

LHC 陽子散乱の理解と QCD: トピックオーク, 新物理探索を例にとって

名古屋大学 理学研究科 物理学教室
素粒子宇宙物理学専攻 談話会
2017年 12月 6日
神戸大学理学研究科
粒子物理研究室 山崎祐司

The highest-mass dijet event
passing the angular selection
(Event 753275626, Run 302347):
the two central high- p_T jets
have transverse momenta
of 3.13 and 2.98 TeV,
they have a $|y^*|$ of 0.66 and
their invariant mass is 7.5 TeV.



Run: 302347

Event: 753275626

2016-06-18 18:41:48 CEST

LHC (Large Hadron Collider) at CERN*

- 標準模型の予言する質量起源のヒッグス粒子，標準模型を超える粒子・相互作用の発見が目的
- 世界最大，最高エネルギーの加速器
- ATLAS (日本含む)，CMS 実験

*CERN: 欧州原子核研究所

周長27km

(電子・陽電子衝突実験
LEP トンネルの再利用)

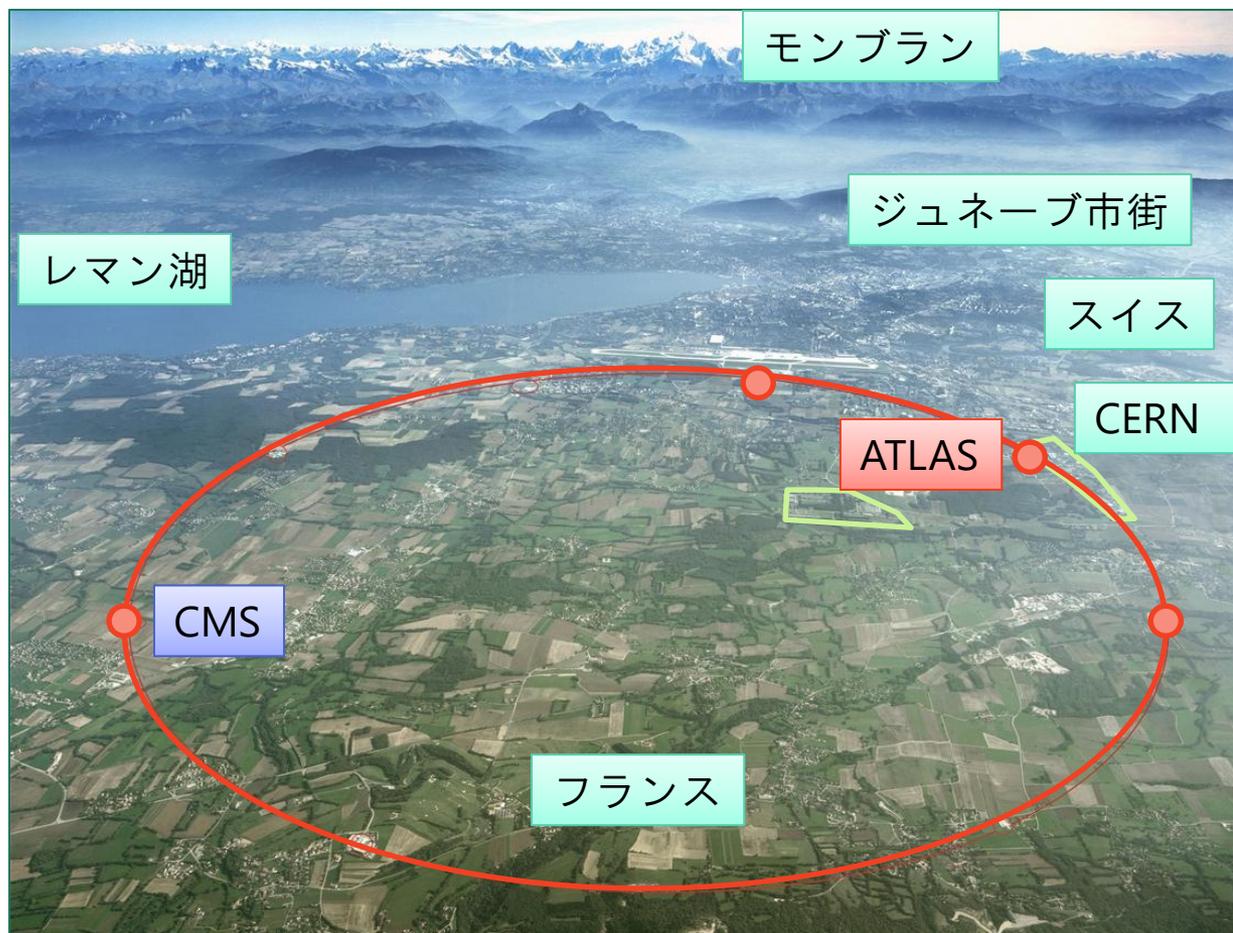
7TeV = 7 兆電子ボルト
(1TeV = 10^{12} eV) の
陽子同士の衝突
重心系エネルギー14 TeV

← 2010-12 年は 7/8 TeV

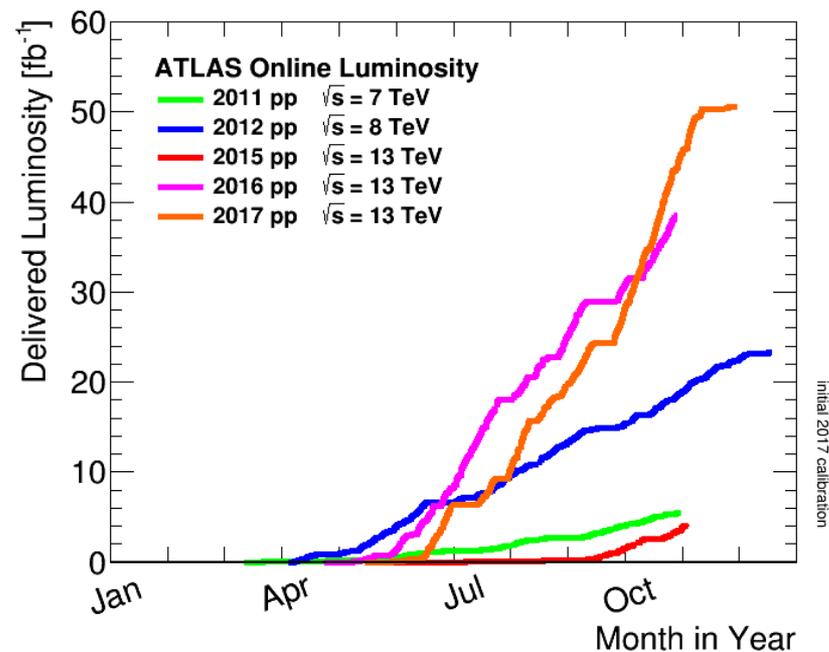
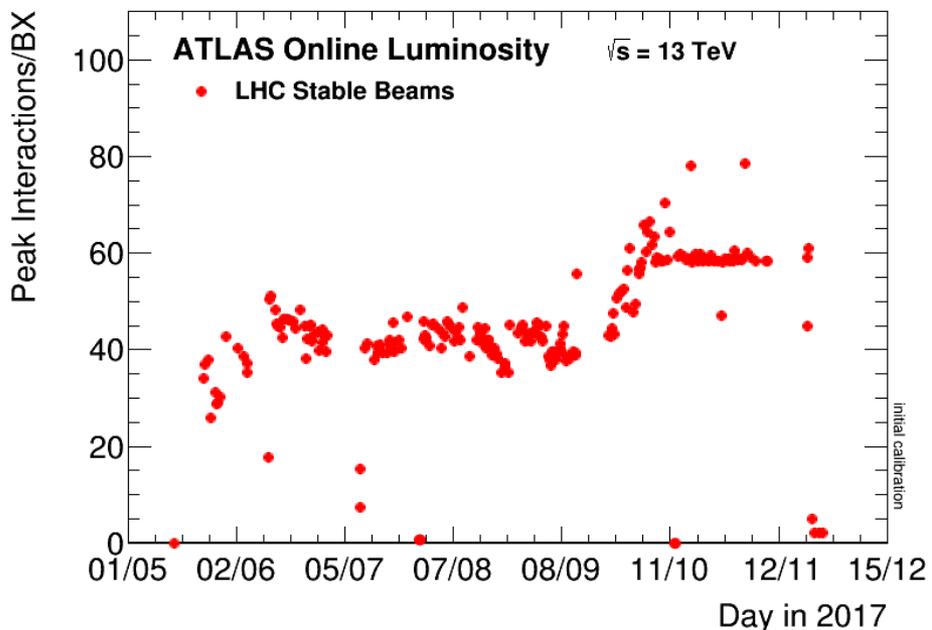
→ 2015-2018 (Run 2)

13 TeV

40MHz 衝突



LHCの運転状況



- 11月は後半 5 TeV runなど特殊 run, 12/4 よりメンテナンス
- 8月ごろは若干不調であったが, バンチ衝突あたりの平均衝突数を上げることで今年目標45/fb達成
 - 2017年は, 実験にやさしくない run...
- 2018年までに 120 fb^{-1} 以上で run2 目標達成

本日の内容

集中講義の内容：高エネルギーコライダー実験と QCD

一方 LHC はルミノシティを順調にためている

測定をどう改善していくか？

トッパークォーク，電弱，BSM の測定に当たって
QCDがどういう役割を果たすか？

- トッパークォーク質量測定
 - W 質量測定
 - SUSY マルチジェットイベント
- について，関連した話題も含めて

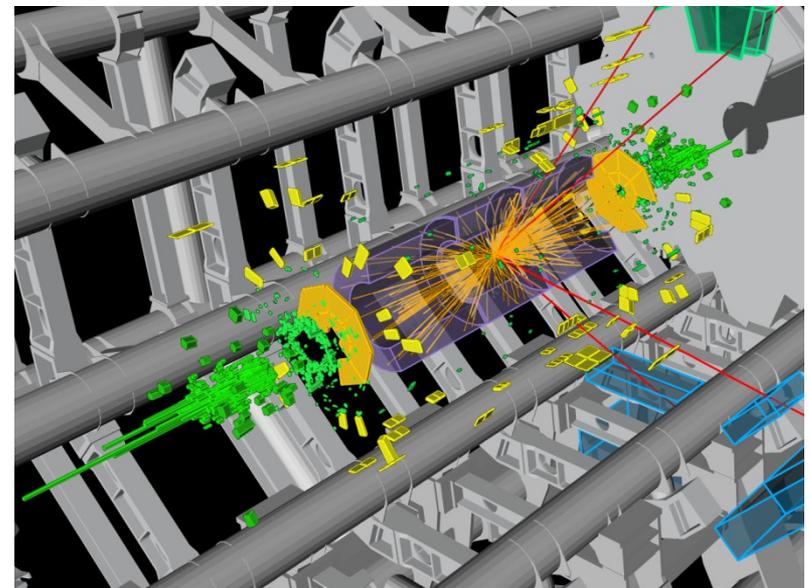
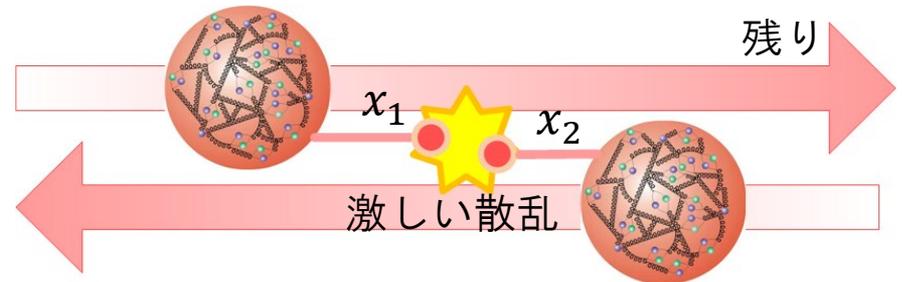
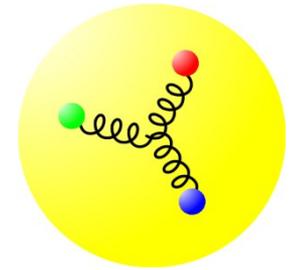
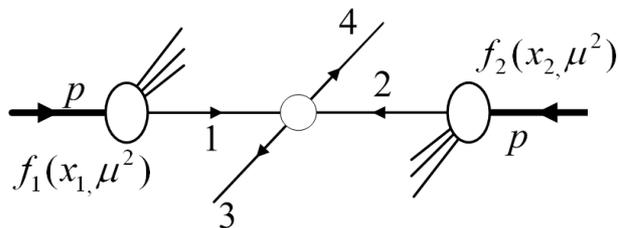
講義との重複は，ご勘弁を

LHC 実験の原理

加速器実験：
素粒子同士の衝突エネルギーで
新粒子生成

- 陽子は複合粒子
{クォーク, グルーオン}
= パarton 同士の散乱
- 残りは飛び去る

散乱断面積：
parton密度 $f(x, \mu^2)$ の積に比例
 $\sigma \propto f(x_1, p_{T1}^2) f(x_2, p_{T2}^2) \sigma(12 \rightarrow 34)$

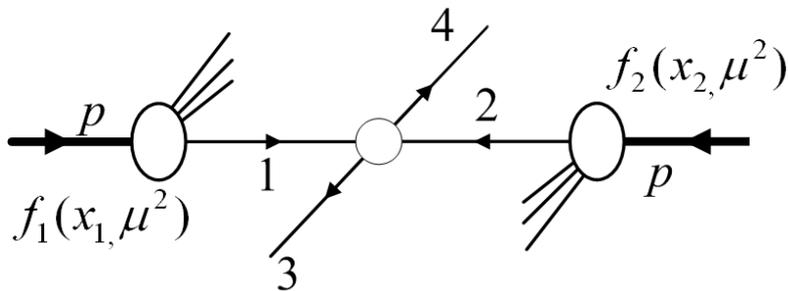


ハドロンコライダーの基礎過程

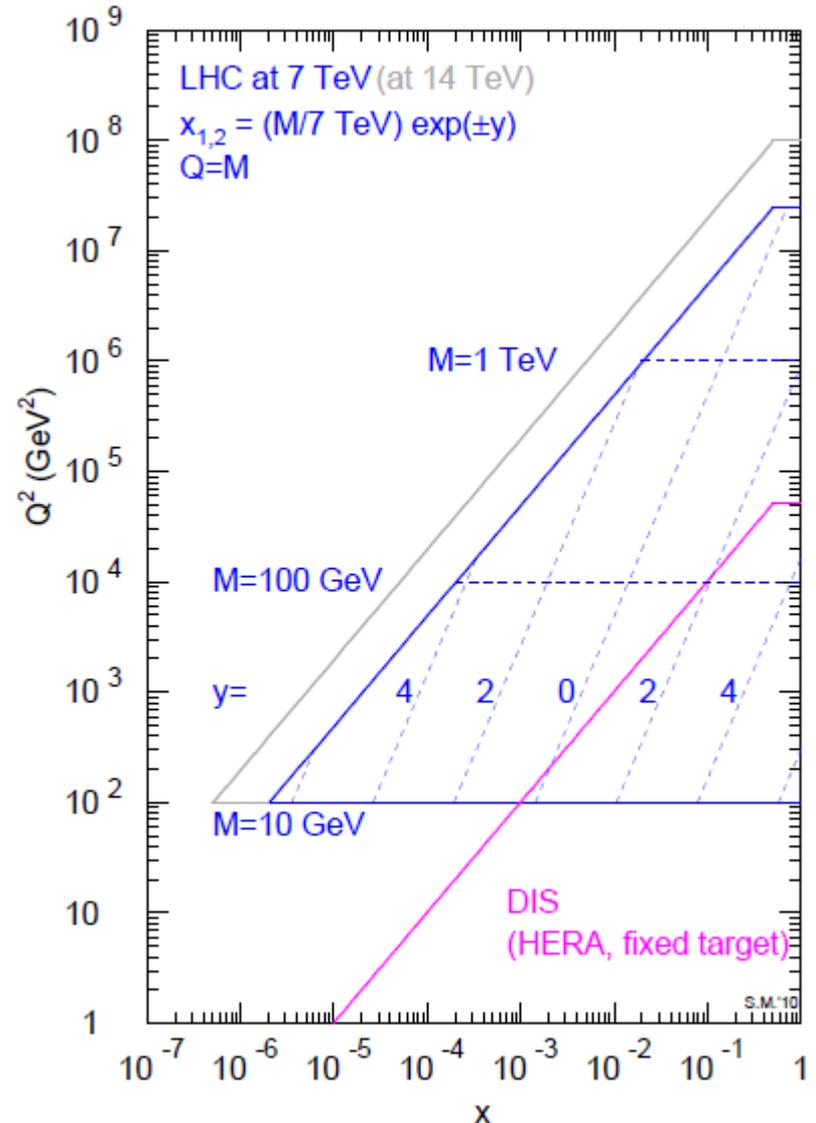
- 陽子の残り（ほぼすべて）は、前方に飛び去る
- パートン散乱の重心系エネルギー

$$\sqrt{\hat{s}} = \sqrt{x_1 x_2 s}$$
- 移行運動量 (の負数の2乗)

$$\hat{t} \equiv Q^2 \sim p_T^2$$

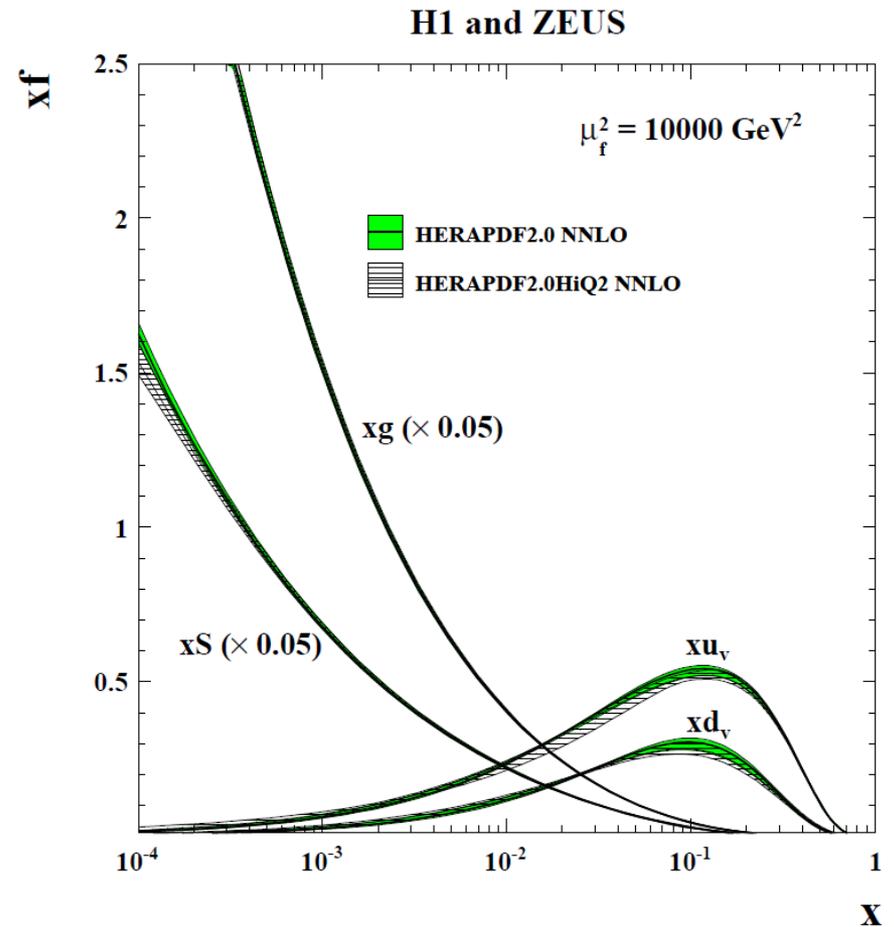
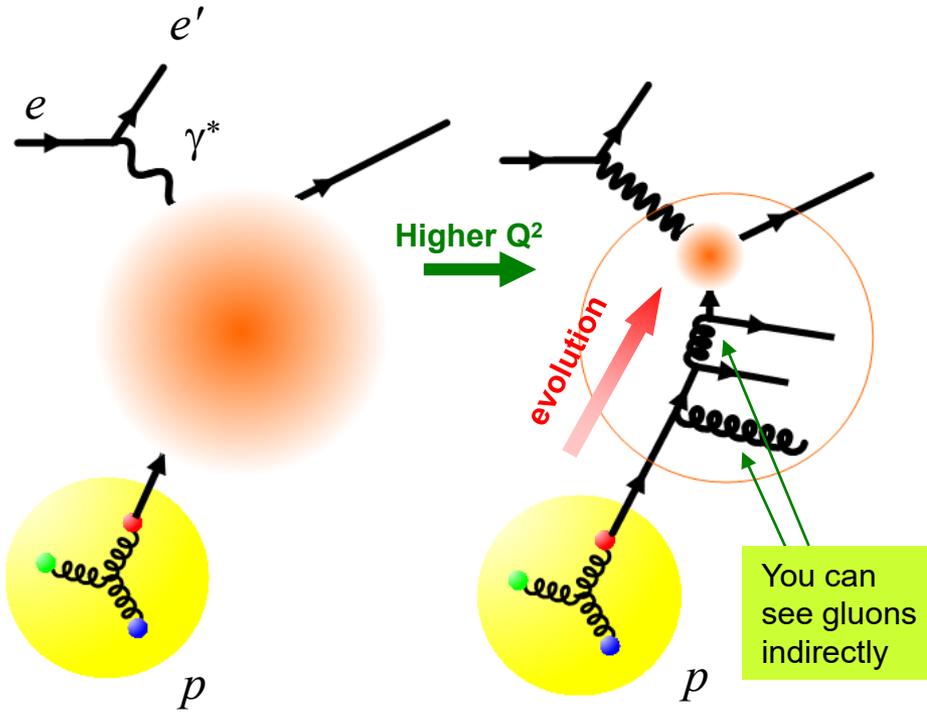


基本（再低次の摂動）は
 パートン・パートンの2 → 2 散乱



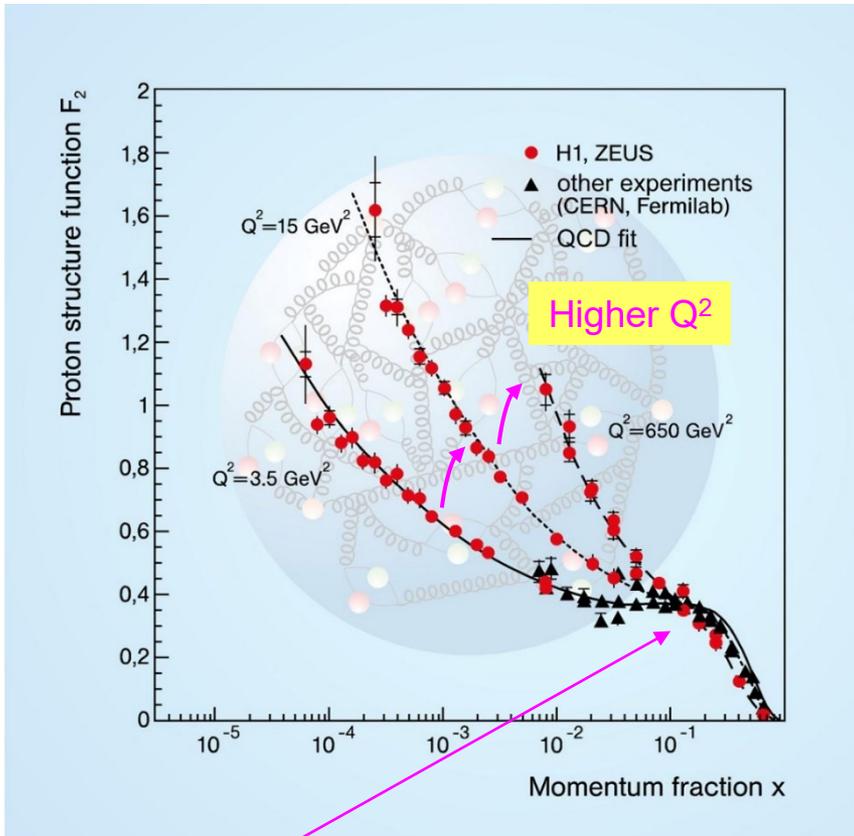
パートン密度 parton distribution function

- 電子・陽子散乱で測定
- グルーオンは scaling violation で
 - ハドロンコライダーでもチェック



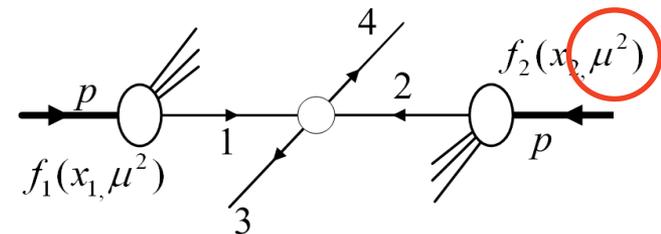
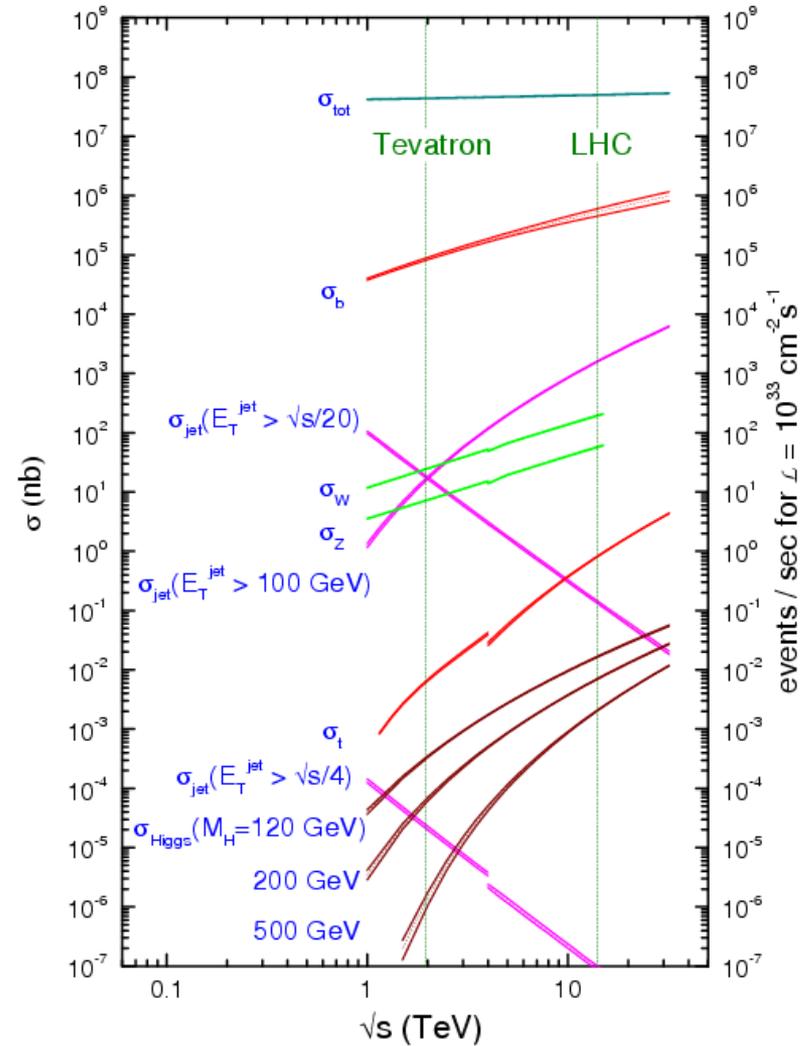
散乱断面積のふるまい

- 全断面積：緩やかに増加
- ハードな散乱：急速に増加
 - パートの増加と関連



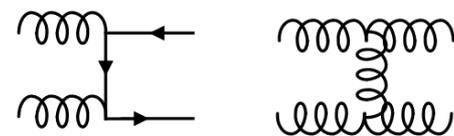
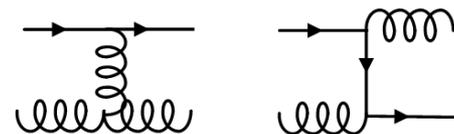
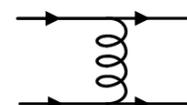
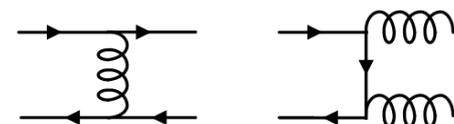
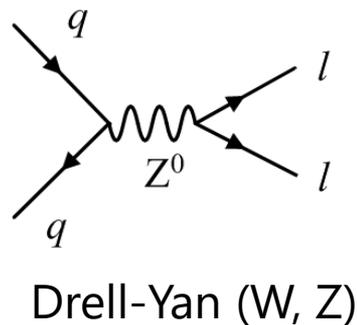
Quark density decreasing at high- x with Q^2

proton - (anti)proton cross sections

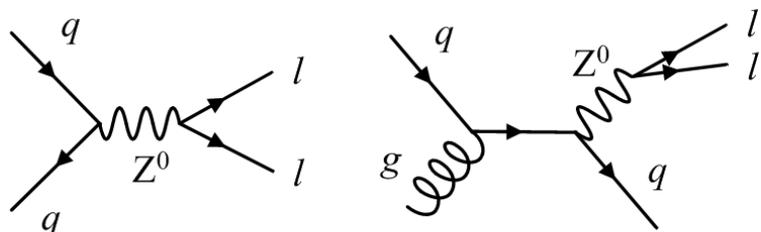


LHCでのプロセス

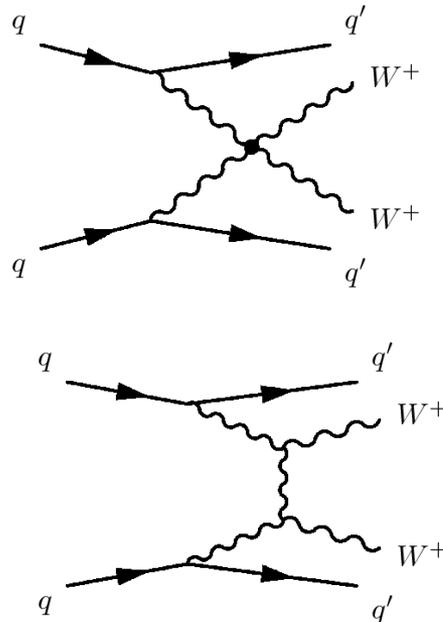
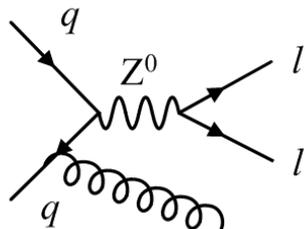
- Dijet
- W, Z (Drell-Yan)
 - W, Z+jets
- Top production (後に)
- Diboson



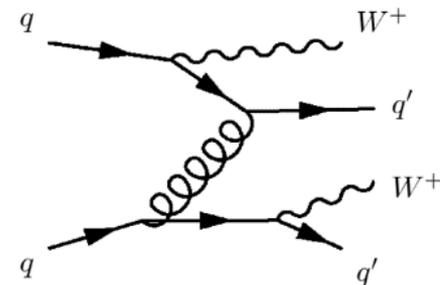
QCD 2→2 dijet



W, Z+jets



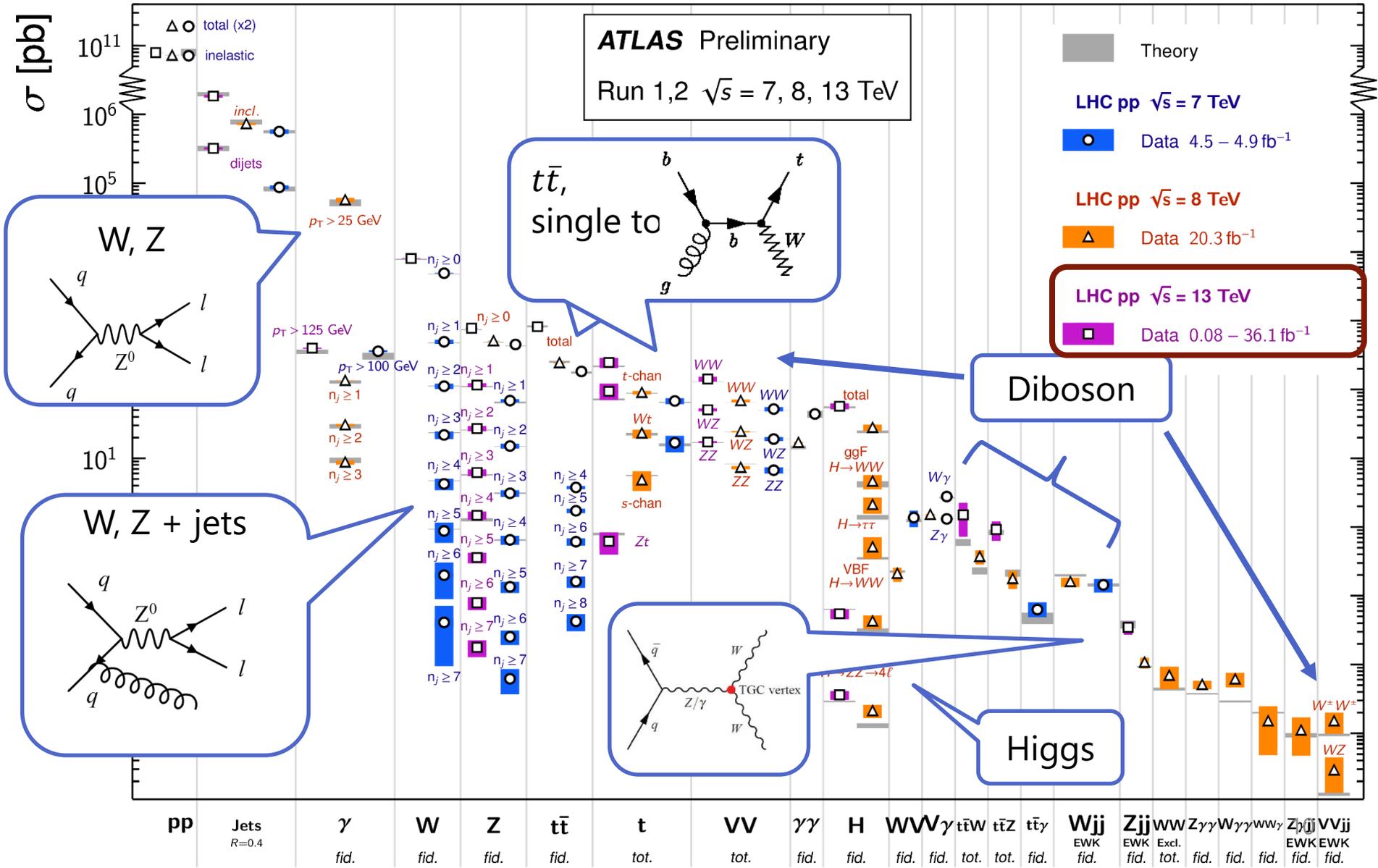
Diboson
← EW diagrams
↓ QCD diagrams



ATLAS のRun1/2標準模型測定

Standard Model Production Cross Section Measurements

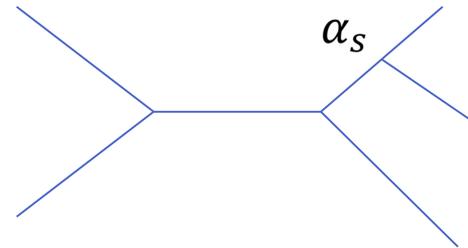
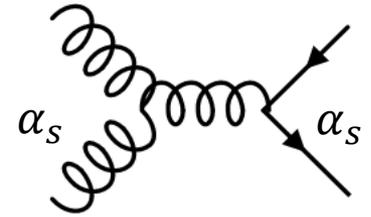
Status: July 2017



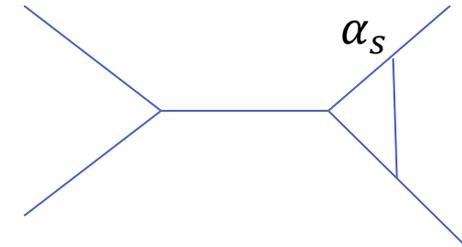
QCD Matrix Element: 高次の摂動 N(N)LO

- LO: lowest order
 - $O(\alpha^2)$ for Drell-Yan, $O(\alpha_s^2)$ for 2-jet production
- NLO: next-to-leading order
 - $O(\alpha_s^3)$ for dijets
 - 加えてループの寄与
 - 両方を加えて初めて発散が抑えられる

NLO計算の難しい理由



tree



loop
(virtual correction)

- どの $\alpha_s(\mu^2)$ をつかう？
 - $\mu = \mu_R$ renormalization scale
 - 本来計算はこの値によらないが、実際はよる

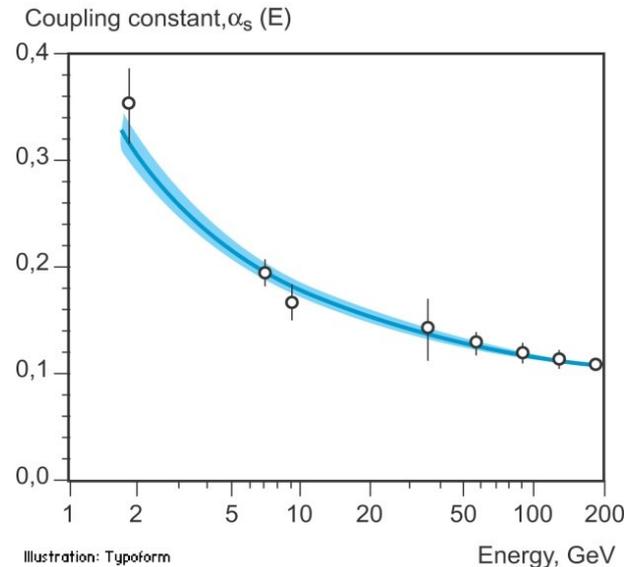
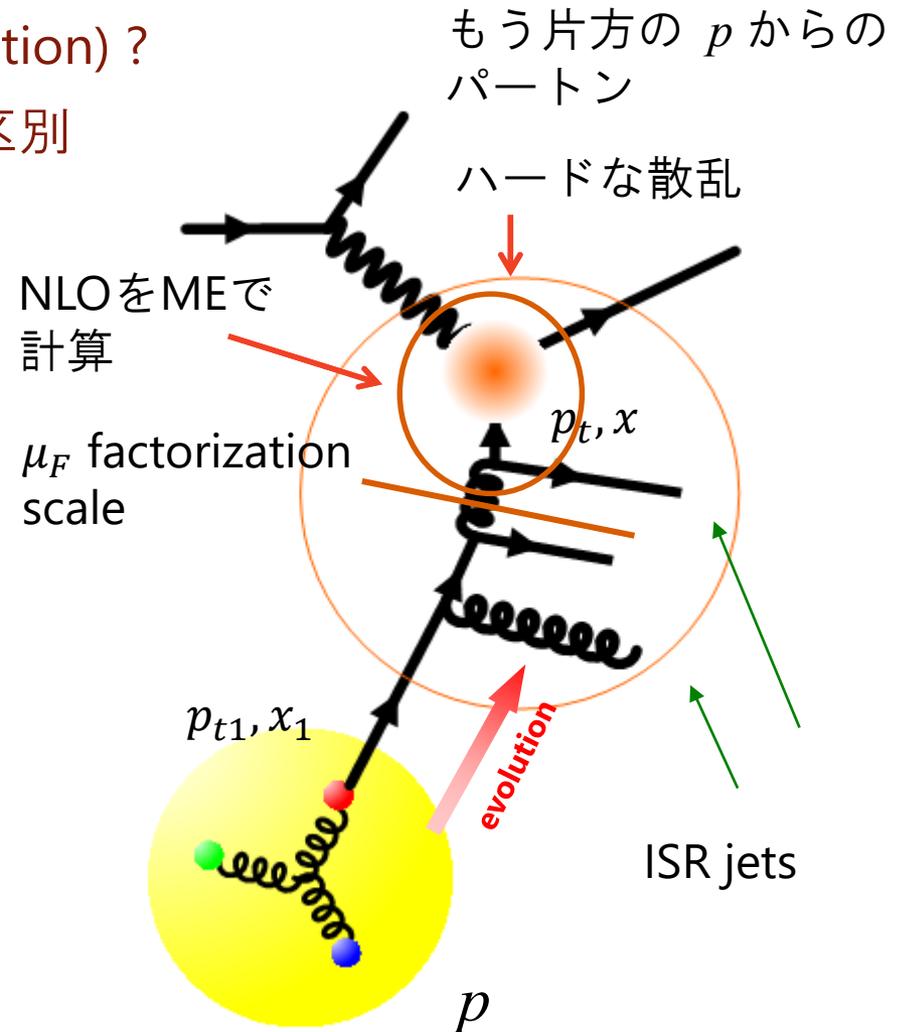
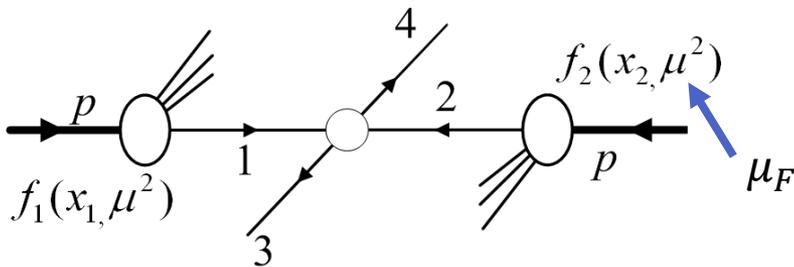


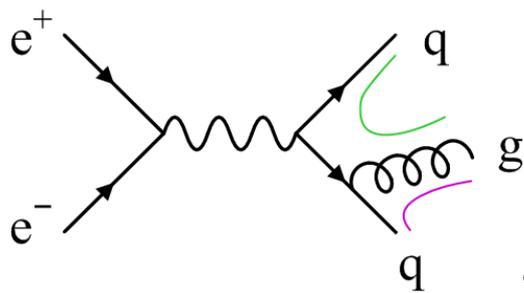
Illustration: Typoform

Factorisation

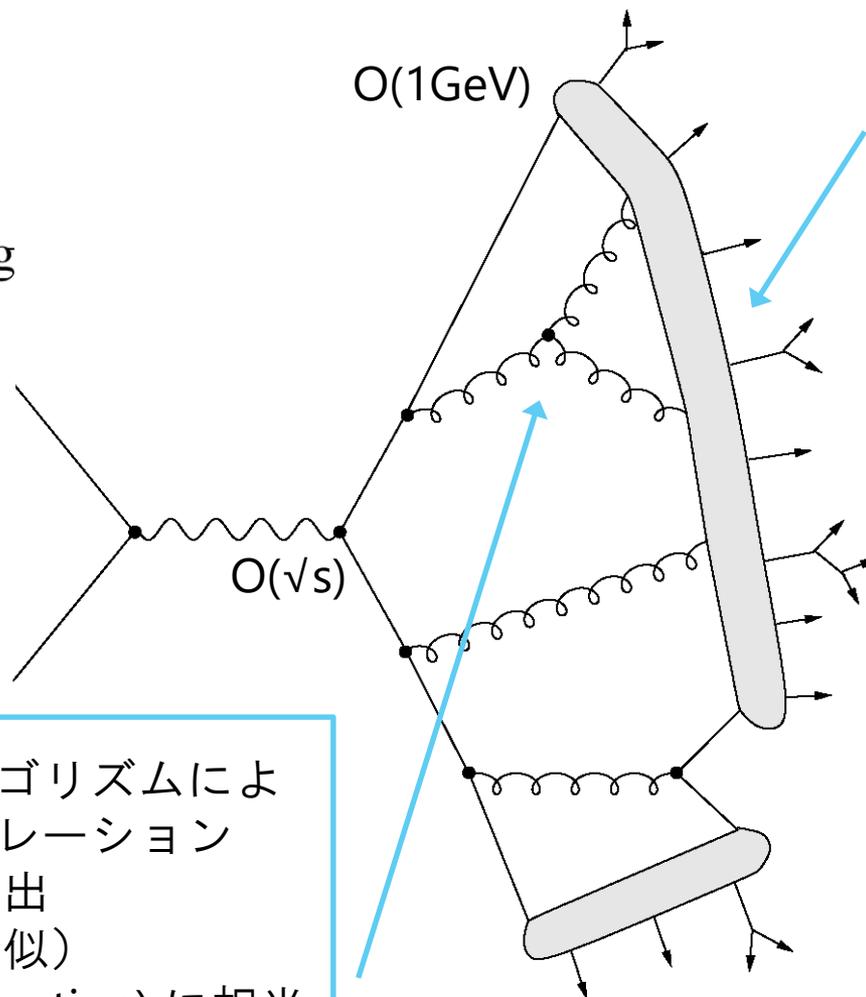
- どこから先がハードな散乱としての高次の計算？
- どこからが ISR (initial state radiation) ?
- 普通は factorization scale μ_F で区別
 - パートンの量 (PDF) は大きく変わる
- 計算結果は μ_F にもよらないはず



Parton Shower



ハードな散乱
厳密な摂動論的
QCD による計算



パートンシャワーアルゴリズムによる
モンテカルロシミュレーション

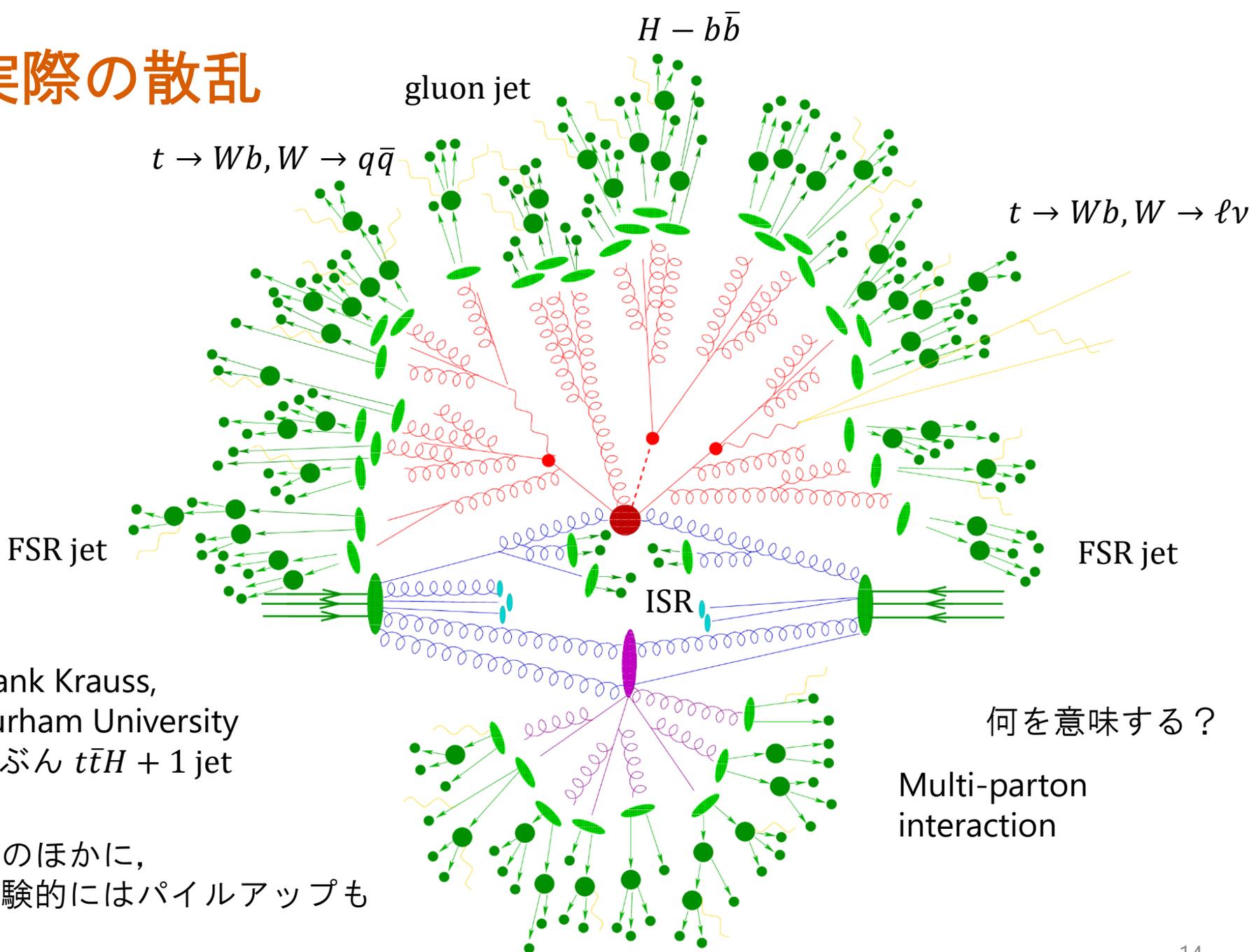
- 次々にパートンを放出
(電磁シャワーに類似)
- Leading Log (resummation) に相当
- Collinear 近似
(大角度は出せない)

非摂動的な破碎化
モデルを用いる

- String (LUND)
fragmentation
JETSET/Pythia
- Cluster
fragmentation
(HERWIG)

どの中間子が
どのパートンから
出たかは
わからない

実際の散乱



Frank Krauss,
Durham University
たぶん $t\bar{t}H + 1 jet$

このほかに,
実験的にはパイルアップも

何を意味する？

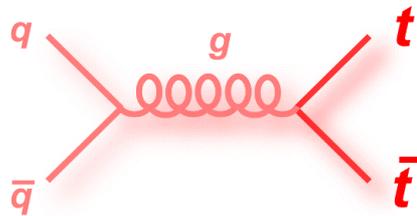
Multi-parton
interaction

トツクオークの精密測定

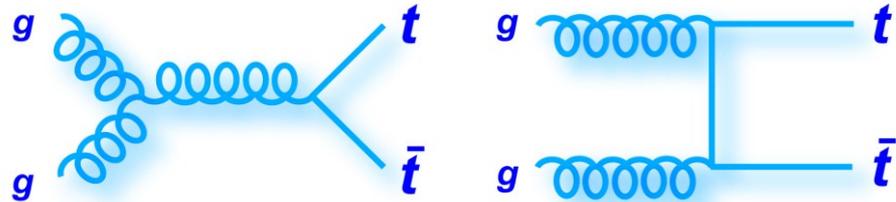
- トツクオーク生成と崩壊
- トツクオーク測定の意義
- 質量測定
- 生成断面積
- 結合定数
- Single-top 生成

Top production in hadron colliders

- EW scale より重い唯一の粒子 $m_t \simeq 173 \text{ GeV}$
- 対生成：強い相互作用



$p\bar{p}$ @ Tevatron: 7.2 pb
 ほぼ $q\bar{q} \rightarrow t\bar{t}$

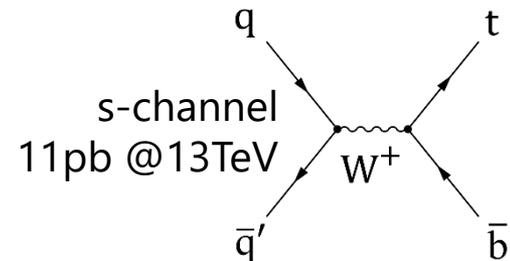
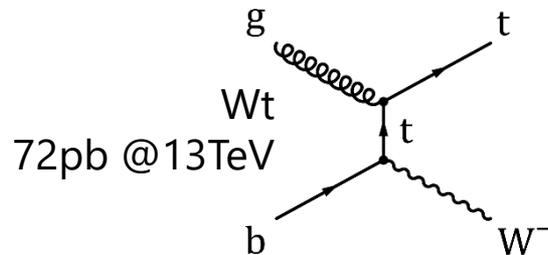
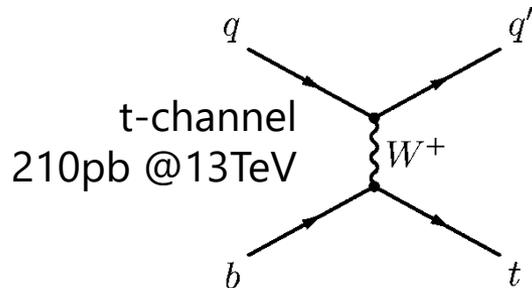


pp @ LHC: ほぼ $gg \rightarrow t\bar{t}$

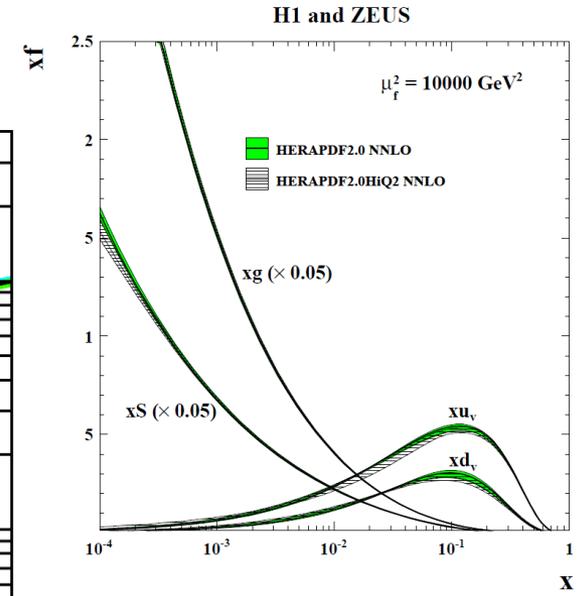
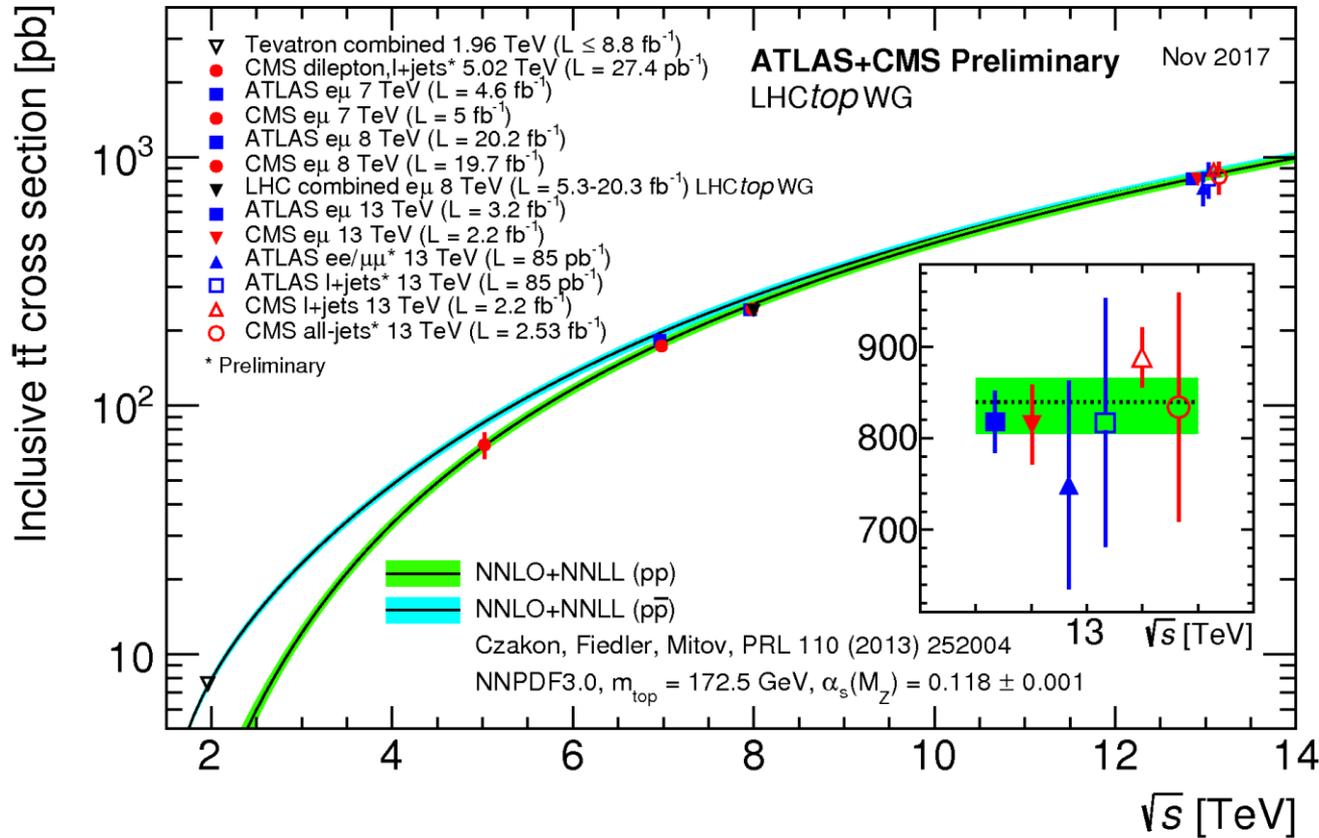
~ 820 pb @ 13 TeV
 実験あたり 4000万以上作られている
 cf. Belle > 772 millions of $\Upsilon(4s)$

- **single-top: 弱生成**

– LHC では大きな生成断面積

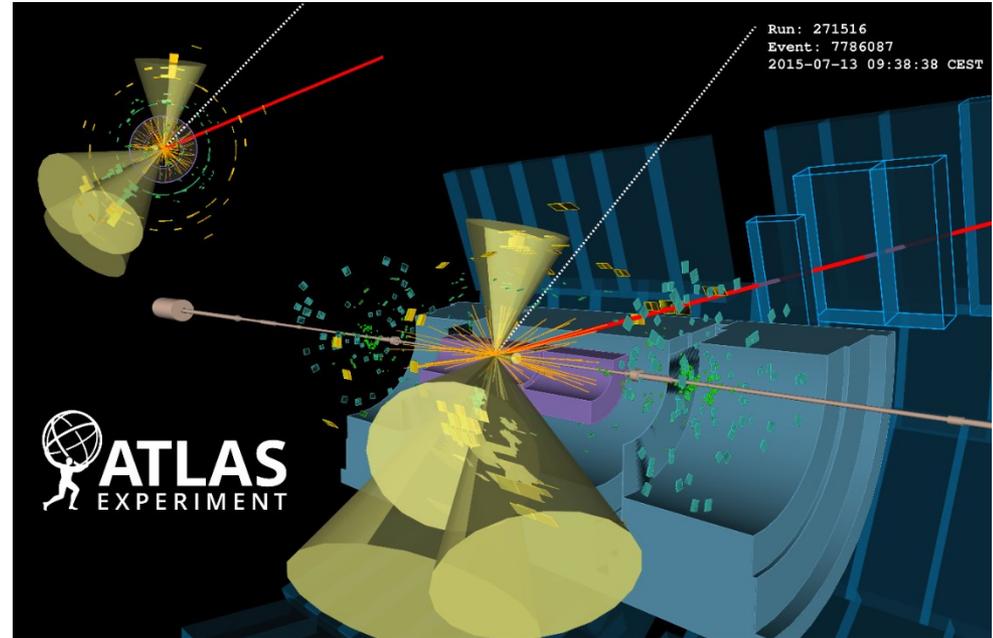


全断面積のふるまい



- 急速に増加 ← 低い運動量のグルーオンでも作れるから
- 5 TeV data from CMS from 2015 data (reference pp run for heavy ions)

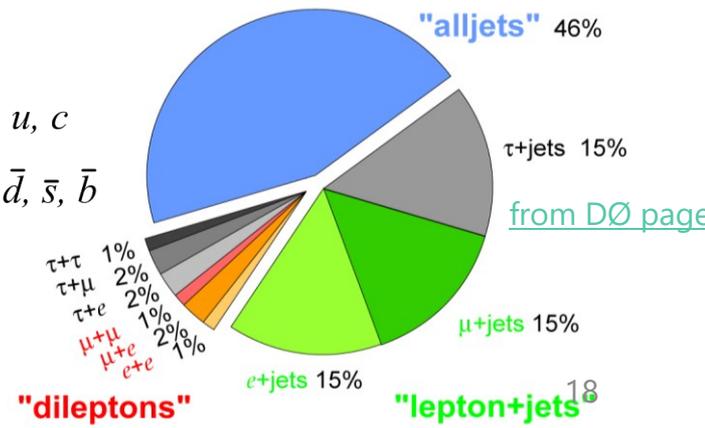
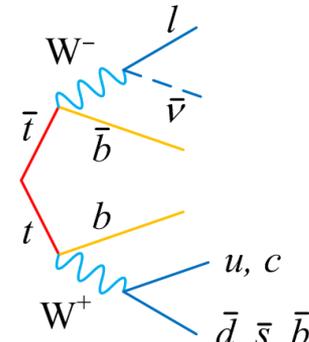
崩壊と再構成



- $t \rightarrow b + W \sim 100\%$
 - 弱い相互作用：helicity が W へ
 - 寿命短い ($\Gamma \sim 1.3 \text{ GeV}$)
ハドロン化の前に崩壊する
唯一のクォーク
 - **b** クォークの純粋なサンプル
b-tag, b-jet energy などの較正

- 対生成の再構成：3つのチャンネル

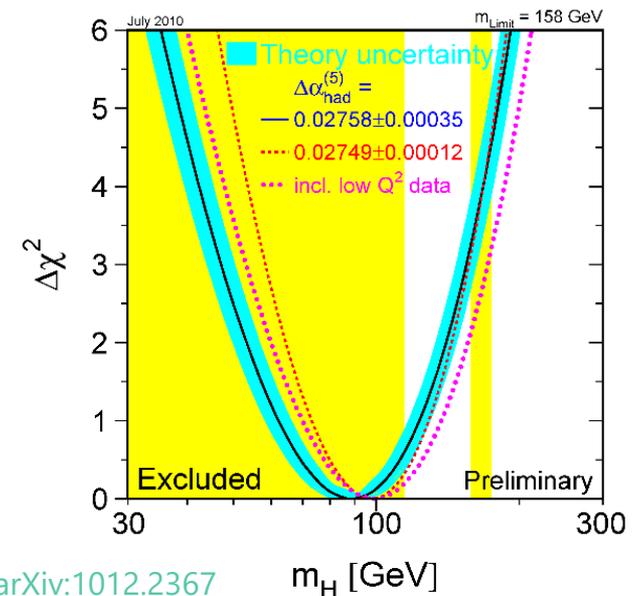
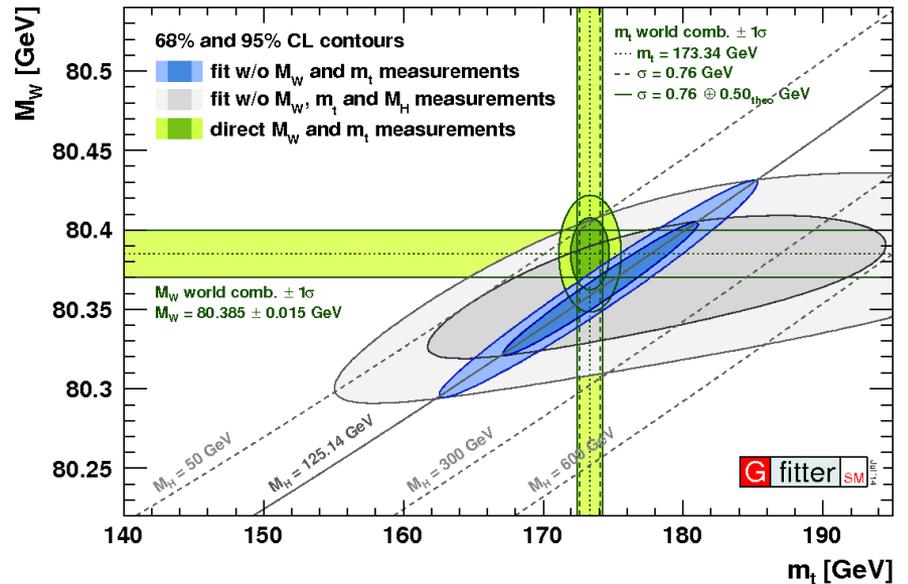
- single lepton: " $\ell + \text{jets}$ "
- dilepton (2ℓ)
 - ニュートリノの運動量は mass constraints:
 $m_{\ell\nu} = m_W, m_{\ell\nu b} = m_t$ から求められる
- all-hadronic (all jets)



トップ測定の意義

- LHC は “top factory”
 - 質量, カップリングの測定
- 精密測定から新物理へ
 - Remember LEP/SLC
Higgs mass “prediction”
- きょうの信号は,
あすのバックグラウンド
 - 生成メカニズム正確に知る必要あり
例えば ttH 測定のための ttZ など
- ILC は 250 GeV スタート
 - 今後10年以上, 他では測れない

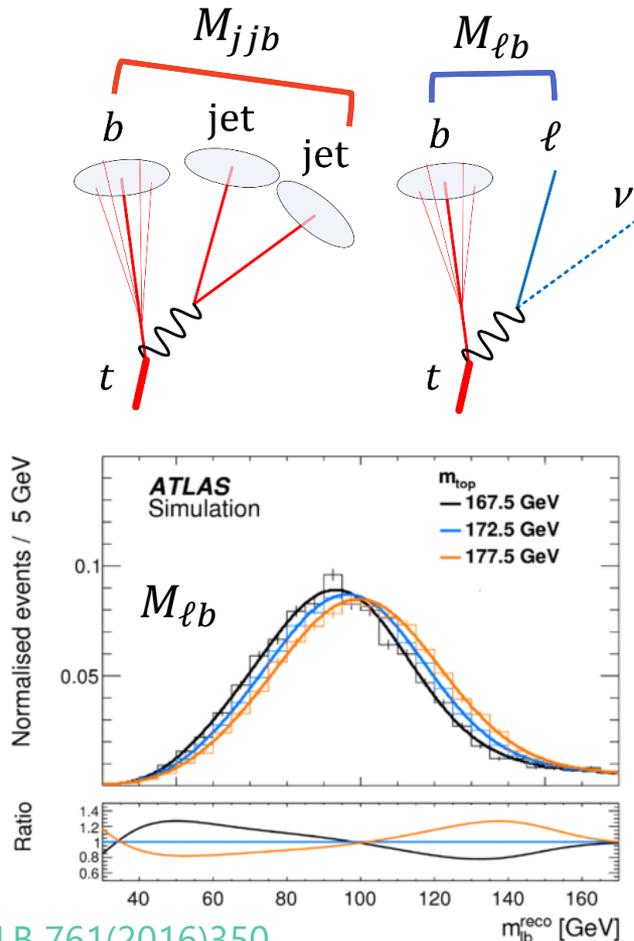
精密測定は (当分の間)
LHC でしかできない



Top mass の測定手法

“Direct mass”

- 崩壊粒子の 4-momentum から不変質量を計算

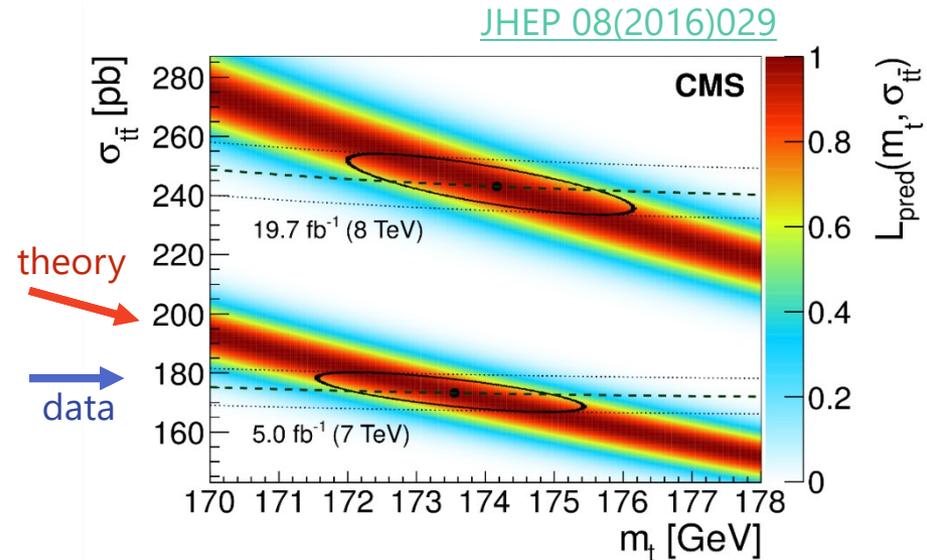


[PLB 761\(2016\)350](#)

“Pole mass”

- 散乱断面積（あるいはその形状）

– propagator を通して断面積に影響がある

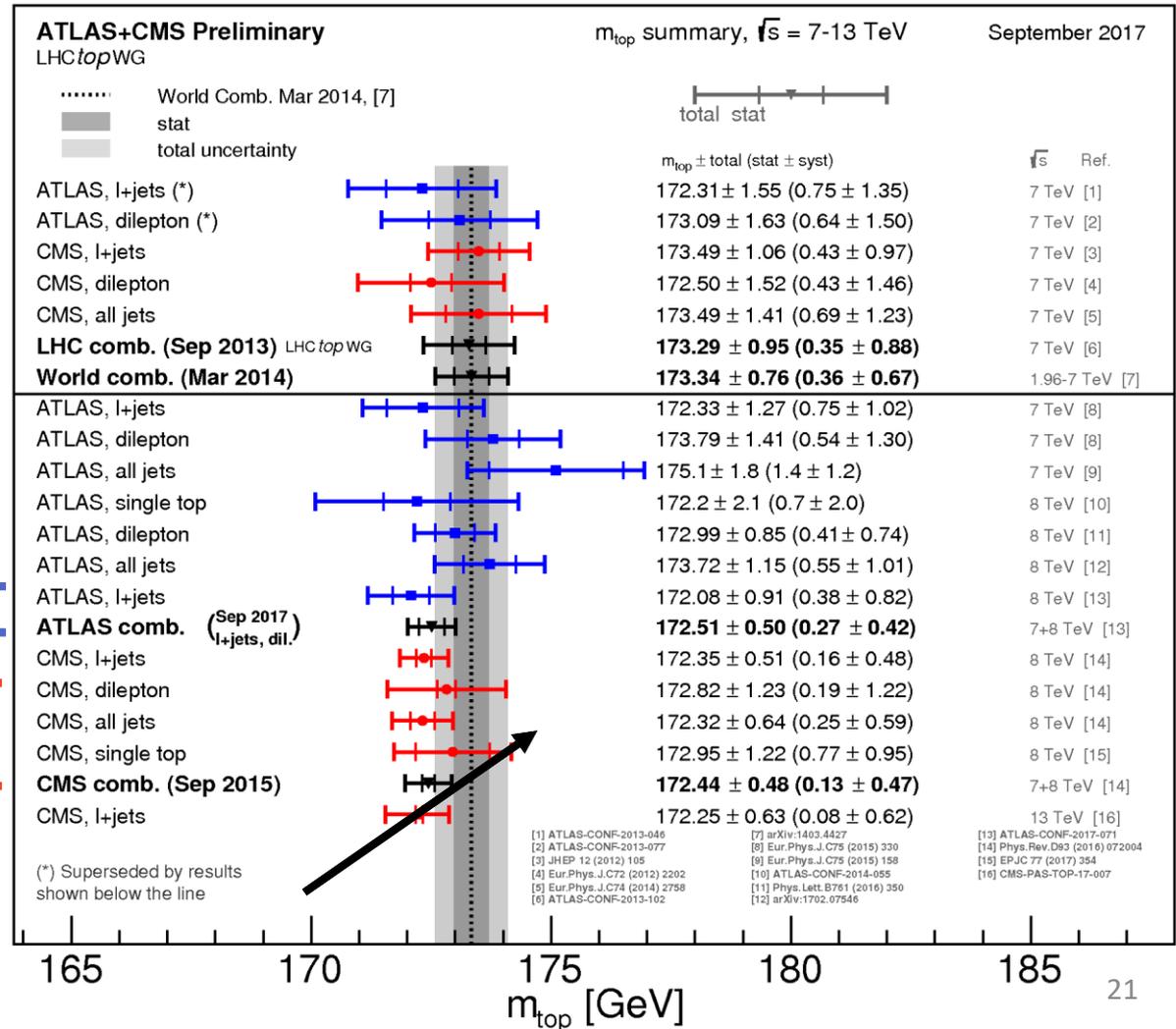


$t\bar{t}$ 全生成断面積とTOP++ (NNLO+NNLL) を比較して求めた

“Direct mass” 測定 の 現状

Best measurements are from “mature” 8TeV data, (being) published in 2016-17

- World combination (2014) 173.34 ± 0.76 GeV (0.44%)



ATLAS best results:
jets and dilepton
Combination: 0.29%

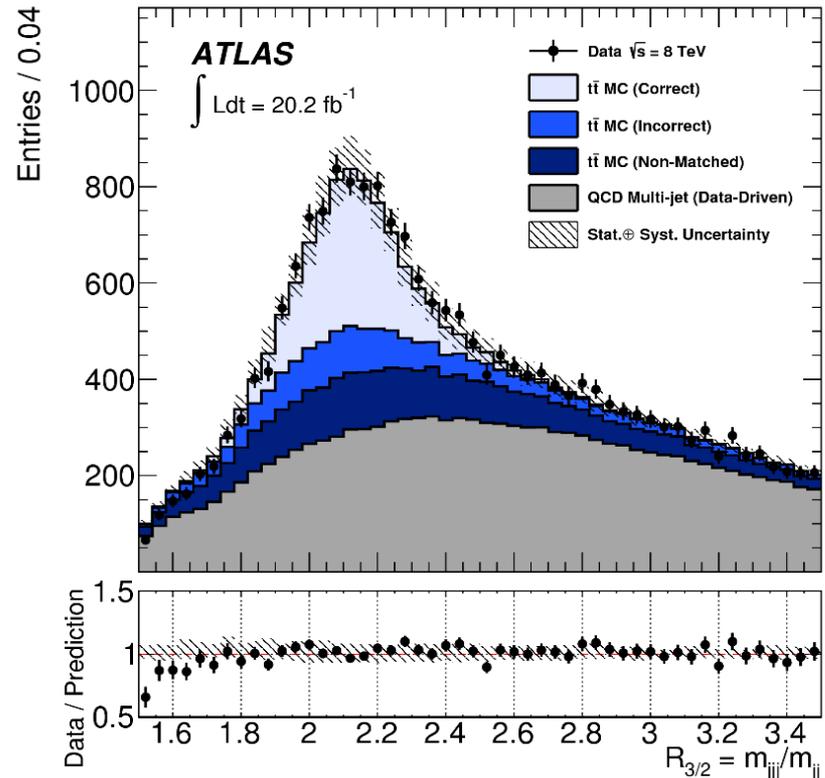
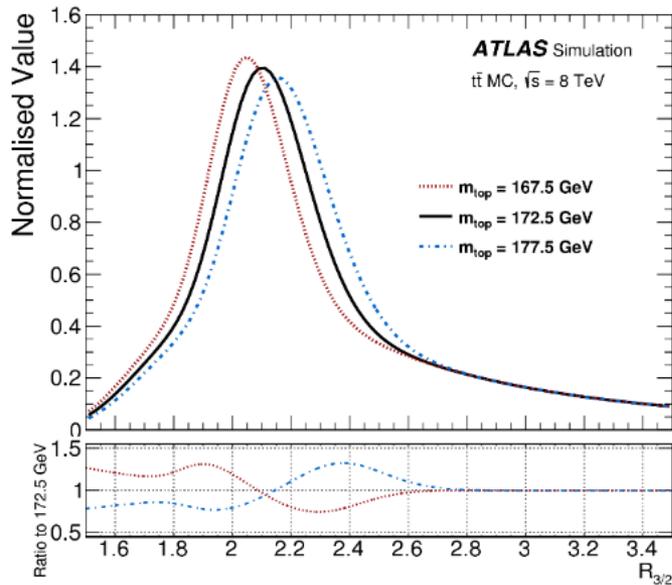
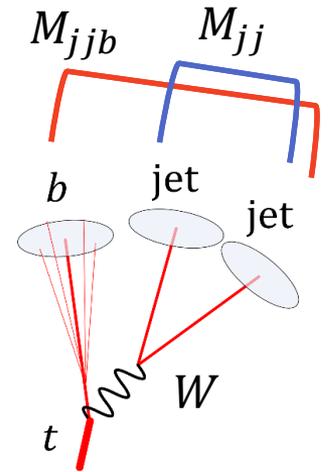


CMS best results
l+jets, all jets
and dilepton
0.28% (0.48 GeV)



hadronic decay を用いた測定

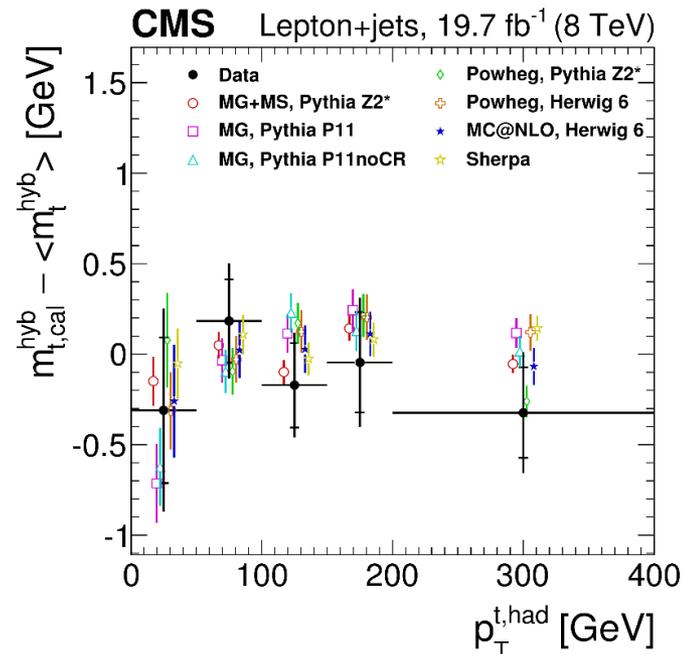
- m_W との比 $R_{3/2} = \frac{m_{jjb}}{m_{jj}} \simeq \frac{m_t}{m_W}$ を求める
 - jet energy scale (JES) 依存性を減らす
- 173.72 ± 0.55 (stat.) ± 1.01 (syst.) GeV
 - 主な系統誤差: JES (0.64 GeV)
 - ハドロン化モデル(0.60 GeV)



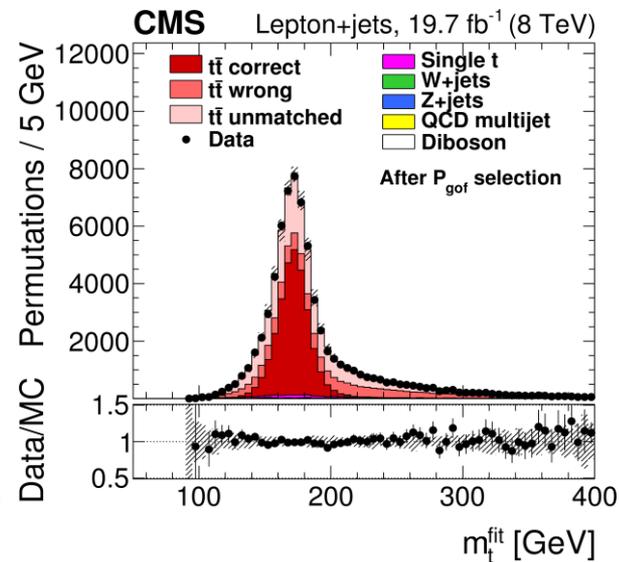
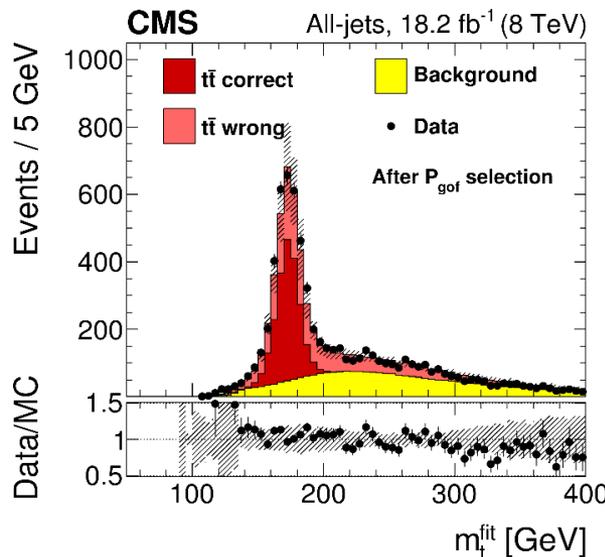
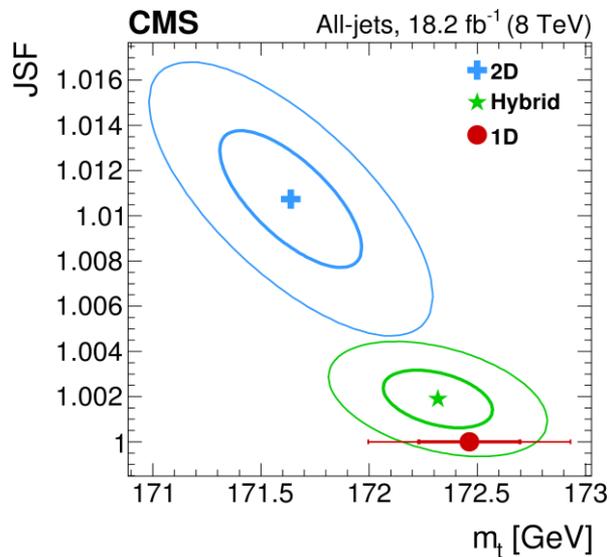
arXiv:
1702.07546

Kinematic fit による質量算出

- すべての終状態オブジェクトから質量を終状態にして likelihood により最適値をイベントごとに算出
- Jet energy scale factor (JSF) がキモ
 - JSF と m_{top} を同時に決定, または
 - 別のサンプルで W を含むものと同じ重みでファクターを決定 (hybrid method)



↑ 運動量依存性がない



< 0.3 GeV に向けて

今の記録
0.49 GeV



Analysis (syst. error)	1 st source (error)	2 nd source (error)	3 rd source (error)
ATLAS dilepton (0.74) PLB 761(2016)350	Jet energy scale (0.54)	<i>b</i> -jet energy scale (0.30)	ISR and FSR (0.23)
ATLAS all hadron (1.01) arXiv: 1702.07546	Hadronisation modelling (0.64)	Jet energy scale (0.60)	<i>b</i> -jet energy scale (0.34)
CMS lepton+jets (0.49) PRD 93(2016)072004	<i>b</i> -jet energy scale (0.32)	Matrix element generator (0.12)	Jet energy correction (0.12)
CMS dilepton (1.22) PRD 93(2016)072004	μ_R, μ_F (0.75)	<i>b</i> -fragmentation (0.69)	<i>b</i> -jet energy scale (0.34)
CMS all hadron (0.59) PRD 93(2016)072004	<i>b</i> -jet energy scale (0.29)	Background estimation (0.20)	In situ jet energy scale (0.19)

experimental
 model dependence

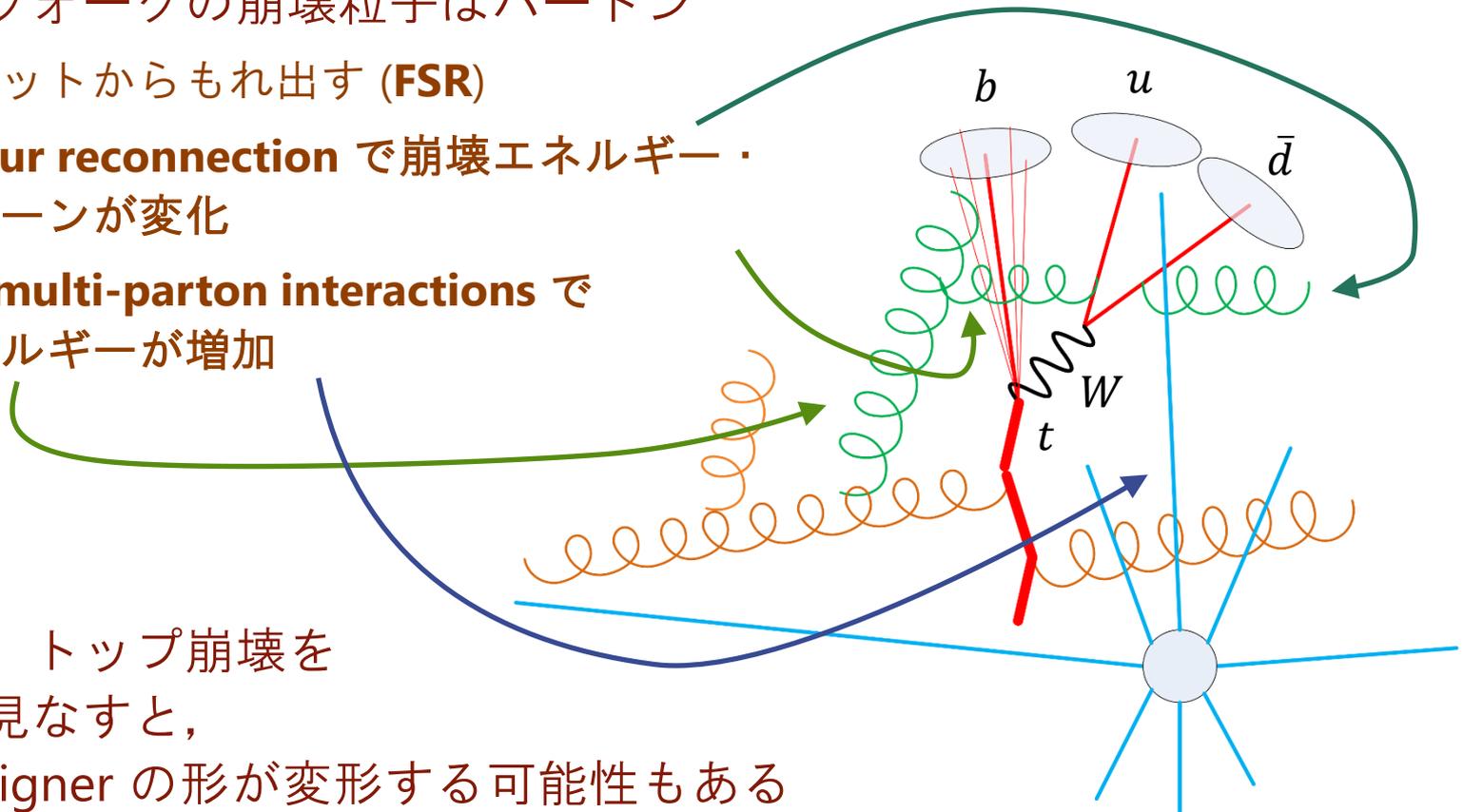
(実験的誤差) \approx (モデル依存性からくる誤差)

- 異なる mass reconstruction の手法を試す
- 測定により使用する **event generator** モデルに制限を
 - **e.g. parton shower, hadronisation ...**

Direct mass によるバイアス

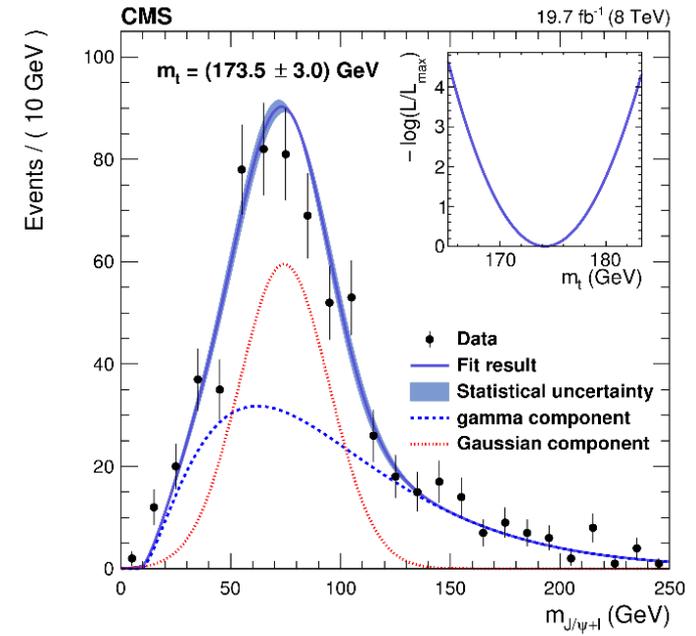
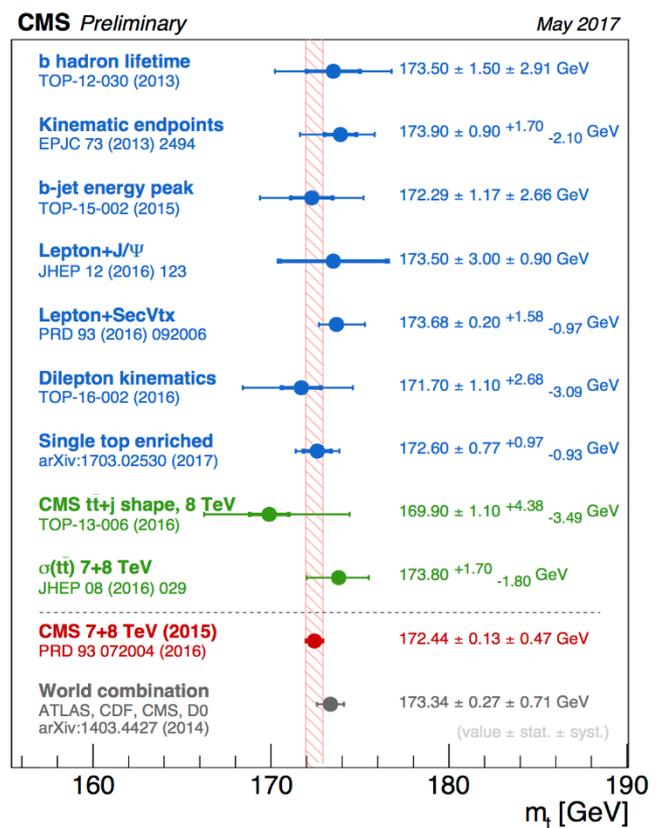
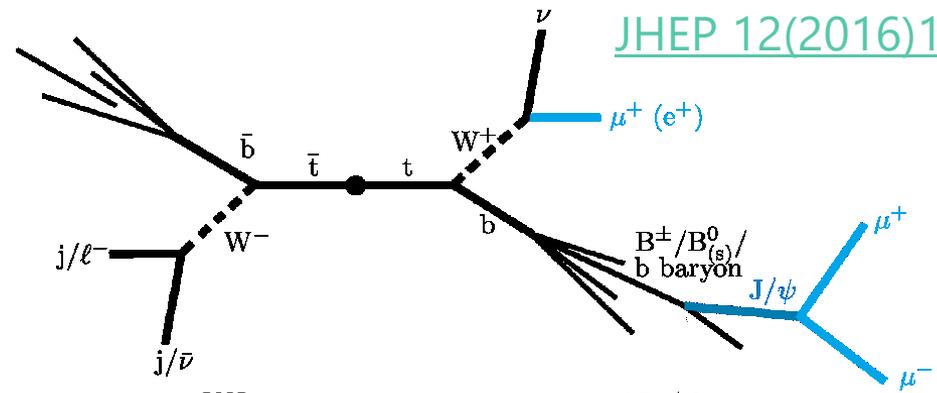
全体の効果は
(a factor) $\times \Lambda_{QCD}$
~ GeV になる？

- 今までのクォーク質量測定は中間子 (J/ψ など)
 - 崩壊粒子が「どれか」決まっている
 - 輻射 ($J/\psi \rightarrow \mu\mu\gamma$ など) もよくわかっている
- トップクォークの崩壊粒子はパートン
 - ジェットからもれ出す (**FSR**)
 - **colour reconnection** で崩壊エネルギー・パターンが変化
 - **ISR multi-parton interactions** でエネルギーが増加
- さらに、トップ崩壊を内線と見なすと、Breit-Wigner の形が変形する可能性もある



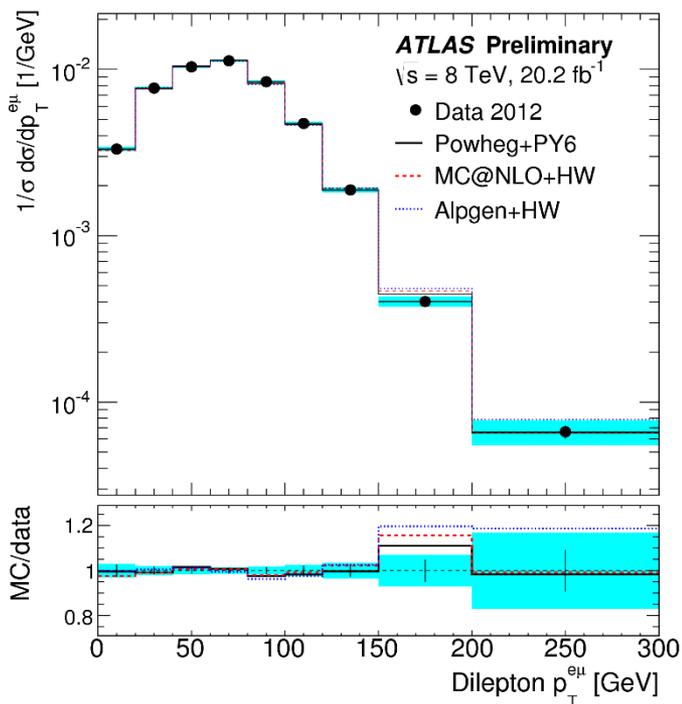
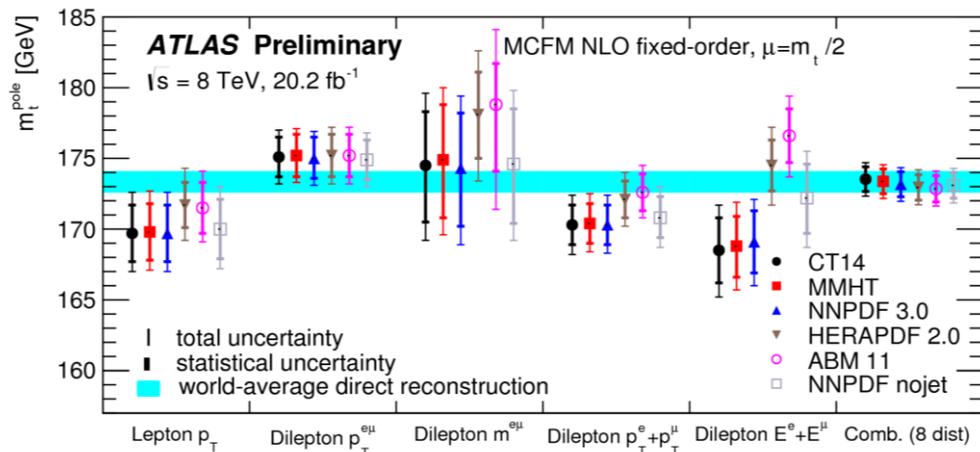
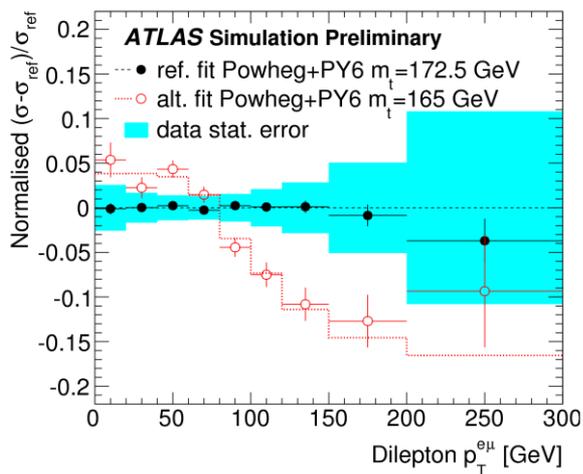
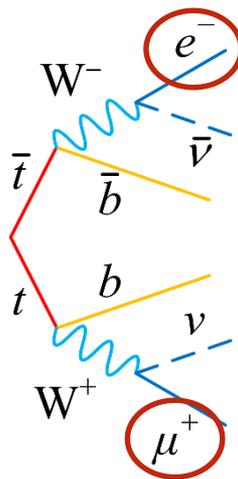
レプトンだけによる トップ質量再構成 b-jet $\rightarrow J/\psi \rightarrow \ell\ell$ と $W \rightarrow \ell\nu$ の組合せ

b-jet fragmentation は不定性があるかと思うが，そうでもない



- レプトンだけで，ジェットにまつわる不定性はない
- 系統誤差 0.9 GeV 結構小さい
 - top p_T modelling (0.64)
 - b-fragmentation (0.37)

断面積の形状から (lepton kinematics)



[ATLAS-CONF-2017-044](#)

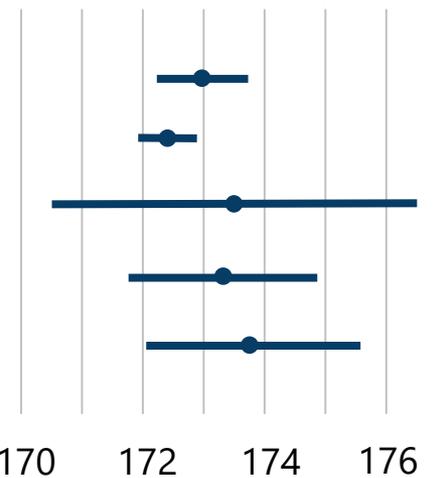
- レプトン関連の運動量形状 ($e\mu$) 8種を用いる
 - $p_T(e \text{ or } \mu), |\eta|, \text{dilepton } p_T^{e\mu}, m^{e\mu}, |y^{e\mu}|, \Delta\phi^{e\mu}, p_T^e + p_T^\mu, E^e + E^\mu$
- W の崩壊は EW なので、QCD 終状態の不定性とは無縁
- $m_t = 173.2 \pm 0.9(\text{stat.}) \pm 0.8(\text{exp.}) \pm 1.2(\text{theo.})$
 - μ_R, μ_F が残る最大の不定性

トップ質量測定のとまとめ

Direct がやはり精度よい
レプトンを使った方法,
Pole mass と
よく合っているが,
誤差大きい

ATLAS direct (dilepton)	172.99 ± 0.85
CMS direct (l+jets)	172.35 ± 0.51
CMS J/ ψ	$173.5 \pm 3.0 \pm 0.9$
ATLAS dilepton σ shape	173.2 ± 1.6
CMS $\sigma(t\bar{t})$	$173.8^{+1.7}_{-1.8}$

Plot by hand
for illustration purpose only



今後の展望

- direct mass: **jet/b-jet JES** も依然重要
- トップ運動量分布など, perturbative QCD の理解
まだスケール不定性が大きい \simeq やっぱり高次の計算がほしい

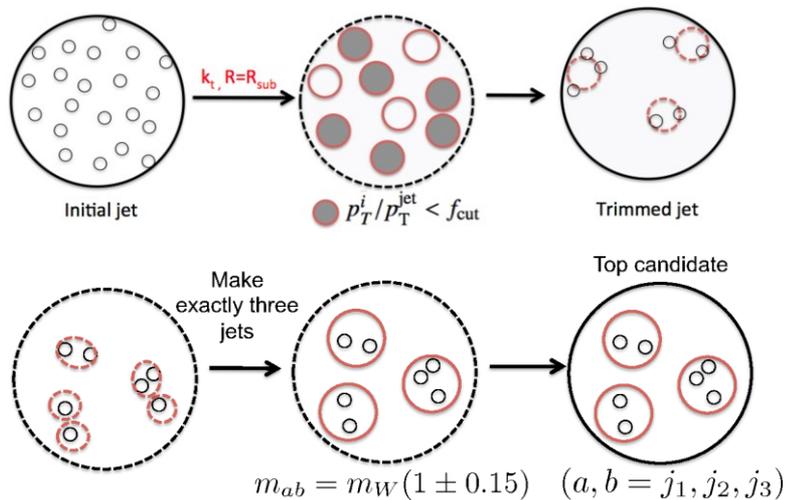
0.3 GeV の精度に向けて,
さらなるトップ生成の QCD による理解が不可欠

微分散乱断面積測定

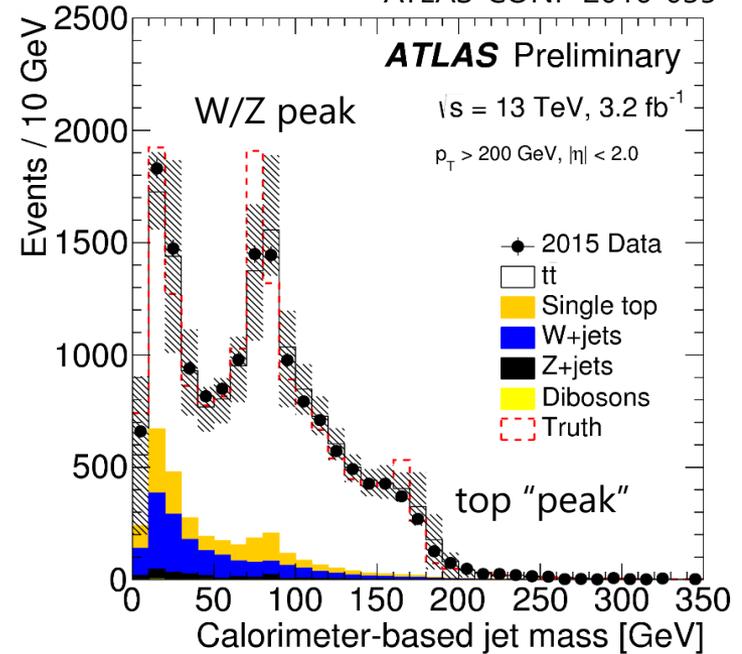
- モデルと直接比較できる物理量
 - 検出器の測定量を “Particle level” に補正，直接モデルの予言と比較できる
パートンへ直接補正するより，モデル依存性少ない
比較により，パートンシャワー，MC tuning 結果などと比較
 - 他の測定の系統誤差を減らせる
- トップ生成そのものが，**BSM** にも感度
 - 特に **high- p_T = highly-boosted top**
- 多くの場合，top は BSM 探しのバックグラウンドにも
 - 正確な理解が大切

ジェットに崩壊する 重い粒子の質量再構成

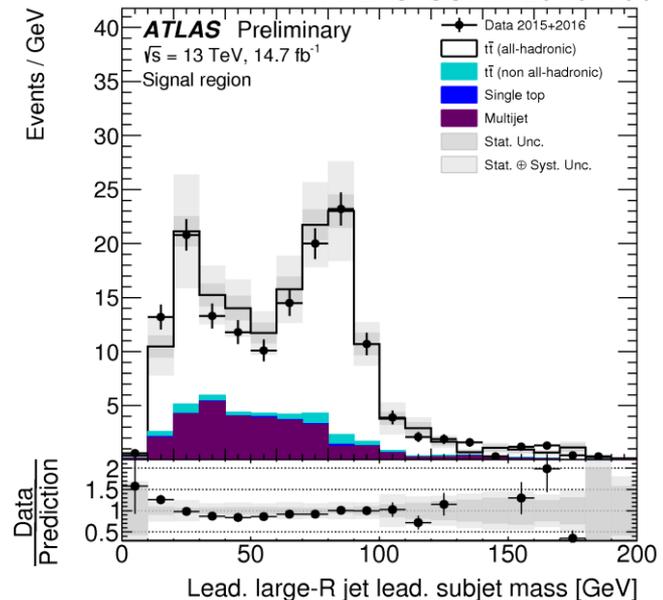
- LHC では、重いトップクォークでも運動量が大きければ、崩壊物が狭い範囲に収まる
- 一つの「ジェット」の内部構造から複数の崩壊クォークを選び分け、親クォーク（トップ）の質量を計算



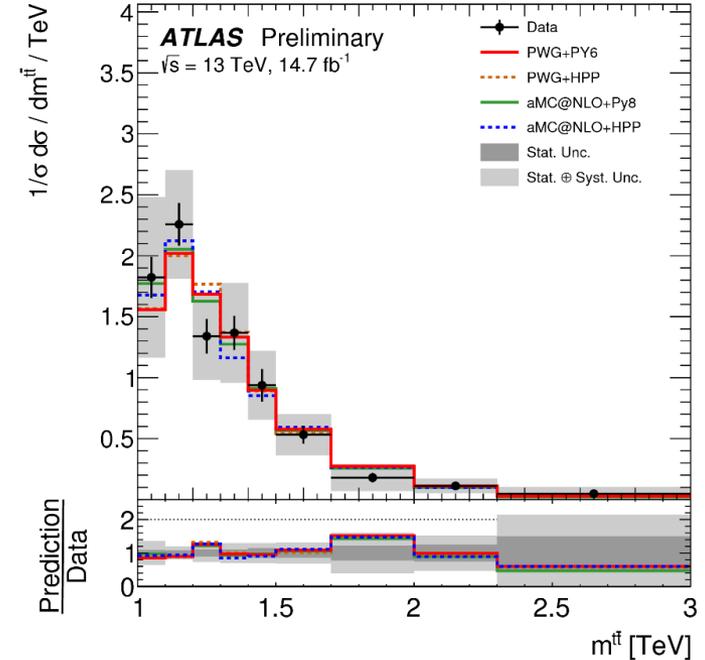
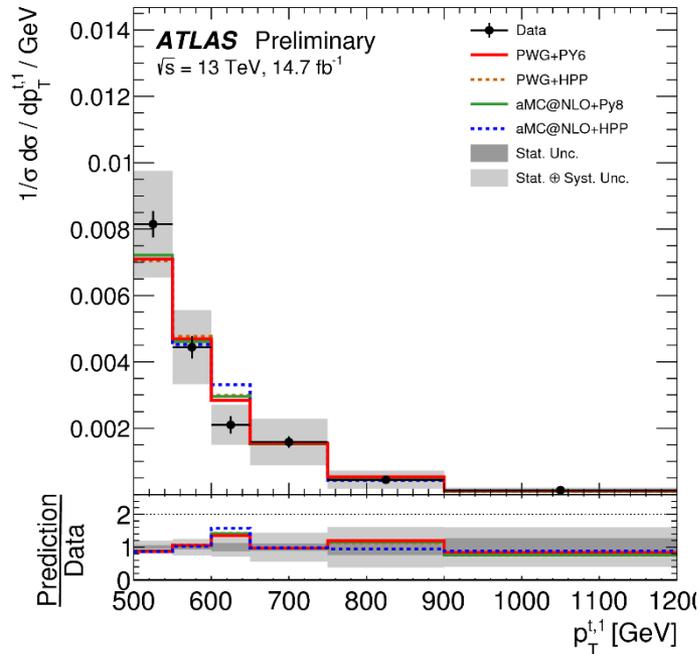
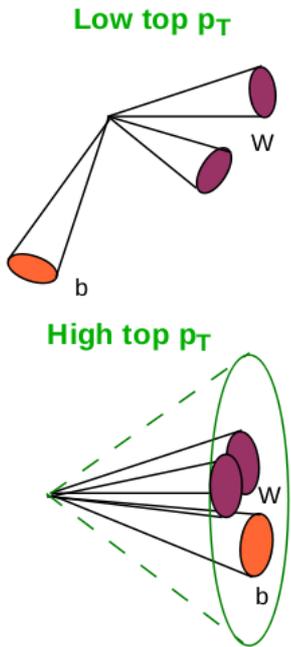
ATLAS-CONF-2016-035



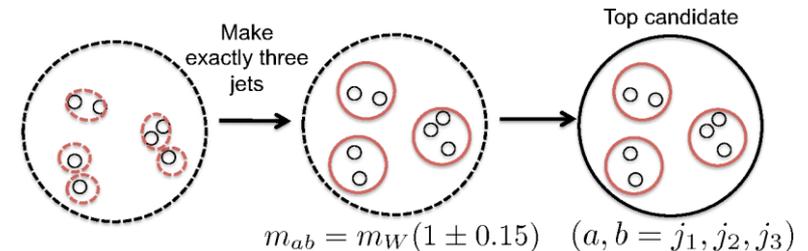
ATLAS-CONF-2016-100



Recent 13 TeV measurements (1)

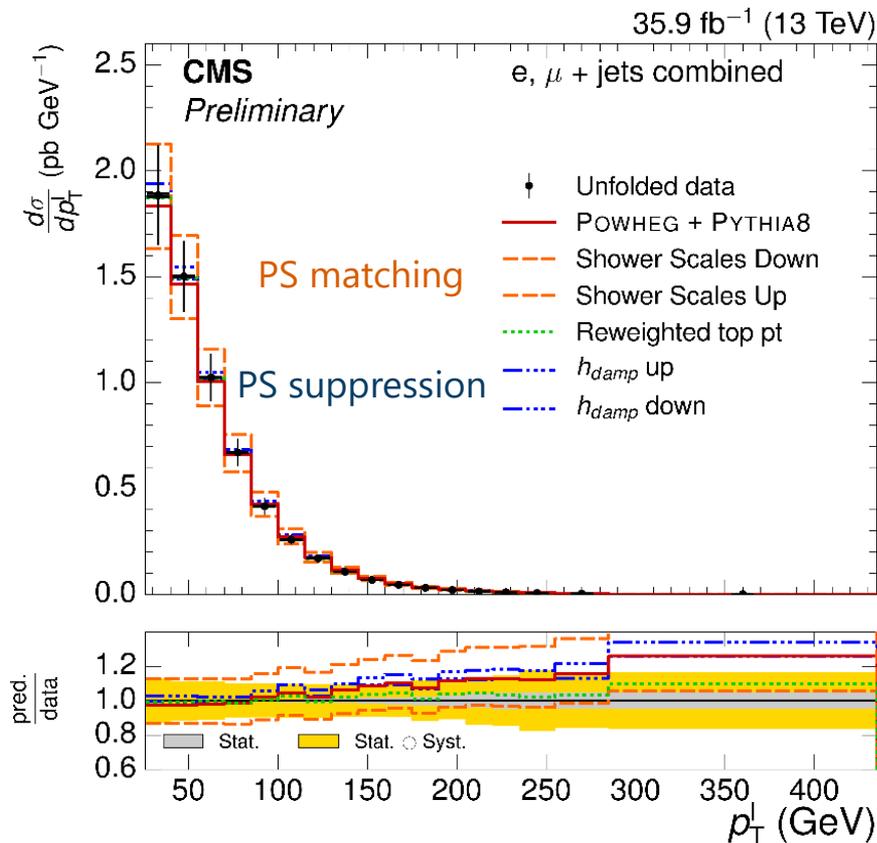
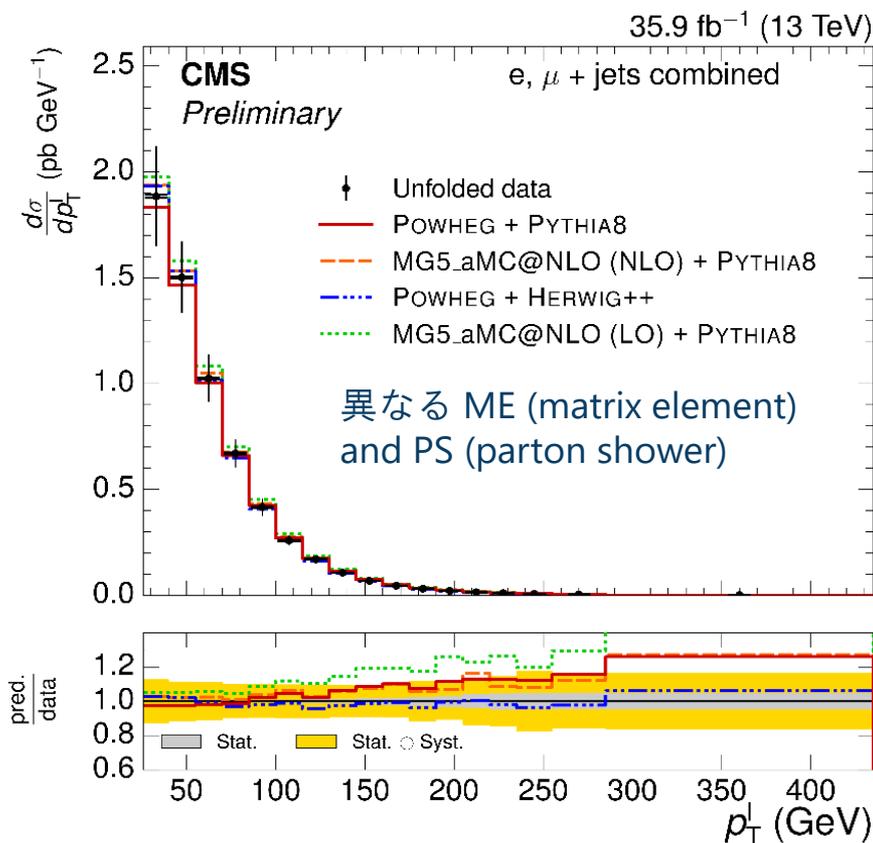


- All-hadronic 崩壊 (14.7 fb^{-1})
- Boosted top のみを用いた
 - 内部構造の「3-jetらしさ」で選別
- $p_T^{\text{top}} \sim 1 \text{ TeV}, m_{t\bar{t}} > 2 \text{ TeV}$
- 系統誤差：パートンシャワー



(from [JHEP09\(2013\)076](#): note that this analysis does somewhat differently to tag boosted top)

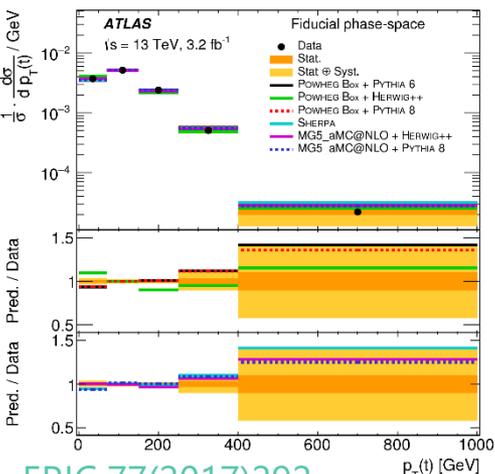
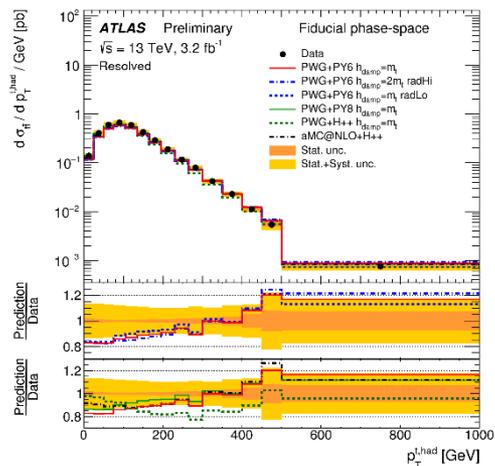
13 TeV 精密測定



- トップクォークの運動量の代わりに、崩壊粒子の運動量を用いる
 - できるだけトップ崩壊にまつわる理論的不定性を小さくし、感度を上げる
- 測定データは高い p_T でデータが NLO より少ない傾向 →

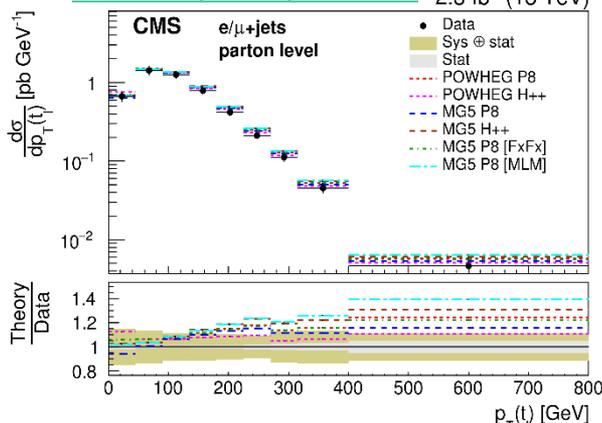
他の 13TeV 測定でも似たような傾向...

ATLAS-CONF-2016-040

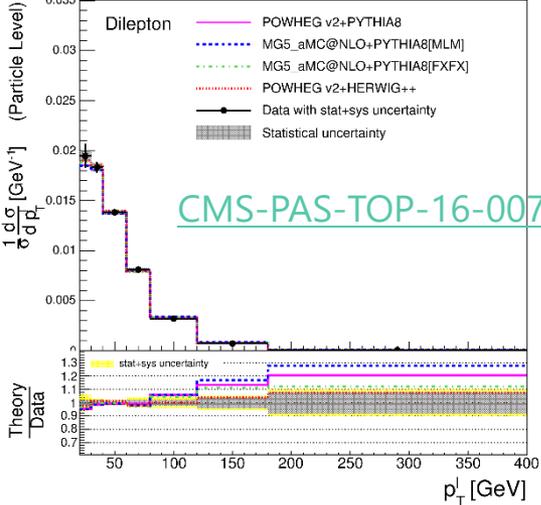


EPJC 77(2017)292

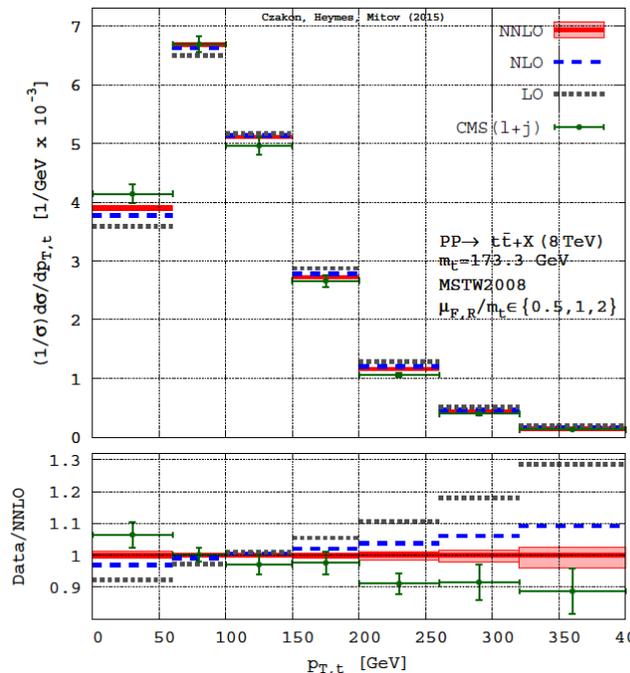
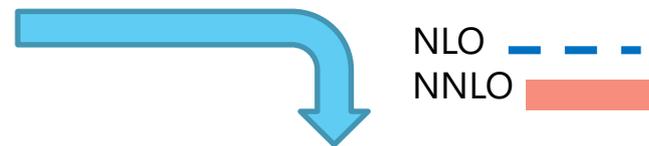
PRD 95(2017)092001 2.3 fb⁻¹ (13 TeV)



CMS Preliminary 2.2 fb⁻¹ (13 TeV)



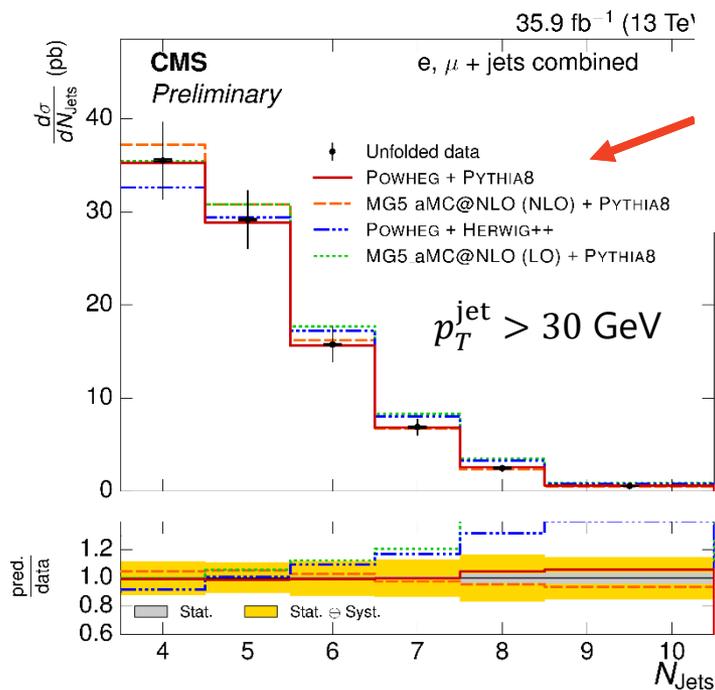
CMS-PAS-TOP-16-007



M. Czakon, D. Heymes and A. Mitov, PRL 116, 082003

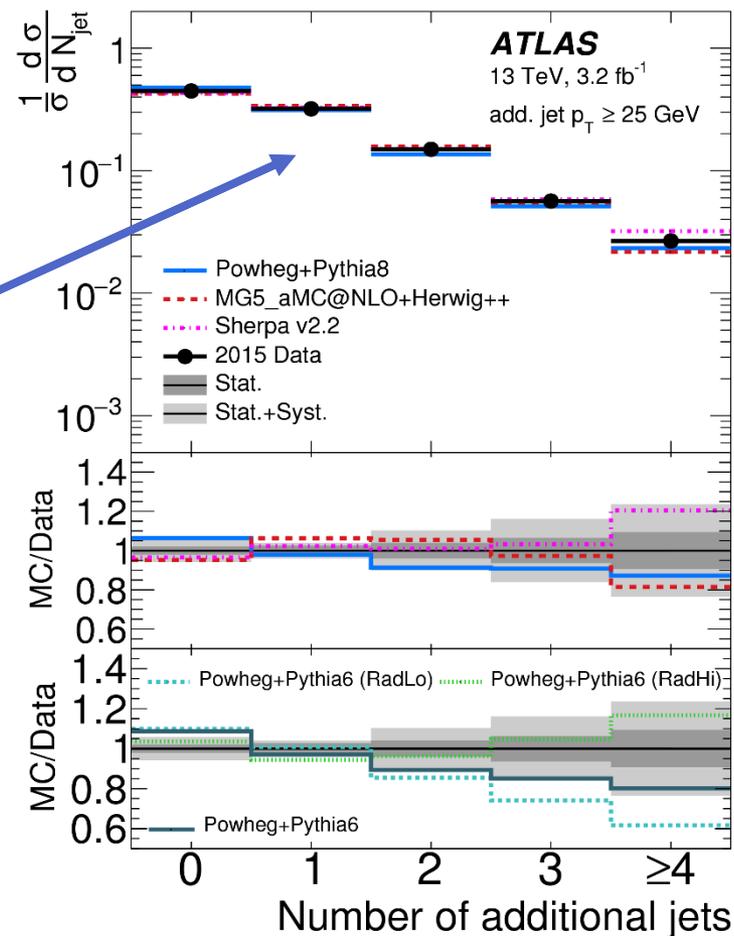
- トップの p_T はNLO の予言より小さい傾向
 - NNLO でよくなるという study あり
 - エネルギーが $t\bar{t}$ 以外のところにいる?

$t\bar{t}$ + jets @ 13 TeV



8TeV の同種の
測定で tuning
した generator
との比較

Hard
radiation
に関しては
tuning なし

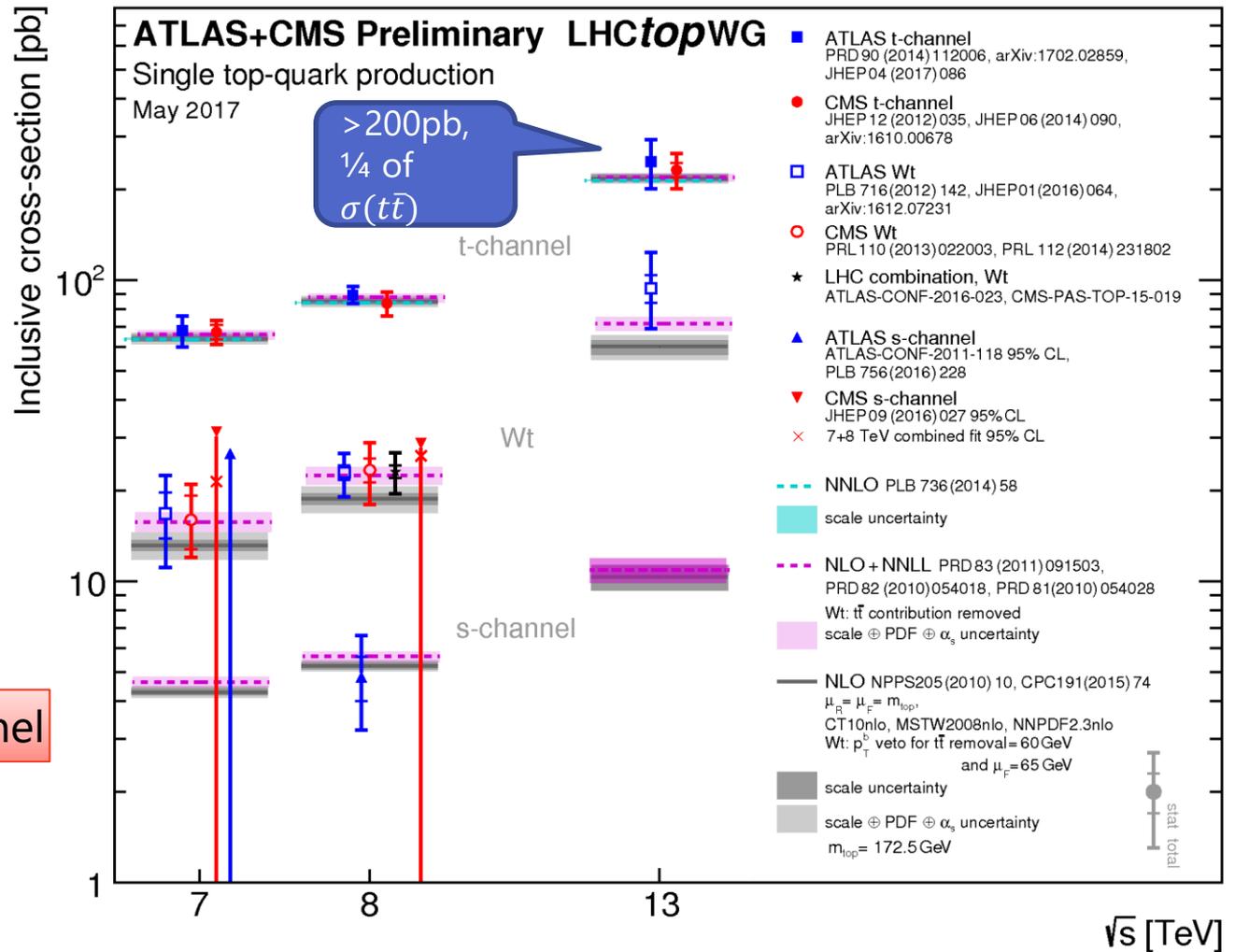
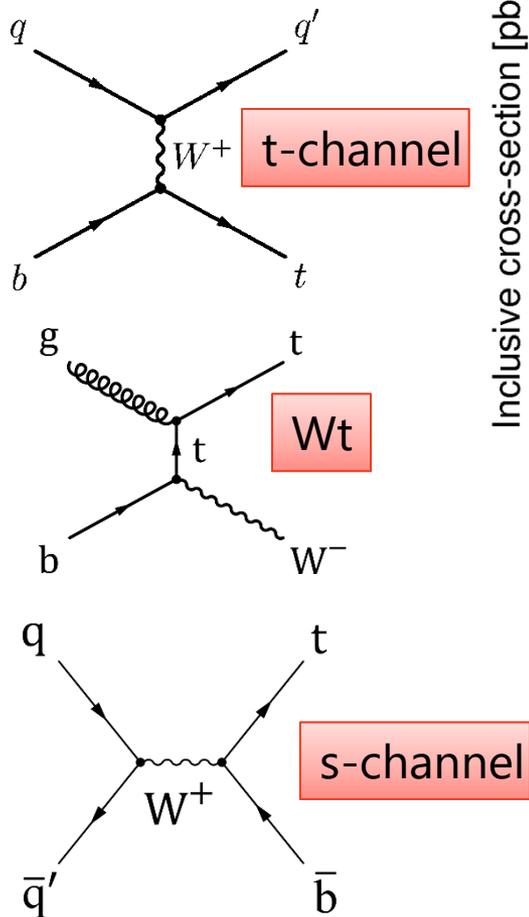


- parton shower モデルへの感度が高い

- 結果はモデルのチューニングに用いる
(パートンシャワーの大角度抑制など)

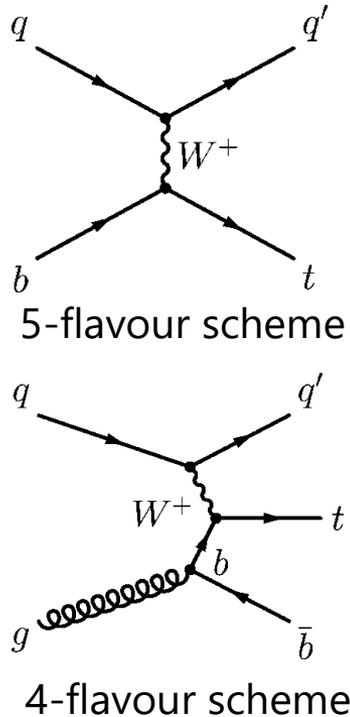
さらなる精度向上に向けて測定を続けていく

Single-top のプロセスと断面積

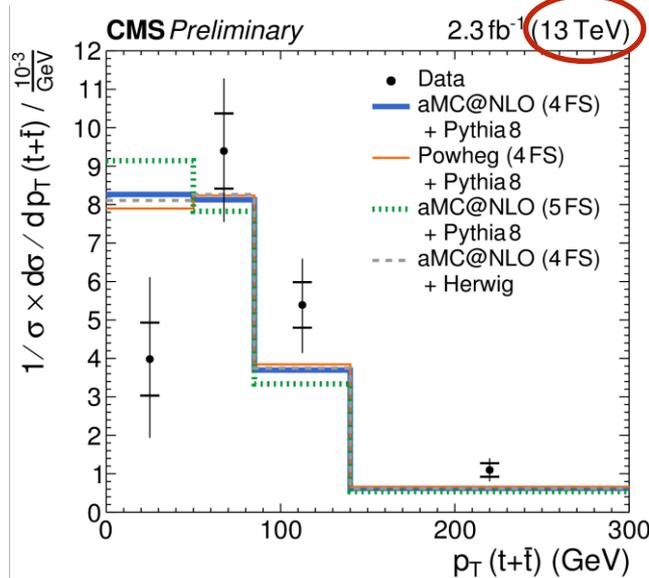


- 統計誤差は t-channel, Wt では生成断面積測定には十分
 - 他変数解析は上記2チャンネルではなくてもいける

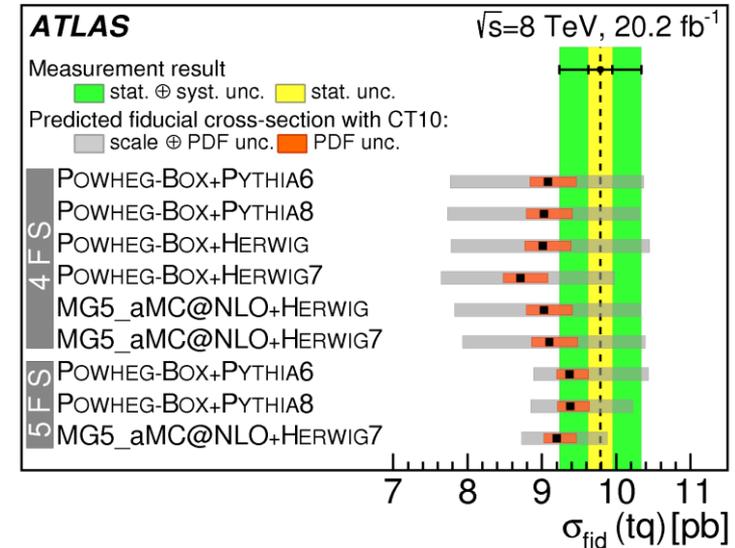
t -channel: 微分断面積, flavour scheme



CMS-PAS-TOP-16-004



arXiv: 1702.02859



- t -channel トップを作るには始状態に b クォーク必要
 - 陽子中に intrinsic b -quark (5-Flavour Scheme, 5FS) か?
それともグルーオンから動的に生成するか (4FS)?
この2つのダイアグラムを適切にたしあわせるひつようあり
- $p_T(t \text{ or } \bar{t})$ が, 将来ひょっとすると役に立つかも

W の質量と QCD

W の質量測定と QCD

- 測定方法：ヤコビアンピークを見る

もし LO だけなら, $p_T^W = 0$

→ $p_T^\ell < m_W/2$ にエッジ

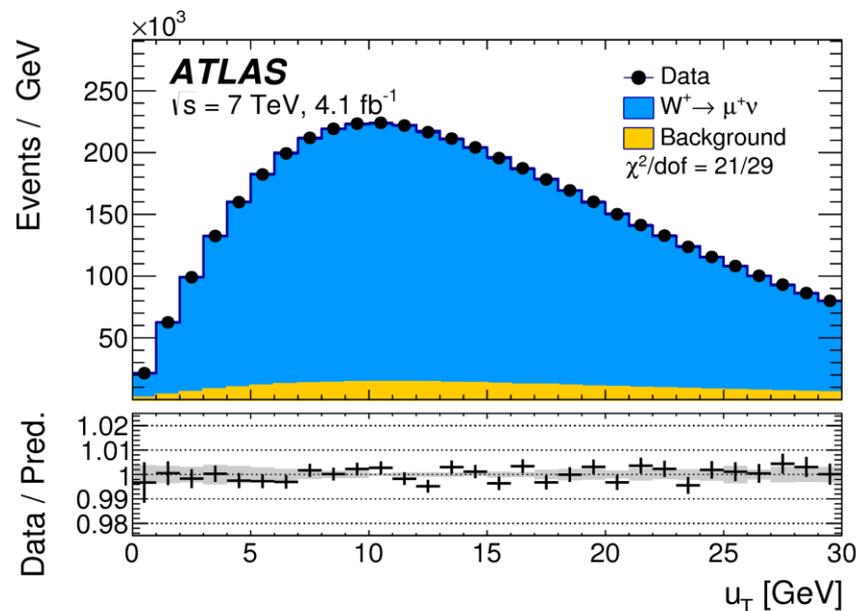
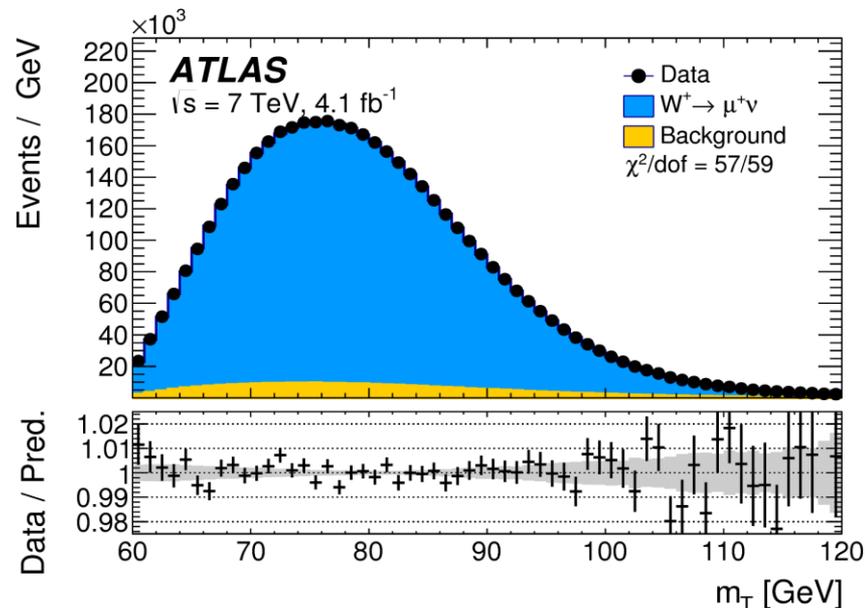
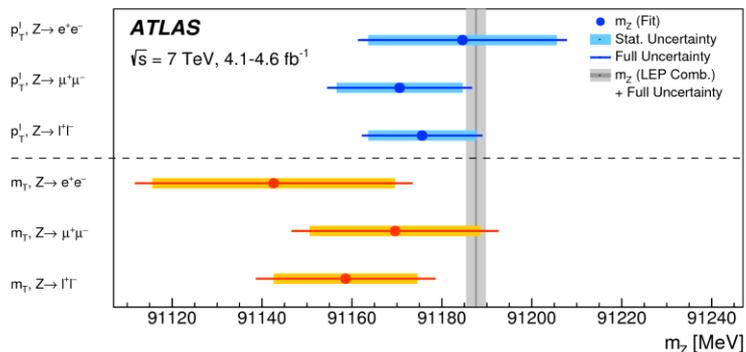
$$\rightarrow m_T = \sqrt{2p_T^\ell p_T^{\text{miss}}(1 - \cos \Delta\phi)} < m_W$$

にエッジ

- 事象選別：LO-like な事象を選ぶ

$u_T < 30$ GeV: レプトン以外の
観測された横運動量の和

- 検出器のキャリブレーション：
 $Z \rightarrow \ell^+ \ell^-$ を用いる



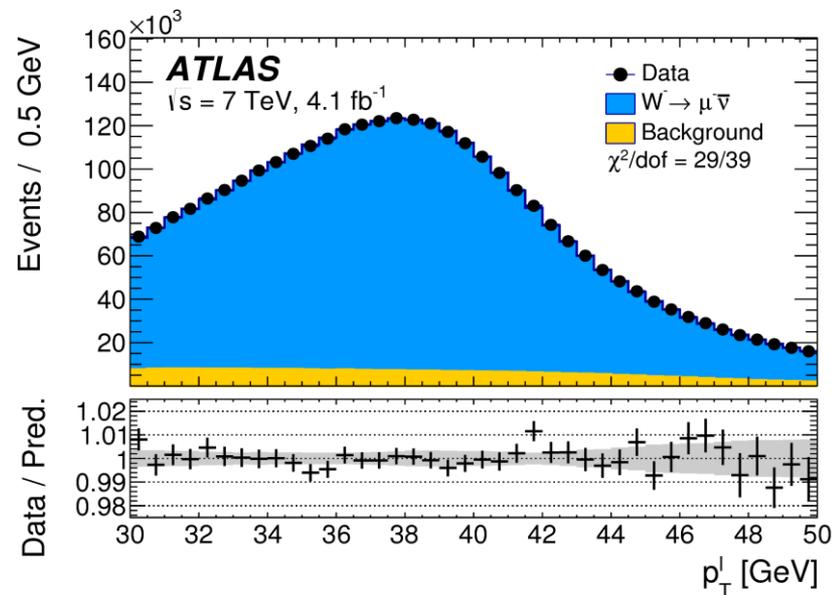
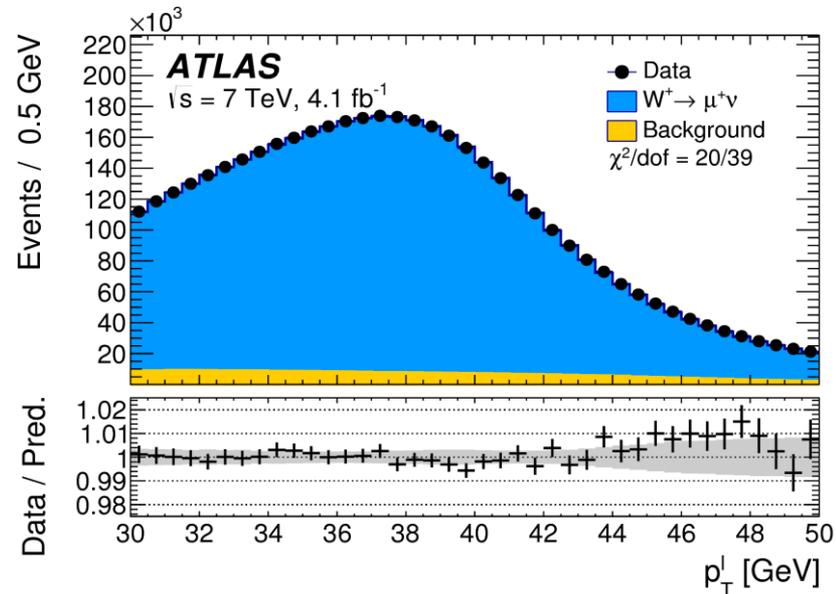
最終的な systematic error to W mass

Uncertainty from p_T^{ℓ} measurement	$W \rightarrow e\nu$	$W \rightarrow \mu\nu$	total
EW correction (FSR, weak, I/F interf.)	4.9	5.6	--
Detector calibration	14.2 (energy scale, efficiencies)	9.8 (momentum scale)	--
	W^+	W^-	combined
Recoil (u_T reconstruction) correction	2.6	2.7	2.6
Background	6.0/4.3 (e/μ)	6.8/5.3 (e/μ)	--
PDF uncertainties	13.1	12.0	8.0
"AZ tune" W transverse momentum	3.0	3.0	3.0
PS, different μ_F in HFL schemes	5.0	5.0	5.0
Angular coefficients	5.8	5.8	5.8
Theory total	15.9	14.8	11.6

- Result: $m_W = 80370 \pm 7(stat.) \pm 11(exp.) \pm 14(model\ syst.)$
 $= 80370 \pm 19\text{ MeV}$

W^+ と W^- の差

- LHC は pp ($p\bar{p}$ でない)
- W^+ は valence quark おおい
 $u_v \bar{d} \rightarrow W^+$ vs $d_v \bar{u} \rightarrow W^-$
 W^+ の方が rapidity 分布広い
 p_T^W 小さい
- Heavy quark からもできる
 b/c quark は,
 active flavour (もともと proton に
 含まれている) か,
 gluon から dynamic に生成かで
 予言が異なる



高次の計算では

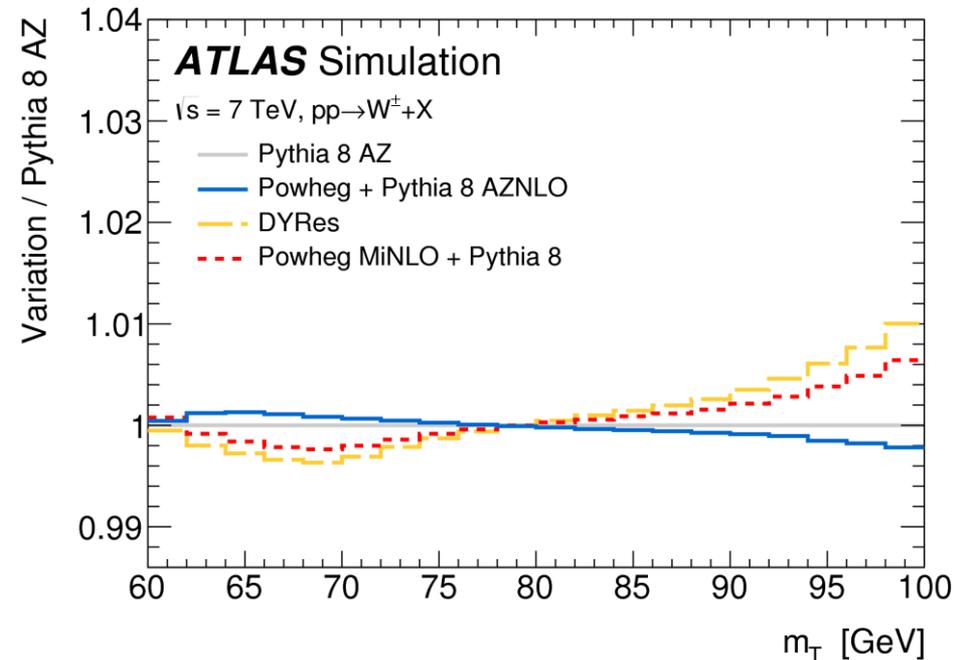
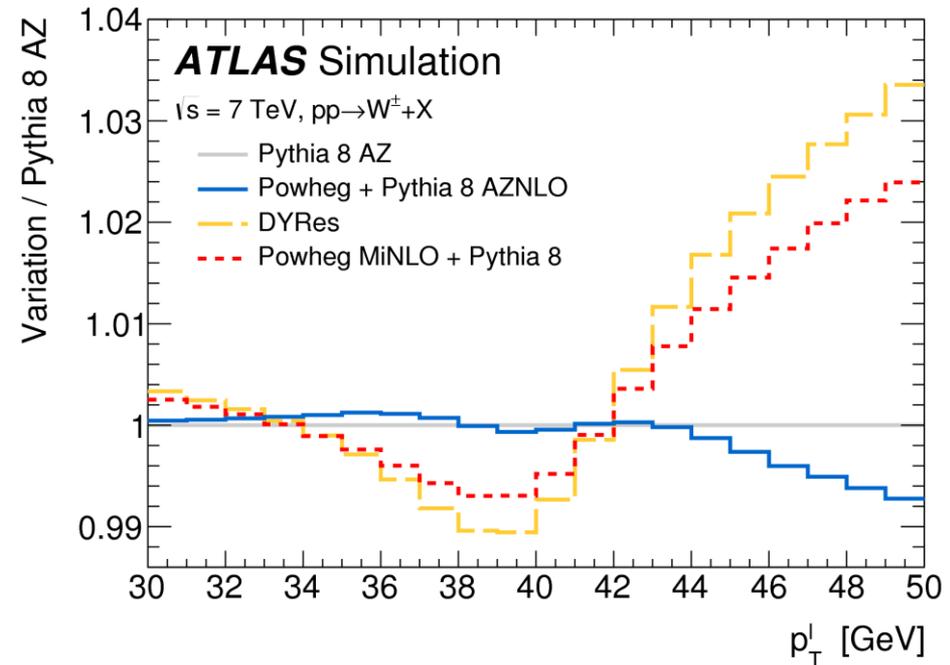
- W からのレプトンの分布は model によって不定性がある

理由 1: 崩壊角

QCD 計算高次の補正がある

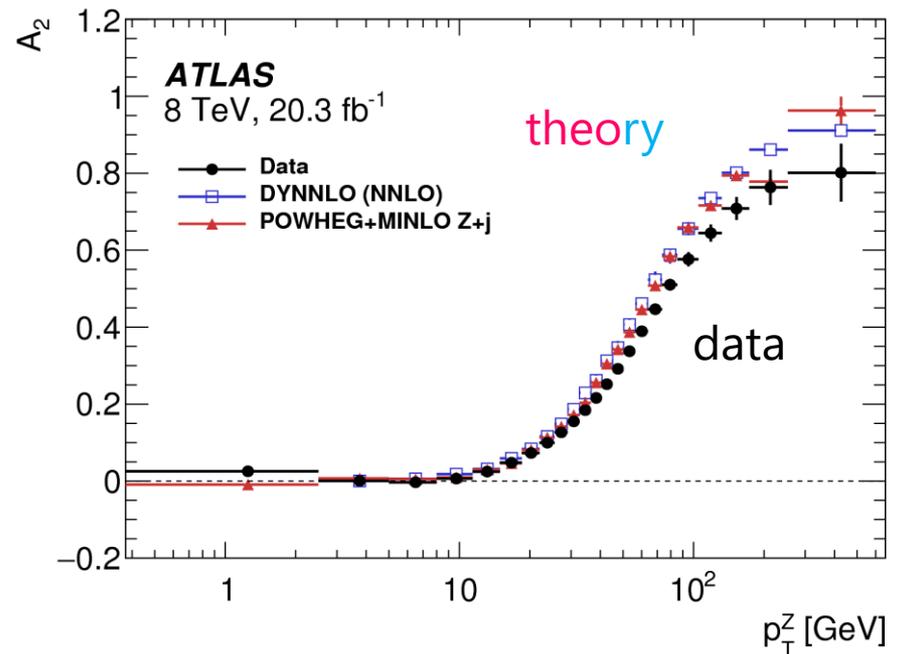
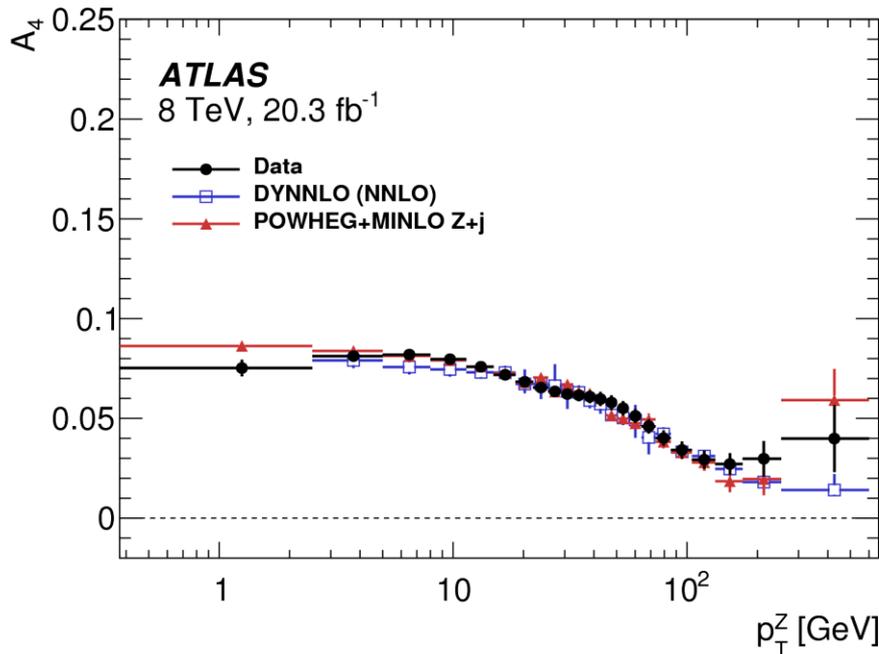
理由 2: 横方向運動量 p_T^W 分布

ME と PS とのマッチングに起因



Z⁰ の崩壊角測定

$$\frac{d\sigma}{dp_T^2 dy dm d\cos\theta d\phi} = \frac{3}{16\pi} \frac{d\sigma}{dp_T^2 dy dm} \times [(1 + \cos^2\theta) + A_0 \frac{1}{2}(1 - 3\cos^2\theta) + A_1 \sin 2\theta \cos\phi + A_2 \frac{1}{2} \sin^2\theta \cos 2\phi + A_3 \sin\theta \cos\phi + A_4 \cos\theta + A_5 \sin^2\theta \sin 2\phi + A_6 \sin 2\theta \sin\phi + A_7 \sin\theta \sin\phi].$$

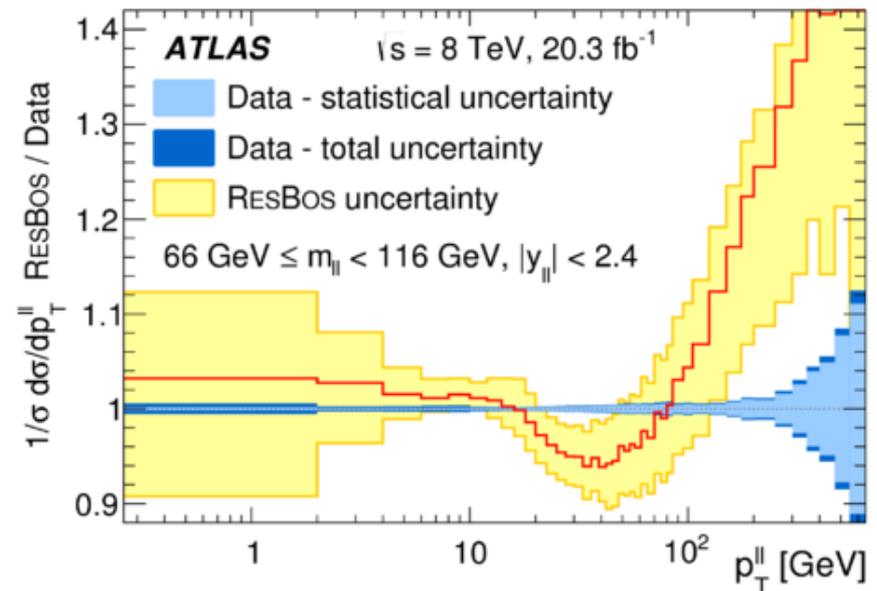
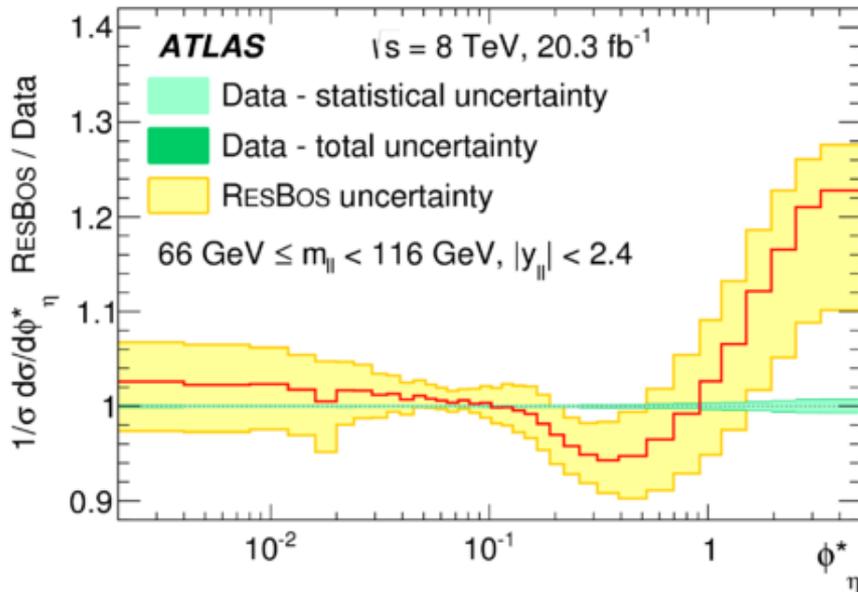


- LO では A_4 のみ
- A_2 が理論で再現されていない → 補正の必要あり

Drell-Yan $p_T^{\ell\ell}$ と “ ϕ_η^* ” による recoil 測定

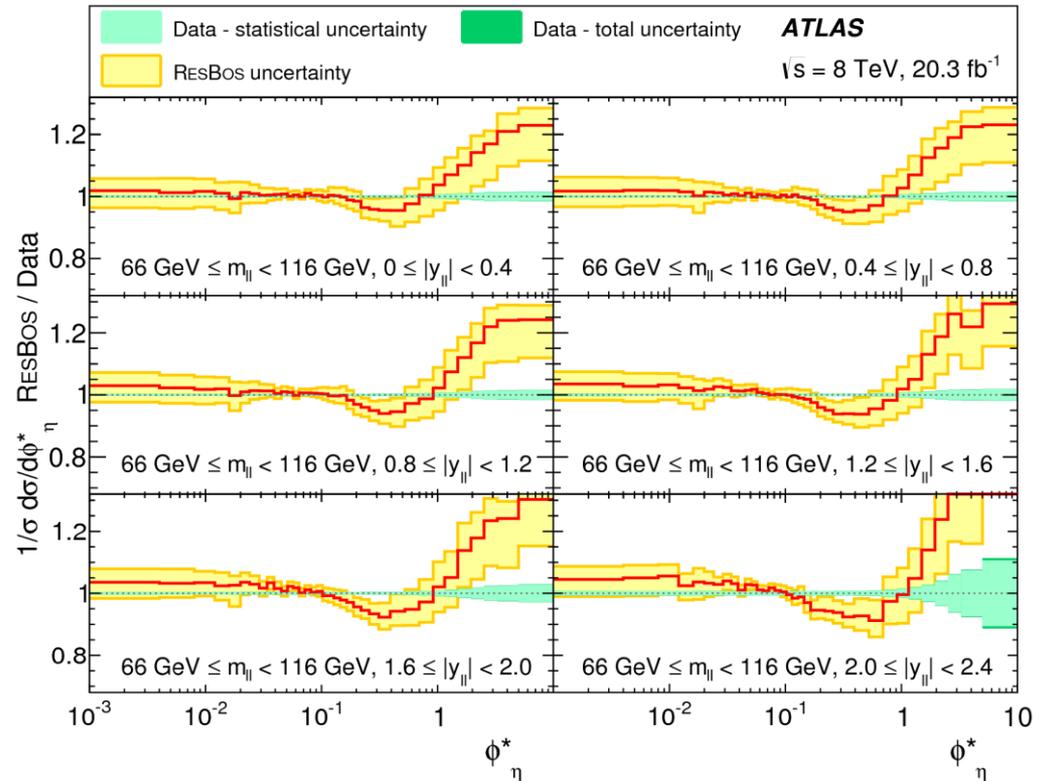
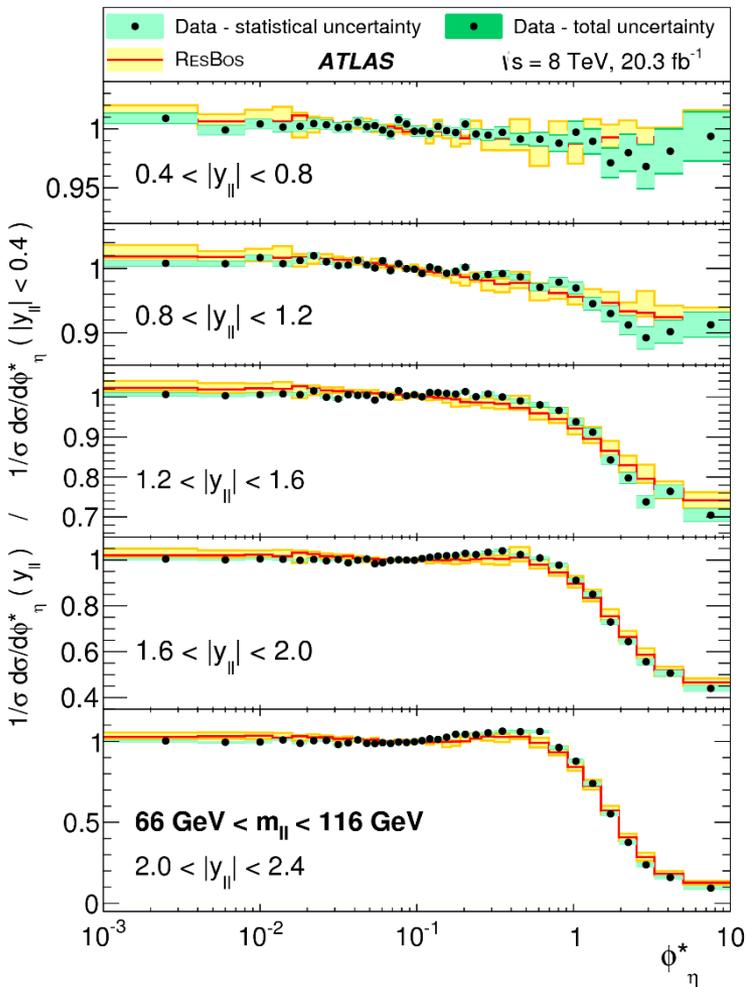
- Drell-Yan lepton 対の p_T はパートン放射のモデルの詳細で変わる
特に, soft \rightarrow hard の受け渡し
- $\phi_\eta^* = \tan\left(\frac{\pi - \Delta\phi}{2}\right) \cdot \sin(\theta_\eta^*) \simeq \frac{p_T^{\ell\ell}}{\sqrt{2}M_{\ell\ell}}$
 - レプトンの角度のみを用いた測定で, 正確に測定可能

Eur. Phys. J. C 76(5), 1-61 (2016)



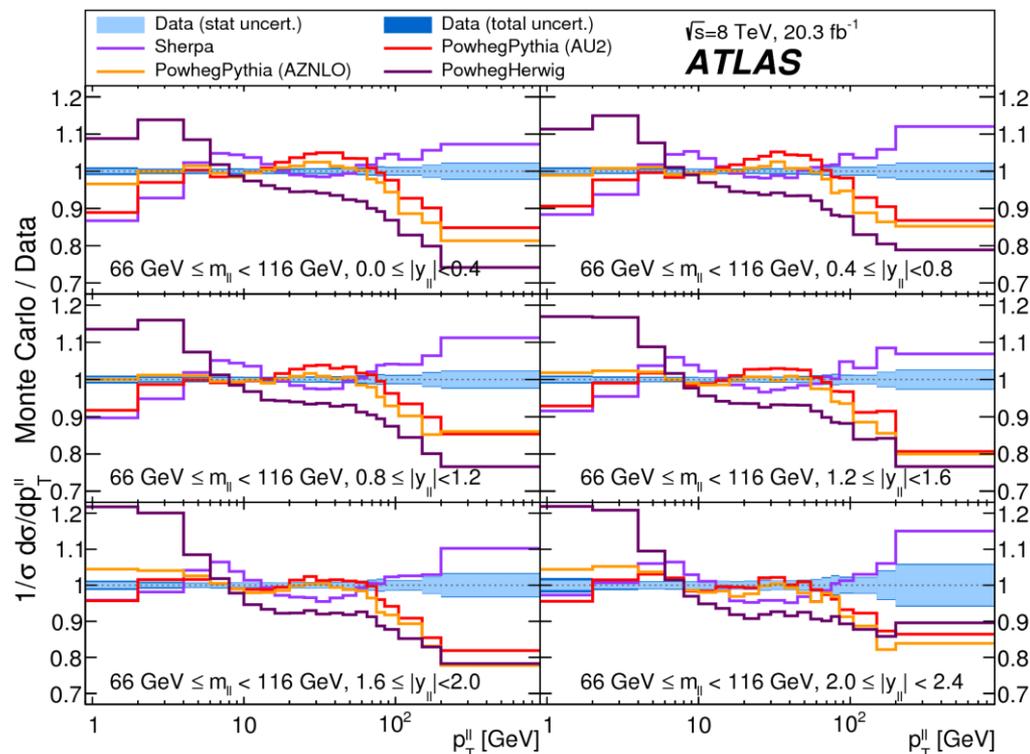
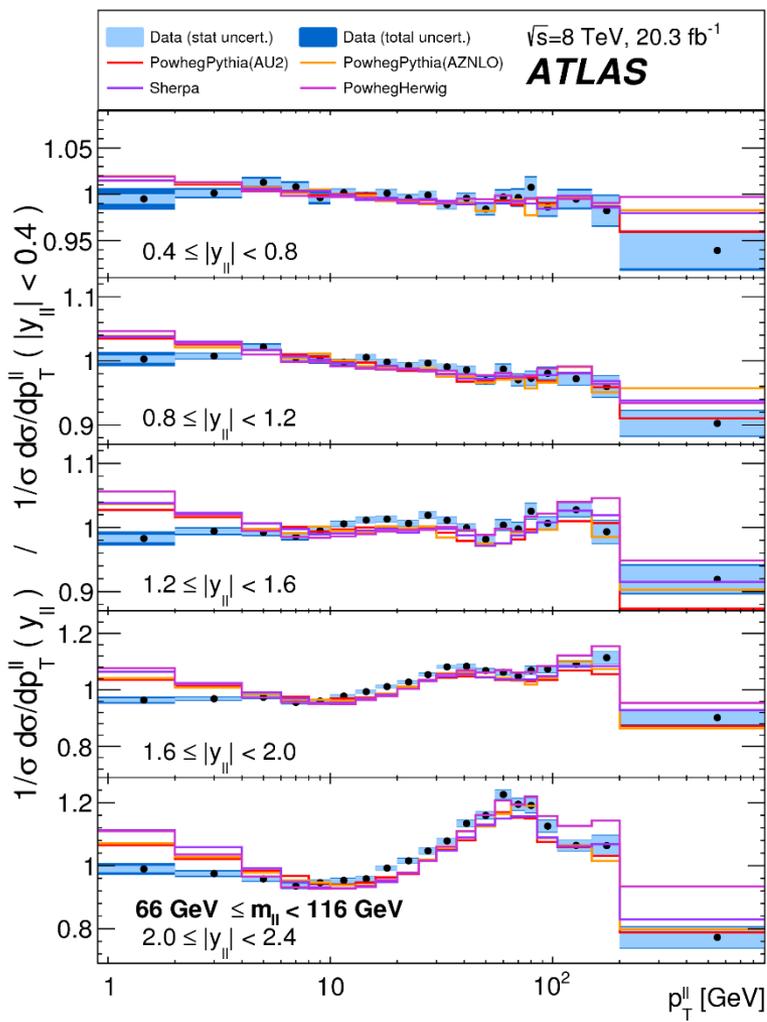
RESBOS (approximate NNLO+NNLL soft gluon) と比べると,
 弱ボゾンの質量領域の上, 下でそれぞれ違うパターンでずれが見られる

弱ボゾンの rapidity による依存性



- モデルは rapidity 依存性のだいたいの傾向は知っている
- ズレのパターンも、あまり rapidity に依存していない

様々なモデルとの比較

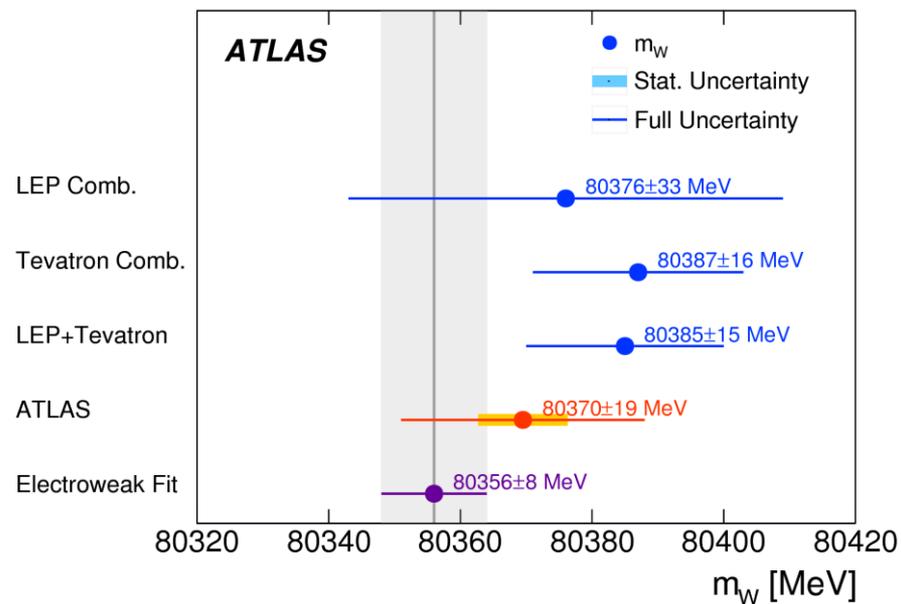
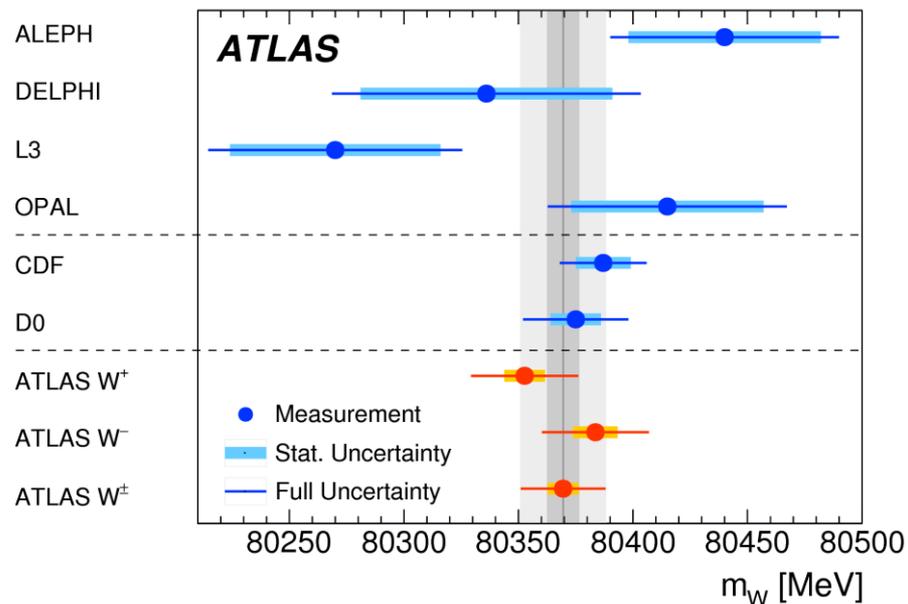
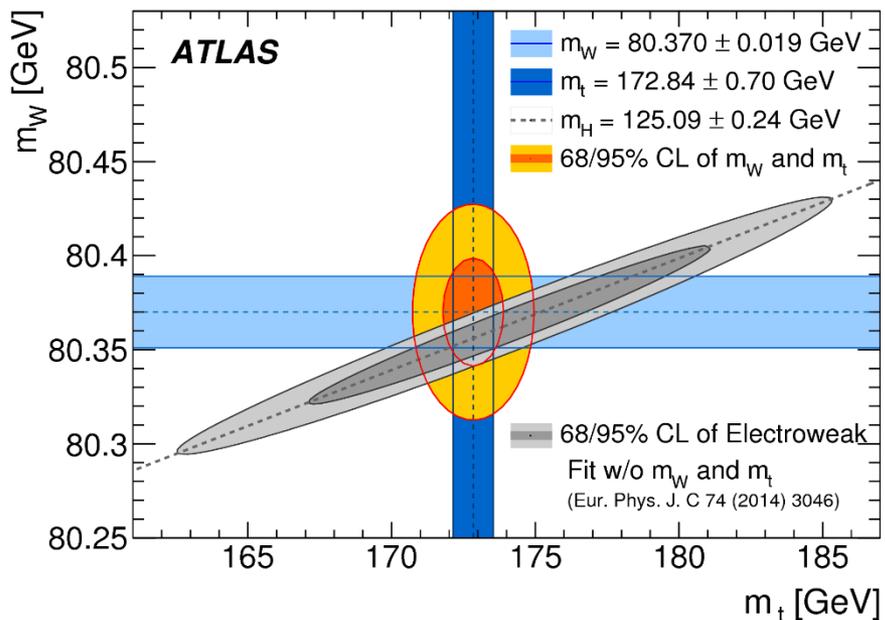


- モデルごとかなり違う予言
 - Powheg+Pythia and +Herwig
 - Powheg and Sherpa
 - ... and RESBOS

Factorisation は, 難しい

W mass 結果

- 1σ 以内で一致。
標準模型よ, どこへ行く



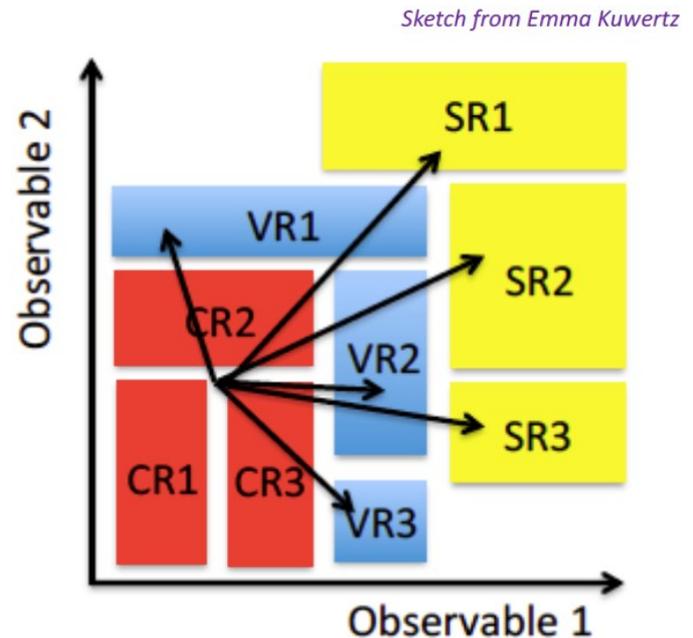
新物理探しでの QCD

BSM search での バックグラウンド

- QCD はだいたい事象を記述している
これまでの話も細かい話でした
- BSM の場合は，違った意味での細かい話：レア事象
位相空間のはじっこでどうなるか
- 例：
 - やたら多いジェット (NLO + Parton shower でいけるか)
 - 重いクォーク生成 (radiated $g \rightarrow Q\bar{Q}$ 多い)
レプトン信号のバックグラウンドにもなる
 - トップクォーク
レプトン, b quark, マルチジェット 何でも出す
Missing も出す
- 再構成, アルゴリズムによる工夫でバックグラウンドを減らすが
最後に残ったのは変なイベント
- シミュレーションはあまり信頼できない

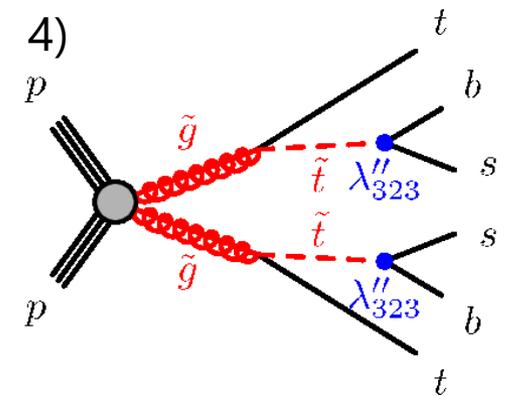
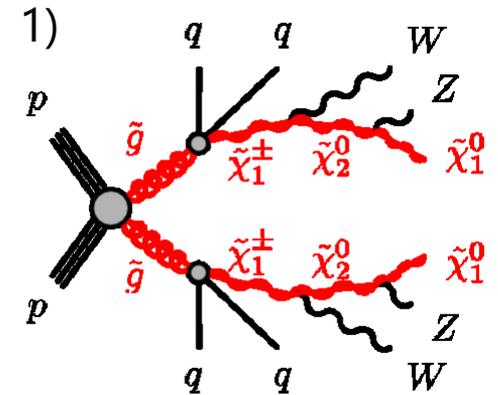
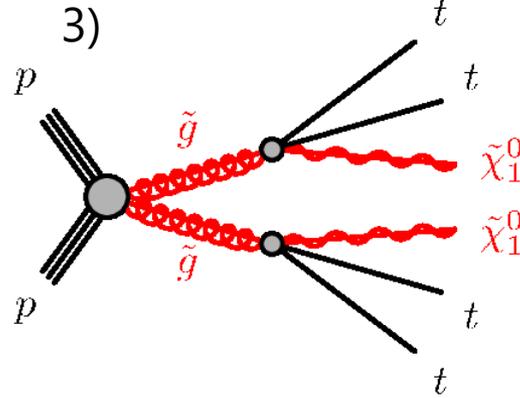
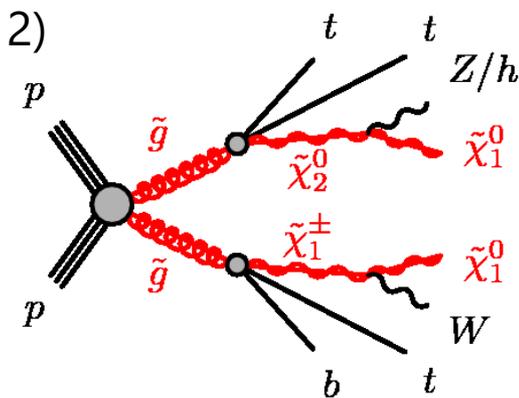
データによるバックグラウンド推定

- シミュレーションは，パートンシャワーにより位相空間を埋めてはいる，と考える
- ただし，量は間違っているかも
 - 絶対量：もちろん正しくない (higher order correction)
 - 相対量：大角度の QCD radiation の相対量は，パートンシャワーの不得意とするところ，やはりあまり正しくない
でも，近傍から外挿すれば，だいたいOKかもしれない



例: ATLAS 0L + E_{miss} + ≥ 7jet search

- Classic SUSY から多数のジェット
 - 強い相互作用をする粒子は重いが, TeV 領域
 - 1. gaugino/higgzino がまばらに質量分布 (カスケード崩壊)
 - 2. 特に重い neutralino/chargino が Higgsino-like だと終状態にトップが出る
 - 3. または stop 経由で top が多数生成 (3-4 top)
 - 4. (classic でない) R-Parity violated model 一般に最後の R-parity breaking 崩壊は見える粒子が増える



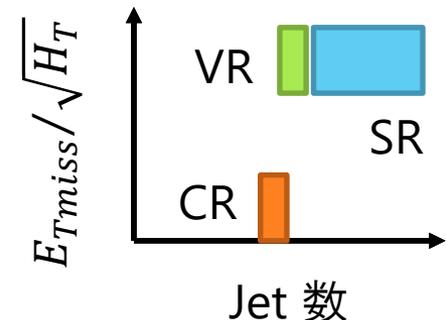
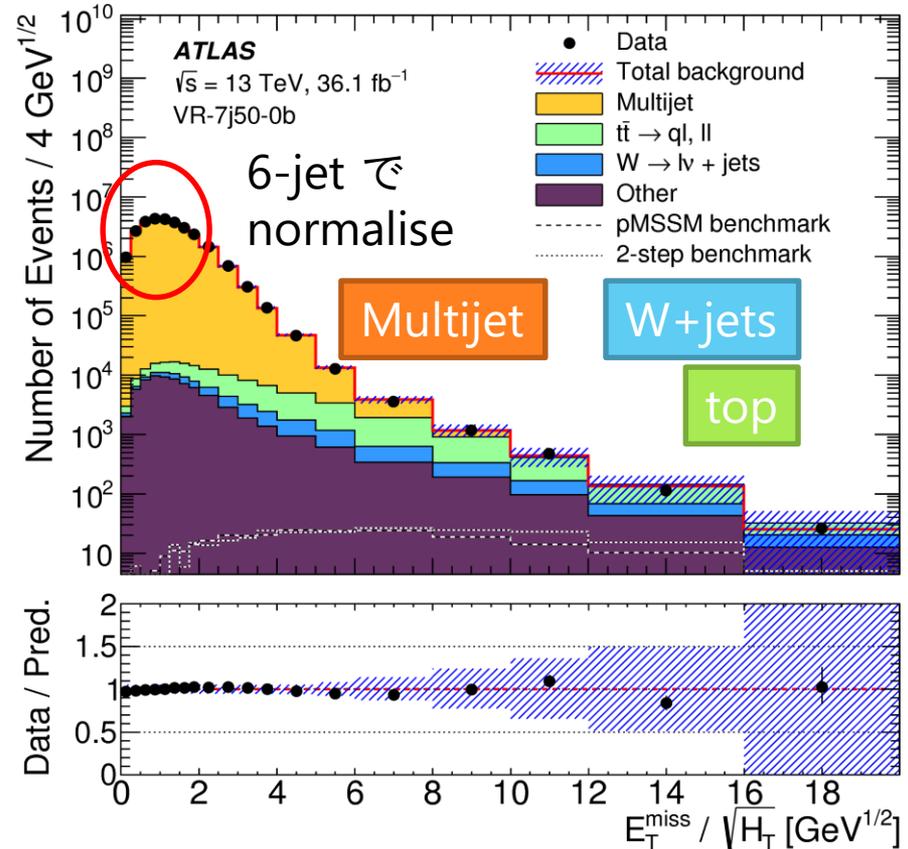
信号領域 (SR) と control region (CR)

SR:

- Lepton なし
- Large E_{Tmiss} : $E_{Tmiss} / \sqrt{H_T} > 5 \text{ GeV}^{1/2}$
 H_T : jet p_T のスカラー和
- たくさんのジェット ($\geq 7, 8, 9, 10, 11$)
 または
 たくさんのジェットと ($\geq 8, 9, 10$)
 質量の重いジェット1つ
 ($> 340, 500 \text{ GeV}$)
 - 重い中間状態がブーストされると
 複数のジェットがまとまる

Multijet CR: 6 jet, $E_{Tmiss} / \sqrt{H_T} < 1.5 \text{ GeV}^{1/2}$

Validation region (VR): 7 jet, $E_{Tmiss} / \sqrt{H_T} > 5 \text{ GeV}^{1/2}$

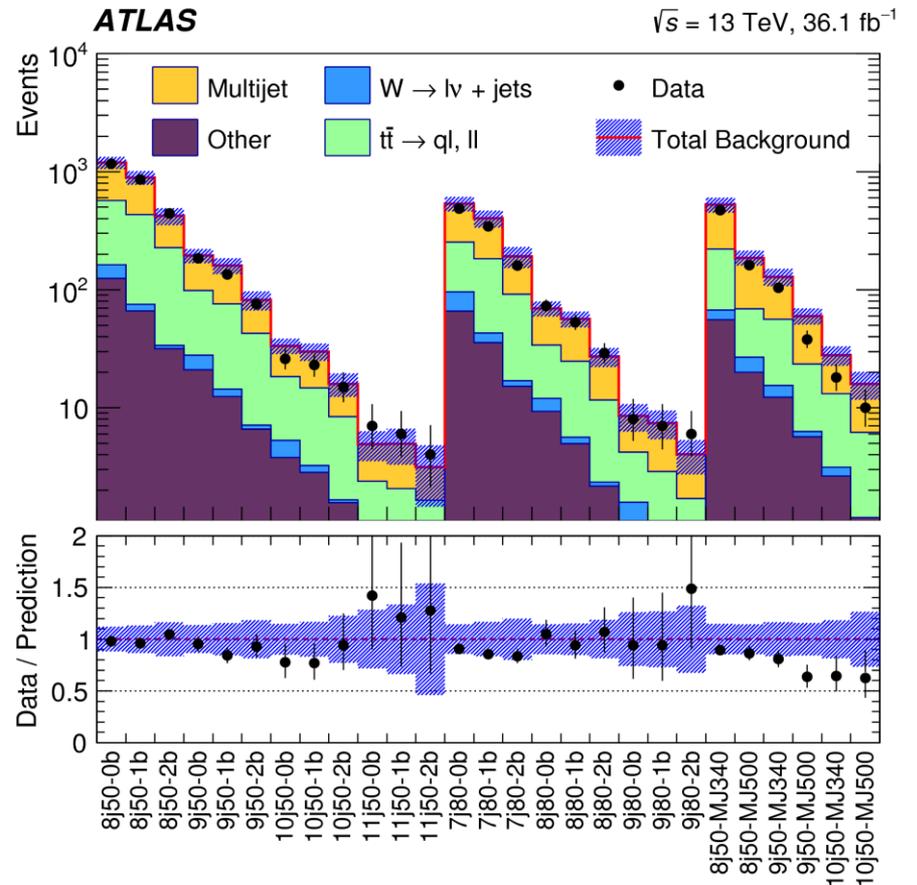
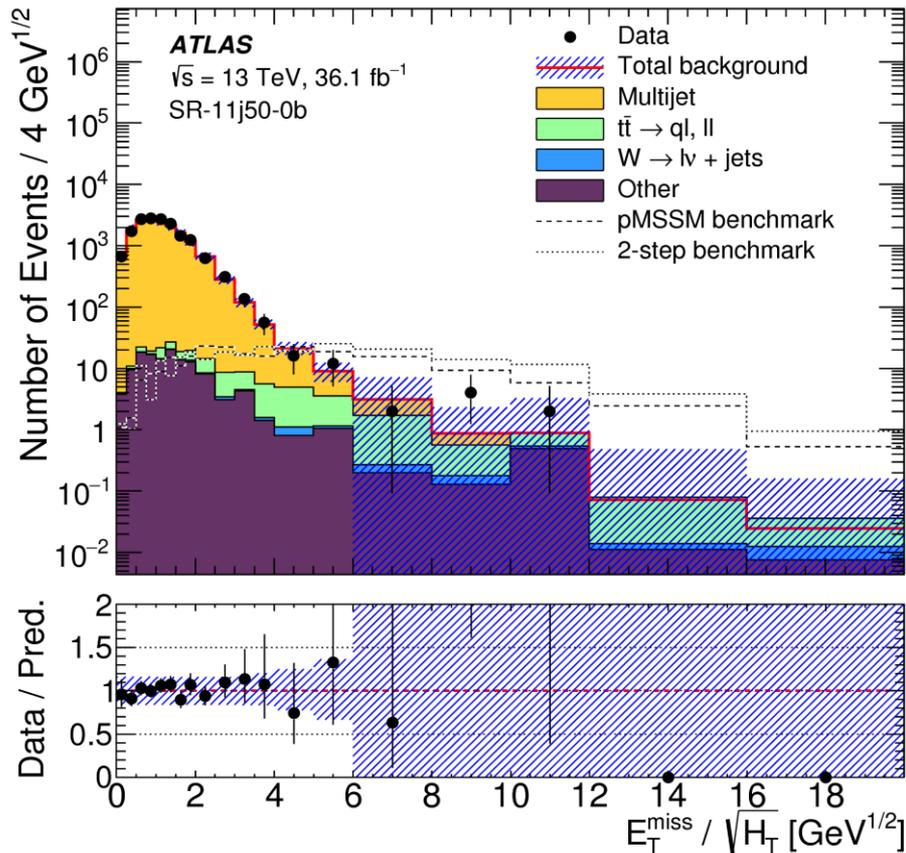


信号領域の分布

Multijet

W+jets

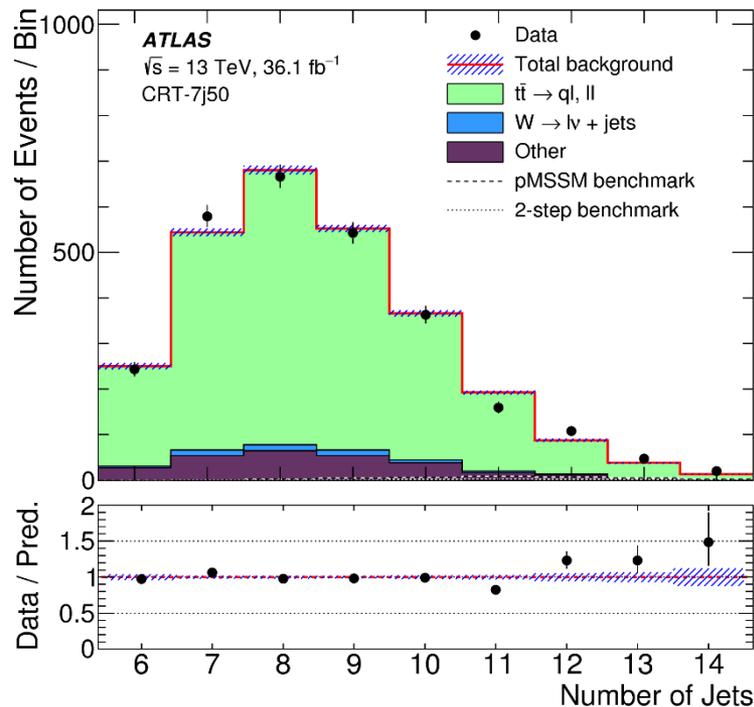
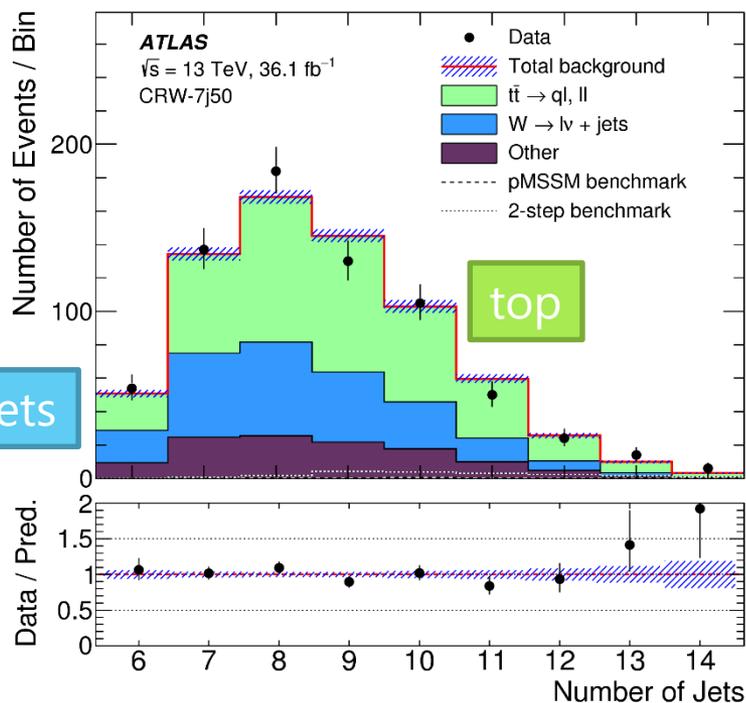
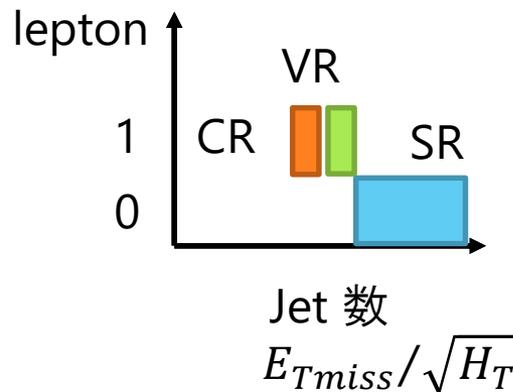
top



- 実はバックグラウンドには $t\bar{t}$, $W + jets$ も多い

$t\bar{t}, W + jets$ の見積

- Lepton を要求して control region を設定
- $t\bar{t}, W+jets$ の区別は b-quark があるか (top) ないか (W)



1 lepton, ≥ 7 jet, $> 3-5 GeV^{\frac{1}{2}}$, b-tag なし

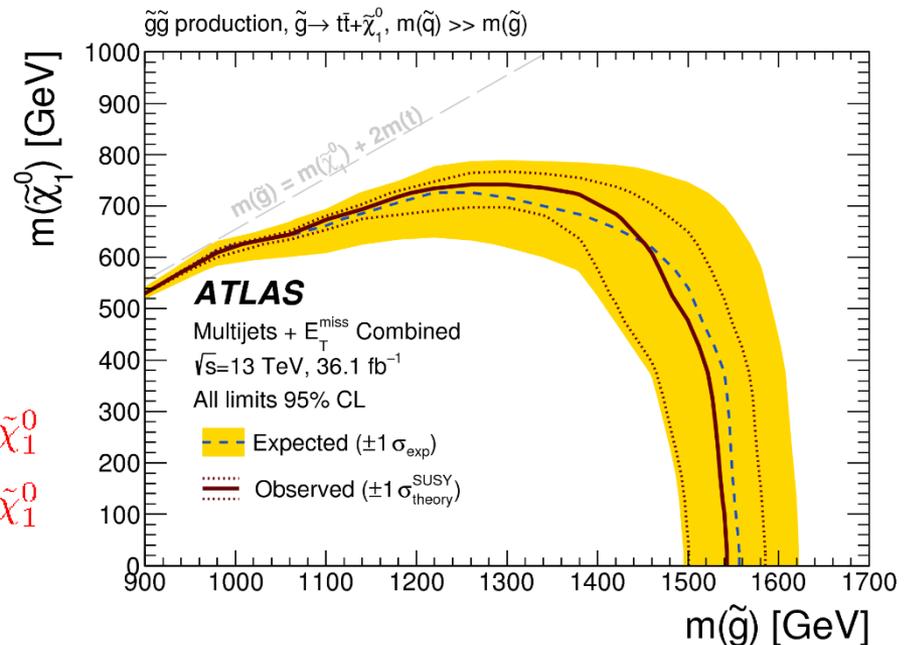
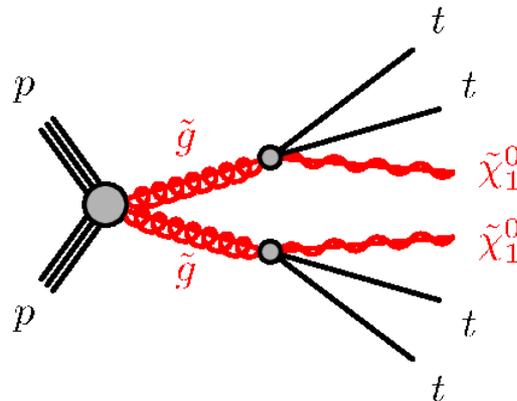
b-tag あり

Systematic error と結果

- Multijet: up to 18% in SR # of events
 - Heavy flavour composition (b-enriched), H_T dependence: データから見積もった
- Top: 10-25 % : jet の数に関するもの
 - Generator 依存性
 - ME – PS マッチング
 - PS モデル など

信号領域はおおむね < 10 event となるようなカットを選ぶ

結果
(stop loop の例)

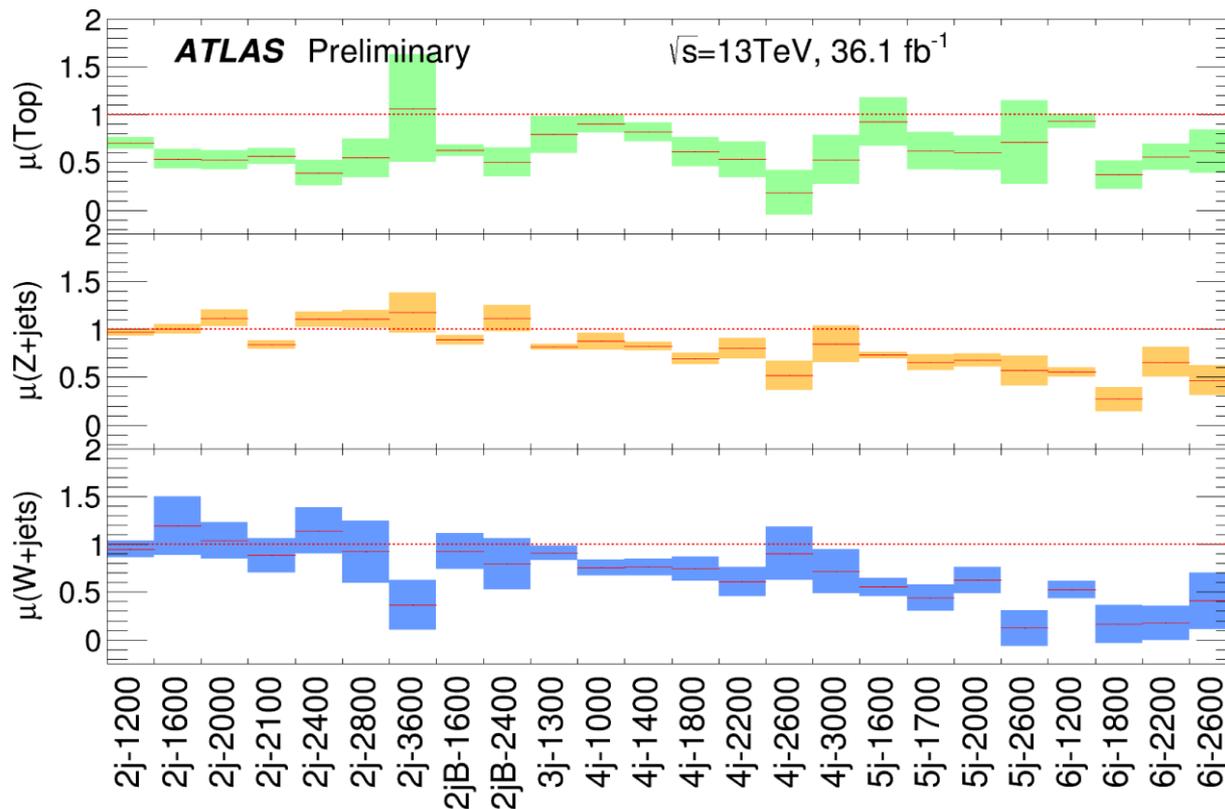


他の解析の例

0-Lepton + 2-6 jets SUSY search (中浜さん, 佐野君も)

- ME 系の誤差が大きい

scale factor: ジェットが大きいほど小さくなる :
理論は multijet が多すぎるようである



まとめ

- LHC での精密測定には, QCD の理解が欠かせない
 - W は ILC で測れるが, top は向こう 20 年 LHC のデータから
- Top mass, W の測定には Soft-hard の境界の物理が効いている
 - Jet fragmentation, parton shower modelling (top mass)
 - W p_T , ISR (W mass)
 - PDF (W mass)
- いろんな測定で, Matrix Element, Parton Shower の不定性も効いている
 - N(N)LO uncertainty (top mass, SUSY searches)
- とはいえ, Generator は一昔前から格段の進歩, まだまだいけます

Boosted object の系統誤差

- Event selection の効率見積が generator によってまちまち
 - 何か再現できていない