



LHC-ATLAS実験におけるタウレプトン対 に崩壊するヒッグス粒子の探索

中村浩二, 塙慶太^A, 田中純一, 増淵達也, 山村大樹
東大素セ, 筑波大数理^A



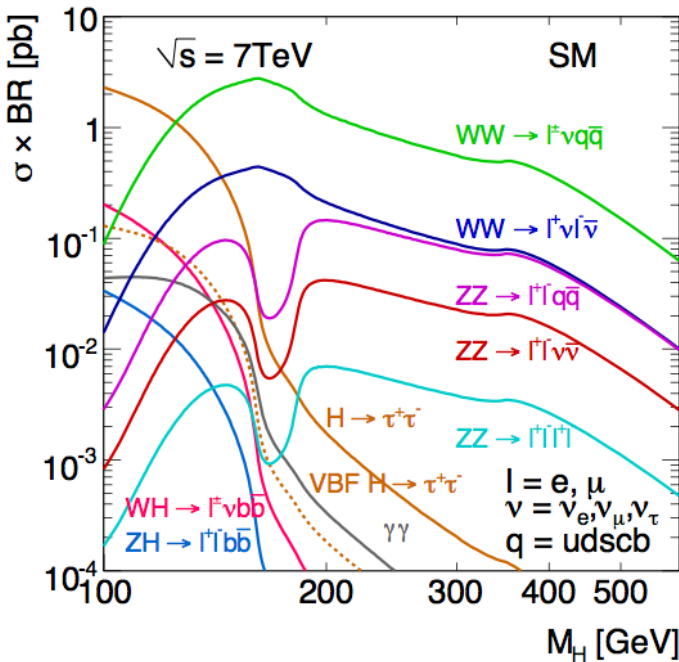
THE UNIVERSITY OF TOKYO

ヒッグス探索とタウチャンネル

- 直接探索では $m_H < 114 \text{ GeV}$ (LEP), $158 < m_H < 173 \text{ GeV}$ (Tevatron) を棄却。
- 標準理論の精密測定によって予想されるヒッグス粒子の質量は

$115 < m_H < 132 \text{ GeV}$ (68% CL.)

LHCにおいて探索可能な主要チャンネル



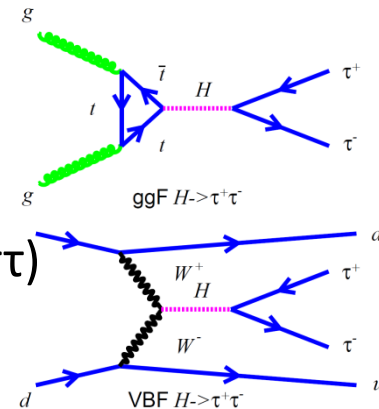
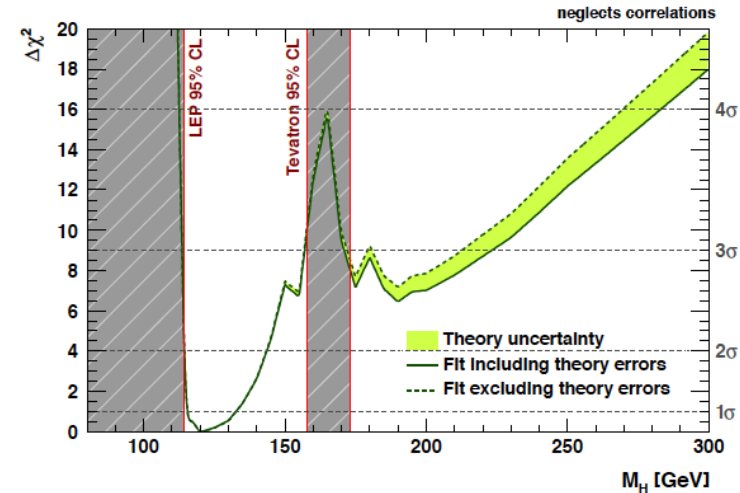
- タウレプトン対に崩壊するチャンネルは、予想される領域でのヒッグス探索において、探索可能で最も観測可能な事象数が多い(橙色)。
- 二つの生成過程

現在

- Gluon Fusion ($H \rightarrow \tau\tau$)
 - 数が多い ($\sim 10 \text{ event @ } 1 \text{ fb}^{-1}$)
 - S/N比 $\sim 1/250$

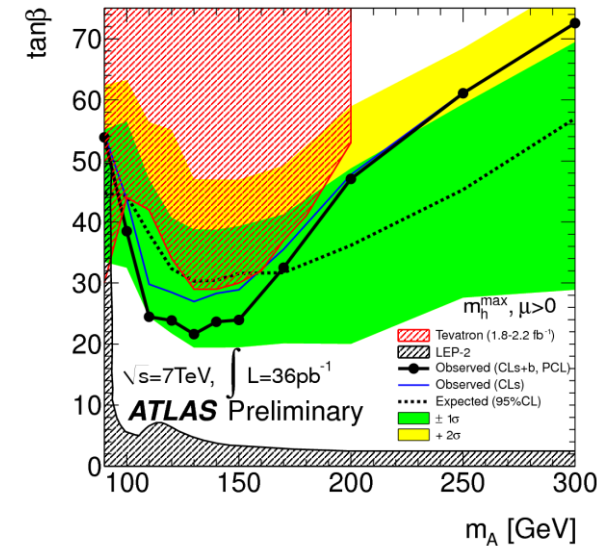
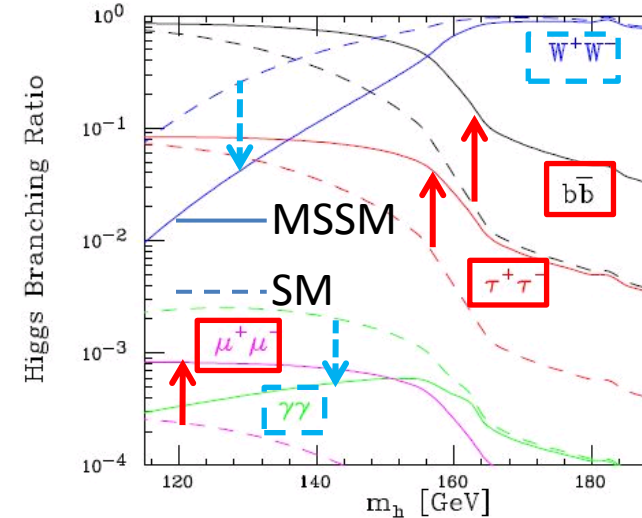
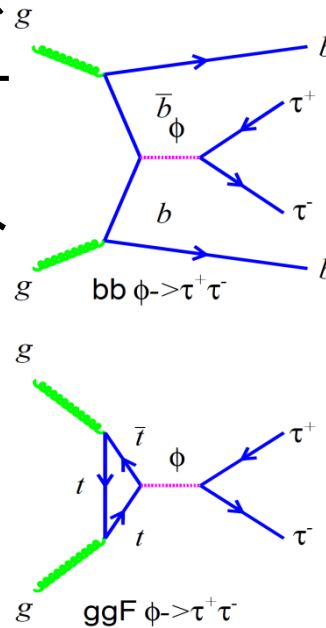
今後

- Vector Boson Fusion ($H \rightarrow \tau\tau$)
 - 数が少ない ($\sim 1 \text{ event @ } 1 \text{ fb}^{-1}$)
 - S/N比 $\sim 1/10-1$



タウチャンネルのもう一つの動機

- 超対称性モデルが拡張したヒッグスモデル(特にMSSM(mhmax)シナリオを研究)
 - 5つのHiggs $\phi=(H,A,h), H^\pm$ を導入
 - 2つのパラメータ: $m_A, \tan\beta$
- LHCにおける探索
 - 生成過程
 - $gg \rightarrow \phi, bb \rightarrow bb\phi$ が支配的
 - 標準理論の20倍の断面積 (@ $m_A=120\text{GeV}, \tan\beta=20$)
 - 崩壊過程
 - 90% $bb, 10\% \tau\tau$ -- enhanced



背景事象が少なく、感度が高い過程はタウ終状態。

2010年(36pb⁻¹)のデータで、
 すでにワールドベストの感度 ([arXiv:1107.5003](https://arxiv.org/abs/1107.5003))
 2011年データ(1fb⁻¹)で棄却領域が
 大幅に広がるのが期待される。

事象選択

τ decay :

$\tau \rightarrow l \nu \nu \sim 1/3$

$\tau \rightarrow h \nu \sim 2/3$

* $l = e$ or μ

$h = \pi/K's$

$\tau\tau \rightarrow ll \sim 1/9$ (small bkg.)

$\tau\tau \rightarrow lh \sim 4/9$ (best sensitivity)

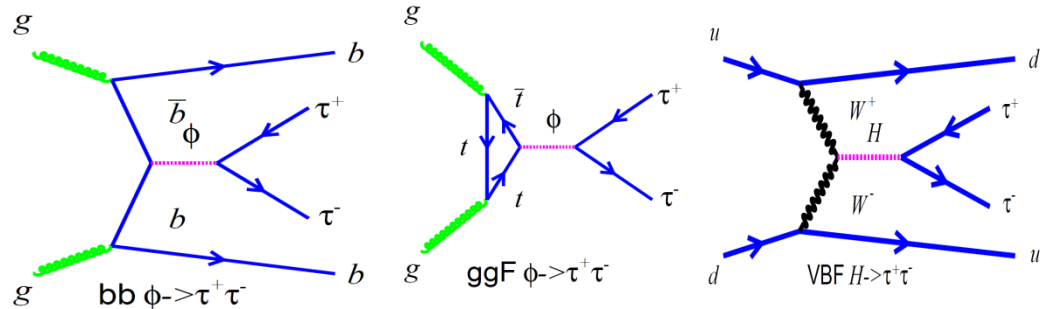
$\tau\tau \rightarrow hh \sim 4/9$ (bad S/N ratio)

すべての終状態の解析が行われているが、最も感度が良いlh channelを中心に解析した。

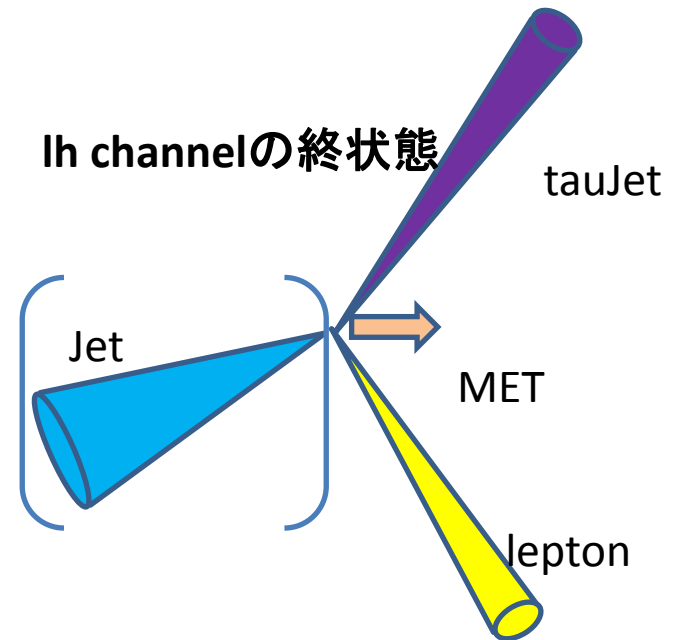
* 詳細な最適化などの研究は17pSD7を参照
最後にコンバインした結果もお見せします。

lh channel のイベントセレクション

- Trigger: electron(20GeV) or muon(18GeV)
- 異符号のレプトンとhadronicタウ(20GeV)+大きな Missing Et(20GeV)
- レプトンとmissingのTransverse Mass ($M_T < 30\text{GeV}$)



lh channelの終状態



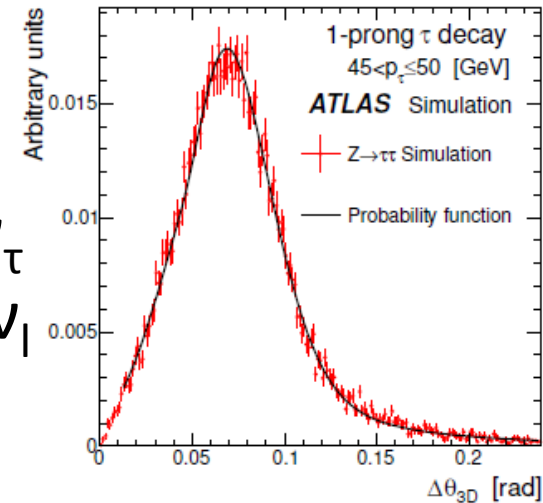
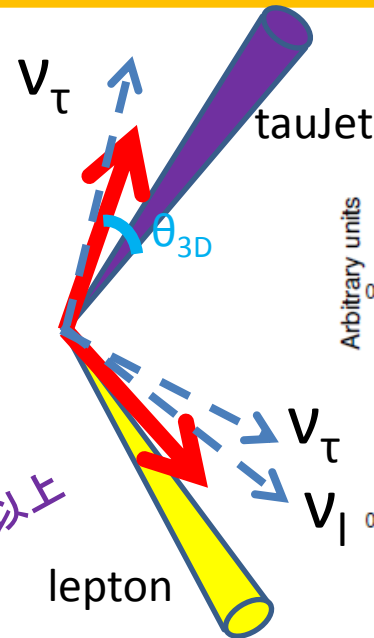
質量の再構成と背景事象

ヒッグス質量の再構成

タウ粒子の質量は自身の運動量に比べて小さいため、崩壊粒子の方向はタウ粒子の方向に近い。

- **Visible mass :**
 - ニュートリノを無視した質量 *効率100%*
- **Collinear mass :**
 - タウ粒子の崩壊をすべて同じ方向と仮定した質量 *効率悪い(30%)*
- **MMC(Missing Mass Calculator) mass :**
 - タウ粒子の方向と再構成可能な崩壊粒子(群)の角度分布(θ_{3D})を仮定して質量解を探したもの。 *効率95%以上*

本解析では、MMC massを使用。



主な背景事象

- **$Z \rightarrow \tau \tau$: leptonもtauも本物**
- **$W + \text{jets}$: jet \rightarrow tauのfake**
- **QCD : jet \rightarrow lepとjet \rightarrow tauの両方fake**
- **その他、 $Z \rightarrow ee/\mu\mu$, Top, WW/WZ/ZZ**

数は理論予想から、分布はデータから。

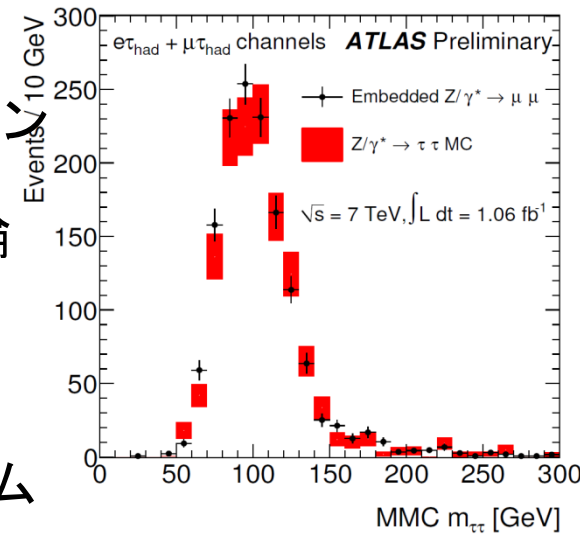
数も分布もデータから。

理論予想とシミュレーションから。

背景事象の見積もり

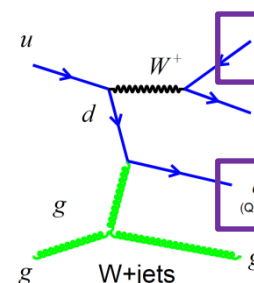
Z→ττの分布

- **アイデア:** Z→μμのデータを用いて、μをシミュレーションのτに置き換えることでZ→ττの分布を作る。
- 事象数は事象選択の途中(lepton+tau選択後)で理論予想に規格化。



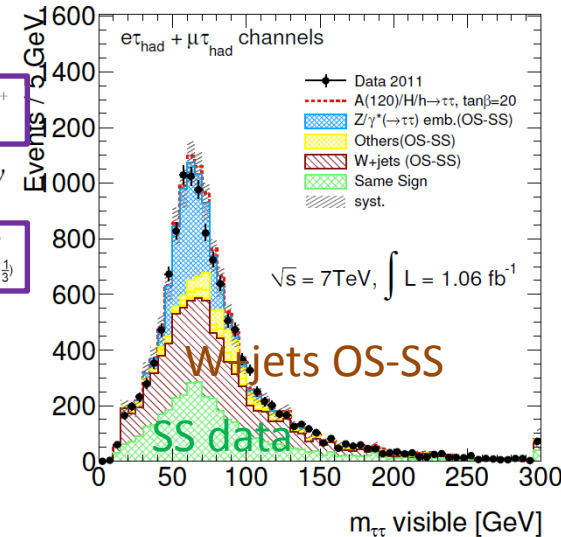
W+jetsとQCD背景事象(tauの誤同定)

- **アイデア:** jetがtauにfakeするときtauの電荷はランダムなので、leptonとtauが同符号(SS)の事象から異符号(OS)の事象を見積もる。
 - QCD : OS=SS (data,MCともに確認。)
 - W+jets : OS>SS ←quark jetの影響 (補正の必要あり。)
- W+jets OS/SS 比はW CRから求める。



→ SSの事象をそのまま使いW+jetsのOS-SS分を補正。

→ この方法だとSSに含まれるその他のFake 事象も同時に見積もることができる。



系統誤差

- データから見積もった背景事象

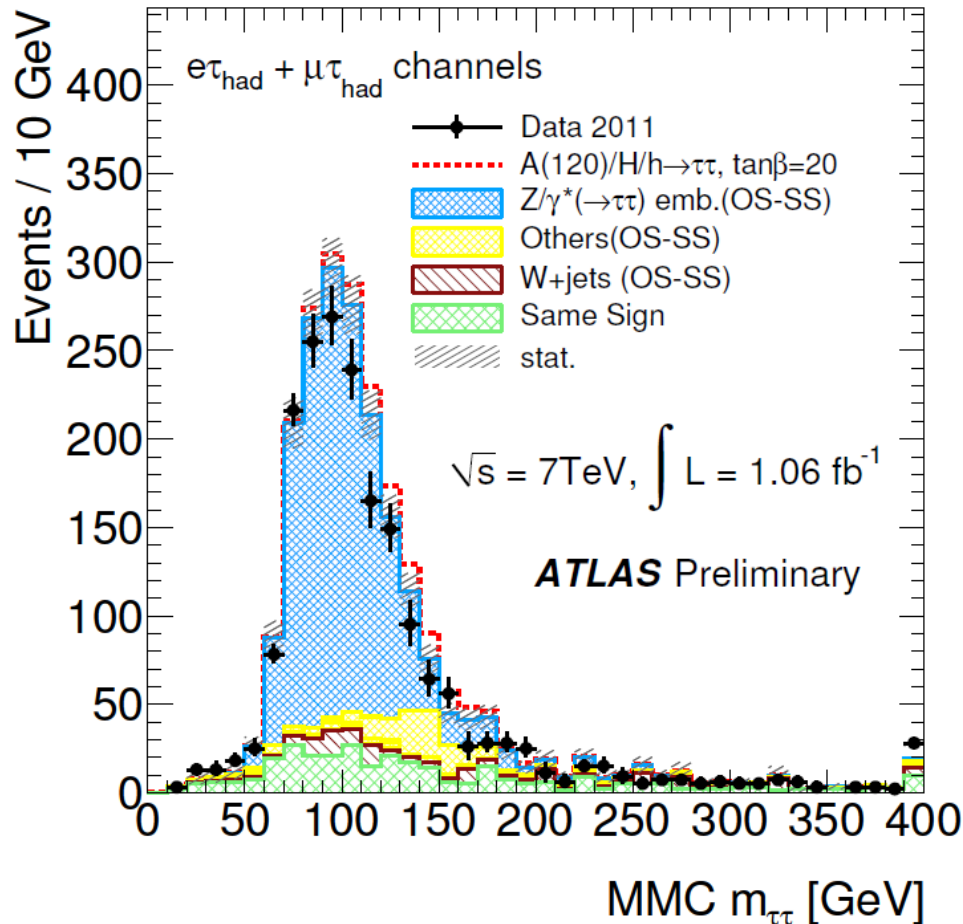
主な系統誤差	値
QCD OS=SS 仮定	19% (sys.) + 11%(SS stat)
W+jets OS/SS 比	11%(measurement) + 10% (mc model)

- シミュレーションを用いた背景事象および信号

主な系統誤差	典型的な値	事象数に対する値	
		Z→tautau	Signal(@120GeV)
Jet/tau energy scale	5-10%	11%(tauのみ)	26%
Tau 同定効率	9.1%	9.1%	9.1%
Electron 同定効率	3%	3.0%	3.6%
Muon 同定効率	2%	1.3%	1.0%
Luminosity	3.7%	3.7%	3.7%
生成断面積	--	5%	14% (tanβ=20)
Generator	--	14%	7%

結果と制限

シグナル領域のMMC分布



Final state	Exp. Background	Data
$\ell\tau_{had}$	$(2.1 \pm 0.4) \times 10^3$	1913

データの分布は信号なしの分布と一致



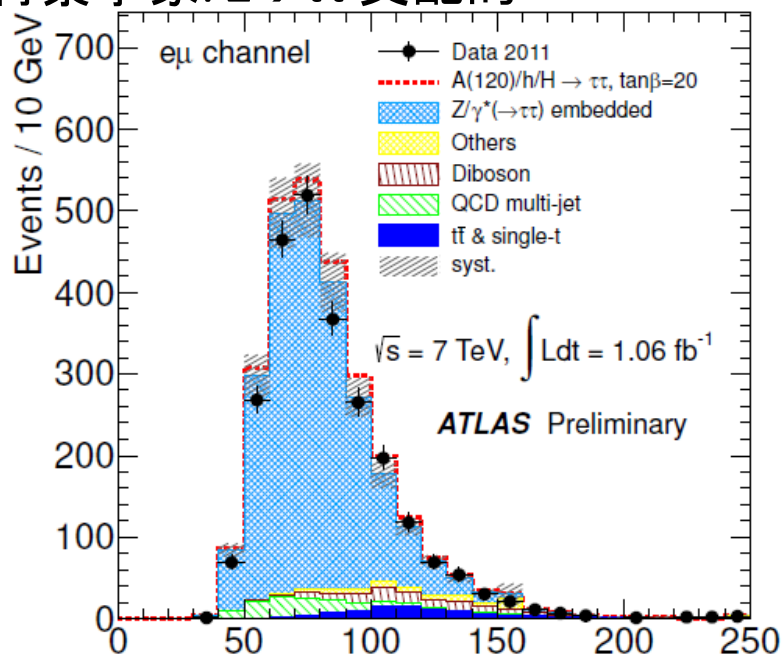
モデルや生成断面積に対する制限

- MMC分布をdiscriminantとするProfile likelihoodを構築。
- すべての系統誤差はNuisance parameterとしLikelihoodに入れた。
- Tau/Jet energy scaleは分布の違いも考慮。
- 95% CL. の制限を求める。

結果の前に...

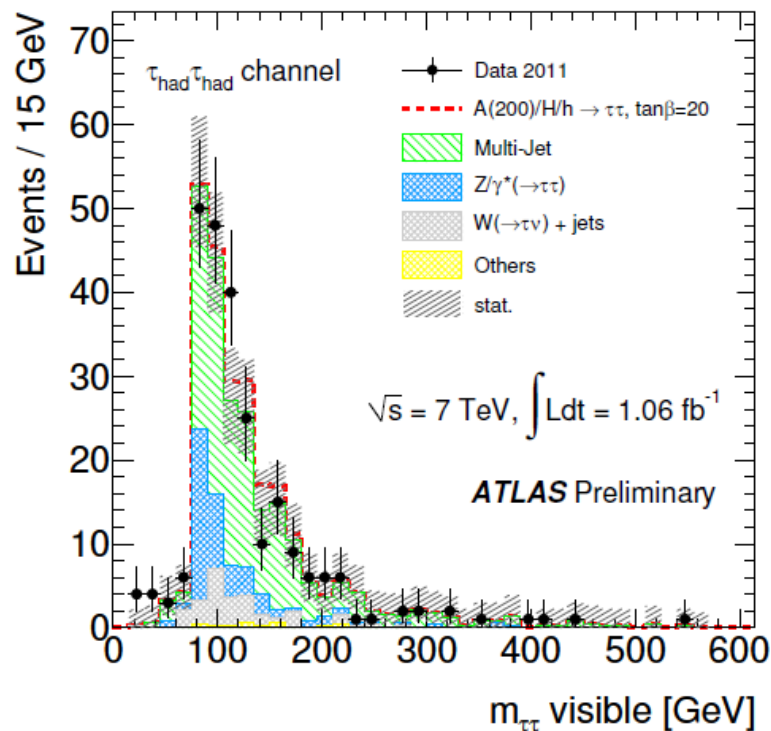
- $H \rightarrow \tau\tau \rightarrow e\mu$ チャンネル

- One electron + one muon
- Scalar sum : $e+\mu+\text{MET} < 120\text{GeV}$ (top veto)
- e-muがback-to-back
- 背景事象: $Z \rightarrow \tau\tau$ 支配的



- $H \rightarrow \tau\tau \rightarrow hh$ チャンネル

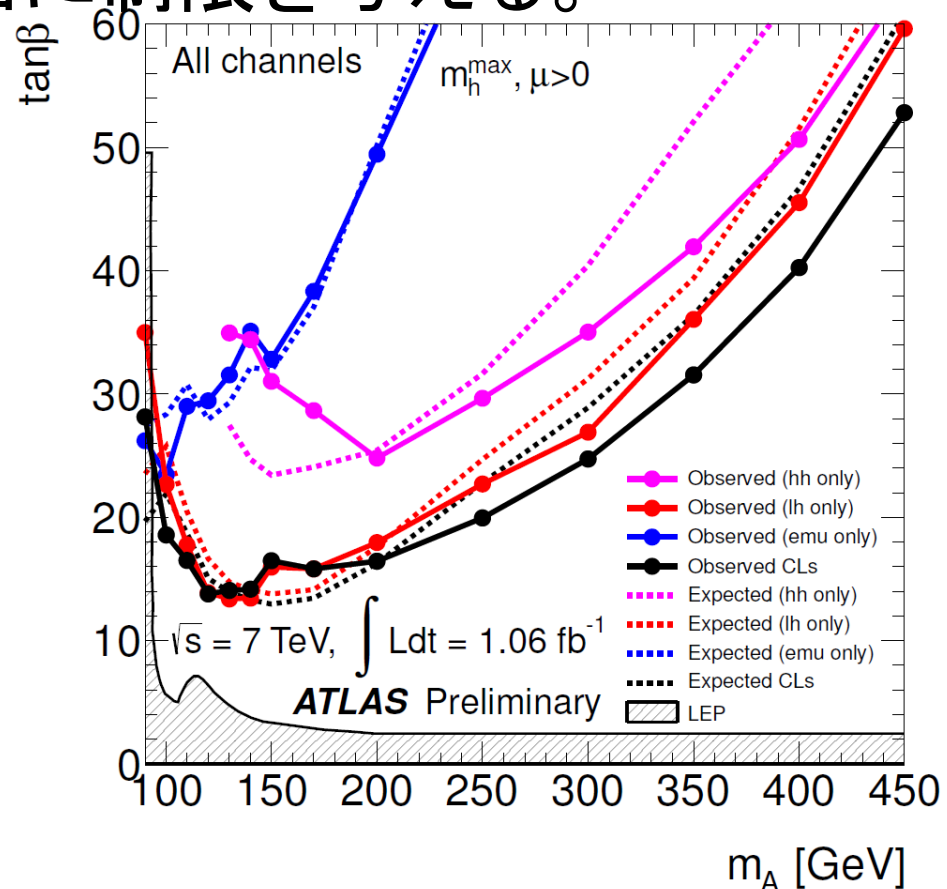
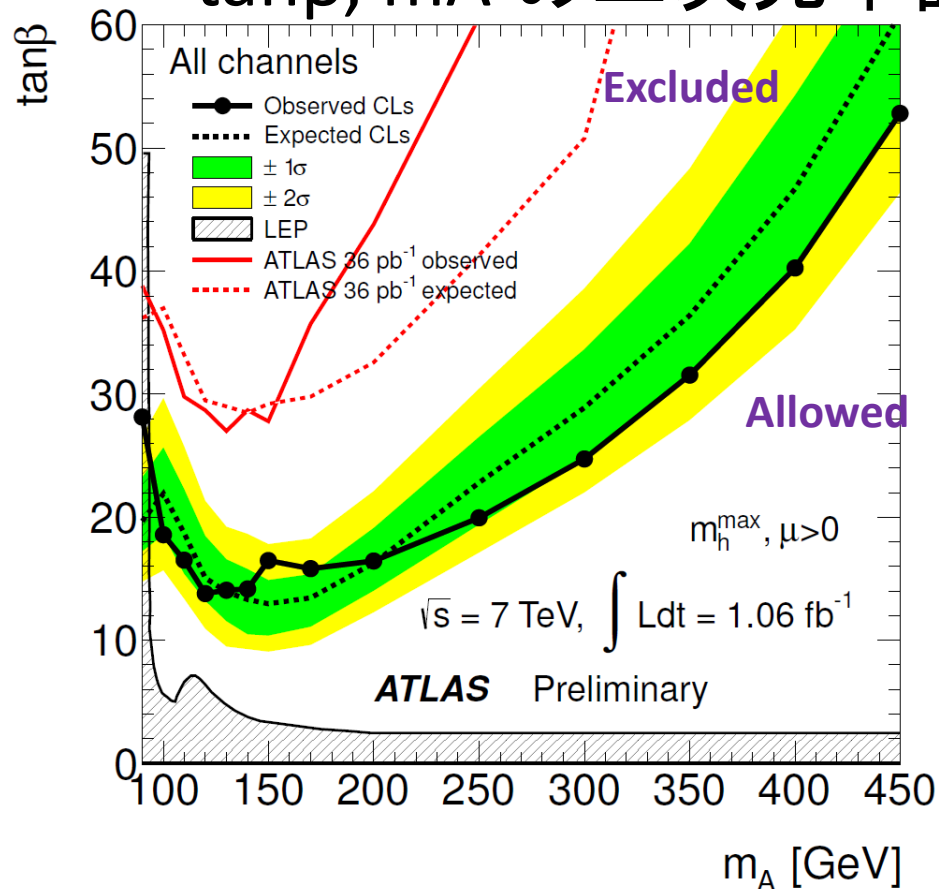
- Trigger : 2 hadronic tau
- 2 hadronic taus+large MET
- 背景事象 : QCDが支配的



$$m_{\tau\tau}^{\text{effective}} = \sqrt{(p_{\tau^+} + p_{\tau^-} + p_{\text{miss}})^2} \quad m_{\tau\tau}^{\text{effective}} [\text{GeV}]$$

MSSM mhmax シナリオ

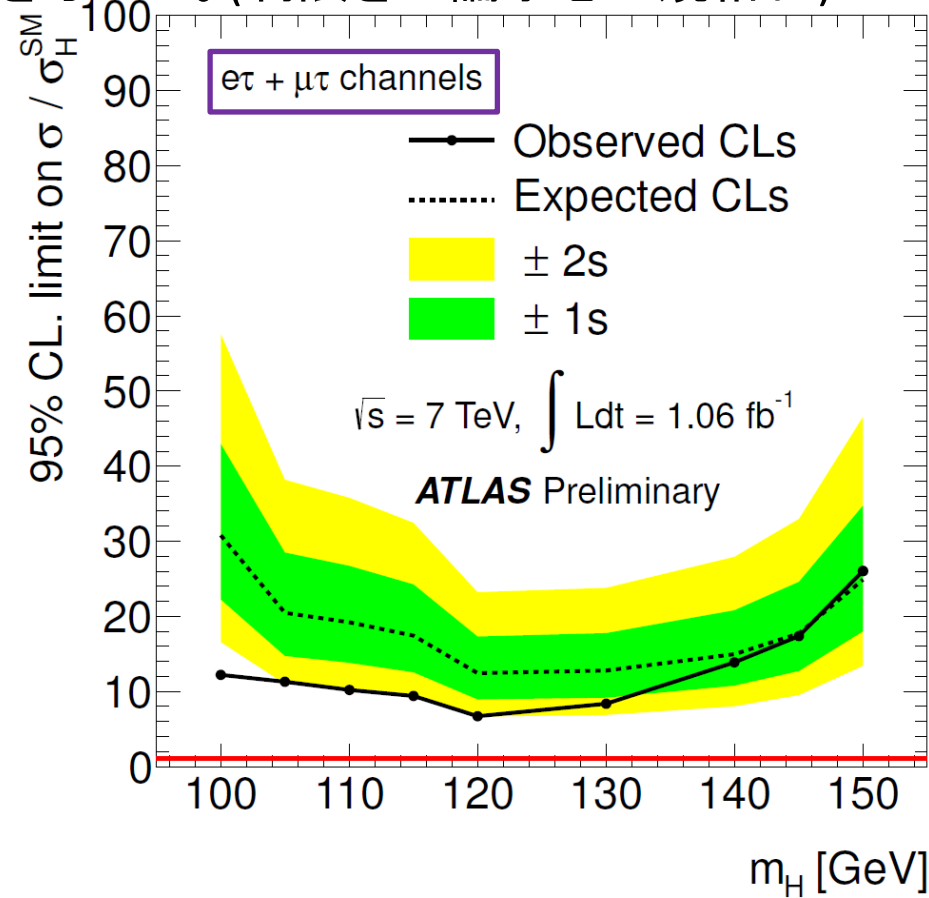
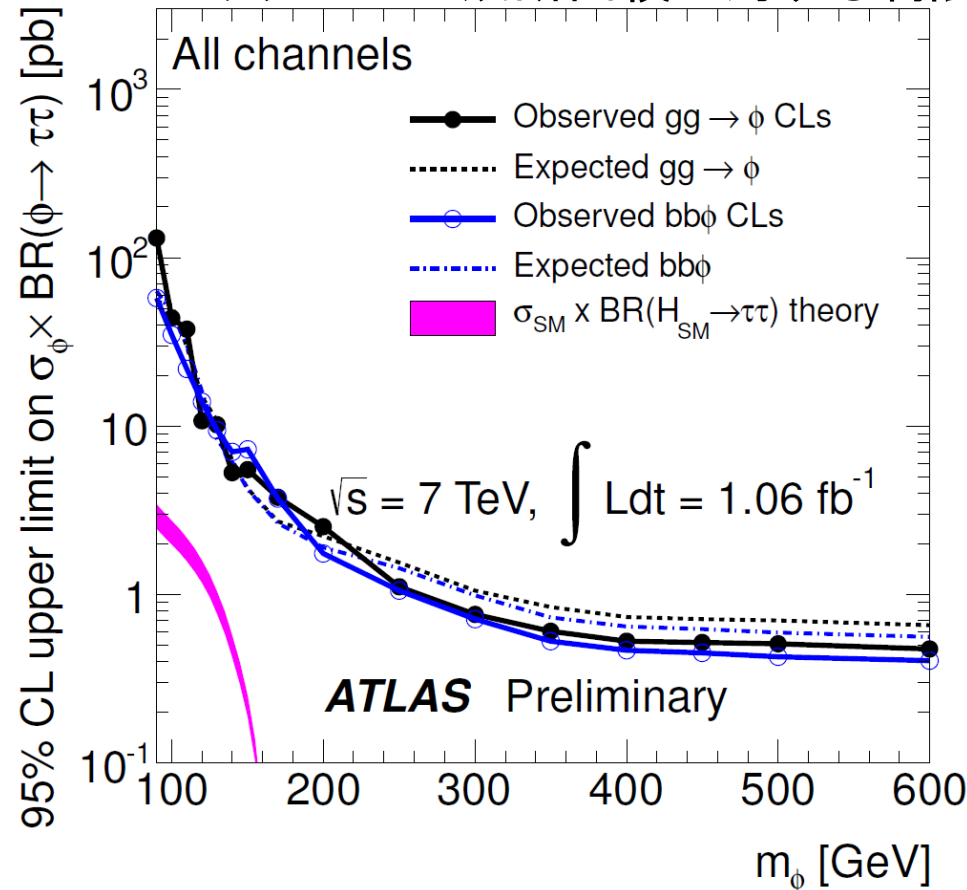
- $\tan\beta, m_A$ の二次元平面に制限を与える。



- $m_A=110-140\text{GeV}$ で $\tan\beta>15$ を、 $m_A=400\text{GeV}$ で $\tan\beta>40$ を棄却。
- すべての領域でhチャンネルが支配的。

モデルによらない制限とSMヒッグス

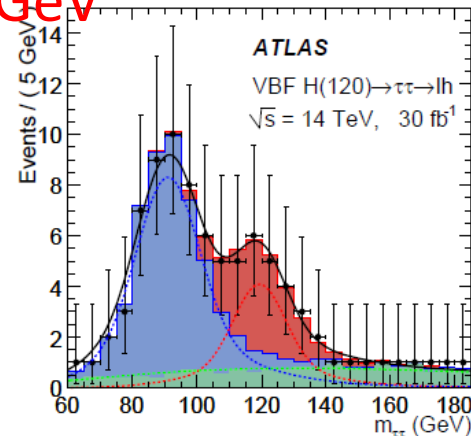
- ggF, bbφ過程のアクセプタンスを仮定して、 $\sigma_\phi \times BR(\phi \rightarrow \tau\tau)$ に対する制限を与えた。
- SMヒッグスの生成断面積に対する制限を与えた。(制限を理論予想で規格化)



- 標準理論の6倍の制限(expectedは12倍)@120GeV

まとめと今後の展望

- 2011年夏までのデータ(1fb^{-1})を用いて、タウレプトン対に崩壊する過程で、ヒッグス探索を行った。
- 結果は信号なしの分布と一致。
- MSSM(mhmax)シナリオのパラメータの棄却領域を大幅に広げた。
 - $m_A=110\text{-}140\text{GeV}$ で $\tan\beta>15$ を、 $m_A=400\text{GeV}$ で $\tan\beta>40$ を棄却。
- 標準理論ヒッグスに対する制限も与えたが、最適化をする必要がある。
 - 標準理論の6倍の制限(expectedは12倍) $@120\text{GeV}$
- 今後VBF過程に最適化した解析を行う。
 - VBF過程の特徴的である前後方のジェットを要求することでS/N比が大幅に改善($S/N>1$)。
 - 現在のVBF過程の事象数は選択後で1.1event
→ 5fb^{-1} で6event予想される。



backup

Missing Mass Calculator

タウ粒子の質量は自身の運動量に比べて小さいため、崩壊粒子の方向はタウ粒子の方向に近い。

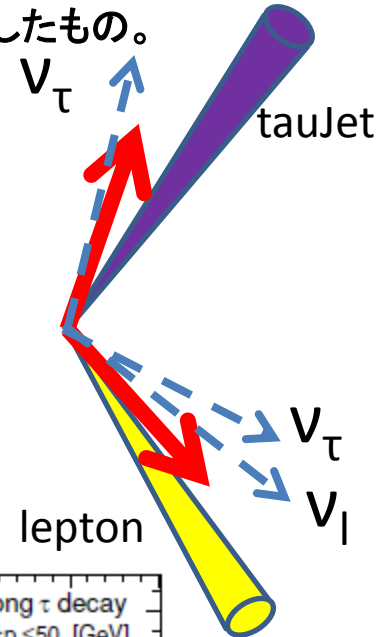
- タウ粒子の方向と再構成可能な崩壊粒子(群)の角度分布(θ_{3D})を仮定して質量解を探したもの。

$$E_x^{\text{miss}} = p_{\text{miss}_1} \sin \theta_{\text{miss}_1} \cos \phi_{\text{miss}_1} + p_{\text{miss}_2} \sin \theta_{\text{miss}_2} \cos \phi_{\text{miss}_2},$$

$$E_y^{\text{miss}} = p_{\text{miss}_1} \sin \theta_{\text{miss}_1} \sin \phi_{\text{miss}_1} + p_{\text{miss}_2} \sin \theta_{\text{miss}_2} \sin \phi_{\text{miss}_2},$$

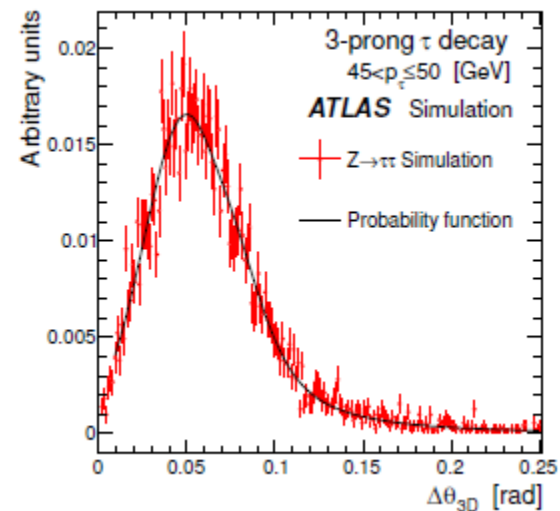
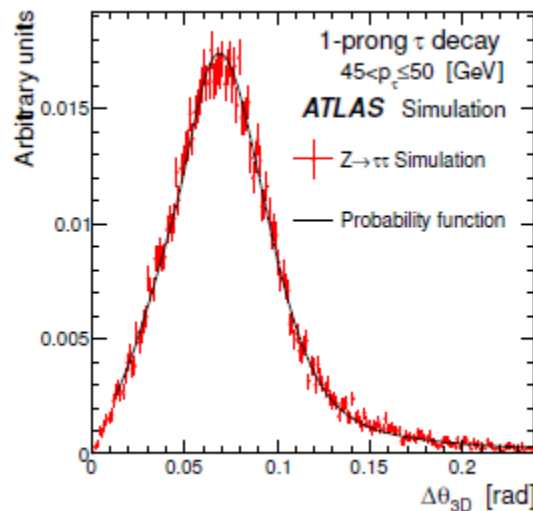
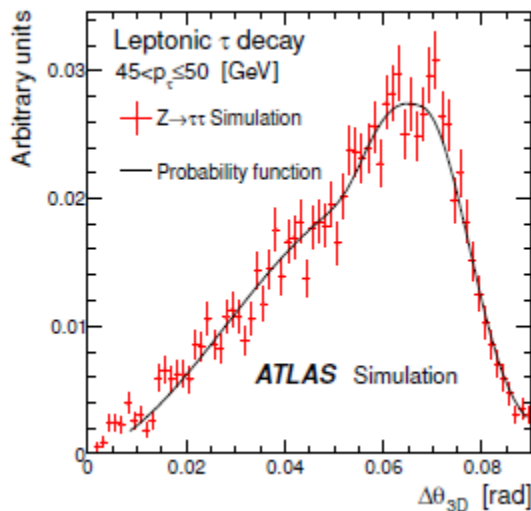
$$m_\tau^2 = m_{\text{miss}_1}^2 + m_{\text{vis}_1}^2 + 2 \sqrt{p_{\text{vis}_1}^2 + m_{\text{vis}_1}^2} \sqrt{p_{\text{miss}_1}^2 + m_{\text{miss}_1}^2} - 2 p_{\text{vis}_1} p_{\text{miss}_1} \cos \Delta\theta_{\text{vm}_1},$$

$$m_\tau^2 = m_{\text{vis}_2}^2 + 2 \sqrt{p_{\text{vis}_2}^2 + m_{\text{vis}_2}^2} \cdot p_{\text{miss}_2} - 2 p_{\text{vis}_2} p_{\text{miss}_2} \cos \Delta\theta_{\text{vm}_2}$$

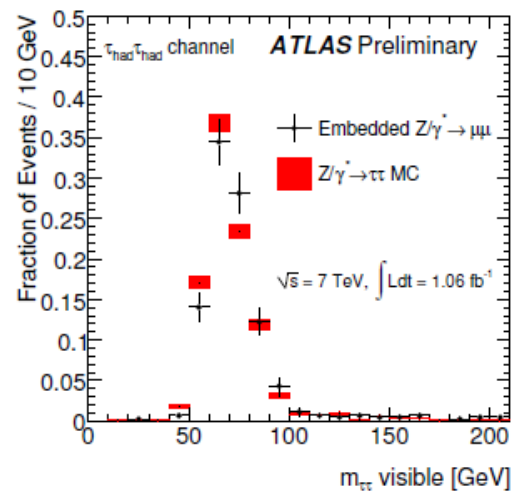
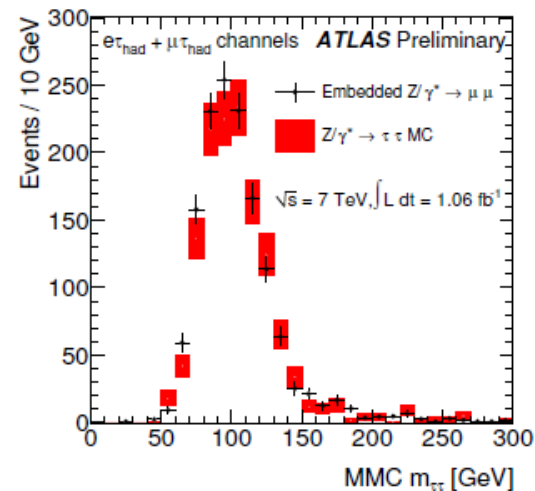
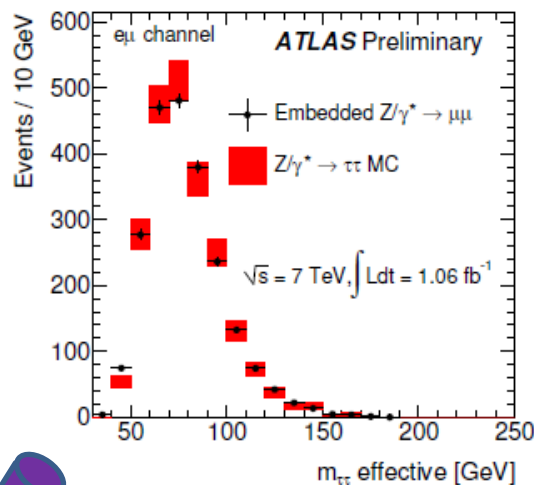
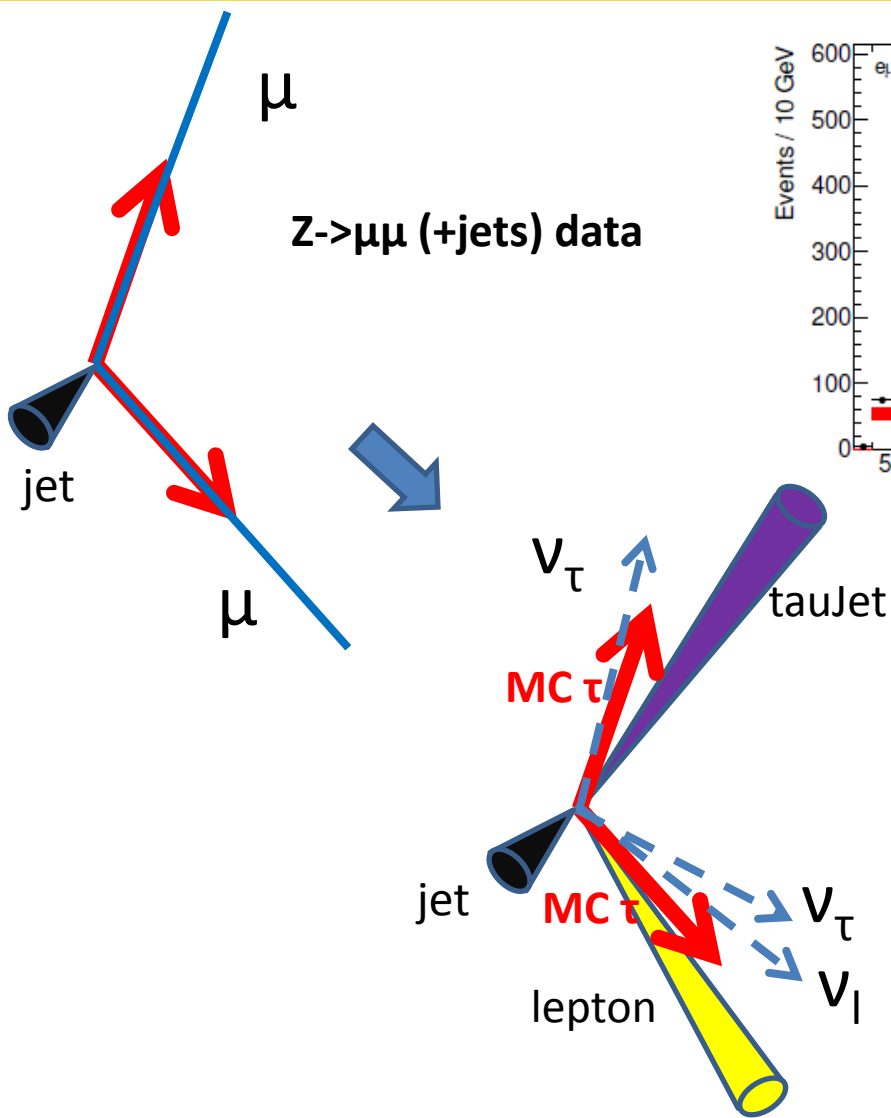


効率

	Z	H(120)	H(150)	H(200)	H(250)	H(300)	H(400)
Efficiency (%)	98	99	98	98	96	91	88



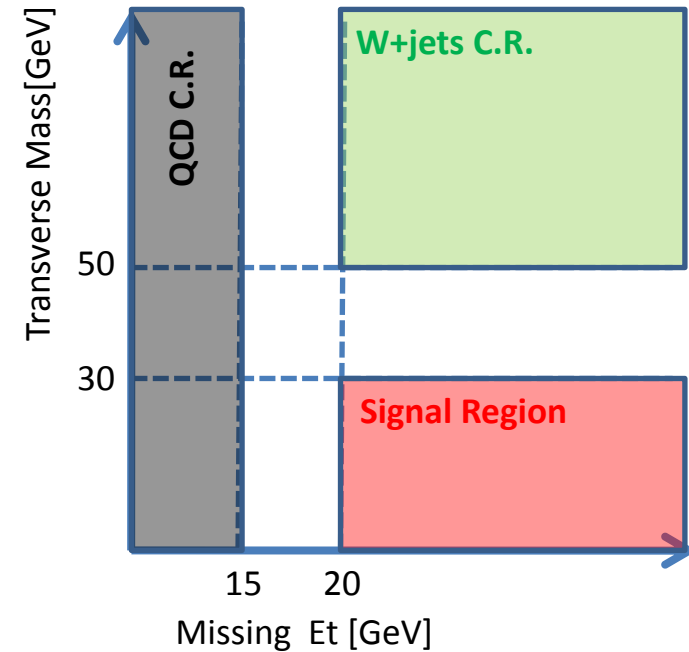
Z → tautau background shape



背景事象の見積もり

- 具体的な方法

$$n_{OS}^{Bkg} = n_{SS}^{Bkg} + n_{OS-SS}^W + n_{OS-SS}^Z + n_{OS-SS}^{other}$$



系統誤差の詳細

- アクセプタンス(断面積)に対する系統誤差の大きさ。
- 3つの数字はそれぞれ、
 - lep-lep/lep-had/had-had チャンネルに相当

	W+jets	Di-boson	$t\bar{t}$ + single-top	$Z/\gamma^* \rightarrow$ $ee, \mu\mu$	$Z/\gamma^* \rightarrow$ $\tau^+\tau^-$	Signal
$\sigma_{inclusive}$	-/-/5	7	10	5/5/-	5	14/14/16
Acceptance	-/-/20	4/2/7	3/2/9	2/14/-	5/14/14	5/7/9
e efficiency	-/-/0.8	4/3.1/0.5	4/3.6/0.3	4/3.1/-	4/3.0/0.5	4/3.6/0.1
μ efficiency	-/-/0.3	2/1.2/0.4	2/1.1/0.0	2/1.3/-	2/1.8/0.4	2/1.0/0.1
τ efficiency and fake rate	-/-/21	-/9.1/15	-/9.1/13	-/48/-	-/9.1/15	-/9.1/15
Energy scales and resolution	-/-/+34 -21	2/+19/+26 -9 -12	6/+5/12 -4	1/+39/- -25	1/11/+63 -23	1/+30/+9 -23 -8
Luminosity	-/-/3.7	3.7	3.7	3.7/3.7/-	3.7	3.7
Total uncertainty	-/-/+45 -36	10/+23/+32 -16 -22	13/15/23	8/+64/- -56	9/21/+67 -31	16/+35/+26 -30 -25

統計手法

Profile Likelihood.

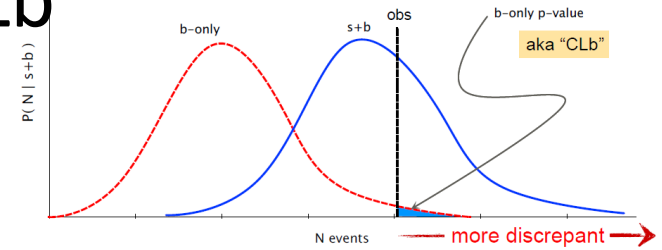
$$\mathcal{P}(n_m, a_i | \mu, \alpha_i) = \prod_{m \in \text{bins}} \text{Pois}(n_m | \nu_m) \cdot G(L_0 | L, \Delta L) \prod_{i \in \text{Syst}} N(a_i | \alpha_i, 1)$$

統計のポアソン
系統誤差

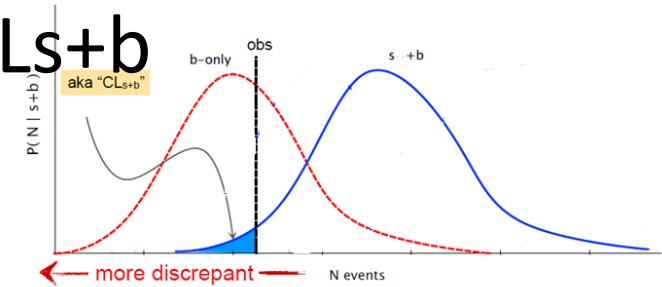
Test Statistics

$$\tilde{q}_\mu = \begin{cases} -2 \ln \tilde{\lambda}(\mu) & \hat{\mu} \leq \mu \\ 0 & \hat{\mu} > \mu \end{cases} = \begin{cases} -2 \ln \frac{L(\mu, \hat{\theta}(\mu))}{L(0, \hat{\theta}(0))} & \hat{\mu} < 0, \\ -2 \ln \frac{L(\mu, \hat{\theta}(\mu))}{L(\hat{\mu}, \hat{\theta})} & 0 \leq \hat{\mu} \leq \mu, \\ 0 & \hat{\mu} > \mu. \end{cases}$$

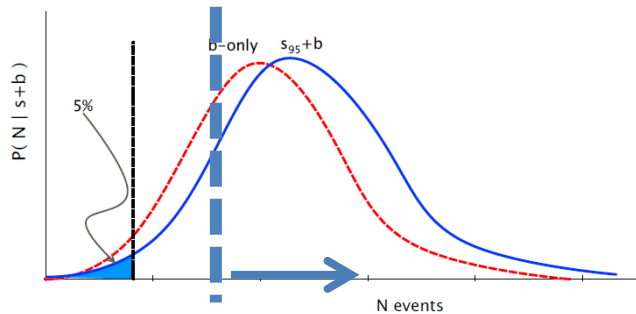
• CLb



• CLs+b

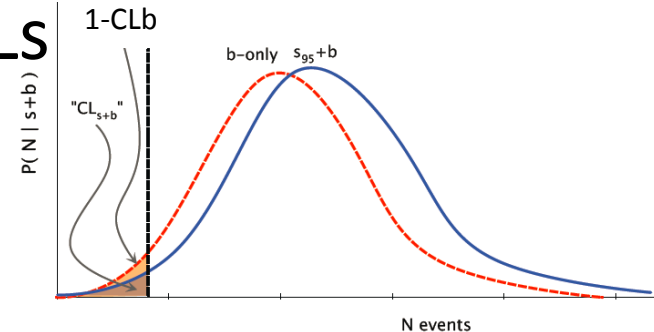


Power Constrained Limit (PCL)



S+b の68%(最近は50%?)以下に観測したとき、そこで止める。(i.e. CLs+b=16%)

CLs



CLs = CLs+b / (1-CLb) もはや確率ではないが...
 CLs < 5% を棄却とするとCLs+bのようなあやまちはない。
 Note : b-onlyの中心が観測されたとき、CLs = 2 * CLs+b