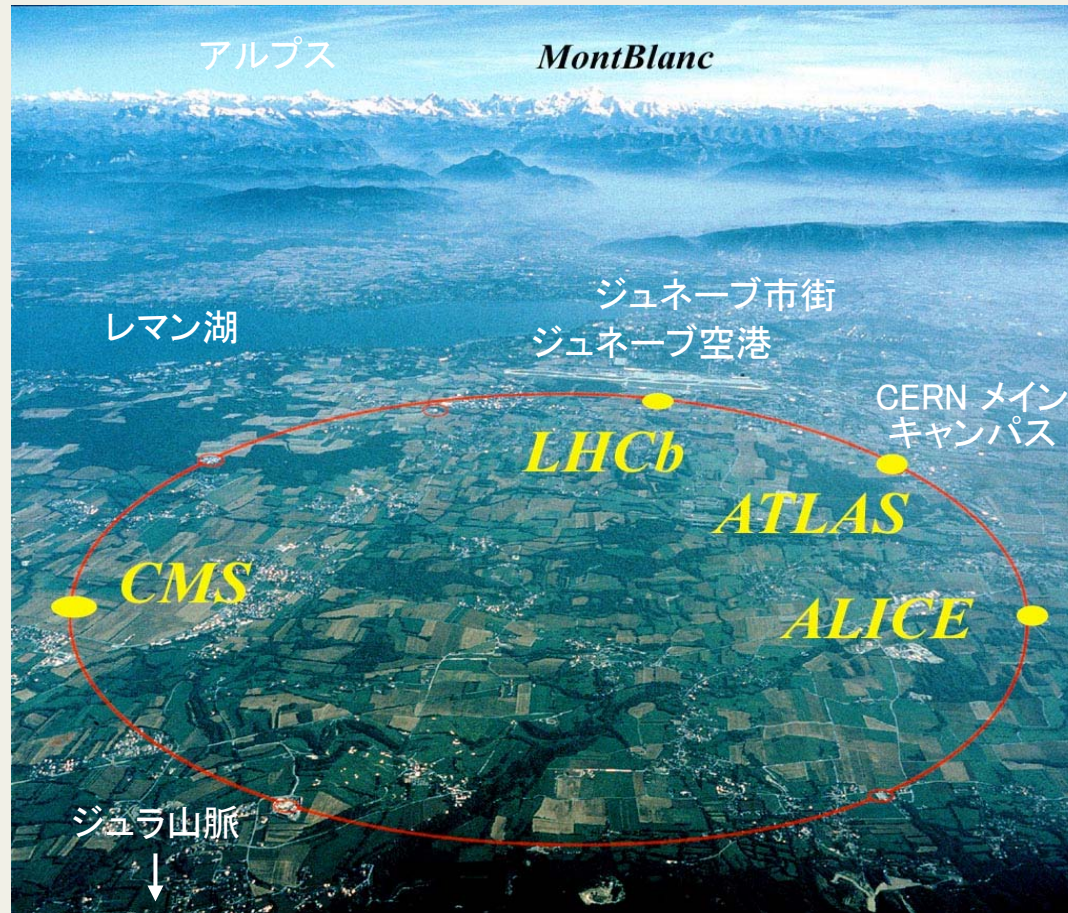


# LHC のための Event Generator

尾高 茂  
KEK

# LHC の簡単な紹介

# LHC (Large Hadron Collider)



ジュラ山脈からジュネーブ方面 (南東) を望む

CERN LEP トンネルを再利用

地下 100 m、周長 27 km

超伝導電磁石を用いた陽子陽子  
衝突型加速器に改造

ビームエネルギー 7 TeV

衝突エネルギー 14 TeV

参考: 山の手線の周長が約 32 km

1984: 検討ワーキング・グループ設置

1994: CERN 理事会で計画承認

1995: 技術報告書提出・承認

1998: 実験室等の掘削開始

2000: LEP 実験終了

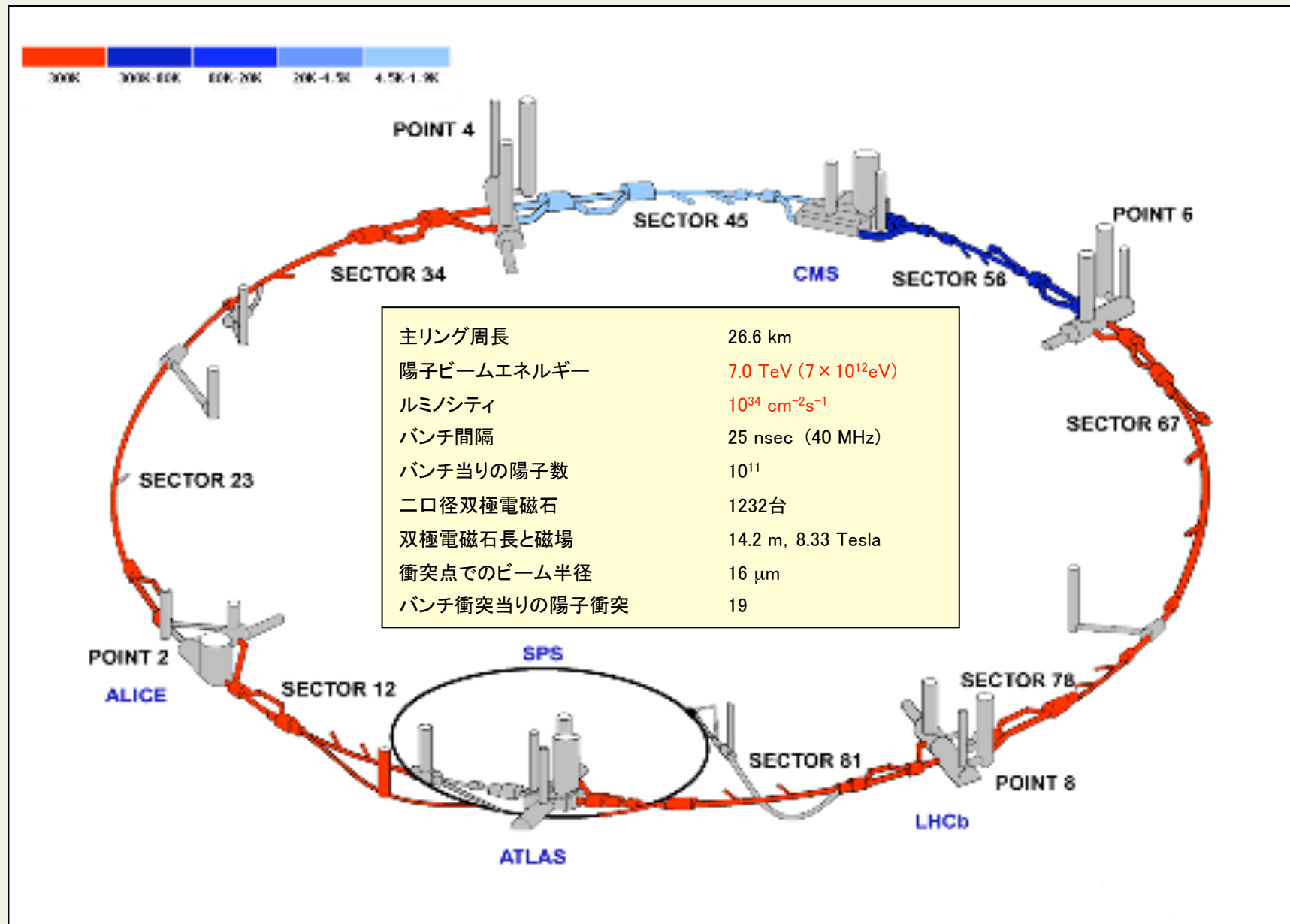
2002: LEP 撤去完了

2003: 掘削作業終了

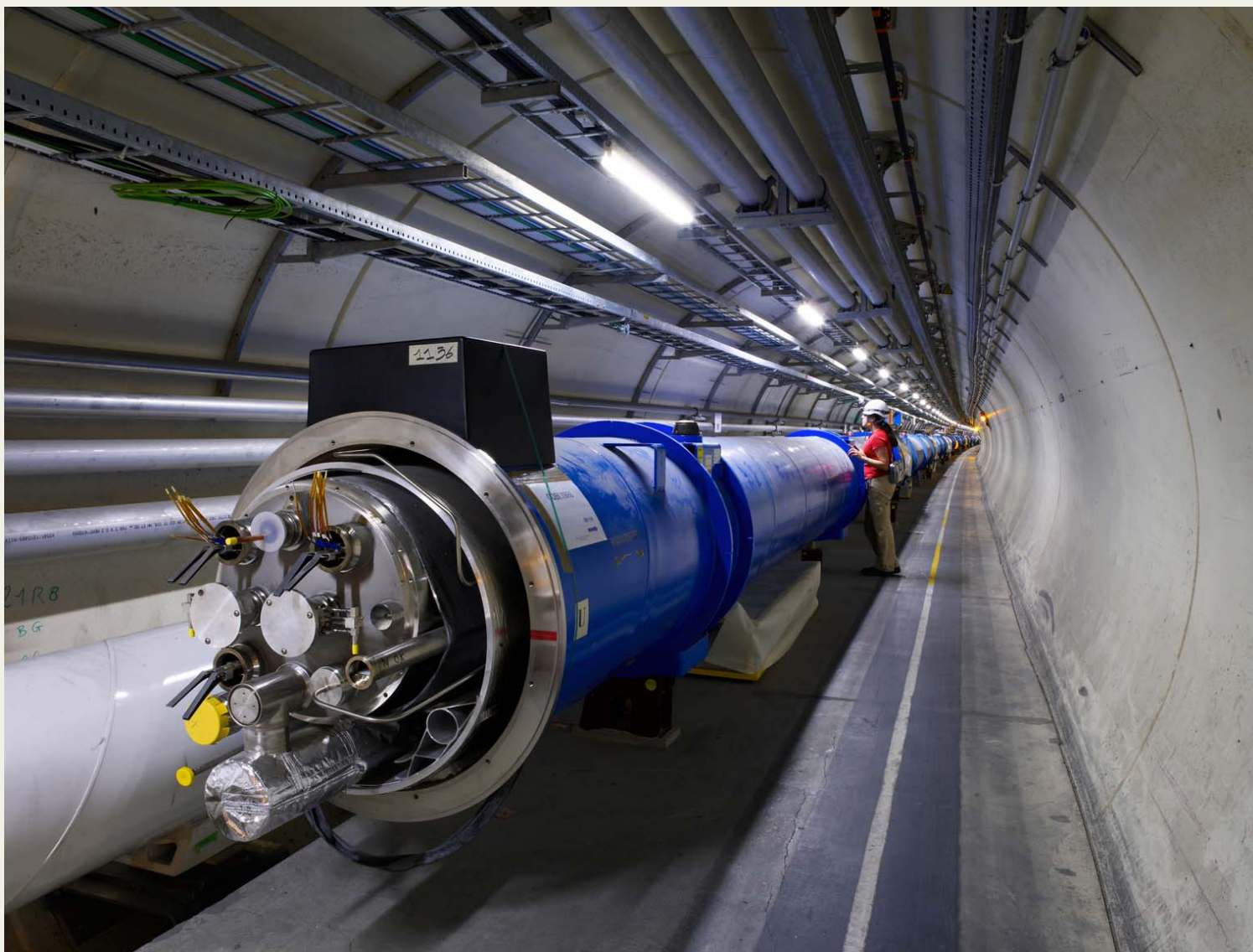
2005: 超伝導磁石設置開始

2007: 超伝導磁石設置完了

2008: LHC 完成







## 日本による LHC 加速器協力

ビーム衝突点では、陽子ビームを10 ミクロンの太さに絞りこむ。このためにレンズの役割をする**超伝導4極マグネット**が必要で日本と米国とが設計・製造した。

KEK が設計、東芝が製造

磁場勾配 = 215 T/m

長さ 5 m、口径 70 mm

2005 年に 18 台の生産と検査を完了

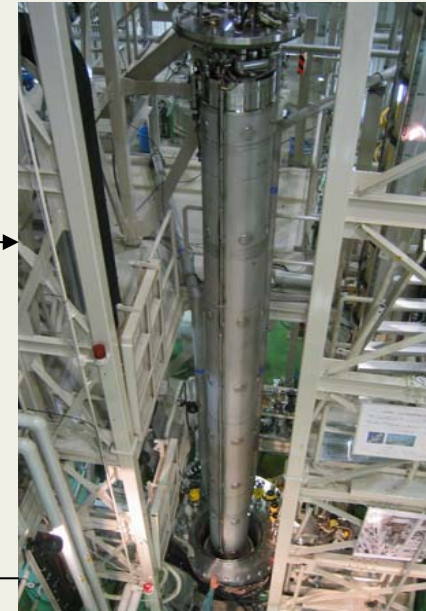


LHC トンネル内に設置された超伝導4極マグネット

2007 年 3 月、圧力テスト中に  
事故: 米国担当部分



超伝導ケーブルを巻く  
作業(東芝京浜工場)



コイルを検査するために垂直型  
クライオスタットに入れる(KEK)

その他、超伝導ケーブルの製造(古河電気工業)や、電磁石用特殊鋼(新日鉄、川鉄)、極低温ヘリウム冷却設備(IHI)など、日本信託基金を財源として調達した。日本企業によるLHC建設への貢献とその高い技術が評価を受けている。





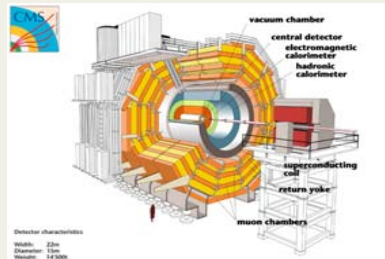
1995年6月23日 与謝野文部大臣がCERN理事会に出席し日本によるLHC建設協力を表明した。非加盟国の中では日本が最初であった。その後も日本は資金協力を行い、総計138.5億円の建設協力を行った。

<http://www.kek.jp/newskek/2008/sepoc/LHCfirstbeam/photo5.html>

# 実験装置

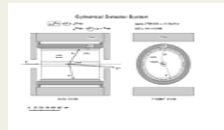
Higgs 粒子探索を主要な目的の一つとするのは  
ATLAS と CMS

## CMS pp衝突実験



## TOTEM

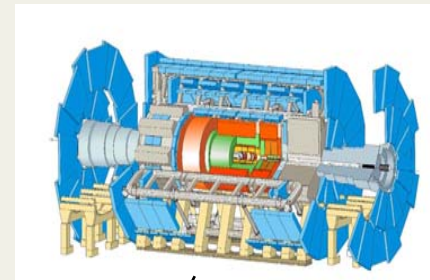
全断面積測定



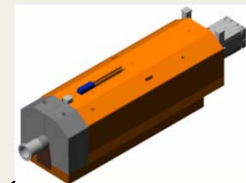
## LHCb Bの物理実験



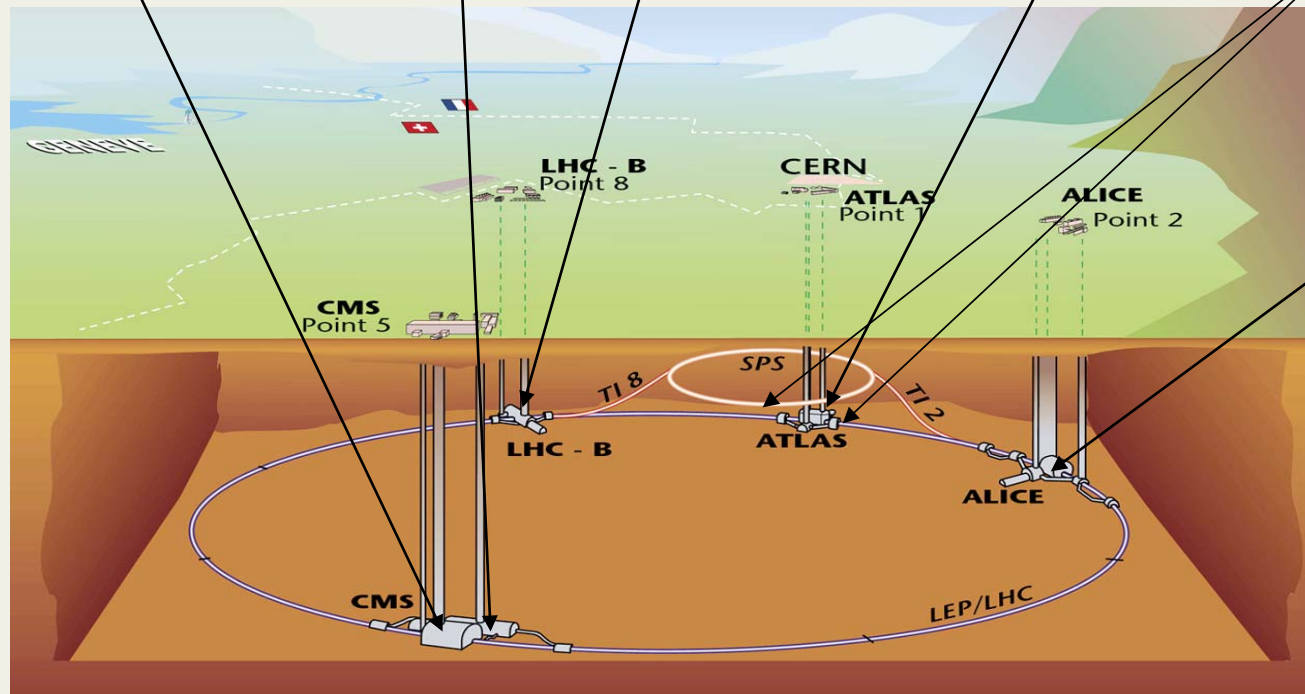
## ATLAS pp衝突実験



## LHCf 超前方生成



## ALICE 重イオン衝突実験



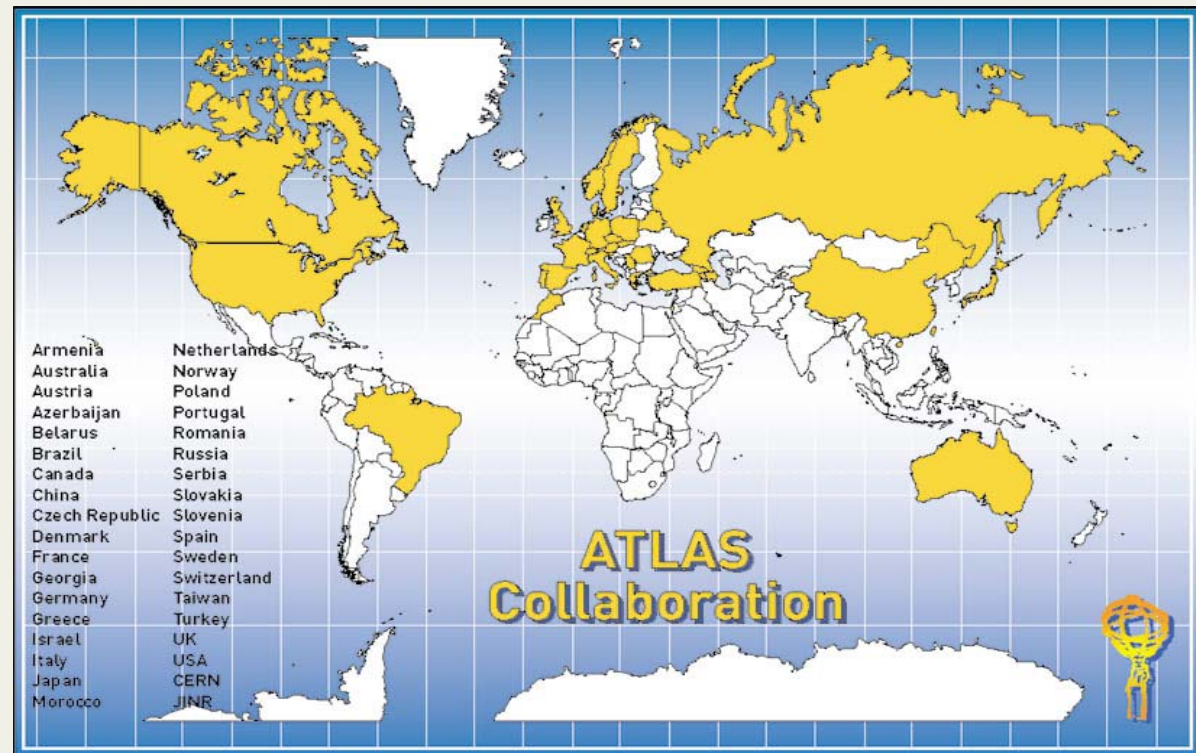


## アトラス国際 共同実験

アトラス実験の国際チームは、34カ国から151の大学・研究所が参加し、研究者約1500名からなるグループで構成される。

(注: これは 2006 年の統計なので現在はもっと多い)

1994年にグループが発足し1996年から10年以上かけて装置の設計・建設を行なってきた。



### 日本の研究機関は ATLAS 実験に参加

KEK, 筑波大学, 東京大学(ICEPP), 首都大学東京, 信州大学, 名古屋大学, 立命館大学, 京都大学, 京都教育大学, 大阪大学, 神戸大学, 鳴門教育大学, 岡山大学, 広島大学, 広島工業大学, 長崎総合科学大学

他の実験に参加している機関も若干あるがここでは割愛

CMS には参加していない

## 超伝導ソレノイド電磁石



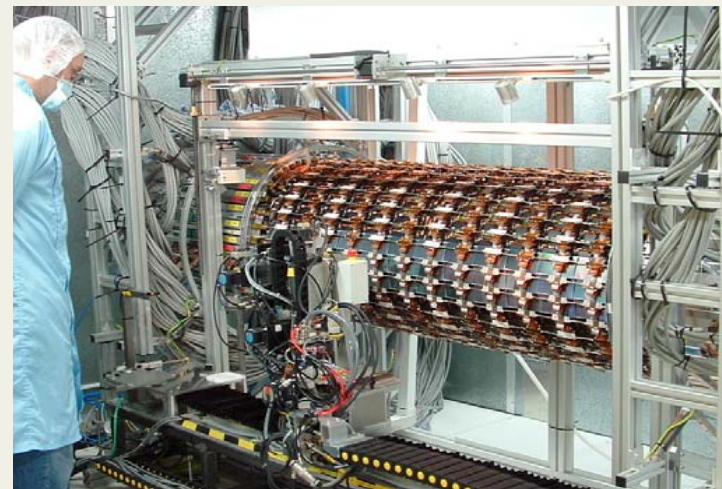
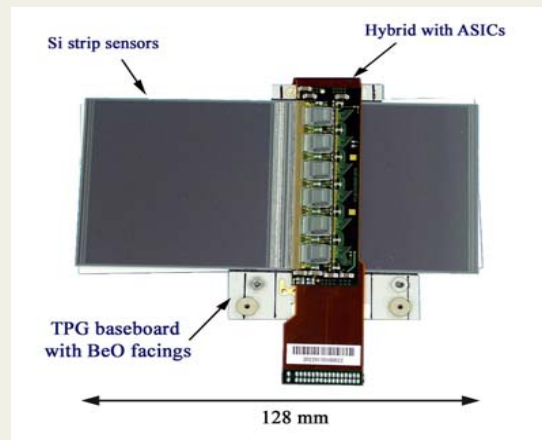
KEK で設計、東芝で制作



CERN へ搬入 (2001 年 9 月)

## シリコン・ストリップ検出器

KEK で制作



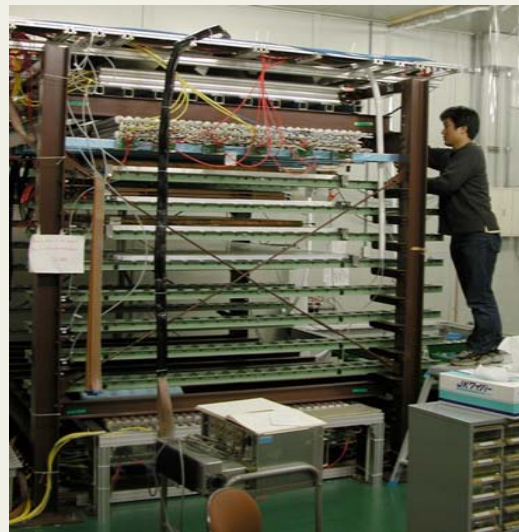
英オックス  
フォード大で  
の組立



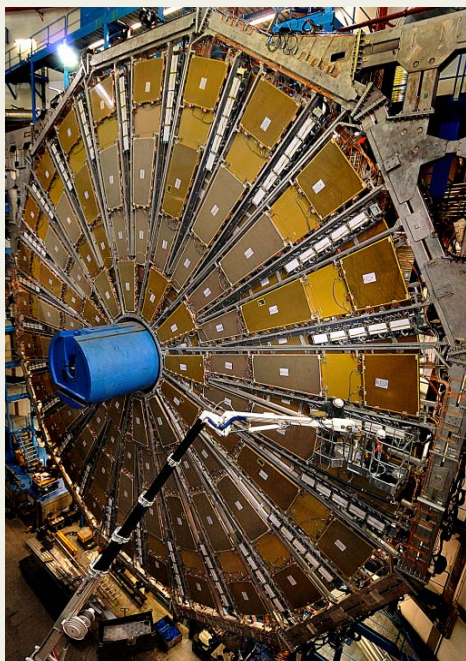
## Thin Gap Chamber (TGC)



KEK でのチェンバー制作



神戸大での検査



CERN での組立

実験ホール内での  
最終組立



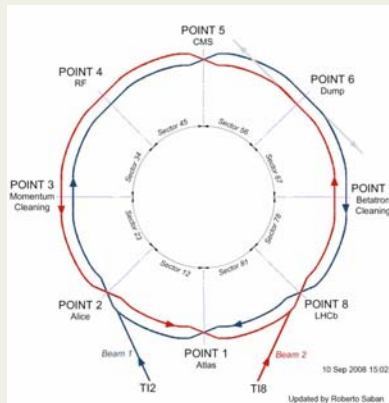


## 最初のビーム周回

2008 年 9 月 10 日

インターネット (Webcast) で全世界に同時中継

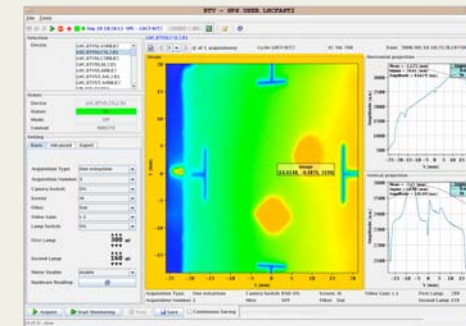
通常の Webcast page はアクセス集中でダウン



テスト開始 50 分で beam 1 (時計回り) の周回に成功

入射エネルギー 450 GeV

数時間後に beam 2 (反時計回り) の周回も成功



最初の周回のビームモニタ: 軌道がずれてしまった為に二つのスポットが見える



LHC コントロールルームは大混雑



KEK セミナーホールでも中継

## ヘリウム漏れ事故

2008 年 9 月 19 日

入射エネルギーでビーム衝突テストを行おうとしているところだった

### 暫定報告 (10 月 16 日)

セクター 3-4 の励磁テスト中に約 9 kA で抵抗電圧発生、1 秒以内に 1 V に増加 (9 kW !)

真空容器内、さらにトンネル内への大量のヘリウム放出

真空容器内圧力の急上昇によって真空隔壁付近が機械的に破損

安全装置が作動してセクター 3-4 全域の電力遮断

セクター 3-4 の 15 トンのヘリウムの内 6 トンが失われた

原因はサブセクター間の超伝導線接合部の不良

電気アークが発生して近くのヘリウム配管を破壊

広範囲なビームパイプ内の汚染、断熱シートの破損があり得る

安全装置は正常に動作したが容量不足などの問題あり

サブセクター: 真空容器の単位、二つのセルを含む

セル: 冷却系の単位、四重極(H) + 3×双極 + 四重極(V) + 3×双極、全長 107 m

室温に戻した後、ダメージが予想される部分を地上に引き上げて調査・修理

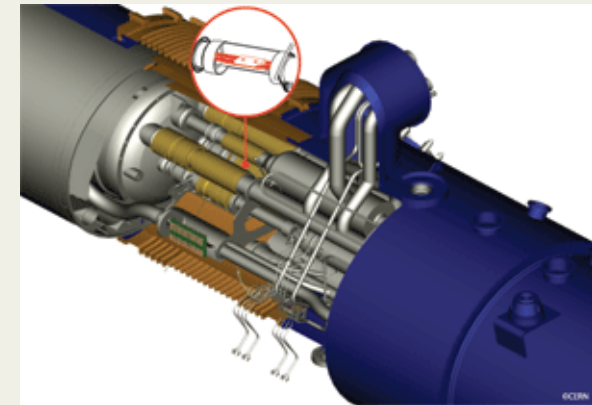
全周に渡って安全装置の強化

スペアパーツと人手は十分にある

運転再開は来年春以降 (4 月末? 7 月?)

いろいろな噂: 励磁試験の時間が取れないので、来年は 5 + 5 TeV だろう

他のセクターでも同じ様な兆候がある



写真は全く公表されていない

## LHC 完成記念式典

2008 年 10 月 21 日



メンバー国、オブザーバー国  
政府代表者が参列: 日本か  
らは山内文部科学副大臣が  
参加



最後に別枠でダルマの  
目入れ式



スイス・ロマンド・オーケストラ  
によるコンサート



# LHC の現状

修理はほぼ終了

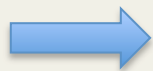
2009 年 11 月中旬に運転再開

まずは、 $3.5 + 3.5 \text{ TeV}$  の衝突を目指す

GRACE から GR@PPA へ

# Hadron collision 用 event generator

“Hadron” は quark/gluon (parton) の複合粒子  
終状態に hadron jet がある場合は、それがどの quark あるいは gluon であるかという識別も困難



実験屋が欲しいのは、例えば  $pp \rightarrow W + 2 \text{ jets} + X$  の  
event generator  
 $ug \rightarrow W^+ dg$  などではない

自動的に **parton の種類の組み合わせについての和**、可能な**運動量の組み合わせについての積分**を行ってくれる事が望ましい

$$\frac{d\sigma_{h_1 h_2 \rightarrow W + 2 \text{ jets} + X}(s)}{d\Phi_{j_1} d\Phi_{j_2}} = \sum_{a,b,c,d} \int_0^1 dx_1 \int_0^1 dx_2 f_{a/h_1}(x_1, \mu_F^2) f_{b/h_2}(x_2, \mu_F^2) \delta(\hat{s} - x_1 x_2 s) \frac{d\hat{\sigma}_{ab \rightarrow Wcd}(\hat{s})}{d\hat{\Phi}_c d\hat{\Phi}_d}$$

↑

parton の組み合わせ  
についての和

Parton Distribution Function  
(PDF) に対する積分

Hard interaction

実験屋が欲しいもの



# GRACE から GR@PPA へ

- **GR@PPA** (GRace At Proton-Proton/Anti-proton collisions)
  - GRACE system の hadron collision への拡張
  - General-purpose event generator (PYTHIA, HERWIG など) への interface
    - PS, hadronization, decay, etc. は general-purpose EG に任せる
  - Event generator package として公開
- Parton flavor/momentum 選択のための**積分変数 (乱数) の追加**
  - 足し合わせ、積分は自動的に行われる
- **Multi-process 対応**
  - 複数の process を同時に扱える
  - 自動的に event mixing

$$\frac{d\sigma_{h_1 h_2 \rightarrow W + 2 \text{ jets} + X}(s)}{d\Phi_{j_1} d\Phi_{j_2}} = \underbrace{\sum_{a,b,c,d} \int_0^1 dx_1 \int_0^1 dx_2 f_{a/h_1}(x_1, \mu_F^2) f_{b/h_2}(x_2, \mu_F^2) \delta(\hat{s} - x_1 x_2 s)}_{\text{この部分を追加}} \underbrace{\frac{d\hat{\sigma}_{ab \rightarrow Wcd}(\hat{s})}{d\hat{\Phi}_c d\hat{\Phi}_d}}_{\text{GRACE}}$$

GR@PPA

- Process reduction
  - Mass/coupling constant の変数化 → Code の短縮

# GR@PPA の歴史

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

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

- 2000 年 1 月 : NLO-WG 活動開始
- 2000 年 10 月 : ACAT Workshop (FNAL)
  - 基本構想を発表
- 2002 年 4 月 : GR@PPA\_4b 公開
  - 4 b-quarks 生成 (QCD, EW, Higgs など、tree level の全ての寄与を含む)
  - PYTHIA 6.1 への interface
  - PDF: PYTHIA built-in PDF と PDFLIB (CERNLIB) に対応
- 2004 年 2 月 : GR@PPA\_all 公開
  - 沢山の多体生成 process を追加
    - $W$ +jets (3 jets まで),  $Z$ +jets (2 jets まで),  $W^*W^*/WZ/ZZ$ , top pair
    - $W/Z$ /top は崩壊過程まで matrix element で評価; i.e., spin correlation や invariant-mass shape を正しく再現
  - LHA (Les Houches Accord) interface、LHAPDF に対応
- 2006 年 2 月 : GR@PPA 2.7 公開
  - 多体生成 process の追加、framework と process の分離、coding の改善
- 最終目標
  - NLO (Next-to-Leading Order) event generator の開発
  - GRACE を用いた NLO event generator 作成の自動化

# GR@PPA 2.76

<http://atlas.kek.jp/physics/nlo-wg/grappa.html#GRAPPA2.7>

- 2006 年 2 月公開
- 多くの多体生成 process を含む
  - $W/Z$  + jets (4 jets まで)
  - $W^+W^-/WZ/ZZ$  + jets (2 jets まで)
  - QCD jets (4 jets まで)
  - top-pair + 0/1 jet
- $W/Z$ /top の decay まで matrix element で計算されている
  - Spin correlation や invariant-mass shape が tree level で正確に再現されている
- LHA interface をサポート
  - 生成した event data を PYTHIA/HERWIG に渡せる
- PDF: LHAPDF, PDFLIB 内の任意の PDF を選択できる
  - テスト用として、default では CTEQ6L1 (built-in) を使用
- 制限事項
  - 全て Leading Order (LO)
  - ME-PS matching (後述) は考慮されていない
  - $W^+W^-/WZ/ZZ$  + jets に bug がある
  - particle の順序について PYTHIA が文句を言う

# GR@PPA 2.76 以降

人手不足 → 開発速度低下

- 複数の開発が進行中
- Initial-state ME-PS matching の実装 → GR@PPA 2.8
  - $W/Z$  生成、 $W^+W^-/WZ/ZZ$  生成
  - 独自の手法: LLL (Limited Leading-Log) subtraction
  - 自前の initial-state Parton Shower (PS) を開発
  - Final-state PS が必要
  - Top pair についても開発中 → GR@PPA 2.9 (?)
- NLO event generator
  - まずは  $W/Z$  生成 → GR@PPA 3.x
  - ほとんど完成しているが、まだ疑問点あり
  - 2.8 の完成が必須
- Di-photon 生成の event generator
  - Low-mass Higgs 生成の background
  - DIPHOX group (LAPP, Annecy) との共同研究
  - Final state の QED radiation matching

# Event Generator 概説

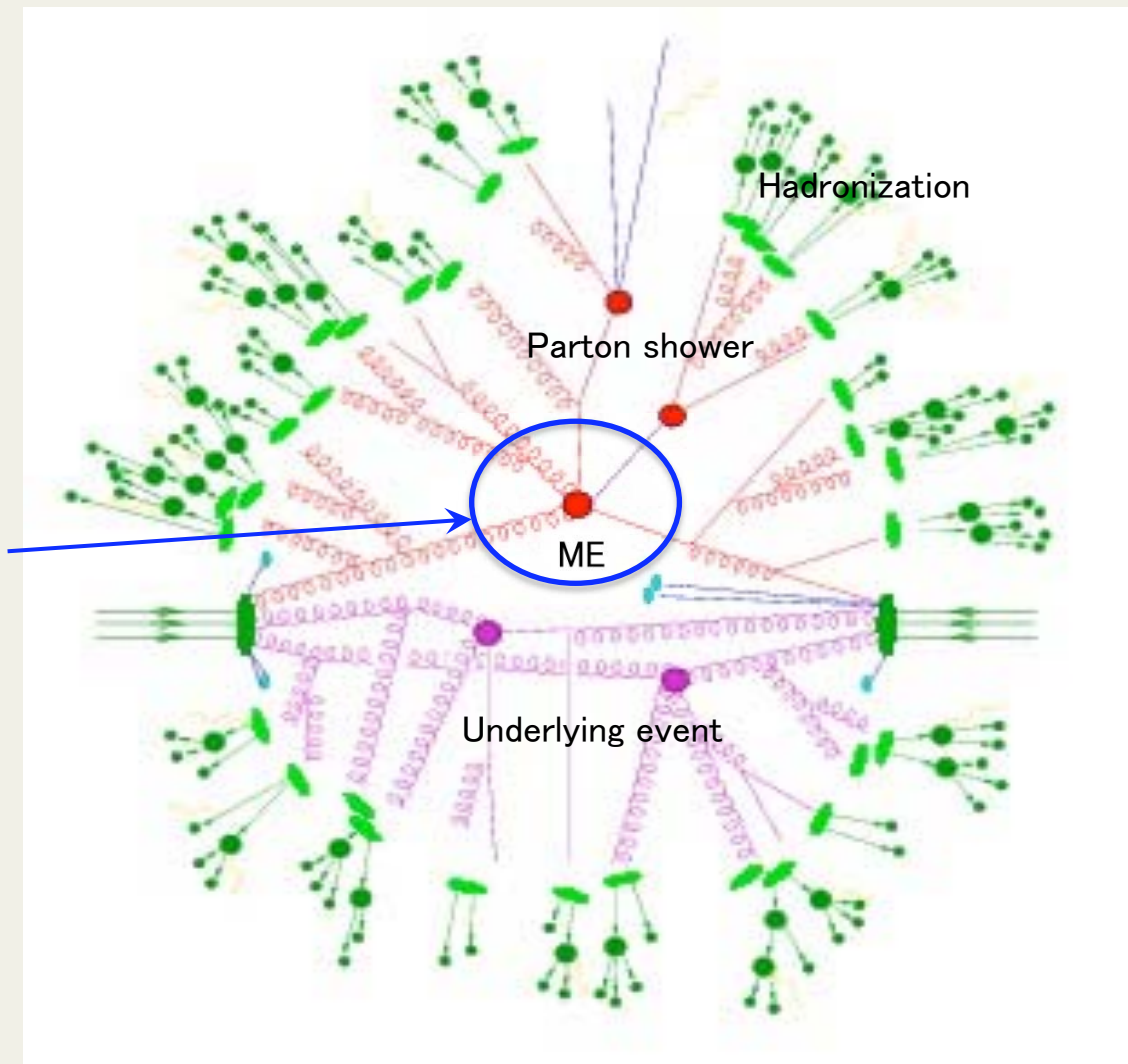


## Hadron collision のイメージ

切り分けは人為的  
整合性は自明でない

GRACE/GR@PPA の役割はここ  
摂動計算の Matrix Element (ME)  
から hard interaction の cross  
section を求める

その他の領域は他の event  
generator に任せる



## ATLAS 測定器・内部飛跡検出器のシミュレーション例

$$pp \rightarrow H + X; H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^- \text{ (黄色の線)}$$

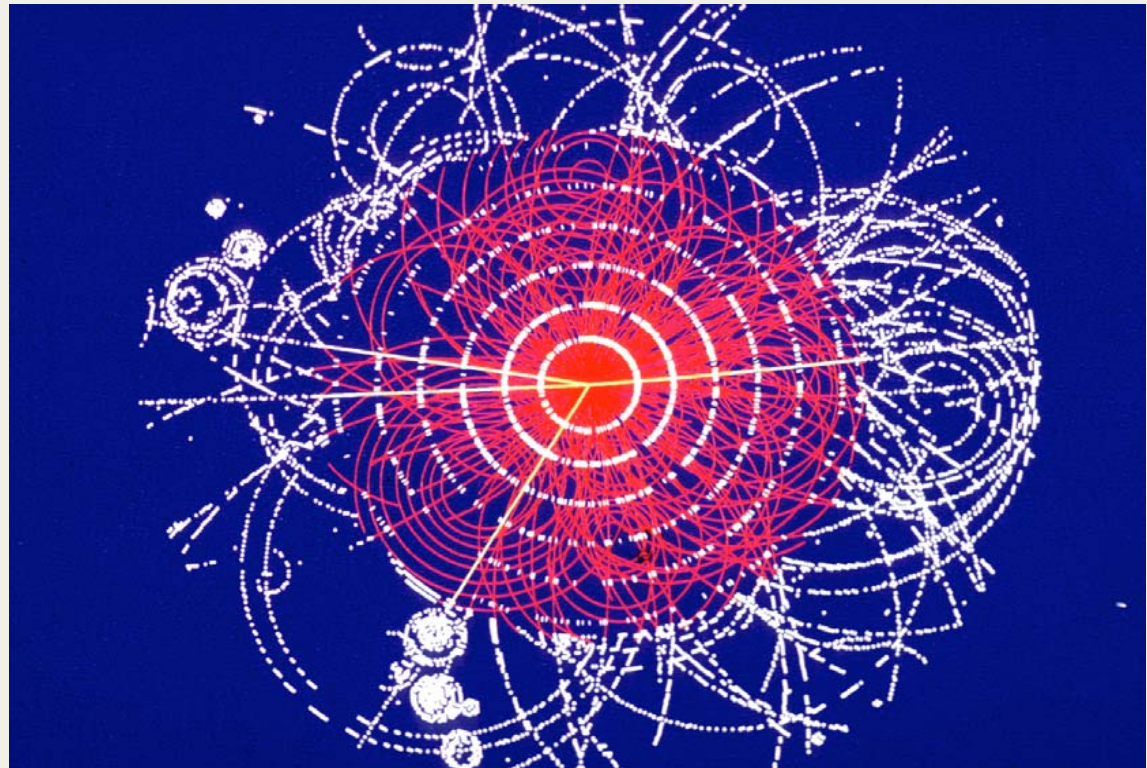
ビーム軸方向から見た測定  
データ

ソレノイド磁場の影響で粒子軌  
跡は円弧状に成っている

ここでは荷電粒子しか見えない

Hard interaction からの粒子は  
黄色い線で示した muon のみ

他は全て Parton Shower や  
Underlying Event からのゴミ



# Hadron collision 用 event generator (1)

General purpose (汎用)

- General-purpose (all-in-one) event generator
  - Parton shower (PS) や hadronization/decay の simulation が充実
  - 基本的に 2 体生成まで (ME の式が手で簡単に書ける)
    - PYTHIA の Higgs ( $\rightarrow W^*W^*$ ) 生成などの例外はある
  - Heavy particle ( $W$ ,  $Z$ , Higgs, top など) は基本的に on-shell 生成
    - 後で decay width, spin correlation などを入れる
  - 多体生成などの複雑な process は外部の generator に任せる
    - LHA interface のサポート
- Fortran 版
  - **PYTHIA**: Lund group を離れて HepForge で開発続行
    - 最新版は PYTHIA 6.4xx
  - **HERWIG**: 開発終了
    - 最終版は HERWIG 6.510
- C++ 化が進められている
  - **HERWIG++**, **PYTHIA8**
    - Fortran 版の HERWIG や PYTHIA の発展型
    - 新しい model や機能の導入も行われている
  - **SHERPA**
    - ME 自動計算を行う AMEGIC++ を内蔵
    - ME-PS matching を行う CKKW 法を真面目に実装

# Hadron collision 用 event generator (2)

## Plug-in/ Hard process

- Plug-in Tool
  - General-purpose event generator や hard-process generator の plug-in
  - PDFLIB, **LHAPDF**: PDF library
    - PDFLIB は開発終了、その後継が LHAPDF
  - EvtGen: B decay
  - **TAUOLA/ PHOTOS**: tau decay/ photon emission
    - Z. Was らが作成、統合した package で配布
  - JIMMY: underlying events for HERWIG
  - CASCADE, ARIADNE: parton shower
    - CCFM kt-factorization (CASCADE), color-dipole model (ARIADNE)
- Hard-process (ME-event) Generator
  - Hard process のみを生成、その他の部分は general-purpose event generator に任せる
  - AcerMC: Higgs の background study 用 generator collection
    - ATLAS Higgs WG が作成したものがベース
  - **AlpGen**: ALPHA algorithm を用いた generator
    - MLM 処方に基づく jet matching を実現する generator として使われている
  - MadCUP: VBF (Vector Boson Fusion) 用 generator collection
  - TopReX: top quark 解析用 generator collection
  - **GR@PPA**
  - .....

# Hadron collision 用 event generator (3)

## Event-generator (matrix-element) generators 他

- Event-generator (matrix-element) generator
  - Hard-process generator を生成するプログラム (群)
  - CompHEP
    - User interface が充実、多体問題は苦手。最近 SUSY に重点
  - MadGraph/MadEvent
    - HELAS に graph 自動生成を加えたもの。User interface が充実。MadEvent は Web interface
  - AMEGIC++
    - SHERPA の一部。C++
  - GRACE
- Cross-section integrator
  - MC integration を用いた cross section 計算 → weighted events が生成される
    - VECBOS, JETRAD, MCFM, NLOJET++, JETPHOX, DIPHOX, etc.
  - 効率良く unweighting が行えれば hard-process generator に成る
- この他にも、Feynman diagram を自動的に生成する事に特化したプログラムなど、いろいろな tool が存在する



いろいろあるが、..

$\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$  at LHC (CTEQ6L,  $p_T > 20 \text{ GeV}$ ,  $|\eta| < 2.5$ ,  $\Delta R < 0.4$ )

Condition given at the MC4LHC WS 2003

Cross section (pb)	Number of jets				
$W^-(e^- \nu_e) + n \text{ jets}$	0	1	2	3	4
ALPGEN	3904(6)	1013(2)	364(2)	136(1)	53.6(6)
MadEvent	3902(5)	1012(2)	361(1)	135.5(3)	53.6(2)
GR@PPA	3905(5)	1013(1)	361.0(7)	133.8(3)	53.8(1)

$W^+(e^+ \nu_e) + n \text{ jets}$	0	1	2	3	4
ALPGEN	5423(9)	1291(13)	465(2)	182.8(8)	75.7(8)
MadEvent	5433(8)	1277(2)	464(1)	182(1)	75.9(3)
GR@PPA	5434(7)	1273(2)	467.7(9)	181.8(5)	76.6(3)

Hard process (ME event) generator は、正しいものを正しく使えば、どれを使っても結果は同じ

- ・ では、どれを使う？
  - 何をどの程度の精度で評価したいのかをよく考える
  - 必要な**精度と計算時間**を秤に掛ける
    - ・ 多体の ME event generation は非常に時間がかかる
    - ・ 概算の段階ならば PYTHIA などの速い event generator で十分な場合が多い
  - 解析手法がある程度決まったら、より精度が良いと思われるものと典型的な例で比較してみる
- ・ **注意**
  - 少なくとも使用する **tool の設定** は consistent でなければならない
    - ・ Mass, coupling, energy scale, etc.
  - Jet が絡むときは **ME-PDF/PS matching 問題** に注意
  - **理論的な不定性** も忘れては成らない
    - ・ Energy scale、PDF などの不定性
  - Underlying event など、**実験が始まるまで分からない事も多い**
- ・ **何が適切かを判断するためには QCD の基礎的な知識が必要**

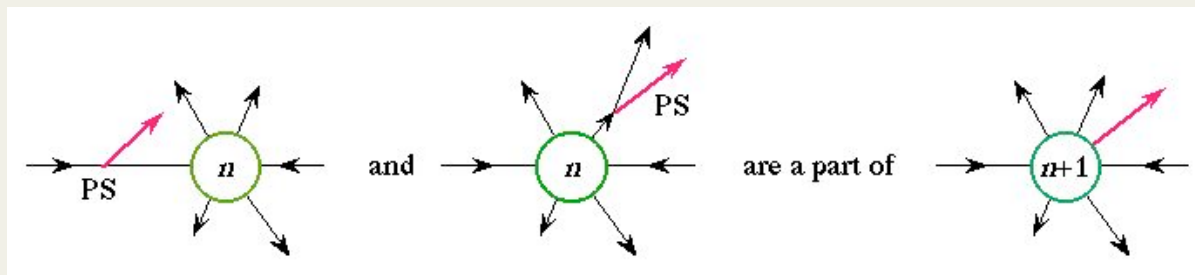
# Double count 問題

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

→ ME-PS matching

## 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

→ PS と ME の分担を明確にする必要がある



## 単純な切り分けでは上手く行かない

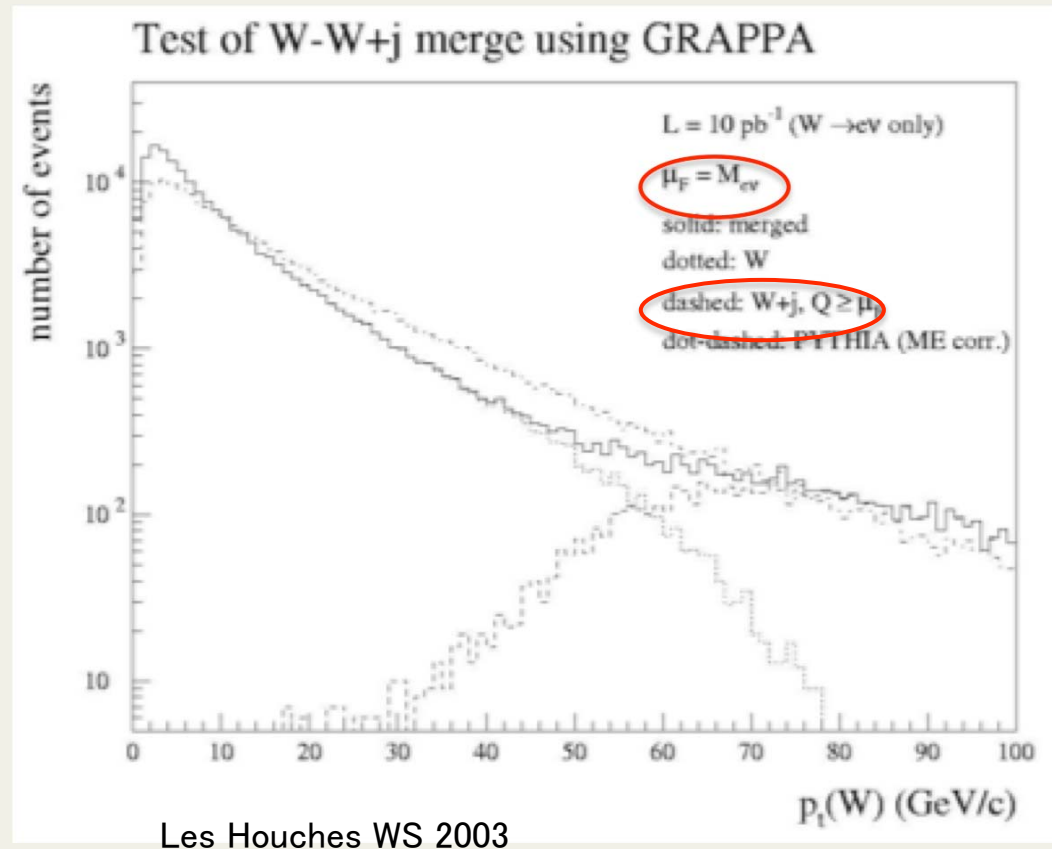
$W + 0 \text{ jet ME}$  に PYTHIA PS を適用して  
 $Q^2 (= -t) < \mu_F^2 = m_W^2$  の jet を生成

$W + 1 \text{ jet ME}$  で  $Q^2 > \mu_F^2$  の jet を生成  
それらを足し合わせる

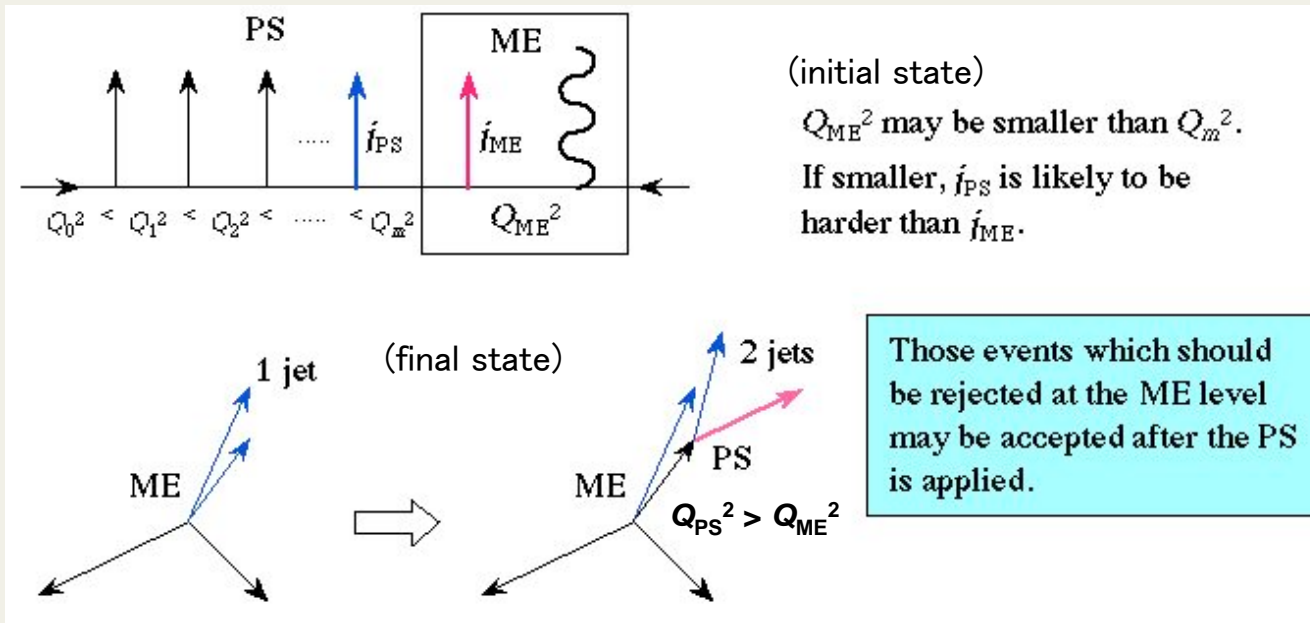
$p_T$  分布に明らかにおかしい structure  
ができてしまう

Double count は無くなったはずだが、  
今度は何かが不足している → PS で  
近似できない  $Q^2 < \mu_F^2$  の non-  
collinear 成分

PYTHIA PS (old PS) が soft 過ぎる事  
も原因の一つだった



## 一つの event generator 内でも double count



ME で評価されている jet が PS でも評価されている

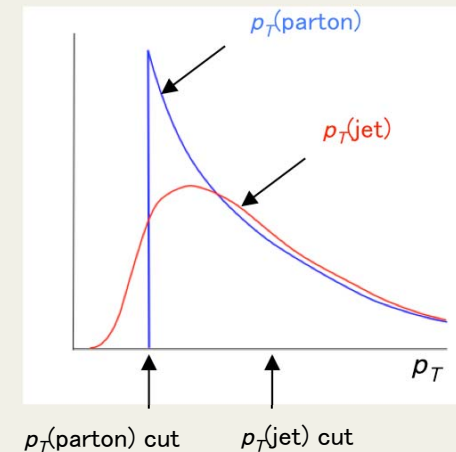
PS jet が ME jet よりも hard に成る様な場合、ME で何を評価しているのか分からなく成る

## 例えば、下記の sample をどうやって生成するか？

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

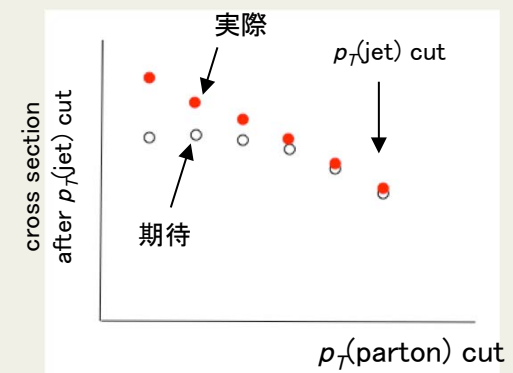
### 普通の方法

- $p_T(\text{parton})$  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

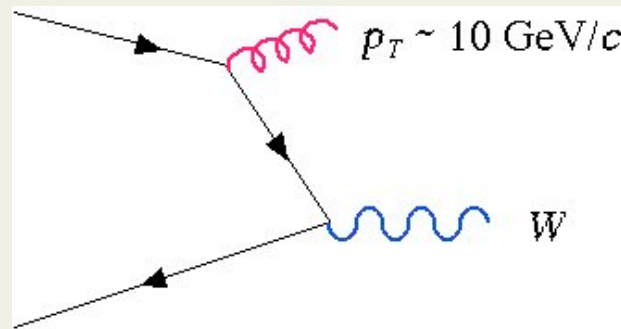


### ところが、

- $p_T(\text{parton})$  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



そもそも、



このような process の ME 計算は信頼性がない

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)

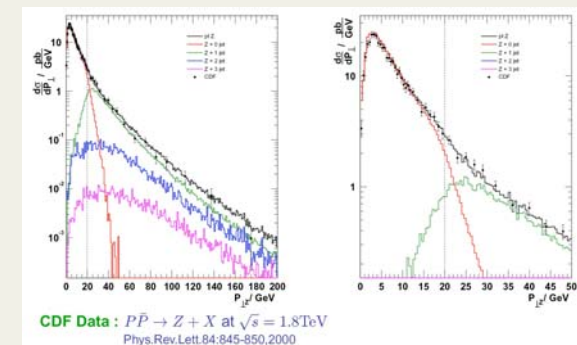
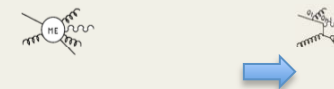
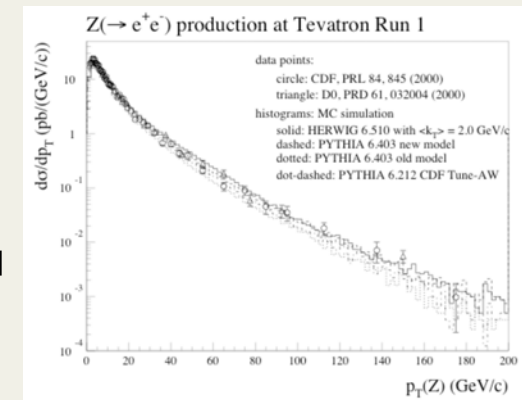
low  $p_T$  では PS に、high  $p_T$  では ME に一致する方法は無いかな？



# 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
  - Jet は全て PS で生成されるので、soft な部分は multi-jet 生成の効果で自然に抑制される
  - Event weight は単純な式で計算できなければ成らないので、W/Z/H などの color singlet 生成に対する 0 jet/1 jet の matching くらいにしか適用できない
- Multi-jet event に対する CKKW 法
  - 0 jet, 1 jet, ... を個別に生成する (cut 値はかなり小さくする)
  - 個々の event を clustering 手法を用いて PS の描像に対応付ける
  - PS の手法に習って Sudakov form factor と coupling の値を評価 → suppression
  - Event 生成時の cut 以下の soft な領域に PS を適用
  - PS の精度での足し合わせができる; i.e., LL or MLLA
- 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 を評価する



# 解決策

## Next-to-Leading Order (NLO) generator

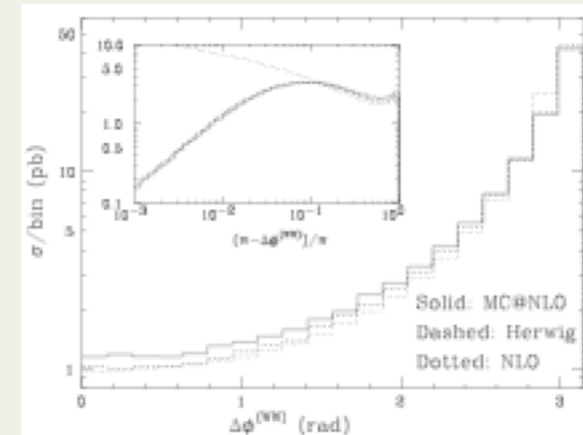
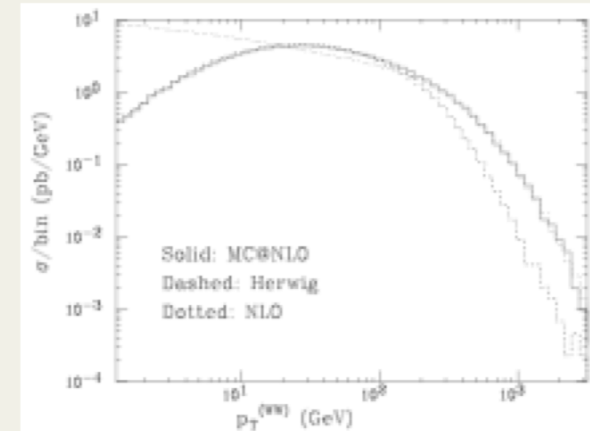
- MC@NLO

- 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 (subtraction)
- Color singlet または heavy quark の NLO event generator; i.e., 0 jet/1 jet の matching のみ
- 人為的な subtraction なので 1-jet event に負の cross section が現れる
- Subtraction 項を決めるために PS に対する正確な理解が必要 (使用する PS に依存)
- 今のところ使えるのは HERWIG PS のみ

- POWHEG

- 全て 1-jet ME から計算
- Sudakov form factor を計算して soft な jet を suppress する
- 対象とする process は MC@NLO と同じ (同じ group が開発)
- 負の cross section が現れない
- PS の適用方法が難しい

$W^+W^-$  production @LHC



## 解決策 (まとめ)

- **PS を補正**して hard な領域で ME に一致させる
  - PYTHIA/HERWIG の ME correction
  - Hard な PS の振る舞いについての正確な理解が必要
- **ME を補正**して soft な領域で PS に一致させる
  - CKKW 法、MLM 処方、POWHEG
  - Sudakov suppression
  - PS の適用領域を狭くする
- **ME から PS の leading order の寄与を差し引く**
  - MC@NLO
  - 使用する PS に依存
  - negative-weight event が生成される

# 我々の解決策

まだ、0-jet/1-jet matching のみ

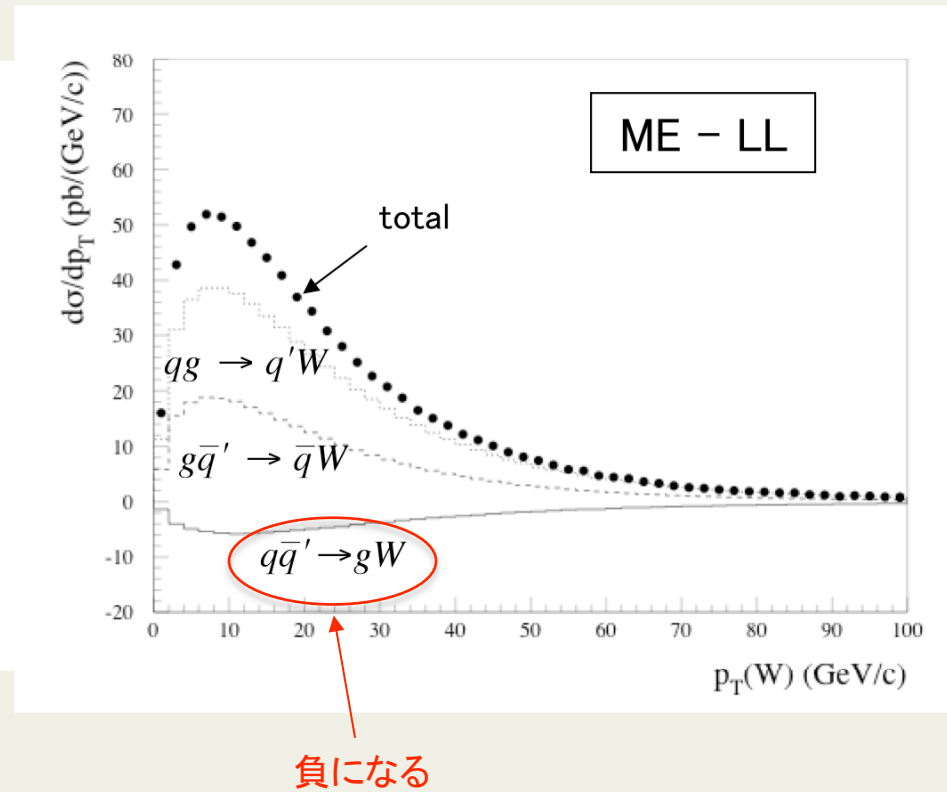
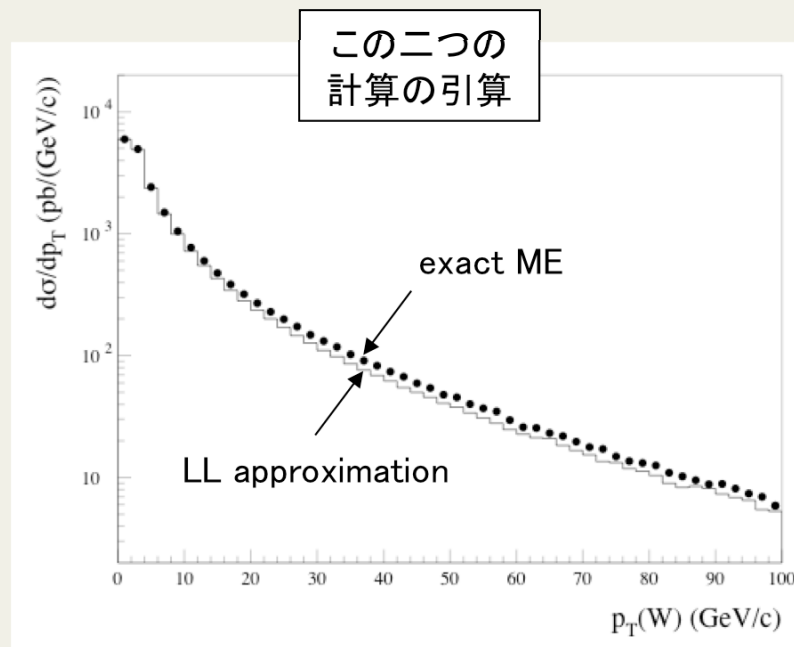
- Initial-state PS は素直に  $Q^2 < \mu_F^2$  の領域に適用
  - PDF との整合性
- PS の leading order の寄与を 1-jet ME から差し引く (subtraction)
  - Limited Leading-Log (LLL) subtraction
  - Subtraction は  $Q^2 < \mu_F^2$  の領域のみ (limited)
  - 発散項が無くなるので、subtraction 後の cross section は有限
  - MC@NLO と同様に負の cross section が現れるが、大きな問題ではない
- 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

$W + 1 \text{ jet @ LHC}$

$p_T > 1 \text{ GeV}/c$

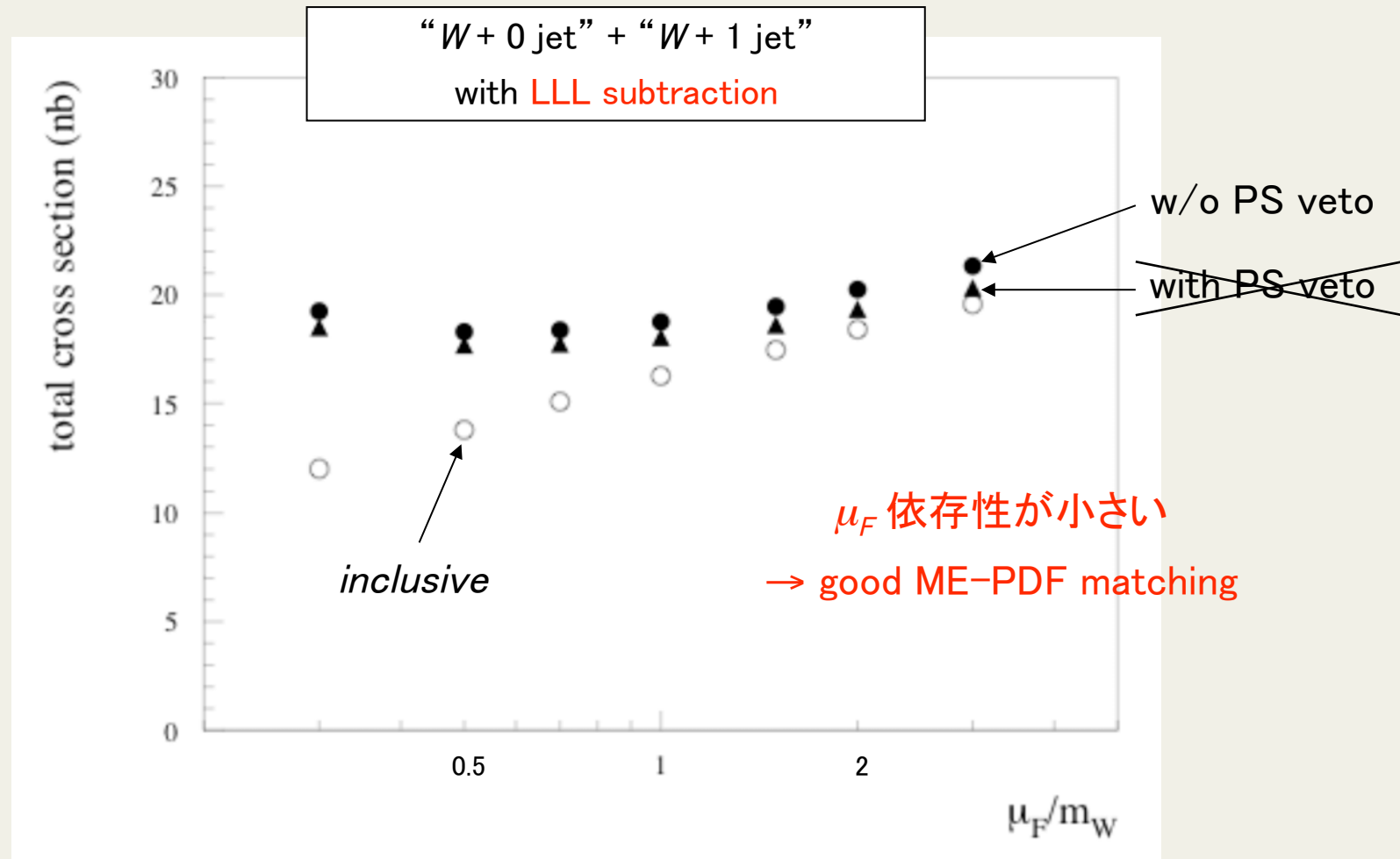
数値計算の安定性のため  
結果には影響しない





## Factorization-scale 依存性

$W$  production @LHC



## PS branch kinematics

Subtract された 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 old-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、

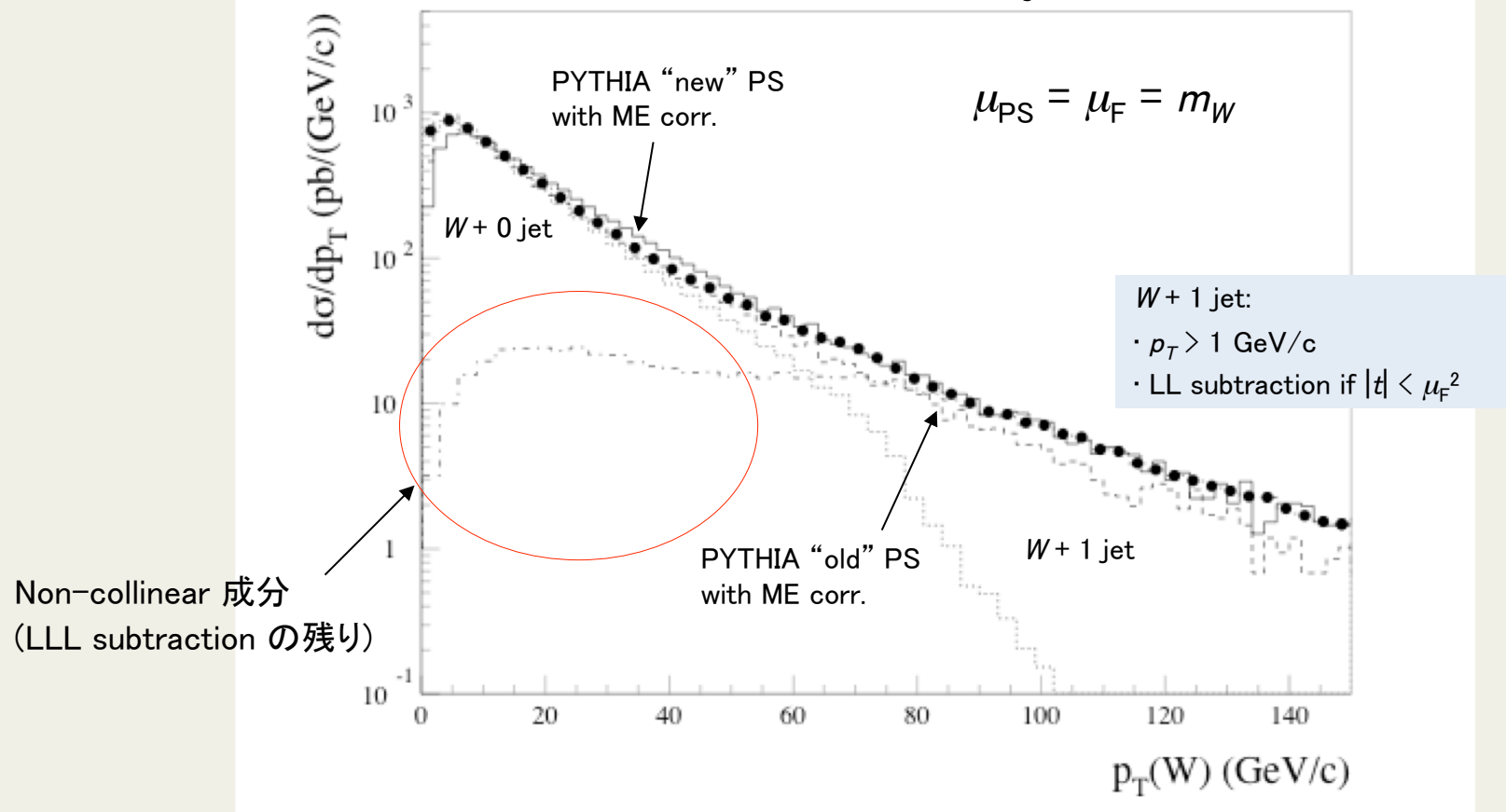
$p_T^2 = (1-z)Q^2$ ; i.e., 「 $Q^2 = \text{virtuality}$ 」を放棄

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

$$k = (E - E', -p_T, 0, p - p')$$
$$p = (E, 0, 0, p)$$
$$p' = (E', p_T, 0, p')$$
$$k^2 = 0 \quad 0 > p^2 > p'^2$$
$$z \approx E' / E$$

## 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



W mass 付近 ( $\mu_F$ ) でスムーズに結合される

$\mu_F$  依存性も小さい

ここまでは、BASES (積分計算) での study の結果

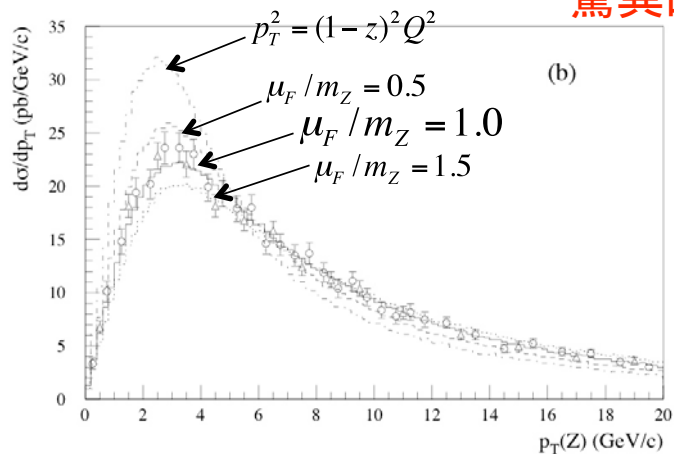
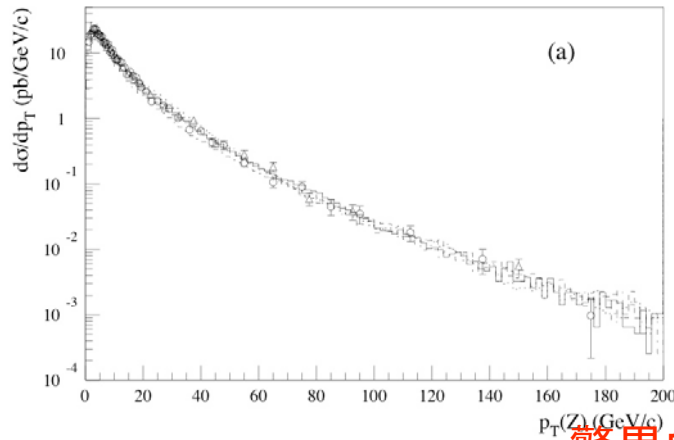
その後、この手法を GR@PPA に導入

PYTHIA/HERWIG を用いて soft な領域の simulation を付  
加できる様になった

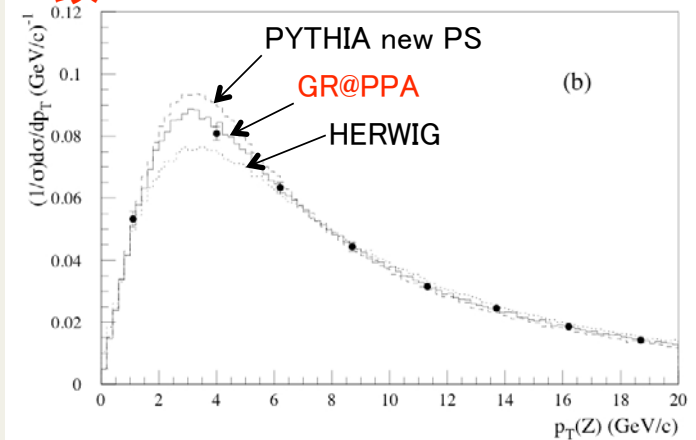
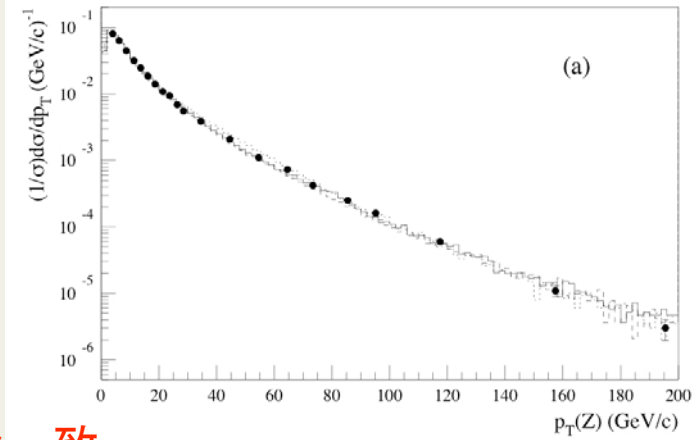
→ 実験データとの比較も可能

# Z production @Tevatron

Run-1 data (CDF, D0) との比較



Run-2 data (D0) との比較



驚異的な一致

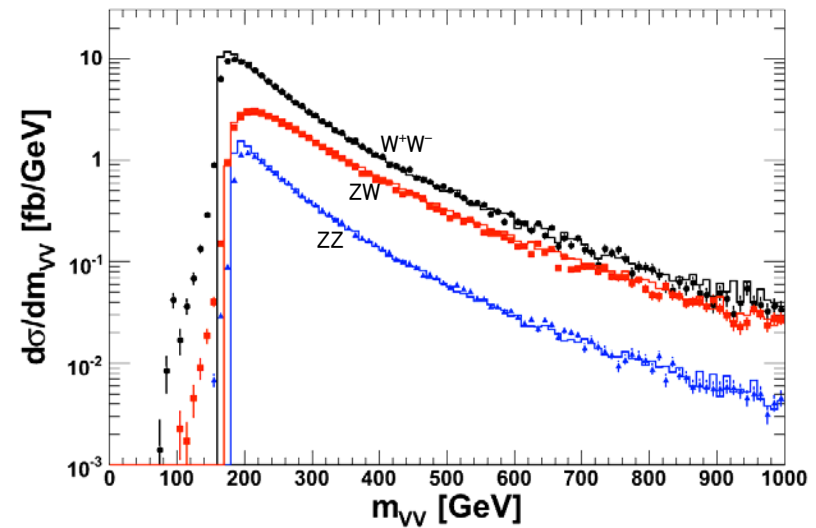
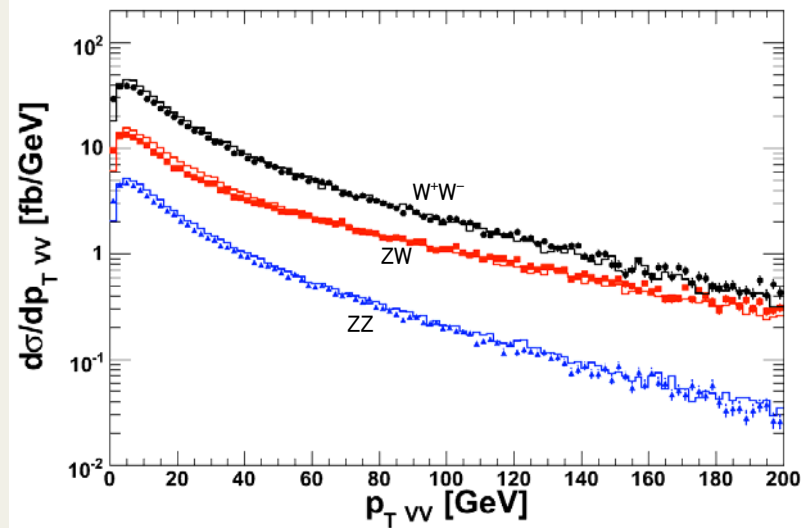
どちらも shape のみの比較: 積分値が同じに成る様に normalize  
Gaussian で non-perturbative effect (+α) を入れている



# Di-boson 生成 @LHC

## GR@PPA v.s. MC@NLO

Plots: GR@PPA2.8-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

という訳で、  
Heavy color-singlet 生成の initial-state ME-PS  
matching はほとんど完成

しかし、  
最終目標までの道はまだ遠い

# 演習

[http://research.kek.jp/people/odaka/grace-school2009/grace-school2009\\_odaka.html](http://research.kek.jp/people/odaka/grace-school2009/grace-school2009_odaka.html)