

研究会「LHCが切り拓く新しい物理」

東京大学, 2009年4月1-3日

Exotics Summary

(実験)

寺師 弘二

ICEPP 東京大学

アウトライン

- ▶ トポロジーとモデル
- ▶ CSCノートの結果
- ▶ これからやるべきこと
- ▶ 面白そうなこと・
盛り上がっていること

新しい物理（モデル）は何か？

SUSY以外で
見ると、、、

余剰次元

▶ ADD, UED, RS, ...

EWSB

▶ Little Higgs, テクニカラー, ...

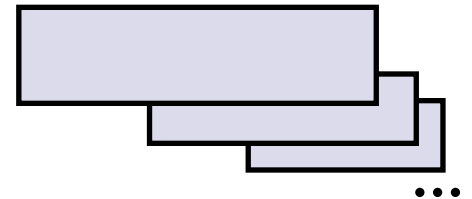
Compositeness

Left-Right symmetry

Leptoquarks

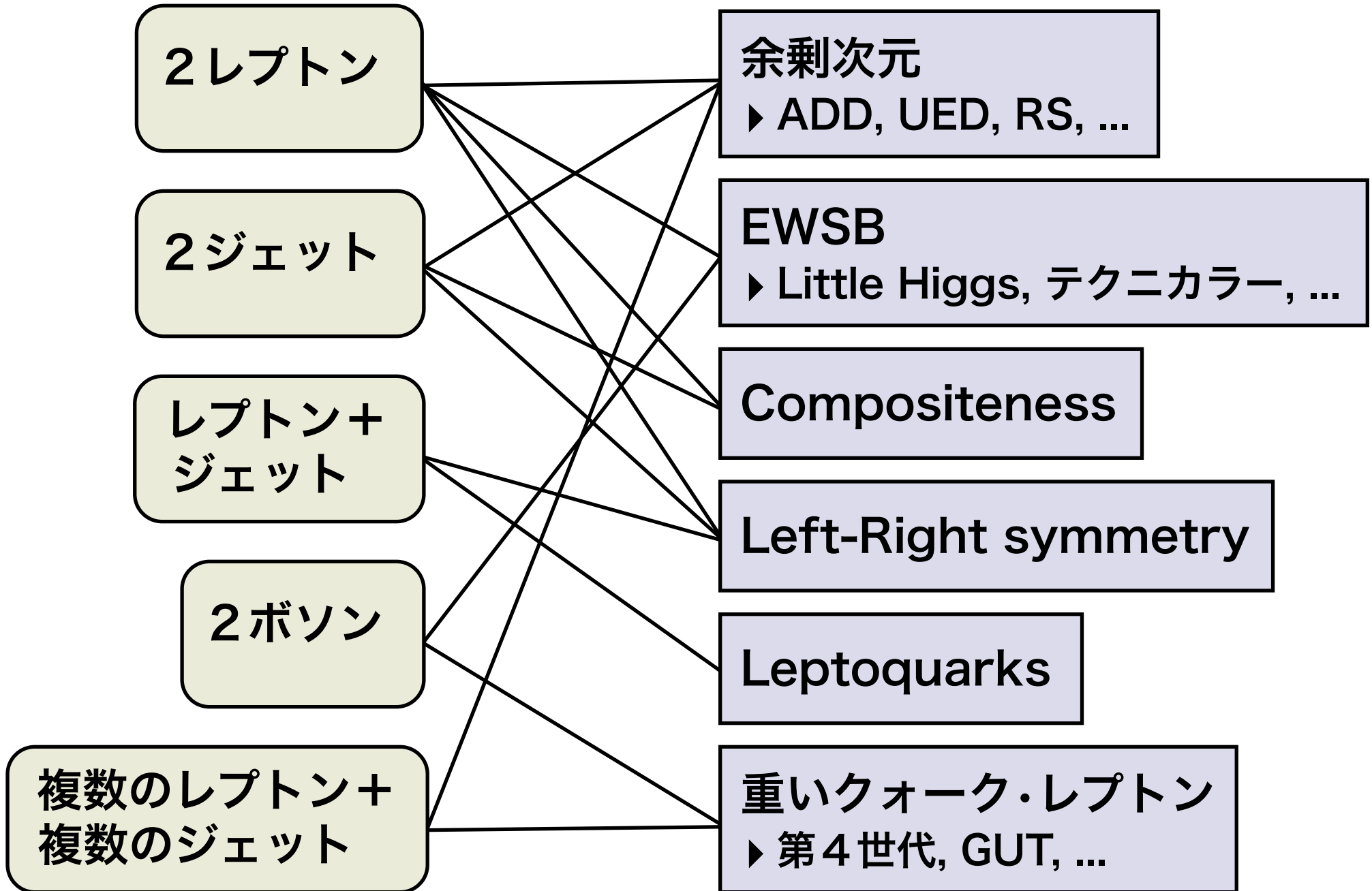
重いクォーク・レプトン

▶ 第4世代, GUT, ...



...

トポロジーで調べる



トポロジーで調べる

2レプトン

アトラスExoticsグループの基本方針

CSC (Computing System Commissioning) の解析でも使われた。

2ジェット

CSCでの研究：

- ▶ 0.01-10 fb⁻¹程度の初期データを用いた解析
- ▶ より確実な（不完全な検出器でも見える）信号
- ▶ 安定した低レベルのバックグラウンドが予想されるもの
- ▶ 信号の特徴が明確（分布上のピーク、形の変化など）

レプトン+
ジェット

2ボソン

以下ではいくつかの結果のみ取り上げる。

複数のレプトン+
複数のジェット

- ▶ 2レプトン
- ▶ 2ジェット
- ▶ レプトン+ジェット

2レプトン： $Z' \rightarrow ee$

2つのloose electron ($|\eta| < 2.5$)

- e55トリガー
- IDトラックとマッチ
- 少なくとも1つのelectron $p_T > 65$ GeV

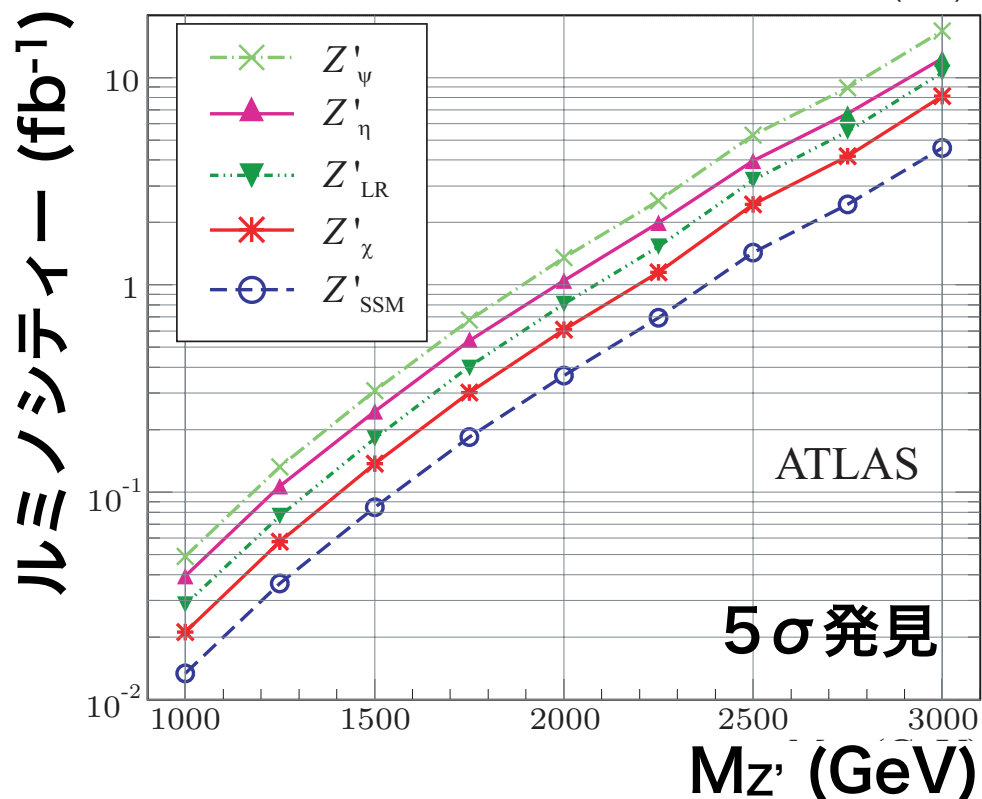
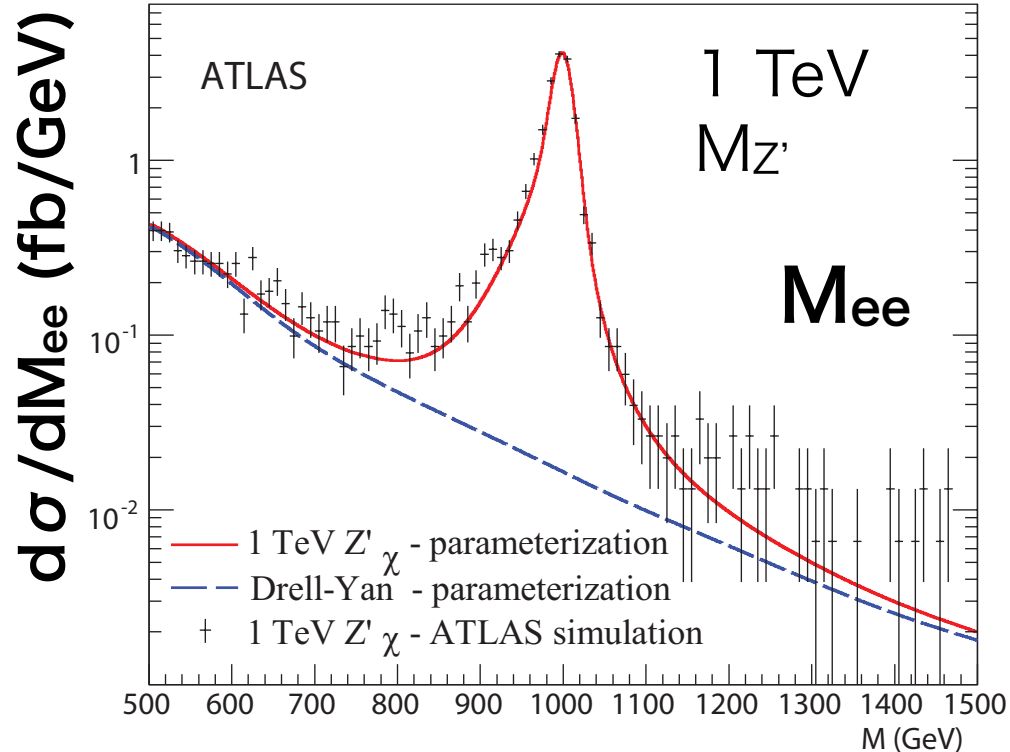
主なバックグラウンド：

SM Drell-Yan過程

系統誤差：

Drell-Yan生成の不定性 (理論)

- ▶ 9% at $M_{ee}=1$ TeV
 - ▶ 14% at $M_{ee}=3$ TeV
- 後述
- cf) 実験による誤差 $< \sim 5\%$

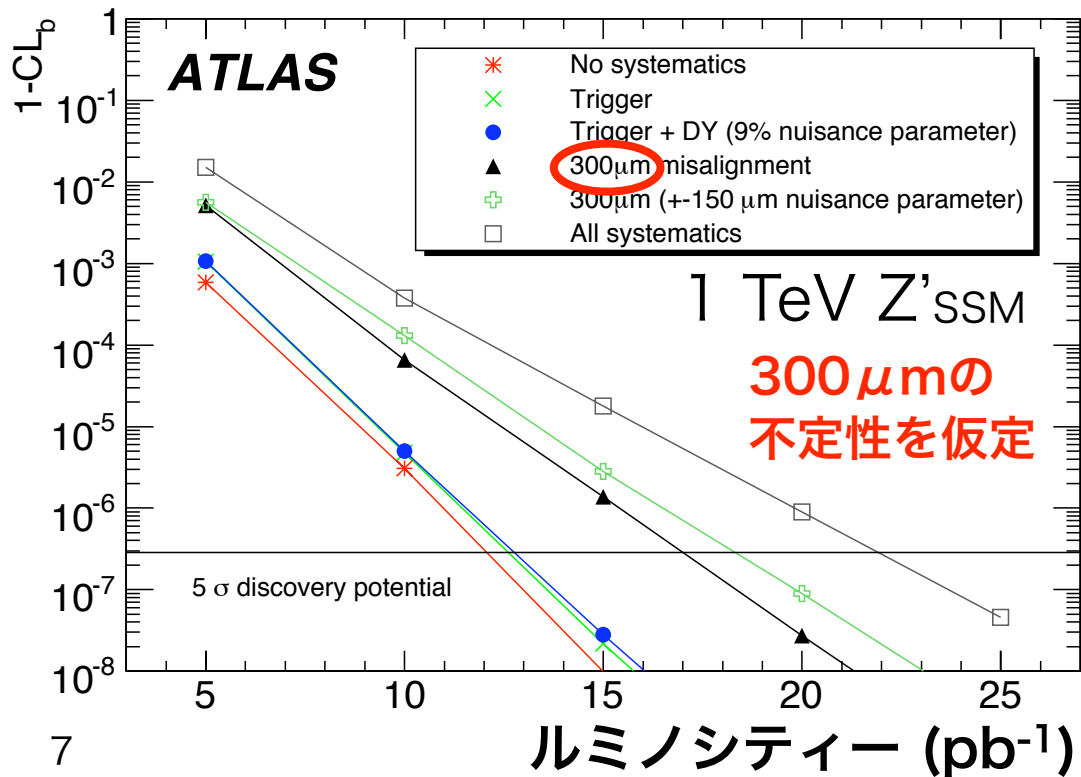
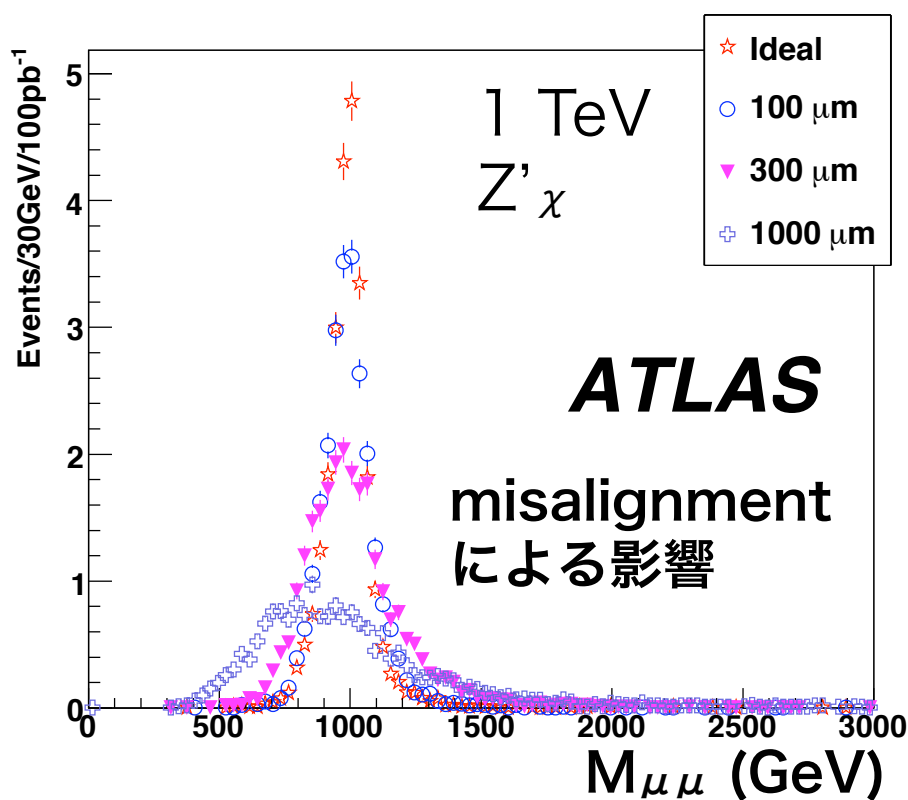


2レプトン: $Z' \rightarrow \mu\mu$

2つのcombinedミューオン

- mu20トリガー
- $p_T > 30 \text{ GeV}$, $|\eta| < 2.5$
- 電荷が反対

- ▶ フェイクBGはelectronチャンネルより少ない
- ▶ 高い p_T では、 p_T 分解能 ($\rightarrow M_{\mu\mu}$ 質量分解能) はelectronよりはるかに悪い
 - 検出器のalignment
ドリフトチェンバーの分解能に依存する。



2レプトン：共鳴状態

バックグラウンド (Electronチャンネル)

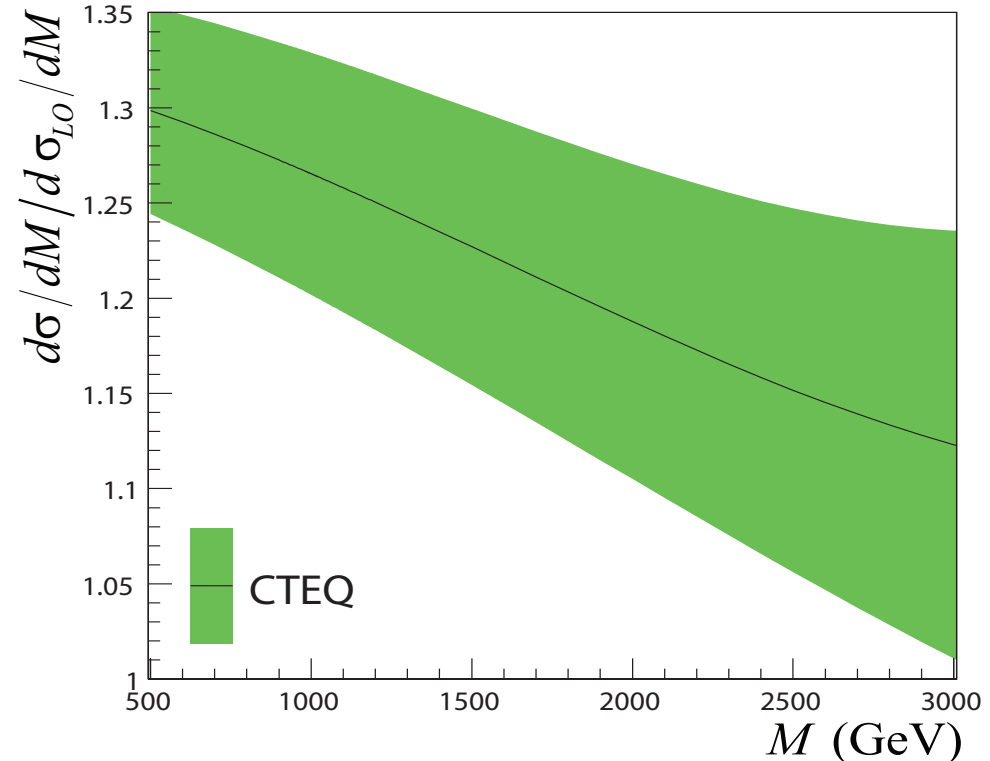
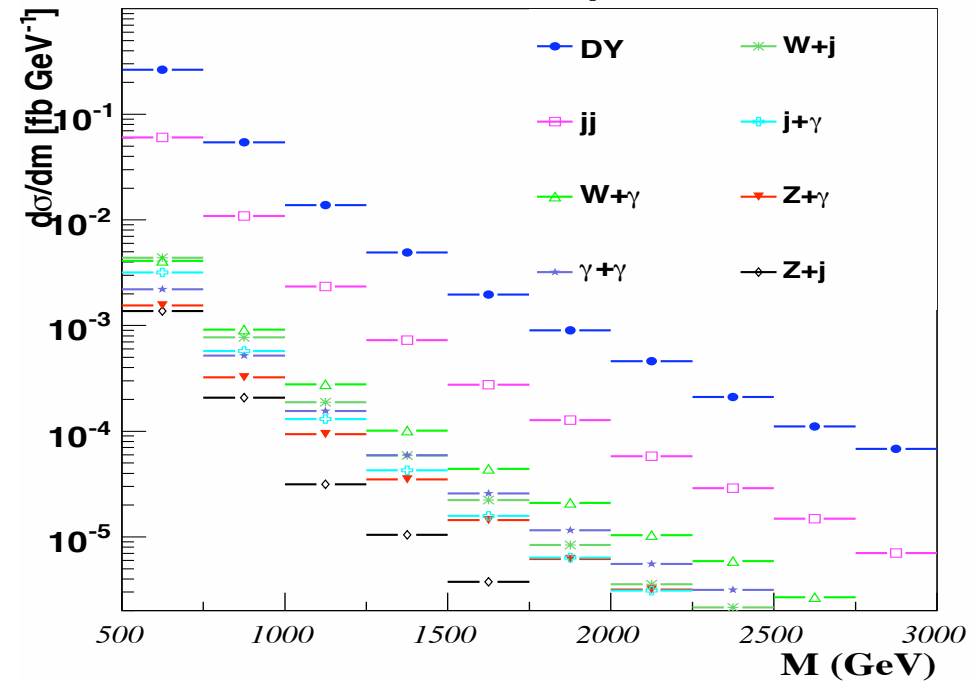
- ▶ Drell-Yan過程
- ▶ フェイクBG
 - ジェット：QCD, W/Z+jets
 - フォトン：W/Z+photon, di-photon
 - 両方：photon+jet

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 : モデル非依存の共鳴状態

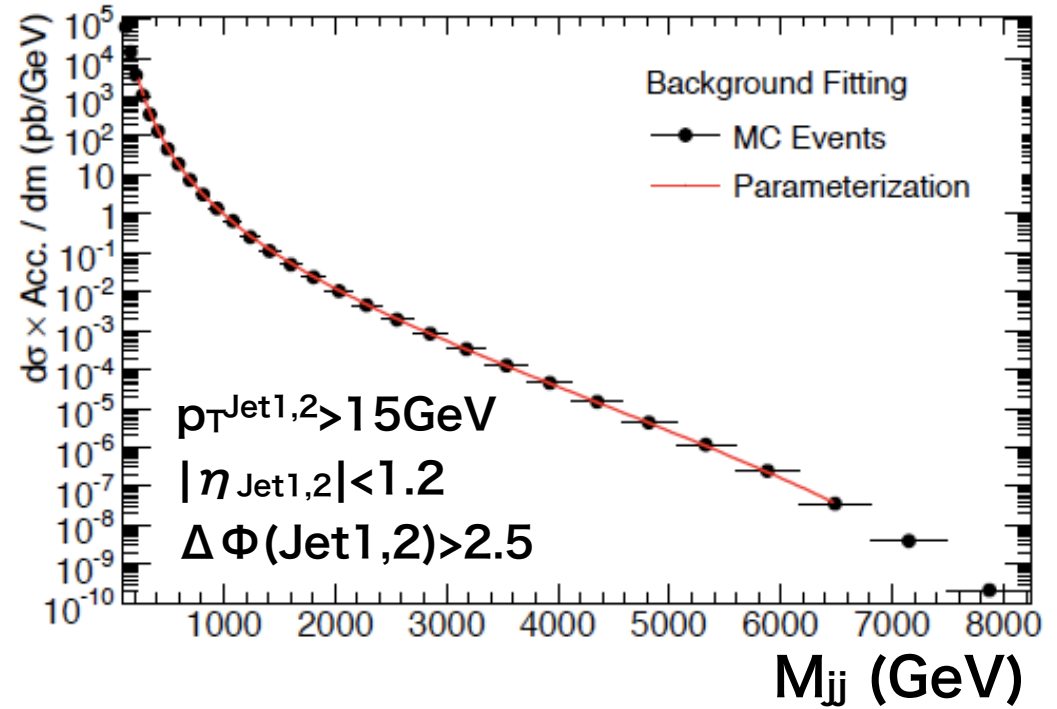
モデルを想定しない 2 ジェット
共鳴状態の探索

→ QCD (PDF) 分布の測定

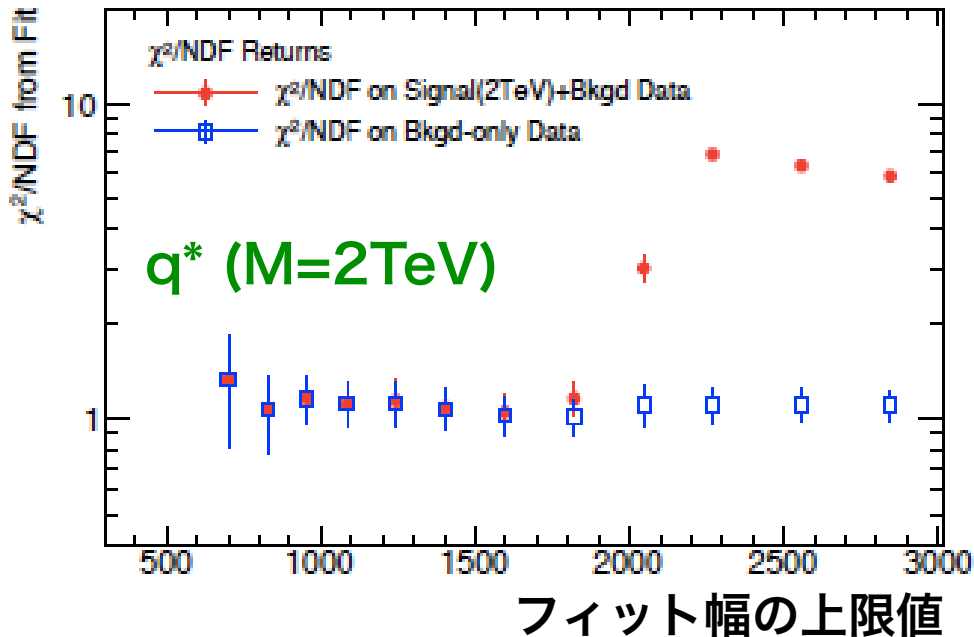
$$M_{jj} \approx x_1 \cdot x_2 \cdot \sqrt{s}$$

2 ジェット 質量分布にフィット

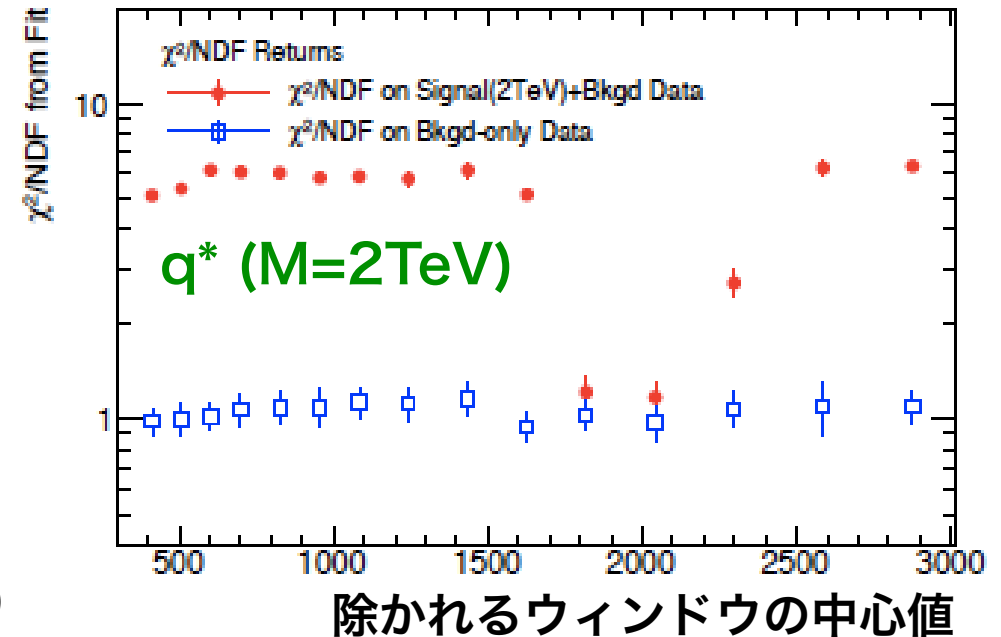
$$\frac{d\sigma}{dM_{jj}} = p_0 \frac{(1 - M_{jj}/\sqrt{s})^{p_1}}{M_{jj}^{p_2}}$$



フィット幅の上限を変える (下限は固定)

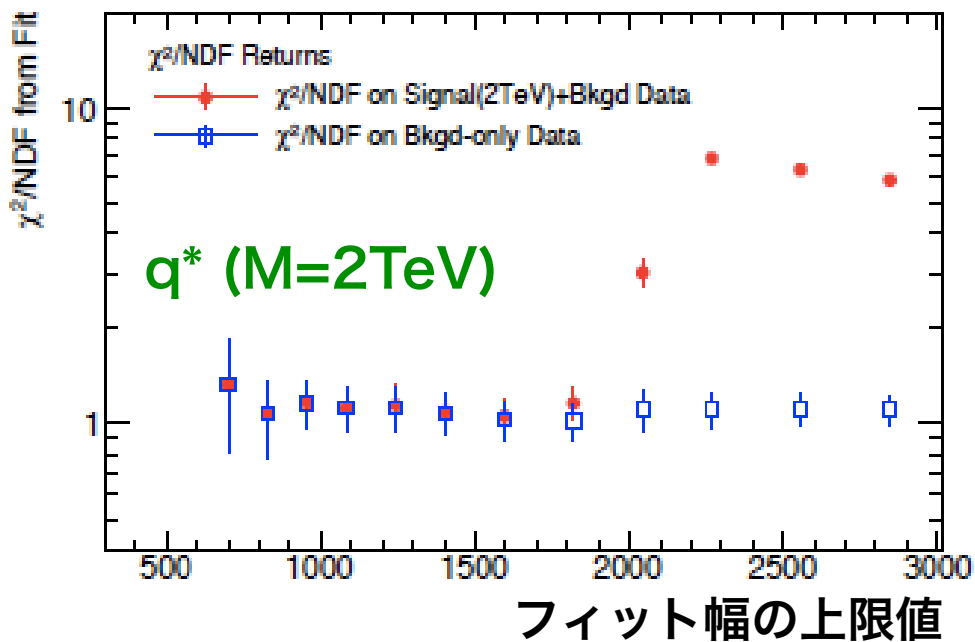


sliding window (幅: 3ビン) を除いてフィット



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）



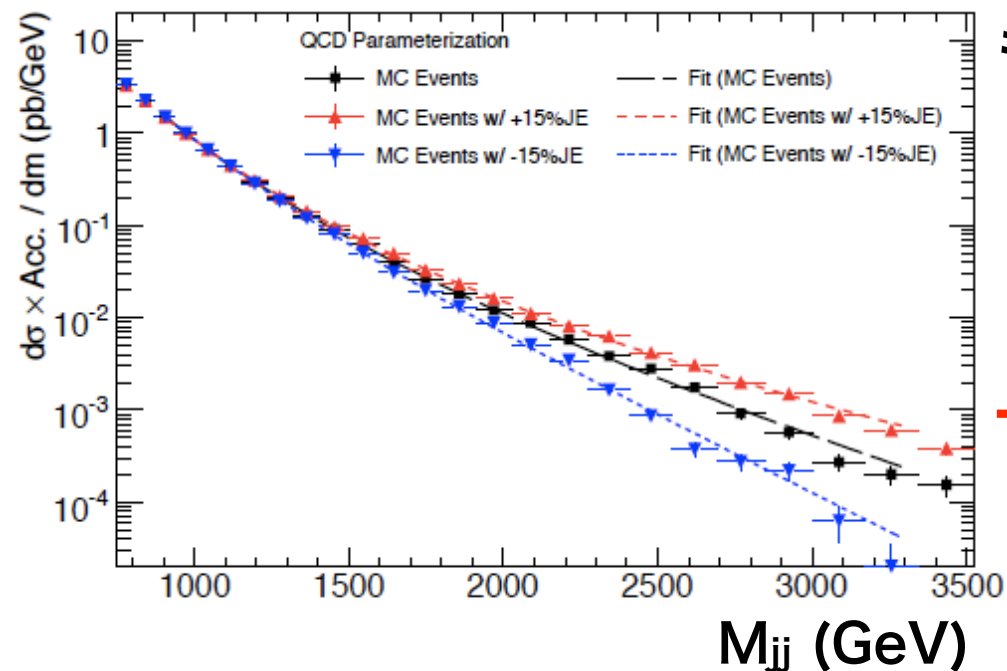
もし χ^2 が1からスタートしない？

- ▶ 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

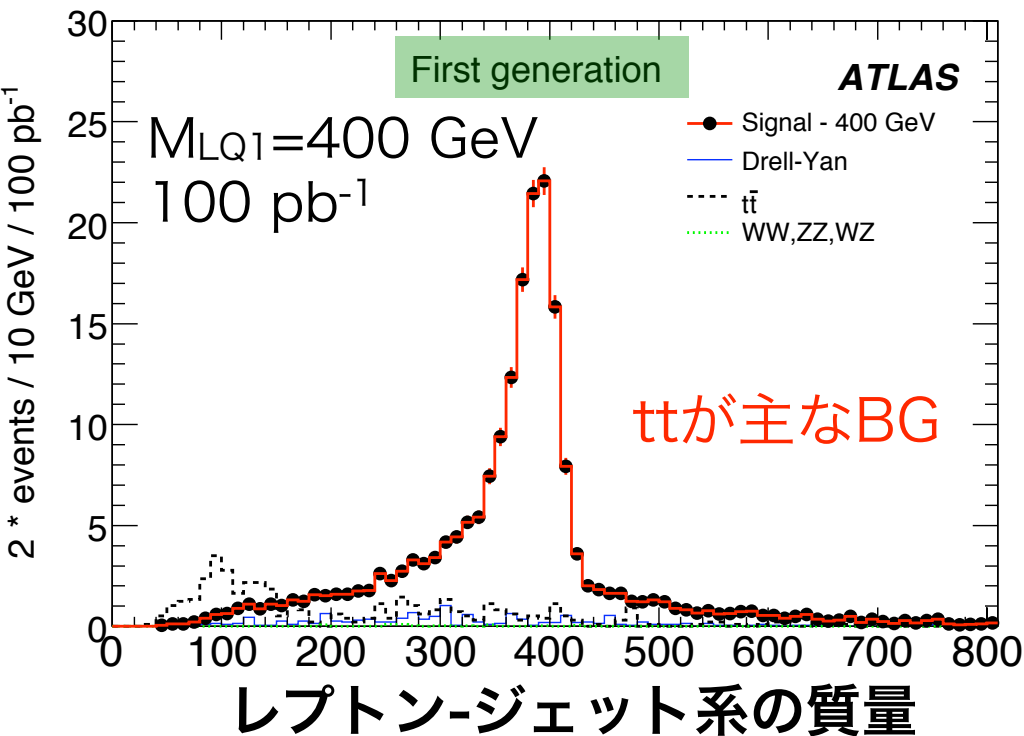


レプトン+ジェット：レプトクォーク

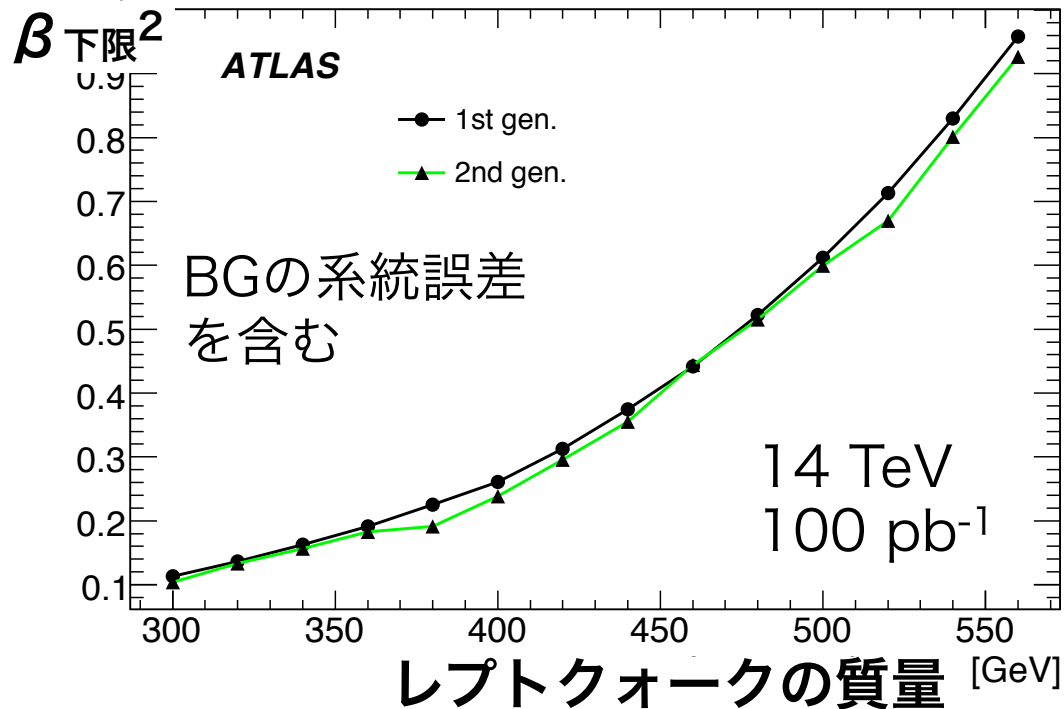
- クォークとレプトンの両方の量子数と反整数の電荷を持つ。
- SMと同じ3世代：LQ₁₍₂₎ → e(μ)+q
- E_T^{miss}を含まない。

- ▶ ≥2レプトン：p_T>20 GeV, |η|<2.5
- ▶ ≥2ジェット：p_T>20 GeV, |η|<4.5
- ▶ S_T ≡ ∑_{i=leptons}² P_Tⁱ + ∑_{j=jets}² P_T^j > ~500 GeV
- ▶ M_{ll} > ~100 GeV
- ▶ l-j対応: M_{lj}の差が最も小さくなる組

$$\beta \equiv \text{Br}(\text{LQ} \rightarrow \text{lq})$$



レプトクォークの質量とβ_{下限}平面での5σ発見能力



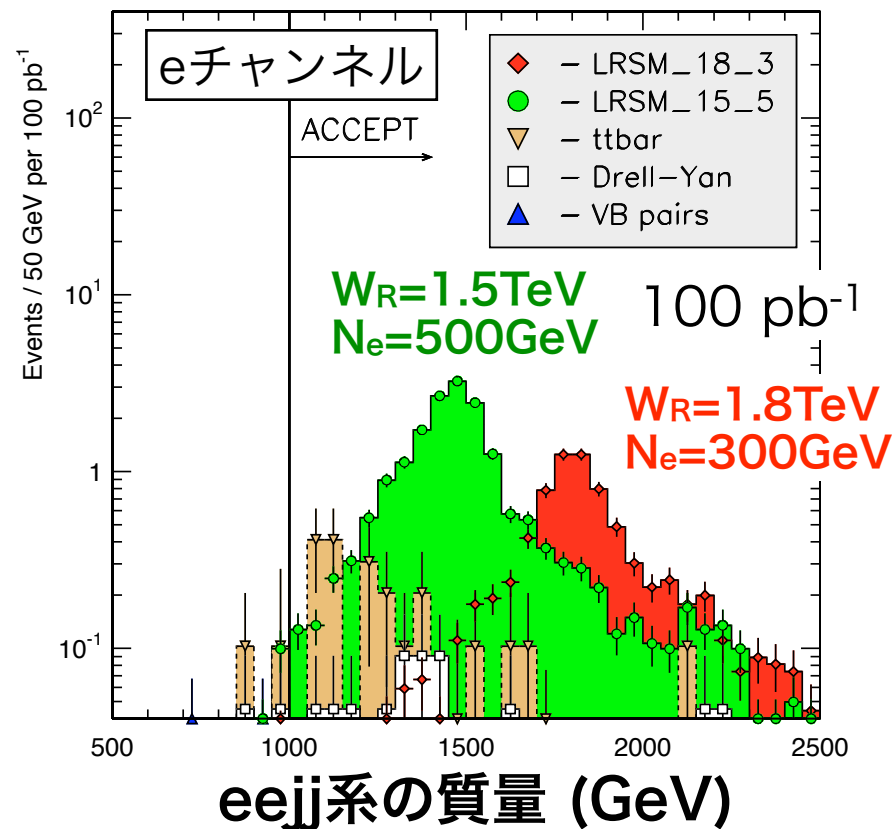
レプトン+ジェット：LRシンメトリー

J.C.Pati and A.Salam : PRD 10, 275 (1974)

SU(2)_L×SU(2)_R×U(1)_{B-L}ゲージ対称性

→ 高エネルギーでパリティが保存

- ▶ 新しいゲージボゾン (W_R, Z', H)
- ▶ 重いマヨラナニュートリノ (N_e, N_μ, N_τ)
- SMニュートリノの軽い質量を説明 (シーソー機構)

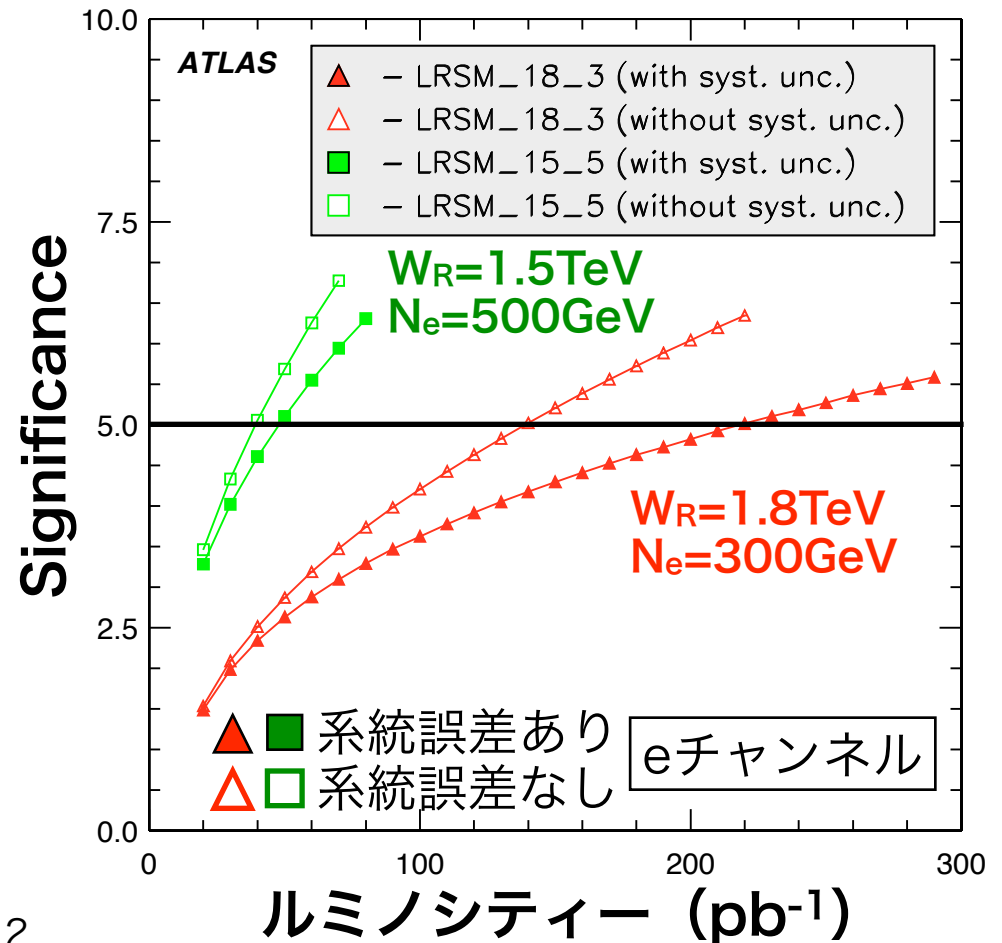


$$W_R \rightarrow l + N_l$$

$$N_l \rightarrow l + q' + \bar{q} \quad (l=e, \mu)$$

レプトクォークと同様のカット

- ▶ $S_T > 700 \text{ GeV}$
- ▶ $M_{ll} > 300 \text{ GeV}$
- ▶ $M_{ljj} > 100 \text{ GeV}$



複数のレプトン+複数のジェット： ブラックホール

- ▶ 理論の説明
- ▶ モンテカルロ生成
- ▶ 解析手法と結果
- ▶ 問題点
- ▶ ...

→ 兼田さん（東大）

これからやるべきこと

1) $\sqrt{s}=10\text{TeV}$ 、ルミノシティー100-200 pb^{-1} で再評価

- ▶ 既に多くの解析で行われているが、、、
- ▶ 14TeVの解析手法でOKか？
- ▶ 新たな問題点は？
- ▶ 物理対象のパフォーマンス？

2) data-drivenバックグラウンドの方法・評価の確立

3) 発見法の開拓

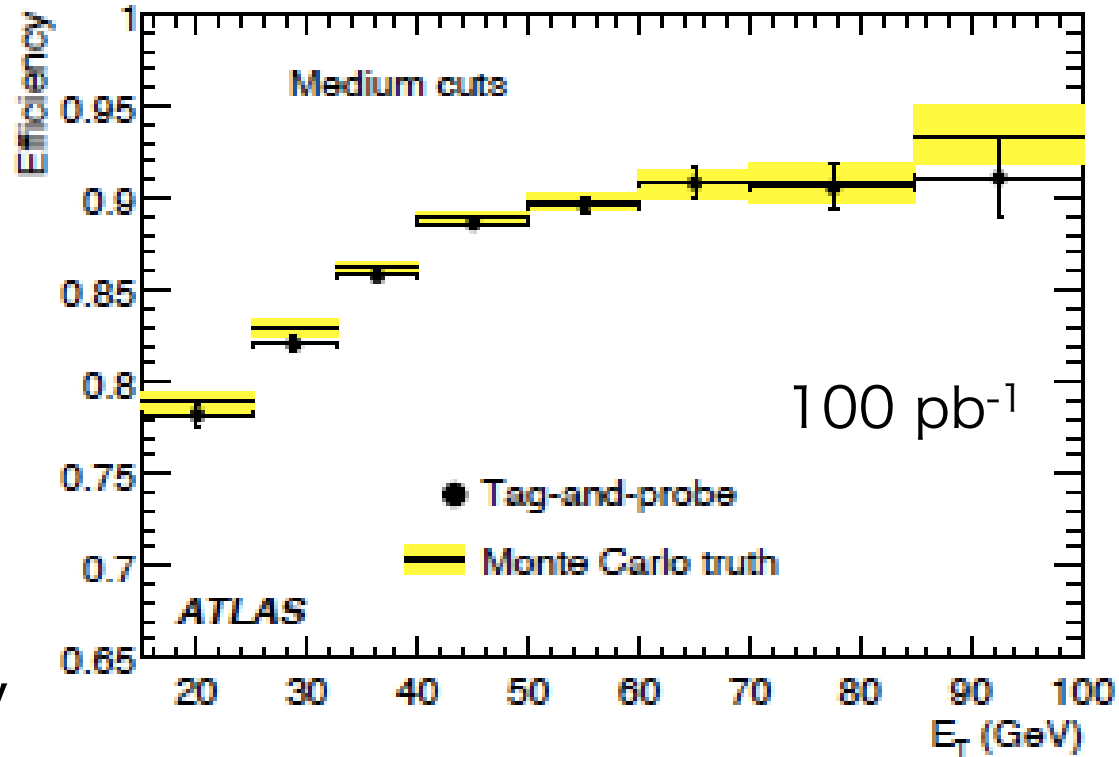
- 例)
$$R = \frac{N(\chi \leq \chi_{\text{cut}})}{N(\chi > \chi_{\text{cut}})} \text{ vs } \chi \equiv \exp(|\eta_1 - \eta_2|)$$

(クォークCompositeness, BH 2 ジェット)

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)
- (→ 増淵さん&東城さんのトーク)



- ▶ 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、、、。

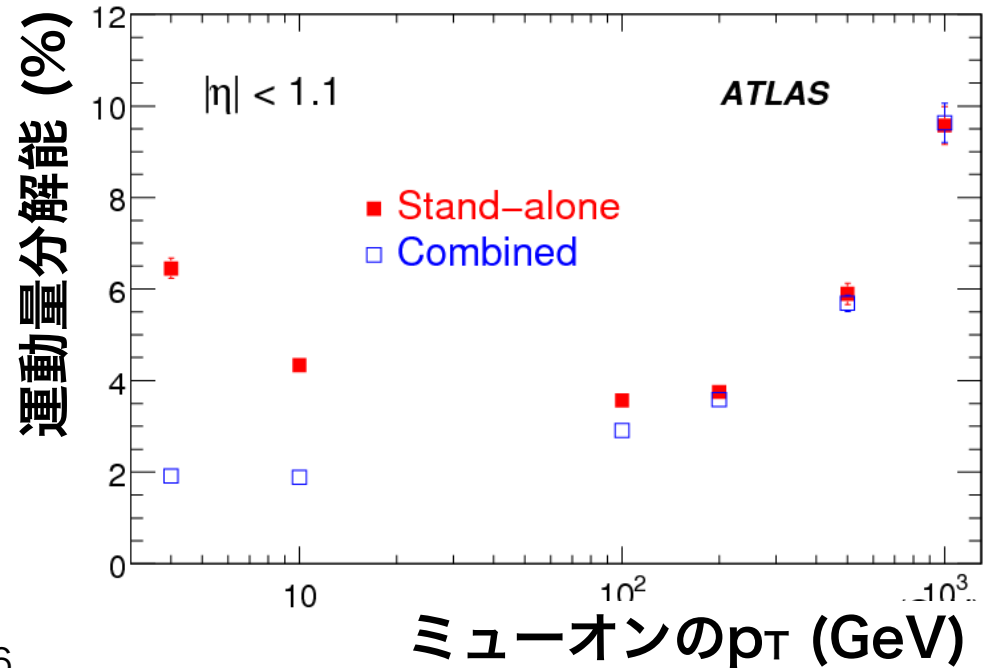
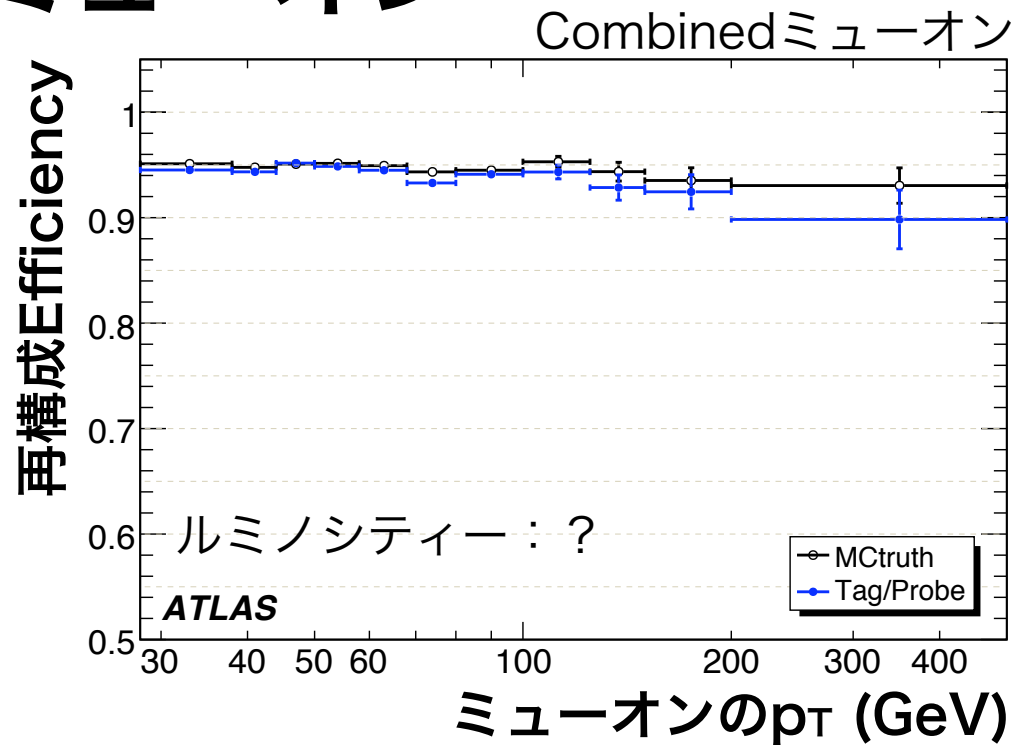
運動量分解能

- ▶ 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**

→ 詳しくは石川さん (神戸大) ？



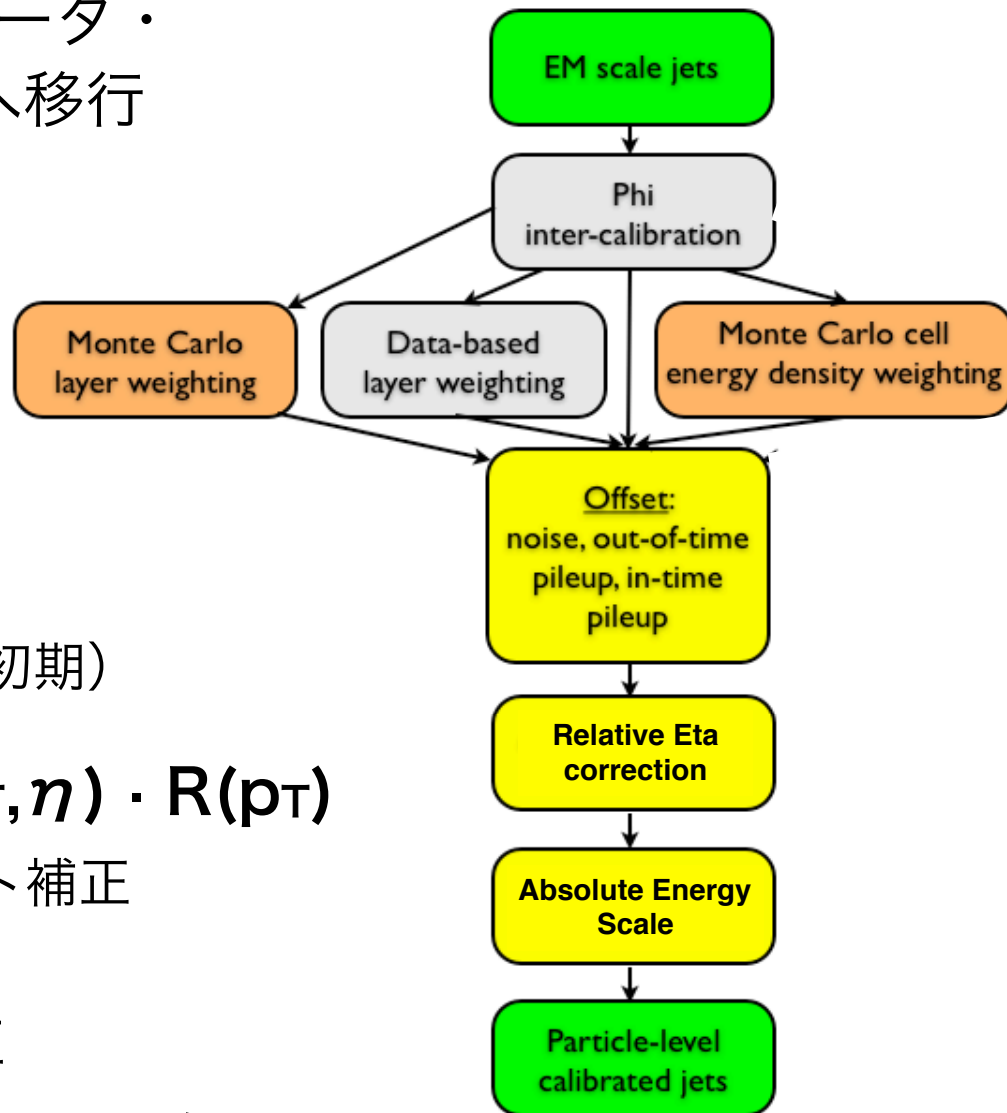
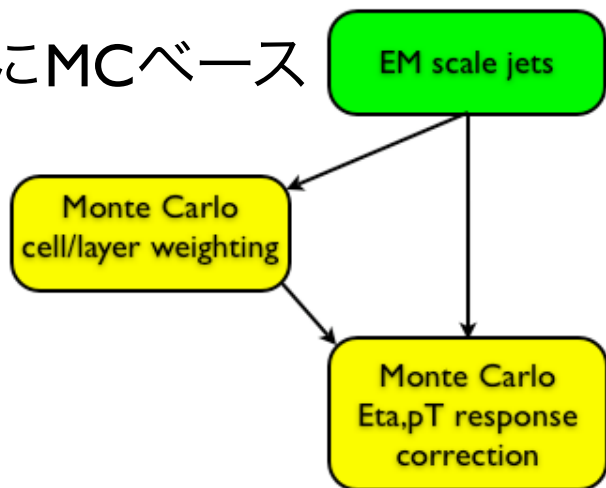
ジェットの軟正

実験開始時

実験初期

完全にMCベース

徐々にデータ・MC混成へ移行



ジェットエネルギースケール補正 (実験初期)

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

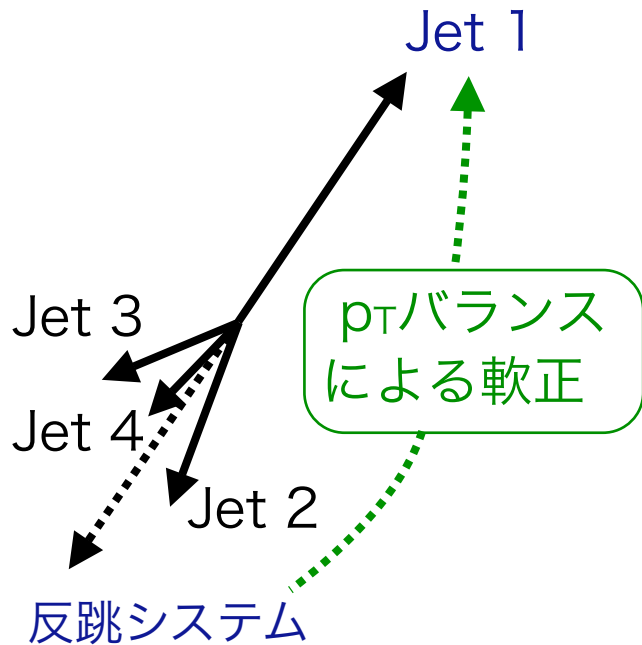
- ▶ $p_T^{\text{offset}} = p_T^{\text{offset}}(\eta, N_{PV}, L)$: オフセット補正
- ▶ $C(p_T, \eta)$: η 応答の相対的な均一化
- ▶ $R(p_T)$: 絶対エネルギースケールへの補正

(→ 山本さんのトーク)

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

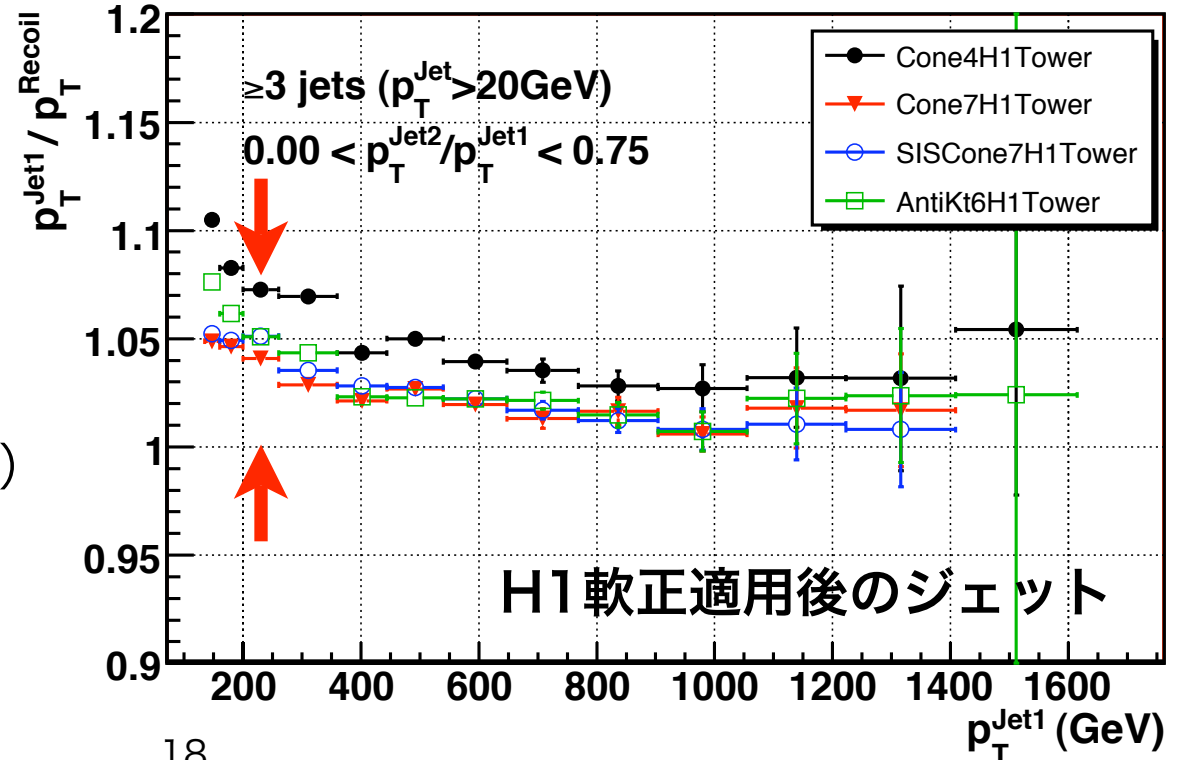


主なずれの理由 ($p_T^{\text{Jet1}} < 300 \text{ GeV}$)

- ▶ 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

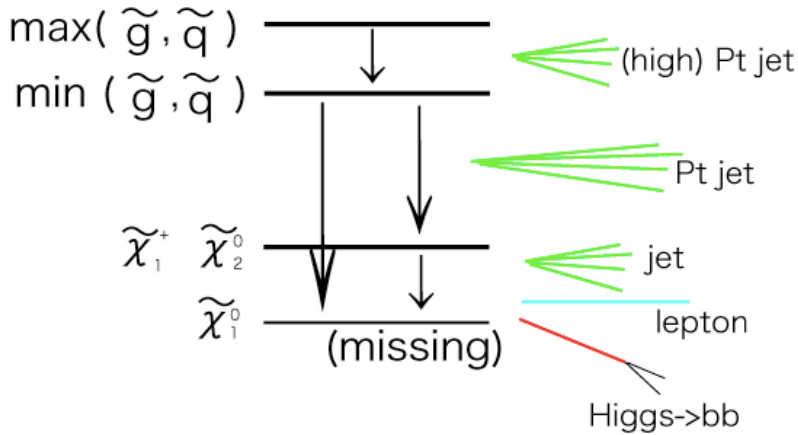


面白そうなこと・ 盛り上がっていること

- 1) 縮退したSUSYとUED
- 2) KKグラビトン・グルーオン
- 3) 重いクォーク・レプトン
- 4) Compositeness

縮退したSUSYとUEDの探索 (I)

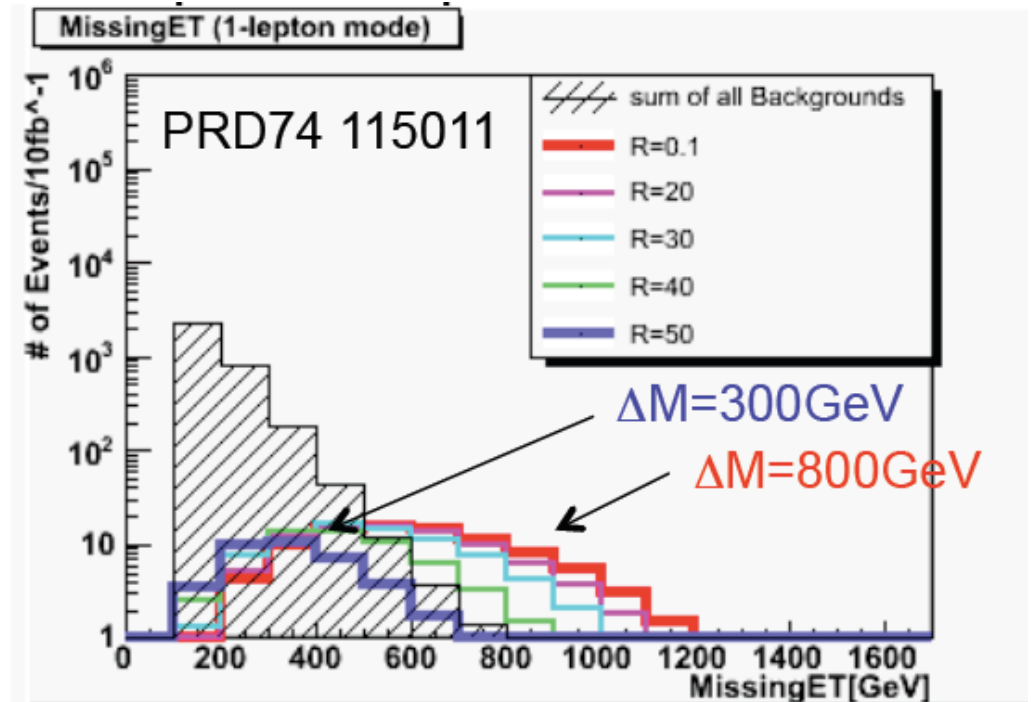
K.Kawagoe, N.Nojiri PRD74 115011



$$\Delta M = M(\tilde{g}, \tilde{q}) - M(\text{LSP})$$

$\Delta M > 400 \text{ GeV}$ ($\Delta M/M > 40\%$)

なら発見可能 (→右図参照)



ATLAS標準1レプトンSUSY解析は、 $\Delta M/M < 30\%$ ではバックグラウンドが多く発見は難しい、、、。

→より縮退した場合 ($\Delta M/M < 30\%$) の発見能力を高める解析方法の開発

→UEDに限らず、縮退したSUSYの探索にも応用できる

例) MMAM (Mixed Moduli Anomaly Model) → $\Delta M/M \sim 30-70\%$

参照) 岡村淳一さんの学会トーク

「ATLAS実験によるUED模型及び縮退したSUSY模型の研究」

縮退したSUSYとUEDの探索 (II)

信号：UEDモデル (縮退した粒子スペクトラム)

R=コンパクト化スケール

質量スケール：1/R → 1/R=700GeVと900GeVの2通り

縮退度： $\ln(\Lambda R)$ の補正項 → 各質量につき、 $\Lambda R = 2, 4, 10, 20$
($\Delta M/M \sim 5, 10, 15, 20\%$) の4通り
をPYTHIAで作成

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

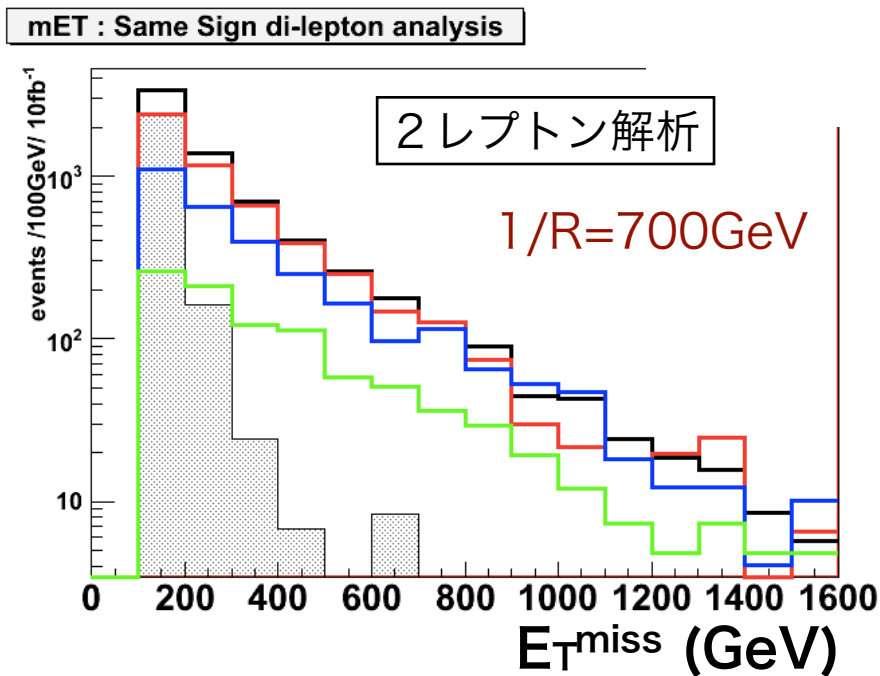
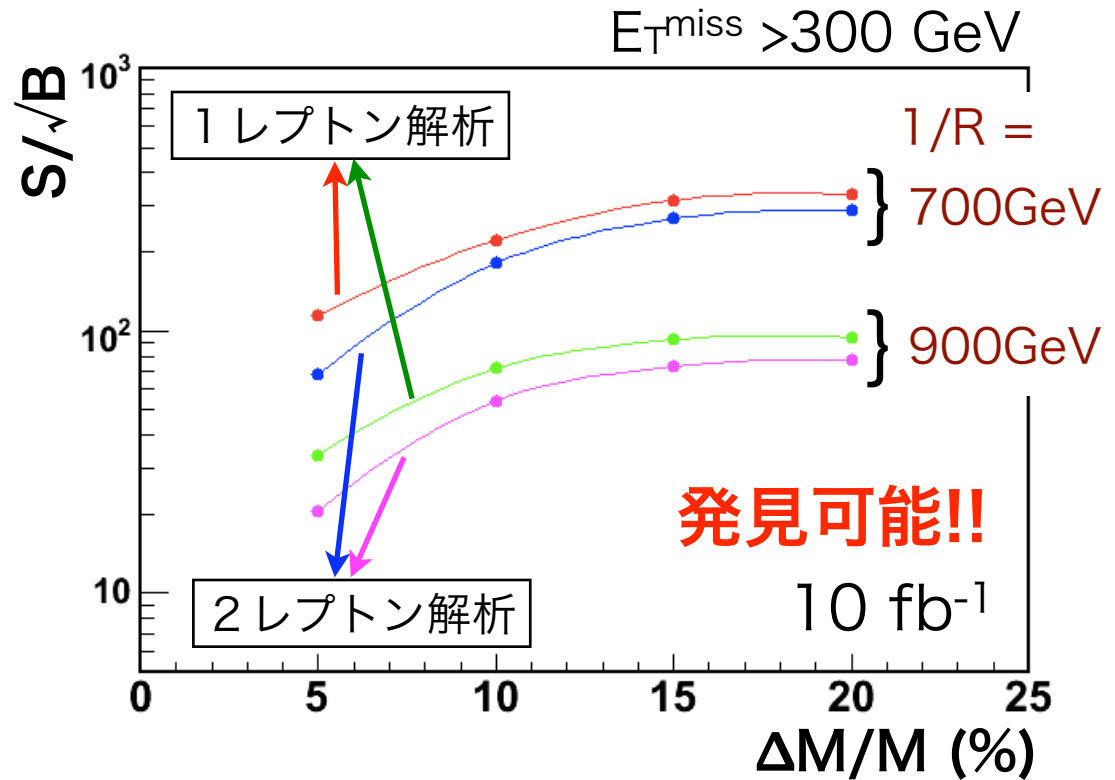
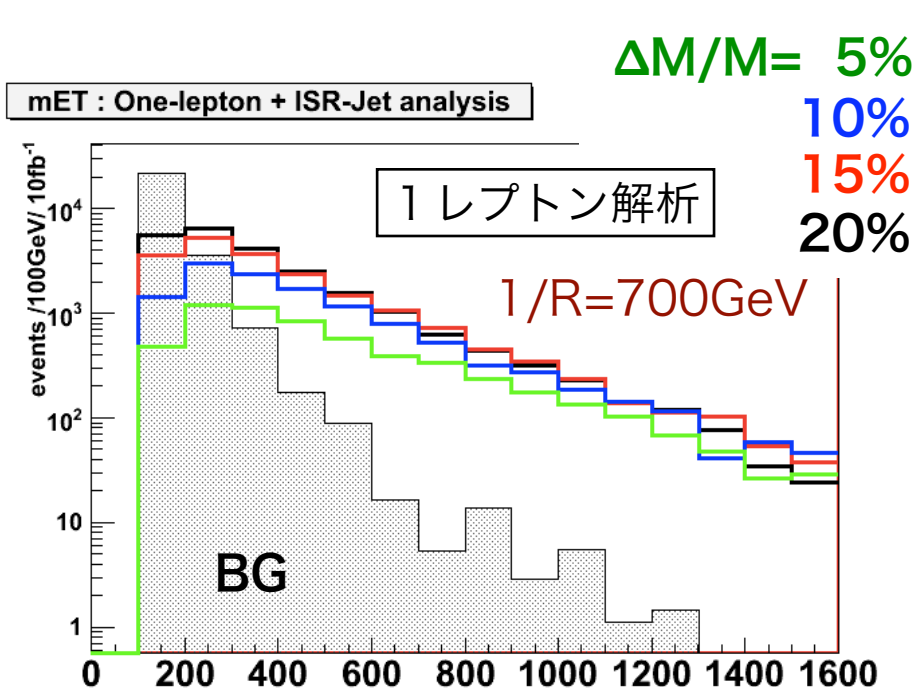
1 レプトン解析

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

2 レプトン解析

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

縮退したSUSYとUEDの探索 (III)



tt → 最も主要なバックグラウンド

今後の課題

- ▶ データによるBGの評価
 - 1レプトン解析：MT法？ (MT vs E_{T}^{miss})
 - 2レプトン解析：？
- ▶ トリガー
 - レプトン+ジェット (+ E_{T}^{miss})?

10³¹トリガーマニュー

```
j42_xe30_e15i_medium
j42_xe30_mu15
mu10_j18
4j23_e15i_medium
4j23_mu15
```

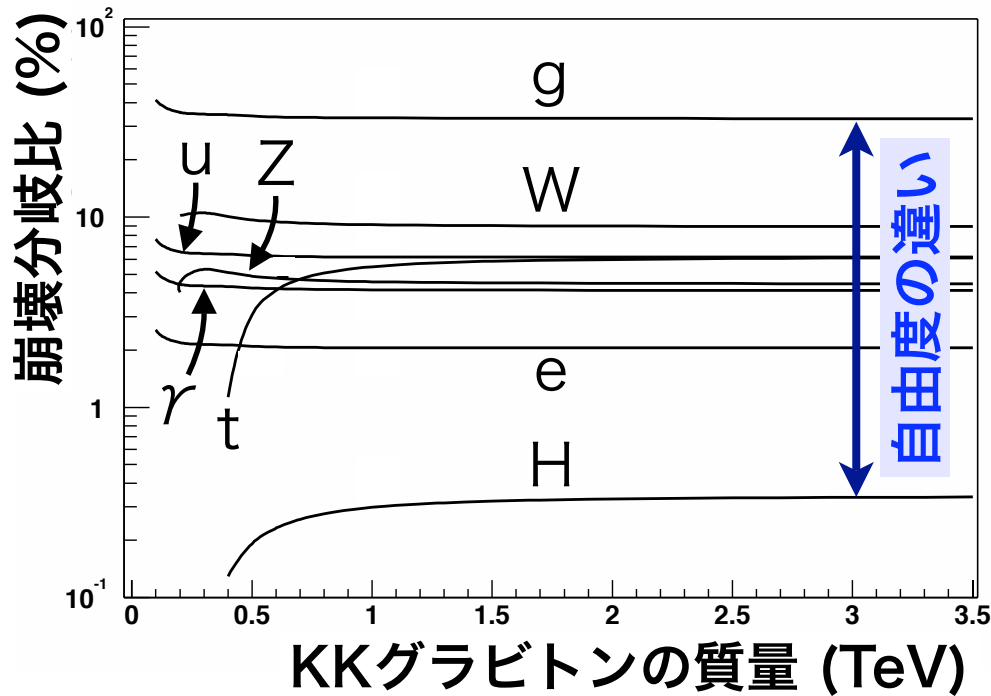
KKグラビトン・KKグルーオンの探索 (I)

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 ($y=0$)とTeVブレーン ($y=\pi r_c$)
- ➡ メトリック $d_s^2 = e^{-2\sigma(y)}\eta_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu - dy^2$, $\sigma(y)=k|y|$ (k = バルクの曲率)
- ➡ 2つのブレーン間でワープ因子 $e^{-kr_c\pi}$ ($kr_c \approx 11$) 分だけスケールが抑圧される。

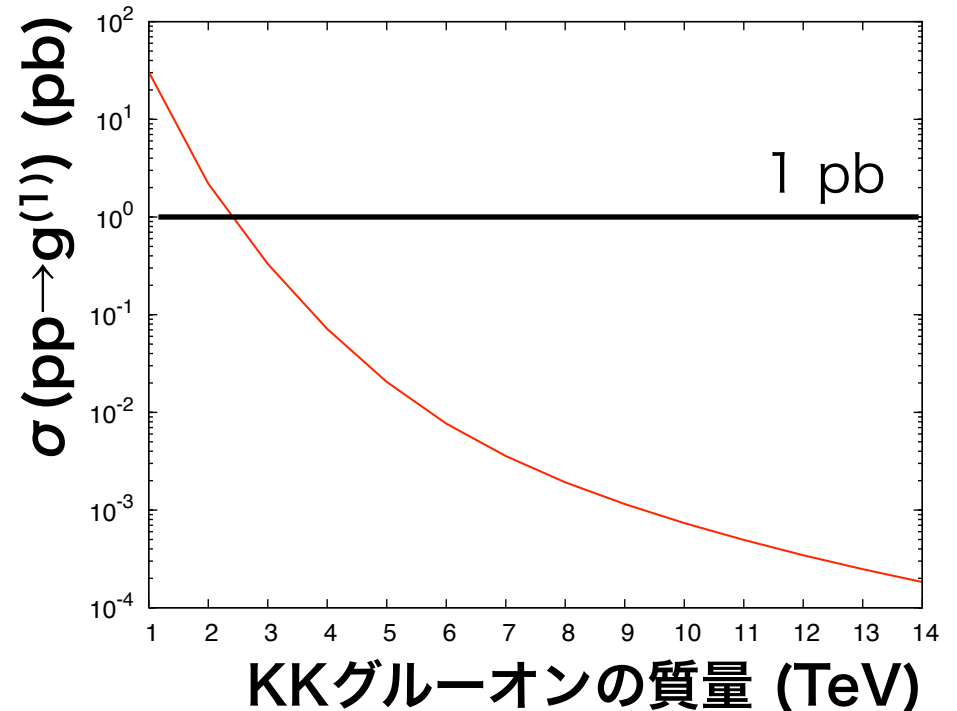
RS1

- ▶ 全てのSM粒子はTeVブレーン上に拘束。
- ▶ 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



Bulk RS

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



KKグラビトン $\rightarrow ee$

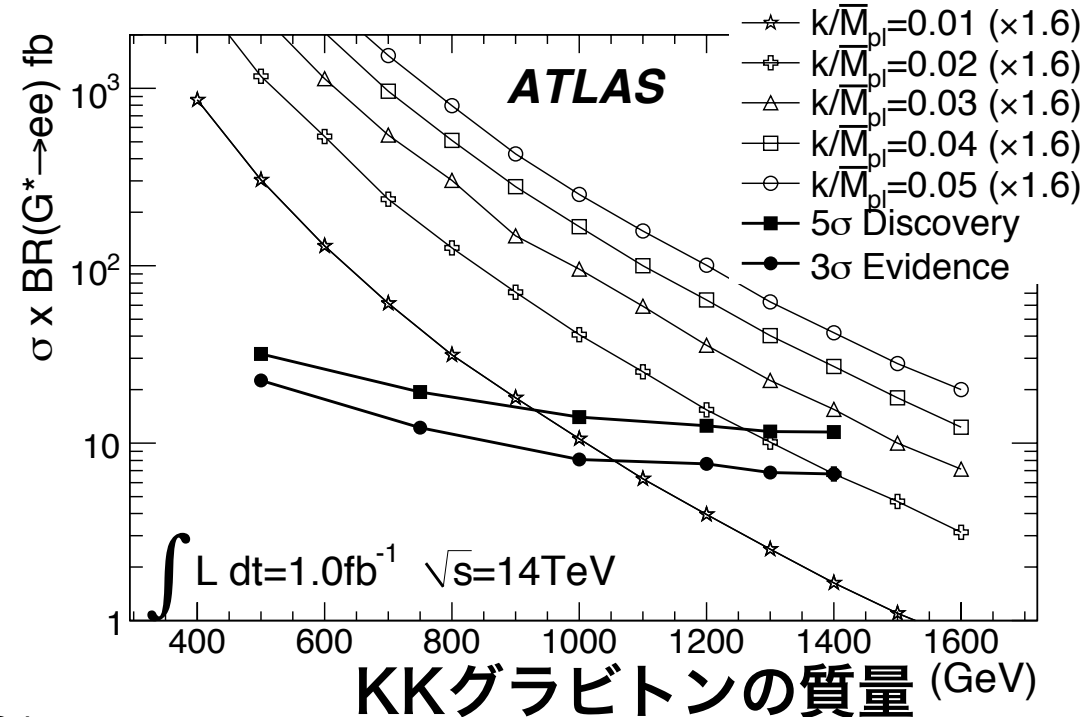
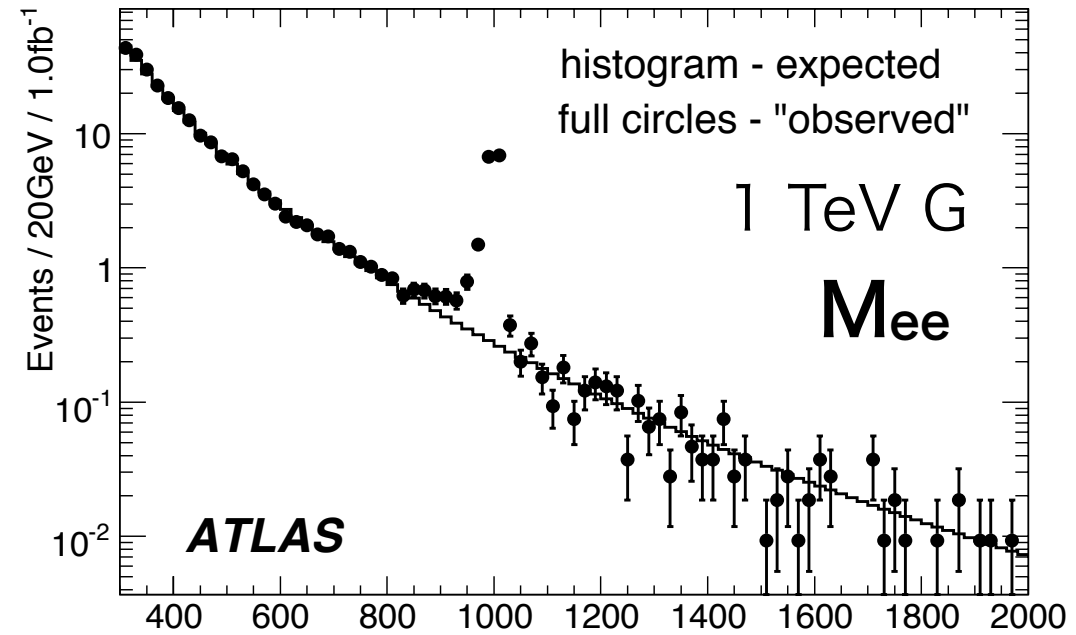
感度の高いチャンネル

- 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

バックグラウンド・系統誤差は

$Z' \rightarrow ee$ 解析とほぼ同じ



KKグルーオン・グラビトンの探索 (II)

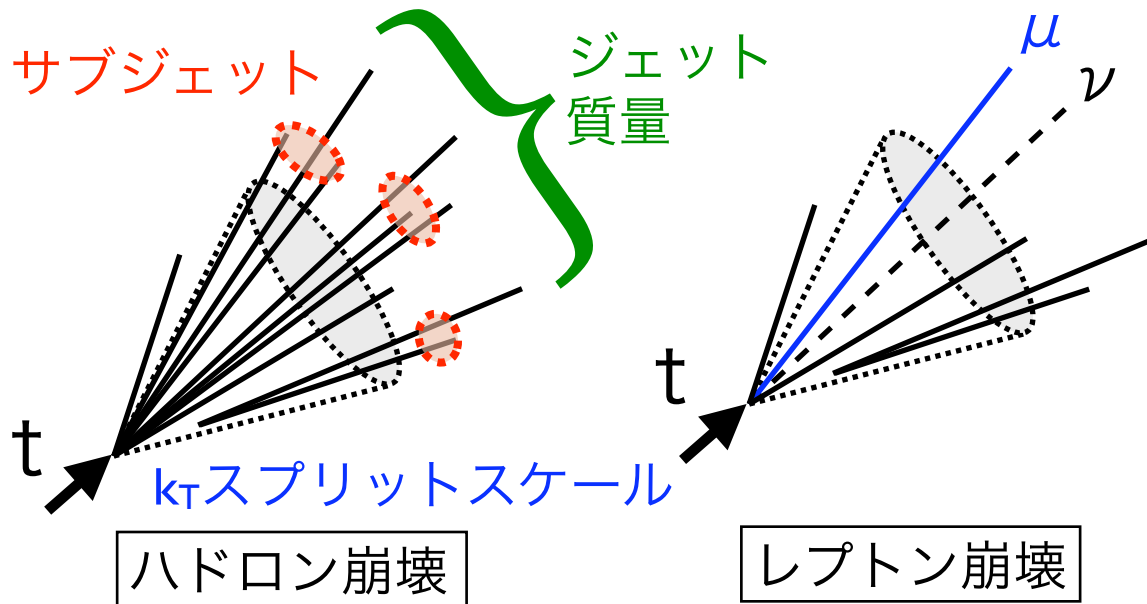
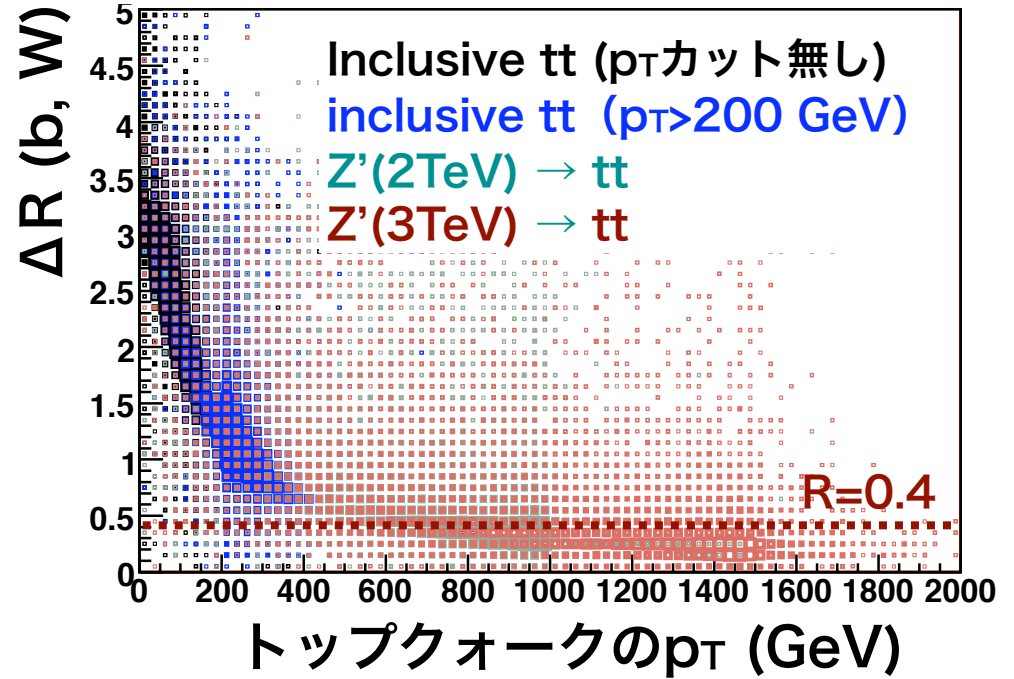
KKグラビトン $\rightarrow ee/\gamma\gamma$

\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 KK $G \rightarrow tt/WW/bb$ などの崩壊分岐比を測定する。

\rightarrow 崩壊生成物の同定が必要!



KK $G/g^{(1)} \rightarrow tt$

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 (東大)

Compositenessの探索

クォークCompositeness

$$L_{ffff}(\Lambda) = \frac{\eta g^2}{2\Lambda^2} \bar{\psi}_f \gamma_\mu \psi_f \bar{\psi}_f \gamma^\mu \psi_f \quad (\eta = \pm 1) \quad \rightarrow \text{今のモデル}$$

- ▶ RR, LRの項をPythiaに追加
- ▶ BH 2 ジェットとの違い? : $\chi \equiv \exp(|\eta_1 - \eta_2|)$ 分布?
- ▶ Compositenessの証明? : 他の接触相互作用との違い?

トップクォークCompositeness

予想されるpp \rightarrow tttt イベント数 (14 TeV, 10 fb⁻¹)

▶ SM : ~35 イベント

▶ t-クォークCompositeness : ~4000-40000 ($M_\rho=1$ TeV)
~300-600 ($M_\rho=2$ TeV)

➡ 実験でどうやって再構成?

➡ 他のモデルと区別できる?

- ブラックホール

- SUSY : $\tilde{g} + \tilde{g} \rightarrow \tilde{t} t + \tilde{t} t \rightarrow tttt + \tilde{\chi}_0 \tilde{\chi}_0$?

重いクォーク・レプトン

$$d_4 + \bar{d}_4 \rightarrow W_j + W_j$$

▶ 第4世代のクォーク・レプトン

$$u_4/d_4 \rightarrow W + q \quad (q=u,d,s,c,b,t)$$

$$\nu_4 \rightarrow W + \text{lepton}$$

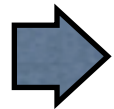
m_{d_4} (GeV)	500	750
Γ (GeV)	8×10^{-3}	2.8×10^{-2}
σ (pb)	2.6	0.25

CompHEP v4.4.3

▶ Little Higgs : 重いトップ (アップタイプ)

$$T \rightarrow Wb/Zt$$

▶ E6-GUT : 重いボトム (ダウンタイプ)

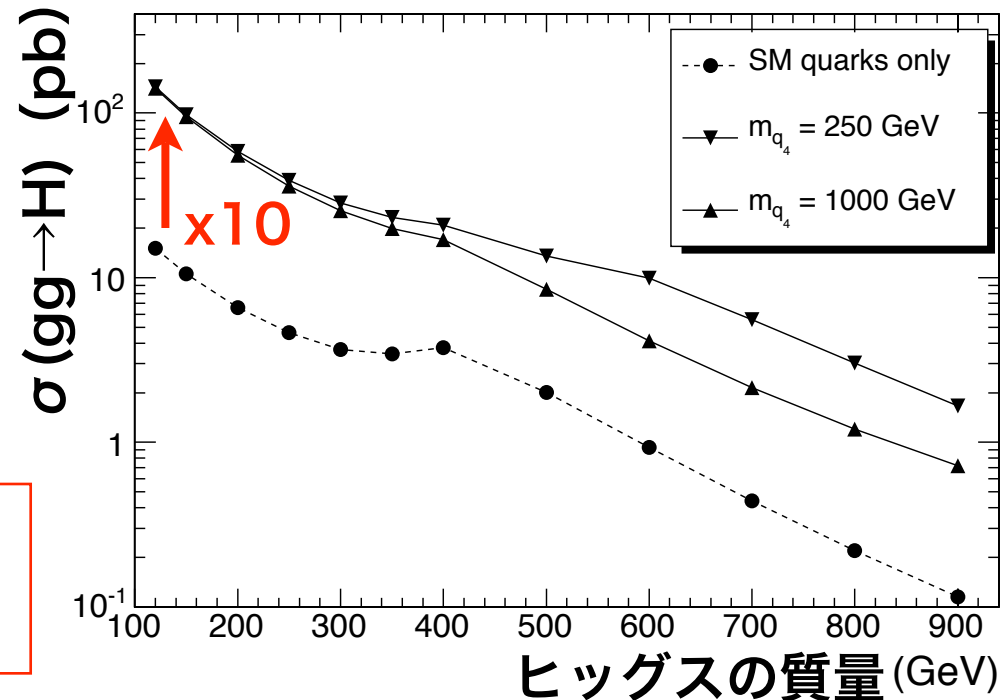


▶ 基本的に $WqWq$ 、 $WqZq$ 、 $WqHq$ のどれかに壊れる。

▶ 今は10通りぐらいの崩壊モードに分けて解析。

▶ モデル依存性の少ない解析は可能か？
- サブジェクト？

第4世代クォーク



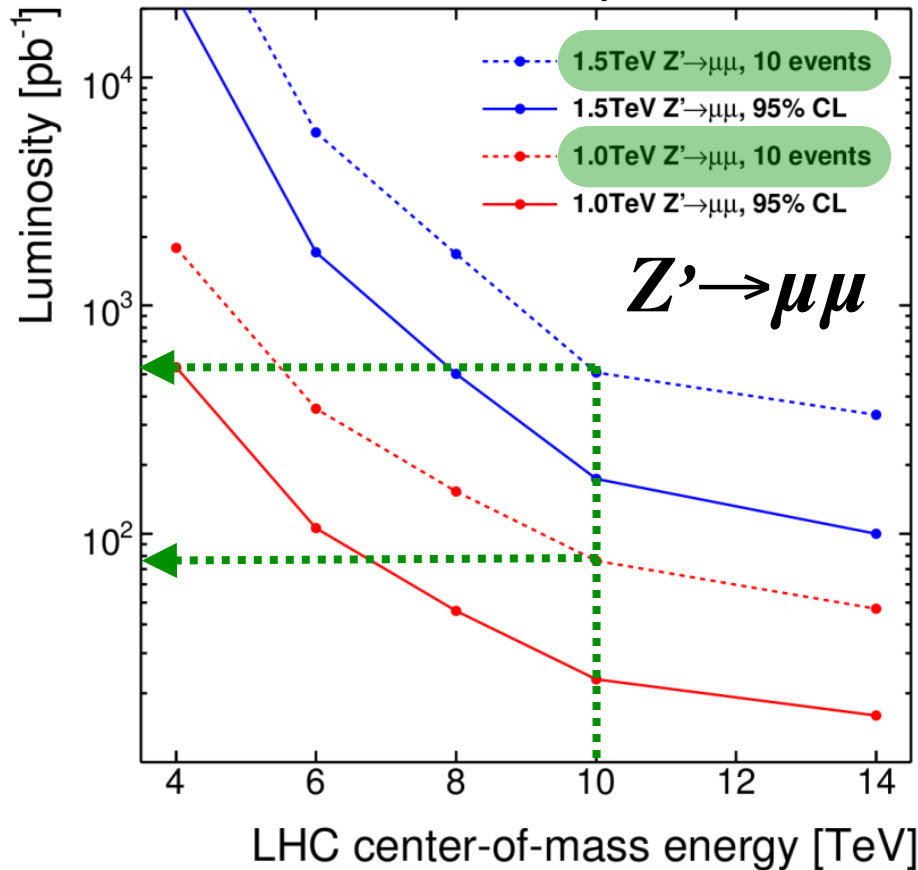
まとめ

- ▶ Electron, Muon, Jetなどの高い p_T 領域での軟正
- ▶ "ttが主なバックグラウンド"という場合が多い。
 - 多種・複数のオブジェクトを要求した結果
- ▶ 基本的な過程・PDFの理解とその不定性を減らす努力

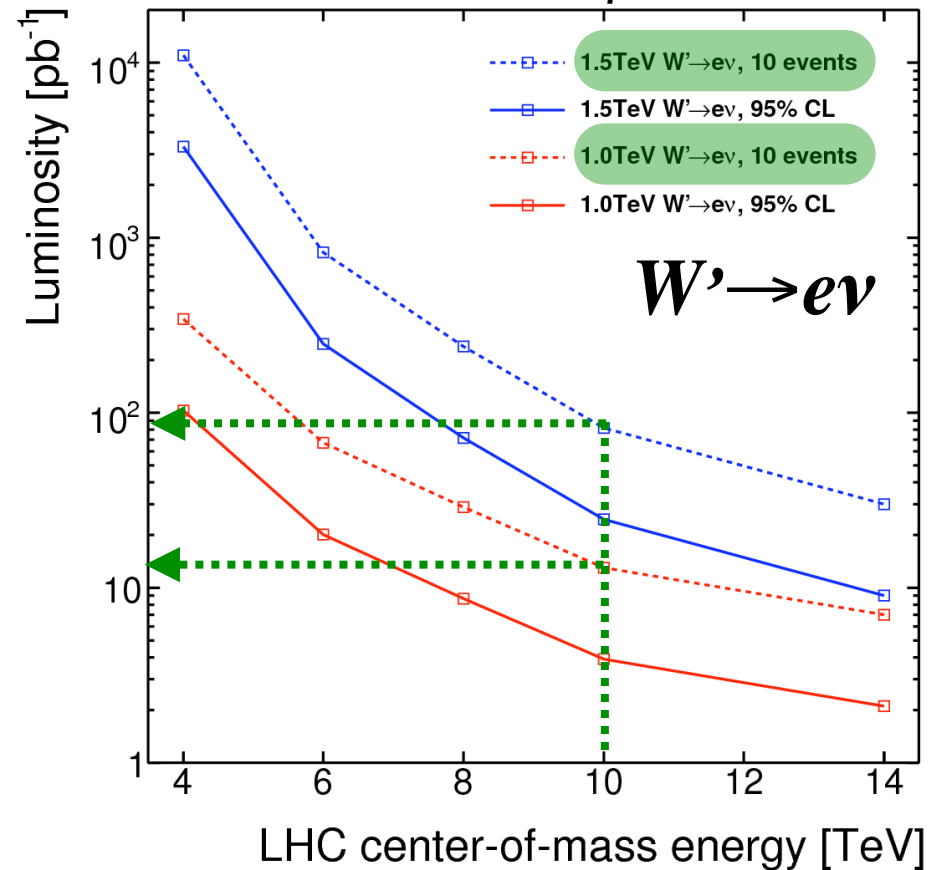
何か面白いものや特徴的なトポロジーで欠けているものなどあったら教えて下さい。

$Z' \rightarrow \mu\mu / W' \rightarrow e\nu$ in Early Data

ATLAS fast simulation



ATLAS fast simulation



Luminosity needed for 5σ discovery (10 TeV)

Mass	1 TeV	1.5 TeV
$Z' \rightarrow \mu\mu$	$\sim 80 \text{ pb}^{-1}$	$\sim 500 \text{ pb}^{-1}$
$W' \rightarrow e\nu$	$\sim 15 \text{ pb}^{-1}$	$\sim 80 \text{ pb}^{-1}$

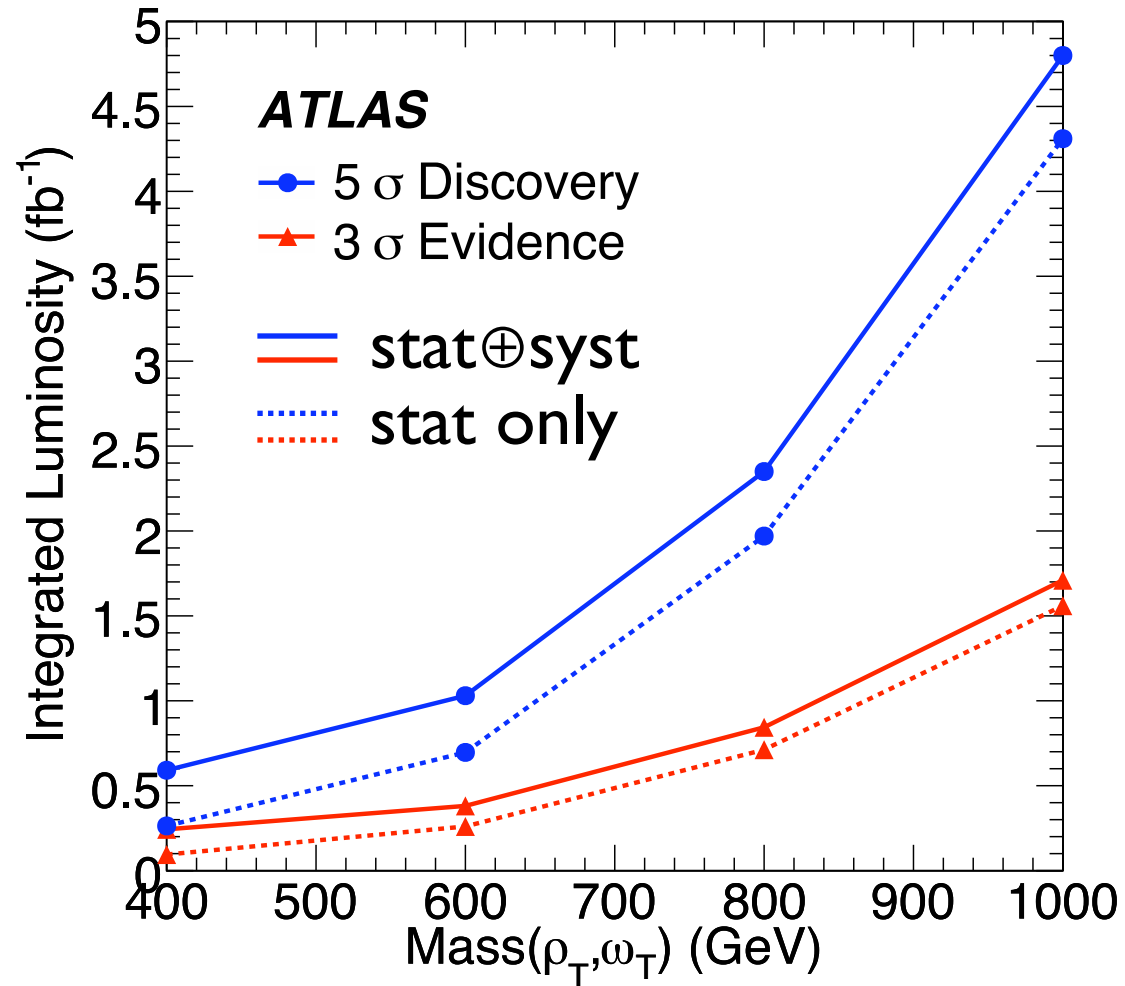
Chamonix
Feb. 2-6

Technicolor $\rho_T/\omega_T \rightarrow \mu\mu$

Technicolor Strawman Model
as a benchmark of strongly
interacting theories

Technirho (ρ_T) and Techniomega
(ω_T) nearly degenerate
 $\rightarrow m(\rho_T) = m(\omega_T)$ assumed

$\rho_T/\omega_T \rightarrow \mu\mu$ has a small branch
but clean signal (early physics)



Similar selections and systematic uncertainties to $Z' \rightarrow \mu\mu$ analysis