

# ハドロン衝突での二光子生成反応における 終状態発散の有限化

27pGB-2

尾高 茂、栗原 良将

高エネルギー加速器研究機構 (KEK)

shigeru.odaka@kek.jp

# LHC での diphoton ( $\gamma\gamma$ ) 生成

Low-mass Higgs boson search の重要な background

「発見」後の study の為にも background の性質を良く  
知っている必要がある

$qg \rightarrow \gamma\gamma + q$  の寄与が非常に大きい

NLO 補正が大きいのは主にこのせい

1 jet まで含む  $\gamma\gamma$  生成の event generator が欲しい

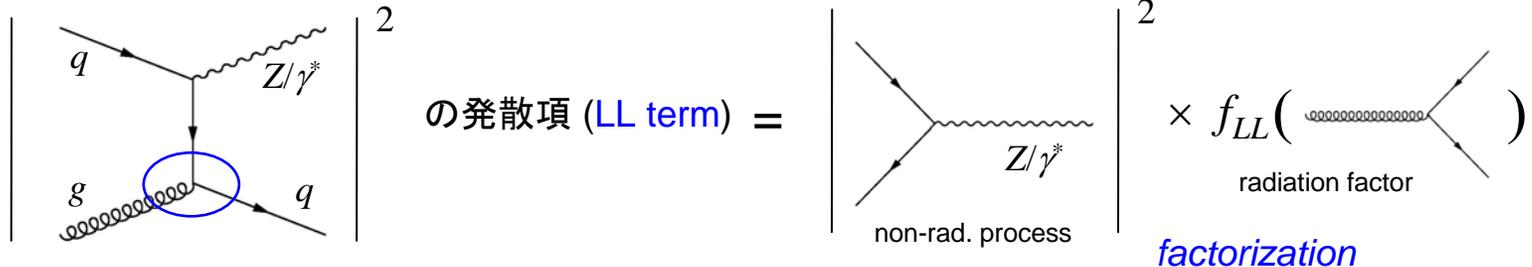
これが無いとまともな efficiency の評価が出来ない

$qg \rightarrow \gamma\gamma + q$  には initial state の QCD 発散だけでなく、  
final state の QED 発散もある

# Initial-state QCD 発散の除去

## Initial-state LLL (Limited Leading-Log) subtraction

$qg \rightarrow Z/\gamma^* + q$  の場合



一般的に 
$$f_{LL}(Q^2, z) = \frac{\alpha_s(\mu_R^2)}{2\pi} \frac{P(z)}{z} \frac{16\pi^2}{Q^2}$$

$P(z)$ : Altarelli-Parisi splitting function

Non-radiative process  $\otimes$  Parton shower (PS) の leading term

これらを差し引く (重複の解消)  $\rightarrow$  残りは有限

PS は  $Q^2 < \mu_F^2 \rightarrow$  subtraction も  $Q^2 < \mu_F^2$  に限定; *i.e.*, **limited**

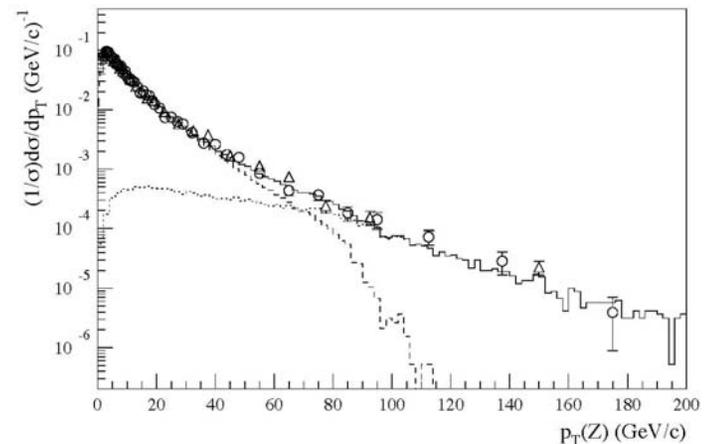
Non-rad.  $\otimes$  PS を足せば、全 phase space を cover する simulation が完成

Single/double weak-boson 生成に適用

$\Rightarrow$  **GR@PPA 2.8**

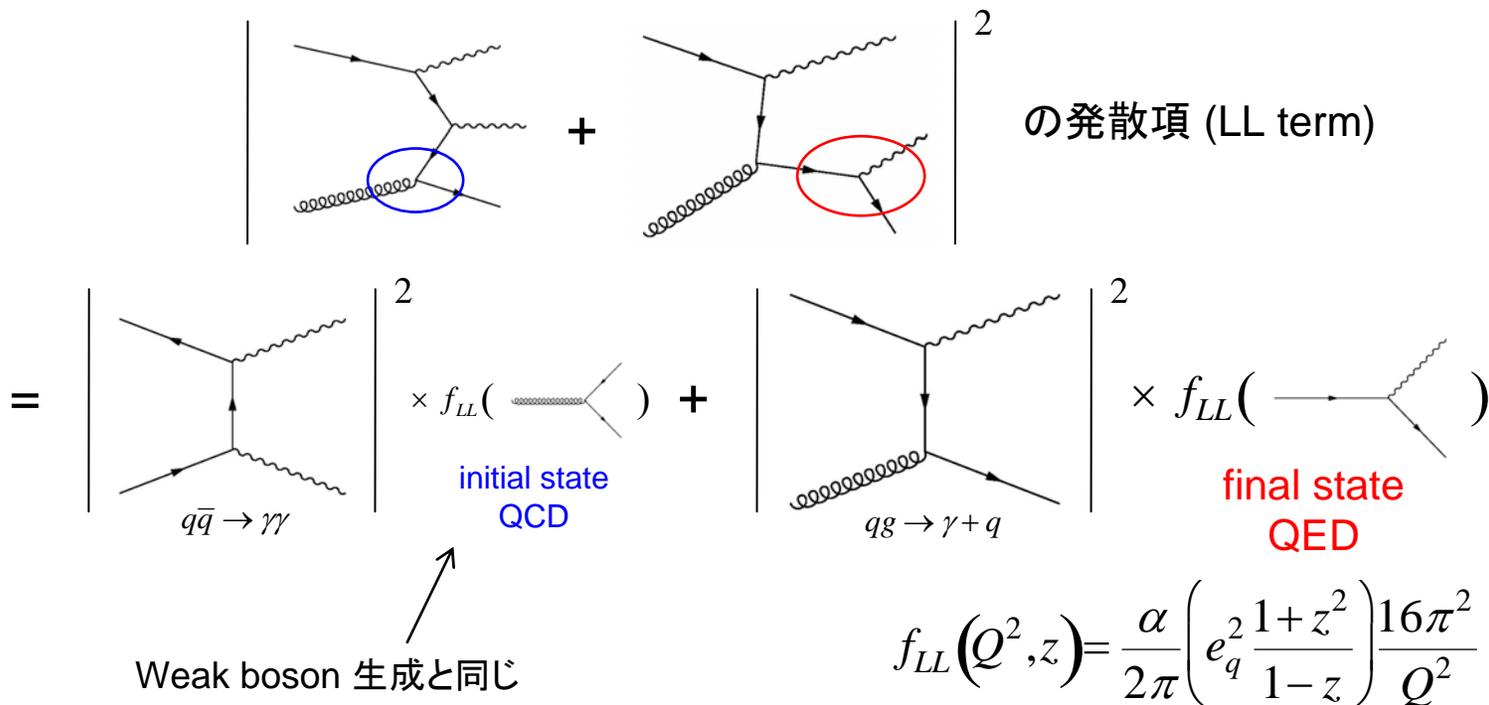
<http://atlas.kek.jp/physics/nlo-wg/grappa.html>

Z-boson production at Tevatron Run-I



# Final-state QED LLL subtraction

$$qg \rightarrow \gamma\gamma + q$$



これらを exact な matrix element から差し引く

足し合わせる non-rad.  $\otimes$  PS の PS は QED radiation を含む必要がある

# $qg \rightarrow \gamma\gamma + q(\text{jet})$ at LHC; typical Higgs-search condition

$pp$  collision @  $\sqrt{s} = 14$  TeV

$$|\eta(\gamma)| \leq 2.5$$

$$p_T(\gamma, \text{lower}) \geq 25 \text{ GeV}/c$$

$$p_T(\gamma, \text{higher}) \geq 40 \text{ GeV}/c$$

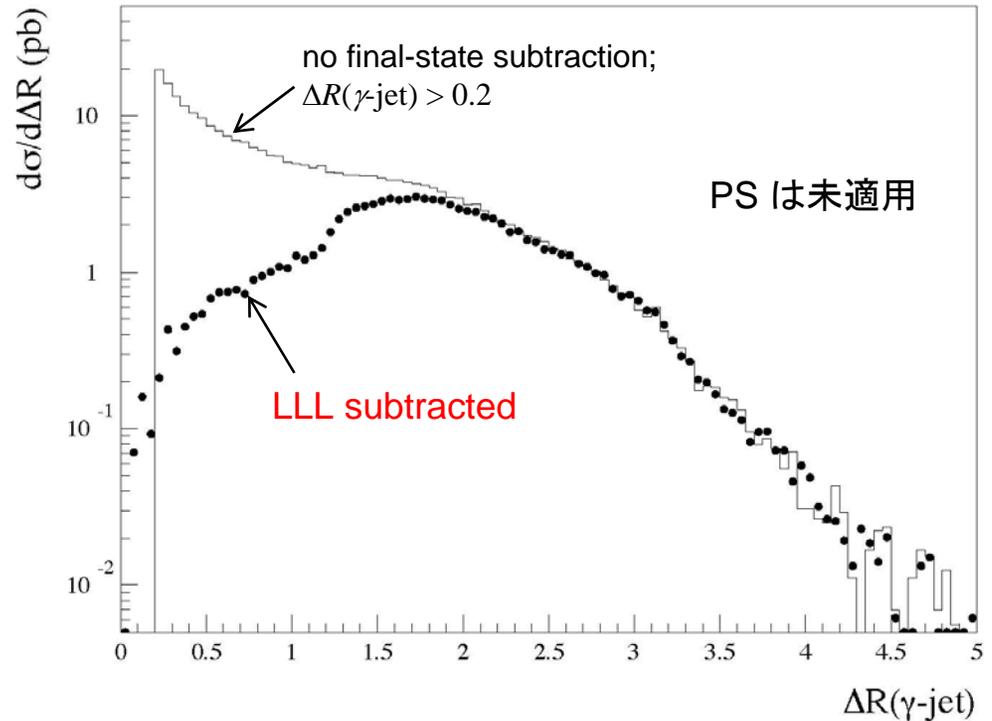
$$80 \leq m_{\gamma\gamma} \leq 140 \text{ GeV}/c^2$$

Initial-state QCD LLL subtraction  
は適用済

Numerical stability を保証する為に  
cut を適用

$$\Delta R(\gamma\text{-jet}) > 0.01$$

i.e., 実質的には no cut



$\Delta R(\gamma\text{-jet})$ :  $\gamma$  と final state  $q(\text{jet})$  との間の opening angle

$$\Delta R^2 = \Delta\eta^2 + \Delta\phi^2 \quad \eta \equiv \frac{1}{2} \ln \frac{p+p_z}{p-p_z}$$

$\gamma$  が 2 個あるので 2 つの値が得られるが、小さい方を探る

# 1 jet まで含む $\gamma\gamma$ 生成の完全な simulation

自前の QED を含む final-state PS は未完成

他は全て GR@PPA で生成できる

Non-rad. ( $\gamma$ +jet 生成)  $\otimes$  PS: fragmentation process は PYTHIA で  
別途 simulate

PYTHIA PS は QED も含んでいる

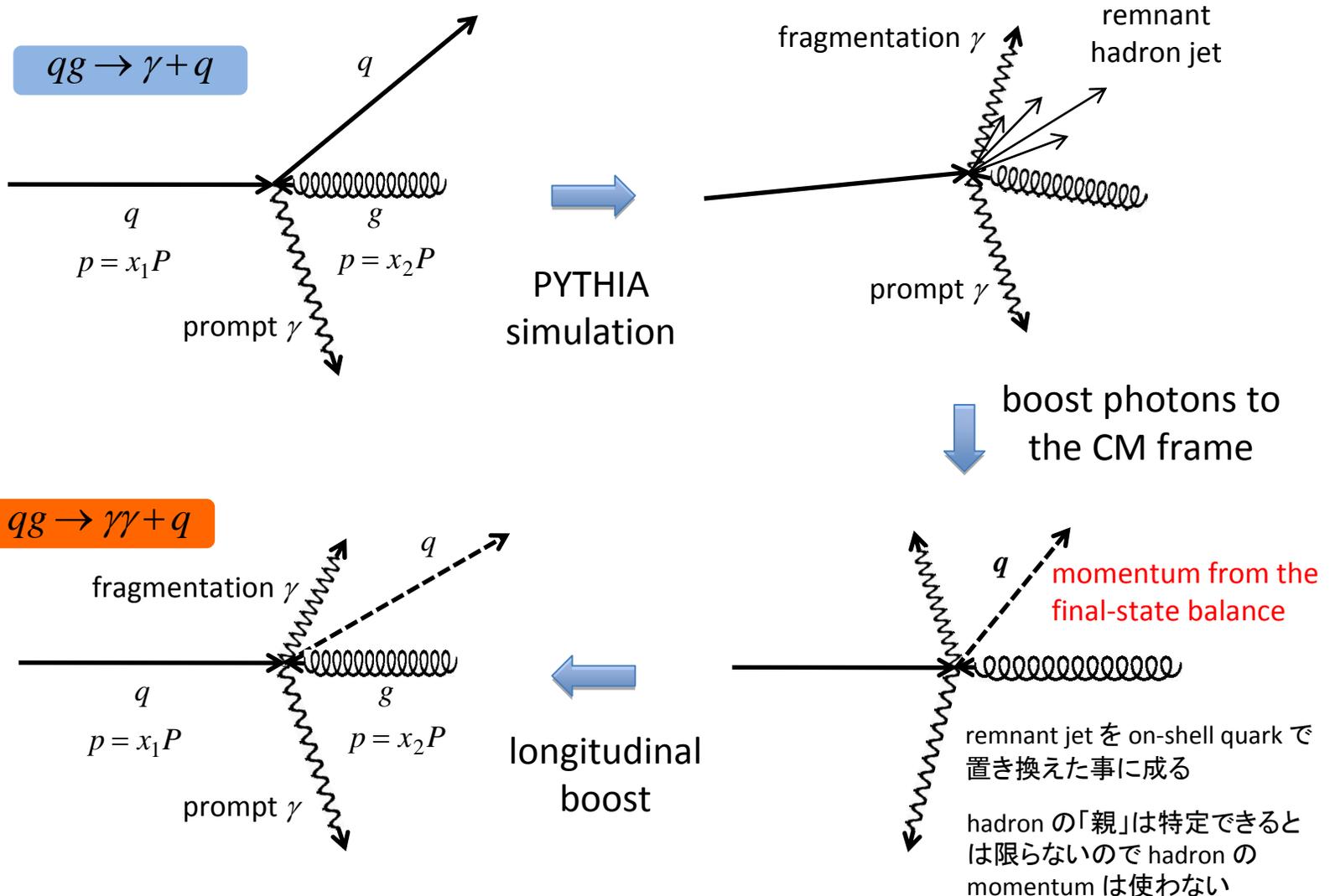
Hard photon が radiate されるまでひたすら生成を続ける (efficiency  $\sim 10^{-4}$ )

"old" PS (PYSHOW) には  $\gamma$  radiation を enhance する option もある (10 倍くらいまで)

Matching を詳細に調べる為には hard interaction 段階の情報が必要

Hard-photon radiation を tag した PYTHIA full simulation の結果から  
" $\gamma$ +jet ( $q$  or  $g$ )" event を再構成する

# Fragmentation $qg \rightarrow \gamma\gamma + q$ event の再構成



# $\gamma\gamma + \text{jet } (q \text{ or } g)$ 再構成の詳細

Parton shower や hadronization のせいで必ずしも

$$\hat{s}_{\text{initial}} = \hat{s}_{\text{final}} \text{ が成り立たない}$$

## "Jet mass" の効果

### "old" PS

PYTHIA simulation で momentum adjustment を行って  $\hat{s}_{\text{initial}} = \hat{s}_{\text{final}}$  としている; i.e., CM 系で prompt photon の momentum は減少

Remnant jet を on-shell quark に置き換えた時点で  $\hat{s}_{\text{initial}} \geq \hat{s}_{\text{final}}$  になる

### "new" PS

Momentum adjustment を行っていない; i.e., prompt photon の momentum は CM 系では不変  
 $\hat{s}_{\text{initial}} \leq \hat{s}_{\text{final}}$

Remnant jet を on-shell quark に置き換えても  
 $\hat{s}_{\text{initial}} \leq \hat{s}_{\text{final}}$

⇒  $\hat{s}_{\text{initial}} = \hat{s}_{\text{final}}$  と成る様に CM 系で final state の overall momentum scale を調整

"old" PS や GR@PPA の PS で行っているのと同じ操作

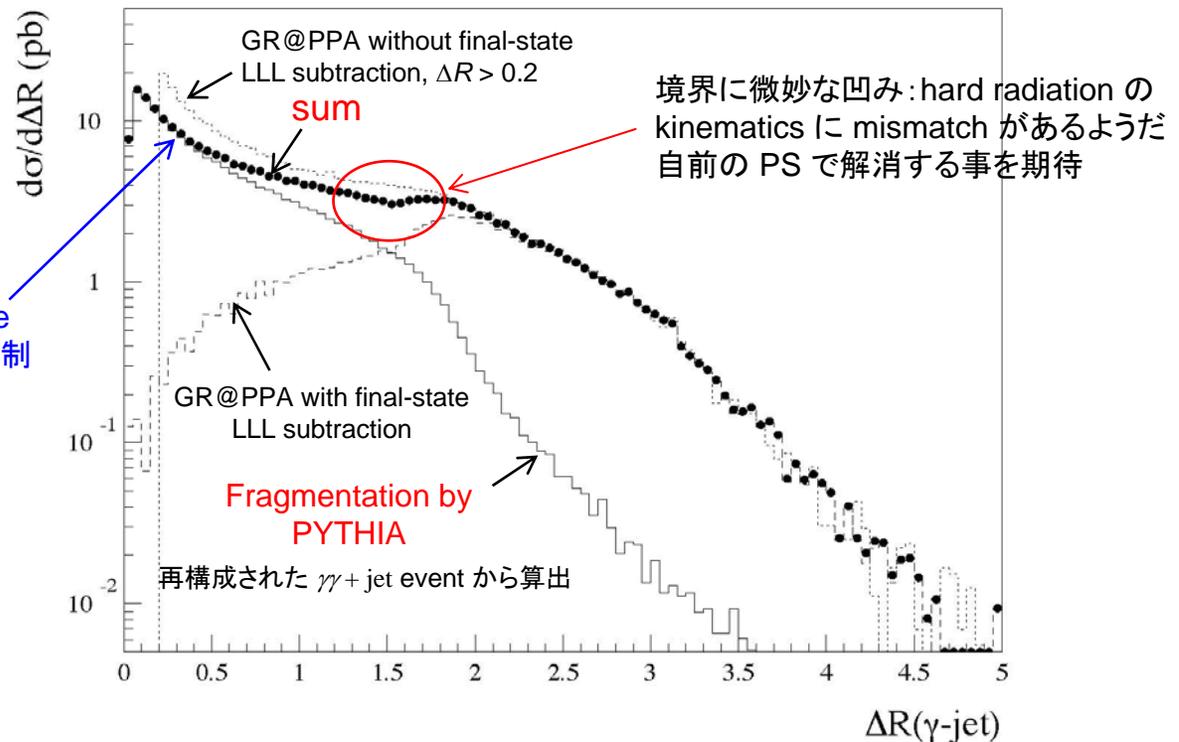
# Matching の検証

全ての process の和のみが物理的な意味を持つ

区分けは人為的、スムーズにつながる必要がある ← 境界を変えても結果が変わらない

LLL-subtracted  $qg \rightarrow \gamma + q$  と fragmentation の和

Final-state matching の検証



Small  $\Delta R$ ではPSの multiple radiation 効果で分布が強く抑制され、発散が解消する

Fragmentation が多少 (20% 程度) 少ない感じもある

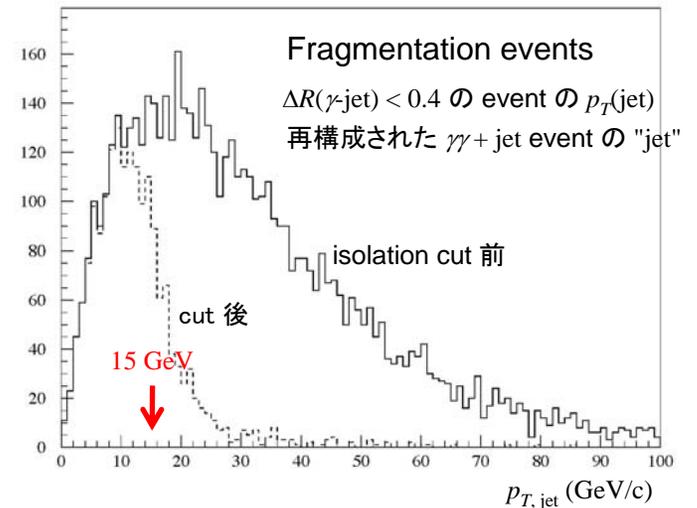
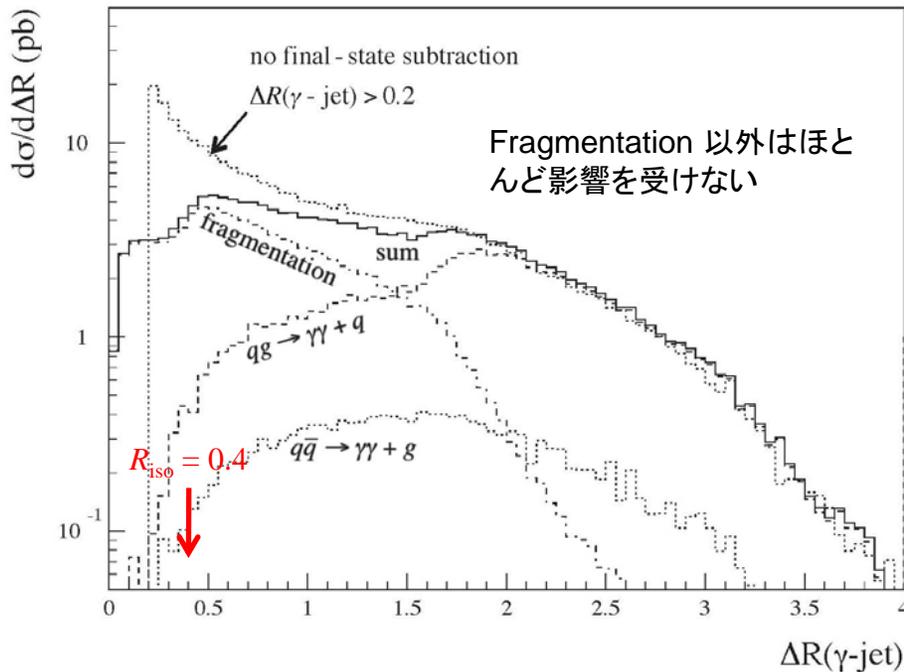
# Isolation cut

実験での  $\gamma$  ID には isolation cut が必要

Hadron jet からの膨大な  $\pi^0$  background の除去  
Small  $\Delta R(\gamma\text{-jet})$  の fragmentation event も除去される

$$E_{T, \text{cone}} = \sum_{\Delta R < R_{\text{iso}} \text{ wrt } \gamma} E_T < 15 \text{ GeV} \quad \text{with } R_{\text{iso}} = 0.4$$

ID する  $\gamma$  と neutrino 以外の全ての粒子についての和をとる



Parton (hard interaction) level の cut がかなり良い近似に成っている  
「再構成」は reasonable に行われている

# 全ての和: $\gamma\gamma$ system の $p_T$ 分布

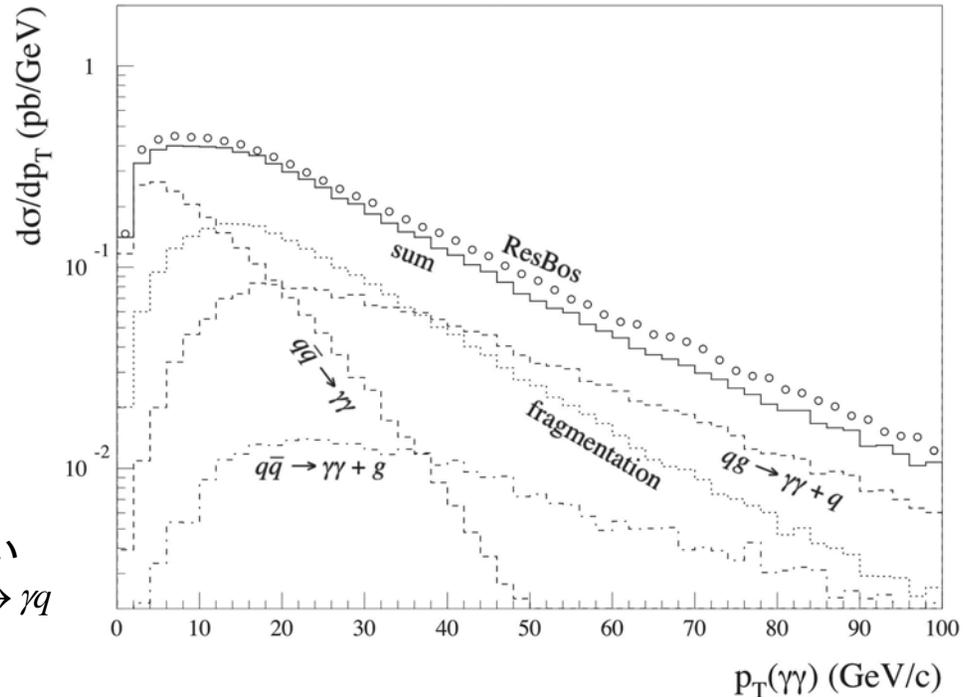
## ResBos とかなり良い一致を示す

ResBos: resummed NLO calculation  
この分布に関して、現状では最も信頼できる  
予言を与えるはず  
DIPHOX のこの分布は見てはならない  
ここでは  $gg \rightarrow \gamma\gamma$  は入れていない

## $q\bar{q} \rightarrow \gamma\gamma$ は全体の 1/3 以下

$q\bar{q} \rightarrow \gamma\gamma$ : 4.1 pb (30%)  
fragmentation: 5.1 pb (37%)  
 $qg \rightarrow \gamma\gamma + q$ : 3.7 pb (27%)  
 $q\bar{q} \rightarrow \gamma\gamma + g$ : 0.8 pb (11%)

この内訳は物理的に意味のあるものではない  
radiation を全て  $\mu_F = p_T$  of  $q\bar{q} \rightarrow \gamma\gamma$  or  $qg \rightarrow \gamma q$   
で hard/soft に分類したときの結果



ただし、「large  $\Delta R(\gamma\text{-jet})$  の  $qg \rightarrow \gamma\gamma + q$  の寄与が無視できない」という事は言える  
 $q\bar{q} \rightarrow \gamma\gamma$  と通常の fragmentation だけでは全く足りないはず  
その上、 $qg \rightarrow \gamma\gamma + q$  は event topology が全く異なる  
"jet tag" での Higgs enrich という解析のシナリオは成り立つのか？

# PYTHIA "new" PS

ここまでは PYTHIA "old" PS (PYSHOW) で fragmentation を評価

最近は "new" PS を標準とすることが多い  
ATLAS も default は "new" PS

"new" final-state PS (PYPTFS) は全く異なる振る舞いをする  
jet の周辺部分が非常に broad

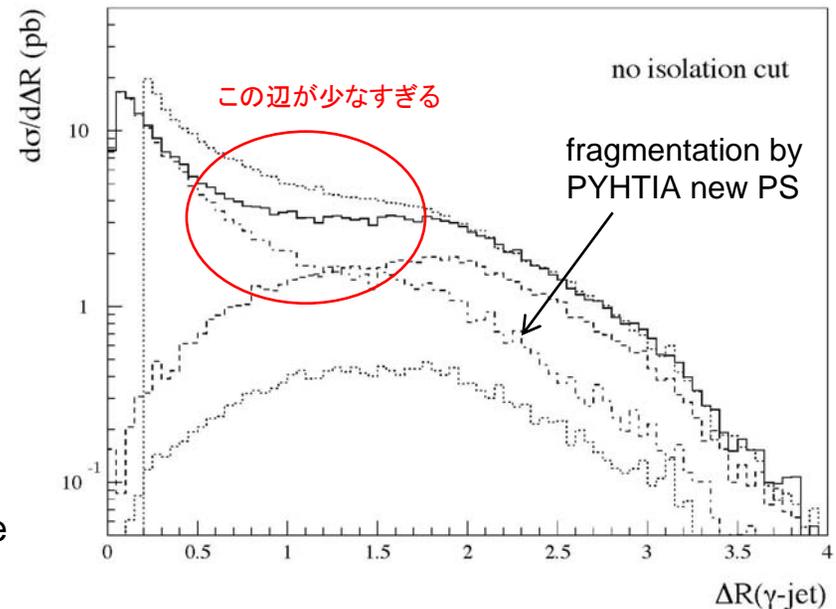
PS の上限の定義が異なるので GR@PPA  
での LLL subtraction もそれに合わせた

large  $\Delta R(\gamma\text{-jet})$  では matching が良いが、 $\Delta R(\gamma\text{-jet}) < 2$  では subtraction 前の spectrum (lowest order の評価) と全く異なる

何らかの理論的な補正 (higher order?) の効果ならば良いが、余りにも違い過ぎる

"new" PS のモデルそのものの効果の様に思える

"old" initial-state PS に続いて "new" final-state PS も「ダメ」?



## まとめ

- LHC での  $H \rightarrow \gamma\gamma$  測定のためには **QED diphoton 生成** の理解が重要
- QED diphoton 生成には  $qg \rightarrow \gamma\gamma + q$  の寄与が大きい
  - これを加えると  $q\bar{q} \rightarrow \gamma\gamma$  の 3 倍以上
    - $\gamma$ - $q$  が collinear に成る領域で発散  $\rightarrow$  fragmentation process
      - 矛盾なく simulate するのは簡単ではない
  - これまで実用的な event generator が無かった (Sherpa で出来る?)
    - Efficiency の信頼できる study が出来ない
- **GR@PPA で (一応) simulate できる様になった**
  - Final-state QED LLL subtraction + initial-state QCD LLL subtraction
  - Fragmentation process は PYTHIA で simulate
    - "old" PS ではほぼ reasonable な結果
    - "new" PS は全く異なる (PS model そのものが悪い?)
  - QCD/QED 混合 final-state PS 開発中
    - Hard- $\gamma$  constraint で efficiency を改善