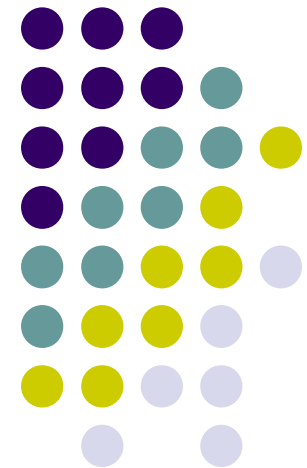


# J/ $\psi$ $\rightarrow$ $\mu\mu$ 事象を用いた ATLASミューオンスペクトロメータの性能評価

～ 後講演「ATLAS実験におけるミューオンチャンネルでのクォークoniumの測定」  
との連続講演 ～

結束晃平, 坂本宏, 織田勸,  
久保田隆至, 松下崇<sup>A</sup>  
他 ATLAS Collaboration

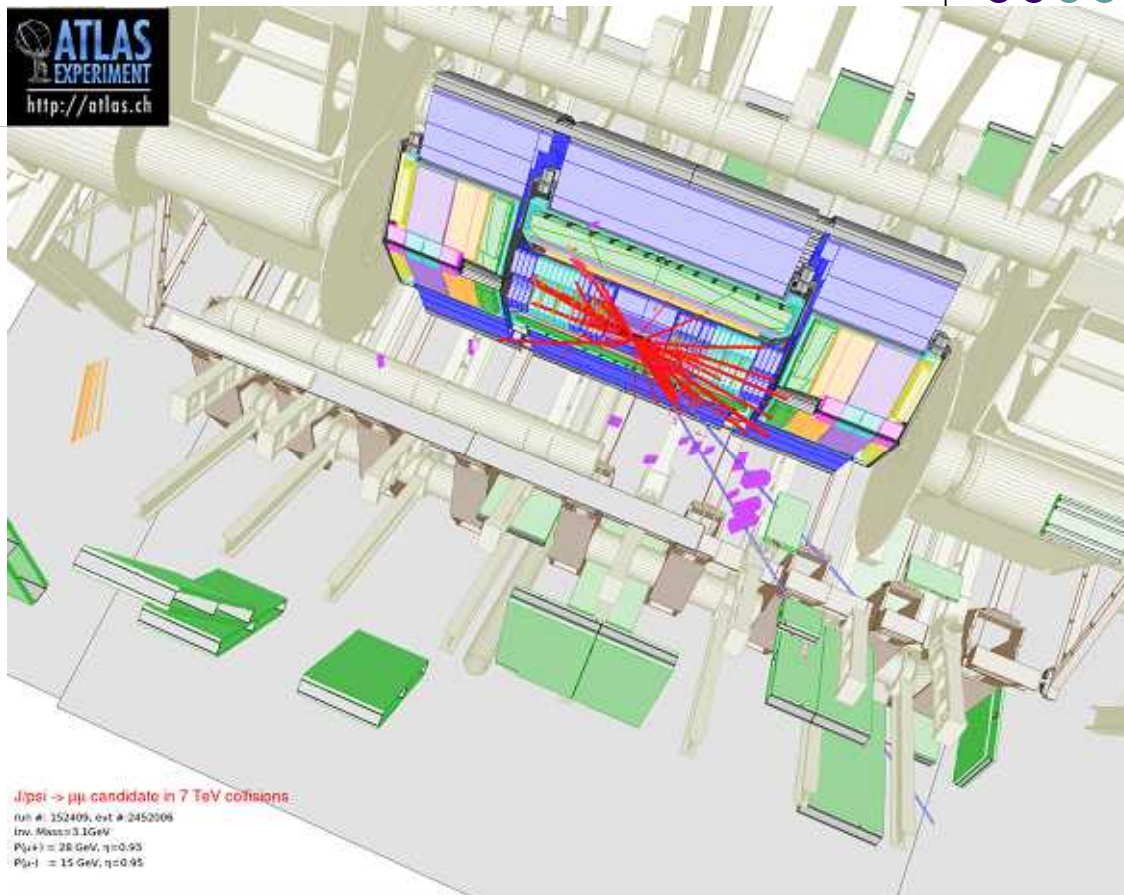
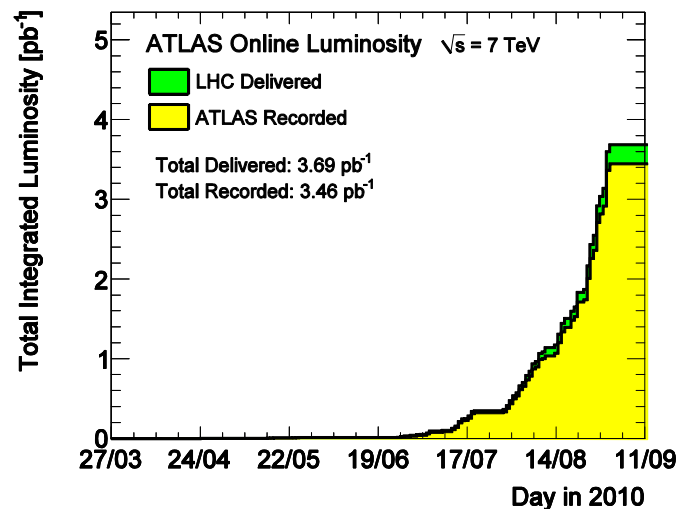
東大素セ, 神戸大理<sup>A</sup>



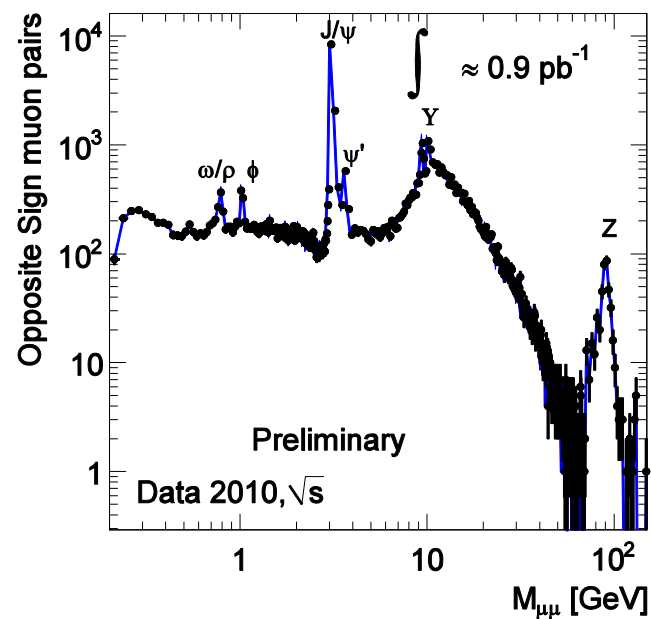


# // 導入

LHCは順調にデータを取得中



J/ψ → μμ 候補事象



di-muon スペクトラム

# // なぜクォークonium( $J/\psi$ ) か / 何を測定するか



なぜクォークoniumか？

実験初期に観測される物理事象の一つ→豊富な統計量

→  $J/\psi$ は共鳴幅が狭いため、di-muonチャンネルが検出器システムの評価に有用

Channel	Statistics in ATLAS $s = 7 \text{ TeV}, 1\text{pb}^{-1}$
$J/\psi \rightarrow \mu\mu$	~ 10K
$Y \rightarrow \mu\mu$	~ 1K
$Z \rightarrow \mu\mu$	~ 0.1K

- クォークonium生成メカニズムの理解 → 次の講演
- Bの物理
- Light CP-odd Higgs bosonの探索

$$\sigma = \frac{N}{L \cdot (A \cdot \prod \varepsilon)}$$

N : 観測された信号数  
L : ルミノシティ  
A : アクセプタンス  
 $\varepsilon$  : 効率

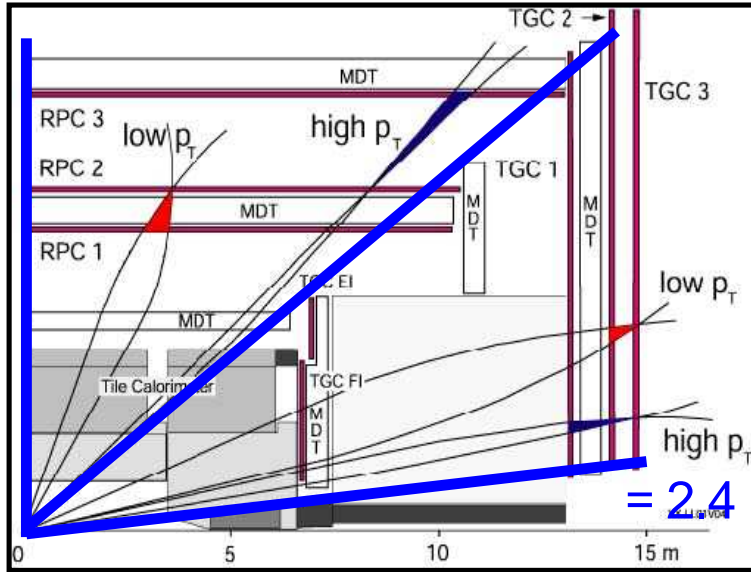
→ 断面積測定には効率(トリガー, 再構成)の測定が不可欠

# // レベル1トリガー

ATLAS 断面図

= 0

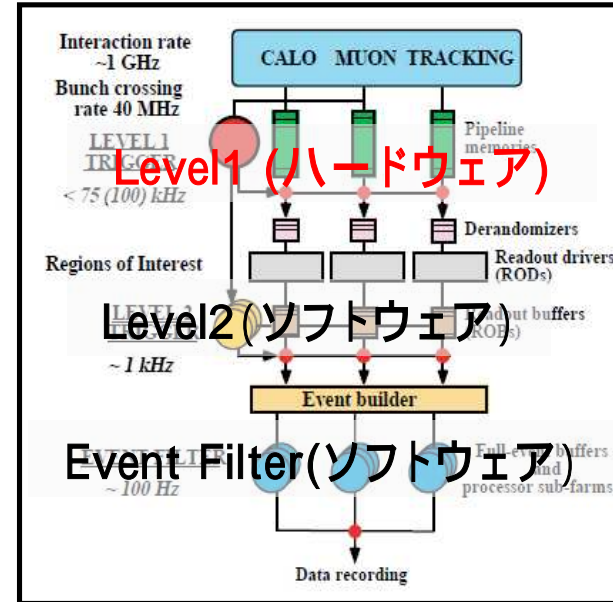
= 1.05



= 2.4

最内部: 内部飛跡検出器  
 中央部: 電磁・ハドロンカロリメータ  
 最外部: **ミュオンスペクトロメータ**  
 $\eta < 1.05$  Barrel領域  
 $\eta \geq 1.05$  End-Cap領域  
**トリガー検出器が異なる**

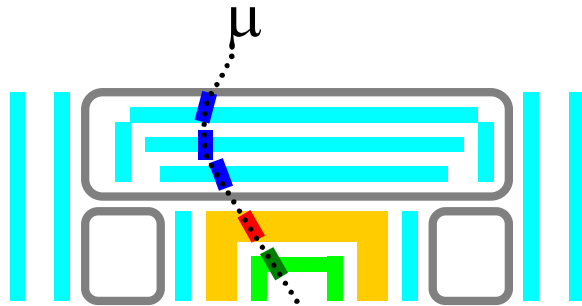
ATLAS トリガースキーム



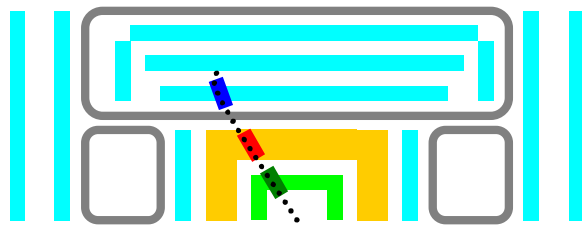
初段トリガーがレベル1トリガー  
 →  $p_T$  をハードウェアで6段階にラベル付け・評価する  
 → 実験状況に応じて変更可能なトリガーマニュー  
 現時点でのレベル1ミュオントリガーマニュー:  
**MU0(もっとも緩いトリガー条件) など6段階**



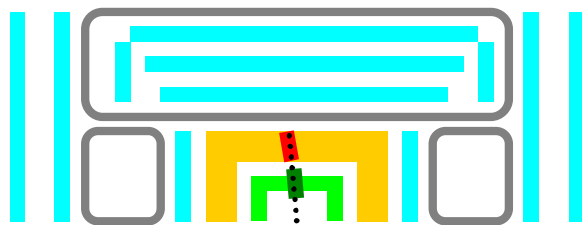
# // ミューオン再構成アルゴリズム



- ・ Combined トラッキング
  - ミューオンスペクトロメータの情報
  - 内部飛跡検出器の情報
  - カロリメータでのenergy deposition情報



- ・ Segment tagger
  - 低い運動量を持つミューオンに対して有効
  - 内部飛跡検出器の情報
  - ミューオンスペクトロメータの部分的な情報



- ・ Calorimeter tagger
  - 内部飛跡検出器の情報
  - カロリメータの情報

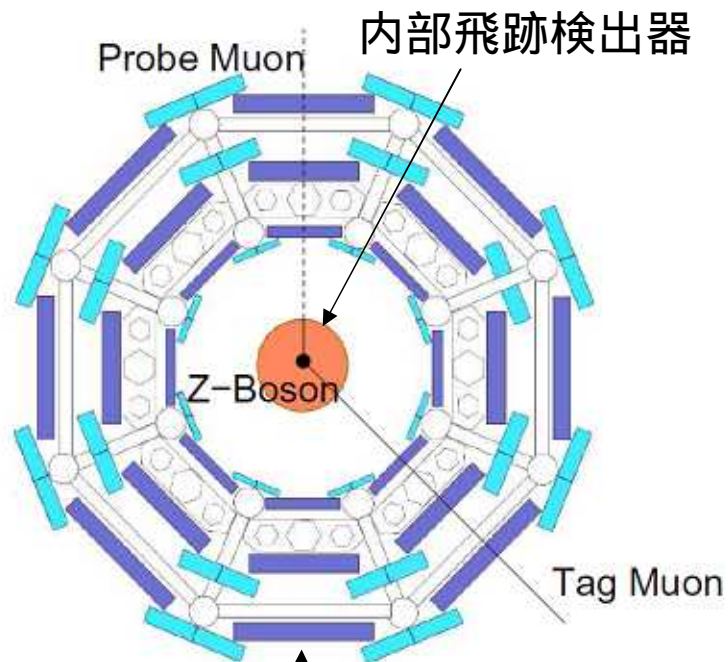
ミューオンスペクトロメータ単体での再構成も可能

# // 再構成/トリガー効率測定法 ~ Tag & Probe 法 ~



di-muon を用いて検出器の効率を測定する方法

- **Probe**とするミュオンに対して  
評価対象となる検出器情報を用いない測定手法
- **絶対的な効率測定が可能!**



ミュオンスペクトロメータ  
( 評価対象検出器群 )

## Tag & Probe法の要点

1. Combined ミュオンを**Tagミュオン**とする
2. Tagミュオンと内部飛跡検出器情報**のみ**の軌跡情報( Probe候補 )で質量を組む
3. 質量が $J/\psi$ 付近であるとき、Probe候補を**Probeミュオン**とみなす

ミュオンスペクトロメータを用いずに  
粒子の質量ピークを利用してProbeをつくる!!

**効率** = “Probeに対応するトリガー又は再構成情報が存在する数”  
/ “( 背景事象を除いた ) 全Probe数”

# // 解析条件

統計量  $\sim 330\text{nb}^{-1}$

## // Pre selection

- Triggers requested: L1\_MU0
- 衝突点から来ているイベントであることを要求  
- 衝突由来の軌跡であることを要求 (宇宙線の可能性の除去) など
- Each track  $\geq 6$  SCT hits,  $\geq 1$  pixel hit

## // Tag selection

- Combined muon
- $p_T$  of associated ID track  $> 4$  GeV
- $|\eta| < 2.5$
- Combined ミューオンを要求 (ミューオンであることを保証するため)
- 衝突由来の軌跡であることを要求 (宇宙線の可能性の除去)
- $p_T > 4\text{GeV}$
- as TRT Hits cuts,  
if  $(|\eta| < 1.9)$   $n\text{Hits}(n\text{TRTHits} + n\text{TRTOuliers}) > 5 \ \&\& \ \text{outliers}/n\text{Hits} < 0.9$   
if  $(|\eta| \geq 1.9)$  require outlierd/nHits < 0.9 only when nHits > 5 など
- impact parameter w.r.t. Primary Vertex cuts:  $d_0 (< 0.3\text{mm})$ ,  $z_0 (< 1.5\text{mm})$ ,  
 $d_0$  and  $z_0$  significance  $< 3$  (in addition, track  $d_0$  at perigee  $< 2\text{mm}$ )

## // Probe selection

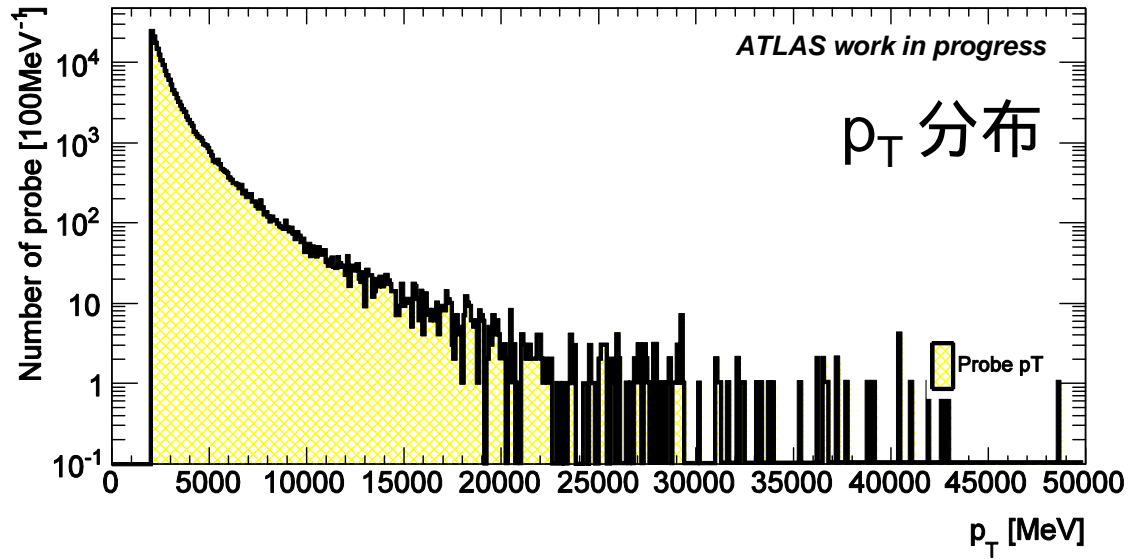
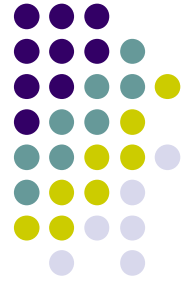
- $p_T > 2\text{GeV}$
- 内部飛跡検出器の情報のみを用いる (ミューオンスペクトロメータの情報は使わない)
- $|\eta| < 3$
- 衝突由来の軌跡であることを要求 (宇宙線の可能性を除去)
- $p_T > 2\text{GeV}$  など

## // Cuts on Tag & Probe

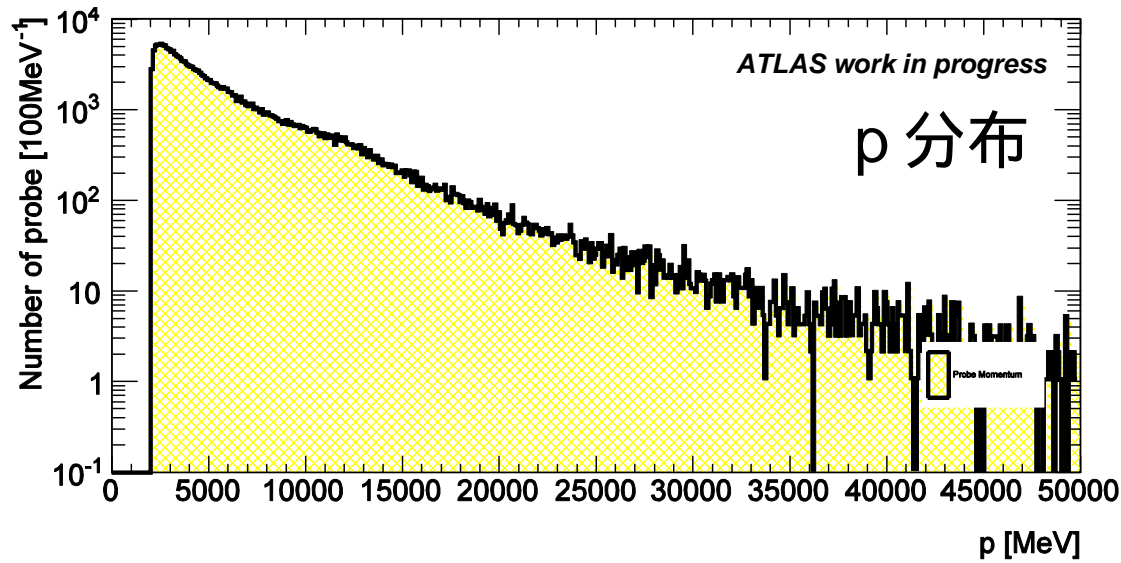
- Tag and probe ID tracks should come from a common vertex
- Tag及びProbeが共通のバーテックスから来ていることを要求
- 反対の電荷同士であること など



# // Probe 分布

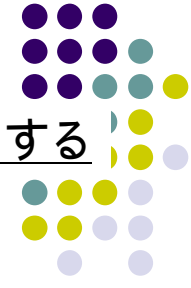


$p_T$  10GeV程度まで測定可能

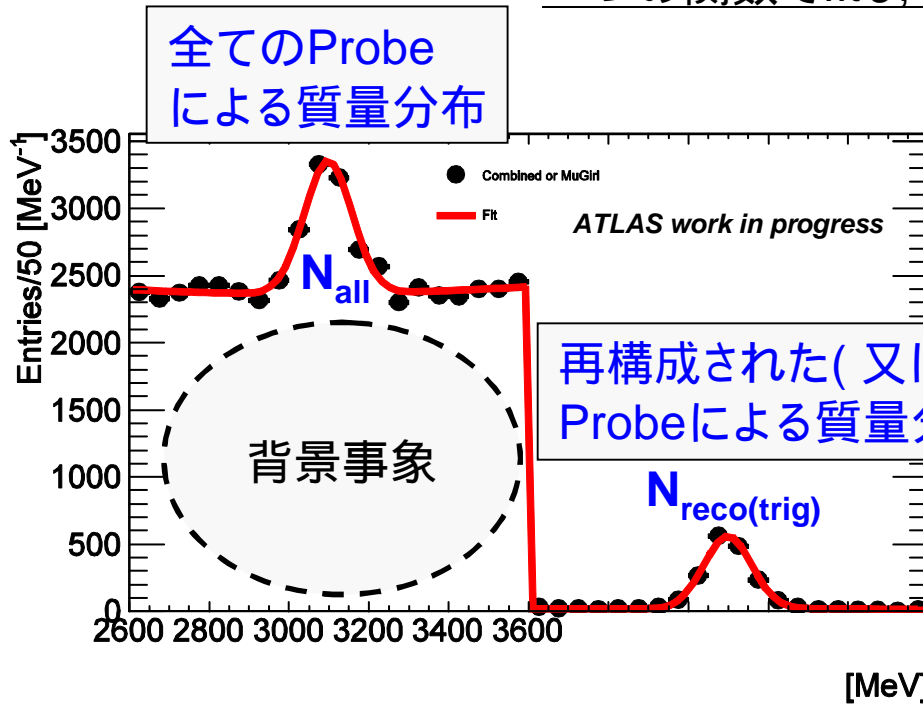




# // 背景事象の除去 ~Simultaneous fitting~



一つの関数でfitし, fittingパラメタとしてefficiencyを算出する



$\chi^2 / \text{ndf}$	37.43 / 30
Prob	0.165
BgParam left0	4580 ± 1743.7
BgParam left1	-1.465 ± 1.136
	0.0002407 ± 0.0001833
	-54.96 ± 348.03
	0.05035 ± 0.17039
BgParam right2	-7.791e-06 ± 2.071e-05
Mean [MeV]	3096 ± 1.5
Sigma(width) [MeV]	60.02 ± 1.53
AllProbSignal(left peak)	2993 ± 162.8
Efficiency(right/left)	0.5425 ± 0.0319

$$\text{Efficiency} = N_{\text{reco(trig)}} / N_{\text{all}} \quad (0 \sim 1 \text{ に制限})$$

Fitting 関数

$$\frac{1}{\exp(100 \cdot (x - 3600)) + 1} \cdot \left( a + bx + cx^2 + \frac{N}{\sqrt{2\pi\sigma}} \cdot 50 \cdot \exp\left(\frac{-(x - \mu)^2}{\sigma^2}\right) \right) + \frac{1}{\exp(100 \cdot (3600 - x)) + 1} \cdot \left( d + ex + fx^2 + \epsilon \frac{N}{\sqrt{2\pi\sigma}} \cdot 50 \cdot \exp\left(\frac{-(x - (\mu + 1000))^2}{\sigma^2}\right) \right)$$

ステップ関数(  $\square$  )

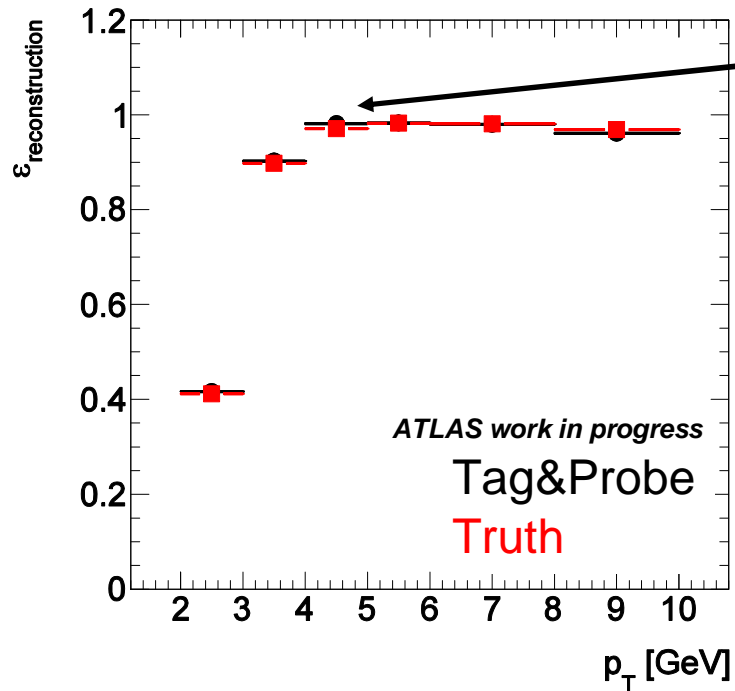
2次関数 ( 背景事象 )

ガウス分布 ( Signal )

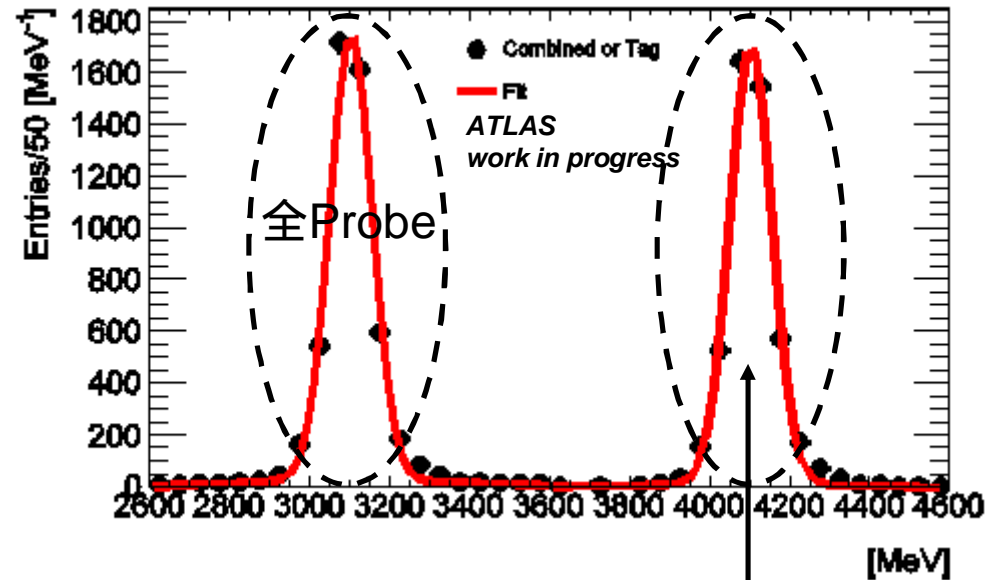
# // J/ψモンテカルロサンプルにおける TruthとTag&Probe法での再構成効率比較



$p_T$ の関数としての再構成効率



( Fittingの例 )  $p_T$  4GeV to 5GeV



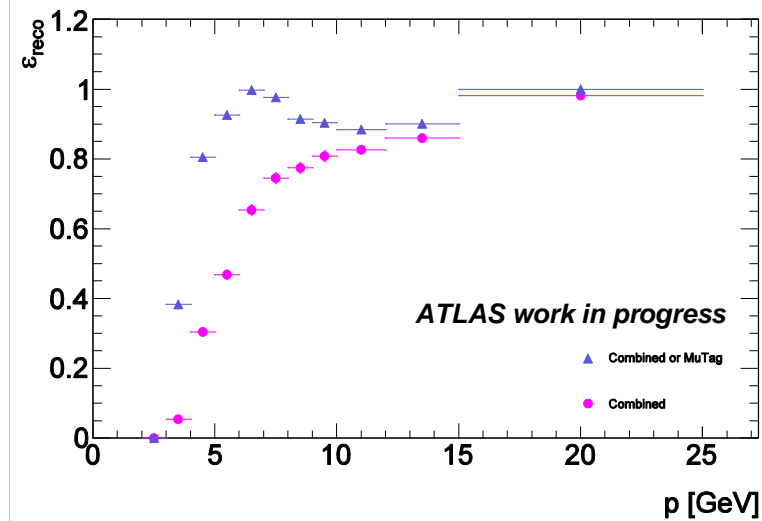
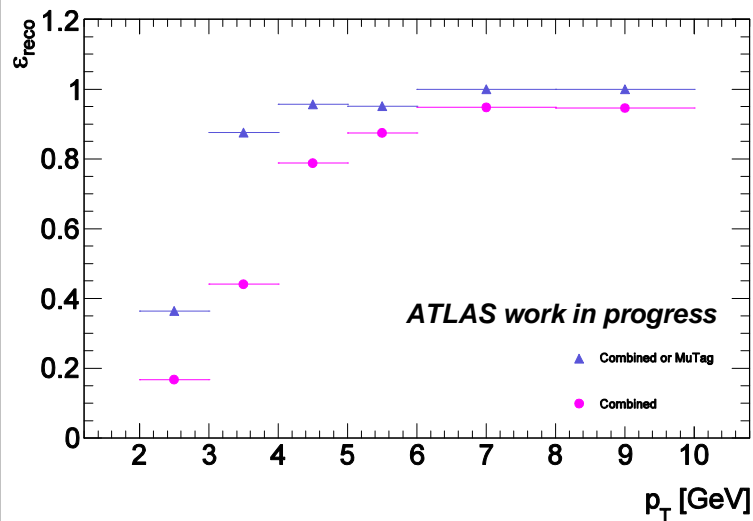
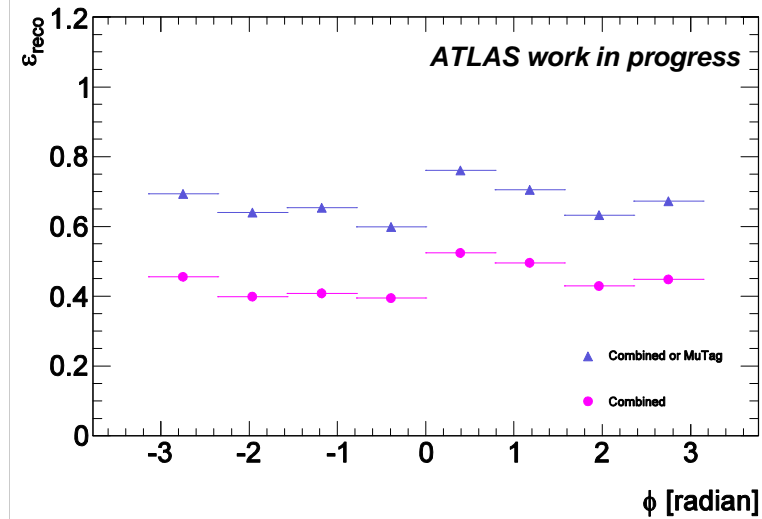
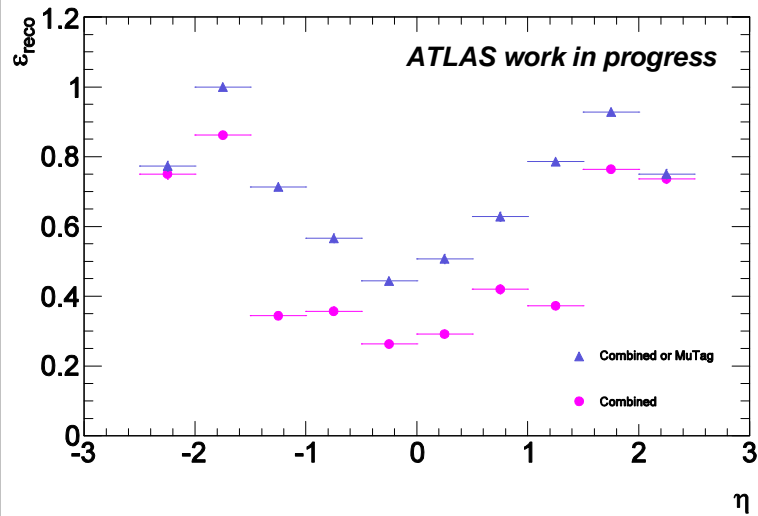
Muonとして再構成された  
Probeのみ

非常に良い一致  
→ Tag&Probe法によるバイアスは  
予想通り小さい

# // 再構成効率

Combined or Segment Tagger  
Combined Only

Binominal Error

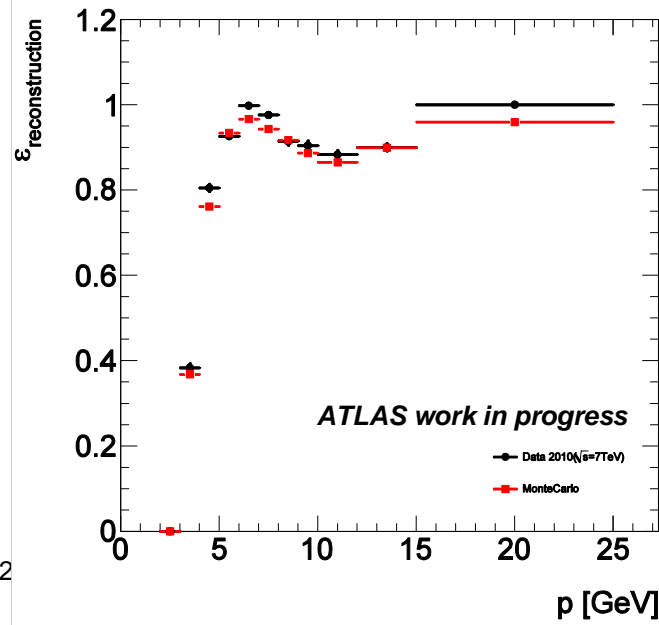
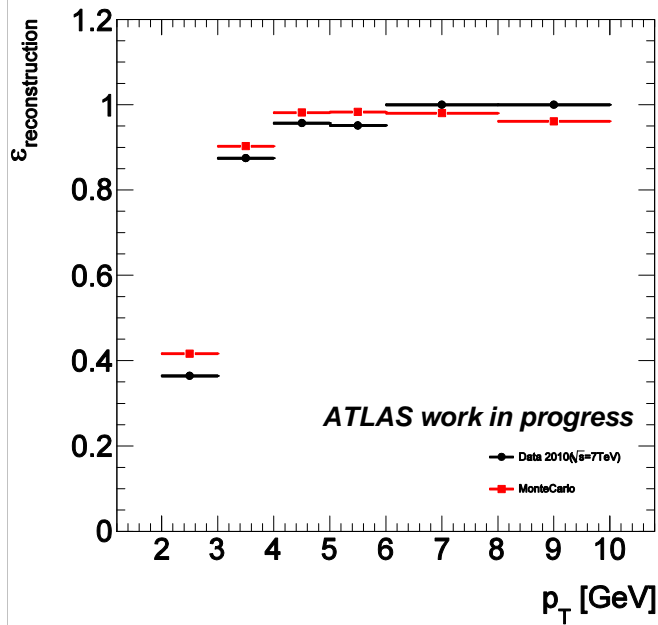
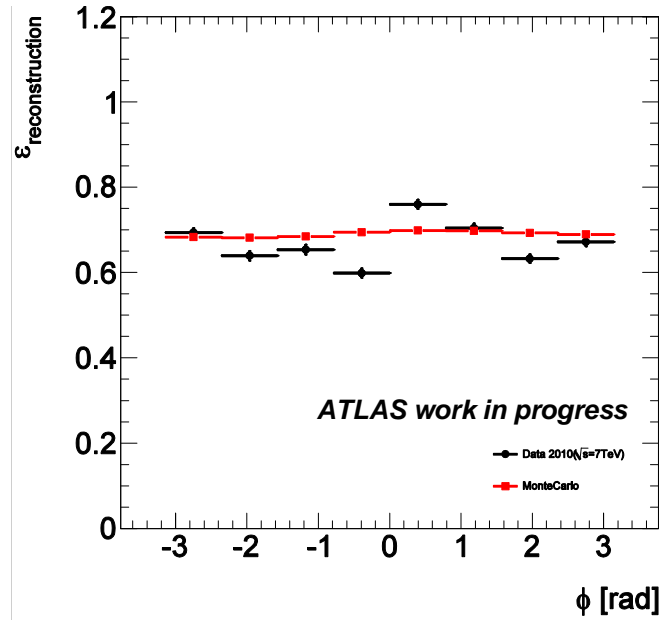
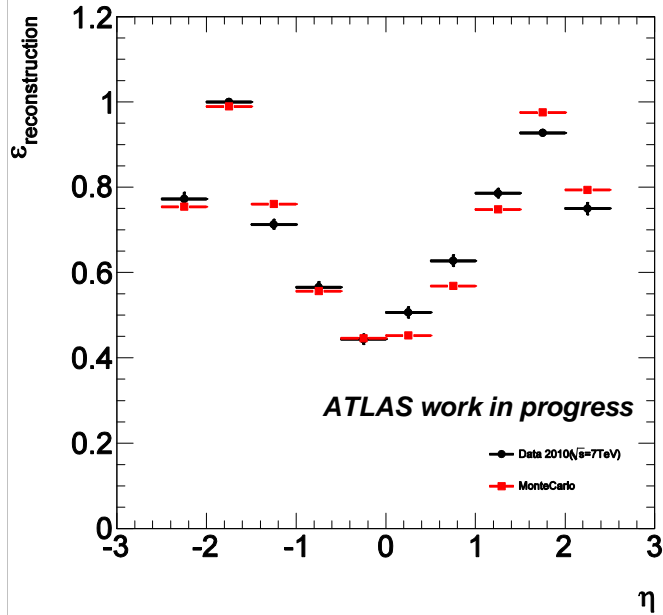


p<sub>T</sub> が6GeV付近でプラトー領域

# // MCとの比較

Data  
 Monte Carlo

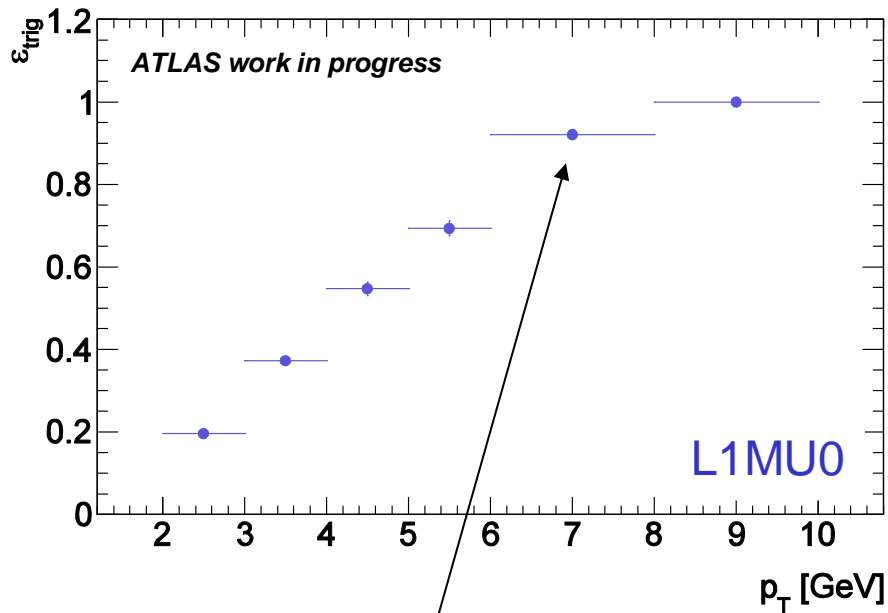
Binominal Error



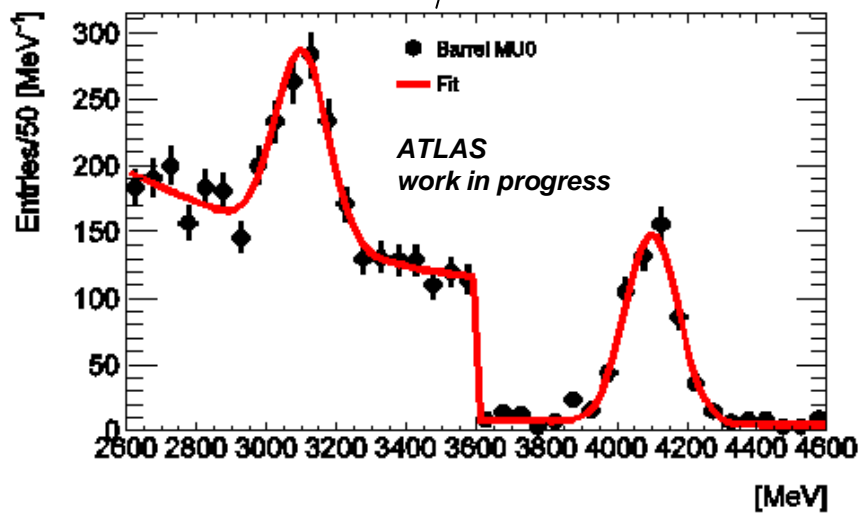
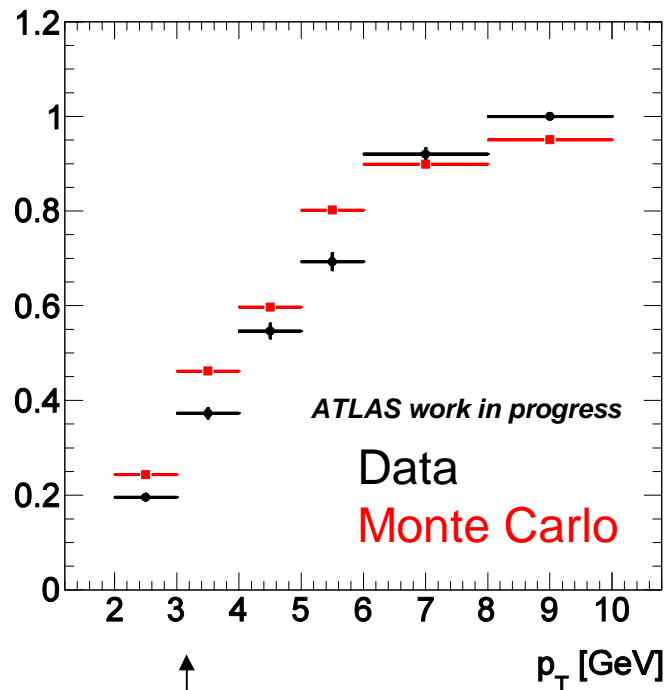
Plots of MC  
 are also made by  
 Tag&Probe

Shapeは  
 良く一致している

# // トリガー 効率 End-Cap



## Binominal Error



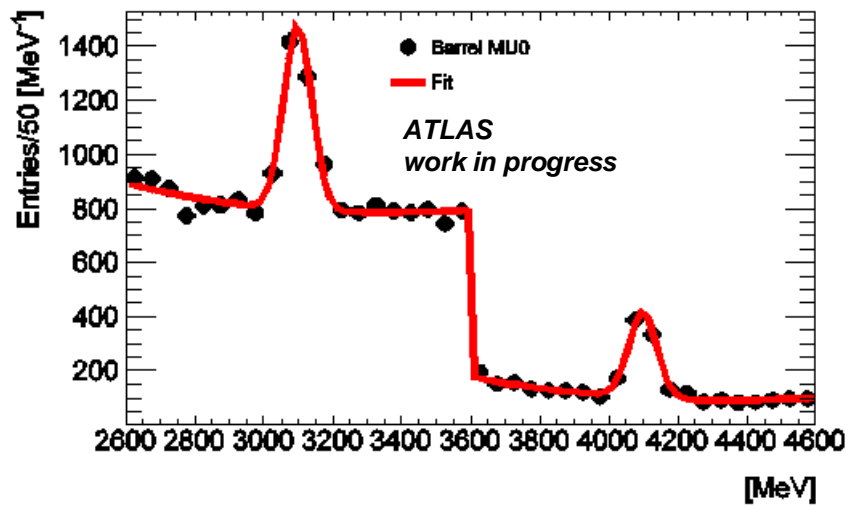
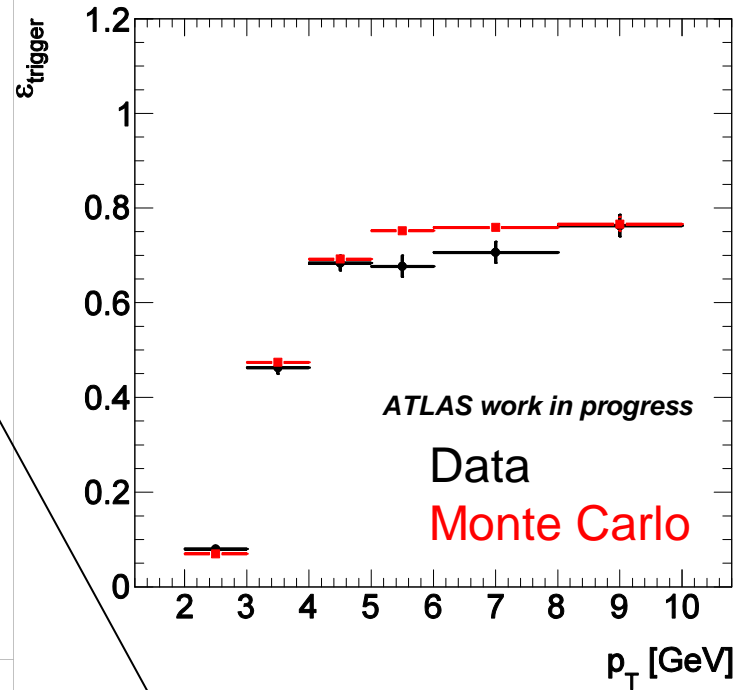
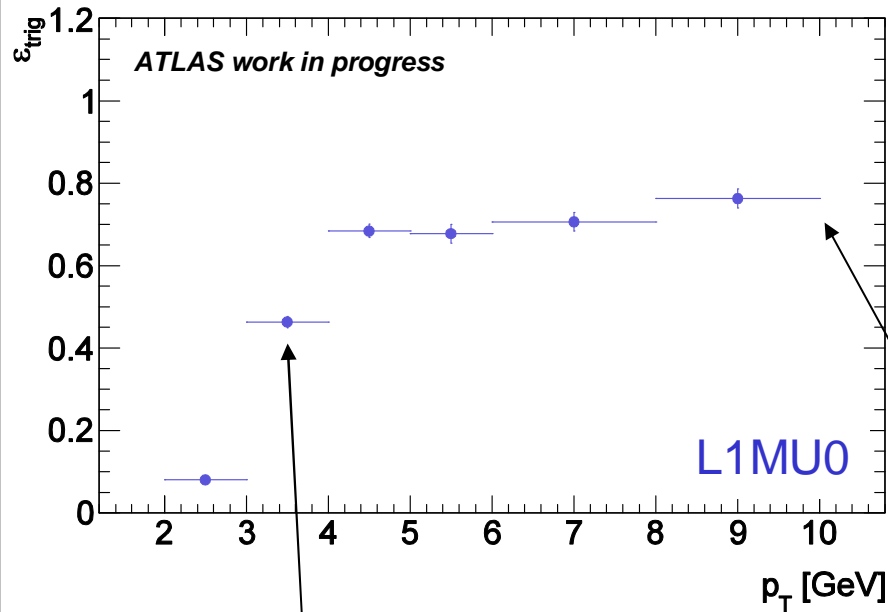
Plots of MC  
are also made by  
Tag&Probe

現時点でMCは

- 検出効率100%
- クロストークなし

と仮定されている

# // トリガー効率 Barrel



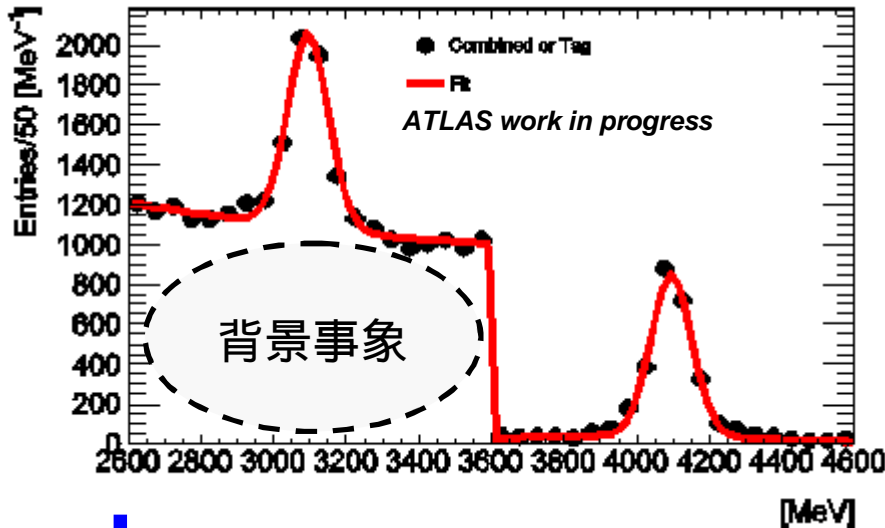
Plots of MC  
are also made by  
Tag&Probe

Barrel 領域は  
Geometrical Acceptanceが ~80%



# // ProbeへCalorimeter Tagger再構成情報を要求すると...

例) Probe  $p_T$  4GeV to 5GeV

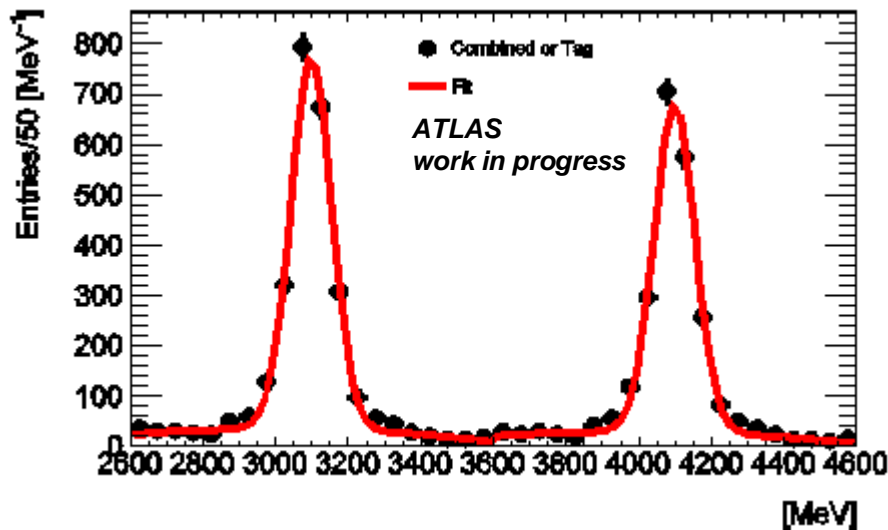


Calorimeter Taggerは、  
ミュオンスペクトロメータの情報を  
使わないので、  
Probeの選択条件として利用できる

$p_T$  4 GeV以下の情報は落とされる



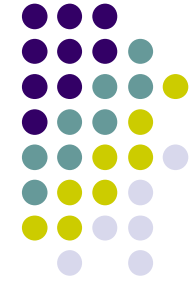
Calorimeter Tagger再構成アルゴリズムをProbeに追加で要求する



背景事象が顕著に除かれる

# // 再構成/トリガー効率の比較

Binominal Error

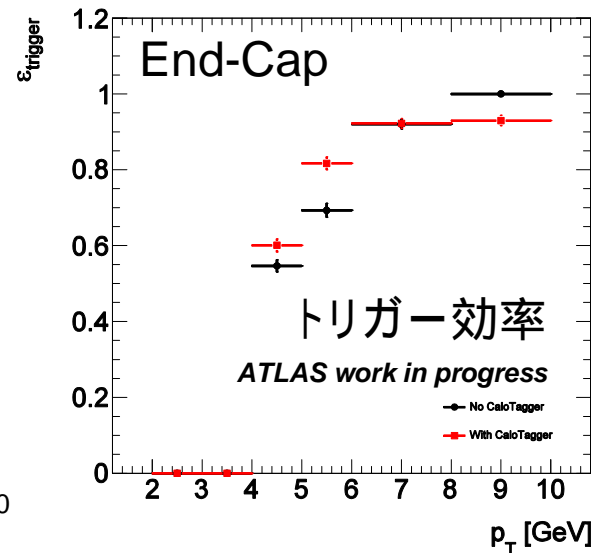
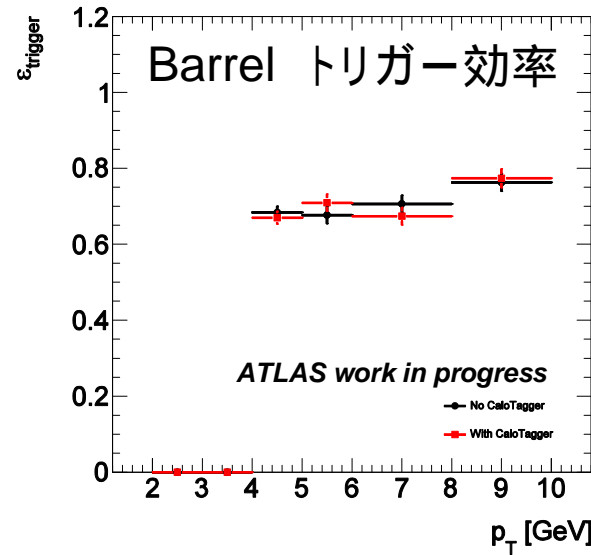
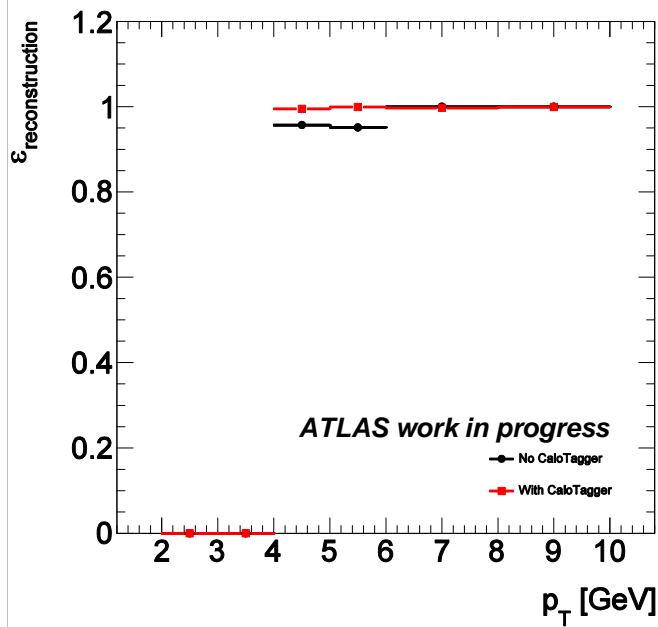


No Calorimeter Tagger

With Calorimeter Tagger

Calorimeter Taggerは  
4 GeV以下の情報は落とされる

再構成効率 ( $p_T$  の関数)





## // まとめ・今後の展望



- 初期に観測される物理としてクォークoniumがあり、生成断面積の測定は重要  
→ 正確な効率測定が不可欠
- $J/\psi$ は狭い共鳴幅を持つので、それ自体が実験システムの評価に有用  
→ Tag & Probe法
- これまでに得られたLHCでの重心系エネルギー7TeVデータに対して  
検出器の再構成及びトリガー効率測定にTag & Probe法を用いた  
→ **本実験で初めて絶対的な再構成効率とレベル1トリガー効率を決定した**

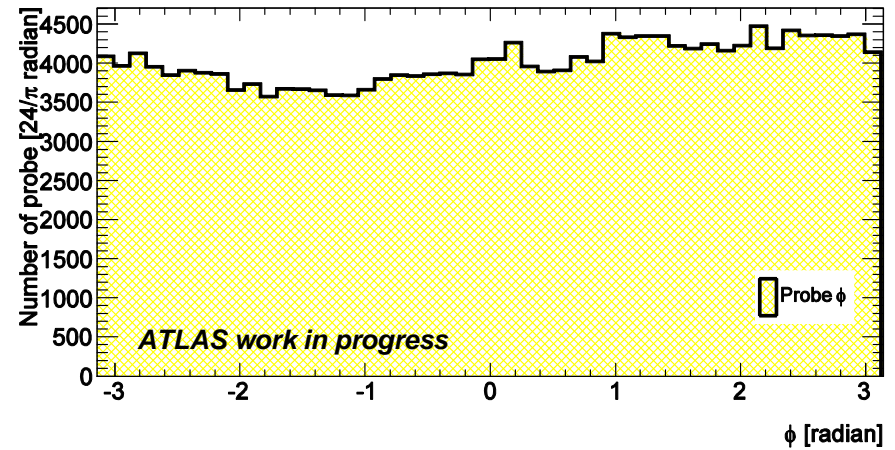
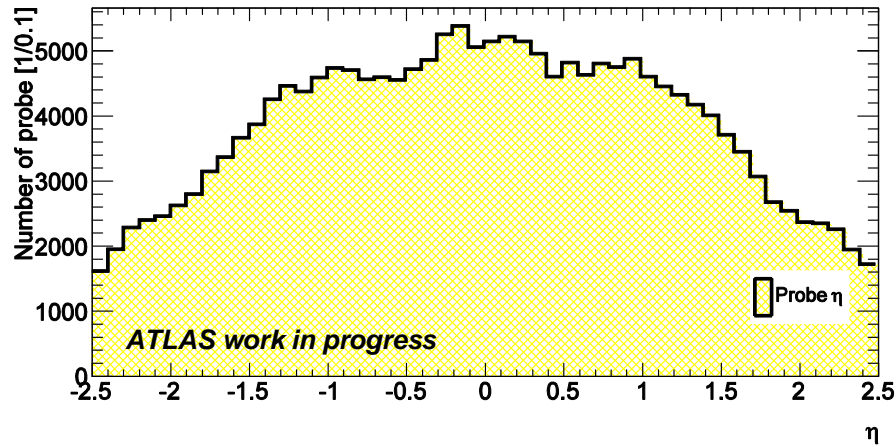
今後、

- 統計量を増やし、より詳細な測定を行う  
→ より高い $p_T$ 領域まで測定できるようになり、  
high- $p_T$ ミューオンを含む物理にとっても重要
- 系統誤差の評価
- 生成断面積の測定

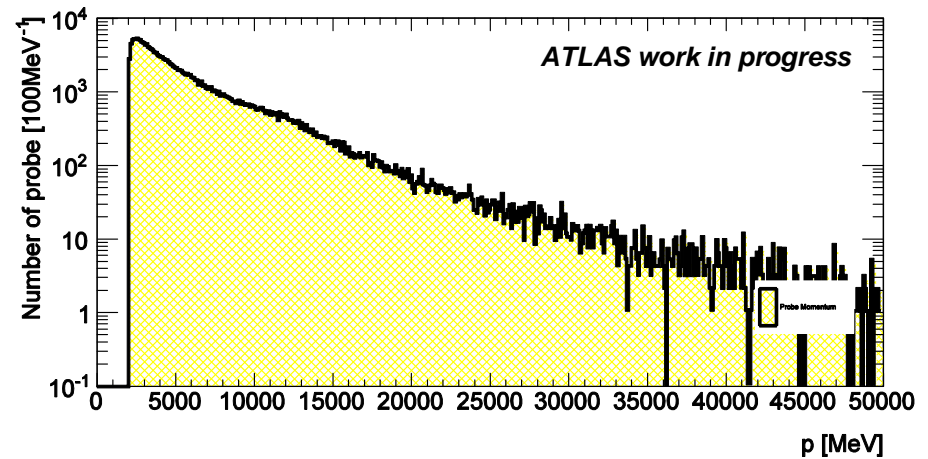
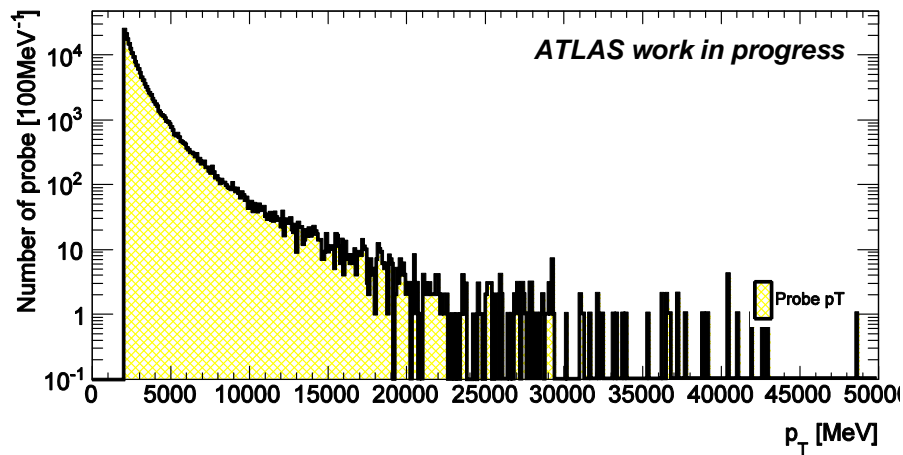
← Backup slides →



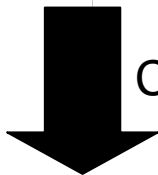
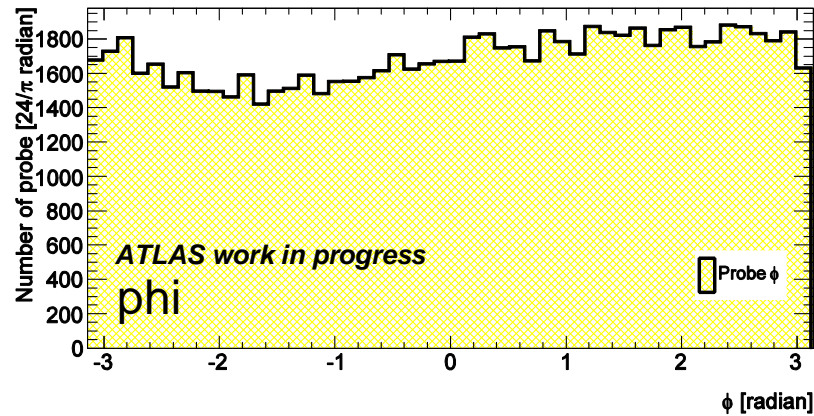
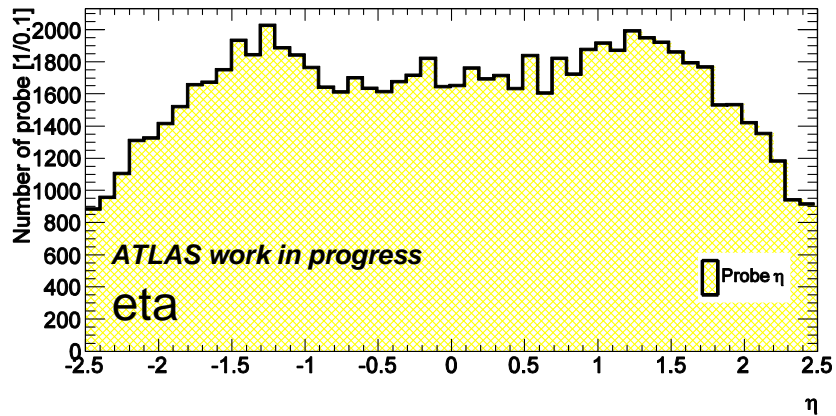
# // Probe 分布



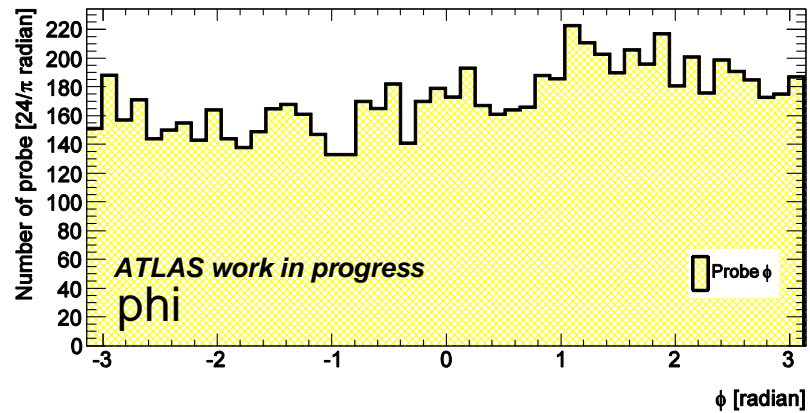
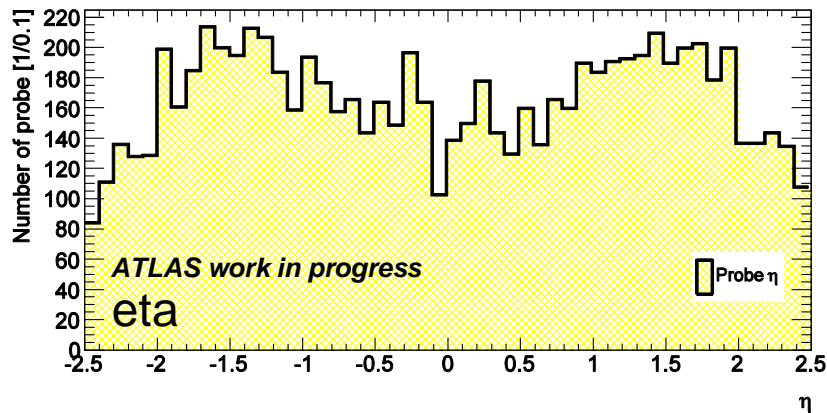
異常なピークやshapeなどは見られない



# // probe 分布の比較

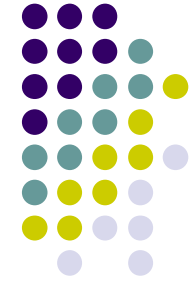


Calorimeter Tagger再構成アルゴリズムを要求



分布の傾向は変わらない

# //Muon selection



“STACO container”

Combined:  $\text{match}^2 < 150$ .

Tagged:  $\text{TMath::Prob}(\text{match}^2, \text{ndof}) > 0.0027$

“MUID container”

Combined: no cuts

Tagged: `IMuonSegmentTaggerValidationTool`

MuGirl: no cuts

note: using “allAuthors” to avoid signal-miscount due to the priority  
that exists in the “primary author”

# // Common cuts as standard selection



## // Pre selection

- Triggers requested: L1\_MU0
- At least 1 primary vertex with  $\geq 3$  tracks
- Each track  $\geq 6$  SCT hits,  $\geq 1$  pixel hit

## // Tag selection

- Combined muon
- $p_T$  of associated ID track  $> 4$  GeV
- $|\eta| < 2.5$
- Track hit quality:
  - SCT hits  $\geq 6$  && Pixel hits  $\geq 1$
  - as TRT Hits cuts,
    - if( $|\eta| < 1.9$ )  $nHits( nTRTHits + nTRTOuliers ) > 5$  &&  $outliers/nHits < 0.9$
    - if( $|\eta| \geq 1.9$ ) require  $outlierd/nHits < 0.9$  only when  $nHits > 5$
- impact parameter w.r.t. Primary Vertex cuts:  $d_0 (< 0.3\text{mm})$ ,  $z_0 (< 1.5\text{mm})$ ,  
 $d_0$  and  $z_0$  significance  $< 3$  (in addition, track  $d_0$  at perigee  $< 2\text{mm}$ )

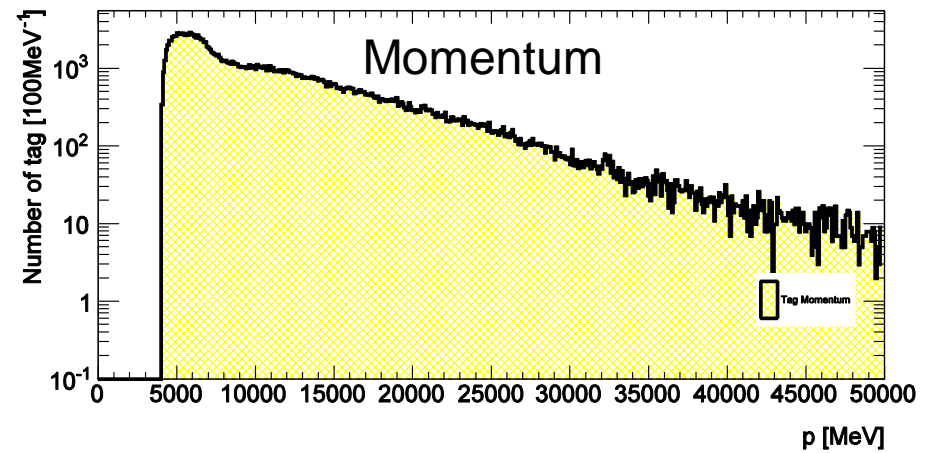
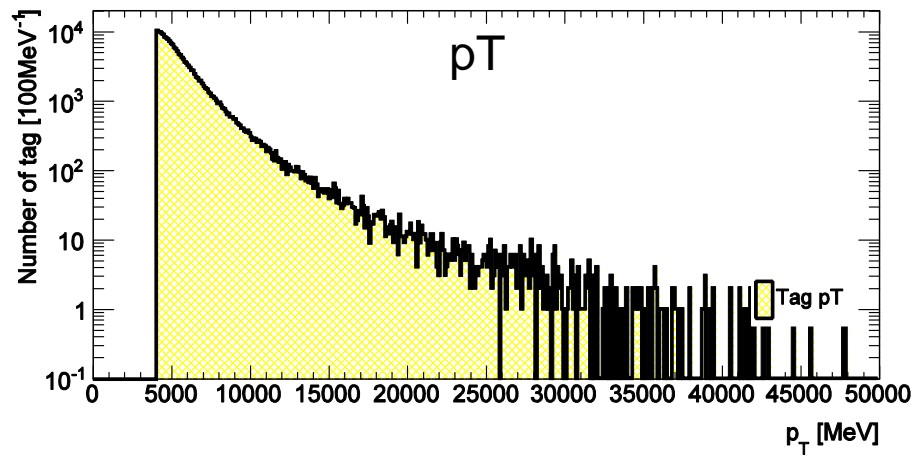
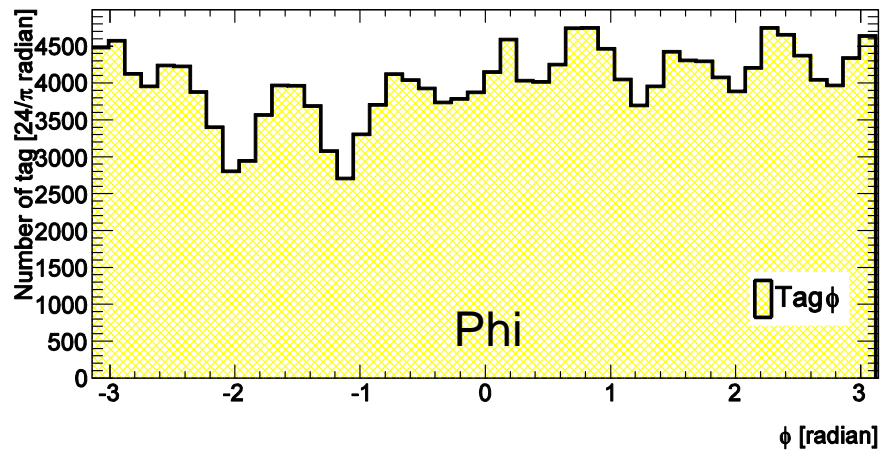
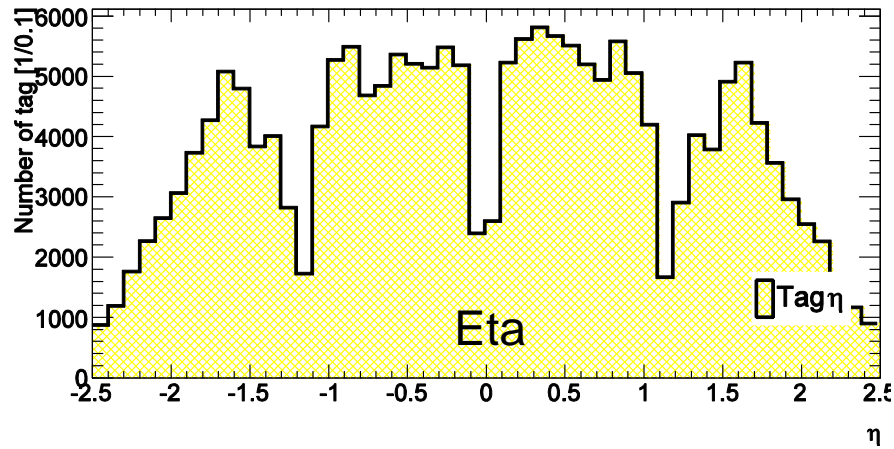
## // Probe selection

- $p_T > 2$  GeV
- $|\eta| < 2.5$
- Track Hit quality is the same ones of tag

## // Cuts on Tag & Probe

- Tag and probe ID tracks should come from a common vertex
- $\chi^2$  of the vertex fit  $< 6$
- $R < 3.5$

# // STACO Data Tag



## // Data set

“Data”

Stream: MuonswBeam

Period: B, C, D (  $\sim 330\text{nb}^{-1}$  )



“MC”

- STACO -

mc09\_7TeV.108496.Pythia\_directJpsimu0mu0.merge.AOD.e540\_s765\_s767\_r1306

- MUID -

mc09\_7TeV.108496.Pythia\_directJpsimu0mu0.recon.ESD.e540\_s765\_s767\_r1302

## // Using code

TrigEffJpsiTools-00-06-17-45 ( added MuTagIMOTools and ExtendedBunch.cxx/h )