

# 整合性のとれたハドロン衝突での 多重ジェット生成シミュレーション

19pSK-4

$W + \text{jets}$  ( $\leq 2 \text{ jets}$ ) 生成のシミュレーション

尾高 茂, 渡辺 則之, 栗原 良将

KEK

# ME-PS matching

LHC の様なハドロン衝突実験では hard interaction に付随して  
多数の**ハドロンジェット**が生成

Simulation では **parton shower (PS)** が必須  
PS は collinear 近似 → isolate した hard jet は再現できない

**Matrix element (ME)** での simulation も必要

ME と PS の重複を避ける  
単純な切り分けでは不連続が生ずる



**ME-PS matching**

ME correction to PS: Pythia, Herwig

Suppression of ME: CKKW (Sherpa, MadGraph), MLM (Alpgen), Powheg

Subtraction from ME: MC@NLO

**Subtraction 法で multi-jet ( $\geq 2$  jets) に対応できるものは無い**

# GR@PPA での ME-PS matching

## LLL (Limited Leading-Log) subtraction

S. Odaka and Y. Kurihara, Eur. Phys. J. C 51, 867 (2007)

重複する leading-log 成分 (collinear 発散項) を数値的に 1-jet ME から subtract

Subtraction の領域を限定 (limited):  $Q^2 \leq \mu_{\text{LLL}}^2$

Subtract された成分は 0-jet  $\otimes$  PS event が restore

EW boson(s) + 0, 1 jet process の統合

GR@PPA 2.8:  $W/Z, W^+W^-/WZ/ZZ$

$\gamma\gamma$

S. Odaka and Y. Kurihara, Comput. Phys. Commun. 183, 1014 (2012)

S. Odaka and Y. Kurihara, Phys. Rev. D 85, 114022 (2012)

Multi-jet ( $\geq 2$  jets) 生成では soft-gluon 発散も考慮する必要がある

Collinear 発散と soft-gluon 発散を同時に再現できる  
近似式を導入

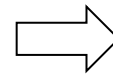
→ combined subtraction

$W/Z + 2$  jets process の発散が消える

Subtraction の修正に対応して 1-jet  $\otimes$  PS event を  
補正

$$T_a^{\text{soft}} = -8\pi\alpha_s \frac{1}{p_a q} \left\{ \sum_b \frac{(\mathbf{T}_a \cdot \mathbf{T}_b)(p_a p_b)}{(p_a + p_b)q} \right\} T_{0,a}$$

Soft-gluon 近似



前回講演  
物理学会年会@東海大  
28aSD01

# 今日の話題

実際に  $W + 0 \text{ jet}, 1 \text{ jet}, 2 \text{ jets}$  を統合する  
シミュレーションを作成

LHC での測定結果と比較

# Event generation

## $W + 2 \text{ jets } (w2j)$

$qg \rightarrow Wq'g$  と  $q\bar{q}' \rightarrow Wgg$  に対して **combined subtraction**

他の subprocess (gluon 生成無し) に対しては LLL subtraction

*Doubly soft events* の寄与は無視

## $W + 1 \text{ jet } (w1j)$

LLL subtraction + **soft-gluon 補正**

## $W + 0 \text{ jet } (w0j)$

補正無し

$W$  は全て  $e\nu$  に崩壊

GR@PPA PS を  $Q_0 = 5 \text{ GeV}$  まで full に適用

$$\mu_R = \mu_F = \mu_{\text{ISR}} = \mu_{\text{FSR}} = m_W \quad \leftarrow \text{単純化}$$

$\mu_{\text{ISR, FSR}}^2$  : PS/subtraction の  $Q^2$  の上限

PDF: CTEQ6L1

# Hadron jet とは？

理論と実験を比較する為には物理的に意味のある厳密な定義が必要

Les Houches WS での consensus

arXiv:0803.0678

**Hadron level で定義**

Parton は物理的な対象ではない

**実験側**

測定の影響を補正

**理論側**

Hadron level まで simulate

**共通の jet-clustering algorithm**

# Event selection / jet clustering

ATLAS 論文の定義に従う

Phys. Rev. D 85 (2012) 092002

Generate した event を PYTHIA 6.425 に渡して hadron level まで simulate

## Event selection

$$p_T^e > 20 \text{ GeV}, |\eta^e| < 2.5, p_T^\nu > 25 \text{ GeV}, m_T > 40 \text{ GeV}$$

$$m_T^2 = 2(p_T^e p_T^\nu - \vec{p}_T^e \cdot \vec{p}_T^\nu)$$

*Born-level* momentum で定義

## Jet clustering

Anti- $k_T$  algorithm ( $R = 0.4$ )

FastJet 3.0.3

Neutrino と  $W$  decay からの  $e$  以外の全ての stable particle を使用

$$p_T^{\text{jet}} > 30 \text{ GeV}, |\eta^{\text{jet}}| < 4.4, \Delta R(e, \text{jet}) > 0.5 \quad \rightarrow \text{detected jet}$$

# Inclusive-jet cross section

$n$  個以上の jet を含む event 生成の cross section

Plot: ATLAS の測定結果

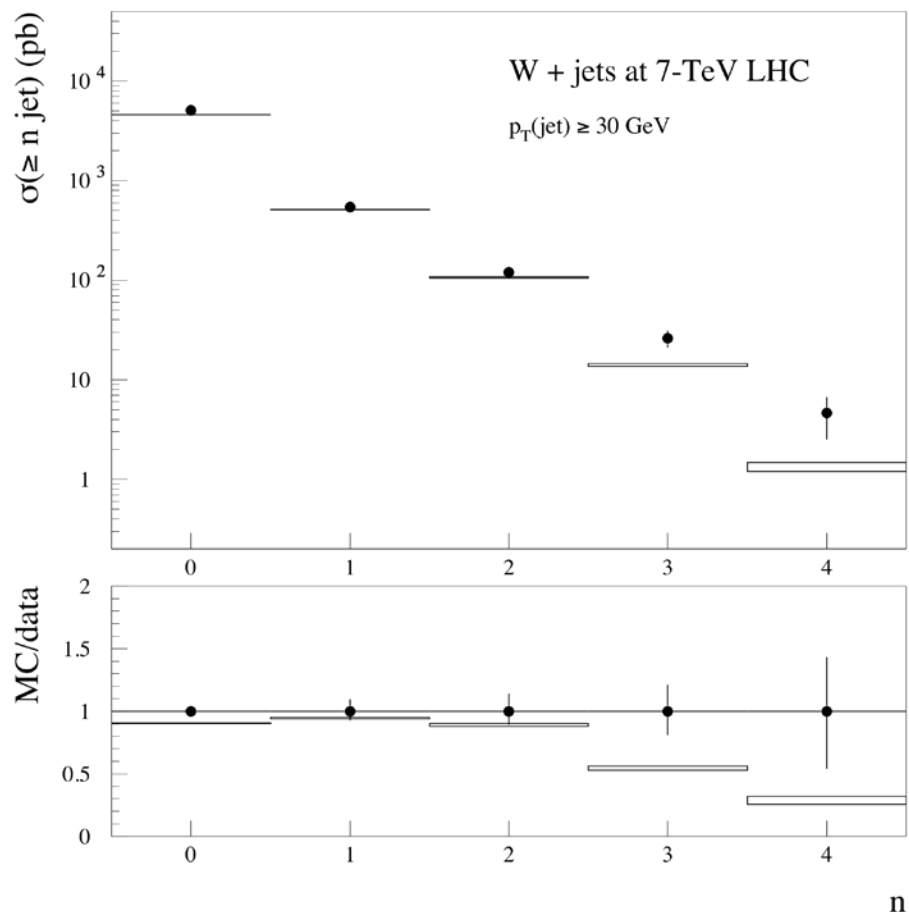
Phys. Rev. D 85 (2012) 092002

Box: simulation

高さが simulation の統計誤差

⇒  $n = 2$  まで良く一致

K-factor (total cross section の比 = 1.1)  
で補正すれば一致はもっと良く成る





# Second-jet $p_T$

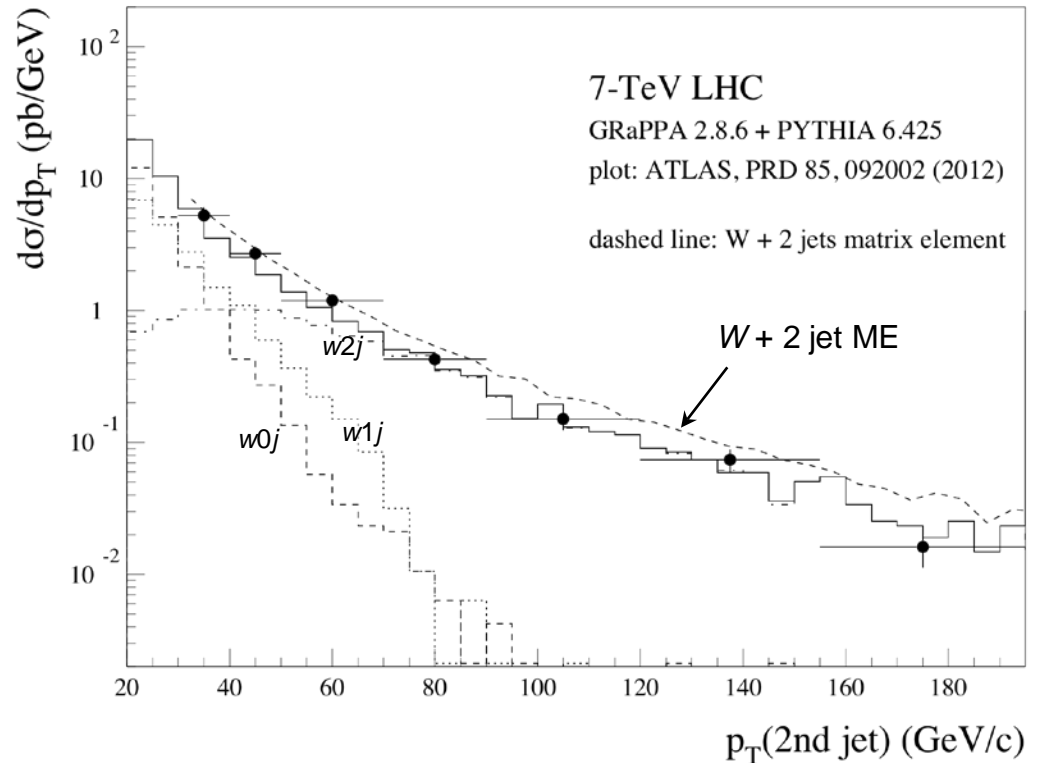
二番目に  $p_T$  の大きな jet の  $p_T$

$W + 2$  jet ME を入れた効果が最も顕著に現れる

$w0j$ ,  $w1j$  は low  $p_T$  に集中

$w2j$  の high  $p_T$  での振る舞いは  
 $W + 2$  jet ME の振る舞いを反映

$w0j + w1j + w2j$  は low  $p_T$  から  
high  $p_T$  に smooth に遷移し、  
測定結果を良く再現



# Energy-scale ( $\mu_F$ ) dependence

$$\mu_{\text{ISR}} = \mu_{\text{FSR}} = \mu_F$$

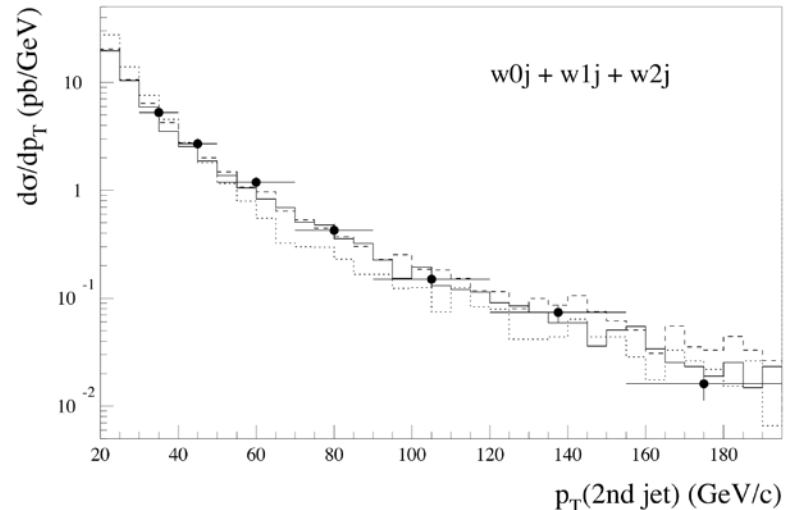
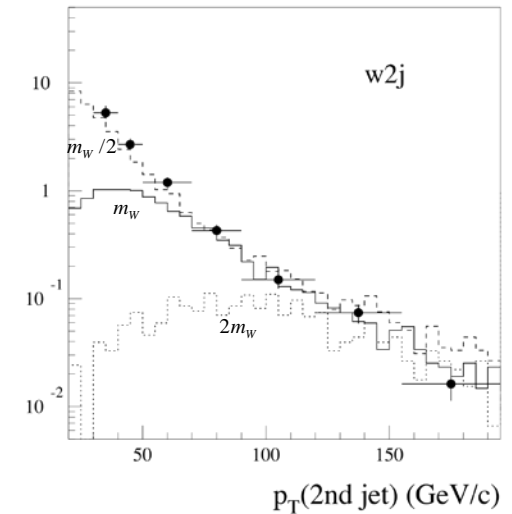
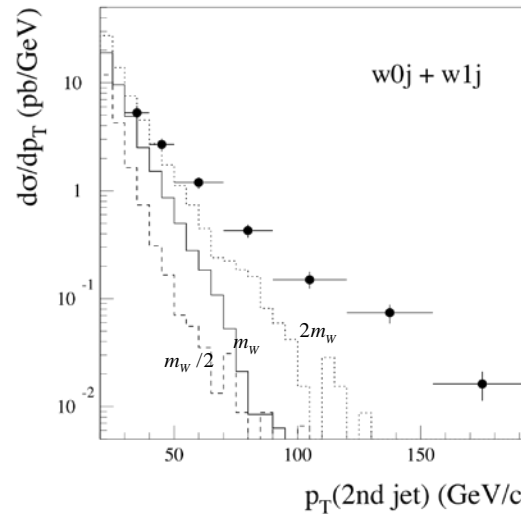
$$\mu_F = m_W/2, m_W, 2m_W$$

発散項に対する PS と ME の境界を移動

$\mu_R = m_W$  ME の QCD coupling は固定

$w0j + w1j$  と  $w2j$  は個々にはあらわに  $\mu_F$  に依存

依存性は互いに cancel して  
 $w0j + w1j + w2j$  は安定;  
*i.e.*, ME-PS matching

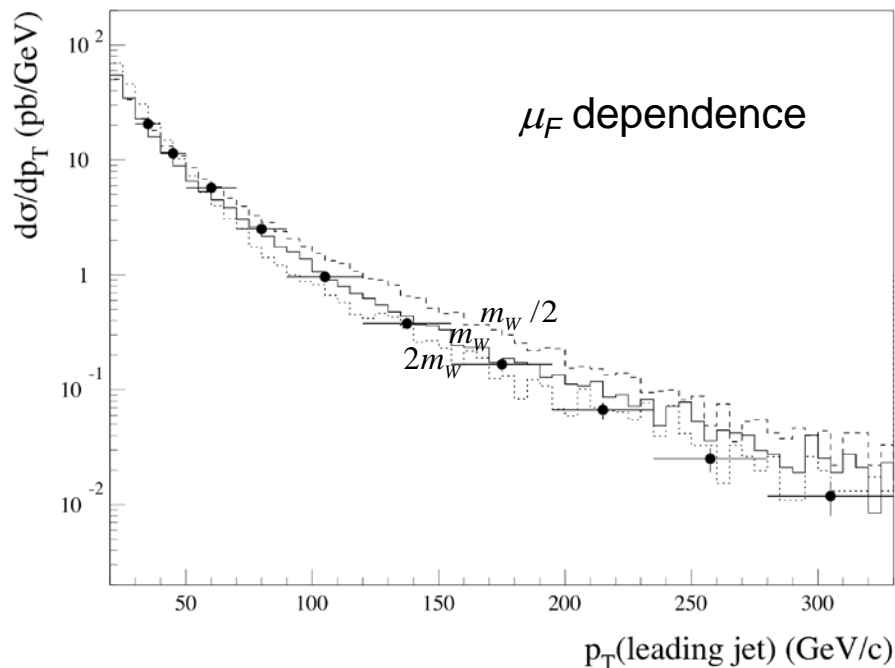
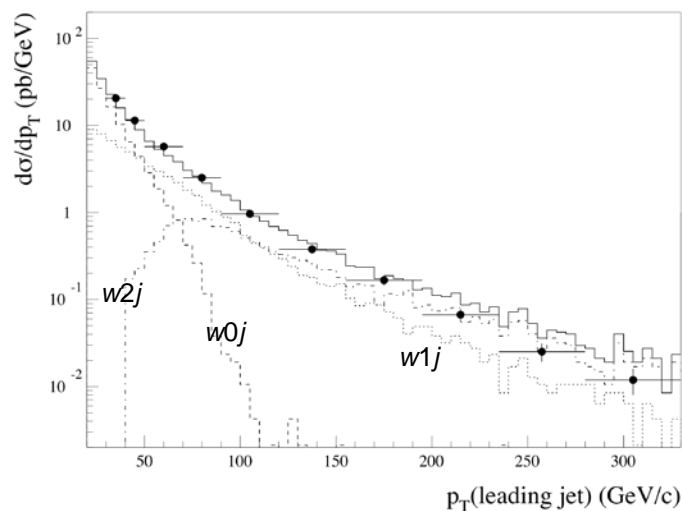


# Leading jet

w2j cross section の  $\mu_F$  依存性が  
leading jet の  $p_T$  分布に影響

結果は ATLAS の測定値と良く一  
致するが、high  $p_T$  で  $\mu_F$  依存性が  
かなり大きく成る (右図)

W の  $p_T$  分布も同様



原因:

High  $p_T$  で w2j の寄与が大きい (左図)

w2j の  $\mu_F$  依存性と cancel すべき w1j の high- $p_T$  cross section の  $\mu_F$  依存性が非常に小さい; *i.e.*, 寄与する PDF の  $\mu_F$  依存性がたまたま非常に小さい

# 今日のまとめ

- ハドロン衝突での **multi-jet 生成** に対応する **subtraction 法**での **ME-PS matching** の手法を  $W$  boson 生成過程に適用
  - $W + 0$  jet, 1 jet, 2 jet 生成過程を統合
  - Combined subtraction, soft-gluon 補正
- Second jet の  $p_T$  分布で **ME-PS matching** が実現されている事を確認
- **Simulation** は **ATLAS** の測定結果をほぼ再現
  - Inclusive-jet cross section (2 jets まで)
  - Second-jet  $p_T$  分布
  - Leading-jet  $p_T$  分布
- 詳細は [arXiv:1409.3334](https://arxiv.org/abs/1409.3334) を参照