

NLO イベントジェネレーター 開発の現状

- NLO Working Group
- NLO とは？
- 開発の現状
- ME-PS matching (double count) 問題

尾高 茂

KEK

shigeru.odaka@kek.jp

NLO Working Group

「アトラス日本グループ」と「南建屋グループ」との共同プロジェクト

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

2000年1月より活動

– GRACE を基にした、ハドロンコライダー実験のための NLO (Next-to-leading Order) Event Generator **自動生成システム** の開発

- 常連メンバー
 - アトラス日本：尾高 (KEK)、津野 (筑波大)
 - 南建屋：藤本、栗原、石川 (KEK)、加藤 (工学院大)
- その他の南建屋グループメンバー、アトラス日本グループメンバーのスタッフ・学生 (筑波大、東大など) も随時参加

何故 NLO ?

- **QCD には絶対値の予言能力が無い**
 - Renormalization scale (μ_R) 依存性
 - 「 $\mu_R = \text{process の typical な energy scale}$ 」に厳密な根拠は無い
 - **Higher order 補正によって scale 依存性が小さくなる**
- **NLO Event Generator の必要性は？**
 - Analytic な計算 (e.g., K factor) だけでは不十分？
 - Radiation は event topology に影響するので acceptance 評価に必要？
 - PDF/Fragmentation (or Parton Shower) で event topology に最も大きな寄与をする LL (leading-log) あるいは NLL (next-to-leading log) 補正は考慮されている
- **NLO Event Generator が有ればそれに越したことは無い (私見)**
 - 余計なことを考えなくて済む
 - 特に、複雑な event selection をしている場合

既存の hadron collision 用 NLO Event Generator

- DYRAD: jet production
 - W.T. Giele, E.W.N. Glover and D.A. Kosower, Nucl. Phys. B403 (1993) 633
- Wbb and Zbb in MCFM
 - R.K. Ellis and S. Veseli, Phys. Rev. D 60, 011501 (1999); hep-ph/9810489
 - J. Campbell and R.K. Ellis, Phys. Rev. D 62, 114012 (2000); hep-ph/0006304
- DIPHOX: photon-pair production
 - T. Binoth et al., Eur. Phys. J. C 16 (2000) 311; hep-ph/9911340
- **MC@NLO**: W-pair production + HERWIG
 - S. Frixione and B. Webber, hep-ph/0204244; hep-ph/0207182

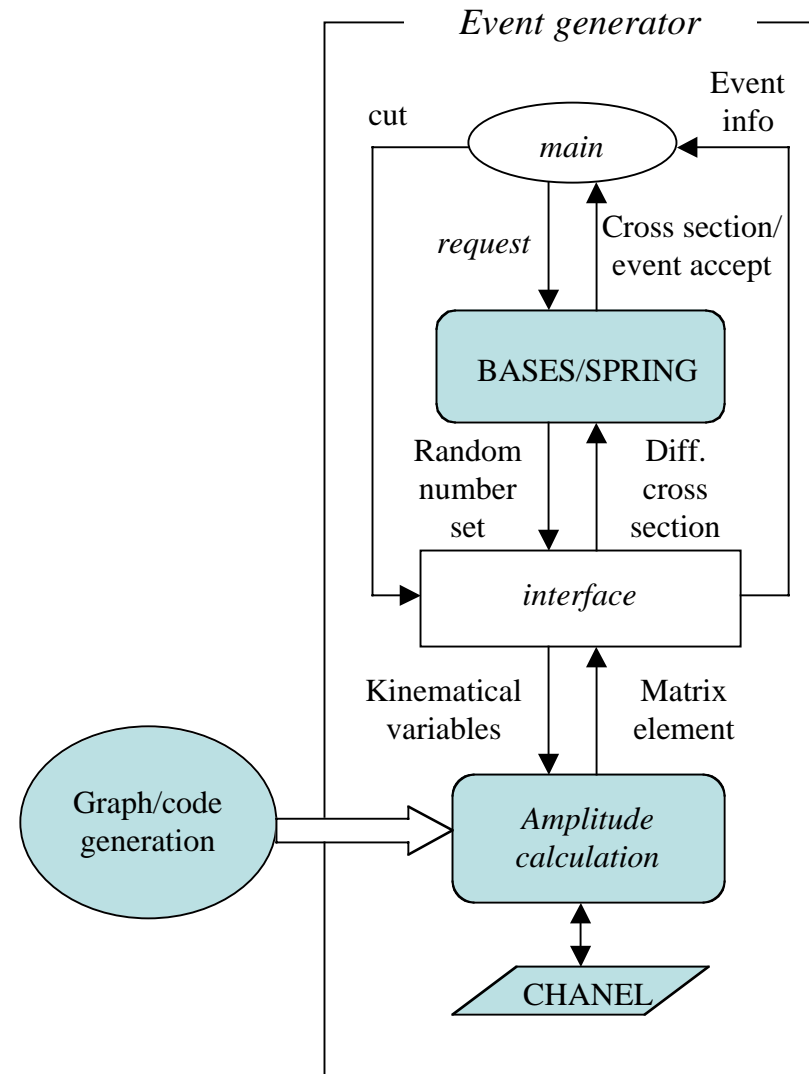
まともな物はほとんど無い
競争相手は MC@NLO くらい

GRACE

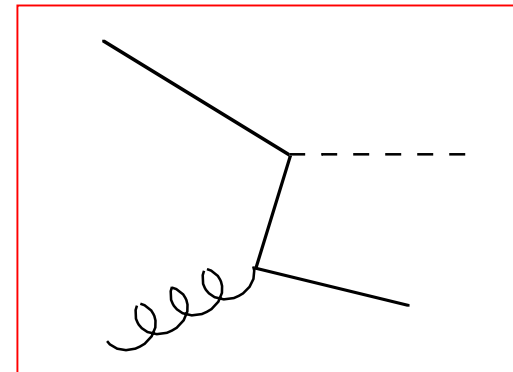
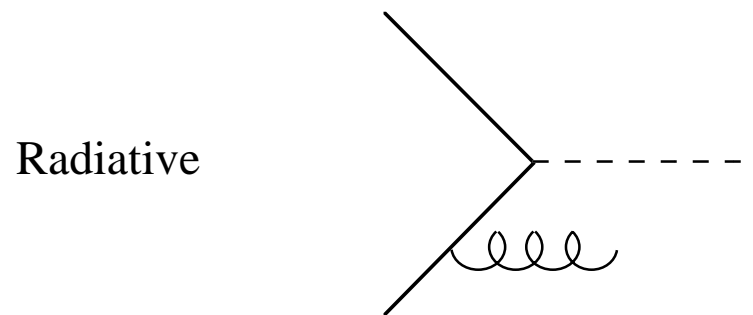
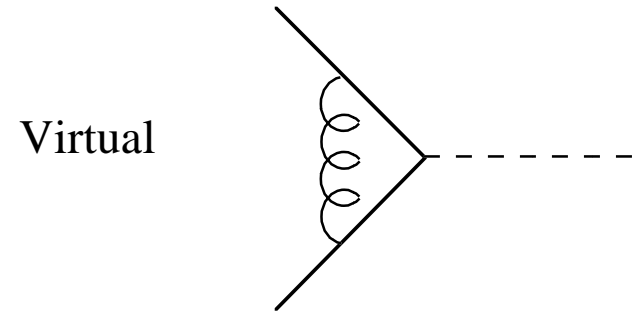
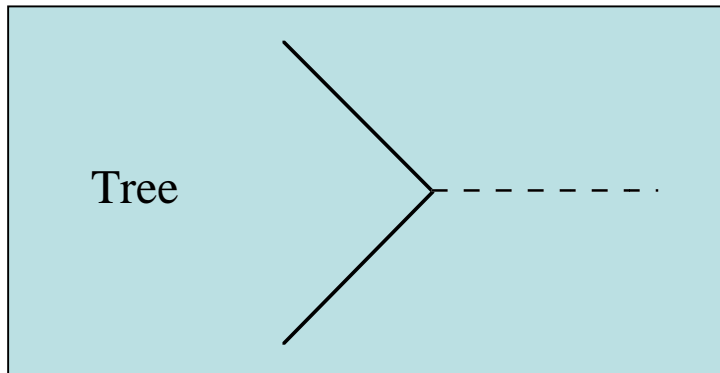
イベントジェネレータ自動生成システム

<http://minami-home.kek.jp/>

- ユーザの指定した initial state、final state に対して全ての可能な Feynman diagram (tree) を生成する
- 生成した diagram の amplitude を計算するための program code (Fortran) を生成する
 - Model library (CHANEL) が必要
 - SM、MSSM は有る
 - EW の NLO も有る
- 汎用積分・イベント生成プログラム BASES/SPRING を含む
 - BASES/SPRING の生成する乱数から amplitude 計算に必要な運動量などの kinematical variable への変換式 (“kinematics”)、matrix element から differential cross section への変換式などの interface はユーザが作る (tool はいろいろ用意されている)
- 問題点
 - Variable initial state (PDF) に対応していない
 - Multi process に対応していない



NLO (QCD) 補正 (簡単な例)



これも same order

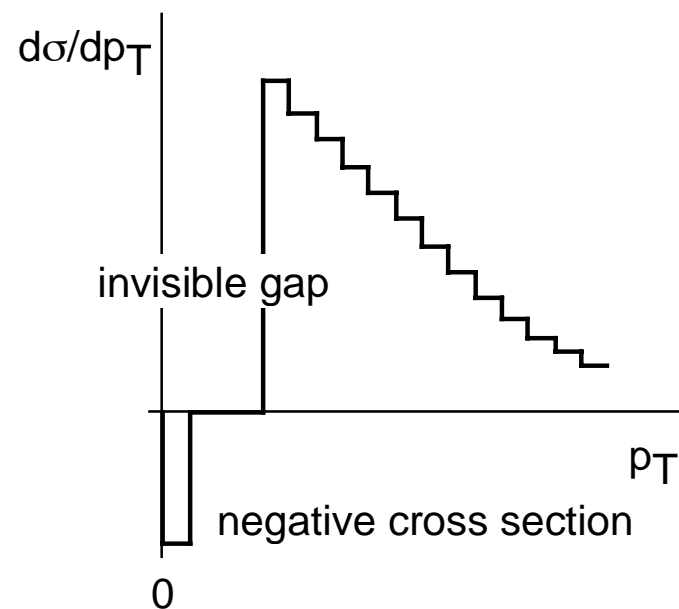
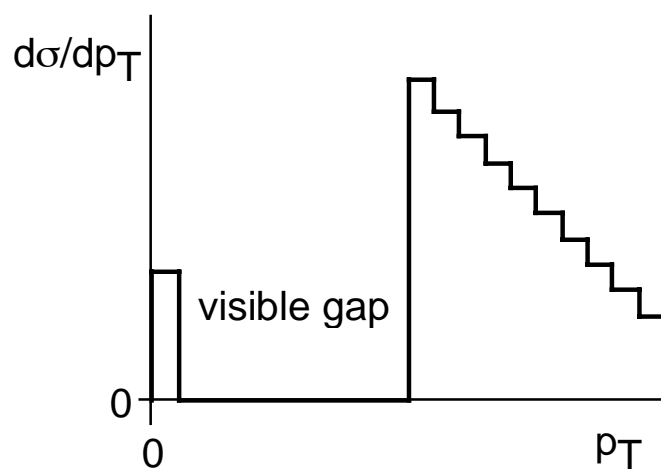
$$|M_{\text{NLO}}|^2 = |M_{\text{Tree}}|^2 + 2\text{Re}(M_{\text{Tree}}^* M_{\text{Virtual}}) + |M_{\text{Radiative}}|^2$$

Renormalization, IR cancellation, ...

Matching with PDF

Radiative process の問題 (1)

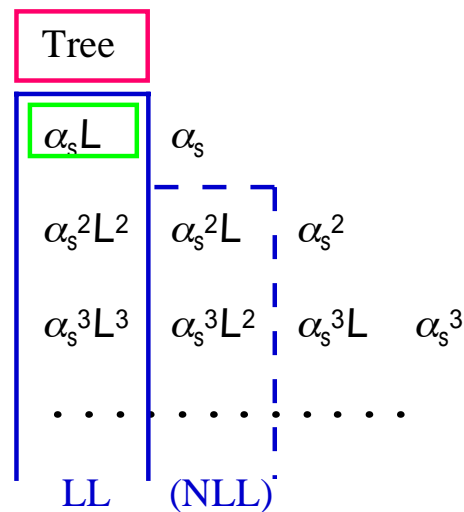
- IR cancellation の為に soft/hard の人為的な切り分けが必要
 - Cut 値が大きいと観測可能な分布に不連続が見えてしまう
 - Cut 値を小さくしすぎると non-radiative cross section が負になる (large negative 問題)
 - QED では (ほぼ) 適当な小さな cut 値を選べたが QCD は coupling が大きいため不可能



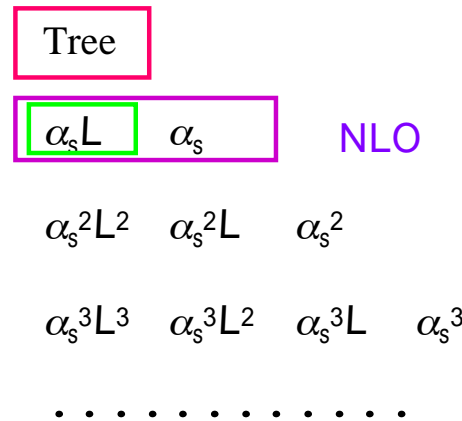
Radiative process の問題 (2)

- Double count 問題

- Radiative process の cross section は発散項 (Log term) と非発散項 (Non-log term) に分けられる
- 発散項の寄与は PDF/Fragmentation あるいは PS で考慮されている (collinear approximation での all order の足し合わせ)
- 二重に補正してはならない



PDF/Fragmentation/PS



$$L = \ln \frac{Q^2}{\Lambda^2} \approx 10$$

if $Q \approx 100 \text{ GeV}$

$$\Rightarrow \alpha_s L \approx 1$$

現状 (1)

- GRACE システムのハドロン反応 への拡張
 - ⇒ **GR@PPA** (<http://atlas.kek.jp/physics/nlo-wg/grappa.html>)
 - Initial state を決める乱数を追加 (PDF, ME-sharing に対応)
 - BASES/SPRING の multi-process 拡張
 - **PYTHIA に埋込**
 - **GR@PPA_4b** (4 b-quark production) を公式に release; Comput. Phys. Commun. に論文投稿 (S. Tsuno et al., hep-ph/0204222; KEK Preprint 2002-7 → accept)
 - その他の process (LO) の event generator (津野: 筑波大) → **GR@PPA_all**
- CHANEL ライブラリの **QCD NLO (one-loop)** への拡張
 - ⇒ **3-point function** は組み込み済み
 - 4-point (box) 以上の計算結果も ready → 組み込み作業中

現状 (2)

- Large negative 問題と double count 問題
 - ⇒ Modified LL-subtraction 法 (Y. Kurihara, hep-ph/0207214)
 - Log term の寄与を数値的に ME から差し引く
 - 差し引いた分は Non-radiative part へ; radiation は PS で simulate
→ IR cancellation も問題ない
- 残りの小さな負の cross section の取り扱い
 - ⇒ BASES/SPRING の拡張 (event weight = ± 1)
Event weight = -1 の確率は非常に小さい
- NLL parton shower(NLL-jet) の開発
 - X-deterministic forward evolution 法 (Y. Kurihara, hep-ph/0207214)
 - NLL 分岐関数の整備終了 (H. Tanaka, RUP-01-12; T. Sugiura, Prog. Theor. Phys. 107, 1163 (2002); hep-ph/0205275)暫定的な coding と evolution の test OK

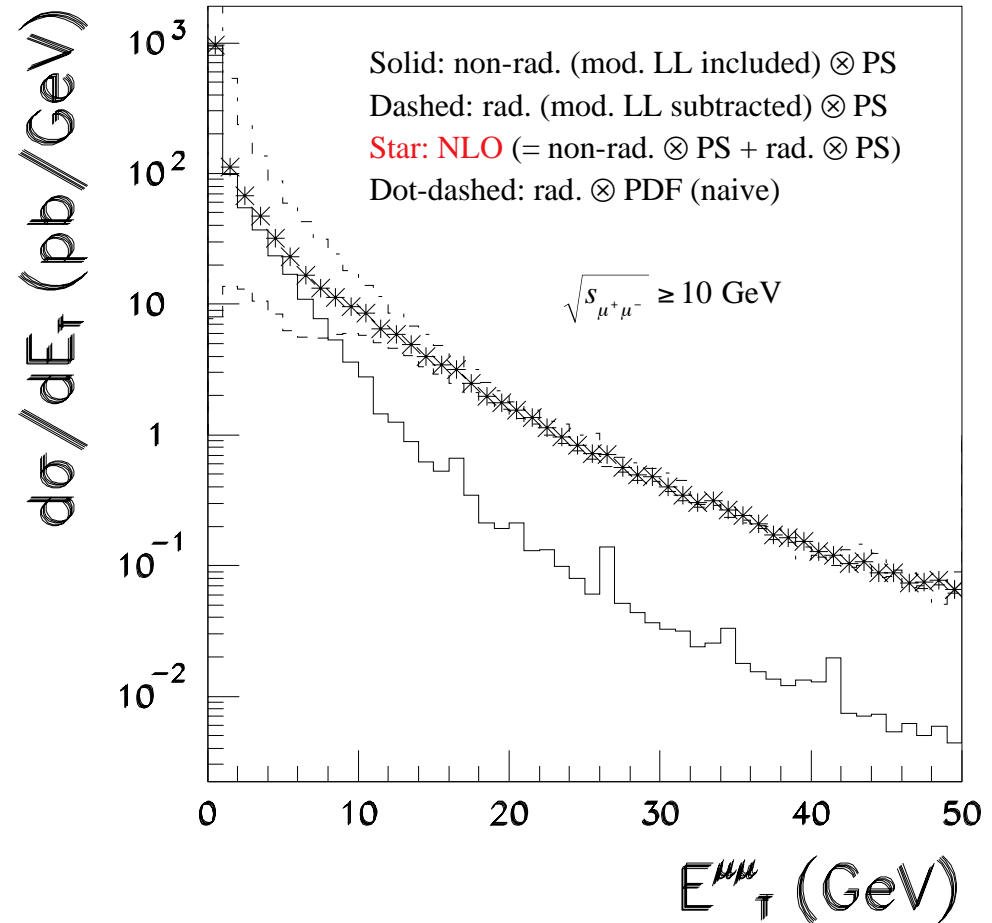
道具立てはほぼ整った

⇒ 一番簡単な Drell-Yan でテスト

NLO Drell-Yan

QED only

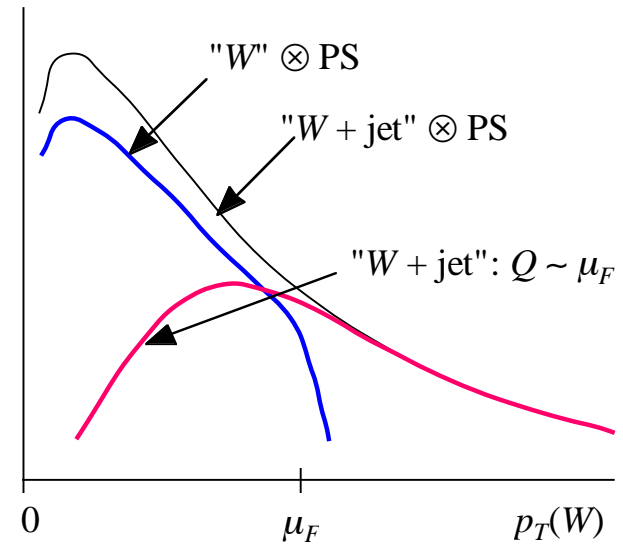
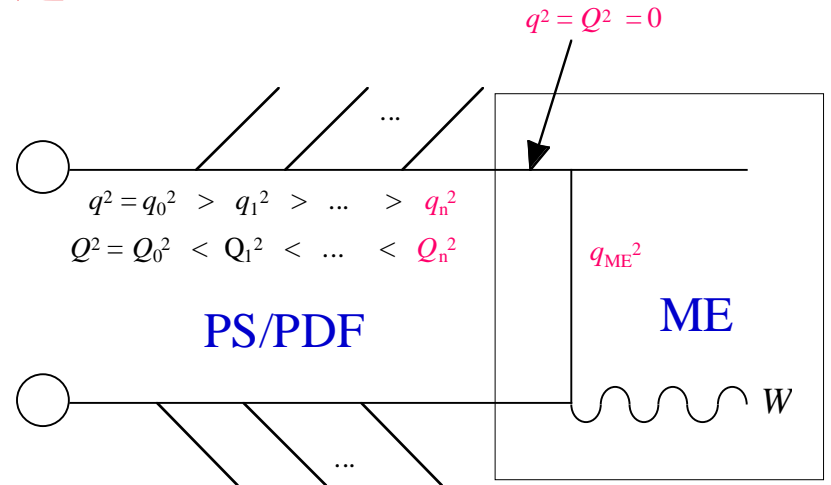
- アイデアのテストとデモンストレーション
 - Kurihara et al., hep/ph-0212216
 - GRACE の枠組みでの NLO 計算とイベントジェネレーション
 - Modified LL-subtraction
 - X-deterministic forward evolution LL-PS
- 結果
 - PS が dominate している small E_T 領域 から ME が dominate している large E_T 領域へのスムーズな移行が実現
- 課題
 - GR@PPA 化
 - 高次の不連続



ME-PS matching

double count 問題

- 実はかなり一般的な問題
- 以下の場合に深刻
 - ME の final state に colored parton(s) がある
 - $E_T(\text{jet}) < \mu_F$
- 例
 - NLO, $W/Z + \text{jet}(s)$, t -pair + jet(s), $H + \text{jet}(s)$
- 問題点
 - 少なくとも LL 近似では $Q_n^2 < Q_{\text{ME}}^2$ のはず;
i.e., small- p_T jet は抑制される
 - ところが、ME は on-shell で計算される; i.e.,
 Q_{ME}^2 はいくらでも小さくなれる
 - 結果的に small- p_T jet を二重に評価している
ことになる (double count)
- Final state でも同様のことが起きる



解決策

- Tevatron で真剣に議論されている
 - “MC Tuning WG”
 - 次回 meeting は 1/14 (今日) at Durham (England)
- 様々な解決策が提案されている
 1. ME から差し引く
 - Numerical LL-subtraction (Y. Kurihara, hep-ph/0207214)
 - MC@NLO (S. Frixione and B. Webber, hep-ph/0204244)
 2. PS から差し引く
 - P_T -rejection (Y. Kurihara, hep-ph/0207214): $p_T(\text{PS}) > p_T(\text{ME})$ なら reject
 - Jet-matching (M. Mangano, 前回の MC Tuning WG meeting での talk): ME の parton と jet の matching を要求
 3. ME で multi-jet を生成して PS への依存を小さくする
 - S. Mrenna, 前回の MC Tuning WG meeting での talk
 4. ME の計算を考慮して PS を補正
 - HERWIG, PYTHIA の Higgs production など
 5. Phase space での切り分け
 - 不連続を避けられない

理論的にクリアでしかも現実的な方法は？

まとめ

- **NLO WG** は 2000 年 1 月より活動
 - 毎週水曜日午後 1 時にミーティング、参加歓迎
 - ミーティングに参加するだけでも、少なくとも「耳年増」に成れる
→ 特に、これから Tevatron/LHC をやりたい学生
- GRACE を基にした hadron collider 用 **NLO Event Generator 自動生成システム**の開発
- 道具立ては整ってきた
 - **GR@PPA**, One-loop 補正ライブラリ, **Modified LL-subtraction**, x-deterministic forward evolution, NLL-jet, etc.
 - Drell-Yan でテスト → 良好な結果 ; 詳細は今後
- **ME-PS matching 問題 (double count 問題)** はまだ決定的な解決策が無い → 議論が盛り上がっている
- 2003 年は変革の年? 新しい動きが始まりそう
 - 5 月 27 日 - 6 月 6 日 : Les Houches Workshop
 - 7 月 2 日 - 8 月 5 日 : LHC MC Workshop at CERN