

LHC-ATLAS実験における 二光子に崩壊するヒッグス粒子の探索(1)

山村 大樹, 田中 純一, 山口 洋平^A

増淵 達也, 中村 浩二, 浅井 祥仁^A

東大素セ, 東大理^A

Outline

LHC-ATLAS実験における $H \rightarrow \gamma\gamma$ 事象の探索

〔2011年のfull dataset(4.9fb^{-1})を用いた解析結果〕

- ◆ イントロダクション
- ◆ Event selection & categorization
- ◆ 解析結果
 - **BG study**
 - **Signal modeling**
 - 系統誤差
 - $H \rightarrow \gamma\gamma$ 探索の最終結果
- ◆ まとめ/ 今後の展望

References

2011年のfull dataset(4.9fb^{-1})を用いた解析結果

◆ **Publication : PRL 108, 111803**
(arXiv : 1202.1414)

◆ **Conf note : ATLAS-CONF-2011-161**
(<https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/CONFNOTES/>)

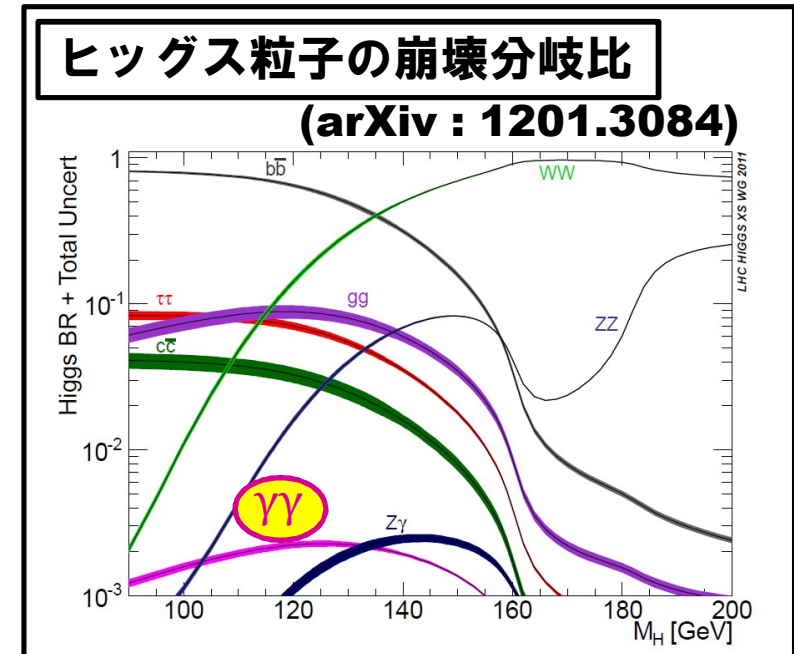
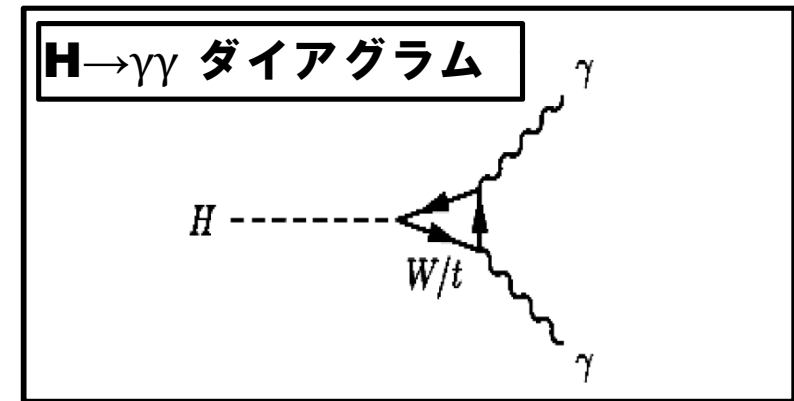
H $\rightarrow\gamma\gamma$ 探索の概要

◆ H $\rightarrow\gamma\gamma$ の特徴

- 崩壊分岐比は、**0.1-0.2%**程度と小さい。
- 高横運動量の光子を2つ持つ事象であるため、**選択効率が良い。**
- **特に $m_H=110-130\text{GeV}$ 領域における sensitivityが高い。**

◆ 背景事象 (background)

- **Irreducible (SMプロセスからくる $\gamma\gamma$ 事象)**
 - … **Main contribution**
- **Reducible … γ +jets, di-jet**
- **Drell-Yan ($Z\rightarrow ee$) … Contributionは非常に小さい。**



Event selection & categorization

◆ Event selection :

2つの高横運動量の光子の存在を要求。

$$(E_T(\gamma_1, \gamma_2) > 40, 25 \text{ GeV})$$

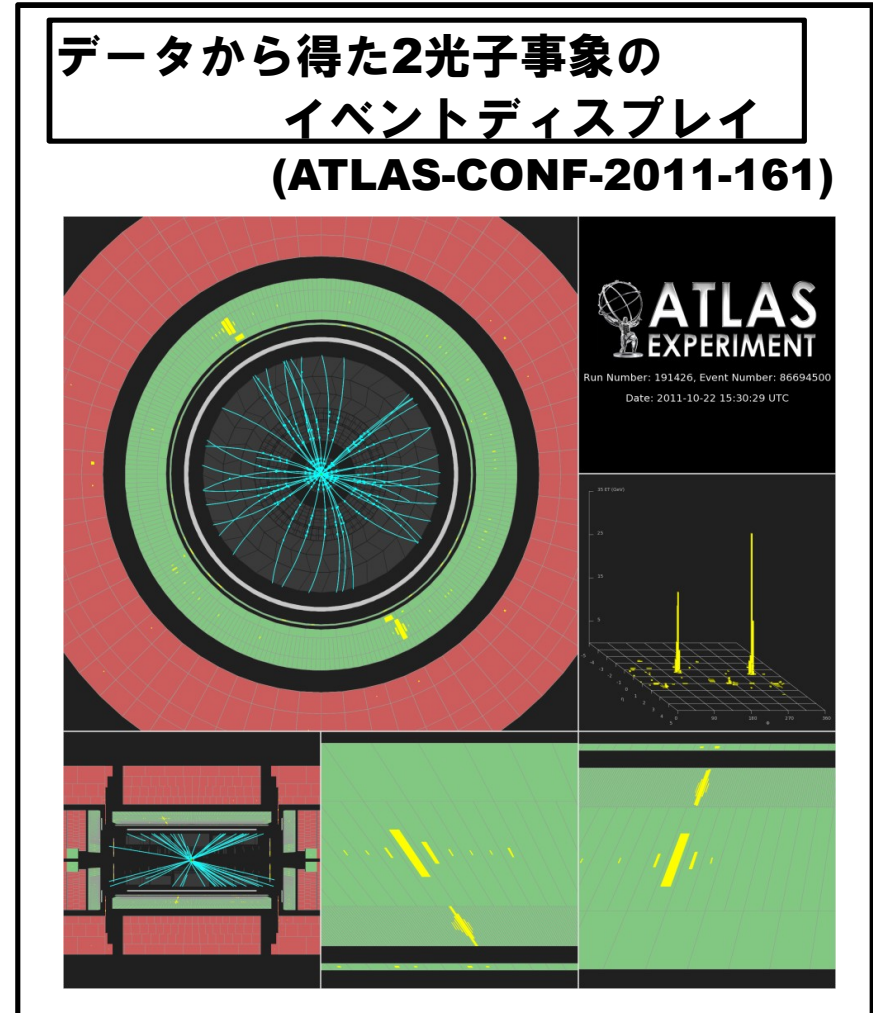
- ・ 2光子トリガー ($E_T > 20 \text{ GeV}$)
- ・ 光子のセレクション
 - ✓ $|\eta| < 1.37$ or $1.52 < |\eta| < 2.37$
 - ✓ $E_T(\gamma_1, \gamma_2) > 40, 25 \text{ GeV}$
 - ✓ photon-ID
 - ✓ Isolation-cut

◆ Event categorization :

Significanceを上げるべく、

イベントを9つに分類する。

(→次頁)



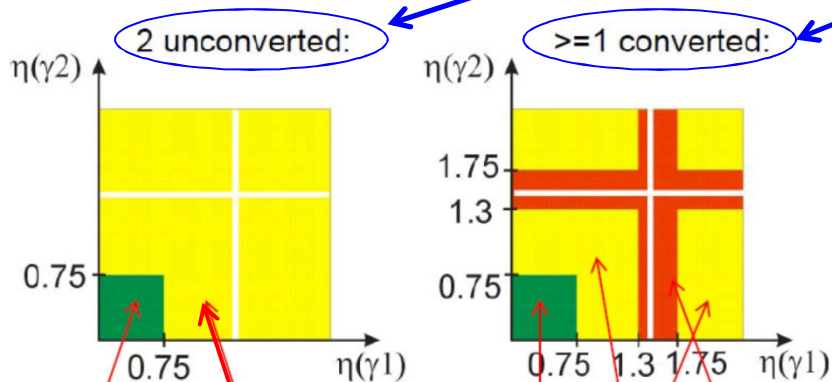
Event categorization

◆ **Unconv event**

… 2光子ともにUnconverted

◆ **Conv event**

… 少なくとも一方の光子が converted



2段階による
Event categorization

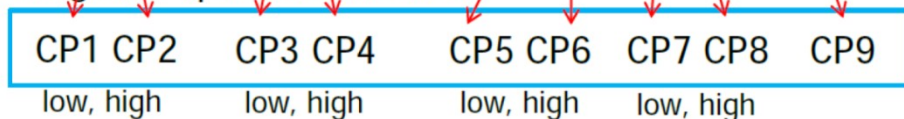
5 categories (**eta, conv**)



← (1) **Unconv/conv および η** を用いて、イベントを 5つに分類。

Low = $p_{Tt} < 40\text{GeV}$ (dominant), high = $p_{Tt} > 40\text{GeV}$

9 categories (**p_{Tt} cat. method**)



← (2) **p_{Tt} を用いた分類。**

- ◆ **Low $p_{T,t}$ (<40GeV)**
- ◆ **High $p_{T,t}$ (>40GeV)**

(※ p_{Tt} の詳細は次頁。)

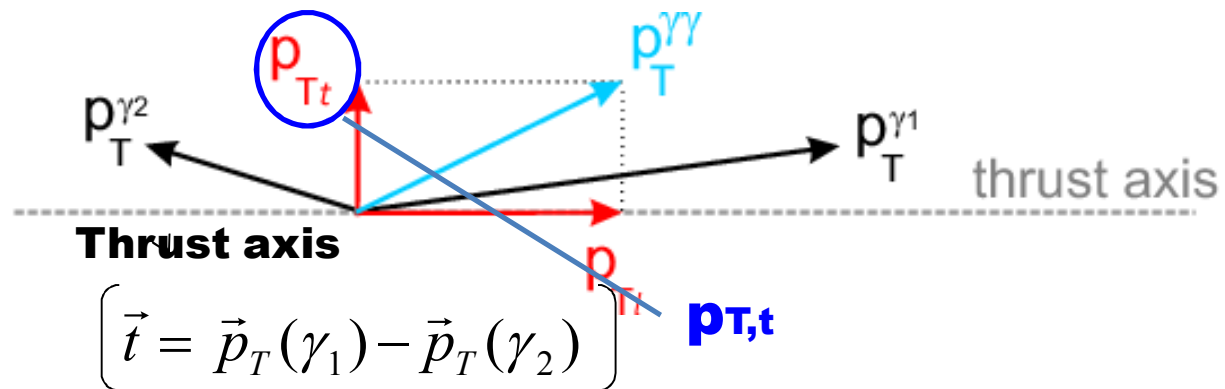
S/B および シグナルのmass resolutionに応じた分類を行っている。

$p_{T,t}$ の定義 ($p_{T,t}$ = “ $p_{T\text{-thrust}}$ ”)

- **“Thrust axis”** を定義: $\vec{t} = \vec{p}_T(\gamma_1) - \vec{p}_T(\gamma_2)$



- **Thrust axis**を基準とした $p_T(\gamma\gamma)$ の横成分を **$p_{T,t}$ (“ $p_{T\text{-thrust}}$ ”)** と定義する。



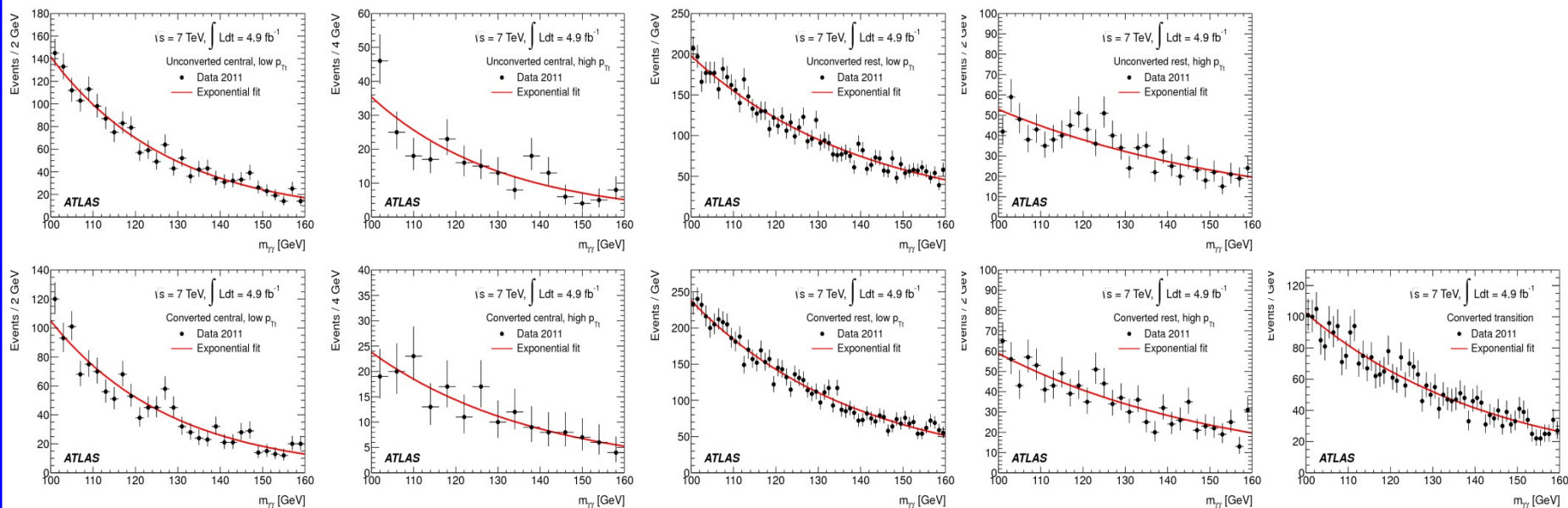
- **$p_{T,t}$ has more discriminative power than $p_T(\gamma\gamma)$.**

解析結果

BG modeling

100-160GeV領域の $M(\gamma\gamma)$ 分布を **single-exponential** でfitする。

各カテゴリの $M(\gamma\gamma)$ スペクトル (ATLAS-CONF-2011-161)



Fit functionとしてexponentialを使うことのreliability :

- 解析で用いるfunction model (= exponential)
- 真のバックグラウンド分布の形

の違いが問題にならないか？

➡ 系統誤差の studyにおいて議論する。

(※ Inclusiveの場合についてのみstudy。)

各BG成分の理解 (data-driven)

最終結果には全く使わないが、reducible BGが十分抑えられているか等を

◆ $\gamma\gamma$ / γ +jet / di-jet :

Checkできる。

2光子のPhoton-ID変数およびIsolation変数に関する“anti-cut”領域をcontrol regionとして用いることで、 $\gamma\gamma$ / γ +jet/di-jetの各成分にData-drivenで分解することができる。(詳細はbackup)

◆ DY($Z \rightarrow ee$)

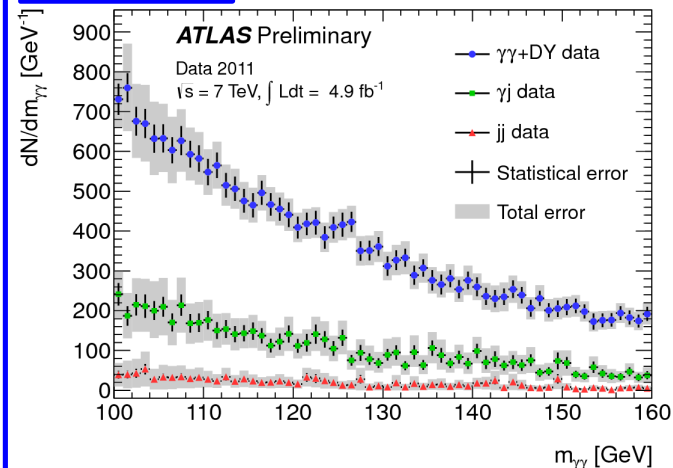
“ $e\gamma$ 事象”をcontrol sampleとする。

($Z \rightarrow ee$ の一方のelectronが
 γ にfakeしたイベント)



$e \rightarrow \gamma$ のfake rateをapplyすることで、 $\gamma\gamma$ セレクト後に残る $Z \rightarrow ee$ 事象のcontributionを評価できる。

Result (ATLAS-CONF-2011-161)



$\gamma\gamma$ がdominant (Fraction : 71%)

$Z \rightarrow ee$ のfraction : 0.7%

Signal modeling

◆ Signal shape

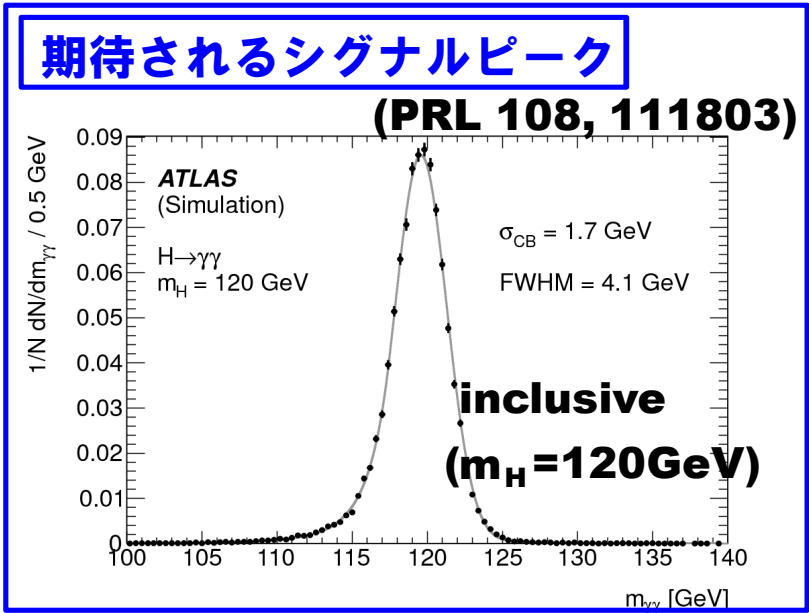
“Crystal-ball (CB) + Gaussian”
での modeling.

カテゴリーごとのシグナルピーク幅
およびシグナル事象数 (for $m_H=120\text{GeV}$)

(arXiv : 1202.1414)

Category	σ_{CB}	FWHM	N_s	N_D
Unconverted central, low p_{Tt}	1.4	3.4	9.1	1763
Unconverted central, high p_{Tt}	1.4	3.3	2.6	235
Unconverted rest, low p_{Tt}	1.7	4.0	17.7	6234
Unconverted rest, high p_{Tt}	1.6	3.9	4.7	1006
Converted central, low p_{Tt}	1.6	3.9	6.0	1318
Converted central, high p_{Tt}	1.5	3.6	1.7	184
Converted rest, low p_{Tt}	2.0	4.7	17.0	7311
Converted rest, high p_{Tt}	1.9	4.5	4.8	1072
Converted transition	2.3	5.9	8.5	3366
All categories	1.7	4.1	72.1	22489

- σ_{CB} , FWHM : シグナルピークの幅
- N_s : シグナル事象数
- N_D : データから決定したBG事象数 ($100 < M(\gamma\gamma) < 160\text{GeV}$)



• Unconv event :

ピーク幅が narrow.

→ significance が良い領域。

• Conv event

ピーク幅の η 依存性が大きい。

→ unconv event に比べて、

より細かい η -bin に区切ることで、

significance の向上が

もたらされる。

系統誤差

(a) **Signal yield** : **+20%/-17%**

◆ **主なerror sources**

- **Theory** : $\sim +15\%/-11\%$
- **Photon-IDのefficiencyの不定性** : $\pm 11\%$
- **Isolationセレクションのefficiencyの不定性** : $\pm 5\%$

(b) **シグナルピーク幅の不定性** : **$\pm 14\%$**

◆ **主なerror** : **calolimeter energy resolutionの不定性 ($\pm 12\%$)**

(c) **カテゴリー間のmigration** (シグナル事象のmigration)

◆ **low \leftrightarrow high p_{Tt} 間**

$$\triangle N_{\text{sig}} = \pm 8\% \text{ (for high } p_{Tt}\text{-bin)}$$

◆ **unconv \leftrightarrow conv 間**

$$\triangle N_{\text{sig}} = \pm 4.5\% \text{ (for unconv-bin)}$$

(d) BG modeling

- $M(\gamma\gamma)$ 分布の解析で用いる関数モデル (= exponential)
- 真のバックグラウンド分布の形が有する違い(residual)について考える。

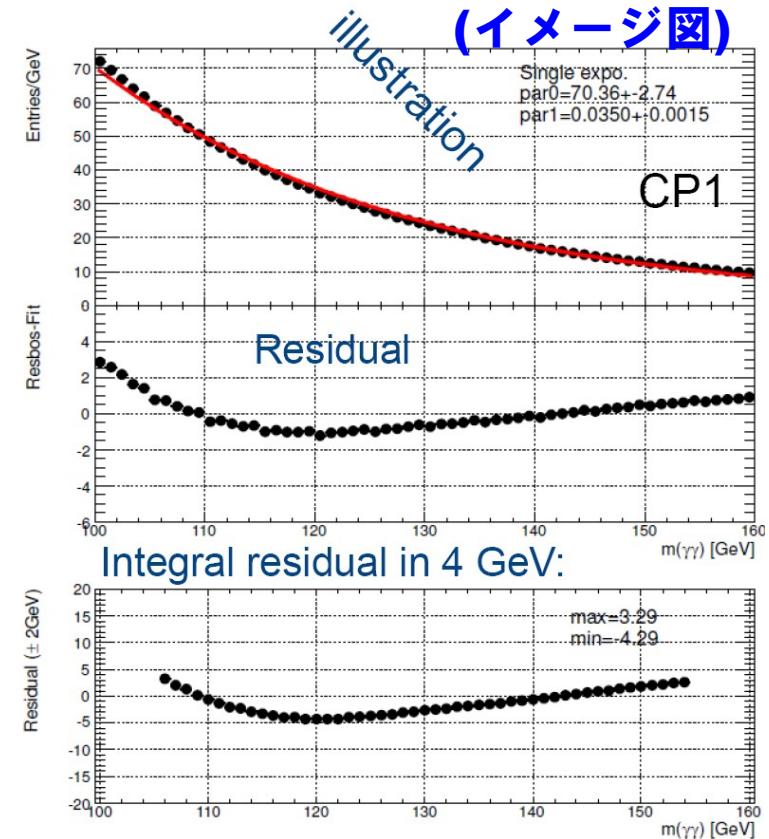
MCを用いた考察

- ◆ RESBOSを使用。
($\gamma\gamma$ プロセスの Parton-level generator)
- ◆ $M(\gamma\gamma)=110-150\text{GeV}$ の探索領域における residualをチェックする。
(幅4GeVのmass windowをスライドして、Integral residualをチェック。)

- 110-150GeVの領域で得られた最も大きいIntegral residual :
BG modelingに起因するシグナル事象数の不定性と定義している。
- 不定性の評価結果 : $\Delta N_{\text{sig}} = 0.1-7.9 \text{ events}$ (カテゴリーごとに定義。)

(e) Energy scaleの不定性

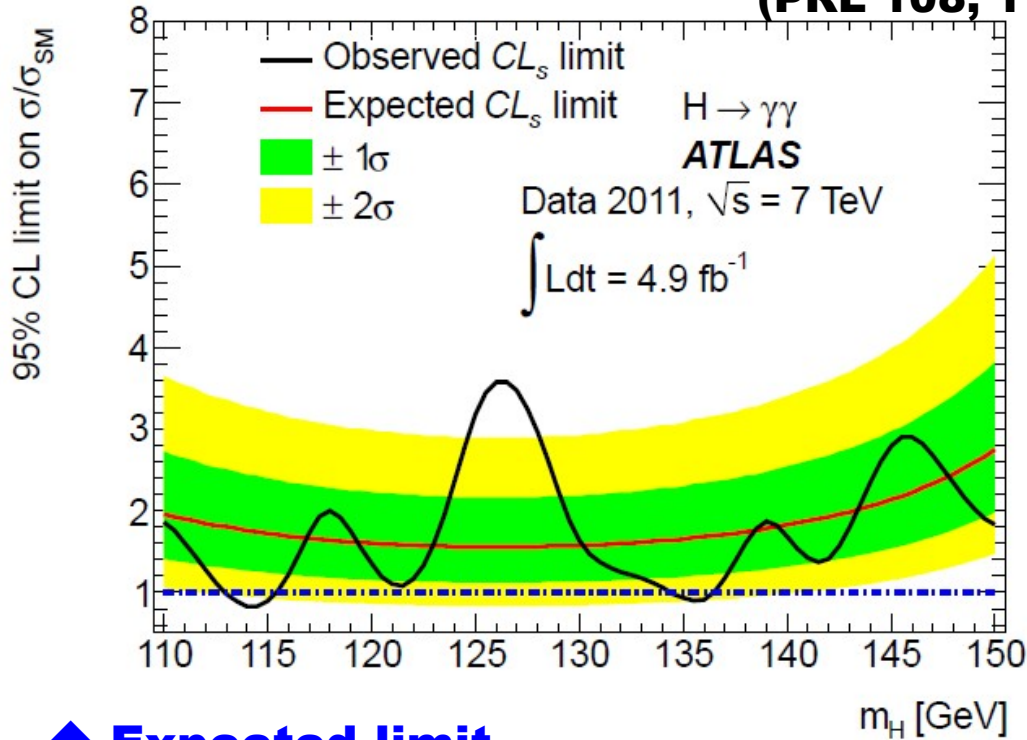
幅4GeV($\pm 2\text{GeV}$)のmass windowをスライドさせて得られたresidual



H → γγ 探索結果

Exclusion limit w.r.t SM prediction (95% C.L.) (w/ CLs)

(PRL 108, 111803)



◆ **Expected limit**

$(1.6-2.7) \times SM$ @ $m_H = 110-150 \text{ GeV}$
 $(1.6-1.7) \times SM$ @ $m_H = 115-130 \text{ GeV}$

◆ **Observed exclusion**

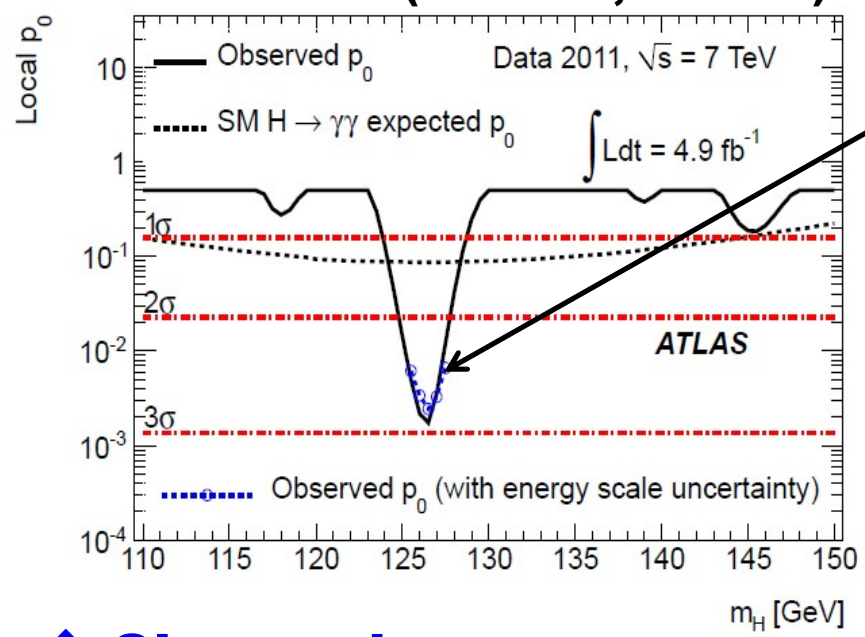
$m_H = 113-115 \text{ GeV}$
 $m_H = 134.5-136 \text{ GeV}$

H→γγ 探索結果

po-value

※LEE(Look-Elsewhere-Effect)を考慮に入れてない場合での結果。

(PRL 108, 111803)



観測された po値

- ・ 黒実線 : Energy scaleの不定性を入れてない場合の結果
- ・ 青点線 : Energy scaleの不定性を入れた場合の結果

◆ Observed excess

探索領域(110-150GeV)内での最も大きなexcess :

$m_H \sim 126.5 \text{ GeV}$ において観測されている。

- ・ LEEを考慮しない場合 : **2.8σ**
- ・ LEEを考慮した場合 : **1.5σ**

Summary

LHC-ATLAS実験における $H \rightarrow \gamma\gamma$ 事象の探索

- ◆ 2011年のfull-dataset (4.9fb-1)を用いた $H \rightarrow \gamma\gamma$ 探索
(探索領域： $m_H=110-150\text{GeV}$)

- ◆ 生成断面積に対する上限値 (@95%C.L.)

- Expected limit

$$\left\{ \begin{array}{l} (1.6-2.7) \times \text{SM} \quad (\text{for } 110-150\text{GeV}) \\ (1.6-1.7) \times \text{SM} \quad (\text{for } 115-130\text{GeV}) \end{array} \right.$$

- Observed exclusion

$$\left\{ \begin{array}{l} m_H = 113-115\text{GeV} \\ m_H = 134.5-136\text{GeV} \end{array} \right.$$

- ◆ 探索領域(110-150GeV)内での最も大きなexcess :

$m_H \sim 126.5\text{GeV}$ において観測されている。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{LEEを考慮していない場合} : 2.8\sigma \\ \text{LEEを考慮した場合} : 1.5\sigma \quad (\text{※LEE : Look-Elsewhere-Effect}) \end{array} \right.$$

H $\rightarrow\gamma\gamma$ 今後の展望

◆ Sensitivityの向上

- Exclusive analysis (VBF-binの導入)
- photon-ID : Cut-base \rightarrow Neural net への移行。
- MVA (Multi-Variate-Analysis)

◆ 2012 run at LHC

- $\sim 15\text{fb}^{-1}$ 程度のデータが取得できるみこみ。
- $\sqrt{s} : 8\text{TeV}$ (7TeVの場合に比べ、ヒッグスの生成断面積が30%up)

◆ 2012年の展望

- Exclusion : ヒッグスがなければ、 $110 < m_H < 130\text{GeV}$ の全領域で可能。
- 他のチャンネル(WW, ZZ, tautau etc.)やCMSとのcombinationにより、SMヒッグス粒子があるかないかについて何らかの答えが出ることを大いに期待して、解析を進める。

Backup

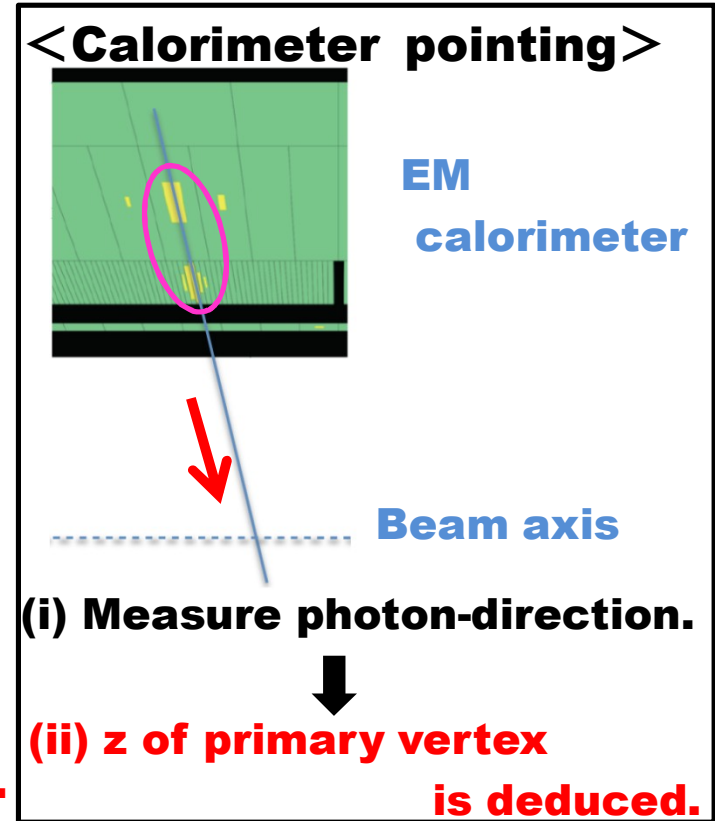
Vertex reconstruction (z-vertex)

Vertex position is measured by

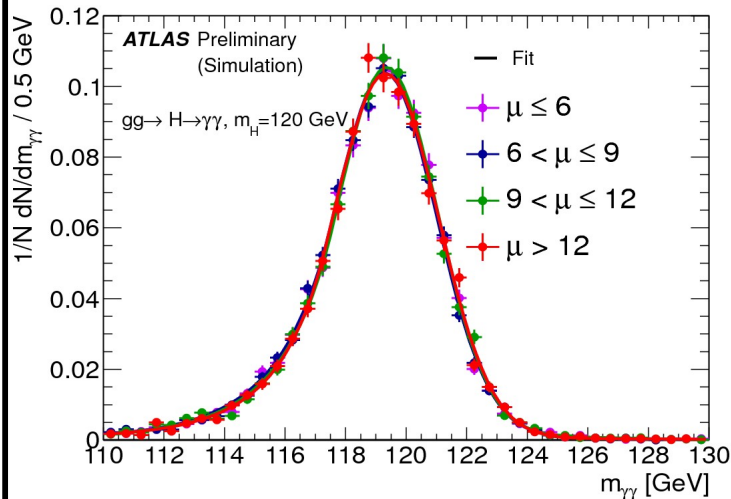
“pointing method”.

- **Unconverted photon :**
“1st + 2nd layer of EM calorimeter”
- **Converted photon :**
“1st layer of EM calorimeter”
+ “conversion point ($\gamma \rightarrow ee$)”

➡ Robust measurement against pile-up.



< $H \rightarrow \gamma\gamma$ peak with various conditions for pile-up >

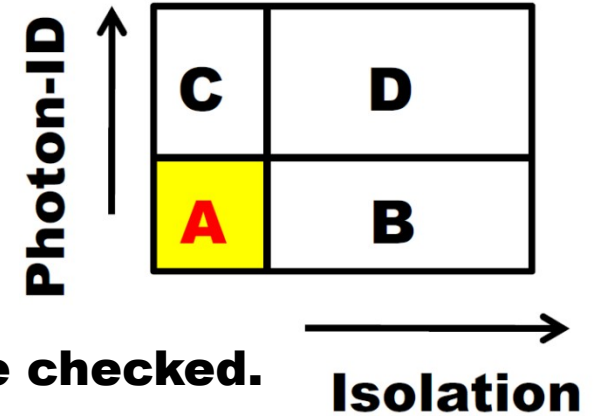


(ATL-CONF-2011-161)

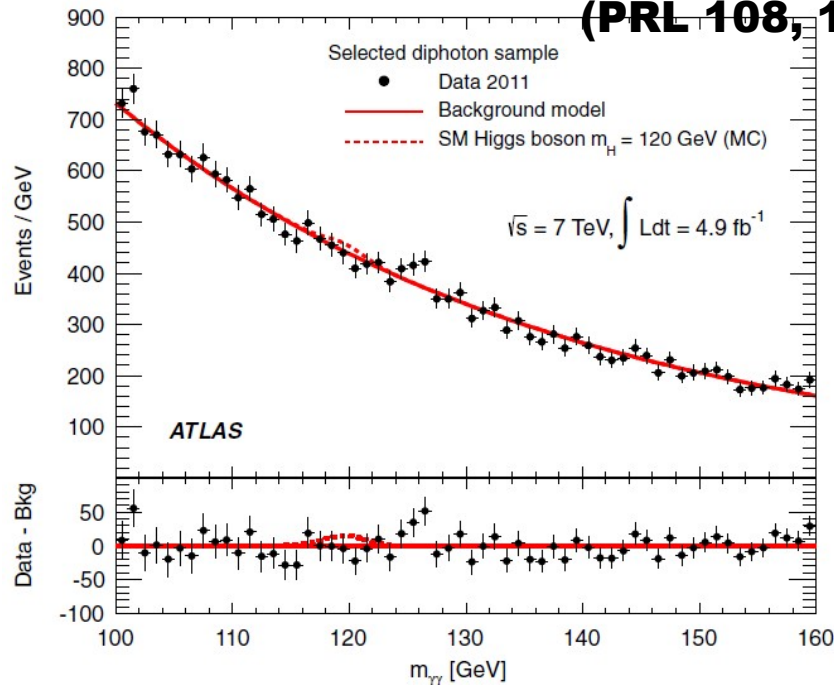
**By using “pointing method”,
 $M(\gamma\gamma)$ resolution also becomes
stable against pile-up effect.**

◆ Data-driven BG decomposition (for $\gamma\gamma$, γ +jets and di-jet)

- Using **“ABCD” method** (i.e. $A=B \cdot C/D$), # of fake photons in “tight-isolated” region can be checked.
- This method is applied to 1st and 2nd photons iteratively.



◆ $M(\gamma\gamma)$ distribution (inclusive) (PRL 108, 111803)



◆ 系統誤差 (summary)

(a) Signal yield

- **photon reconstruction & identification** $\pm 11\%$
- **effect of pileup on photon identification** $\pm 4\%$
- **isolation cut efficiency** $\pm 5\%$
- **trigger efficiency** $\pm 1\%$
- **Higgs boson x-sec (scales)** $+12\%/-8\%$
- **Higgs boson x-sec (PDF+ α_s)** $\pm 8\%$
- **Higgs boson pt-modeling** $\pm 1\%$
- **Luminosity** $\pm 3.9\%$

(b) Signal mass resolution

- **Calorimeter energy resolution** $\pm 12\%$
- **Photon energy calibration** $\pm 6\%$
- **Effect of pileup on energy resolution** $\pm 3\%$
- **Photon angular resolution** $\pm 1\%$

(c) Signal category migration

- **Higgs boson pt-modeling** $\pm 8\%$
- **Conversion rate** $\pm 4.5\%$

(d) BG modeling $\pm(0.1-7.9)$ events

Limit calculation on $H \rightarrow \gamma\gamma$

- ◆ **Profile likelihood ratio method**を用いる。
(CLsによるlimit setting。)
- ◆ **Unbinned maximum likelihood fit is performed simultaneously in 9 categories.**
 - **BG parameters : free**
 - **# of nuisance parameters = 32** (→ 次頁参照。)
- ◆ **PDF for (S+B)-fit**

$$pdf = n_{signal}(\mu) \cdot f_s + \delta_{spr} \sigma_{spr} \cdot f_s + n_b \cdot f_b$$

Signal model
(Defined by MC)

Signal term which is produced by
the bias due to BG modeling.
(Spurious term)

BG term

List of nuisance parameters

- Exponential slope for each category: 9
- Background normalization for each category: 9
- Spurious signal events: 9 categories, but 2 share p_{Tt} and η categorization $\rightarrow 7$
- migration between low p_t and high $p_t \rightarrow 1$ for all (total anti-correlated)
- migration between unconverted-converted $\rightarrow 1$ for all (total anti-correlated)

The following are correlated among 9 categories:

- Signal resolution
- Signal Acceptance (yield)
- Luminosity
- Cross section (2)

$\rightarrow 5$

$$9+9+7+2+5 = 32$$