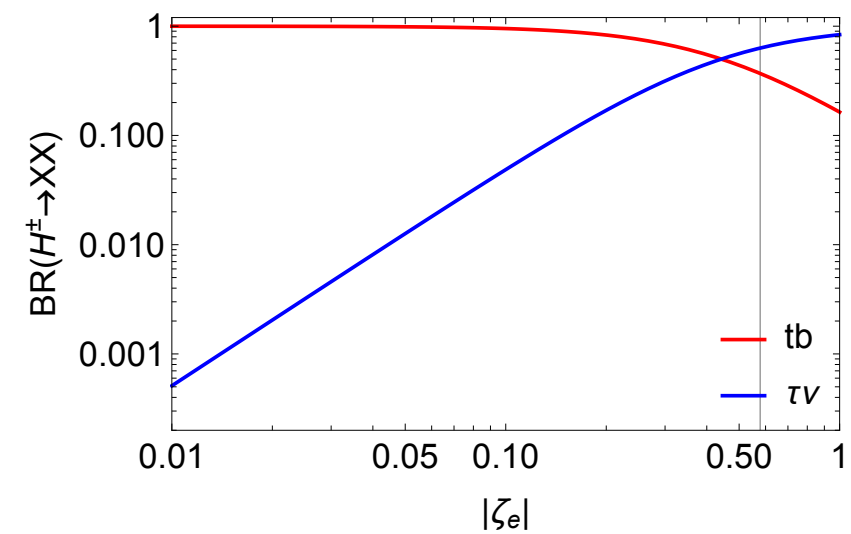
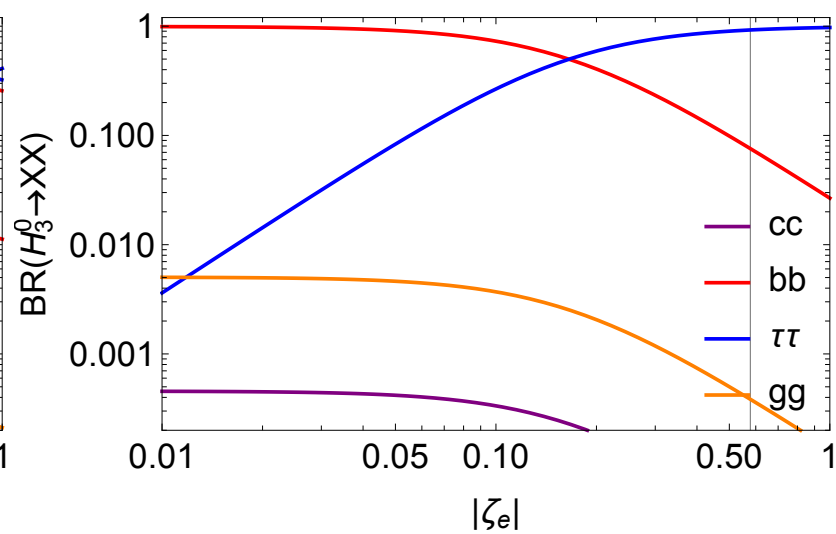
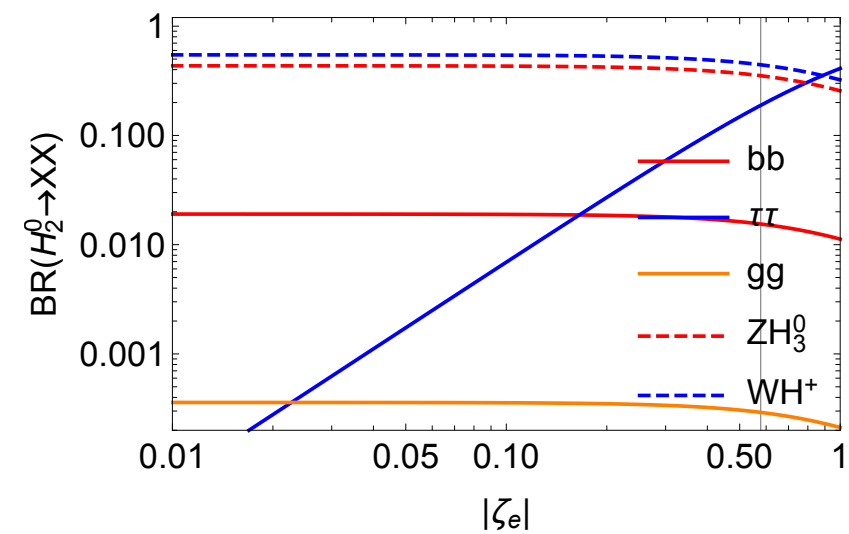
Productions (3/4)



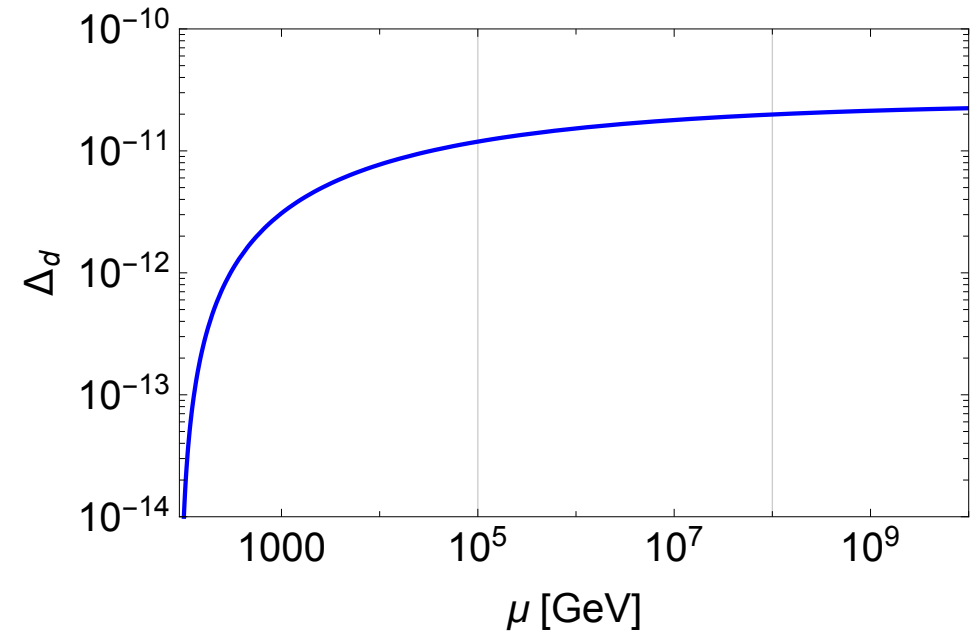
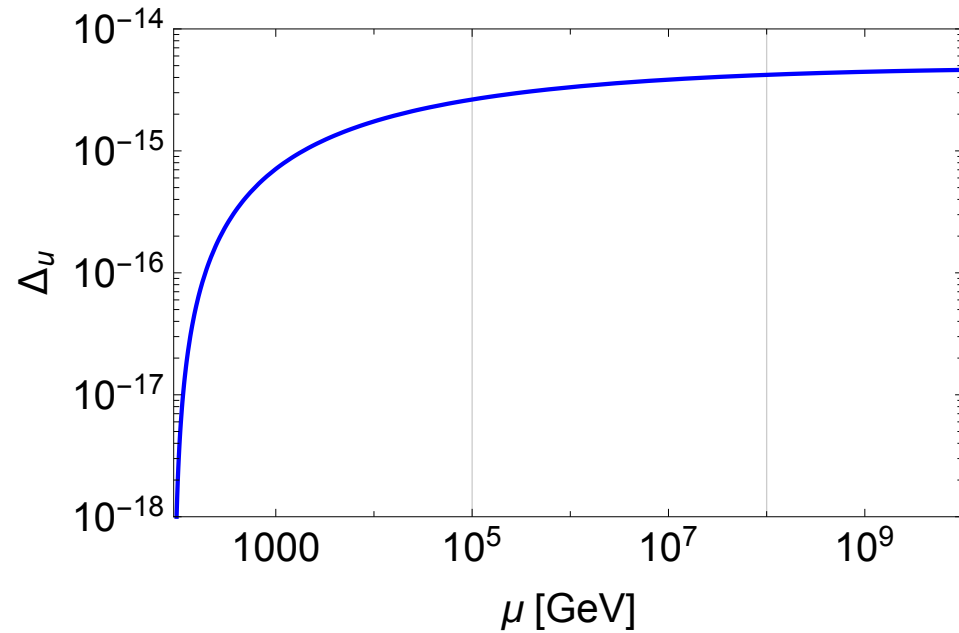
Productions (4/4)



Branching ratios

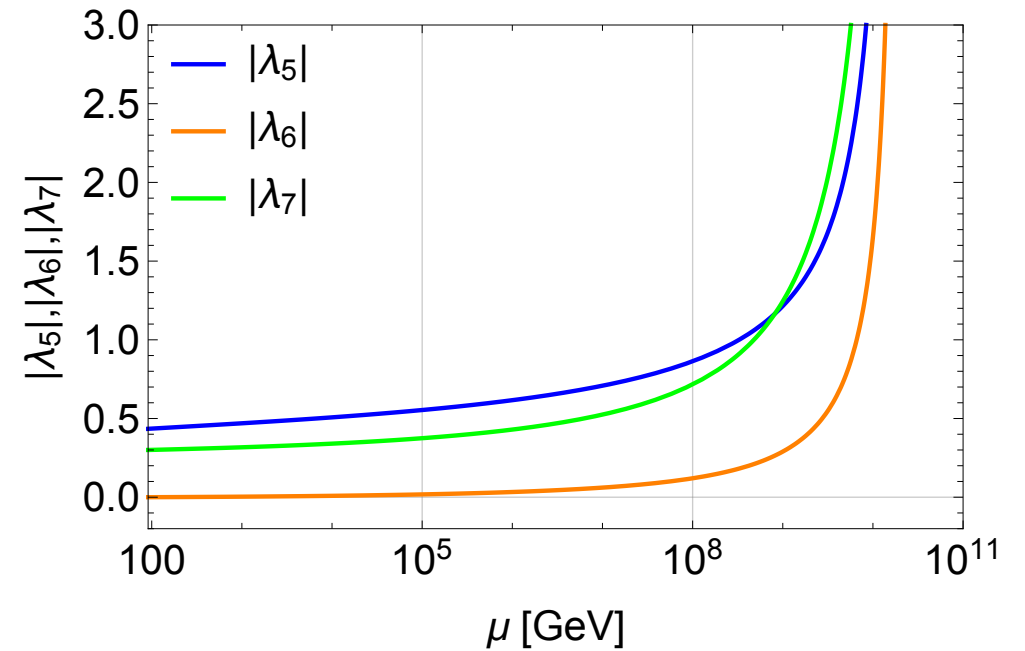
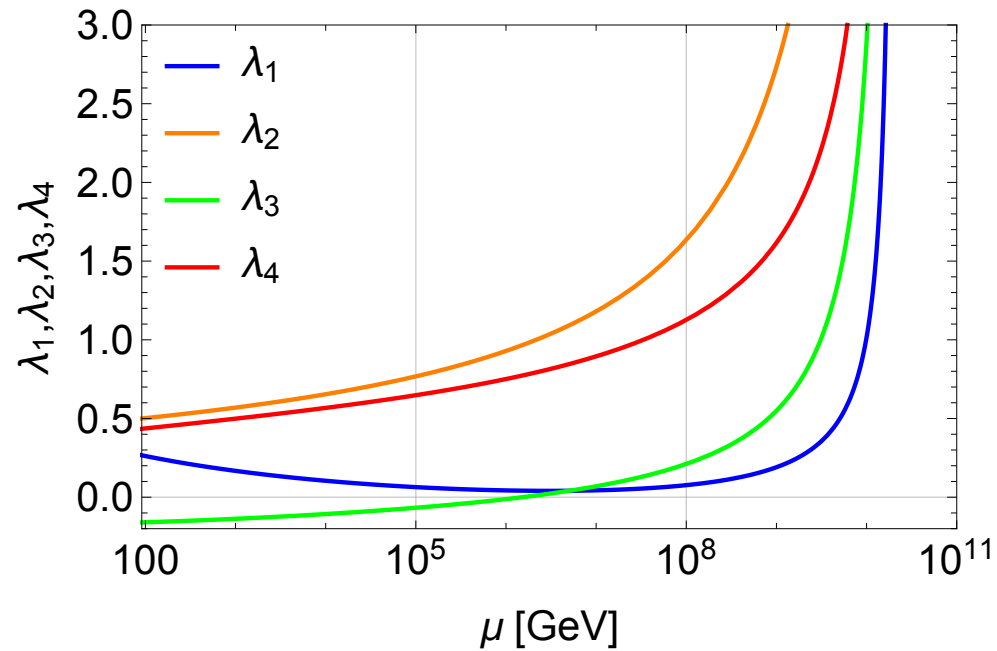


RGE -Yukawa couplings-



$$\Delta_q \equiv \text{Tr} [\delta y_q^\dagger \delta y_q], \quad \text{where} \quad \delta y_q \equiv \hat{\rho}_q - \left\{ \frac{\hat{\rho}_q^{33}}{\hat{M}_q^{33}} \right\} \hat{M}_q, \quad (q = u, d)$$

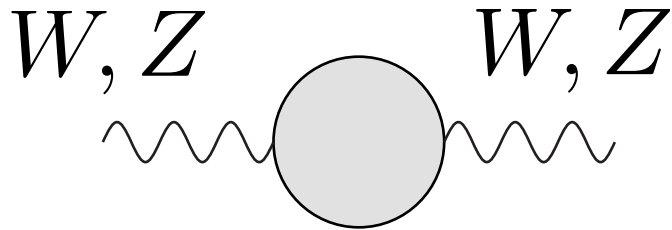
RGE -Higgs couplings-



rho parameter

$$\rho = \frac{m_W^2}{m_Z^2 \cos^2 \theta_W} = 1 \quad (\text{at tree level})$$

- When CP symmetry is broken, the custodial symmetry is not respected and the rho parameter deviates from the SM value.



Corrections to the rho parameter do not contain the Higgs self couplings at 1-loop level.

$$V \supset \lambda_7 (\Phi_2^\dagger \Phi_2) (\Phi_1^\dagger \Phi_2)$$

-> λ_7 does not change the rho parameter at 1-loop level.