

2ジェットまで含む ハドロン衝突での二光子生成シミュレーション

13pSK-8

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

前回 (2011.9.17 弘前大) の「まとめ」

- LHC での $H \rightarrow \gamma\gamma$ 測定の為には 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

- 1 jet まで含む event generator が必要

- Initial-state QCD matching の手法を拡張 → final-state QED 発散の処理
- Fragmentation process の simulation に QED を含む final-state PS が必要
- PYTHIA old PS はかなり良好な結果を与えるが、不満足な点も多い
- PYTHIA new PS は使えない

- 独自の QCD/QED mixed PS

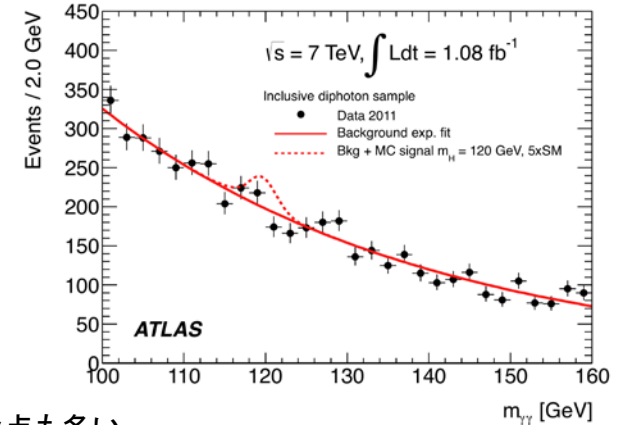
- 基本的な動作テストは良好な結果

- Fragmentation function で $Q < Q_0$ の radiation を補完

- 今後の予定

- GR@PPA framework への組み込み
- Hard-photon radiation を強制する PS の開発 → generation efficiency の改善

Lepton-photon conf. での ATLAS の結果
Background の評価は simulation ではない



全て完成



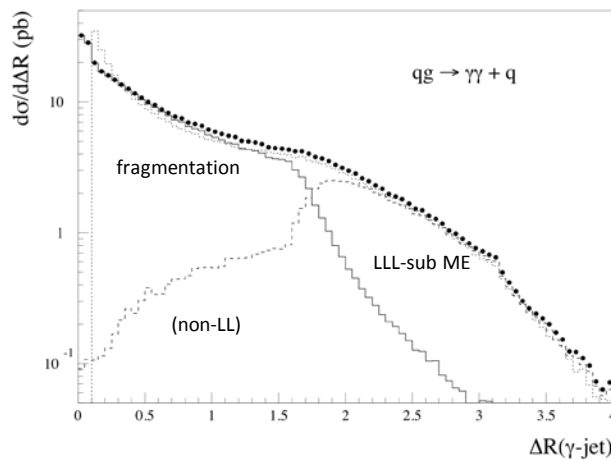
「1 jet まで含む二光子生成イベント・ジェネレータ」完成

S. Odaka and Y. Kurihara,

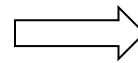
*Consistent simulation of non-resonant diphoton production at hadron collisions
with a custom-made parton shower,*

Phys. Rev. D 85, 114022 (2012); arXiv:1203.4038 [hep-ph]

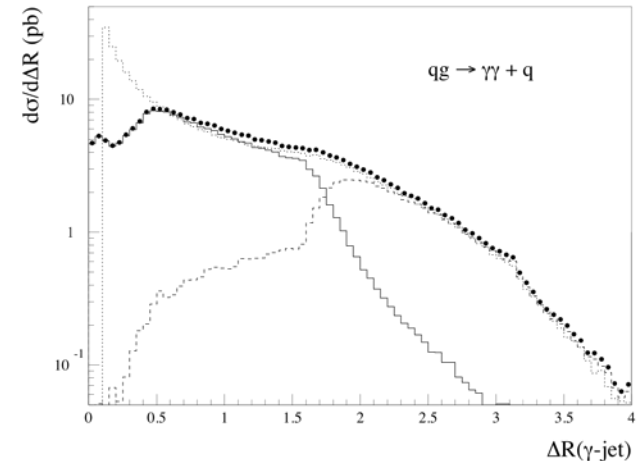
Jet matching: initial-state QCD, final-state QED
FF radiation で補完された forced γ -radiation PS



γ -jet 間の ΔR (小さい方) の分布



Hadron 段階での
isolation cut



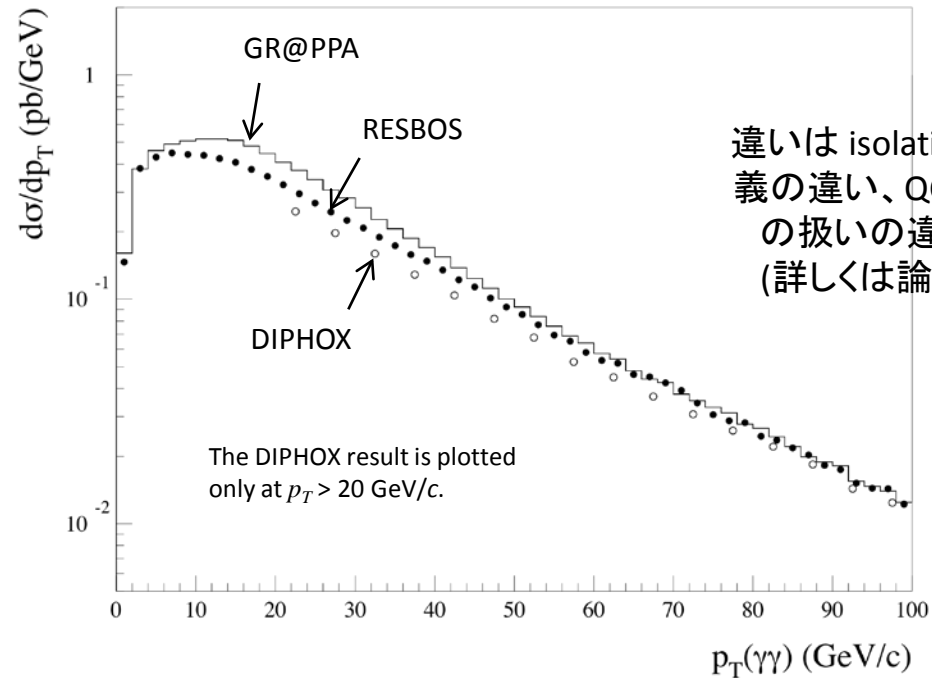
RESBOS, DIPHOX と reasonable な一致

$\gamma\gamma$ システムの p_T 分布

pp collisions at 14 TeV

two γ 's in $|\eta| < 2.5$,
 $p_T(\gamma_1) > 40 \text{ GeV}/c$,
 $p_T(\gamma_2) > 25 \text{ GeV}/c$
 $\Delta R_{\gamma\gamma} > 0.4$,
 and $80 < m_{\gamma\gamma} < 140 \text{ GeV}/c^2$

$E_{T,\text{iso}} < 15 \text{ GeV}$
 with $R_{\text{iso}} = 0.4$

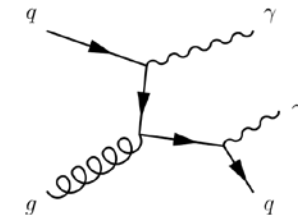


違いは isolation cut の定義の違い、QCD radiation の扱いの違いに起因 (詳しくは論文を参照)

The DIPHOX result is plotted only at $p_T > 20 \text{ GeV}/c$.

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

定義に依るが、我々の典型的な条件では 70% 以上



ここからが今日の本題

Further higher orders

Proton 内の大きな gluon density の影響で 1-jet process
 $qg \rightarrow \gamma\gamma + q$ の寄与が非常に大きい

⇒ 2-jet process $gg \rightarrow \gamma\gamma + q\bar{q}$ の寄与も大きいのでは？

$\Delta\phi_{\gamma\gamma}$ が小さい領域で、NLO 計算は $\Delta\phi_{\gamma\gamma}$
分布を再現できない

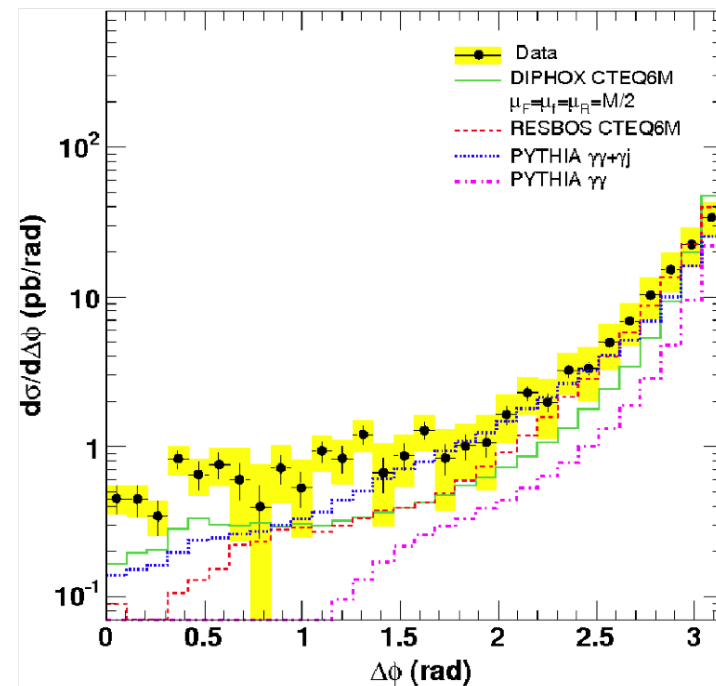
CDF: PRL 107, 102003 (2011); PRD 84,
052006 (2011)

同様な結果は LHC の ATLAS や CMS で
も見えている

⇒ 更なる higher order の必要性
を示唆

2 jet まで含む SHERPA でのシミュレーションや
NNLO 計算がこの分布をかなり良く再現する事が
最近示されている

CDF measurement



$\gamma\gamma + 2 \text{ jets}$

完全なセット:

LLL-subtracted $\gamma\gamma + 2 \text{ jets}$
+ LLL-subtracted $\gamma + 2 \text{ jets} \otimes$ one fragmentation
+ QCD 2-jet \otimes two fragmentation

最初の二つには新たな $\gamma\gamma + 2 \text{ jets}$ と $\gamma + 2 \text{ jets}$ の ME が必要
開発中

最後の一つは forced PS を拡張すれば対応可能

QCD 2-jet のイベント・ジェネレータは既に持っている

Forced γ -radiation PS

Hard interaction で生成された quark に対して一つの photon radiation だけを考える
QED radiation の確率が小さいので、多分これだけで良い
Gluon からの radiation は考えない

Fragmentation function (FF) を使って $Q^2 < Q_0^2$ (PS の cutoff) の radiation を考慮
Radiation に energy cut を適用



Primary event weight: $P = P_{PS}(Q_0^2, \mu^2) + P_{FF}(Q_0^2)$ $P_{PS}(Q_0^2, \mu^2) = 1 - S_{QED}(Q_0^2, \mu^2)$

これらの確率に従って PS radiation か FF radiation かを選択

PS radiation を選択した場合は $S_{QED}(Q_{QED}^2, \mu^2) = \eta$ を解いて Q_{QED}^2 を求める

通常通りに QCD PS を適用し、 Q^2 が Q_{QED}^2 を下回ったところで QED branch を挿入

FF radiation を選択した場合は、QCD PS 終了後に残っている primary quark に QED branch を追加

Additional weights:

"Forward" 条件と PS での energy cut $\rightarrow z$ parameter に対する制限,

FF radiation での energy cut $\rightarrow x$ parameter に対する制限;

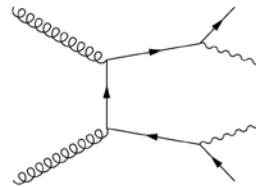
i.e., 残っている quark momentum が不十分な場合は weight = 0



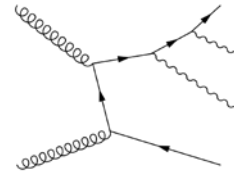
得られた event weight を "LabCut" framework を利用して BASES/SPRING に渡す

Forced multiple γ -radiation PS

Two fragmentation



2 single-radiations



1 double-radiation

一般化

n 個の quark から m 個の photon $\rightarrow i$ 番目の quark から k_i 個の photon $\sum_{i=1}^n k_i = m$

Gluon の photon radiation は無視

可能な組み合わせの数: $H(n, m) = \frac{(n + m - 1)!}{(n - 1)! m!}$

各 quark に対して通常通りに $Q_{i,1}^2, Q_{i,2}^2, \dots, Q_{i,k_i}^2$ を決める

Primary event weight: $w = H(n, m) \prod_{i=1}^n P_i$

$$P_i = [1 - S_{\text{QED}}(Q_0^2, \mu^2)] \times [1 - S_{\text{QED}}(Q_0^2, Q_{i,1}^2)] \times \dots \times [1 - S_{\text{QED}}(Q_0^2, Q_{i,k_i-1}^2) e^{-P_{\text{FF}}(Q_0^2)}]$$

最後の branch では $P_{i,k_i}^{(\text{PS})} = 1 - S_{\text{QED}}(Q_0^2, Q_{i,k_i-1}^2)$ and $P_{i,k_i}^{(\text{FF})} = S_{\text{QED}}(Q_0^2, Q_{i,k_i-1}^2) (1 - e^{-P_{\text{FF}}(Q_0^2)})$

FF radiation

Two fragmentation by GR@PPA

CDF condition

$p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV

Forced γ -radiation PS was applied to QCD 2-jet events ($p_T > 10$ GeV/c, $|\eta| < 3.0$), with $n_\gamma = 2$, $E_\gamma > 10$ GeV and $\mu = p_T$.

Selection

2 photons within $|\eta| < 1.0$
 $p_T(\gamma_1) > 17$ GeV/c, $p_T(\gamma_2) > 15$ GeV/c, $\Delta R_{\gamma\gamma} > 0.4$
 $E_{\text{iso}} < 2.0$ GeV with $R_{\text{iso}} = 0.4$

CDF は underlying event の効果を無くす様に補正しているので PYTHIA-MI は off

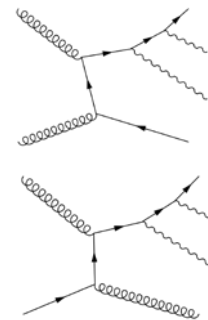
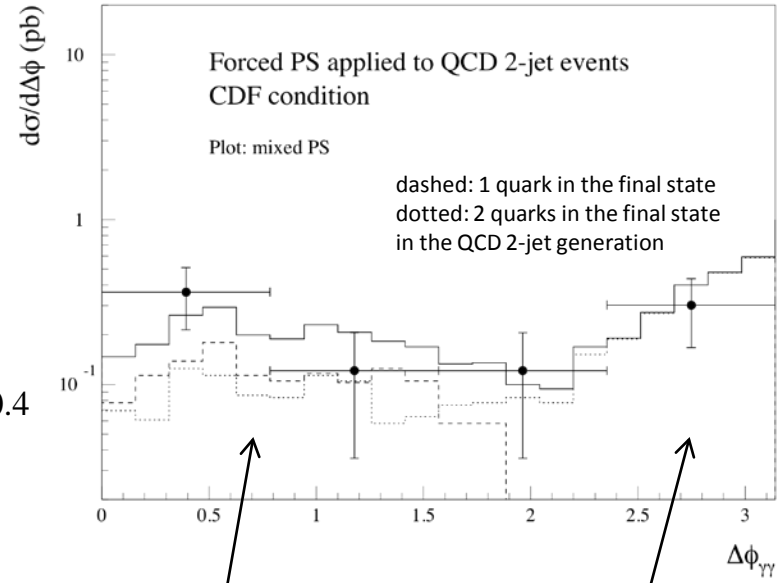
一応、mixed-PS の結果 (plot) と consistent

Mixed-PS simulation

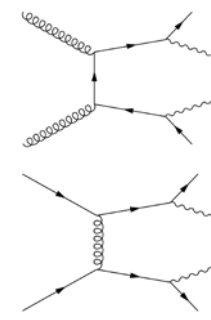
Equally treating QCD/QED branches
 6×10^9 QCD 2-jet events
 6 jobs \times 10 days/job
 とんでもない時間がかかる

Forced-PS simulation

Single 4-hour job



double radiation



2 single-radiations

Combined result

既存の $\gamma\gamma$ と $\gamma\gamma + \text{jet}$,
+ two fragmentation

$\Delta\phi_{\gamma\gamma}$ が小さい領域では
"two fragmentation" の
寄与が顕著

"double radiation" の効果

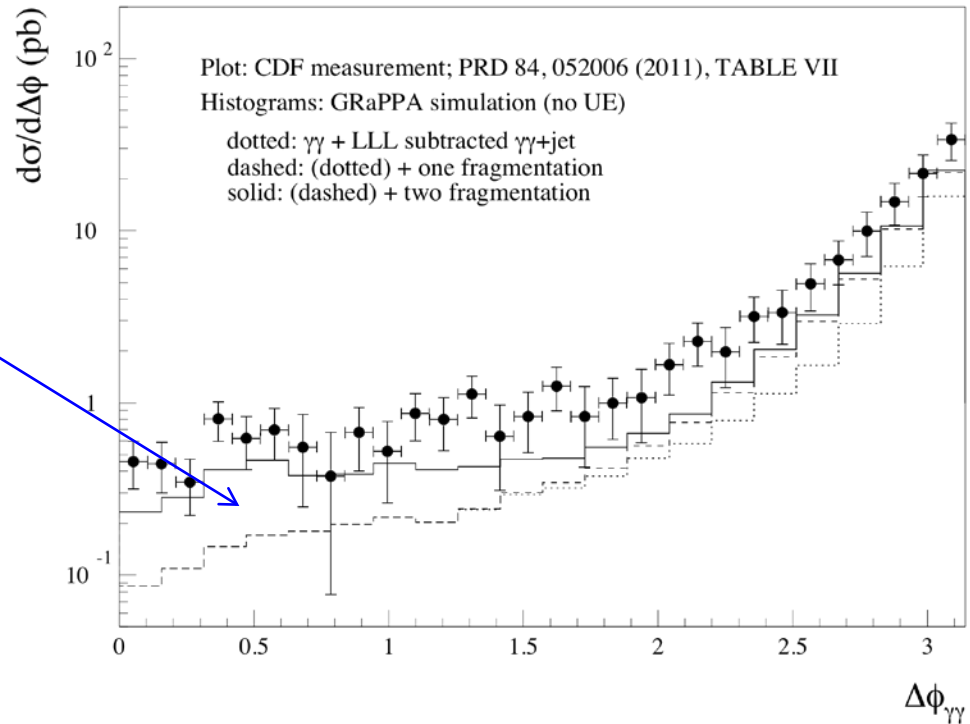
まだ全体的に小さい
Virtual 補正の効果もあるだ
ろうが、、

まだ足りない process

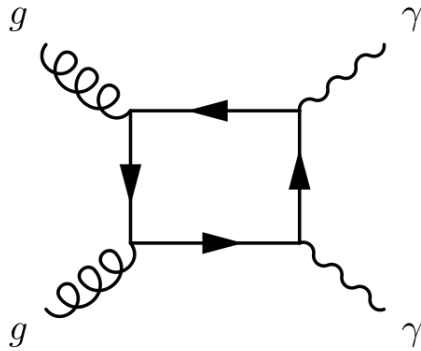
LLL-subtracted $\gamma\gamma + 2 \text{ jets}$

LLL-subtracted $\gamma + 2 \text{ jets} \otimes \text{one fragmentation}$

及び $gg \rightarrow \gamma\gamma (+ \text{jet})$



$$gg \rightarrow \gamma\gamma (+ g)$$



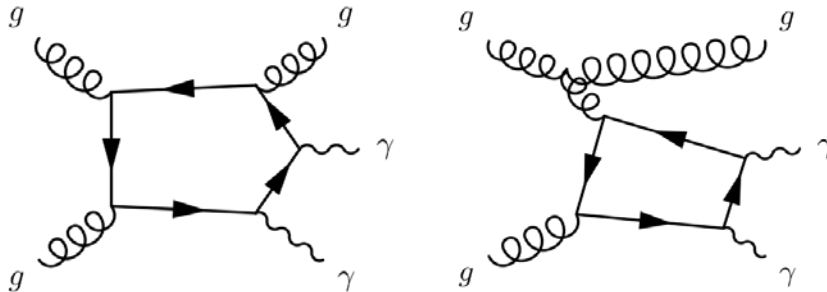
1-loop が最低次

PYTHIA, DIPHOX, RESBOS に入っている
無視できない寄与

小森氏によって GR@PPA に追加
ME を手で coding

済

Small $\Delta\phi_{\gamma\gamma}$ 領域には寄与しない

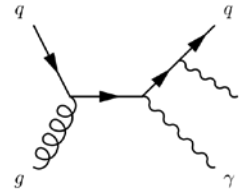
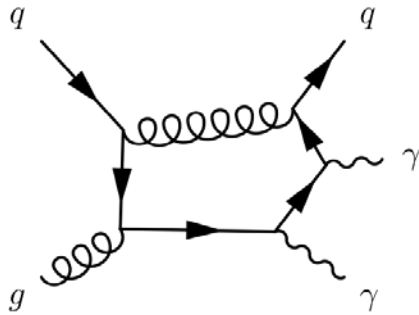


RESBOS は NLO 補正の radiative
process として考慮

Small $\Delta\phi_{\gamma\gamma}$ 領域に寄与する可能性
がある

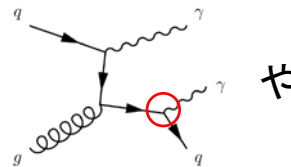
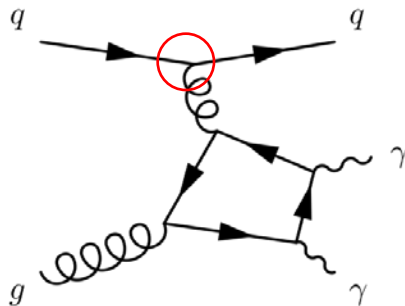
未

$qg \rightarrow \gamma\gamma + q$ (1 loop)

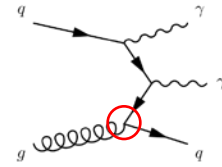


に gluon 内線を追加したもの

余り効かない？



や



と異なる発散項

RESBOS は interference を無視して発散項のみを考慮

本当に interference は小さいか？

$qg \rightarrow \gamma\gamma + q$ は dominant process なので、影響が大きい可能性がある

まとめ

- ハドロン衝突での diphoton (+ jet) 生成の event generator 完成: Phys. Rev. D 85, 114022 (2012); arXiv:1203.4038 [hep-ph]
 - Initial-state QCD 発散に対する LLL subtraction を final-state QED 発散に拡張
 - Subtract された発散を regularize する為に QCD/QED-mixed PS を開発; fragmentation function (FF) を使って small- Q^2 radiation を補完
 - PS は hard-photon radiation を強制する機能を持つ (forced γ -radiation PS)
 - 1-jet process ($qg \rightarrow \gamma\gamma + q$) が dominate \rightarrow 2-jet process も効くのでは？
- Forced γ -radiation PS を multiple γ -radiation に拡張
 - QCD 2-jet \otimes two fragmentation を simulate (2-jet process の一部)
 - この simulation は CDF や ATLAS, CMS が NLO 計算の不足を観測している small $\Delta\phi_{\gamma\gamma}$ 領域に大きな寄与
- 2 jets まで含む event generator を完成させる為には、まだ足りない process がある
 - 2-jet process: LLL-subtracted $\gamma\gamma + 2$ jets, LLL-subtracted $\gamma + 2$ jets \otimes one fragmentation
 - 1-loop process も無視できない: $gg \rightarrow \gamma\gamma$ は手で coding, $gg \rightarrow \gamma\gamma + g$ はまだ
 - 他にも無視できない process があるかもしれない