

Phenomenology of Composite 2 Higgs Doublet Models

柳生 慶 (成蹊大)



arXiv: 1803.01865 [hep-ph]

共同研究者 : S. D. Curtis, L. D. Rose, A. Tesi (Florence)

S. Moretti (Southampton)

ILC夏の合宿

2018年9月9日, 国民宿舎大城

Extended Higgs sectors with non-standard κ_V

柳生 慶 (成蹊大)



arXiv: 1808.10152 [hep-ph]

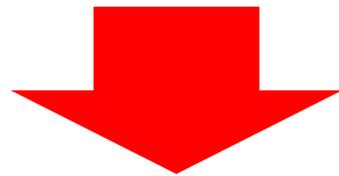
共同研究者 : Cheng-Wei Chiang (国立台湾大学)

ILC夏の合宿

2018年9月9日, 国民宿舎大城

ファイマンの言葉

It doesn't matter how beautiful your theory is,
it doesn't matter how smart you are.
If it doesn't agree with experiment, it's wrong.



It doesn't matter how exotic your theory is,
It doesn't matter how foolish you are.
If it agrees with experiment, it's correct.



R. P. Feynman (1918-1988)

ヒッグス結合測定の実況

ATLAS-CONF-2018-31 (13 TeV, 80/fb)

Parameter	(a) no BSM
κ_Z	1.07 ± 0.10
κ_W	1.07 ± 0.11
κ_b	$0.97^{+0.24}_{-0.22}$
κ_t	$1.09^{+0.15}_{-0.14}$
κ_τ	$1.02^{+0.17}_{-0.16}$
κ_γ	$1.02^{+0.09}_{-0.12}$
κ_g	$1.00^{+0.12}_{-0.11}$
B_{BSM}	-

CMS-PAS-HIG-17-031 (13 TeV, 36/fb)

BR _{inv.} = 0				
Parameter	Best fit	Uncertainty		
		Stat.	Syst.	
κ_Z	0.99	$^{+0.11}_{-0.11}$ (+0.11) (-0.11)	$^{+0.09}_{-0.09}$ (+0.09) (-0.09)	$^{+0.06}_{-0.06}$ (+0.06) (-0.06)
κ_W	1.12	$^{+0.13}_{-0.19}$ (+0.12) (-0.12)	$^{+0.10}_{-0.18}$ (+0.09) (-0.09)	$^{+0.08}_{-0.07}$ (+0.07) (-0.07)
κ_t	1.09	$^{+0.14}_{-0.14}$ (+0.14) (-0.15)	$^{+0.08}_{-0.08}$ (+0.08) (-0.09)	$^{+0.12}_{-0.12}$ (+0.12) (-0.12)
κ_τ	1.01	$^{+0.17}_{-0.18}$ (+0.16) (-0.15)	$^{+0.11}_{-0.15}$ (+0.11) (-0.11)	$^{+0.12}_{-0.09}$ (+0.11) (-0.11)
κ_b	1.10	$^{+0.27}_{-0.33}$ (+0.25) (-0.23)	$^{+0.19}_{-0.30}$ (+0.19) (-0.17)	$^{+0.19}_{-0.14}$ (+0.17) (-0.15)
κ_g	1.14	$^{+0.15}_{-0.13}$ (+0.14) (-0.12)	$^{+0.10}_{-0.09}$ (+0.10) (-0.09)	$^{+0.11}_{-0.09}$ (+0.10) (-0.09)
κ_γ	1.07	$^{+0.15}_{-0.18}$ (+0.12) (-0.12)	$^{+0.10}_{-0.17}$ (+0.10) (-0.10)	$^{+0.11}_{-0.07}$ (+0.07) (-0.07)

ヒッグス結合測定の実況

ATLAS-CONF-2018-31 (13 TeV, 80/fb)

CMS-PAS-HIG-17-031 (13 TeV, 36/fb)

Parameter	(a) no BSM	ゲージ結合	= 0			
			Best fit	Uncertainty Stat.	Syst.	
κ_Z	1.07 ± 0.10		0.99	$+0.11$ -0.11 (+0.11) (-0.11)	$+0.09$ -0.09 (+0.09) (-0.09)	$+0.06$ -0.06 (+0.06) (-0.06)
κ_W	1.07 ± 0.11		1.12	$+0.13$ -0.19 (+0.12) (-0.12)	$+0.10$ -0.18 (+0.09) (-0.09)	$+0.08$ -0.07 (+0.07) (-0.07)
κ_b	$0.97^{+0.24}$ -0.22		1.09	$+0.14$ -0.14 (+0.14) (-0.15)	$+0.08$ -0.08 (+0.08) (-0.09)	$+0.12$ -0.12 (+0.12) (-0.12)
κ_t	$1.09^{+0.15}$ -0.14		1.01	$+0.17$ -0.18 (+0.16) (-0.15)	$+0.11$ -0.15 (+0.11) (-0.11)	$+0.12$ -0.09 (+0.11) (-0.11)
κ_τ	$1.02^{+0.17}$ -0.16		1.10	$+0.27$ -0.33 (+0.25) (-0.23)	$+0.19$ -0.30 (+0.19) (-0.17)	$+0.19$ -0.14 (+0.17) (-0.15)
κ_γ	$1.02^{+0.0^{\sim}}$ -0.1	湯川結合	1.14	$+0.15$ -0.13	$+0.10$ -0.09	$+0.11$ -0.09

ヒッグス 2 重項場の存在はやはり疑いようのない事実

ヒッグス結合測定の実況

ATLAS-CONF-2018-31 (13 TeV, 80/fb)

Parameter	(a) no BSM
κ_Z	1.07 ± 0.10
κ_W	1.07 ± 0.11
κ_b	$0.97^{+0.24}_{-0.22}$
κ_t	$1.09^{+0.15}_{-0.14}$
κ_τ	$1.02^{+0.17}_{-0.16}$
κ_γ	$1.02^{+0.09}_{-0.12}$

CMS-PAS-HIG-17-031 (13 TeV, 36/fb)

BR _{inv.} = 0				
Parameter	Best fit	Uncertainty		
		Stat.	Syst.	
κ_Z	0.99	$^{+0.11}_{-0.11}$	$^{+0.09}_{-0.09}$	$^{+0.06}_{-0.06}$
κ_W	1.12	$^{+0.13}_{-0.19}$	$^{+0.10}_{-0.18}$	$^{+0.08}_{-0.07}$
κ_t	1.09	$^{+0.14}_{-0.14}$	$^{+0.08}_{-0.08}$	$^{+0.12}_{-0.12}$
κ_τ	1.01	$^{+0.17}_{-0.18}$	$^{+0.11}_{-0.15}$	$^{+0.12}_{-0.09}$
κ_b	1.10	$^{+0.27}_{-0.33}$	$^{+0.19}_{-0.30}$	$^{+0.19}_{-0.14}$

全ての κ は誤差の範囲で SM ($\kappa = 1$) とコンシステント

ヒッグス結合測定の実況

ATLAS-CONF-2018-31 (13 TeV, 80/fb)

Parameter	(a) no BSM
κ_Z	1.07 ± 0.10
κ_W	1.07 ± 0.11
κ_b	$0.97^{+0.24}_{-0.22}$
κ_t	$1.09^{+0.15}_{-0.14}$
κ_τ	$1.02^{+0.17}_{-0.16}$
κ_γ	$1.02^{+0.09}_{-0.12}$

CMS-PAS-HIG-17-031 (13 TeV, 36/fb)

BR _{inv.} = 0				
Parameter	Best fit	Uncertainty		
		Stat.	Syst.	
κ_Z	$0.99^{+0.11}_{-0.11}$ (+0.11) (-0.11)	$+0.09$ -0.09 (+0.09) (-0.09)	$+0.06$ -0.06 (+0.06) (-0.06)	
κ_W	$1.12^{+0.13}_{-0.19}$ (+0.12) (-0.12)	$+0.10$ -0.18 (+0.09) (-0.09)	$+0.08$ -0.07 (+0.07) (-0.07)	
κ_t	$1.09^{+0.14}_{-0.14}$ (+0.14) (-0.15)	$+0.08$ -0.08 (+0.08) (-0.09)	$+0.12$ -0.12 (+0.12) (-0.12)	
κ_τ	$1.01^{+0.17}_{-0.18}$ (+0.16) (-0.15)	$+0.11$ -0.15 (+0.11) (-0.11)	$+0.12$ -0.09 (+0.11) (-0.11)	
κ_b	$1.10^{+0.27}_{-0.33}$ (+0.25) (-0.23)	$+0.19$ -0.30 (+0.19) (-0.17)	$+0.19$ -0.14 (+0.17) (-0.15)	

中心値は $\kappa_V > 1$ あるいは $\kappa_W \neq \kappa_Z$ を示している。

ヒッグス結合測定の実況

ATLAS-CONF-2018-31 (13 TeV, 80/fb)

Parameter	(a) no BSM
κ_Z	1.07 ± 0.10
κ_W	1.07 ± 0.11
κ_b	$0.97^{+0.24}_{-0.22}$
κ_t	$1.09^{+0.15}_{-0.14}$
κ_τ	$1.02^{+0.17}_{-0.16}$
κ_γ	$1.02^{+0.09}_{-0.12}$

CMS-PAS-HIG-17-031 (13 TeV, 36/fb)

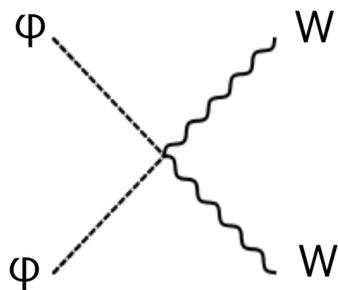
BR _{inv.} = 0				
Parameter	Best fit	Uncertainty		
		Stat.	Syst.	
κ_Z	$0.99^{+0.11}_{-0.11}$ (+0.11) (-0.11)	$+0.09$ -0.09 (+0.09) (-0.09)	$+0.06$ -0.06 (+0.06) (-0.06)	
κ_W	$1.12^{+0.13}_{-0.19}$ (+0.12) (-0.12)	$+0.10$ -0.18 (+0.09) (-0.09)	$+0.08$ -0.07 (+0.07) (-0.07)	
κ_t	$1.09^{+0.14}_{-0.14}$ (+0.14) (-0.15)	$+0.08$ -0.08 (+0.08) (-0.09)	$+0.12$ -0.12 (+0.12) (-0.12)	
κ_τ	$1.01^{+0.17}_{-0.18}$ (+0.16) (-0.15)	$+0.11$ -0.15 (+0.11) (-0.11)	$+0.12$ -0.09 (+0.11) (-0.11)	
κ_b	$1.10^{+0.27}_{-0.33}$ (+0.25) (-0.23)	$+0.19$ -0.30 (+0.19) (-0.17)	$+0.19$ -0.14 (+0.17) (-0.15)	

これが本当なら大事件！！

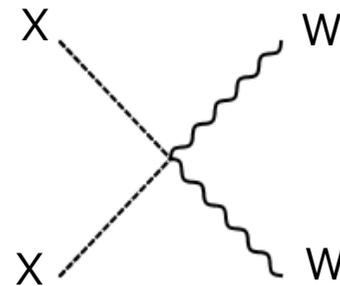
目次

- イントロダクション
- ゲージ結合によるヒッグスセクターの分類
- $K_W \neq K_Z$ を導くモデルとILC実験での検証
- まとめ

ヒッグス場の分類



$$\frac{\text{Diagram}}{2 c_W^2 \left(\begin{array}{c} \phi \quad Z \\ \phi \quad Z \end{array} \right)} = 1$$



$$\frac{\text{Diagram}}{2 c_W^2 \left(\begin{array}{c} X \quad Z \\ X \quad Z \end{array} \right)} \neq 1$$

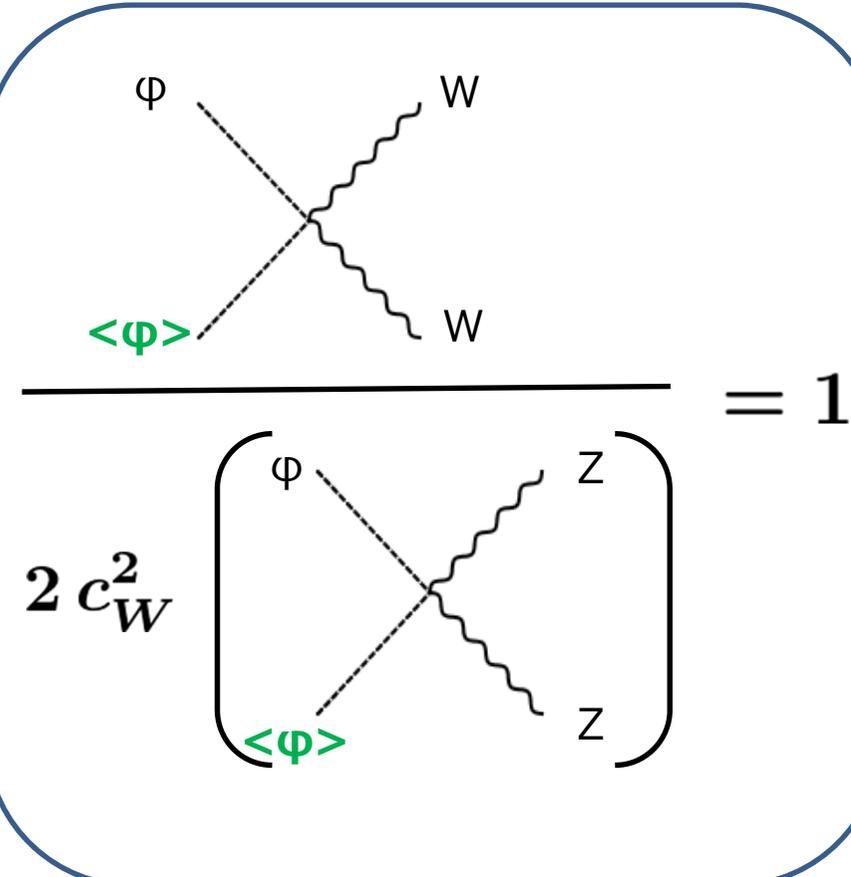
ヒッグス場の分類

$$\frac{\text{Diagram 1}}{2 c_W^2 \left(\text{Diagram 2} \right)} = 1$$

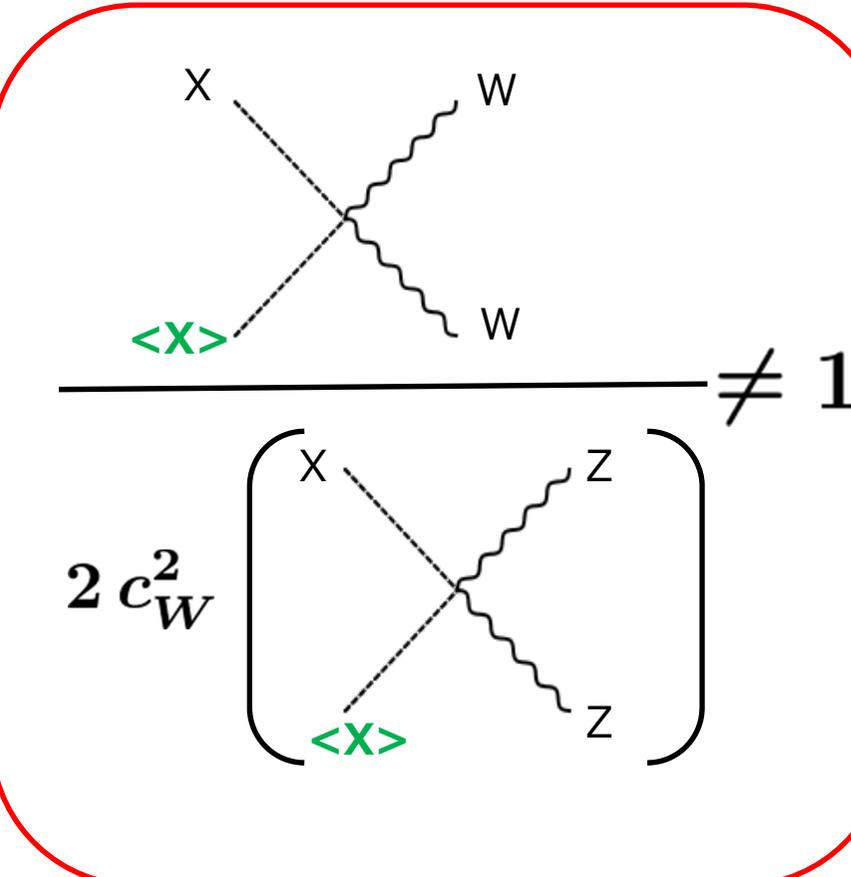
$$\frac{\text{Diagram 1}}{2 c_W^2 \left(\text{Diagram 2} \right)} \neq 1$$

電弱ローパラメータ (ρ) への寄与

ヒッグス場の分類



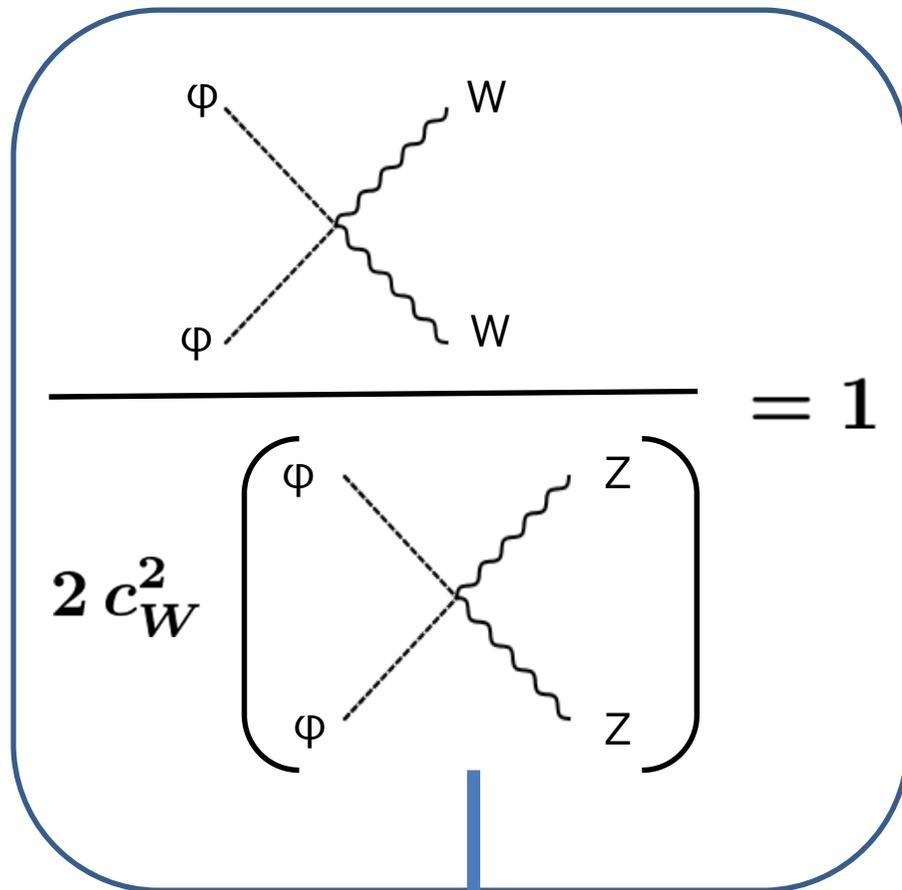
A Feynman diagram showing a vertex where a dashed line labeled ϕ and a green dashed line labeled $\langle\phi\rangle$ meet. From this vertex, two wavy lines labeled W emerge. Below this diagram is a horizontal line, followed by the expression $= 1$. To the left of this line is the coefficient $2 c_W^2$. Below the horizontal line is a large right-facing curly bracket containing a similar Feynman diagram, but with the wavy lines labeled Z instead of W . The $\langle\phi\rangle$ label is also present in this diagram.



A Feynman diagram showing a vertex where a dashed line labeled X and a green dashed line labeled $\langle X\rangle$ meet. From this vertex, two wavy lines labeled W emerge. Below this diagram is a horizontal line, followed by the expression $\neq 1$. To the left of this line is the coefficient $2 c_W^2$. Below the horizontal line is a large right-facing curly bracket containing a similar Feynman diagram, but with the wavy lines labeled Z instead of W . The $\langle X\rangle$ label is also present in this diagram.

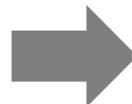
SVV結合への寄与

ヒッグスセクターの分類

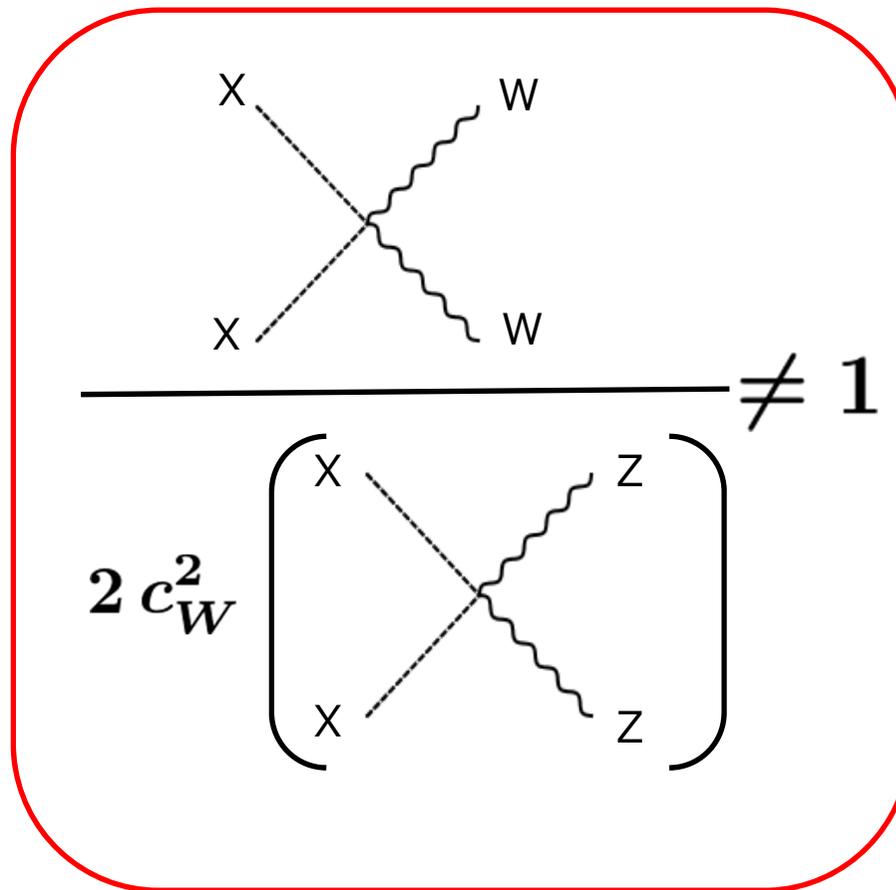


複数個

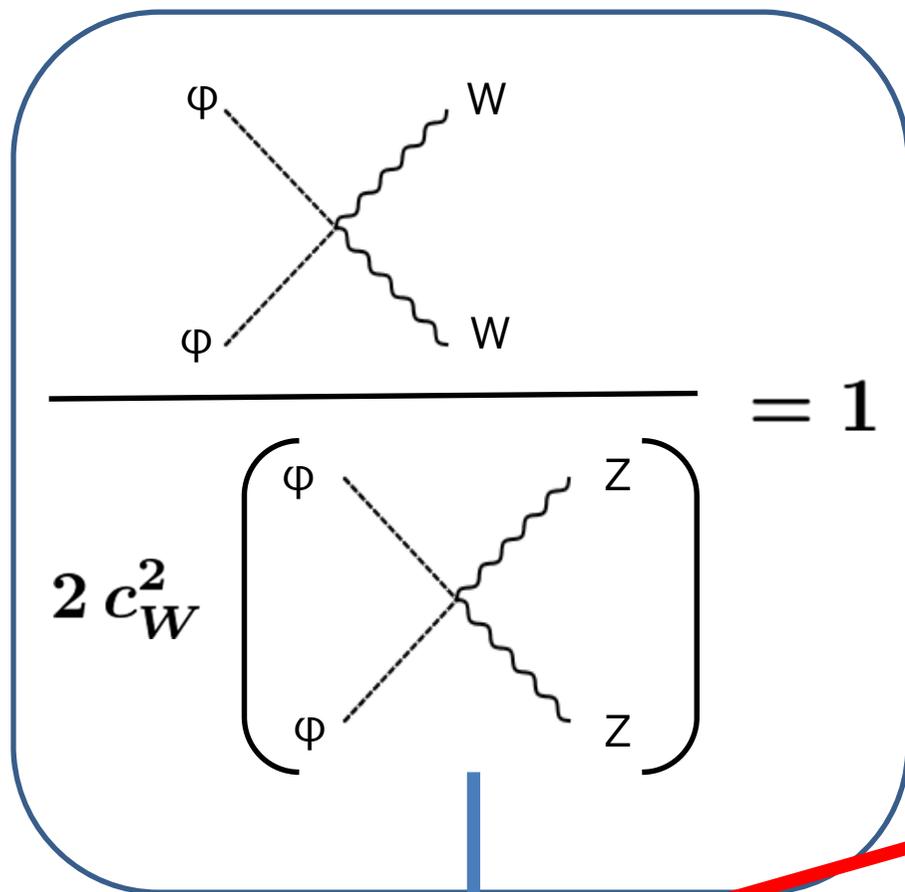
標準模型, 2HDM, ...



$\rho = 1$ かつ $\kappa_W = \kappa_Z$ (ツリーレベル)

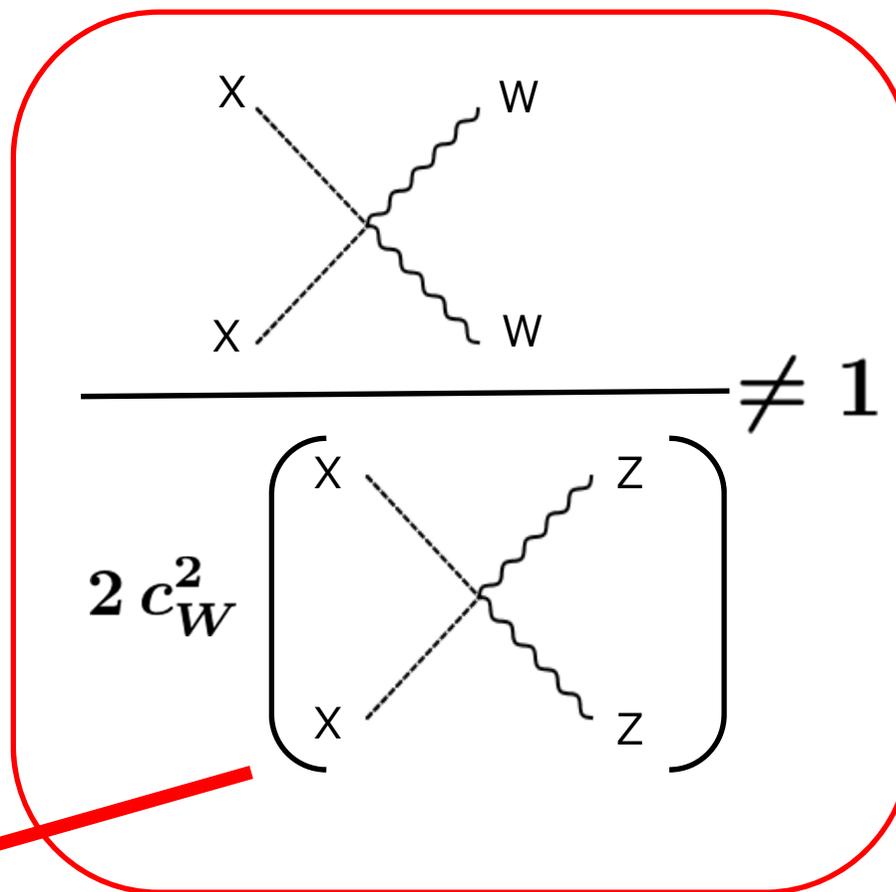


ヒッグスセクターの分類

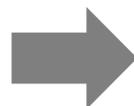


複数個

1個

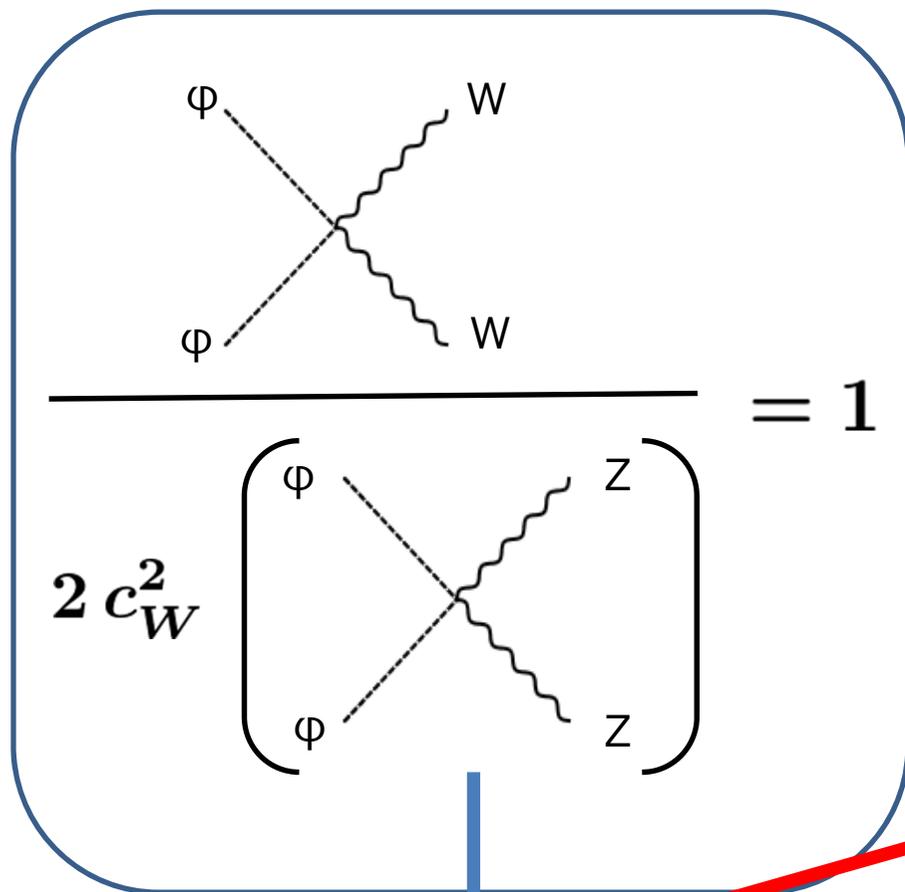


3重項模型(Type-2 Seesaw), ...



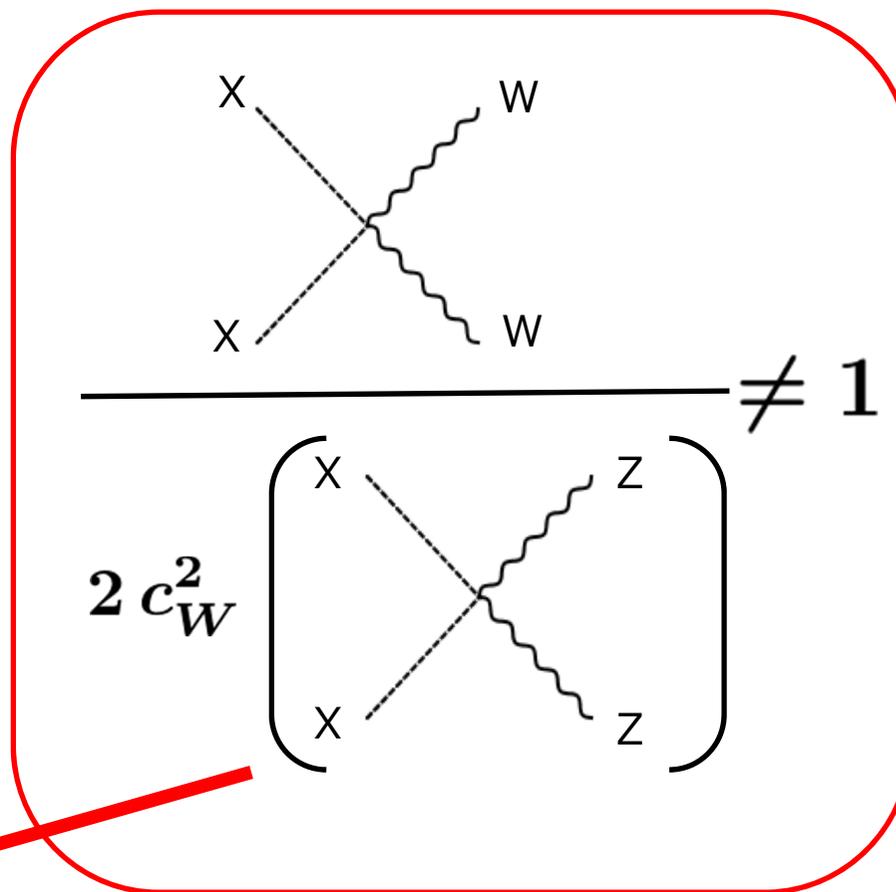
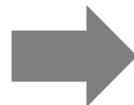
$\rho \neq 1$ かつ $k_W \neq k_Z$ (ツリーレベル)

ヒッグスセクターの分類



複数個

Georgi-Machacek 模型, ...



複数個

$\rho = 1$ かつ $K_W = K_Z$

$\rho = 1$ かつ $K_W \neq K_Z$ ($\rho \neq 1$ も可能)

ヒッグスセクターの分類

□ $\rho = 1$ (ツリーレベル)を要請すると、ヒッグスセクターの構造は

- ϕ のみで構成 (常に $\kappa_W = \kappa_Z$)
- ϕ と複数個の X で構成 ($\kappa_W \neq \kappa_Z$ も可能)

のように分類できる。

□ $\kappa_V > 1$ は、どちらのシナリオでも実現可能だが、現象論的な問題を

考慮すると後者のみ実現可能。

$\rho_{\text{tree}} = 1$ を満たす拡張ヒッグス模型

$$a = 1, \dots, N$$

- ヒッグス2重項場 $\Phi \sim (1/2, 1/2)$ + ヒッグス多重項場 $X_a \sim (T_a, Y_a)$

$$\rho_{\text{tree}} = \frac{m_W^2}{m_Z^2 \cos^2 \theta_W} = \frac{v_\Phi^2 + 2 \sum_b v_b^2 [T_b(T_b + 1) - Y_b^2]}{v_\Phi^2 + 4 \sum_a v_a^2 Y_a^2}$$

T_a : (半) 整数
 Y_a : (半) 整数
 $Q_a = T_a + Y_a$

$$\rho_{\text{tree}} = 1 \quad \longrightarrow \quad \sum_a v_a^2 [T_a(T_a + 1) - 3Y_a^2] = 0$$

- 各々の X_a に対して上式を要請: $(T_a, Y_a) \sim (0, 0), \underbrace{(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}), (3, 2), \dots}_{= \varphi \text{ (それ以外=X)}}$

- 全体の和(\sum_a)に対して要請: Xを導入する場合、少なくとも2個以上のXが必要

Xを2個含む拡張ヒッグス模型

□ ヒッグスセクター : $\Phi \sim (1/2, 1/2) + X_1 \sim (T_1, Y_1) + X_2 \sim (T_2, Y_2)$

$$\rho_{\text{tree}} = 1 \quad \rightarrow \quad r = \frac{v_2^2}{v_1^2} = -\frac{T_1(T_1 + 1) - 3Y_1^2}{T_2(T_2 + 1) - 3Y_2^2} \quad \left(\sum_a v_a^2 [T_a(T_a + 1) - 3Y_a^2] = 0 \right)$$

Xを2個含む拡張ヒッグス模型

□ ヒッグスセクター : $\Phi \sim (1/2, 1/2) + X_1 \sim (T_1, Y_1) + X_2 \sim (T_2, Y_2)$

$$\rho_{\text{tree}} = 1 \quad \rightarrow \quad r = \frac{v_2^2}{v_1^2} = -\frac{T_1(T_1 + 1) - 3Y_1^2}{T_2(T_2 + 1) - 3Y_2^2} \quad \left(\sum_a v_a^2 [T_a(T_a + 1) - 3Y_a^2] = 0 \right)$$

□ 真空期待値 :

$$v^2 = v_\Phi^2 + \xi^2 v_1^2 \quad \xi^2 = 4(Y_1^2 + rY_2^2)$$
$$\tan \beta = \frac{v_\Phi}{\xi v_1}$$

Xを2個含む拡張ヒッグス模型

□ ヒッグスセクター : $\Phi \sim (1/2, 1/2) + X_1 \sim (T_1, Y_1) + X_2 \sim (T_2, Y_2)$

$$\rho_{\text{tree}} = 1 \quad \rightarrow \quad r = \frac{v_2^2}{v_1^2} = -\frac{T_1(T_1 + 1) - 3Y_1^2}{T_2(T_2 + 1) - 3Y_2^2} \quad \left(\sum_a v_a^2 [T_a(T_a + 1) - 3Y_a^2] = 0 \right)$$

□ 真空期待値 : $v^2 = v_\Phi^2 + \xi^2 v_1^2$ $\xi^2 = 4(Y_1^2 + rY_2^2)$ $\begin{pmatrix} h_\Phi \\ h_{X_1} \\ h_{X_2} \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} h \\ H_1 \\ H_2 \end{pmatrix}$

$\tan \beta = \frac{v_\Phi}{\xi v_1}$

□ hVV結合 : $\frac{gv}{2} \left[R_{11} s_\beta + \frac{R_{21}}{\xi} 2[T_1(T_1 + 1) - Y_1^2] c_\beta + \frac{\sqrt{r} R_{31}}{\xi} 2[T_2(T_2 + 1) - Y_2^2] c_\beta \right]$

$$\frac{g_Z v}{4} \left[R_{11} s_\beta + \frac{R_{21}}{\xi} 4Y_1^2 c_\beta + \frac{\sqrt{r} R_{31}}{\xi} 4Y_2^2 c_\beta \right]$$

Xを2個含む拡張ヒッグス模型

□ ヒッグスセクター : $\Phi \sim (1/2, 1/2) + X_1 \sim (T_1, Y_1) + X_2 \sim (T_2, Y_2)$

$$\rho_{\text{tree}} = 1 \quad \rightarrow \quad r = \frac{v_2^2}{v_1^2} = -\frac{T_1(T_1 + 1) - 3Y_1^2}{T_2(T_2 + 1) - 3Y_2^2} \quad \left(\sum_a v_a^2 [T_a(T_a + 1) - 3Y_a^2] = 0 \right)$$

□ 真空期待値 : $v^2 = v_\Phi^2 + \xi^2 v_1^2$ $\xi^2 = 4(Y_1^2 + rY_2^2)$ $\begin{pmatrix} h_\Phi \\ h_{X_1} \\ h_{X_2} \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} h \\ H_1 \\ H_2 \end{pmatrix}$

$\tan \beta = \frac{v_\Phi}{\xi v_1}$

□ hVV結合 :

$$\frac{gv}{2} \left[R_{11}s_\beta + \frac{R_{21}}{\xi} 2[T_1(T_1 + 1) - Y_1^2]c_\beta + \frac{\sqrt{r}R_{31}}{\xi} 2[T_2(T_2 + 1) - Y_2^2]c_\beta \right] \quad \mathbf{K_W}$$

$$\frac{g_Z v}{4} \left[R_{11}s_\beta + \frac{R_{21}}{\xi} 4Y_1^2 c_\beta + \frac{\sqrt{r}R_{31}}{\xi} 4Y_2^2 c_\beta \right] \quad \mathbf{K_Z}$$

Xを2個含む拡張ヒッグス模型

□ ヒッグスセクター : $\Phi \sim (1/2, 1/2) + X_1 \sim (T_1, Y_1) + X_2 \sim (T_2, Y_2)$

$$\rho_{\text{tree}} = 1 \quad \rightarrow \quad r = \frac{v_2^2}{v_1^2} = -\frac{T_1(T_1 + 1) - 3Y_1^2}{T_2(T_2 + 1) - 3Y_2^2} \quad \left(\sum_a v_a^2 [T_a(T_a + 1) - 3Y_a^2] = 0 \right)$$

□ 真空期待値 : $v^2 = v_\Phi^2 + \xi^2 v_1^2$ $\xi^2 = 4(Y_1^2 + rY_2^2)$ $\begin{pmatrix} h_\Phi \\ h_{X_1} \\ h_{X_2} \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} h \\ H_1 \\ H_2 \end{pmatrix}$

$\tan \beta = \frac{v_\Phi}{\xi v_1}$

□ hVV結合 : $\frac{gv}{2} \left[R_{11}s_\beta + \frac{R_{21}}{\xi} 2[T_1(T_1 + 1) - Y_1^2]c_\beta + \frac{\sqrt{r}R_{31}}{\xi} 2[T_2(T_2 + 1) - Y_2^2]c_\beta \right]$

K_W

$\frac{g_Z v}{4} \left[R_{11}s_\beta + \frac{R_{21}}{\xi} 4Y_1^2 c_\beta + \frac{\sqrt{r}R_{31}}{\xi} 4Y_2^2 c_\beta \right]$

K_Z

□ hFF結合 : $\frac{m_F}{v} \frac{R_{11}}{s_\beta} K_F$

基本的な制限

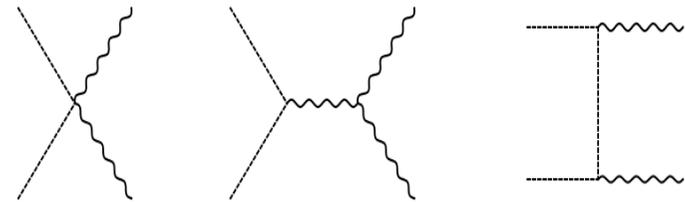
- $\rho_{\text{tree}} = 1$ ($r > 0$) : ρ に対して**正に効く** $\langle X \rangle$ と**負に効く** $\langle X \rangle$ の組み合わせが必要

Hally, Logan, Pilkington, PRD85, 095017(2012)

- 摂動ユニタリティ : $T \leq 7/2$ ($Y \neq 0$), $T \leq 4$ ($Y = 0$)



77 possibilities



- 大局的U(1): X_1 及び X_2 の位相変換不変性 \rightarrow NGボソン



27 possibilities

- ランダウポール: ゲージ結合がプランクスケール以前で発散しない



15 possibilities

15個のシナリオ

Chiang, Yagyu, arXiv: 1808.10152 [hep-ph]

(T_1, Y_1)	(T_2, Y_2)	r	ξ^2	v_1^{\max}
(1,1)	(1,0)	1/2	4	118
(3/2,1/2)	(1,1)	3	13	65
(3/2,3/2)	(1,0)	3/2	9	79
(3/2,3/2)	(3/2,1/2)	1	10	75
(2,0)	(1,1)	6	24	48
(2,0)	(3/2,3/2)	2	18	56
(2,1)	(1,1)	3	16	59
(2,1)	(3/2,3/2)	1	13	65
(2,2)	(2,1)	2	24	48
(5/2, 1/2)	(1, 1)	8	33	41
(5/2, 1/2)	(3/2, 3/2)	8/3	25	47
(5/2, 3/2)	(1, 1)	2	17	57
(5/2, 3/2)	(3/2, 3/2)	2/3	15	61
(3,0)	(1,1)	12	48	34
(3,0)	(3/2,3/2)	4	36	39

← Georgi-Machacek 模型

目次

- イントロダクション
- ゲージ結合によるヒッグスセクターの分類
- $K_W \neq K_Z$ を導くモデルとILC実験での検証
- まとめ

Georgi-Machacek 模型

Georgi, Machacek, NPB262, 463 (1985)

Chanowitz, Golden, PLB165, 105 (1985)

□ ヒッグスセクター : $\Phi \sim (1/2, 1/2) + X_1 \sim (1, 1) + X_2 \sim (1, 0)$

$$r = 1/2, \xi = 2$$

Georgi-Machacek 模型

Georgi, Machacek, NPB262, 463 (1985)

Chanowitz, Golden, PLB165, 105 (1985)

□ ヒッグスセクター : $\Phi \sim (1/2, 1/2) + X_1 \sim (1, 1) + X_2 \sim (1, 0)$

$$r = 1/2, \xi = 2$$

□ カストディアル対称性をポテンシャルに課す場合

Georgi-Machacek 模型

Georgi, Machacek, NPB262, 463 (1985)

Chanowitz, Golden, PLB165, 105 (1985)

□ ヒッグスセクター : $\Phi \sim (1/2, 1/2) + X_1 \sim (1, 1) + X_2 \sim (1, 0)$

$$r = 1/2, \xi = 2$$

□ カストディアル対称性をポテンシャルに課す場合

$$\Delta = \begin{pmatrix} \chi^{0*} & \xi^+ & \chi^{++} \\ \chi^- & \xi^0 & \chi^+ \\ \chi^{--} & \xi^- & \chi^0 \end{pmatrix}$$

$X_1^c \quad X_2 \quad X_1$

Georgi-Machacek 模型

Georgi, Machacek, NPB262, 463 (1985)

Chanowitz, Golden, PLB165, 105 (1985)

□ ヒッグスセクター : $\Phi \sim (1/2, 1/2) + X_1 \sim (1, 1) + X_2 \sim (1, 0)$

$$r = 1/2, \xi = 2$$

□ カストディアル対称性をポテンシャルに課す場合

→ CP-evenヒッグスの混合に予言が現れる

$$R_{11} = c_\alpha, R_{21} = -\sqrt{\frac{2}{3}}s_\alpha, R_{31} = -\sqrt{\frac{1}{3}}s_\alpha$$

$$\Delta = \begin{pmatrix} \chi^{0*} & \xi^+ & \chi^{++} \\ \chi^- & \xi^0 & \chi^+ \\ \chi^{--} & \xi^- & \chi^0 \end{pmatrix}$$

$X_1^c \quad X_2 \quad X_1$

Georgi-Machacek 模型

Georgi, Machacek, NPB262, 463 (1985)

Chanowitz, Golden, PLB165, 105 (1985)

□ ヒッグスセクター : $\Phi \sim (1/2, 1/2) + X_1 \sim (1, 1) + X_2 \sim (1, 0)$

$$r = 1/2, \xi = 2$$

□ カストディアル対称性をポテンシャルに課す場合

→ CP-evenヒッグスの混合に予言が現れる

$$R_{11} = c_\alpha, R_{21} = -\sqrt{\frac{2}{3}}s_\alpha, R_{31} = -\sqrt{\frac{1}{3}}s_\alpha$$

$$\kappa_W = R_{11}s_\beta + (R_{21} + \sqrt{2}R_{31})c_\beta$$

$$\kappa_Z = R_{11}s_\beta + 2R_{21}c_\beta$$

$$\Delta = \begin{pmatrix} \chi^{0*} & \xi^+ & \chi^{++} \\ \chi^- & \xi^0 & \chi^+ \\ \chi^{--} & \xi^- & \chi^0 \end{pmatrix}$$

$X_1^c \quad X_2 \quad X_1$

Georgi-Machacek 模型

Georgi, Machacek, NPB262, 463 (1985)

Chanowitz, Golden, PLB165, 105 (1985)

□ ヒッグスセクター : $\Phi \sim (1/2, 1/2) + X_1 \sim (1, 1) + X_2 \sim (1, 0)$

$$r = 1/2, \xi = 2$$

□ カストディアル対称性をポテンシャルに課す場合

→ CP-evenヒッグスの混合に予言が現れる

$$R_{11} = c_\alpha, R_{21} = -\sqrt{\frac{2}{3}}s_\alpha, R_{31} = -\sqrt{\frac{1}{3}}s_\alpha$$

$$\Delta = \begin{pmatrix} \chi^{0*} & \xi^+ & \chi^{++} \\ \chi^- & \xi^0 & \chi^+ \\ \chi^{--} & \xi^- & \chi^0 \end{pmatrix}$$

$X_1^c \quad X_2 \quad X_1$

$$\kappa_W = R_{11}s_\beta + (R_{21} + \sqrt{2}R_{31})c_\beta$$

$$\kappa_Z = R_{11}s_\beta + 2R_{21}c_\beta$$



$$s_\beta c_\alpha - 2\sqrt{\frac{2}{3}}c_\beta s_\alpha$$

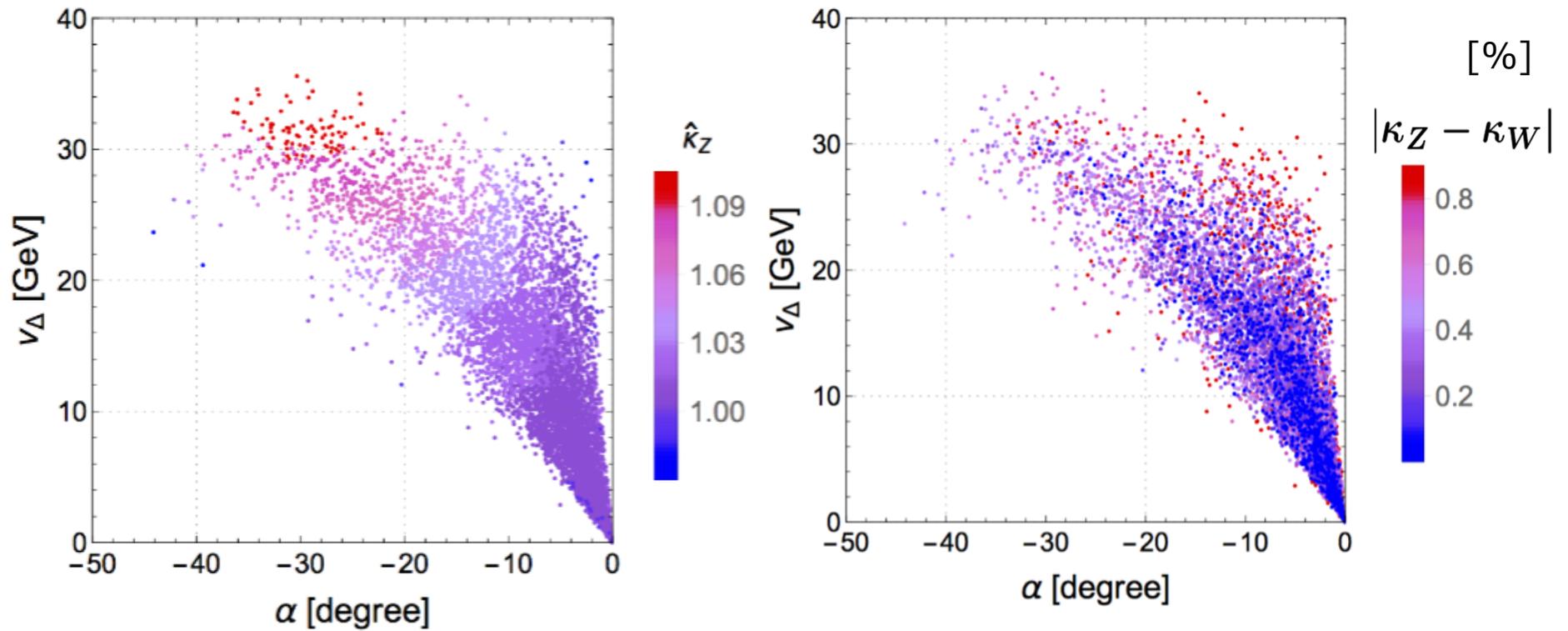
カストディアル対称性

$\kappa_V > 1$ はツリーレベルで可能。

$\kappa_W \neq \kappa_Z$ は1ループレベルで可能。

1ループレベルでの κ_V

Chiang, Kuo, KY, PRD98 (2018), 013008



カストディアル対称性無しの場合

Chiang, Yagy, arXiv: 1808.10152 [hep-ph]

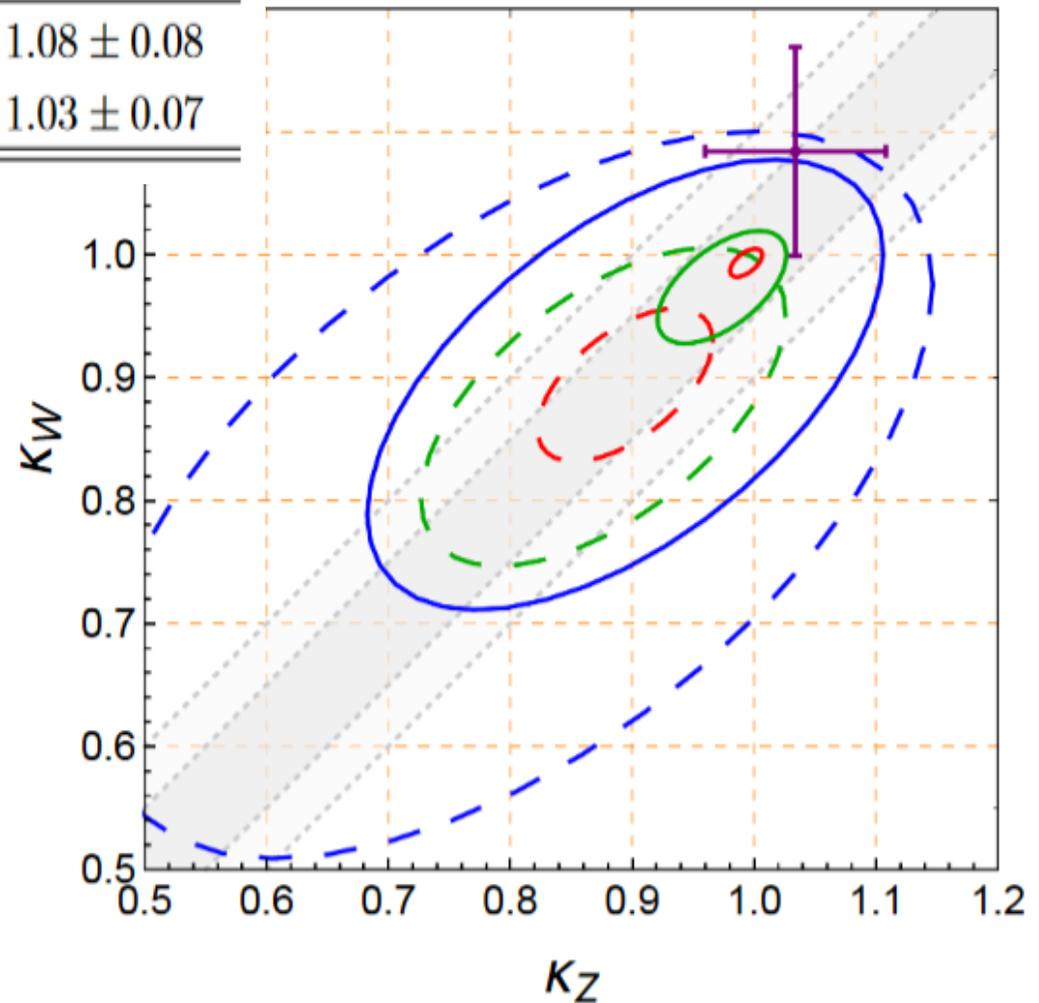
Parameter	ATLAS	CMS	Average
κ_W	1.07 ± 0.10	$1.12^{+0.13}_{-0.19}$	1.08 ± 0.08
κ_Z	1.07 ± 0.10	0.99 ± 0.11	1.03 ± 0.07

- 実線 : $\kappa_F = 1.0$
破線 : $\kappa_F = 0.9$

- $v_1 =$ 10 GeV
20 GeV
40 GeV

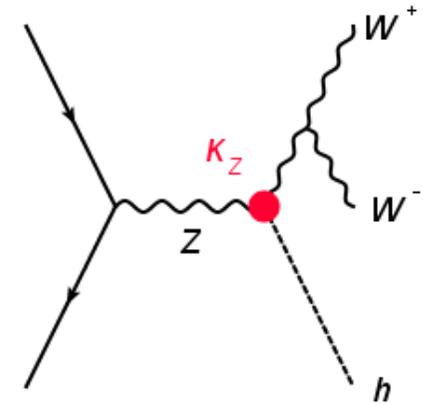
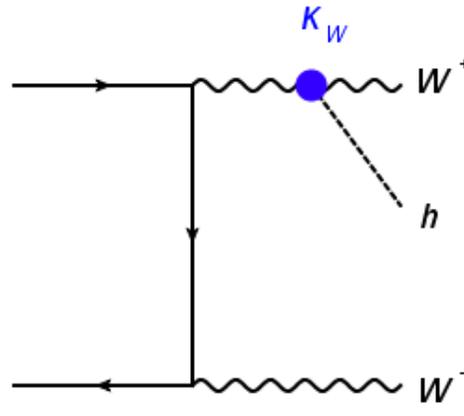
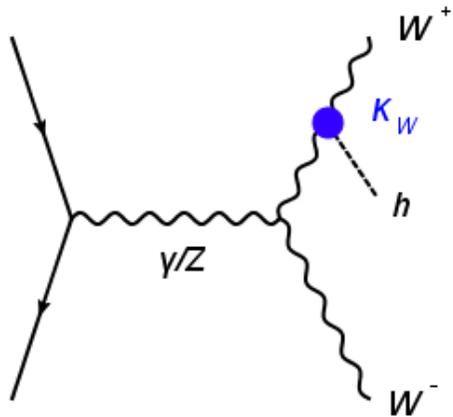
- R_{21} & R_{31} : スキャン

$$R_{11}^2 + R_{21}^2 + R_{31}^2 = 1$$



ILC実験での検証

$$e^+e^- \rightarrow W^+W^-h$$



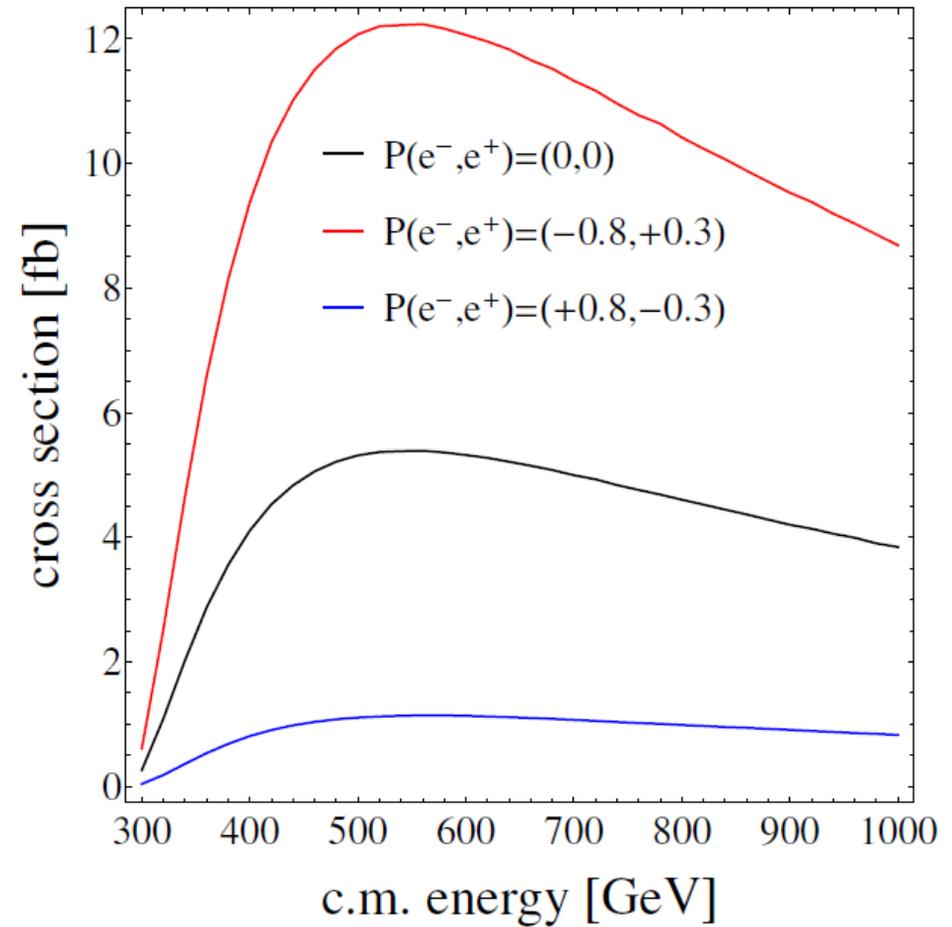
$$|\mathcal{M}|^2 = |\mathcal{M}_W|^2 + |\mathcal{M}_Z|^2 + \underline{(\mathcal{M}_W \mathcal{M}_Z^* + h.c.)}$$

K_W と K_Z の相対符号にも感度を持つ

断面積

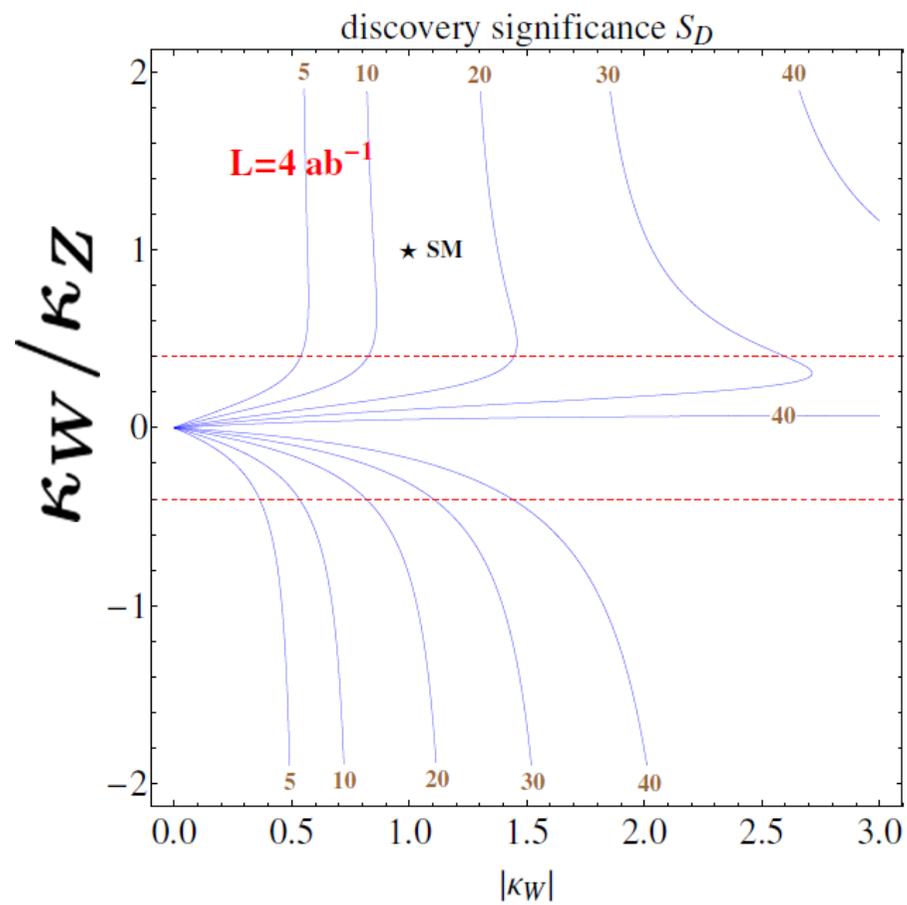
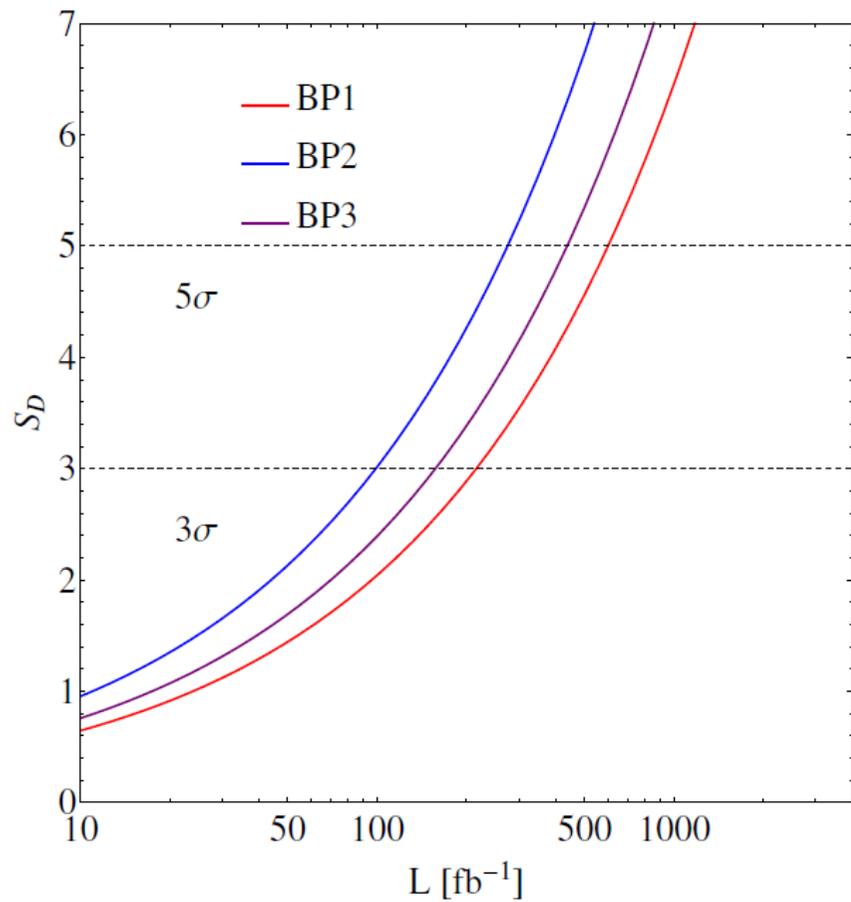
Chiang, He, Li, JHEP08, 126 (2018)

- $\sqrt{s} \sim 500$ GeVで断面積が最大
- 偏極ビームで10 fb程度



シグニフィカンス

Chiang, He, Li, JHEP08, 126 (2018)



まとめ

□ LHC Run-IIでのh結合の測定結果

Parameter	ATLAS	CMS	Average
κ_W	1.07 ± 0.10	$1.12^{+0.13}_{-0.19}$	1.08 ± 0.08
κ_Z	1.07 ± 0.10	0.99 ± 0.11	1.03 ± 0.07

□ $\rho_{\text{tree}} = 1$ を満たす拡張ヒッグス模型

$(T, Y) \sim (0, 0), (1/2, 1/2), (3, 2) : \kappa_V < 1, \kappa_W = \kappa_Z$

これ以外のヒッグス場2個以上 : $\kappa_V > 1, \kappa_W \neq \kappa_Z$ (例 : Georgi-Machacek 模型)

□ 摂動ユニタリー性、大局的U(1)、ランダウポールを考慮すると、

15通りの $\kappa_W \neq \kappa_Z$ を出す模型が構成可能

□ ILC実験において、 $e^+e^- \rightarrow W^+W^-h$ 過程を見れば、相対符号を含めて κ_W, κ_Z

を測定できる可能性がある。