

# 微分相互作用を用いた 複合ヒッグスモデルの判別可能性

---

菊田遥平（総合研究大学院大学/KEK）

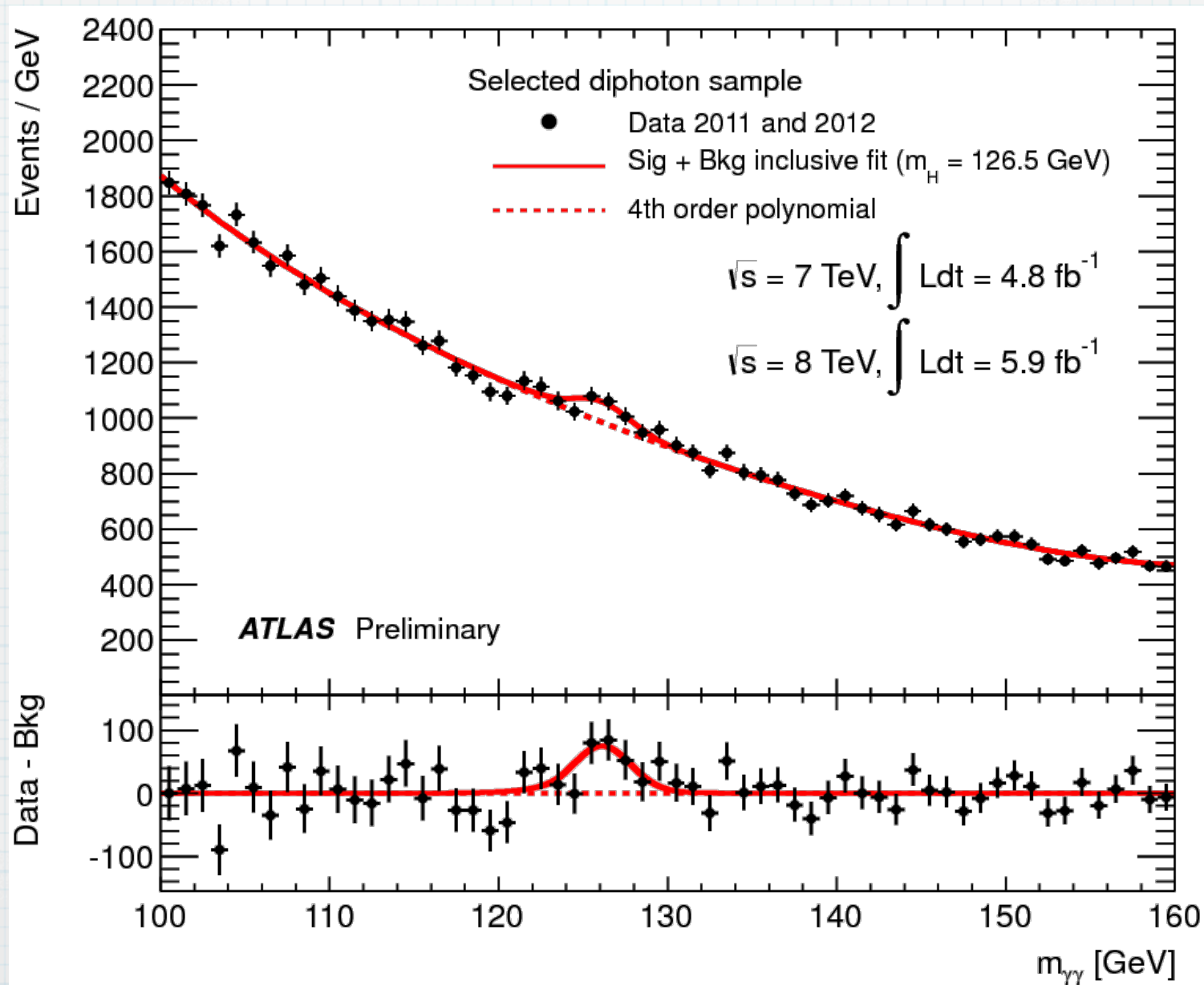
素粒子物理学の進展 @基研

2012/07/20

共同研究者

山本康裕（東京大学）

# ヒッグス粒子(?)の発見



# ヒッグス粒子(?)の発見

---

今後は性質を明らかにすることが肝要

## † 各量子数の決定

質量  $\sim 125,6$  [GeV] ?

スピン  $\sim 0, 2$  ?

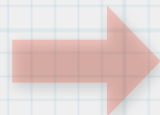
⋮

## † 結合定数の決定

ゲージボソンとの結合

フェルミオンとの結合

自己結合



新しい物理へのヒント

# ヒッグス粒子(?)の発見

---

今後は性質を明らかにすることが肝要

## † 各量子数の決定

質量  $\sim 125,6$  [GeV] ?

スピン  $\sim 0, 2$  ?

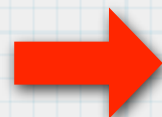
⋮

## † 結合定数の決定

ゲージボソンとの結合

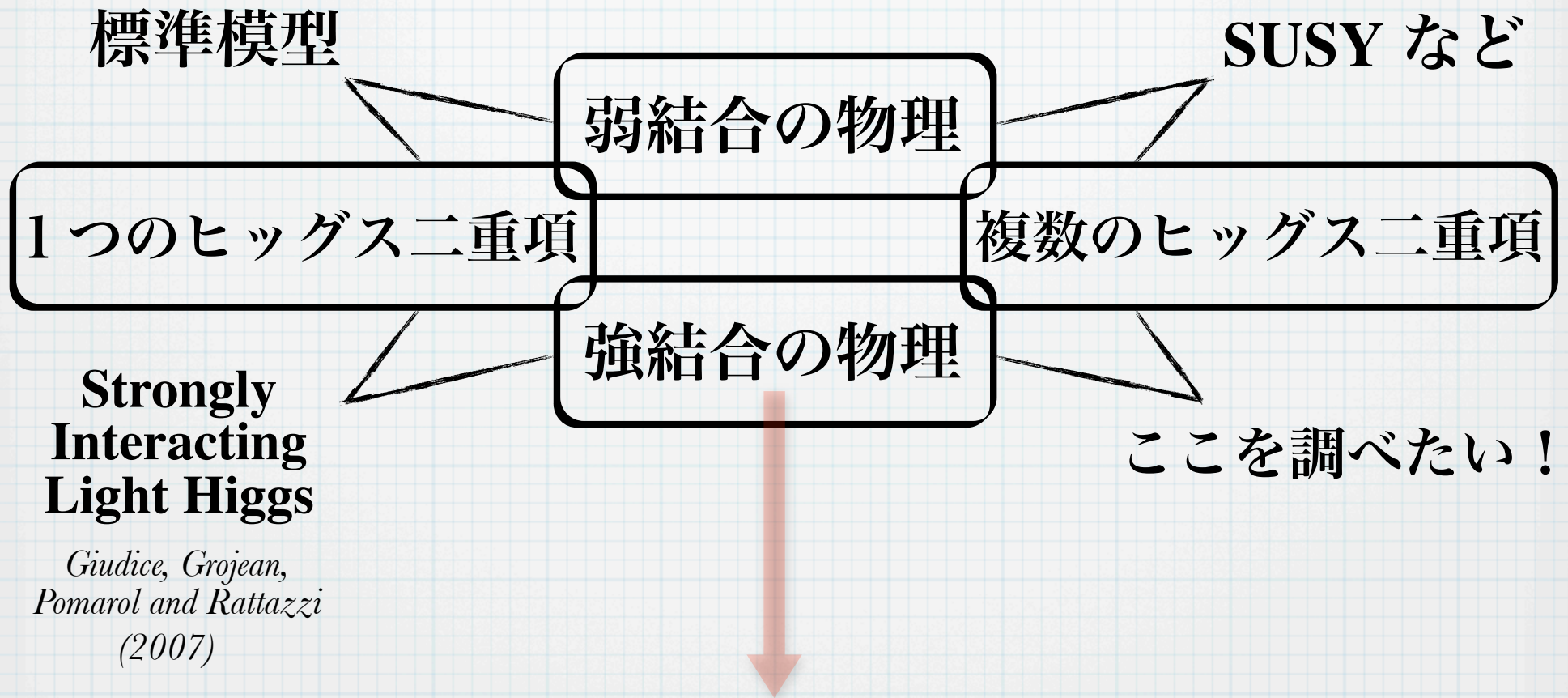
フェルミオンとの結合

自己結合



新しい物理へのヒント

# ヒッグスセクターの可能性

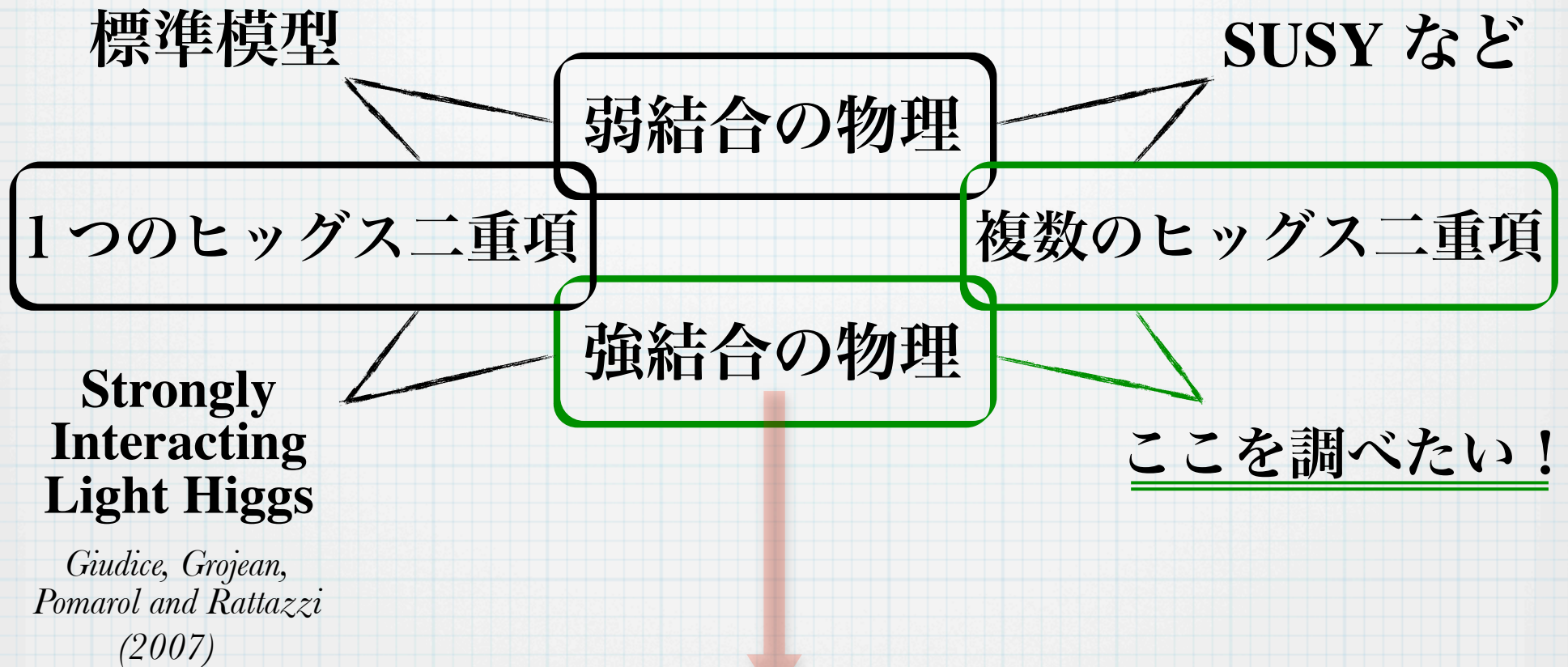


強結合起源のヒッグス

大域的対称性の破れに伴う Pseudo NGB

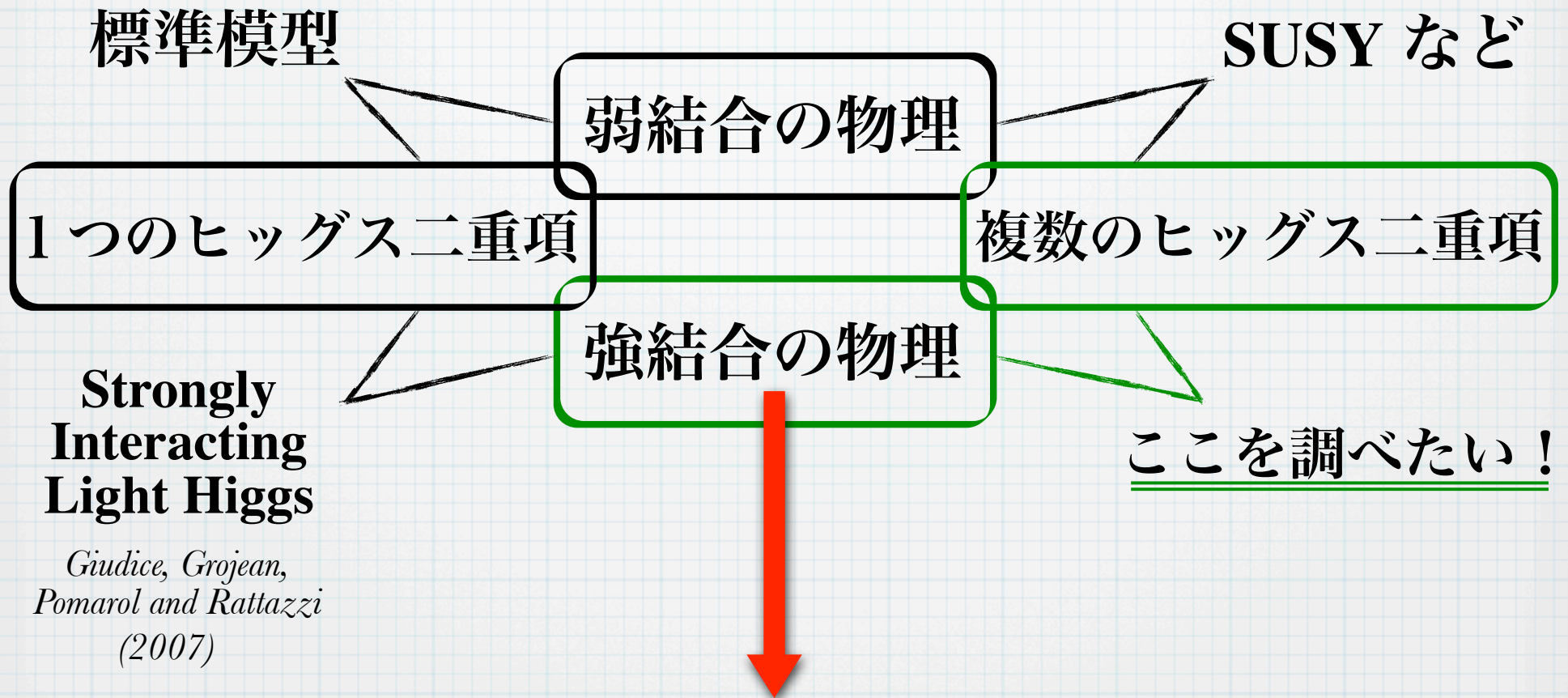


# ヒッグスセクターの可能性



強結合起源のヒッグス  
大域的対称性の破れに伴う Pseudo NGB

# ヒッグスセクターの可能性



強結合起源のヒッグス  
大域的対称性の破れに伴う Pseudo NGB

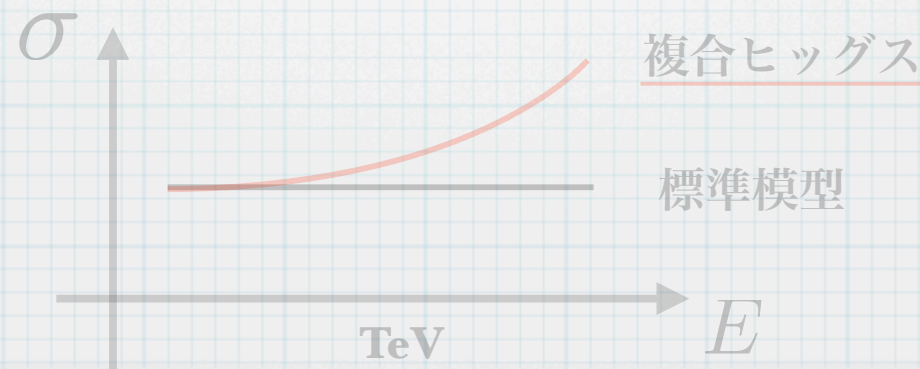
# 複合ヒッグス模型の次元6微分相互作用

$$\mathcal{L}_{\text{NL}\Sigma\text{M}}^{\text{Higgs}} = \frac{f^2}{2} \text{Tr} \left[ (\partial e^{i\pi/f}) (\partial e^{-i\pi/f}) \right] \supset \frac{c_H}{2f^2} \partial(H^\dagger H) \partial(H^\dagger H)$$

† ヒッグスが関係する相互作用の変更

$$\frac{1}{2} \left( 1 + c_H \frac{v^2}{f^2} \right) \partial h \partial h \longrightarrow h \rightarrow \frac{1}{\sqrt{1 + c_H (v^2/f^2)}} h$$

† 高エネルギーの VBF 過程で支配的





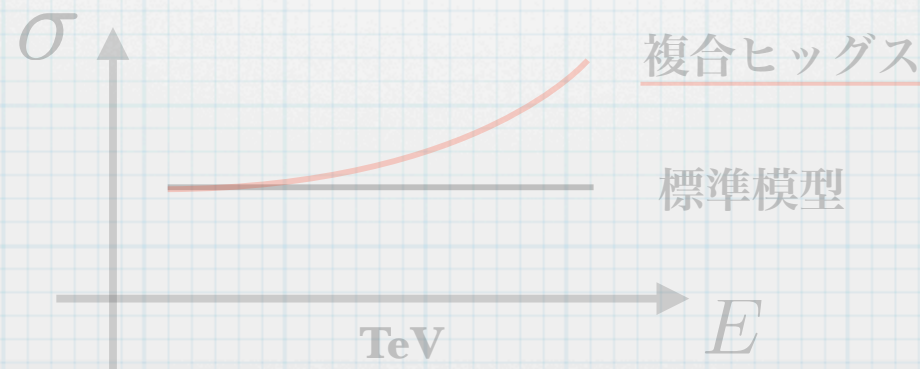
# 複合ヒッグスモデルの次元6微分相互作用

$$\mathcal{L}_{\text{NL}\Sigma\text{M}}^{\text{Higgs}} = \frac{f^2}{2} \text{Tr} \left[ (\partial e^{i\pi/f}) (\partial e^{-i\pi/f}) \right] \supset \frac{c_H}{2f^2} \partial(H^\dagger H) \partial(H^\dagger H)$$

## † ヒッグスが関係する相互作用の変更

$$\frac{1}{2} \left( 1 + c_H \frac{v^2}{f^2} \right) \partial h \partial h \longrightarrow h \rightarrow \frac{1}{\sqrt{1 + c_H (v^2/f^2)}} h$$

## † 高エネルギーの VBF 過程で支配的



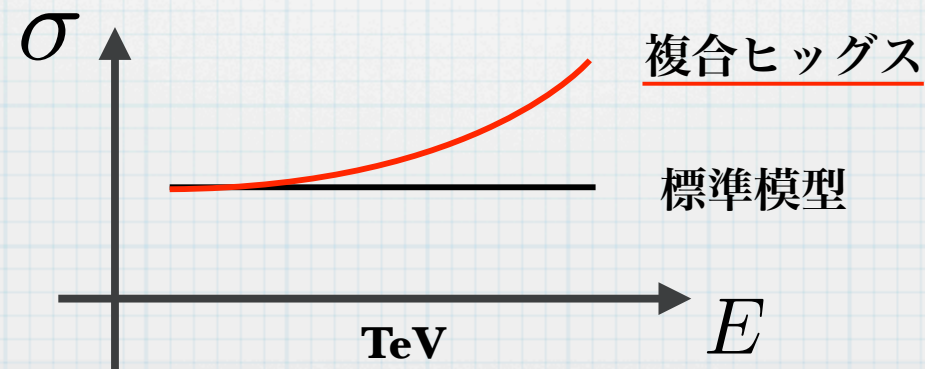
# 複合ヒッグスモデルの次元6微分相互作用

$$\mathcal{L}_{\text{NL}\Sigma\text{M}}^{\text{Higgs}} = \frac{f^2}{2} \text{Tr} \left[ (\partial e^{i\pi/f}) (\partial e^{-i\pi/f}) \right] \supset \frac{c_H}{2f^2} \partial(H^\dagger H) \partial(H^\dagger H)$$

† ヒッグスが関係する相互作用の変更

$$\frac{1}{2} \left( 1 + c_H \frac{v^2}{f^2} \right) \partial h \partial h \longrightarrow h \rightarrow \frac{1}{\sqrt{1 + c_H(v^2/f^2)}} h$$

† 高エネルギーの VBF 過程で支配的



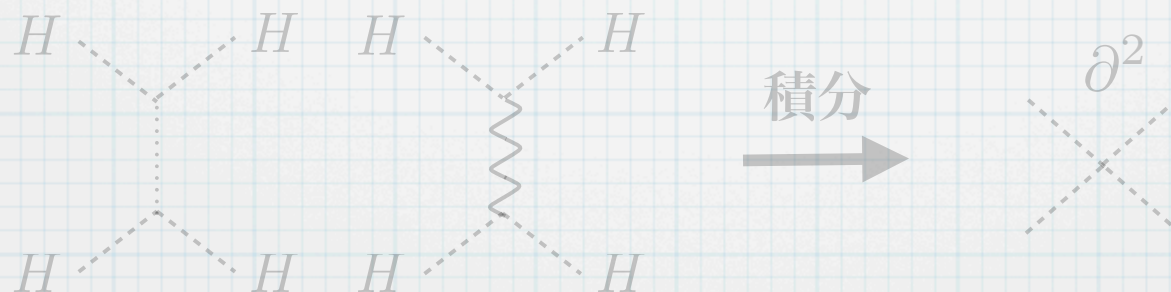
# 次元6微分相互作用への寄与

## † 非線形表現からの寄与

$$\mathcal{L}_{\text{NL}\Sigma\text{M}}^{\text{Higgs}} = \frac{f^2}{2} \text{Tr} \left[ (\partial e^{i\pi/f}) (\partial e^{-i\pi/f}) \right] \supset \frac{c_H}{2f^2} \partial(H^\dagger H) \partial(H^\dagger H)$$

➡ 複合ヒッグス特有の効果

## † 重い粒子との相互作用からの寄与



➡ 新物理があればいつでも現れ得る効果

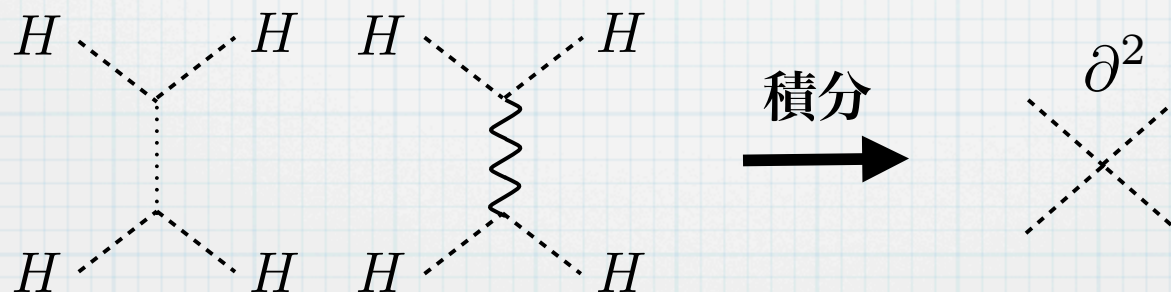
# 次元6微分相互作用への寄与

## † 非線形表現からの寄与

$$\mathcal{L}_{\text{NL}\Sigma\text{M}}^{\text{Higgs}} = \frac{f^2}{2} \text{Tr} \left[ (\partial e^{i\pi/f}) (\partial e^{-i\pi/f}) \right] \supset \frac{c_H}{2f^2} \partial(H^\dagger H) \partial(H^\dagger H)$$

➡ 複合ヒッグス特有の効果

## † 重い粒子との相互作用からの寄与



➡ 新物理があればいつでも現れ得る効果



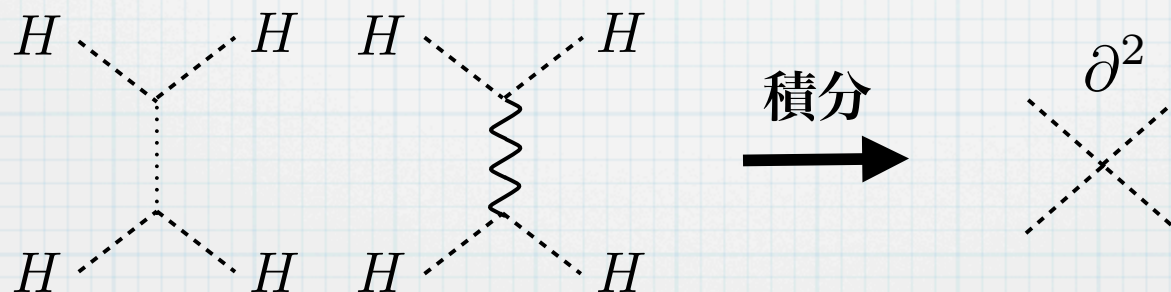
# 次元6微分相互作用への寄与

## † 非線形表現からの寄与

$$\mathcal{L}_{\text{NL}\Sigma\text{M}}^{\text{Higgs}} = \frac{f^2}{2} \text{Tr} \left[ (\partial e^{i\pi/f}) (\partial e^{-i\pi/f}) \right] \supset \frac{c_H}{2f^2} \partial(H^\dagger H) \partial(H^\dagger H)$$

➡ 複合ヒッグス特有の効果

## † 重い粒子との相互作用からの寄与



➡ 新物理があればいつでも現れ得る効果

# 次元6微分相互作用への寄与

ヒッグス二重項がN個の場合

## ✦ 非線形表現からの寄与

*Y. Kikuta, Y. Okada and Y. Yamamoto*

*PRD.85.075021 (2012)*

→ 対称性の観点からその構造を明らかにした

$$\mathcal{L}_{\text{NL}\Sigma\text{M}}^{\text{dim6}} \supset \frac{c_{ijkl}^H}{f^2} O_{ijkl}^H + \frac{c_{ijkl}^T}{f^2} O_{ijkl}^T$$

係数の自由度

	Re	Im
$O_{ijkl}^H = \partial \left( H_i^\dagger H_j \right) \partial \left( H_k^\dagger H_l \right)$	$(1/4)N^2(N^2 + 3)$	$(1/4)N^2(N^2 - 1)$
$O_{ijkl}^T = \left( H_i^\dagger \overleftrightarrow{D} H_j \right) \left( H_k^\dagger \overleftrightarrow{D} H_l \right)$	$(1/4)N^2(N^2 + 3)$	$(1/4)N^2(N^2 - 1)$

$i, j, k, l = 1, \dots, N$

# 次元6微分相互作用への寄与

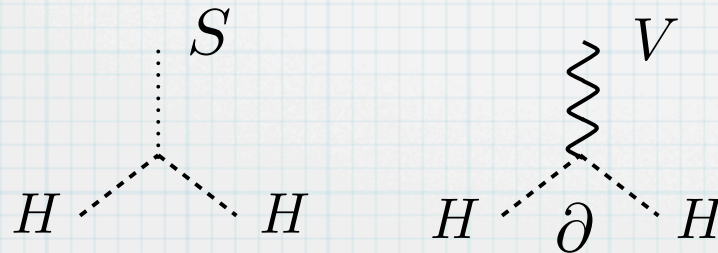
ヒッグス二重項がN個の場合

† 重い粒子との相互作用からの寄与

複数のヒッグス二重項の場合は分かってない



ツリーレベルの効果を考える：三点結合が効く



結合し得る表現は？

積分で出る寄与は？

非線形表現からの寄与と分離可能か！？

# 次元6微分相互作用への寄与

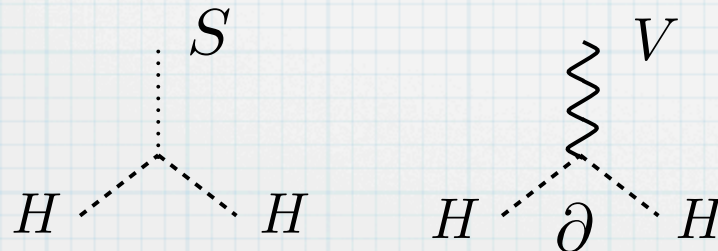
ヒッグス二重項がN個の場合

† 重い粒子との相互作用からの寄与

複数のヒッグス二重項の場合は分かってない



ツリーレベルの効果を考える：三点結合が効く



結合し得る表現は？

積分で出る寄与は？

非線形表現からの寄与と分離可能か！？



# 講演の目次

---

## 1. 導入

† ヒッグス粒子(?)の発見

† 複合ヒッグスの次元6微分相互作用

## 2. 重い粒子の分類とその効果

†  $SU(2)_L \otimes SU(2)_R$  の下での分類

† 次元6微分相互作用への寄与

## 3. ヒッグス複合性の判別

† 具体例：ヒッグス二重項2つの場合

† 特徴的な物理過程

## 4. まとめ

# 下準備

ヒッグスを  $SO(4N)$  基本表現として取り扱う

$$\eta = (h_1 \ h_2 \ h_3 \ h_4 \ \dots \ h_{4N})^T$$

$$H_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} h_{1+4(i-1)} + ih_{2+4(i-1)} \\ h_{3+4(i-1)} + ih_{4+4(i-1)} \end{pmatrix}$$

$SO(4N)$  生成子の分類

$$\left\{ T_{(ij)}^{SO(4N)} \right\} = \left\{ T_{(ij)}^{L\alpha}, T_{(ij)}^{R\beta}, U_{(ij)}, S_{(ij)}^{\alpha\beta} \right\} \quad \begin{matrix} [3,1] & [1,3] & [1,1] & [3,3] \\ \text{SU}(2)_{\text{L}} \otimes \text{SU}(2)_{\text{R}} \end{matrix}$$

$$T_{(12)}^{L\alpha} = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{4 \times 4} & T^{L\alpha} & \cdots & \mathbf{0}_{4 \times 4} \\ -T^{L\alpha} & \mathbf{0}_{4 \times 4} & \cdots & \mathbf{0}_{4 \times 4} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{0}_{4 \times 4} & \cdots & \mathbf{0}_{4 \times 4} & \mathbf{0}_{4 \times 4} \end{pmatrix}$$

# 下準備

ヒッグスを  $SO(4N)$  基本表現として取り扱う

$$\eta = (h_1 \ h_2 \ h_3 \ h_4 \ \dots \ h_{4N})^T$$

$$H_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} h_{1+4(i-1)} + ih_{2+4(i-1)} \\ h_{3+4(i-1)} + ih_{4+4(i-1)} \end{pmatrix}$$

$SO(4N)$  生成子の分類

$$\left\{ T_{(ij)}^{SO(4N)} \right\} = \left\{ T_{(ij)}^{L\alpha}, T_{(ij)}^{R\beta}, U_{(ij)}, S_{(ij)}^{\alpha\beta} \right\} \quad \begin{matrix} [\mathbf{3}, \mathbf{1}] & [\mathbf{1}, \mathbf{3}] & [\mathbf{1}, \mathbf{1}] & [\mathbf{3}, \mathbf{3}] \\ \text{SU}(2)_{\mathbf{L}} \otimes \text{SU}(2)_{\mathbf{R}} \end{matrix}$$

$$U_{(12)} = i \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{4 \times 4} & \mathbf{1}_{4 \times 4} & \cdots & \mathbf{0}_{4 \times 4} \\ -\mathbf{1}_{4 \times 4} & \mathbf{0}_{4 \times 4} & \cdots & \mathbf{0}_{4 \times 4} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{0}_{4 \times 4} & \cdots & \mathbf{0}_{4 \times 4} & \mathbf{0}_{4 \times 4} \end{pmatrix}$$

# 下準備

---


ヒッグスを  $SO(4N)$  基本表現として取り扱う

$$\eta = (h_1 \ h_2 \ h_3 \ h_4 \ \dots \ h_{4N})^T$$

$$H_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} h_{1+4(i-1)} + ih_{2+4(i-1)} \\ h_{3+4(i-1)} + ih_{4+4(i-1)} \end{pmatrix}$$

$SO(4N)$  生成子の分類

$$\left\{ T_{(ij)}^{SO(4N)} \right\} = \left\{ T_{(ij)}^{L\alpha}, T_{(ij)}^{R\beta}, U_{(ij)}, S_{(ij)}^{\alpha\beta} \right\} \quad \begin{matrix} [3,1] & [1,3] & [1,1] & [3,3] & SU(2)_{\textcolor{blue}{L}} \otimes SU(2)_{\textcolor{green}{R}} \end{matrix}$$

  $SU(2)_{\textcolor{blue}{L}} \otimes SU(2)_{\textcolor{green}{R}}$  の表現で分類



# スカラーの場合

$$[1,1] \quad \alpha_{ij}^r (\eta^T \mathbf{1}_{(ij)} \eta) f\Phi \sim \alpha_{ij}^r (H_i^\dagger H_j + H_j^\dagger H_i) f\Phi$$

$$i \leq j$$

$$\alpha_{ij}^i (\eta^T U_{(ij)} T_{(ii)}^{\overline{R3}} \eta) f\Phi \sim i\alpha_{ij}^i (-H_i^\dagger H_j + H_j^\dagger H_i) f\Phi$$

$$[1,3]$$

$$i < j$$

$$\alpha_{ij}^c (\eta^T U_{(ij)} (T_{(ii)}^{\overline{R1}} - iT_{(ii)}^{\overline{R2}}) \eta) f\Phi_c \sim \alpha_{ij}^c (H_i^T \epsilon H_j) f\Phi_c$$

$$[3,1] \quad \alpha_{ij}^{tr} (\eta^T U_{(ij)} T_{(ii)}^{\overline{L\alpha}} \eta) f\Phi^\alpha \sim i\alpha_{ij}^{tr} (-H_i^\dagger \sigma^\alpha H_j + H_j^\dagger \sigma^\alpha H_i) f\Phi^\alpha$$

$$i < j$$

$$\alpha_{ij}^{ti} (\eta^T T_{(ij)}^{\overline{L\alpha}} T_{(ii)}^{\overline{R3}} \eta) f\Phi^\alpha \sim \alpha_{ij}^{ti} (H_i^\dagger \sigma^\alpha H_j + H_j^\dagger \sigma^\alpha H_i) f\Phi^\alpha$$

$$[3,3]$$

$$i \leq j$$

$$\alpha_{ij}^{tc} (\eta^T T_{(ij)}^{\overline{L\alpha}} (T_{(ii)}^{\overline{R1}} - iT_{(ii)}^{\overline{R2}}) \eta) f\Phi_c^\alpha \sim \alpha_{ij}^{tc} (H_i^T \epsilon \sigma^\alpha H_j) f\Phi_c^\alpha$$

# スカラーの場合

$$\begin{aligned}
 & \begin{aligned}
 & \text{[1,1]} \quad \alpha_{ij}^r \left( \eta^T \mathbf{1}_{(ij)} \eta \right) f\Phi \sim \alpha_{ij}^r \left( H_i^\dagger H_j + H_j^\dagger H_i \right) f\Phi \\
 & i \leq j \\
 & \text{[1,3]} \left\{ \begin{aligned}
 & \alpha_{ij}^i \left( \eta^T U_{(ij)} T_{(ii)}^{\text{R3}} \eta \right) f\Phi \sim i\alpha_{ij}^i \left( -H_i^\dagger H_j + H_j^\dagger H_i \right) f\Phi \\
 & i < j \\
 & \alpha_{ij}^c \left( \eta^T U_{(ij)} \left( T_{(ii)}^{\text{R1}} - iT_{(ii)}^{\text{R2}} \right) \eta \right) f\Phi_c \sim \alpha_{ij}^c \left( H_i^T \epsilon H_j \right) f\Phi_c - \text{complex singlet}
 \end{aligned} \right. \\
 & \text{[3,1]} \quad \alpha_{ij}^{tr} \left( \eta^T U_{(ij)} T_{(ii)}^{\text{L}\alpha} \eta \right) f\Phi^\alpha \sim i\alpha_{ij}^{tr} \left( -H_i^\dagger \sigma^\alpha H_j + H_j^\dagger \sigma^\alpha H_i \right) f\Phi^\alpha \\
 & i < j \\
 & \text{[3,3]} \left\{ \begin{aligned}
 & \alpha_{ij}^{ti} \left( \eta^T T_{(ij)}^{\text{L}\alpha} T_{(ii)}^{\text{R3}} \eta \right) f\Phi^\alpha \sim \alpha_{ij}^{ti} \left( H_i^\dagger \sigma^\alpha H_j + H_j^\dagger \sigma^\alpha H_i \right) f\Phi^\alpha \\
 & i \leq j \\
 & \alpha_{ij}^{tc} \left( \eta^T T_{(ij)}^{\text{L}\alpha} \left( T_{(ii)}^{\text{R1}} - iT_{(ii)}^{\text{R2}} \right) \eta \right) f\Phi_c^\alpha \sim \alpha_{ij}^{tc} \left( H_i^T \epsilon \sigma^\alpha H_j \right) f\Phi_c^\alpha
 \end{aligned} \right.
 \end{aligned}
 \end{aligned}$$

# スカラーの場合

$$\begin{aligned}
 & \begin{aligned}
 & \text{[1,1]} \quad \alpha_{ij}^r \left( \eta^T \mathbf{1}_{(ij)} \eta \right) f\Phi \sim \alpha_{ij}^r \left( H_i^\dagger H_j + H_j^\dagger H_i \right) f\Phi \\
 & i \leq j \\
 & \text{[1,3]} \left\{ \begin{aligned}
 & \alpha_{ij}^i \left( \eta^T U_{(ij)} T_{(ii)}^{\text{R3}} \eta \right) f\Phi \sim i\alpha_{ij}^i \left( -H_i^\dagger H_j + H_j^\dagger H_i \right) f\Phi \\
 & i < j \\
 & \alpha_{ij}^c \left( \eta^T U_{(ij)} \left( T_{(ii)}^{\text{R1}} - iT_{(ii)}^{\text{R2}} \right) \eta \right) f\Phi_c \sim \alpha_{ij}^c \left( H_i^T \epsilon H_j \right) f\Phi_c - \text{complex singlet}
 \end{aligned} \right. \quad \text{real singlet}
 \end{aligned}
 \\
 \\
 & \begin{aligned}
 & \text{[3,1]} \quad \alpha_{ij}^{tr} \left( \eta^T U_{(ij)} T_{(ii)}^{\text{L}\alpha} \eta \right) f\Phi^\alpha \sim i\alpha_{ij}^{tr} \left( -H_i^\dagger \sigma^\alpha H_j + H_j^\dagger \sigma^\alpha H_i \right) f\Phi^\alpha \\
 & i < j \\
 & \text{[3,3]} \left\{ \begin{aligned}
 & \alpha_{ij}^{ti} \left( \eta^T T_{(ij)}^{\text{L}\alpha} T_{(ii)}^{\text{R3}} \eta \right) f\Phi^\alpha \sim \alpha_{ij}^{ti} \left( H_i^\dagger \sigma^\alpha H_j + H_j^\dagger \sigma^\alpha H_i \right) f\Phi^\alpha \\
 & i \leq j \\
 & \alpha_{ij}^{tc} \left( \eta^T T_{(ij)}^{\text{L}\alpha} \left( T_{(ii)}^{\text{R1}} - iT_{(ii)}^{\text{R2}} \right) \eta \right) f\Phi_c^\alpha \sim \alpha_{ij}^{tc} \left( H_i^T \epsilon \sigma^\alpha H_j \right) f\Phi_c^\alpha - \text{complex triplet}
 \end{aligned} \right. \quad \text{real triplet}
 \end{aligned}
 \end{aligned}$$

# ベクターの場合

$$\begin{aligned}
 & \text{[1,1]} \quad i\gamma_{ij}^i \left( \eta^T U_{(ij)} \overleftrightarrow{\partial} \eta \right) V \sim \gamma_{ij}^i \left( H_i^\dagger \overleftrightarrow{\partial}_\mu H_j - H_j^\dagger \overleftrightarrow{\partial}_\mu H_i \right) V \\
 & i < j \\
 & i\gamma_{ij}^r \left( \eta^T T_{(ij)}^{\overline{R3}} \overleftrightarrow{\partial} \eta \right) V \sim i\gamma_{ij}^r \left( H_i^\dagger \overleftrightarrow{\partial} H_j + H_j^\dagger \overleftrightarrow{\partial} H_i \right) V
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} & \text{[1,1]} \\ & i < j \end{aligned}} \right\} \text{real singlet}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{[1,3]} \quad i\gamma_{ij}^c \left( \eta^T \left( T_{(ij)}^{\overline{R1}} - iT_{(ij)}^{\overline{R2}} \right) \overleftrightarrow{\partial} \eta \right) V_c \sim i\gamma_{ij}^c \left( H_i^T \epsilon \overleftrightarrow{\partial} H_j \right) V_c - \text{complex singlet} \\
 & i \leq j
 \end{aligned}$$

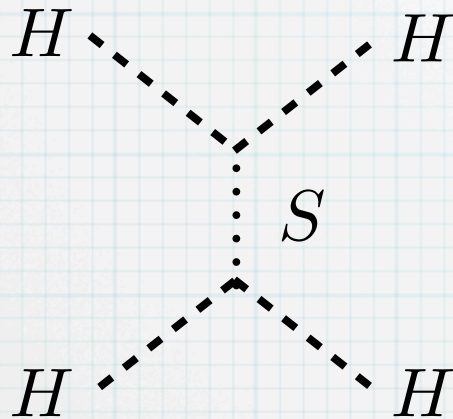
$$\begin{aligned}
 & \text{[3,1]} \quad i\gamma_{ij}^{tr} \left( \eta^T T_{(ij)}^{\overline{L\alpha}} \overleftrightarrow{\partial} \eta \right) V^\alpha \sim i\gamma_{ij}^{tr} \left( H_i^\dagger \sigma^\alpha \overleftrightarrow{\partial} H_j + H_j^\dagger \sigma^\alpha \overleftrightarrow{\partial} H_i \right) V^\alpha \\
 & i \leq j \\
 & i\gamma_{ij}^{ti} \left( \eta^T T_{(ij)}^{\overline{L\alpha}} T_{(ii)}^{\overline{R3}} \overleftrightarrow{\partial} \eta \right) V^\alpha \sim i\gamma_{ij}^{ti} \left( H_i^\dagger \sigma^\alpha \overleftrightarrow{\partial} H_j - H_j^\dagger \sigma^\alpha \overleftrightarrow{\partial} H_i \right) V^\alpha
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} & \text{[3,1]} \\ & i \leq j \end{aligned}} \right\} \text{real triplet}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{[3,3]} \quad i\gamma_{ij}^{tc} \left( \eta^T T_{(ij)}^{\overline{L\alpha}} \left( T_{(ii)}^{\overline{R1}} - iT_{(ii)}^{\overline{R2}} \right) \overleftrightarrow{\partial} \eta \right) V_c^\alpha \sim i\gamma_{ij}^{tc} \left( H_i^T \epsilon \sigma^\alpha \overleftrightarrow{\partial} H_j \right) V_c^\alpha - \text{complex triplet} \\
 & i < j
 \end{aligned}$$



# 積分後に現れる次元6微分演算子

## スカラーの場合



$$\mathcal{L}_{\text{int}} = J_H S$$

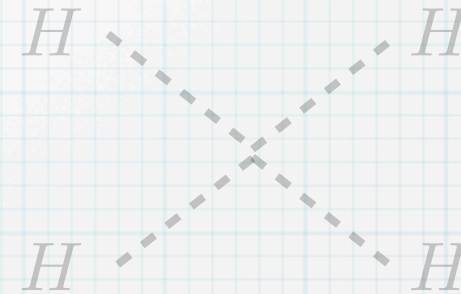
$J_H$  : **real singlet**  $H_i^\dagger H_j \pm H_j^\dagger H_i$

**complex singlet**  $H_i^T \epsilon H_j$

**real triplet**  $H_i^\dagger \sigma^\alpha H_j \pm H_j^\dagger \sigma^\alpha H_i$

**complex triplet**  $H_i^T \epsilon \sigma^\alpha H_j$

$S$  積分  $\longrightarrow$



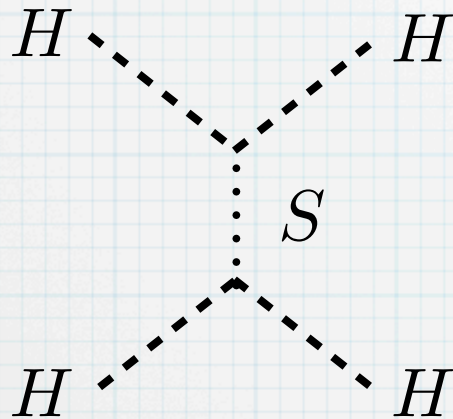
$$\mathcal{L}_{\text{eff}} = -\frac{1}{m_S^2} J_H^\dagger \left( \underline{1} - \frac{\square}{m_S^2} \right) J_H$$

ヒッグス四点結合

$O^H, O^T$

# 積分後に現れる次元6微分演算子

## スカラーの場合



$$\mathcal{L}_{\text{int}} = J_H S$$

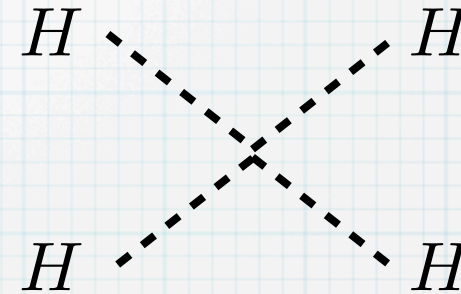
$J_H$  : **real singlet**  $H_i^\dagger H_j \pm H_j^\dagger H_i$

**complex singlet**  $H_i^T \epsilon H_j$

**real triplet**  $H_i^\dagger \sigma^\alpha H_j \pm H_j^\dagger \sigma^\alpha H_i$

**complex triplet**  $H_i^T \epsilon \sigma^\alpha H_j$

$S$  積分  $\longrightarrow$



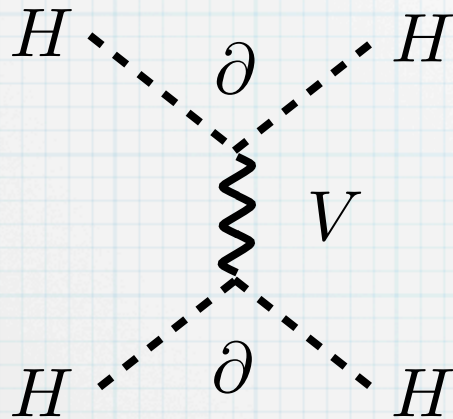
$$\mathcal{L}_{\text{eff}} = -\frac{1}{m_S^2} J_H^\dagger \left( \underline{\underline{1}} - \frac{\square}{m_S^2} \right) J_H$$

ヒッグス四点結合

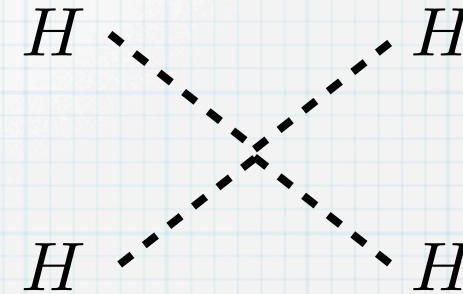
$O^H, O^T$

# 積分後に現れる次元6微分演算子

ベクターの場合



$V$  積分  $\longrightarrow$



$$\mathcal{L}_{\text{int}} = J_H^\mu V_\mu$$

$$\mathcal{L}_{\text{eff}} = -\frac{1}{m_V^2} \underline{J_H^{\mu\dagger} J_{H\mu}}$$

$$J_H^\mu : \text{real singlet} \quad H_i^\dagger \overleftrightarrow{\partial}_\mu H_j \pm H_j^\dagger \overleftrightarrow{\partial}_\mu H_i$$

$$\text{complex singlet} \quad H_i^T \epsilon \overleftrightarrow{\partial} H_j$$

$$\text{real triplet} \quad H_i^\dagger \sigma^\alpha \overleftrightarrow{\partial} H_j \pm H_j^\dagger \sigma^\alpha \overleftrightarrow{\partial} H_i$$

$$\text{complex triplet} \quad H_i^T \epsilon \sigma^\alpha \overleftrightarrow{\partial} H_j$$

$\searrow$

$$\underline{\underline{O^H, O^T}}$$

# 積分後に現れる次元6微分演算子

## ゲージカレントの寄与

$$\left( i\gamma_{ij}^{tr} \left( \eta^T T_{(ij)}^{L\alpha} \overleftrightarrow{D}_\mu \eta \right) + \gamma_W (D^\nu W_{\nu\mu})^\alpha \right) V^{\alpha\mu}$$

$$\left( i\gamma_{ij}^r \left( \eta^T T_{(ij)}^{R3} \overleftrightarrow{D}_\mu \eta \right) + \gamma_B D^\nu B_{\nu\mu} \right) V^\mu$$

## 積分後の電弱パラメータへの寄与

$$\hat{S} \sim \frac{\gamma_{ij}^L \gamma_W}{m_{V\alpha}^2} v_i v_j + \frac{\gamma_{ij}^3 \gamma_B}{m_{Vn}^2} v_i v_j$$

$$W \sim \frac{\gamma_W^2}{m_L^2} v^2, \quad Y \sim \frac{\gamma_B^2}{m_{R3}^2} v^2$$

➡ 制限が厳しいので質量は重い方向へ

➡  $O^{H,T}$  へのベクターの寄与は小さいので無視



# 積分後に現れる次元6微分演算子

## ゲージカレントの寄与

$$\left( i\gamma_{ij}^{tr} \left( \eta^T T_{(ij)}^{L\alpha} \overleftrightarrow{D}_\mu \eta \right) + \gamma_W (D^\nu W_{\nu\mu})^\alpha \right) V^{\alpha\mu}$$

$$\left( i\gamma_{ij}^r \left( \eta^T T_{(ij)}^{R3} \overleftrightarrow{D}_\mu \eta \right) + \gamma_B D^\nu B_{\nu\mu} \right) V^\mu$$

## 積分後の電弱パラメータへの寄与

$$\hat{S} \sim \frac{\gamma_{ij}^L \gamma_W}{m_{V\alpha}^2} v_i v_j + \frac{\gamma_{ij}^3 \gamma_B}{m_{Vn}^2} v_i v_j$$

$$W \sim \frac{\gamma_W^2}{m_L^2} v^2, \quad Y \sim \frac{\gamma_B^2}{m_{R3}^2} v^2$$

➡ 制限が厳しいので質量は重い方向へ

➡  $O^{H,T}$  へのベクターの寄与は小さいので無視

# コストディアル不変性

重い自由度を積分する前の議論

→  $SU(2)_{\text{R}}$  triplet を構成すればよい

例 :  $SU(2)_{\text{L}}$  real & complex triplet スカラー

$$\alpha_{ij}^{tr} \left( \eta^T T_{(ij)}^{L\alpha} T_{(ii)}^{R3} \eta \right) f \Phi^\alpha$$
$$\alpha_{ij}^{tc} \left( \eta^T T_{(ij)}^{L\alpha} \left( T_{(ii)}^{R1} - iT_{(ii)}^{R2} \right) \eta \right) f \Phi_c^\alpha$$

パラメータの関係 :  $\alpha_{ij}^{tr} = \sqrt{2} \alpha_{ij}^{tc}$ ,  $m_{\Phi^\alpha} = m_{\Phi_c^\alpha}$

$$\rightarrow \mathcal{L}_{\Phi^\alpha} + \mathcal{L}_{\Phi_c^\alpha} = -\frac{1}{2} \Phi_A^\alpha \left( \square + m_{\Phi_A^\alpha}^2 \right) \Phi_A^\alpha + \alpha_{ij}^{tr} \left( \eta^T T_{(ij)}^{L\alpha} T_{(ii)}^{RA} \eta \right) f \Phi_{\underline{A}}^\alpha$$

足をつぶしているので確かに  $SU(2)_{\text{L}} \otimes SU(2)_{\text{R}}$  不変

# コストディアル不変性

重い自由度を積分する前の議論

→  $SU(2)_R$  triplet を構成すればよい

例 :  $SU(2)_L$  real & complex triplet スカラー

$$\alpha_{ij}^{tr} \left( \eta^T T_{(ij)}^{L\alpha} T_{(ii)}^{R3} \eta \right) f \Phi^\alpha$$
$$\alpha_{ij}^{tc} \left( \eta^T T_{(ij)}^{L\alpha} \left( T_{(ii)}^{R1} - iT_{(ii)}^{R2} \right) \eta \right) f \Phi_c^\alpha$$

パラメータの関係 :  $\alpha_{ij}^{tr} = \sqrt{2} \alpha_{ij}^{tc}$ ,  $m_{\Phi^\alpha} = m_{\Phi_c^\alpha}$

$$\rightarrow \mathcal{L}_{\Phi^\alpha} + \mathcal{L}_{\Phi_c^\alpha} = -\frac{1}{2} \Phi_A^\alpha \left( \square + m_{\Phi_A^\alpha}^2 \right) \Phi_A^\alpha + \alpha_{ij}^{tr} \left( \eta^T T_{(ij)}^{L\alpha} T_{(ii)}^{RA} \eta \right) f \Phi_{\underline{A}}^\alpha$$

足をつぶしているので確かに  $SU(2)_L \otimes SU(2)_R$  不変

# コストディアル不変性

重い自由度を積分する前の議論

→  $SU(2)_R$  triplet を構成すればよい

例 :  $SU(2)_L$  real & complex triplet スカラー

$$\alpha_{ij}^{tr} \left( \eta^T T_{(ij)}^{L\alpha} T_{(ii)}^{R3} \eta \right) f \Phi^\alpha$$
$$\alpha_{ij}^{tc} \left( \eta^T T_{(ij)}^{L\alpha} \left( T_{(ii)}^{R1} - iT_{(ii)}^{R2} \right) \eta \right) f \Phi_c^\alpha$$

パラメータの関係 :  $\alpha_{ij}^{tr} = \sqrt{2} \alpha_{ij}^{tc}$ ,  $m_{\Phi^\alpha} = m_{\Phi_c^\alpha}$

$$\rightarrow \mathcal{L}_{\Phi^\alpha} + \mathcal{L}_{\Phi_c^\alpha} = -\frac{1}{2} \Phi_A^\alpha \left( \square + m_{\Phi_A^\alpha}^2 \right) \Phi_A^\alpha + \alpha_{ij}^{tr} \left( \eta^T T_{(ij)}^{L\alpha} T_{(ii)}^{RA} \eta \right) f \Phi_{\underline{A}}^\alpha$$

足をつぶしているので確かに  $SU(2)_L \otimes SU(2)_R$  不変



# 係数の自由度

	非線形表現		スカラー積分	
	Re	Im	Re	Im
一般の場合	$\frac{N^2}{2}(N^2 + 3)$	$\frac{N^2}{2}(N^2 - 1)$	$N(2N + 1)$	$N(2N - 1)$
カストディアル 不変	$\frac{N^2}{3}(N^2 + 2)$	0	$N(N + 1)$ [3,1] [3,3]	0

		非線形表現	スカラー積分
カストディアル不変	$N = 1$	1	2
	$N = 2$	8	6

→ 一般に  $N \geq 2$  の場合はスカラー積分の自由度が少ない !!

# 係数の自由度

	非線形表現		スカラー積分	
	Re	Im	Re	Im
一般の場合	$\frac{N^2}{2} (N^2 + 3)$	$\frac{N^2}{2} (N^2 - 1)$	$N(2N + 1)$	$N(2N - 1)$
カストディアル 不変	$\frac{N^2}{3} (N^2 + 2)$	0	$N(N + 1)$ [3,1] [3,3]	0

		非線形表現	スカラー積分
カストディアル不変	$N = 1$	1	2
	$N = 2$	8	6

→ 一般に  $N \geq 2$  の場合はスカラー積分の自由度が少ない !!

# 講演の目次

---

## 1. 導入

- † ヒッグス粒子(?)の発見
- † 複合ヒッグスの次元6微分相互作用

## 2. 重い粒子の分類とその効果

- †  $SU(2)_L \otimes SU(2)_R$  の下での分類
- † 次元6微分相互作用への寄与

## 3. ヒッグス複合性の判別

- † 具体例：ヒッグス二重項2つの場合
- † 特徴的な物理過程

## 4. まとめ

# 複合性の判別

具体例：ヒッグス二重項2つの場合 (N=2)

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{2\text{HDM}}^{\text{dim } 6} = & \frac{c_{1111}^H}{f^2} \frac{O_{1111}^H}{2} + \frac{c_{1112}^H}{f^2} (O_{1112}^H + O_{1121}^H) + \frac{c_{1122}^H}{f^2} O_{1122}^H + \frac{c_{1221}^H}{f^2} O_{1221}^H \\ & + \frac{c_{1212}^H}{f^2} \left( \frac{O_{1212}^H + O_{2121}^H}{2} \right) + \frac{c_{2221}^H}{f^2} (O_{2212}^H + O_{2221}^H) + \frac{c_{2222}^H}{f^2} \frac{O_{2222}^H}{2} \\ & + \frac{c_{1122}^T}{f^2} O_{1122}^T + \frac{c_{1221}^T}{f^2} O_{1221}^T + \frac{c_{1212}^T}{f^2} \left( \frac{O_{1212}^T + O_{2121}^T}{2} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} O_{ijkl}^H &= \partial \left( H_i^\dagger H_j \right) \partial \left( H_k^\dagger H_l \right) \\ O_{ijkl}^T &= \left( H_i^\dagger \overleftrightarrow{D} H_j \right) \left( H_k^\dagger \overleftrightarrow{D} H_l \right) \end{aligned}$$

	非線形表現	スカラー積分
カストディアル不変	8	6
$\begin{aligned} c_{iijj}^T + c_{ijji}^T + c_{ijij}^T &= 0 \\ 3c_{iijj}^T + c_{ijji}^H - c_{ijij}^H &= 0 \end{aligned}$		

スカラー積分における特徴的な関係式は  $c_{1212}^H - c_{1221}^H = 0$



# 複合性の判別

具体例：ヒッグス二重項2つの場合 (N=2)

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{2\text{HDM}}^{\text{dim } 6} = & \frac{c_{1111}^H}{f^2} \frac{O_{1111}^H}{2} + \frac{c_{1112}^H}{f^2} (O_{1112}^H + O_{1121}^H) + \frac{c_{1122}^H}{f^2} O_{1122}^H + \frac{c_{1221}^H}{f^2} O_{1221}^H \\ & + \frac{c_{1212}^H}{f^2} \left( \frac{O_{1212}^H + O_{2121}^H}{2} \right) + \frac{c_{2221}^H}{f^2} (O_{2212}^H + O_{2221}^H) + \frac{c_{2222}^H}{f^2} \frac{O_{2222}^H}{2} \\ & + \frac{c_{1122}^T}{f^2} O_{1122}^T + \frac{c_{1221}^T}{f^2} O_{1221}^T + \frac{c_{1212}^T}{f^2} \left( \frac{O_{1212}^T + O_{2121}^T}{2} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} O_{ijkl}^H &= \partial \left( H_i^\dagger H_j \right) \partial \left( H_k^\dagger H_l \right) \\ O_{ijkl}^T &= \left( H_i^\dagger \overleftrightarrow{D} H_j \right) \left( H_k^\dagger \overleftrightarrow{D} H_l \right) \end{aligned}$$

	非線形表現	スカラー積分
カストディアル不変	8	6

$$\begin{aligned} c_{iijj}^T + c_{ijji}^T + c_{ijij}^T &= 0 \\ 3c_{iijj}^T + c_{ijji}^H - c_{ijij}^H &= 0 \end{aligned}$$

スカラー積分における特徴的な関係式は  $c_{1212}^H - c_{1221}^H = 0$

# 複合性の判別

具体例：ヒッグス二重項2つの場合 (N=2)

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{2\text{HDM}}^{\text{dim } 6} = & \frac{c_{1111}^H}{f^2} \frac{O_{1111}^H}{2} + \frac{c_{1112}^H}{f^2} (O_{1112}^H + O_{1121}^H) + \frac{c_{1122}^H}{f^2} O_{1122}^H + \frac{c_{1221}^H}{f^2} O_{1221}^H \\ & + \frac{c_{1212}^H}{f^2} \left( \frac{O_{1212}^H + O_{2121}^H}{2} \right) + \frac{c_{2221}^H}{f^2} (O_{2212}^H + O_{2221}^H) + \frac{c_{2222}^H}{f^2} \frac{O_{2222}^H}{2} \\ & + \frac{c_{1122}^T}{f^2} O_{1122}^T + \frac{c_{1221}^T}{f^2} O_{1221}^T + \frac{c_{1212}^T}{f^2} \left( \frac{O_{1212}^T + O_{2121}^T}{2} \right)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}O_{ijkl}^H &= \partial \left( H_i^\dagger H_j \right) \partial \left( H_k^\dagger H_l \right) \\ O_{ijkl}^T &= \left( H_i^\dagger \overleftrightarrow{D} H_j \right) \left( H_k^\dagger \overleftrightarrow{D} H_l \right)\end{aligned}$$

	非線形表現	スカラー積分
カストディアル不変	8	6

$$\begin{cases} c_{iijj}^T + c_{ijji}^T + c_{ijij}^T = 0 \\ 3c_{iijj}^T + c_{ijji}^H - c_{ijij}^H = 0 \end{cases}$$

スカラー積分における特徴的な関係式は

$$c_{1212}^H - c_{1221}^H = 0$$

# 複合性の判別

具体例：ヒッグス二重項2つの場合 (N=2)

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{2\text{HDM}}^{\text{dim } 6} = & \frac{c_{1111}^H}{f^2} \frac{O_{1111}^H}{2} + \frac{c_{1112}^H}{f^2} (O_{1112}^H + O_{1121}^H) + \frac{c_{1122}^H}{f^2} O_{1122}^H + \frac{c_{1221}^H}{f^2} O_{1221}^H \\ & + \frac{c_{1212}^H}{f^2} \left( \frac{O_{1212}^H + O_{2121}^H}{2} \right) + \frac{c_{2221}^H}{f^2} (O_{2212}^H + O_{2221}^H) + \frac{c_{2222}^H}{f^2} \frac{O_{2222}^H}{2} \\ & + \frac{c_{1122}^T}{f^2} O_{1122}^T + \frac{c_{1221}^T}{f^2} O_{1221}^T + \frac{c_{1212}^T}{f^2} \left( \frac{O_{1212}^T + O_{2121}^T}{2} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} O_{ijkl}^H &= \partial \left( H_i^\dagger H_j \right) \partial \left( H_k^\dagger H_l \right) \\ O_{ijkl}^T &= \left( H_i^\dagger \overleftrightarrow{D} H_j \right) \left( H_k^\dagger \overleftrightarrow{D} H_l \right) \end{aligned}$$

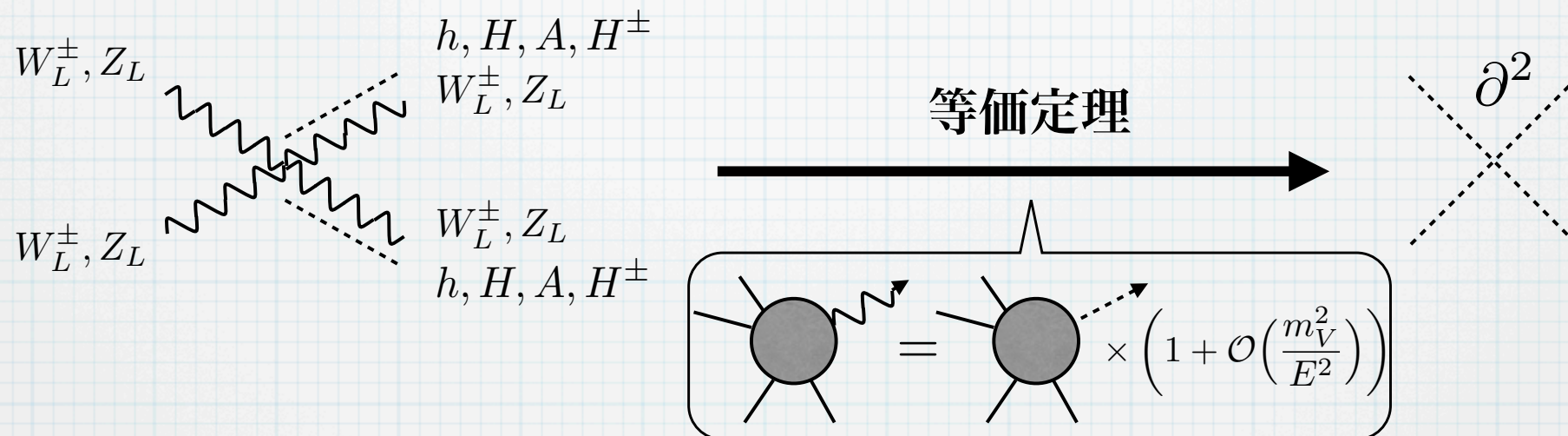
	非線形表現	スカラー積分
カストディアル不変	8	6

$$\begin{cases} c_{iijj}^T + c_{ijji}^T + c_{ijij}^T = 0 \\ 3c_{iijj}^T + c_{ijji}^H - c_{ijij}^H = 0 \end{cases}$$

スカラー積分における特徴的な関係式は  $c_{1212}^H - c_{1221}^H = 0$

# 複合性の判別

## 特徴的な物理過程 : Vector Boson Fusion



$$\sigma(W_L^+ W_L^- \rightarrow hA) = \frac{s}{32\pi f^4} \frac{2}{27} \sin^2(\alpha - \beta) (c_{1221}^H - c_{1212}^H)^2$$

$$\sigma(W_L^+ W_L^- \rightarrow HA) = \frac{s}{32\pi f^4} \frac{2}{27} \cos^2(\alpha - \beta) (c_{1221}^H - c_{1212}^H)^2$$

$$\begin{pmatrix} h \\ H \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_3 \\ h_7 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} G^0 \\ A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta & \sin \beta \\ -\sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_4 \\ h_8 \end{pmatrix}$$



# 複合性の判別

---

$$\sigma(W_L^+ W_L^- \rightarrow hA) = \frac{s}{32\pi f^4} \frac{2}{27} \sin^2(\alpha - \beta) (c_{1221}^H - c_{1212}^H)^2$$
$$\sigma(W_L^+ W_L^- \rightarrow HA) = \frac{s}{32\pi f^4} \frac{2}{27} \cos^2(\alpha - \beta) (c_{1221}^H - c_{1212}^H)^2$$

非線形表現：一般に  $c_{1221}^H - c_{1212}^H \neq 0$

スカラー積分：一般に  $c_{1221}^H - c_{1212}^H = 0$

➡ これらの振る舞いは純粹に非線形表現の効果

複合ヒッグス模型の強力な手掛かり

(複数のヒッグス二重項の存在が本質的)

# 複合性の判別

---

$$\sigma(W_L^+ W_L^- \rightarrow hA) = \frac{s}{32\pi f^4} \frac{2}{27} \sin^2(\alpha - \beta) (c_{1221}^H - c_{1212}^H)^2$$
$$\sigma(W_L^+ W_L^- \rightarrow HA) = \frac{s}{32\pi f^4} \frac{2}{27} \cos^2(\alpha - \beta) (c_{1221}^H - c_{1212}^H)^2$$

非線形表現：一般に  $c_{1221}^H - c_{1212}^H \neq 0$

スカラー積分：一般に  $c_{1221}^H - c_{1212}^H = 0$

➡ これらの振る舞いは純粋に非線形表現の効果

複合ヒッグス模型の強力な手掛かり

(複数のヒッグス二重項の存在が本質的)

# 講演の目次

---

## 1. 導入

- † ヒッグス粒子(?)の発見
- † 複合ヒッグスの次元6微分相互作用

## 2. 重い粒子の分類とその効果

- †  $SU(2)_L \otimes SU(2)_R$  の下での分類
- † 次元6微分相互作用への寄与

## 3. ヒッグス複合性の判別

- † 具体例: ヒッグス二重項2つの場合
- † 特徴的な物理過程

## 4. まとめ

# まとめ

## ✓ 複合ヒッグス模型の次元6微分相互作用

非線形表現からの寄与

重い粒子からの寄与

## ✓ 重い粒子の効果

ベクターの寄与：重い傾向にあり効かない

スカラーの寄与：

	非線形表現	スカラー積分
カストディアル不変	$\frac{N^2}{3}(N^2 + 2)$	$N(N + 1)$ [3,1] [3,3]

## ✓ ヒッグス複合性の判別：非線形表現でのみ現れる過程

$$\sigma(W_L^+ W_L^- \rightarrow hA), \sigma(W_L^+ W_L^- \rightarrow HA) \propto \frac{s}{f^4} (c_{1221}^H - c_{1212}^H)^2$$