
LHC-ATLAS におけるトップ クォーク対生成断面積の測定

奥村恭幸

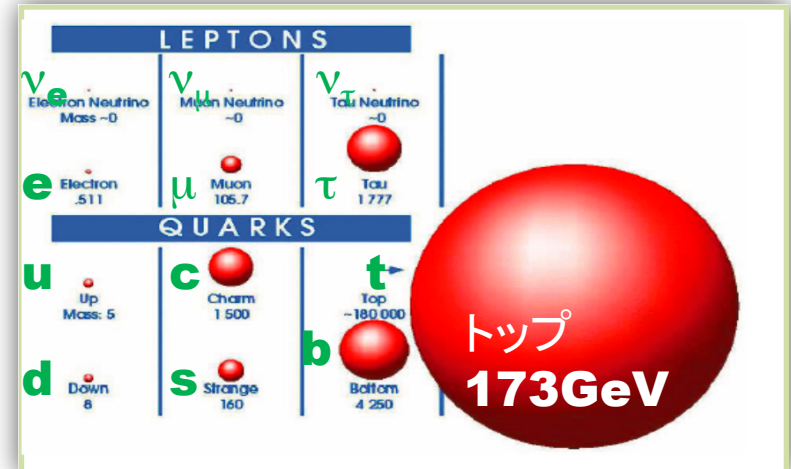
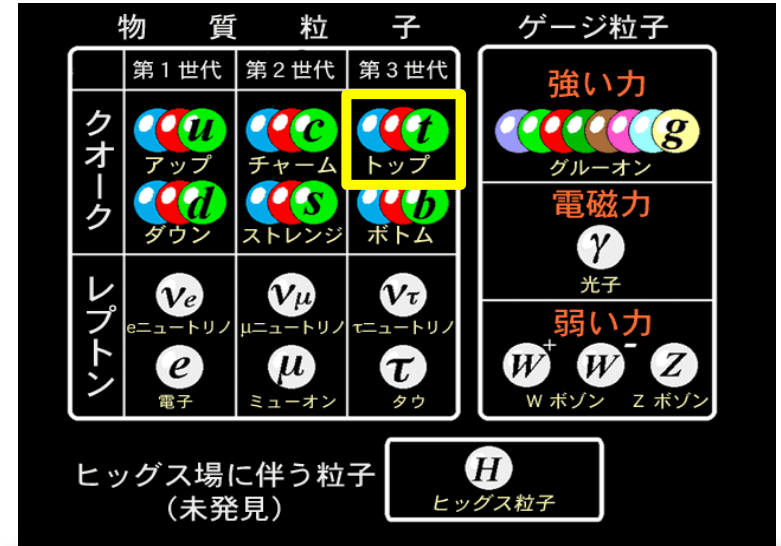
(OKUMURA, Yasuyuki)

Nagoya University, Japan

素粒子標準模型とトップクォーク

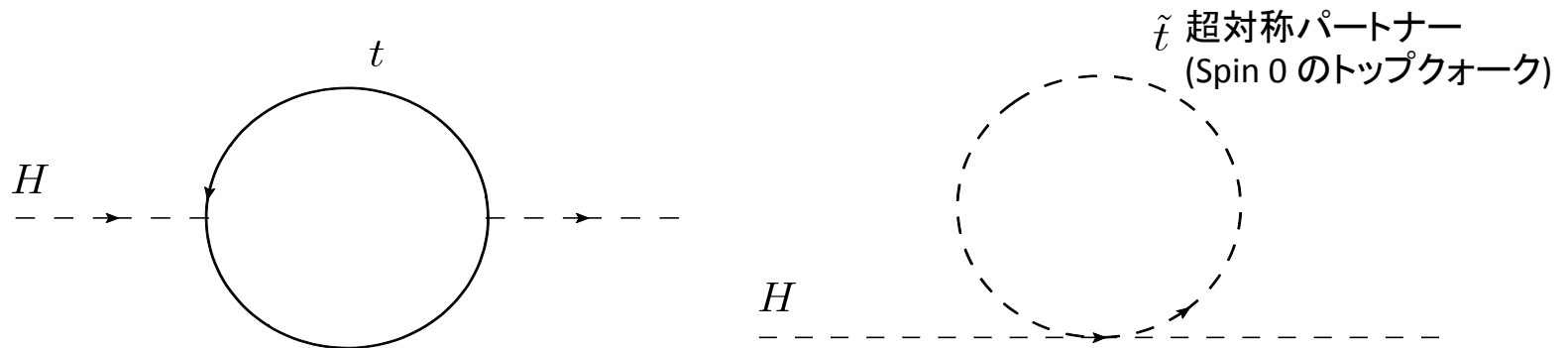
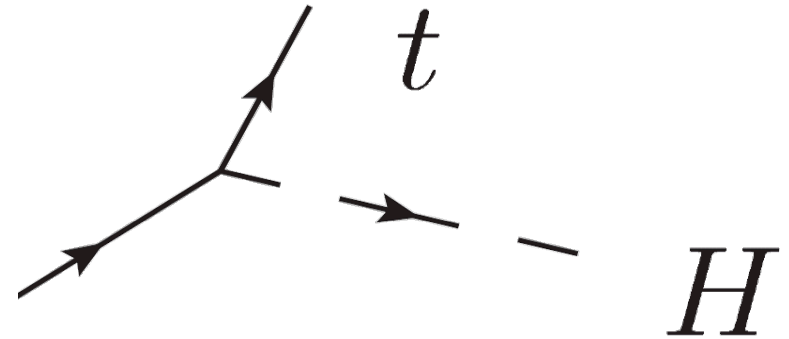
- 素粒子標準模型 (Standard Model)
 - ゲージ原理による量子場の理論
 - 素粒子の相互作用を記述
 - ゲージ粒子の存在を予言
 - 質量獲得の機構が未解明
 - ヒッグス場 (相転移した真空) と素粒子の相互作用の理解

- トップクォーク
 - 最大質量の素粒子 ($173 \text{ GeV}/c^2$) をもち、質量の起源の解明に対し重要なプローブとして働く



トップクォークを用いた質量起源解明

- トップクォークとヒッグス場(ヒッグス粒子)の結合
 - 湯川相互作用の理解を進める
- ヒッグス場の質量の発散問題
 - トップとヒッグス粒子のループ効果の理解
 - ヒッグス場の安定化の機構の理解

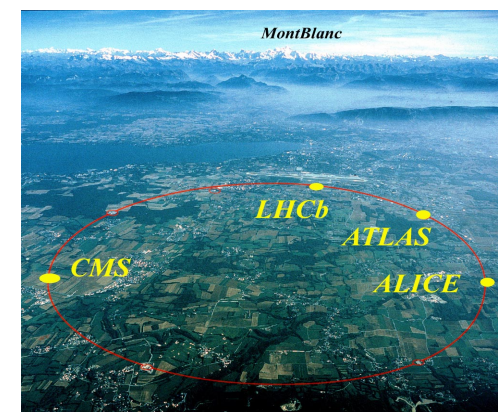


トップクォーク測定は質量起源の解明に対して重要なアプローチ
エネルギーフロンティア実験 + トップクォーク

Large Hadron Collider

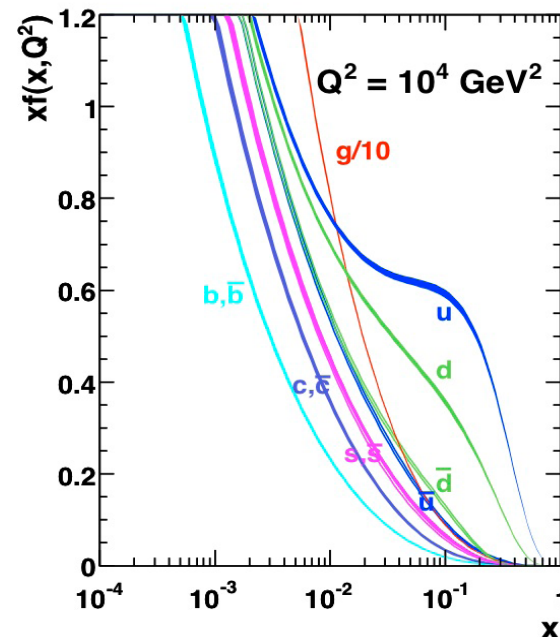
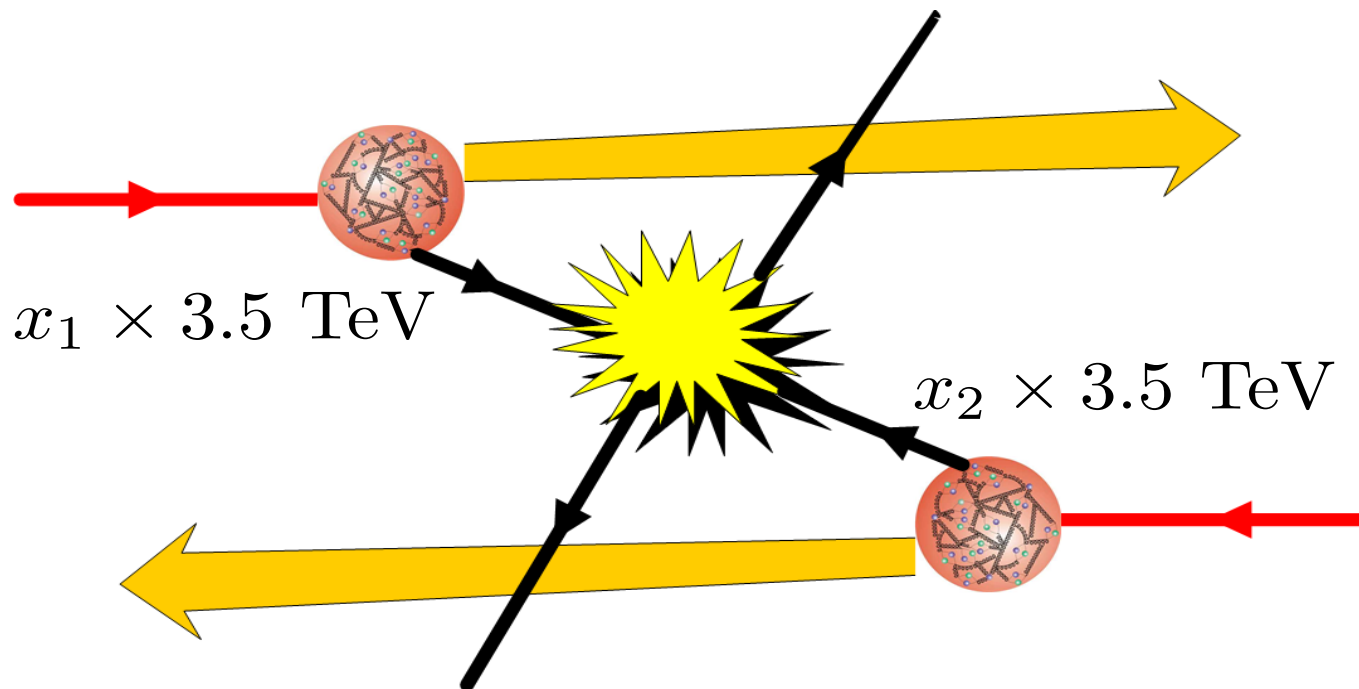
エネルギーフロンティア & ルミノシティフロンティア ハドロンコライダー:

- Proton-Proton collider
- 3.5 TeV + 3.5 TeV = 7 TeV
- 瞬間ルミノシティ
 $L = 10^{33}/\text{cm}^2/\text{s}$ (2011 August)



Process	Cross-section	Production-rate
PP inelastic (soft-QCD)	70 mb	70 MHz
W production	100 nb	100 Hz
Z production	30 nb	30 Hz
tt production	165 pb	0.2 Hz

陽子・陽子衝突の運動学



- Center-of-mass-energy
- Longitudinal momentum (proton-beam axis)
- Transverse momentum

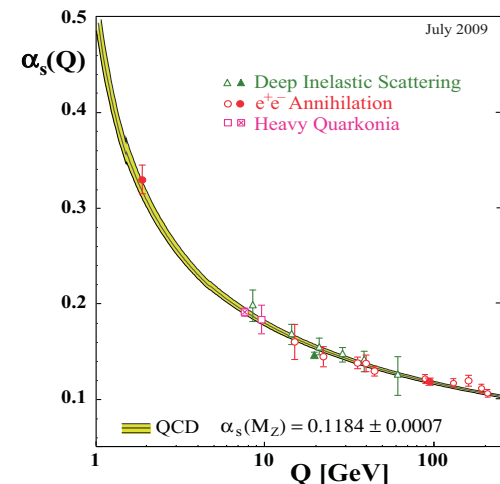
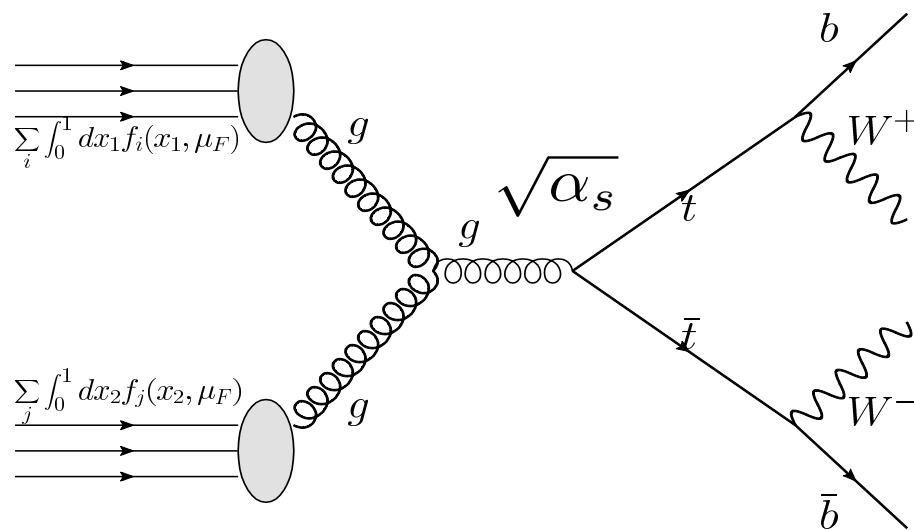
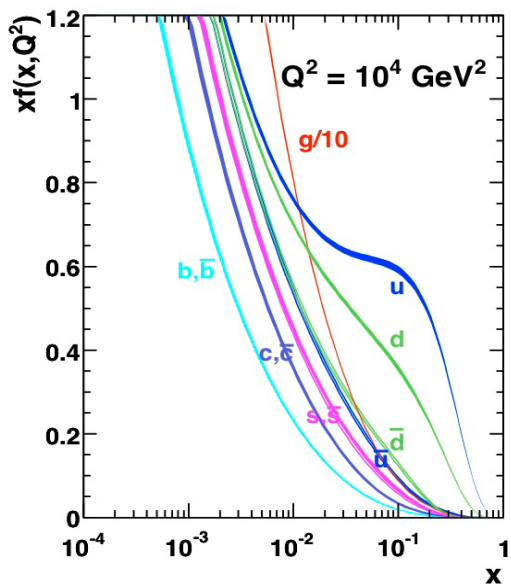
$$\sqrt{\hat{s}} = \sqrt{x_1 x_2} \times 7 \text{ TeV}$$

$$(x_1 - x_2) \times 3.5 \text{ TeV}$$

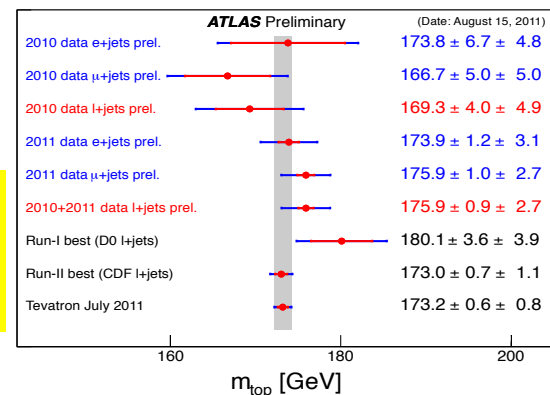
$$0$$

トップクォーク対生成断面積

$$\sigma_{t\bar{t}+X} = \int_0^1 dx_1 \int_0^1 dx_2 \sum_{ij} f_i(x_1, \mu_F) f_j(x_2, \mu_F) \hat{\sigma}_{ij \rightarrow t\bar{t}+X}(\sqrt{\hat{s}})$$



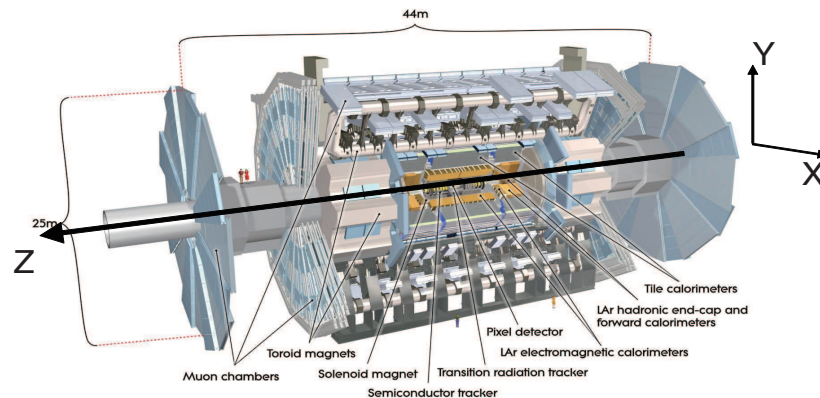
トップクォーク対生成断面積の精密測定は、標準模型 (QCD, EW) の 7 TeV 陽子・陽子衝突での精密検証



ATLAS 検出器

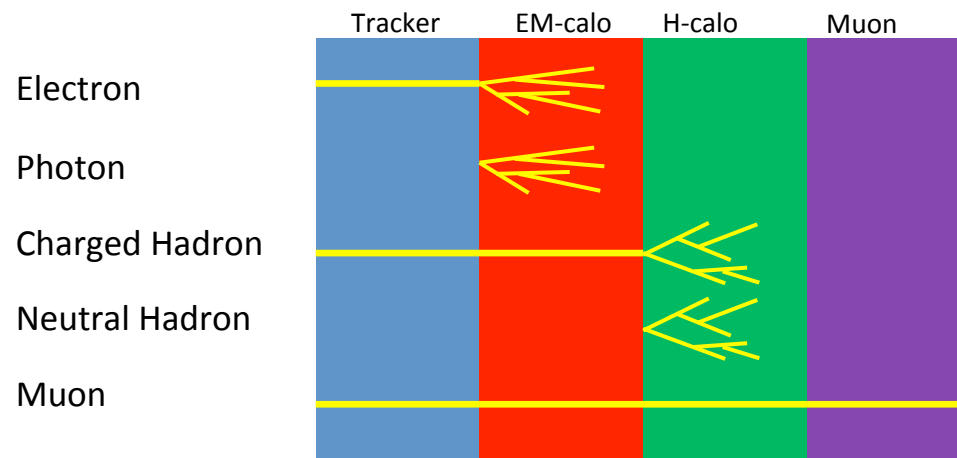
汎用型検出器

- 精密飛跡検出器 : $|\eta| < 2.5$
- 電磁カロリメータ : $|\eta| < 3.2$
- ハドロンカロリメータ : $|\eta| < 4.9$
- ミューオン検出器 : $|\eta| < 2.7$



終状態の再構成

- 粒子識別
 - 電子, ミュー粒子, 光子, ハドロン
- 運動量測定
 - レプトン (a few %)
 - ハドロン (10%)



トップクォーク対生成の終状態

Wボソンの崩壊終状態で定義:

- Lepton + hadron (35%)
- Dilepton (7%)
 - $ee, \mu\mu, e\mu$
- All hadron (55%)

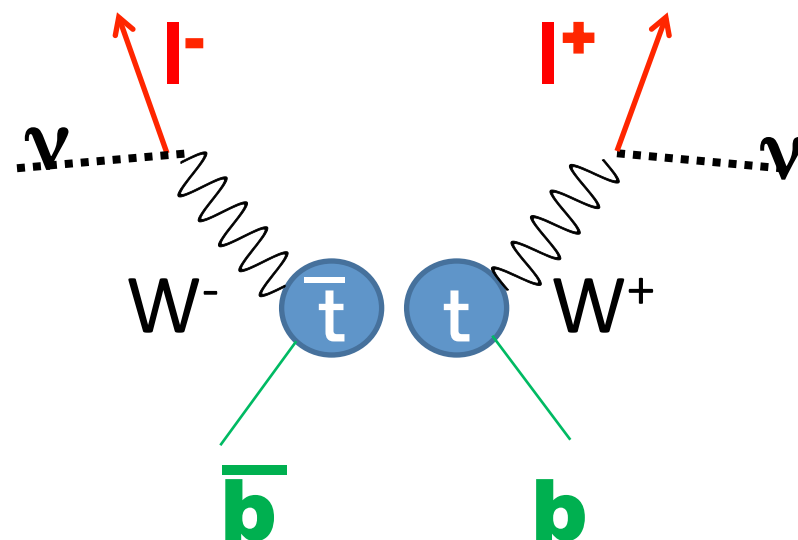
ダイレプトン終状態の特徴

- 2本の異符号のレプトン
- bクォーク
- ニュートリノ

Leptonic decay 26%

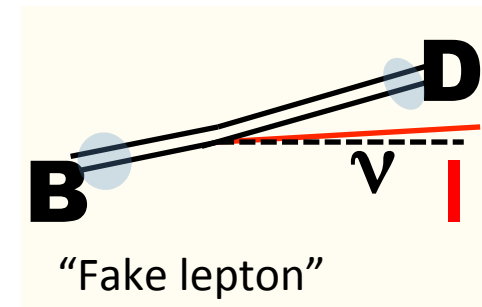
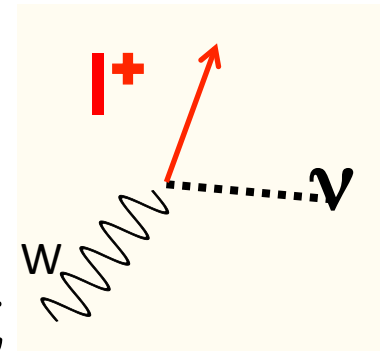
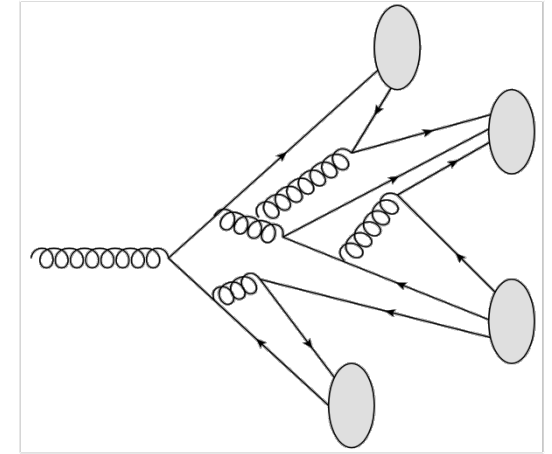
$W \rightarrow e/\mu + \nu$	22%
$W \rightarrow \tau + \nu$	$\tau \rightarrow e/\mu + \nu + \nu$ 4%
	$\tau \rightarrow q + q' + \nu$ 7%
$W \rightarrow qq'$	67%

Hadronic decay 74%



終状態の再構成

- クォークやグルーオン
 - ハドロン化し、運動量が分散
 - ハドロンカロリメータで、“ハドロンジェット”として再構成
- 電子・ミュー粒子
 - “単一飛跡”として検出
 - 高横運動量
 - アイソレーション
- ニュートリノ
 - “Missing E_T ”として再構成



トップクォーク候補事象

Muon

- ✓ Inner tracker
 - ✓ Muon detector
- $P_T = 54 \text{ GeV}$

Neutrino

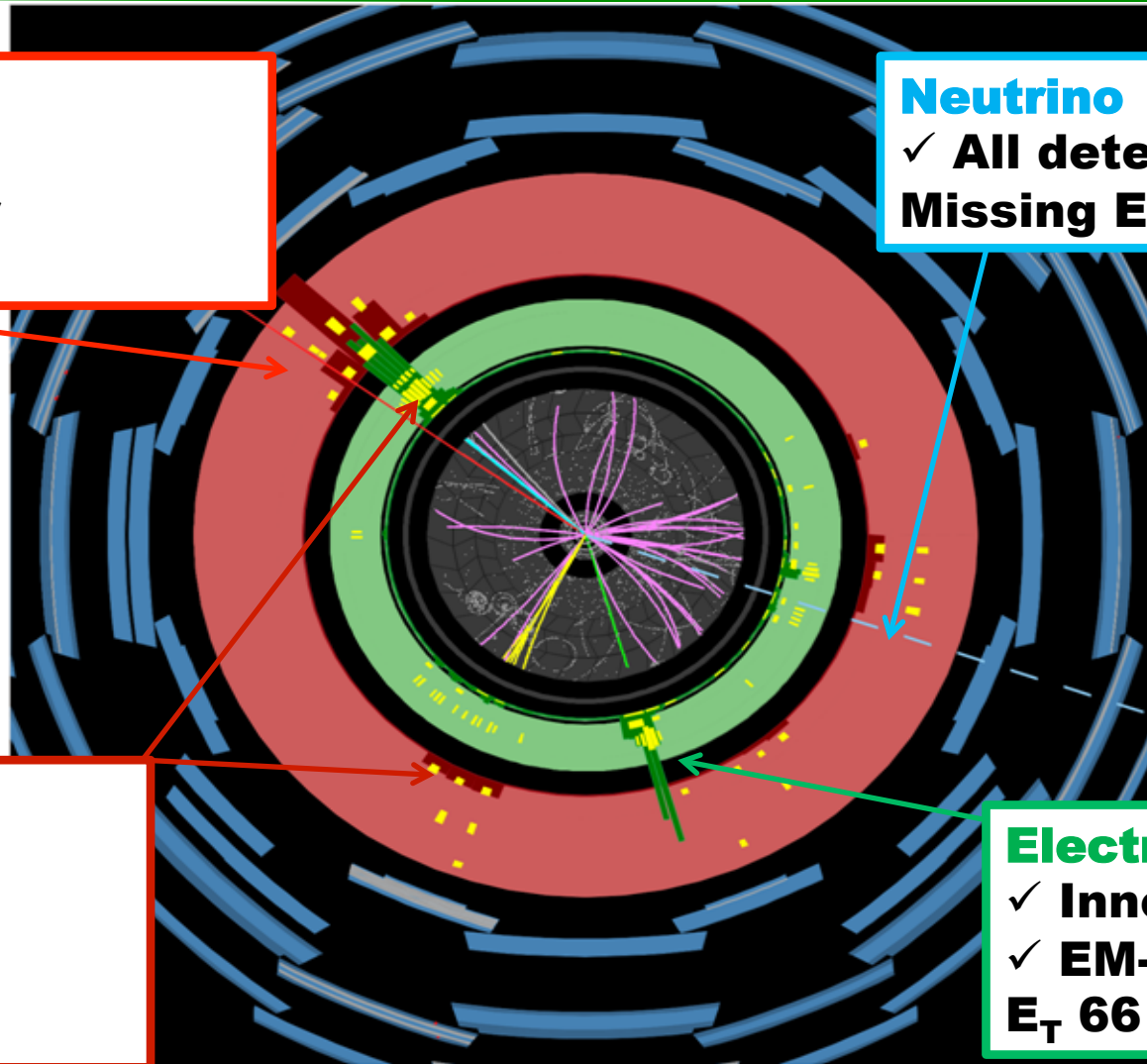
- ✓ All detectors
- Missing $E_T = 129 \text{ GeV}$

Two Hadron jet

- ✓ H-Calorimeter
- P_T
 $1^{\text{st}} = 173 \text{ GeV}$
 $2^{\text{nd}} = 44 \text{ GeV}$

Electron

- ✓ Inner detector
 - ✓ EM-Calorimeter
- $E_T = 66 \text{ GeV}$



生成断面積測定

数え上げによる $\sigma_{t\bar{t}}$ 測定

$$\sigma_{t\bar{t}} = \frac{N_{\text{data}} - BG}{A\mathcal{L}}$$

- 候補事象数 (N_{data})
- 背景事象数推定 (BG)
- 信号のアクセプタンス (A)
- 積分ルミノシティ (\mathcal{L})

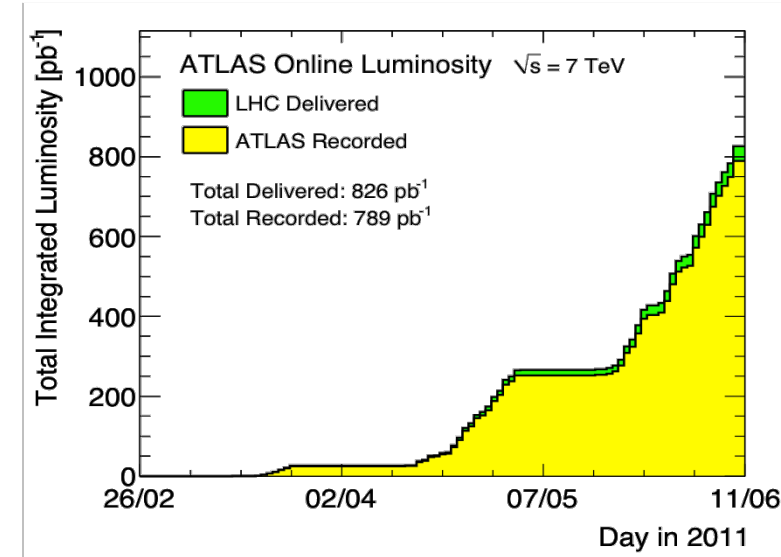
高精度達成のための戦略:

- 検出器を良く理解
 - レプトン測定 (e/μ)
 - ハドロンカロリメータ測定 (Hadron jets, Missing E_T)
- “効率的”にかつ “効果的” に信号を選別する手法を確立
- 含まれる背景事象を良く理解

Data samples

陽子・陽子衝突データ

- シングルレプトントリガー
 - 電子 (20 GeV)
 - ミューオン (18 GeV)
- “GOOD Data quality” 条件を満たす $0.70 \pm 0.03 \text{ fb}^{-1}$ を使用

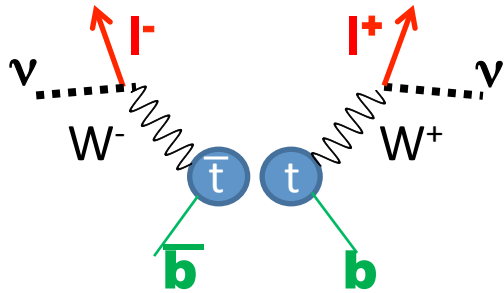


シミュレーションサンプル

- 信号アクセプタンス (A)
- 背景事象数見積もり (BG)

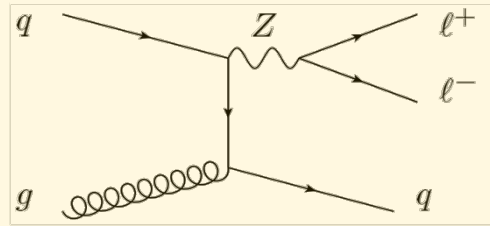
Signal sample	Background sample		
$t\bar{t}$	$Z + \text{jets}$	WW, WZ, ZZ	Wt

信号サンプル & コントロールサンプル

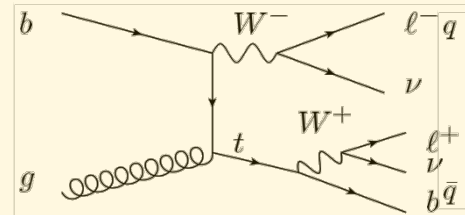


$tt(\rightarrow \ell\ell)$ ($\sigma_{\text{BF}}^{\text{SM}} = 11 \text{ pb}$)

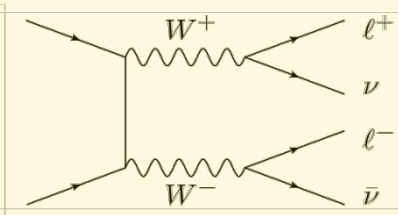
Events that include two lepton in their final states



$Z (\rightarrow ee/\mu\mu) + \text{jets}$ ($1.0 \times 10^3 \text{ pb}$)



Single top (1.0 pb)



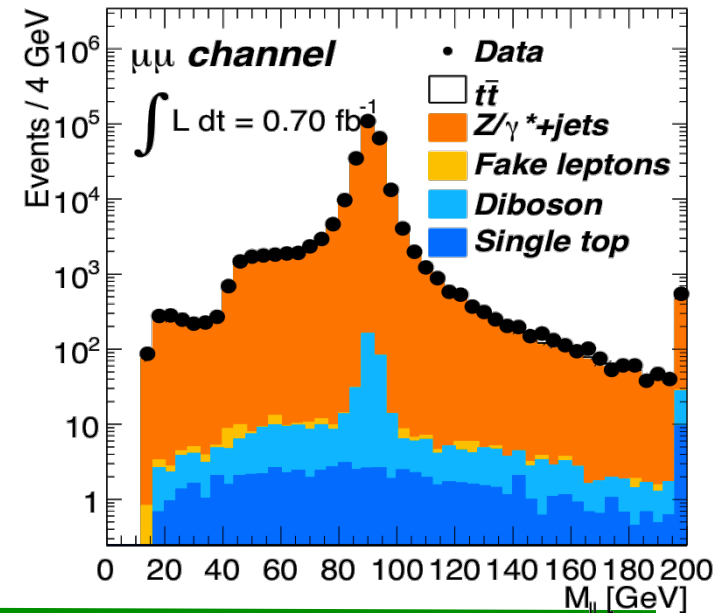
Diboson (7.6 pb)

Z ボソンコントロールサンプル

- 検出器の理解
- $Z \rightarrow ee / \mu\mu$ の背景事象の理解

信号サンプル

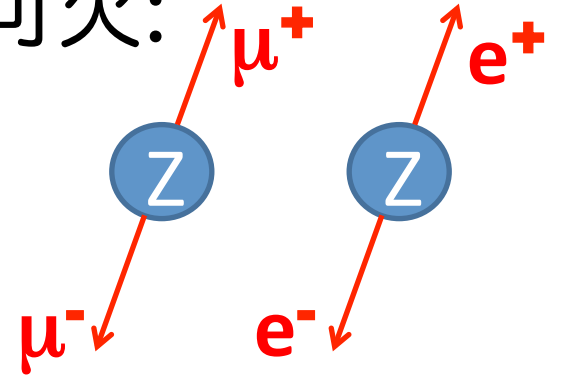
- トップクォーク対生成事象を抽出
- Missing E_T , Large #jets, Out of Z resonance



レプトン検出器の性能評価

電子・ミュー粒子の検出効率の実機性能は、
正確に断面積を測定する際に必要不可欠:

- 信号のアクセプタンス評価 (A)
- バックグラウンド評価 (BG)



Z ボソンコントロールサンプルを用いた
“Tag & Probe” 法

測定手法の例 (トリガー効率測定)

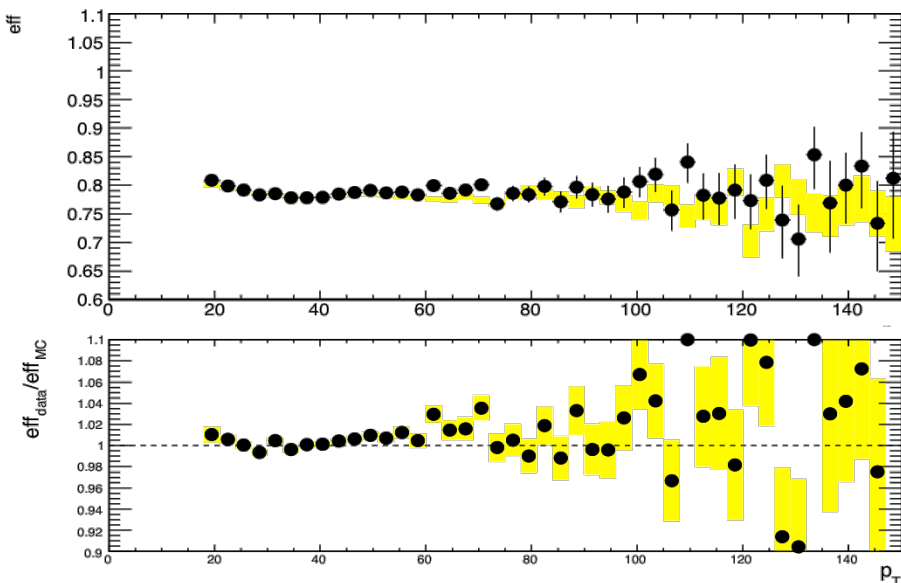
- 2 本の isolated & high p_T レプトン & Z ボソン質量
- 内 1 本がトリガー条件を満たしていること
- もう一本は効率測定の “probe” として使用可能

レプトン検出器の性能評価

トリガー効率、レプトン再構成効率、
アイソレーション条件の効率を、別々に測定

– p_T , η , #jets, #vertices の関数として測定

測定結果を、トップクォーク事象や、その他のバックグラウンドの検出数理解に用いる → 実機性能に基づいた評価



Top events	ee	$\mu\mu$	e μ
Two lepton selection	19%	36%	26%

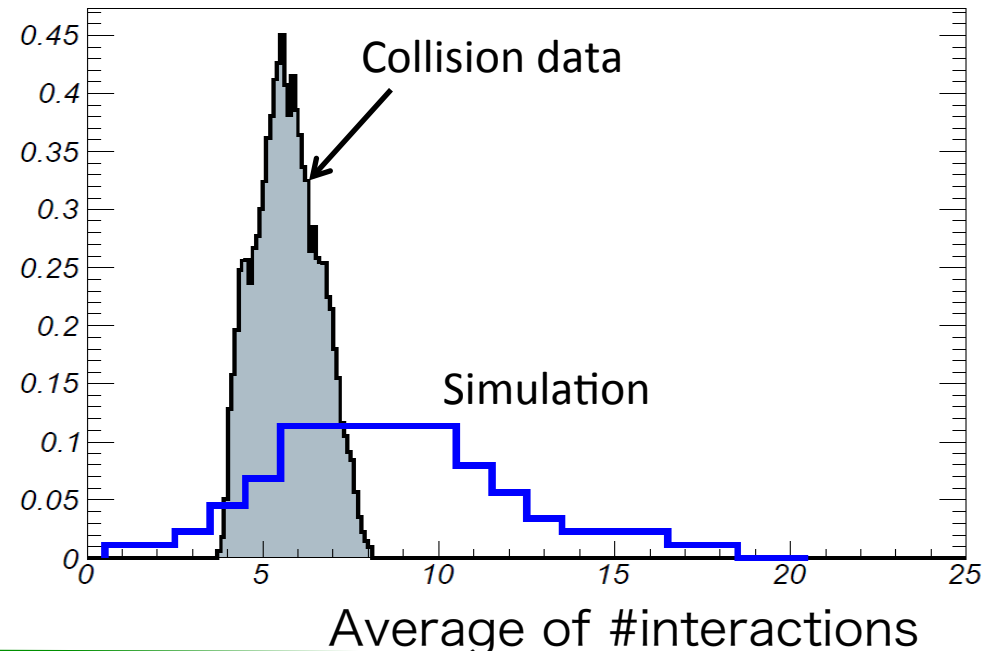
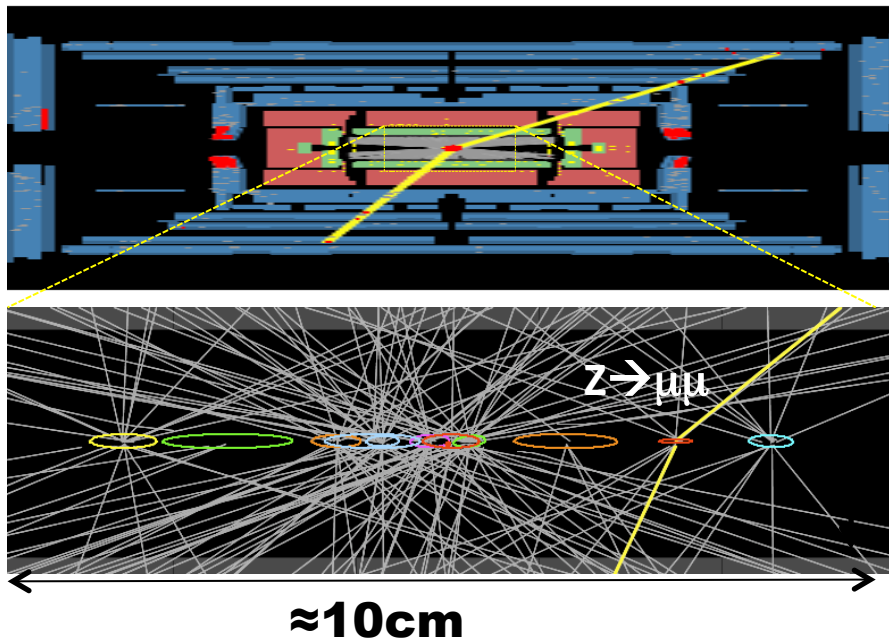
Uncertainties	electron	muon
Trigger	$\pm 0.5\%$	$\pm 1.0\%$
Reconstruction	$\pm 1.0\%$	$\pm 0.3\%$
Isolation cut	$\pm 3.0\%$	$\pm 0.03\%$

ハドロンカロリメータとパイルアップ

パイルアップ衝突数は平均 6個 / バンチ交差

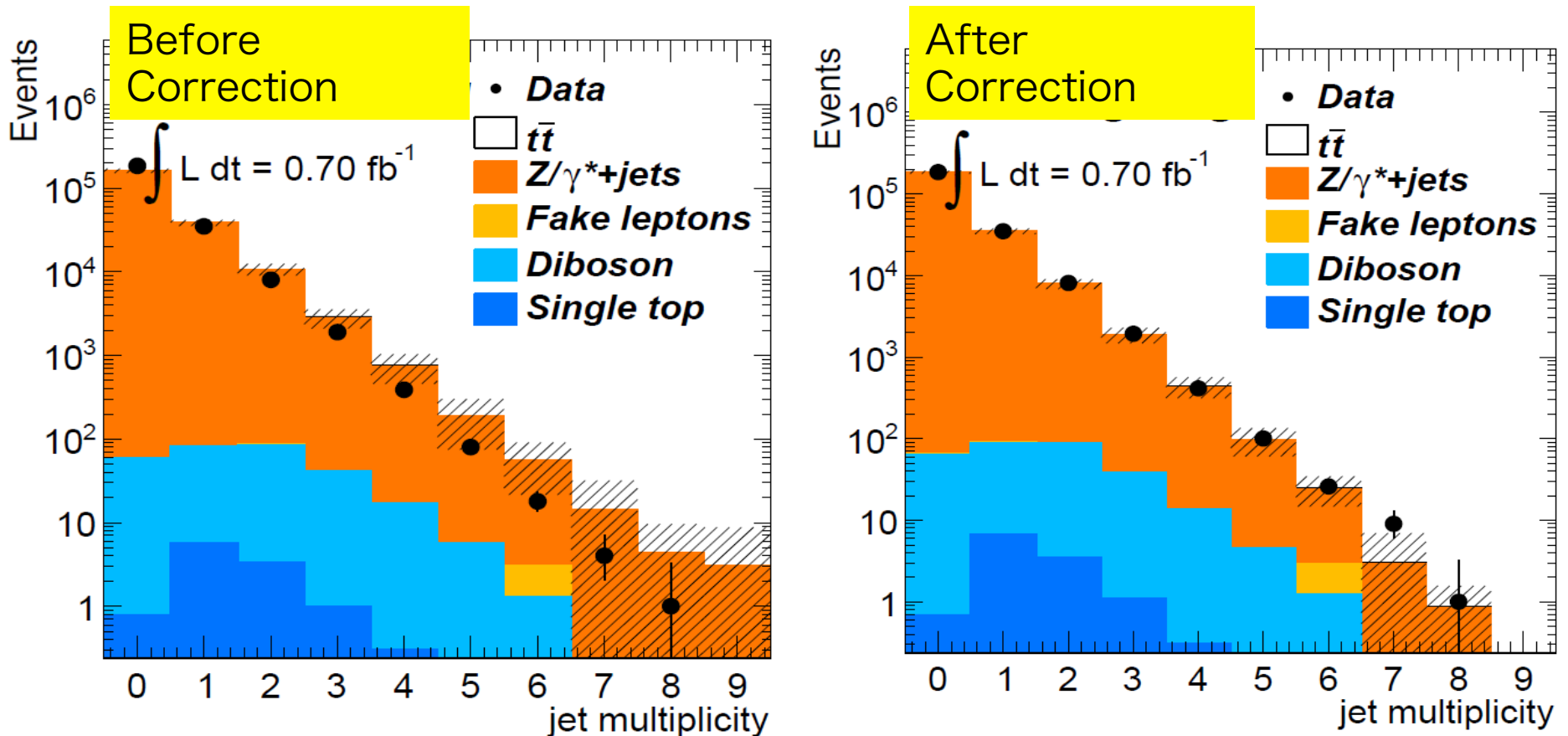
- #jets & Missing E_T が影響を受ける

シミュレーション中で正確に再現し、その影響を理解した上で測定を遂行する



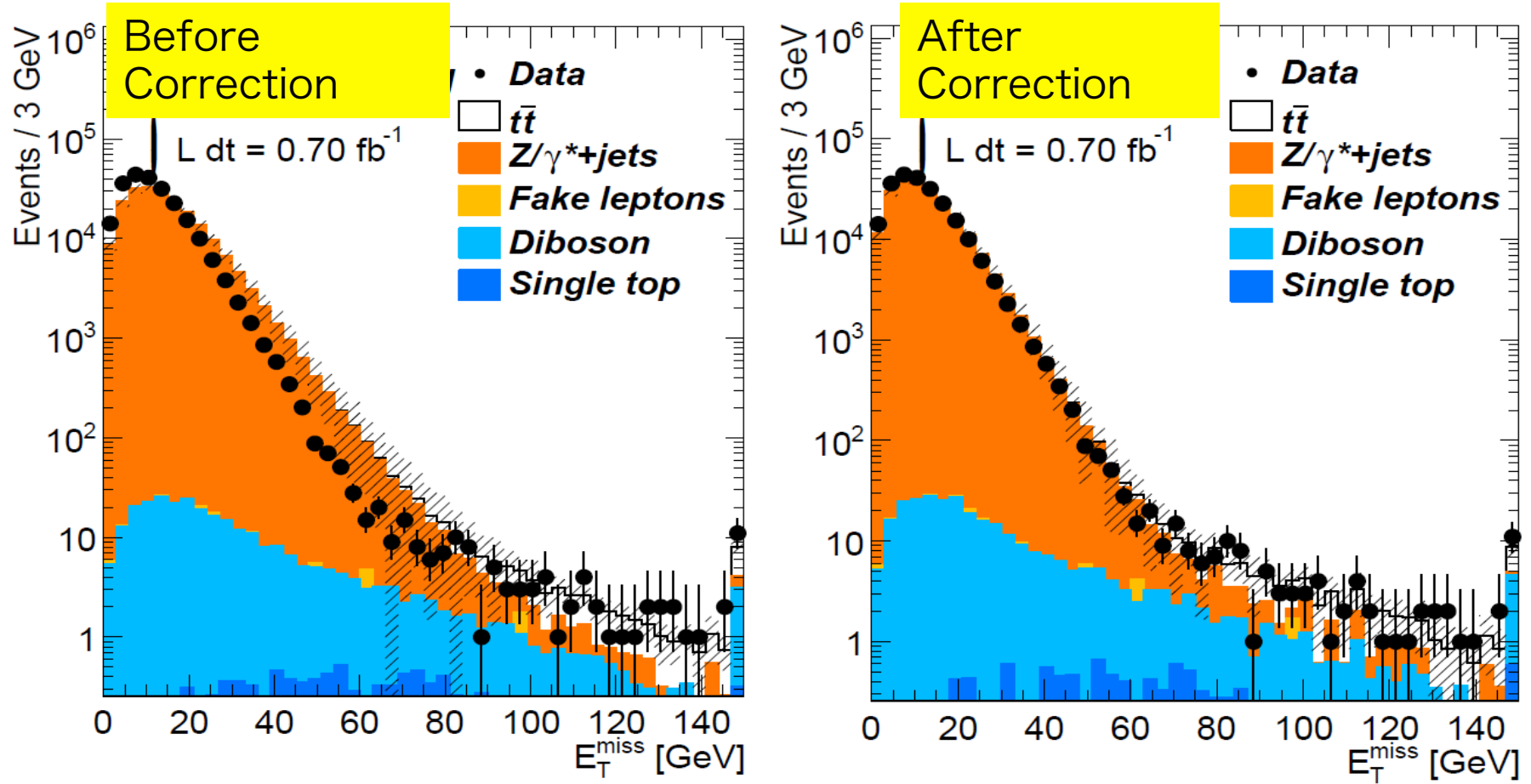
Jet multiplicity

- Validation with Z+jets control region



Missing E_T

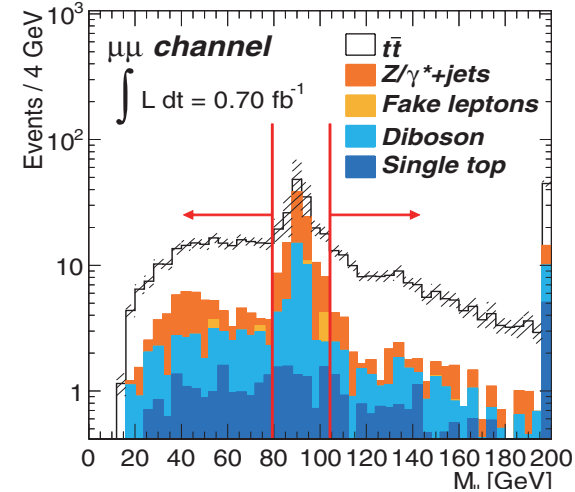
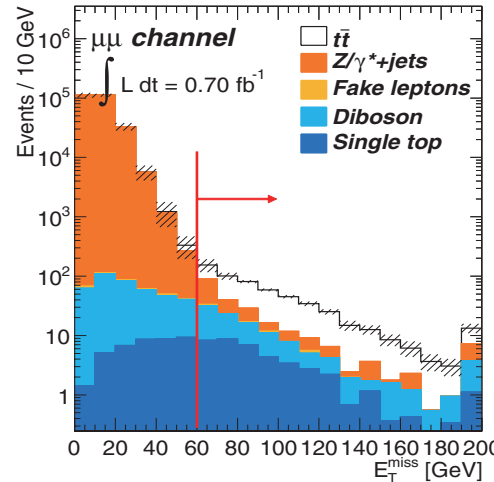
- Validation with Z+jets control region



Event Selection

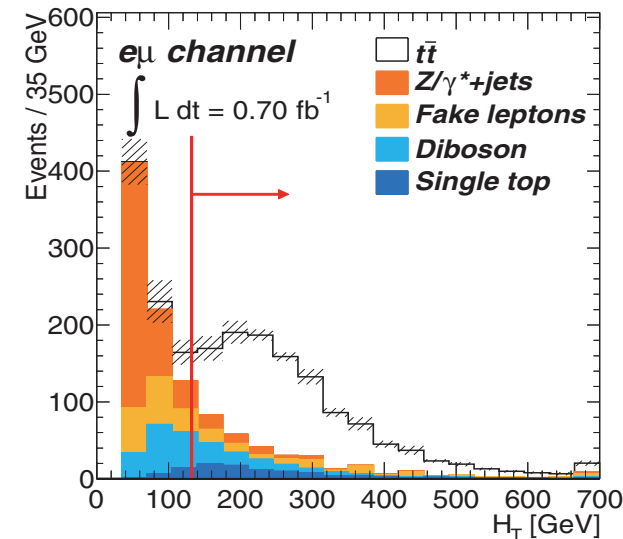
ee/ $\mu\mu$ チャンネル

1. A pair of high- p_T isolated leptons
2. Missing ET > 60 GeV
3. Z veto ($|M_{ll} - M_Z| > 10$ GeV)
4. # jets ≥ 2



e μ チャンネル

1. A pair of high- p_T isolated leptons
2. HT > 130 GeV
3. # jets ≥ 2

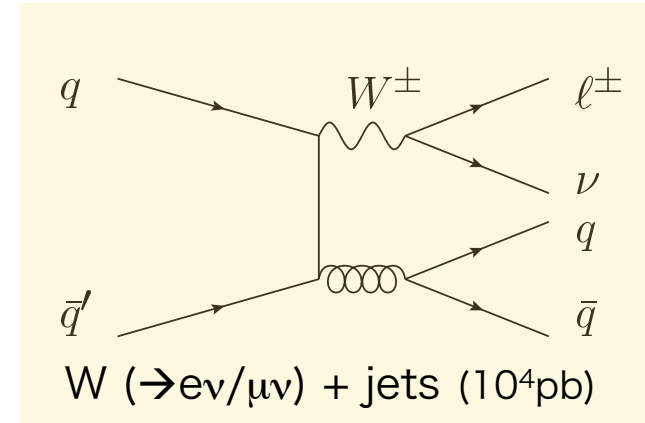
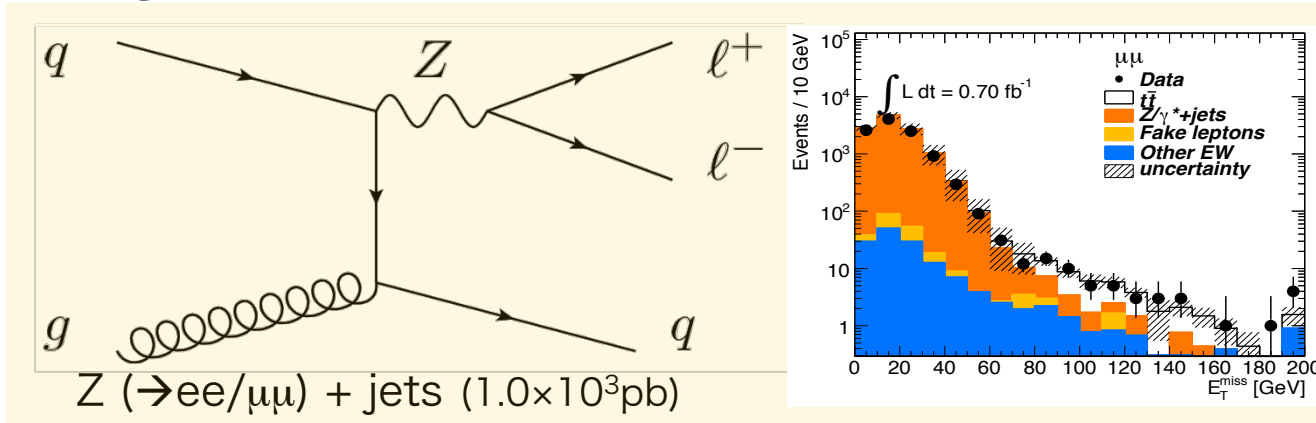


	Acceptance (%)	#events (data)
ee	6.6 ± 0.9	165
mm	13.0 ± 1.0	301
em	20.0 ± 1.1	963

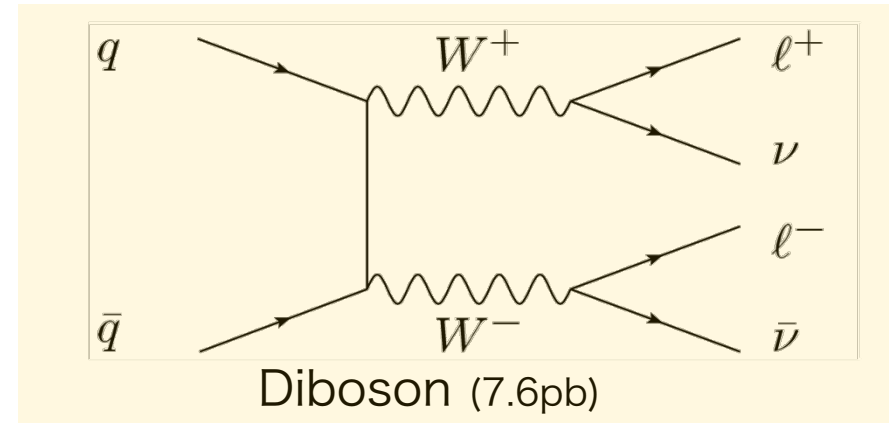
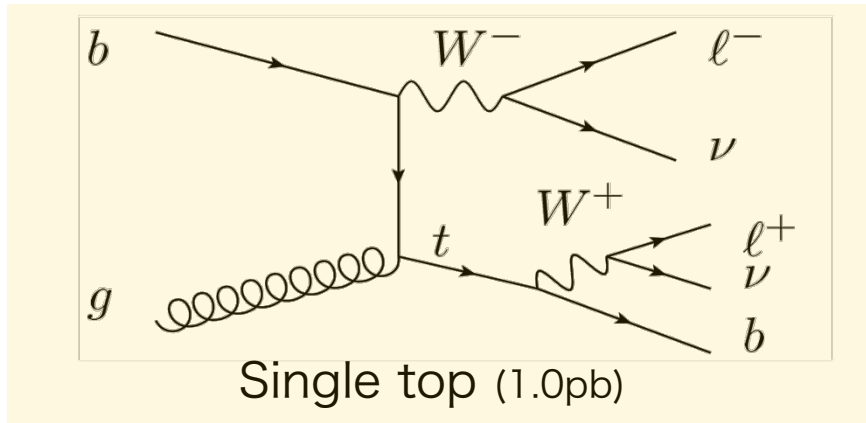
1400 candidates are collected from 0.70 fb⁻¹ data

Background estimation

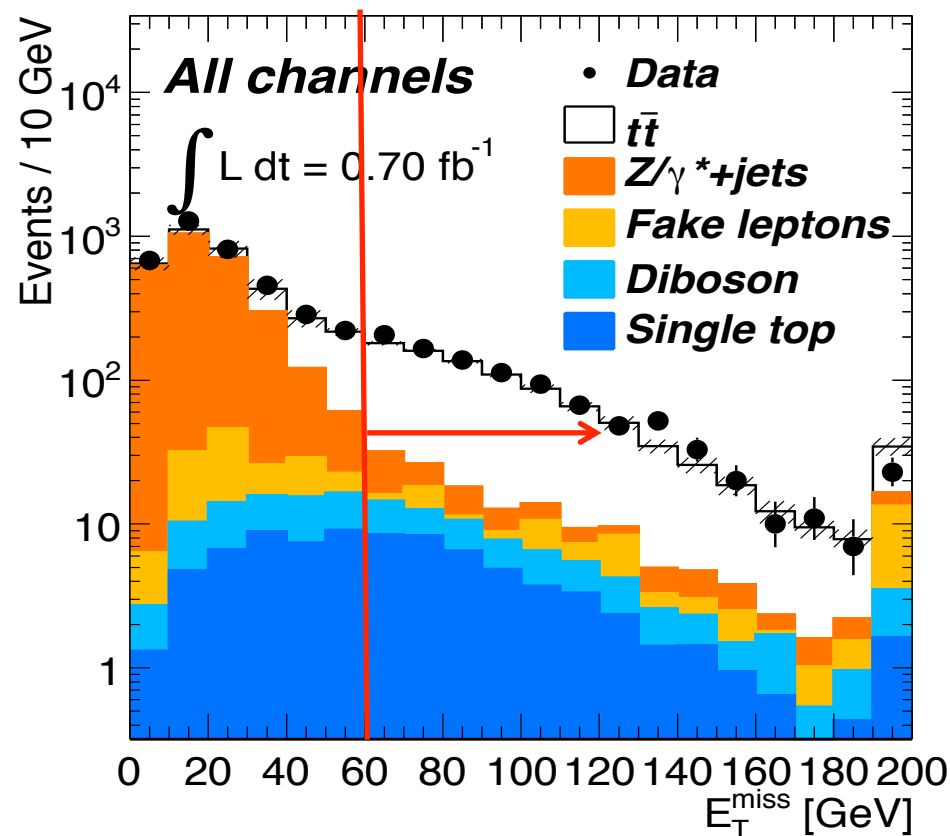
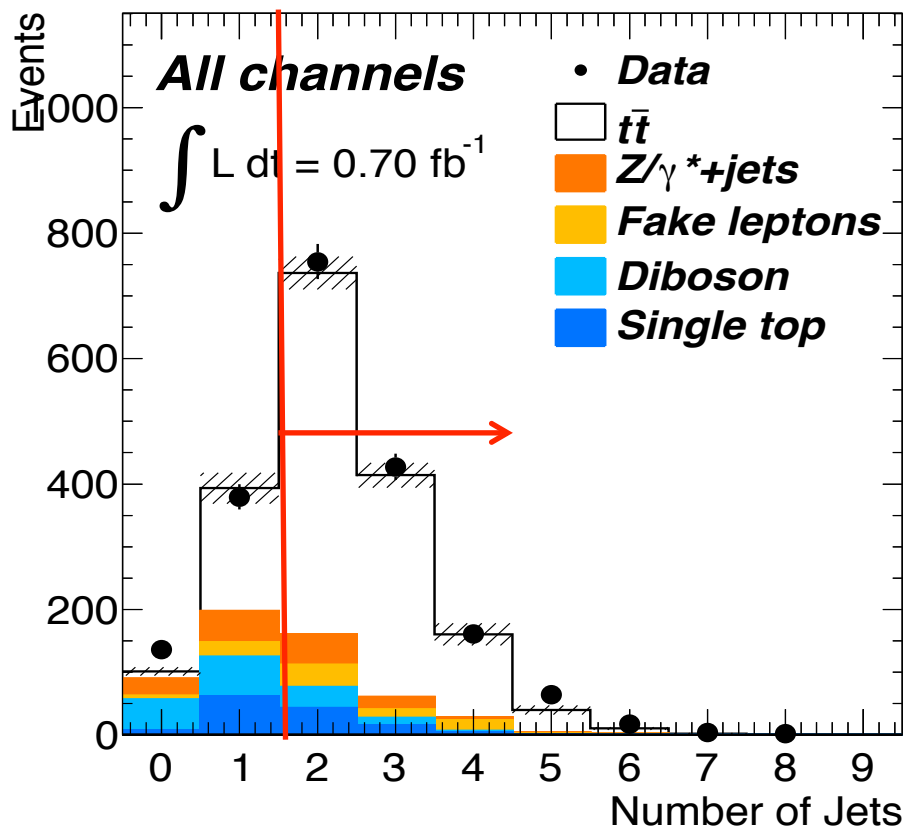
Backgrounds due to detector effects



Backgrounds that have similar event topologies (two leptons, neutrino)



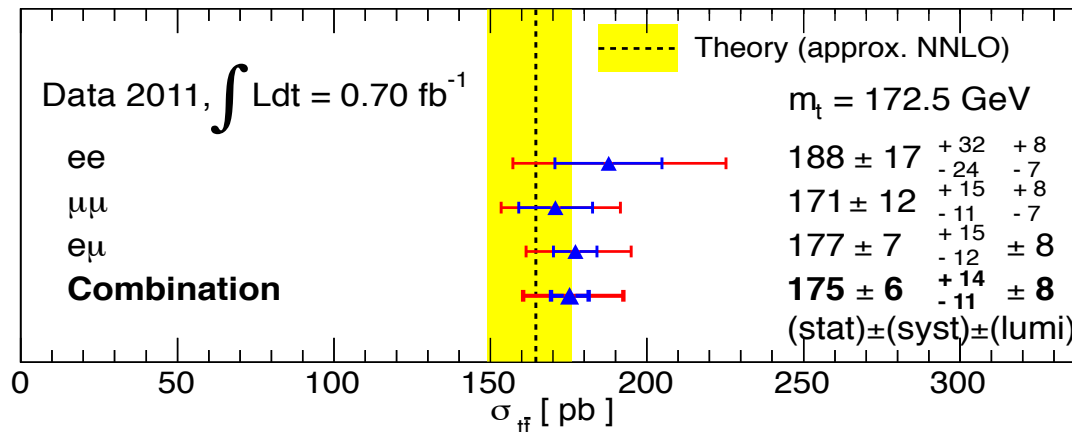
Signal region plots



非常に純度の高いトップクォーク対生成信号のサンプル 83%
標準模型の予言の分布と精度の範囲内で一致

Cross-section extraction

	ee	$\mu\mu$	$e\mu$
Drell-Yan+jets (DD)	$4.0^{+2.5}_{-1.2}$	$14.4^{+5.4}_{-4.2}$	-
Drell-Yan($\rightarrow \tau\tau$)+jets (MC)	4.9 ± 2.6	11.0 ± 5.0	42.5 ± 16.1
Fake leptons (DD)	2.5 ± 1.9	0.3 ± 0.6	44.0 ± 24.0
Single top (MC)	$6.4^{+1.2}_{-1.1}$	$16.0^{+1.9}_{-2.2}$	41.1 ± 5.5
Diboson (MC)	5.9 ± 1.0	$8.7^{+1.2}_{-1.5}$	32.9 ± 4.9
Total (non $t\bar{t}$)	23.6 ± 4.4	50.5 ± 8.4	160.5 ± 34.1
$t\bar{t}$ (MC)	124.0 ± 17.2	$241.3^{+14.5}_{-17.9}$	745.5 ± 41.8
Total expected events	147.6 ± 17.8	$291.8^{+16.6}_{-19.9}$	906.6 ± 53.9
Observed events	165	301	963



$\delta\sigma/\sigma < 10\%$

Consistent with SM prediction (165^{+11}_{-16} pb)

Uncertainty estimation

1. Data statistics (3%)

- Poisson error

2. Luminosity (4%)

- Denominator of x-sec
- Background estimation

3. Modeling in simulation (4%)

- X-sec prediction for background processes
- Acceptance dependence of choice of a set of PDF

4. Detector performances (5%)

- Uncertainty on performance measurements

5. Data-driven background estimation (2%)

- Fake rate evaluation

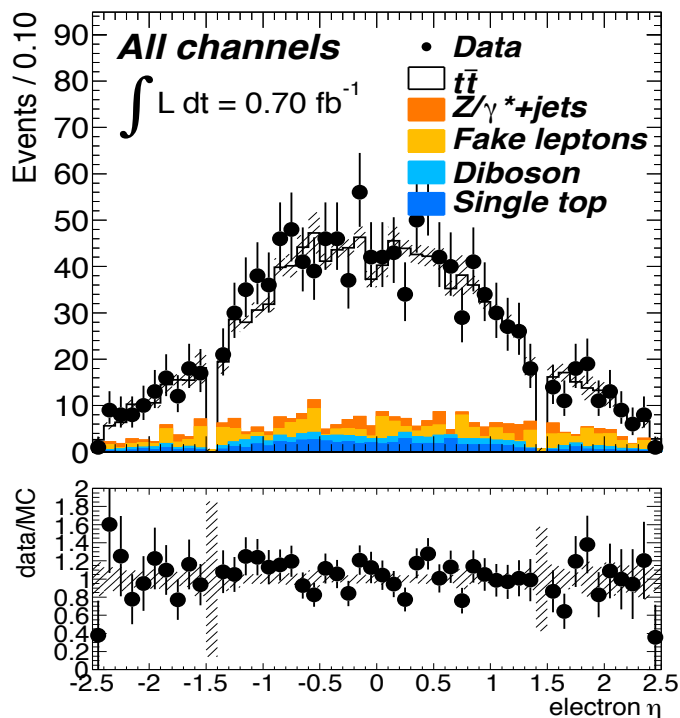
$$\sigma_{t\bar{t}} = \frac{N_{\text{data}} - BG}{A\mathcal{L}}$$

Signal region plots

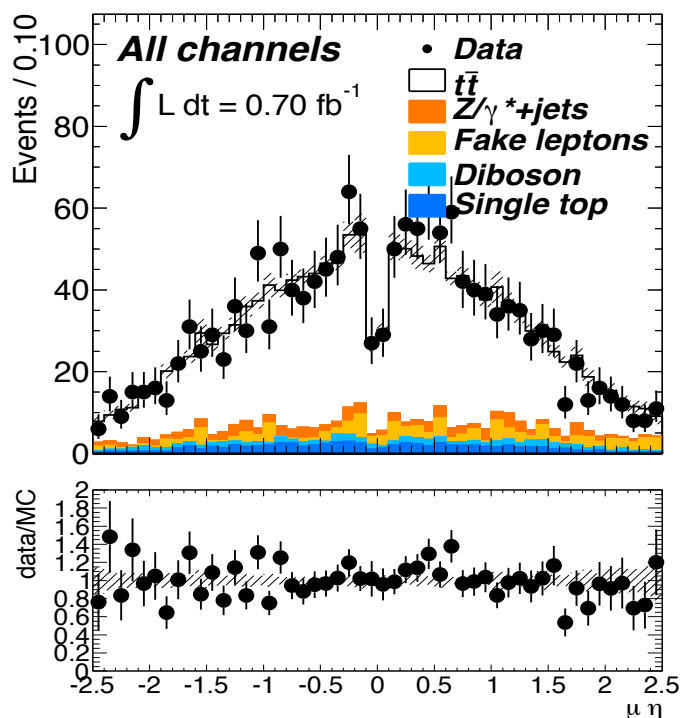
Lepton & jet η distributions

– PDF, top quark mass

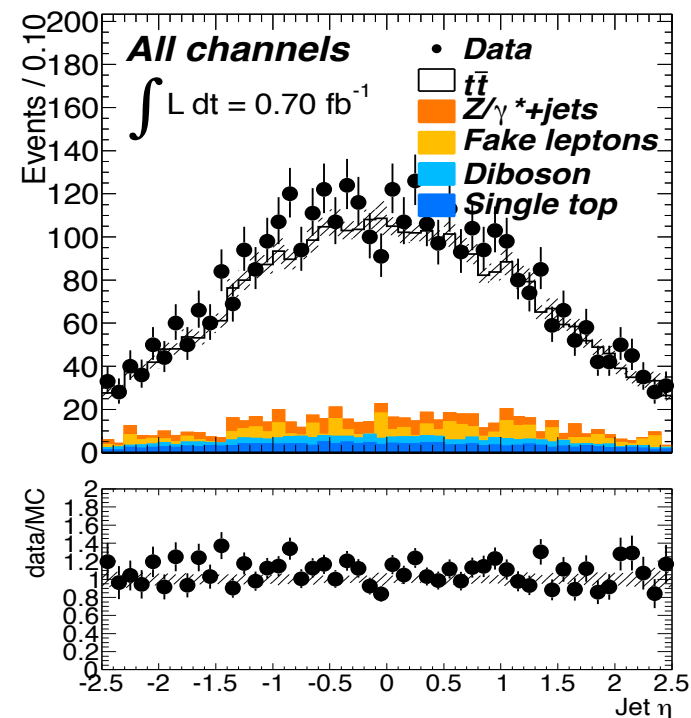
Electron η



Muon η



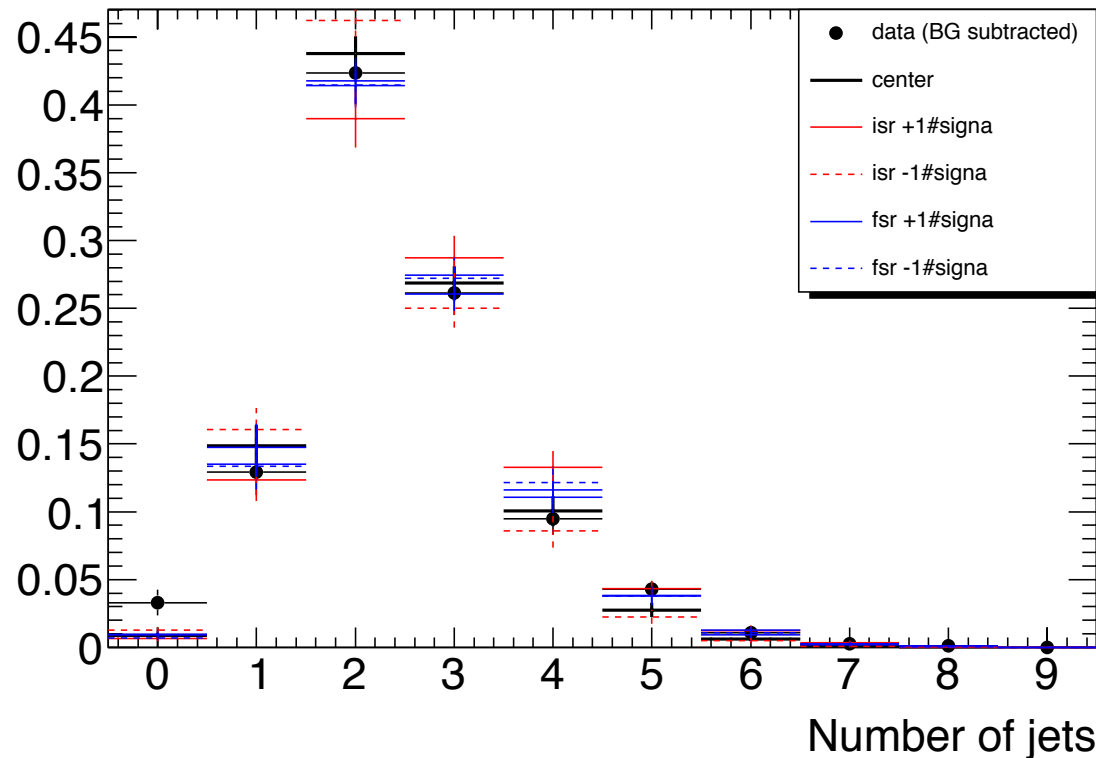
Hadron jet η



jets distribution in ttbar

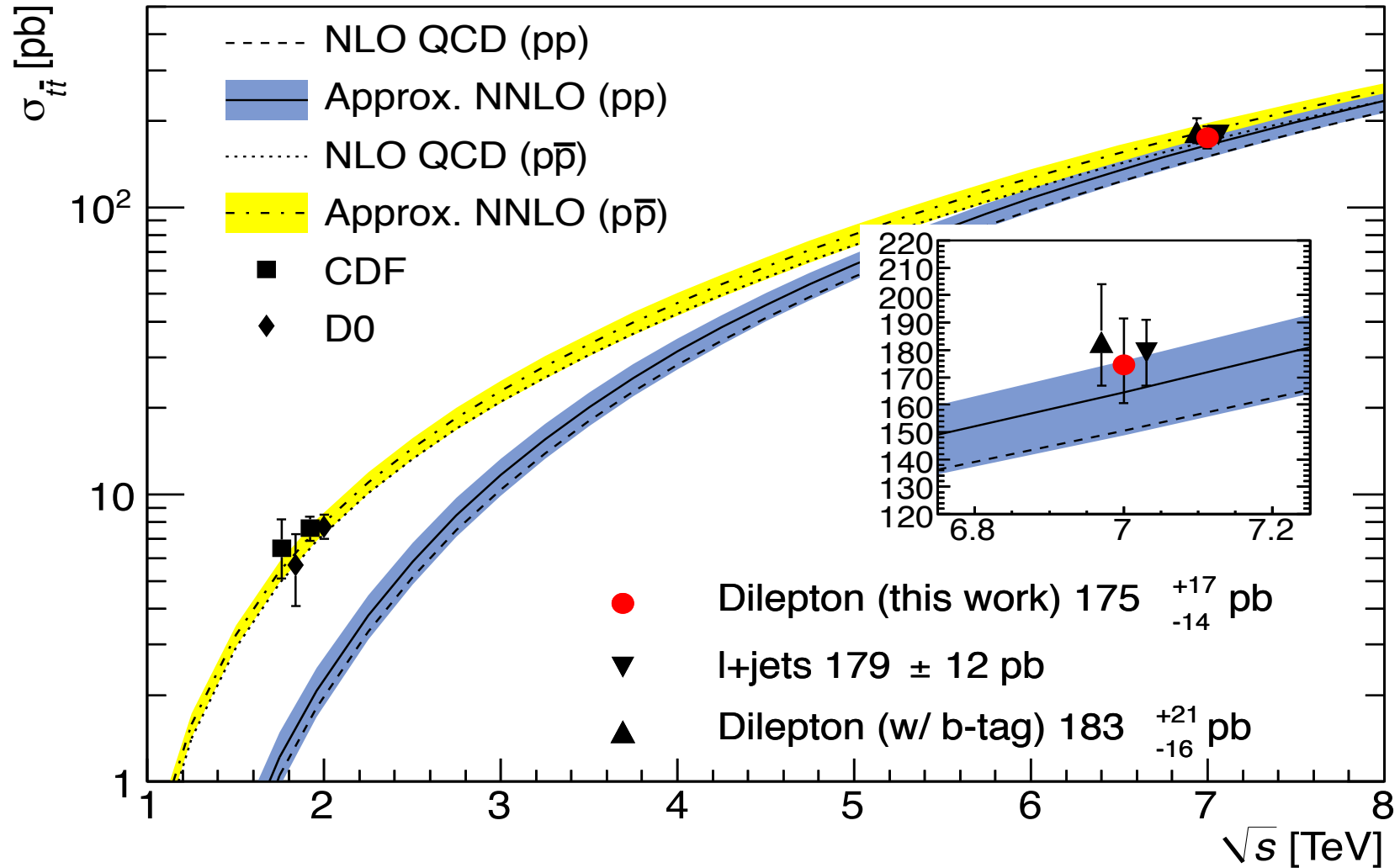
QCD parameters (Λ_{QCD} , cut-off for p.shower)

– Varied with range compatible to their uncertainty



The current P-QCD & EW theory (SM) gives well-consistent description of ttbar production at 7 TeV.
More tuning will enable us interesting study in ttbar + high jet multiplicity region

Comparison with Tevatron



Summary 1

初のトップ対生成断面積の精密測定結果 (10%)

- ダイレプトン終状態に注目することで、soft-QCD 背景事象を効果的に抑制
- 検出器の理解を進めることで、実機の評価に基づく断面積評価を実現

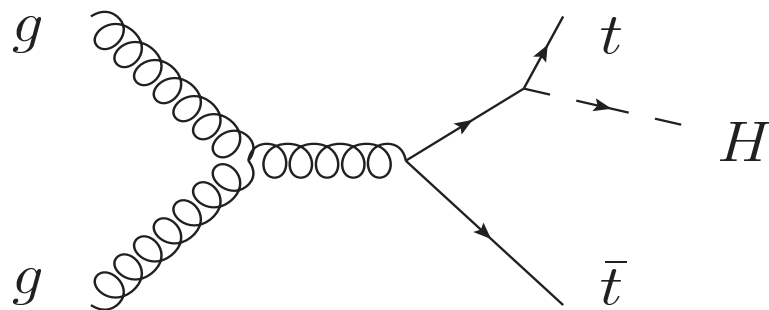
$$\sigma_{t\bar{t}} = 175 \pm 6(\text{stat.}) \begin{matrix} +14 \\ -11 \end{matrix} (\text{syst.}) \pm 8(\text{lumi.})$$

7 TeV 陽子・陽子衝突中のトップクォーク対生成事象が現在の SM でよく記述されていることを実験的に証明

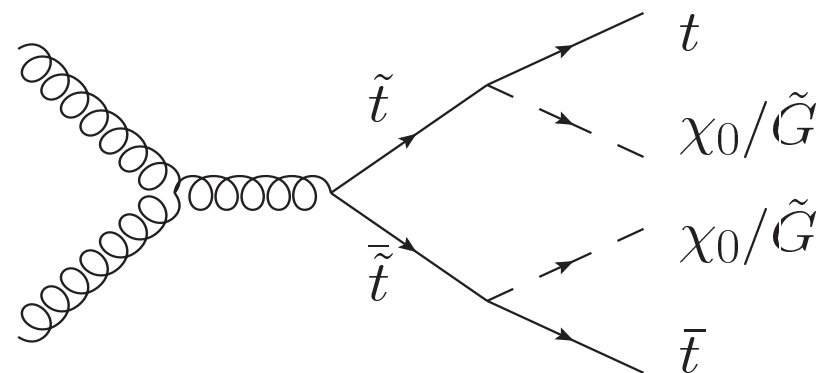
- PDF, strong coupling constant, top mass, BF of top decay

Summary 2

トップクォークをプローブとした“質量起源の解明”
に対して重要な基礎を築いた：
“tt+jets” や “tt+Missing- E_T ”
with more data in 2012 (15fb^{-1} , 8 TeV)



Higgs 生成 (tt + jets, 0.1pb)

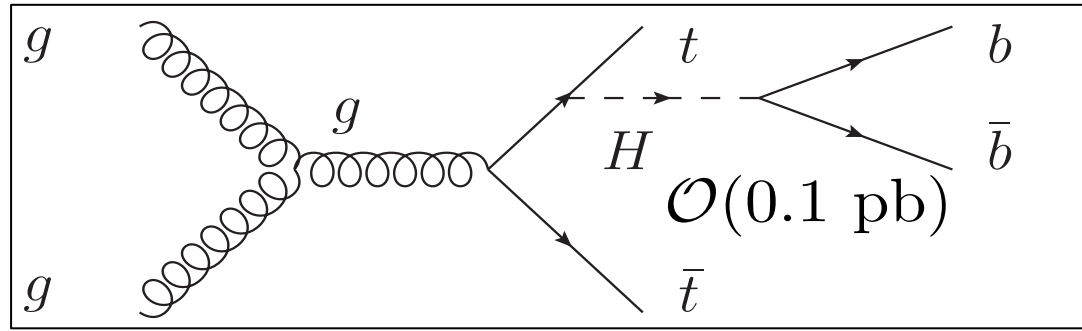
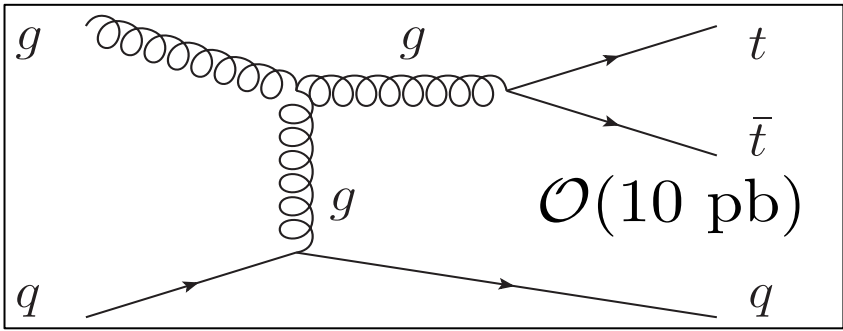


SUSY 生成 (tt + Missing E_T , 0.1pb)

Top pair + jets

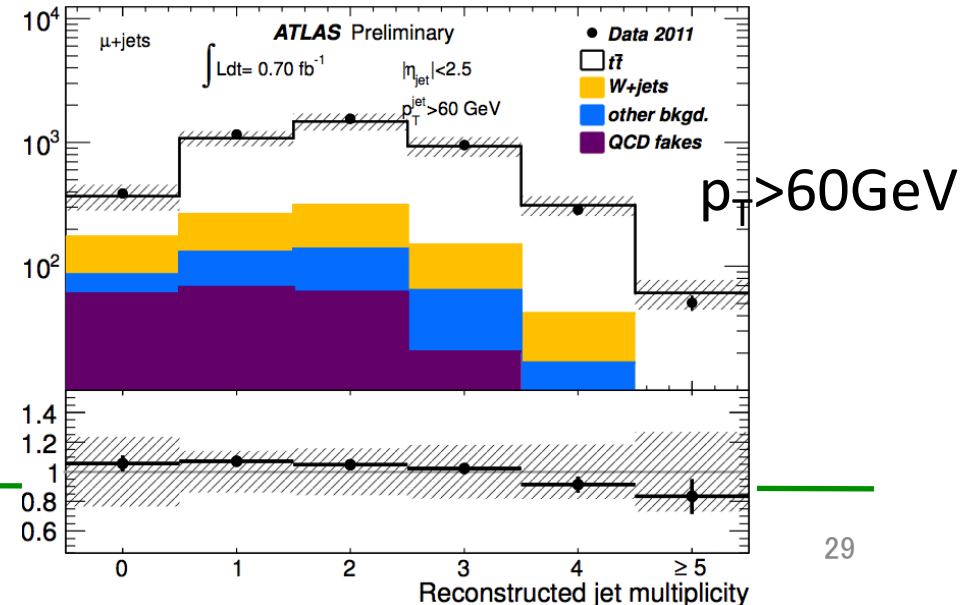
#jets distributions in top-pair productions

- ISR + Higgs(?)



- (1) Exactly one lepton (e/m)
- (2) large $m_T(W)$,
- (3) #jets ≥ 4 with $p_T > 25$ GeV, (one of the jets b-tagged)

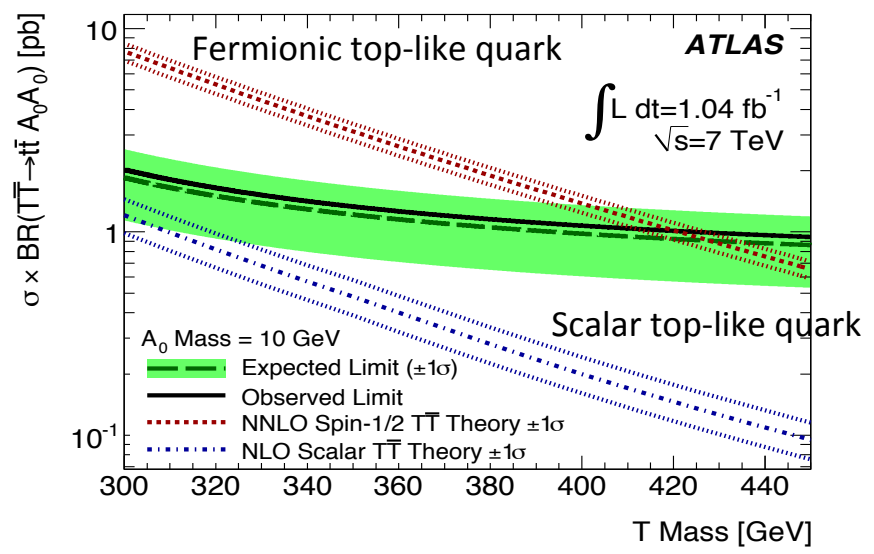
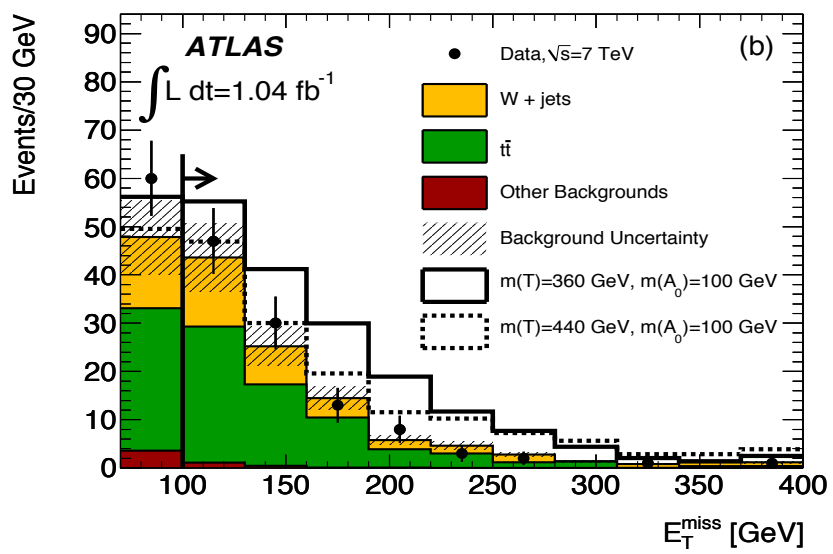
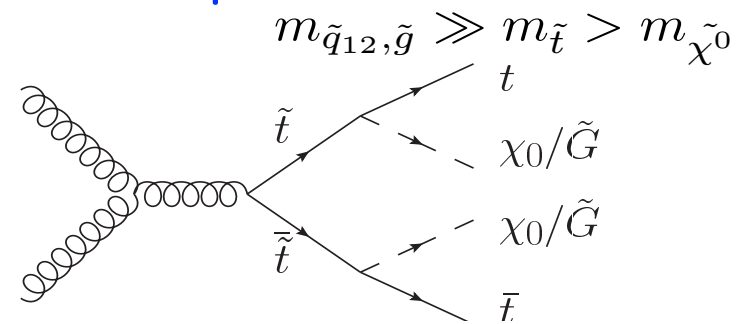
- Understand detector performance
- Tune ISR related parameters (Λ_{QCD}) and reduce the uncertainties



Top pair + Missing ET

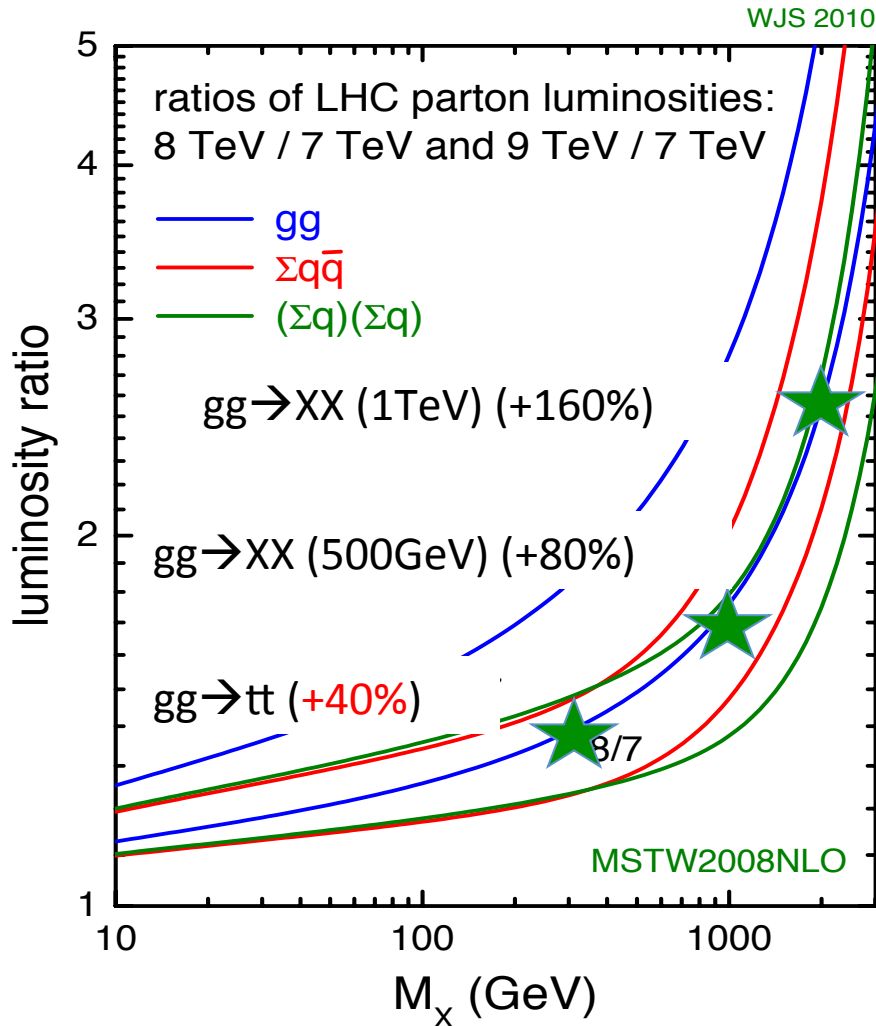
tt events (lepton + jets) + “additional Missing E_T”
 – Top-like quark decaying t + undetected particle

- (1) Exactly one lepton (e/m),
- (2) large m_T(W)
- (3) #jets ≥ 4 with (one of the jets b-tagged)
- (4) Extraordinary Missing ET > 100 GeV

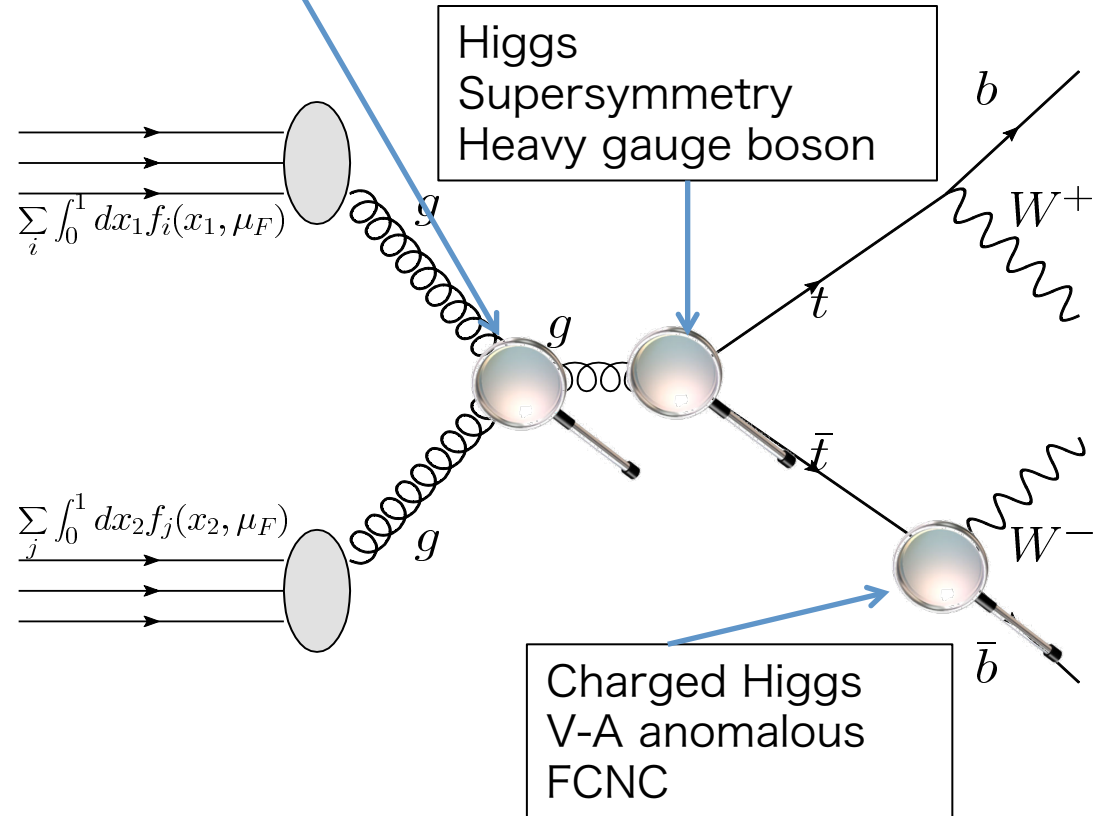


Fermionic top-like new quark pair-production is excluded up to O(400 GeV)
 Stop pair-production can be reached with 10 times more data in 2012

2012 with 8 TeV & 15 fb⁻¹



Parton Distribution Function
Strong coupling constant



おまけ

基本的なサイクルをすることができてラッキーでした

- 検出器を触って
(作って&動かして&校正して)
- その性能を理解して
- 自分が面白いと思う
物理測定につなげる



“データをとって” “自分で解析する” ことの面白み

LHC-ATLAS 実験で活躍するために気をつけたこと

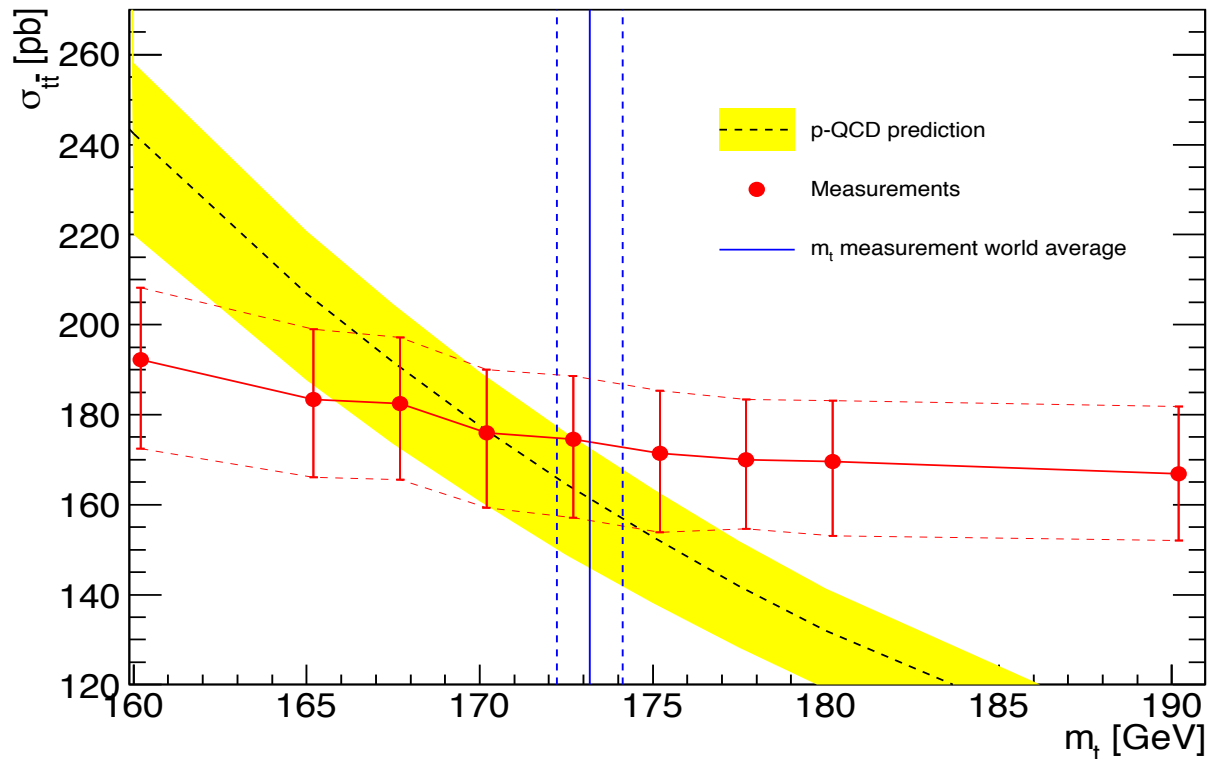
- 素早いアクションでグループをリード
- やったことをどンドングループで発表 (自慢) して地位を確立

活躍するのは若手 (博士大学院生 & ポスドク) で
測定器運転でも物理解析でも活躍機会はいくらでもある

おしまい

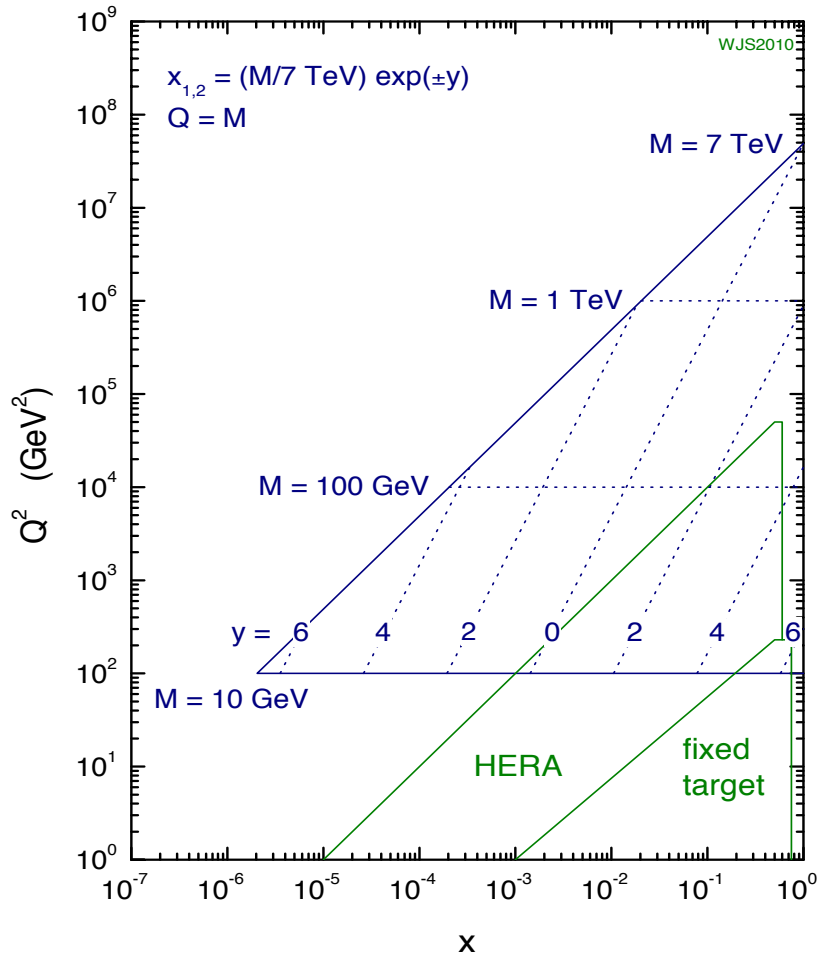
Top mass

- Measurement is robust for mass difference.
- The measurements will match the best with the SM if the $m_{\text{top}} = 170$ GeV

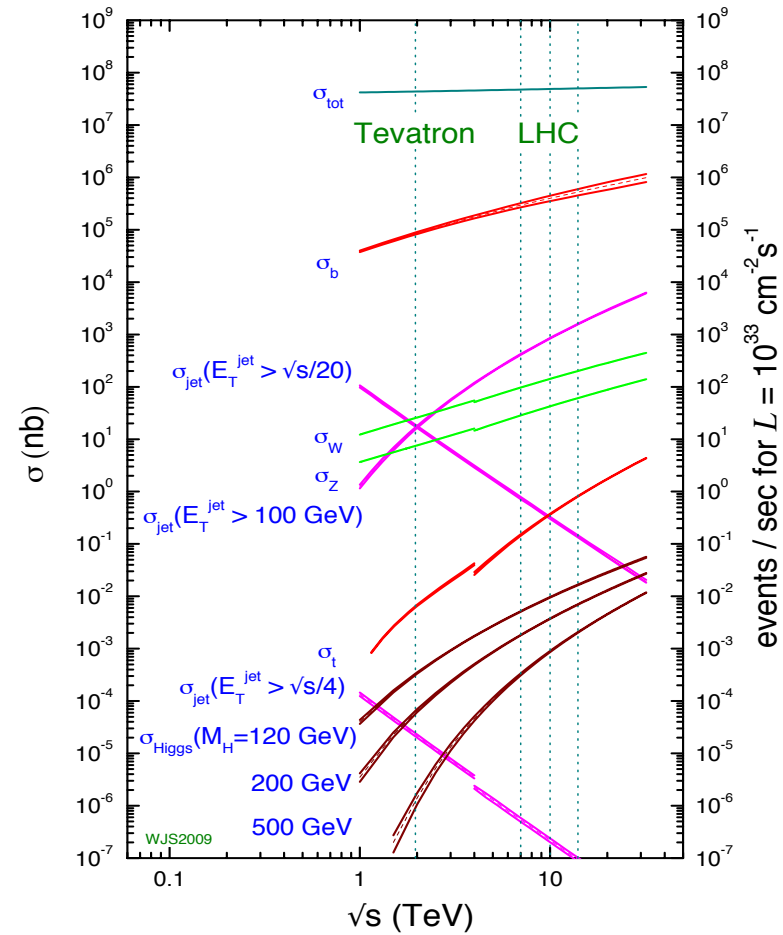


Cross-section summary

7 TeV LHC parton kinematics



proton - (anti)proton cross sections



<http://projects.hepforge.org/mstwpdf/>

x, Q^2 parameter space for $t\bar{t}$ production (NLO)

