

# LHCアトラス検出器における光子IDの パフォーマンスとdiphotonトポロジーの研究

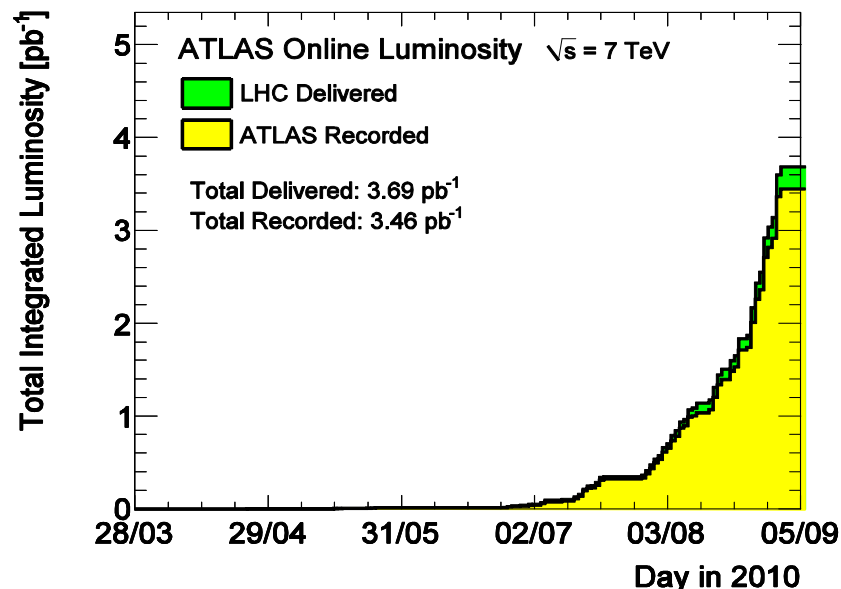
東大素セ, 東大理<sup>A</sup>, 山村大樹, 田中純一, 浅井祥仁<sup>A</sup>

# Introduction

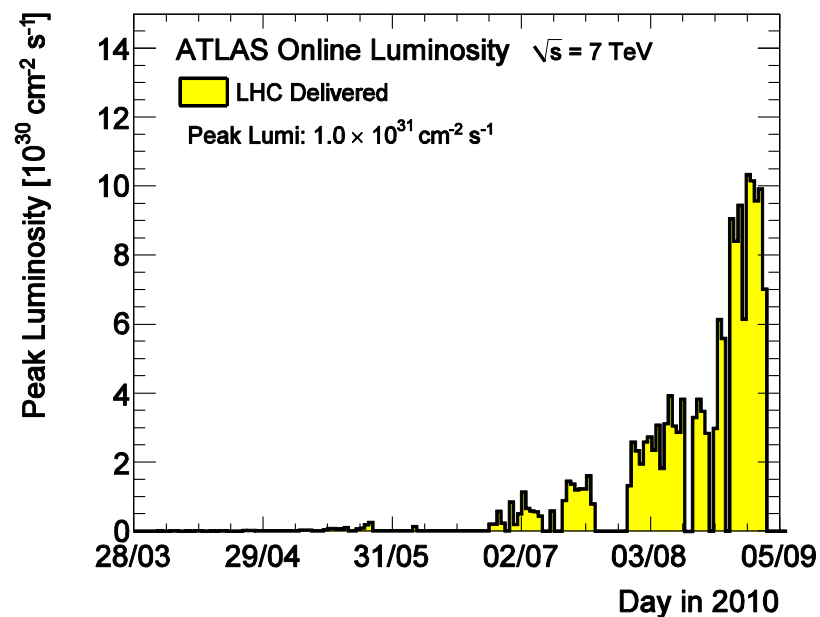
## ◆ LHC実験の現状

- 2010年3月より、 $\sqrt{s} = 7\text{TeV}$ での衝突実験開始。
- 積算ルミノシティ :  $L \sim 3.46\text{pb}^{-1}$  (2010/09/05 現在)
- ピークルミノシティ :  $1.0\text{e}+31 / \text{cm}^2/\text{s}$ が達成されている。
- LHC plan
  - ✓ 2010年 :  $L \sim (30-50) \text{pb}^{-1}$
  - ✓ 2011年 :  $L \sim 1\text{fb}^{-1}$

### <積算ルミノシティ>



### <ピークルミノシティ>



# ATLAS検出器を用いたdiphoton終状態の物理の研究

## ◆ diphoton終状態の物理

- ヒッグス粒子やLarge extra dimensions(LED)の探索において、大きな感度を持つ。
  - ✓ ヒッグス :  $H \rightarrow \gamma\gamma$
  - ✓ LED :  $G^* \rightarrow \gamma\gamma$
- データ解析の現状
  - ✓ photon performanceの理解を進めている。

### 本日のtalk内容

#### (i) Diphoton物理 (Higgs, LED)

- $1\text{fb}^{-1}$ で得られる結果。
- 探索をするうえで、検出器のこういったperformanceが重要となるか？

#### (ii) ATLAS検出器におけるphoton performance

(データを用いてどこまで理解を進めているか)

# Diphoton物理

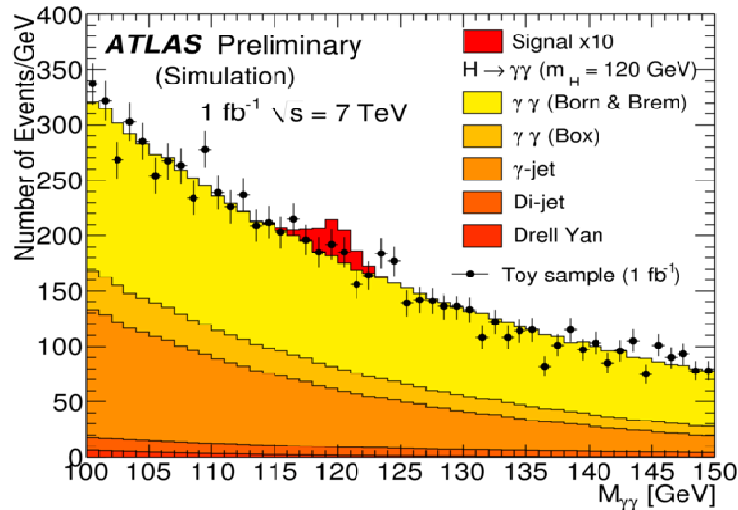
# Diphoton物理

## (1) ヒッグス探索 ( $H \rightarrow \gamma\gamma$ )

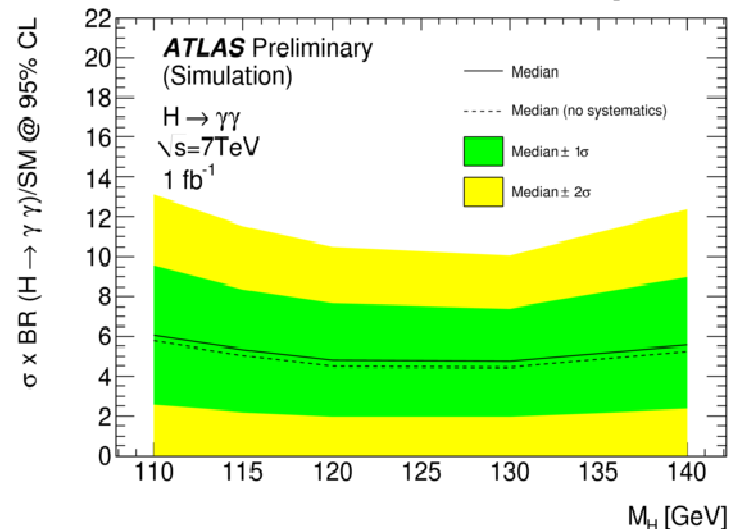
- 期待されるシグナル事象数 :  

$$N_{\text{sig}}(@1\text{fb}^{-1}) \sim 10 \quad (110 < m_H < 140\text{GeV})$$
- バックグラウンド事象 :  $\gamma\gamma$ ,  $\gamma$ +jets, Di-jet, Drell-Yan
- Side-band fitによるバックグラウンド評価
- $1\text{fb}^{-1}$  での展望 : 標準理論で期待されるx-secの4.5-6倍程度のlimitが得られるみこみ。

<期待される $M(\gamma\gamma)$ スペクトラム>  
(at  $1\text{fb}^{-1}$ )



<Prospect for limit study with  $H \rightarrow \gamma\gamma$ >  
(at  $1\text{fb}^{-1}$ )



## (2) LED探索 ( $G^* \rightarrow \gamma\gamma$ )

◆ 大きな余剰次元(LED)を仮定したADDモデル **(Arkani-Hamed, Dimopoulos and Dvali)**

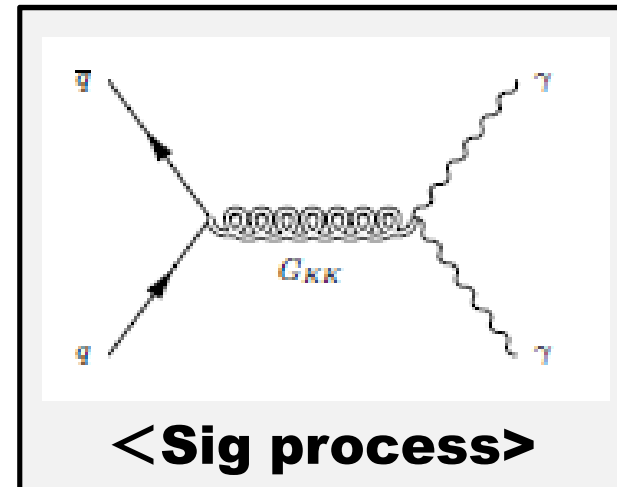
- n次元のコンパクト化されたフラットな余剰次元 (サイズR)
- SM粒子は(3+1)次元ブレーンに束縛 / グラビトンのみバルク内を伝搬。
- 重力のプランクスケールを下げ、階層問題を解決できる可能性。

$$M_D^{n+2} = M_{\text{Pl}}^2 / (2\pi R)^n \quad \left( \begin{array}{l} M_D : (4+n)\text{次元におけるプランクスケール} \\ M_{\text{Pl}} \sim 10^{18} \text{ GeV} \end{array} \right)$$

➡ プランクスケールがTeVオーダーであれば、ATLAS実験において

仮想KKグラビトンを介したLED事象

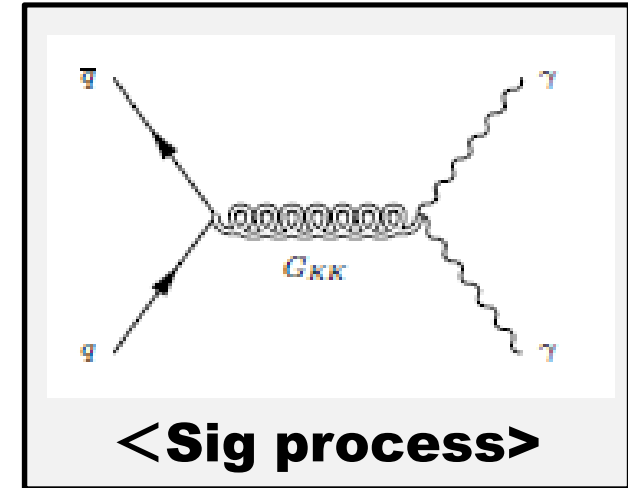
( $G^* \rightarrow \gamma\gamma$ )が大きく enhanceされる。



## (2) LED探索 ( $G^* \rightarrow \gamma\gamma$ ) (Cont.)

### ◆ $\gamma\gamma$ 終状態を用いた探索

- ・ 仮想KKグラビトンを介した  
di-photon事象の探索。
- ・ KKグラビトンのmass :
  - ✓ m番目の励起状態 :  $M_m \sim m/R$  ( $m=1,2,3,\dots$ )  
(R : 余剰次元のサイズ)
  - ✓  $M_D \sim \text{TeV}$ のモデル :  $M_m \sim 1\text{meV}-100\text{MeV}$ 
    - ➡ グラビトンのmassスペクトルのスケール小さく、かつ縮退しているため、 $M(\gamma\gamma)$ スペクトルを観測しても、ピークは現れない。



**LEDの兆候については、 $M(\gamma\gamma)$ スペクトル形の解析を通して行う。**

## (2) LED探索 ( $G^* \rightarrow \gamma\gamma$ ) (Cont.)

### ◆ MCシミュレーション

#### シグナル

- Evt generator : Sherpaを使用。
- x-sec :  $\sigma(\text{tot}) = \underbrace{\sigma(\text{SM})}_{\text{BG部分}} + \underbrace{\sigma(\text{LED}) + \sigma(\text{interference})}_{\text{Signal部分}}$
- 以下の各場合について、イベント生成。
  - ✓  $n = 2, 3, 4, 5, 6$  (  $n$  : 余剰次元数 )
  - ✓  $M_s = 1, 2, 3 \text{ TeV}$  (  $M_s$  : string scale )

#### バックグラウンド (※ NLOにnormalizeしてある。)

- $\gamma\gamma$  : シグナルサンプルに含まれている。
- $\gamma$ +jets : Pythiaサンプル
- QCD dijet : Pythiaサンプル

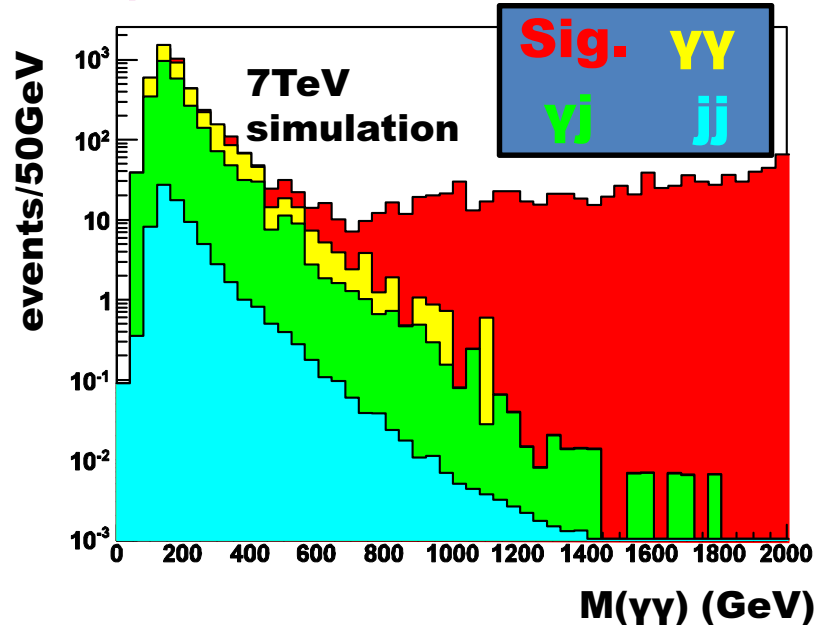


## イベントセレクション

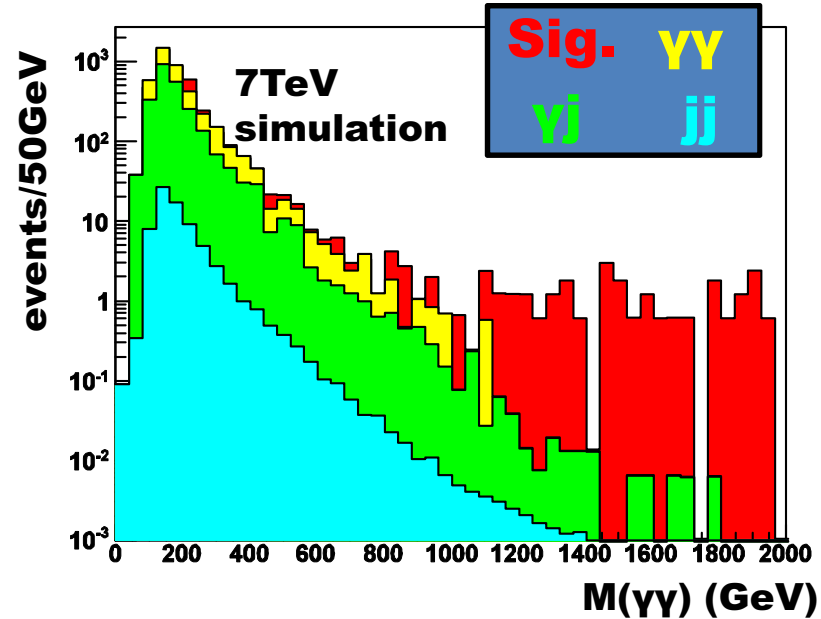
- $p_T(\gamma_1) > 50 \text{ GeV}$ ,  $p_T(\gamma_2) > 50 \text{ GeV}$
- $|\eta(\gamma)| < 1.37$  or  $1.52 < |\eta(\gamma)| < 2.37$   
(※crack regionは除く。)
- $M(\gamma\gamma) > 500 \text{ GeV}$

## $M(\gamma\gamma)$ 分布 ( $1 \text{ fb}^{-1}$ )

Ex.)  $n=3$



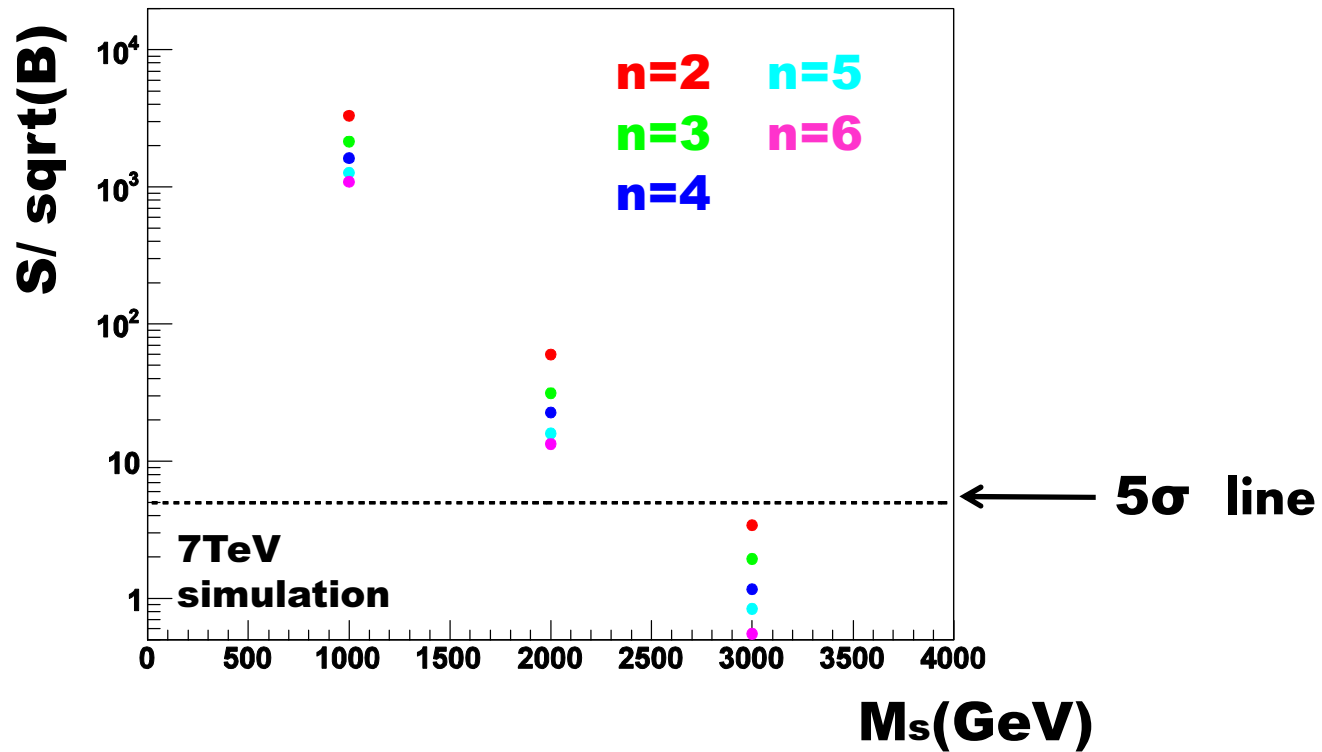
(i)  $M_s=2 \text{ TeV}$ の場合



(ii)  $M_s=3 \text{ TeV}$ の場合

# Prospects for LED search ( $1\text{fb}^{-1}$ )

## ◆ Significance for LED search



**$M_s=2.5-3\text{TeV}$ 程度まで、有意な探索が行えそう。**

# 余剰次元(LED)やヒッグス粒子の探索において、重要となる カロリメータのperformance

## (i) Fake rate

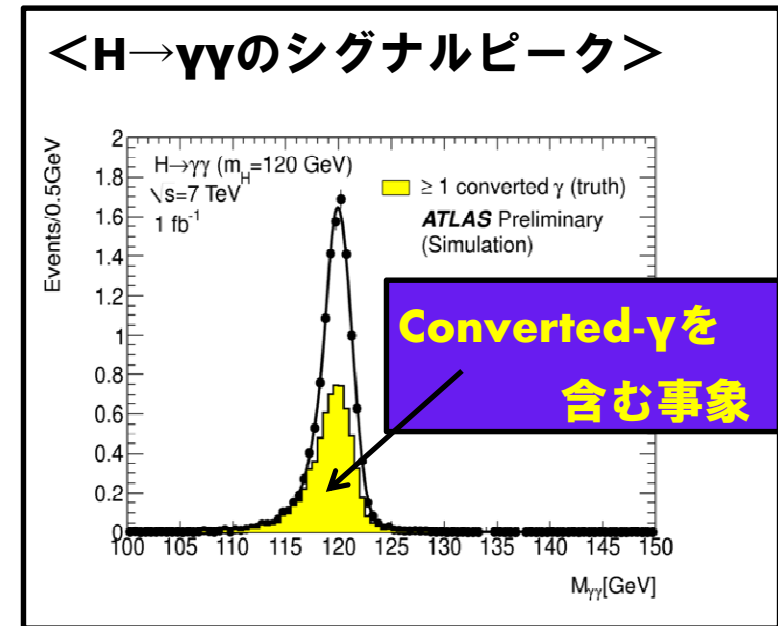
- ・ハドロンジェットがfake photonクラスターを作ってしまう確率。 $(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma, \eta \rightarrow \gamma\gamma)$
- ・データを用いた理解が始まっている。

## (ii) Photon eff.

## (iii) Diphotonのピークのcheck

- ・ Material(物質質量)あるいは、resolution, Calib.の性能check
- ・  $H \rightarrow \gamma\gamma$ のようなresonance探索を行ううえで重要。
- ・ Materialについて、data/MCで極端なずれがないかどうかも理解する必要あり。(10%程度の精度で理解できるとgood。)
- ・ resolutionの目標値： $\sigma(E)/E \sim 10\% \sqrt{E} \oplus 0.7\%$

←  $\pi^0$  peakを使ったcheckを行っているので紹介したい。



# Photon performance check

**(i) Fake rate**

**(ii) Photon eff.**

**(iii)  $\pi^0$  peak**

# 液体アルゴン電磁カロリメータ

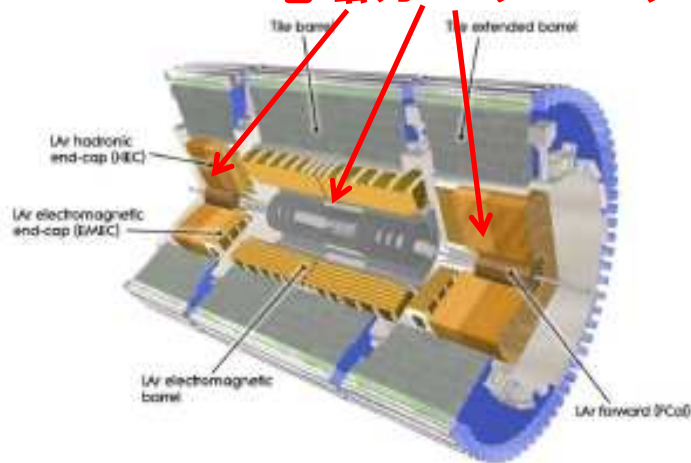
## ◆ 3 layers からの構造

- Strip (1<sup>st</sup> layer) :
  - Fine granularity in  $\eta$
- Middle (2<sup>nd</sup> layer)
- Back (3<sup>rd</sup> layer)
- $|\eta| < 1.8$ には、pre-samplerもある。

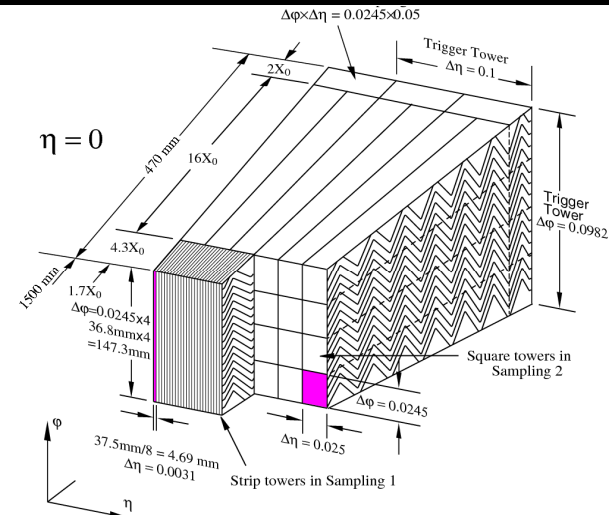
< $\Delta\eta \times \Delta\phi$  granularity in each compartment (barrel)>

	Pre-sampler	Strip(1 <sup>st</sup> )	Middle(2 <sup>nd</sup> )	Back(3 <sup>rd</sup> )
$\Delta\eta \times \Delta\phi$	$0.025 \times 0.1$	$0.003 \times 0.1$	$0.025 \times 0.025$	$0.05 \times 0.025$

## 電磁カロリメータ



<アトラス検出器>



<電磁カロリメータ>

# 電磁カロリメータによるPhotonセレクション

◆ “shower shape” + “isolation” による選別。

◆ fake photonをいかに効率よく落とすかが鍵。

## “Shower shape” と “isolation”

(i) Shower shape : EMクラスターのシャワー形状を利用したセレクション

- real photonとfake photonのシャワー形状の特徴の違いを利用して、fake photonをrejectする。(9パラメータを使用。)

- ✓ real photon : 横方向への広がりが小さい。
- ✓ fake photon : 横方向への広がりが大きい。

(ii) Isolation

- photonクラスター周りに細かいクラスターが存在しないかを見る。
- 周辺のactivityが大きい場合、ジェット内の $\pi^0$ や $\eta$ である可能性が高いのでrejectする。

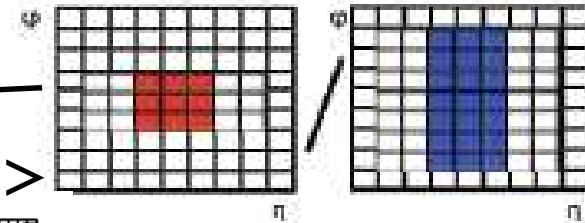
➡ 現在用いているIsolationパラメータ : “**etcone40**”

- etcone40 : photonクラスター周辺の $\Delta r=0.4$ 以内に存在するクラスターの $E_T(\text{sum})$

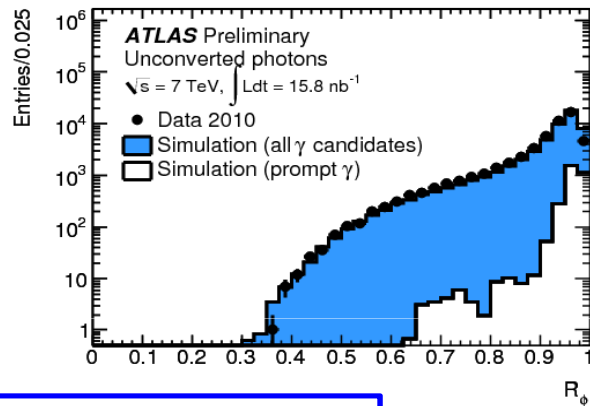
# 7TeV dataで得られたshower shape変数分布 ( $L \sim 15.8 \text{nb}^{-1}$ )

## EM 2層目の変数 ( $E_T > 10 \text{GeV}$ )

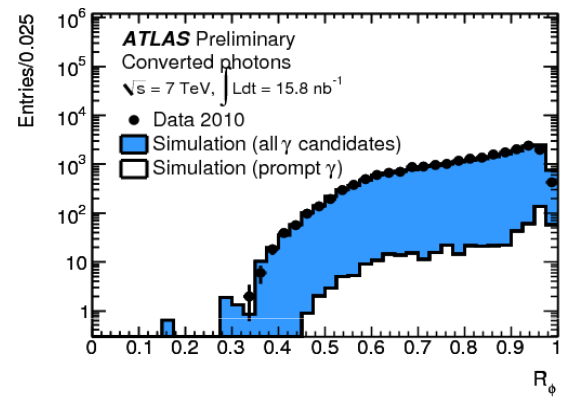
(ex.)  $R_\phi$  ( $3 \times 3$ と $3 \times 7$ のエネルギー比) ←



### <Unconverted photon>

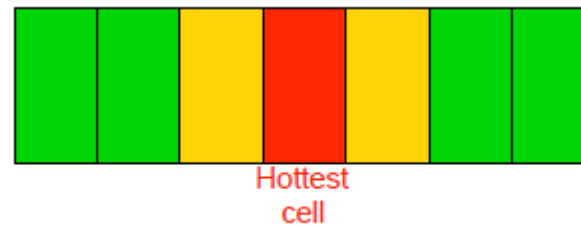
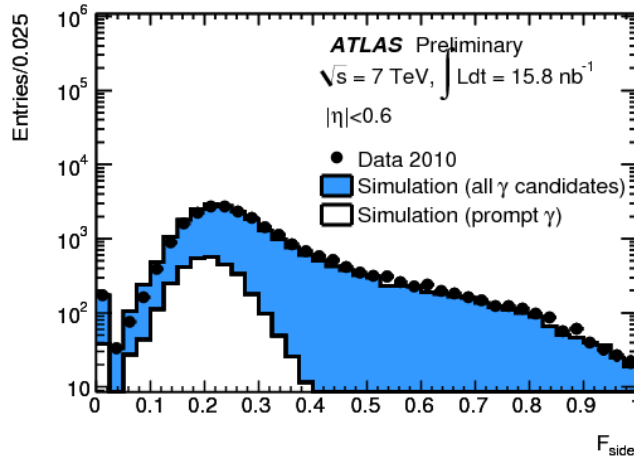


### <Converted photon>



## EM 1層目の変数 ( $E_T > 10 \text{GeV}$ )

(ex.)  $F_{\text{side}} = (E_{\pm 3} - E_{\pm 1}) / E_{\pm 3}$



$(E_{\pm n} : \text{Deposited energy in } \pm n \text{ strips around the hottest cell})$

## **(i) Fake rate**



Photonセレクション (reminder)  
"shower shape" と "Isolation"  
によるセレクション

## Fake rate

- ◆ ハドロンジェットが、EMカロリメータ内にfake photonクラスターを作ってしまう確率を、データを用いて測定したい。

$$\text{fake rate} = \frac{\text{Photonセレクション後に残ったfake photon数}}{\text{Reconstructされたジェット数}}$$

- ◆ fake photon数をいかにして測定するかが鍵となる。

- Photonセレクション後のSignal regionには、  
fake photonとreal photonが混在。

← 実データにおいて、fake photon数をいかにしてextractするか?

- ◆ データを用いた測定として、まずは、Signal regionにおける**"Purity"**というパラメータの測定から試みている。

- Purity : Signal regionに含まれるreal photonの割合。

$$\left[ = N^{sig}(real) / [N^{sig}(real) + N^{sig}(fake)] \right]$$

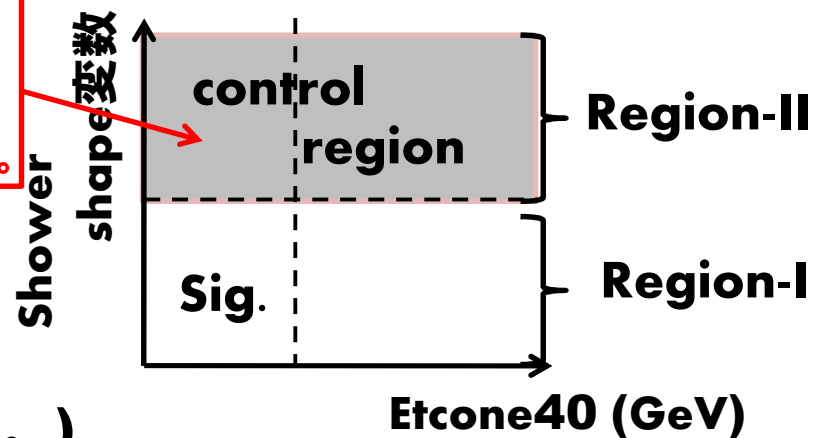
- EMトリガー(threshold=5GeV)を用いて、 $E_T > 10\text{GeV}$ のphotonクラスターのpurityを測定。

# Purity 測定

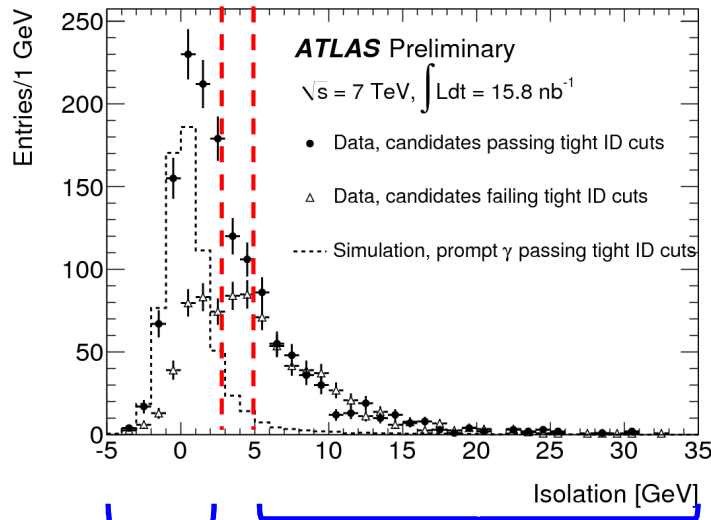
## ◆ Control regionの定義

- region-I : shower shapeセレクション後のregion (real photonとfake photonが混在。)
- region-II (control region) : “**etcone40と相関のないshower shape変数**”によって作るanti-cut region。

Region-I における Fake photonの Etcone40分布形を決定。



## ◆ etcone40分布 ( $L \sim 15.8 \text{nb}^{-1}$ , $E_T > 20 \text{GeV}$ )



- Circle : region-I における分布 (data)
- Triangle : region-II から得たfake photonの分布形
- Dashed : region-I におけるreal photonの分布形(MC)

Region-IIから得たfake photonの分布をもとに、signal regionにおけるfake photon数、real photon数をextractする。

Sig region (etcone40 < 3GeV)

Region-IIの分布は、etcone40 > 5GeVの Regionを使ってnormalize。

# 測定結果 ( $L \sim 15.8 \text{ nb}^{-1}$ )

## ◆ Photonクラスター数

- photonセレクション前 : 268982
- photonセレクション後 : 7348

$10 < E_T < 15 \text{ GeV} : 5271$   
 $15 < E_T < 20 \text{ GeV} : 1213$   
 $E_T > 20 \text{ GeV} : 864$

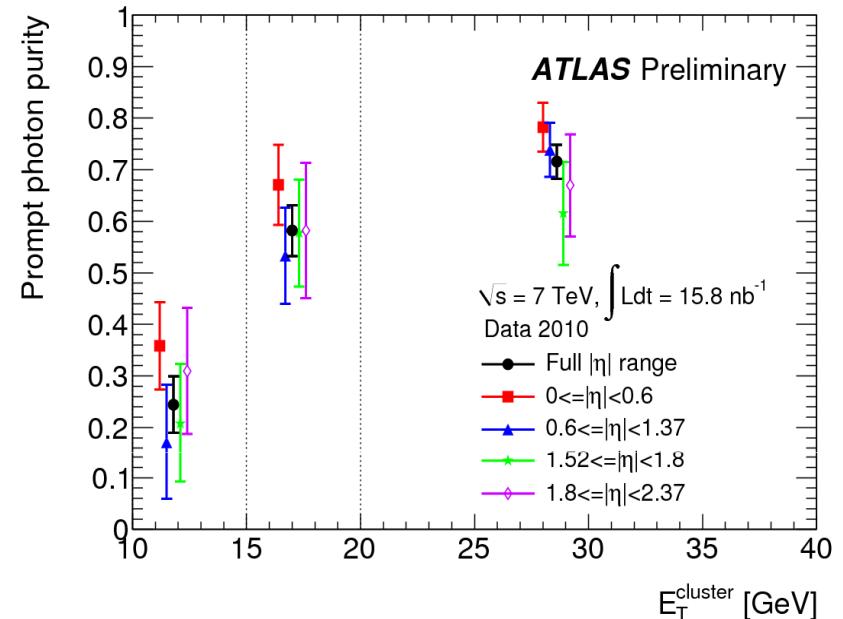
## ◆ Purity測定結果

$E_T(\text{GeV})$	Purity (%)
10-15	$24 \pm 5(\text{stat.}) \pm 24(\text{sys.})$
15-20	$58 \pm 5(\text{stat.}) \pm 8(\text{sys.})$
20-	$72 \pm 3(\text{stat.}) \pm 6(\text{sys.})$

### Sys error.

- Control regionへの  
real photonのもれ
- Shower shape変数と  
Isolation変数の相関。

による不定性が主な寄与。



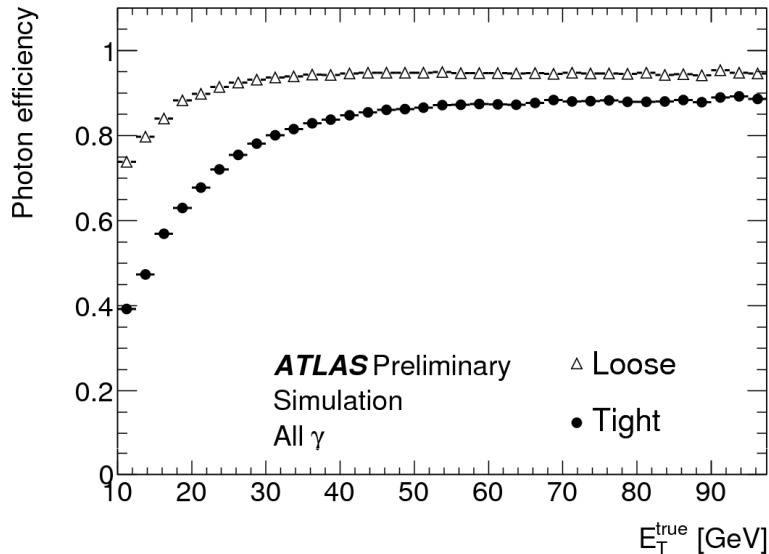
## < Purity測定結果 >

(※error barは統計誤差のみ。)

**(ii) Photon eff.**

# Photon eff.の測定

## 期待される photon effスペクトラム



### ◆ 直接的な測定法

$Z \rightarrow l l \gamma$  を用いる方法というのが  
あるが、今は無理。

- x-sec = a few pb
- 測定には、 $1\text{fb}^{-1}$  程度のデータが必要。

### ◆ 間接的な測定法： electronを用いるのが有用か？

Z事象起源のelectronに対し、 photonセレクションを課してみる。

➡ Photon efficiencyを間接的に議論・理解。

**(iii)  $\pi^0$  peak**

**(Using 900GeV data)**

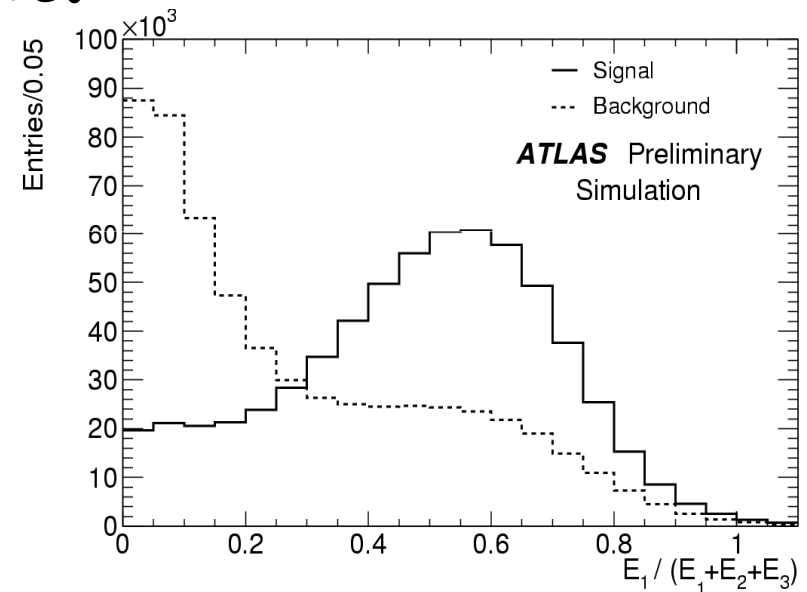
## Check on $\pi^0$ peak

### ◆ $E_T$ の低い( $E_T > 400 \text{ MeV}$ )EMクラスターを用いた $\pi^0$ ピークの観測 :

- 昨年  $\sqrt{s} = 900 \text{ GeV}$ での衝突実験開始後すぐに観測された。
- ピークの形状のcheckを通して、calib., material等で、data/MCで相対的な違いがないかどうかの理解が進められる。

### <イベントセレクション>

- **All combinations of two EM clusters are used.**
- **$|\eta(\gamma)| < 1.37$  or  $1.52 < |\eta(\gamma)| < 2.37$**
- **$E_1 / (E_1 + E_2 + E_3) < 0.1$**   
( $E_i$  :  $i$ 番目のlayerにおける energy deposit)
- **$E_T(\gamma) > 300 \text{ MeV}$**
- **$E_T(\gamma\gamma) > 900 \text{ MeV}$**

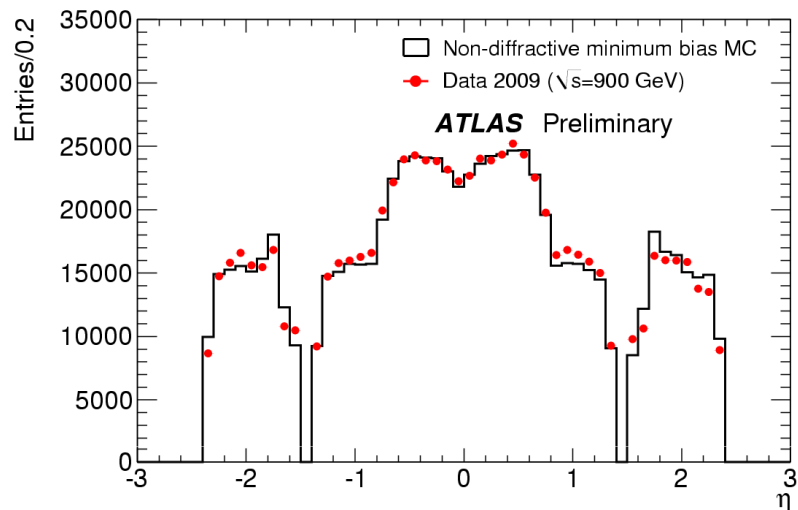


<  $E_1 / (E_1 + E_2 + E_3)$  分布 (900 GeV MC) >  
〔 実線 : Signal , 点線 : bg 〕

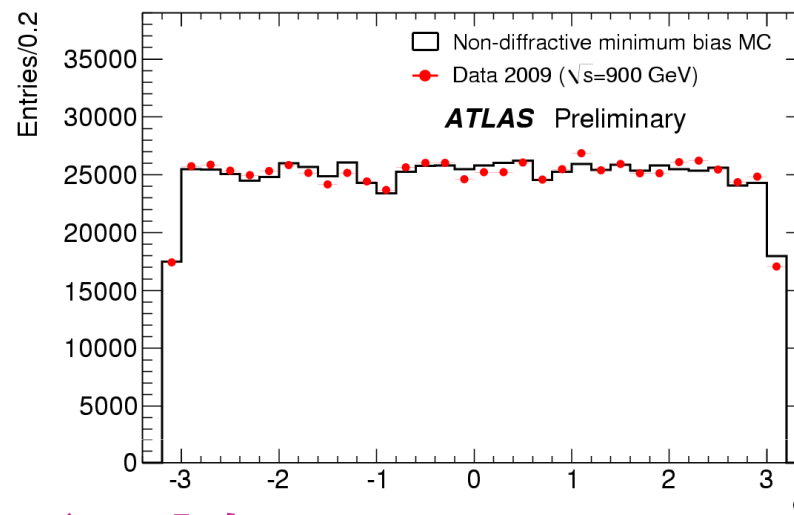
# EMクラスターの基本分布

(Using 900GeV data with  $L \sim 9\mu\text{b}^{-1}$ )

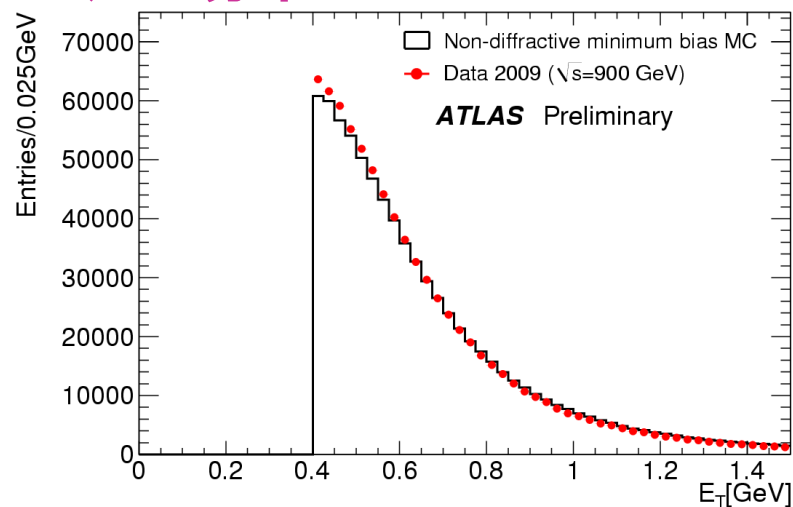
## ◆ $\eta$ 分布



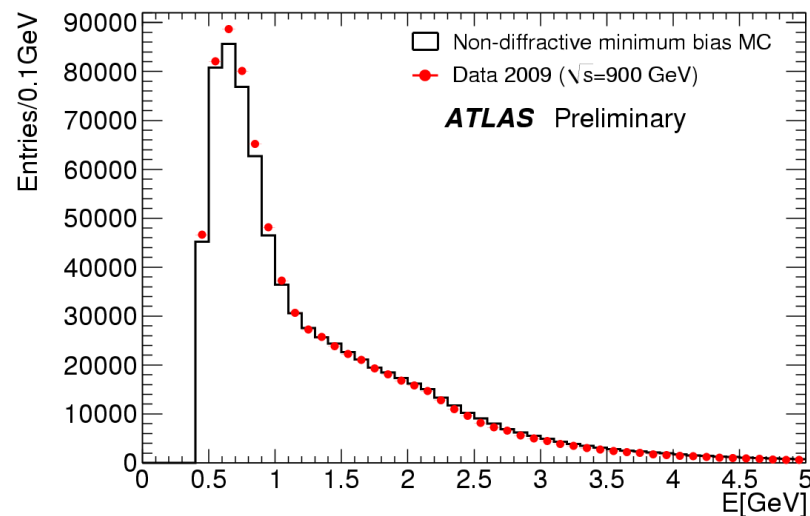
## ◆ $\phi$ 分布



## ◆ $E_T$ 分布



## ◆ $E$ 分布



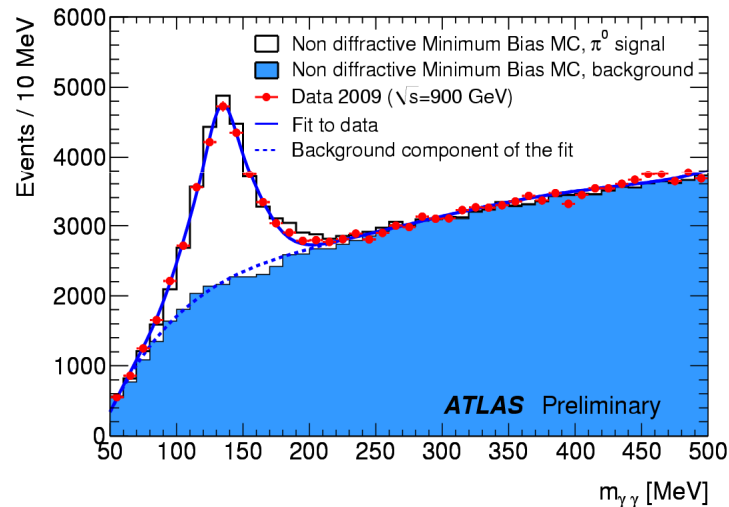


# M( $\gamma\gamma$ )スペクトルで観測された $\pi^0$ peak

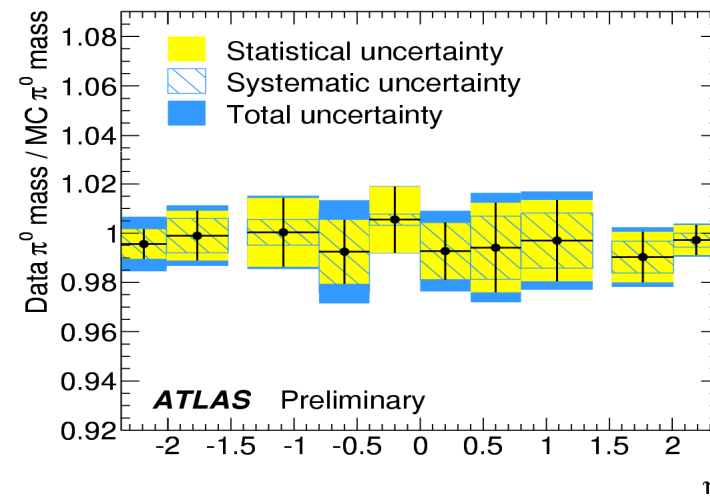
(Using 900GeV data with  $L \sim 9\mu\text{b}^{-1}$ )

Material, calib.等について、data/MCで大きなずれがないかのcheck。

## < $\pi^0$ peak>



## < $\pi^0$ peak位置に関する data/MCの比較結果>



- 比較結果 : どの $\eta$ -regionでも 不定性の範囲内でconsistent。
- もっとhigh-energyのregion :  $Z \rightarrow ee$ をstudyする必要あり。

## Summary

### ◆ **diphoton終状態の物理 ( $1\text{fb}^{-1}$ で得られる結果)**

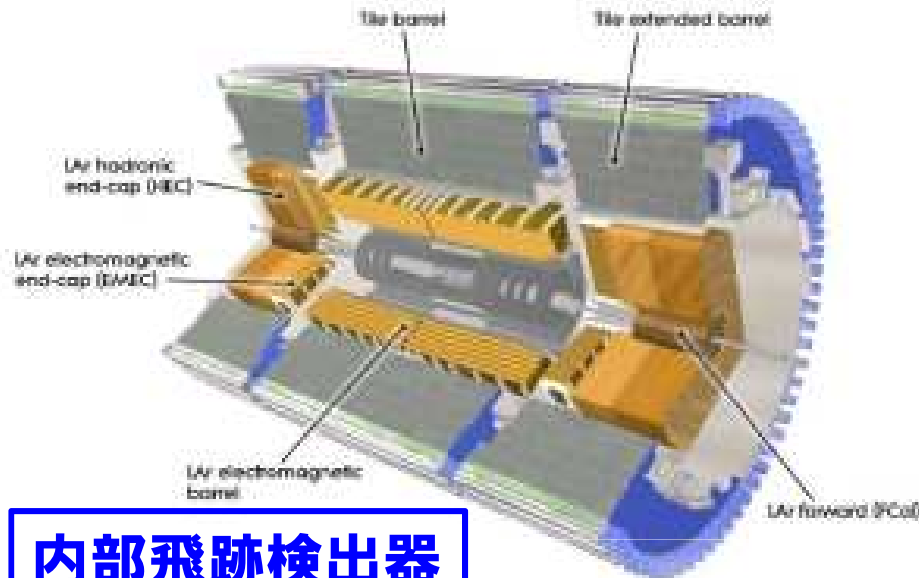
- ヒッグス粒子探索：標準理論で预言される $\sigma$ -secの6-7倍までのlimit
- LED探索：ADDモデルで预言される  $G^* \rightarrow \gamma\gamma$  事象の探索。  
Ms=2.5-3TeV程度まで有意な探索が可能。

### ◆ **実データを用いたphoton performanceの理解状況**

- **photonセレクションに用いるID変数分布**  
Fake photonを含めた分布形：dataとMCで大体よく合っている。
- **fake rate**
  - ✓ Purityの測定 (using data with  $L=15.8\text{nb}^{-1}$  )  
測定精度：16%( $15 < E_T < 20\text{GeV}$ ), 9%( $E_T > 20\text{GeV}$ )
  - ✓ Fake rateの測定はこれから。(ジェットトリガーを用いた測定)
- **photon eff.**
  - ✓ まずは、Z事象のelectronを用いた間接的な理解を行う。
  - ✓  $Z \rightarrow \ell\ell\gamma$  を用いた直接測定： $1\text{fb}^{-1}$ のデータを用いて測定する。
- **$\pi^0$  peak study**
  - ✓ ピーク形状に関するdata/MCの相対的なcheck：  
どの $\eta$ -regionでも 不定性の範囲内でconsistent。

# Backup

# 電磁カロリメータ / 飛跡検出器

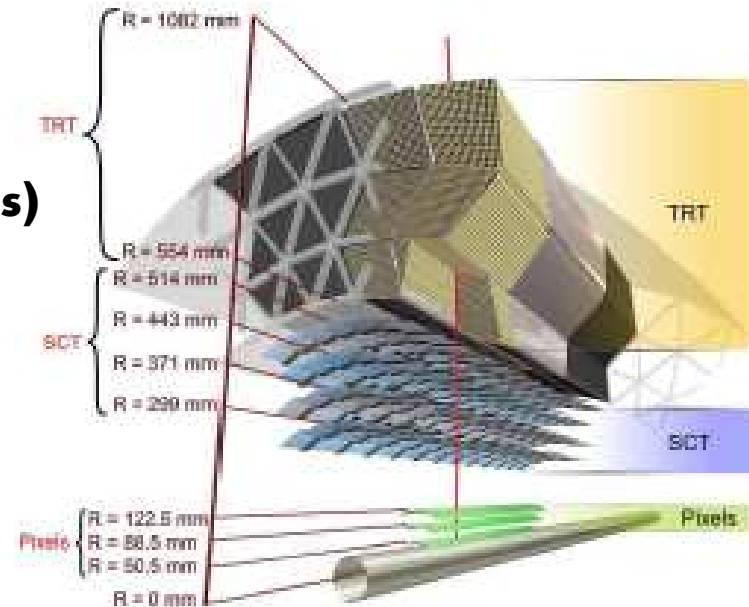


## 液体アルゴン電磁カロリメータ

- **Barrel + 2 Endcaps**
- **Coverage :  $|\eta| < 3.2$**
- **Thickness :  $> 24.0X_0$**
- **170k channels**

## 内部飛跡検出器

- ◆ **Pixel (ピクセル検出器)**
  - **Barrel : 3 layers (67M pixels)**
  - **Endcap : 3 disks per side (6.6M pixels)**
- ◆ **SCT (Semi-Conductor Tracker)**
  - **Barrel : 4 layers**
  - **Endcap : 9 disks per side**
- ◆ **TRT (Transition Radiation Tracker)**
  - **Straw tube tracking chamber**
  - **遷移輻射を利用した electron-IDも可。**



## Shower variables used for photon-ID

### (i) Hadronic leakage (**rhad**)

Defined as ratio of the transverse energy in the 1<sup>st</sup> layer of the hadronic calorimeter

### (ii) 2<sup>nd</sup> layer of the ECAL

- **R<sub>η</sub>** (=e237/e277), **R<sub>φ</sub>** (=e233/e237)
- **w<sub>2</sub>** : lateral width in η (Calculated in “3×5” window)

### (iii) 1<sup>st</sup> layer of the ECAL

- **R<sub>max2</sub>** =  $e_{max2} / (1 + 0.009/E_t(\text{GeV}))$
- **ΔE<sub>s</sub>** =  $e_{max2} - e_{min}$
- **F<sub>side</sub>** = 
$$\frac{E(\pm 3) - E(\pm 1)}{E(\pm 3)} \left( \begin{array}{l} E(\pm n) : \text{Deposited energy in } \pm n \text{ strips} \\ \text{around the one with the highest} \\ \text{energy} \end{array} \right)$$
- **w<sub>s3</sub>** : shower width over the three strips around the one with the highest energy
- **w<sub>stot</sub>** : shower width over the strips that cover 2.5 cells of 2<sup>nd</sup> layer

3

---

• **E<sub>ratio</sub>** =  $(E_{max} - E_{max2}) / (E_{max} + E_{max2})$

## Purity測定

### ◆ signal regionにおけるfake photon数の評価

- Isolation変数とID変数に相関がない場合、

$$\frac{N^{sig}(fake)}{N^I(fake)} = \frac{N^{II}(fake)}{N^{III}(fake)}$$

(数の比が同じになる。)

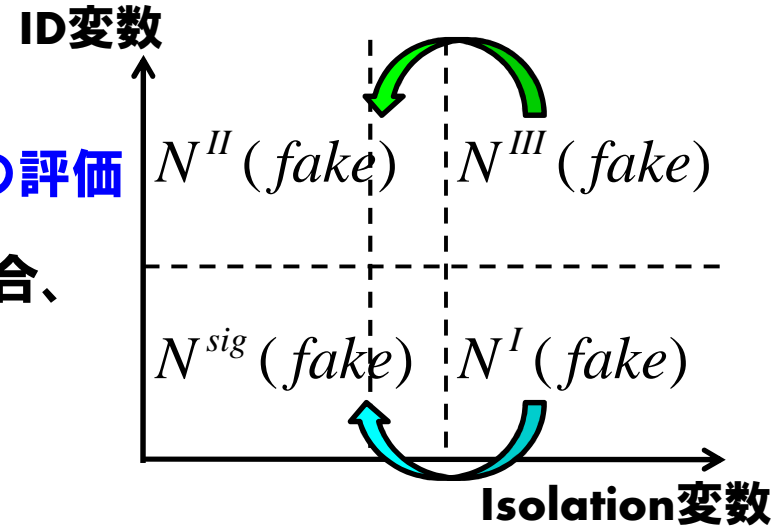
- region I, II, III は、fake photonしか存在しないregionであることから、

Signal regionにおけるfake photon数を求めることができる。

$$N^{sig}(fake) = N^I(fake) \cdot \frac{N^{II}(fake)}{N^{III}(fake)}$$

### ◆ Purityの評価

$$P = 1 - \frac{N^{sig}(fake)}{N^{sig}(fake) + N^{sig}(real)}$$

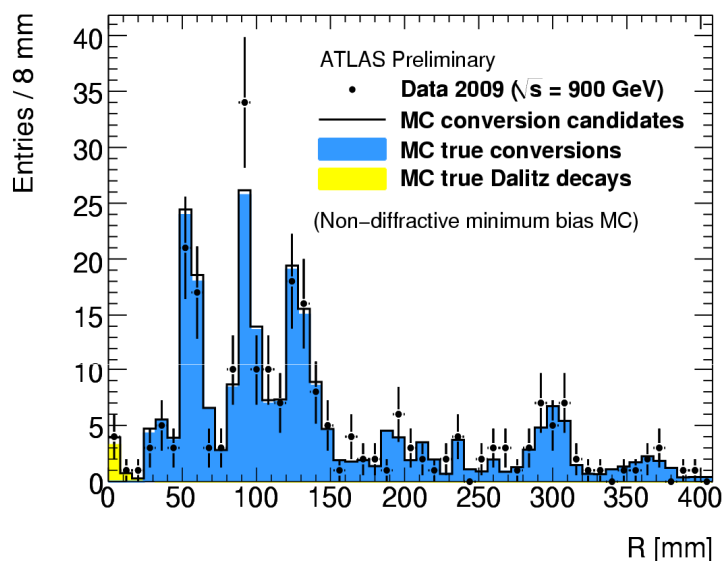


<各regionにおける  
Fake photon数>

## Conversion (For ID material mapping)

物質量の理解、大事。(calib., “M(gg) reso at Higgs search”への影響。)

### ◆ R(conv)分布 (900GeV result)



- **SCT-SCT track pairのconversion cand.**
- **Pixel および SCTのinner 2 layersが見えている。**
- **SCT inner 2 layerまでのmapping :**  
**MCとconsistentな結果 (統計の範囲内。)**

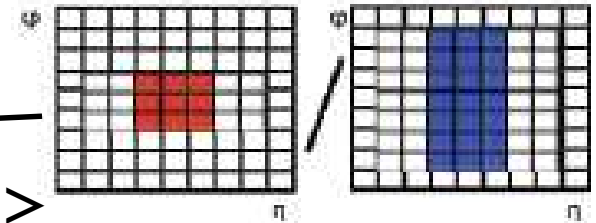
### <今後の課題> (for winter conf note?)

- **もっと統計精度のよい測定。**  
→ **7TeV dataで十分な統計量を使用する。**
- **conv rec eff. の理解 (今はMCを信用。)**
  - ✓ **Dalitz decay を使ったeffの理解?**
  - ✓ **Ks : radius大きいregionのstudyも可能?**
- **SCT outer 2 layers のmapping**
  - ✓ **TRTonly-TRTonly track pairを使用。**
  - ✓ **fake conversionのsuppressが課題。**  
**(HT使ったPIDが鍵。)**

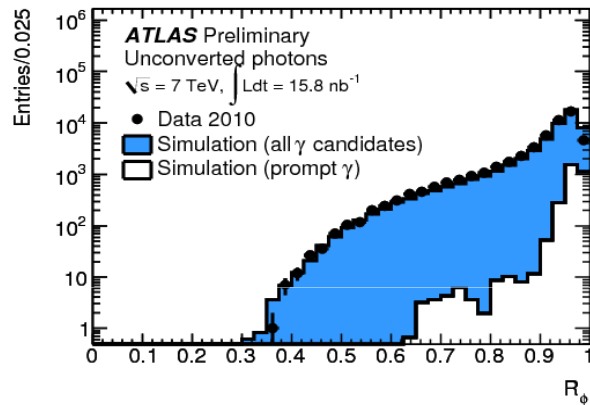
# 7TeV dataで得られたshower shape変数分布 ( $L \sim 15.8 \text{nb}^{-1}$ )

## EM 2層目の変数 ( $E_T > 10 \text{GeV}$ )

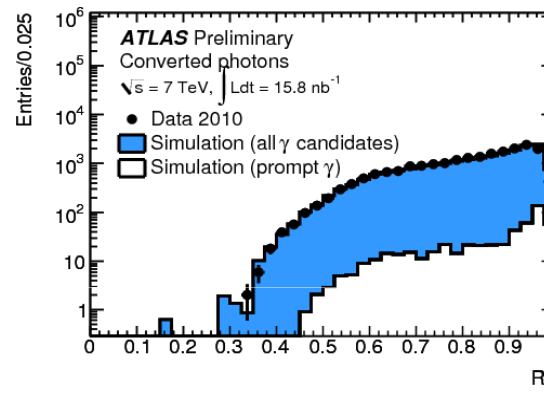
(ex.)  $R_\phi$  ( $3 \times 3$ と $3 \times 7$ のエネルギー比) ←



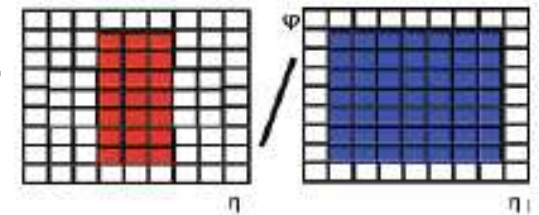
<Unconverted photon>



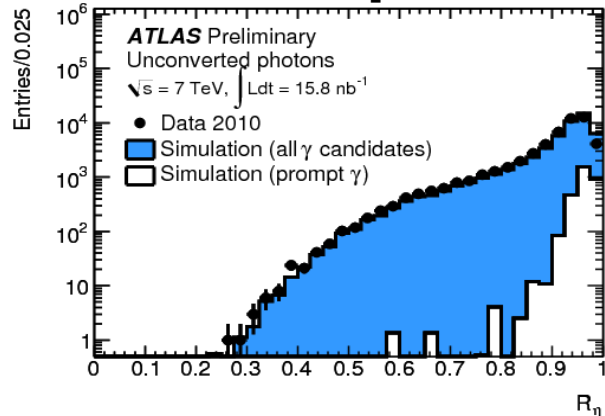
<Converted photon>



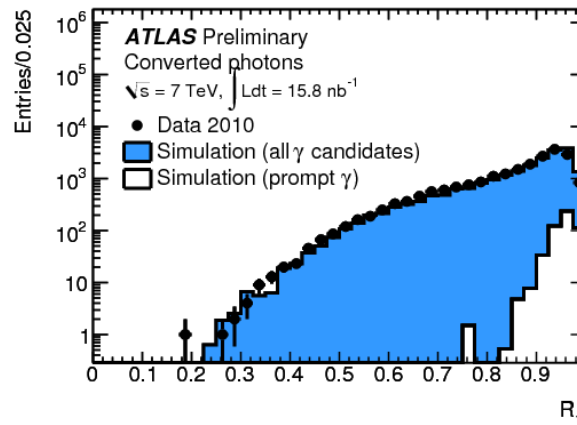
(ex.)  $R_\eta$  ( $3 \times 7$ と $7 \times 7$ のエネルギー比) ←



<Unconverted photon>



<Converted photon>

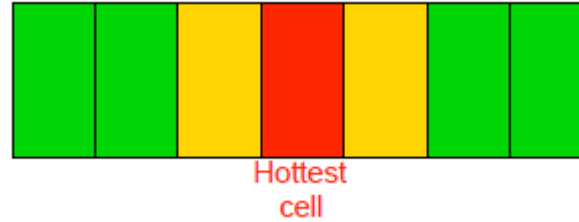
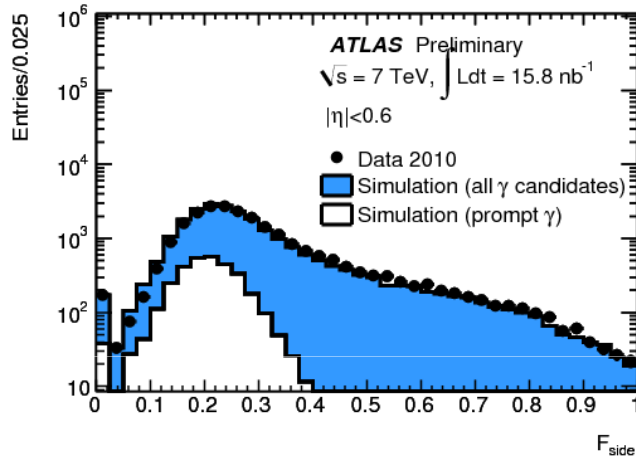




# 7TeV dataで得られたshower shape変数分布 ( $L \sim 15.8 \text{nb}^{-1}$ )

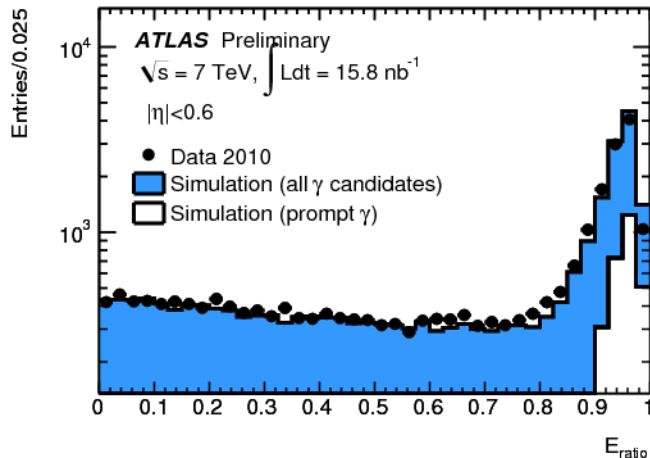
## EM 1層目の変数 ( $E_T > 10 \text{GeV}$ のクラスター)

(ex.)  $F_{\text{side}} = (E_{\pm 3} - E_{\pm 1}) / E_{\pm 3}$



$E_{\pm n}$  : Deposited energy in  $\pm n$  strips around the hottest cell

(ex.)  $E_{\text{ratio}} = (E_{\text{max}} - E_{\text{max}2}) / (E_{\text{max}} + E_{\text{max}2})$



$E_{\text{max}}$  : Deposited energy in hottest cell  
 $E_{\text{max}2}$  : Deposited energy in 2<sup>nd</sup> maximum cell