

ジェット整合性のとれたハドロン衝突用 イベントジェネレータ

– GR@PPA event generator での ME-PS matching –
13pSA-7

尾高 茂, 栗原良将

KEK

Double count 問題

Hadron collision 用 event generator における
最も深刻な問題

→ ME-PS matching

例えば、 $pp \rightarrow W + \text{jet} + X$

$$\frac{d\sigma_{pp \rightarrow W + \text{jet} + X}(s)}{d\Phi_j} = \sum_{a,b,c} \int_0^1 dx_1 \int_0^1 dx_2 f_{a/p}(x_1, \mu_F^2) f_{b/p}(x_2, \mu_F^2) \delta(\hat{s} - x_1 x_2 s) \frac{d\hat{\sigma}_{ab \rightarrow Wc}(\hat{s})}{d\hat{\Phi}_c}$$

Parton Distribution Function
(PDF) に対する積分

Hard interaction



Event generator では

Parton Shower (PS)

摂動計算の matrix element (ME)
を使った event 生成

両方に parton (jet) radiation の効果が含まれる
整合性は自明でない

下記の sample をどうやって生成するか？

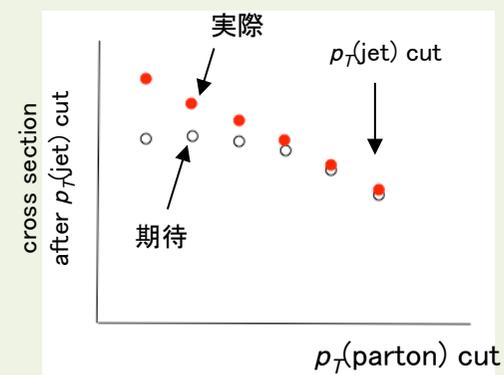
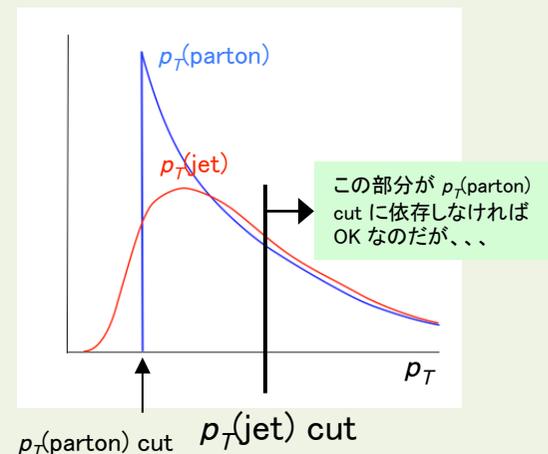
$$W + 1 \text{ jet}, p_T(\text{jet}) > 20 \text{ GeV}/c$$

普通の方法

- $p_T(\text{parton})$ cut を $20 \text{ GeV}/c$ よりも適当に小さくして、 $W + 1 \text{ jet}$ event generator で hard-interaction events を生成
- PS/hadronization/detector simulation を通す \rightarrow smearing
- Jet reconstruction を行って $p_T(\text{jet}) > 20 \text{ GeV}/c$ を適用
- $p_T(\text{parton})$ cut を変えて、 $p_T(\text{jet})$ cut 後の cross section の変化を調べる
- この cross section が変わらなくなる位置に $p_T(\text{parton})$ cut 値を決める

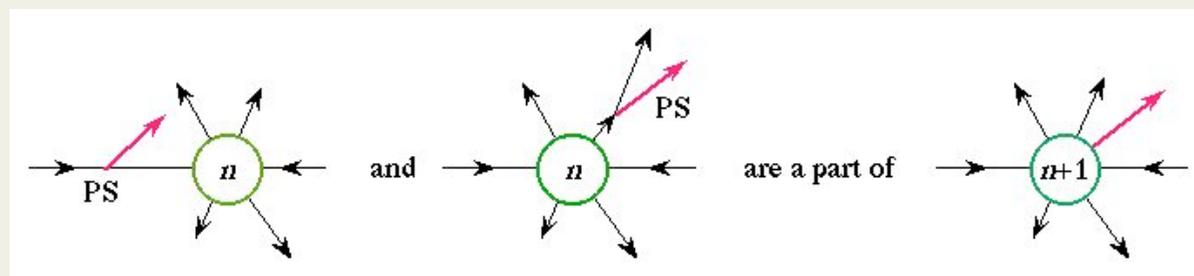
ところが、

- $p_T(\text{parton})$ cut をどこまで小さくしても cross section が一定に成らない
- 調べてみると、reconstruct された jet は hard interaction からの parton と関係ないものが多い



異なる jet-multiplicity の ME の足し合わせ

Multi-jet event の simulation、NLO event generation では足し合わせが必須



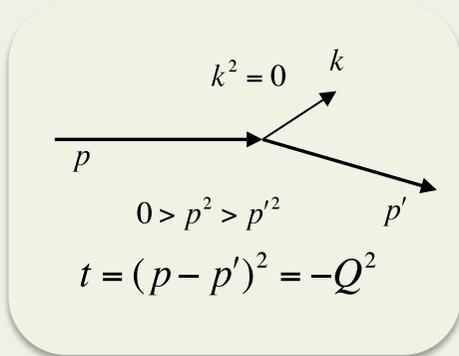
n -jet ME + PS jet は $(n+1)$ -jet ME の一部

これらを単純に足し合わせると double count

PS を使わなくても PDF に radiation の効果が入っている
ので問題は同じ

簡単な double count 回避策

$$\frac{d\sigma_{pp \rightarrow W + \text{jet} + X}(s)}{d\Phi_j} = \sum_{a,b,c} \int_0^1 dx_1 \int_0^1 dx_2 f_{a/p}(x_1, \mu_F^2) f_{b/p}(x_2, \mu_F^2) \delta(\hat{s} - x_1 x_2 s) \frac{d\hat{\sigma}_{ab \rightarrow Wc}(\hat{s})}{d\hat{\Phi}_c}$$



Factorization scale

PDF はこの energy scale まで parton radiation の効果を足し上げる
i.e., $Q^2 < \mu_F^2$

ME

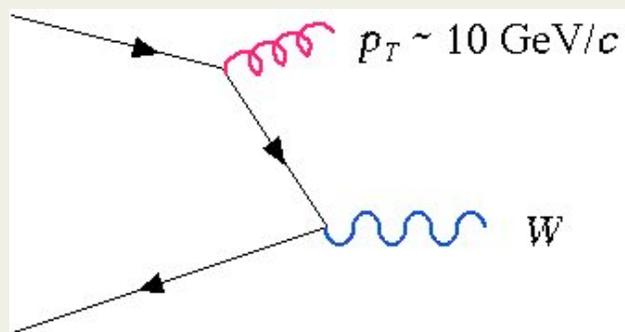
Parton shower も基本的に同じ

PS energy scale (μ_{PS}); *i.e.*, $Q^2 < \mu_{PS}^2$

μ_F^2 or $\mu_{PS}^2 < Q_{ME}^2$ とすれば double count は回避できる

Q_{ME}^2 : 摂動計算部分の parton (jet) radiation の Q^2

しかし、



$$p_T(\text{jet})^2 \ll m_W^2$$

このような process の摂動計算は信頼性が無い

higher order (multi-jet) の寄与が大きい

i.e., PS の方が信頼性の高い評価ができる

上記 process の ME は $p_T \rightarrow 0$ で発散するが、multi-jet 効果で抑制されて有限に成る (Sudakov suppression)

逆に $\mu_F, \mu_{PS} = m_W$ として、 $Q_{ME} > m_W$ と制限すれば？ (low- p_T jet は PS に任せる)

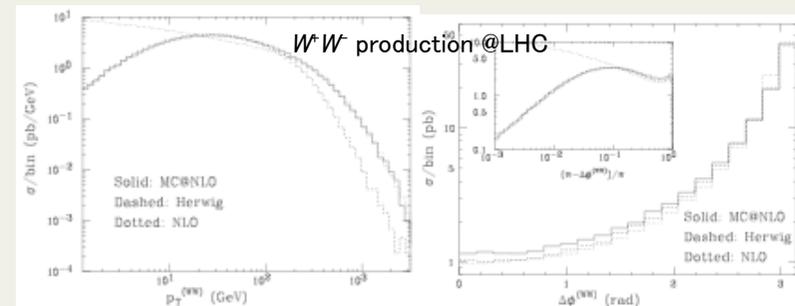
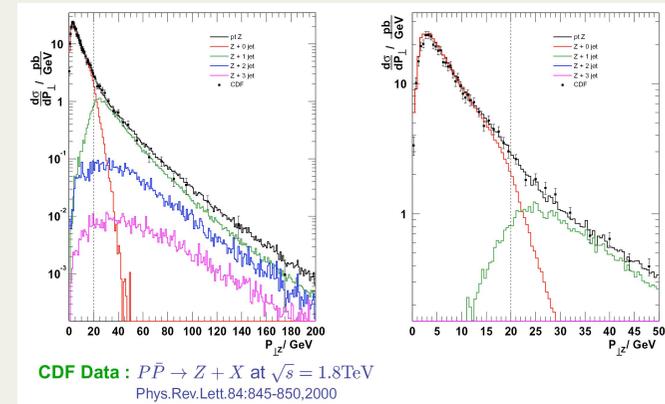
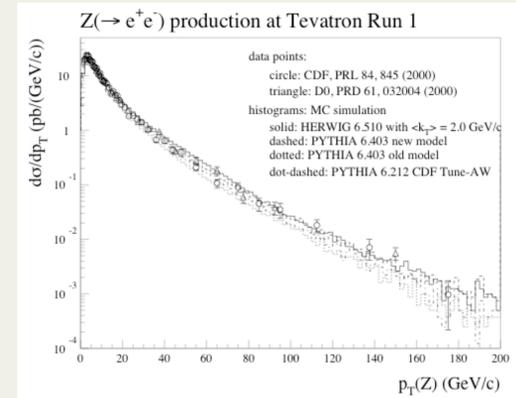
$p_T \sim m_W$ で PS/PDF の collinear 近似の精度が悪い \rightarrow mismatch

low p_T では PS に、high p_T では ME に一致する方法は無い？

解決策

- Leading Order (LO) generator
 - PYTHIA/HERWIG の **ME correction**
 - PS で非常に hard な jet まで生成し、最も hard な jet の生成確率が 1-jet ME に一致する様に補正
 - Multi-jet event に対する **CKKW 法**
 - 個々の event を clustering 手法を用いて PS の描像に対応付け、PS の手法に習って Sudakov form factor と coupling の値を評価 → **suppression**
 - **MLM 処方**
 - CKKW に似ているが、PS picture への対応付けではなく、ME-jet (parton) と PS 適用後に再構成された jet との matching で **suppression** を評価
- Next-to-Leading Order (NLO) generator
 - **MC@NLO**
 - ME correction と同様に 0-jet event に非常に hard な領域まで PS を適用し、その leading order の寄与を 1-jet ME から差し引く
 - **POWHEG**
 - 全て 1-jet ME から計算し、Sudakov form factor を計算して soft な jet を **suppress** する

PS を ME に合わせる (**ME correction**)
 or ME を PS に合わせる (**suppression**)
 or ME から PS 補正分を引く (**subtraction**)



我々の解決策

GR@PPA event generator

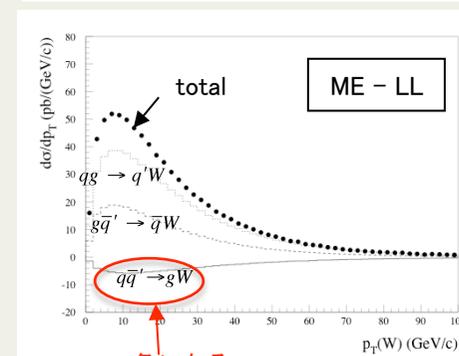
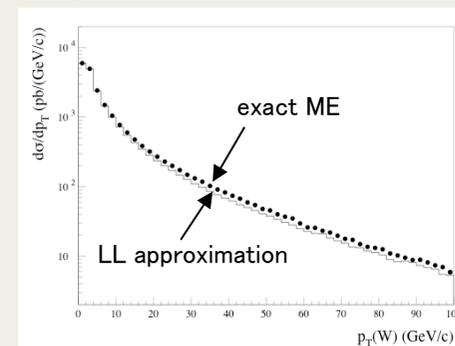
まだ、0-jet/1-jet matching のみ

- Initial-state PS は素直に $Q^2 < \mu_F^2$ の領域に適用
 - PDF との整合性
- PS の leading order の寄与を 1-jet ME から差し引く (subtraction)
 - Limited Leading-Log (LLL) subtraction
 - Subtraction は $Q^2 < \mu_F^2$ の領域のみ (limited)
 - 発散項が無くなるので、subtraction 後の cross section は有限
 - MC@NLO と同様に負の cross section が現れるが、大きな問題ではない
- Subtraction との整合性を保証するために自前の PS を作成
 - QCDPS (by 栗原)
 - 最も単純な Leading-Log (LL) PS
 - PYTHIA に含まれる angular ordering や gluon correlation などの補正はいっさい無い
→ 振る舞いが予言可能
- NLO event generator に発展可能
 - 0-jet process に virtual/soft 補正を加えれば NLO
- Final-state radiation にも拡張可能 → multi-jet process の matching

LL subtraction

W + 1 jet @LHC

$p_T > 1 \text{ GeV}/c$ (数値計算の安定性のため)



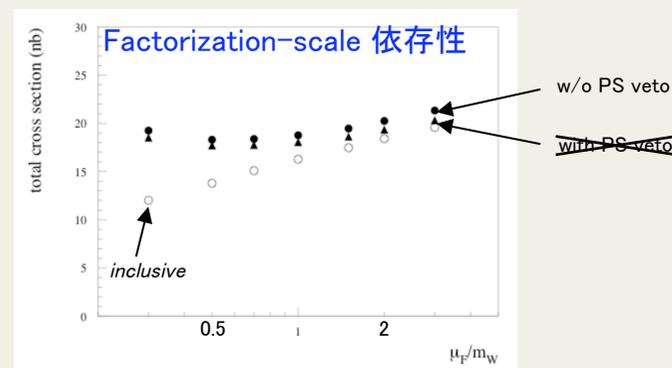
負になる

W production @LHC

“W + 0 jet” + “W + 1 jet”
with LLL subtraction

μ_F 依存性が小さい

→ good ME-PDF matching



PS branch kinematics

Subtract した LLL 成分は 0-jet event に適用される PS で recover する

Visible な領域に境界 ($Q = \mu_F$) がある

→ PS は subtract した **LLL 成分の p_T 分布を正確に再現**しなければならない

適切な PS branch model の導入が必要

PYTHIA PS が何故か soft 過ぎる (p_T が小さ過ぎる) という事が
独自 PS 開発の主な動機



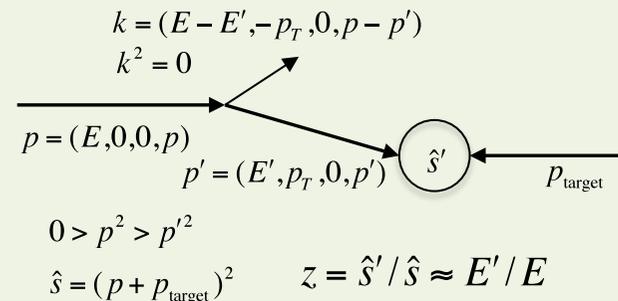
p_T -prefixed PS branch kinematics

PYTHIA old PS model に似ているが、

$p_T^2 = (1-z)Q^2$; *i.e.*, 「 $Q^2 = \text{virtuality}$ 」を放棄

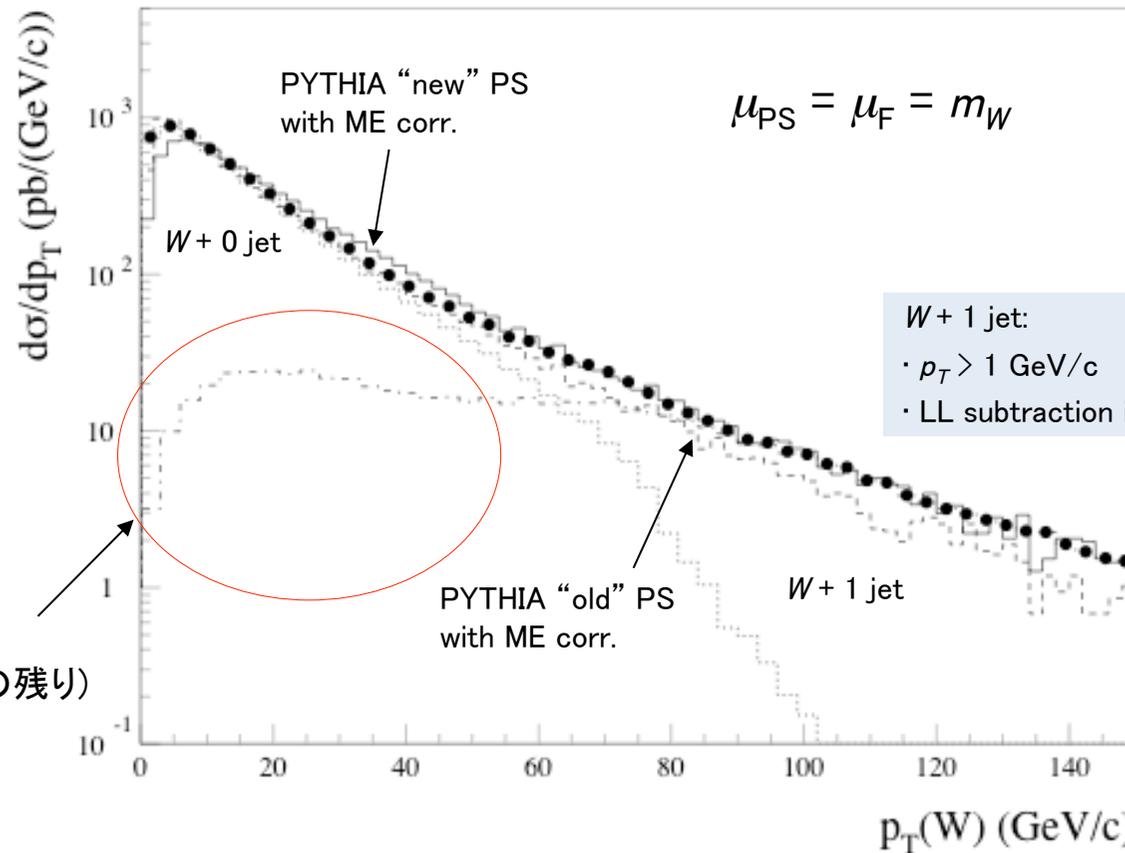
PYTHIA old PS は「 $Q^2 = -p'^2$ 」を仮定して、
energy/momentum 保存から p_T を求める

PS は Q^2 と z を与える



W production @LHC

ここでは、まだ、Hadronization/decay
などの soft な効果は simulate されて
いない



Non-collinear 成分
(LLL subtraction の残り)

W mass 付近 (μ_F) でスムーズに結合される

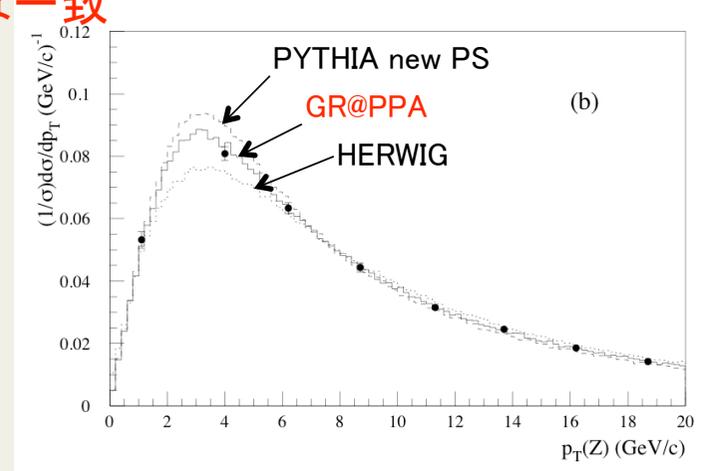
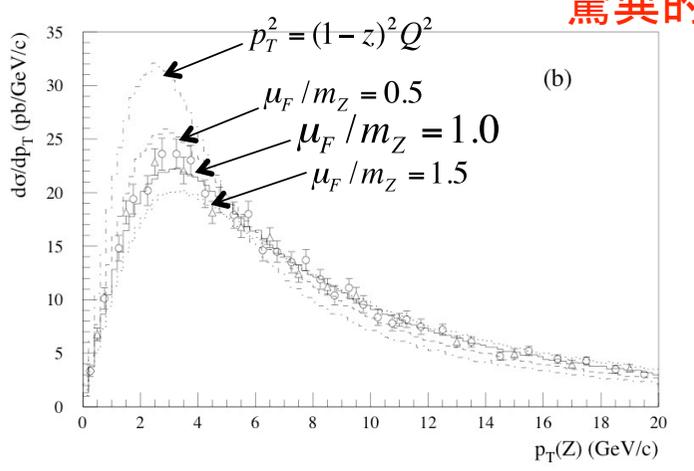
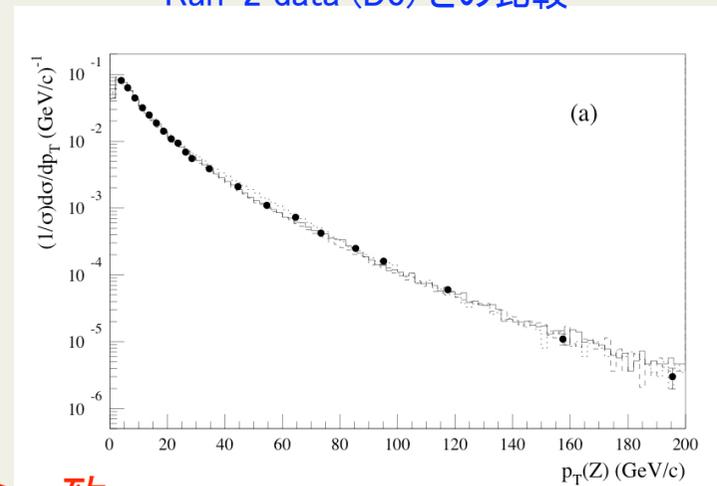
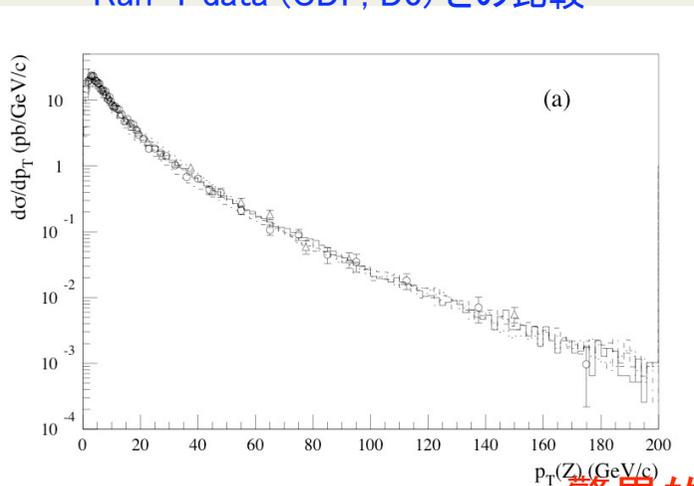
μ_F 依存性も小さい

Z production @Tevatron

GR@PPA: GR@PPA 2.8-dev2 + PYTHIA 6.419; 完全な hadron level までの simulation

Run-1 data (CDF, D0) との比較

Run-2 data (D0) との比較



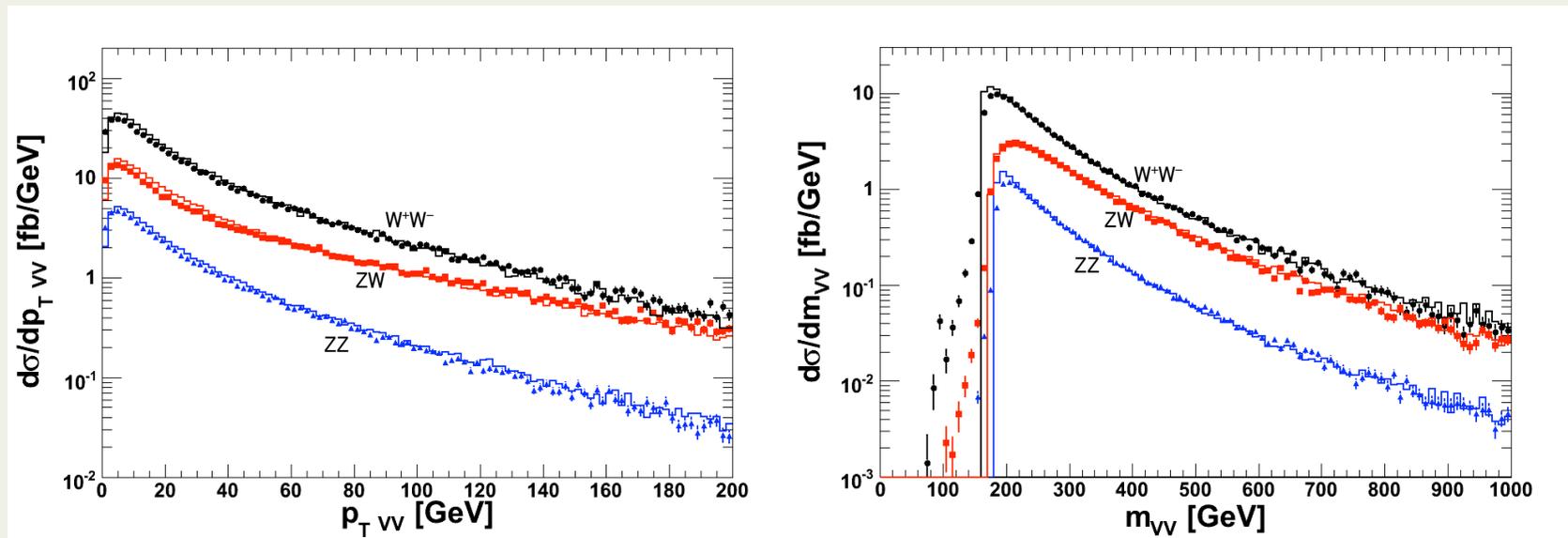
驚異的な一致

どちらも shape のみの比較: 積分値が同じに成る様に normalize

Di-boson 生成 @LHC

GR@PPA v.s. MC@NLO

Plots: GR@PPA 2.8-dev5 + PYTHIA 6.419
Solid lines : MC@NLO3.31+Herwig6.510.3+Jimmy4.31.3



Reasonable な一致を示す

GR@PPA はまだ NLO ではない (virtual/soft correction が入っていない)

MC@NLO には W/Z の decay width が入っていない

まとめ

- Hadron collision 用 event generator では、parton (jet) radiation の double count を回避する工夫が必要 → **ME-PS matching**
 - PS を使わない積分計算でも ME-PDF matching 問題はある
 - 世の中の event generator には、既にいくつかの解決策が実装されている
- GR@PPA event generator に**独自の解決策**を実装
 - **LLL subtraction + QCDPS (p_T -prefixed PS kinematics)**
 - まだ、0 jet と 1 jet の matching のみ
 - W 生成、 Z 生成、di-boson (W^+W , WZ , ZZ) 生成に適用済
 - **Tevatron での $p_T(Z)$ spectrum を非常に良く再現する**
 - **NLO event generator 開発の重要な要素**