

アトラス実験におけるZ'粒子の探索

内藤大輔 田中礼三郎

岡山大学自然科学研究科

2007年3月26日

日本物理学会@首都大学東京南大沢キャンパス

目次

1. ゲージ対称性の拡張
2. アトラス実験
3. Z' 粒子の再構成
4. まとめ

1. ゲージ対称性の拡張

- 標準理論の拡張

- 新しい理論

- ゲージ対称性の拡張

- E_6 や $SO(10)$ 大統一理論

- » ψ モデル、 χ モデル、 η モデル

- 余剰次元

- » Kaluza-Kleinモデル

- Left-Right Symmetryモデル

- Alternative Left-Right Symmetryモデル

- SSM(Sequential Standard Model)

- などなど...

- 重いゲージ粒子の予言 (Z' 粒子)

Z'粒子の生成と崩壊

- クォーク反クォークの対消滅により生成
- Drell-Yan過程
- 2つのレプトンに崩壊する

$Z' \rightarrow e^+e^-$ ← Discovery Channel

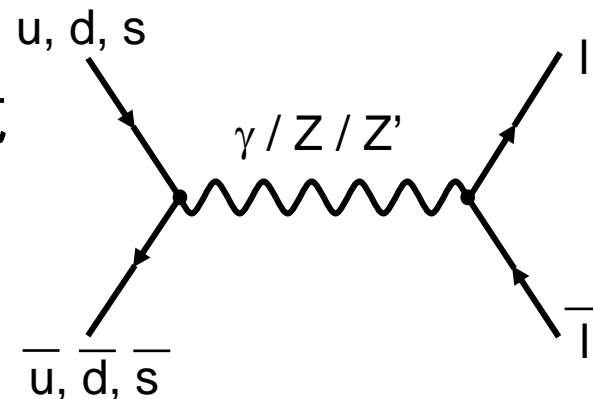
$Z' \rightarrow \mu^+\mu^-$

$pp \rightarrow Z' \rightarrow l^+l^- X$ の微分断面積

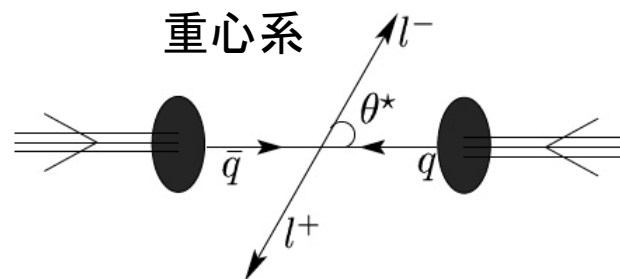
- Z'の質量
 - Rapidity Y
 - 角度 θ^*
- に依存

$$\frac{d\sigma}{d\sqrt{s'}dYd\cos\theta^*} = \sum_{\text{quarks } q} [g_q^S(Y, \sqrt{s'})S_q(\sqrt{s'})(1 + \cos^2\theta^*) + g_q^A(Y, \sqrt{s'})A_q(\sqrt{s'})2\cos\theta^*]$$

S_g と A_g は理論に依存した量
 g_g^S と g_g^A はPDFに関係した量



Ref: ATL-PHYS-PUB-2005-010



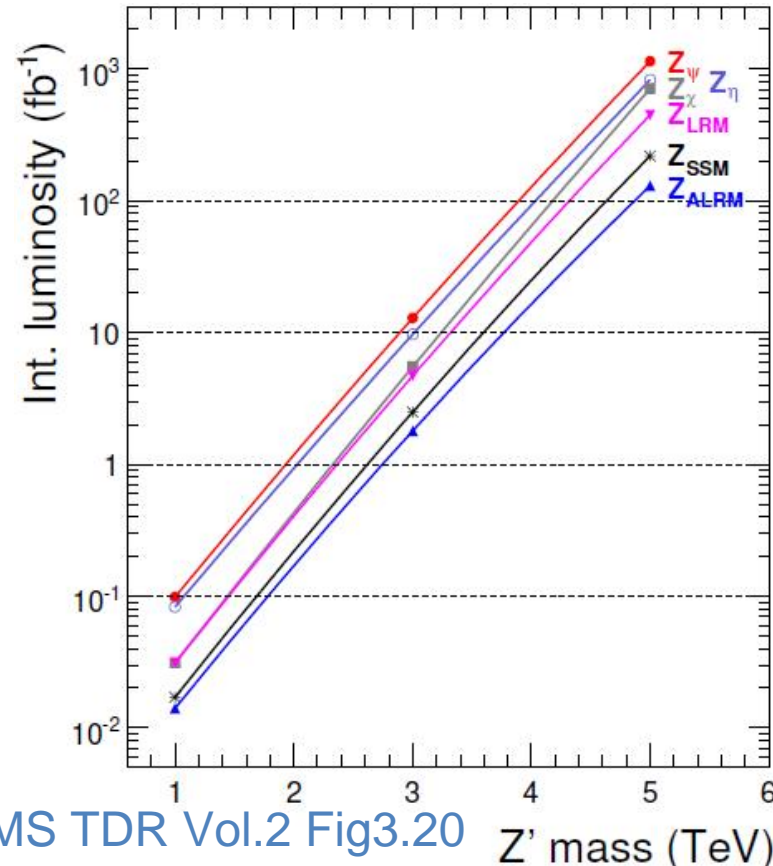
θ^* は重心系でのクォークとレプトンの成す角

Z'の発見能力

- LHCにおいて5 σ confidence levelで発見可能なZ'
 - 3-4TeV (10fb⁻¹, 低ルミノシティー時)
 - 4-5TeV (100fb⁻¹, 高ルミノシティー時)
- Z'が存在すれば
 - 質量 $M_{Z'}$
 - 崩壊幅 $\Gamma_{Z'}$
 - 全断面積 $\sigma_{Z'}$
 - スピンZ'
 - forward-backward asymmetry

質量分布をフィットすることによって決定

理論の識別

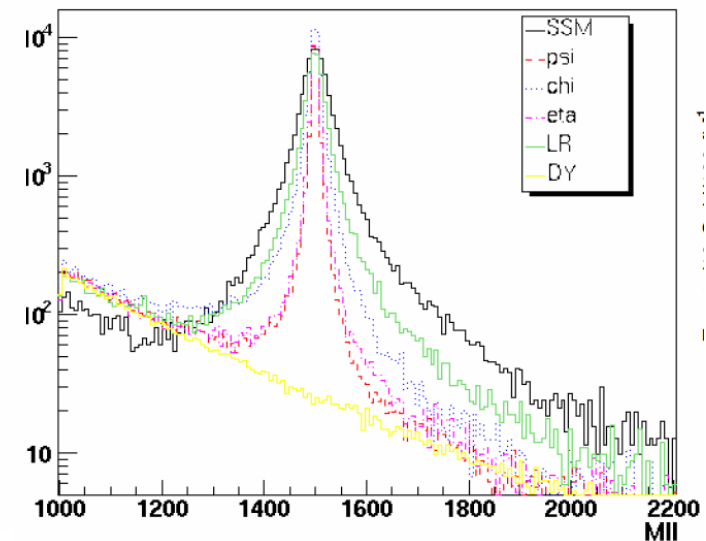
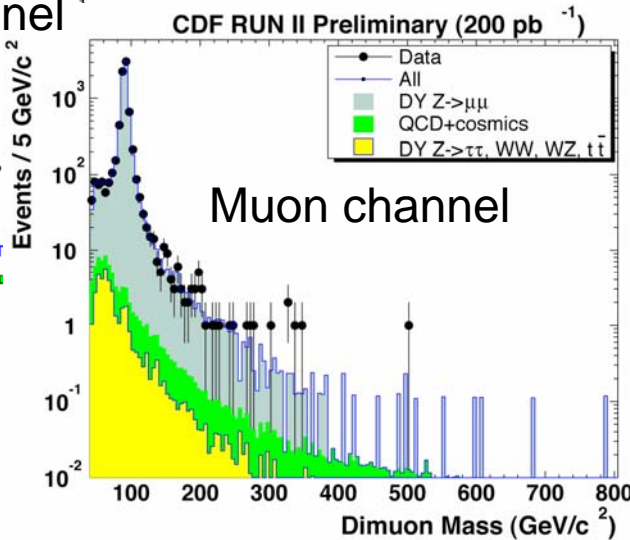
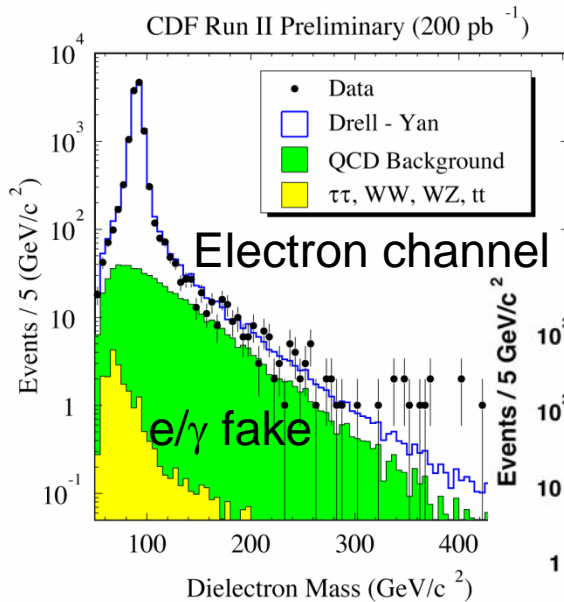


Z'の質量分布

- $Z' \rightarrow e^+e^-$
 - e/gamma fakeが問題
 - $Z' \rightarrow \mu^+\mu^-$
 - バックグラウンドが少ないきれいな事象
- 大きな不変質量を持つ

		Cross section (fb)
$M = 1.5 \text{ TeV}$	<i>SSM</i>	164.4
	ψ	124.9
	χ	153.1
	η	128.2
	<i>LR</i>	148.6
$M = 4 \text{ TeV}$	<i>SSM</i>	0.4
	<i>KK</i>	5.9

Ref: ATL-PHYS-PUB-2005-010

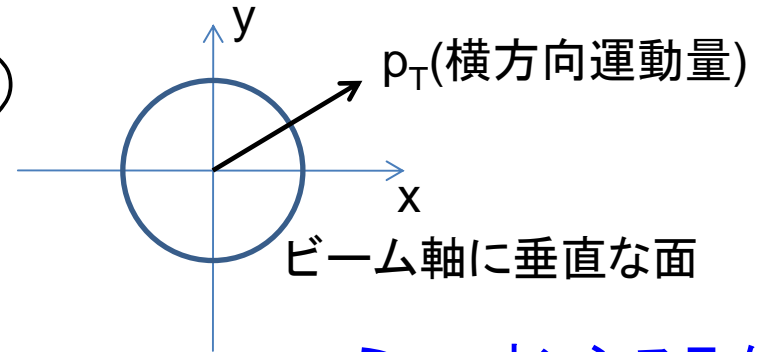


Z'を再構成するには高エネルギーのレプトン2つを観測する必要がある

2. アトラス実験

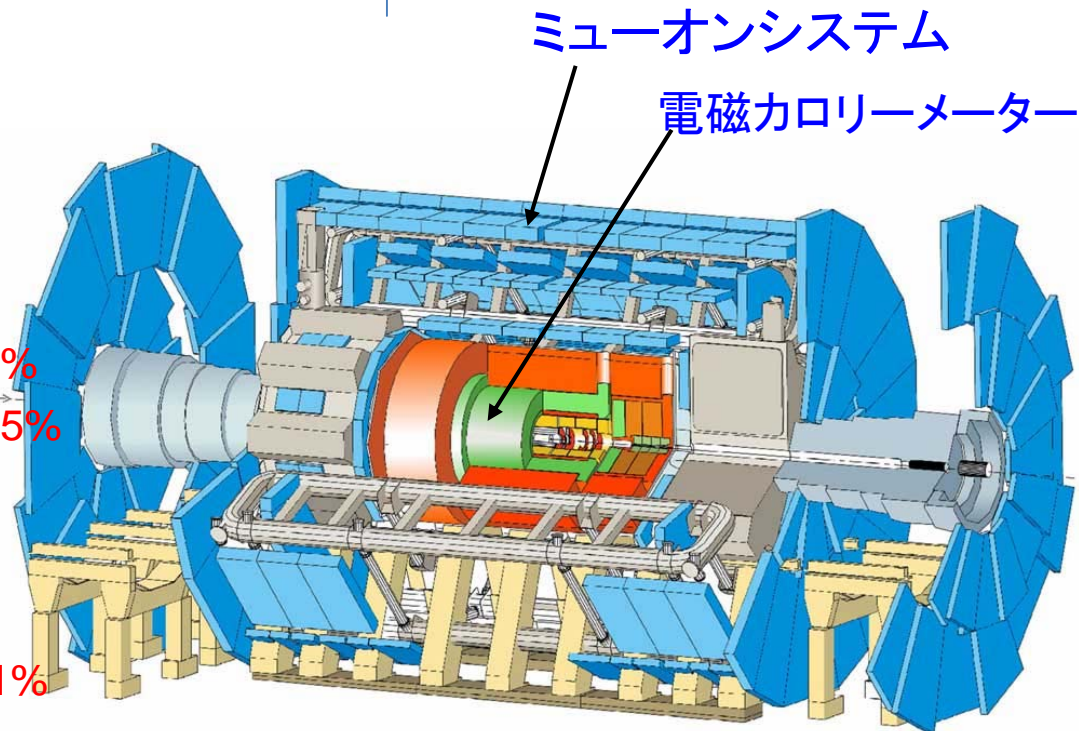
- LHC(大型ハドロン衝突型加速器)

- 陽子-陽子
- 重心系エネルギー14TeV
- 設計ルミノシティー
 - 年間 10fb^{-1} (低ルミノシティー時)
 - 年間 100fb^{-1} (高ルミノシティー時)

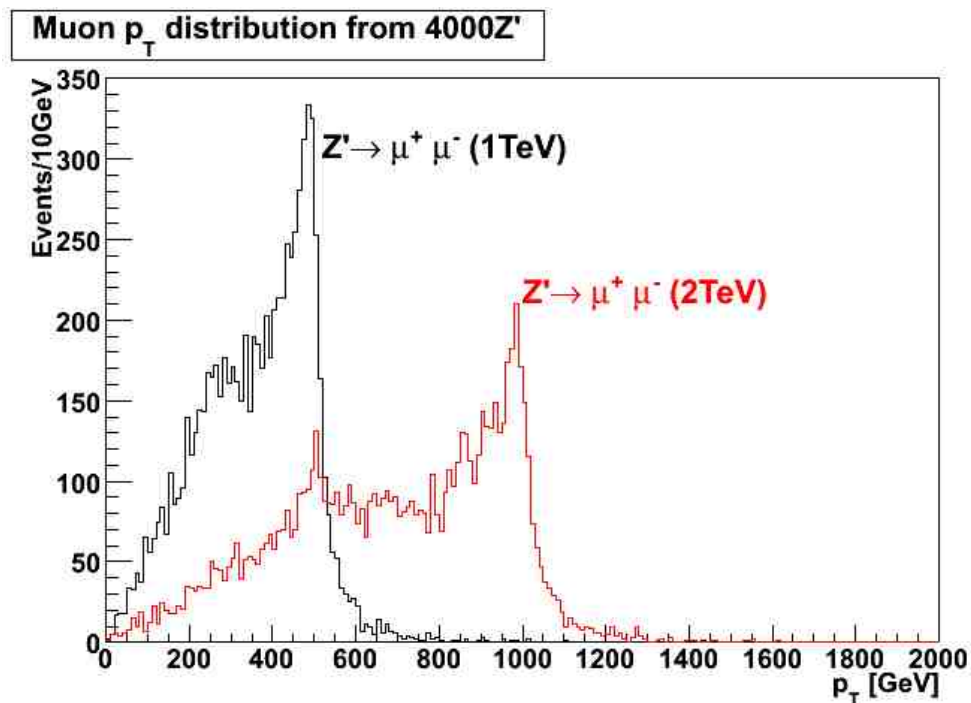
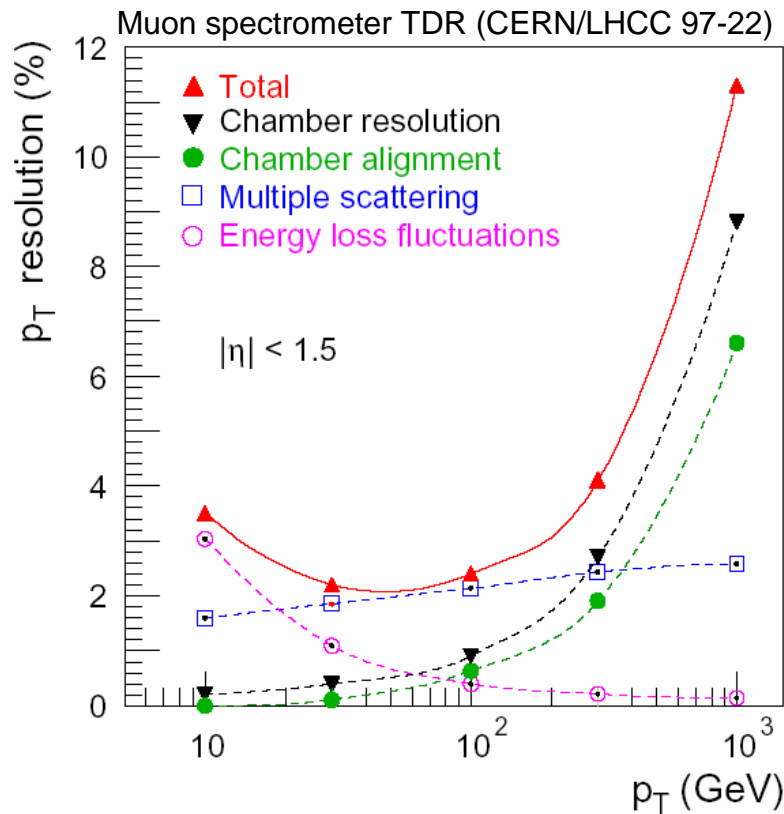


- アトラス検出器

- 電磁カロリメーター
 - 高エネルギーの電子
 - $E=500\text{GeV}$ の場合 $\rightarrow \sigma(E) \sim 0.6\%$
 - $E=1000\text{GeV}$ の場合 $\rightarrow \sigma(E) \sim 0.5\%$
- ミューオンシステム
 - 高エネルギーミュー粒子
 - $p_T=500\text{GeV}$ の場合 $\rightarrow \Delta p_T \sim 6\%$
 - $p_T=1000\text{GeV}$ の場合 $\rightarrow \Delta p_T \sim 11\%$



ミュー粒子の横方向運動量



高エネルギーミュー粒子の横方向運動量分解能



ミュオンシステムのアライメントが重要

高エネルギーミュー粒子

Ref: PDG D. E. Groom et al., Atomic Data and Nuclear Data Table **78**,183-356(2001)

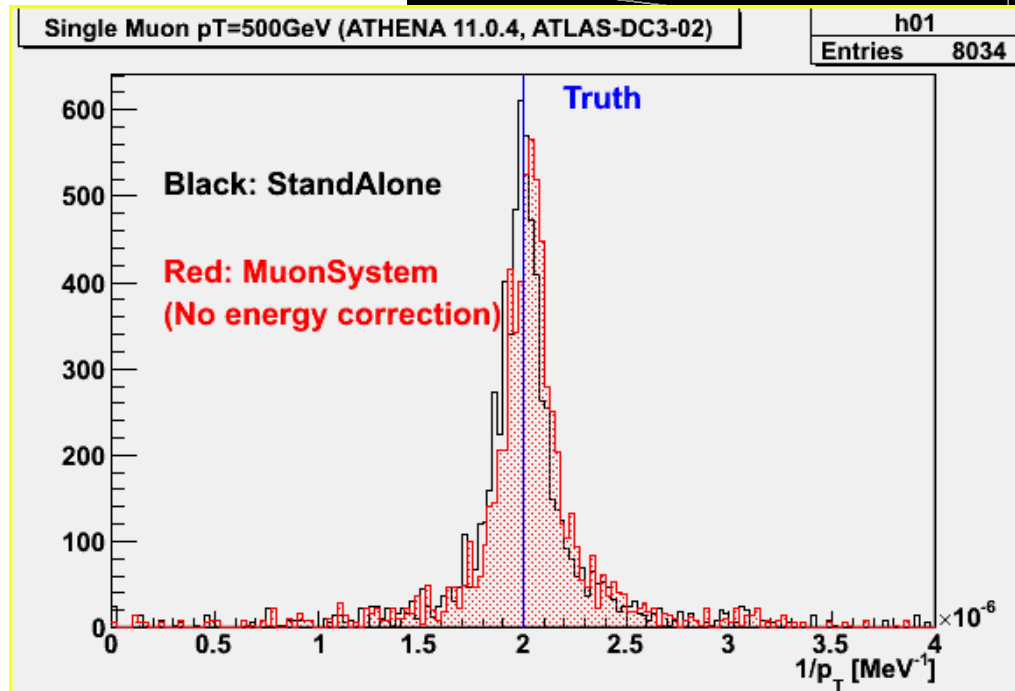
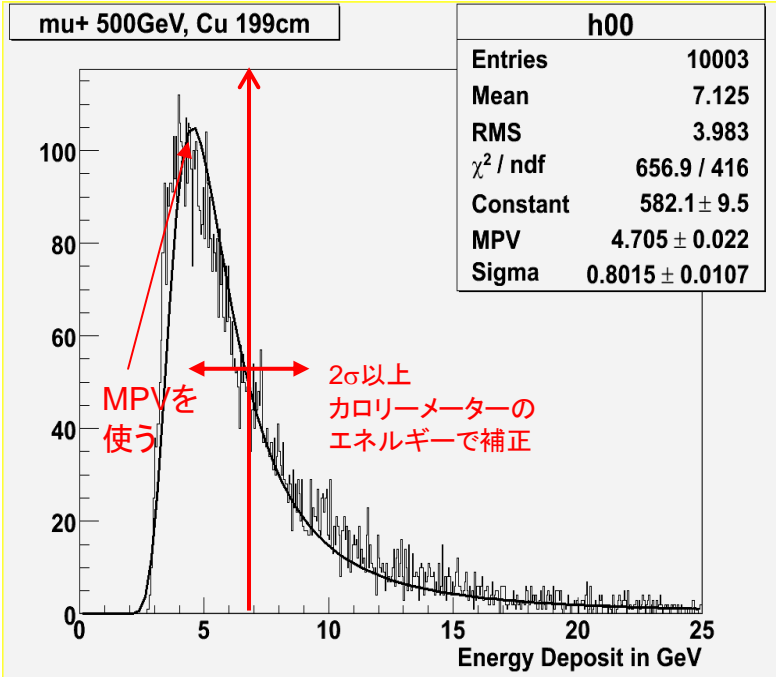
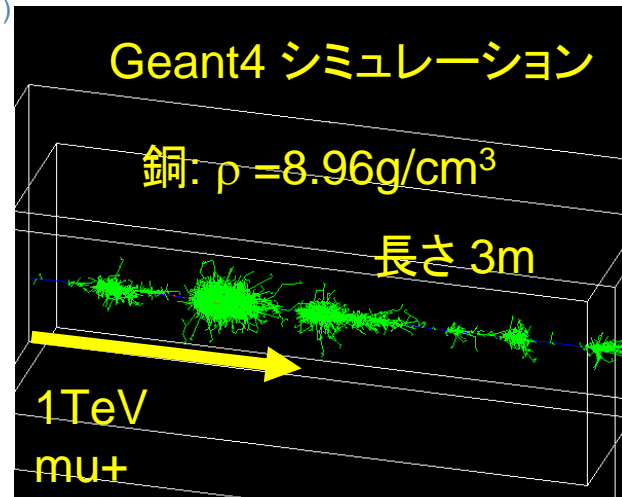
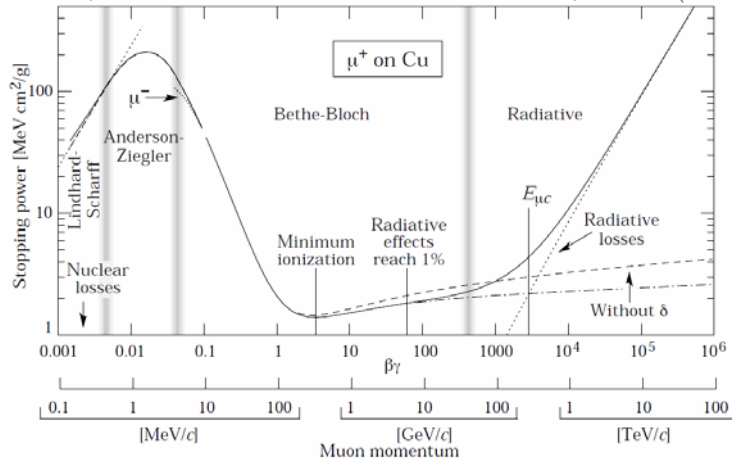
ミュー粒子の制動輻射



エネルギー損失



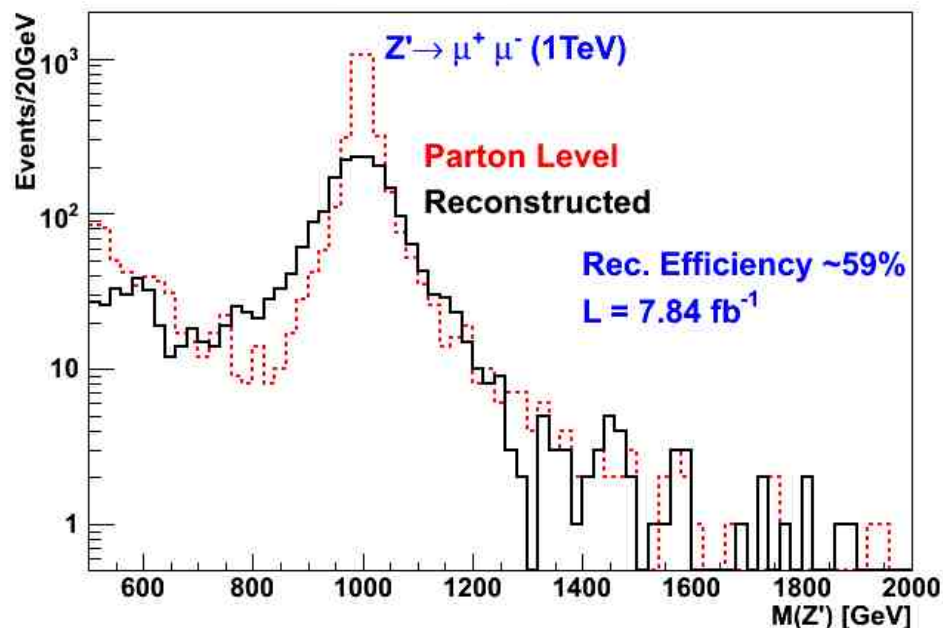
Z'質量の再構成に影響



3. Z'粒子の再構成

Z' resonance (4000Z')

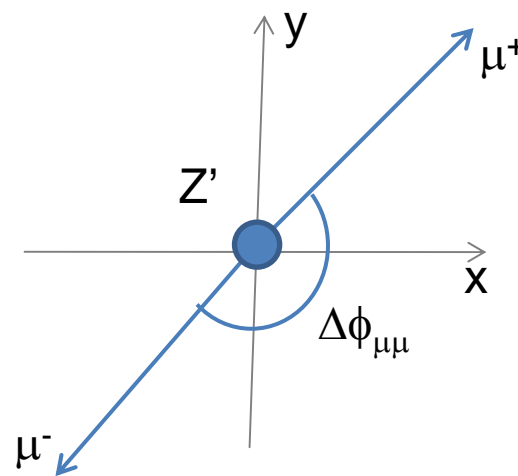
- 2つのミュー粒子を要求
- $p_T > 50 \text{ GeV}$
- $|\eta| < 2.5$
- 互いに逆の電荷を持つ
- 互いに逆方向に飛び出した
 $\Delta\phi_{\mu\mu} > 2.9 \text{ rad}$



- 再構成効率: 約59%

- 解析したシミュレーションサンプル

- SSM1000 : SSM, $M_{Z'} = 1 \text{ TeV}$, $\Gamma_{Z'} = 30 \text{ GeV}$
- SSM2000 : SSM, $M_{Z'} = 2 \text{ TeV}$, $\Gamma_{Z'} = 60 \text{ GeV}$



質量分布のフィット

真の質量分布が従う式

$$f(x) = \frac{a_{BW} M^2 \Gamma^2}{(x^2 - M^2)^2 + M^2 \Gamma^2} \times e^{-c_{int} x} + a_{DY} e^{-c_{DY} x}$$

6パラメーター

Ref: ATL-PHYS-PUB-2005-010

主なフィットすべきパラメーターは M, Γ 質量分解能 σ を考慮

再構成された質量分布が従うコンボリューション関数

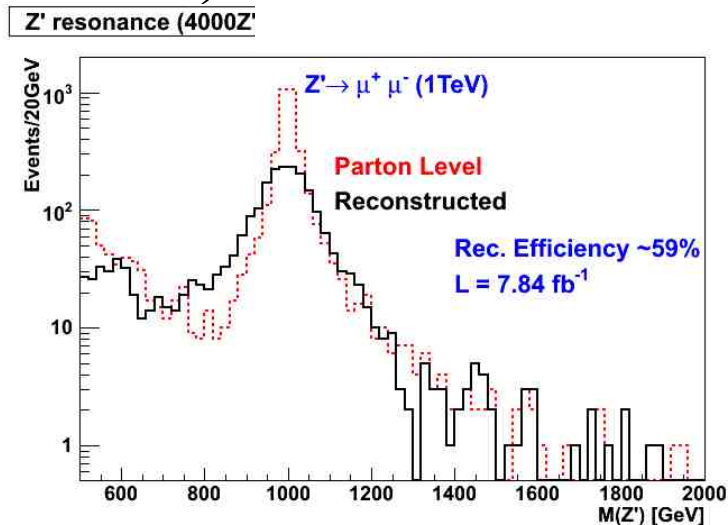
$$F(x) = \int_{x-5\sigma}^{x+5\sigma} \left(\frac{a_{BW} M^2 \Gamma^2}{(x'^2 - M^2)^2 + M^2 \Gamma^2} \times e^{-c_{int} x'} + a_{DY} e^{-c_{DY} x'} \right) \times \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-x')^2}{2\sigma}} dx'$$

7パラメーター

フィットの方法

- イ) ヒストグラムを χ^2 でフィットする
- ロ) ヒストグラムを使わずに Unbinned Log-Likelihood でフィットする

→統計が少ない時に有効



質量分解能の見積もり

崩壊幅 Γ と分解能 σ を同時に決めるのは難しい



分解能 σ を別の方法で見積もる



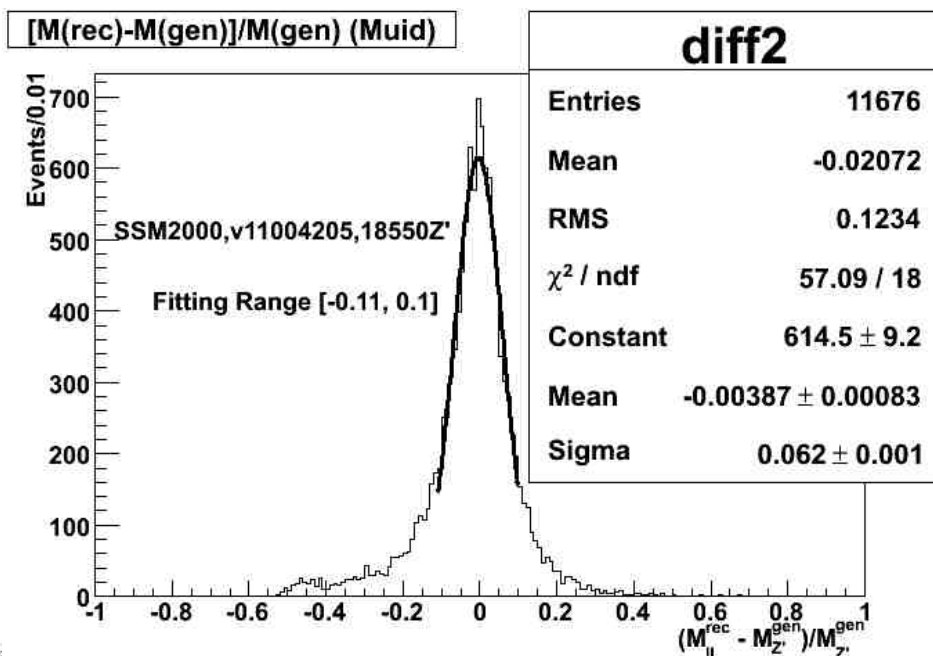
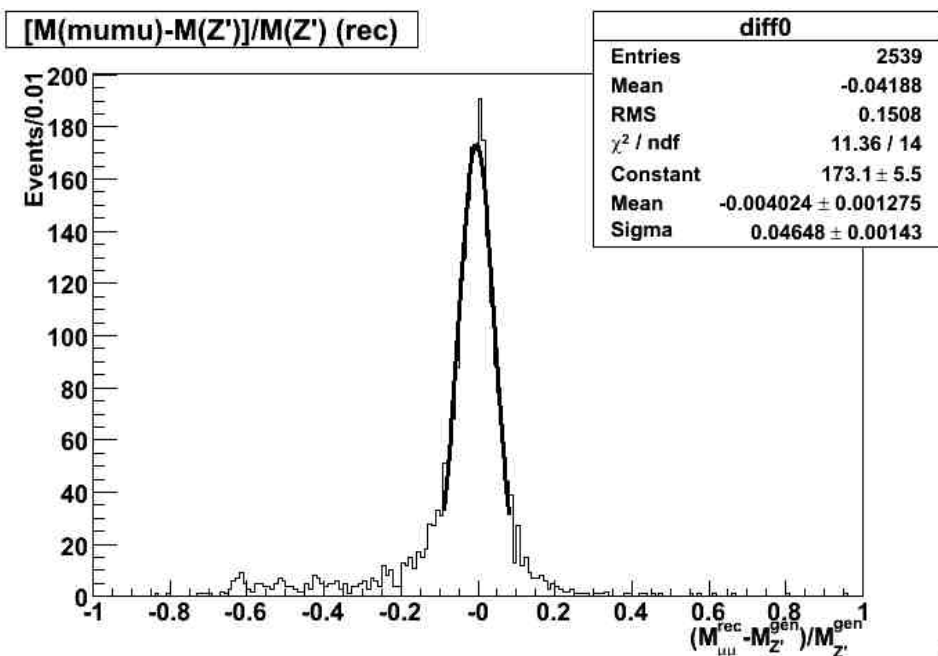
$$\frac{m_{\mu\mu}^{recon} - m_{Z'}^{truth}}{m_{Z'}^{truth}}$$

← モンテカルロの情報を使う

$Z' \rightarrow \mu^+\mu^-$	質量分解能
$M_{Z'}=1000\text{GeV}$	46GeV
$M_{Z'}=2000\text{GeV}$	124GeV



分解能を固定してフィットする
→ 6パラメーターのフィット



Toy Monte Carlo

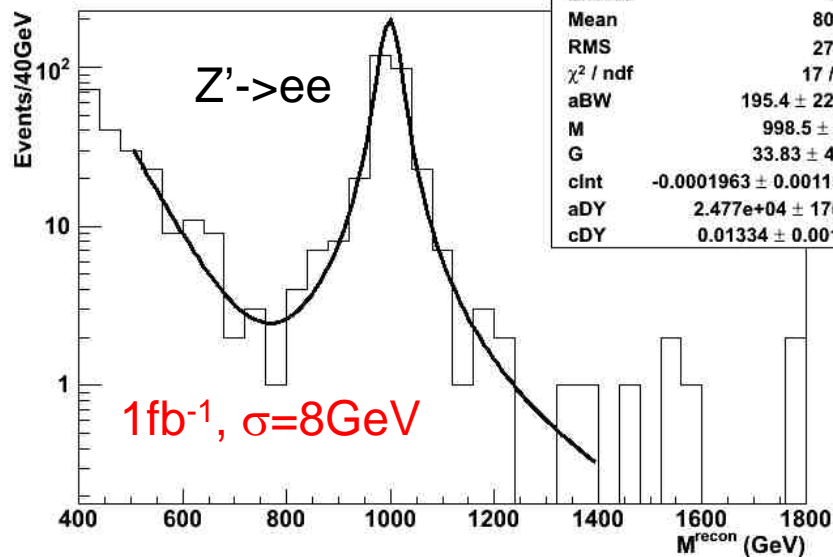
仮定:

- 質量分解は一定
- 再構成効率100%

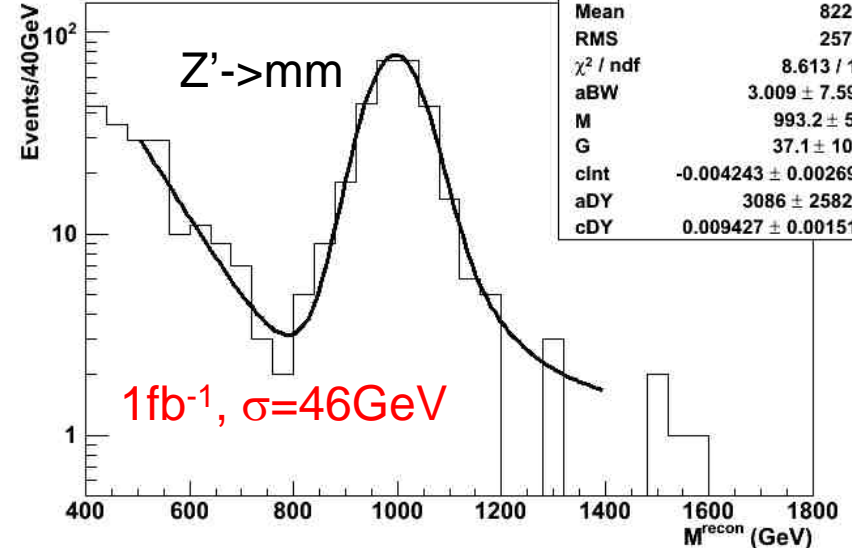
Unbinned Log-Likelihood を使用した結果

	チャンネル	質量 $M_{Z'}$ [GeV]	崩壊幅 $\Gamma_{Z'}$ [GeV]
1fb ⁻¹ (510Z')	Z'->ee($\sigma=8\text{GeV}$)	998.8 \pm 1.2 (0.1%)	29.3 \pm 2.5 (8.5%)
	Z'->mm($\sigma=46\text{GeV}$)	1000 \pm 4 (0.4%)	40.8 \pm 7 (17%)
10fb ⁻¹ (5100Z')	Z'->ee($\sigma=8\text{GeV}$)	999.7 \pm 0.4 (0.04%)	28.7 \pm 0.8 (2.8%)
	Z'->mm($\sigma=46\text{GeV}$)	1000 \pm 1 (0.1%)	30.8 \pm 2.4 (7.8%)
理論値		1000	30

Toy19 MC M=1000,G=30,s=8,recon

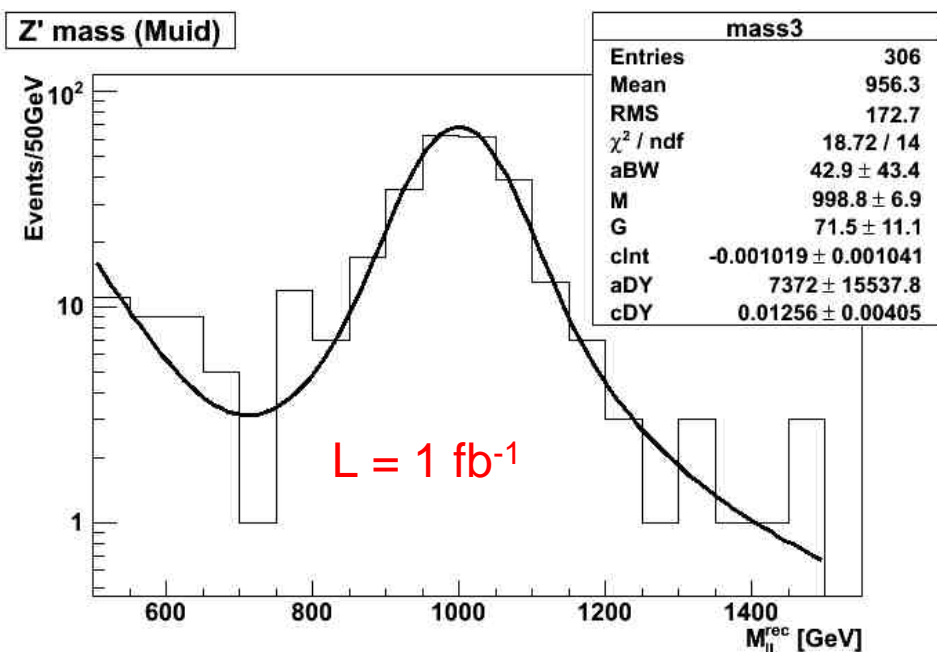


Toy19 MC M=1000,G=30,s=46,recon



フルシミュレーションのフィット

χ^2 によるフィット



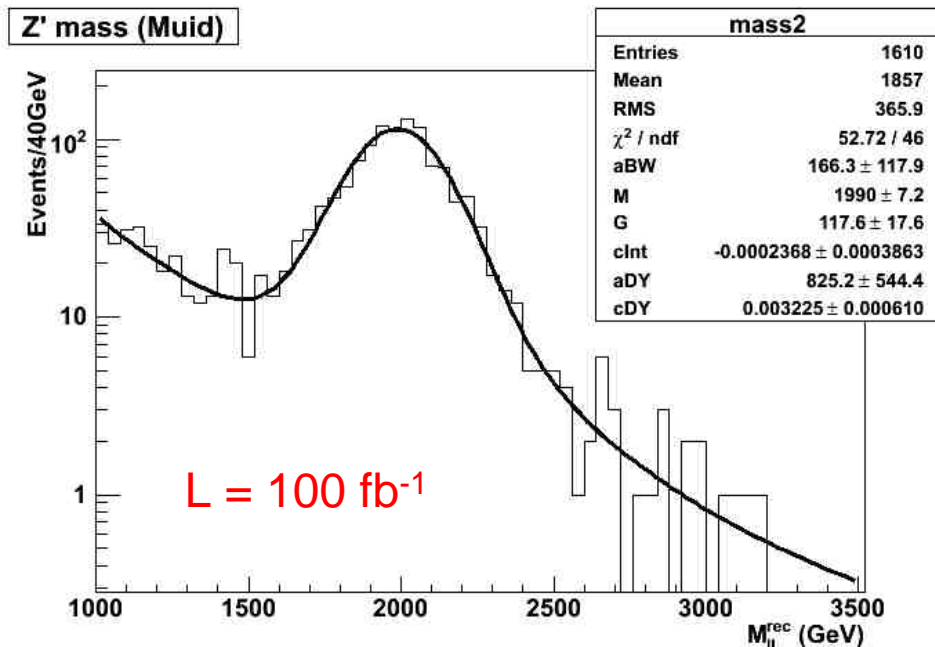
SSM1000

生成断面積 = 510fb

$M_{Z'}$ = 1000GeV

$\Gamma_{Z'}$ = 30GeV

σ = 46GeV(固定)



SSM2000

生成断面積 = 23.8fb

$M_{Z'}$ = 2000GeV

$\Gamma_{Z'}$ = 60GeV

σ = 124GeV(固定)

フルシミュレーションの結果

$Z' \rightarrow \mu^+ \mu^-$	積分ルミノシティ	方法	M[GeV]	Γ [GeV]
SSM1000 $M_{Z'}=1000\text{GeV}$ $\Gamma_{Z'}=30\text{GeV}$	1fb ⁻¹ (510Z')	χ^2	998.8±6.9(0.7%)	71.5±11.1(16%)
		Log Likelihood	995.6±6.7(0.7%)	73.1±16.4(22%)
	7.84fb ⁻¹ (4000Z')	χ^2	995.6±2.3(0.2%)	48.9±6.1(12%)
		Log Likelihood	995.7±2.3(0.2%)	51.2±5.2(10%)
SSM2000 $M_{Z'}=2000\text{GeV}$ $\Gamma_{Z'}=60\text{GeV}$	10fb ⁻¹ (240Z')	Log Likelihood	2017±26(1.2%)	135±46(34%)
	100fb ⁻¹ (2400Z')	χ^2	1990±7(0.4%)	118±18(15%)
		Log Likelihood	1996±7(0.4%)	120±8(7%)
	779fb ⁻¹ (18550Z')	χ^2	1993±3(0.2%)	134±7(5%)
		Log Likelihood	1994±3(0.2%)	143±7(5%)

質量は高い精度で決まる。
崩壊幅は10～20%の精度で決まる。

でも、質量と崩壊幅ともに理論値からの有意なずれが観測される。

- わずかだがRadiative Muonの影響
- 検出効率の p_T および質量依存性
- 質量分解能の p_T および質量依存性

4. まとめ

- Z'発見後の...
- Z' → μ⁺μ⁻ (SSM)の質量M_{Z'}と崩壊幅Γ_{Z'}を決定方法を研究した
 - Toy Monte Carlo によって質量、崩壊幅を正確に決定できることを確認
 - フルシミュレーションサンプルをフィット
 - SSM1000 : M_{Z'}=1000GeV, Γ_{Z'}=30GeV, σ(M_{Z'})=46GeV固定 (4000Z')
 - SSM2000 : M_{Z'}=2000GeV, Γ_{Z'}=60GeV, σ(M_{Z'})=124GeV固定 (18550Z')

- 1fb⁻¹ (実験初期の段階)

- SSM1000(1TeV)
 - 質量: 精度約0.7%で決定できる
 - 崩壊幅: 精度約20%で決定できる

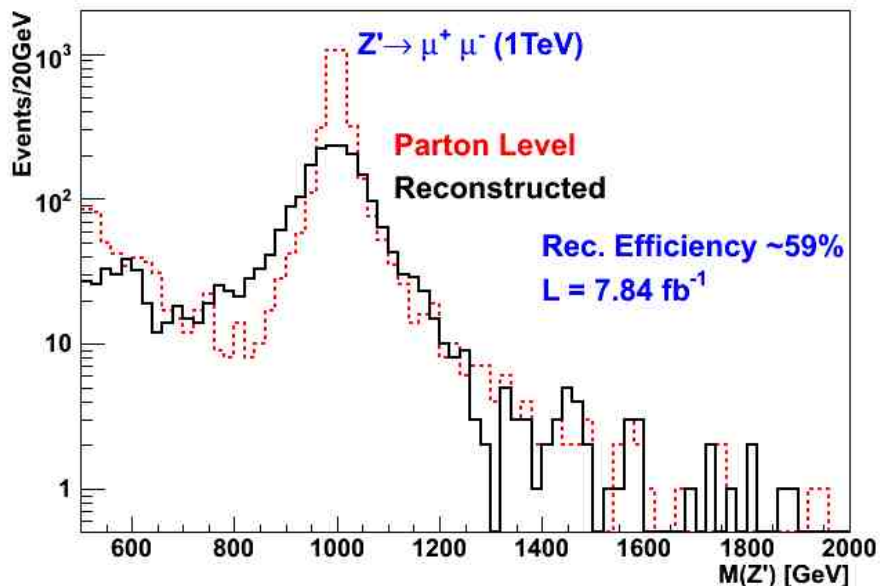
- 10fb⁻¹

- SSM1000(1TeV)
 - 質量: 精度約0.2%で決定できる
 - 崩壊幅: 精度約10%で決定できる
- SSM2000(2TeV)
 - 質量: 精度約1.2%で決定できる
 - 崩壊幅: 精度約34%で決定できる

- 今後

- 質量、崩壊幅ともに理論値からの有意なずれを観測
 - 検出器の振舞いをより深く理解
 - 効率や質量分解能に対するミュ-粒子のp_T, η, φ依存性を調べる

Z' resonance (4000Z')



付録

Generating Toy Monte Carlo

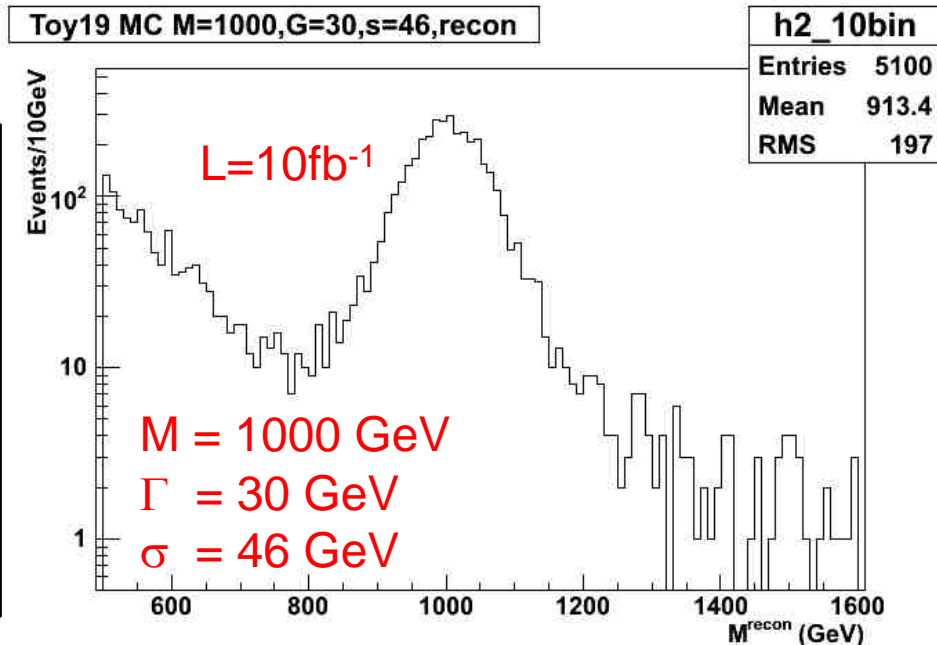
$$f(x) = \frac{a_{BW} M^2 \Gamma^2}{(x^2 - M^2)^2 + M^2 \Gamma^2} \times e^{-c_{int} x} + a_{DY} e^{-c_{DY} x}$$

Reference: ATL-PHYS-PUB-2005-010

1. We generate a random number m_t following $f(x)$ shape.
2. We generate a random number m_r following Gaussian shape with mean = m_t and σ = (mass resolution).

m_r distribution becomes like reconstructed Z' resonance.

aBW	91
M	1000
Γ	30
cInt	-0.002
aDY	1.3e4
cDY	0.01
σ	46



Log-Likelihood

イベント毎に計算

最小になるようにフィットする

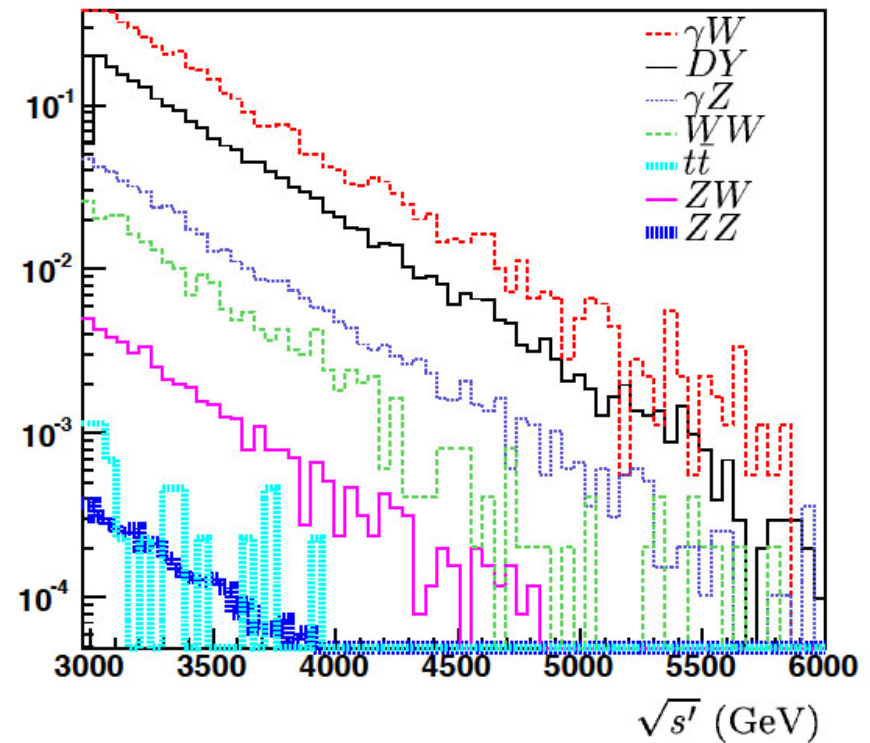
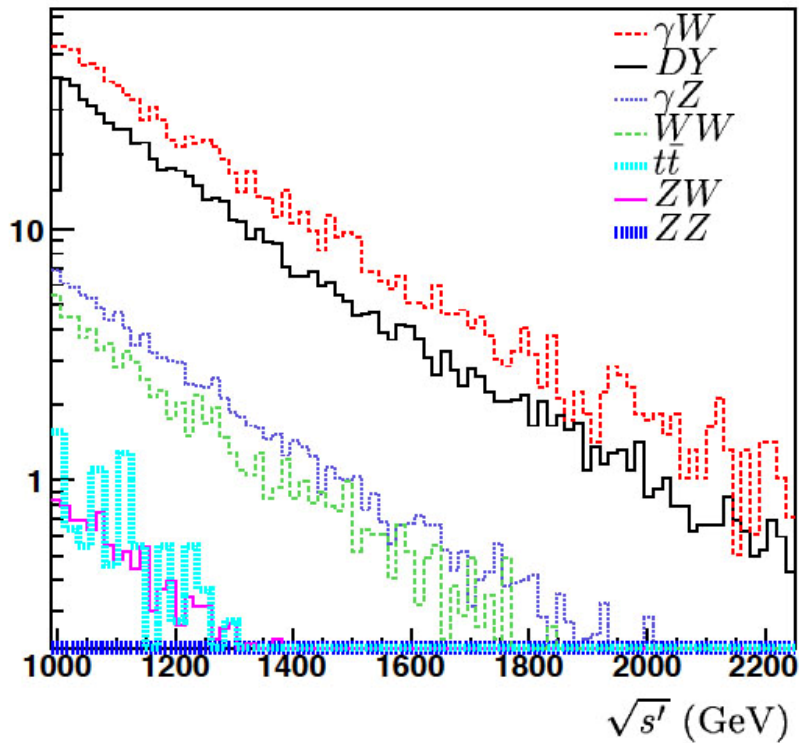
$$\min \left(- \sum_i^{\text{events}} \log \frac{F(M_i)}{\int_{M_{\text{lower}}}^{M_{\text{upper}}} F(M) dM} \right)$$

$$F(x) = \int_{x-5\sigma}^{x+5\sigma} \left(\frac{a_{BW} M^2 \Gamma^2}{(x'^2 - M^2)^2 + M^2 \Gamma^2} \times e^{-c_{\text{int}} x'} + a_{DY} e^{-c_{DY} x'} \right) \times \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-x')^2}{2\sigma}} dx'$$

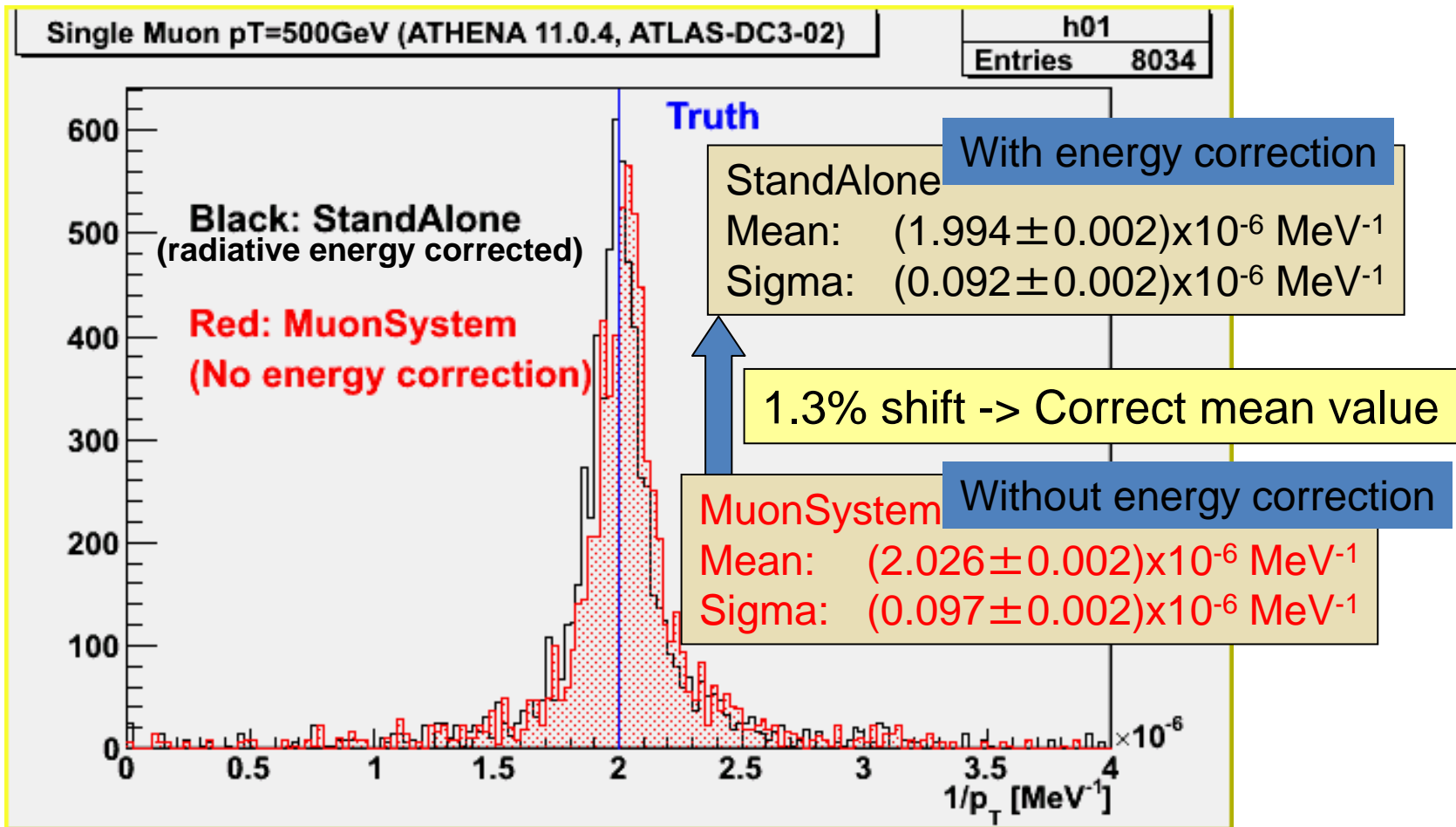
バックグラウンド

$$Z' \rightarrow e^+e^-$$

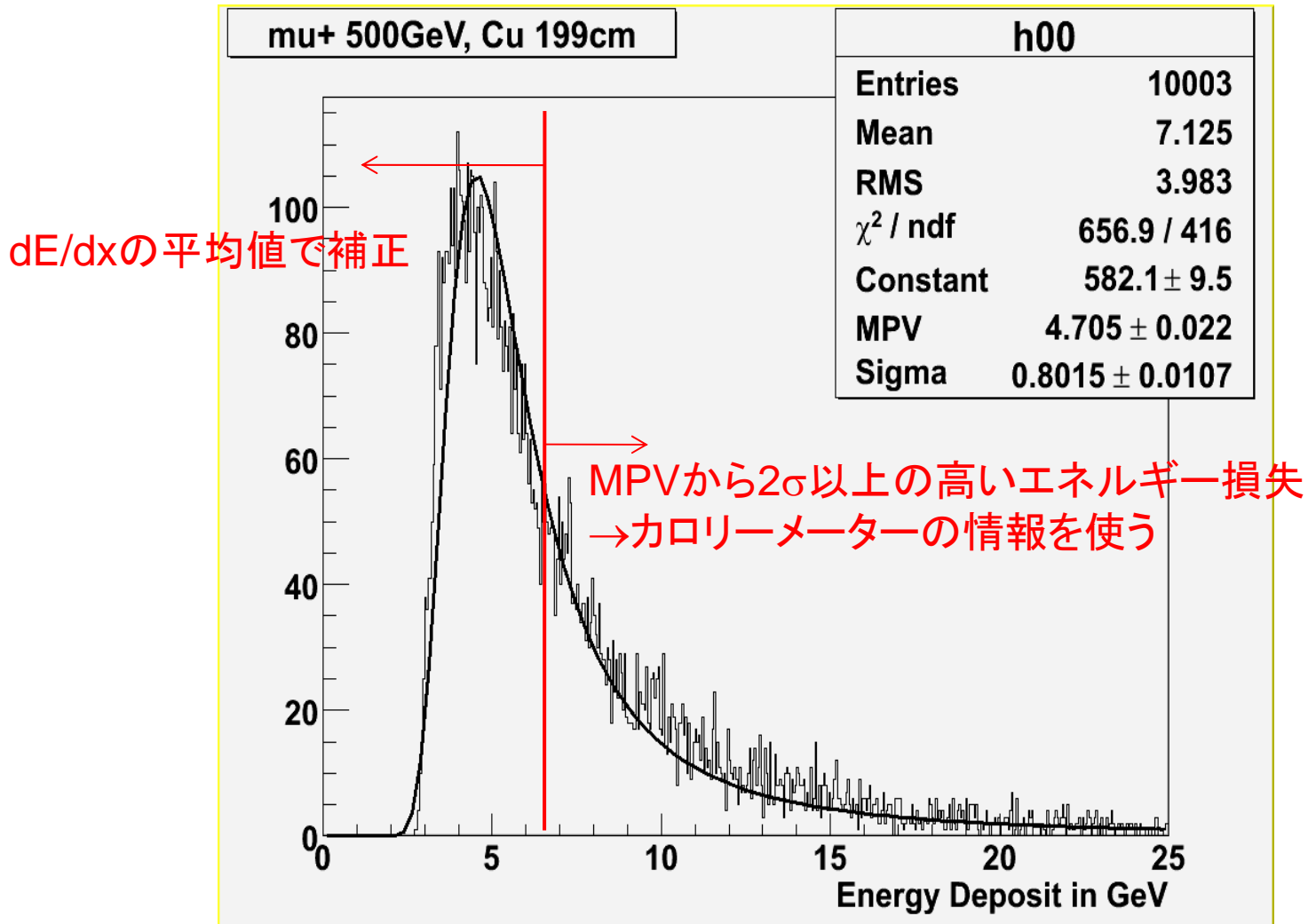
$L = 100 \text{ fb}^{-1}$



μ^+ , $p_T=500\text{GeV}/c$, $|\eta|\leq 1.5$



ミュー粒子のエネルギー補正



→ 分解能が悪いミューオンチャンネルも原理的には電子のチャンネル同様に質量と崩壊幅を測定することができる

高エネルギーミュオン粒子

ミュオン粒子の制動輻射



エネルギー損失

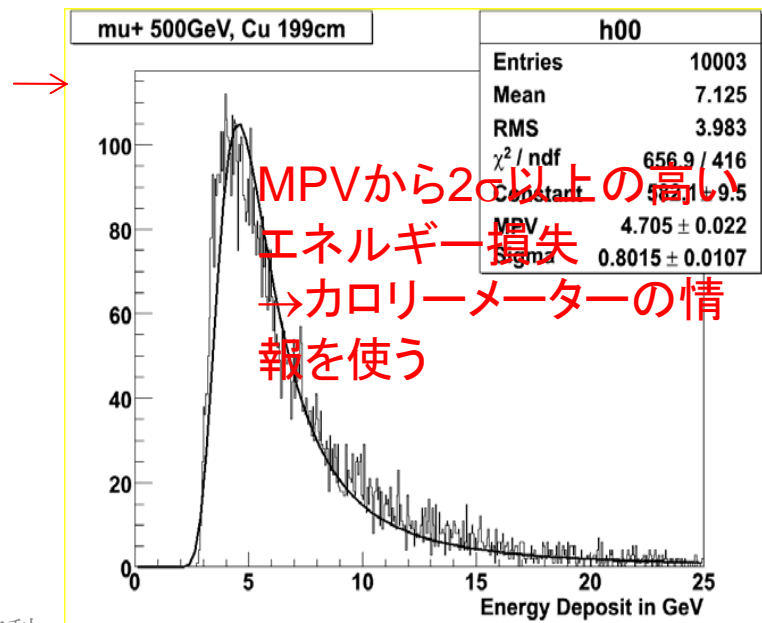
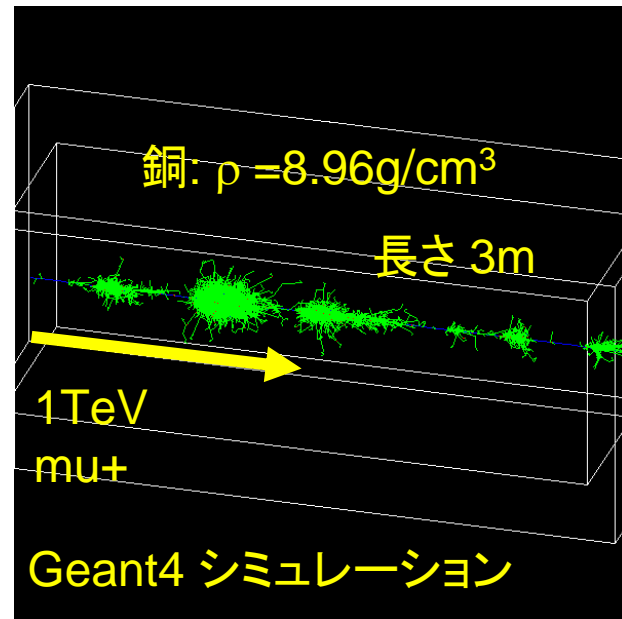
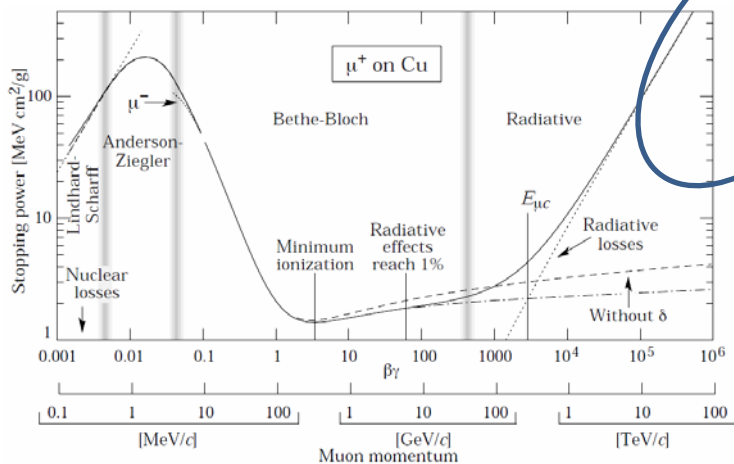


Z'質量の再構成に影響

電磁カロリメータ
ハドロンカロリメータ

Radiative Muon

dE/dxの
平均値で
補正



Ref: PDG D. E. Groom et al., Atomic Data and Nuclear Data Table **78**,183-356(2001)

2007年3月26日

岡山大学自然科学研究科