

実験サマリー ヒッグス探索
（SM Higgs）

田中純一 (ICEPP東大)



内容

- イントロダクション
  - LHCにおけるヒッグス粒子生成と崩壊過程のまとめ
- 発見能力とExclusionのまとめ
  - LHCとTevatron
- 各論
  - Luminosity & Pileup
  - H->WW
  - H->$\gamma\gamma$
  - H->$\tau\tau$
  - H->ZZ
- 気になること
- まとめ



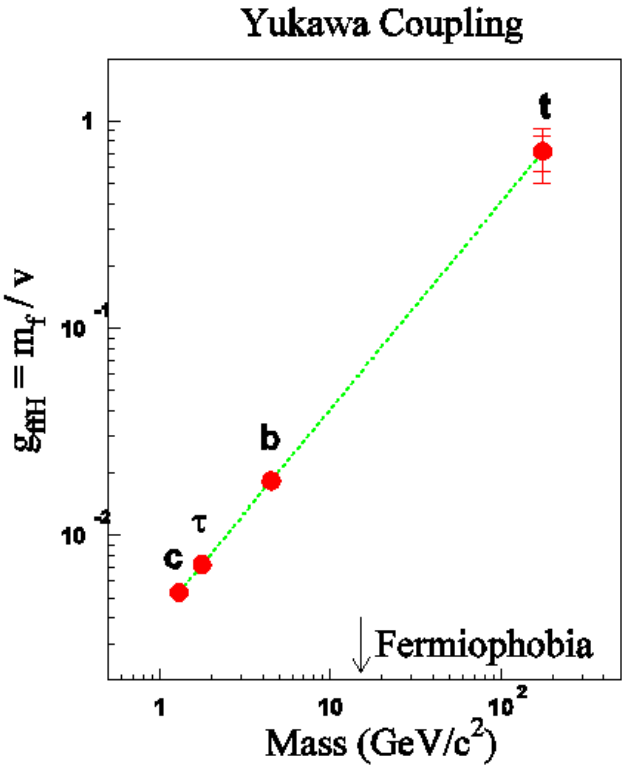
イントロ



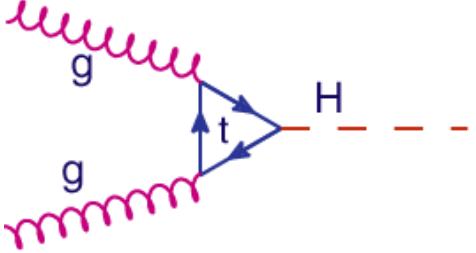
ヒッグス粒子

- ゲージ対称性を破る質量項は駄目(繰り込めなくなって予言能力がなくなる)。
  一方で、80.4GeV、91.2GeVの質量をもつW、Zゲージ粒子を観測。
- スカラー場を導入して自発的対称性の破れでゲージ粒子に質量を与える。
  =>ヒッグス機構
  =>残った質量のあるスカラー粒子が**ヒッグス粒子**である。
- 同様にフェルミオンにも質量を与えている。
- 質量の起源であるヒッグス粒子は未発見である。

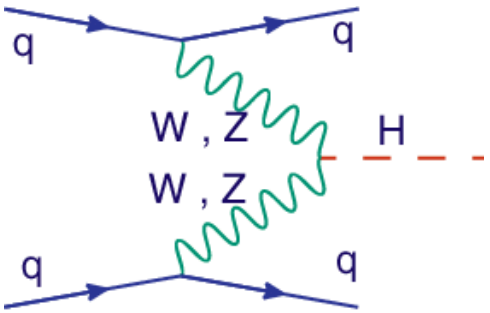
- LHCでの研究課題
  - まずは発見！=> このトーク
  - 無事発見できたら、その粒子の性質の測定
    1. 質量
    2. 湯川結合 => 山村君のトーク
    3. スピン、CPなどなど



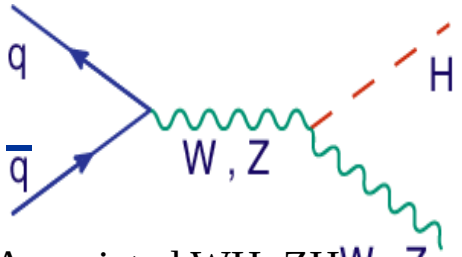
LHCにおけるSM Higgsの生成



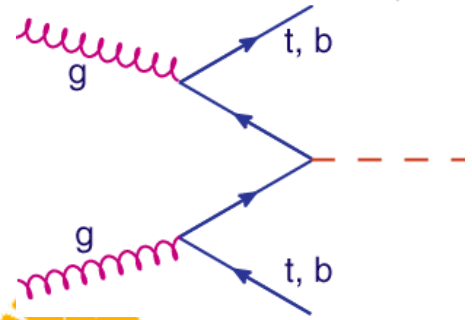
Gluon Fusion



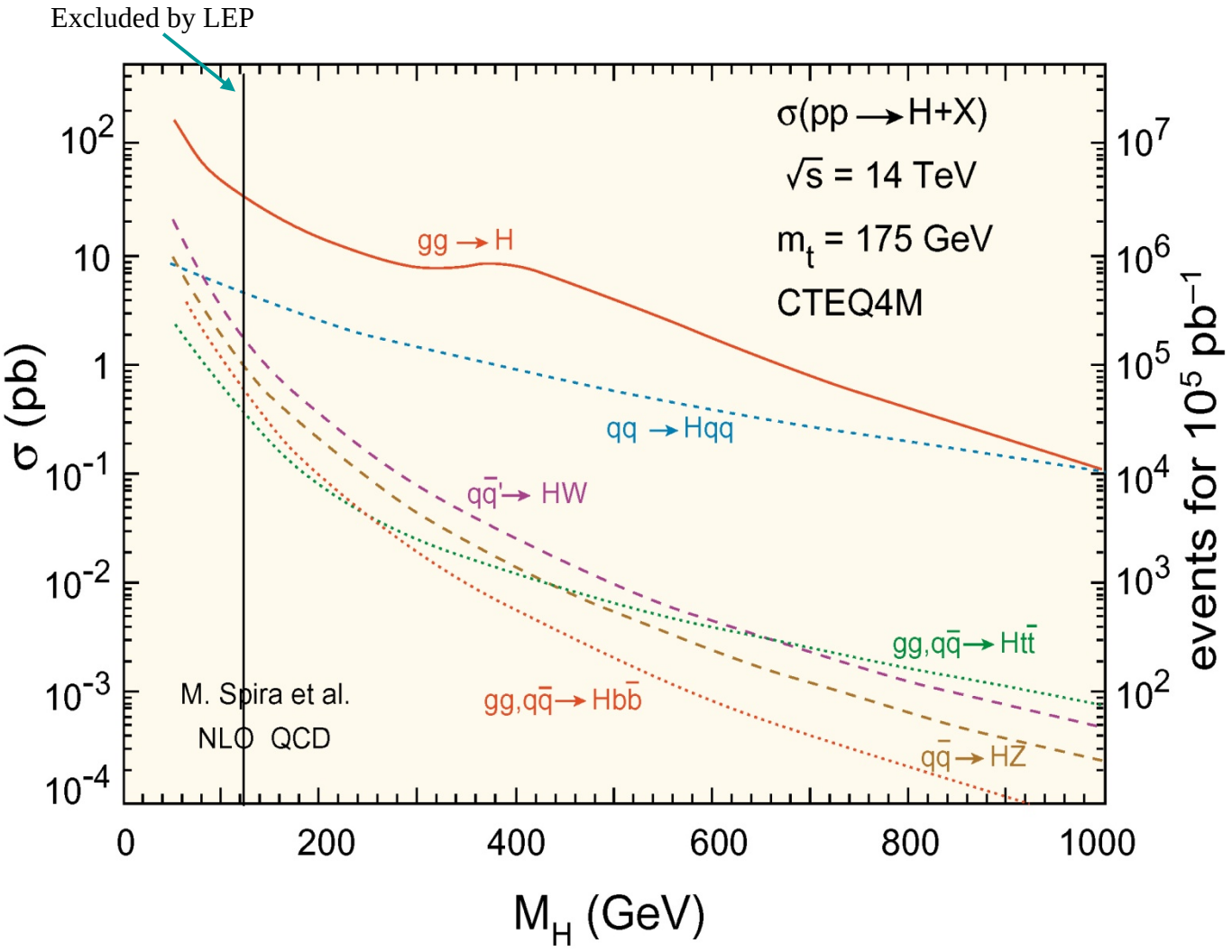
Vector Boson Fusion (VBF)



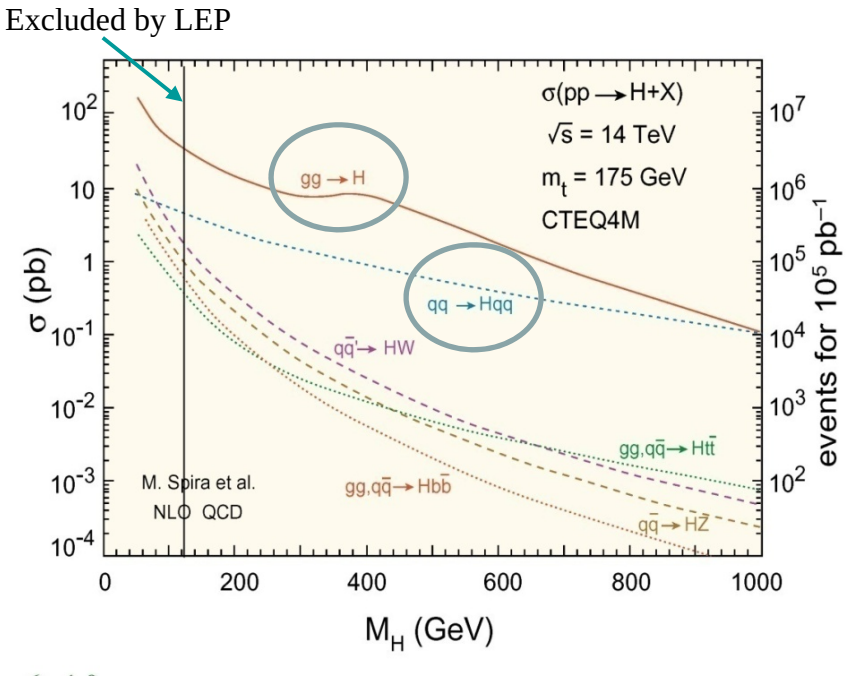
Associated WH, ZH

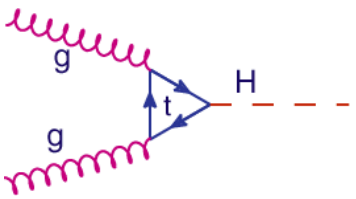


Associated ttH, bbH

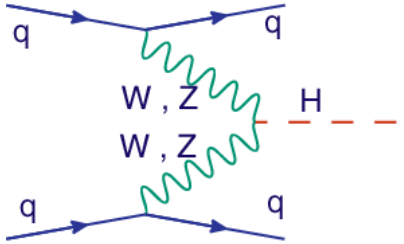


Production of SM Higgs





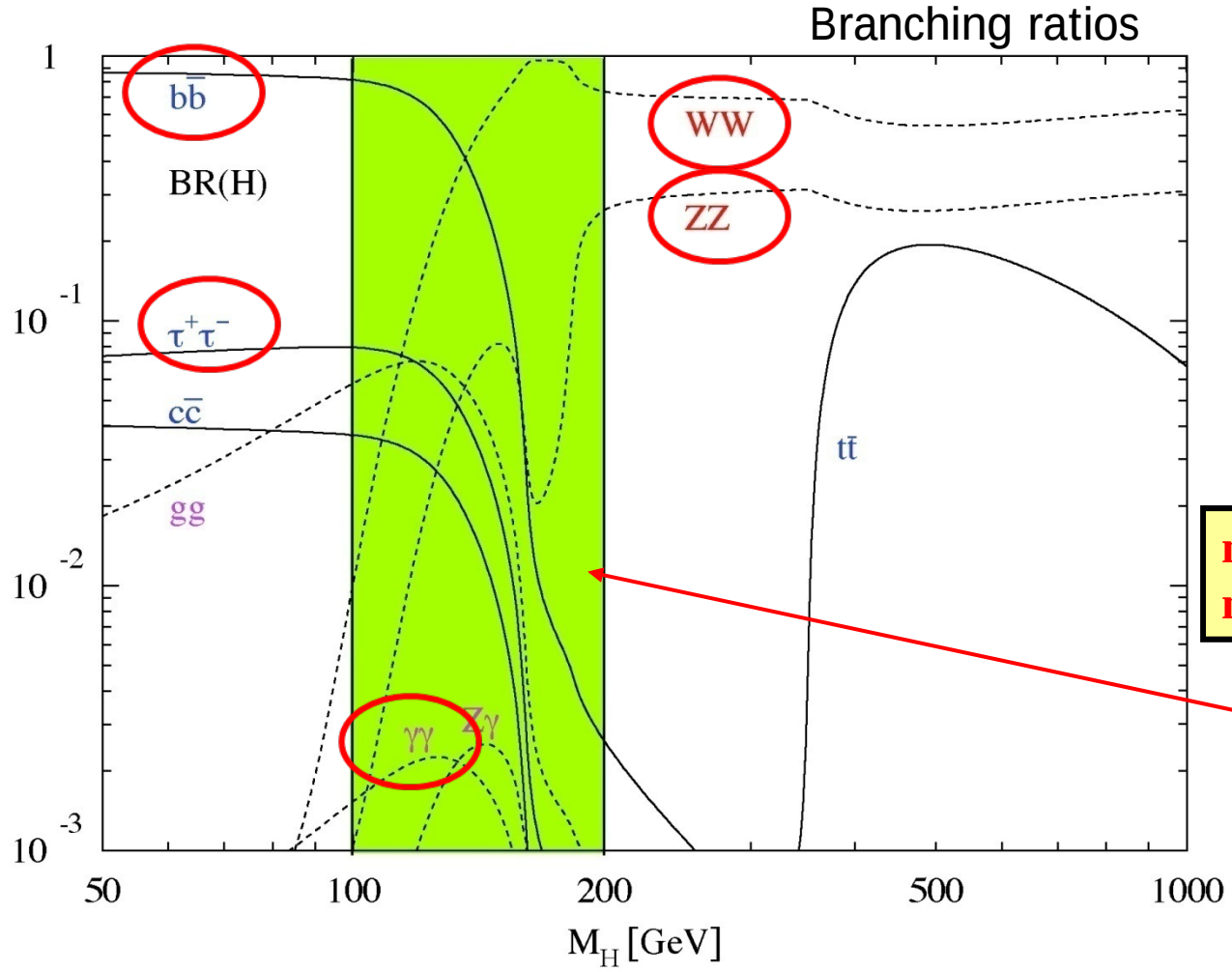
Gluon Fusion (GF)

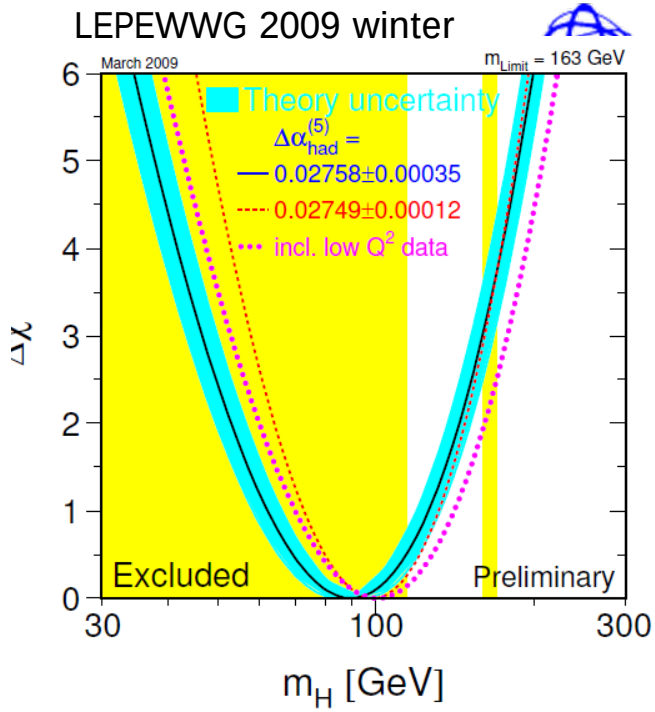


Vector Boson Fusion (VBF)

- GF is the dominant production process in LHC.
  - No other signature to separate signal from backgrounds.
- VBF is the 2nd one in LHC.
  - Two forward jets can be observed.
  - No color flow between 2 initial quarks. Activity in the central region is less than other processes. -> Central jet veto etc.

SM Higgsの崩壊





m_H=90(+36-27)GeV
m_H < 163 GeV/c^2 @95% C.L.

bb, ττ, γγ, WW, ZZが重要。

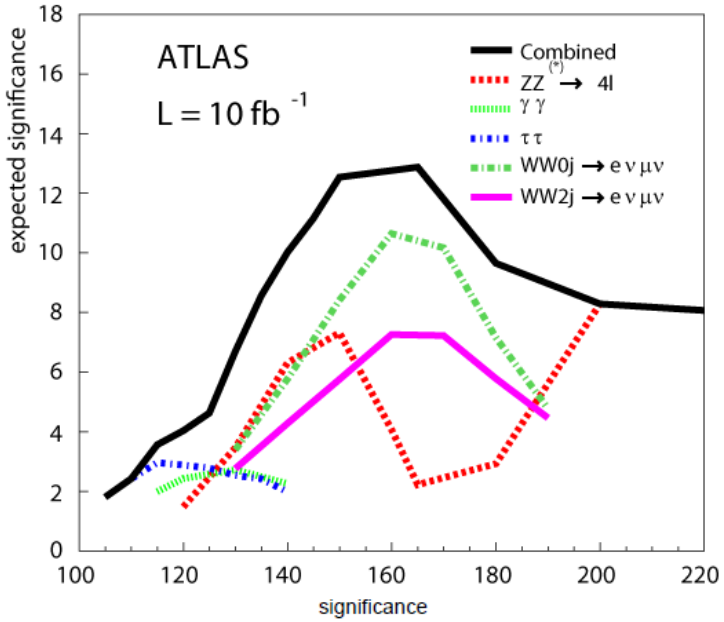
標準理論が予言する場所にあれば非常に面白い。(特に150GeV以下)
-> 様々な崩壊モードがあるため、結合定数が測定可能。

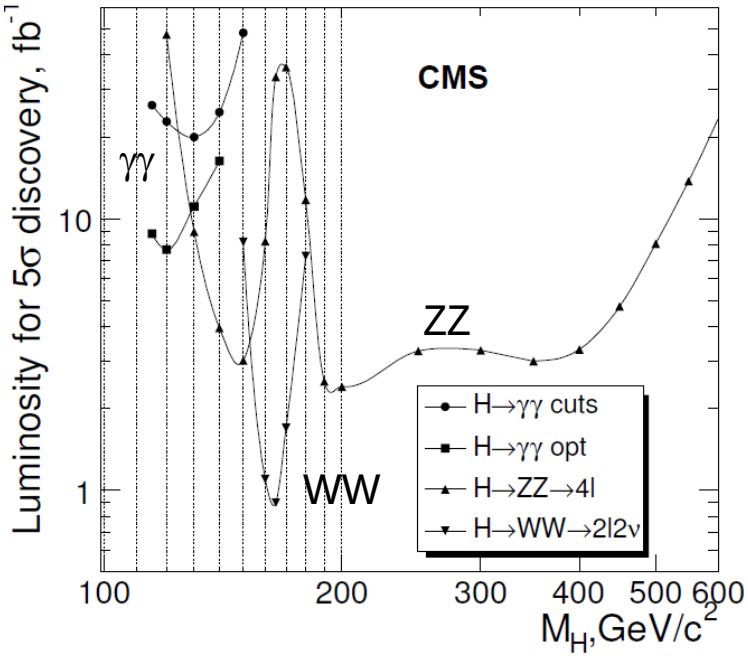


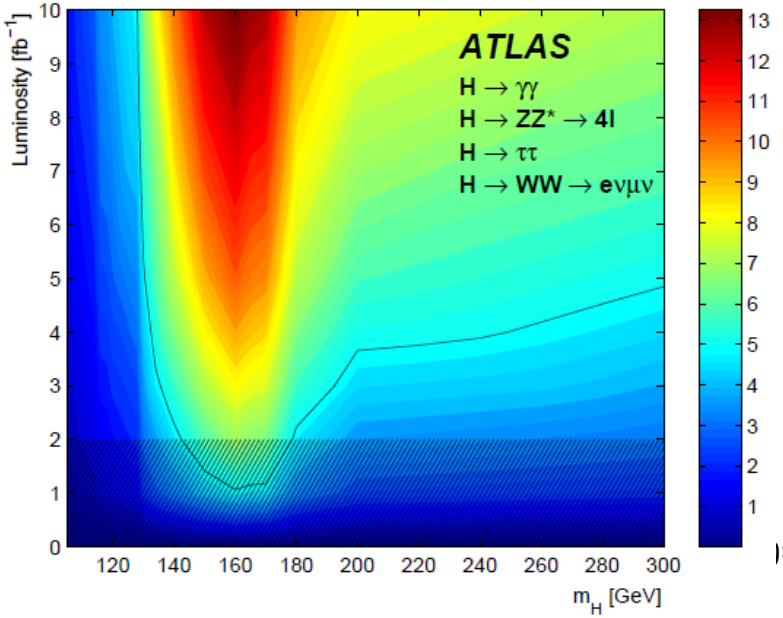
発見能力とExclusion



LHCの発見能力

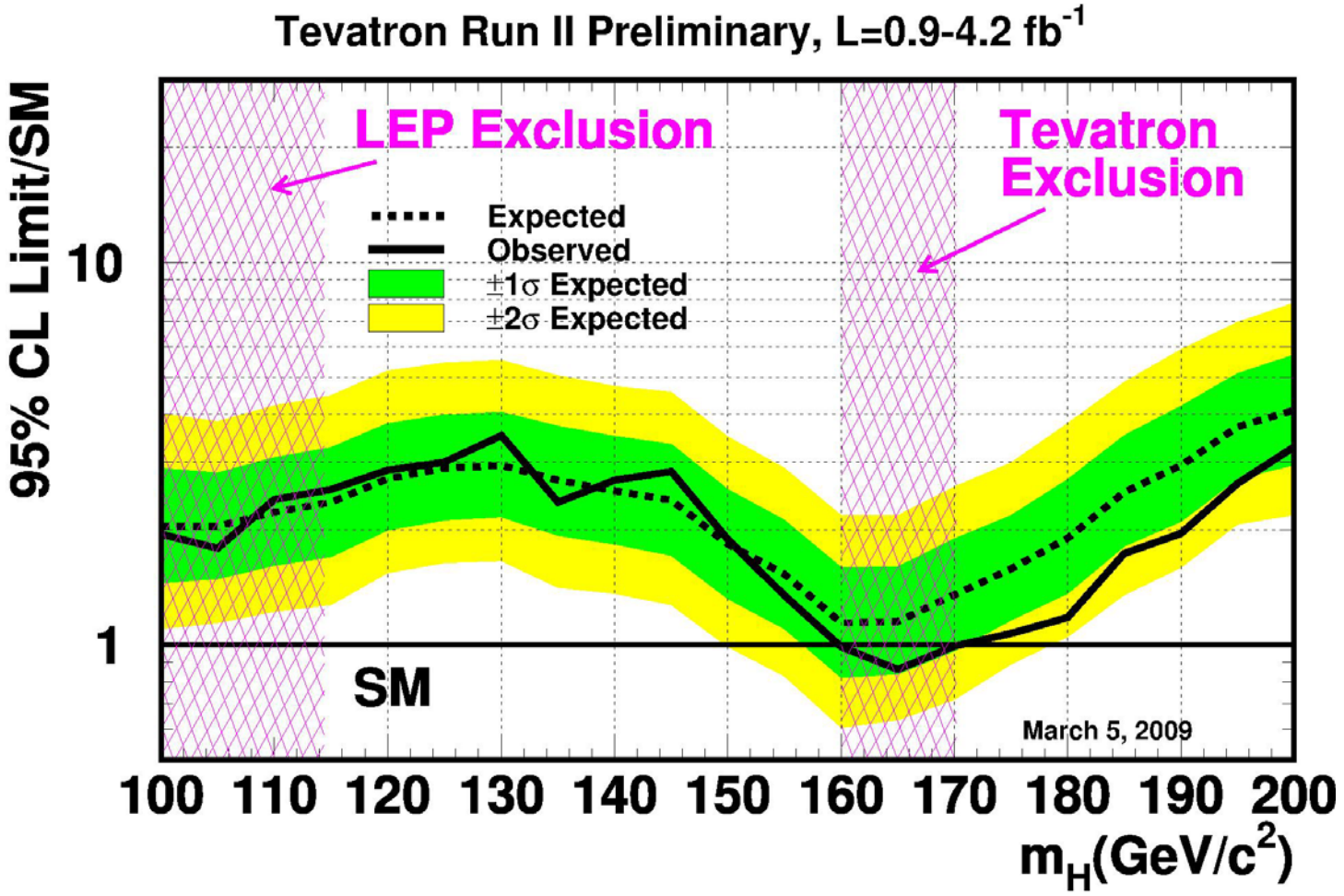






- 5fb^{-1}あれば軽いヒッグス以外は発見可能。
  - 130GeV以下は10-30fb^{-1}のデータが必要。

Exclusion at Tevatron



160-170GeVはテバトロンによりexcludeされた。
Exclusionに関してはテバトロンを無視できない。



各論



Luminosity & Pileup

[CSC Book]

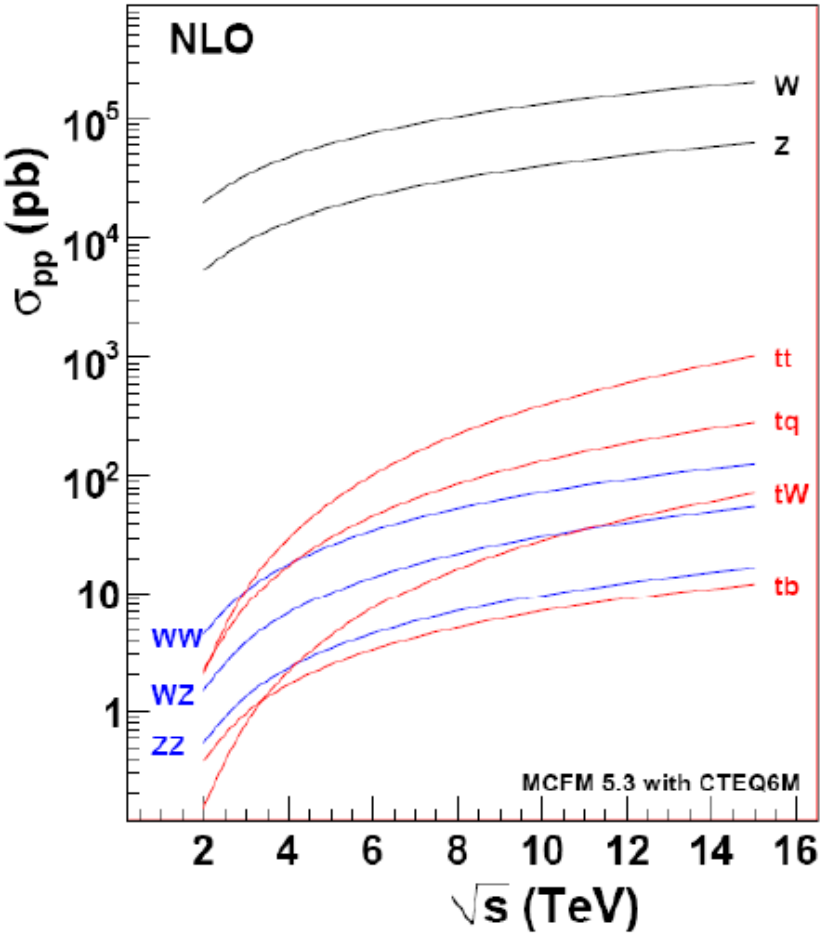
- 10^{33}, bunch spacing=25ns
  - 2.3 collisions / one x-ing
- $2x10^{33}$, bunch spacing=25ns
  - 4.6 collisions / one x-ing

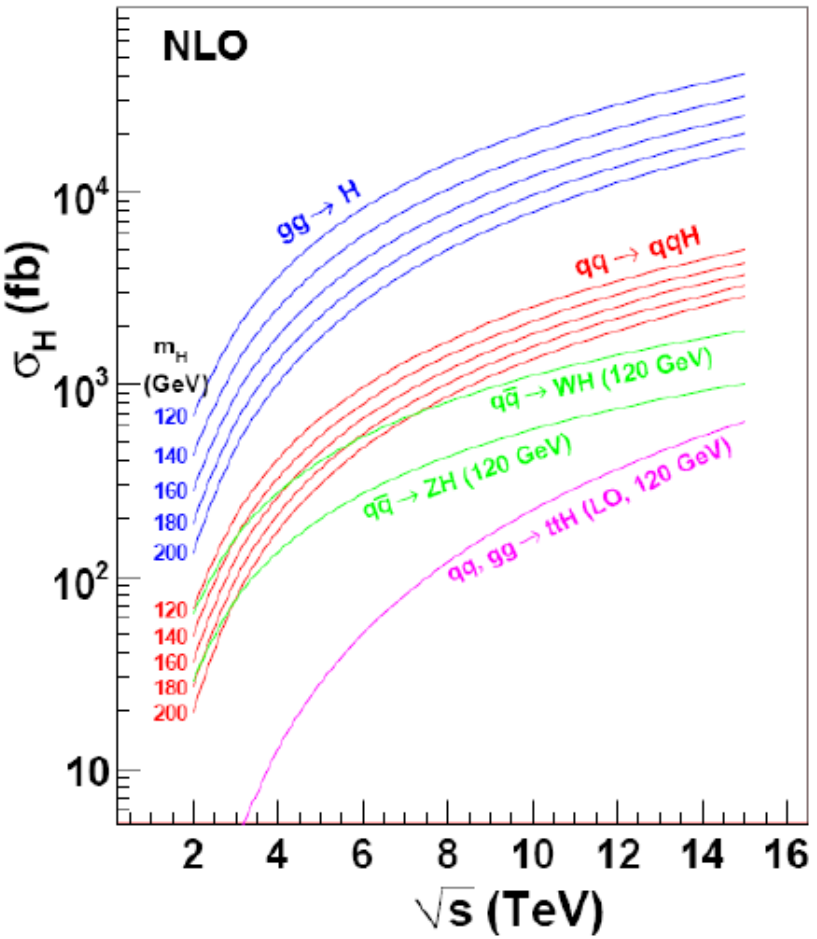
[今考えているrunning condition]

- 10^{32}, bunch spacing=450ns
  - 4.1 collisions / one x-ing -> 無視できない。
- 10^{32}, bunch spacing=75ns
  - 0.69 collisions / one x-ing
- 10^{32}, bunch spacing=50ns
  - 0.46 collisions / one x-ing
- 実際にどれでlong run(up to 200-300pb^{-1})するかはまだ決定されていない。

2009-2010の実験データに向けて、10TeV, 200pb^{-1}をターゲットに研究進めている。

14TeV -> 10TeV





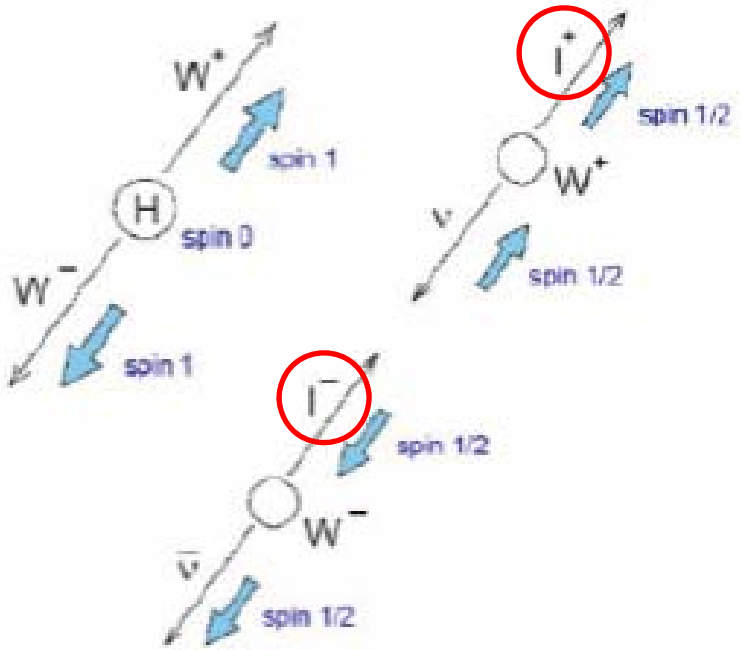
- W^+ : 109nb -> 78nb (72%), W^-: 80nb -> 55nb (69%), Z: 58nb->40nb (69%)
  ttbar: 876pb -> 396pb (45%)
- gg->H(120): 37pb -> 21pb (57%)
- qq->qqH(120): 4.6pb -> 2.6pb (57%)

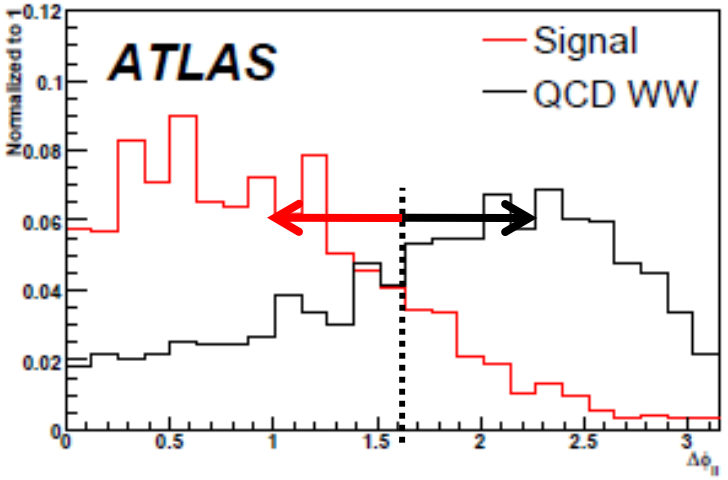
H->WW->lνlν(+no jet)

- 軽いヒッグスにおいて最も感度のあるモード
  - 2lepの場合、ヒッグスを再構成できないためピークを観測することができない。
  - ヒッグスの質量に相関のあるM_Tの分布においてヤコビアンピークを観測できる。

- スピン相関を利用する。
  - シグナルの場合、2lepが同じ方向に出やすい。

$$M_T = \sqrt{(E_T^{ll} + E_T^{\nu\nu})^2 + (\vec{p}_T^{ll} + \vec{\not{p}}_T)^2}$$
$$E_T^{ll} = \sqrt{(p_T^{ll})^2 + m_{ll}^2}$$
$$E_T^{\nu\nu} = \sqrt{(\vec{\not{p}}_T)^2 + m_{ll}^2}$$





H->WW->lνlν+no jet

- l=electron およびmuon
  - CSC Bookではバックグラウンドの研究(low mass DY)が間に合わなかったためemuチェンネルのみ。
- トリガー
  - 主にsingle electron/muonを使う。
  - emu/ee/mumuも利用する。

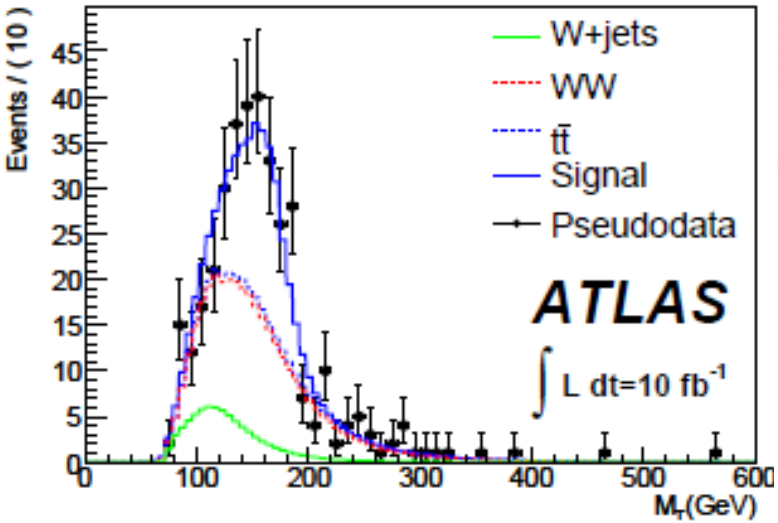
Fake次第

Selection	Selection cuts	$gg \to H(170)$	$t\bar{t}$	WW	$Z \to \tau\tau$	$W+jets$
pre-selection	Lepton Selection+M_{ll}	166.4	6501	718.12	4171	209.1
	$p_T^{miss} > 30$ GeV	147.7	5617	505.25	526.3	181.6
	$Z \to \tau\tau$ Rej.	145.8	5215	485.12	164.2	150.4
	Jet Veto	61.80	14.84	238.35	31.91	76.12
	b-veto	61.56	6.85	237.87	30.76	76.13
		37%		33%		36%
signal region	$\Delta\phi_{ll} < 1.575$, $M_T < 600$ GeV	50.6±2.5	2.3±1.6	85.4±2.7	<1.7	38±38
control region	$\Delta\phi_{ll} > 1.575$, $M_T < 600$ GeV	10.9±1.1	4.6±2.3	151.9±3.6	30.8±4.2	38±38
b-tagged signal region	$\Delta\phi_{ll} < 1.575$	-	1.14±1.14	-	-	-
b-tagged control region	$\Delta\phi_{ll} > 1.575$	-	5.71±2.55	-	-	-

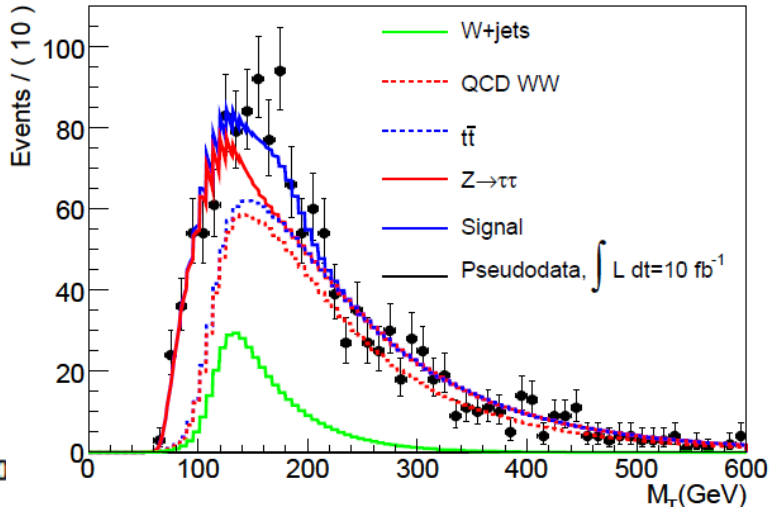
(単位=fb)

H->WW->lνlν+no jet

Signal region

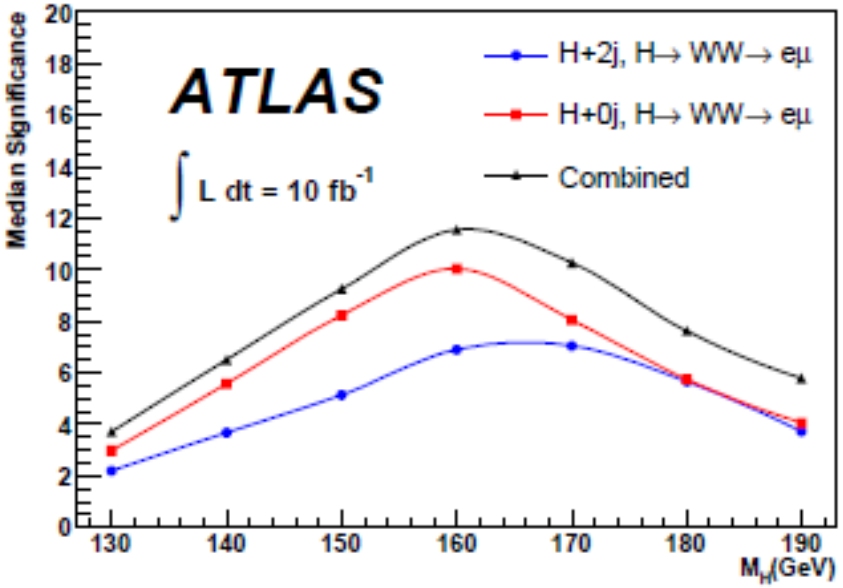


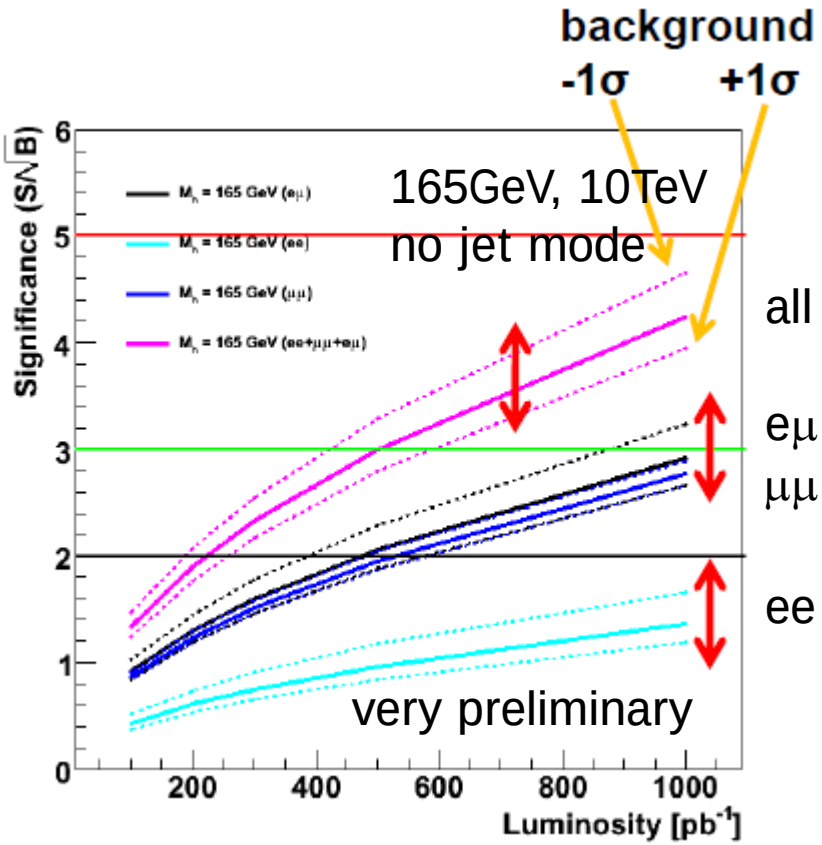
Control region



- Control regionは基本的にnormalizationを求めるために使う。
  - WWは上記の分布から。
    - 前提としてW+jetsのnormalizationが必要だが、これは”tight+loose”法で可能である。(増渕君)
  - ただし、分布の形が同じではない。
- Shapeを(できる限り)データから求めることが今後の課題
  - MCによる補正が必要になる->どこまで理解できるか？

H->WW->lνlν(+no jet)



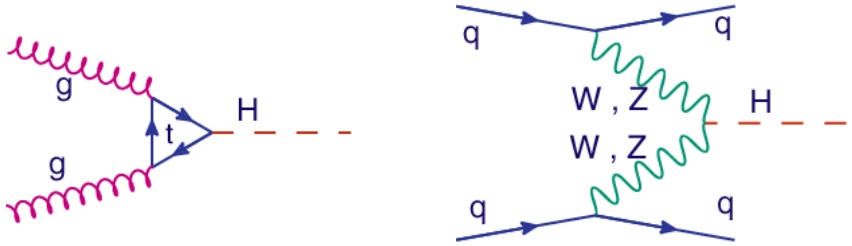


- 10fb^{-1}あれば130GeV以上は問題なし。(図はeμのみ)
- eeはelecのefficiencyがmuonと比較して悪いこととW+jetsのBGが抑えられないためμμより悪い。
  - 詳細な研究が必要
- 200pb^{-1}ではどうか？Do the best
  - Low mass Higgsの詳細な研究を開始しつつある。

N_S~10, N_B~40 with 200pb^{-1} (165GeV, 10TeV)

H->γγ

- 200pb^{-1}の物理？
  - S=15fb, B=640fb at 10TeV -> N_S~3, N_B~130
- Additional jetの取り扱い等で3種類の解析方法がある。

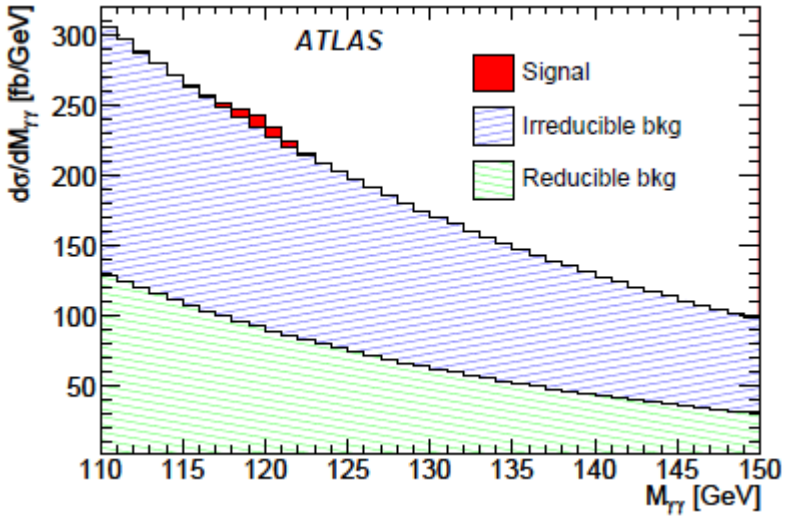


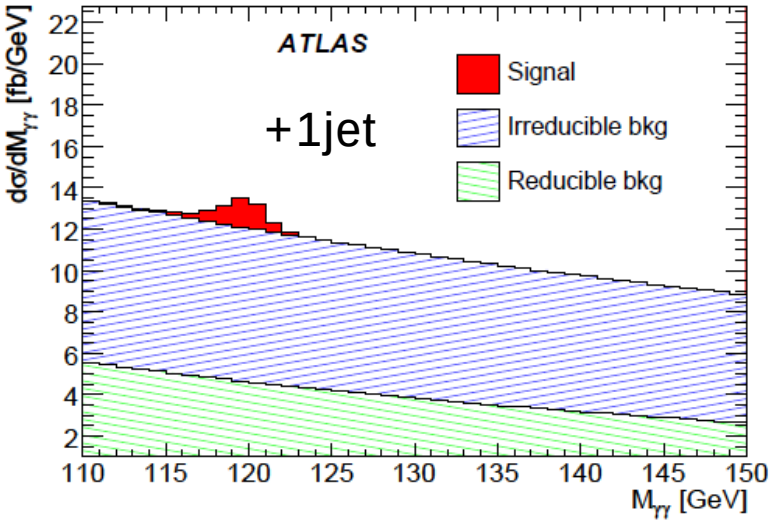
  - 単純に2つのphotonを要求する。(inclusive analysis)
  - 2jetを要求する。-> VBF processをtagするため。
  - 1jetを要求する。
    - GF+1 additional jet
    - VBFで1つのジェットがrecできない、あるいは、アクセプタンス外。

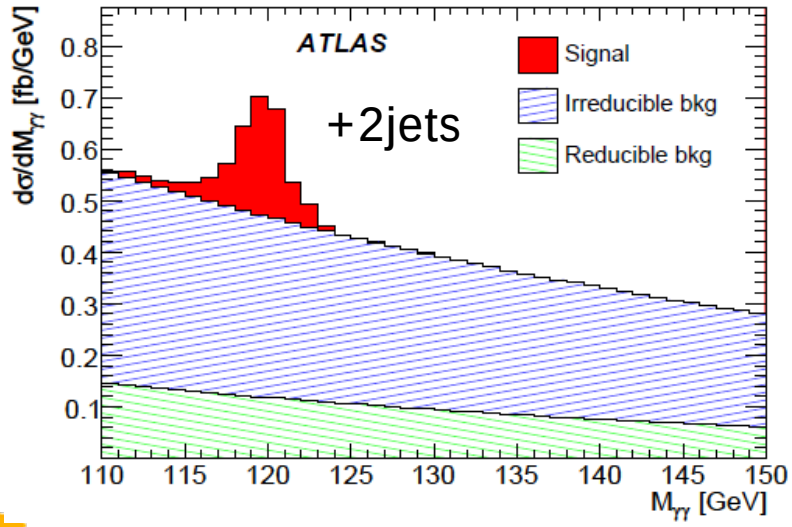
H->γγ

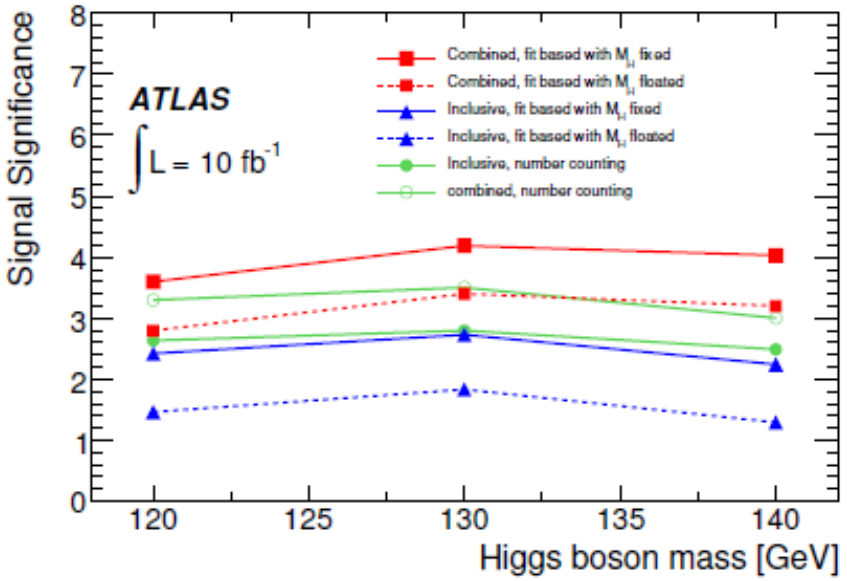
m_H=120GeV

inclusive

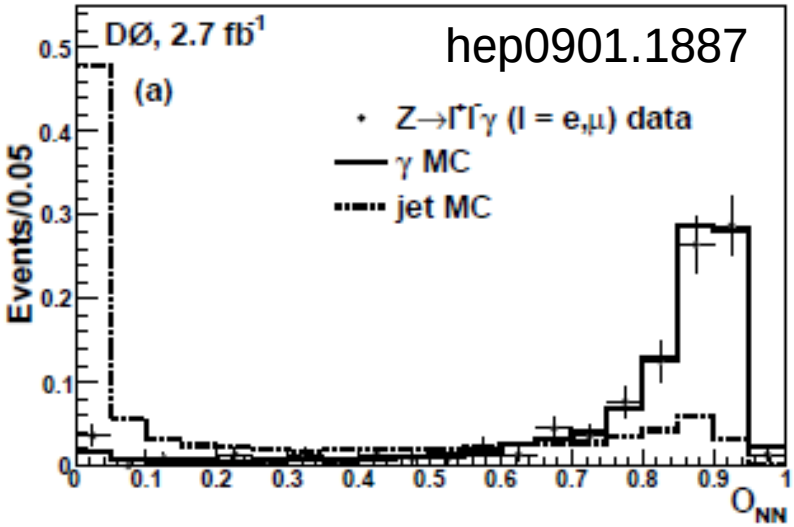




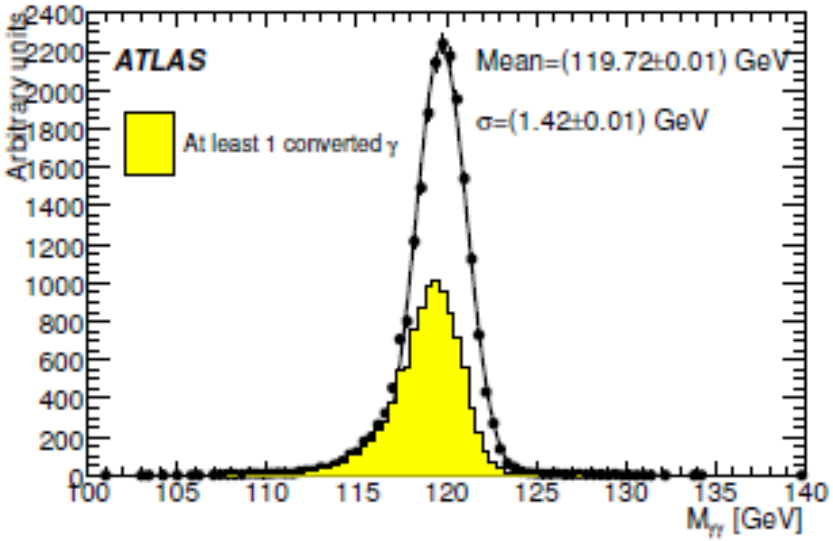




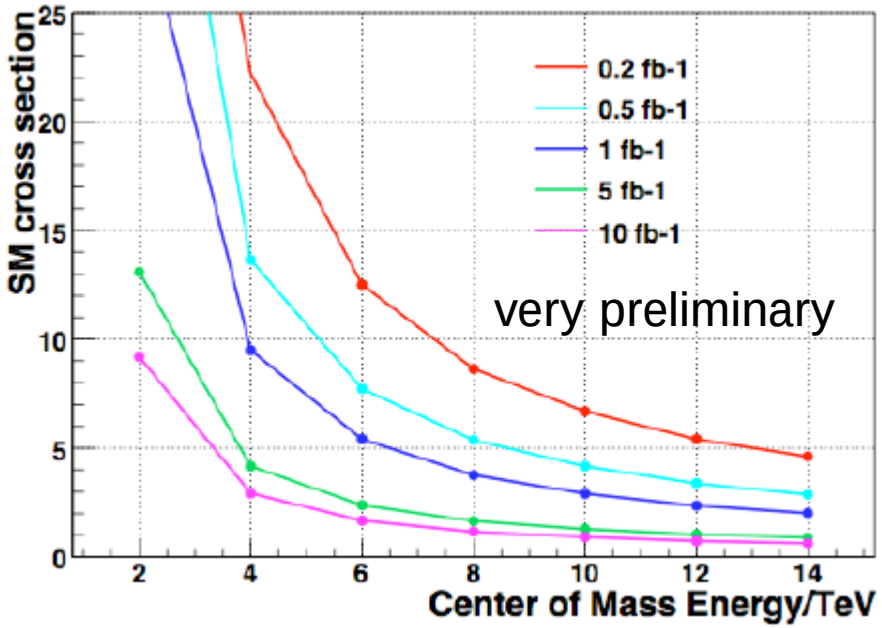
H->γγ



- トリガー関連の研究
  - データからのTrigger rateの見積もり
    - Pure photonを選びだせない。
  - トリガーによるバイアス
    - トリガーのIsolation条件がイベントセレクションにバイアスをかける可能性がある。
      - 実験初期はIsolationがないトリガーメニューを使う予定。g20_loose
- Photon fake rateの見積もり
  - データからphoton fake rateを算出する方法は数種類研究されている。
    - 結果の取り扱いにおいては、データとMCの比較が中心である。
      -> 直接H->γγの解析データに応用できるようにしたい。
- Side band analysisの再チェック(CSC bookではまじめにやっていない)
- Photon efficiencyの見積もり
  - Z->eeとMCによる補正から。
    - Conversionが多いためカロリーメータ前の物質量をきちんと評価できるかが鍵。
      - 約35%がconversionする。
  - Z->μμγから直接求める。



H->γγ

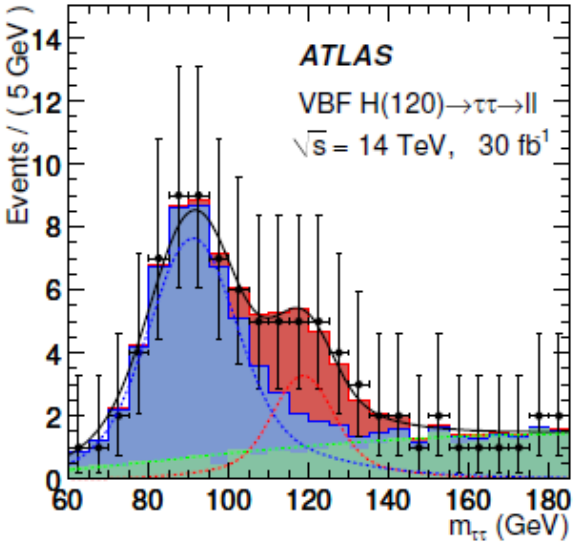


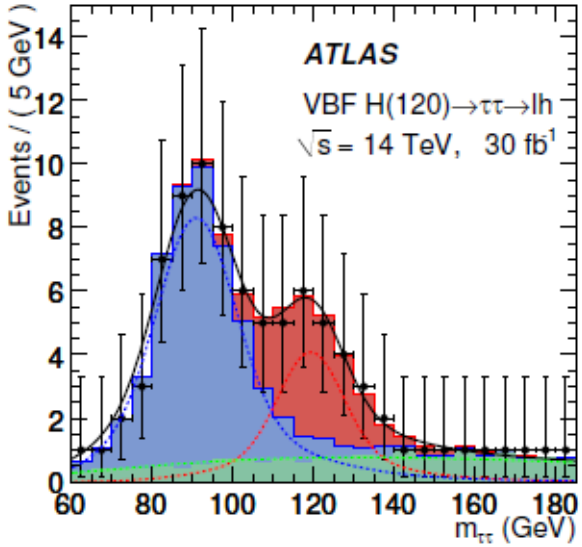
- 10TeV, 10fb^{-1}ならOK.
  - BG減への改善があれば、5fb^{-1}でも可能。
- 10TeV, 200pb^{-1}なら約7倍のx-secが必要。

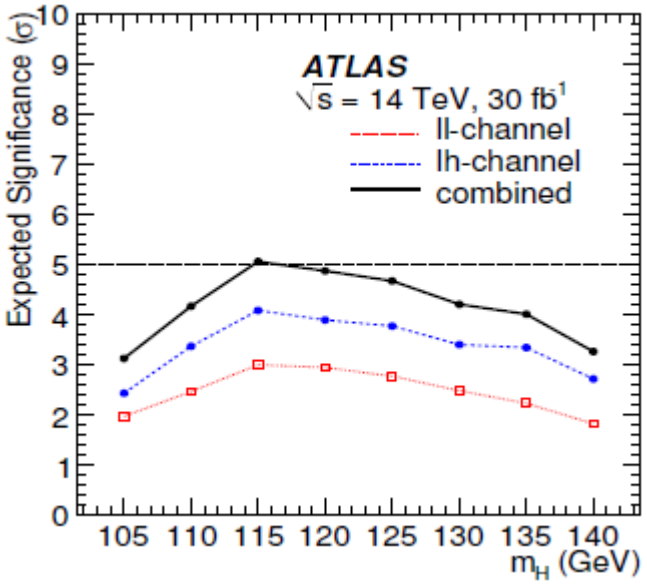
VBF H->ττ

- 200pb^{-1}の物理？ N_S~<0.1
- Analysis
  - ll channel
    - 2 leptons (e or mu)
    - Forward jets
    - Missing Et
  - lh channel
    - 1 e or mu
    - 1 hadronic tau
    - Forward jets
    - Missing Et
- Single e/mu triggerを使っているが Trigger rateは予想以上に大きい。
  - いわゆるe25やmu20を10^{33}の条件で使えるか？->厳しいのでは？というのが本音
  - Combined trigger menuを研究して提案する必要がある。
    - 2 lepton
    - 1 lepton + tau + X etc

Results w/o pileup





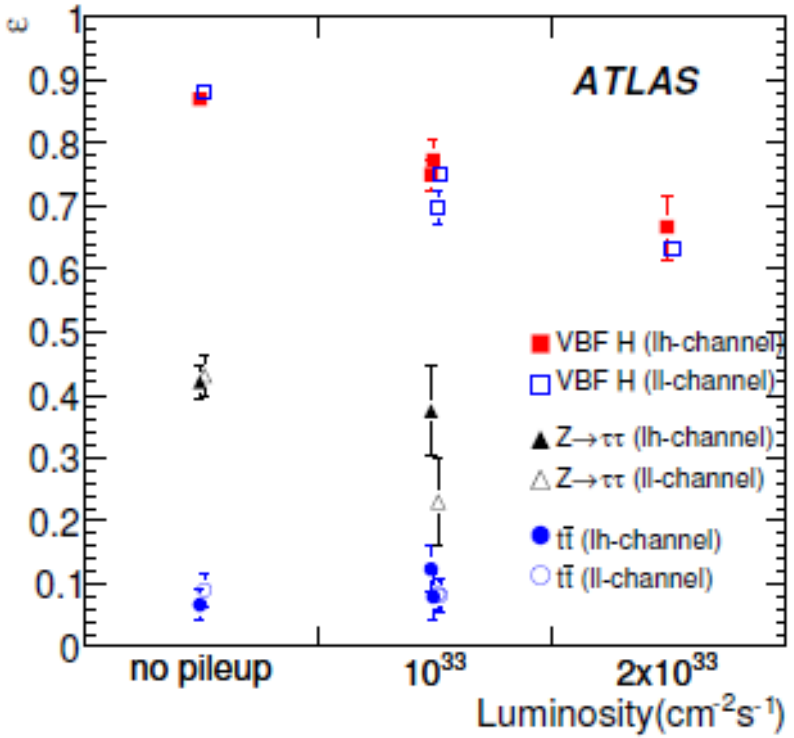


VBF H->ττ

- Pileupが与える影響の研究
  - Central jet vetoへの影響
    - イベントバーテックスの同定
      - イベントバーテックスから来たジェットだけを使う、など
    - 代替案の研究
      - トラック
      - トラックジェット
  - TauIDへの影響
    - 次ページ

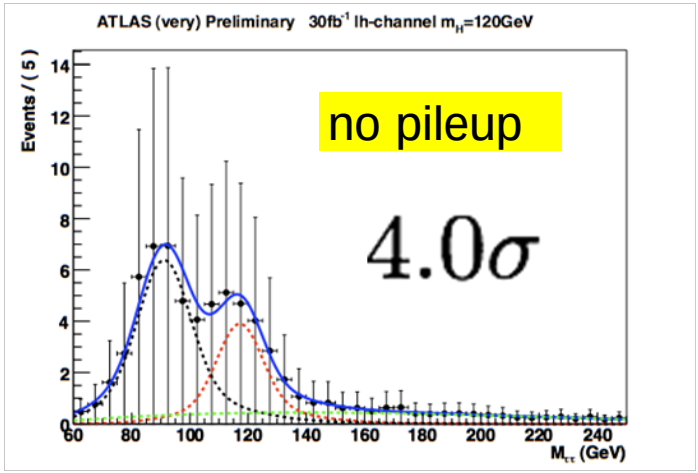
- Central jet veto for ll, lh チャンネル
  - Reject events that have any jet of Pt>20GeV in the central region (|η|<3.2).

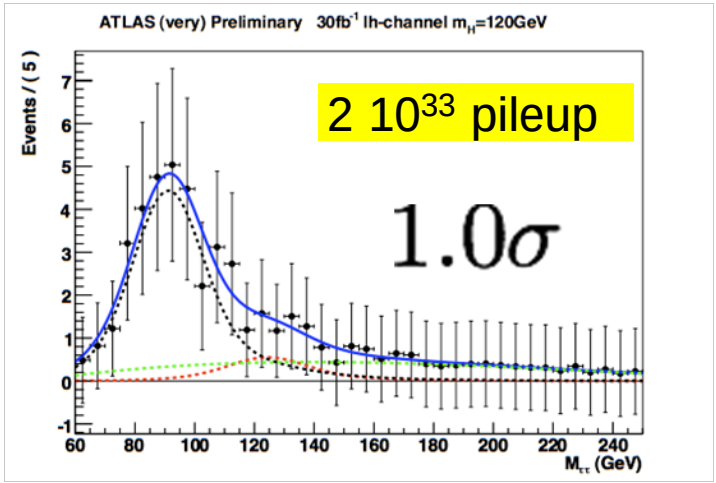
Survival probability by CJV as a function of luminosity



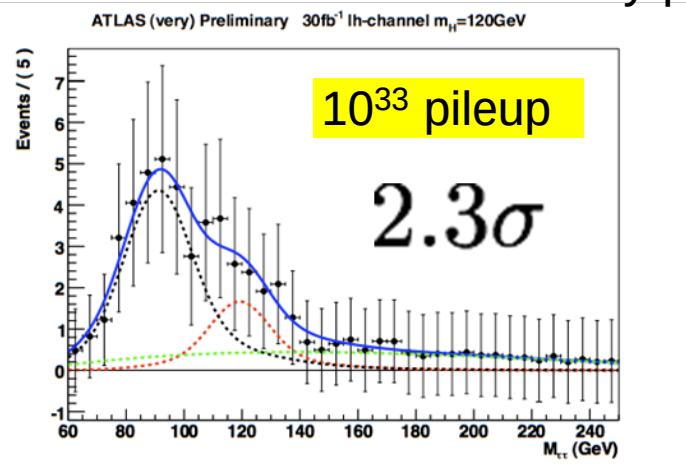
VBF H->ττ

lh-channel, m_H=120GeV, 30fb^{-1}





very preliminary



No pileupで求めたLikelihoodをpileupがある状態で使った場合の(古い)結果

- Pileupの影響が非常に大きいことを表している。

「対策」

- ルミノシティ依存のIDを準備する。
- ルミノシティ依存性の比較的小さいものを利用する。

VBF H->ττ

- Backgroundsの研究 <- 実験初期はこれ
  - Z->ττ+njets (irreducible)
  - W+njets, ttbar, QCD (reducible)
    - b-veto is applied in ll channel.

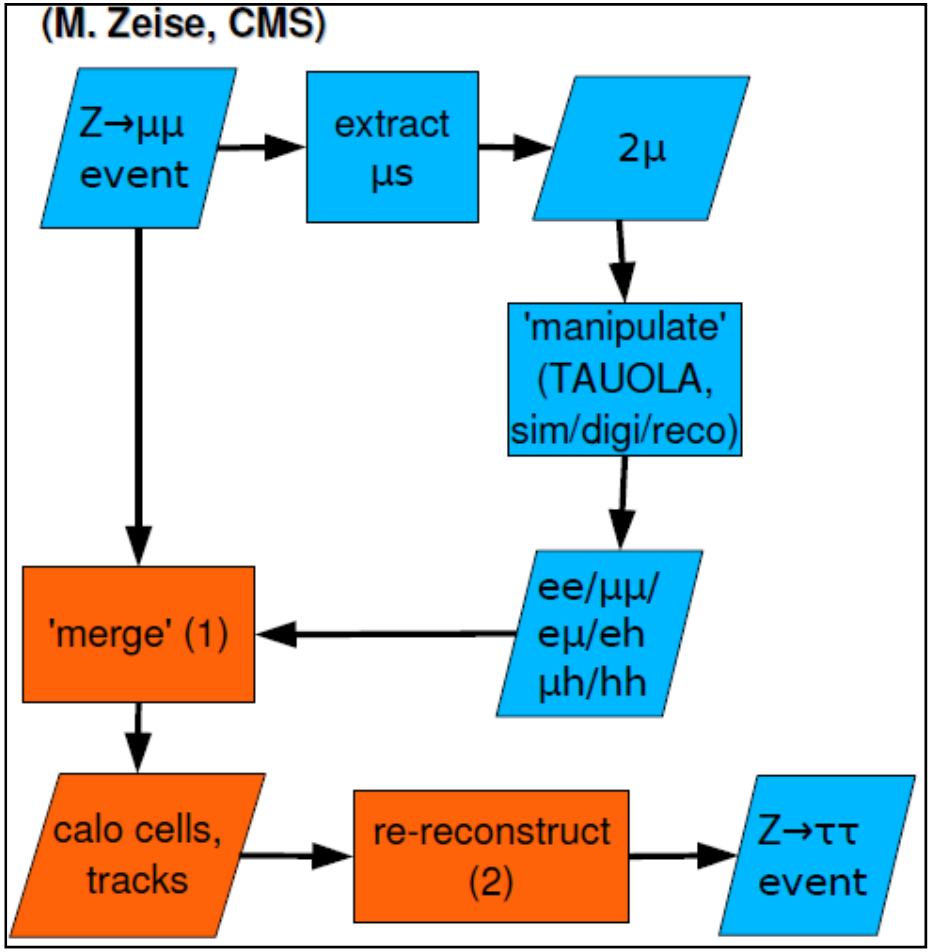
channel	σ×BR (in fb)	preselection (in fb)	full selection (in fb)	events with 200 pb^{-1}
VBF H(120)→ ττ, ll	175×0.124	3.1	0.25	0.050
VBF H(120)→ ττ, lh	175×0.456	4.5	0.37	0.074
VBF H(120)→ ττ, hh	175×0.420	6.5	0.19	0.038
bbh/A(120)→ ττ, ll (≥1 b-jet)	19900×0.124	98	16	3.2
bbH/A(200)→ ττ, ll (≥1 b-jet)	3800×0.124	27	4.7	0.94
bbh/A(120)→ μμ (0 b-jet)	70	46	29	5.8
bbh/A(120)→ μμ (≥1 b-jet)	70	46	4.3	0.86
bbH/A(200)→ μμ (0 b-jet)	13	9.2	5.3	1.06
bbH/A(200)→ μμ (≥1 b-jet)	13	9.2	0.99	0.198

Table 2: Background cross sections at 10 TeV.

channel	σ×BR (pb)	events with 200pb^{-1}
Z→ ττ	1350	270000
Z→ ee	1350	270000
Z→ μμ	1350	270000
W→ eν	14300	2860000
W→ μν	14300	2860000
W→ τν	14300	2860000
ttbar	396	79200
ttbar with ≥1l=(e,μ,τ) from W-decay	215	43000
Zbb, Z→ ll (m_{ll} >30 GeV)	60 (Alpgen)	12000

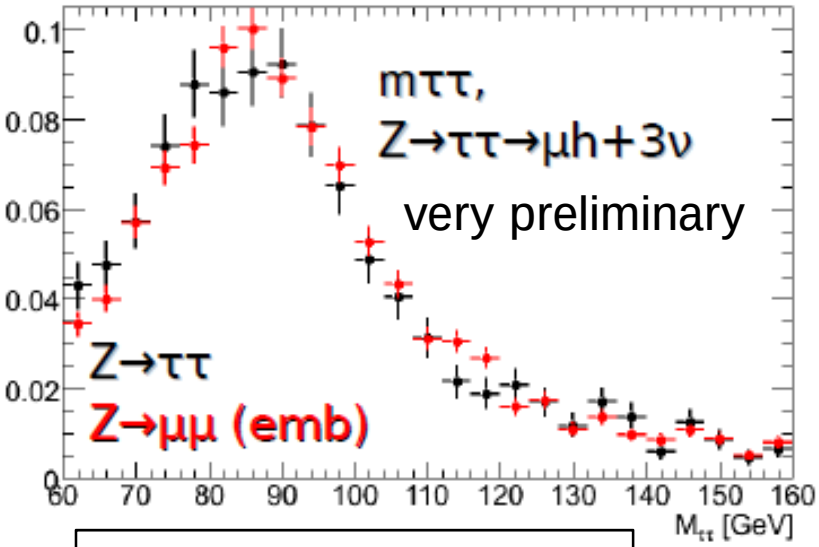
VBF H->ττ

- データからのZ->ττの分布の見積もり



$Z \rightarrow \mu\mu$	
Acceptance	at least one truth muon within $\lvert\eta\rvert < 2.8$ and $p_T > 5$ GeV
Trigger	mu10 EF trigger selection
TwoMuons	at least two muons (Staco) in $\lvert\eta\rvert < 2.5$ and $p_T > 20$ GeV
Charge	opposite charge
Isolation	ID isolation within a 0.4 cone ($\Sigma p_T < 5$ GeV, $\Sigma_{tracks} < 6$)
ZMass	± 20 GeV mass window

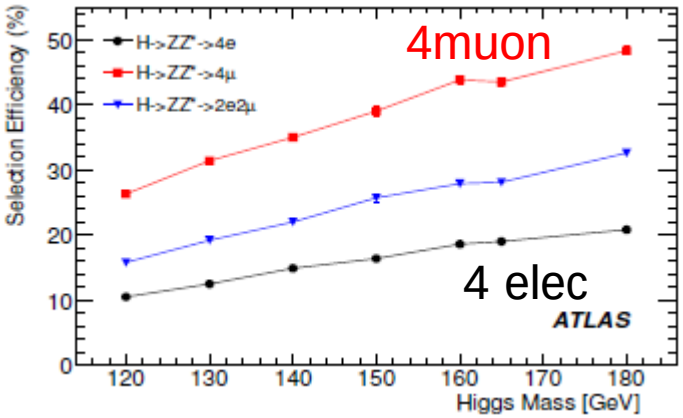
Purity ~ >99% (very preliminary)
(QCDからのfakeをきちんと評価する必要有り)



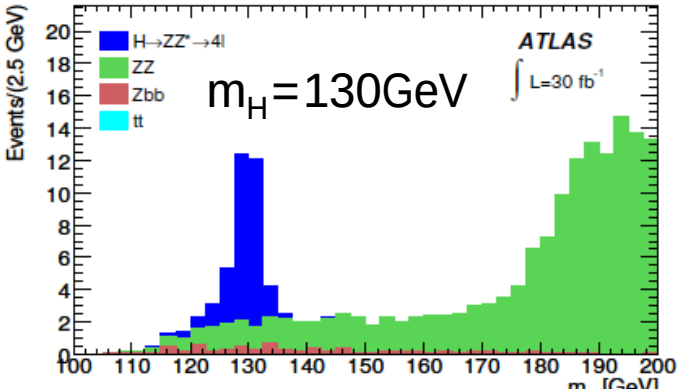
まだ開発途中の結果です。

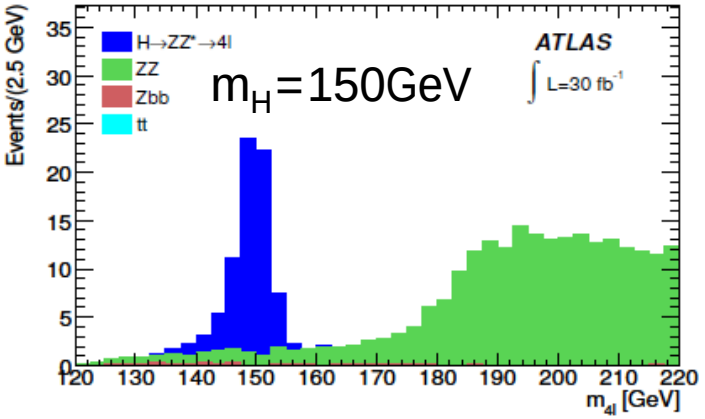
H->ZZ->4l

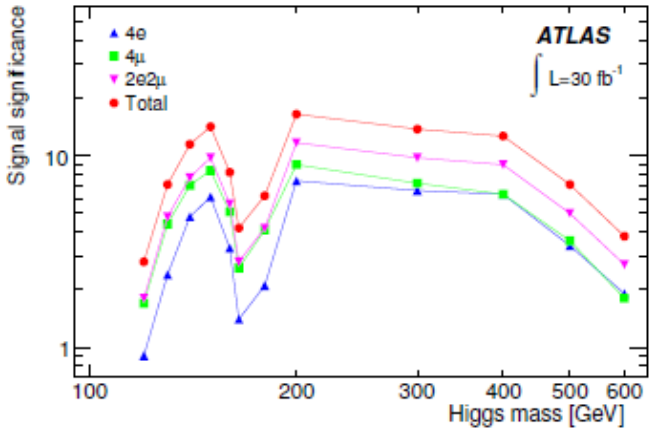
- 200pb^{-1}の物理？ N_S~<1
- Analysis
  - 4 electrons / 4 muons
    - Muon : combined+low Pt
    - Elec : 2 loose high Pt + 2 medium low Pt
  - 2 electrons + 2 muons
- Single/double e/mu trigger
- Electron/muon identification



- BG of ZZ and Zbb
  - lepton isolation, impact parameter are used to reduce Zbb background.
  - ZZ is irreducible background.







H->ZZ->4l

- Normalization: Z->llからZZ->4lへ

  Side bandから算出する以外の方法の紹介

$$\rho_{DY} = \frac{\sigma(q\bar{q} \to ZZ \to 4\mu)}{\sigma(q\bar{q} \to Z \to 2\mu)}$$

  – Z->μμのx-secは1fb-1程度のデータがあれば精度よく測定可能。(0.2% stat, 2.4% syst)

$$2016 \pm 4\ (\text{stat}) \pm 49\ (\text{syst})\ \text{pb}\ (\text{for}\ 1\ \text{fb}^{-1}) \quad (14\text{TeV})$$

  – この方法への疑問
    - 経験的にループに由来するk-factorは非常に大きいことを知っている。
      – たとえばK-factor(NLO to LO) ~ 1.8 for gg->H->γγ
      – 計算のオーダーをあげると不定性が十分大きく残っていることが分かる。
        » ~2.x (NNLO to LO) for gg->H->γγ
    - gg->ZZ(NNLO)の計算ができるからそれで十分と言えないのでは？

    等の意見がある

  不定性が大きいかもしれないがconsistency checkのために必要。(できることはすべて行う)

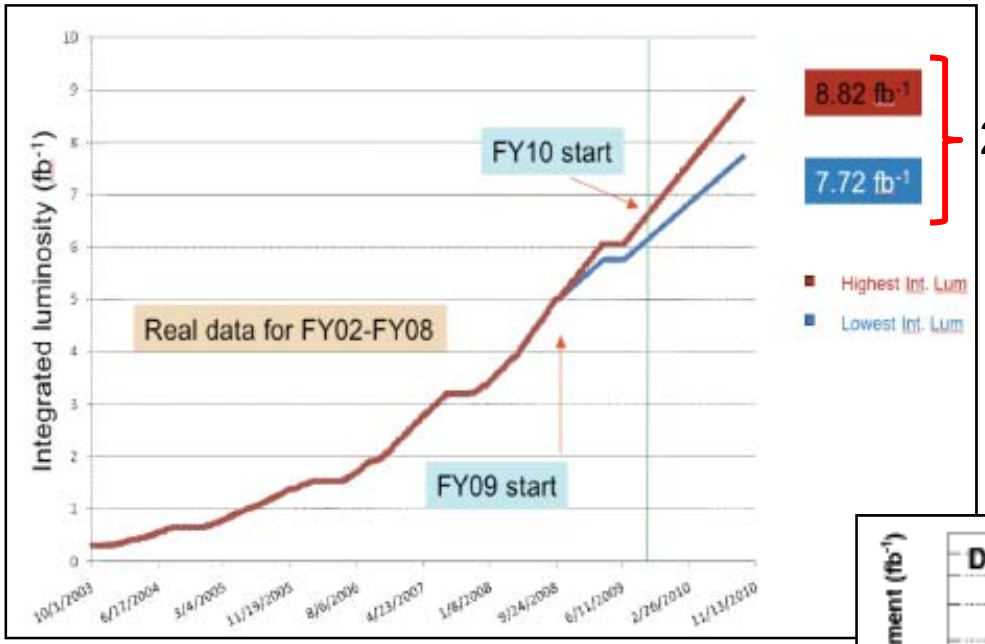
  その他、W+jets <= γ+jets, WW+jets <= γγ+jets などのアイデアも検討中(for H->WW)



気になること

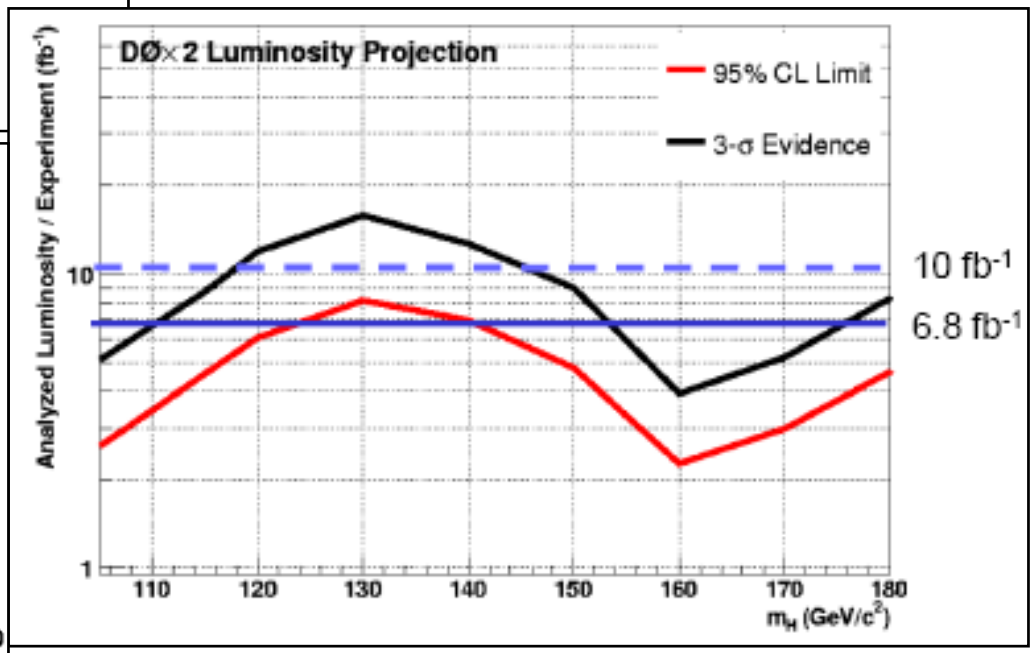


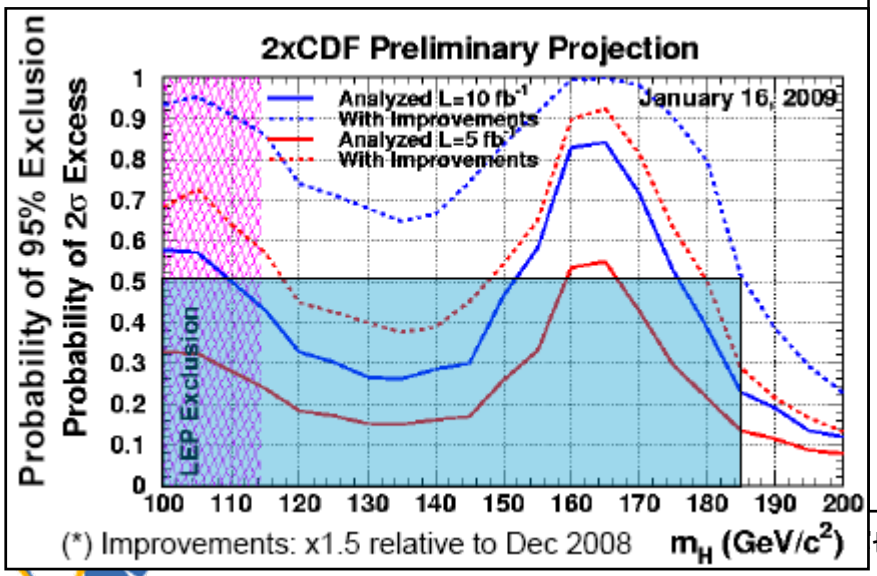
テバトロンの予定



2010年末の予定

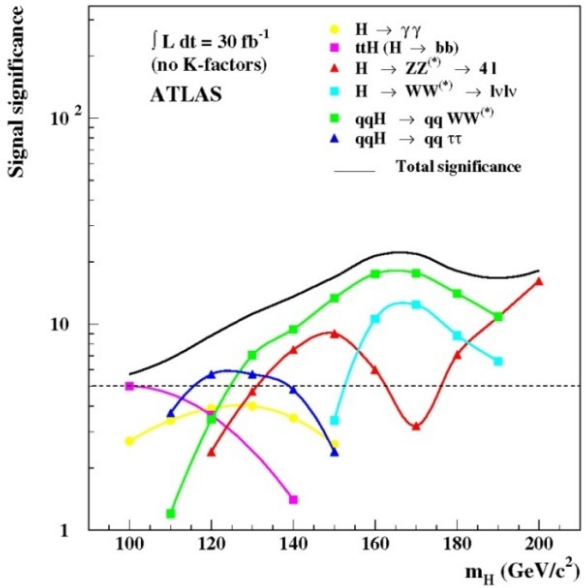
10fb^{-1}/expのデータがあれば
-185GeV以下は95%CLでexclude
-Low mass/high mass -> 3σ evidence

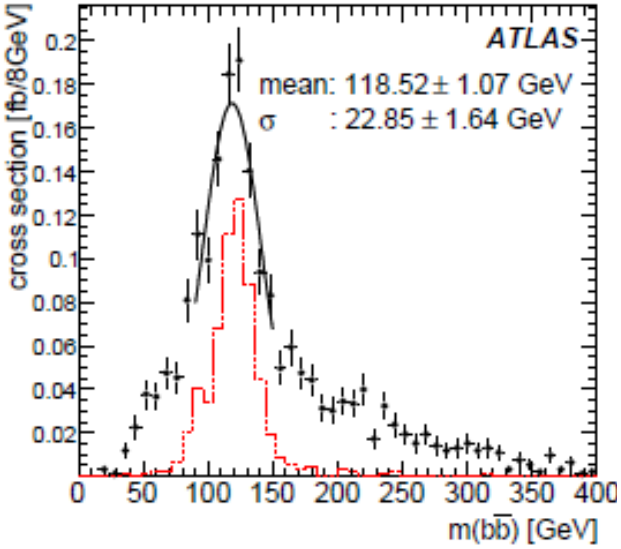


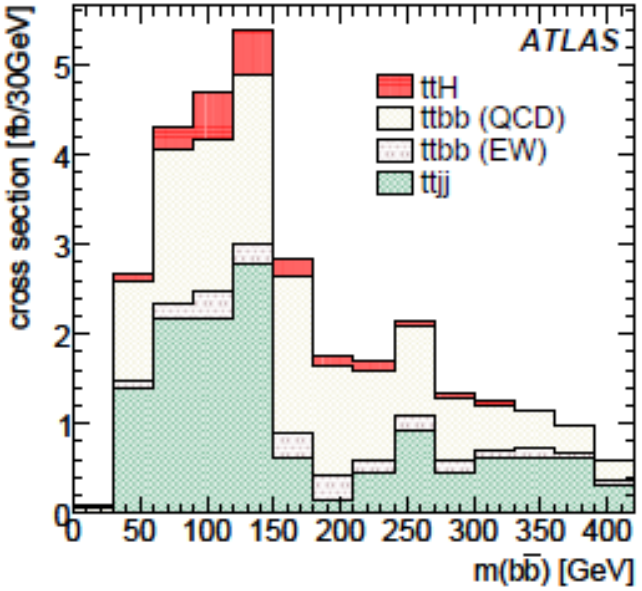


bクォーク湯川結合

- ttH, H->bbはDiscoveryチャンネルとして報告されていた。
  - 軽いHiggsの場合、BR(H->bb)がdominate.
  - Yukawa couplingの性質の理解する上できわめて重要.







「今後の課題」

- Higgsの質量が分かっている条件での再解析
- 積極的に他のモードも研究する。(ttHを捨てるという意味ではない)
  - High boosted higgs (by subjet method)
  - VBF+gamma/W

まとめ

[LHCの発見能力]

- 130GeV以上なら5fb^{-1}のデータで発見可能 -> 2011年？
- 130GeV以下なら10-30fb^{-1}のデータが必要 -> 2012-13ぐらい？

[Tevatronの状況]

- 160-170GeVをexcludeした。
- 10fb^{-1}/expのデータ(2011年)で185GeV以下をexcludeする予定。

[主要モードの研究状況および課題]

- 10TeVの研究にシフト
- 実験初期は特にH->WWが鍵
  - Tevatronとの競争
  - BG shapeの理解が非常に大切
- H->$\gamma\gamma$, $\tau\tau$, ZZは5fb^{-1}以上のデータが必要。
  - 実験初期はBGの理解が中心

解析状況

	bb	ττ	γγ	WW	ZZ
GF		△	○	○	○
VBF	△	○	○	○	△
WH	△		○	○	
ZH	△		○	△	
ttH	△	△	○	○	
bbH	△				

○…ポジティブに進行中　　△…結果がネガティブだった。再挑戦。これから…など

午後の部

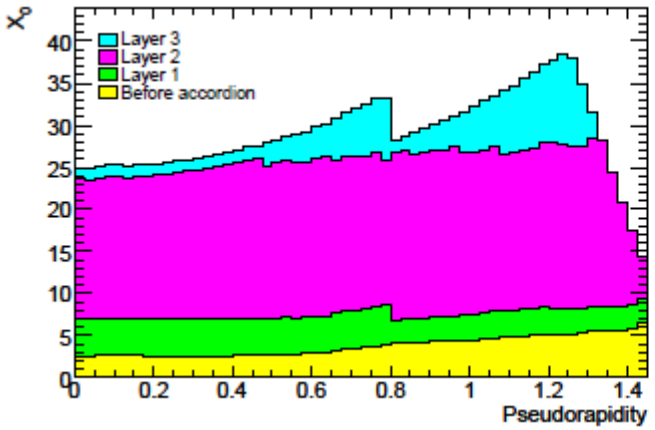
- ヒッグス機構以外のEWSBモデル等、おさえておきたいモデル
  - 「Higgslessとextra-dimension」の続き by 棚橋さん
  - その他

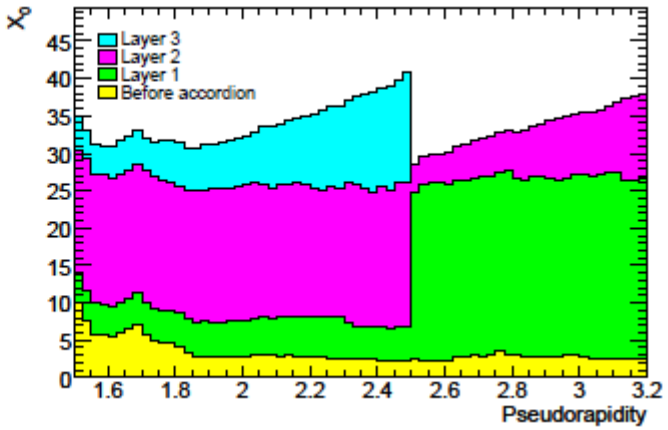
- 新しい解析モード、手法に関して
  - VBF H->bb + γ の可能性と課題 by 山村さん
  - Subjet analysisの応用 (high boosted Higgs) by 磯部さん
  - その他

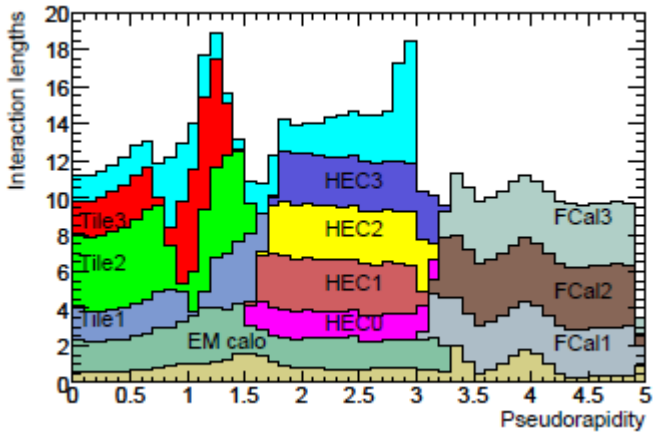


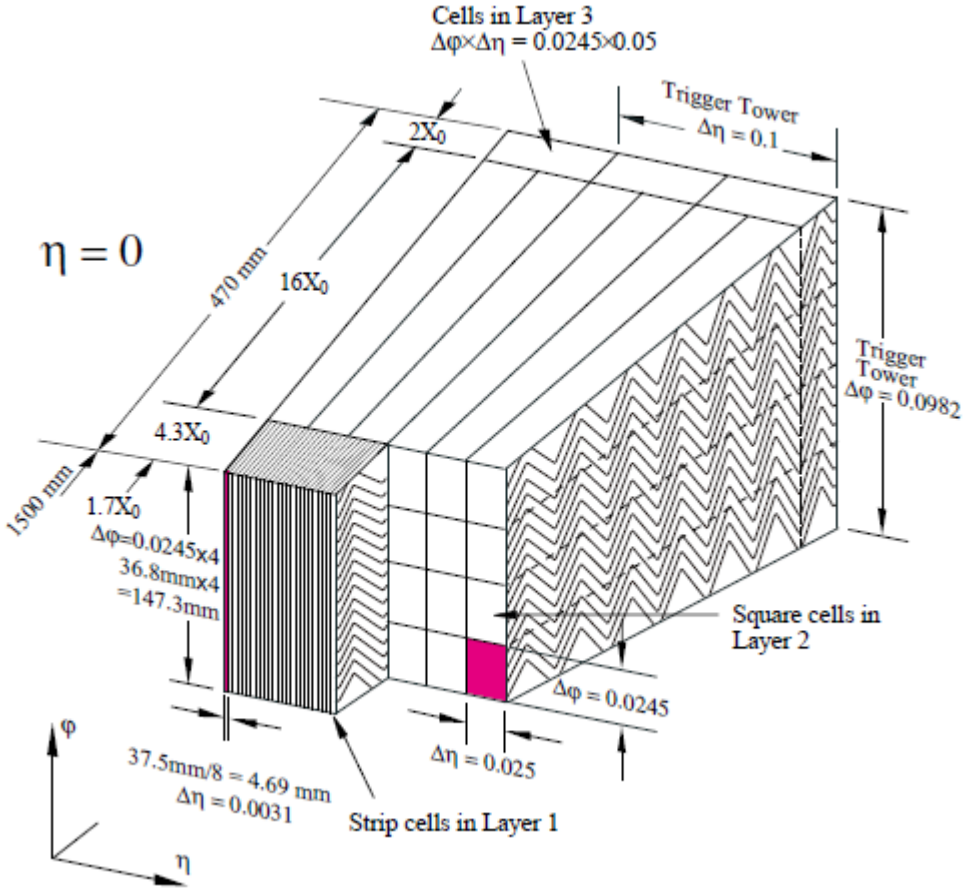
バックアップ




X_0
Layer 3
Layer 2
Layer 1
Before accordion
Pseudorapidity

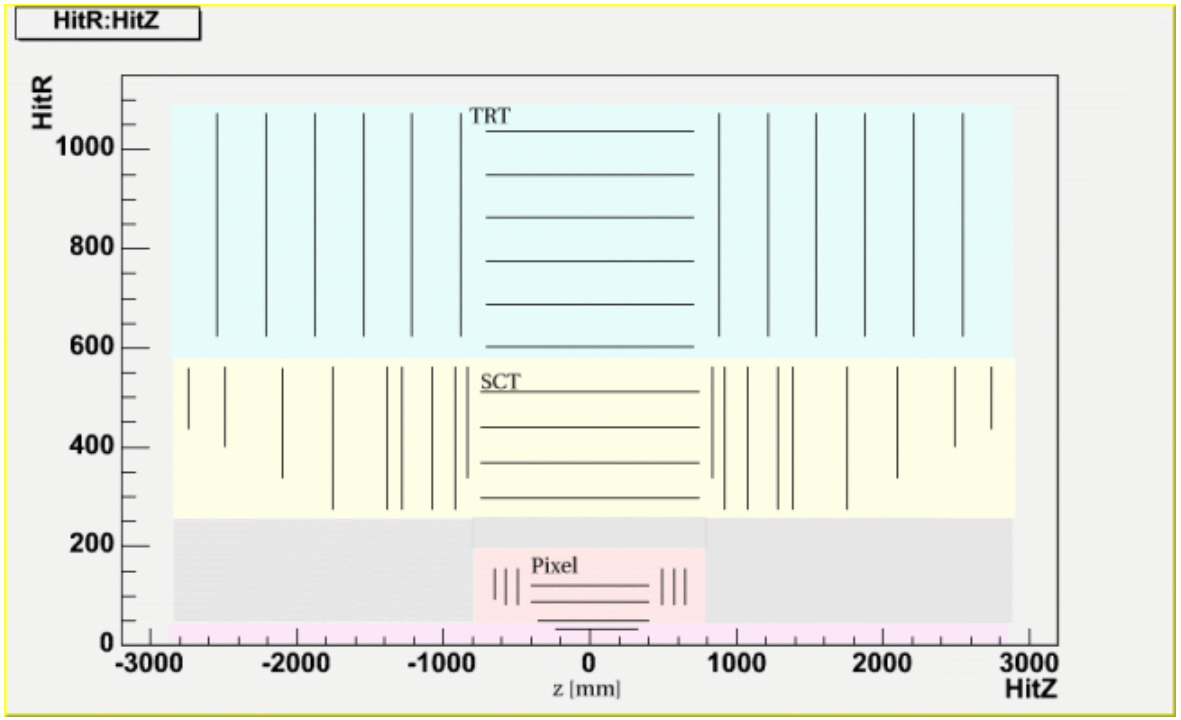

X_0
Layer 3
Layer 2
Layer 1
Before accordion
Pseudorapidity


Interaction lengths
HEC3
HEC2
HEC1
HEC0
Tile3
Tile2
Tile1
EM calo
FCal3
FCal2
FCal1
Pseudorapidity


Cells in Layer 3
Δφ×Δη = 0.0245×0.05
Trigger Tower
Δη = 0.1
2X0
η = 0
470 mm
16X0
4.3X0
1500 mm
1.7X0
Δφ=0.0245x4
36.8mmx4
=147.3mm
Trigger
Tower
Δφ = 0.0982
Square cells in
Layer 2
Δφ = 0.0245
φ
37.5mm/8 = 4.69 mm
Δη = 0.0031
Δη = 0.025
Strip cells in Layer 1
η

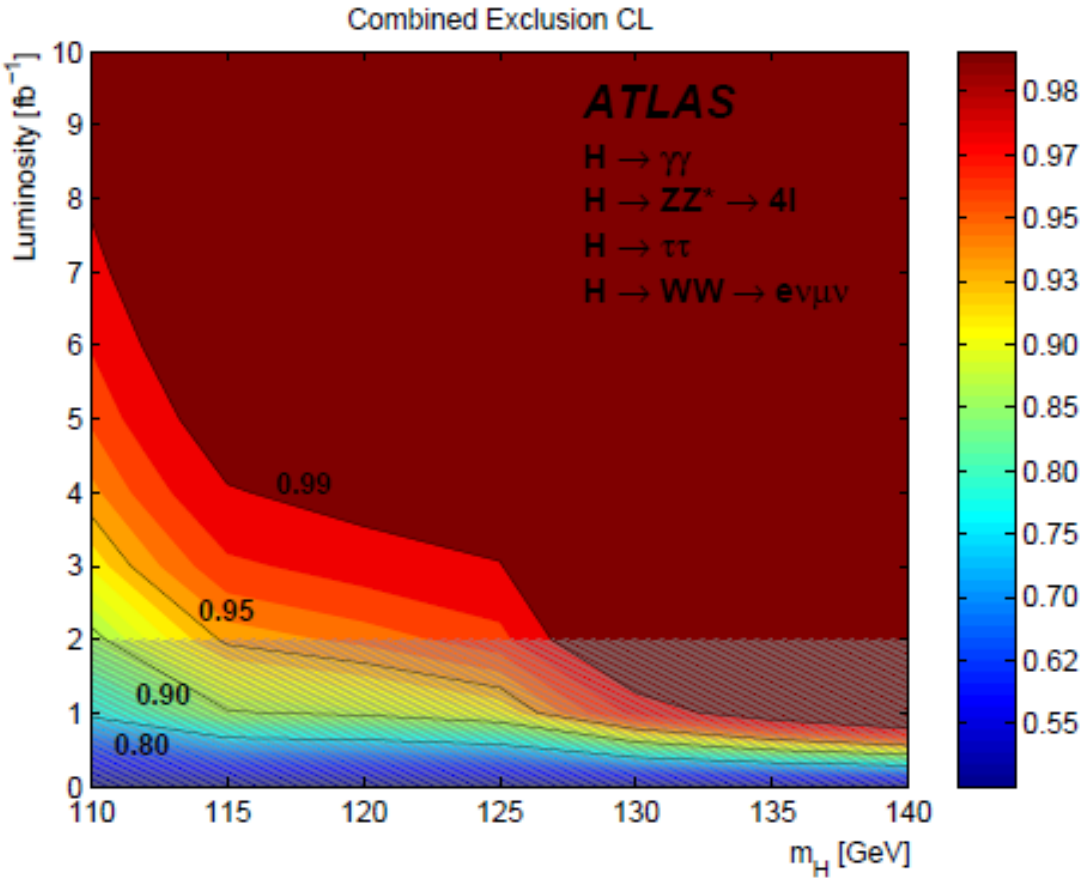
ID位置情報(これまた若干古いですが基本は同じ。)

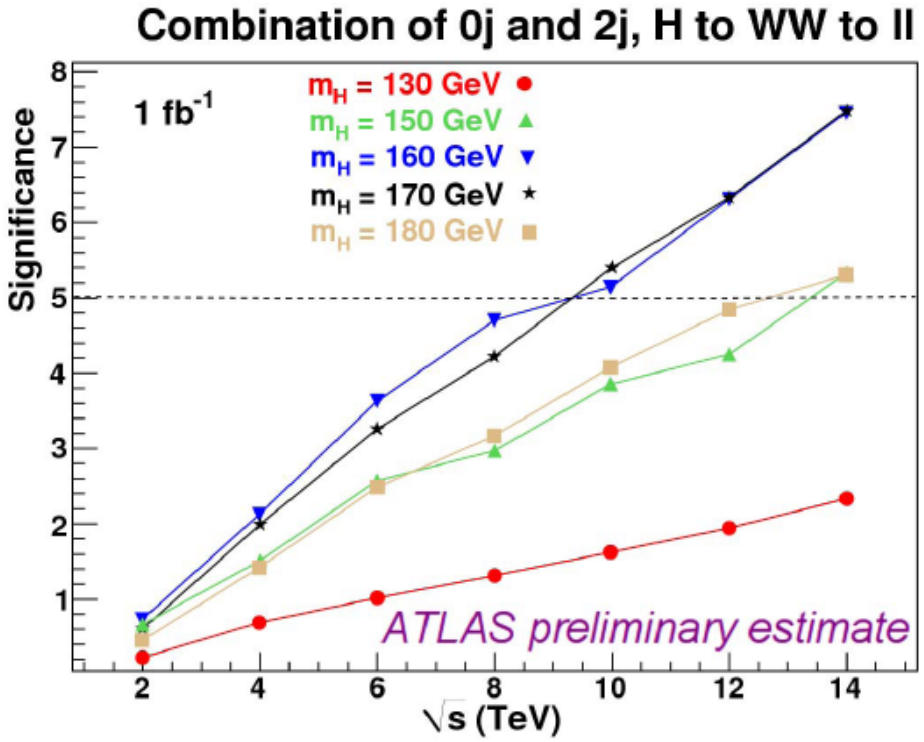
- https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/Atlas/InDetTrackingGeometry
  - DC2 layout

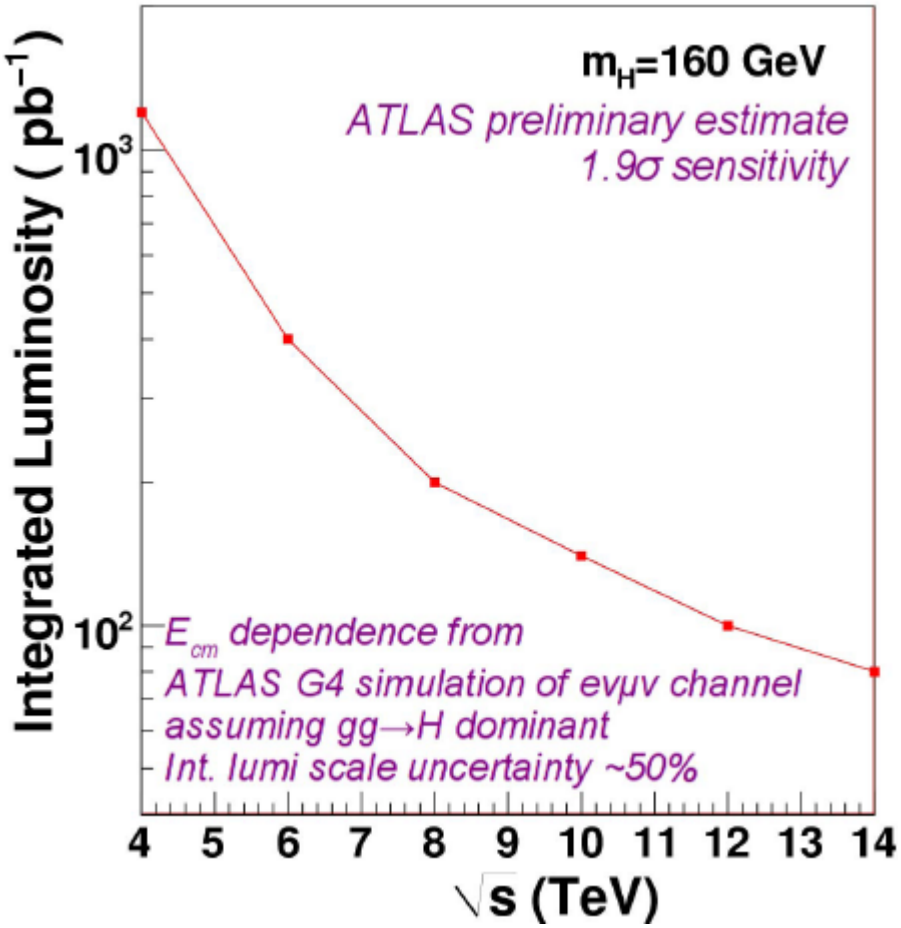


- Radius seen at geometry database
  - beampipe 3.46cm
  - Pixel 5.05, 8.85, 12.25 cm
  - SCT 29.95, 37.1, 44.4, 51.4cm

Exclusion at ATLAS

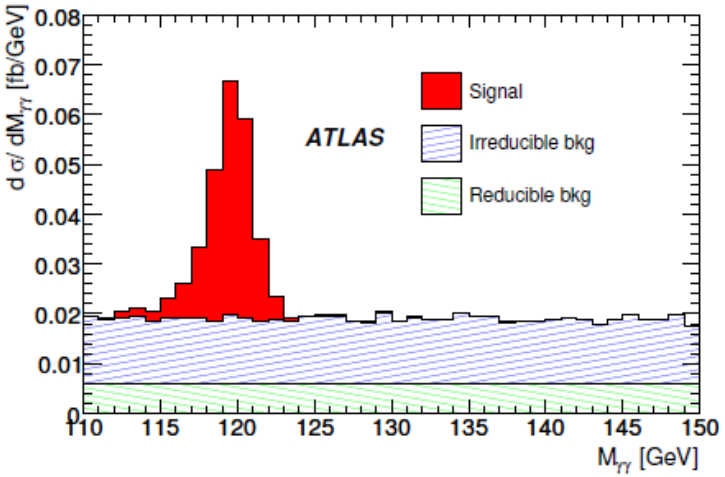


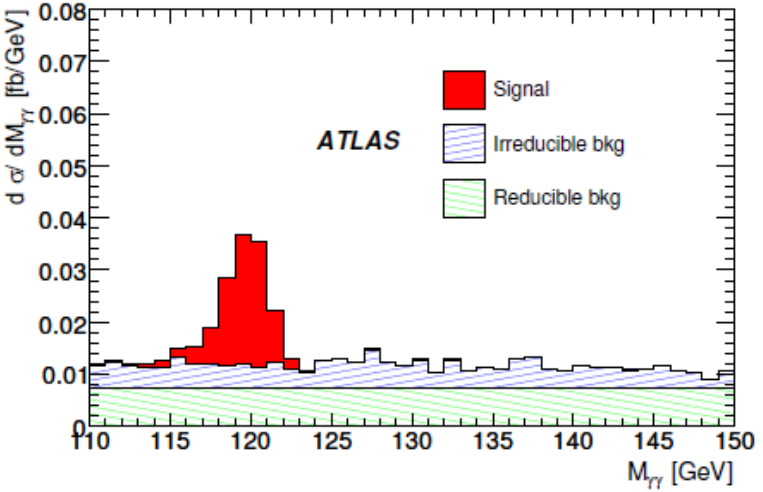

Combination of 0j and 2j, H to WW to ll
1 fb-1
mH = 130 GeV
mH = 150 GeV
mH = 160 GeV
mH = 170 GeV
mH = 180 GeV
ATLAS preliminary estimate
Significance
√s (TeV)


mH=160 GeV
ATLAS preliminary estimate
1.9σ sensitivity
Ecm dependence from
ATLAS G4 simulation of evμν channel
assuming gg→H dominant
Int. lumi scale uncertainty ~50%
Integrated Luminosity (pb-1)
√s (TeV)

H->γγ with 0/1lep+MET

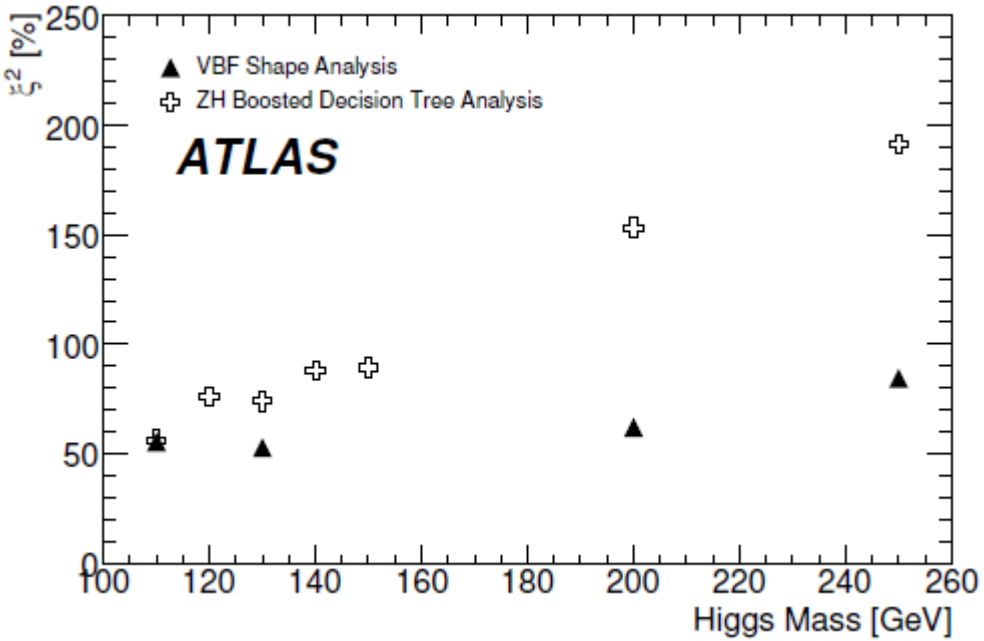
- 1lepモード
  - WH->lνγγ
  - ttH->lνγγ+X
- 0lepモード
  - ZH->ννγγ





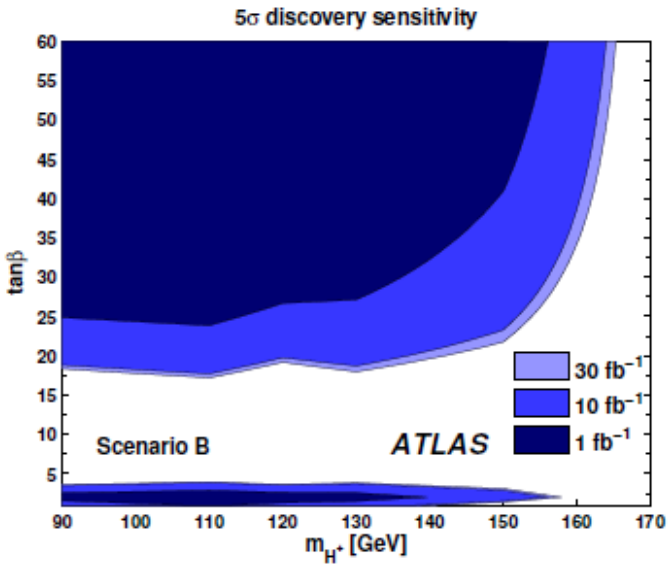
Invisibly Decaying Higgs

- VBFとWH/ZHの生成モードを使う。(CSC noteではVBFとZH)
- VBFはトリガーが問題になるが、FJ23+J23+XE100という新しいメニューを提案。(eff=55%, 2+-1Hz@10^{33})
- Countingベース。BG estimationが重要。
  - ξ^2="BR(H->inv) x σ_{BSM}" / "BR(H->inv)=100% x σ_{SM}"
    - 簡単に言うとSMと比較した値。
  - 以下の結果は95% CL(30fb^{-1})になるときのξ^2

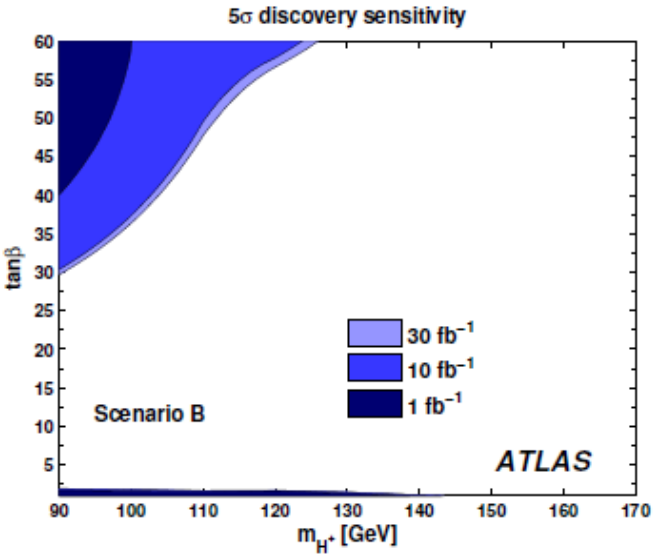


トップより軽いH^+

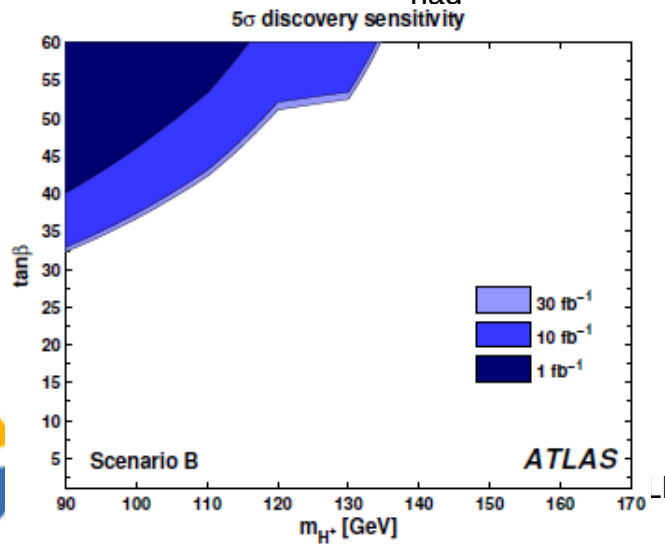
$tt\to bHbW\to b\tau_{had}\nu bqq$



$tt\to bHbW\to b\tau_{lep}\nu bqq$



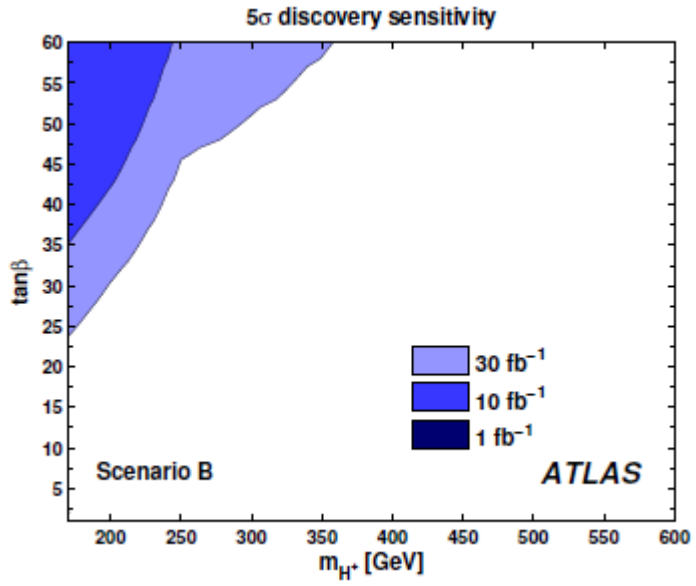
$tt\to bHbW\to b\tau_{had}\nu bl\nu$



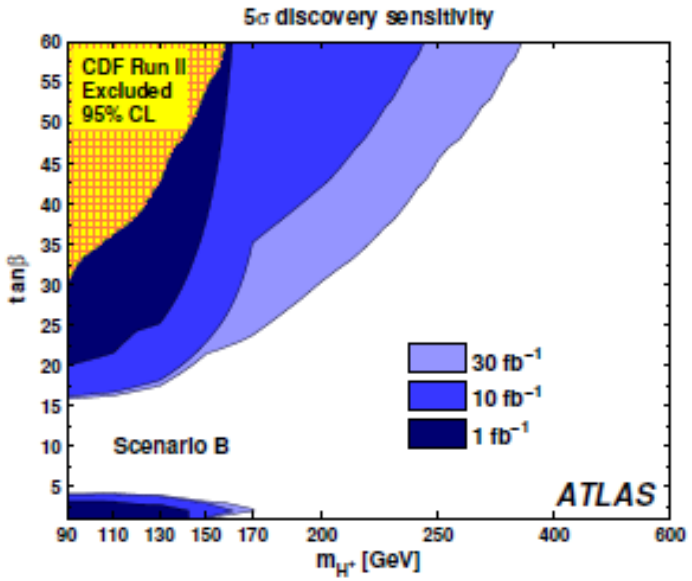
Scenario B = m_h-max

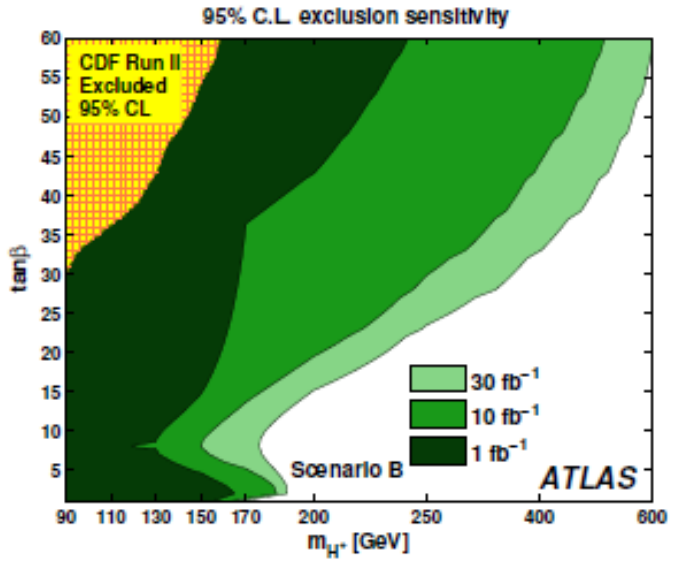
H^+

トップより重いH^+の場合：
$gg/gb \to t[b]H \to bqq[b]\tau_{had}\nu$



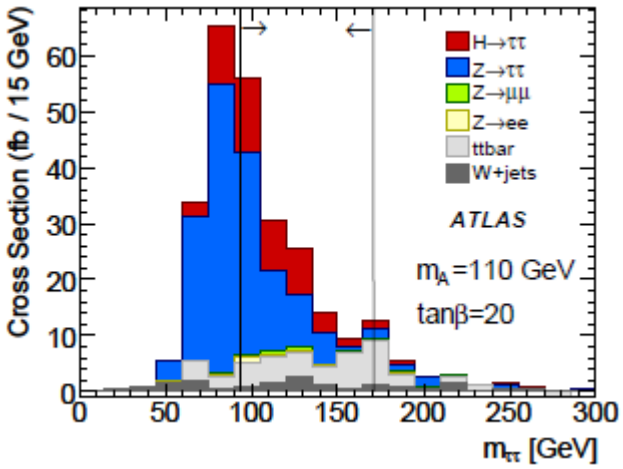
Combined result

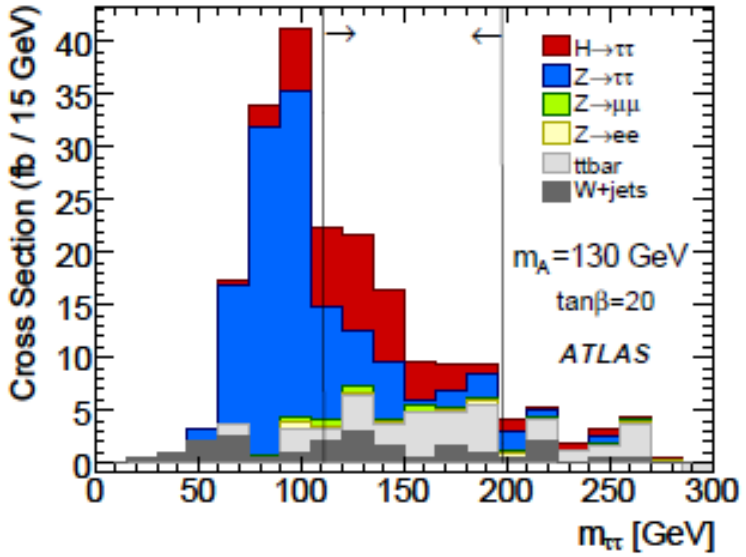




MSSM h/H/A->ττ

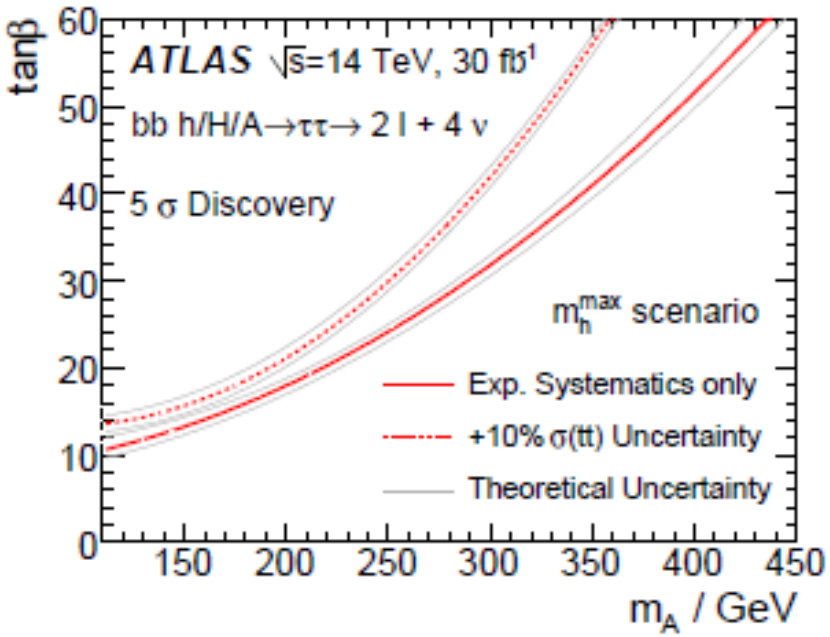
- VBF H->ττと同様にll,lh,hhモードを研究している。
- llモードのみ結果あり。
  - Peak観測がないため、
    これも"counting"ベース。
  - BG estimationが重要
    -> "Z->μμ->ττ"法

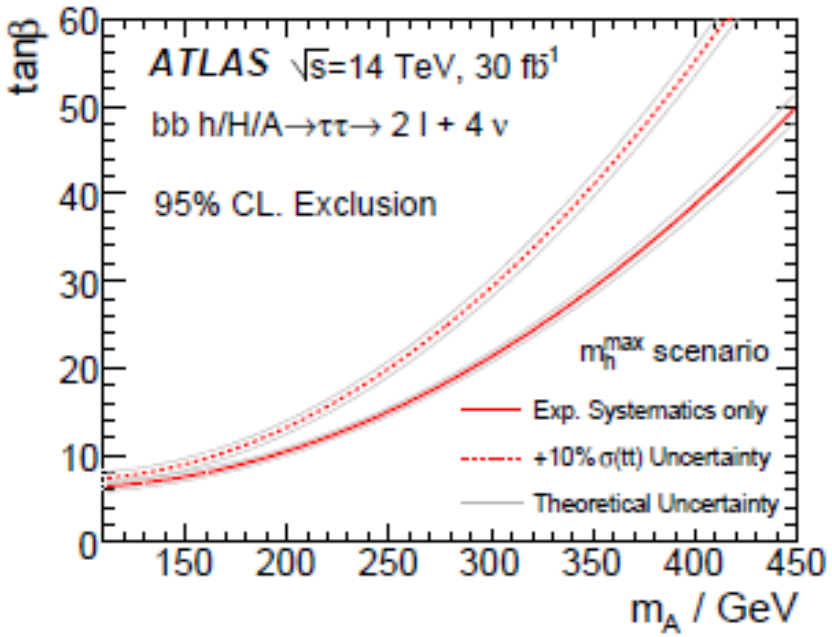




  - 個人的には、
    - b-tagged jetを要求して(つまり、bbHを期待して)、collinear近似で質量を組むのはあまりにも単純化しすぎている。
      ->改善の余地あり

MSSM h/H/A->ττ

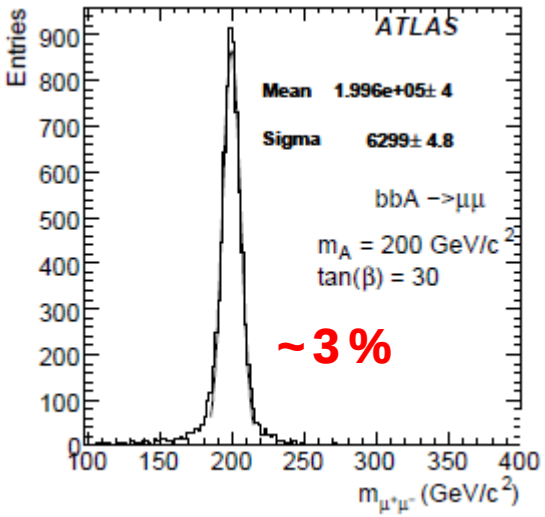

ATLAS √s=14 TeV, 30 fb⁻¹
bb h/H/A→ττ→ 2 l + 4 ν
5 σ Discovery
m_h^{max} scenario
Exp. Systematics only
+10% σ(tt) Uncertainty
Theoretical Uncertainty
tanβ
m_A / GeV


ATLAS √s=14 TeV, 30 fb⁻¹
bb h/H/A→ττ→ 2 l + 4 ν
95% CL. Exclusion
m_h^{max} scenario
Exp. Systematics only
+10% σ(tt) Uncertainty
Theoretical Uncertainty
tanβ
m_A / GeV

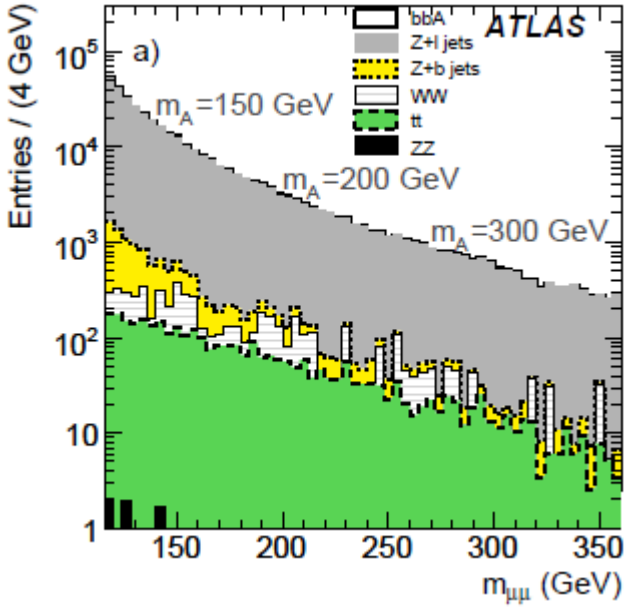
MSSM h/H/A->μμ

- B-taggingの有無で2つの解析の流れ
  - M(μμ)分布を見る限り厳しそうだが、BGはスムースなのでsubtractできる(と思う。)

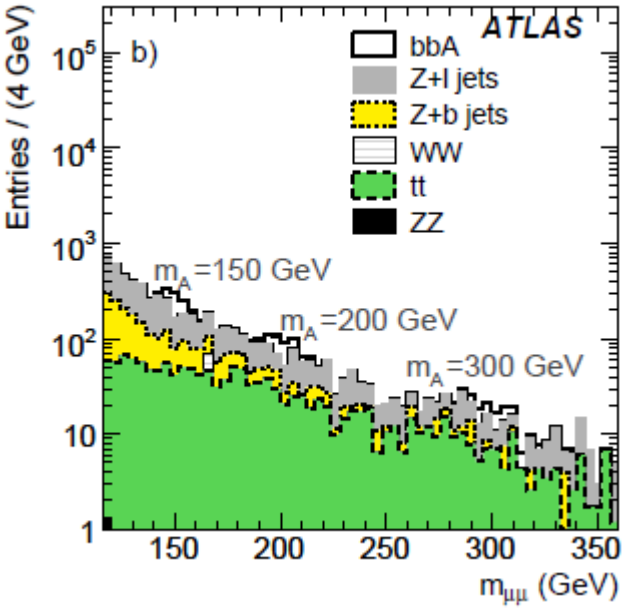
Signal only



0 b-tagged jet

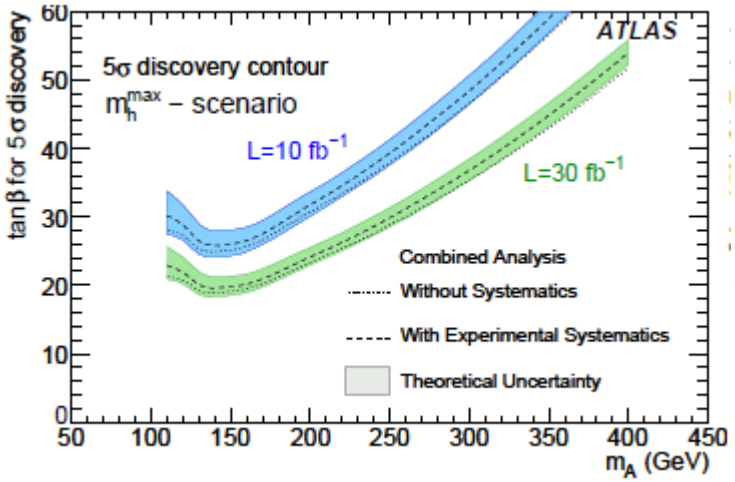


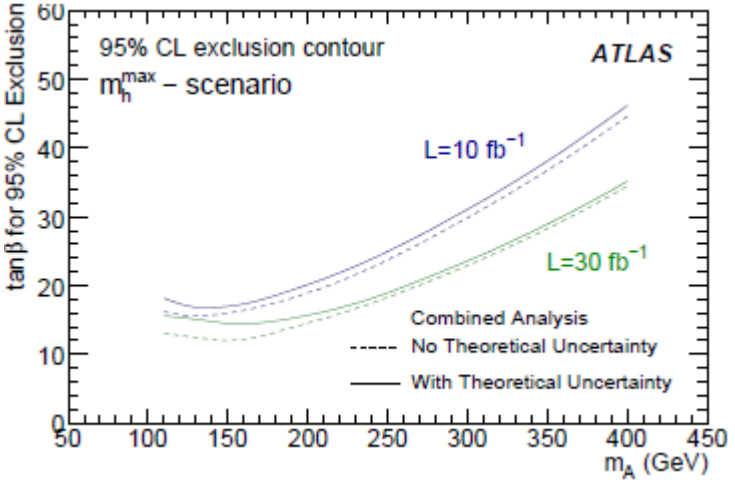
>=1 b-tagged jet



  - CSC noteでは、ttbar ee/eμからttbarのcontributionをsubtractする方法が議論されている。

MSSM h/H/A->μμ


ATLAS
5σ discovery contour
m_h^{max} – scenario
L=10 fb^{-1}
L=30 fb^{-1}
Combined Analysis
Without Systematics
With Experimental Systematics
Theoretical Uncertainty
tanβ for 5σ discovery
m_A (GeV)


ATLAS
95% CL exclusion contour
m_h^{max} – scenario
L=10 fb^{-1}
L=30 fb^{-1}
Combined Analysis
No Theoretical Uncertainty
With Theoretical Uncertainty
tanβ for 95% CL Exclusion
m_A (GeV)