

LHC-ATLAS実験における モノジェット事象の探索

風間慎吾, 金谷奈央子^A, 寺師弘二^A

浅井祥仁, 小林富雄^A

東大理, 東大素セ^A

日本物理学会年次大会@新潟大学

1. 大きな余剰次元模型 (Large Extra Dimension)

階層性問題・・・Planckスケール($\sim 10^{19}\text{GeV}$)とEWスケール($\sim 100\text{GeV}$)の乖離

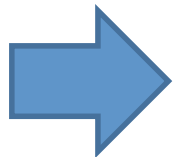


Large Extra dimension (Arkani-Hamed, Dimopoulos, Dvali)

- n 個のフラットな余剰次元がコンパクト化されている(サイズ R)
- 全ての標準理論の粒子は $(3+1)$ 次元のBraneに束縛されており、Gravitonのみが余剰次元を伝播できる

$$M_{pl}(4)^2 \sim M_{pl}(n+4)^{n+2} R^n$$

- $M_{pl}(4)$ ($\sim 10^{19}\text{GeV}$)が余剰 n 次元空間の大きな体積 $V_n = (2\pi R)^n$ によって薄められた結果、真のPlanckスケール $M_{pl}(n+4) \sim \text{TeV}$ となる



階層性問題の解決

- ◆ $n=1$: $R \sim 10^8\text{km}$ なので除外
- ◆ $n=2$: $R \sim 100\mu\text{m}$ (Eöt-Wash実験の範囲 $M_{pl}(n+4) > 3.2\text{TeV}$)
- ◆ $n \geq 3$: **加速器実験**での探索が有効

$$R \sim 10^{30/n-17}\text{cm}$$

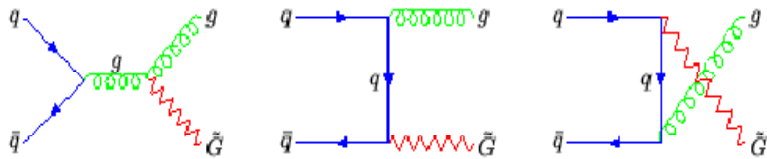
1. Kaluza-Klein (KK) Graviton の実生成

2. SM粒子間の仮想KKGravitonの交換

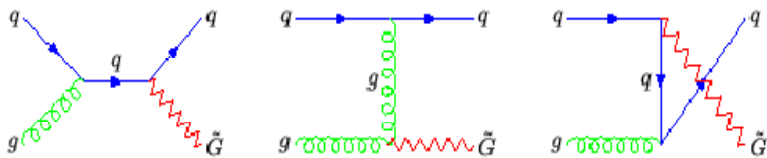
1. 大きな余剰次元模型:LHCでのシグナル

LHCでのKK Gravitonの生成は**モノジェット**として見える

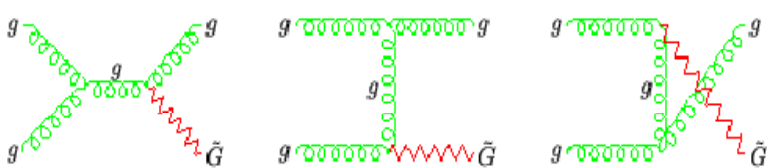
• $q\bar{q} \rightarrow gG$



• $qg \rightarrow gG$



• $gg \rightarrow gG$



シグナルの特徴

● KK Gravitonは検出器と相互作用しないため観測されない



大きな消失エネルギー
(Missing Et)として観測される

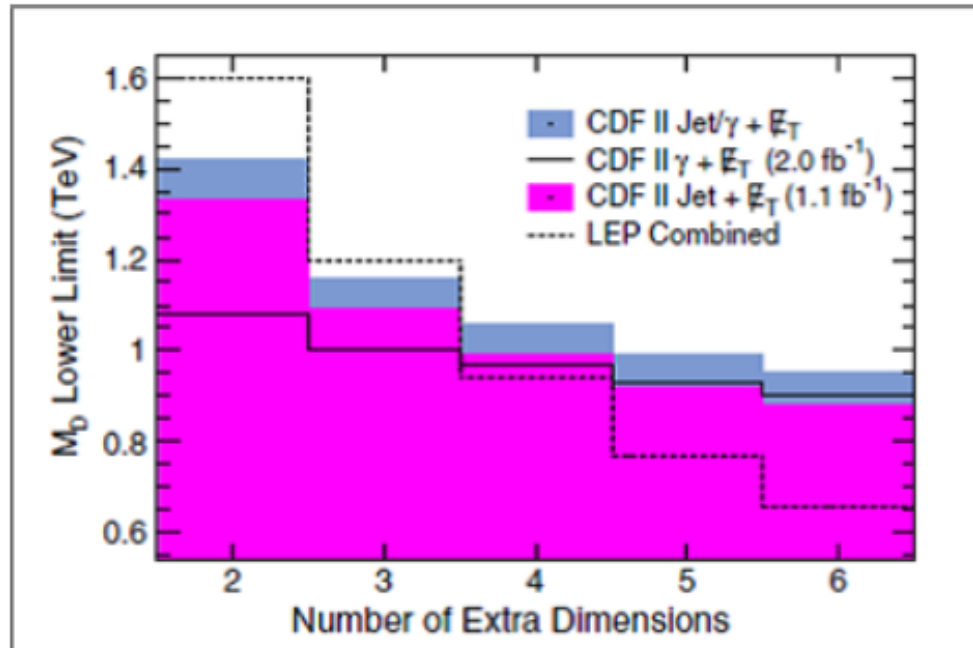
● 生成断面積: $\sigma_{total} \sim \frac{E^n}{M_{pl}(n+4)^{n+2}}$

1つ1つのKKモードのカップリングは弱い
が、全ての振動モードを足し合わせることで、
グラビトンは強い結合となる。

探索すべきは、モノジェットとMissing Etがback-to-backに観測される事象

1. 大きな余剰次元模型: 現在までのリミット

● 加速器実験からの制限



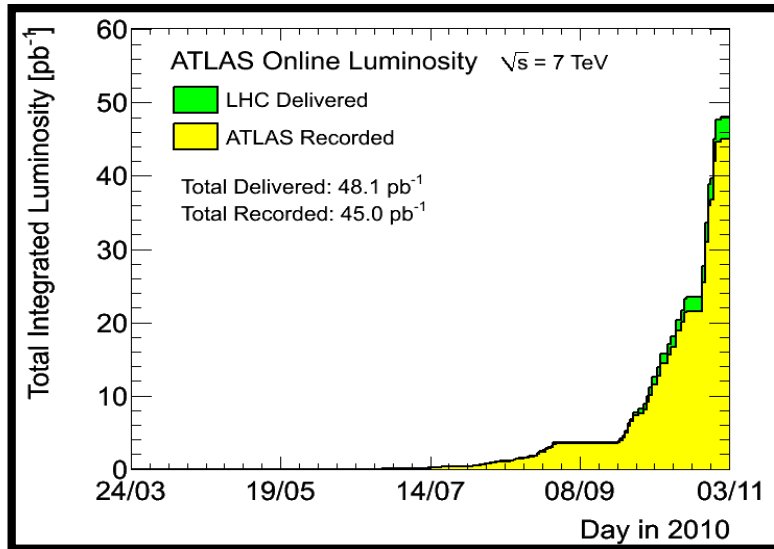
95%CL lower limit on $M_{pl}(n+4)$
(γ , or jet+MissingEt combined)

n	95%CL lower limits on $M_{pl}(n+4)$
2	1.40TeV
3	1.15TeV
4	1.04TeV
5	0.98TeV
6	0.94TeV

● 重力の逆二乗則からのズレの探索からの制限(Eot-Washグループ)

n	95%CL lower limits on $M_{pl}(n+4)$
2	3.2TeV

2.実験データ,シミュレーション,サンプルに関して(1/2)



解析では34.6pb⁻¹のデータを使った。

(ビームの安定性、主要な検出器が稼働していたイベント)

KKgraviton(シグナル)サンプル

- $M_{pl}(n+4) = 1.1\text{TeV} \sim 3.0\text{TeV}$
- 余剰次元の数 $n=2,3,4,5,6$ (合計約100点、各 2.0×10^5 イベント生成)
- GeneratorとしてはExoGravitonを使用
- $M_{pl}(n+4) = 1.5\text{TeV}, 2.0\text{TeV}, 3.0\text{TeV}$ はFullサンプルが存在し、その他は、Geant4ベースのfull simulationではなく、fast simulationを使用 (ただし、full simulationの結果を再現するようtuneされたfast simulation使用)

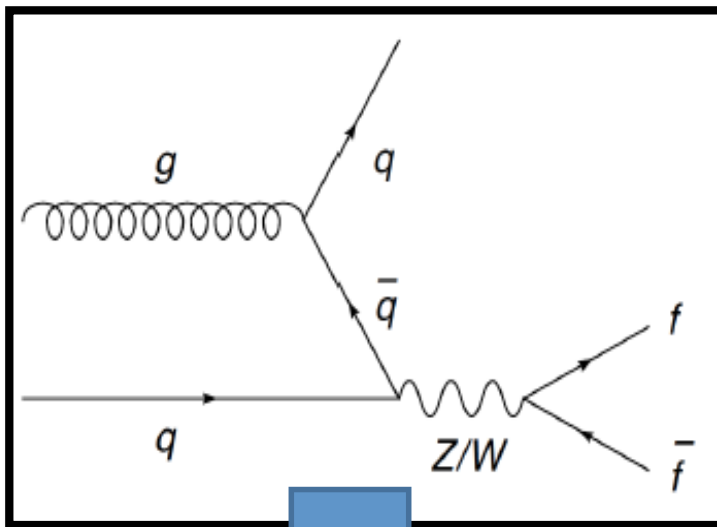
	Xsec@($n=3, M_{pl}(n+4)=1.5\text{TeV}$)
qg	31.6pb
gg	23.0pb
qqbar	4.6pb

非常に大きな生成断面積を持つ($\sim O(100)\text{pb}$)

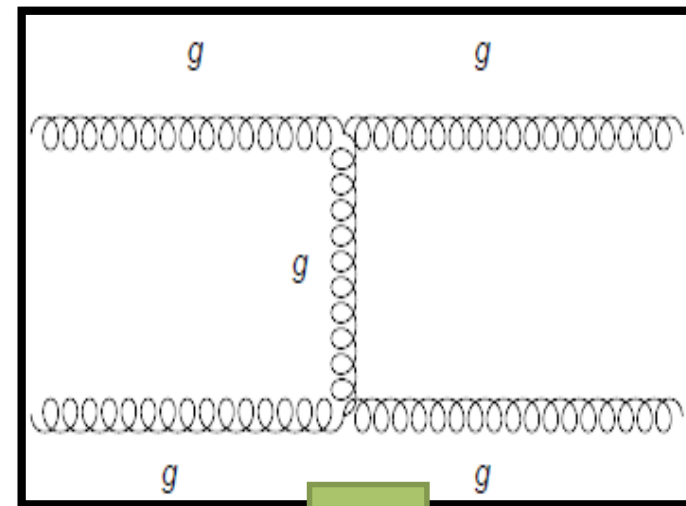
2.実験データ,シミュレーション,サンプルに関して(2/2)

バックグラウンドは全てFullシミュレーションを用いて評価した

Main Background	Event Generator	Cross section (pb)	イベント数
$Z \rightarrow \nu\nu$	Alpgen	5800	1×10^5
$W \rightarrow l\nu$	Alpgen	31000	6×10^6
QCD	Pythia	$\sim 10^{10}$	1×10^7
ttbar	MC@NLO	160	9×10^5
$Z \rightarrow ll$	Alpgen	3200	1×10^6



$Z \rightarrow \nu\nu$ はシグナルと同じトポロジーのため、最大のバックグラウンドとなる。
 $W \rightarrow l\nu$ はleptonのIDに失敗するとシグナルと同じトポロジーとなる。



片方のジェットが不感物質中でエネルギーを多く損失するとバックグラウンドとなる。

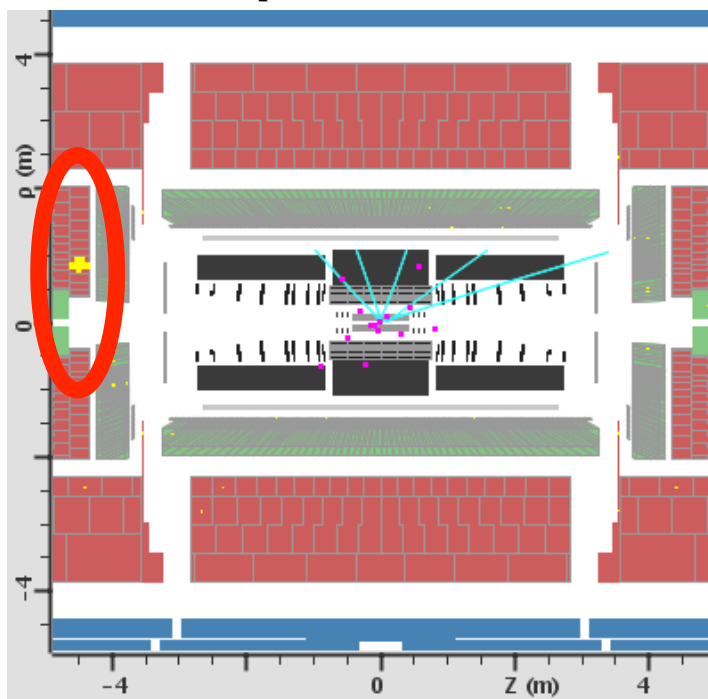
3.1.解析:Event Cleaning

Non-collision起源のイベント(Noise,Cosmics,BeamHaloはバランスせず、MissingEt分布にテールを作る。特にCosmics起源のイベントは偽のmono-jet事象を作ってしまう

“EventのCleaning が必要”

1. HEC(Hadron EndCap) noise
2. LAr coherent noise
3. Cosmics,BeamHalo

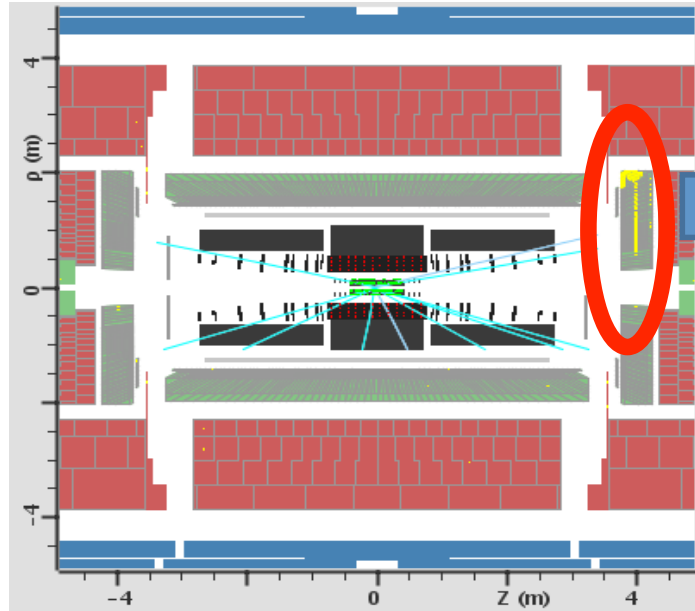
1. HEC(Hadron EndCap) noise



- MissingEtのtailのほとんどがHEC(Hadron EndCap)のnoiseに起因している。
- 基本的にsingle cellが鳴るため、mono-jet事象の様に見える

HECnoiseは、1つのjetに含まれるCellの数が少ないため、これにより除去可能

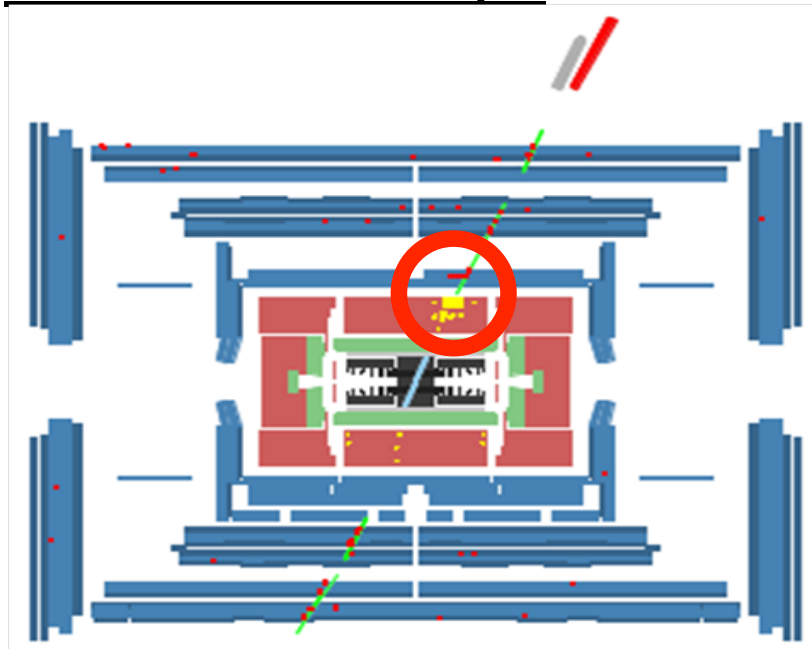
2. LAr coherent noise



LAr(電磁カロリメータ)でcoherentなノイズが発生することがあり、非常に大きなMissingEtをとる
(左イベントではMissingEt = 1959GeV)

LArでの出力波形と期待される波形を用いて落とせる

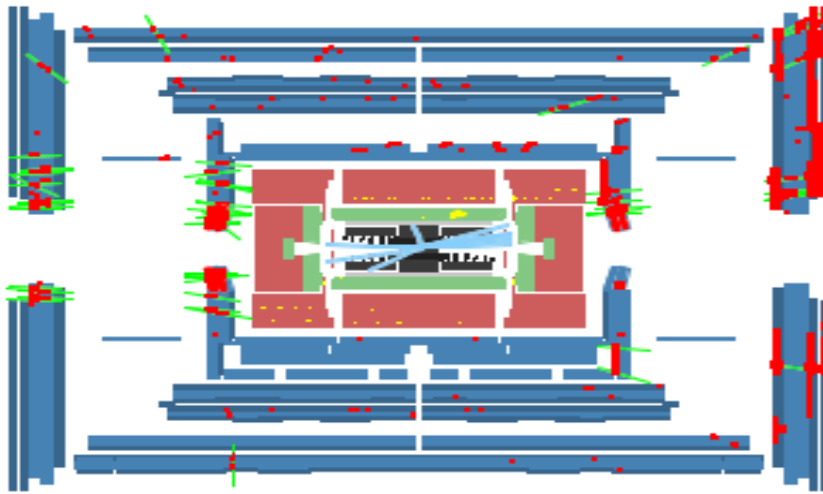
3. cosmic rays



cosmic muonがハドロンカロリメータで制動放射を起こしてhigh pT jetを作り、あたかもmono-jet事象の様に振る舞う
(100GeV以上のJetを作るレート ~ 0.1 Hz)

クラスターにassociateしているtrackがないこと、さらには電磁カロリメータで測定されたエネルギーの割合が低いことに着目して落とせる

4. Beam Halo

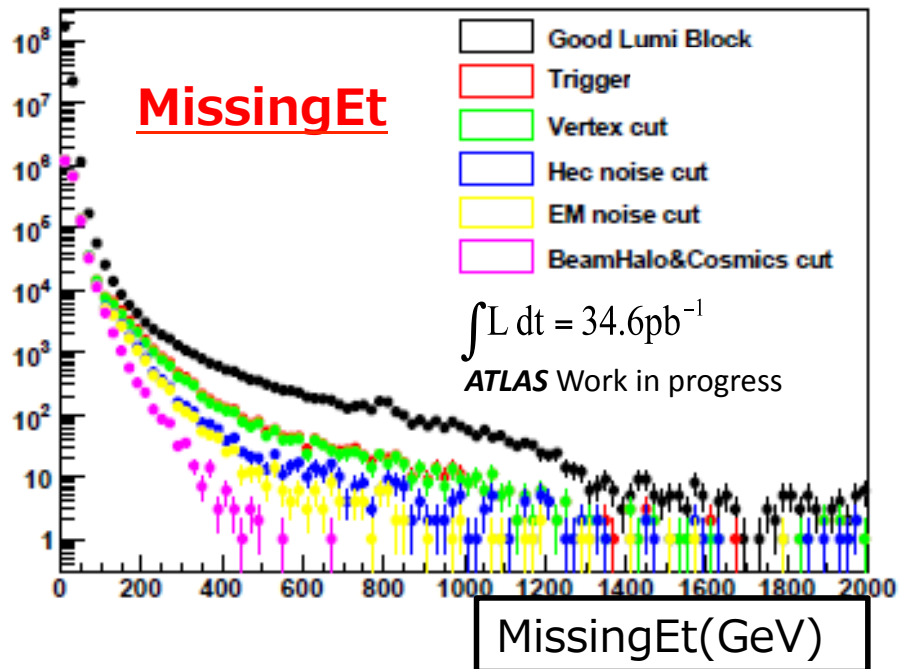


BeamHaloとは陽子ビームがLHC 加速器のビームパイプ内の残留ガスと弾性・非弾性散乱することで生じる二次粒子のこと (左図ではBeamHaloのミュオンが水平方向に検出器全体を通過している)



クラスターにassociateしているtrackがないことに着目して落とせる

5. Event Cleaning前後のMissingEt分布



3.2.解析:Event Selection

1. Number of electron = 0
2. Number of muon = 0
- 3. MissingEt > 220GeV**
- 4. Leading Jet pT > 250GeV & $|\eta| < 2.0$**
- 5. 2nd Jet pT < 60GeV**
- 6. $\Delta\phi(2nd\ jet\ \&\ MissingEt) > 0.5$**
7. Number of jet < 3

No lepton channel

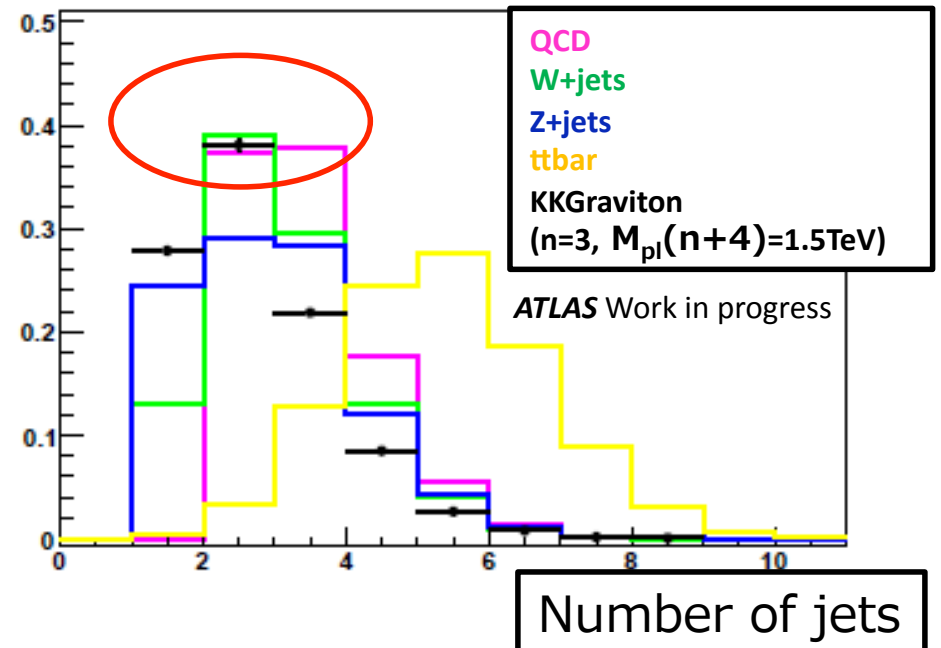
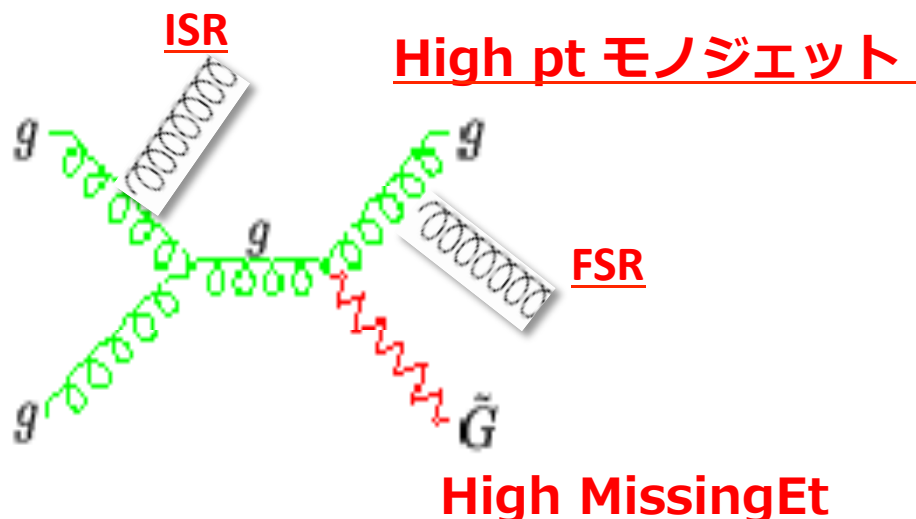
**back-to-backの
high pT モノジェット**

+

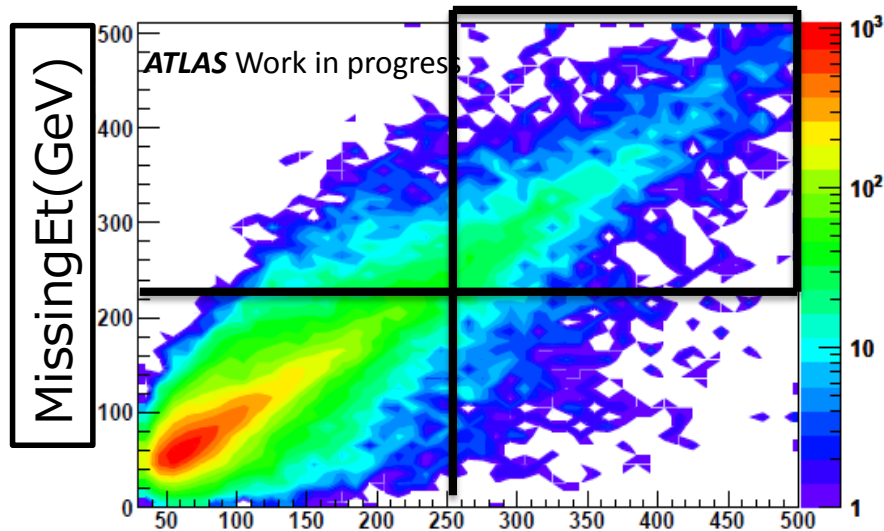
大きなMissingEt

ISR/FSRの効果から

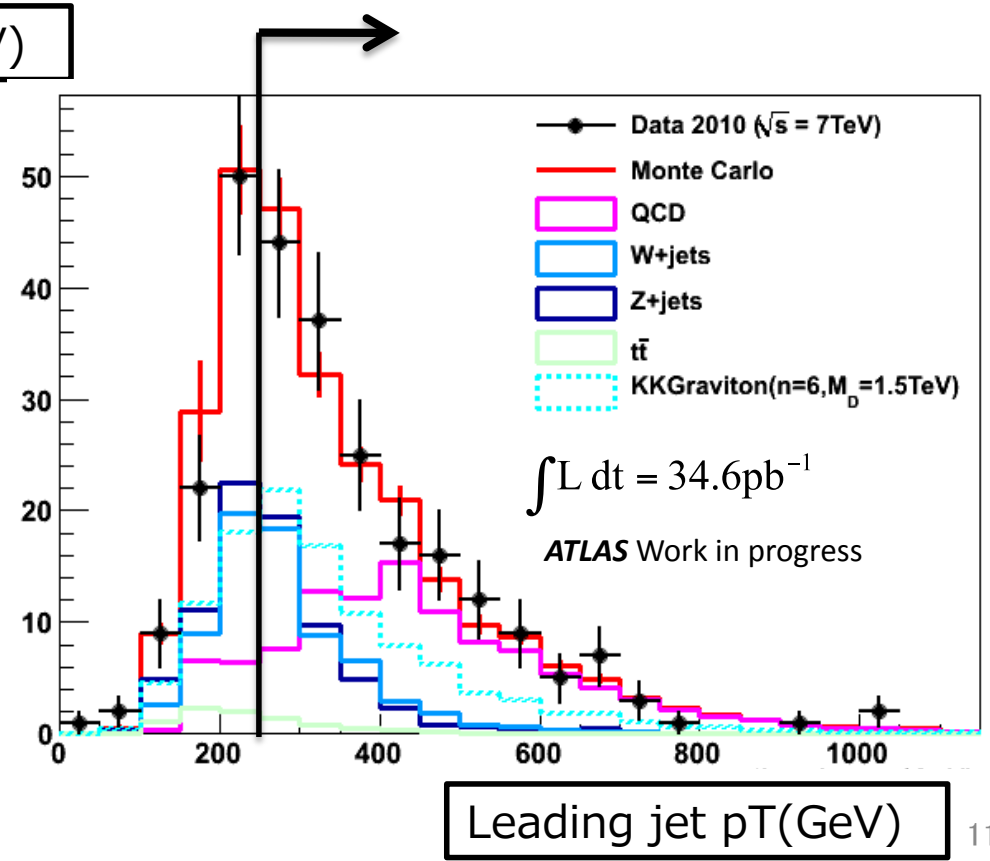
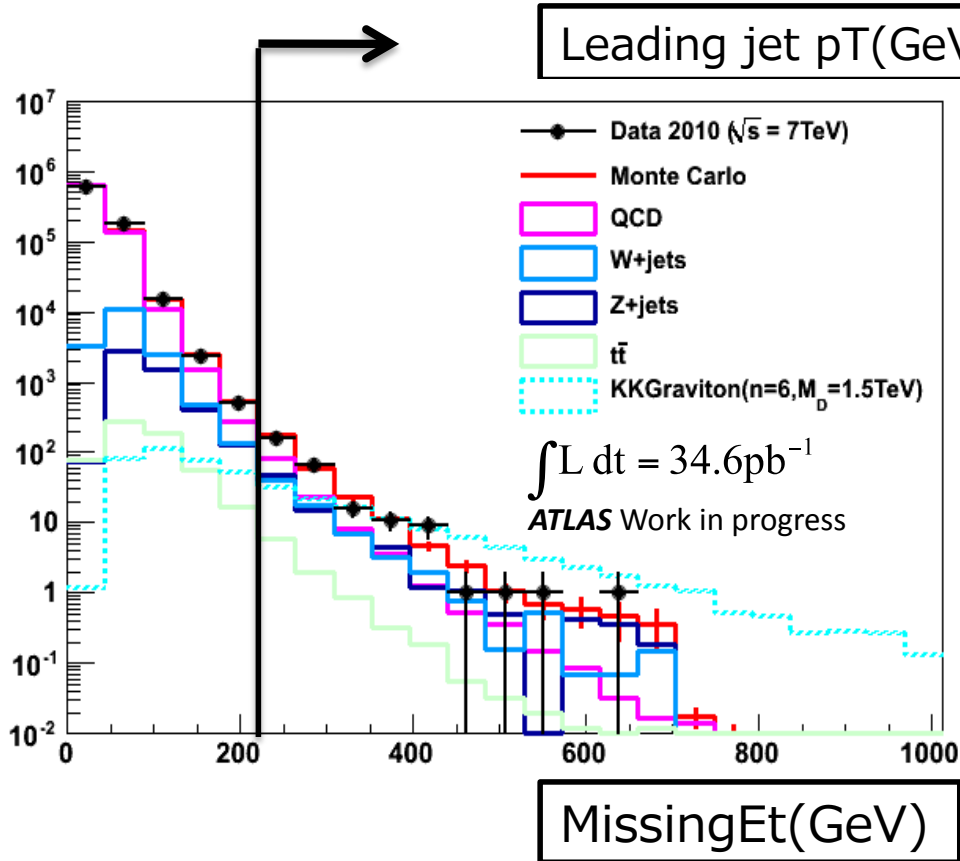
シグナルも2nd jetを多く持つ



3.2.解析:Event Selection: MissingEt & 1st jet

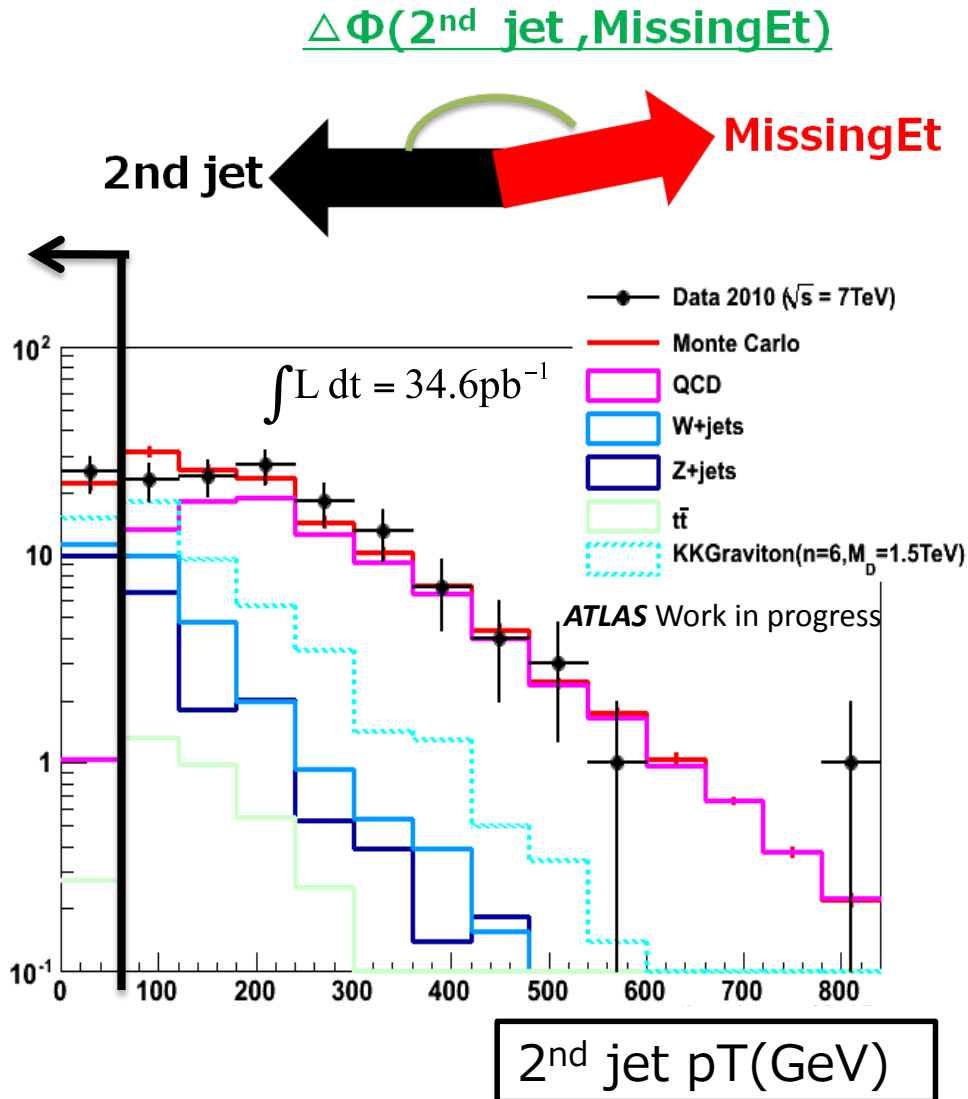


- Leading jet とMissingEtは強い相関を持つ
- **MissingEt > 220 GeV**
- **Leading jet pT > 250 GeV**

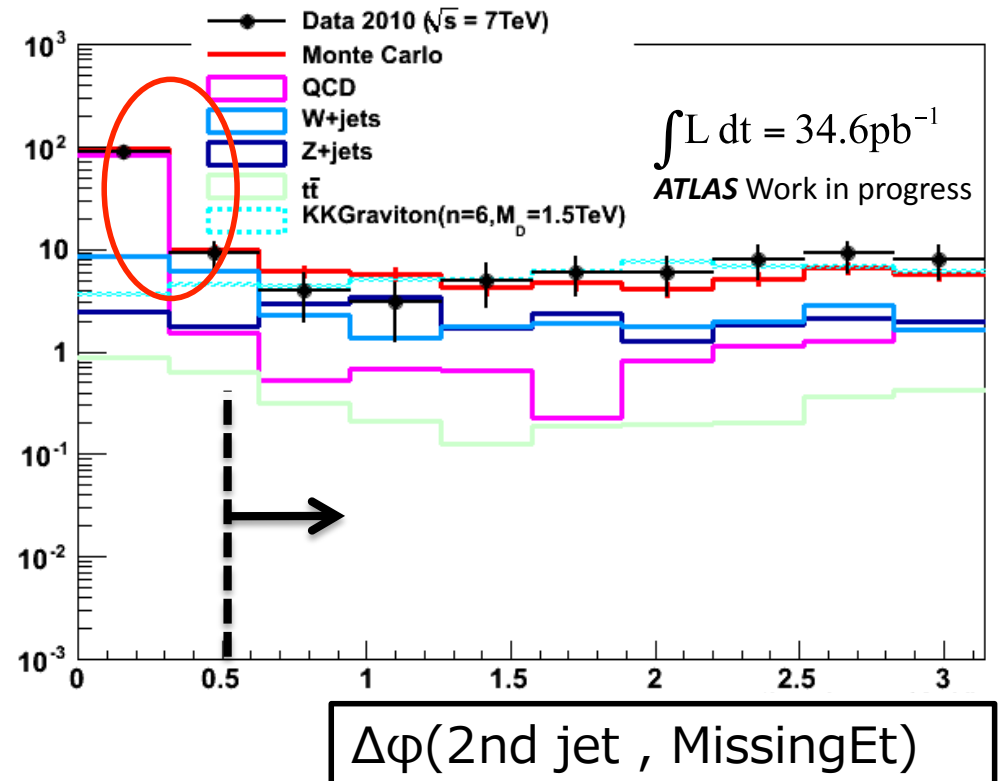


3.2.解析:Event Selection: 2nd jet cut

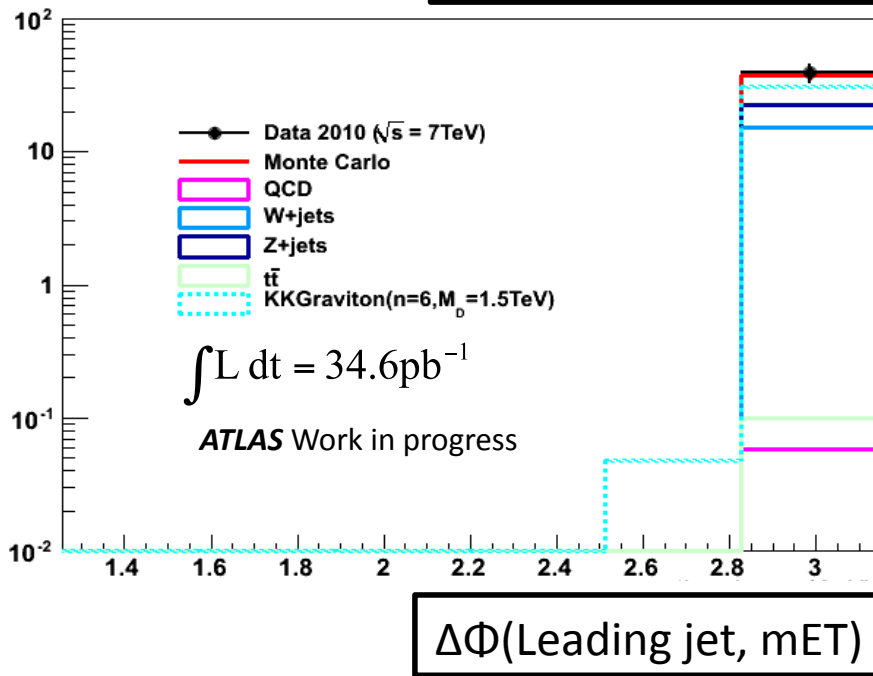
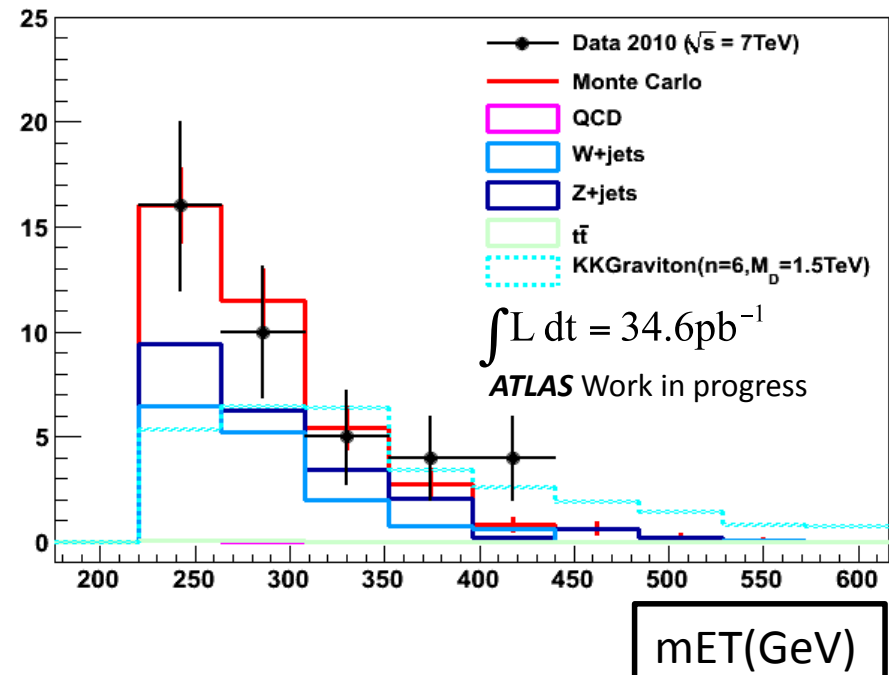
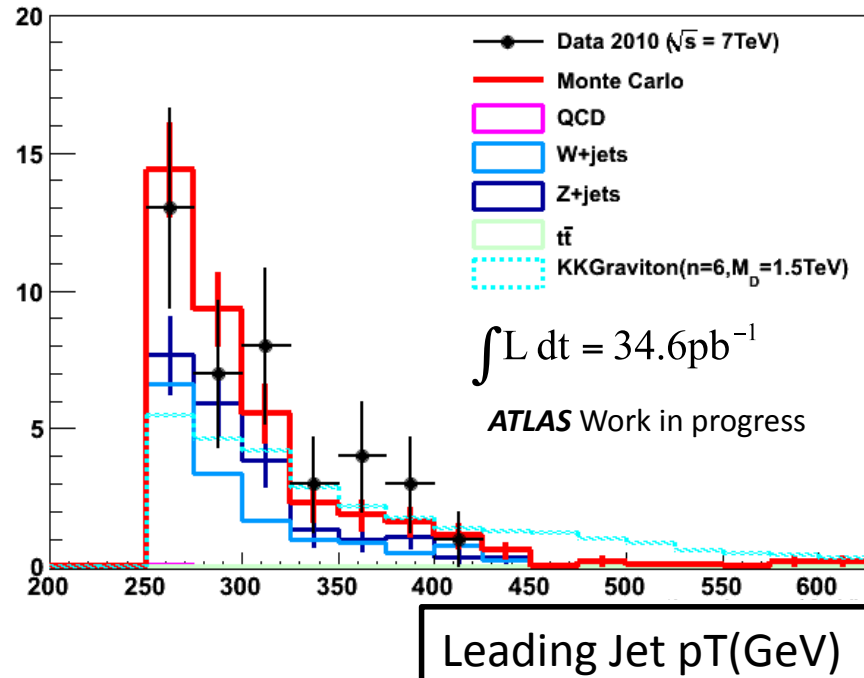
ISRやFSRの効果でシグナルは2nd jet を多く持つ。ただし、QCDを落とすため2nd jet $p_T < 60\text{GeV}$, $\Delta\phi(2^{\text{nd}} \text{ jet}, \text{MissingEt}) > 0.5$ を要求



QCD事象はMissingEtと2nd jet が同じ方向を向いている



3.2.解析:Event Selection:全てのセレクション後の分布



データと標準理論からの予言は合っており、超過は見られない

3.3.解析:Background estimation

バックグラウンドの評価法(MC法)

- MCと実験データの分布の形は合っていると仮定し、それぞれのバックグラウンドがエンハンスされる領域を選んでMCをデータに規格化し、その規格化係数(スケールファクター)を求める。

例えば、Wボソンバックグラウンドのスケールファクターは、

$$\frac{N_{Data} - (N_{QCD,MC} + N_{Z,MC} + N_{t\bar{t},MC})}{N_{W,MC}}$$

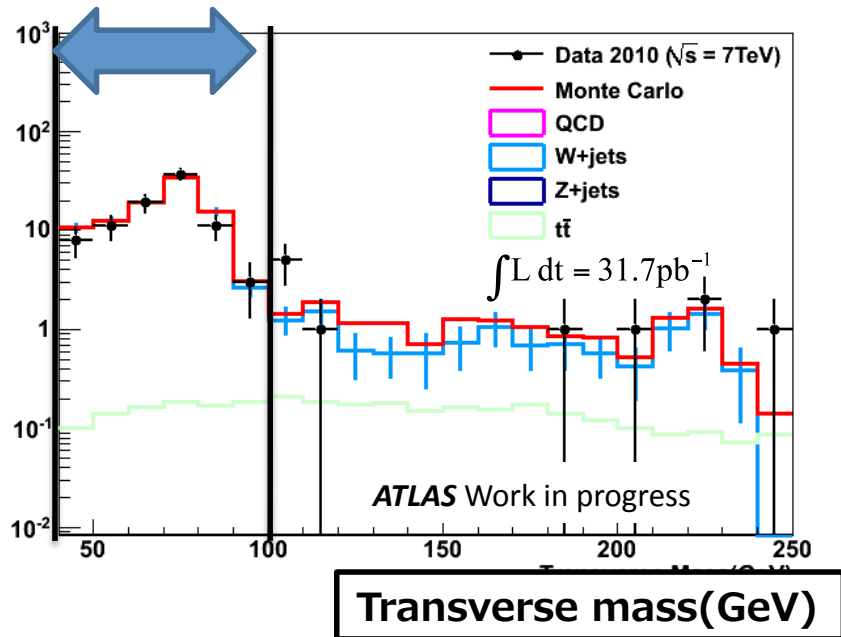
- スケールファクターを実際のEvent selection後に残るMCのバックグラウンドに適用させる。前ページまでのグラフには全てこのスケールファクターが適用されている。

*)ttbar事象は実験データの統計が少ないため、理論値で規格化している

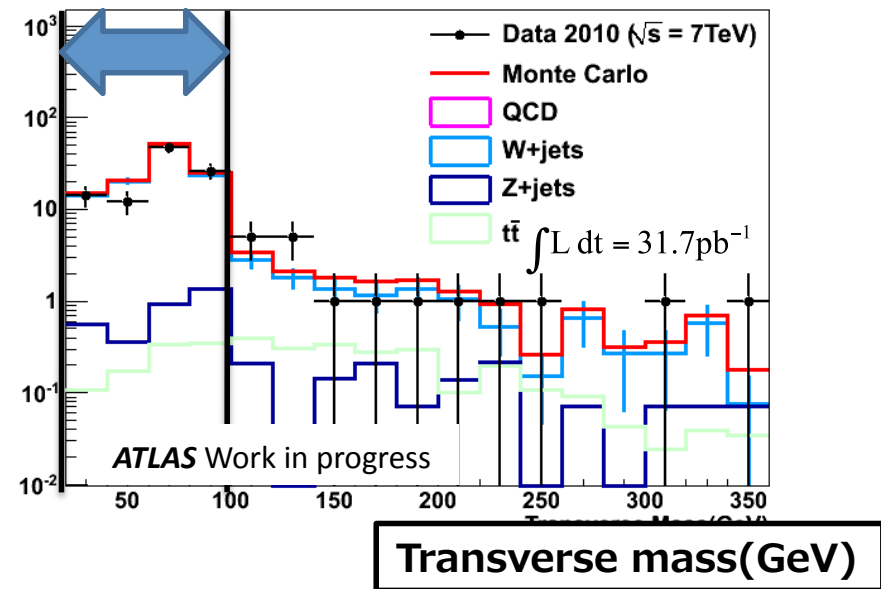
3.3.解析:Background estimation of $W \rightarrow l\nu$

Wボソン崩壊事象のエンハンスにTransverse mass(M_T)を用いる
 $40\text{GeV} < M_T < 100\text{GeV}$ を選択

electron channel



muon channel



モノジェットのトポロジーになるべく近くなるように評価するため、
High p_T モノジェット + 大きなMissingEtを要求する

1. Number of lepton = 1
2. $40\text{GeV} < M_T < 100\text{GeV}$
3. Number of jet = 1
4. MissingEt > 100GeV & $p_T > 100\text{GeV}$

Scale Factor

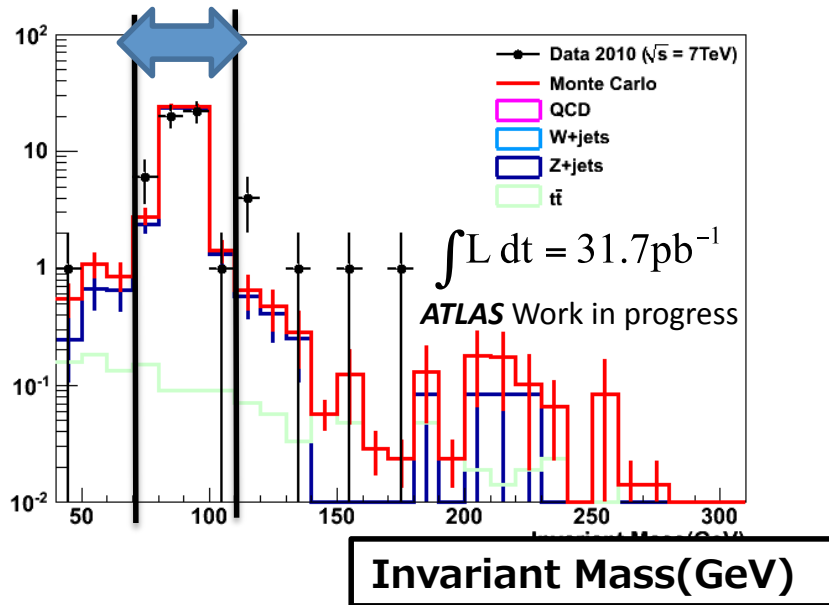
$W_{e\nu}, W_{\tau\nu} \rightarrow 0.96 \pm 0.14$

$W_{\mu\nu} \rightarrow 0.87 \pm 0.13$

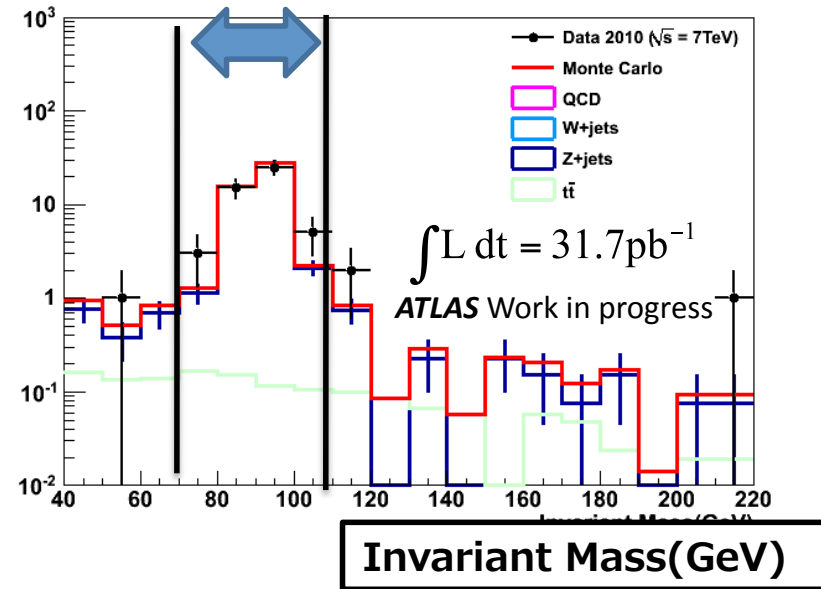
3.3.解析:Background estimation of Z → ll

Zボソン崩壊事象のエンハンスには、2つのleptonの不変質量 M_{ll} を用いる
 $71\text{GeV} < M_{ll} < 111\text{GeV}$ を選択

electron channel



muon channel



モノジェットのトポロジーになるべく近くなるように評価するため、
 High pT モノジェット + 大きなMissingEtを要求する

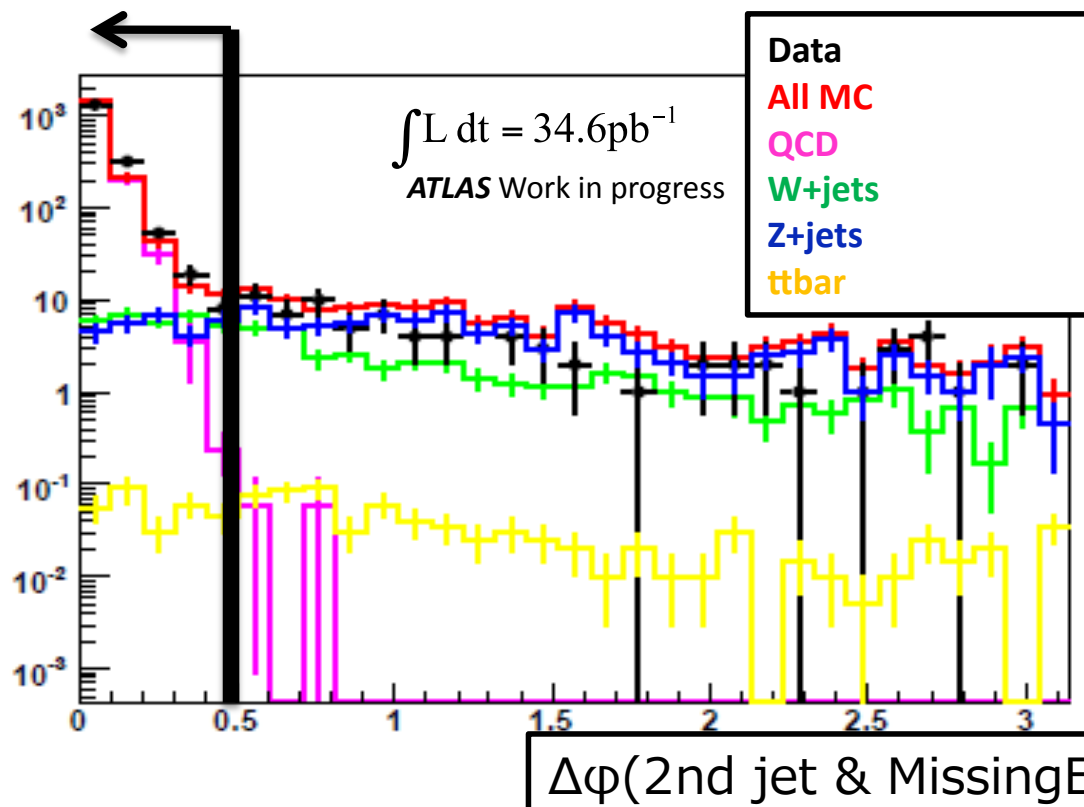
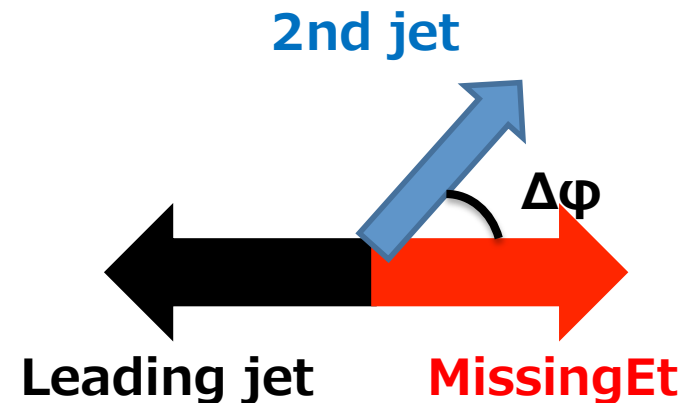
1. Number of opposite sign , same flavor lepton = 2
2. $71\text{GeV} < M_{ll} < 111\text{GeV}$
3. Number of jet = 1
4. $\text{MissingEt} > 100\text{GeV} \ \& \ pT > 100\text{GeV}$

Scale Factor	
Zee, Ztautau	→ 0.99 ± 0.18
Zmumu	→ 0.85 ± 0.18

3.3.解析:Background estimation of QCD

1. Number of electron = 0
2. Number of muon = 0
3. MissingEt > 100GeV
4. Leading Jet pT > 200GeV & $|\eta| < 2.0$
5. Number of jet < 3
6. $\Delta\phi(2nd\ jet \ \& \ MissingEt) < 0.5$

$\Delta\phi(2nd\ jet \ ,MissingEt) < 0.5$
でエンハンスする



スケールファクター
= 1.01 ± 0.04 (stat.)

3.4.解析: Background estimation:カットフロー

	Data	All BG	Z+jets	W + jets	QCD	ttbar	KKgraviton n=6, Mpl(n+4)=1.5TeV
mET>220GeV	268	245.3	78.0	72.5	83.0	11.8	113.7
Leading jet's pt>250GeV & eta <2.0	172	154.4	38.0	40.2	71.5	4.7	77.6
$\Delta\Phi(\text{MissingEt},$ 2nd jet) > 0.5	77	71.7	34.6	28.3	5.8	3.0	71.1
2 nd jet pT <60GeV	46	42.4	24.4	17.6	0.12	0.31	34.7
Number of jets<=2	39	37.7 ±2.7(stat.)	22.5 ±2.3(stat.)	15.1 ±1.4(stat.)	0.08 ±0.08(stat.)	0.13 ±0.02(stat.)	31.2 ±0.6(stat.)

QCDは不定性が大きいですが、最終結果には効かない。

標準理論からの予言と実験データはコンシステント

3.5.解析:系統誤差

シグナル

	系統誤差
Renormalization/Factorizationスケール	11%
ISR/FSR	12%
PDF	5%
Jet Energy Scale	10%
Jet Energy Resolution	~0%

	系統誤差
Luminosity	11%
Pile Up	3%

W/Zボソン崩壊事象

	系統誤差
Renormalization/Factorizationスケール	15%
ISR/FSR	10%
PDF	5%
Jet Energy Scale	10%
Jet Energy Resolution	1.7%

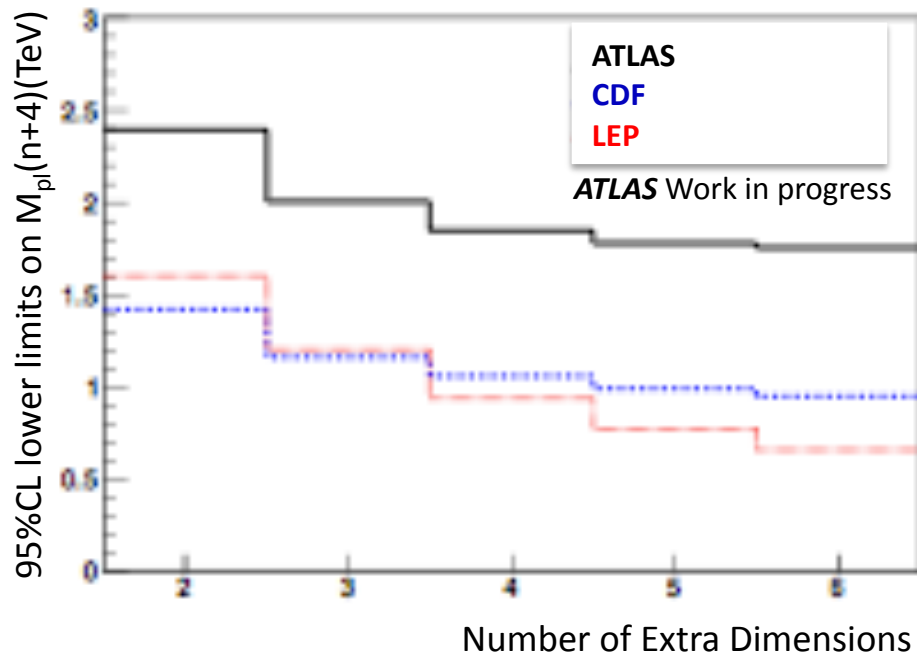
	系統誤差
Luminosity	11%
Pile Up	1%
Lepton reconstruction efficiency	<1%

これらの全ての系統誤差を考慮して、Confidence Levelを計算し、
真のプランクスケール $M_{pl}(n+4)$ に対して制限を課す

4. 結果: Observed Limit on $M_{pl}(n+4)$

標準理論からの予言と実験データはコンシステントであり、実験データに有意な超過は見られなかった

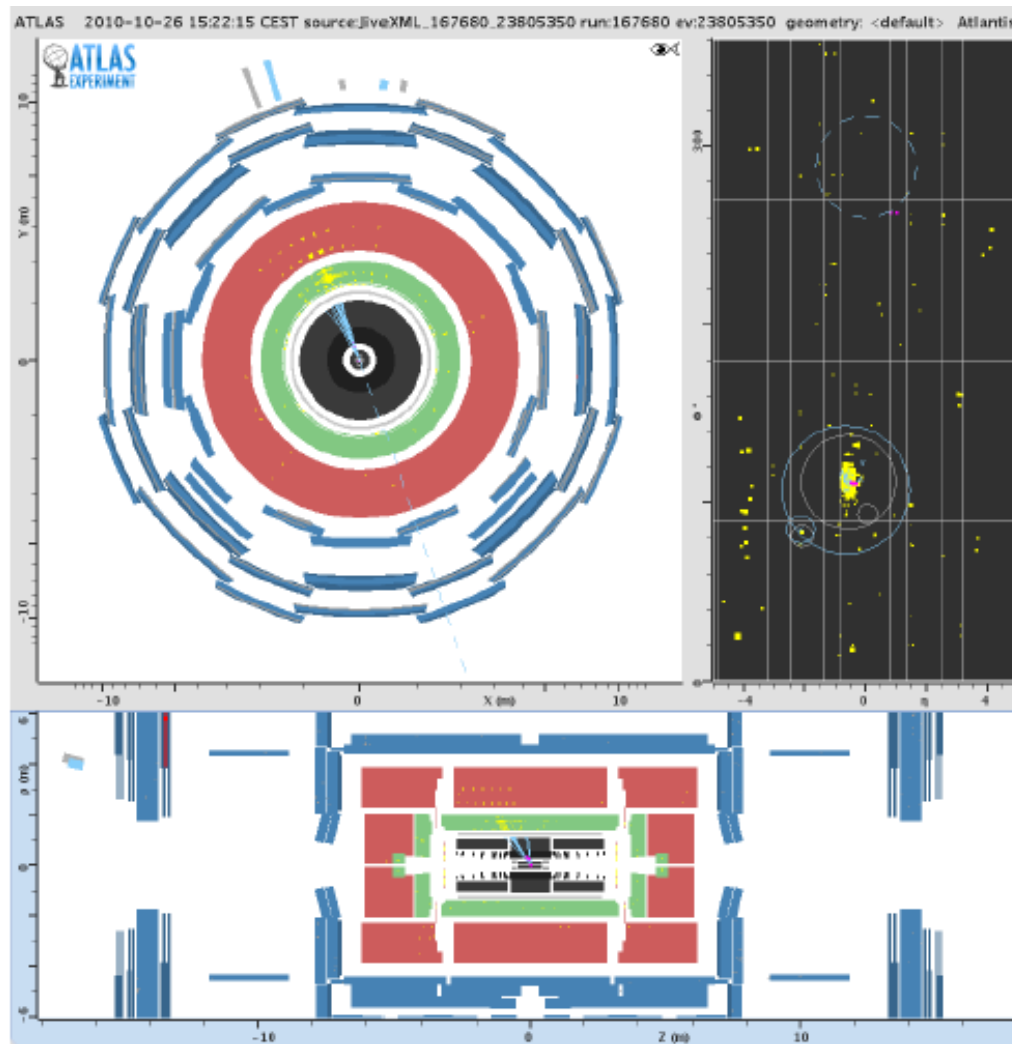
真のプランクスケール $M_{pl}(n+4)$ に対して95% CLs lower limit を求めた
(統計誤差、系統誤差を含む)



n	95% CLs lower limits on $M_{pl}(n+4)$
2	2.39TeV
3	2.00TeV
4	1.85TeV
5	1.78TeV
6	1.75TeV

余剰次元の数 $n \geq 2$ の場合に於いて、これまでの加速器実験の結果を大幅に上回る結果を得る事が出来た

4. 結果:EventDisplay



mET	413GeV
1 st jet pT	350GeV
$\Delta\Phi(\text{jet}, \text{mET})$	3.1

Z \rightarrow vv事象だと思われる

5. まとめ

- 階層性問題を解決する大きな余剰次元モデルでは、LHC-ATLAS実験において“モノジェット+MissingEt”事象の生成が予想される
- 約 34.6pb^{-1} のLuminosityの実験データでモノジェット事象の探索を行った
- non-collision起源(Cosmicsなど)を除くCleaningを行った
- バックグラウンドをモンテカルロとデータを用いて評価し(MC法)、モノジェット探索に最適化したカットを掛けた
- 実験データと標準理論からの予言はコンシステントであり、真のプランクスケールに対して、**これまでの加速器実験を越えた新たな制限を得た。**

余剰次元の数	2	3	4	5	6
Limit	2.39TeV	2.00TeV	1.85TeV	1.78TeV	1.75TeV