



LHCおよびHL-LHC実験で予想される 湯川結合、自己結合の測定精度

中村浩二 (高エネ研)



発見から測定の時代へ

「ヒッグス粒子探索における新粒子の発見」

Higgs-like particle ??

4.8 fb⁻¹ @7TeV + 5.8 fb⁻¹ @8TeV



新粒子の特性を測定

4.8 fb⁻¹ @7TeV + 21 fb⁻¹ @8TeV

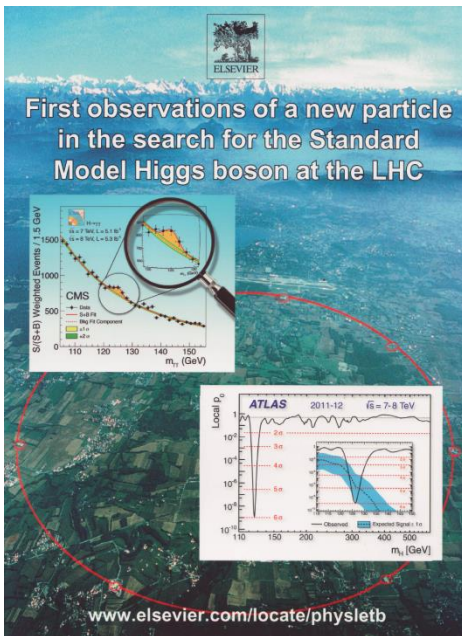
- 質量の測定 $125.5 \pm 0.2(stat) \pm 0.6(sys)$ GeV
- スピンの測定 $J^P=0^-, 2^+$ を棄却
- 結合定数の測定 大事！

結合定数を測定することで、「標準理論ヒッグス粒子か？」に答える

ただし、どこまで測れば、

- 1) ヒッグス粒子と呼べるか？
- 2) 標準理論と言って問題ないか？
- 3) 満足か？

は(少なくとも私には)不明→今回はどこまで測れるか？だけお見せします。



いままでにわかったこと

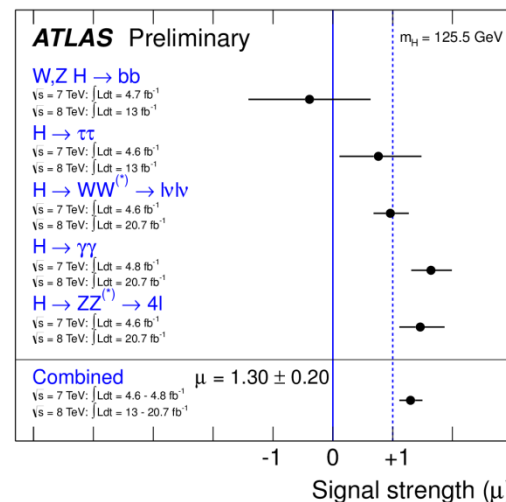
今までの粒子と違って膨大な結合定数を導入する必要がある。
→ データの解釈が非常に複雑。

生成断面積 x 崩壊分岐比は標準理論と無矛盾

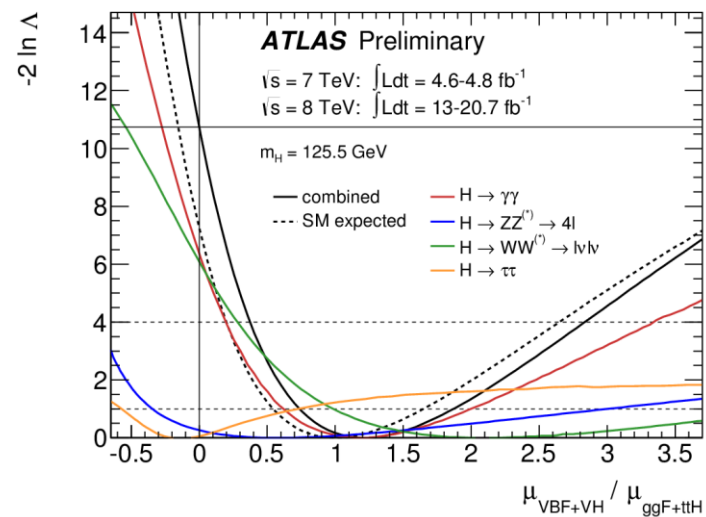
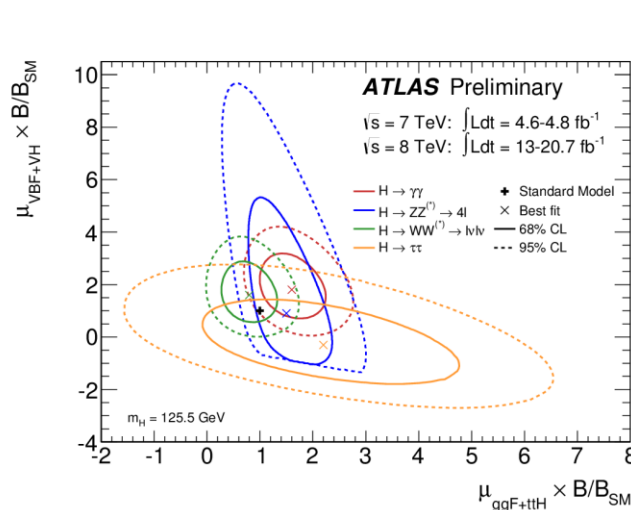
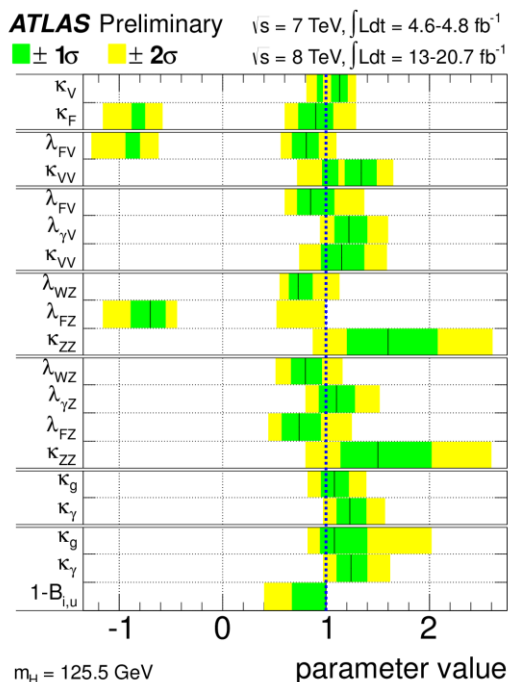
HWW, HZZ, H $\gamma\gamma$, H $\gamma\gamma$ は存在(>3 σ)

フェルミオホビック や ボソフェリックではない

生成過程は、ggH, VBF H とも存在(~3 σ)



重くてよかったなあ...



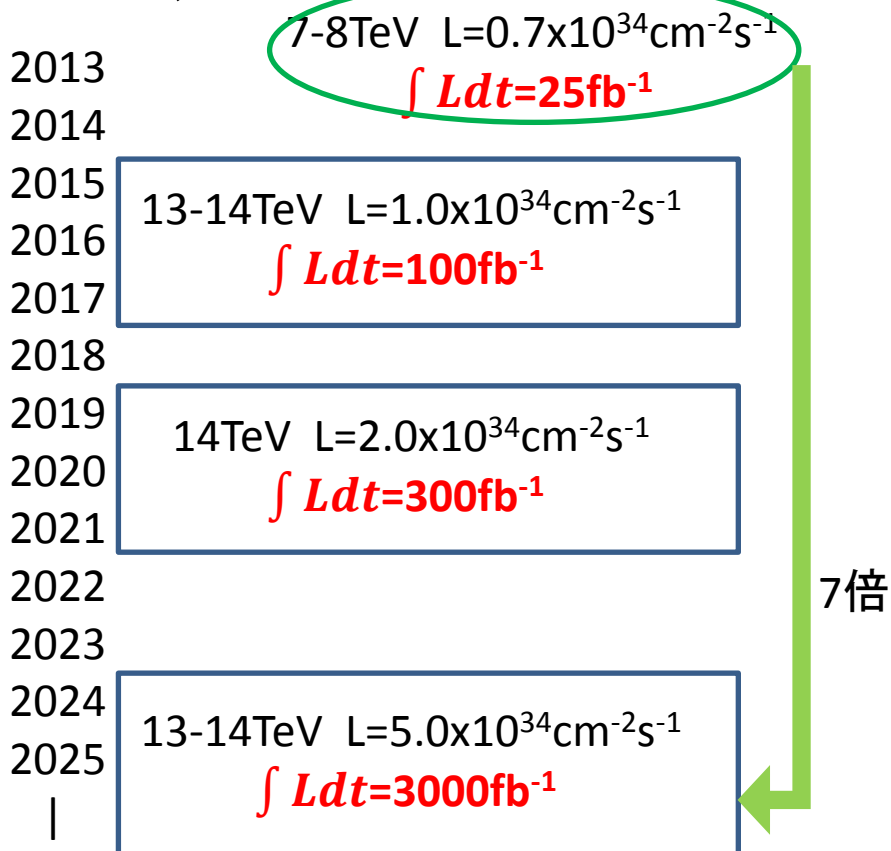
まだわかってないこと

- 一言でいうと「湯川結合」
 - レプトンとの結合。
 - $H \rightarrow \tau\tau$ (Y_τ)で発見、 $H \rightarrow \mu\mu$ (Y_μ)で再確認。結合比の測定。
 - クォークとの結合(特にUp type/down type)
 - 存在は間接的に確認。(H $\circ$ ggは本当にtop が支配的なのか?)
 - $H \rightarrow b\bar{b}$ (Y_b)で直接観測。
 - Y_t の測定 (ttH 過程)

14TeVのLHCでこれらがどのくらいの精度で決まるのかをお話しします。

14TeVに増強したLHC I

• 予定



8TeV および 14TeVの生成断面積

[pb]	8TeV	14TeV	
W/Z ^{*1}	36/3 x10 ³	61/6 x10 ³	x1.8
Ttbar ^{*1}	129	452	x3.5
ggH	20	50	x2.5
WH/ZH	0.7/0.4	1.5/0.9	x2.1
ttH	0.13	0.6	x4.7

*1 : at least one lepton

- 良い点
 - 生成断面積が大
 - S/Bが改善
- 大変な点
 - Trigger (e.g. lepton trigger 12倍)
 - L1の改善や物理トリガー
 - Pileup : 150-250 衝突/event
 - Trackerの性能 (放射線耐性)

14TeVに増強したLHC II

<Trigger> : 数字はthreshold [GeV]

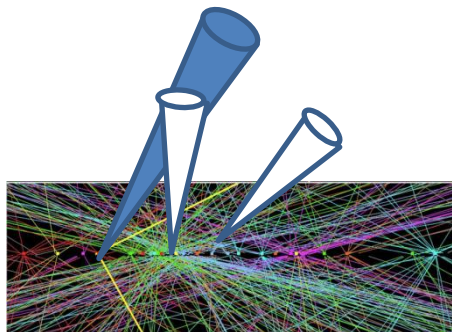
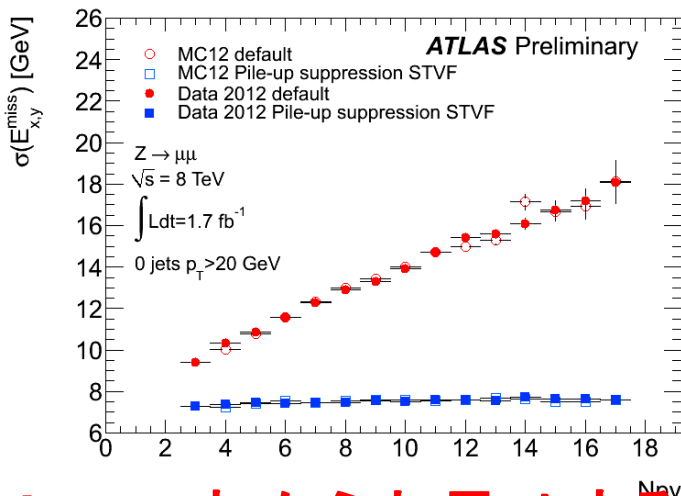
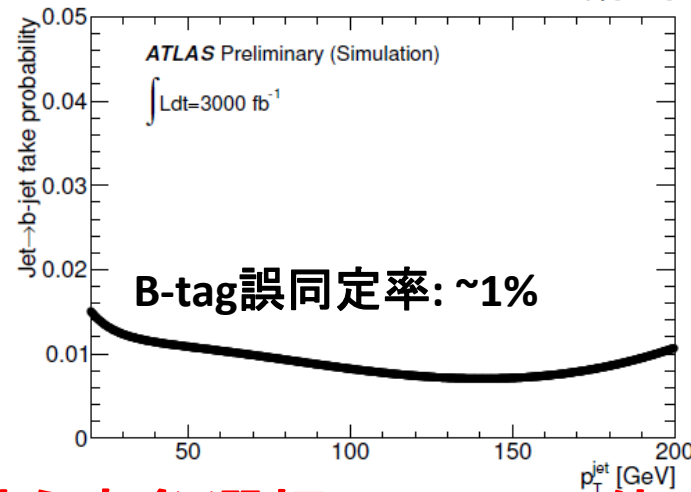
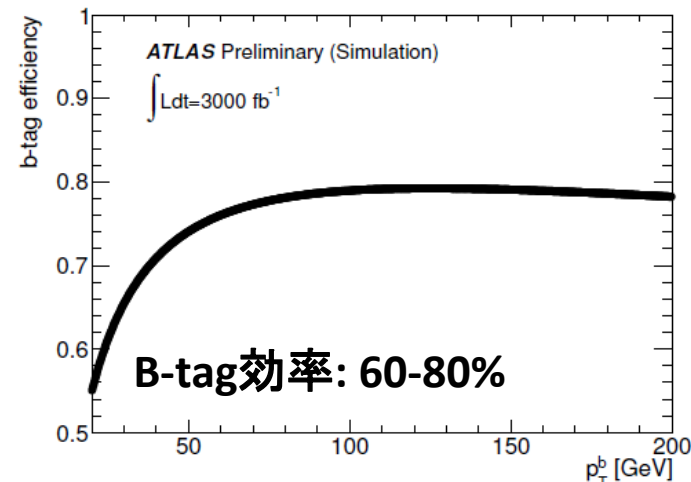
		e	μ	2e	2 μ	e μ	τ	$\tau\mu$	jet
2×10^{34}	Level 1	EM28H	MU20	2EM15	2MU11	EM15 MU10	TAU60	TAU15 MU10	J100
	Offline	33	25	2x20	2x13	20,12	150	40,15	250
3×10^{34}	Level 1	EM50H	MU20 (eta<1.9)	2EM20	2MU11	EM20 MU10	TAU80	TAU15 MU15	J100
	Offline	60	25	2x25	2x13	25,12	180	40,20	250

- 3×10^{34} でelectron triggerは解析時に60GeVの閾値
 - ちなみにHL-LHCは 5×10^{34} の予定。→W/Zの事象もとれない!
- 基本的にL1の問題
 - L1 caloの改良
 - コンバインドトリガー & L1 topological trigger (e.g. $\Delta\eta$, ΔR cut)
- FTK & 物理トリガー
 - e.g. b, τ の閾値を下げる、VBF 生成過程に特化したトリガー

14TeVに増強したLHC III

<Pileup>

- たとえば、
140衝突/事象で、b-tag の誤同定率は現在
(0-40衝突/事象)と比べて1.25倍悪くなる。
- 逆に言えば、動く(放射線耐性の高い)シリコン検出器を作ることが大事
- METの分解能もtrackingで補正できる！



→ これからお見せする結果は、triggerに伴う事象選択、Pileupに伴う性能の低下を考慮

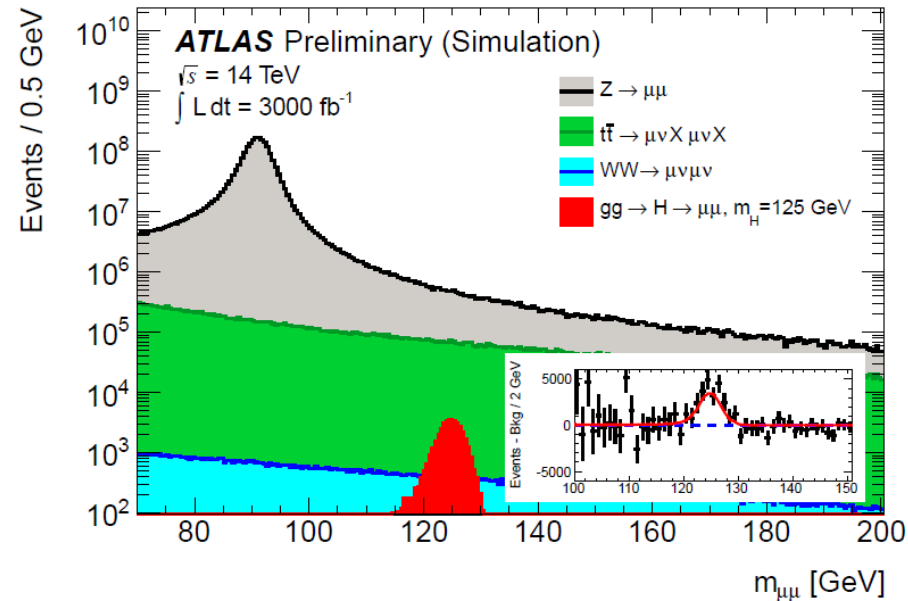
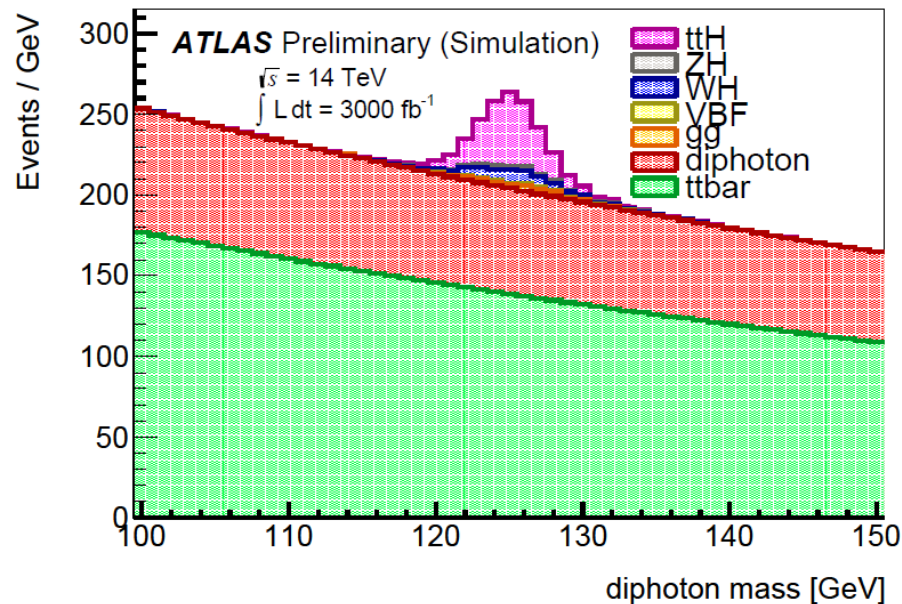
結合定数の測定

- さまざまな生成崩壊過程で結合定数の測定を行う。
- $300\text{fb}^{-1} \sim 3000\text{fb}^{-1}$ までの感度を推測
- ○が現在解析を行ったもの(他ができないというわけではないので注意！)
- (○)はデータ解析の実績がないもの
- ×は現在解析されているが、予測感度を出していないもの。

	ggF	VBF H	WH	ZH	ttH
$H \rightarrow \gamma\gamma$	○	○	(○)	(○)	(○)
$H \rightarrow ZZ^*$	○	×			
$H \rightarrow WW^*$	○	○	○		
$H \rightarrow \tau\tau$	△	○			
$H \rightarrow \mu\mu$	○				(○)
$H \rightarrow b\bar{b}$			×	×	← B-tag/Jet の系統誤差が大

結合定数の観測： Y_t と Y_μ

- $ttH, H \rightarrow \gamma\gamma$
 - $ttH, H \rightarrow bb$ と並んで Y_t 測定に重要
 - 2つの光子と1か2レプトンと複数ジェットを要求。
 - 3000fb⁻¹における $S/\sqrt{B}$ は約 6 σ !
- $H \rightarrow \mu\mu$
 - レプトンとの結合を調べるのに有効な過程の一つ
 - 崩壊分岐比: 2.2×10^{-4}
 - 3000fb⁻¹における感度は6 σ 以上
 - $ttH, H \rightarrow \mu\mu$ は30事象 ($S/B < 1$)

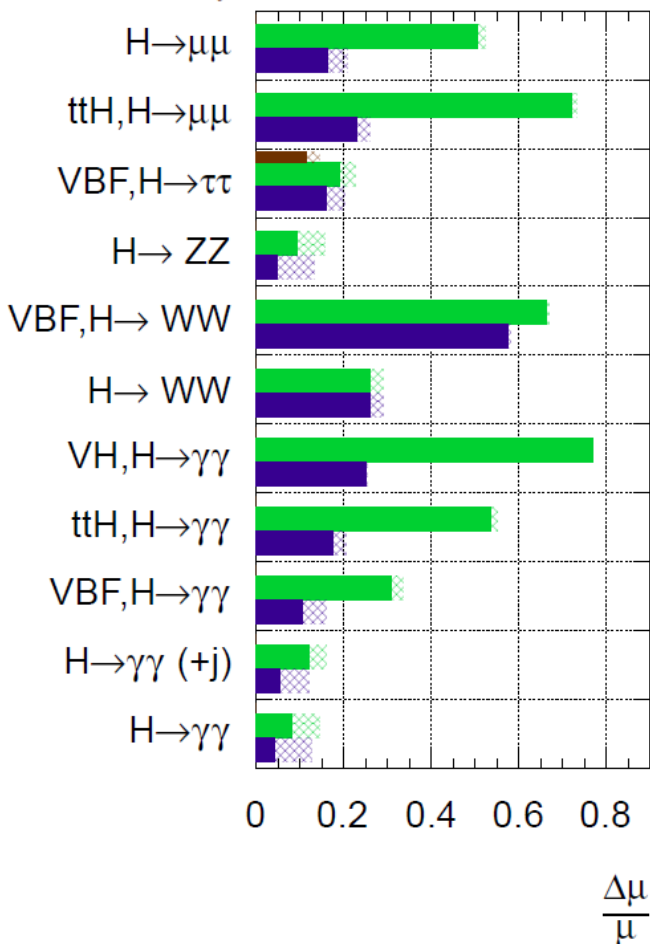


300fb⁻¹-3000fb⁻¹での予想感度

ATLAS Preliminary (Simulation)

$\sqrt{s} = 14$ TeV: $\int Ldt=300 \text{ fb}^{-1}$; $\int Ldt=3000 \text{ fb}^{-1}$

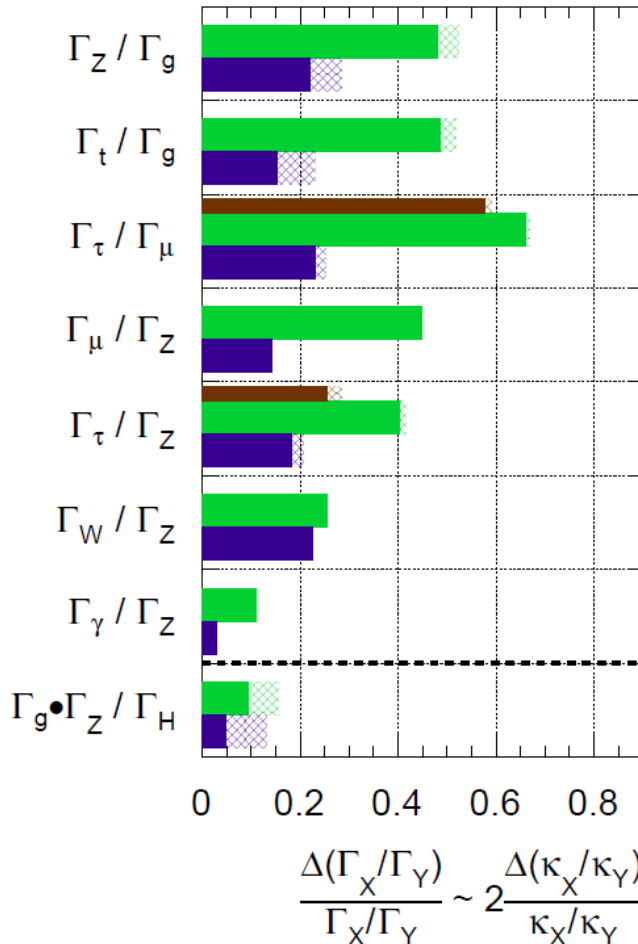
$\int Ldt=300 \text{ fb}^{-1}$ extrapolated from 7+8 TeV



ATLAS Preliminary (Simulation)

$\sqrt{s} = 14$ TeV: $\int Ldt=300 \text{ fb}^{-1}$; $\int Ldt=3000 \text{ fb}^{-1}$

$\int Ldt=300 \text{ fb}^{-1}$ extrapolated from 7+8 TeV

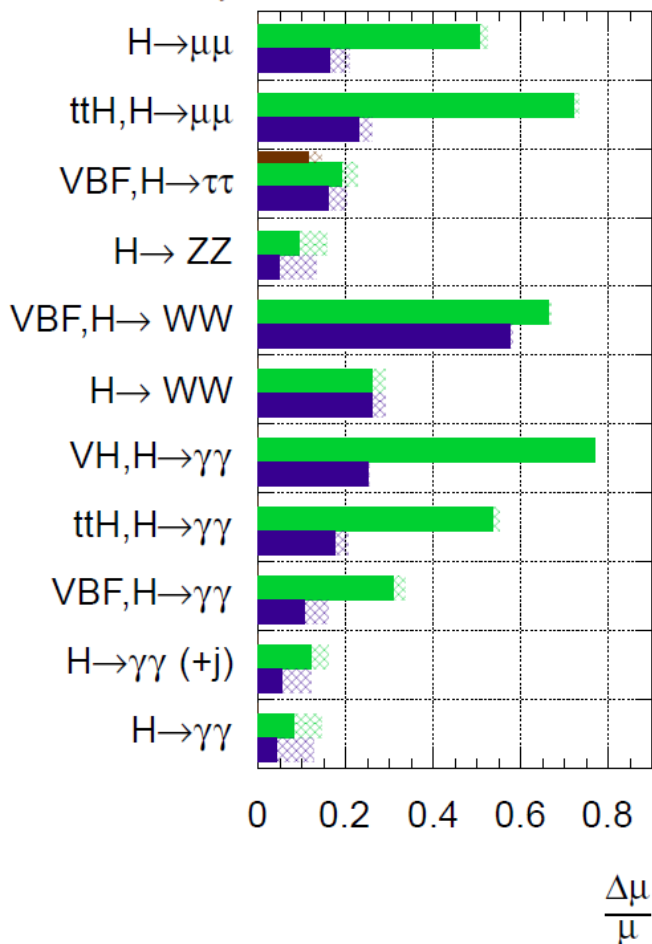


300fb⁻¹-3000fb⁻¹での予想感度

ATLAS Preliminary (Simulation)

$\sqrt{s} = 14$ TeV: $\int L dt = 300 \text{ fb}^{-1}$; $\int L dt = 3000 \text{ fb}^{-1}$

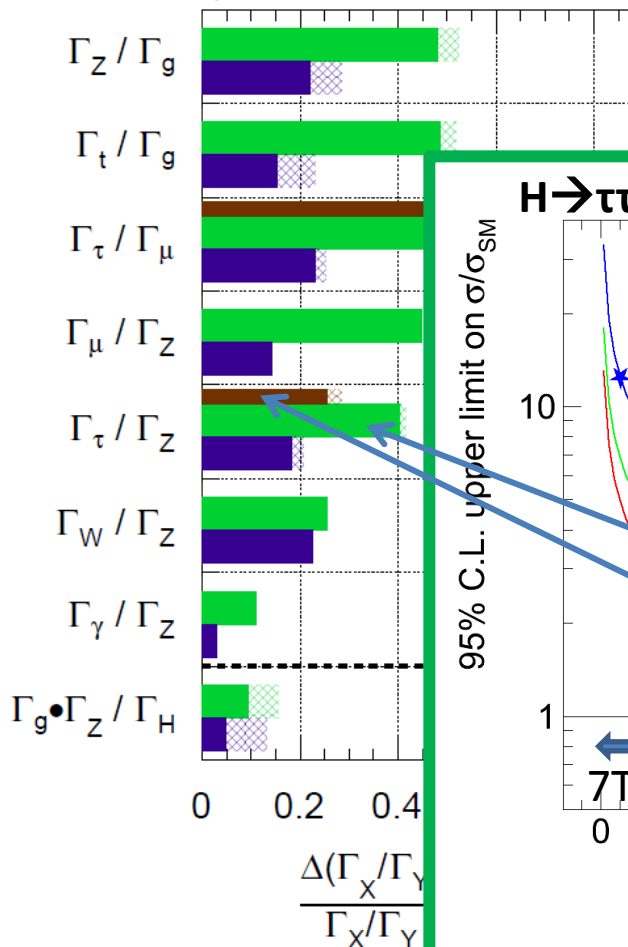
$\int L dt = 300 \text{ fb}^{-1}$ extrapolated from 7+8 TeV



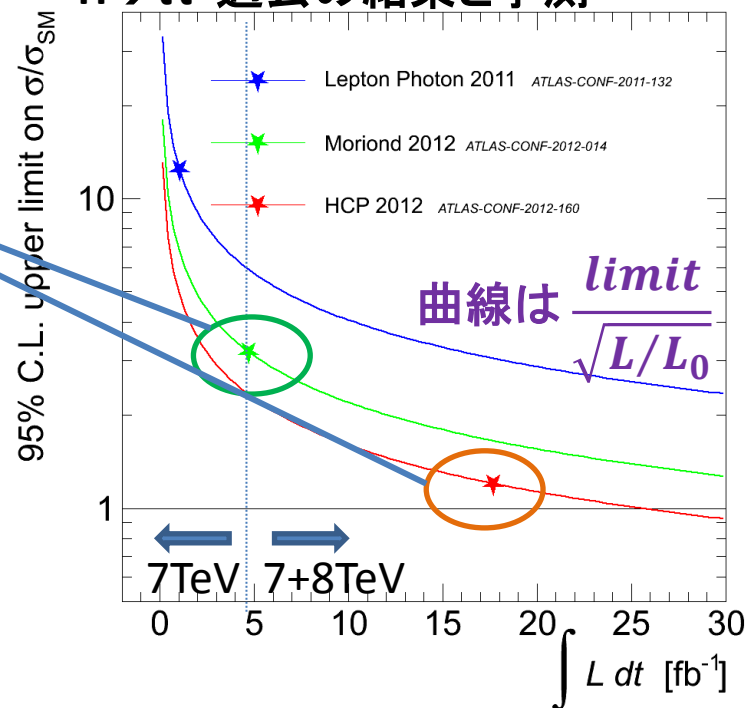
ATLAS Preliminary (Simulation)

$\sqrt{s} = 14$ TeV: $\int L dt = 300 \text{ fb}^{-1}$; $\int L dt = 3000 \text{ fb}^{-1}$

$\int L dt = 300 \text{ fb}^{-1}$ extrapolated from 7+8 TeV



H→ττ 過去の結果と予測

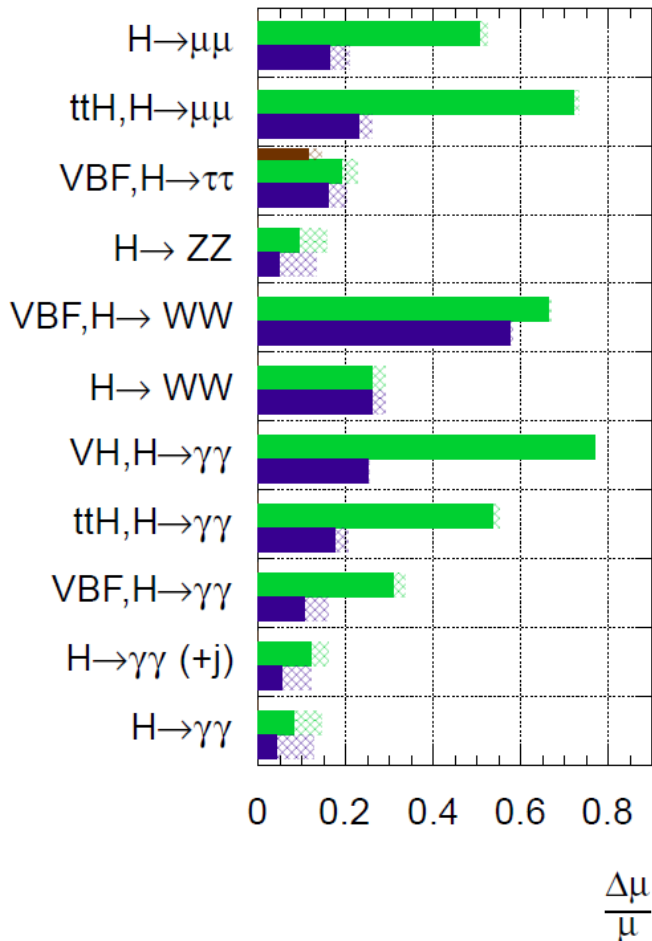


300fb⁻¹-3000fb⁻¹での予想感度

ATLAS Preliminary (Simulation)

$\sqrt{s} = 14$ TeV: $\int L dt = 300 \text{ fb}^{-1}$; $\int L dt = 3000 \text{ fb}^{-1}$

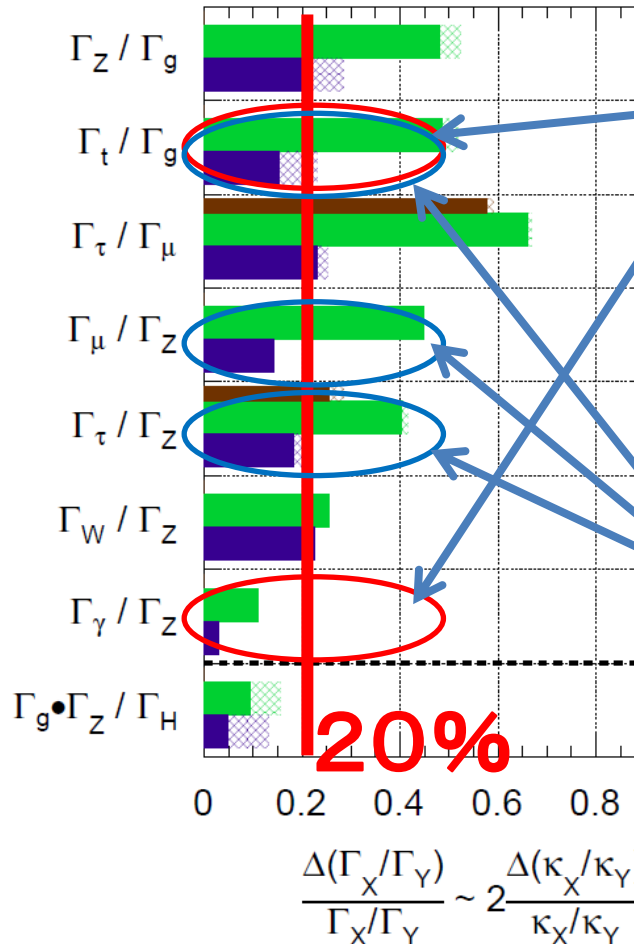
$\int L dt = 300 \text{ fb}^{-1}$ extrapolated from 7+8 TeV



ATLAS Preliminary (Simulation)

$\sqrt{s} = 14$ TeV: $\int L dt = 300 \text{ fb}^{-1}$; $\int L dt = 3000 \text{ fb}^{-1}$

$\int L dt = 300 \text{ fb}^{-1}$ extrapolated from 7+8 TeV

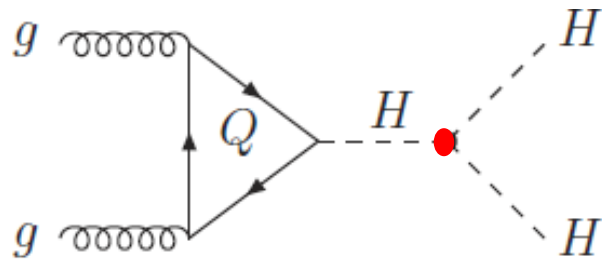
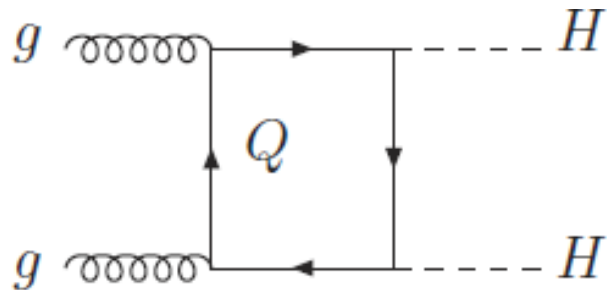


新物理に感度

湯川の測定精度
(@3000fb⁻¹)

- $\gamma_t \sim 15\%$
- $\gamma_\mu \sim 10\%$
- $\gamma_\tau \sim 10\%$

ヒッグス対生成と自己結合



- ヒッグス粒子は通常単一生成するが、対生成することもある。
- さらに時々**HHH結合**をもつ生成もある (**ヒッグスの大事な特性の一つ**)
- 14TeVでのヒッグス対生成の断面積は **34fb^{-1}** (+ α)と非常に小さい。
 - 3000fb^{-1} で10万事象
- 角度分布で区別して、HHH結合の有無を議論することはLHCではかなり難しい。

$\sqrt{s}$ [TeV]	$\sigma_{gg \rightarrow HH}^{\text{NLO}}$ [fb]	$\sigma_{qq' \rightarrow HHqq'}^{\text{NLO}}$ [fb]	$\sigma_{q\bar{q}' \rightarrow WHH}^{\text{NNLO}}$ [fb]	$\sigma_{q\bar{q} \rightarrow ZHH}^{\text{NNLO}}$ [fb]	$\sigma_{q\bar{q}/gg \rightarrow t\bar{t}HH}^{\text{LO}}$ [fb]
14	33.89	2.01	0.57	0.42	1.09
33	207.29	12.05	1.99	1.68	8.37
100	1417.83	79.55	8.00	8.27	82.69

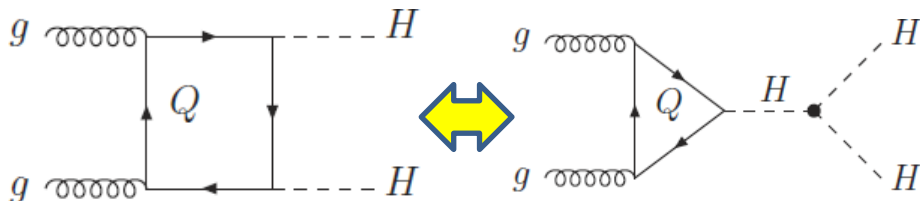
自己結合の存在の確認のために

Q. LHCでHHH結合の存在を確認する方法はないのか？

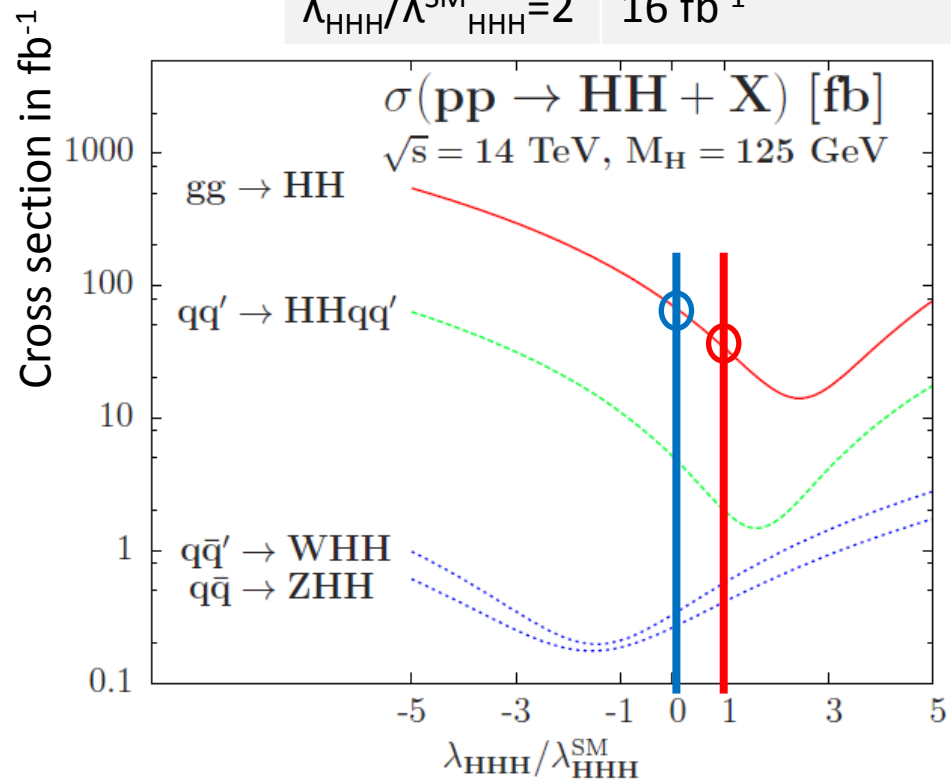
A. あります！

BoxとTriangleの間のinterferenceによって $pp \rightarrow HH$ の生成断面積が大きく変わる。

$$\sigma(\text{HHH無})/\sigma(\text{HHH有}) \sim 2$$



	gg→HH σ [fb ⁻¹] @ 14TeV
$\lambda_{\text{HHH}}/\lambda_{\text{HHH}}^{\text{SM}}=1$	34 fb ⁻¹
$\lambda_{\text{HHH}}/\lambda_{\text{HHH}}^{\text{SM}}=0$	71 fb ⁻¹
$\lambda_{\text{HHH}}/\lambda_{\text{HHH}}^{\text{SM}}=2$	16 fb ⁻¹



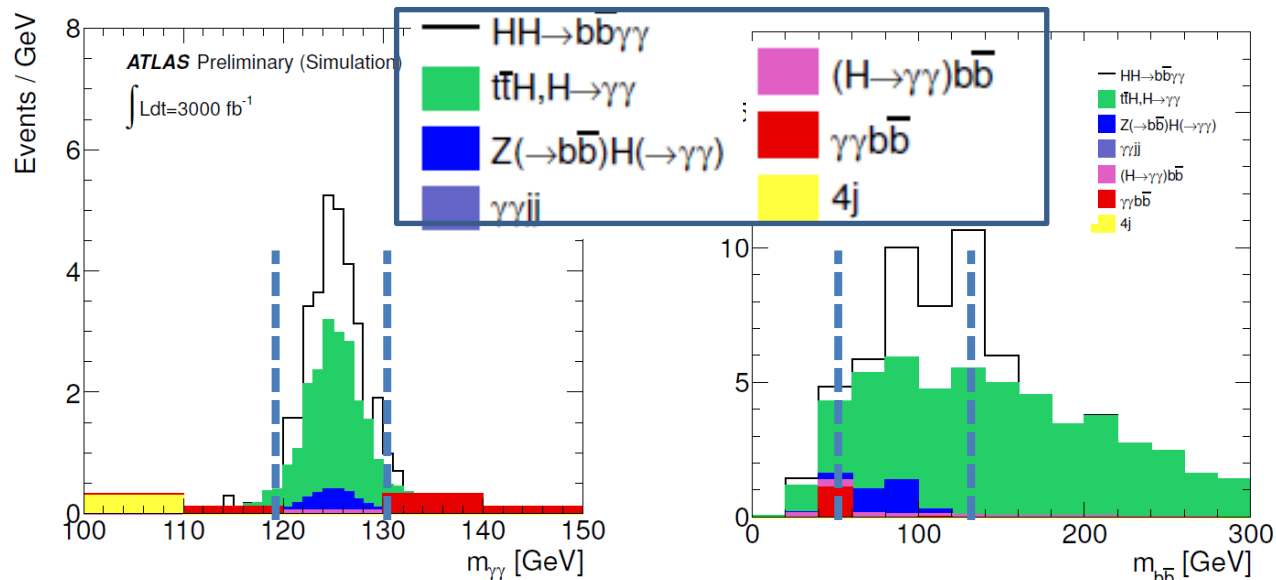
一つの例、 $HH \rightarrow bb\gamma\gamma$

- QCD, $t\bar{t}$ のバックグラウンドが比較的少ないであろうチャンネル。
- カット後の信号数は10事象以上
 - 2つの光子 ($P_T^\gamma > 25\text{GeV}$)
 - 2つのb-jet ($P_T^b > 40/25\text{GeV}$)
 - $50 < m_{bb} < 130$, $120 < m_{\gamma\gamma} < 130\text{GeV}$

	Expected event in 3000 fb ⁻¹
$HH \rightarrow bb\gamma\gamma$ ($\lambda_{HHH}/\lambda_{HHH}^{\text{SM}}=1$)	10.7
$HH \rightarrow bb\gamma\gamma$ ($\lambda_{HHH}/\lambda_{HHH}^{\text{SM}}=0$)	17.9
$HH \rightarrow bb\gamma\gamma$ ($\lambda_{HHH}/\lambda_{HHH}^{\text{SM}}=2$)	6.4

選択後のバックグラウンド

sample	events expected in 3000 fb ⁻¹
$\gamma\gamma b\bar{b}$	1.1
$ZH(Z \rightarrow b\bar{b}, H \rightarrow \gamma\gamma)$	2.8 -10?
$b\bar{b}H(H \rightarrow \gamma\gamma)$	0.5
$\gamma\gamma jj$	0.1
$jjjj$	0
$t\bar{t}H(H \rightarrow \gamma\gamma)$	13.6
$t\bar{t} (\geq 1 \text{ leptonic } W \text{ decay})$	1.1
Total Background	19.2 -26?



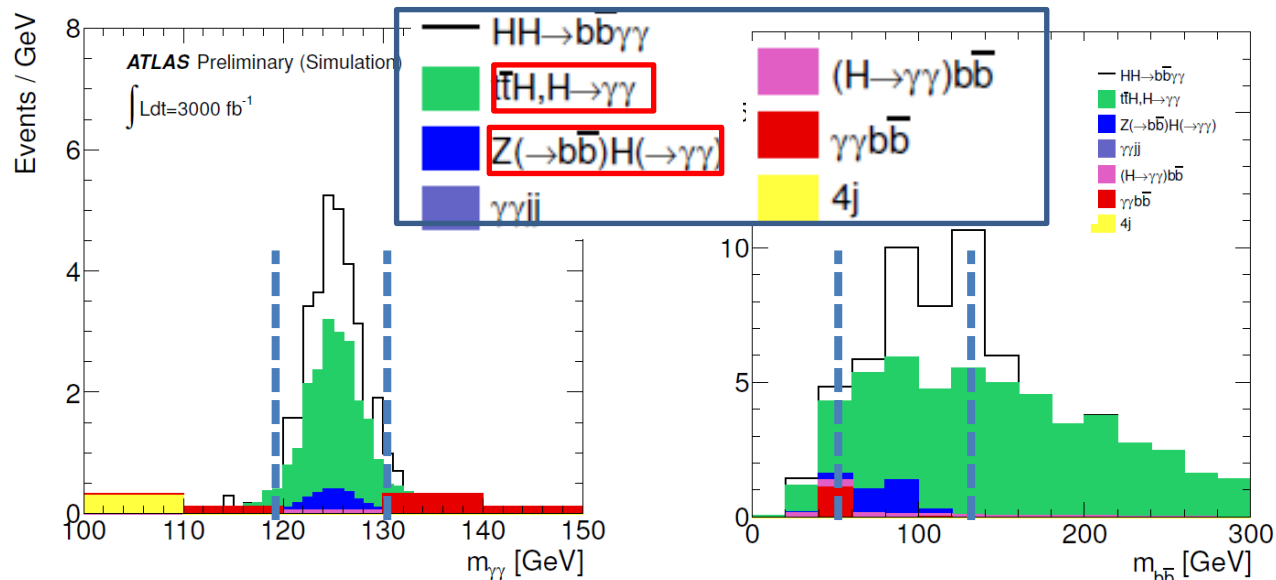
一つの例、 $HH \rightarrow bb\gamma\gamma$

- このセレクション後バックグラウンドはほぼヒッグス単一生成過程。
- 標準理論ヒッグス対生成を $2.1\text{--}2.4\sigma$ で観測 $\rightarrow$ 他のチャンネルを加えて 3σ ?

	Expected event in 3000 fb^{-1}
$HH \rightarrow bb\gamma\gamma$ ($\lambda_{HHH}/\lambda_{HHH}^{\text{SM}}=1$)	10.7
$HH \rightarrow bb\gamma\gamma$ ($\lambda_{HHH}/\lambda_{HHH}^{\text{SM}}=0$)	17.9
$HH \rightarrow bb\gamma\gamma$ ($\lambda_{HHH}/\lambda_{HHH}^{\text{SM}}=2$)	6.4

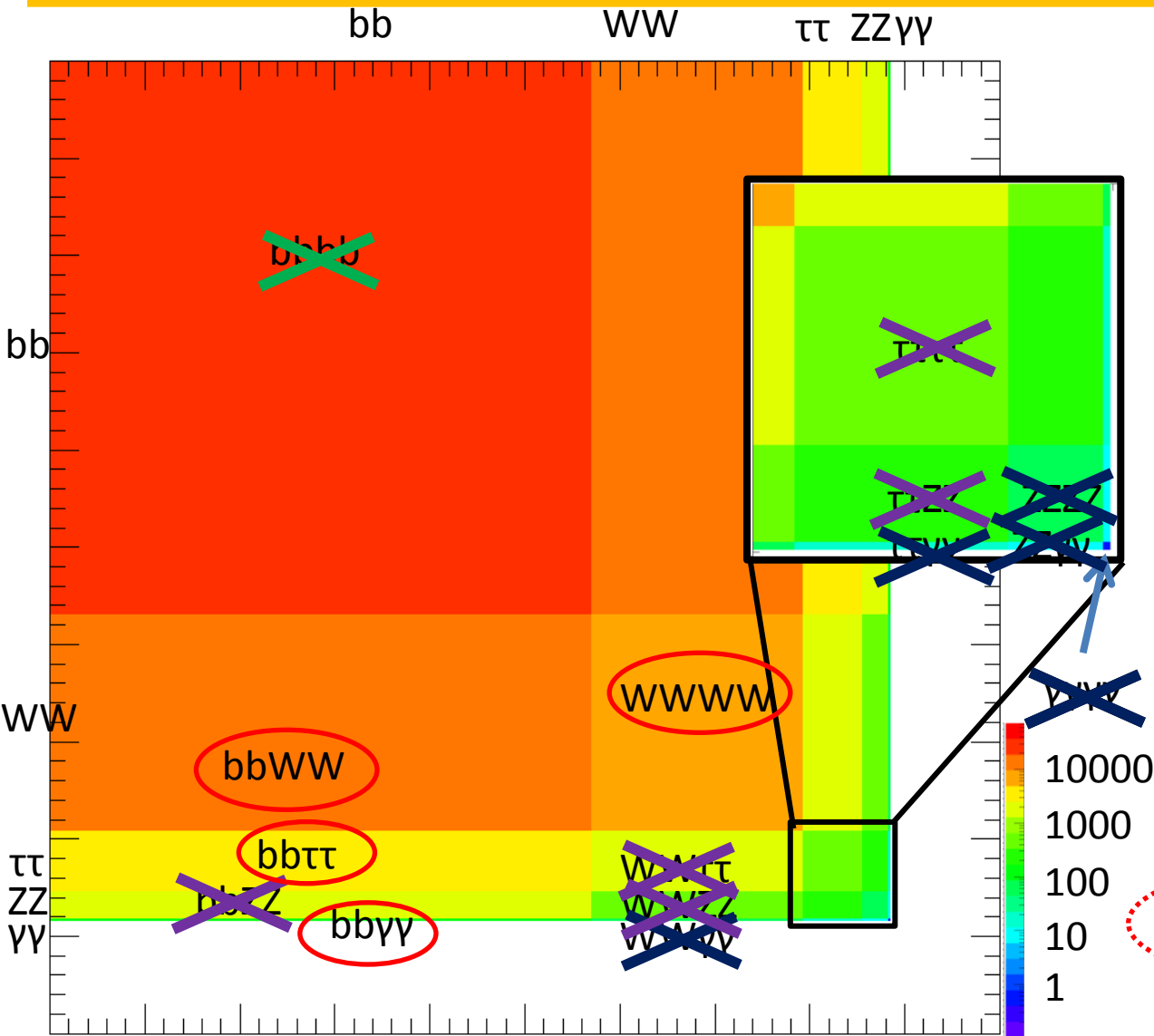
選択後のバックグラウンド

sample	events expected in 3000 fb^{-1}
$\gamma\gamma b\bar{b}$	1.1
$ZH(Z \rightarrow b\bar{b}, H \rightarrow \gamma\gamma)$	2.8 -10?
$b\bar{b}H(H \rightarrow \gamma\gamma)$	0.5
$\gamma\gamma jj$	0.1
$jjjj$	0
$t\bar{t}H(H \rightarrow \gamma\gamma)$	13.6
$t\bar{t}$ (≥ 1 leptonic W decay)	1.1
Total Background	19.2 -26?



$\rightarrow$ 大体30%くらいで $\sigma(HH)$ が測れる。 $\rightarrow \lambda_{HHH}/\lambda_{HHH}^{\text{SM}}=0$ を棄却(95%CL)

他のチャンネルの可能性



2 Higgs production :

34 fb@14TeV

$L=3000\text{fb}^{-1}$

10万イベント！

しかし...

200 event以下

Z/W/ τ のlepton BR
trigger がない...

$bb\gamma\gamma$: 最有力

$bbWW$:

$tt\bar{t}$ bkg ($S/B \sim 10^{-5}$)

$bb\tau\tau$: ??

$WWWW$: ??

この辺がカギ？

おまけ、 $HH \rightarrow bb\tau\tau$

- Promising?
 - 約7000事象以上存在@3000fb⁻¹
 - 大きな損失運動量がないので質量再構成が可能。組み合わせもひとつに決まる。
 - すべての過程が解析可。(bb $\tau_l\tau_h$, bb $\tau_l\tau_l$, bb $\tau_h\tau_h$)
- 課題としては...
 - そもそもtriggerは大丈夫か？ Lepton(+tau)+b？
 - トップクォークのバックグラウンドを落とすための努力。MET？
 - そのほかにZH $\rightarrow bb\tau\tau$ ($\tau\tau bb$)ものぞくことのできないバックグラウンド
 - ヒッグス粒子の質量分布に違いがでるか？
 - 質量再構成のためのMET分解能。

まとめ

- 発見から一年、すでに精密測定の世界
 - 質量、スピン測定はほぼ終了。
 - H_{WW} , H_{ZZ} , $H\gamma\gamma$, $H\gamma\gamma$ の存在は確認($>3\sigma$)
 - Y_b , Y_τ は、少々お待ちください。
- 2015年以降のLHC->HL-LHCで可能な測定
 - Y_b , Y_τ の確実な発見($<100\text{fb}^{-1}$)
 - Y_t , Y_μ の発見
 - 結合定数の精密測定
 - $Y_\tau \sim 10\%$, $Y_\mu \sim 10\%$, $Y_t \sim 15\%$ 程度 (改善の可能性あり)
 - Y_b は、今後の系統誤差の研究しだい。
 - ヒッグス対生成の発見($\sim 3\sigma$)、自己結合の間接的な証明(95%CL)

Backup

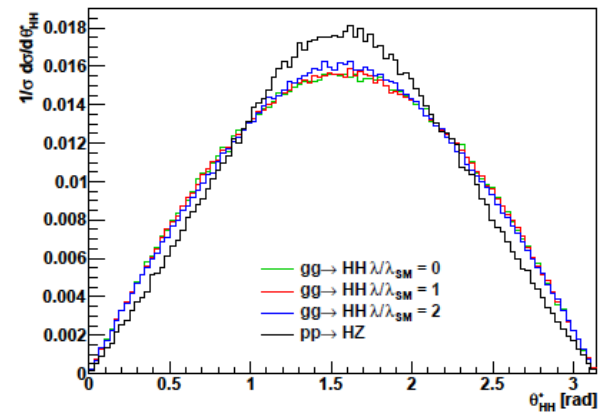
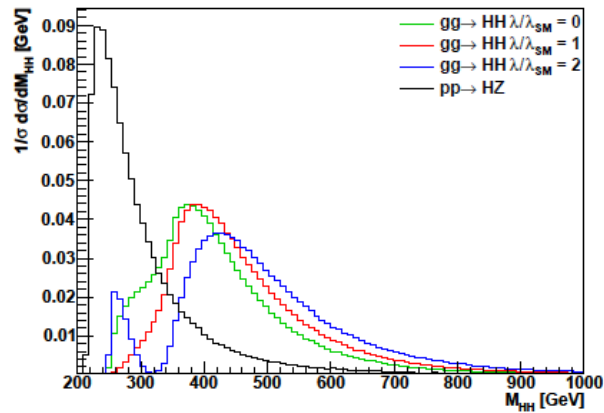
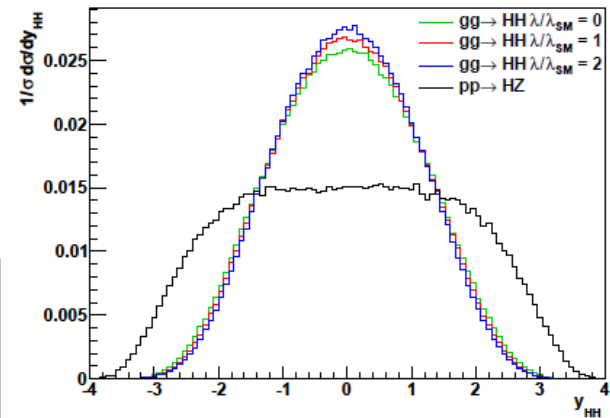
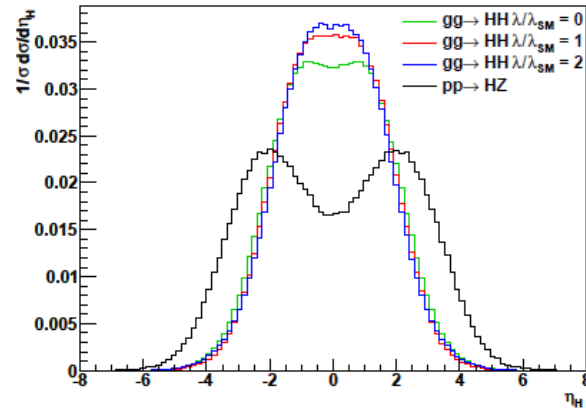
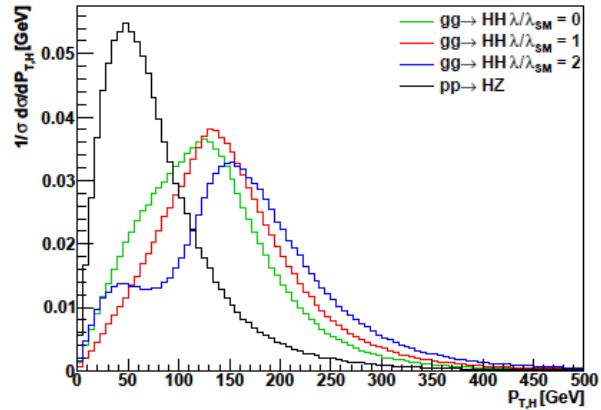
• $2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

L1 Item	Offline pT	Predicted Rate/kHz	Rate with pileup	Unique Rate (no pileup)
EM28H	33	28.0	28.0	19.8
EM50	60	8.6	8.6	0.5
2EM15H	2x20	8.8	10.3	4.6
MU20	25	25.6	25.6	23.8
2MU11	2x13	4.3	6.6	3.8
EM15H_MU10	20,12	2.0	4.9	0.1
2EM8H_MU10	2x12,12	0.9	4.0	0.2
EM8H_2MU6	12,2x8	0.6	2.2	0.2
TAU60	150	10.2	10.2	1.2
2TAU30_TAU40	100,80	9.4	9.4	2.3
2TAU15I_3J15	2x40,50(jet)	8.7	14.3	2.4
2TAU15I_EM15H_3J15	40,20,50(jet)	4.9	8.3	0.0
TAU15I_MU10	40,15	4.6	7.4	1.9
TAU20I_XE40_3J15	50,90,50(jet)	1.3	2.5	0.1
J100	250	4.9	4.9	0.3
4J20	Nx60	1.6	2.9	0.2
J75_XE40	200,150	4.7	5.4	0.7
XE60	190	1.2	2.7	0.1
Others	topo?	~5	0.0	5.0
Totals		90.0	100.0	

• $3 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

L1 Item	Offline pT	Predicted Rate/kHz	Rate with pileup	Unique Rate (no pileup)
EM50H	60	4.9	4.9	2.3
EM80	100	2.2	2.2	0.0
2EM20H	2x25	3.4	3.7	2.4
MU20 (eta<1.9)	25	32.3	32.3	30.1
2MU11	2x13	6.4	10.0	5.9
EM20H_MU10	25,12	1.9	5.0	0.7
2EM11H_MU10	2x15,12	0.7	2.5	0.2
EM11H_2MU6	15,2x6	0.7	2.4	0.2
TAU80	180	5.4	10.2	0.1
2TAU40	2x100	8.1	8.1	3.0
2TAU15I_3J20	2x45,60(jet)	8.8	13.5	3.8
2TAU15I_EM20H_3J20	40,25,60(jet)	3.4	4.6	0.0
TAU15I_MU15	40,20	3.0	4.8	0.9
TAU20I_XE40_3J20	50,90,60(jet)	1.4	4.1	0.1
J100	250	7.3	7.3	0.9
4J20	Nx60	2.4	4.6	0.6
J75_XE40	200,150	7.0	8.6	2.4
XE60	190	1.9	5.8	0.1
Others	topo?	~20	~12	20.0
Totals		90.0	100.0	

HH kinematics in different λ



他のチャンネルの可能性

