

ヒッグス三重項模型における、 $H^{++} \rightarrow W^+W^+$ 崩壊シナリオの実験的制限について

横谷 洋 (富山大理)

共同研究者 : 兼村晋哉 (富山大理),
柳生慶 (台湾中央大学)

“First constraint on the mass of doubly-charged Higgs bosons
in the same-sign diboson decay scenario at the LHC” [arXiv: 1305.2383v2](https://arxiv.org/abs/1305.2383v2)

第41回北陸信越地区 素粒子論グループ研究会,
国立立山青少年自然の家, 2013. 5. 24-26

目次：

1. イントロダクション：ヒッグス3重項模型
2. 3重項ヒッグス粒子の加速器実験による探索
3. WW崩壊シナリオに対する実験からの制限
4. まとめ

Higgs Triplet Model (HTM)

*Cheng, Li (1980);
Schechter, Valle, (1980);
Magg, Wetterich, (1980);
Mohapatra, Senjanovic, (1981).*

- ヒッグス3重項模型 :

SU(2) doublet Φ & triplet Δ

$$Y = 1/2$$

$$Y = 1$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} \phi^+ \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(\phi + v_\phi + i\chi) \end{bmatrix}$$

$$\Delta = \begin{bmatrix} \frac{\Delta^+}{\sqrt{2}} & \Delta^{++} \\ \Delta^0 & -\frac{\Delta^+}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

$$\text{where } \Delta^0 = (\delta + v_\Delta + i\eta)/\sqrt{2}$$

場の自由度 :

$$4 \text{ (Doublet)} + 6 \text{ (Triplet)} - 3 \text{ (NG boson)} = 7 \text{ (Physical)}$$

$$H^{\pm\pm}, H^\pm, H, A, h$$

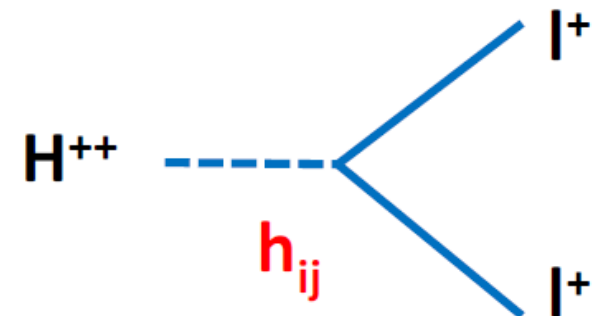
Higgs Triplet Model (HTM)

- Higgs potential in the HTM :

$$\begin{aligned}
 V = & m^2 \Phi^\dagger \Phi + M^2 \text{Tr}(\Delta^\dagger \Delta) + [\mu \Phi^T i\tau_2 \Delta^\dagger \Phi + \text{h.c.}] \\
 & + \lambda_1 (\Phi^\dagger \Phi)^2 + \lambda_2 [\text{Tr}(\Delta^\dagger \Delta)]^2 + \lambda_3 \text{Tr}[(\Delta^\dagger \Delta)^2] \\
 & + \lambda_4 (\Phi^\dagger \Phi) \text{Tr}(\Delta^\dagger \Delta) + \lambda_5 \Phi^\dagger \Delta \Delta^\dagger \Phi.
 \end{aligned}$$

- Yukawa coupling of Triplet field :

$$\mathcal{L}_Y = h_{ij} \overline{L}_L^{ic} i\tau_2 \Delta L_L^j + \text{h.c.}$$



→ “Lepton-number” 2を、3重項場に割り振る。

Higgs Triplet Model (HTM)

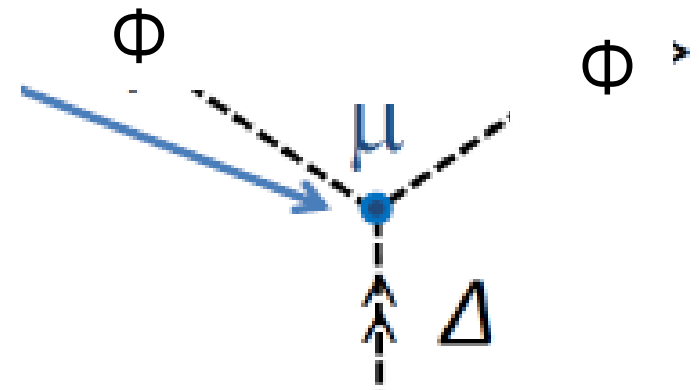
- Higgs potential in the HTM :

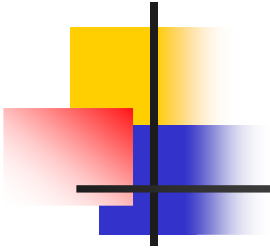
lepton-number を破る相互作用

$$\begin{aligned}
 V = & m^2 \Phi^\dagger \Phi + M^2 \text{Tr}(\Delta^\dagger \Delta) + [\mu \Phi^T i\tau_2 \Delta^\dagger \Phi + \text{h.c.}] \\
 & + \lambda_1 (\Phi^\dagger \Phi)^2 + \lambda_2 [\text{Tr}(\Delta^\dagger \Delta)]^2 + \lambda_3 \text{Tr}[(\Delta^\dagger \Delta)^2] \\
 & + \lambda_4 (\Phi^\dagger \Phi) \text{Tr}(\Delta^\dagger \Delta) + \lambda_5 \Phi^\dagger \Delta \Delta^\dagger \Phi.
 \end{aligned}$$

- 3重項場の真空期待値 :

$$v_\Delta = \frac{\mu v_\Phi^2}{\sqrt{2} M_\Delta^2}$$





ρパラメータ

3重項場は、Tree level でρパラメータを変える。

- The Electroweak ρ-parameter in the HTM :

$$\rho = \frac{v^2}{v^2 + 2v_{\Delta}^2} \quad \text{where} \quad v^2 = (v_{\phi}^2 + v_{\Delta}^2) = (246\text{GeV})^2$$

Experimental constraints:

$$\rho_{\text{exp}} = 1.0004^{+0.0003}_{-0.0004} \rightarrow v_{\Delta} < 3.5 \text{ GeV}$$

ニュートリノ質量

- ・ ニュートリノ質量

$$(\mathcal{M}_\nu)_{ij} = \sqrt{2} h_{ij} v_\Delta$$

$$\sim O(0.1 \text{ eV})$$

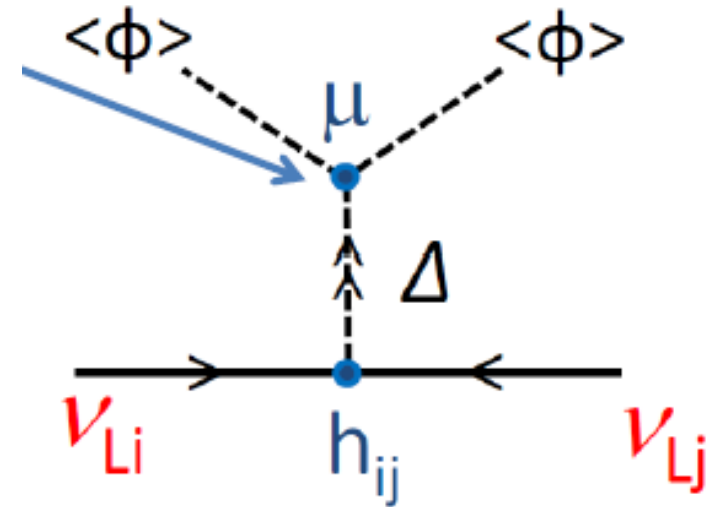
ニュートリノ質量行列が、

3重項場との湯川相互作用で直接決まっている。

$$h_{ij} \propto 1/v_\Delta \quad \text{湯川の大きさは、} v_\Delta \text{ に反比例}$$

- ・ 3重項場の真空期待値の期待される値

$$0.1 \text{ eV} \lesssim v_\Delta \lesssim 3.5 \text{ GeV}$$

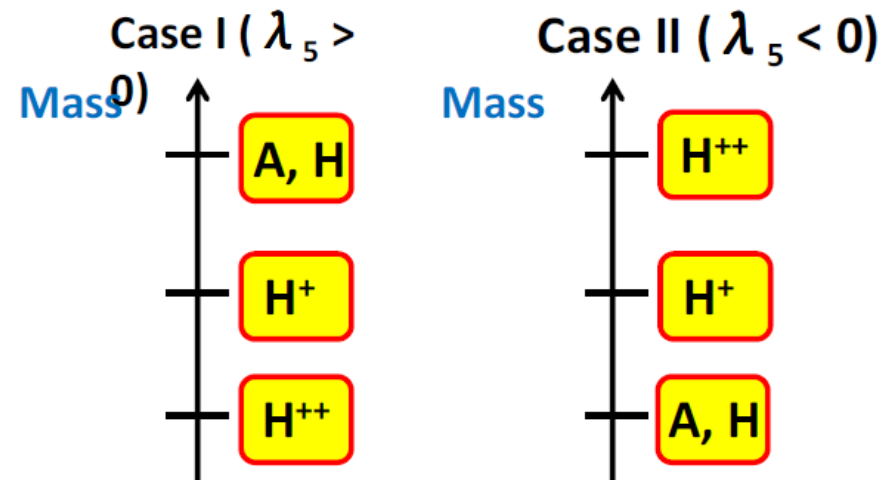


Mass Spectrum of Triplet bosons

- Mass spectrum of triplet Higgs is determined by the sign of λ_5 :

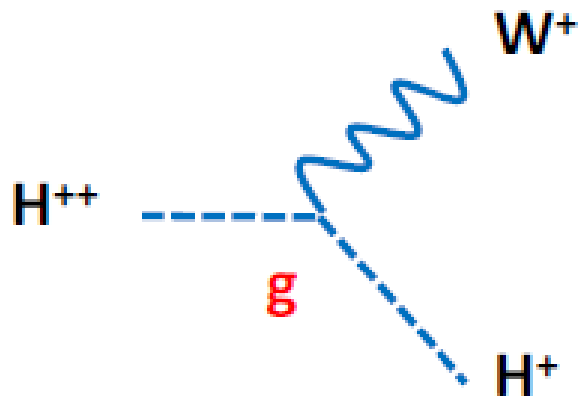
Under the condition of $v_\Delta \ll v$

$$\begin{aligned} m_{H^{++}}^2 &\simeq M_\Delta^2 - \frac{v^2}{2} \lambda_5 \\ m_{H^+}^2 &\simeq M_\Delta^2 - \frac{v^2}{4} \lambda_5 \\ m_A^2 &\simeq m_H^2 = M_\Delta^2 \end{aligned}$$

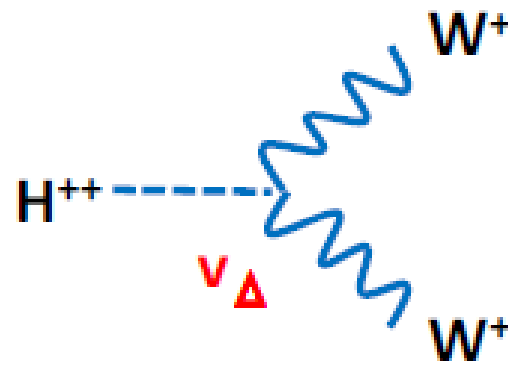


degenerated case : ($\lambda_5 = 0$) $m_{H^{++}} = m_{H^+} = m_H = m_A$

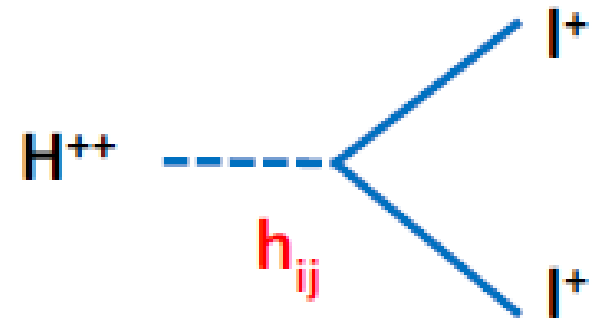
Couplings of Triplet Higgs



Gauge



VEV



Yukawa

(with Left-handed leptons)



Decays of Triplet Higgs

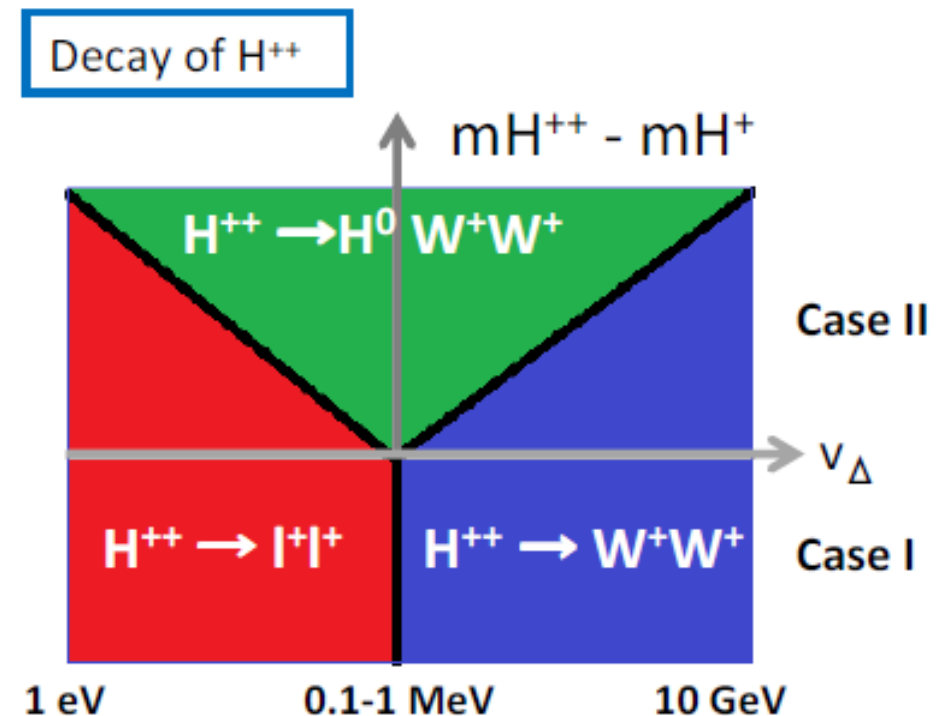
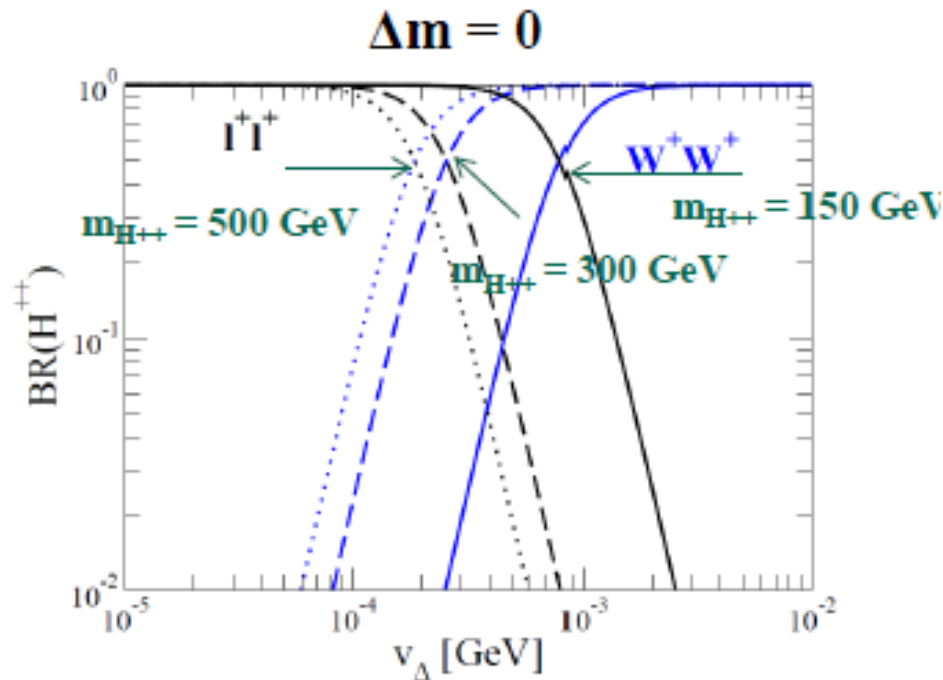
Decays of Triplet Higgs (H^{++})

Chakrabarti, Choudhury, Godbole, Mukhopadhyaya, (1998);
 Chun, Lee, Park, (2003);
 Perez, Han, Huang, Li, Wang, (2008);
 Melfo, Nemevsek, Nesti, Senjanovic, (2011)

崩壊分岐比は、 v_Δ の値によって大きく変化する。

$$\begin{cases} \Gamma(\ell^+\ell^+) \propto 1/v_\Delta^2 & (h_{ij} \propto 1/v_\Delta) \\ \Gamma(W^+W^+) \propto v_\Delta^2 \end{cases}$$

質量差があるときは、
 $H^{++} > H^+W^+$ も効く



H⁺⁺ in the other models

Doubly-charged scalar bosons

Doubly-charged scalar bosons: Signature for the non-minimal Higgs sector.

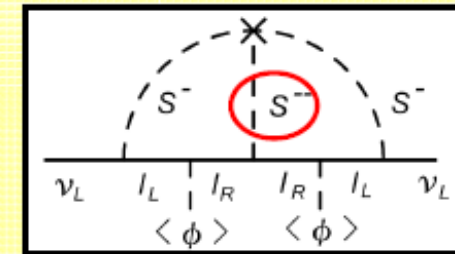
I = 0, Y = 2: S^{±±}

→ Zee-Babu model

*Zee, (1986);
Babu, (1988)*

Int.

$$\overline{\ell_R^c} \ell_R S^{++}$$



I = 1/2, Y = 3/2: Φ_{3/2}

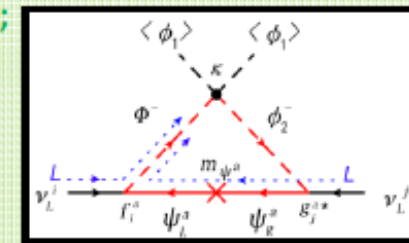
→ Radiative seesaw model

*Rental, Shepherd, Su (2011);
Aoki, Kanemura, KY, (2011)*

Int.

$$\frac{1}{\Lambda} \overline{L_L^c} \cdot \not{\Phi} \Phi_{3/2} \ell_R$$

$$\Phi_{3/2} = \begin{bmatrix} \Phi^{++} \\ \Phi^+ \end{bmatrix}$$



I = 1, Y = 1: Δ

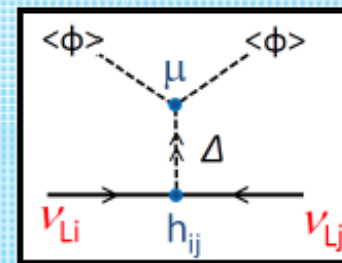
→ Type-II seesaw model

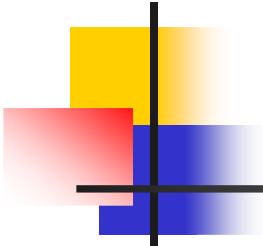
*Cheng, Li (1980);
Schechter, Valle, (1980);
Magg, Wetterich, (1980)*

Int.

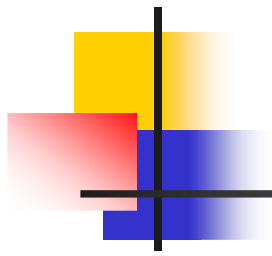
$$\overline{L_L^c} \cdot \Delta L_L$$

$$\Delta = \begin{pmatrix} \frac{\Delta^+}{\sqrt{2}} & \Delta^{++} \\ \Delta^0 & -\frac{\Delta^+}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$





2. 加速器実験による探索：

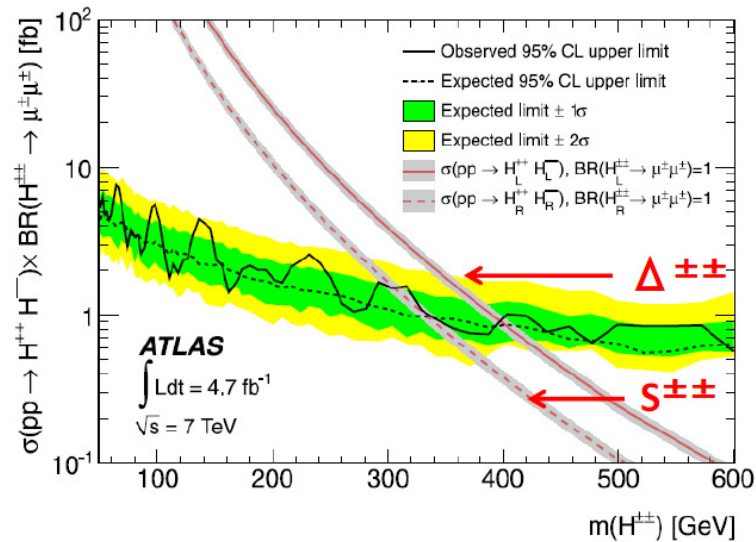


複荷電スカラー粒子の特徴的信号は、同符号レプトン対

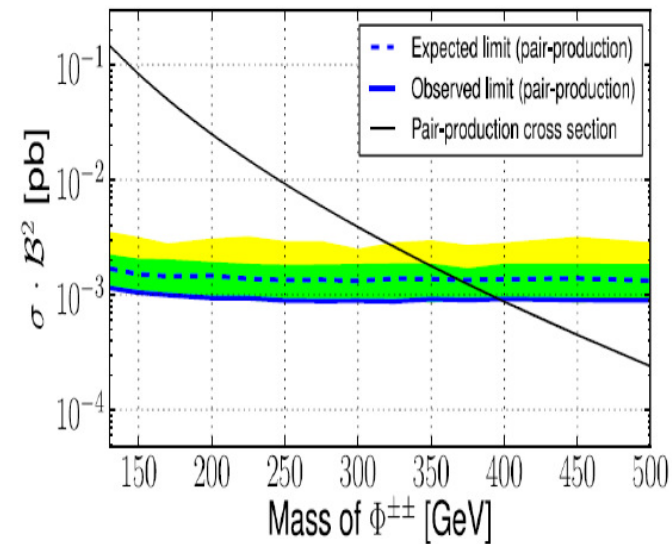
- Same-Sign Dilepton searches at LEP, Tevatron and the LHC
 - Searches for inclusive S.S. dilepton events
 - Look for the peak in S.S. dilepton invariant-mass distribution
 - Mass bounds by assuming 100% Br for ee, emu, mumu, etau,,,
- 同符号レプトン対に崩壊する場合の、質量に対する制限：

LEP	: $M > 100$ GeV
Tevatron	: $M > 150$ GeV
LHC	: $M > 400$ GeV (現時点で)

ATLAS, Eur. Phys. J.C. 72 (2012),
7 TeV, 4.7 fb⁻¹



CMS, Eur. Phys. J.C. 72 (2012),
7 TeV, 4.9 fb⁻¹



Benchmark point

Combined 95 % CL
limit [GeV]

CMS, EPJC72

7 TeV, 4.9fb⁻¹

$$B(\Phi^{++} \rightarrow e^+ e^+) = 100 \%$$

444

$$B(\Phi^{++} \rightarrow e^+ \mu^+) = 100 \%$$

453

$$B(\Phi^{++} \rightarrow e^+ \tau^+) = 100 \%$$

373

$$B(\Phi^{++} \rightarrow \mu^+ \mu^+) = 100 \%$$

459

$$B(\Phi^{++} \rightarrow \mu^+ \tau^+) = 100 \%$$

375

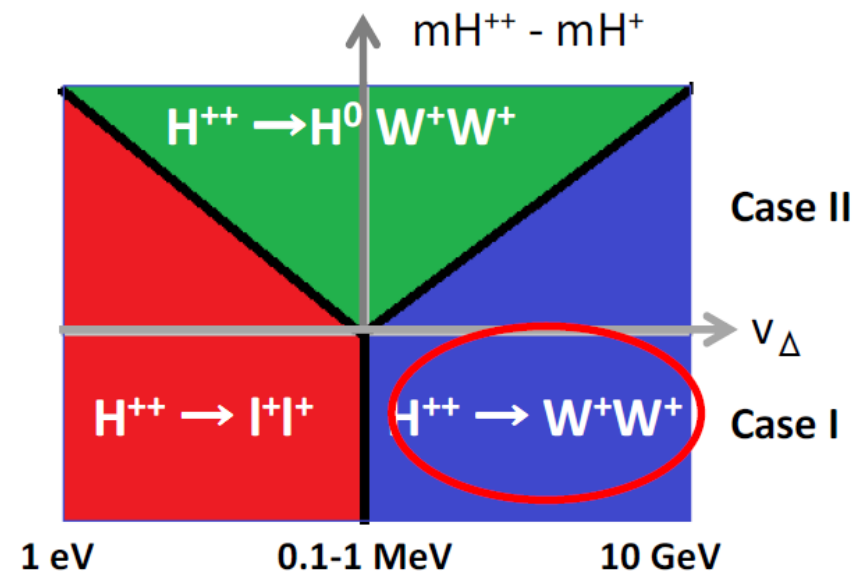
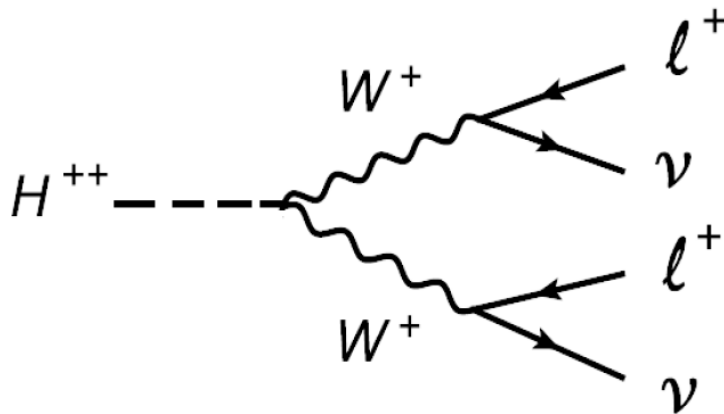
$$B(\Phi^{++} \rightarrow \tau^+ \tau^+) = 100 \%$$

204

Perez, Han, Huang, Li, Wang (2008);
Chiang, Nomura, Tsumura (2012);
Kanemura, KY, Yokoya (2013)

WW崩壊シナリオに対する制限

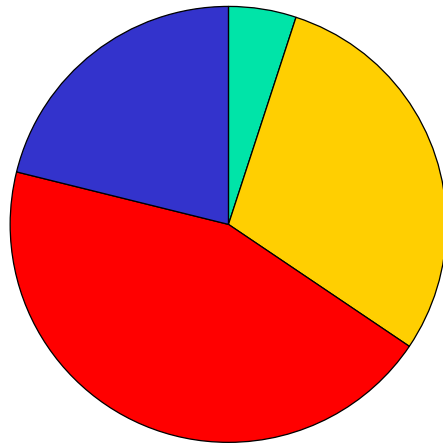
- Equally important decay mode as the dilepton mode.
- No experimental bound has been studied so far.
- Characteristic signatures are also “S.S. dilepton plus missing”.



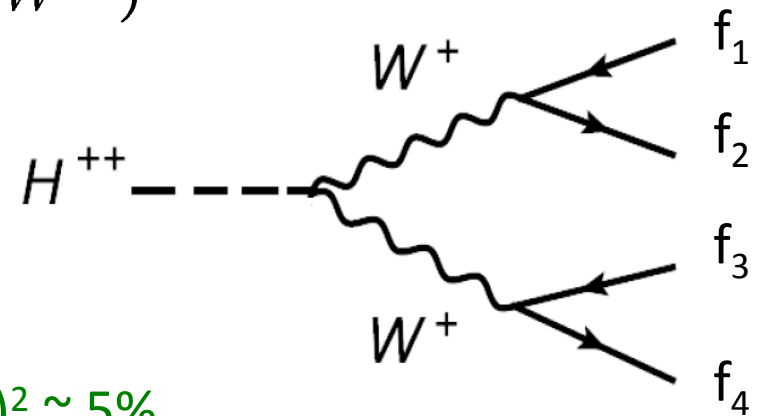
WW崩壊シナリオの信号：

For $m_{H^{++}} > 2m_W$, $\mathcal{B}(H^{++}) \simeq \mathcal{B}(W^+)\mathcal{B}(W^+)$

($m_{H^{++}} < 2m_W$ では、修正される。)



- S.S. dilepton : $(2/9)^2 \sim 5\%$
- Lepton-plus-jets : $2/9 * 2/3 * 2 \sim 30\%$
- Jets : $(2/3)^2 \sim 44\%$
- Tau + X : $\sim 17/81 \sim 20\%$



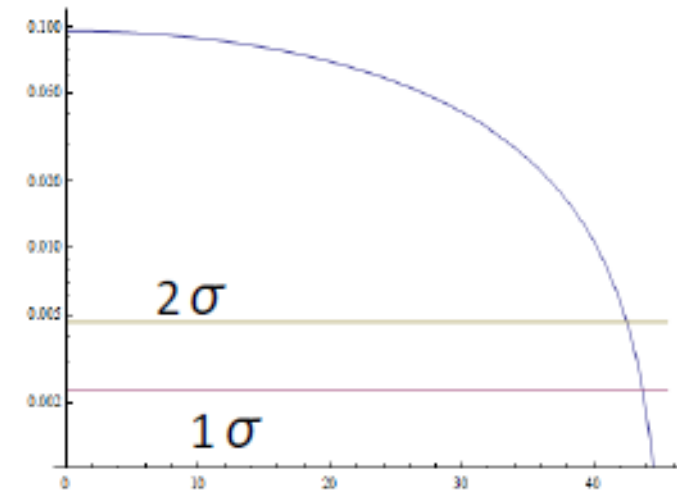
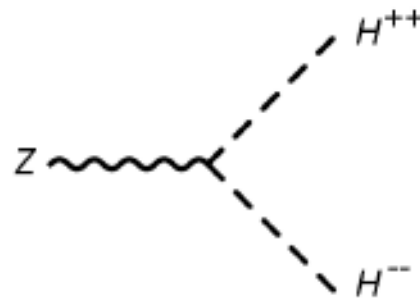
- Jetを含む崩壊がたくさんあるが、特徴的なのは”S.S. dilepton + Missing”崩壊。
(親粒子の電荷が測れる。)
- 崩壊分岐比が $\sim \text{Br}(W) * \text{Br}(W)$ になっていることが、**WW崩壊の証拠**。

Bound from LEP

LEP I: Collision energy is m_Z

Precise measurement for
the Z boson decay width.

$$\Gamma_Z(\text{exp}) = 2.4952 \pm 0.0023 \text{ GeV}$$



$$\Gamma_Z(\text{SM}) = 2.4960 \pm 0.0002 \text{ GeV}$$

- If Z-boson can decay into $H^{++}H^{--}$, it gives sizable correction to the decay width.

$$\Gamma_Z(H^{++}H^{--}) = \frac{G_F m_Z^2}{6\pi\sqrt{2}} (1 - 2s_W^2)^2 \left(1 - \frac{4m_{H^{++}}^2}{m_Z^2} \right)^{3/2}$$

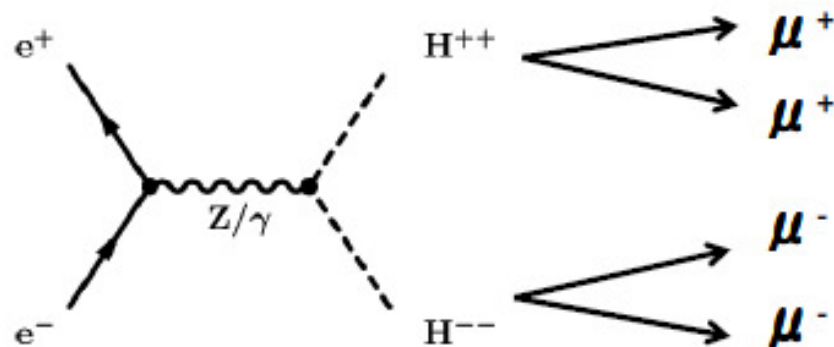
$$m_{H^{++}} > 43 \text{ GeV}$$

- Solid constraint which does not depend on the decay of H^{++} .

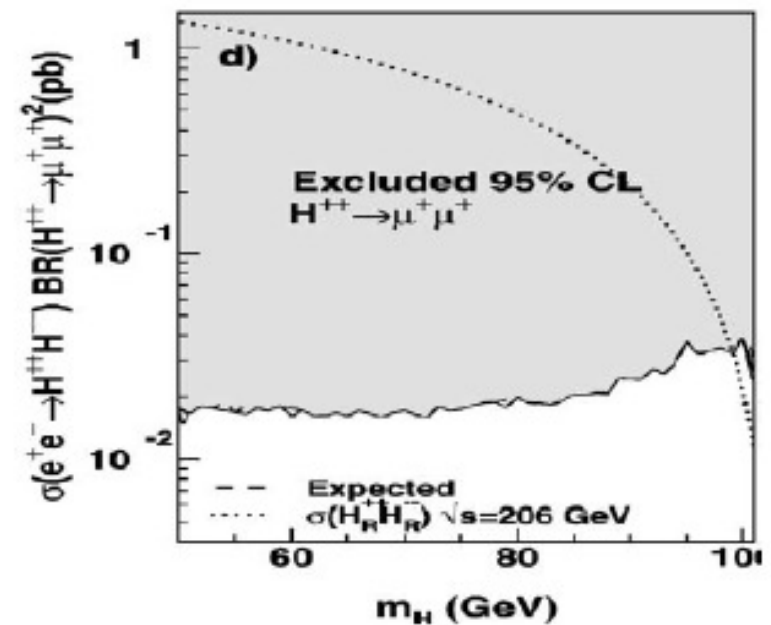
Bound from LEP (4 lepton events) :

LEP II: Collision energy is up to 209 GeV

4 lepton channel search



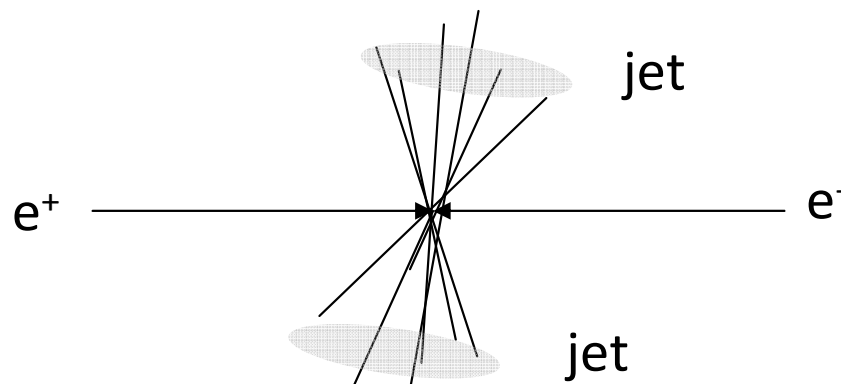
L3, Phys. Lett. B576 (2003), 206 GeV, 624 pb⁻¹



- Constraints in dilepton decay modes : $m_{H^{++}} > 100\text{GeV}$
- For diboson decay, no constraint can be obtained due to the suppression $\text{Br}[W>lv]^4$.

- There has been no dedicated searches at LEP for this scenario
 - Exclusive 4-lepton searches
 - no bound due to the suppression by $[\text{Br}(\text{lv})]^4$
 - Searches for S.S. dilepton (inclusively or with jets) are desired.
 - Careful analysis for hadronic events must be considered. **work in progress**

(Thrust distribution, Thrust axis distribution, fat jets events)

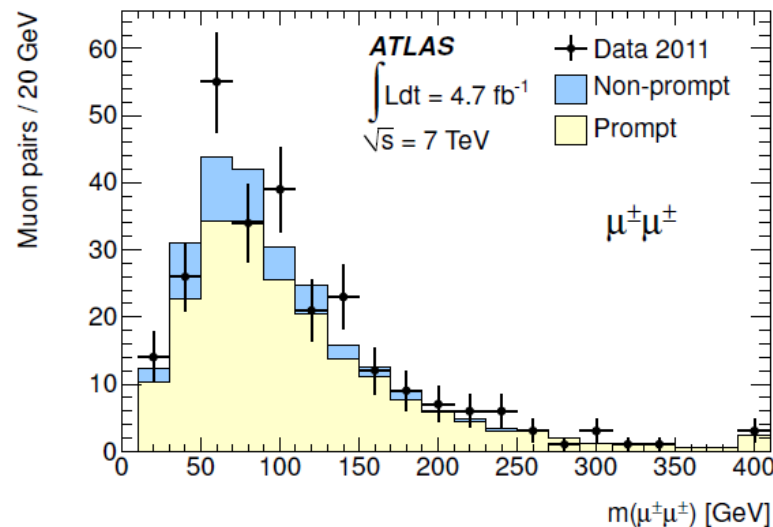


$$\frac{d\sigma_{H^{++}H^{--}}}{d\cos\theta} \propto \sin^2\theta$$

LHCデータを用いた制限

JHEP1212,007

ATLAS実験は、LHC $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$, $L=4.7\text{fb}^{-1}$ のデータを用いて同符号レプトン生成事象を探索し、異常な過剰がなかったため、同符号レプトン生成過程の断面積に上限を与えた。



95% C.L. upper limit [fb]

	$\mu^+\mu^+$	
$m > 15 \text{ GeV}$	$15.0^{+6.1}_{-3.3}$	15.2
$m > 100 \text{ GeV}$	$8.4^{+3.2}_{-2.4}$	7.9
$m > 200 \text{ GeV}$	$3.5^{+1.6}_{-0.7}$	4.3
$m > 300 \text{ GeV}$	$2.0^{+0.8}_{-0.5}$	2.1
$m > 400 \text{ GeV}$	$1.5^{+0.6}_{-0.3}$	1.8
	expected	observed

これを、HTMのWW崩壊シナリオでの、同符号レプトン生成過程の”有効”断面積と比較する。 ($\mu^+\mu^+$ モード)

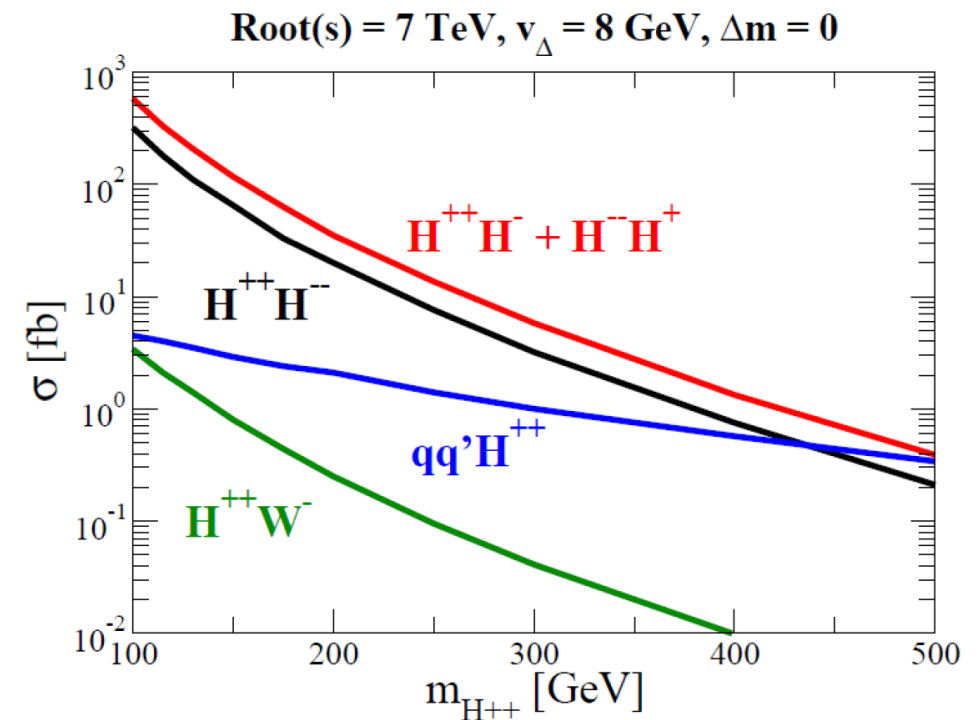
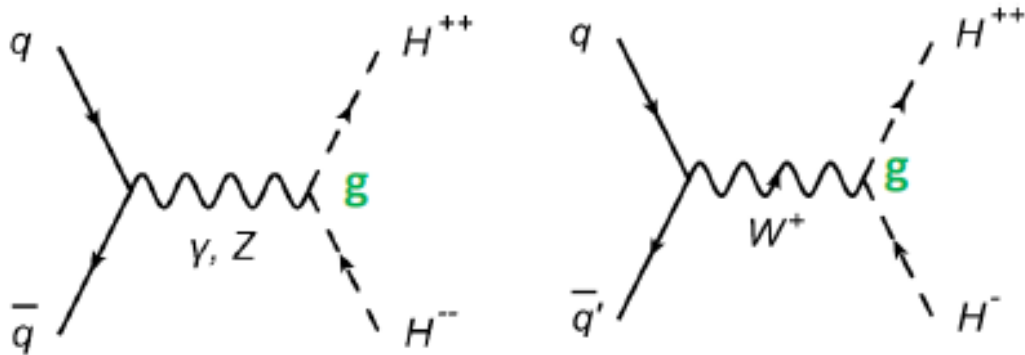
$$\sigma_{\text{eff.}}(\mu^+\mu^+) = \sigma_{\text{tot}}(H^{++}) \cdot \mathcal{B}(H^{++} \rightarrow \mu^+\mu^+X) \cdot \epsilon_{\text{cut}}$$

LHCでの生成断面積

Akeroyd, Aoki (05),
Akeroyd, Chiang, Gaur (07) ..

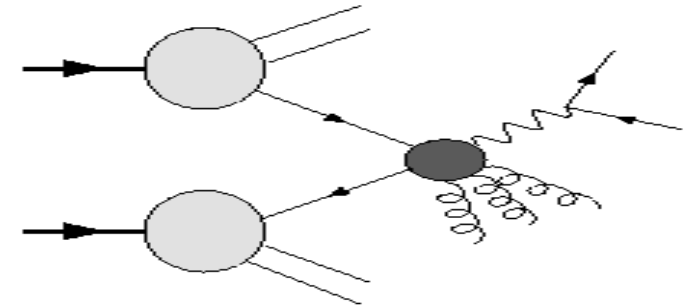
- Doubly-charged Higgs Production at the LHC

$$\left\{ \begin{array}{l} pp \rightarrow H^{++} H^{--} + X \\ pp \rightarrow H^{++} H^{-} (H^{--} H^{+}) + X \end{array} \right.$$



LHCでの生成断面積

- ハドロンコライダーでの散乱断面積の計算



$$\sigma_{\text{had}}(s) = \sum_{i,j} \int d\tau \frac{d\mathcal{L}_{ij}}{d\tau}(\tau) \cdot \hat{\sigma}_{ij}(Q^2 = \tau s)$$

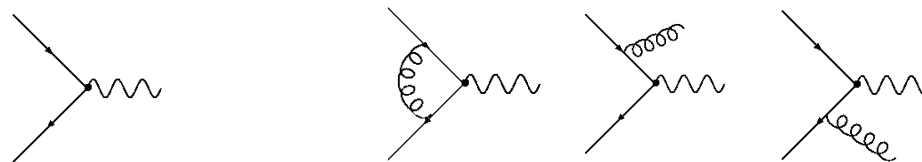
パートンルミノシティ $\frac{d\mathcal{L}_{ij}}{d\tau}(\tau, \mu_F) = \int \frac{dx}{x} f_{i/p}(x, \mu_F) f_{j/p}(\tau/x, \mu_F)$

パートン分布関数

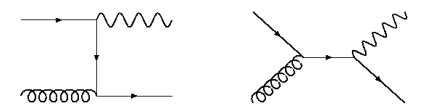
パートン散乱過程は、QCDの摂動計算を用いて計算する。

μ_F : 因子化スケール

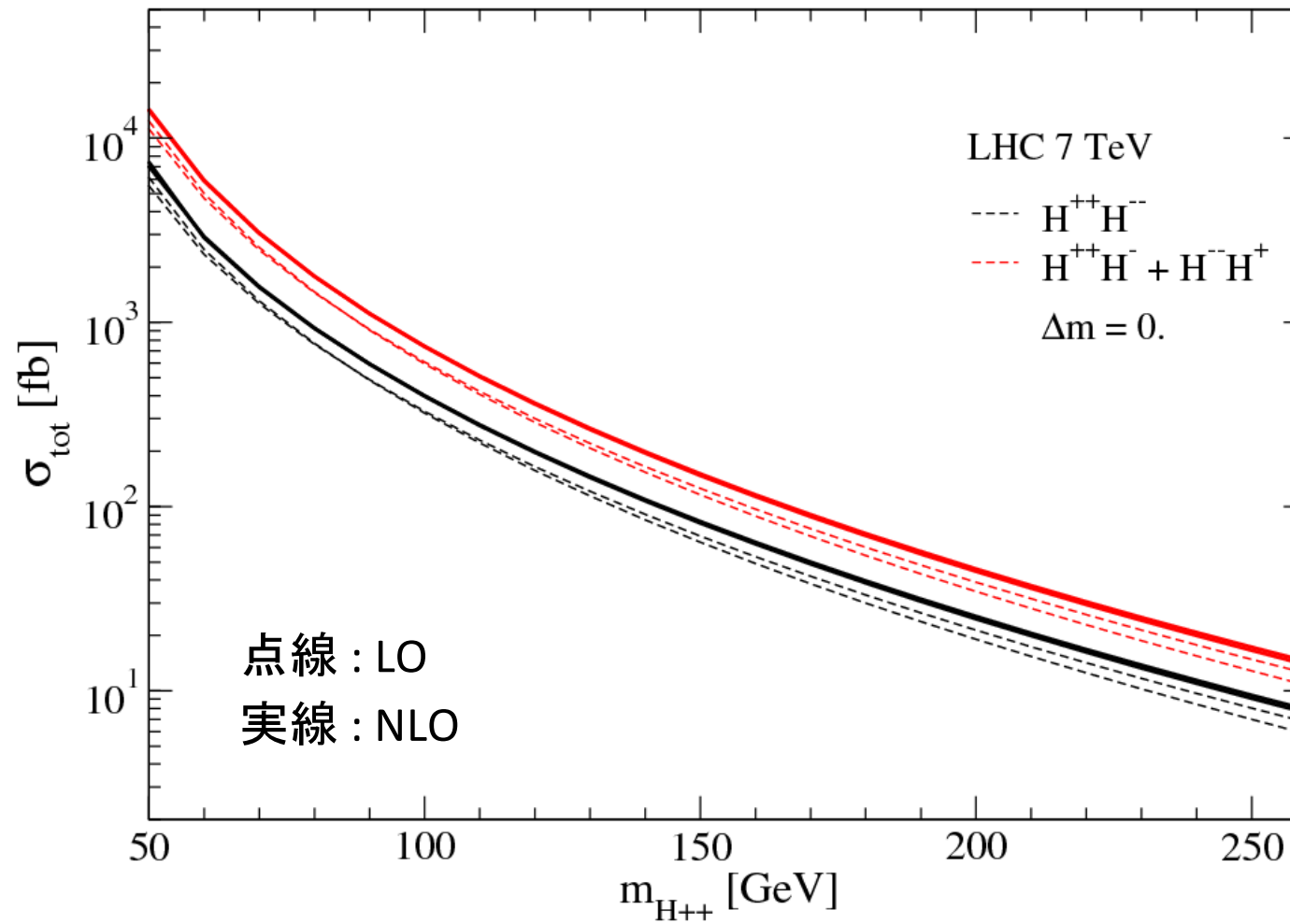
$$\hat{\sigma}_{q\bar{q}}(Q^2) = \hat{\sigma}_{q\bar{q}}^0(Q^2) + \frac{\alpha_s(\mu^2)}{\pi} \hat{\sigma}_{q\bar{q}}^1(Q^2, \mu_F^2) + \dots$$



$$\hat{\sigma}_{qg} = \frac{\alpha_s}{\pi} \hat{\sigma}_{qg}^1 + \dots$$



LHCでの生成断面積



生成断面積のNLO補正

- NLO補正を含めることによって、断面積の予言が増加し、計算の不定性が減少する。

$$K = \frac{\sigma_{\text{NLO}}}{\sigma_{\text{LO}}} \simeq 1.2$$

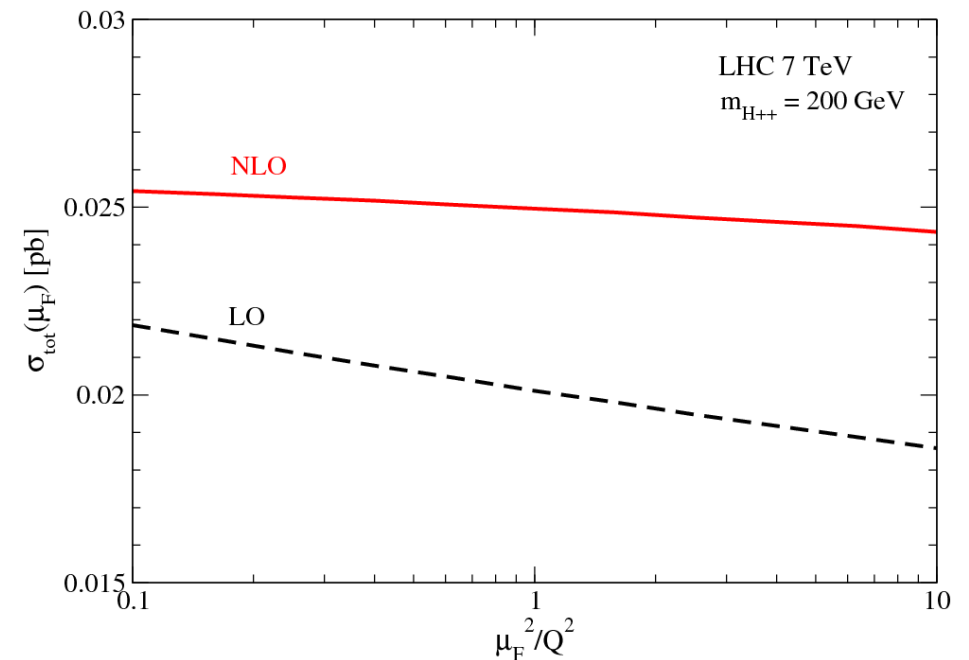
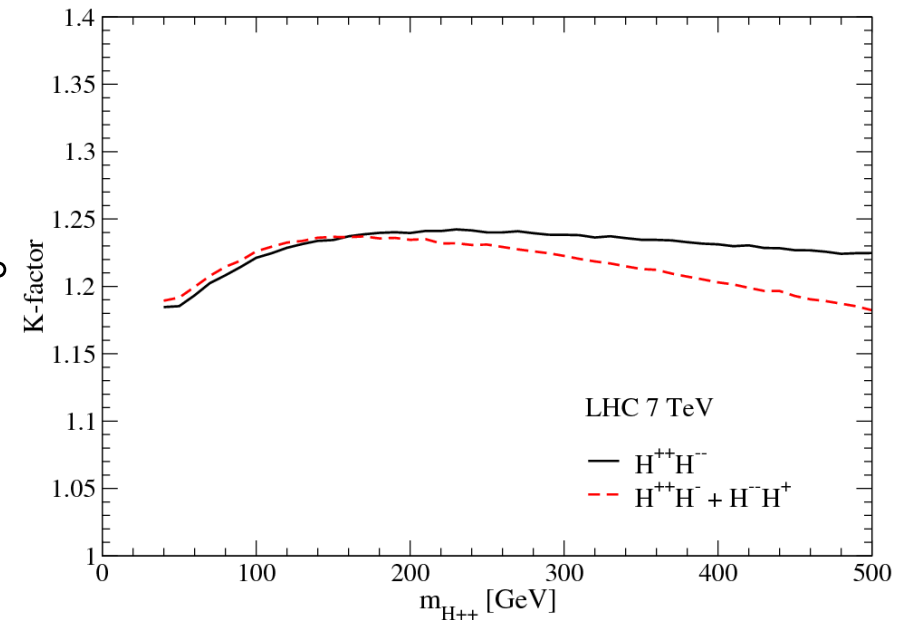
- 摂動計算の不定性：因子化スケールを

$$Q^2/5 < \mu_F^2 < 5Q^2$$

の間に振って、変化を見る。

LO断面積の不定性 : 10% ~ 20%

NLO断面積の不定性 : ~ 5%



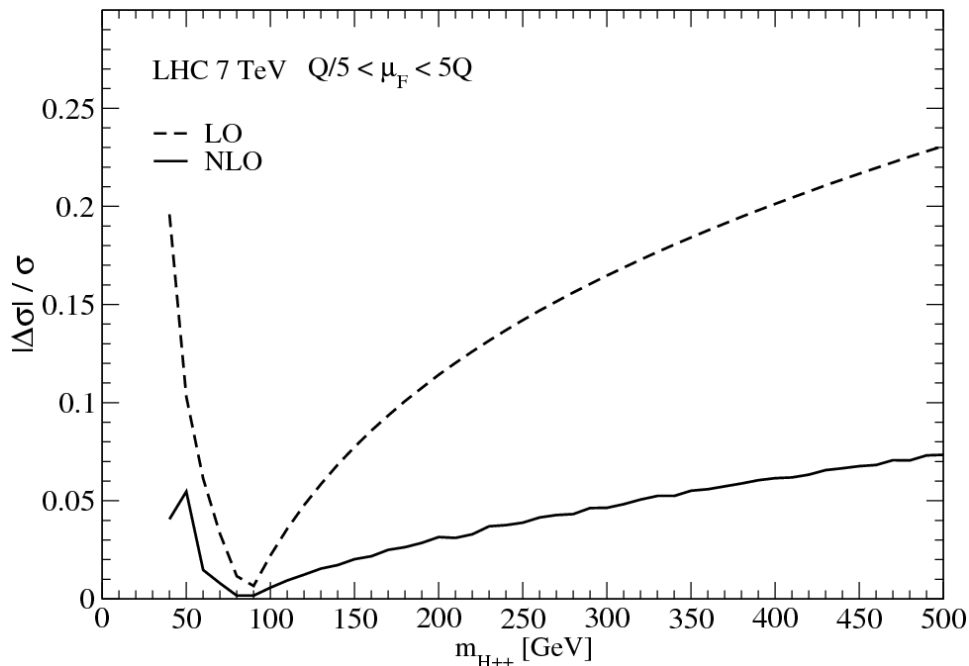
生成断面積のスケール依存性

$$\text{LO : } \sigma_{\text{tot}} = \int d\tau \frac{d\mathcal{L}}{d\tau}(\tau, \mu_F) \cdot \hat{\sigma}_0(Q^2)$$

$$\text{NLO : } \sigma_{\text{tot}} = \int d\tau \frac{d\mathcal{L}}{d\tau}(\tau, \mu_F) \cdot \hat{\sigma}_1(Q^2, \mu_F^2, \alpha_s(\mu_F))$$

スケール依存性の
cancelation が起きる。

LO, NLO断面積のスケール依存性



LOには、比較的大きな不定性。

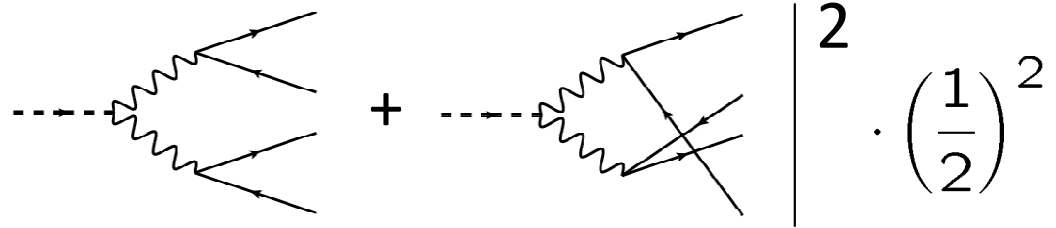
NLOでは、スケール依存性が減少する。

→ 安定した予言値

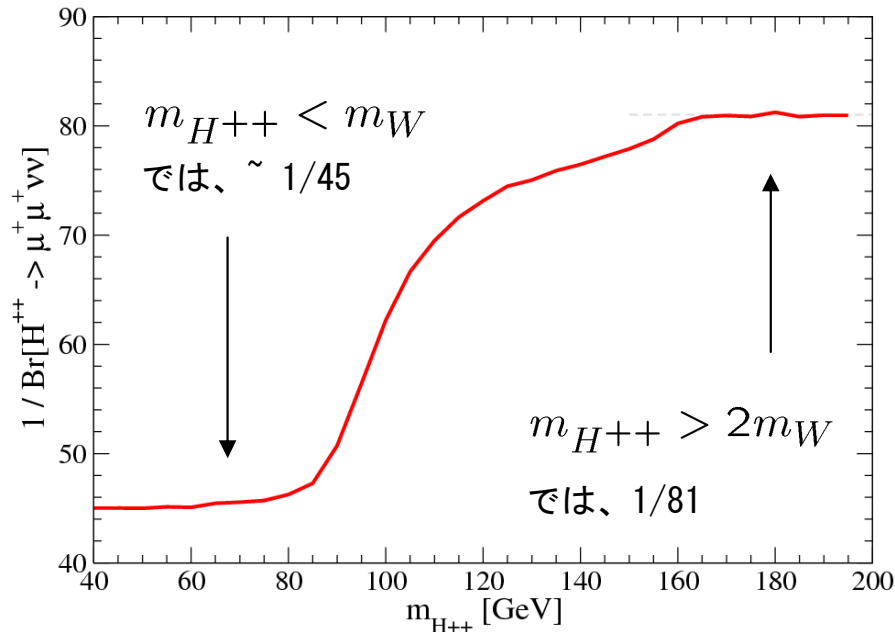
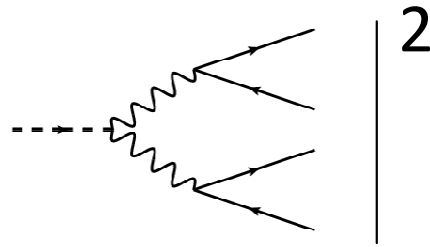
予言値の補正だけでなく、不定性が減少することが、高次補正を含める効果。

$H^{++} \rightarrow W^+W^+ \rightarrow 4f$ の分岐比

同種フェルミオン対
(e^+e^+ , $\mu^+\mu^+$)



異種フェルミオン対
($e^+\mu^+$)



$$m_{H^{++}} > 2m_W$$

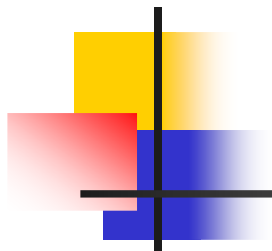
Wのon-shell近似が良い。
干渉項は効かない。

$$\mathcal{B}(H^{++} \rightarrow \mu^+\mu^+\nu\nu) \simeq \mathcal{B}(W^+ \rightarrow \mu^+\nu)\mathcal{B}(W^+ \rightarrow \mu^+\nu) \simeq (1/9)^2$$

$$m_{H^{++}} < (2)m_W$$

片方(両方)のWがoff-shell。
干渉項が効いてくる。

軽い H^{++} では、同種粒子モードへの
分岐比が増加する。



エフィシエンシー

- 検出効率の見積もり:

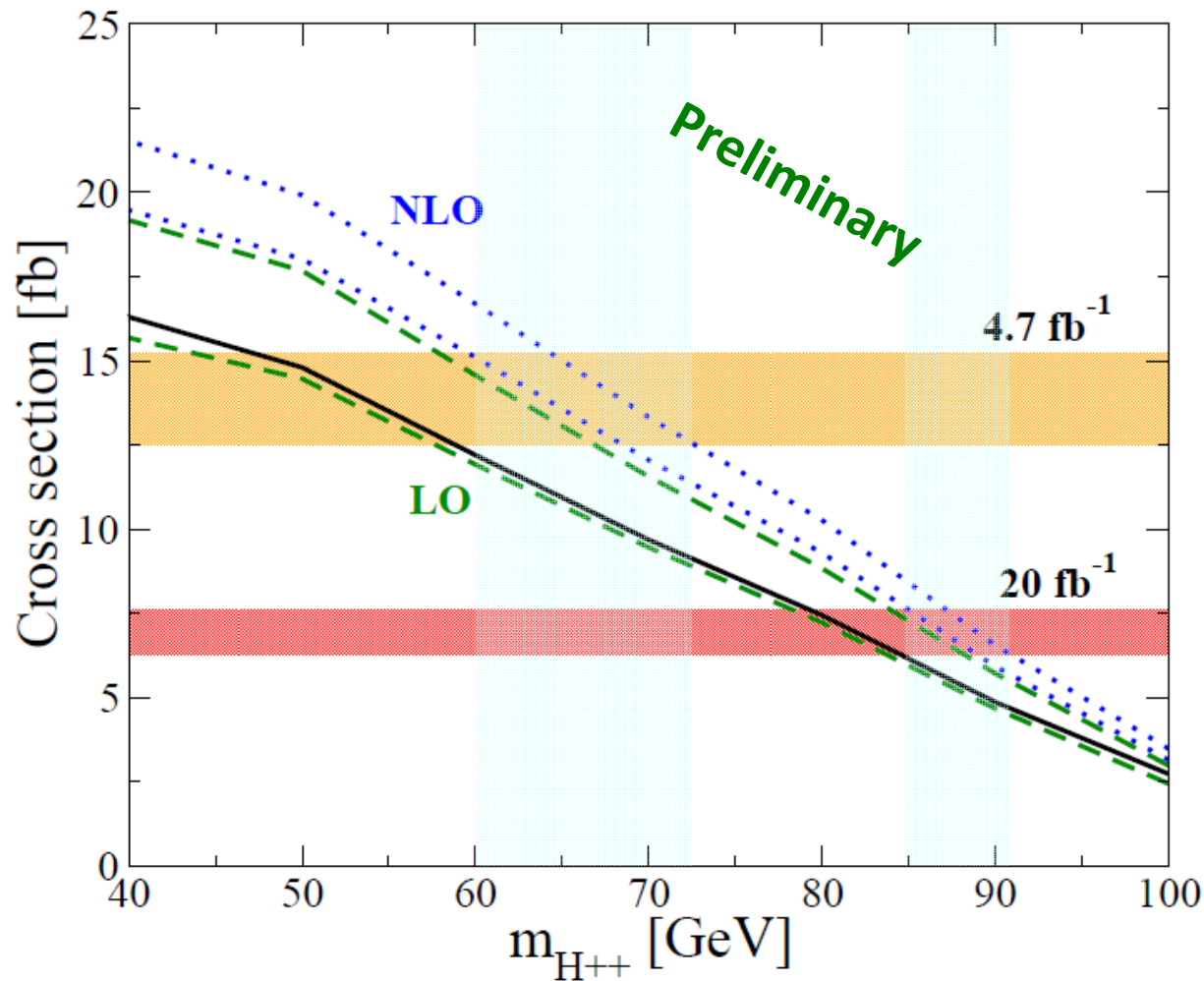
検出器のアクセプタンス: $|\eta_\mu| < 2.5, p_T^\mu > 20 \text{ GeV}$

バックグラウンドを落とすためのカット: $M_{\ell\ell} > 15 \text{ GeV}$

MadGraphを用いて、 $pp \rightarrow H^{++} + X \rightarrow \mu^+ \mu^+ + X$ イベントを生成し、これらのカットによってイベントが残る割合を見積もる。

Mass [GeV]	40	60	80	100
Acc.	0.01	0.12	0.22	0.23
$M_{\ell\ell}$ cut	0.78	0.94	0.98	0.99

結果 : H^{++} の質量への制限



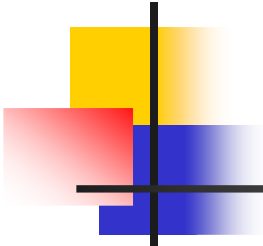
理論予測に5% (NLO) [10% (LO)]
の不定性を仮定。

4.7fb⁻¹のデータで、
 $m_{H^{++}} > 60$ GeVの制限を得た。

20fb⁻¹のデータでの制限を
外挿によって見積もると、
85 GeVまで到達する見込み。

(7TeV→8TeVの
断面積の増加を無視する。)

これは、LHCデータを用いた、WW崩壊のシナリオでの初めての制限。



まとめ：

- ヒッグス3重項模型は、標準模型的ヒッグス粒子を含む、ヒッグスセクターのシンプルな拡張の一つ。

3重項場の真空期待値によって、ニュートリノ質量が生成される。
ニュートリノ質量行列が、湯川相互作用と直接結びついている。

この模型の特徴的な粒子の複荷電ヒッグス粒子は、
同符号のレプトン対や、Wボソン対に崩壊する。

- 複荷電ヒッグス粒子の探索は、これまで、同符号レプトン対への崩壊過程でのみ行われていた。($m_{H^{++}} > 400 \text{ GeV}$)
- LHC-ATLAS実験の同符号レプトン対生成のデータを用いて、WW崩壊での H^{++} の質量の制限を得た。

$$m_{H^{++}} > 60 \text{ GeV} \text{ (7TeV, } 4.7 \text{ fb}^{-1}\text{)}$$

$$m_{H^{++}} > 85 \text{ GeV} \text{ (20fb}^{-1} \text{ by extrapolation)}$$

