

LHC-ATLAS実験における

$H \rightarrow \tau\tau \rightarrow \text{lepton-lepton}$ を用いたHiggs粒子の探索

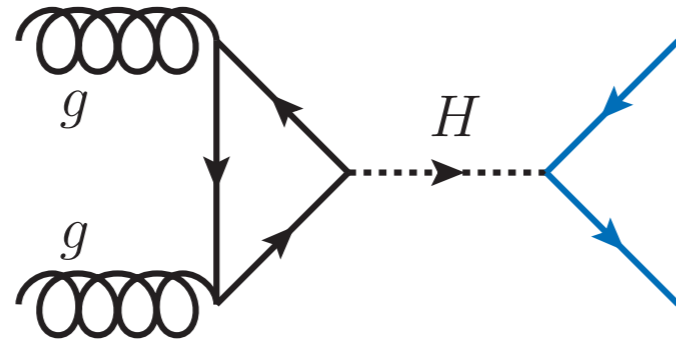
森永真央(まさひろ), 中村浩二^A, 塙慶太^B, 田中純一^B, 浅井祥仁
東大理, 高工研^A, 東大素セ^B



H → $\tau\tau$

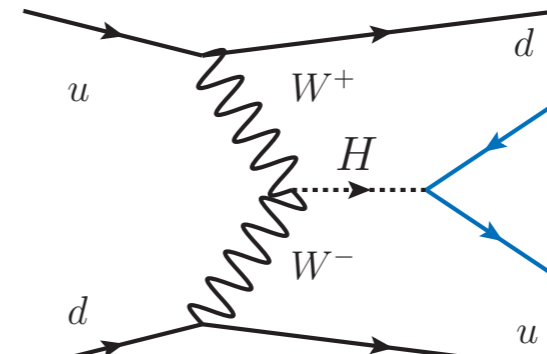
- レプトン湯川結合の有無を確認することが、いま、最も重要!!!
- Higgs粒子の生成過程: 主要な2つの過程を考える。

gluon gluon-Fusion(ggF)



- LHCでの主な生成過程
- jetを捕まえて, S/Nを上げる

Vector Boson Fusion(VBF)



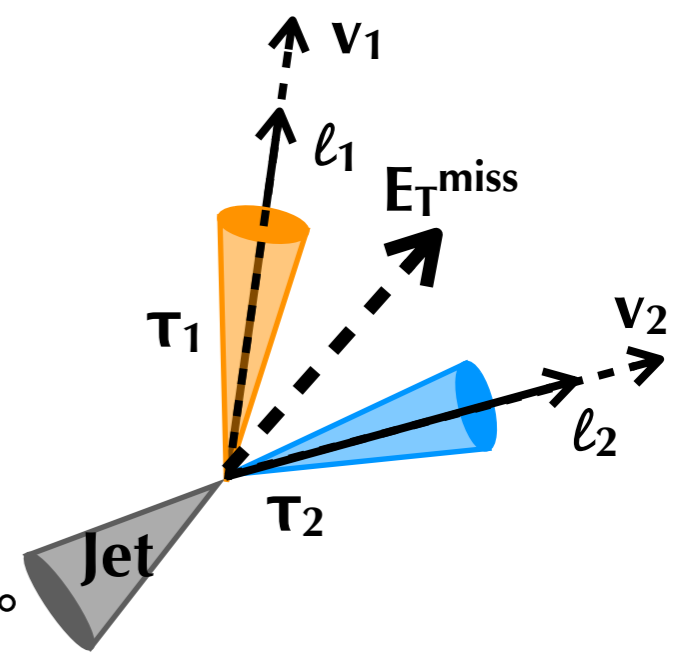
- クォークがW/Zを生成し2つのWZから生成され, 前後方にjetが観測される

- Higgs → $\tau\tau$ 崩壊: τ 粒子の終状態によって3つのチャンネルがある
 - hadron-hadron(44%), lepton-hadron(46%): 数が多いが, Fake hadronic tau事象の制御が難しい。
 - lepton-lepton(12%): 分岐比は小さいがクリーンで系統誤差は相対的に小さくなる
 - しかし, 現在(13fb^{-1})の結果では, 発見感度は 0.7σ 程度しかない。
 - ➔ 現在、多変数解析を用いて解析を進めている。
- 本講演ではLHC-ATLASが2012年に取得した 20.3fb^{-1} のデータを用いた解析状況を報告する。
 - 最終結果はまだブラインド中で, 期待される制限/感度をお見せします。

Signal Topology

- **Signal Topology:**

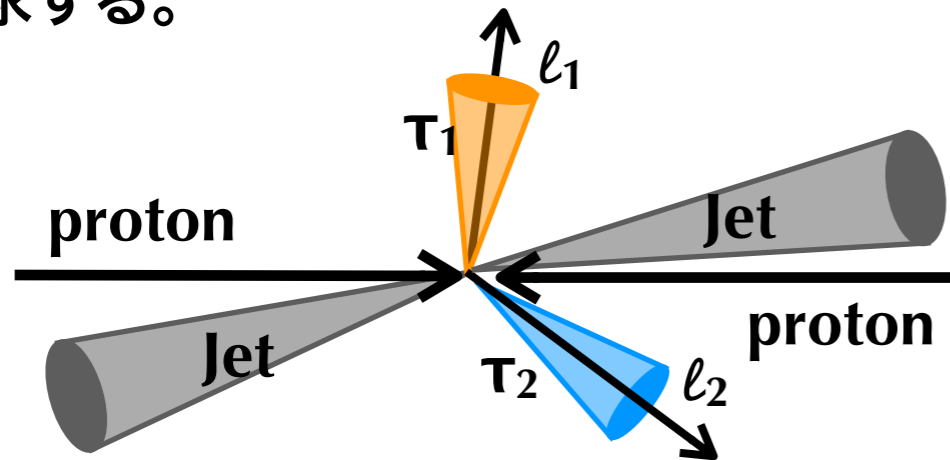
- 終状態に2つのlepton(e, μ), E_T^{miss} (ニュートリノ), ジェットがいる。
 - レプトンの組み合わせにより終状態は $ee, e\mu, \mu\mu$ に分けられる。
 - 高い運動量をもつ τ 粒子の崩壊粒子は τ 粒子と同じ方向にでやすい。
 - ➔ E_T^{miss} がleptonの間に観測される。



- 本解析は発見感度を上げるため生成過程に応じて4つの信号領域を設定した。

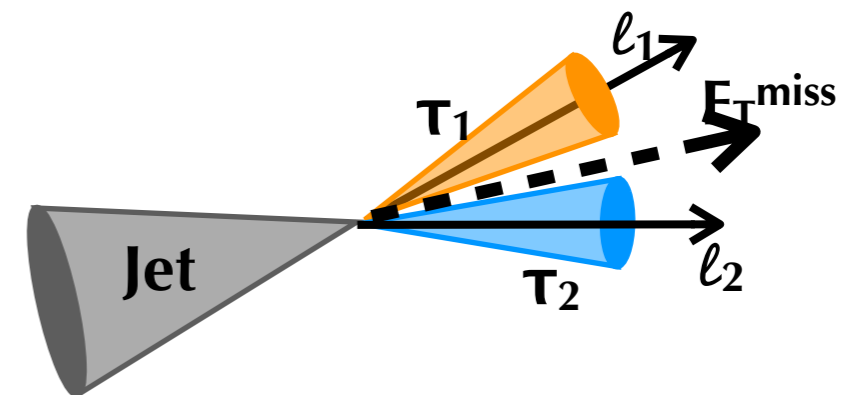
VBF Topology

- 高い運動量を持ったジェットが前後方に2つ観測される。
- ジェット間の角度(η 方向)が大きいことを要求する。



Boosted Topology

- Higgs粒子が高い運動量のジェットとともに生成されブーストするトポロジー。
- 2leptonと E_T^{miss} で組んだベクターの p_T が大きい事象を選択する



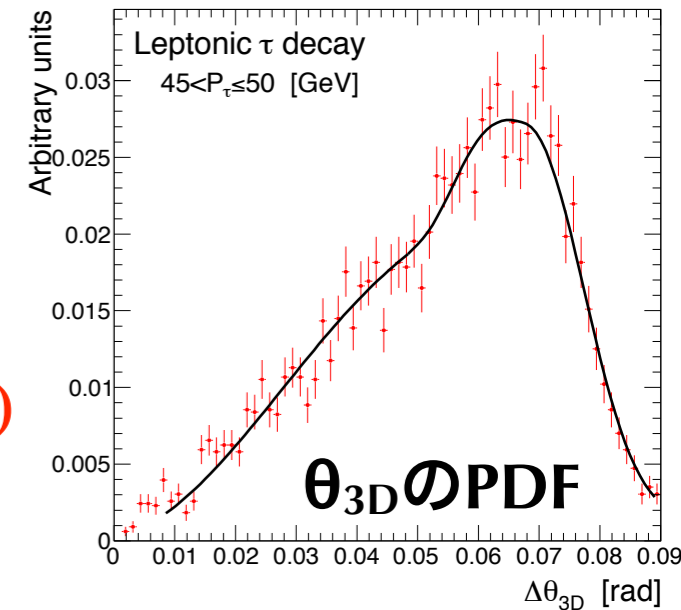
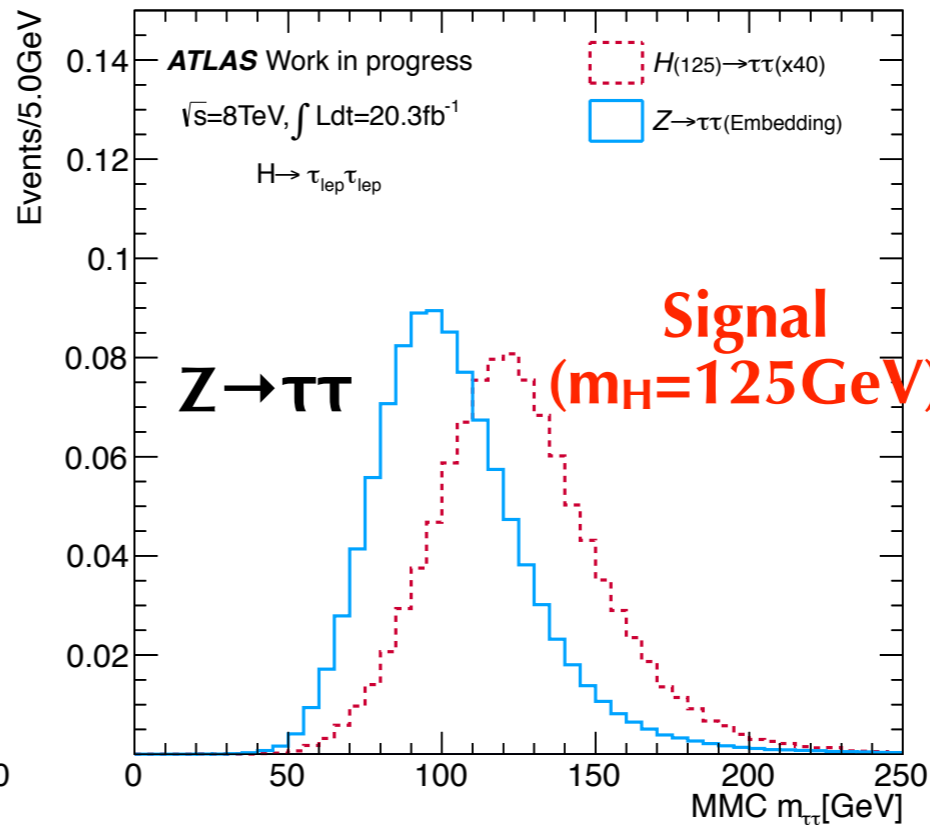
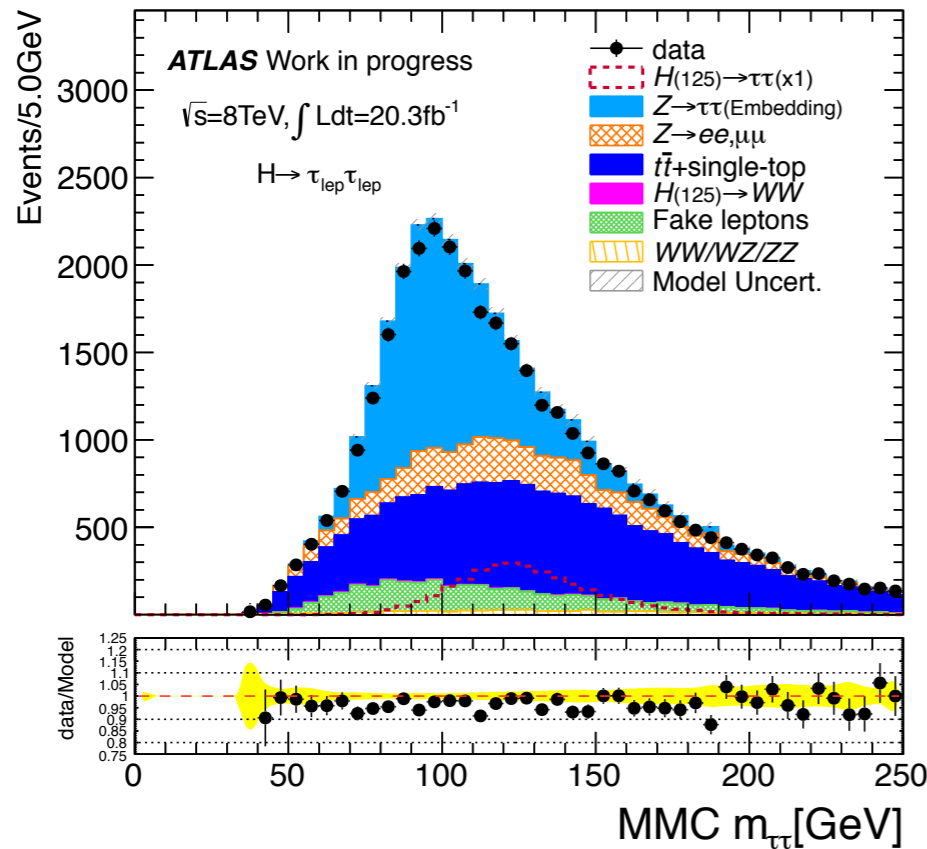
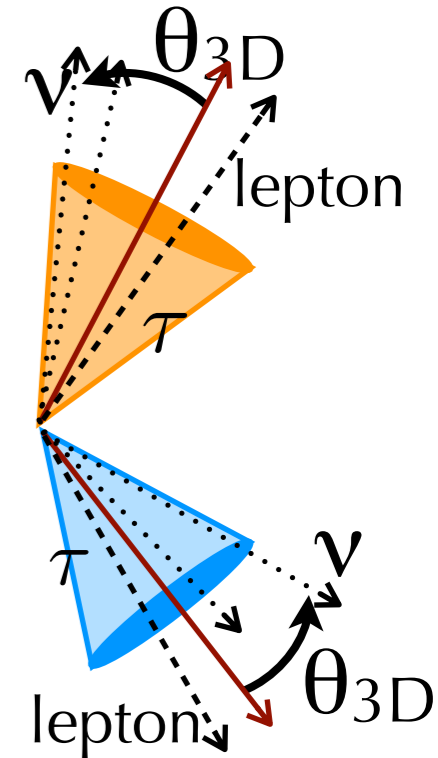
質量再構成

- **Missing Mass Calculator(MMC):**

- 元の τ 粒子と崩壊粒子群との角度 θ_{3D} 分布でLikelihoodを6Dスキャンし再構成した質量。(θ_{3D} のPDFはMCから)
- τ 粒子からのニュートリノを仮定し、 E_T^{miss} の分解能だけ余分にスキャンするためCollinear massに比べて効率は良くなる。

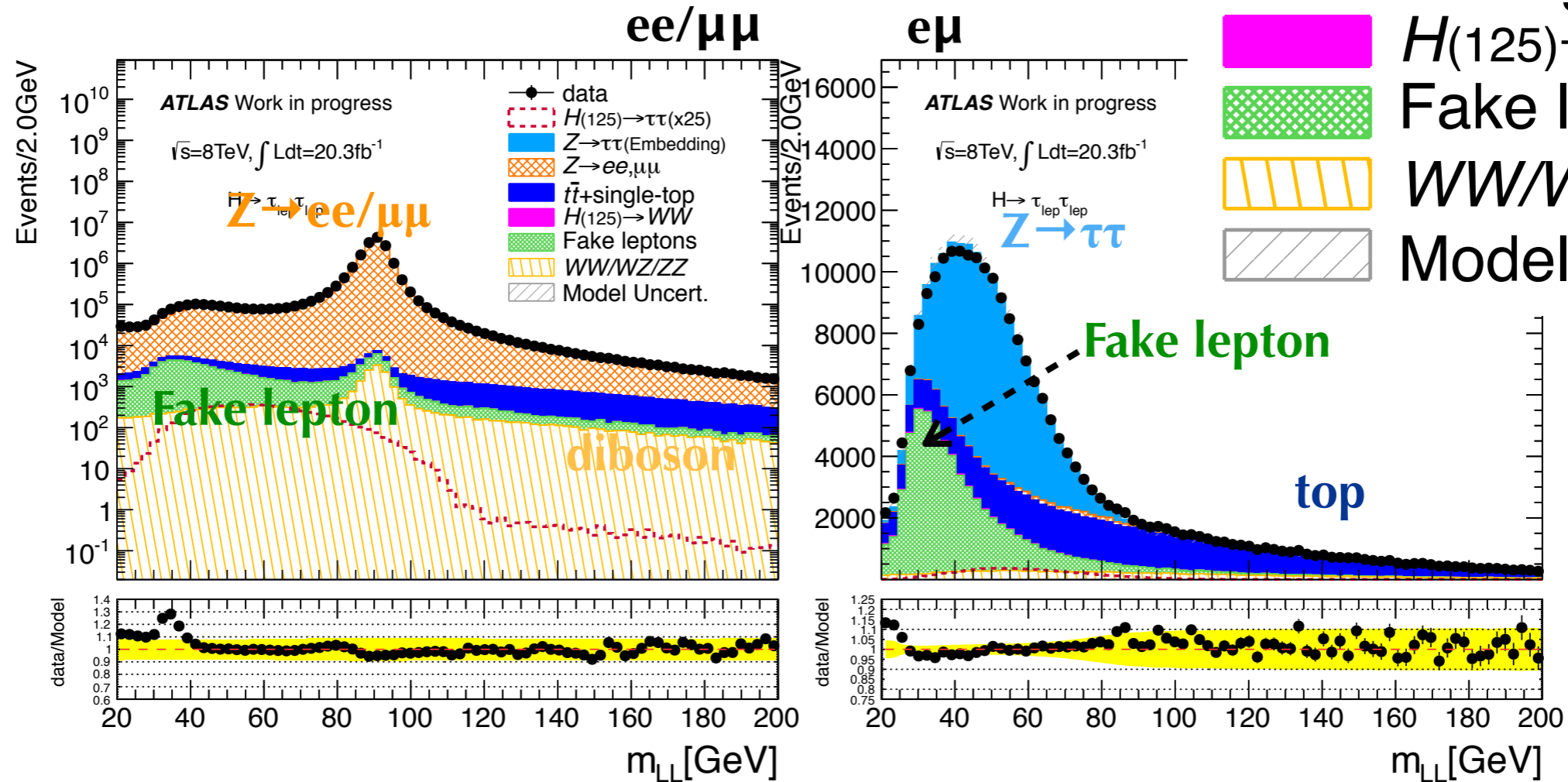
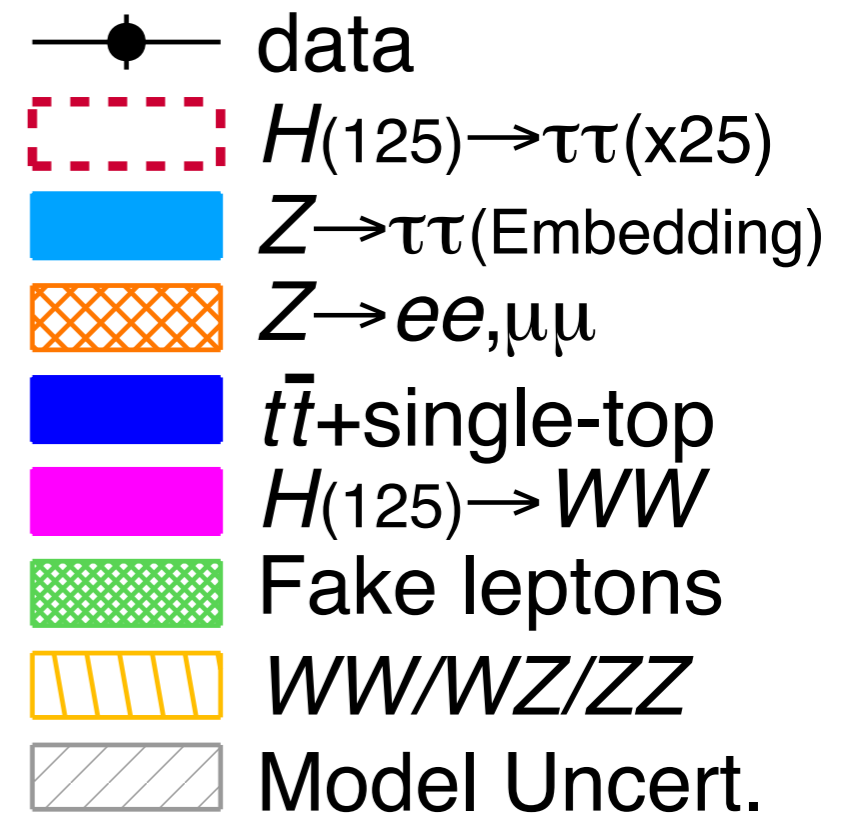
- E_T^{miss} カット後の2つの再構成された質量分布と、信号事象と $Z \rightarrow \tau\tau$ 事象の $m_{\tau\tau}$ 分布の比較

- 信号事象は $Z \rightarrow \tau\tau$ 事象に比べ、ピーク的位置が分離されていることがわかる。



背景事象

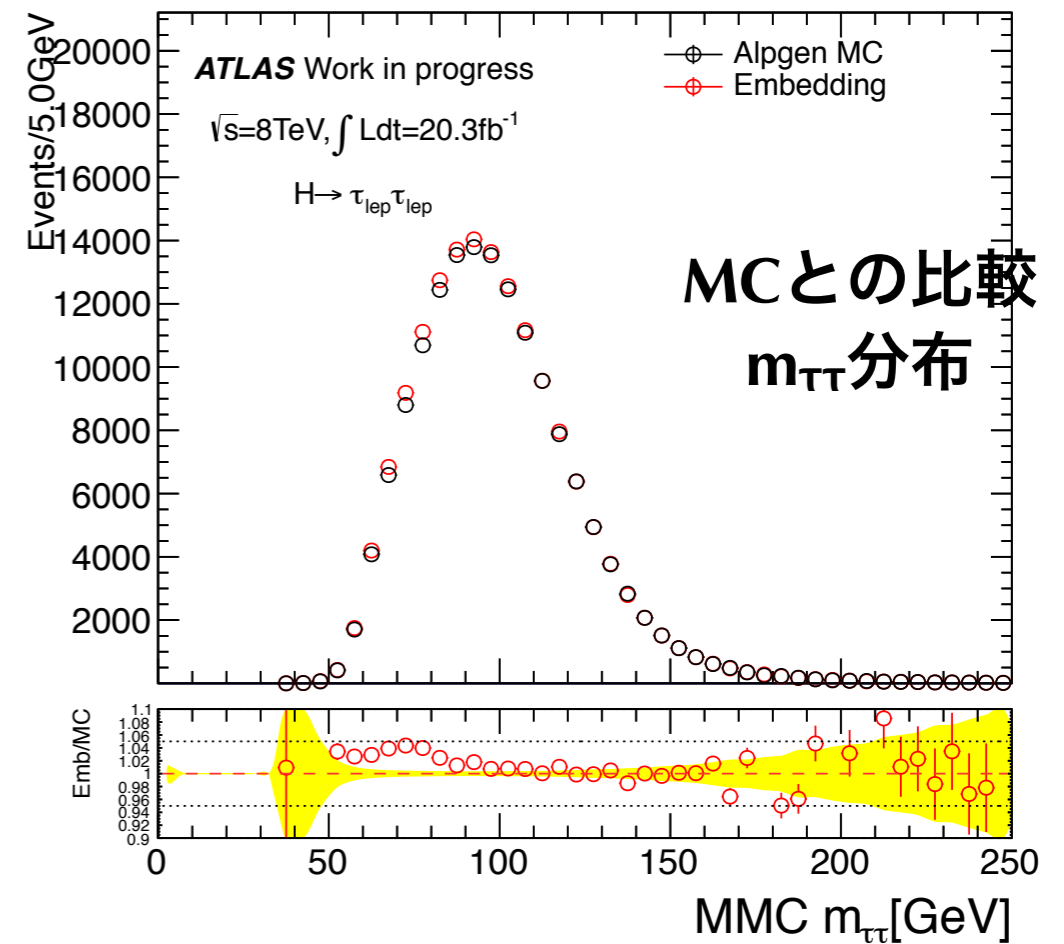
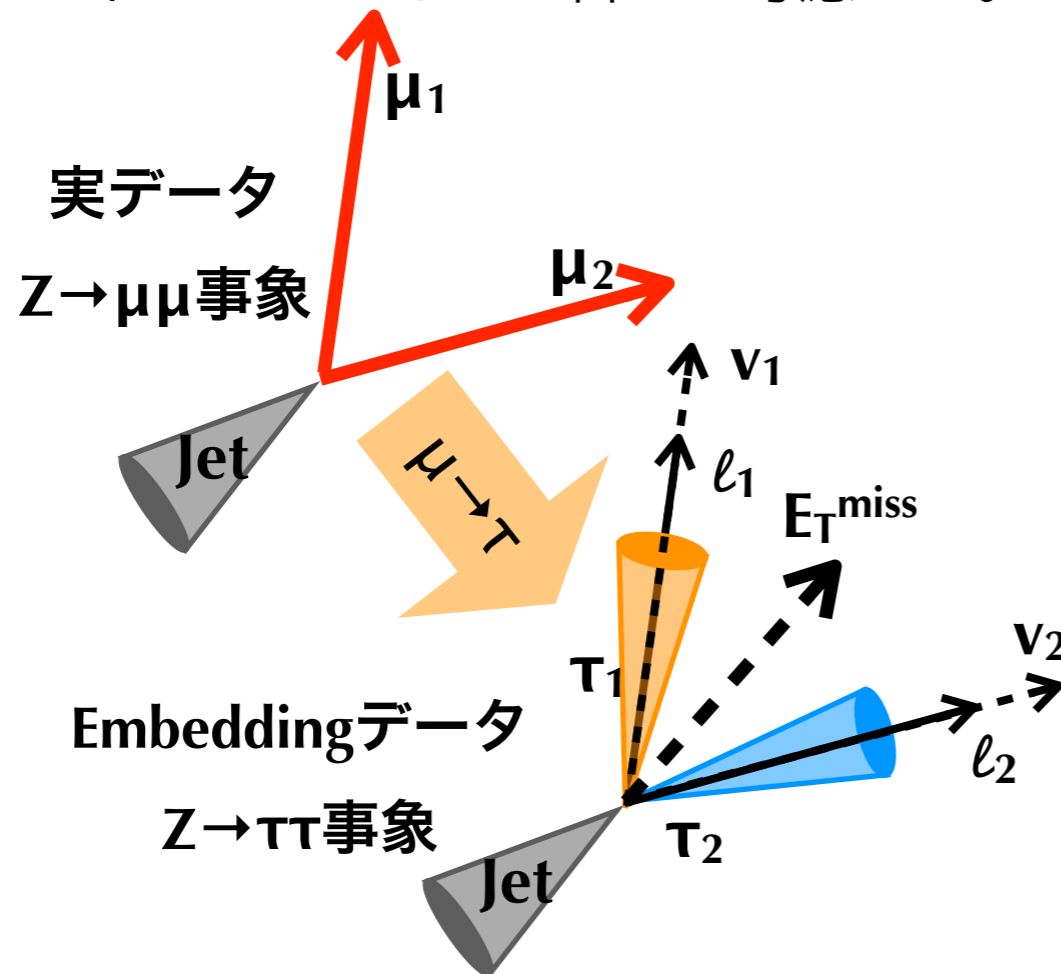
- 背景事象には, lepton, E_T^{miss} , jetが伴うプロセス
- チャンネル($ee, \mu\mu, e\mu$)で背景事象の構成が異なる
 - 2つのleptonを選択した後の $m_{\ell\ell}$ 分布.



- $Z \rightarrow \tau\tau$: irreducibleな背景事象, 主な違いは質量だけ \rightarrow 再構成した質量のみで分ける。
- Fake lepton事象: MCでの見積もりは困難 \rightarrow データから見積もる。
- その他の背景事象: MCサンプルをCRにおいて観測データを用いて補正する。
- Higgsの他の崩壊チャンネル: 特に断面積の大きい $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$ は無視できず背景事象とした。

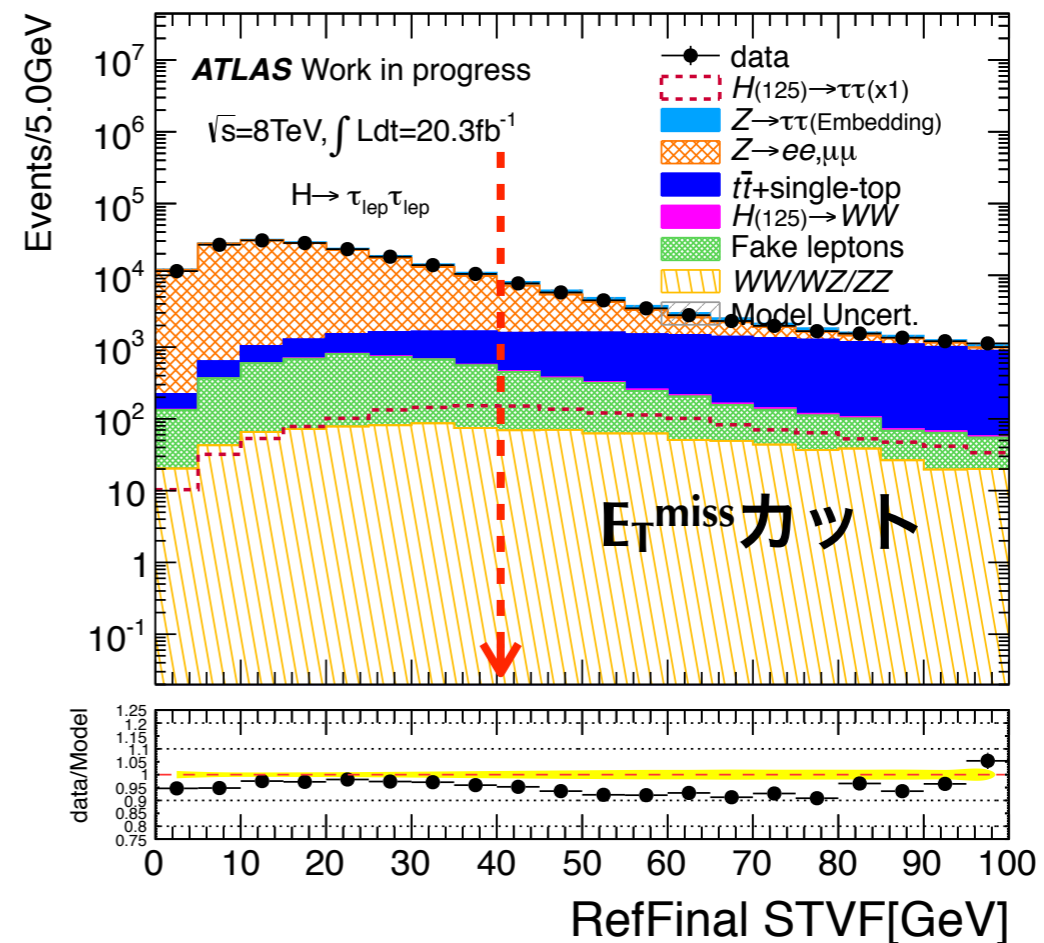
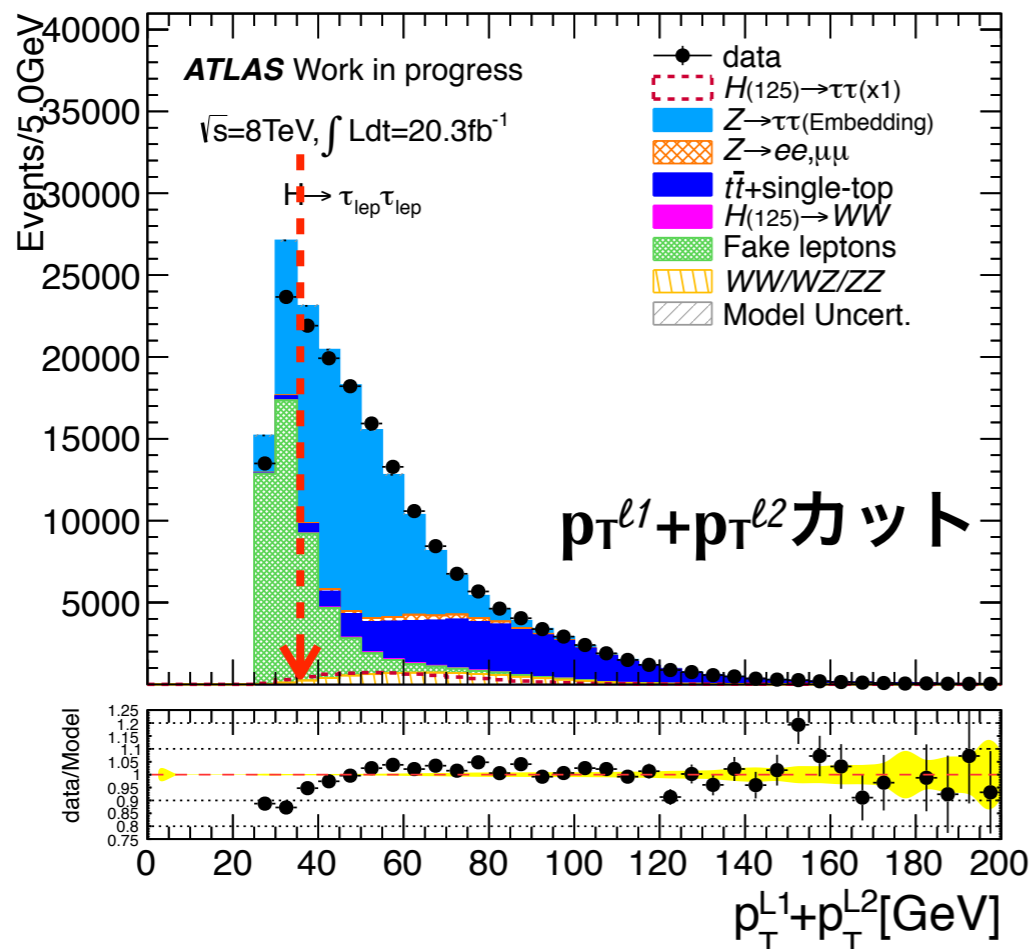
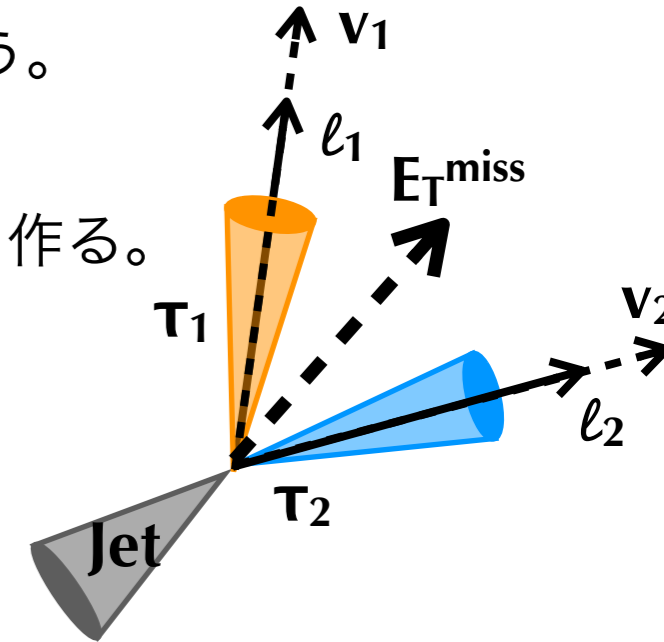
背景事象の見積もり: $Z \rightarrow \tau\tau$

- $Z \rightarrow \tau\tau$ の見積もり: 終状態が全く同じで、信号と比べ断面積も高く, irreducibleな背景事象である。
 - 最も重要な背景事象であるため、実データを用いた方法で見積もる。
- **Embedding method:** 観測データとシミュレーションを用いた方法。
 - データ中において $Z \rightarrow \mu\mu$ 事象を選び、 μ 粒子を τ 粒子(シミュレーション)に置き換える。
 - データを用いるためジェットやパイルアップアクティビティ等の不定性がなくなる。
 - 規格化はデータを用いる。
- $Z \rightarrow \mu\mu$ 事象の選択とカロリメータでの反応(μ 粒子)の置き換えにおいて系統誤差が生じる。
 - 今回、それらをシェイプも含めて考慮した。



事象選択

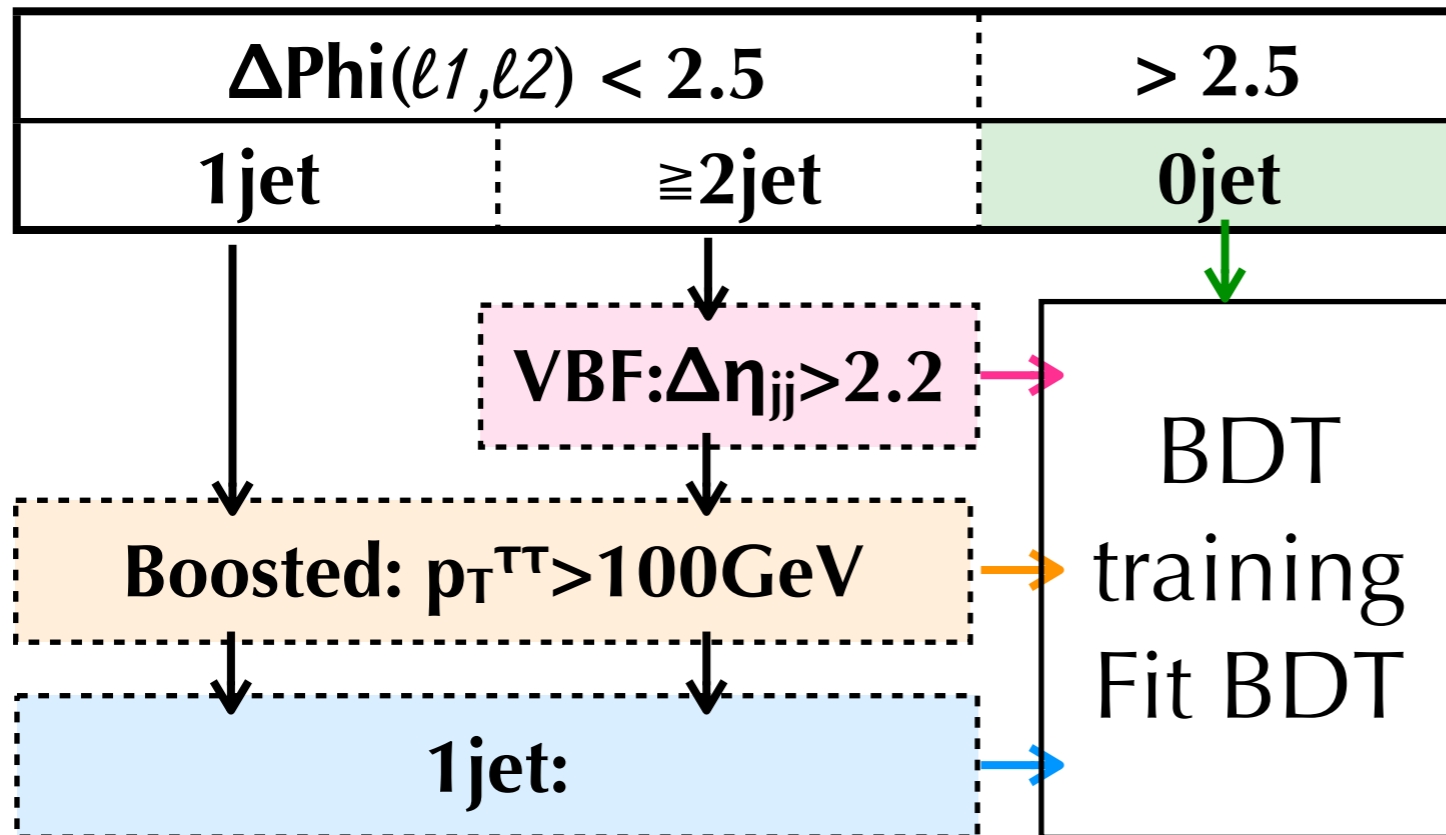
- 本解析は, トリガー(dilepton, single-lepton trigger)の後にPreSelectionを行う。
- その後、事象選別を行い、4つの信号領域 (SR)を設定する。
 - $m_{\ell\ell}$ カット: $Z \rightarrow \ell\ell$ 事象を落とすと同時にこのコントロール領域(CR)を作る。
 - $p_T^{l1} + p_T^{l2}$ カット: Fake lepton事象を落とす(Fake leptonはlow p_T が多い)
 - ジェットタグ: High p_T ジェットを要求する。
 - E_T^{miss} カット: E_T^{miss} を要求し $Z \rightarrow \ell\ell$ 事象やFake lepton事象を落とす。
 - E_T^{miss} が2つのレプトンの間にあることを要求する。
 - B-Tagging Veto: b-クォーク由来のジェットがいる事象をTop事象のCRとして利用する。



事象分類と多変数解析

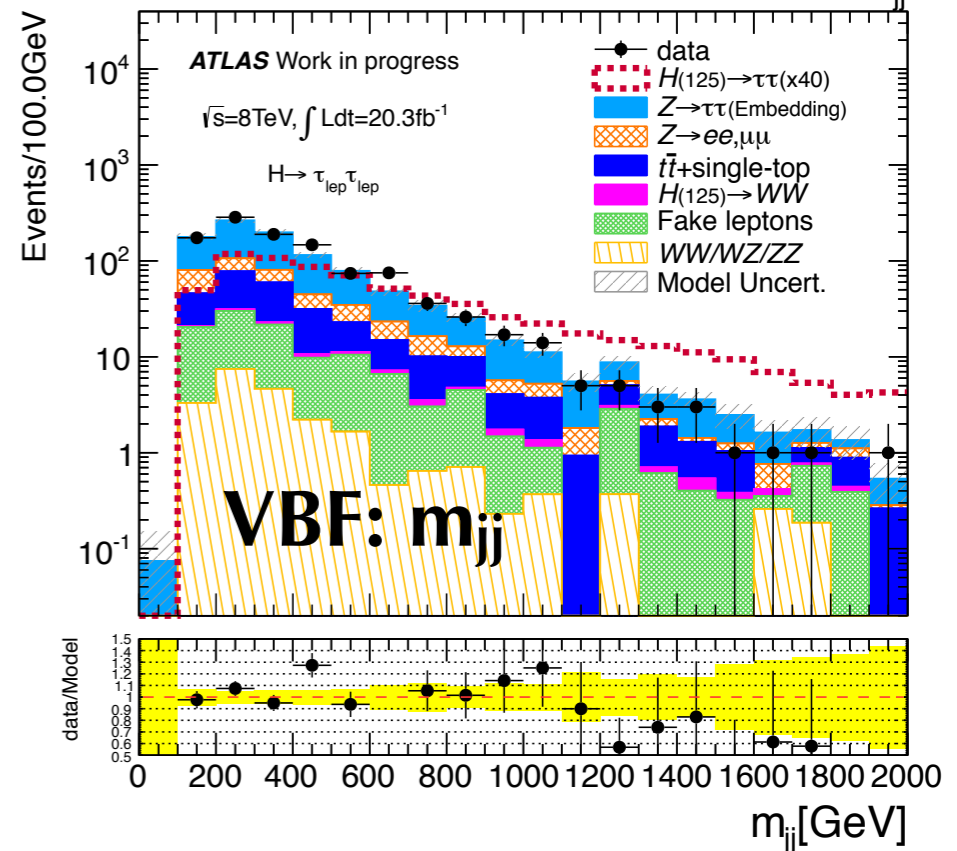
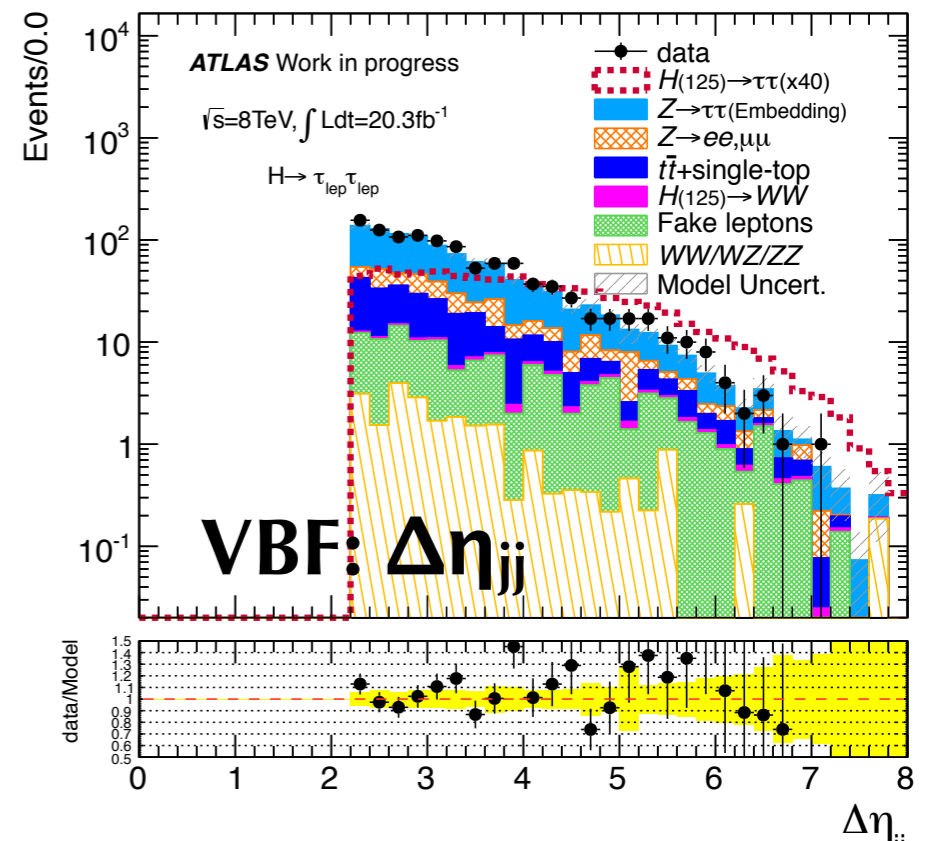
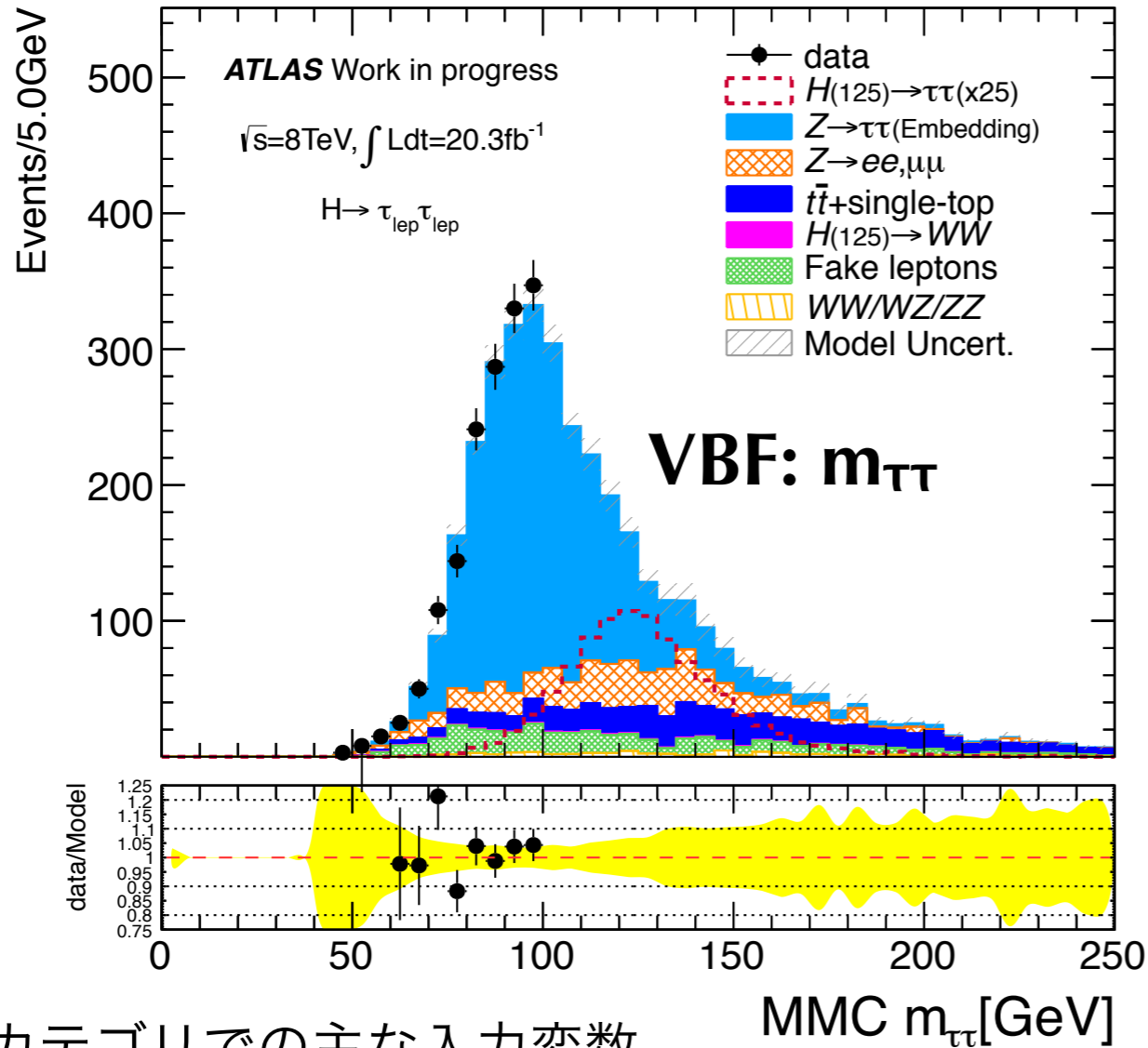


- 信号事象の生成過程に注目し事象分類を行い、発見感度の向上させる。
 - **VBFカテゴリ**: 前後方の2ジェットをタグする。
 - **Boostedカテゴリ**: $p_T^{\tau\tau} > 100\text{GeV}$ を要求し信号をenhanceする。
 - **0/1ジェットカテゴリ**: S/Nは良くないが、ggF過程をenhanceする。
- 生成される信号事象数が非常に少ない→多変数解析のひとつである**Boosted Decision Tree**を用いてさらなる向上を目指した。
- **Boosted Decision Tree: BDT**
 - 信号/背景事象の学習サンプルを用いて複数の決定木を作り、信号事象らしさ(BDTスコア)を計算する。



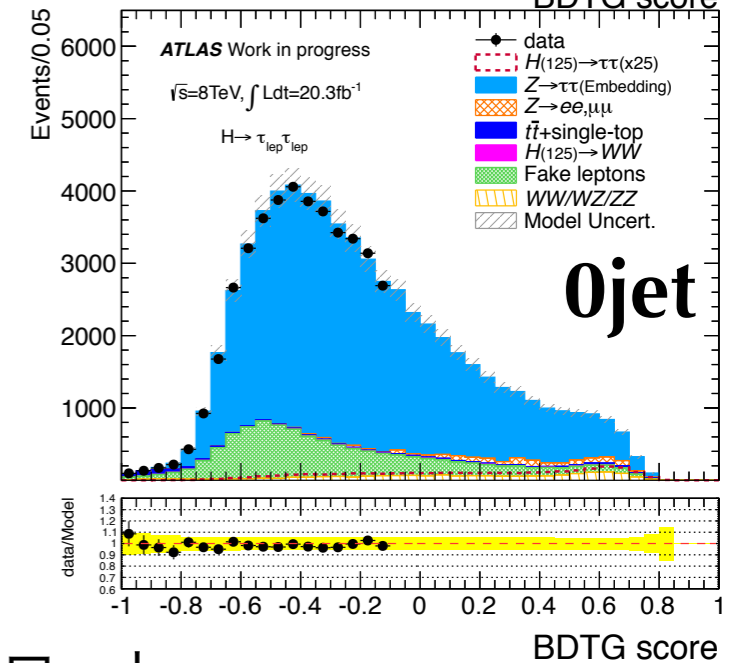
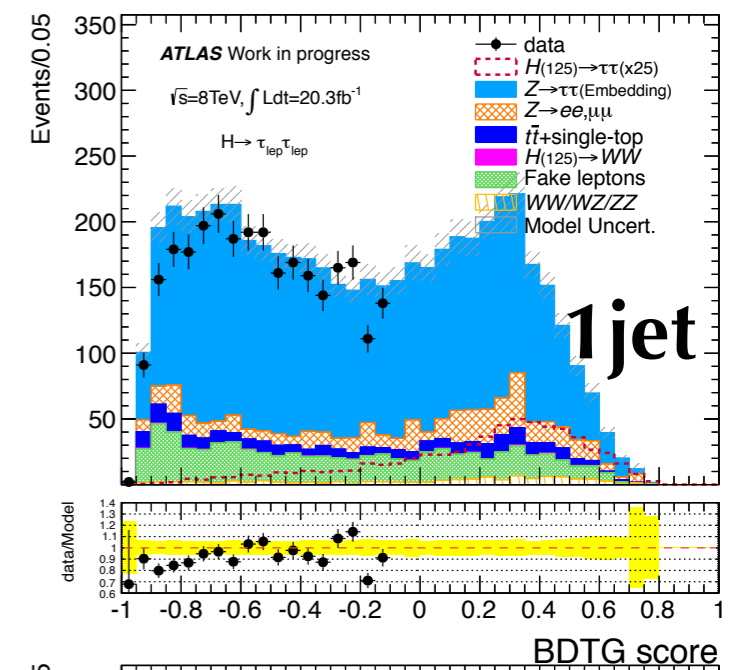
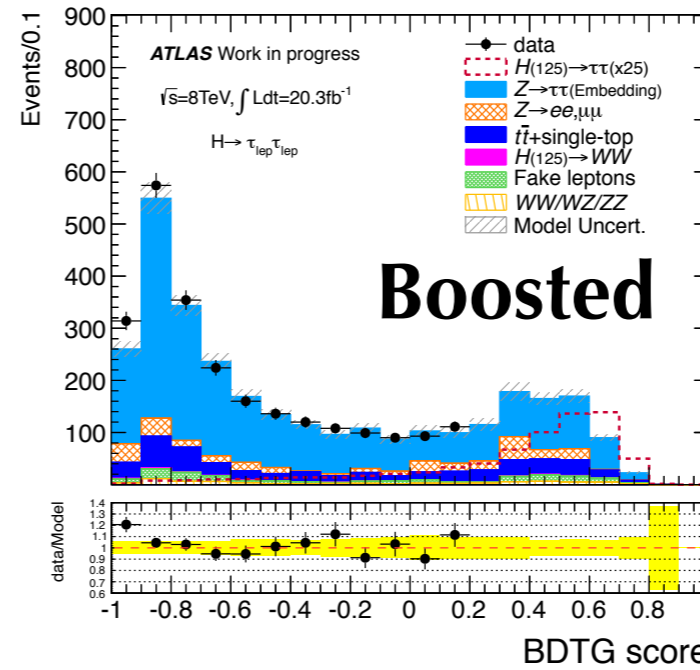
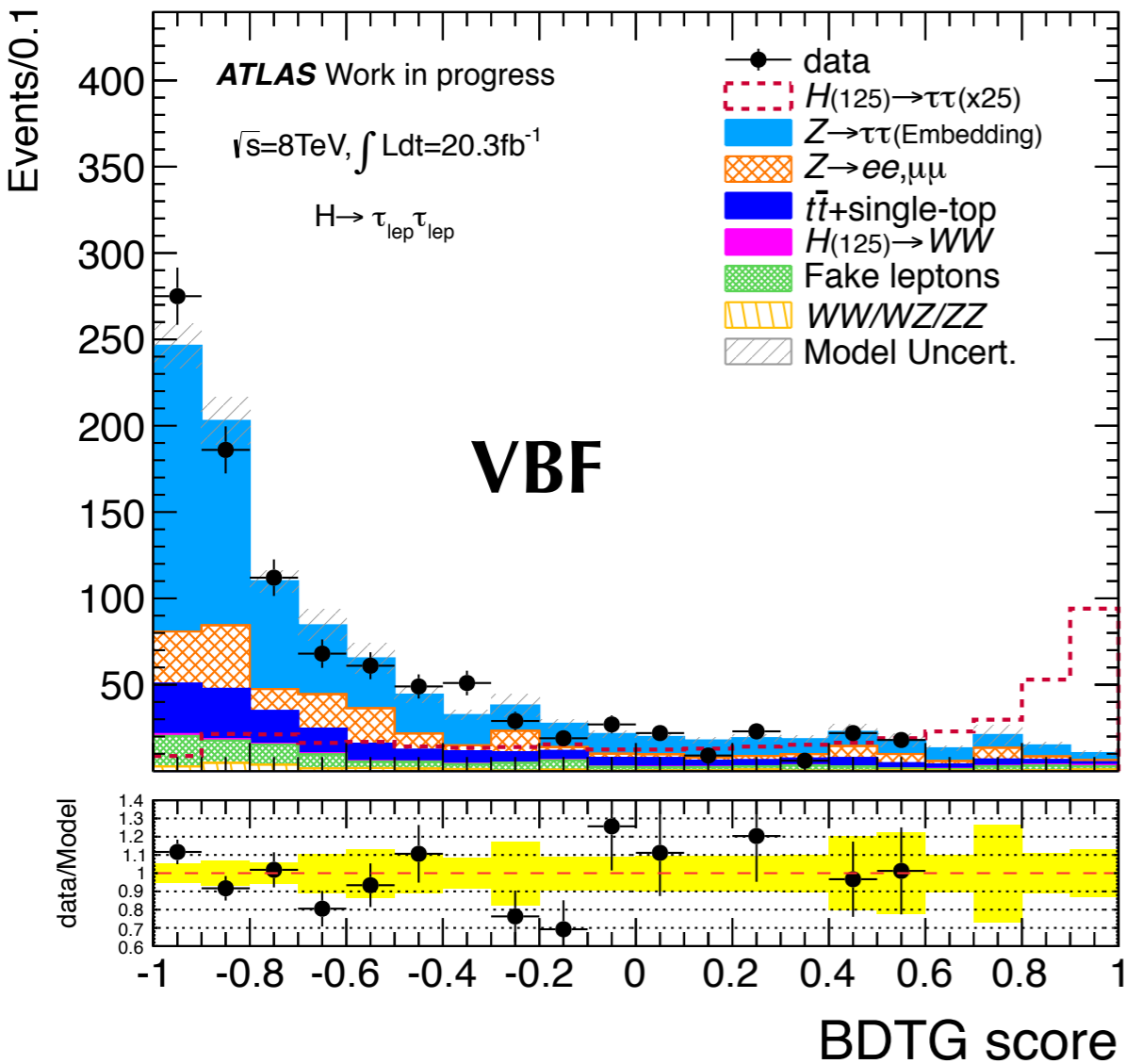
カテゴリ	主な入力変数
VBF	$m_{\tau\tau}, \Delta\eta_{jj}, m_{jj},$
Boosted	$m_{\tau\tau}, p_T^{\ell 1}, p_T^{j 1}, \Delta\phi_{\ell\ell},$
1jet	$m_{\tau\tau}, m_T^{\ell 1}, m_T^{\ell 2}, \Delta R_{\ell\ell}, H_T,$
0jet	$m_{\tau\tau}, m_{\ell\ell}, m_T^{\ell 1}, \Delta R_{\ell\ell}, H_T,$

BDTへの入力変数: VBFカテゴリ



- VBFカテゴリでの主な入力変数
- $m_{\tau\tau}$: 100GeV以上は信号事象が多いためブラインド中。
- $\Delta\eta_{jj}, m_{jj}$ (dijet 不変質量): いずれも VBF信号は高い領域まで分布し分離能力は高い。

信号領域でのBDTスコア分布

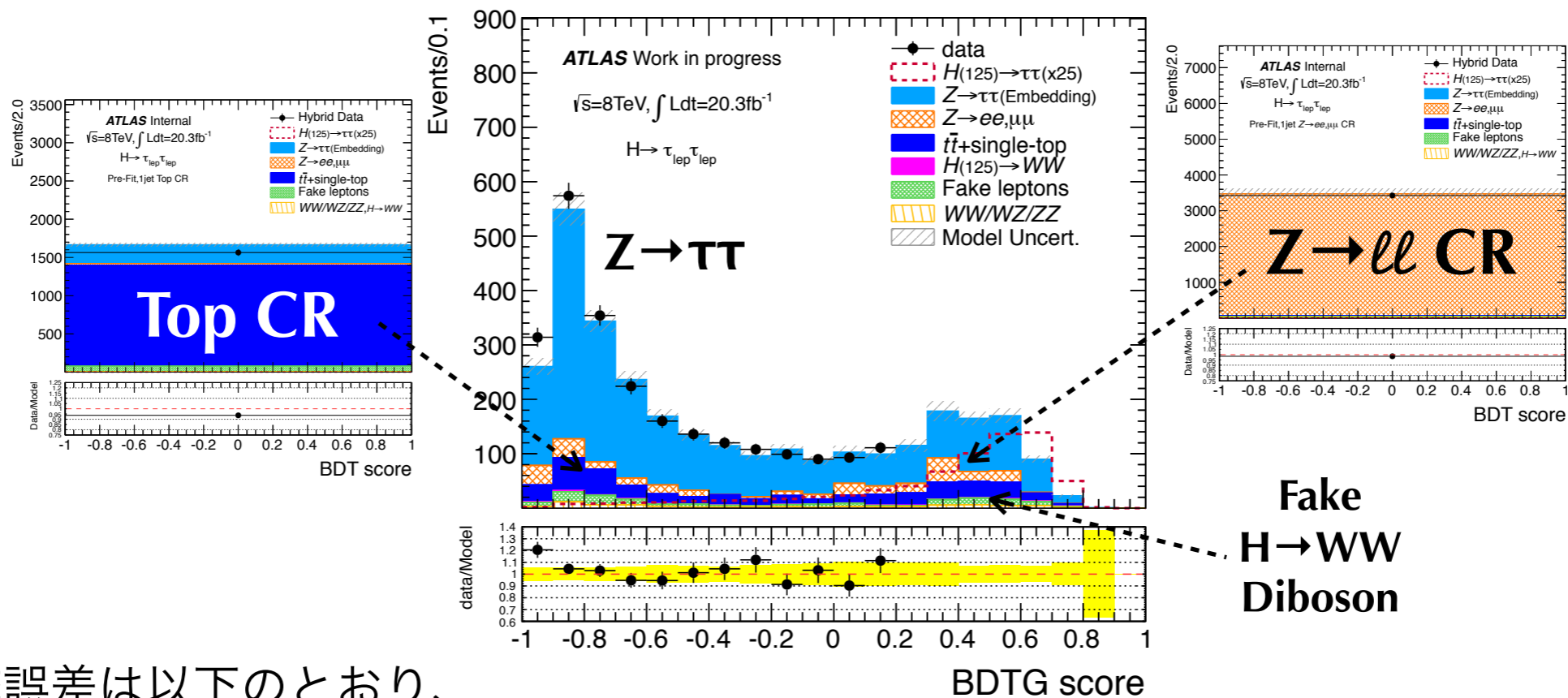


background Like ←-----→ **Signal Like**

- ハイスコア事象はまだブラインド中。信号事象が<30%の部分のみプロット。
- 特に、VBFカテゴリでは、信号と背景事象が綺麗にわかれており、
- これらのBDTスコア分布を用いて最終的な結果を、Profile Likelihood Fitにより得る。

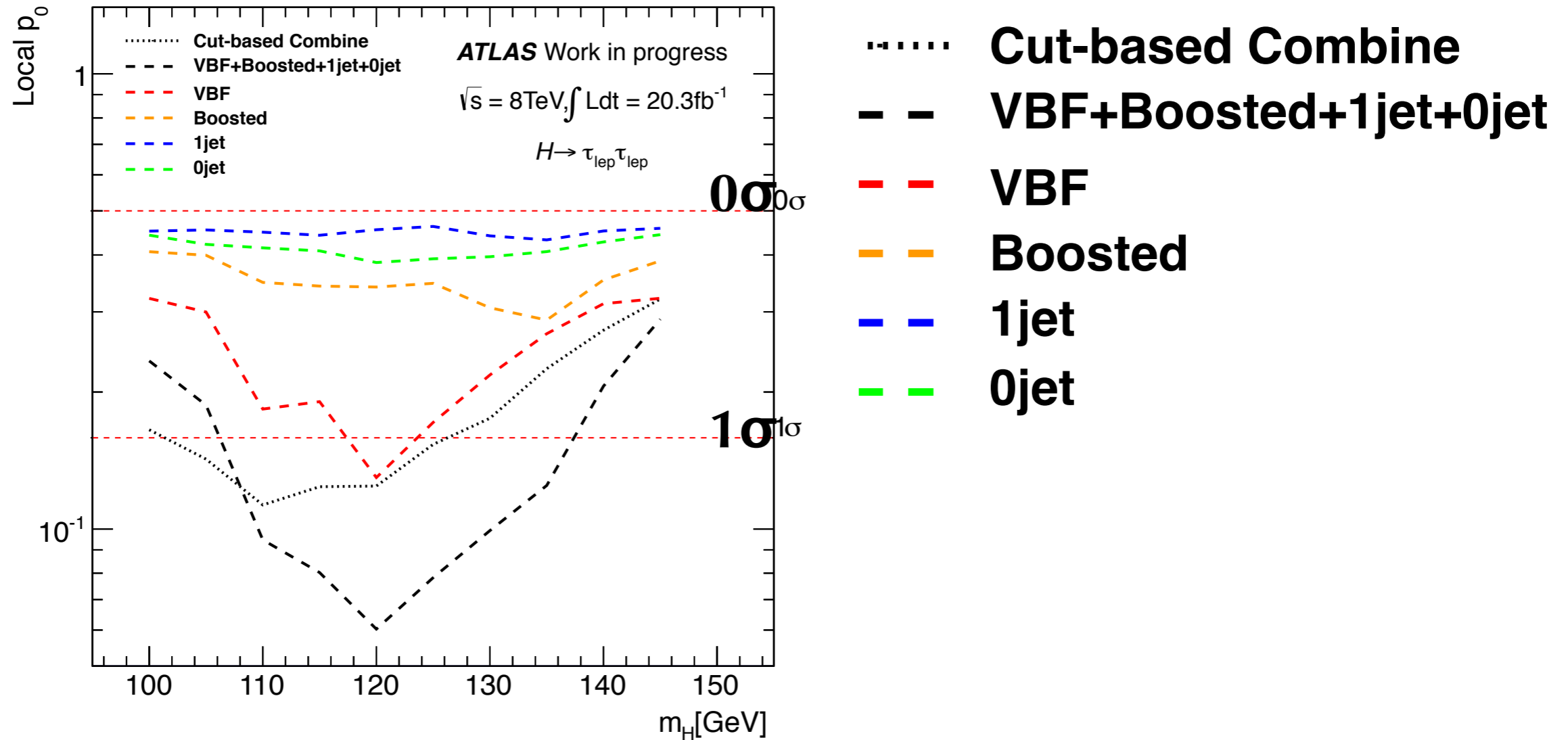
発見感度の計算方法

- Profile Likelihood法を用いて発見感度を計算した
- Likelihoodは信号領域(SR)だけではなくコントロール領域(CR)も考慮して作成した。



- 主な系統誤差は以下のとおり、
 - B-tagging efficiency: ~10%
 - ジェットエナジースケール: 5~15%
 - Embedding methodによる不定性: ~15%
 - ggF過程のQCDスケールの理論計算: 30%

発見感度



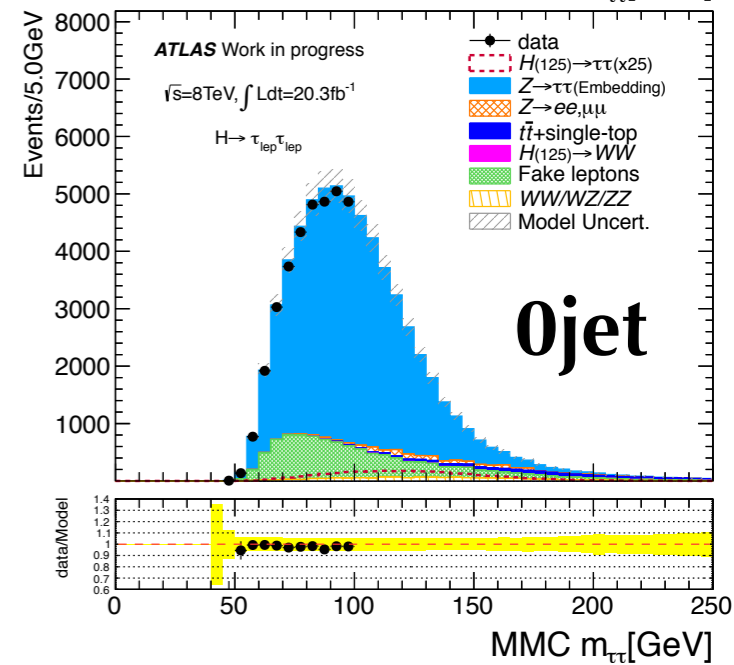
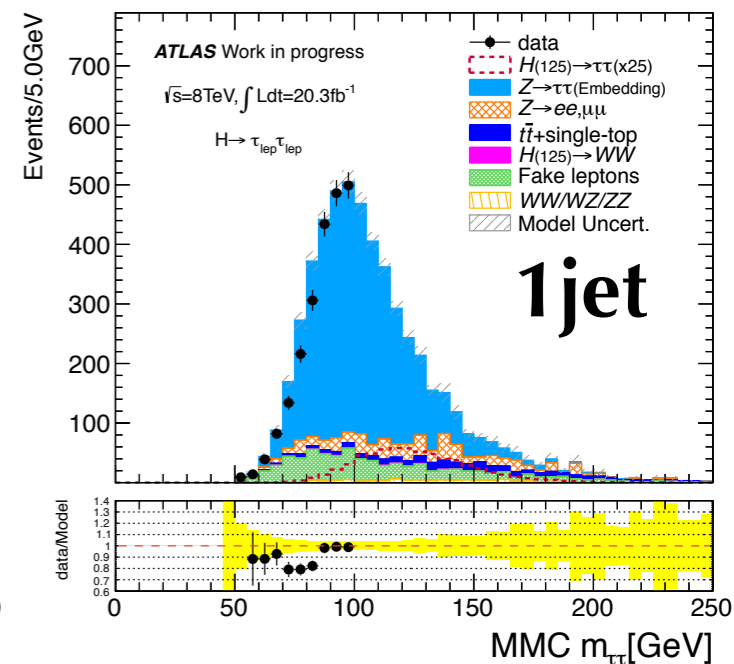
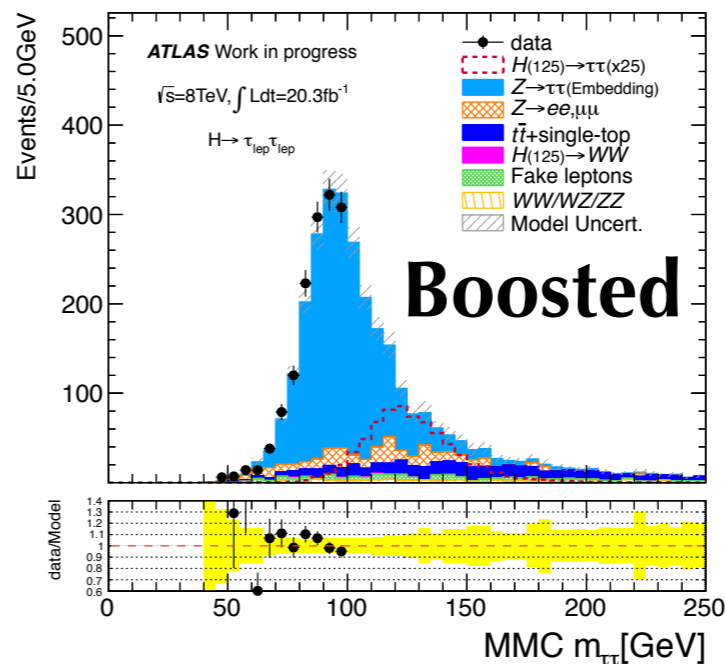
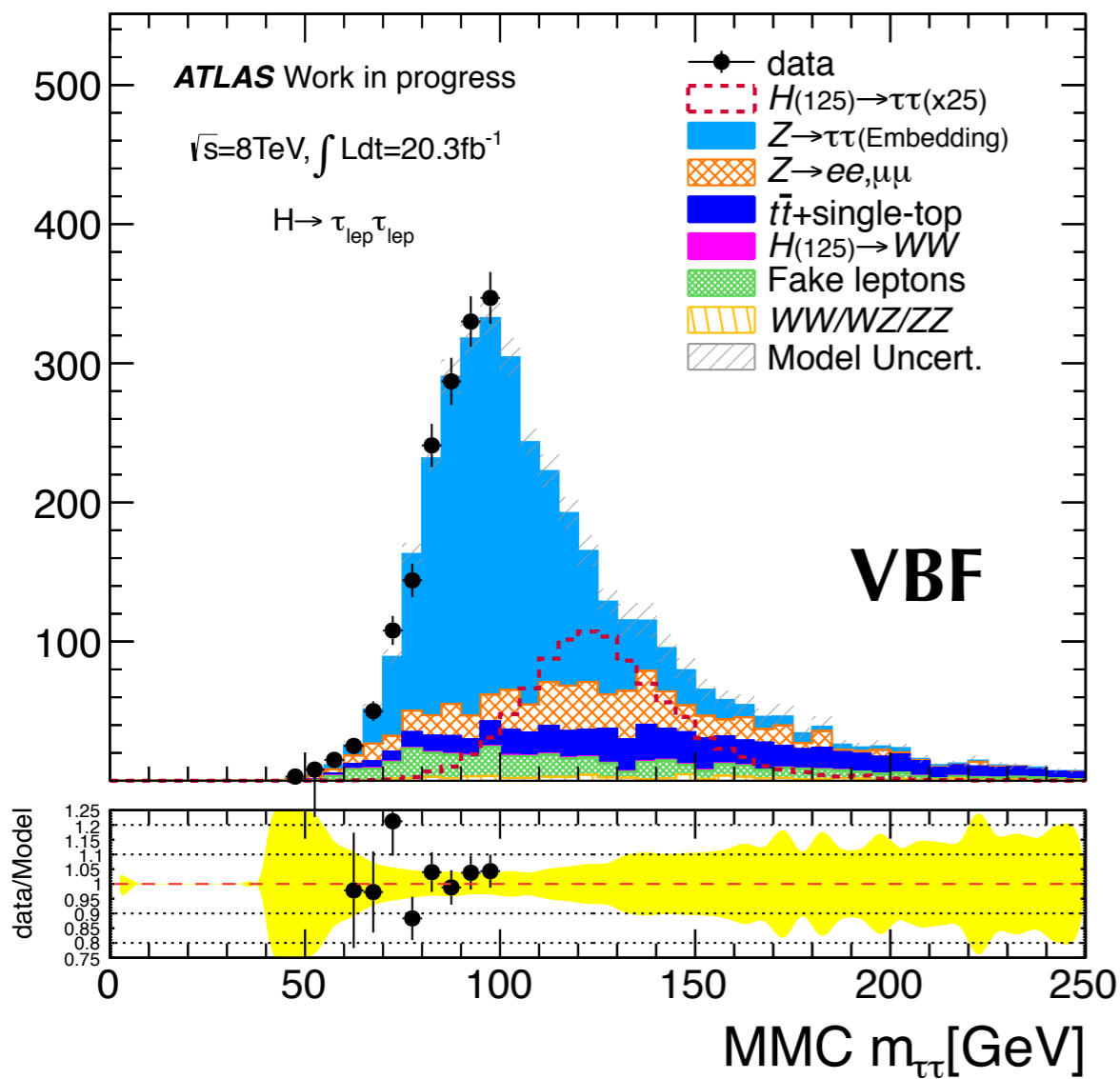
- 4つの信号領域とコンバインした場合の予測される発見感度を示す。
 - VBFカテゴリがもっとも感度を持ち、単独で 1.0σ を超える。
- その他のカテゴリを全てコンバインすると**125GeVでは約 1.4σ** の発見感度が予測される。
 - ➡ 従来の方法に比べ**40%の発見感度向上!!**

まとめ

- $H \rightarrow \tau\tau \rightarrow \text{lepton-lepton}$ モードを2012年取得した全てのデータ(8TeV, 20.3fb⁻¹)を用いて解析した。
- 事象を4カテゴリに分けて解析し、さらに多変数解析を導入した。
 - 期待される発見感度は4つの信号領域を合わせて約1.4 σ である。
 - 解析手法の改善により前回に比べて、合計で80%(ほぼ倍返し)の改善を達成した。
 - データの統計による改善：約25%
 - 多変数解析による改善：約40%
 - その他の改善：約15%
- 解析結果は他のlepton-hadron, hadron-hadronモードと合わせてもうすぐ出ます。
 - 発見感度は3つの崩壊モードで3.6 σ 程度である。

Back Up!

BDTへの入力変数:MMC $m_{\tau\tau}$



- 各カテゴリーでの再構成された質量 $m_{\tau\tau}$ 分布。
 - (100GeV以上は信号事象が多いため、まだブラインド中。)

質量再構成

- Higgs粒子と $Z \rightarrow \tau\tau$ を見分けるには質量の再構成が重要

- 崩壊粒子の方向が元の τ 粒子の方向に近い \rightarrow Collinear近似

- **Collinear mass:** di-tau Collinear近似を用いて再構成した質量

- **MMC(Missing Mass Calculator) mass:**

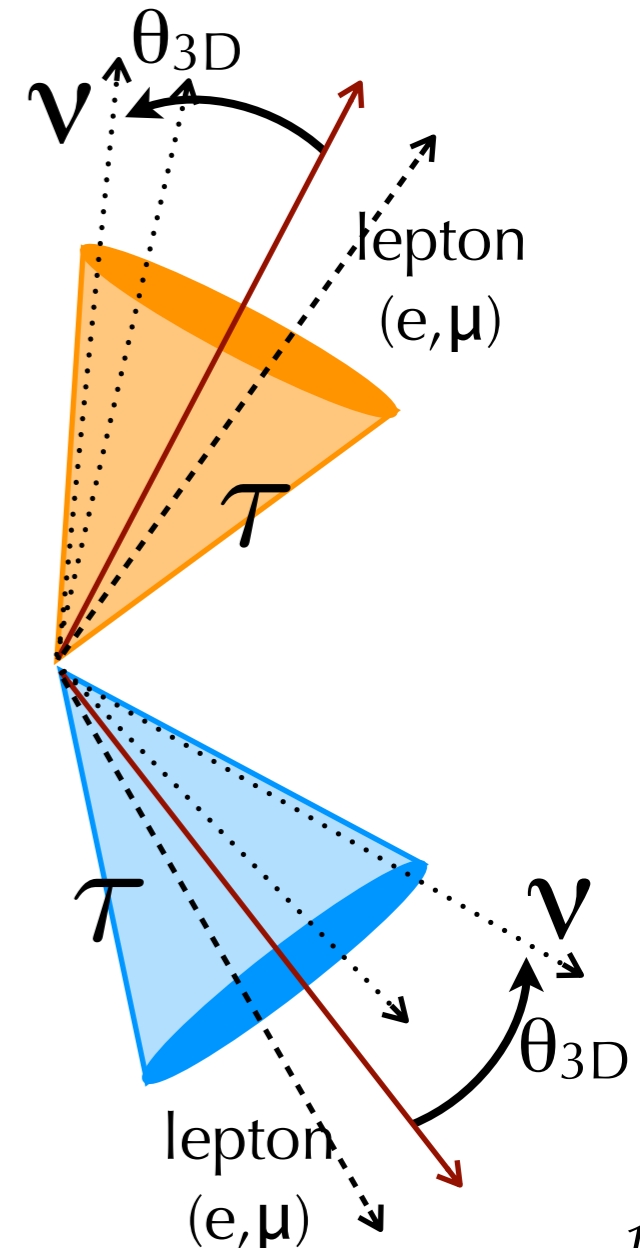
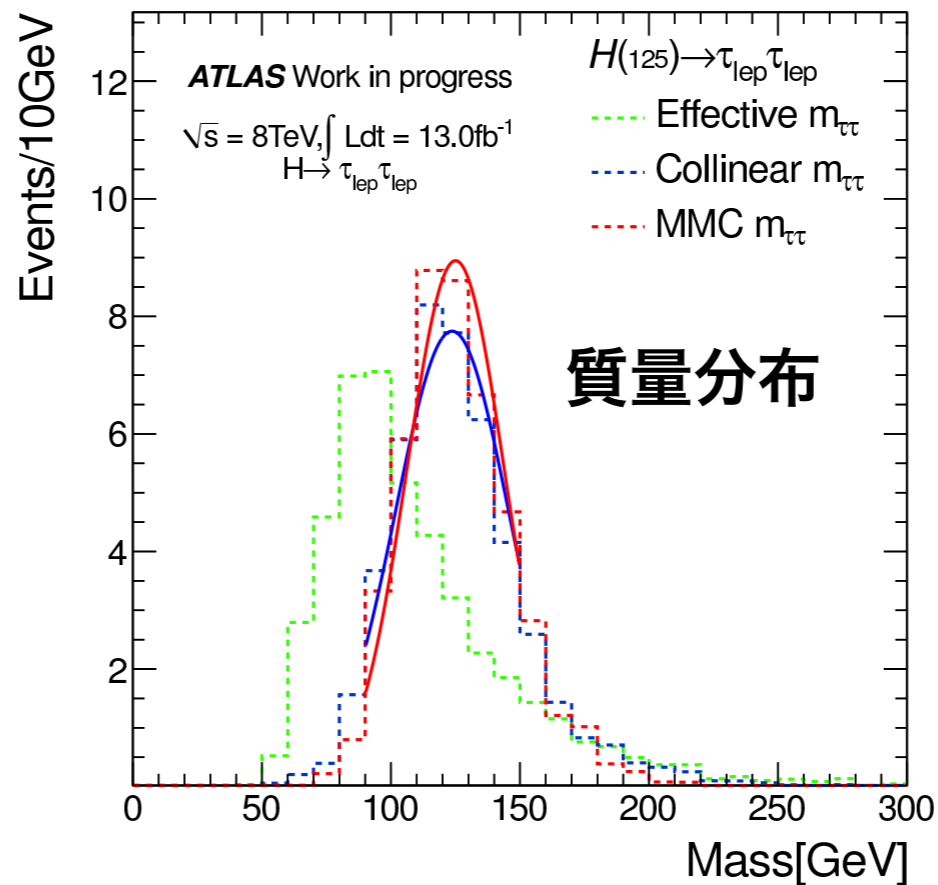
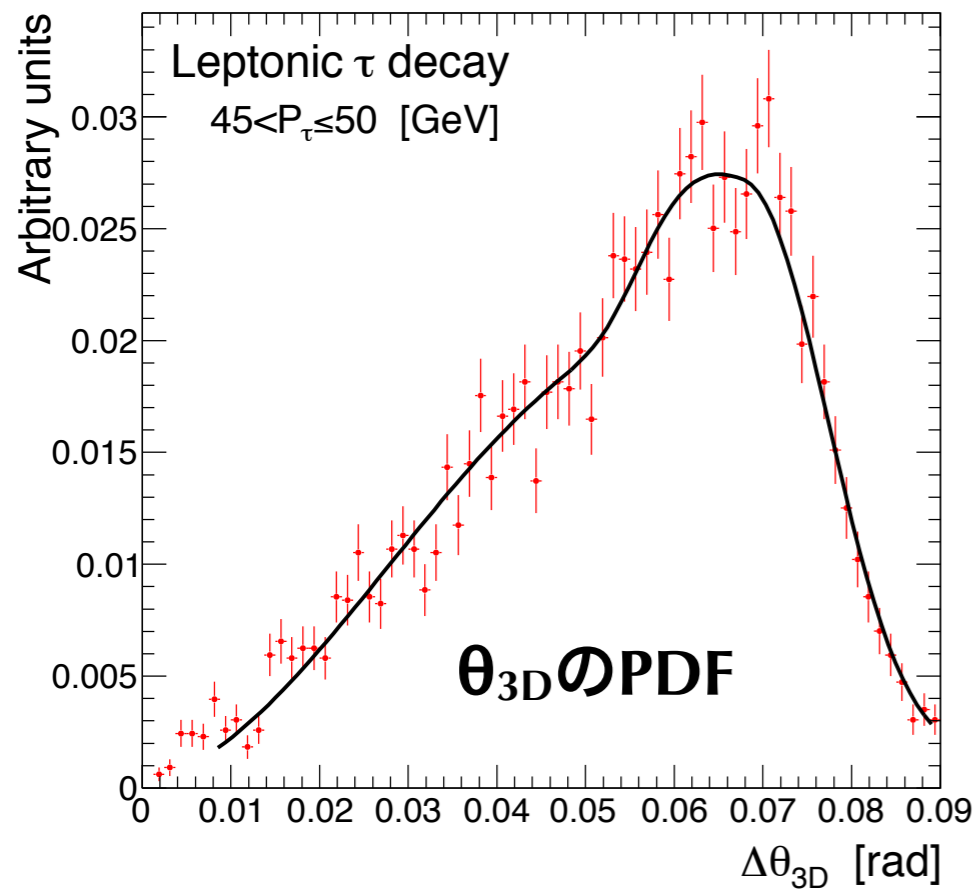
- τ 粒子の方向と再構成可能な崩壊粒子(群)の3次元的な角度(θ_{3D})をPDF(確率密度関数)にもつLikelihoodを用いて再構成した質量

$$\mathcal{P}_{event} = \mathcal{P}(\Delta\theta_1, p_{\tau 1}) \times \mathcal{P}(\Delta\theta_2, p_{\tau 2}) \times \mathcal{P}(\Delta E_x^{miss}) \times \mathcal{P}(\Delta E_y^{miss}),$$

$$m_{\tau\tau}^{coll} = \frac{m_{\ell\ell}}{\sqrt{x_1 x_2}}$$

$$x_{1,2} = \frac{p_{\ell_{1,2}}}{p_{\ell_{1,2}} + p_{miss_{1,2}}}$$

$$0 < x_{1,2} < 1.0$$



事象選択

- 本解析は, トリガー(dilepton, single-lepton trigger)の後にPre-selectionを行う。
- その後、カテゴリゼーションを行い、4つの信号領域 (SR)を設定する。
 - Pre-selectionの各カットの詳細

Cut	$\geq 1\text{jet}:e\mu(ee + \mu\mu)$	0jet: $e\mu$
Cut1	Exactly Two leptons with O.S.	
Cut2	$30 \text{ GeV} < m_{\ell\ell} < 100(75) \text{ GeV}$	
Cut3	$p_T^{\ell_1} + p_T^{\ell_2} > 35 \text{ GeV}$	
Cut6	$\Delta\phi_{\ell\ell} < 2.5$	$\Delta\phi_{\ell\ell} > 2.5$
Cut4	$p_T^{J1} > 20(40) \text{ GeV}$	$\Delta\phi_{\ell_1, E_T^{\text{miss}}} > 1.5$
Cut5	$E_T^{\text{miss}} > 20(40) \text{ GeV}$	$p_T^{\ell_1} + p_T^{\ell_2} + E_T^{\text{miss}} < 125 \text{ GeV}$
Cut6	$0.1 < x_{1,2} < 1.0$	None

- **Cut2:** $m_{\ell\ell}$ で $Z \rightarrow \ell\ell$ 事象を落とすと同時にこのコントロール領域(CR)を作る。
- **Cut3:** Fake lepton事象を落とす(Fake leptonはlow p_T が多い)
- Cut4: 2レプトンがback-to-backなトポロジーか否かでカテゴリライズ。
- Cut5: ハードプロセスからのHigh p_T ジェットを要求する。
- Cut6: E_T^{miss} を要求し $Z \rightarrow \ell\ell$ 事象やFake lepton事象を落とす。
- Cut7: di-tauがCollinearなトポロジーを要求する。

