

研究会「LHCでの余剰次元研究」

東京大学, 2009年9月7日

UEDモデルと KKグラビトン

寺師 弘二

ICEPP 東京大学

アウトライン

Universal Extra Dimensions

- ▶ モデルと発見能力

Kaluza-Kleinグラビトン

- ▶ 大きな余剰次元：Mono-jet、Di-jet
- ▶ 歪曲した余剰次元：共鳴状態

Universal Extra Dimensions

全てのSM粒子が小さな余剰次元バルク ($R^{-1} \sim \text{TeV}$) に広がる。

4次元でのKaluza-Kleinモードは

▶ SM粒子と同じ量子数・スピンを持つ。

▶ 質量は

$$m_n^2 \approx m_{SM}^2 + \frac{n^2}{R^2}$$

で与えられる。

n = 励起状態のレベル

→ 無限個のKKモード

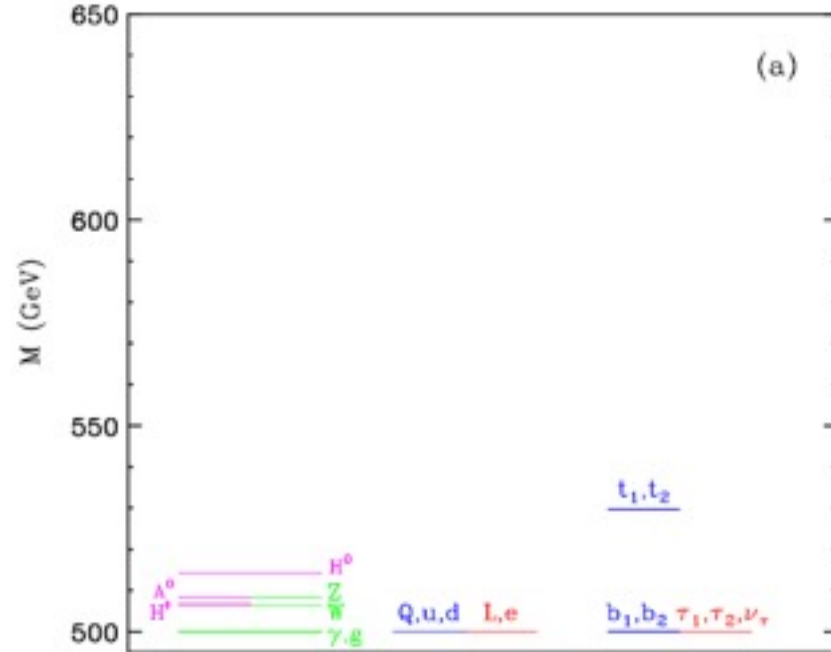
KK量子数の保存

→ 最も軽いKK粒子は安定 (暗黒物質の候補)

縮退したKK粒子スペクトラム

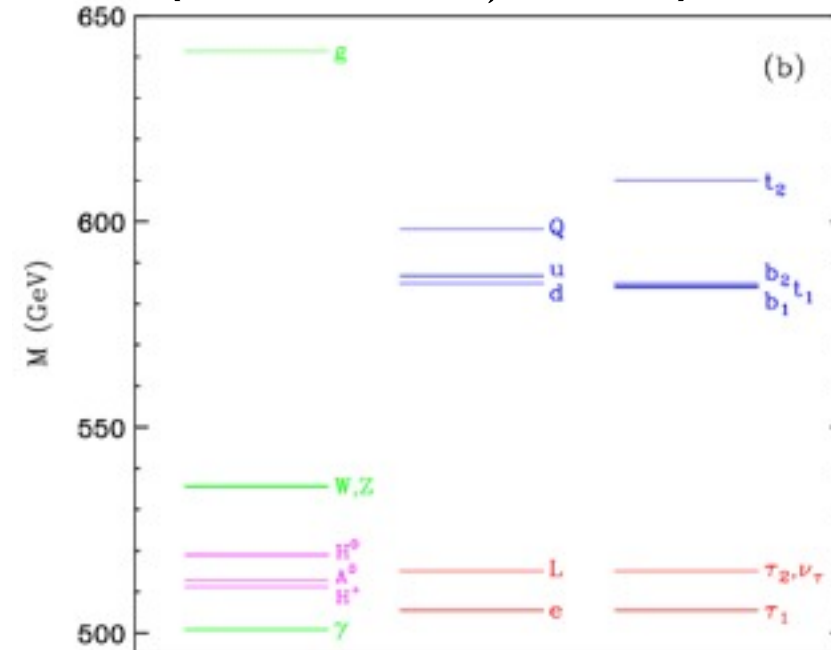
→ 量子補正により質量差が生まれる。

tree level



1-loop level

($1/R=500\text{GeV}$, $\Lambda R=20$)



Universal Extra Dimensions

Minimal UED モデル：余剰次元を1次元だけ持つ高次元模型

3つのパラメータで記述される。

- ▶ R^{-1} ：コンパクト化スケール
- ▶ Λ ：カットオフスケール
- ▶ m_H ：ヒッグス質量

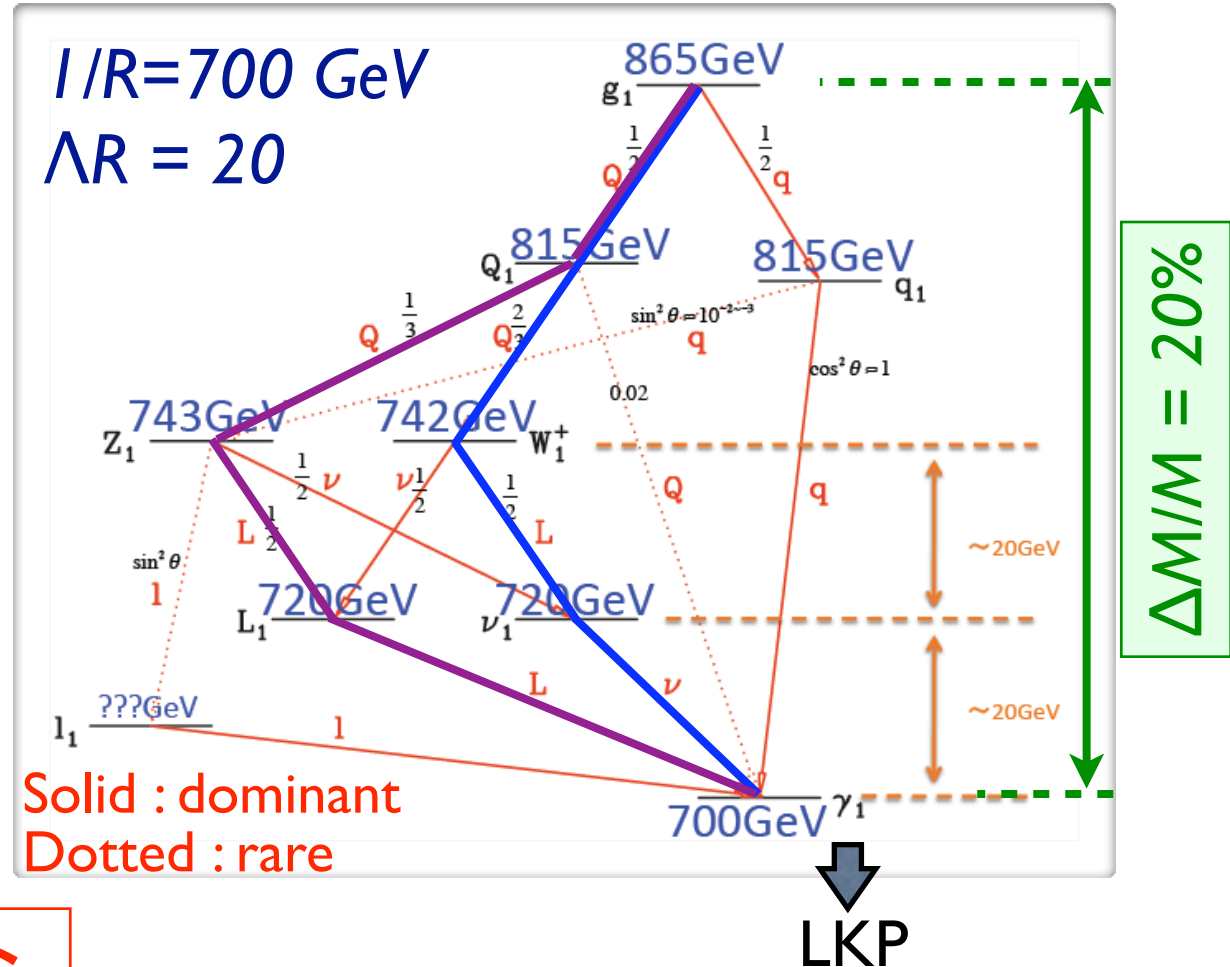
LHCでの生成

$g^{(l)}g^{(l)}, g^{(l)}q^{(l)}, q^{(l)}q^{(l)}$ が主になる。

崩壊過程

レプトンを伴う崩壊が多い。

例) $g^{(l)} \rightarrow l + jj + E_T^{miss}$
 $ll + jj + E_T^{miss}$



**1/2/4-レプトン + ジェット
 + E_T^{miss} を持つ信号**

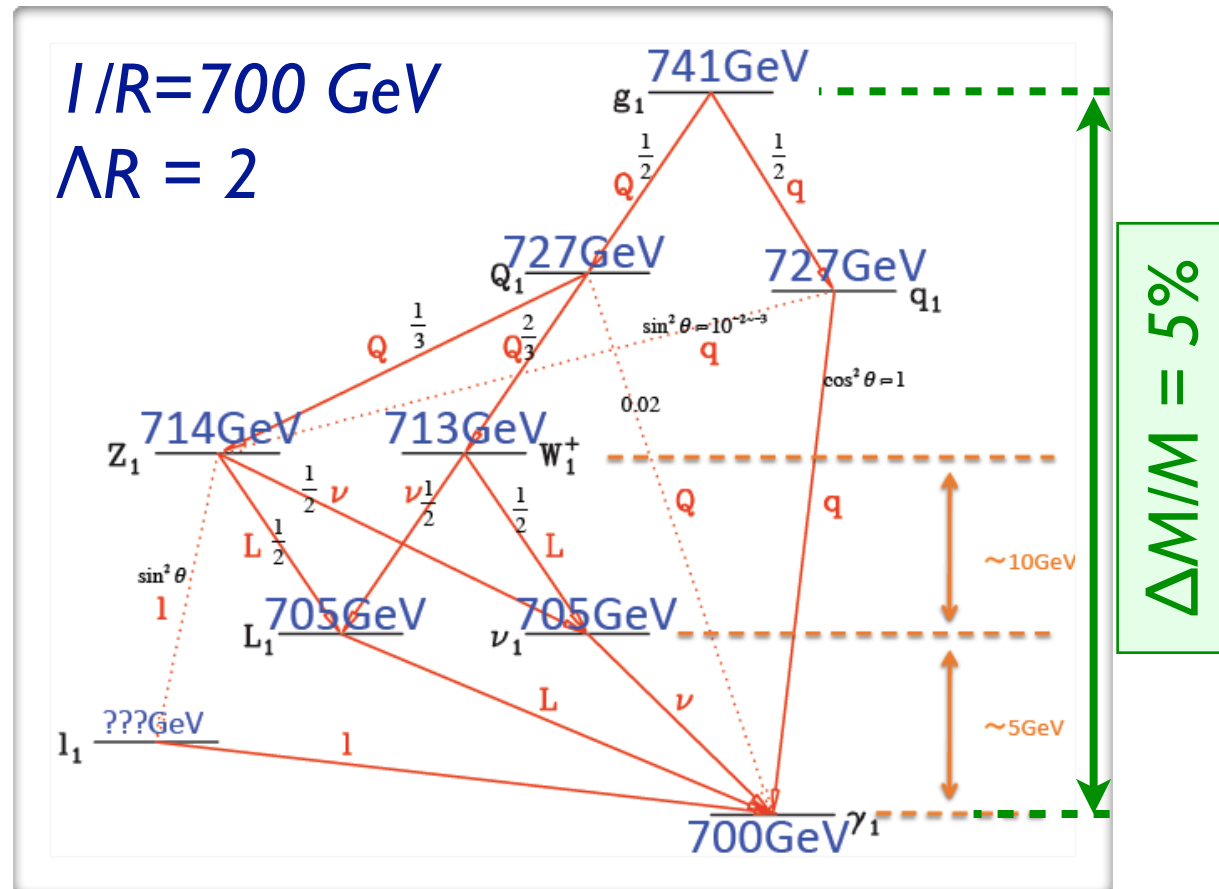
Universal Extra Dimensions

KK粒子の質量差は ΛR （量子補正）でコントロールされる。

- ▶ $\Lambda R = 20 \rightarrow \Delta M/M \approx 20\%$
- ▶ $\Lambda R = 2 \rightarrow \Delta M/M \approx 5\%$

縮退度が上がるにつれ、KK粒子崩壊からのレプトン・ジェットはよりソフトになる。

- $p_T \sim 10\text{GeV}$ 程度までのレプトン再構成能力とfakeの評価が重要。
- トリガーも大切。
 - ▶ シングルレプトン
 - ▶ レプトン + E_T^{miss}
 - ▶ ジェット + E_T^{miss}



UEDの探索：1-レプトン/2-レプトン



Pythia UED (6.4.19)

コンパクト化スケール $1/R$ → $1/R = 400\text{GeV}-1\text{TeV}$ (50-100 GeV bin)

量子補正 ΛR → 各質量につき、 $\Lambda R = 2-5000$ ($\Delta M/M = 5\sim 50\%$)

バックグラウンド

- QCD (PYTHIA)
- W/Z+jets (ALPGEN)
- tt (MC@NLO) → 最も主要なバックグラウンド

1レプトン解析

- ① #Leptons = 1 ($P_{T\text{Lepton}} > 10$ GeV)
- ② #Jets ≥ 3 ($P_{T\text{Jet}} > 30$ GeV)
- ③ Jet1 $P_T > 100$ GeV
- ④ $E_{T\text{miss}} > 100$ GeV
- ⑤ $M_T > 100$ GeV

2レプトン解析

- ① #Leptons = 2 ($P_{T\text{Lepton}} > 10$ GeV)
- ② Same sign leptons
- ③ #Jets ≥ 2 ($P_{T\text{Jet}} > 50$ GeV)
- ④ $E_{T\text{miss}} > 100$ GeV

UEDの探索：1-レプトン/2-レプトン



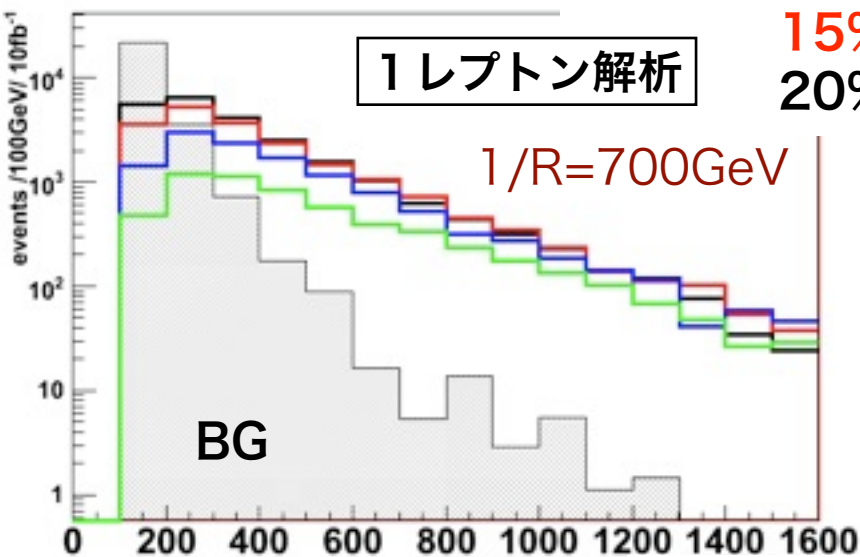
$\Delta M/M = 5\%$

10%

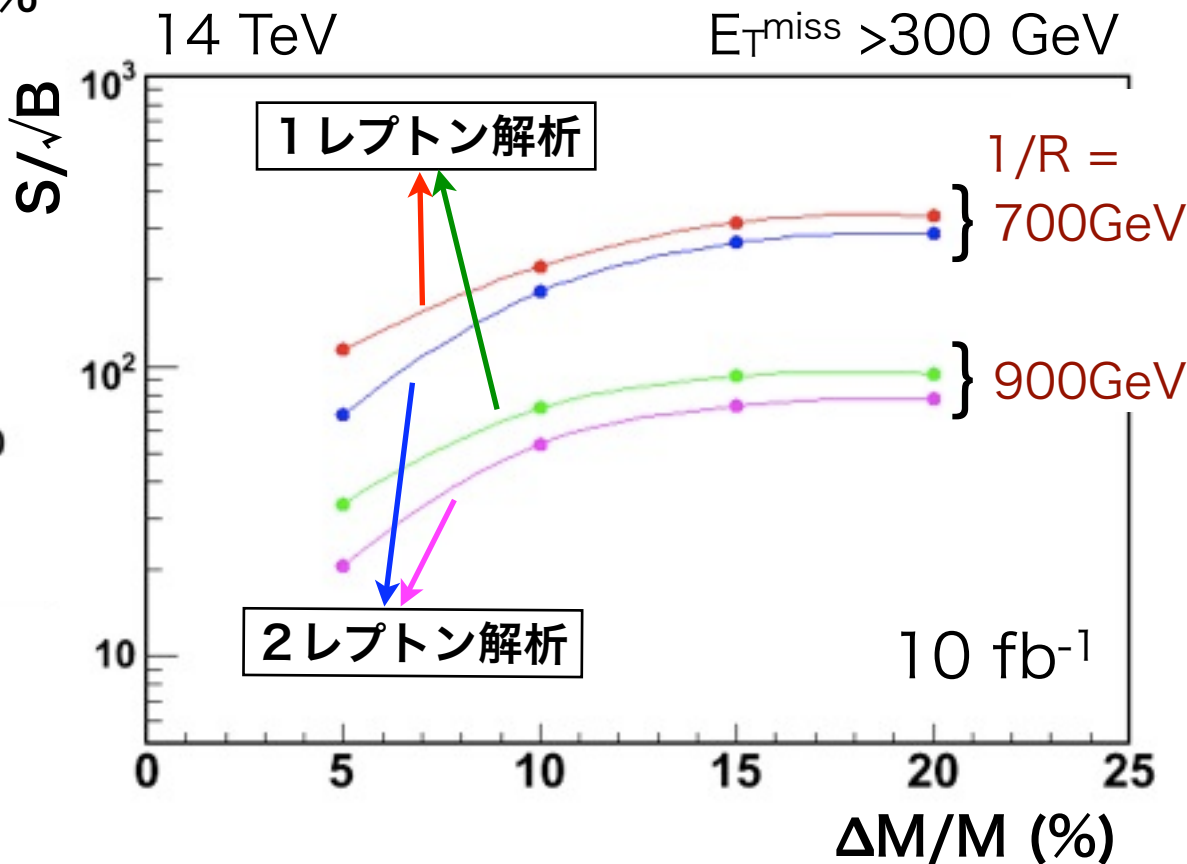
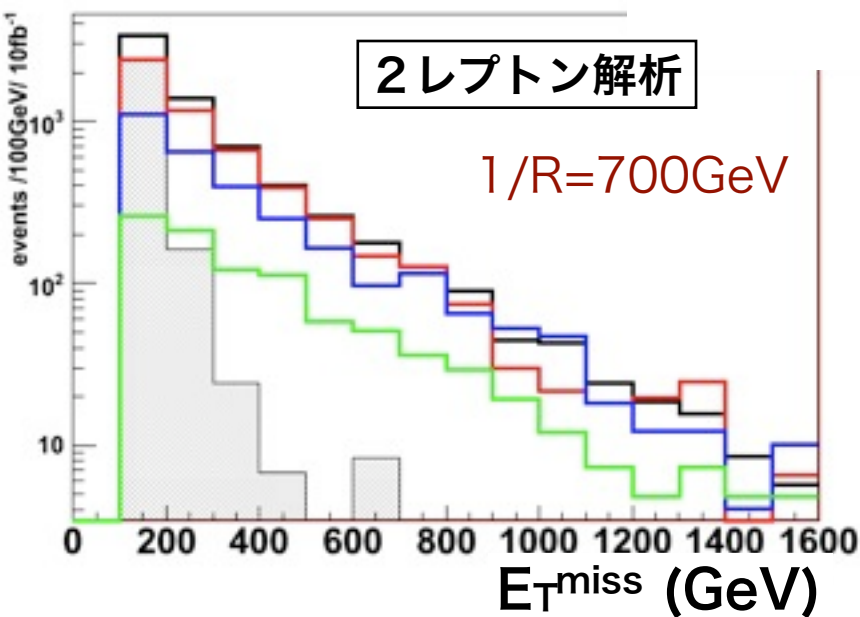
15%

20%

mET : One-lepton + ISR-Jet analysis



mET : Same Sign di-lepton analysis

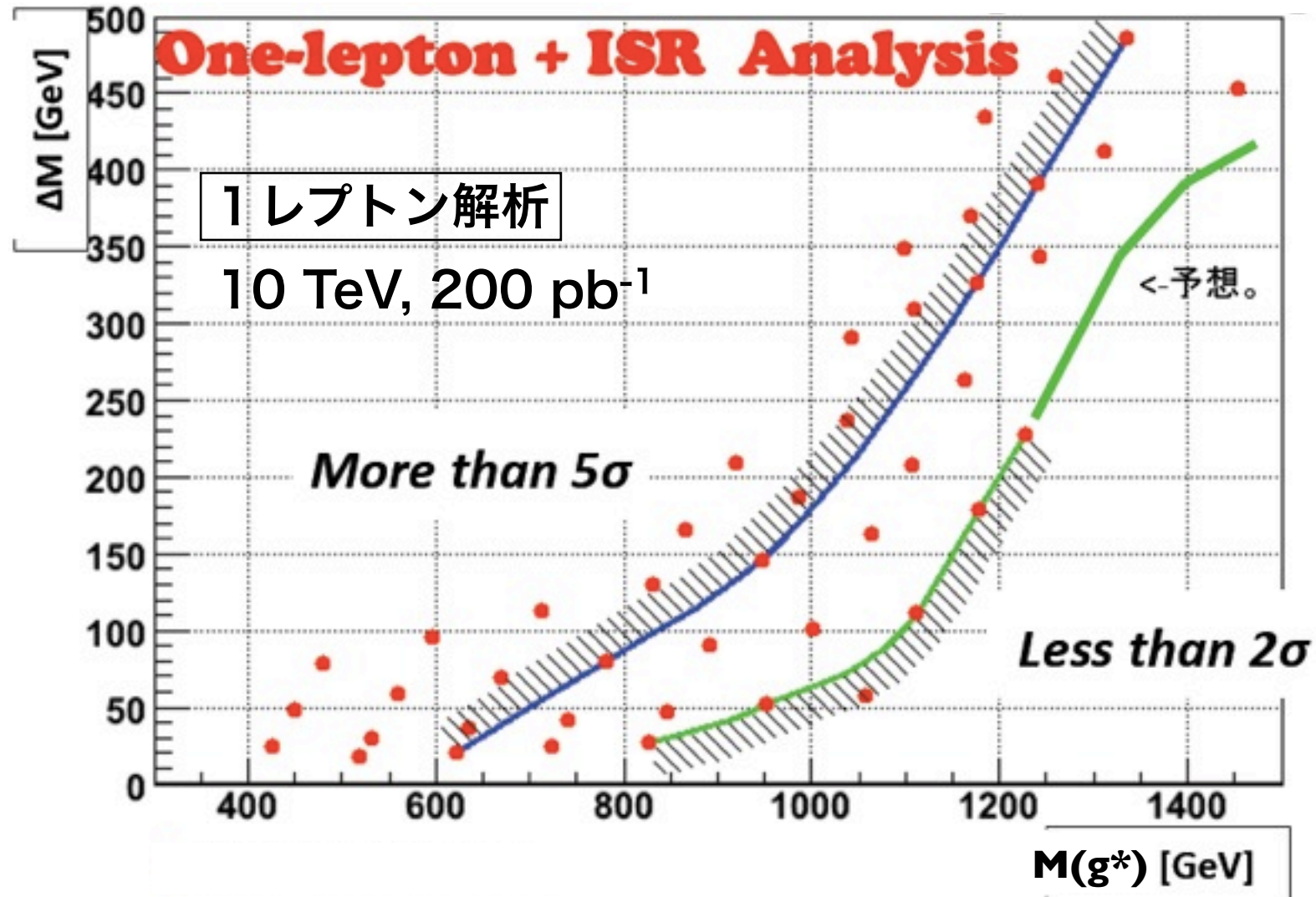


バックグラウンドの評価
 SUSY標準のMT法 →データから評価可能。

UEDの探索：1-レプトン/2-レプトン



2009/10年のデータから期待されるパフォーマンス





Full Simulation Study

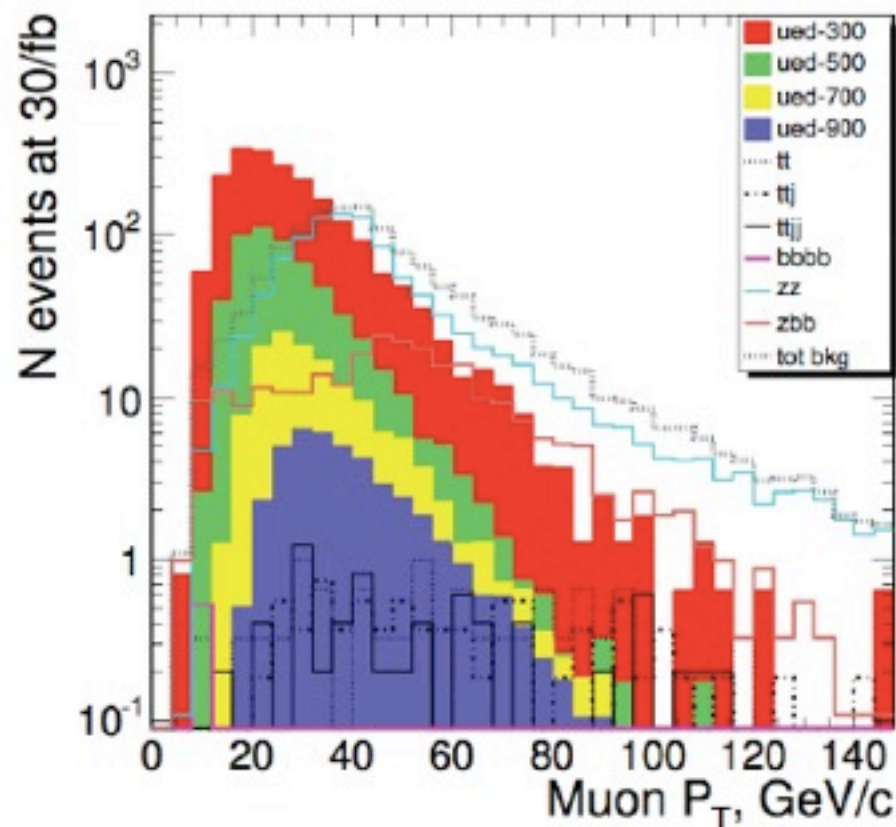
- **MUED signal:**
 - Generated by CompHEP and KK particles are decayed by UEDDECAY (enabling only $4\mu, 4e$ and $2e2\mu$ decay channels)
 - Fix $m_{\text{higgs}} = 120$ GeV, $\Lambda R = 20$, scan $R^{-1} = 300, 500, 700, 900$ GeV, as allowed MUED parameter space
 - $R^{-1} < \sim 1050$ GeV from dark matter constraints.
 - $R^{-1} > \sim 300$ GeV from EW precision measurement.
 - $\sigma = 2, 0.23, 0.05$ and 0.01 pb respectively.
- **Main background:**
 - $ZZ \rightarrow 4$ leptons (Pythia) $\sigma = 0.1$ pb
 - $t\bar{t} + n$ jets and $b\bar{b}b\bar{b} \rightarrow 4$ leptons (AlpGen) $\sigma = 1.2$ pb
 - $Zb\bar{b} \rightarrow 4$ leptons (Pythia) $\sigma = 0.7$ pb
- **Background rejection is our main focus in this analysis**

UEDの探索：4-レプトン



Trigger & Event Selection

- **Trigger:** single and di- μ/e
- Offline lepton selection:
 - **Electrons:** $p_T > 7$ GeV, $|\eta| < 2.5$, $0.9 < E/P < 1.5$, and $E_{\text{Hcal}} / E_{\text{Ecal}} < 0.1$
 - **Muons:** $p_T > 5$ GeV and $|\eta| < 2.4$
 - At least 4 isolated leptons and 2 pairs of OSSF
 - **Isolation:** Sum P_T of charged tracks within a $R=0.3$ cone around muon/e is less than 3 GeV
- **B tag veto:** reject if a event has ≥ 1 tagged b-jet



Hardest Muon P_T in
4 μ channel

UEDの探索：4-レプトン



For ZZ:

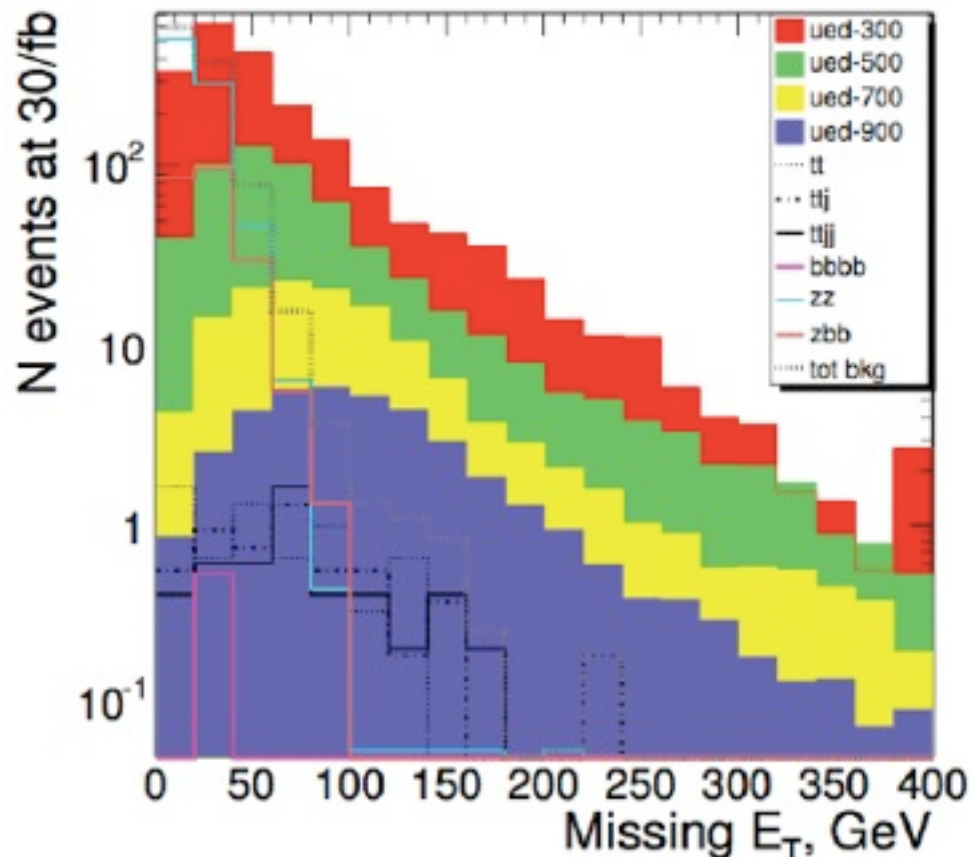
MUED leptons are SOFT.

lepton p (1st, 2nd, 3rd, 4th) < (70, 60, 40, 30) GeV

For Zbb & ZZ:

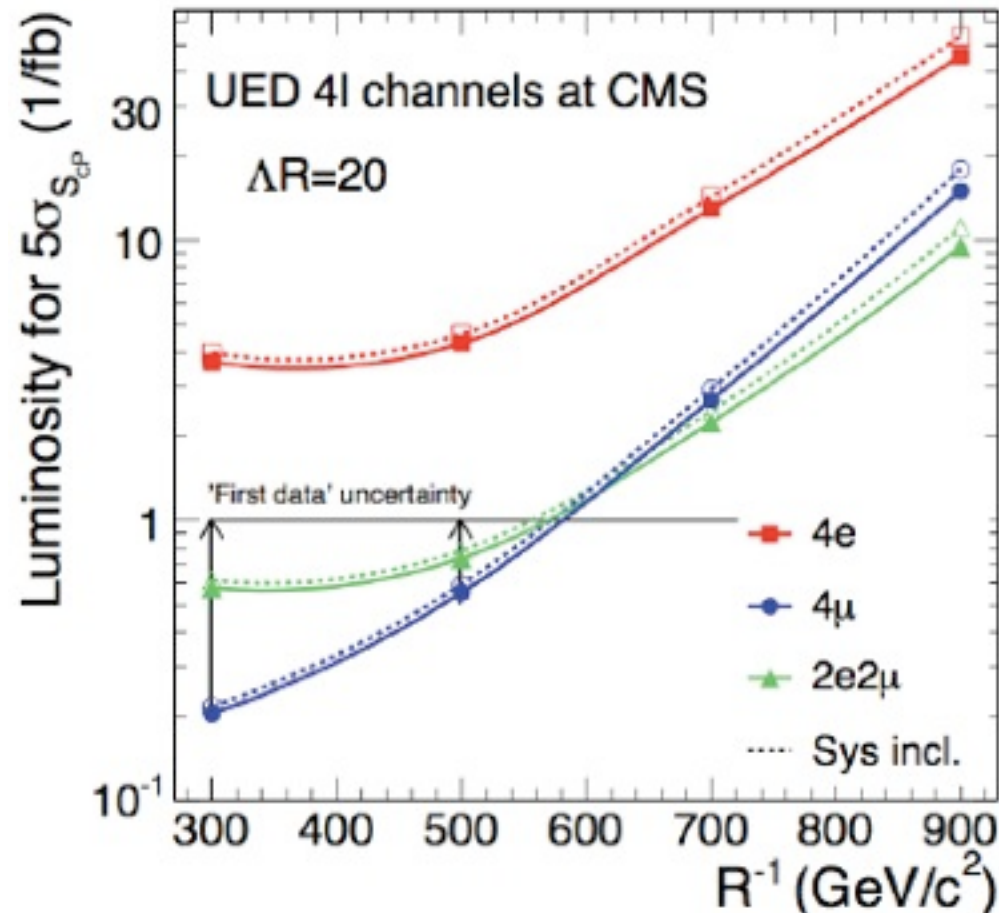
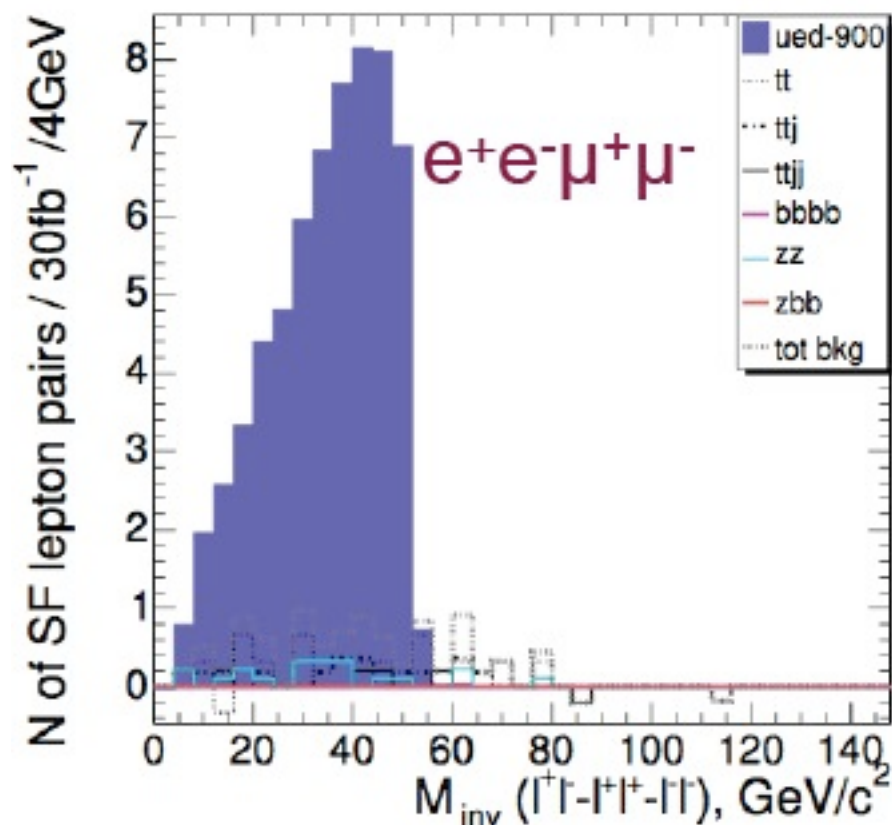
MET > 60 GeV can be used for further background rejection.

After MET cut, the Zbb & ZZ backgrounds are already small compared to UED signals for $R^{-1}=300,500$, but still large for larger R^{-1} signals -> Z veto.



- Combinatorial uncertainty for $e^+e^-e^+e^-$ and $\mu^+\mu^-\mu^+\mu^-$ channels
 - Removed by subtracting same sign lepton pairs.
- End-point transition: characteristic of decay of heavy particle
- Z veto: event is rejected if it has one or more OSSF lepton pair with $Minv < 5$ or $Minv > 80$ GeV

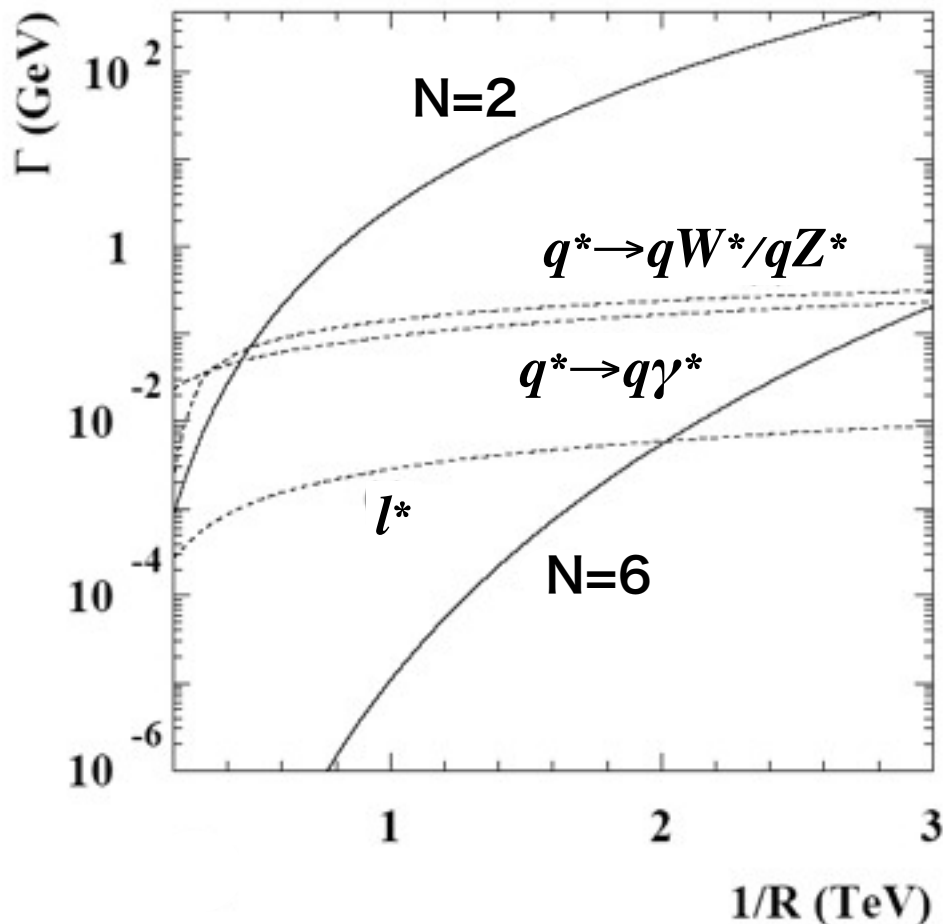
UEDの探索：4-レプトン



- MUED can be discovered at the CMS with $\sim 30 \text{ fb}^{-1}$ data for the allowed theoretical parameter space ($300 < R^{-1} < 1050 \text{ GeV}$)
- For $R^{-1} < 600 \text{ GeV}$ signals, $\mu^+\mu^-\mu^+\mu^-$ and $e^+e^-\mu^+\mu^-$ channels can have a 5σ discovery with less than 1 fb^{-1} of data.

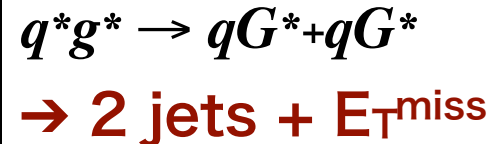
UEDの探索：Gravity-Mediated

- ▶ 全てのSM粒子が存在する $4+\delta$ 次元のブレーン ($1/R \sim \text{TeV}$) が、 $4+N$ 次元の大きな空間 ($1/R \sim \text{eV}$) に埋め込まれているシナリオ。
- ▶ $4+N$ 次元空間にはグラビトンのみが伝搬できる。
- ▶ KKフェルミオン・KKボソンの崩壊様式は、質量縮退度とGravity-Mediatedな崩壊の崩壊幅に依存する。



実線：Gravity-Mediatedな崩壊の崩壊幅
破線：縮退度による崩壊幅

Gravity崩壊 (N=2の場合)



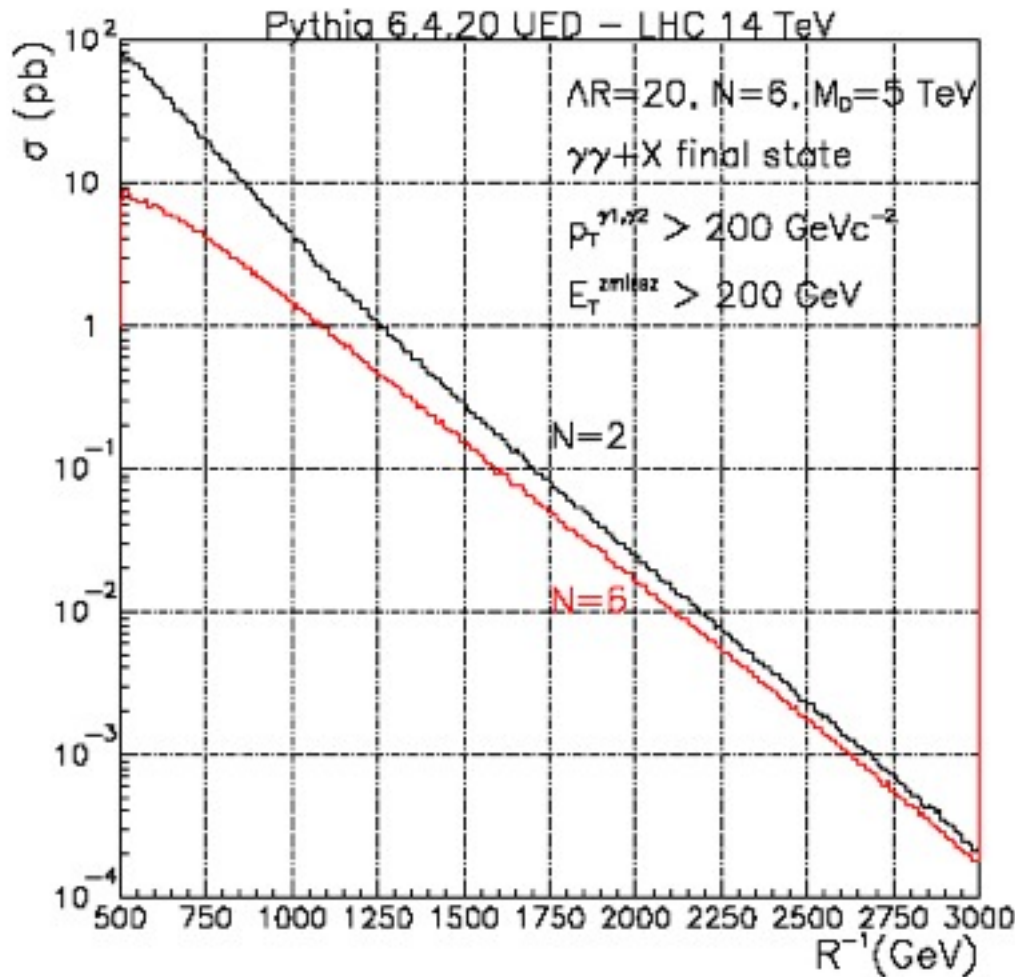
KK \rightarrow LKP \rightarrow Gravity崩壊 (N=6の場合)





UEDの探索：2光子 + E_T^{miss}

$\delta = 1$ (Minimal UED), $N = 6$, $\Lambda R = 20$, $M_D = 5$ TeV



$p_T^{\gamma 1, \gamma 2} > 100$ GeV, $|\eta_{\gamma 1, \gamma 2}| < 2.5$
 $E_T^{\text{miss}} > 200$ GeV

14 TeV

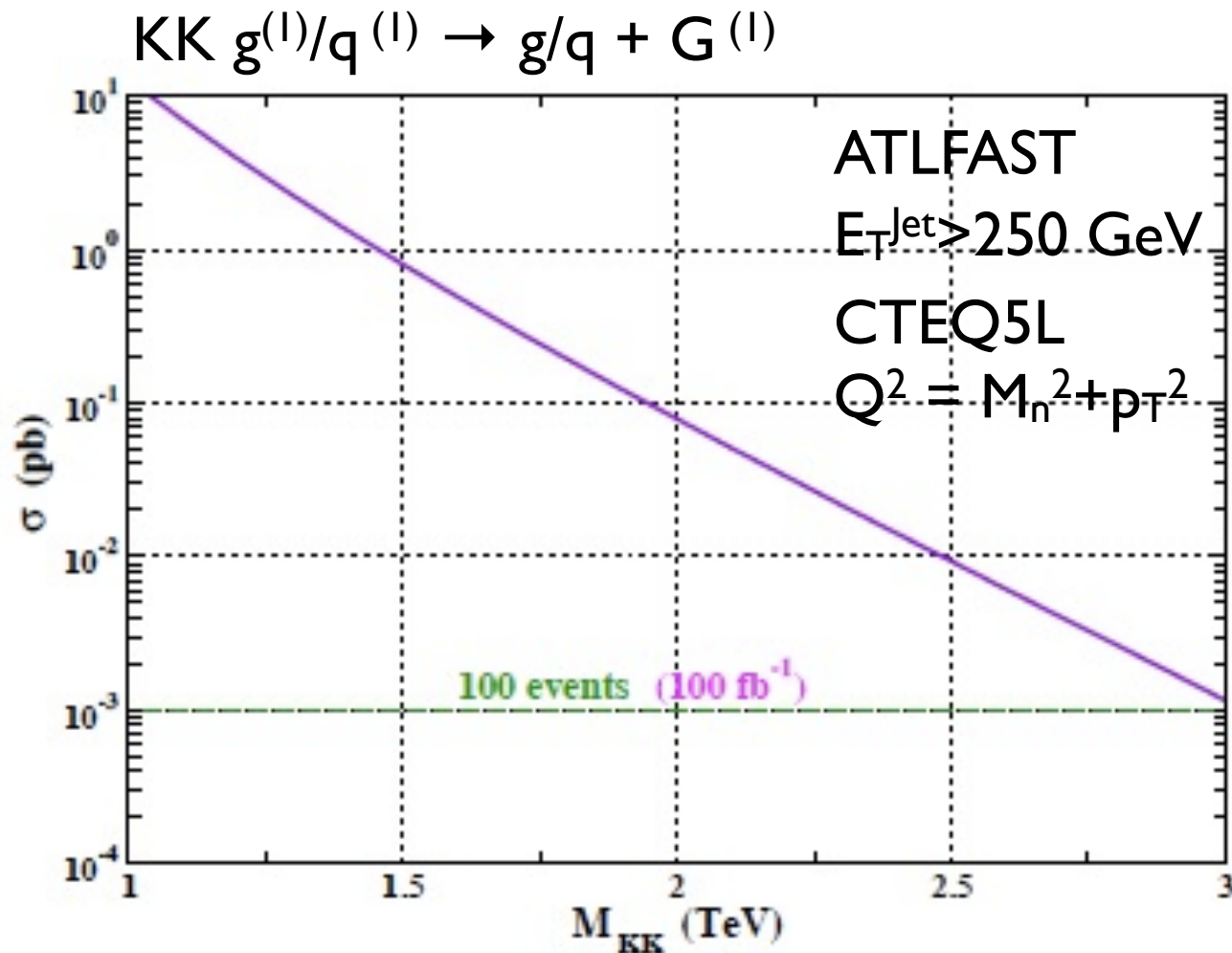
I/R	500	1000	1500
Efficiency	19%	45%	56%
事象数 (100 pb ⁻¹)	1900	50	2

バックグラウンドを考慮した
解析が進行中、、、。



UEDの探索： 2ジェット + E_T^{miss}

- ▶ N=2の場合、KKクォーク・KKグルーオンはグラビトン+ゼロモードへ崩壊する。
→ 2ジェット + E_T^{miss} を特徴とする信号を作る。



UEDの探索： 2ジェット + E_T^{miss}

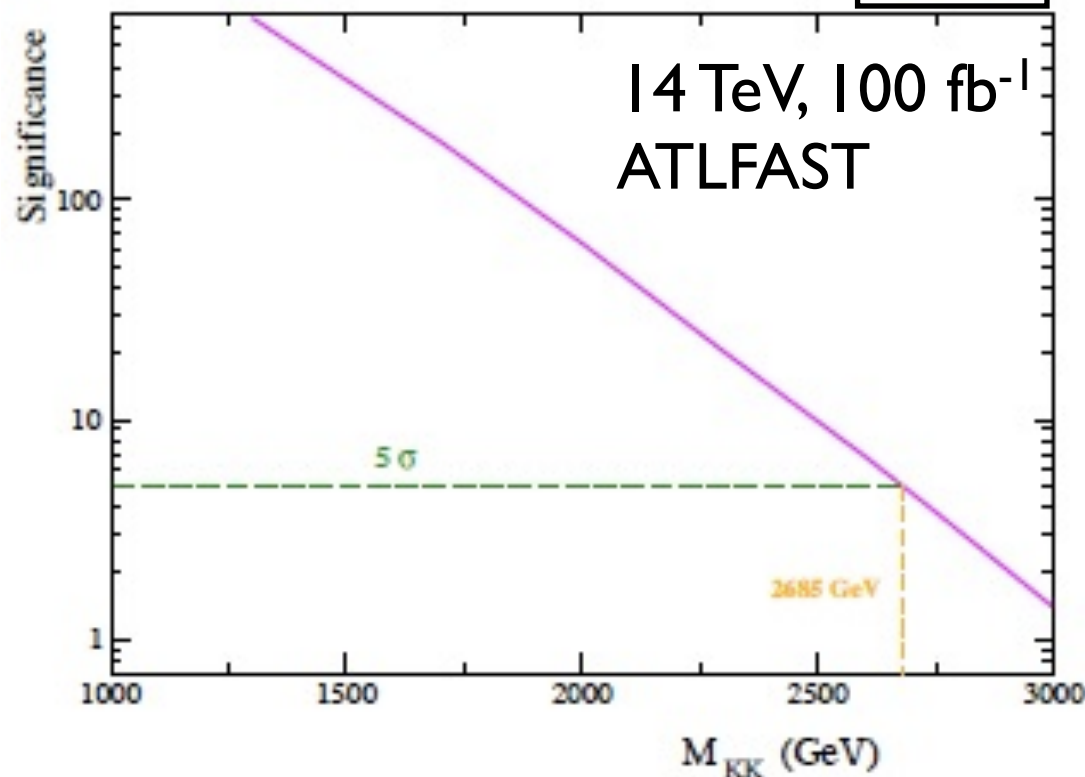


バックグラウンド

- ▶ $Z(\rightarrow \nu \nu) + \text{jets}$
- ▶ $W(\rightarrow l \nu) + \text{jets}$ (lepton missed)

イベント選別

- ▶ No isolated leptons
- ▶ $p_T^{\text{Jet1}} > 250 \text{ GeV}$
- ▶ $p_T^{\text{Jet2}} > 150 \text{ GeV}$
- ▶ $\Delta \phi (\text{jet1}, \text{jet2}) < 2.6$
- ▶ $E_T^{\text{miss}} > 775 \text{ GeV}$



UED+LED ($M_{KK}=1.3 \text{ TeV}$)		バックグラウンド	
Efficiency	事象数 (100 fb^{-1})	Efficiency	事象数 (100 fb^{-1})
14%	28000	0.07%	1800

→ 質量1.3 TeVのKK粒子の発見 (10事象、 5σ) は $\sim 35 \text{ pb}^{-1}$ で可能。
 100 fb^{-1} で $\sim 2.7 \text{ TeV}$ まで発見可能。

LEDでのKKグラビトン

大きな余剰次元モデル (Arkani-Hamed, Dimopoulos, Dvali)

- ▶ n次元のコンパクト化されたフラットな余剰次元 (サイズR)。
- ▶ 全てのSM粒子は(3+1)次元ブレーンに束縛 → グラビトンはバルクに飛ぶ。

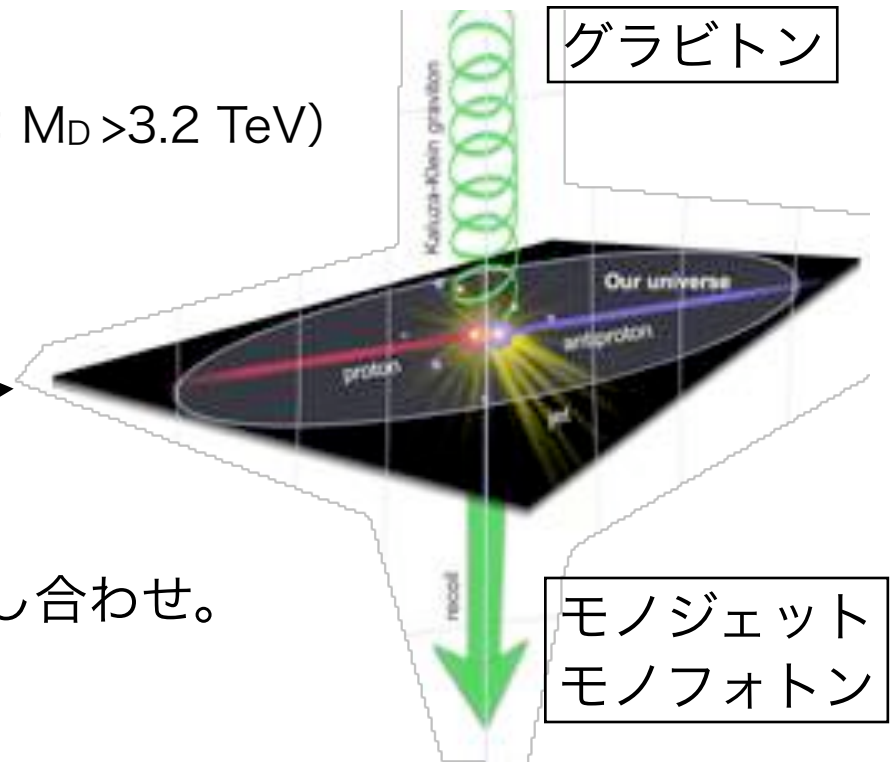
$$M_{\text{Pl}}^2 = V_n M_{\text{D}}^{n+2}$$

真のPlanckスケール $M_{\text{D}} \sim \text{TeV}$ → 余剰n次元空間の”大きな”体積 $V_n = (2\pi R)^n$ によって $M_{\text{Pl}} \sim 10^{18} \text{ GeV}$ が薄められた結果。

- ➔ n=1 : R ~ 10^8 km となり除外
- ➔ n=2 : R ~ $100 \mu\text{m}$ (Eöt-Wash実験の範囲 : $M_{\text{D}} > 3.2 \text{ TeV}$)
- ➔ n ≥ 3 : 加速器実験で探索可能

加速器実験での信号 :

- ▶ KKグラビトンの実生成
 - ▶ SM粒子間の仮想KKグラビトン交換
- ➔ 全てのKKグラビトンタワーからの寄与の足し合わせ。





トリガー

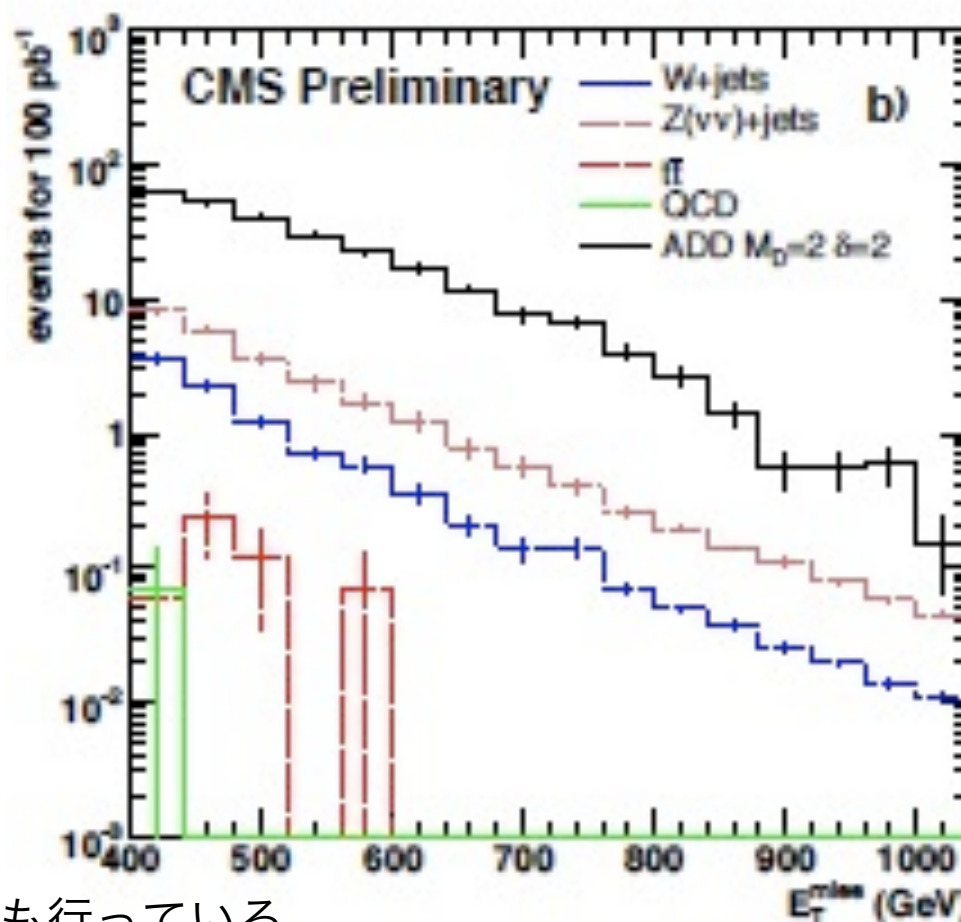
$$H_T = \sum_{p_T(j) > p_T^0} |\vec{p}_T(j)| > 250 \text{ GeV}$$

$$MH_T = \left| \sum_{p_T(j) > p_T^0} \vec{p}_T(j) \right| > 100 \text{ GeV}$$

イベント選別

- ▶ $E_T^{\text{miss}} > 400 \text{ GeV} *$
- ▶ Jet EM Fraction < 0.9
- ▶ Isolated Track Veto
- ▶ $p_T^{\text{Jet1}} > 350 \text{ GeV}, |\eta_{\text{Jet1}}| < 1.7$
- ▶ $\# \text{Jets}(p_T > 40 \text{ GeV}) < 3$
- ▶ $\Delta \phi(\text{jet1}, E_T^{\text{miss}}) > 2.8$
- ▶ $\Delta \phi(\text{jet2}, E_T^{\text{miss}}) > 0.5$

* 10TeVでは E_T^{miss} を使わずMHTのみの解析も行っている。



LED ($\delta=2$)		バックグラウンド					
$M_D=2\text{TeV}$	$M_D=6\text{TeV}$	$Z \rightarrow \nu \nu$	$W \rightarrow e \nu$	$W \rightarrow \mu \nu$	$W \rightarrow \tau \nu$	tt	QCD
262	4.9	25.7	2.0	2.0	5.5	0.5	< 0.6

バックグラウンドの評価



Z→ν ν+jetsバックグラウンドをデータを元に評価する。

W→μ ν+jetsコントロールサンプル

- ▶ イベント選別を適用 (Isolated Track Vetoを除く)
- ▶ W→τ ν : $N(W\rightarrow\mu\nu)\times Br(\tau\rightarrow\mu\nu\nu)$ として評価
- ▶ tt : MCで評価

Z→μ μ+jetsを使うのは統計的に厳しい、、、。

	W→μ ν	W→τ ν	tt
MC	20.0	3.3	2.0
データ	19.9±4.5	3.5±0.8	-



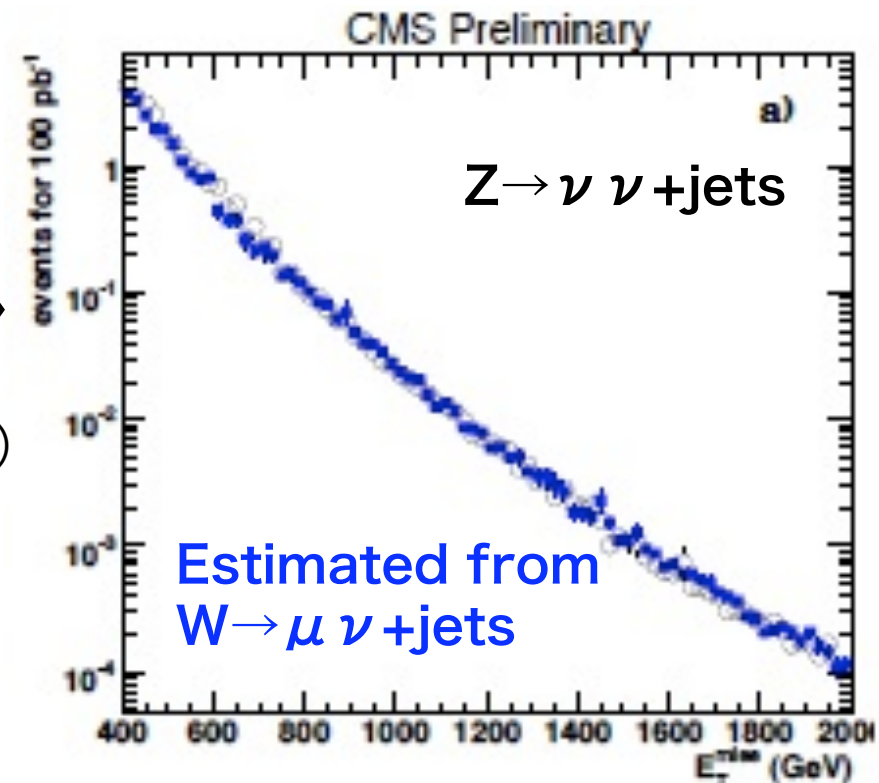
W→μ ν+jetsをZ→ν ν+jetsへスケール

- ▶ $\sigma(Z\rightarrow\nu\nu)/\sigma(W\rightarrow\mu\nu)$ (MC)
- ▶ ミューオンEfficiency : 再構成・トリガー (データ)

	Z→ν ν	W→τ ν
MC	25.7	5.5
データ	21.9±4.9	4.9±1.1

Z→ν ν+jetsのE_T^{miss}分布

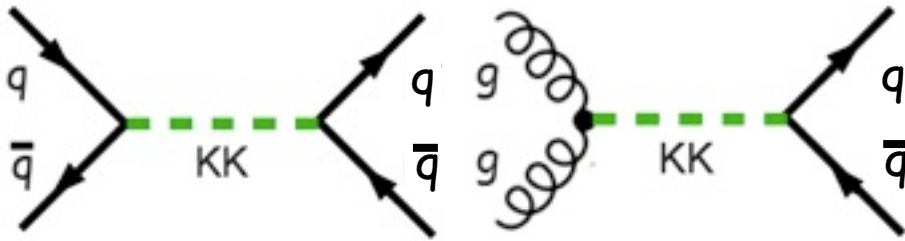
- ▶ W→μ ν イベント中のミュオンを除去



2ジェット解析

TeV重力理論では、 $M_D \sim \text{TeV}$ のスケールで強い重力の影響が見え始める。

→ 仮想KKグラビトン交換による2フェルミオン生成



断面積の n -依存性が比較的弱い。

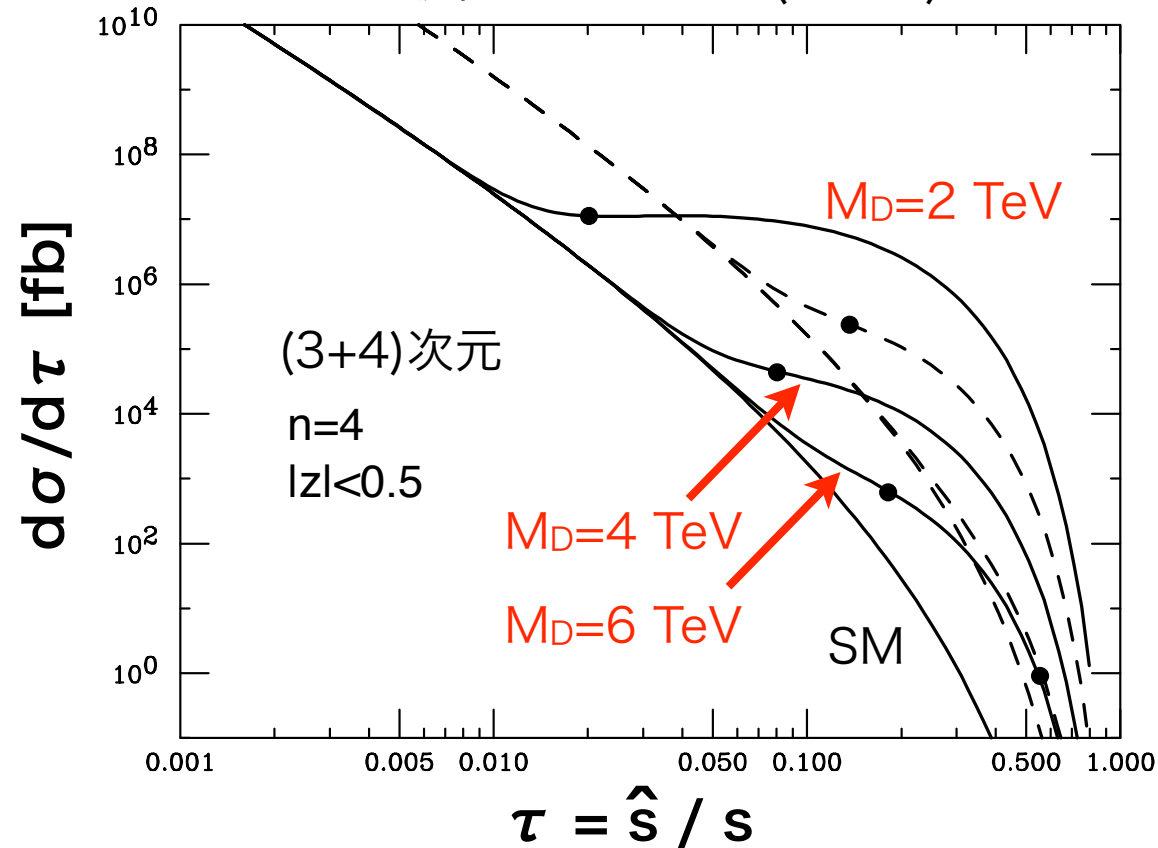
→ 仮想グラビトン過程では、 $n > 2$ の場合にも M_D に強い制限がつけられる可能性がある。

高 p_T ジェットあるいは大きな2ジェット質量を持つ事象の超過を探す。

- ▶ クォークcompositeness、micro black-hole(→ 2ジェット)探索にも有効。
- ▶ 実験としては難しい、、、。(→次ページ)

実線：LHC (14 TeV)

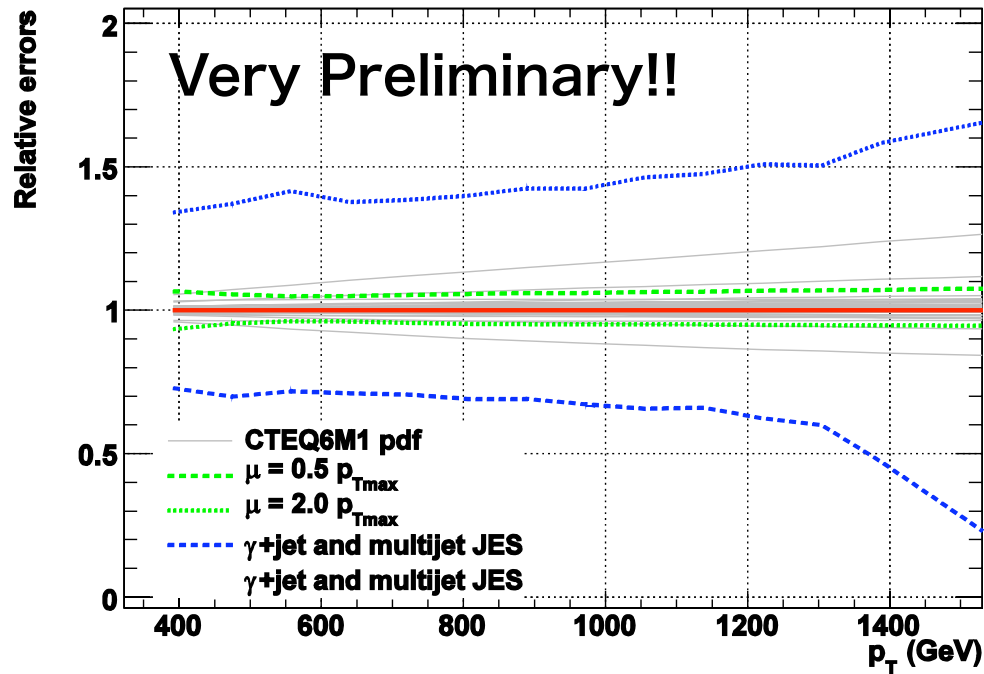
破線：Tevatron (2 TeV)



2ジェット解析：QCDの精密測定

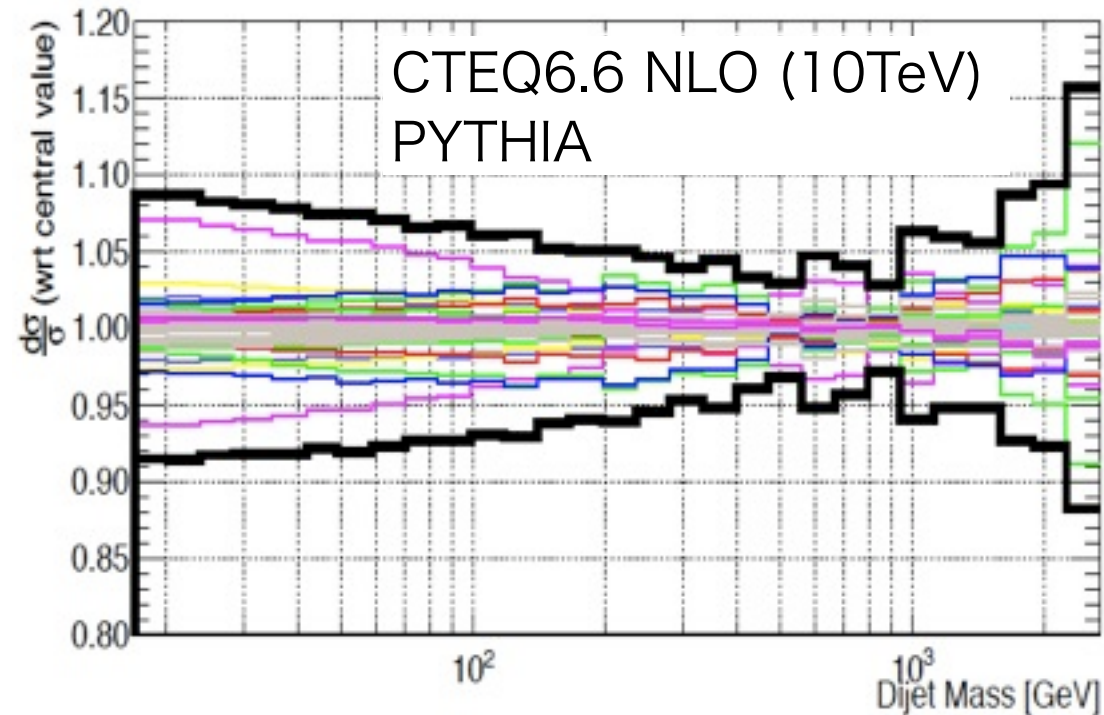
高い p_T 領域での実験・理論の不定性を正確に評価する必要がある。

JESによる不定性



- ▶ $p_T^{Jet}=1.0$ TeVで+40/-35%程度。
- ▶ 最も大きな不定性。

PDFによる不定性



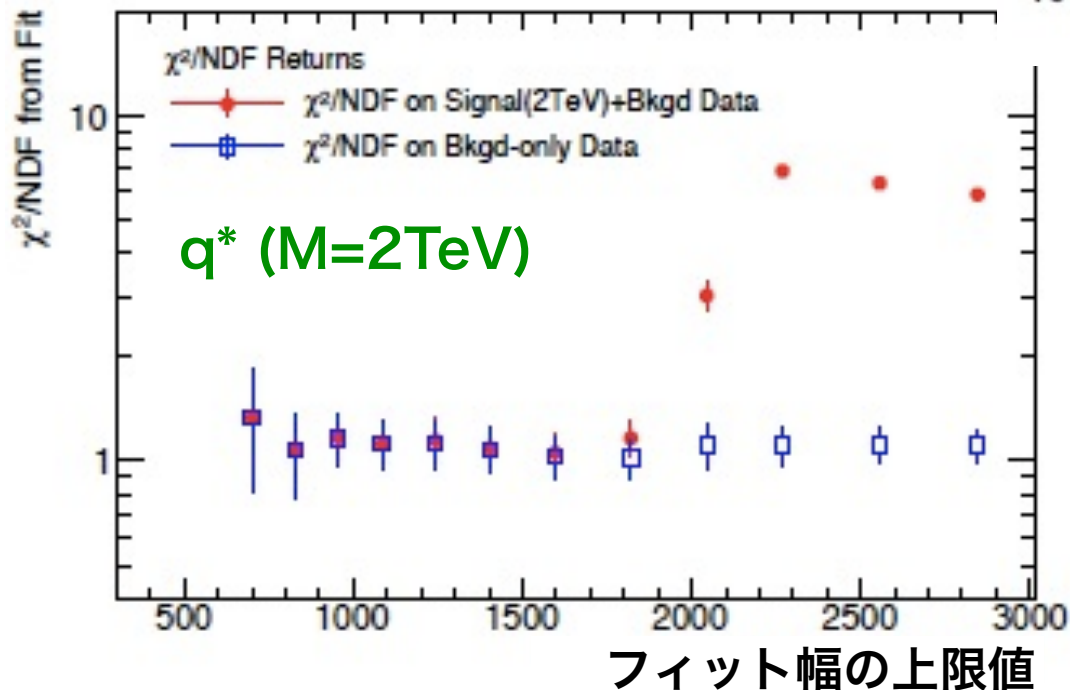
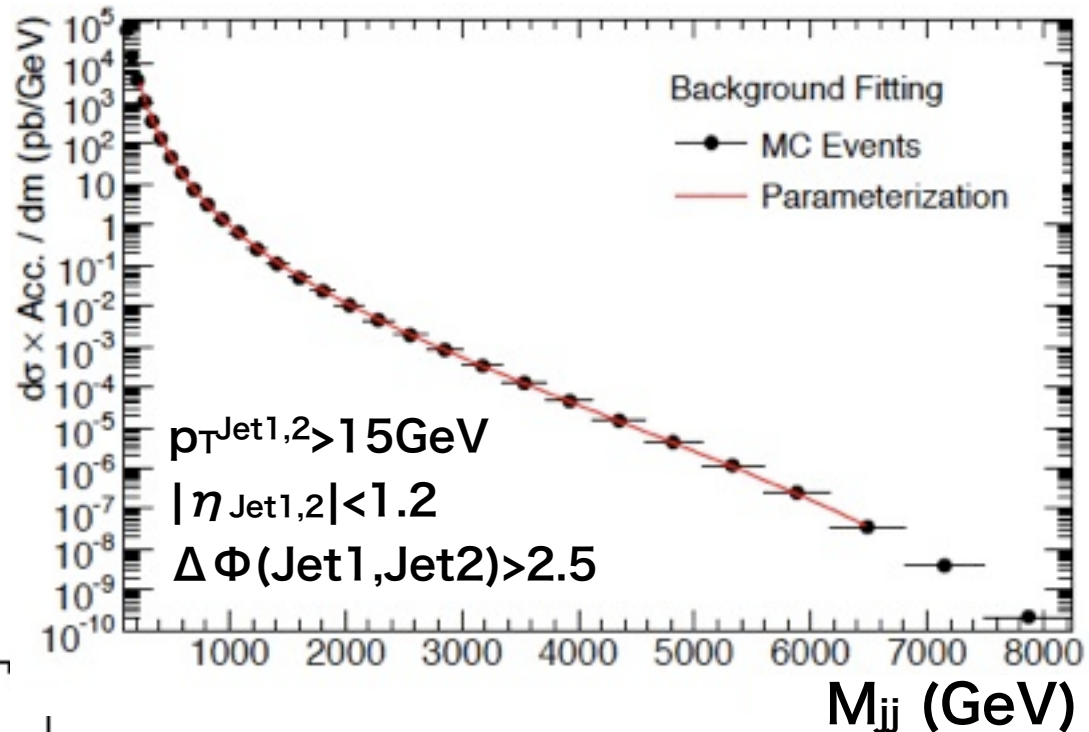
- ▶ $M_{jj} = 3$ TeVで+15/-12%程度。
- ▶ Eigenvector **6** (低いmass) and **11** (高いmass)からの不定性が支配的。

2ジェット解析：共鳴状態の探索

2ジェット共鳴状態 (Excited q/g , Z' , RS $G^* \rightarrow gg/qq$, ...) の探索

- ▶ QCD 2ジェット質量分布にフィット
- ▶ フィットのからのずれを検証

$$\frac{d\sigma}{dM_{jj}} = p_0 \frac{(1 - M_{jj}/\sqrt{s})^{p_1}}{M_{jj}^{p_2}}$$



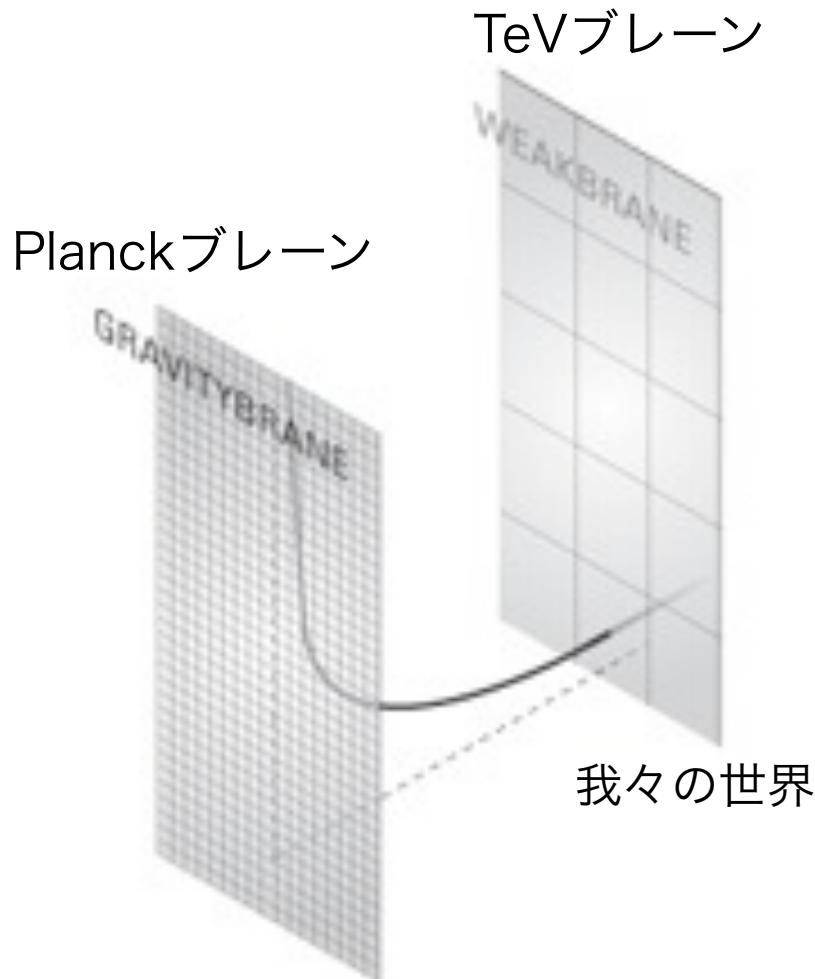
フィット幅の上限を上げていくことで、QCDからのずれを探す。
(下限は固定)

共鳴状態だけでなく、イベント超過の探索にもおそらく有効。

RSでのKKグラビトン

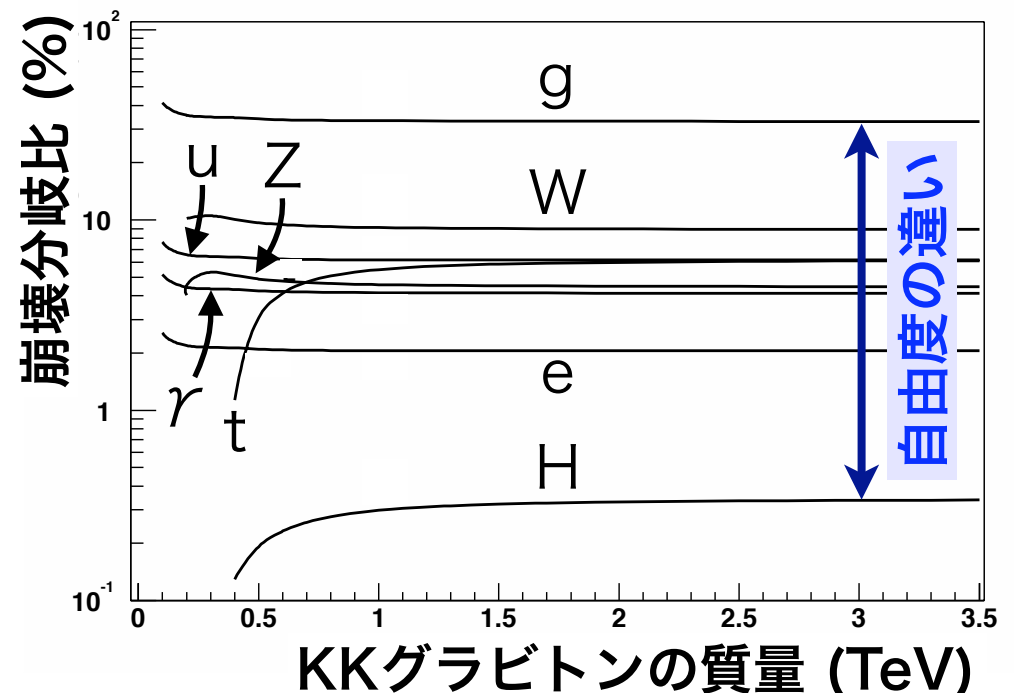
歪曲した余剰次元モデル (Randall, Sundrum)

- ▶ 2つのブレーン (PlanckブレーンとTeVブレーン) に挟まれた余剰次元。
- ▶ non-factorizableなバルクの幾何 $d_s^2 = e^{-2k|y|} \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu - dy^2$ (k =バルクの曲率)。
- ▶ PlanckスケールからTeVスケールへ、歪曲因子 $e^{-kr_c\pi}$ ($kr_c \approx 11$) だけスケールされる。



RS1

- ▶ 全てのSM粒子はTeVブレーン上に束縛。
- ▶ グラビトン結合因子 $1/\Lambda_\pi$ ($\Lambda_\pi = \bar{M}_{Pl} e^{-kr_c\pi}$)
→ 全てのSM粒子に共通



RS KKグラビトン $\rightarrow ee$

$M_G = 1 \text{ TeV}$

感度の高いチャンネル

- スピン2の測定も可能

モデルパラメータ		Γ_G (GeV)	$\sigma \cdot \text{Br}$ (fb)
m_G (TeV)	k/\bar{M}_{pl}		
0.5	0.01	0.08	187
0.75	0.01	0.10	28
1.0	0.02	0.57	26
1.4	0.05	5.02	27

主なバックグラウンド :

SM Drell-Yan過程

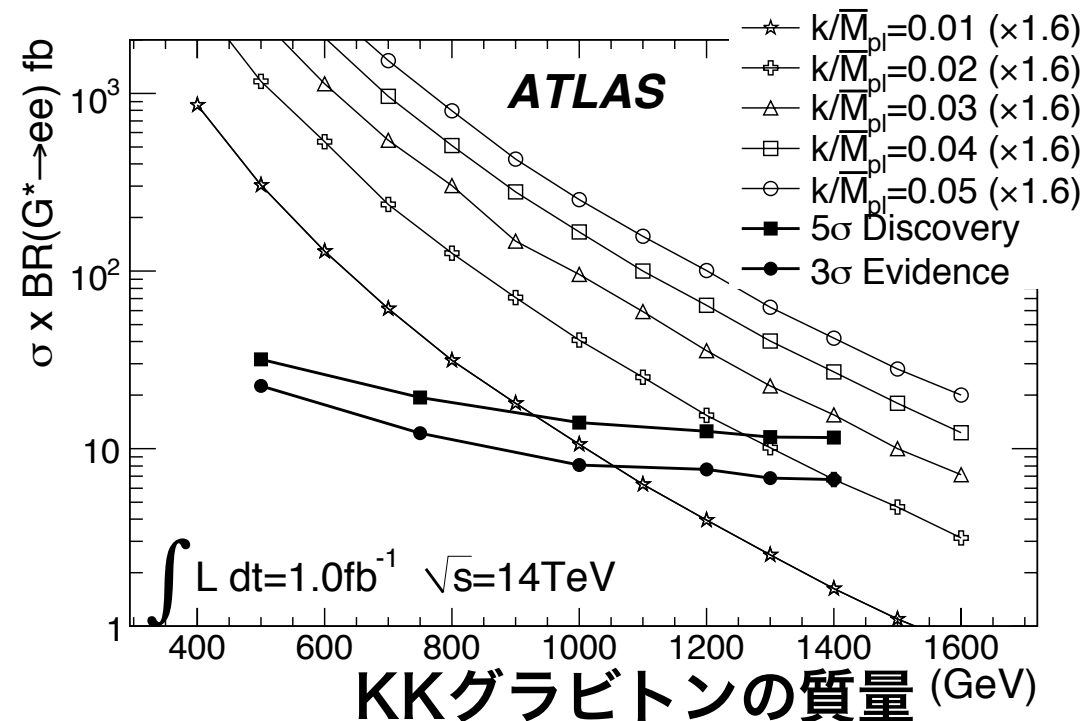
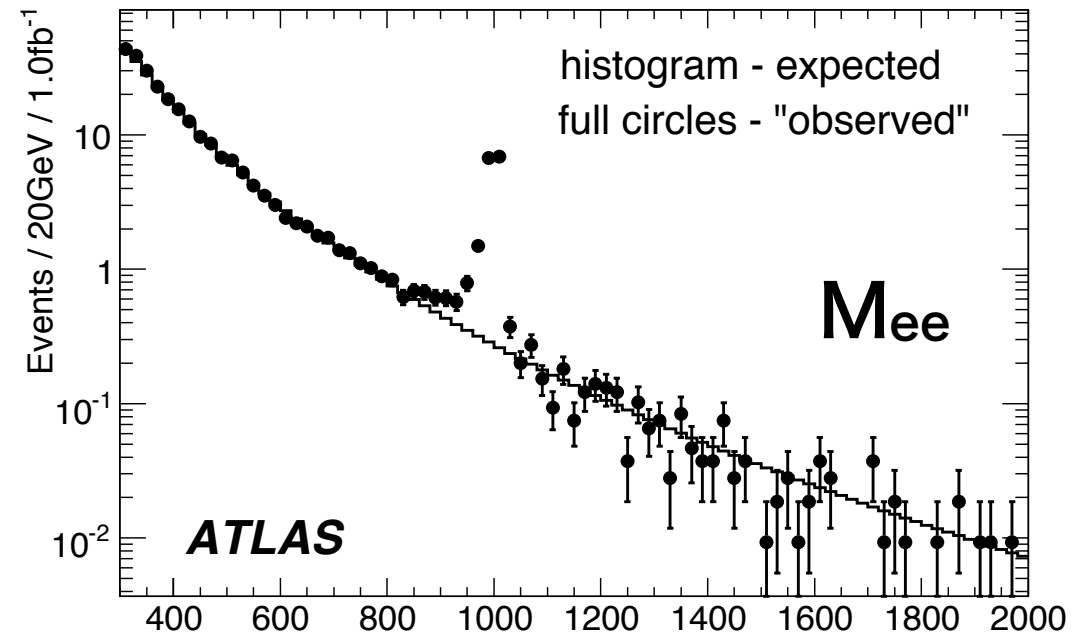
系統誤差 :

Drell-Yan生成の不定性 (理論)

▶ 9% at $M_{ee}=1 \text{ TeV}$

▶ 14% at $M_{ee}=3 \text{ TeV}$

cf) 実験による誤差 $< \sim 5\%$



KKグラビトン・ KKグルーオンの探索

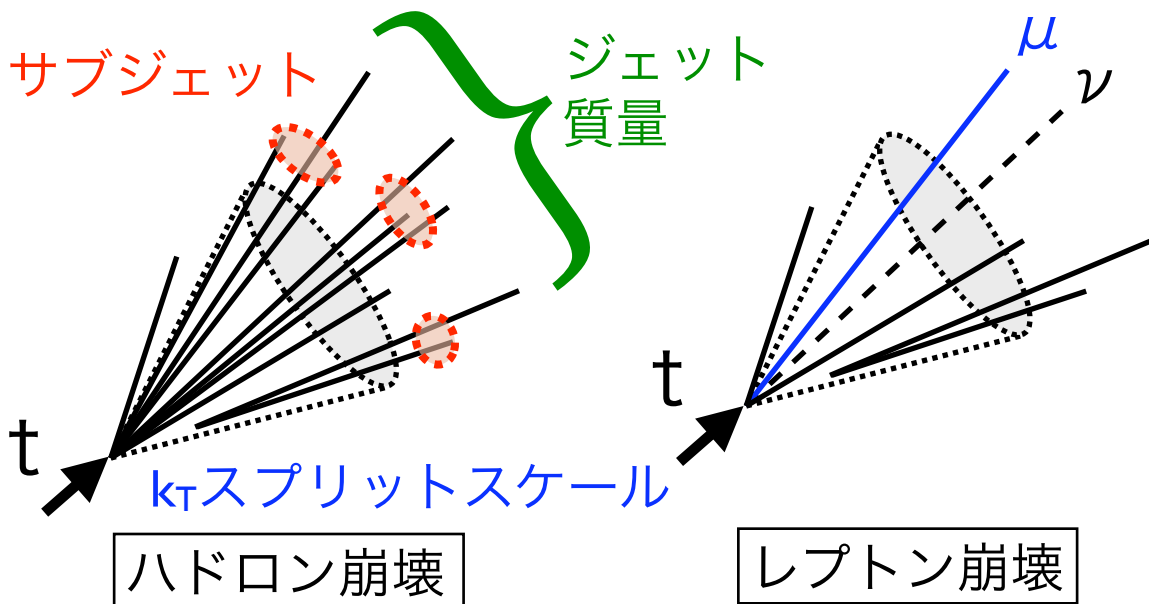
KKグラビトン $\rightarrow ee/\gamma\gamma$

\rightarrow (もし存在すれば) 発見可能性は高い。

KK生成であることの証拠?

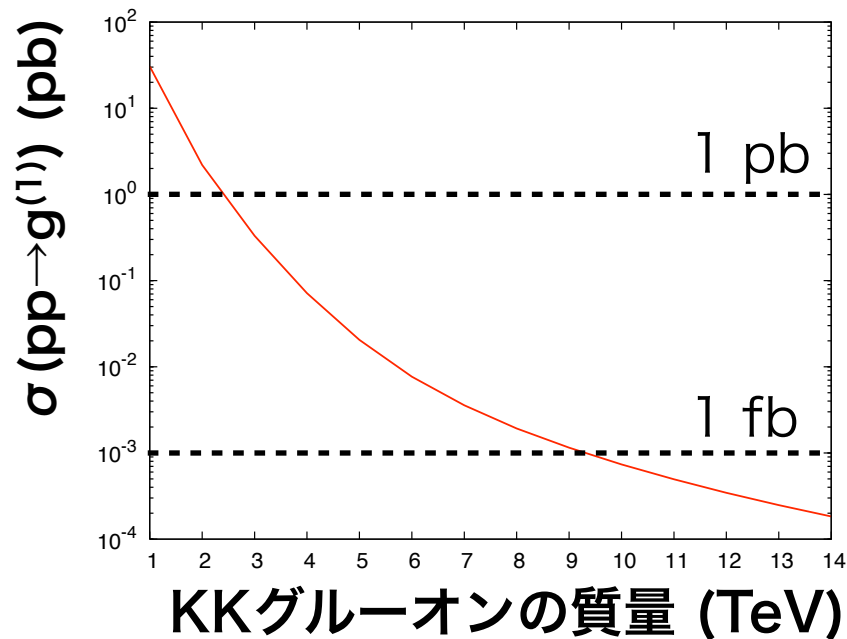
\rightarrow $tt/WW/bb$ などへの崩壊分岐比を測定する。

\rightarrow 崩壊生成物の同定が必要!



Bulk RS

- ▶ 全てのSM粒子がバルクに飛ぶ。
- ▶ KKグルーオン、トップクォーク (y_{t-1}) とともにTeVブレーン近傍に局所化する。
 \rightarrow KK $g^{(1)} \rightarrow tt$ が支配的 (Br~93%)



高い p_T のトップジェットを生成。

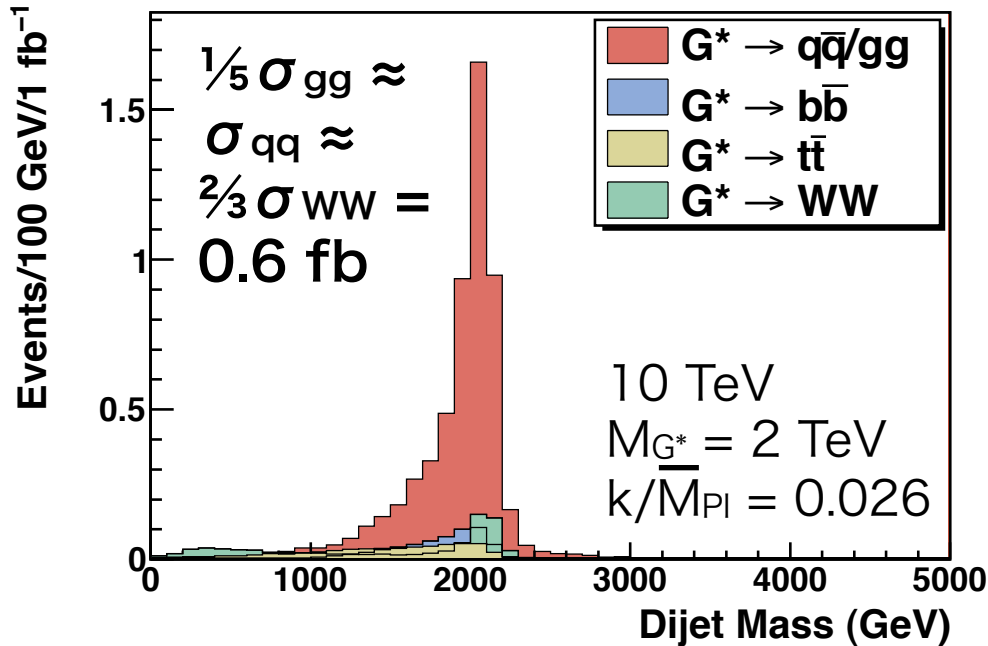


- ▶ サブジェット構造
- ▶ ジェットの質量
- ▶ ジェット内のレプトンの存在等を使ってトップをIDする。

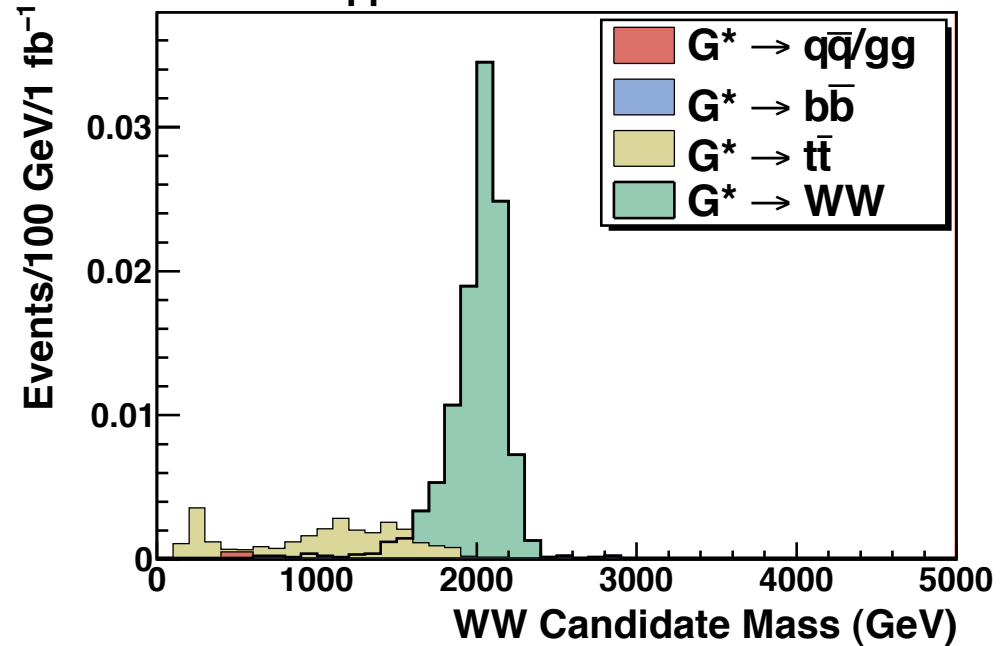
\rightarrow 磯部さんのトーク

KKグラビトンへの応用：G* → WW

All Events



WW → lν qq' Selection

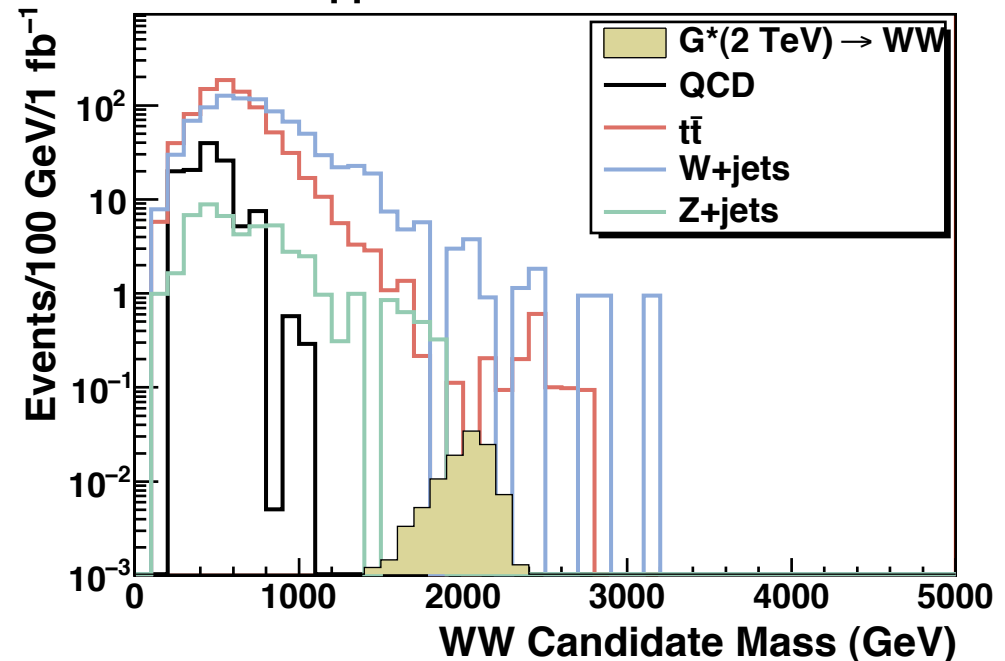


WW → lν qq Selection

- ▶ $N_{\text{subjets}} \geq 2$ (→詳しくは磯部さん)
- ▶ Jet Mass: $70 < M_{\text{jet}} < 120 \text{ GeV}$
- ▶ 1 isolated lepton
- ▶ $E_{T^{\text{miss}}} > 30 \text{ GeV}$
→ Solve ν (W-mass constraint)

バックグラウンドはまだ多い、、、。
 WW共鳴状態の探索には一般的に有効。

WW → lν qq' Selection



まとめ

UED、LED、RSの典型的な信号に対しては、LHCでの発見能力はかなり高い。

- ▶ ただし、よく理解された検出器・データが前提。
- ▶ 2ジェット解析は難しい解析の一つ。

これからやるべきこと（実験）

- 1) $\sqrt{s}=10\text{TeV}$ 、ルミノシティー100-200 pb^{-1} で再評価する。
 - ▶ 14TeVの解析手法でOKか？
 - ▶ 新たな問題点は？
 - ▶ **ジェット・レプトン・ E_T^{Miss} の再構成・較正パフォーマンス**
- 2) data-drivenバックグラウンドの方法・評価の確立。
- 3) $\sqrt{s}=7\text{ TeV}$ 、50-100 pb^{-1} ではどうか？

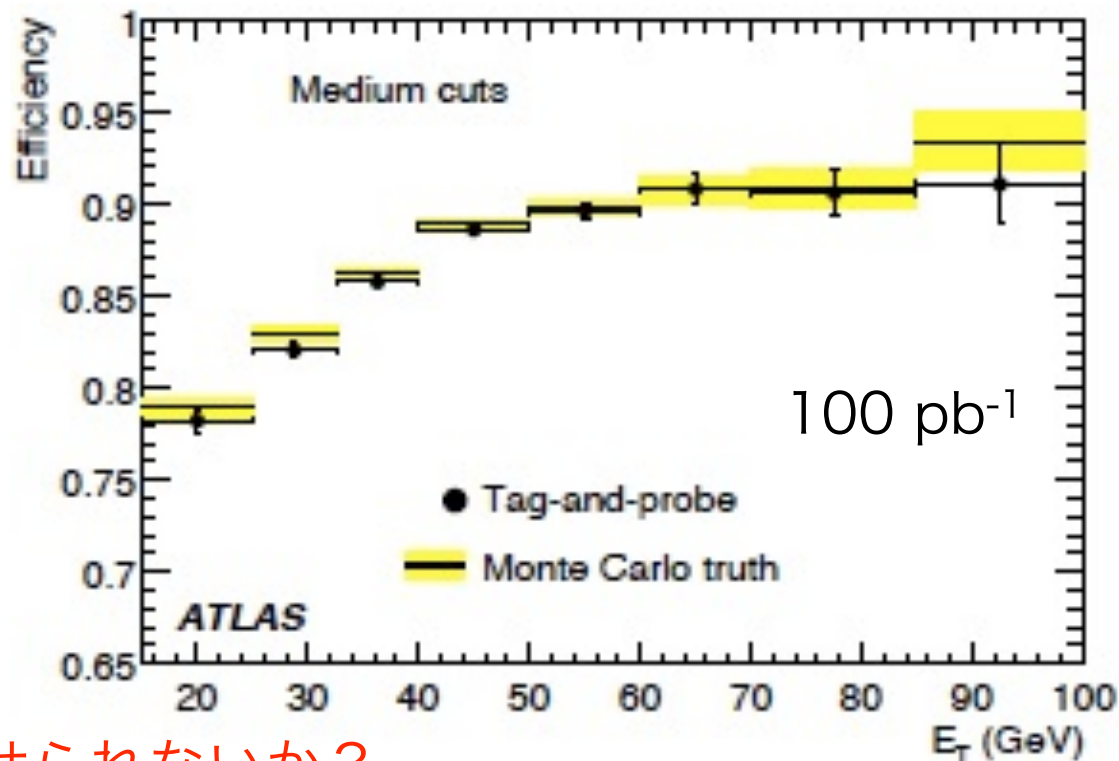
バックアップ

高い p_T のレプトン

データを用いたレプトン同定効率の決定

→通常”タグ&プローブ”と呼ばれる方法が使われる。

- ▶ タイトIDカット on tagレプトン
- ▶ 効率 vs probeレプトン (Zボソンのピークで)
- ▶ 統計の限界 at $p_T^{\text{Lepton}} \sim 100 \text{ GeV}$
- ▶ $p_T^{\text{Lepton}} \sim 300\text{-}500\text{ GeV}$ まで伸ばせられないか？
- ▶ MCとの比較・スケール調整 →もっと高い p_T 領域へMCで外挿？



Electronの場合 (MCの結果)

E_T	280-560 GeV		560-1120 GeV	
	Efficiency	Jet Rejection	Efficiency	Jet Rejection
Loose ID	90%	620	92%	550
Medium ID	85%	2300	87%	1900

高い p_T のミュオン

”タグ&プローブ” (→前のスライド)

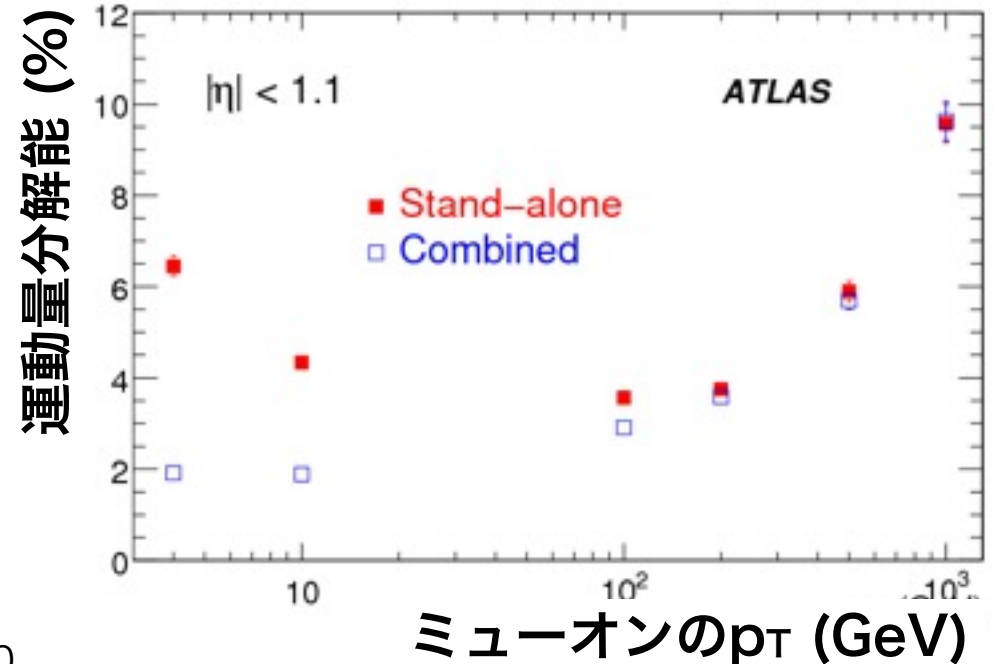
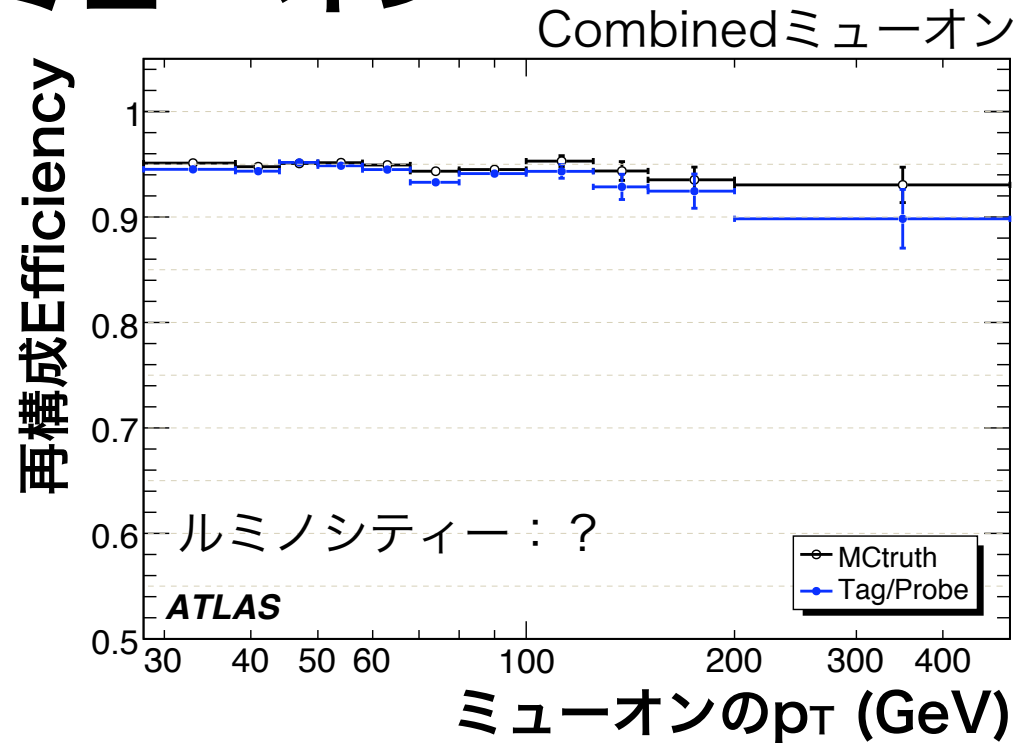
- $p_T > 100$ GeVで差が出始めている?
- 少なくとも $p_T > 200$ GeVは初期には無理、...

運動量分解能

- ▶ ミュオン: $\Delta p_T / p_T \propto p_T$
- ▶ 電子: $\Delta p_T / p_T \propto 1/\sqrt{p_T}$

高い p_T では検出器のアライメントとドリフトチェンバーの分解能がもっとも効くが、ともに理想とするレベルに近づいているよう、...

▶ **理想: $\Delta p_T / p_T \sim 10\%$ @ 1TeV**



ジェットの軟正

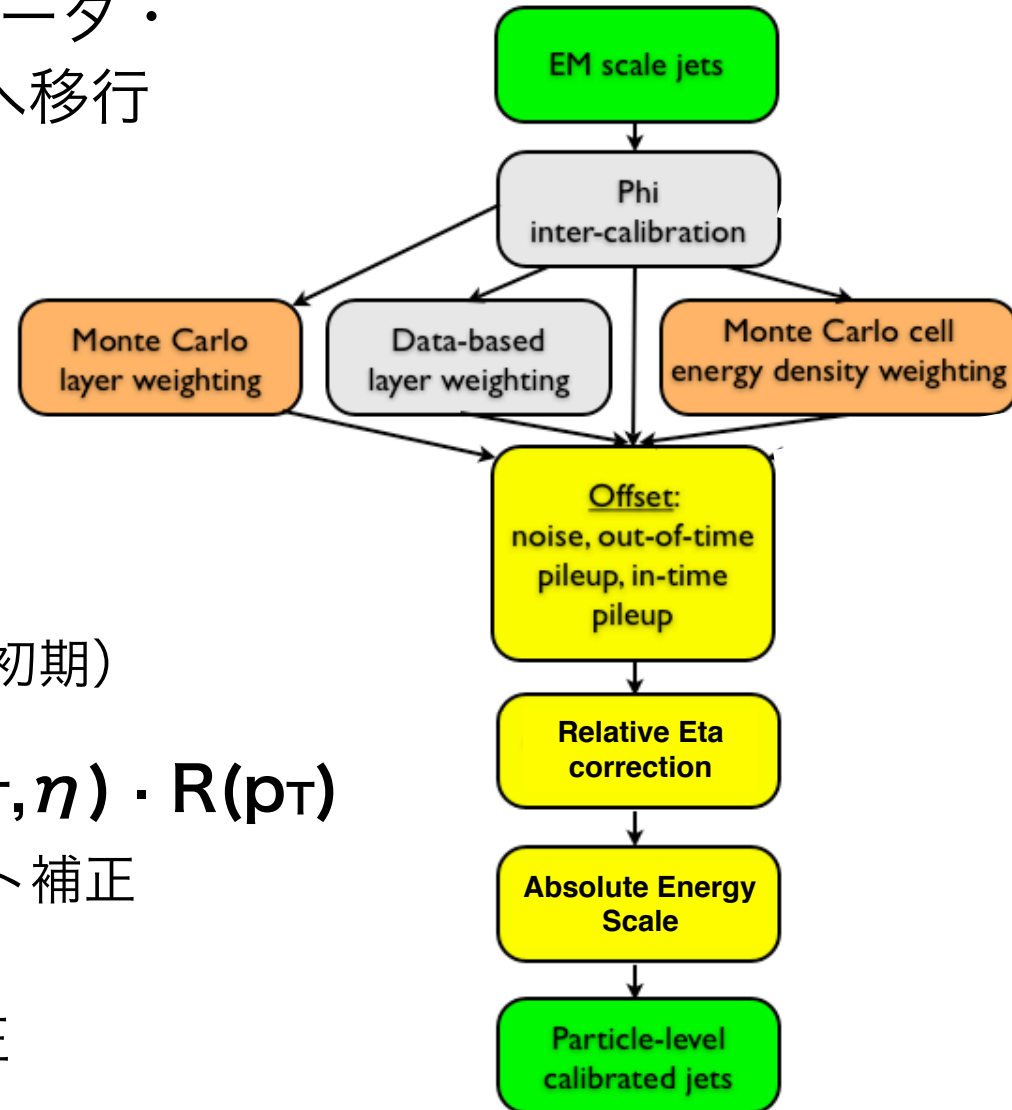
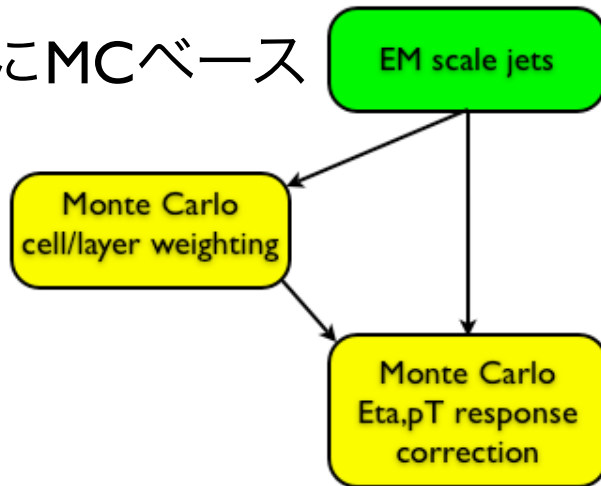
実験開始時

実験初期

徐々にデータ・
MC混成へ移行



完全にMCベース



ジェットエネルギースケール補正 (実験初期)

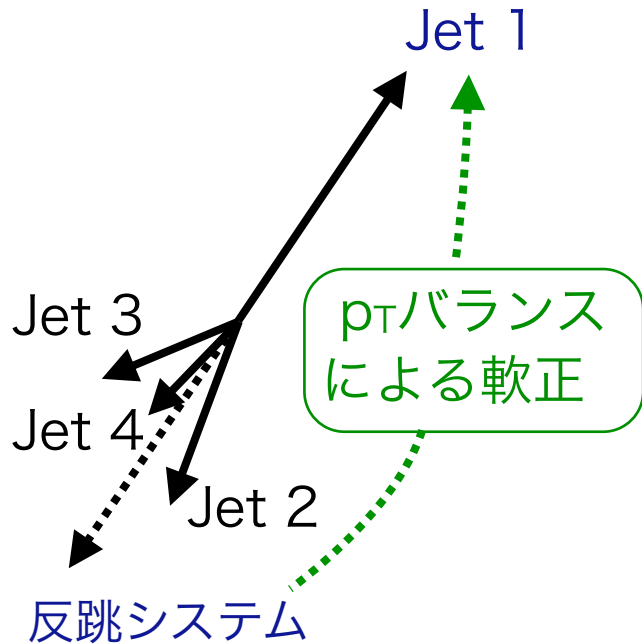
$$p_T^{\text{corr}} = [p_T^{\text{measured}} - p_T^{\text{offset}}] \cdot C(p_T, \eta) \cdot R(p_T)$$

- ▶ $p_T^{\text{offset}} = p_T^{\text{offset}}(\eta, N_{PV}, L)$: オフセット補正
- ▶ $C(p_T, \eta)$: η 応答の相対的な均一化
- ▶ $R(p_T)$: 絶対エネルギースケールへの補正

高い p_T のジェット

高 p_T ジェットとバランスするReferenceが必要

→ マルチジェット

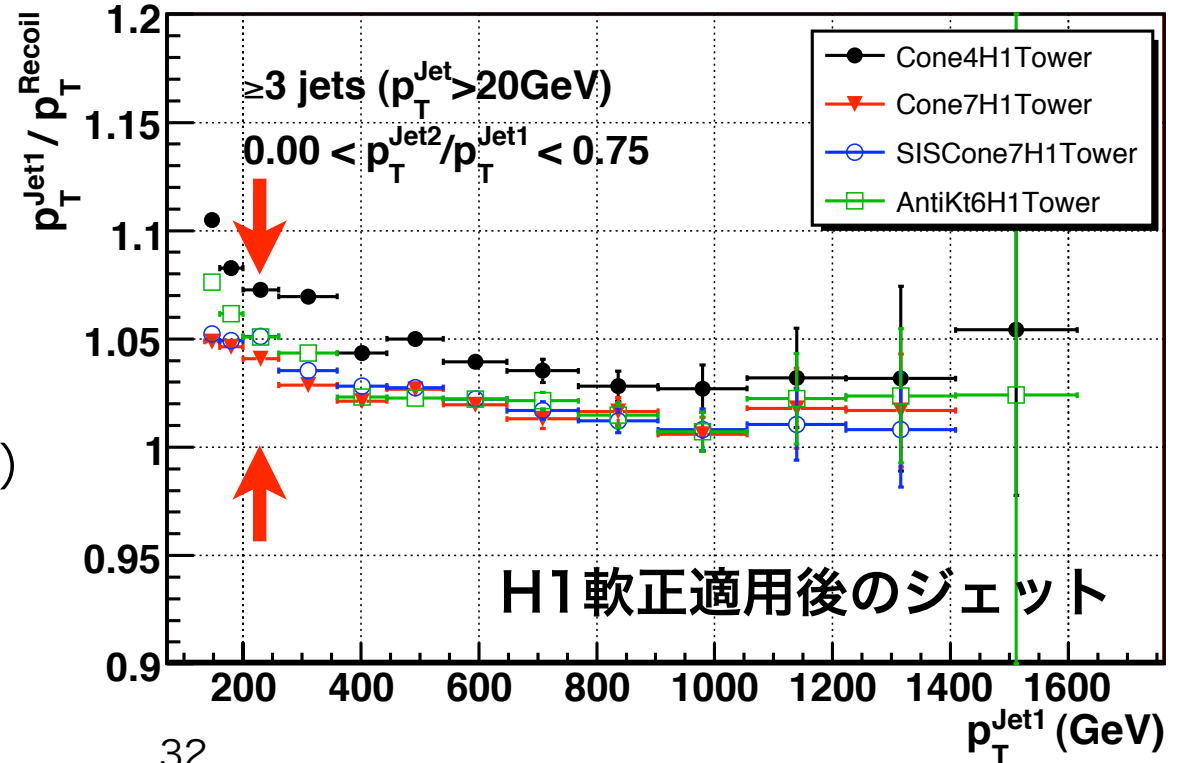


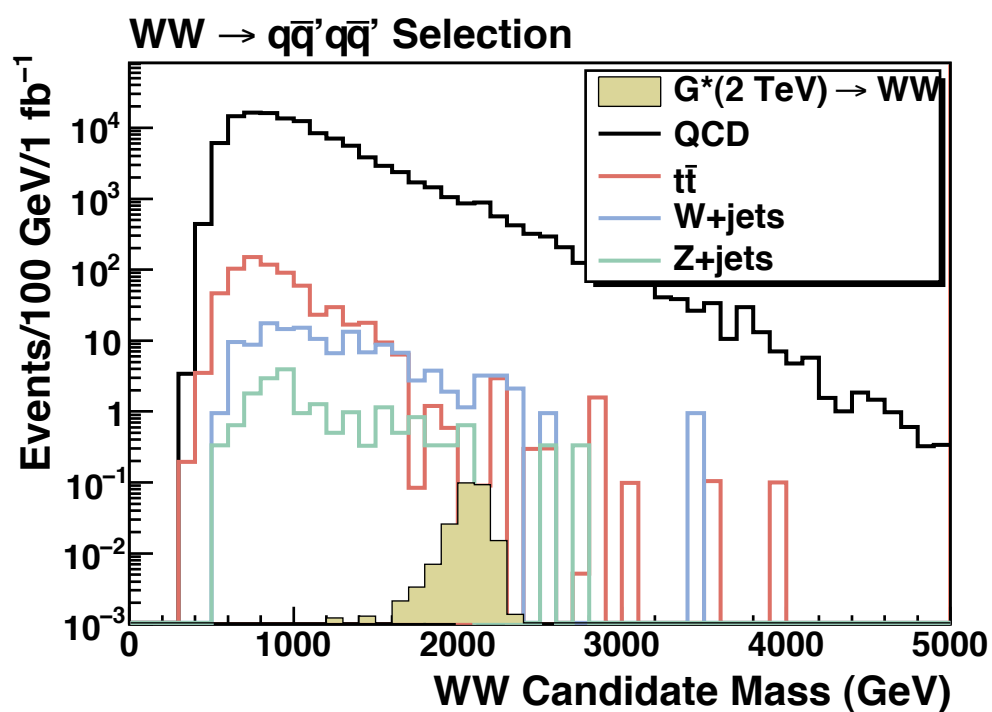
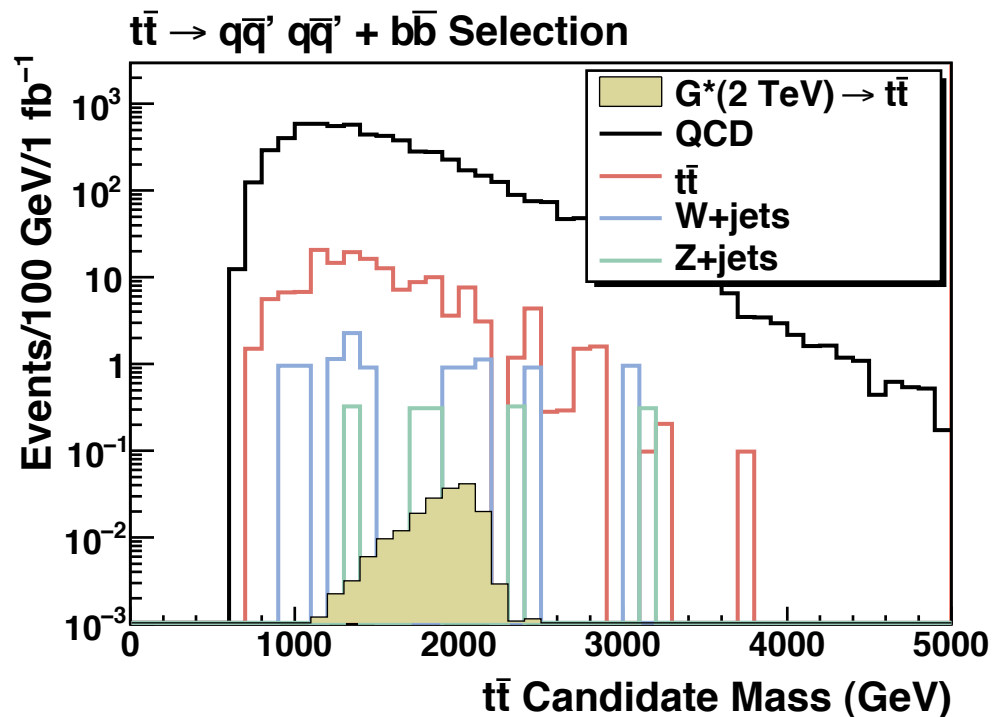
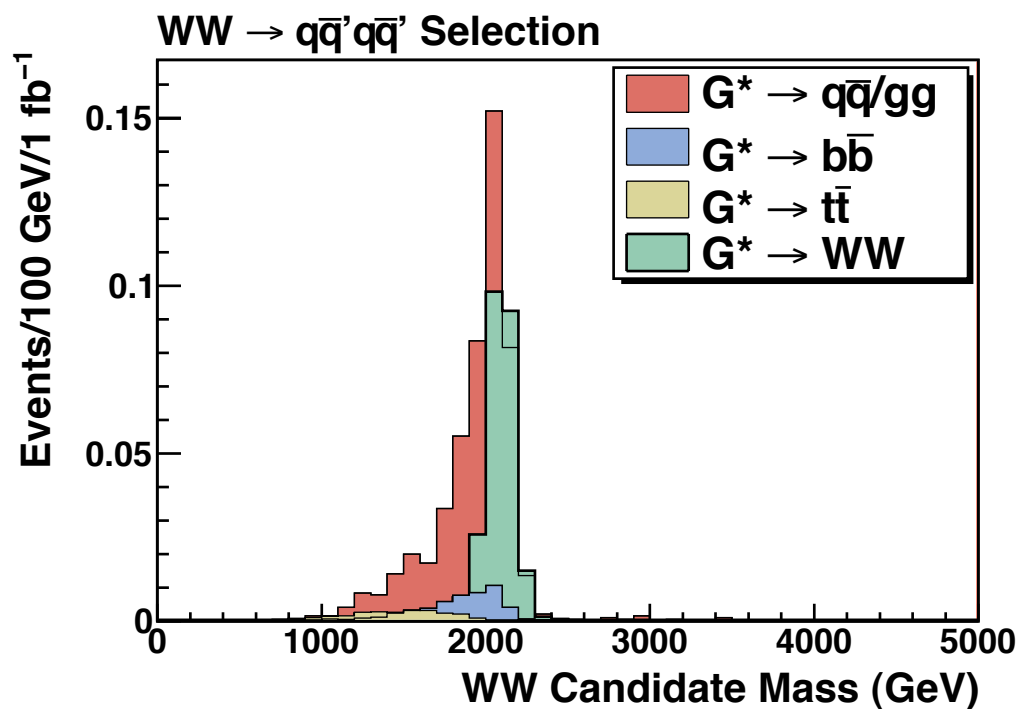
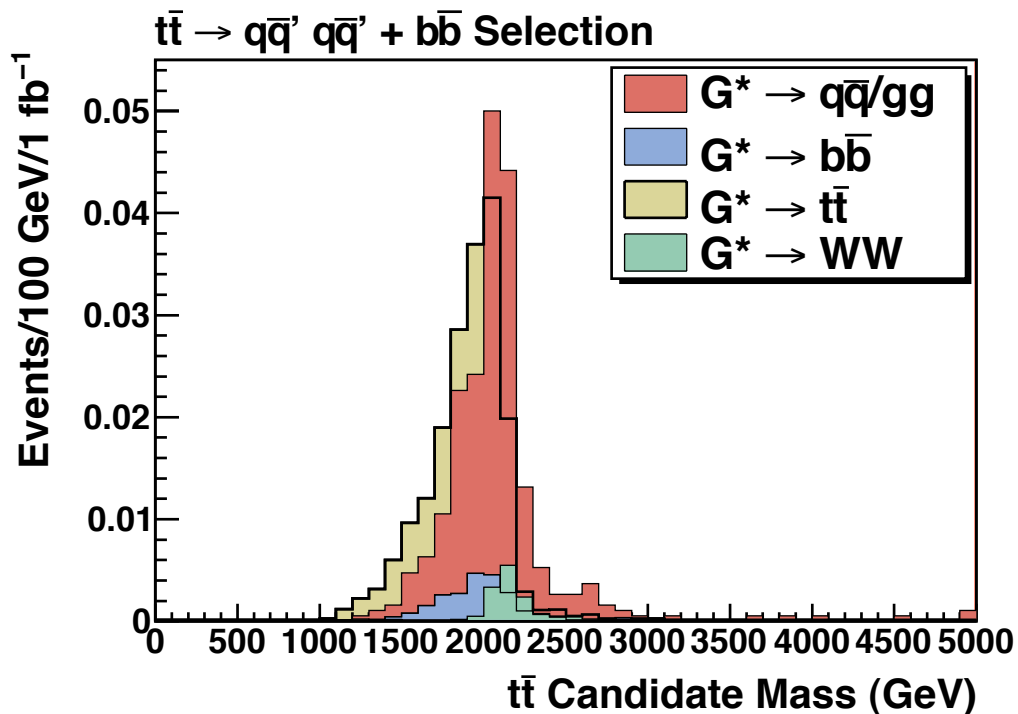
主なずれの理由 ($p_T^{\text{Jet1}} < 300 \text{ GeV}$)

- ▶ 不完全なH1軟正因子
- ▶ ソフトなグルーオン放射

→ 反跳システムの p_T を過小評価

- ▶ 反跳システム内のジェットは軟正されている必要がある。
- ▶ Jet 1は反跳システム全体とバランスするため、以下を考慮する必要がある。
 - ソフトなグルーオン放射
 - underlyingイベント
 - out-of-coneエネルギー





2レプトン：共鳴状態

バックグラウンド (Electronチャンネル)

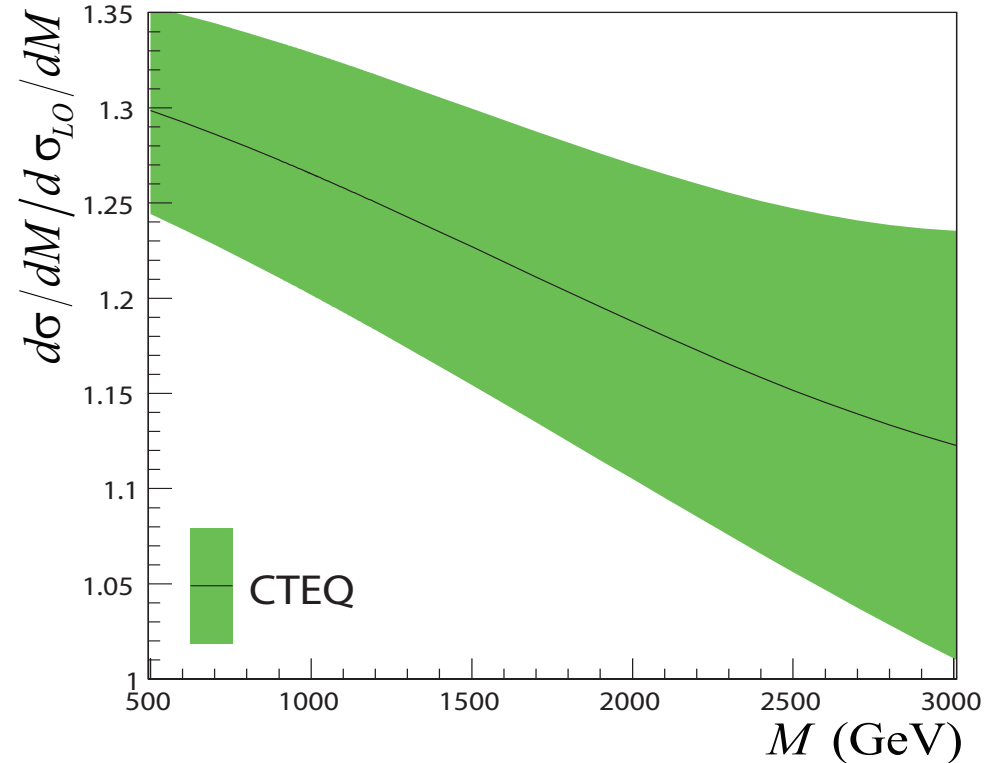
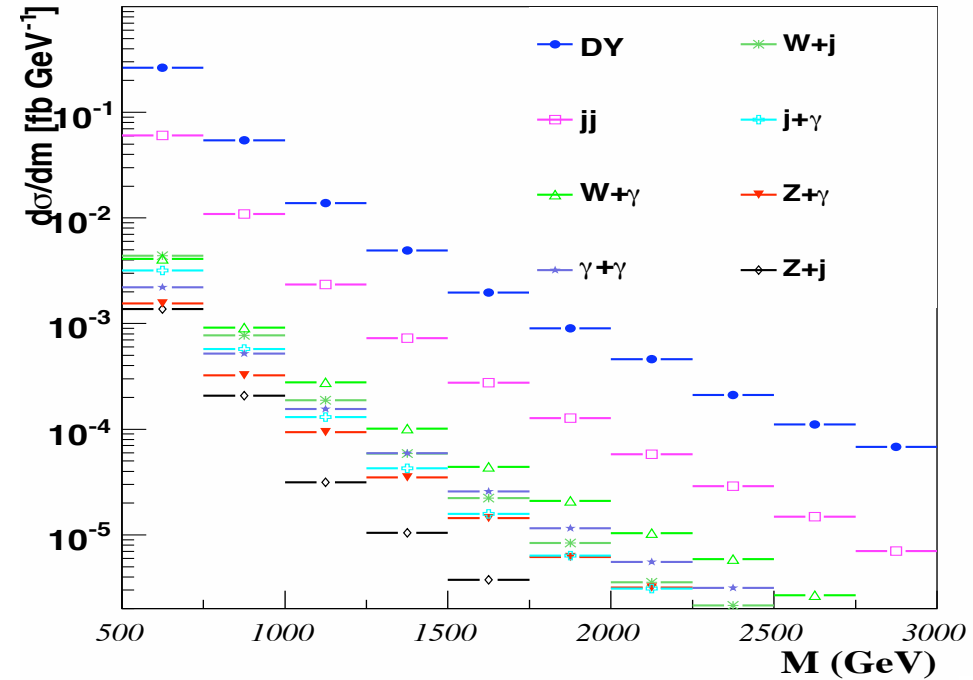
- ▶ Drell-Yan過程
- ▶ フェイクBG
 - ジェット：QCD, W/Z+jets
 - フォトン：W/Z+photon, di-photon
 - 両方：photon+jet

標準Electronカットのジェット（フォトン）除去因子 $R=4 \times 10^3$ (10) をバックグラウンドサンプルに適用。

- ▶ Drell-Yan BGが支配的
 - ▶ 2ジェット BGはDYの約30%
- どこまで信頼できるか？

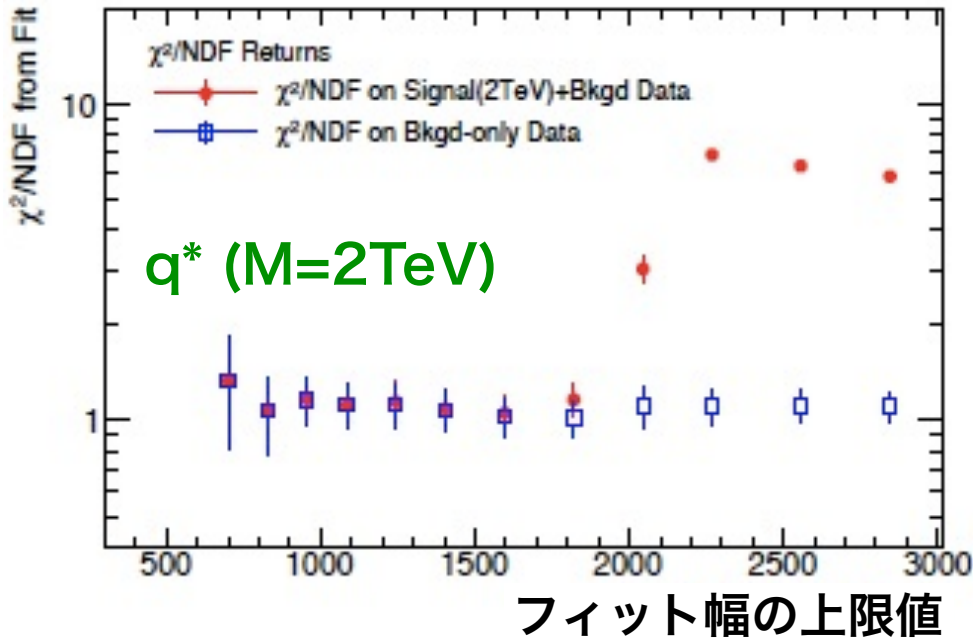
- ▶ Drell-Yan 2レプトン生成の理論不定性
 - EWK/QCDの高次補正
 - スケール依存性：+6/-3%
 - PDFの不定性：±5(11)% at 1(3) TeV
- ▶ 実験からの不定性 < ~4%
 - Electron ID/Acceptance

$d\sigma/dM_{ee}$ (適用後)



2ジェット：一般的な共鳴状態

フィット幅の上限を変える（下限は固定）



もし χ^2 が1からスタートしない？

- ▶ 低い p_T 領域のジェット補正？
- ▶ トリガーの境目？
- ▶ p_T spectrumは？

もし χ^2 がだらだらと上がったら？

- ▶ p_T に依存するジェットの系統誤差？
- ▶ Compositeness？
- ▶ 幅の広い共鳴状態？（例えば重いグルーオン）

→ 高い p_T 領域のジェット軟正が重要

