# Unitarity sum rules and W’ boson couplings

大川 翔平（名古屋大学）

based on PRD 92, 055016 (2015)

共同研究者: 阿部智広（KEK）、長井遼（名古屋大学）
棚橋誠治（名古屋大学、KMI）

松江素粒子物理学研究会＠島根大学 2016.03.25

# イントロダクション

Spin-1の新粒子(V’=W’, Z’)を考える理由

- **新物理の中に現れる可能性有**
  - 電弱対称性の破れが非摂動のdynamicsと関係している場合

    例.) テクニカラーを考えるとQCDのrho mesonに対応するベクトルメソンが現れても良い

  - UVではもっと大きなゲージ群で記述される(or に統一されている)と思った場合

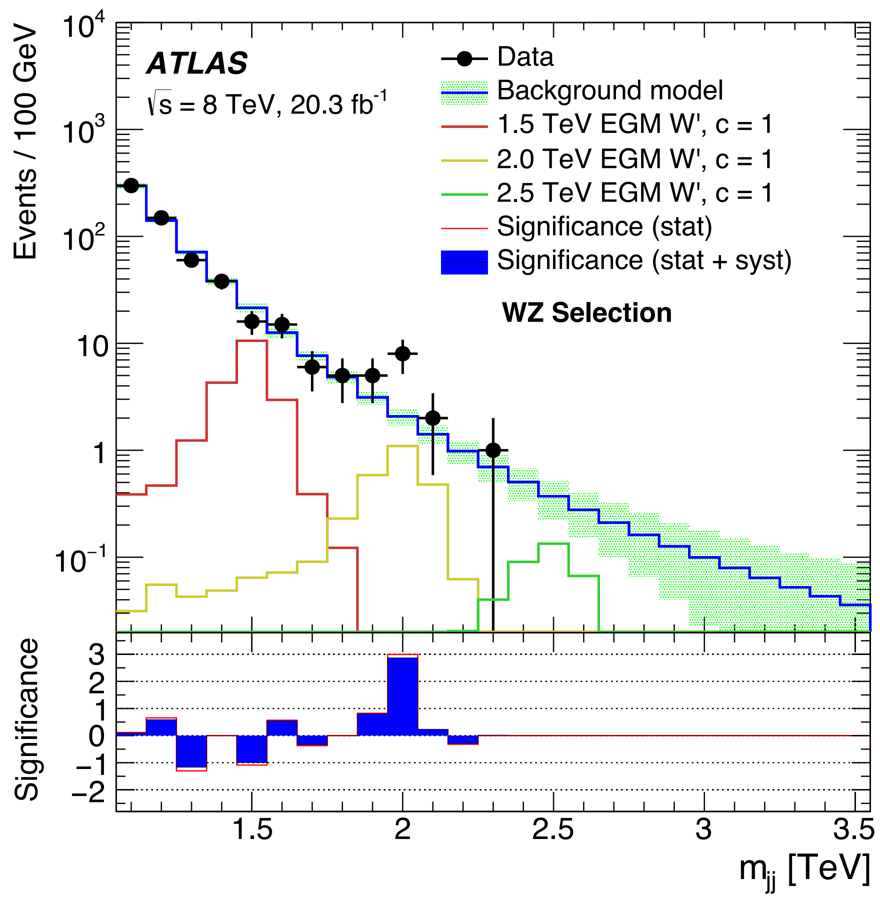
    拡張されたゲージ対称性が標準模型まで破れた後に heavy vector が現れる

    例.) 大統一理論、221模型、…

- **実験のアノマリーを説明できるかもしれない**

  例.) ATLAS 2TeV diboson anomaly (V’→WZ,WW,ZZ)

  [1506.00962]



# V’が今後発見されたとして、、、

- **V’はどんな物理と関係しているのか**
  - 非摂動のdynamicsと関係？
  - extended gauge sector？

- **両者を区別するためには次に何を見れば良いか**
  - 非摂動的な場合には近くに他のレゾナンスが見えるかもしれない
    例.) テクニパイオン → diphoton ?? [Matsuzaki-Yamawaki ’15]
  - 摂動的な場合にはVVV’カップリングとVV’hカップリングに関係が付く ←**今日はこの話をします**

# トークプラン

- イントロダクション
- 摂動的ユニタリティとユニタリティ和則
- ATLAS 2TeV アノマリー
- まとめ

# 摂動的ユニタリティとユニタリティ和則

- **Model**

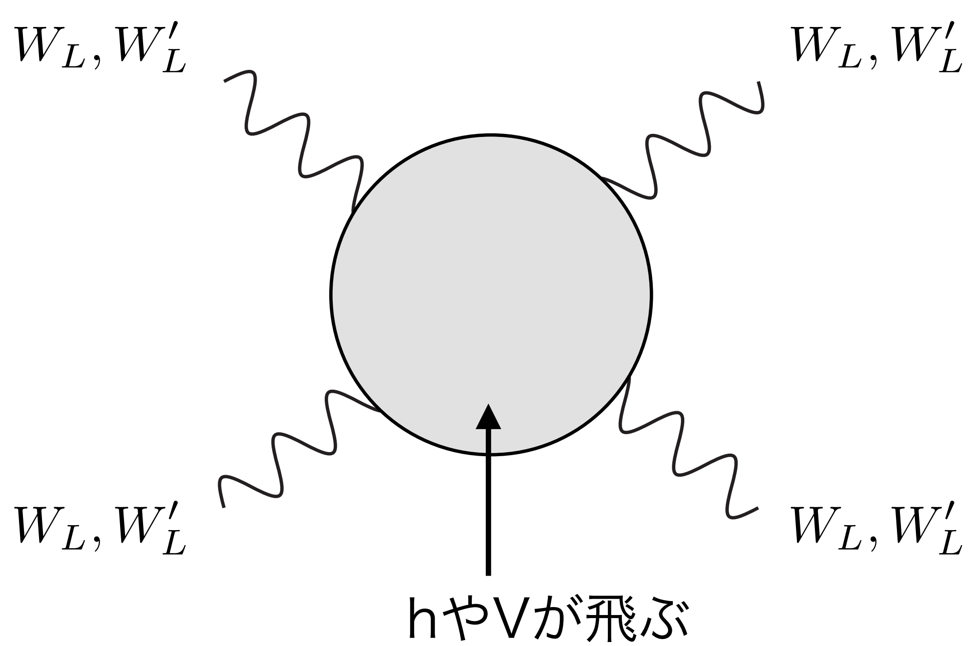
  singlet:　$h, h', h'', \cdots$

  triplet:　$W, W'$

- **やったこと**

  ① WW->WW, WW->WW’, WW->W’W’ の tree level 散乱振幅が高エネルギーで大きくならない

  ② E=M$_{W'}$ で摂動的ユニタリティを保つ




$$\sim \frac{E^4}{M_V^4} + \frac{E^2}{M_V^2} + \frac{E^0}{M_V^0}$$

# 摂動的ユニタリティとユニタリティ和則

- **Model**

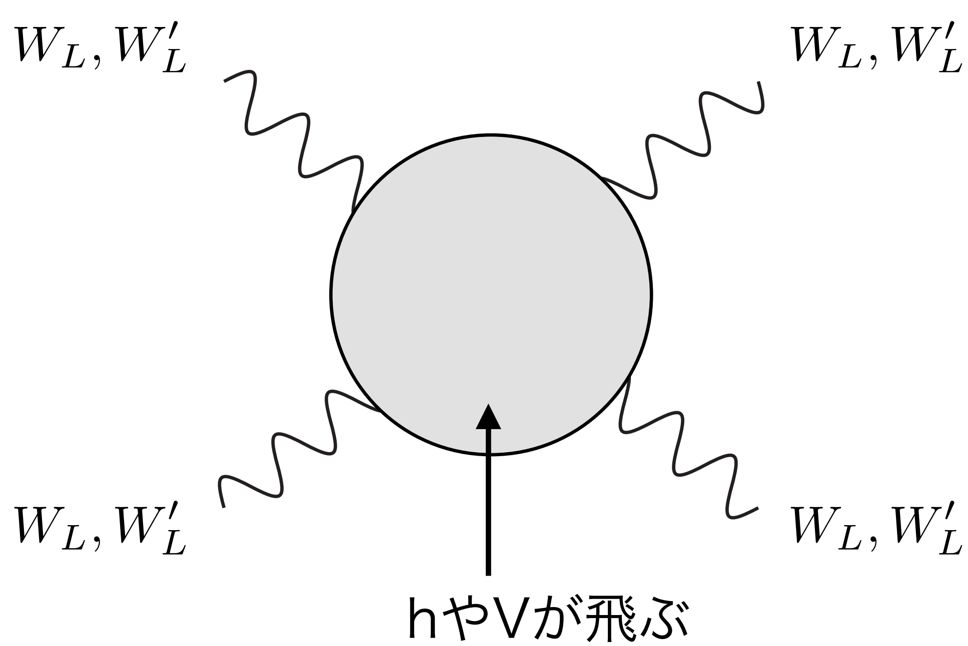
  singlet: $h, h', h'', \cdots$

  triplet: $W, W'$

- **やったこと**

  ① WW->WW, WW->WW', WW->W'W' の tree level 散乱振幅が高エネルギーで大きくならない

  ② E=M$_{W'}$ で摂動的ユニタリティを保つ




$$\sim \underbrace{\cancel{\frac{E^4}{M_V^4}}}_{=0} + \underbrace{\cancel{\frac{E^2}{M_V^2}}}_{=0} + \frac{E^0}{M_V^0}$$

① $E^4$, $E^2$がキャンセルする
→ ユニタリティ和則

# 摂動的ユニタリティとユニタリティ和則

- **Model**

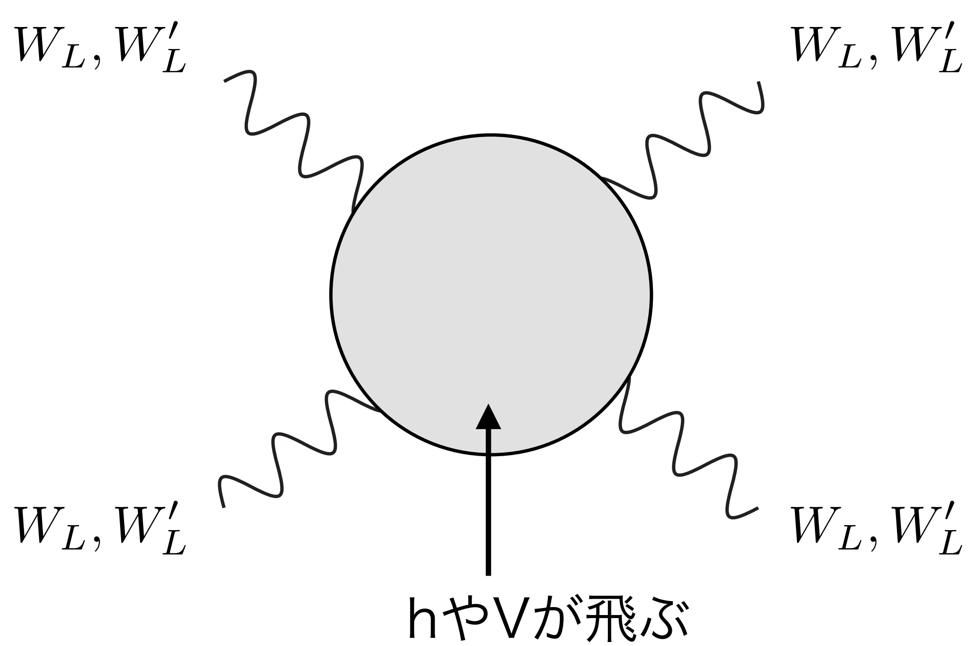
  singlet: $h, h', h'', \cdots$

  triplet: $W, W'$

- **やったこと**

  ① WW->WW, WW->WW', WW->W'W' の tree level 散乱振幅が高エネルギーで大きくならない

  ② E=M$_{W'}$ で摂動的ユニタリティを保つ




② 摂動的ユニタリティ

$$\sim \underbrace{\cancel{\frac{E^4}{M_V^4}}}_{=0} + \underbrace{\cancel{\frac{E^2}{M_V^2}}}_{=0} + \frac{E^0}{M_V^0} \lesssim 32\pi$$

① $E^4$, $E^2$がキャンセルする

→ ユニタリティ和則

# 散乱振幅のE$^4$-behavior

WW->WW

- E$^4$がキャンセル

$$g_{WWWW} = g^2_{WWW} + g^2_{WWW'}$$

- 摂動的ユニタリティ@E=M$_{W'}$

$$(g_{WWWW} - g^2_{WWW})\frac{M^4_{W'}}{M^4_W} \lesssim 32\pi$$

[Lee-Quigg-Thacker '77]

WWW'カップリングを適当にパラメトライズする

$$g_{WWW'} = \xi_V g_{WWW}\frac{M^2_W}{M^2_{W'}}$$

$$\Rightarrow \quad |\xi_V| \lesssim 15$$

# さらにE²-behaviorがキャンセルすることも要求すると、、

**WW->WW**

$$\sum_m g^2_{WWh_m} = 4M_W^2(g^2_{WWW} + g^2_{WWW'}) - 3M_W^2 g^2_{WWW} - 3M_{W'}^2 g^2_{WWW'}$$

**WW->WW'**

$$\begin{aligned}\sum_m g_{WWh_m} g_{WW'h_m} &= (3M_W^2 + M_{W'}^2)(g_{WWW} g_{WW'W} + g_{WWW'} g_{WW'W'}) \\ &\quad - 3M_W^2 g_{WWW} g_{WW'W} - 3M_{W'}^2 g_{WWW'} g_{WW'W'}\end{aligned}$$

**WW->W'W'**

$$\begin{aligned}\sum_m g^2_{WW'h_m} &= (2M_W^2 + 2M_{W'}^2)(g^2_{WW'W} + g^2_{WW'W'}) - 2(M_W^2 g^2_{WW'W} + M_{W'}^2 g^2_{WW'W'}) \\ &\quad - (M_W^2 g_{WWW} g_{W'W'W} + M_{W'}^2 g_{WWW'} g_{W'W'W'})\end{aligned}$$

これらの式をまとめると、

$$\boxed{g_{WW'h_m} = \pm \xi_V g_{WWh_m}}$$

＊この関係式は $W'', W''', \cdots$ があったとしても変わらないことが示せる

# これまでに得た式から分かること

- ベクトル３点

$$g_{WWW'} = \xi_V g_{WWW} \frac{M_W^2}{M_{W'}^2}$$

- ベクトル-ヒッグス

$$g_{WW'h} = \xi_V g_{WWh}$$

$$\frac{\Gamma(W' \to Wh)}{\Gamma(W' \to WZ)} \simeq \kappa_V^2$$

$$(\kappa_V = g_{WWh}/g_W M_W)$$

したがって、

- 高エネルギーで摂動的なら $\dfrac{\Gamma(W' \to Wh)}{\Gamma(W' \to WZ)} \simeq 1$
- $\dfrac{\Gamma(W' \to Wh)}{\Gamma(W' \to WZ)} \simeq 0$ なら非摂動的

[Fukano-Matsuzaki-Yamawaki '15]

# $M_{W'}$ ~ 2TeVにしてみる、、、

- Parametrization

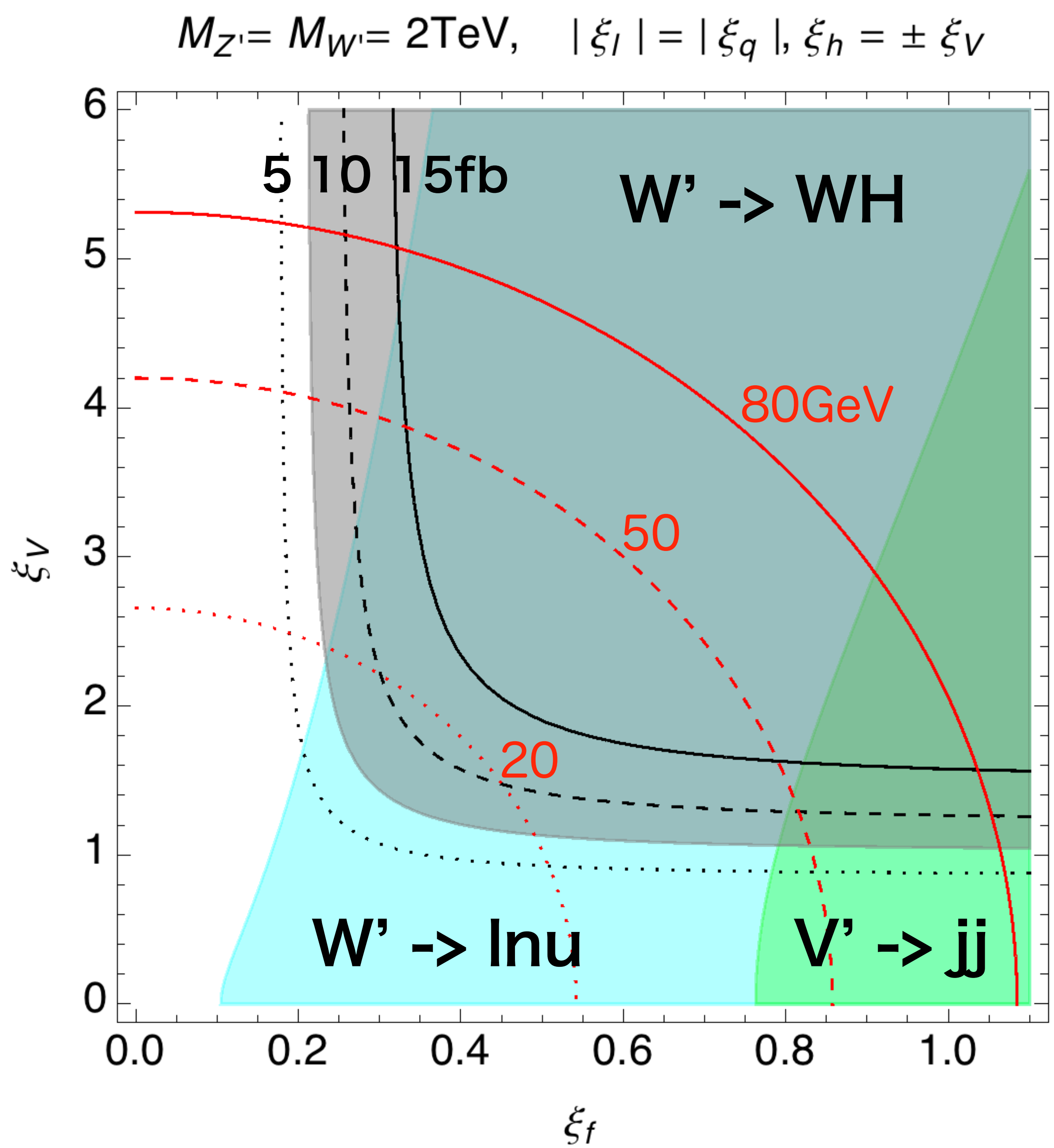
$$M_{W'} = M_{Z'} = 2\ \mathrm{TeV}$$

$$g_{WWW'} = \xi_V g_W \frac{M_W^2}{M_{W'}^2}$$

$$g_{WW'h} = \xi_V g_W M_W \quad (\kappa_V = 1)$$

$$g_{W'qq} = g_{W'll} = \xi_f g_W$$

# 2015年6月時点の制限 [Abe-Nagai-SO-Tanabashi '15]




- 等高線

  黒: $\sigma(pp \to W')B_{W'}(WZ) + \sigma(pp \to Z')B_{Z'}(WW) = 5, 10, 15$ [fb]

  赤: $\Gamma_{W'} = 20, 50, 80$ [GeV]

- 制限

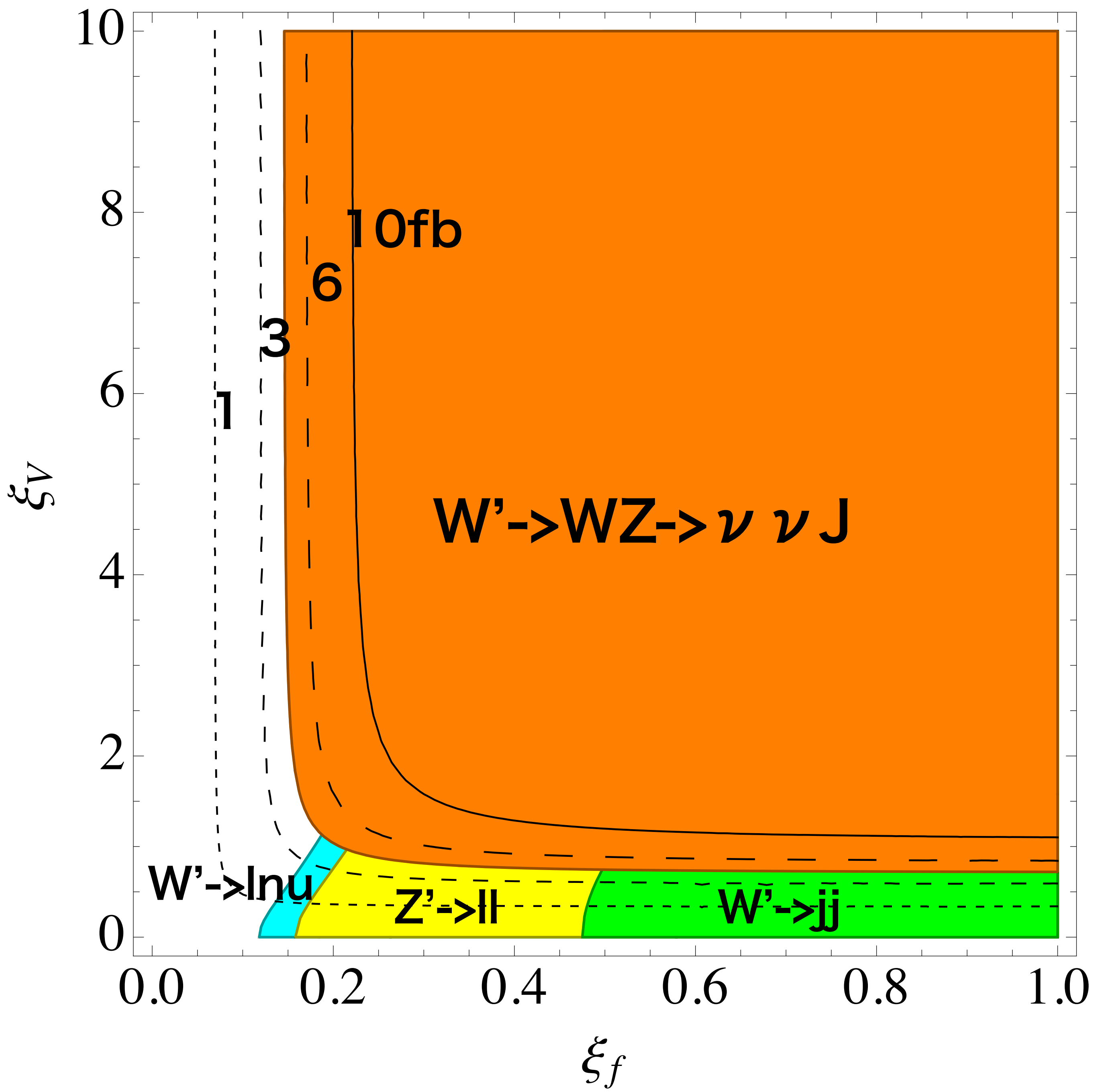
  Green: $V' \to jj$

  Cyan: $W' \to l\nu$

  Gray: $W' \to WH$

- anomalyを説明するためには σB=数fb-10数fbくらい欲しい（文献による）

# LHC Run2 の結果を考慮すると




- 8TeV

等高線: $\sigma(pp \to W')B_{W'}(WZ)$
$+ \sigma(pp \to Z')B_{Z'}(WW)$
$= 1, 3, 6, 10$ [fb]

- 13TeV

Green: $V' \to jj$ [ATLAS-CONF-2015-063]

Yellow: $Z' \to ll$ [ATLAS-CONF-2015-070]

Cyan: $W' \to l\nu$ [CMS PAS EXO-15-006]

New Orange: $W' \to WZ \to \nu\nu qq$ [ATLAS-CONF-2015-068]

➡ σB > 4.5 fb は排除

# まとめ

- **Spin-1の新粒子(V’=W’, Z’)があった場合**

  摂動的なら

$$g_{WWW'} = \xi_V g_W \frac{M_W^2}{M_{W'}^2}$$

$$g_{WW'h} = \kappa_V \xi_V g_W M_W$$

もしくは同様に

$$\frac{\Gamma(W' \to Wh)}{\Gamma(W' \to WZ)} \simeq \kappa_V^2$$

  が言える

- **$M_{W'}$~2TeVとした場合**

  LHC Run2 の制限から

$$\sigma(pp \to W')B_{W'}(WZ) + \sigma(pp \to Z')B_{Z'}(WW) > 4.5 \text{ [fb]}$$

or

$$\sigma(pp \to W')B_{W'}(WZ) > 3.0 \text{ [fb]}$$

  は排除される

# Back up

## E²-behavior

WW->WW

$$\sum_m g_{WWh_m}^2 = 4M_W^2(g_{WWW}^2 + g_{WWW'}^2) - 3M_W^2 g_{WWW}^2 - 3M_{W'}^2 g_{WWW'}^2$$

WW->WW'

$$\sum_m g_{WWh_m} g_{WW'h_m} = (3M_W^2 + M_{W'}^2)(g_{WWW}g_{WW'W} + g_{WWW'}g_{WW'W'})$$
$$- 3M_W^2 g_{WWW}g_{WW'W} - 3M_{W'}^2 g_{WWW'}g_{WW'W'}$$

WW->W'W'

$$\sum_m g_{WW'h_m}^2 = (2M_W^2 + 2M_{W'}^2)(g_{WW'W}^2 + g_{WW'W'}^2) - 2(M_W^2 g_{WW'W}^2 + M_{W'}^2 g_{WW'W'}^2)$$
$$- (M_W^2 g_{WWW} g_{W'W'W} + M_{W'}^2 g_{WWW'} g_{W'W'W'})$$

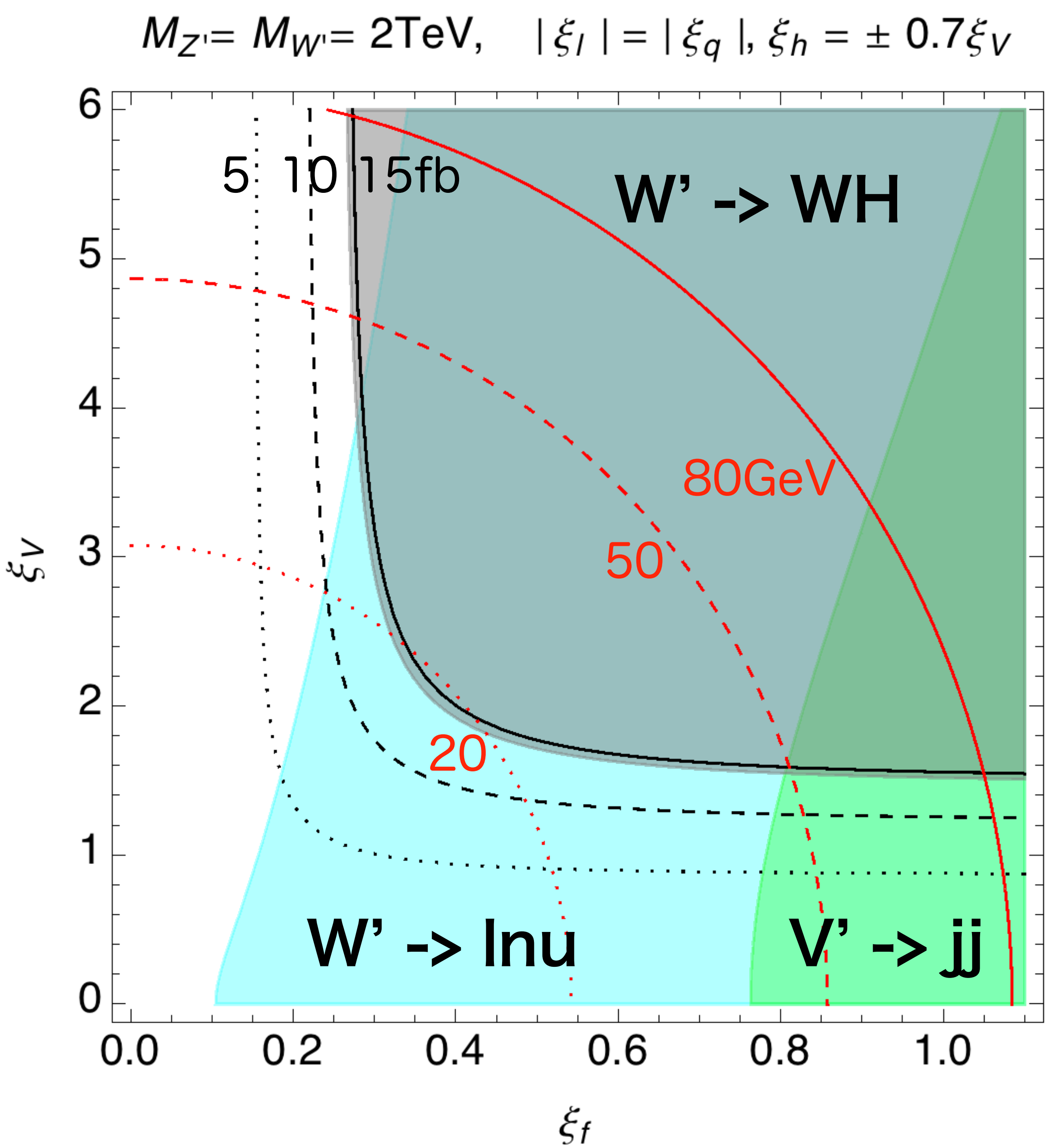
これらの式をまとめると、

$$\sum_m (g_{WW'h_m} \pm \xi_V g_{WWh_m})^2 = \xi_V^2 g_{WWW}^2 M_W^2 \mathcal{O}(\frac{M_W^2}{M_{W'}^2})$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{g_{WW'h_m} = \pm\xi_V g_{WWh_m}}$$

＊この関係式は $W'', W''', \cdots$ があったとしても変わらないことが示せる

# 2015年6月時点の制限 [Abe-Nagai-SO-Tanabashi '15]




- 等高線

  黒: $\sigma(pp \to W')B_{W'}(WZ)$
  $+\sigma(pp \to Z')B_{Z'}(WW)$
  $= 5, 10, 15$ [fb]

  赤: $\Gamma_{W'} = 20, 50, 80$ [GeV]

- 制限

  Green: $V' \to jj$

  Cyan: $W' \to l\nu$

  Gray: $W' \to WH$

- anomalyを説明するためには
  σB=3-20 fbくらい欲しい（文献による）

# Custodial symmetry violation

WやZの散乱振幅のE$^2$-behaviorが、カストディアル対称性を保つことを要求すると、

$$
\begin{aligned}
g_{WWW'} &= \xi_V g_W \frac{M_W^2}{M_{W'}^2} \\
g_{WZW'} &= \xi_V g_W \frac{M_W M_Z}{M_{W'}^2} \\
g_{WWZ'} &= \xi_V g_W \frac{M_W^2}{M_{Z'}^2} R(M_{W'}/M_{Z'}) \\
g_{WW'h} &= \kappa_V \xi_V g_W M_W \\
g_{ZZ'h} &= \kappa_V \xi_V g_W M_Z R(M_{W'}/M_{Z'})
\end{aligned}
$$

が言える（RはR(1)=1を満たす関数）