



国際リニアコライダーにおける
ヒッグスの質量・断面積・
およびCP混合の解析

東北大学理学研究科物理学専攻

素粒子実験研究室

綿貫 峻

目次



- 導入
 - 新物理の検証
 - 反跳解析の概要
- 実験概要
 - 国際リニアコライダー(ILC)実験
 - ILD測定器
- 断面積・質量解析
 - シミュレーションの条件
 - 事象選別
 - モデル非依存性の確認
 - 準モデル非依存解析
 - フィッティング・偽実験解析
 - 質量テンプレート法
- CP混合解析(SM)
- まとめ



道入

~ Introduction ~

標準模型を超える理論の検証

- 標準模型(SM)は物理を概ね正しく説明できるが、いまだ問題も残っている(階層性問題、ダークマター、…など)

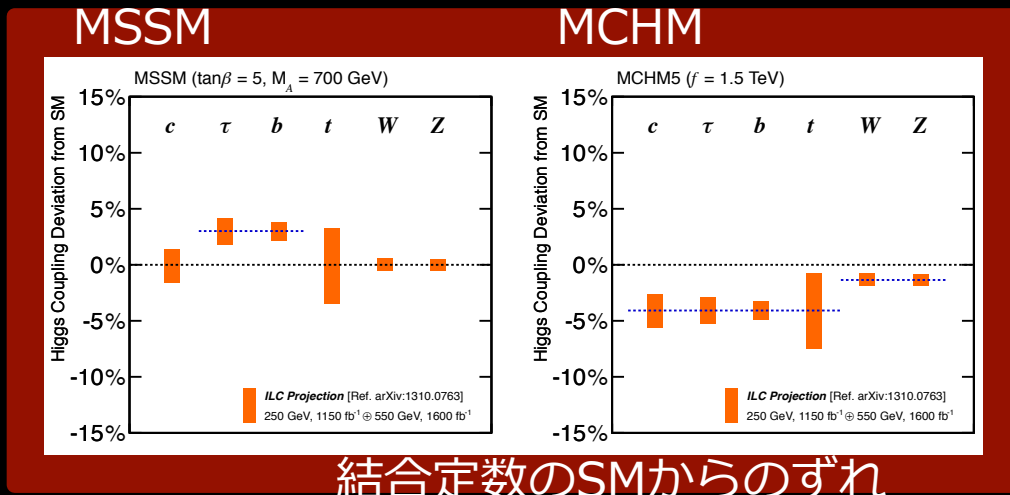
→ SMを超える理論(BSM)が必要

- SUSY
- Composite Higgs
- etc...

LHCで見つかったヒッグスはSMか？ BSMか？

- そのために、ヒッグスと他の粒子との結合定数が知りたい

新物理があると特徴的なずれが見える



結合定数のSMからのずれ

断面積測定



- 結合定数を測定するには何が必要か？

$$g^2_{haa} \propto \Gamma(h \rightarrow aa) = \Gamma_h \times BR(h \rightarrow aa)$$

total width

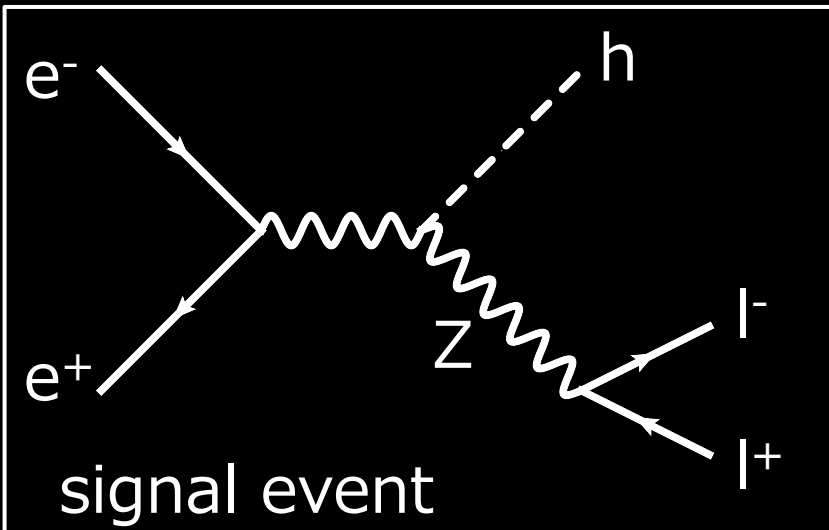
Branching Ratio

$h \rightarrow ZZ$ 結合

cross section σ

$\sigma \times BR$ 測定値

LHCで測れるのは
相対値だけ

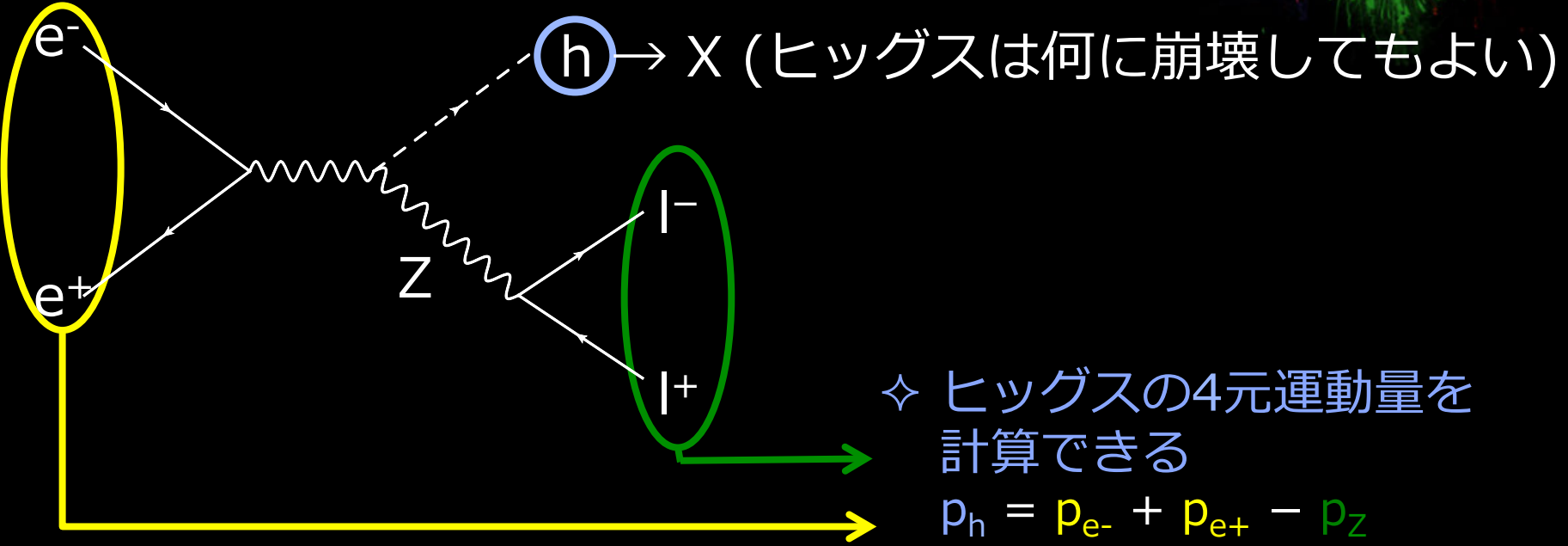


ILCなら反跳を用い精密&
モデル非依存に生成断面積
 σ を測定できる

➡ 本研究の目的

反跳 (recoil)

- レプトンコライダーは始状態の4元運動量が既知
⇒ LHC等のハドロンコライダーでは不可能な、BRに非依存な σ の測定ができる



ヒッグスを再構成したい

直接

反跳

ヒッグスの崩壊モデルに依存してしまう

モデルに非依存

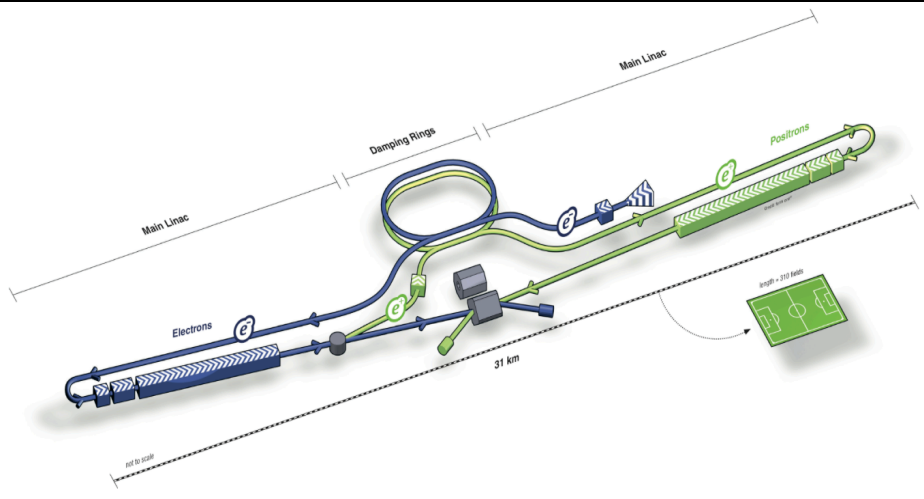




実験

~ Collider & Detector ~

国際リニアコライダー(ILC)実験



■ 概要

- e^+e^- 衝突型の線形加速器
- $E_{\text{CMS}} = 250, 350, 500 \text{ GeV}$
(アップグレードで1TeV)
- ビーム電子・陽電子の
スピン偏極を設定できる

■ 期待される物理

- トップクォーク精密測定
- LHCでは困難な、カラーレスな新粒子の探索

- ヒッグスの高感度測定

ILD測定器

ハドロンカロリメータ

中性ハドロンエネルギー測定

ソレノイドコイル

3.5[T]の高磁場を生成

電磁カロリメータ

光子・電子エネルギー測定

崩壊点検出器

最内層に設置され、
崩壊点を測定

飛跡検出器

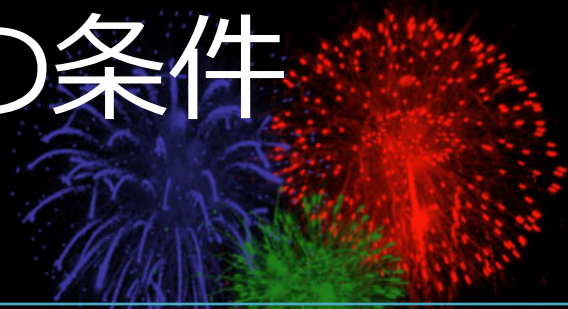
荷電粒子のトラッキング、
運動量の測定



解析

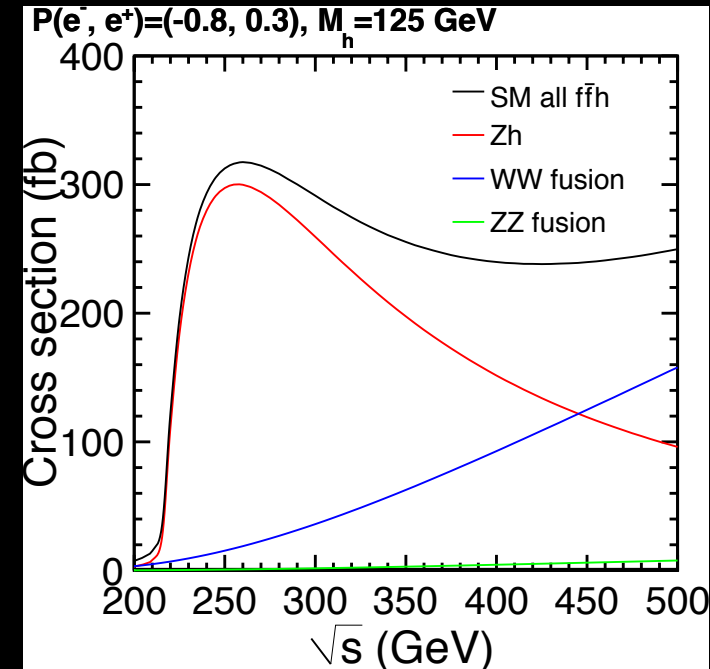
~ Analysis ~

シミュレーションの条件



ヒッグス質量	重心系 エネルギー	積分 ルミノシティ	スピン偏極
125 [GeV]	250 [GeV]	250 fb ⁻¹	$P(e^-, e^+) = (\pm 0.8, \mp 0.3)$

- $E_{\text{CMS}} = 250 \text{ GeV}$ は Zh の断面積のピークがあるエネルギー
- 統計量は 250 fb^{-1} を仮定 (約3年分)
- 異なるスピン偏極
 $P(e^-, e^+) = (\pm 0.8, \mp 0.3)$ の比較
 - signal断面積の大きい電子左巻き偏極
 - W^\pm 由来のBGが抑制される電子右巻き偏極

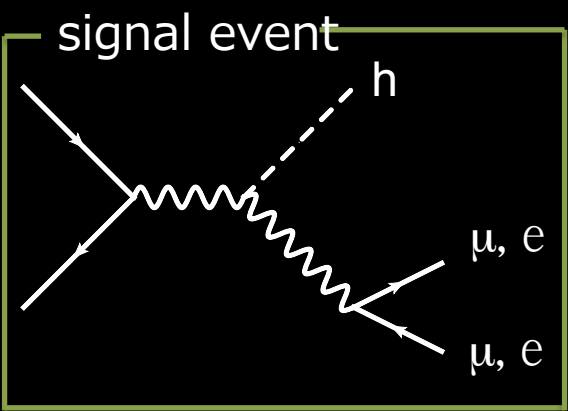


生成イベントの分類

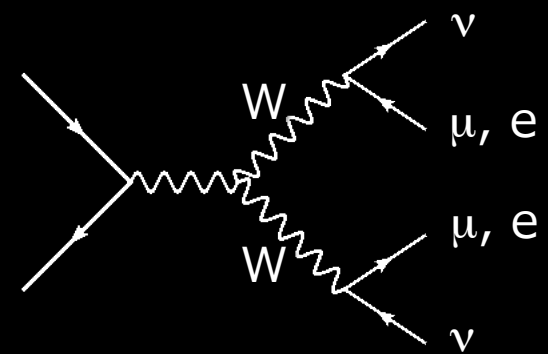
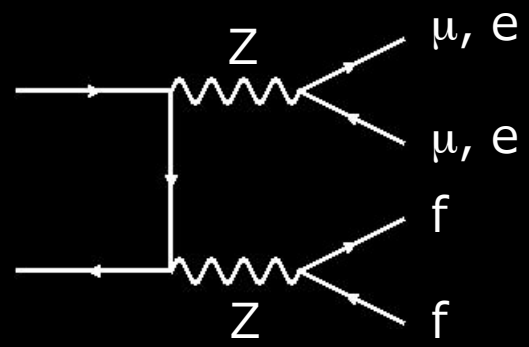
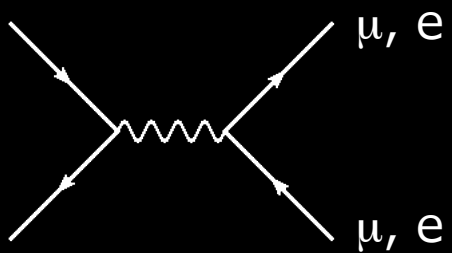


■ Signal : $e^+e^- \rightarrow Zh \rightarrow \mu\mu h, eeh$

■ 主なBGは μ チャンネルで $\mu\mu$ 、 $\mu\mu f f$ 、 $\mu\mu\nu\nu$
(fはtと ν を除くフェルミオン)



σ (fb)	μ チャンネル		eチャンネル	
	左巻き	右巻き	左巻き	右巻き
Signal	10.4	7.02	10.9	7.38
ll	13000	10400	31300	29400
$ll\nu\nu$	2030	207	2080	203
$llff$	1560	1320	1620	1430



解析の流れ



■レプトン選別

- $Zh \rightarrow l+l+h$ のZを再構成
- 最適化のために条件を設ける

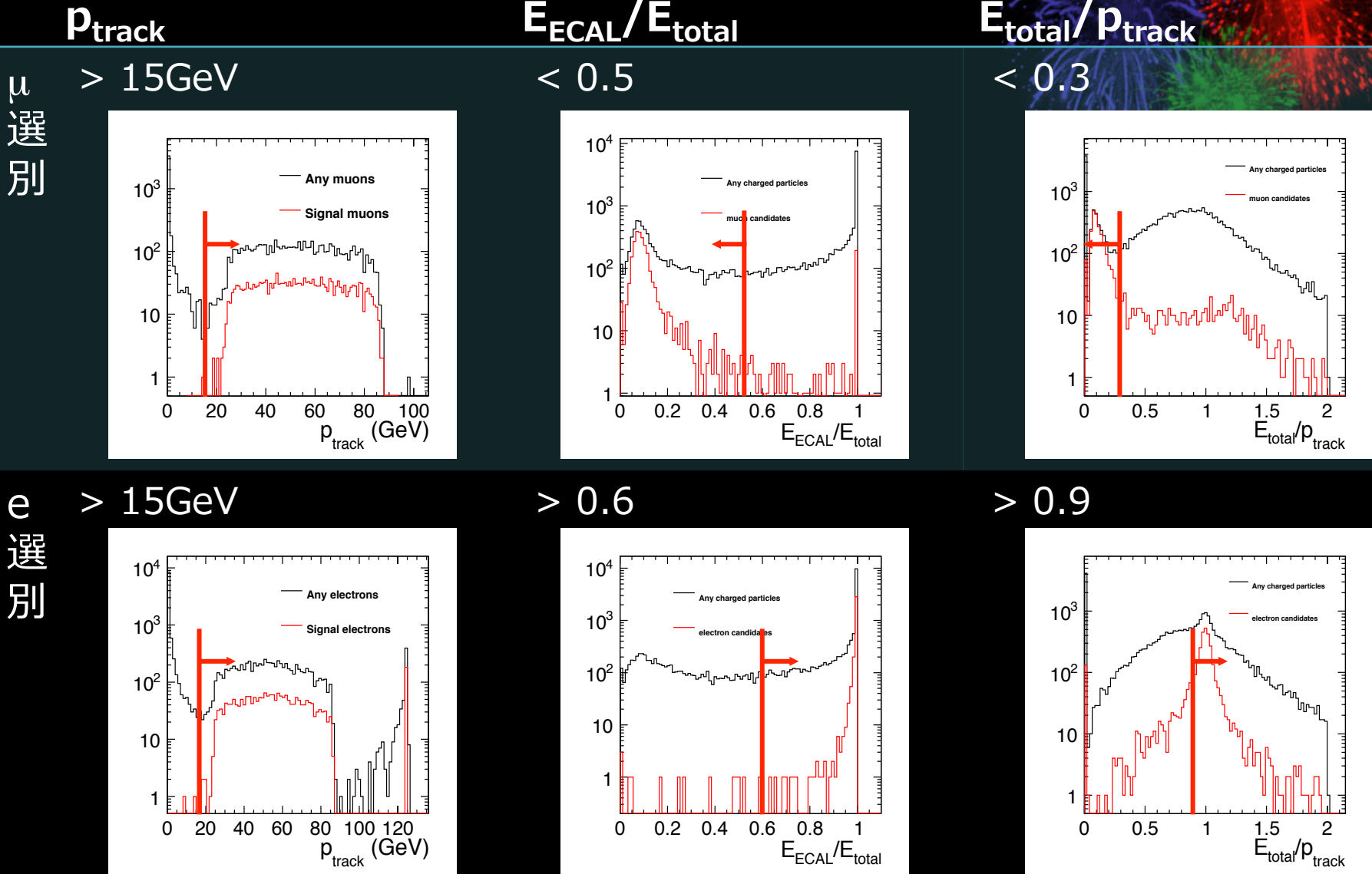
■BG排除

- レプトン対に条件をかけてBGを排除
- Signalのeff.はヒッグスの崩壊モードに非依存となるよう条件を設定

■フィット & Toy-MC

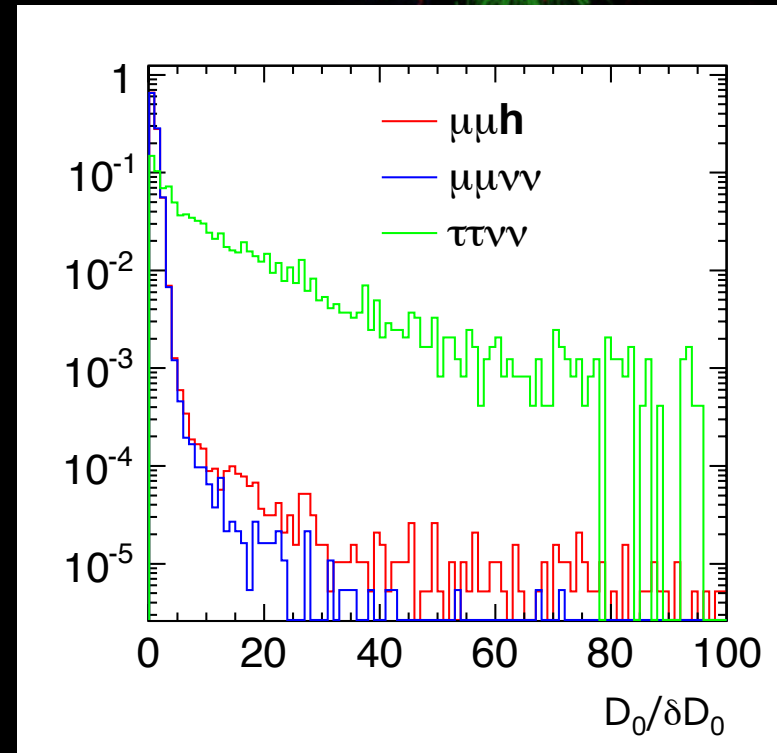
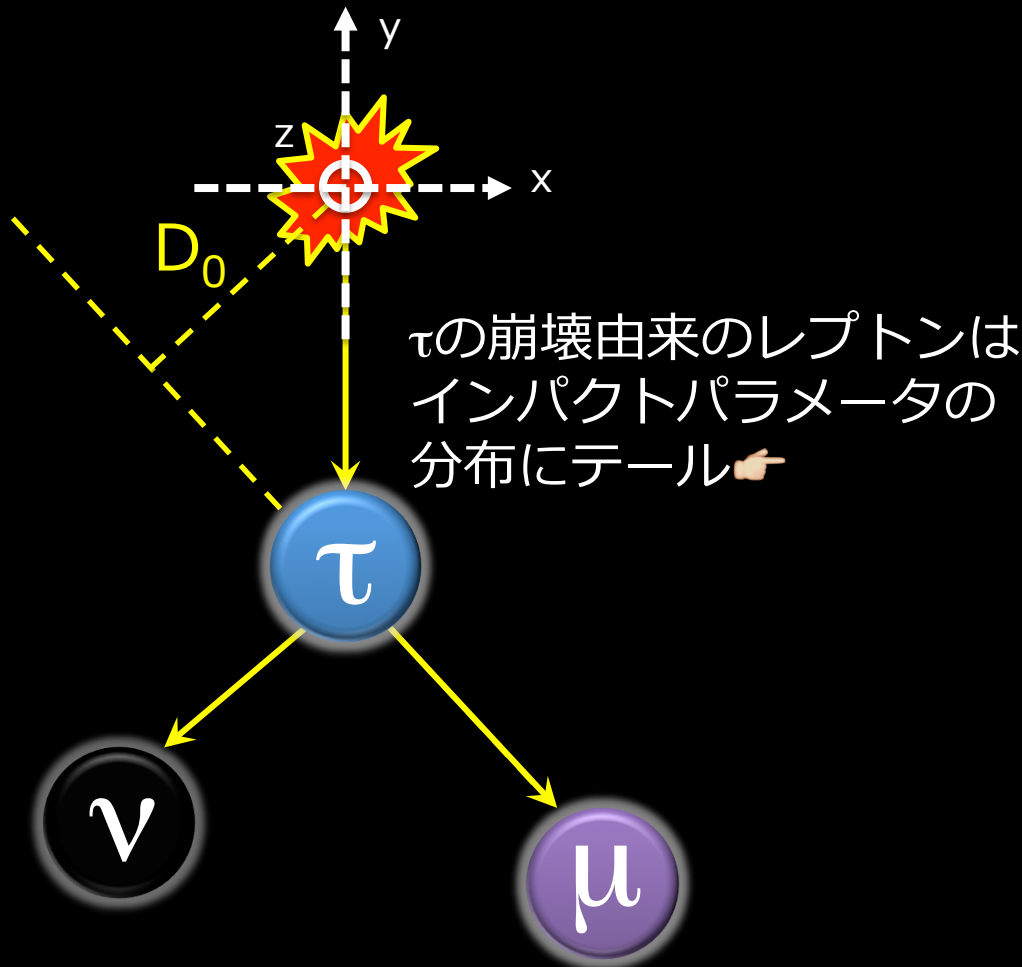
- 反跳質量分布をフィットしたPDFを元に偽実験(Toy-MC)を繰り返し、signalのイベント数・ヒッグス質量の統計誤差を見積もる

レプトン選別



インパクトパラメータ

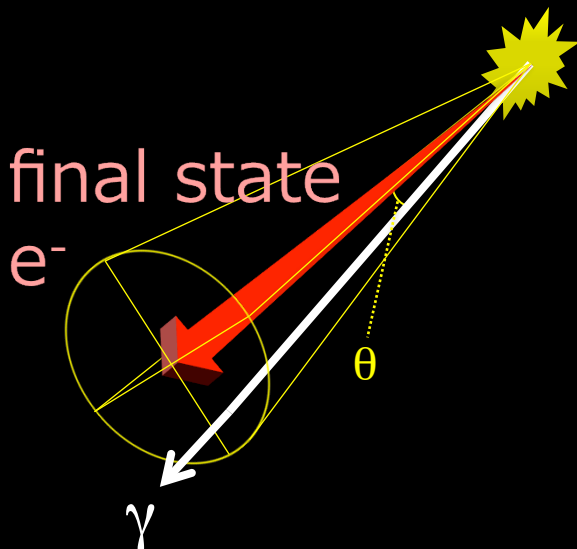
- $\tau^\pm \rightarrow l^\pm \nu_l$ 由来のレプトンを除くため、 μ トラックの xy 平面でのインパクトパラメータに上限 ($D_0/\delta D_0 < 5$)



インパクトパラメータ分布

$\tau\nu\nu$ などのBGを削減

制動放射リカバリ



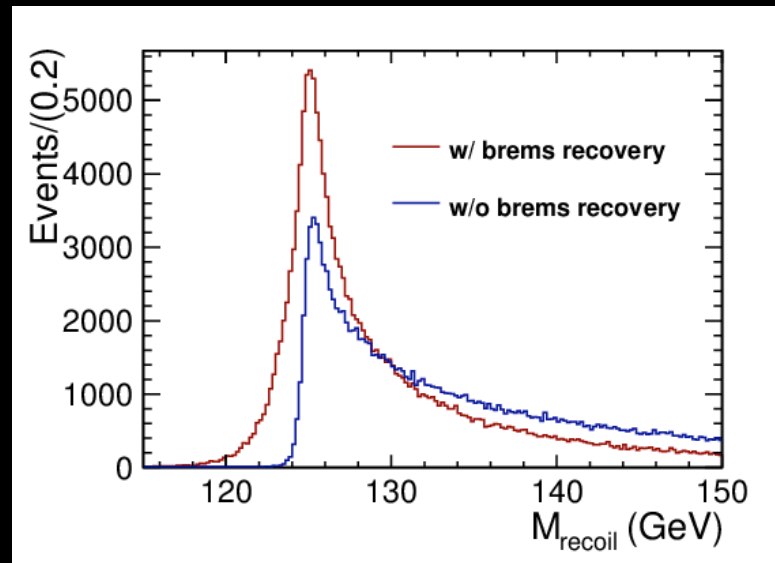
- 特に e^\pm は制動放射によりエネルギーを失いやすい
- ➔ 反跳分布のテール悪化の原因
- e^\pm に近い方向の γ の (E, p) を足す

recovery条件

= 制動放射リカバリ

- $\cos\theta > 0.99995$ or
- $\cos\theta > 0.999$ かつ $E_\gamma/E_e > 3\%$

➔ 反跳質量分布のピーク改善
➔ σ 測定精度が劇的に向上



解析の流れ



■レプトン選別

- $Zh \rightarrow l^+l^-h$ のZを再構成
- 最適化のために条件を設ける

■BG排除

- レプトン対に条件をかけてBGを排除
- SignalのEff.はヒッグスの崩壊モードに非依存となるよう条件を設定

■フィット & Toy-MC

- 反跳質量分布をフィットしたPDFを元に偽実験 (Toy-MC)を繰り返し、signalのイベント数・ヒッグス質量の統計誤差を見積もる

di-lepton events

BG排除



$$p_{Tdl} > 20 \text{ GeV}$$

$$M_{dl} \in (80, 100) [\text{GeV}]$$

$$a_{\text{cop}} \in (0.2, 3.0)$$

$$\delta p_{Tbal} \notin (-10, 10) [\text{GeV}]$$

$$\cos \theta_{\text{missing}} < 0.99$$

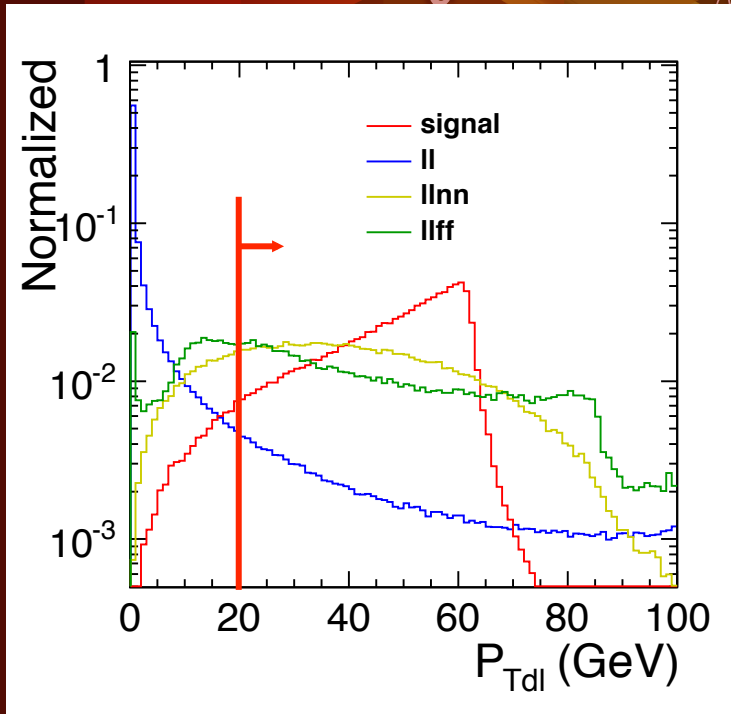
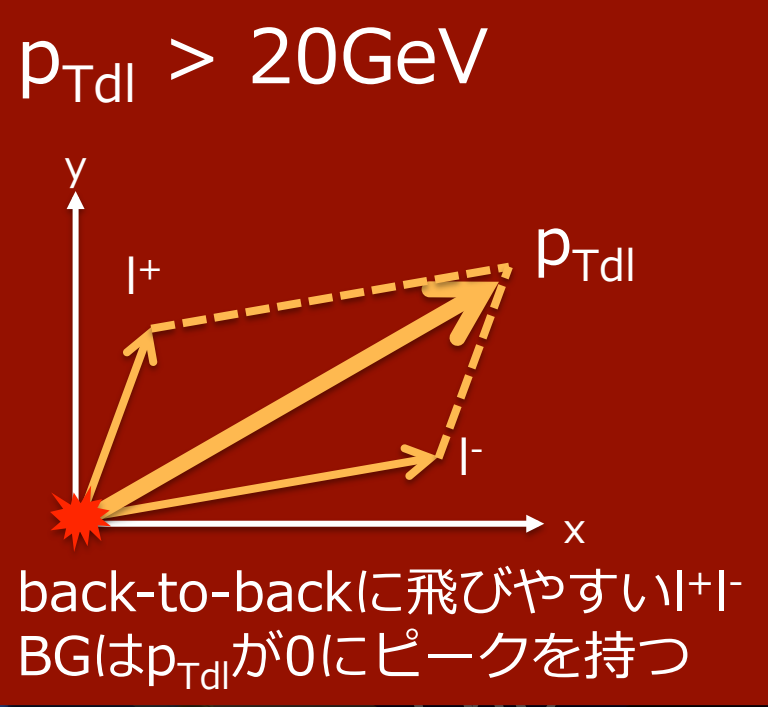
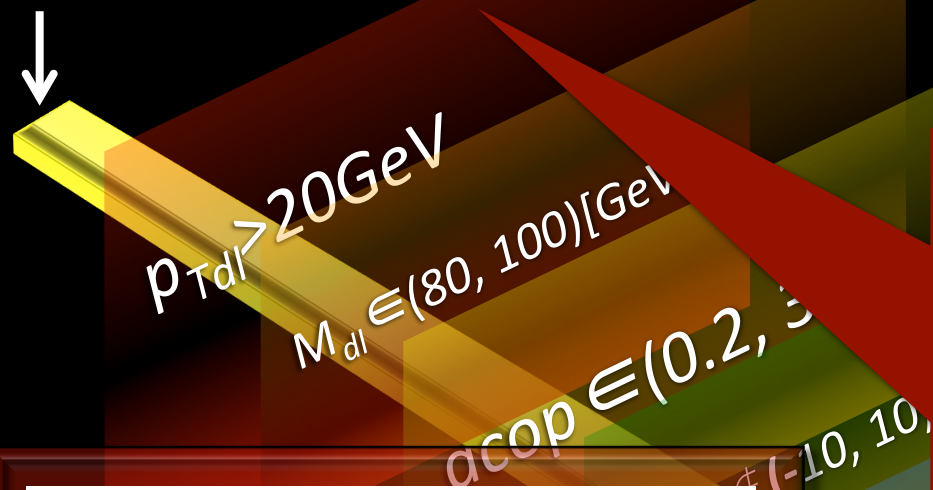
$$M_{\text{recoil}} \in (115, 150) [\text{GeV}]$$

Likelihood



di-lepton events

横運動量 p_{Tdl}



di-lepton events

不変質量 M_{dl}

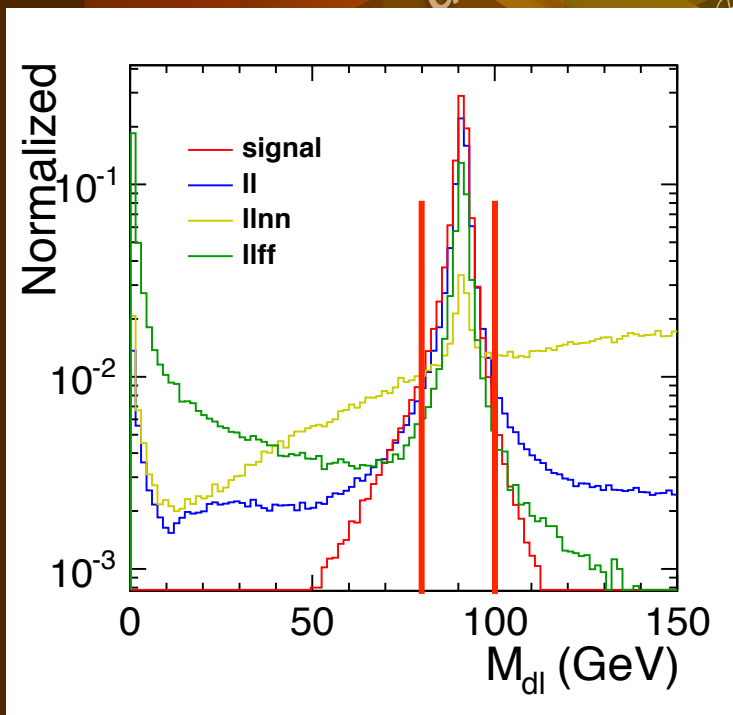
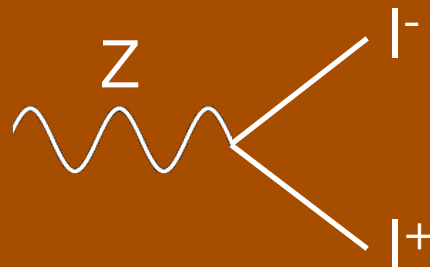


$p_{Tdl} > 20 \text{ GeV}$

$M_{dl} \in (80, 100) [\text{GeV}]$

$\text{acop} \in (0.2, 3.0)$

$M_{dl} \in (80, 100) \text{ GeV}$
Zボソンから崩壊した対



$\cos\theta_m$

$M_{recoil} \in (115, \dots)$

Likelihood

方位角差 Acoplanarity

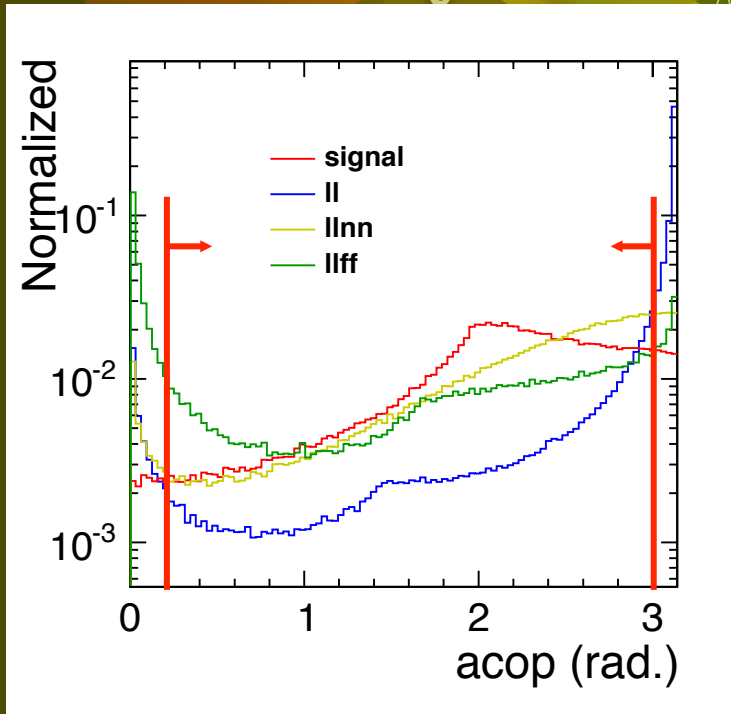
di-lepton events



$p_{Tdl} > 20 \text{ GeV}$

$M_{dl} \in (80, 100) [\text{GeV}]$

$acop \in (0.2, 3.0)$



$acop \in (0.2, 3.0)$

レプトン対に崩壊する中間粒子が
ビーム方向に飛びやすいBGは
 $acop$ が π にピーク

横運動量差 δP_{Tbal}

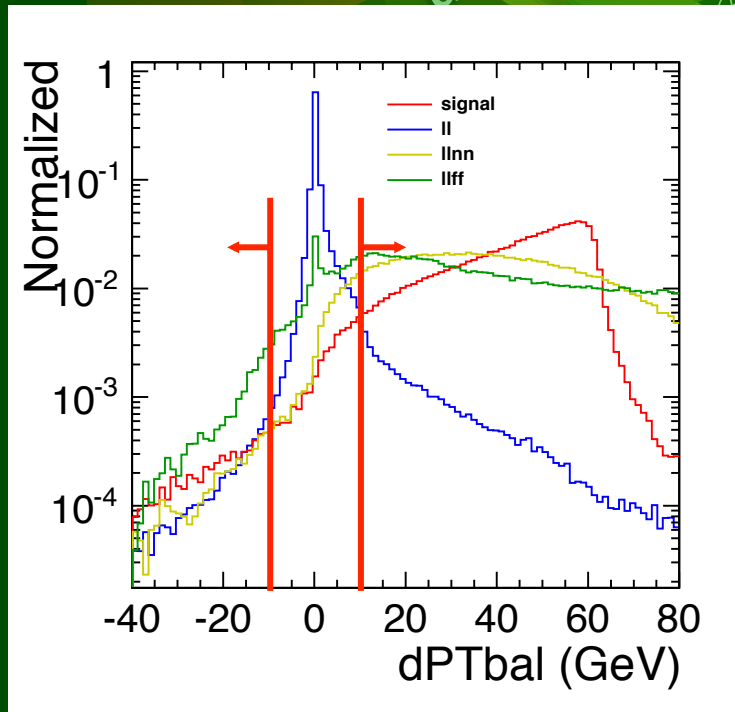
di-lepton events



$p_{Tdl} > 20 \text{ GeV}$

$M_{dl} \in (80, 100) [\text{GeV}]$

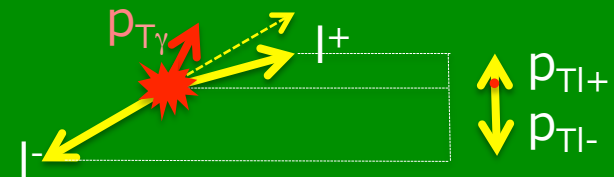
$a_{cop} \in (0.2, 3.0)$



$\cos\theta_{missing} < 0.1$

$M_{recoil} \in (1, 10) [\text{GeV}]$

$\delta P_{Tbal} \in (-10, 10) \text{ GeV}$



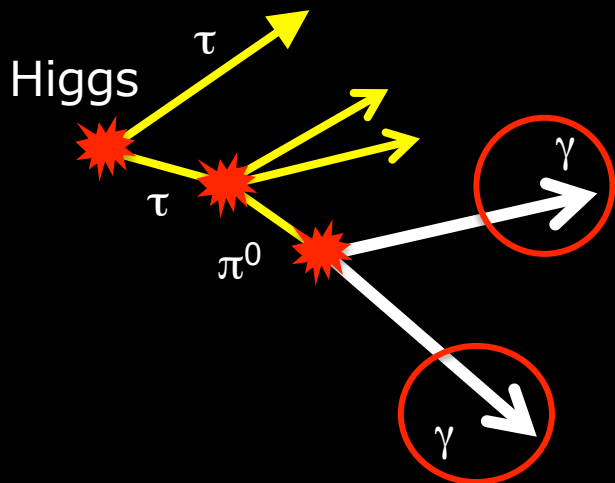
δP_{Tbal} : レプトン対と
高エネルギー γ の
横運動量の差

ISRが高 p_T を持つと l^+l^- BG
の p_{Tdl} のバランスが崩れる
→ $l^+l^-\gamma$ BGに効果的

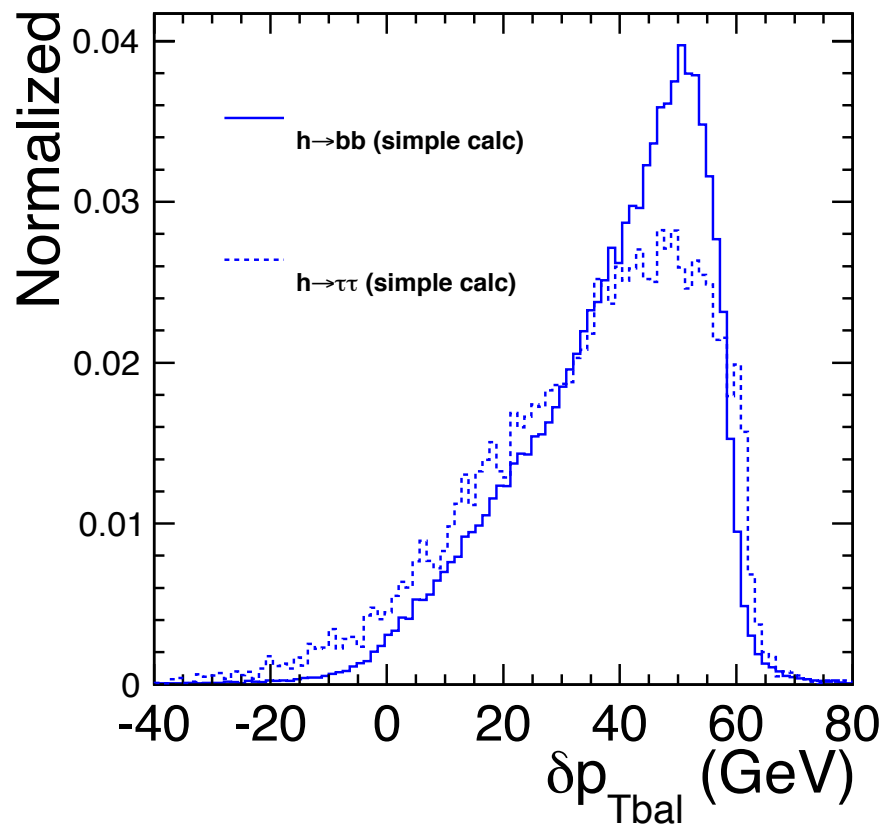


δp_{Tbal} のバイアス排除

- $\delta P_{Tbal} = (\text{レプトン対の} p_T) - (\text{高エネルギー}\gamma\text{の} p_T)$
- 単なる高エネルギーという条件ではヒッグス崩壊モードにバイアス



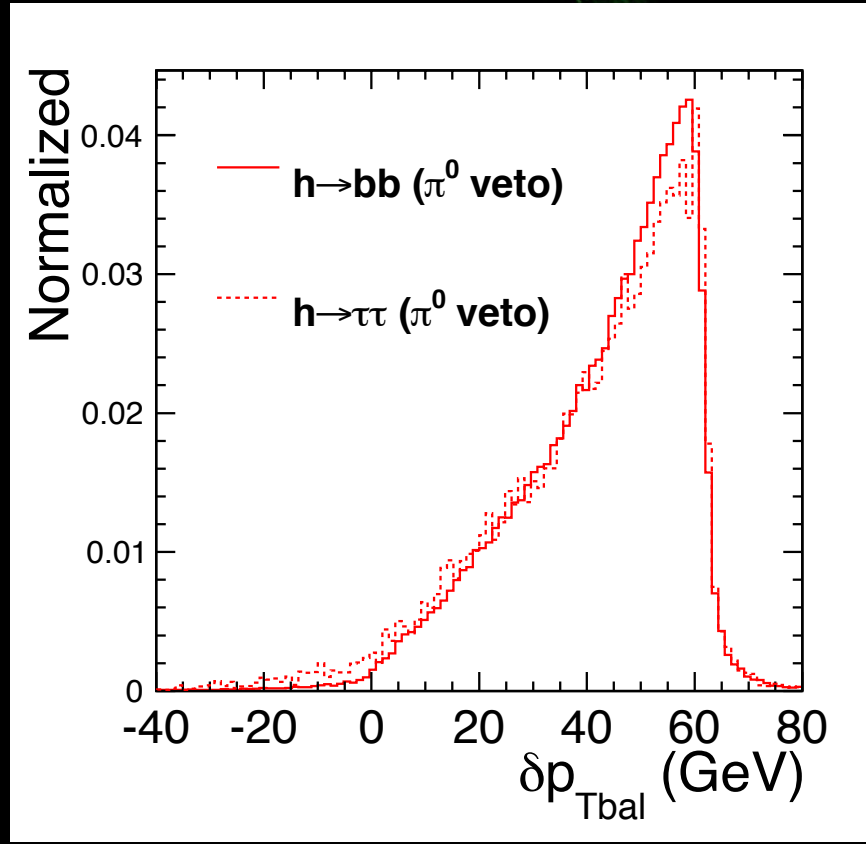
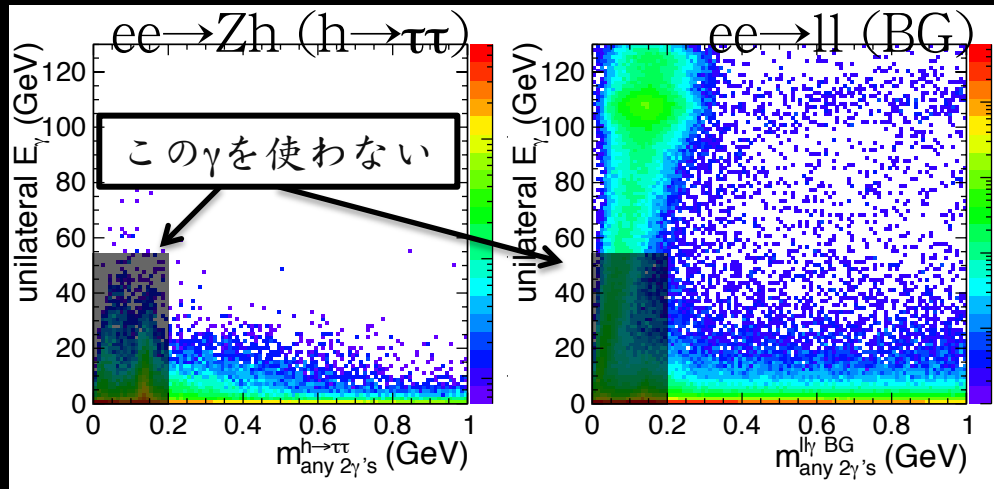
この γ を拾うと、 $h \rightarrow \tau\tau$ の δp_{Tbal} カットのみにeff.が下がる👉



使用する γ の制限



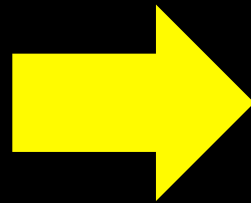
- $h \rightarrow \tau\tau$ の γ は大量の π^0 中間子が原因
 - 2γ の不変質量 $\sim m_\pi$ にピーク
 - 崩壊を重ねるのでエネルギーはあまり大きくない



使用する γ に課す条件

$m_{2\gamma} > 0.2$ [GeV]

or $E_\gamma > 60$ [GeV]



BGを排除しつつバイアスを低減

di-lepton events

$\cos\theta_{\text{missing}}$



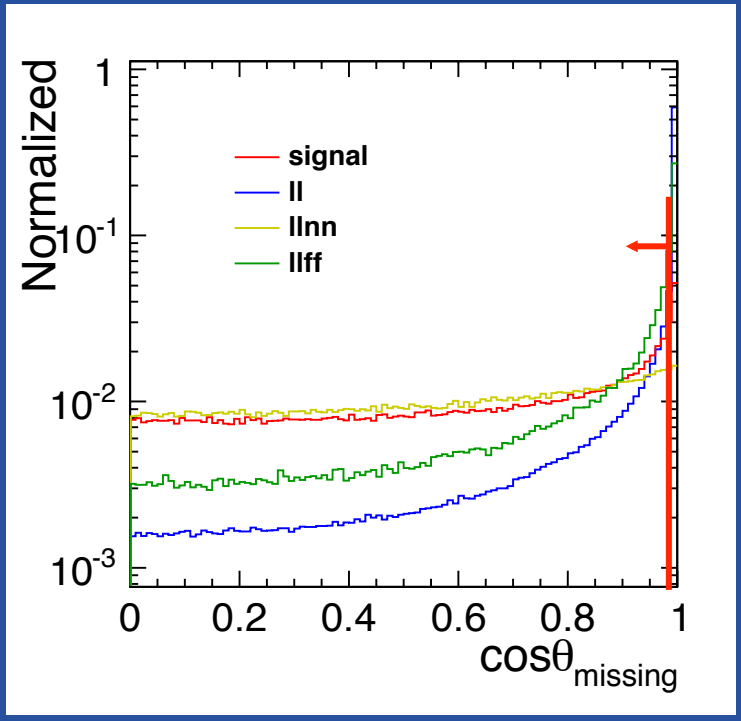
$p_{Tdl} > 20 \text{ GeV}$

$M_{dl} \in (80, 100) [\text{GeV}]$

$\cos\theta_{\text{miss}} \in (0.2, 3.0)$

$M_{\text{miss}} \in (10, 10) [\text{GeV}]$

$\cos\theta_{\text{miss}} < 0.99$



$\cos\theta_{\text{missing}} < 0.99$ or
 $|\cos\theta_{dl}| < 0.8$

検出されない粒子の角度分布

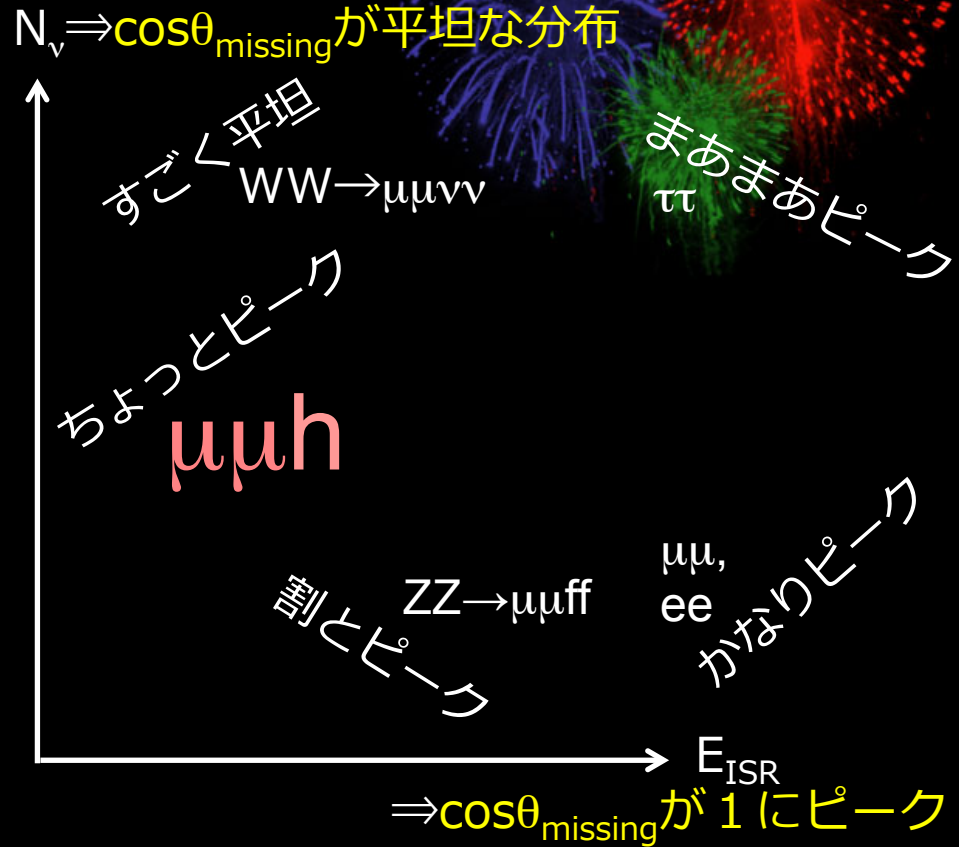
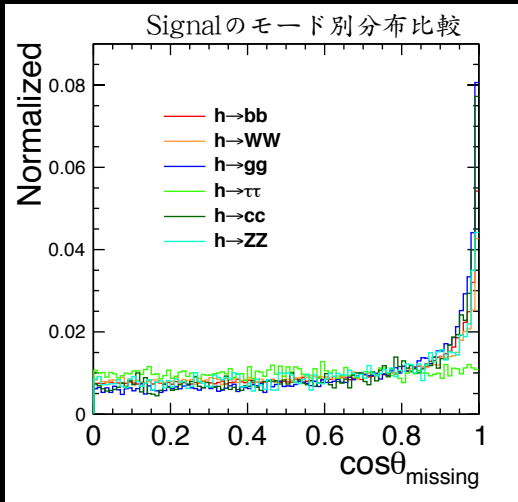
$\mathbf{p}_{\text{miss}} = -\sum \mathbf{p}_{\text{obs}}$ の $\cos\theta$

llff BGなどは $\cos\theta_{\text{missing}} = 1$ に
 鋭いピークを持つ

$\cos\theta_{\text{missing}}$ 分布とSignalの偏り

- 終状態に ν を含むと平坦
- 粒子が軽いと1にピーク
 ∴ E_{ISR} 制限が弱い
- Signalは基本的に ν を出さないので1にピーク
 ☆ $\text{I}+\text{I}$ の方が鋭いので significanceは向上する

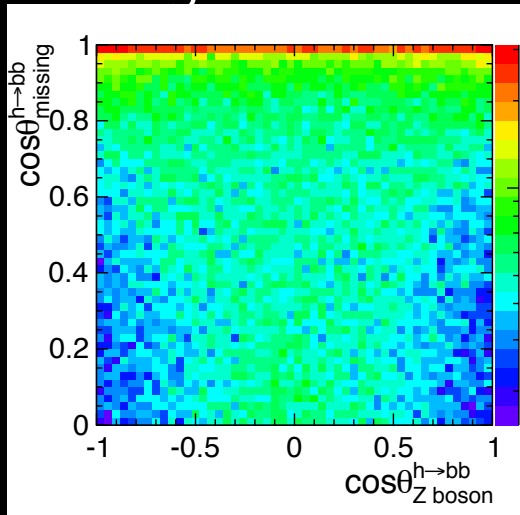
$h \rightarrow \tau\tau$ モードは ν を頻繁に出すので平坦な分布 \uparrow を持ってしまう



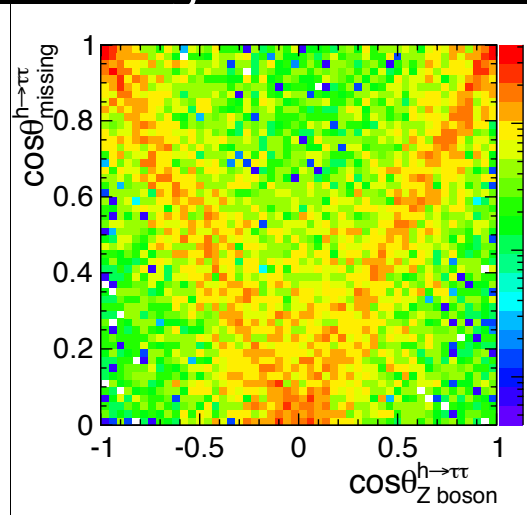
単に $\cos\theta_{\text{missing}}$ だけかけると、 $h \rightarrow \tau\tau$ だけ検出効率が高くなる
 → Zの生成角度 $\cos\theta_{\text{dl}}$ で緩和

$\cos\theta_{\text{missing}}$ 選別の緩和

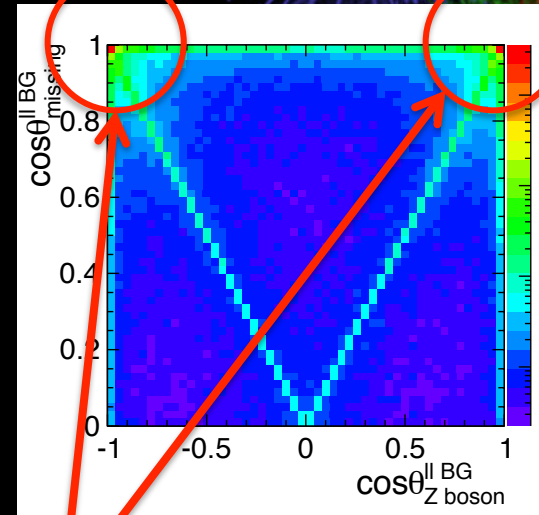
Signal $h \rightarrow b\bar{b}$



Signal $h \rightarrow \tau\tau$

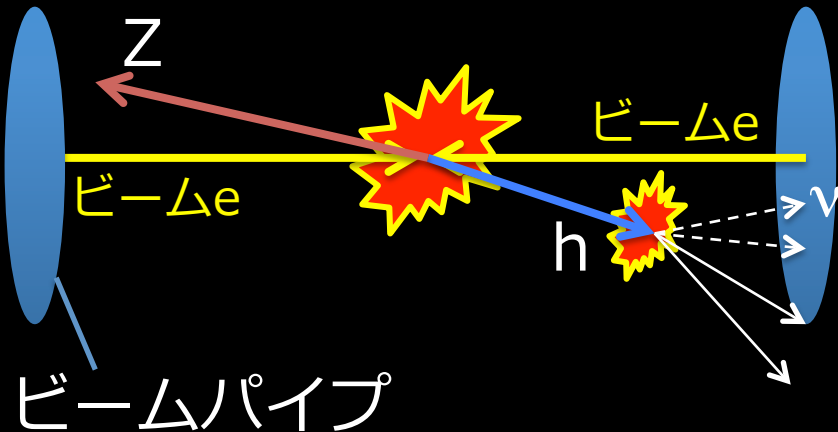


$|+|-$ BG



ここ以外を残す; $\cos\theta_{\text{missing}} < 0.99$
or $|\cos\theta_{\text{dl}}| < 0.8$

- ヒッグス(とZボソン)が前後方向に生成される
=> ν がブーストされビームパイプに多く入射するようなイベントならバイアスはない



di-lepton events

反跳質量 M_{recoil}



$p_{Tdl} > 20 \text{ GeV}$

$M_{dl} \in (80, 100) [\text{GeV}]$

$\cos\theta_{\text{miss}} \in (0.2, 3.0)$

$M_{\text{recoil}} \in (10, 10) [\text{GeV}]$

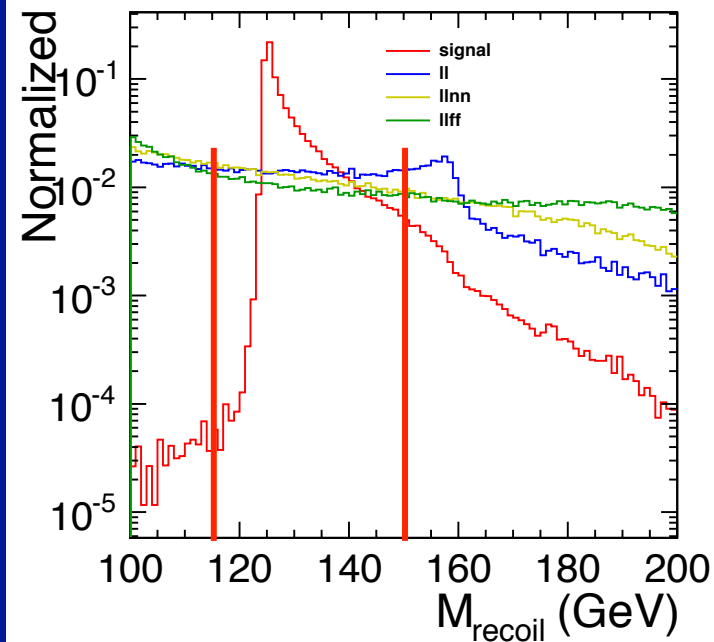
$M_{\text{recoil}} \in (115, 150) [\text{GeV}]$

フィッティングに適した領域を設定

$\cos\theta_{\text{missing}} < 0.99$

$M_{\text{recoil}} \in (115, 150) [\text{GeV}]$

Likelihood



di-lepton
events

尤度関数 Likelihood



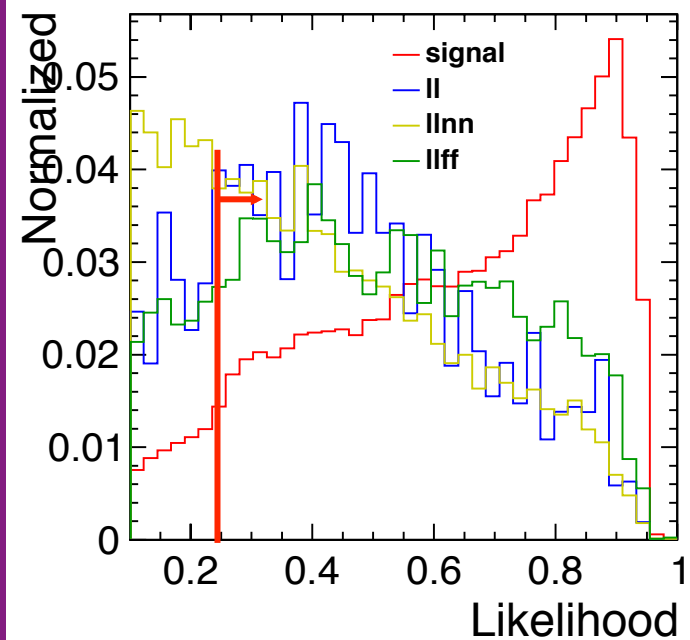
$p_{Tdl} > 20 \text{ GeV}$

$M_{dl} \in (80, 100) [\text{GeV}]$

$\cos\theta_{op} \in (0.2, 3.0)$

Likelihood

入力変数(PDF)から信号尤度を計算
ただしBGがSignalピーク付近に
バンプを持たないように注意



$\cos\theta_{\text{missing}} < 0.99$

$M_{\text{recoil}} \in (115, 150) [\text{GeV}]$

Likelihood

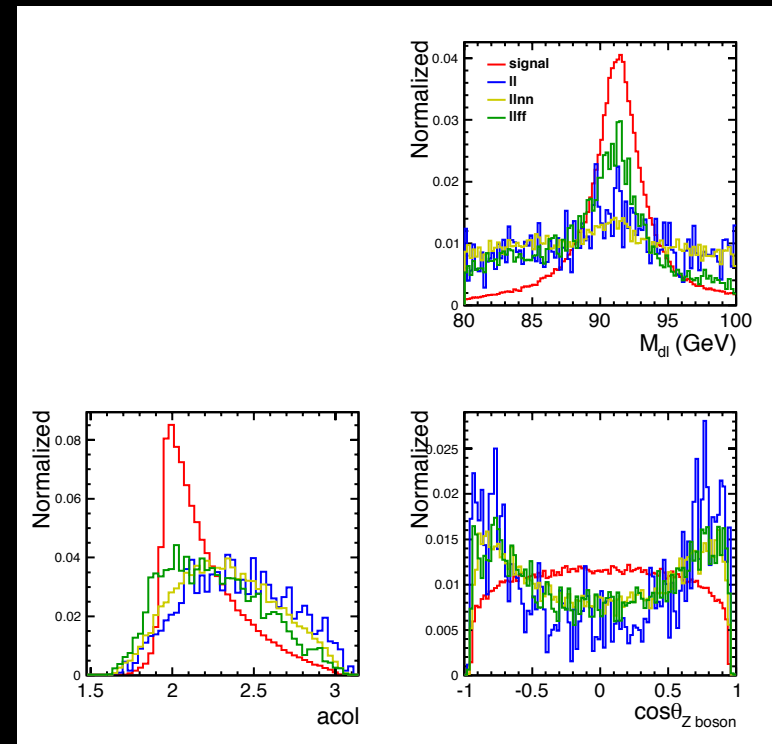
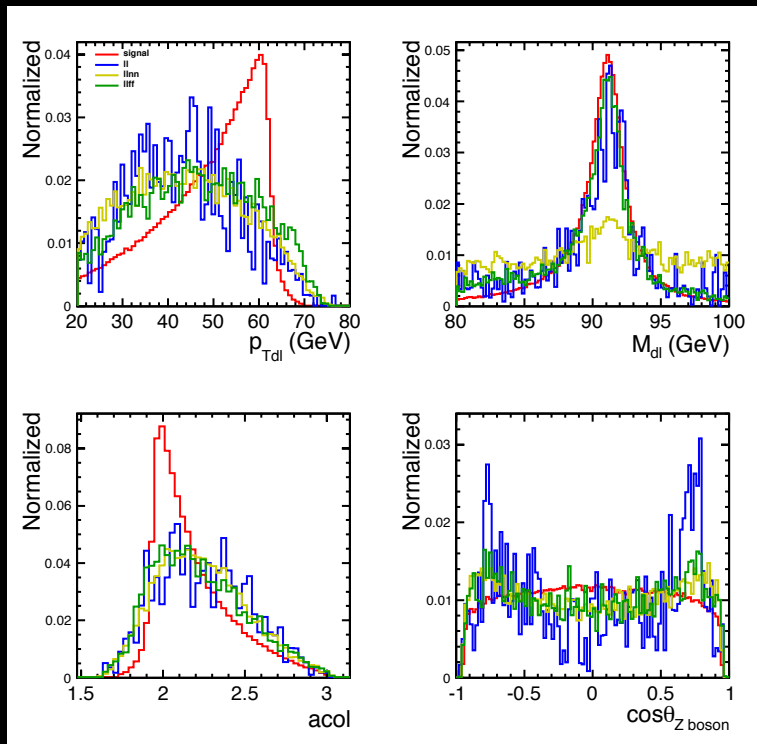
Likelihoodの入力変数

■ $\mu\mu h$ チャンネル

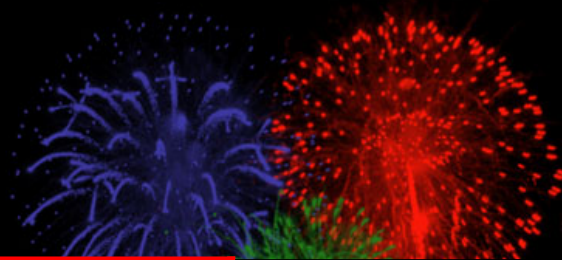
- p_{Tdl}
 - M_{dl}
 - Acolinearity
 - $\cos\theta_{dl}$
- 定義に使うPDFの $M_{recoil} \in (115, 150)$

■ $ee h$ チャンネル

- M_{dl}
 - Acolinearity
 - $\cos\theta_{dl}$
- $M_{recoil} \in (120, 140)$



BG排除結果



左巻き $P(e^-, e^+) = (-0.8, +0.3)$

$\mu\mu h$	signal	ll	ll $\nu\nu$	llff
No Cut	2603	3245302	507166	390041
After Cut	1588	427	2049	1269
eeh	signal	ll	ll $\nu\nu$	llff
No Cut	2729	7831081	520624	404279
After Cut	1101	1256	1781	833

右巻き $P(e^-, e^+) = (+0.8, -0.3)$

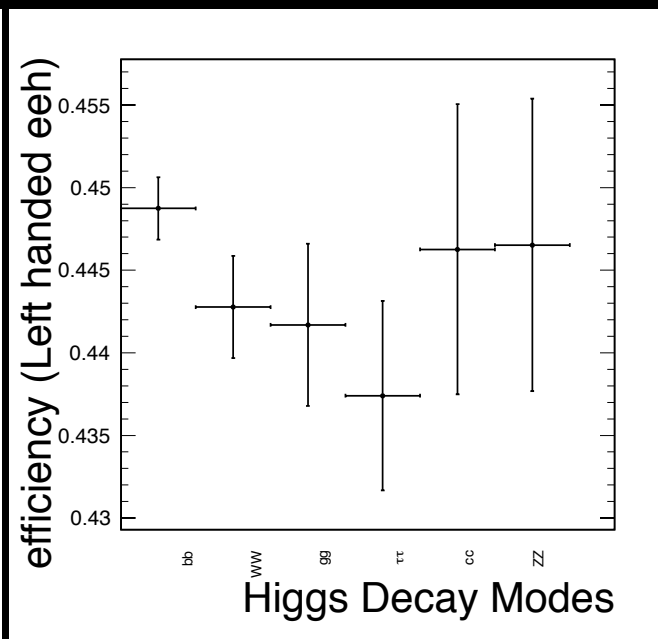
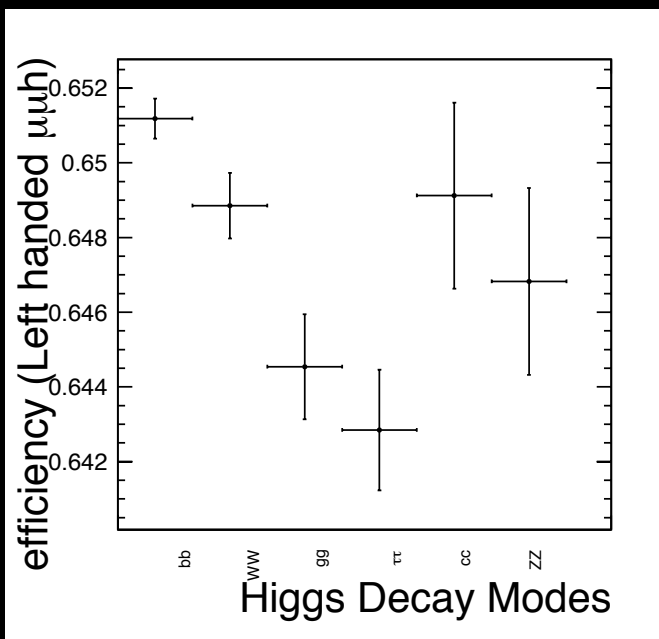
$\mu\mu h$	signal	ll	ll $\nu\nu$	llff
No Cut	1756	2591926	51768	330876
After Cut	1113	287	323	650
eeh	signal	ll	ll $\nu\nu$	llff
No Cut	1844	7343955	52853	358595
After Cut	742	927	230	393

$\epsilon(115, 150)$

Signal検出効率(ヒッグス崩壊別)



- モード別のずれは1%程度
- 断面積の統計誤差(結果の項)は3%程度なので、
モード依存性は統計誤差に比べて小さい



eff.のずれ
< 統計誤差

μ チャンネル左巻き

eチャンネル左巻き

準モデル非依存解析

$\mu\mu h$	signal	$\mathbb{1}$	$\mathbb{1}\nu\nu$	$\mathbb{1}ff$	others
1500	427	2049	1269	7	
1256	1781	833	4		

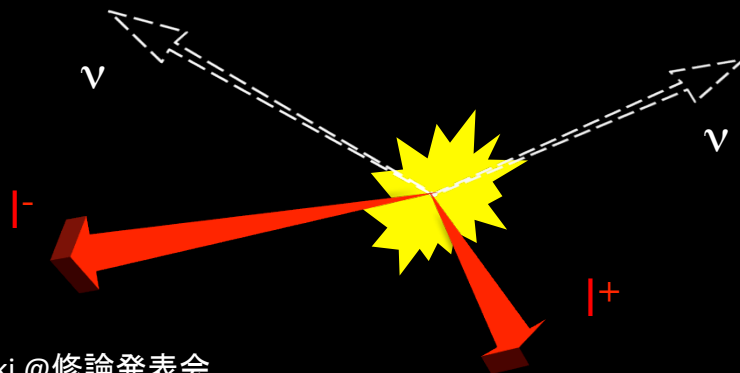
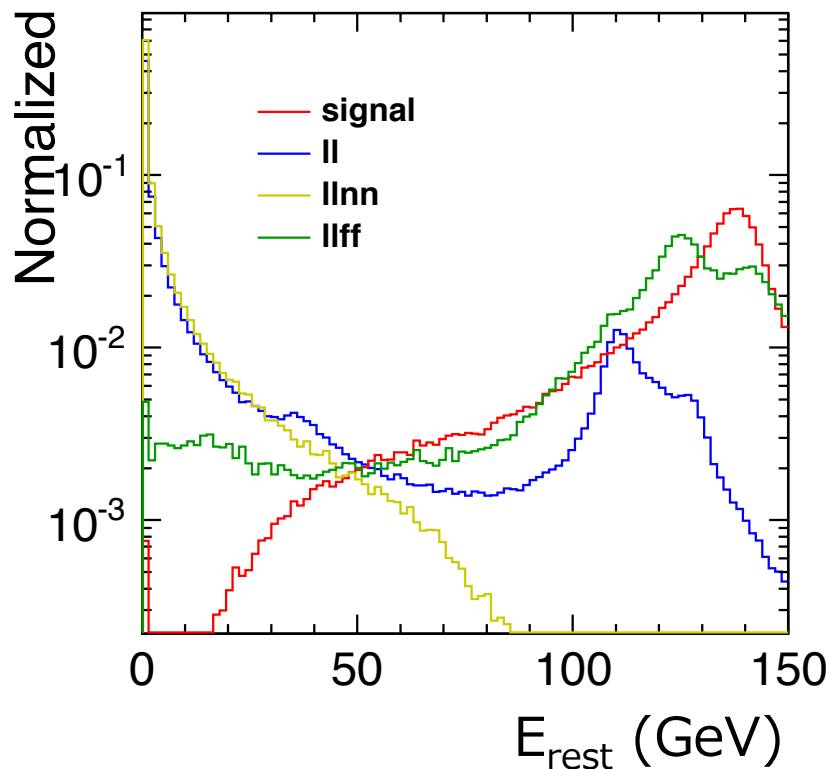
左巻き偏極だとニュートリノを含むBGが支配的な傾向

427	2049	1269	7
-----	------	------	---

1256	1781	833	4
------	------	-----	---

1256	1781	833	4
------	------	-----	---

- $\mathbb{1}\nu\nu$ BGを排除するために E_{rest} を用いたカットを採用
- $E_{\text{rest}} \equiv E_{\text{detected}} - E_{\text{di-lepton}} > 5\text{GeV}$
- ヒッグスのinvisible decayのeff.を下げるが他の解析から測定できる
- 非常に緩い選別をかけることでバイアスを最小限に抑える(準モデル非依存)

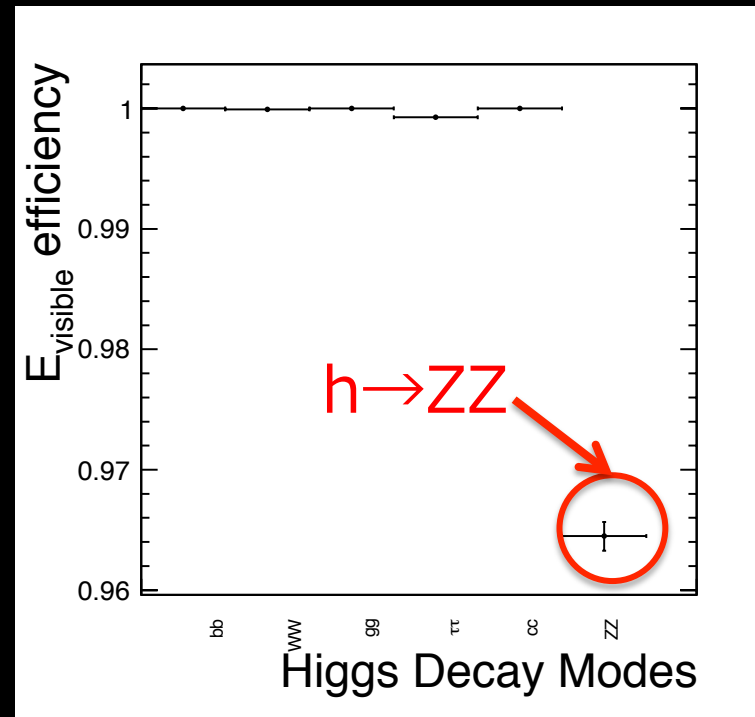


準モデル非依存解析

$\mu\mu h$	signal	\parallel	$\parallel_{\nu\nu}$	\parallel_{ff}	others
\sim Likelihood	1588	427	2049	1269	7
E_{rest}	1586	427	641	1269	7

eeh	signal	\parallel	$\parallel_{\nu\nu}$	\parallel_{ff}	others
\sim Likelihood	1101	1256	1781	833	4
E_{rest}	1100	1256	671	833	4

- $\parallel_{\nu\nu}$ のBGに対して効果大
- ただし $h \rightarrow ZZ$ モードにバイアス
- $h \rightarrow ZZ$ のBR(SMで2.66%)は十分小さいので、カットの系統誤差は小さくできる



解析の流れ



■レプトン選別

- $Zh \rightarrow l+l+h$ のZを再構成
- 最適化のために条件を設ける

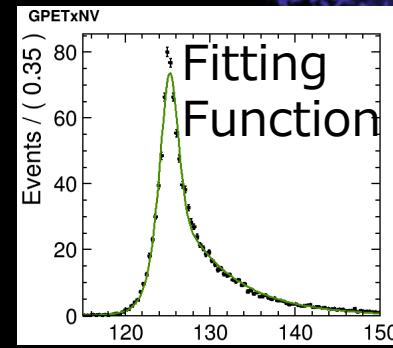
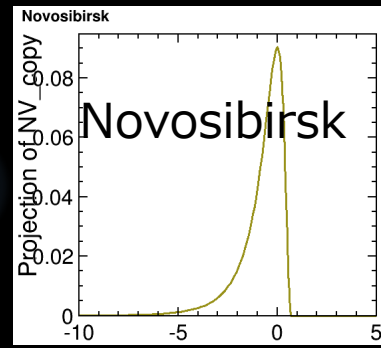
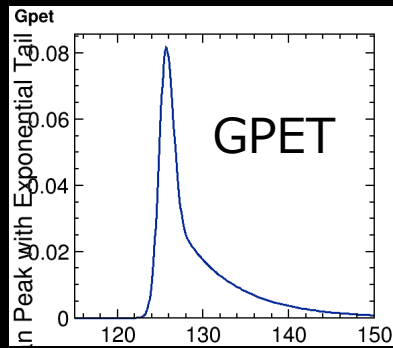
■BG排除

- レプトン対に条件をかけてBGを排除
- Signalのeff.はヒッグスの崩壊モードに非依存となるよう条件を設定

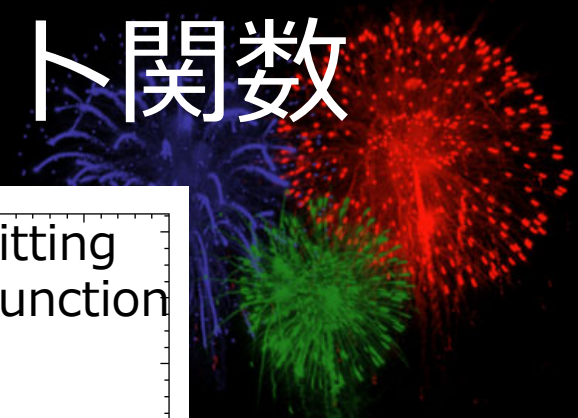
■フィット & Toy-MC

- 反跳質量分布をフィットしたPDFを元に偽実験 (Toy-MC)を繰り返し、**signalのイベント数・ヒッグス質量の統計誤差**を見積もる

反跳質量分布フィット関数



※eeh distribution



■ Signalのフィット関数はGPETとNovosibirskの 畳み込み関数

- GPET: ガウス関数ピークと指数関数テールの組合せ
- Novosibirsk : カロリメータの応答を表現

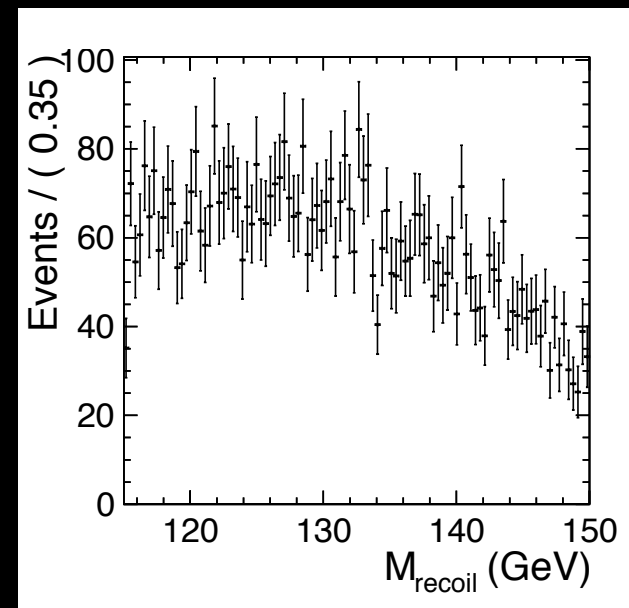
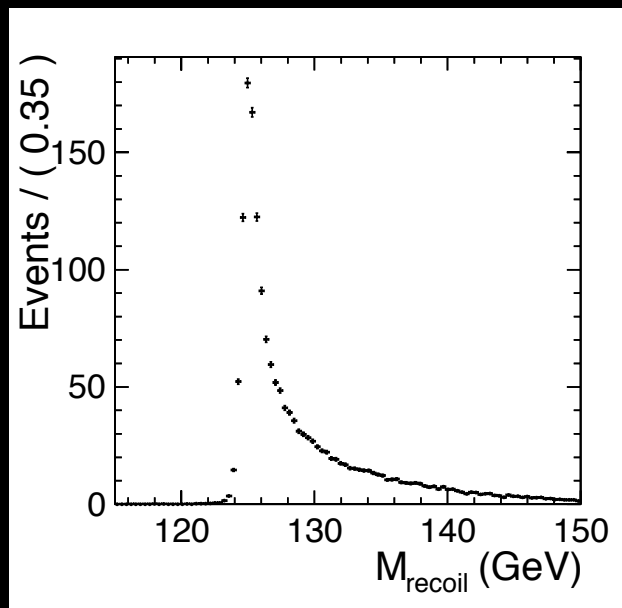
[Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 441 (2000) 401-426]

■ BGは3次関数でフィット

偽実験解析



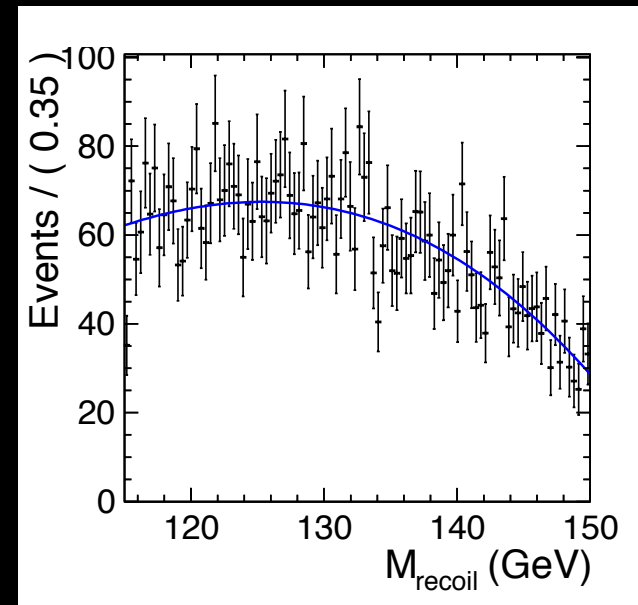
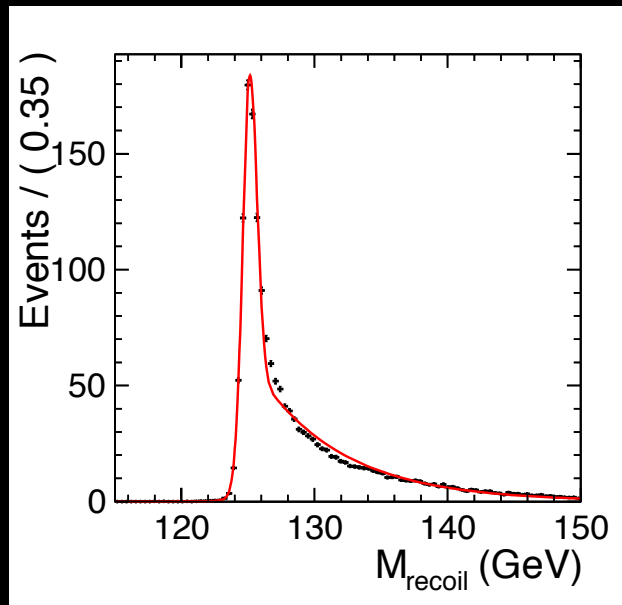
1. データセットがある



偽実験解析



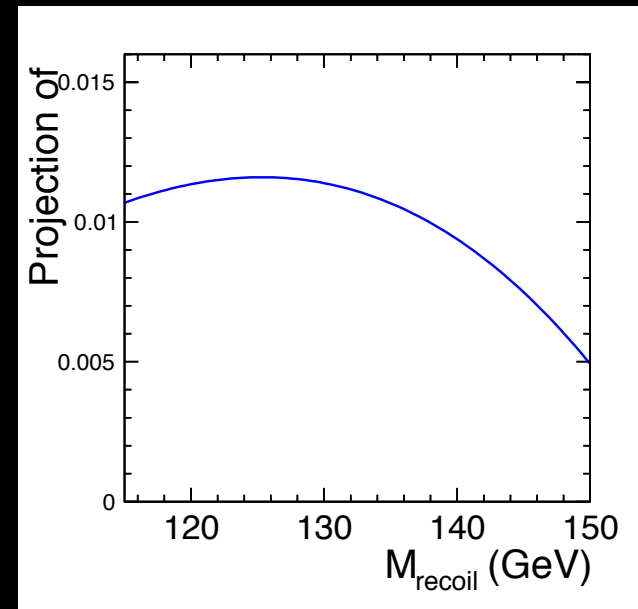
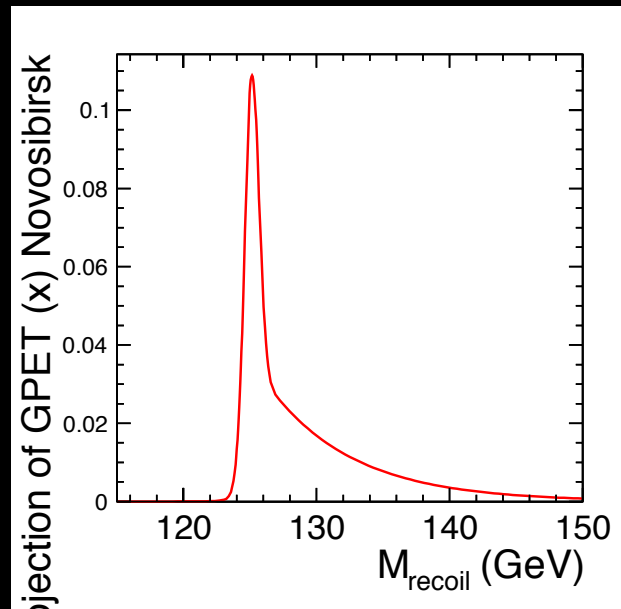
1. データセットがある
2. 前述の関数でフィットする



偽実験解析



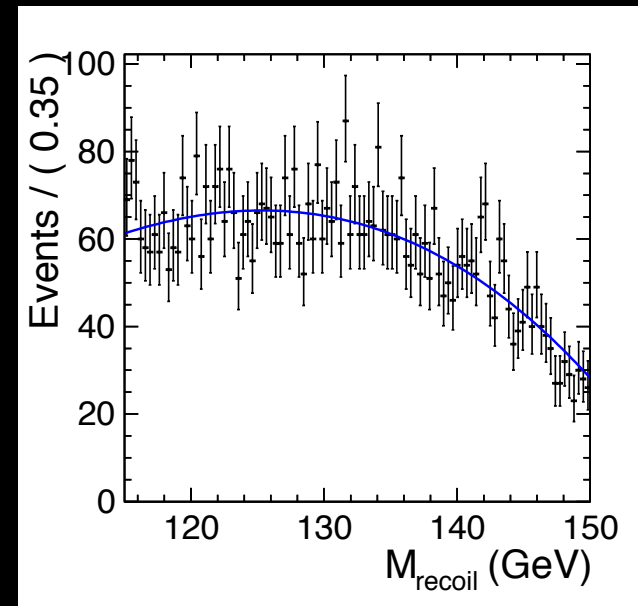
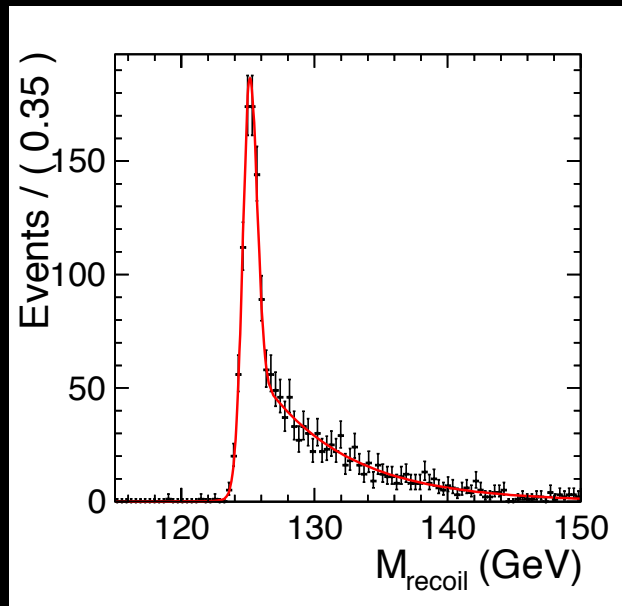
1. データセットがある
2. 前述の関数でフィットする
3. PDFが手に入る



偽実験解析



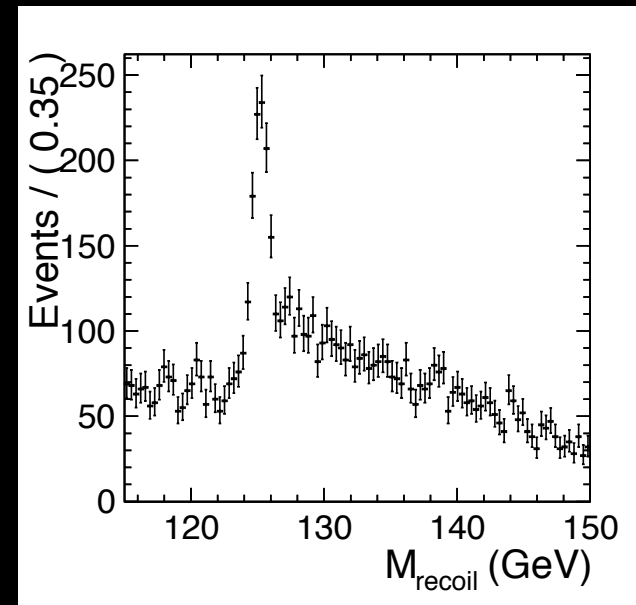
1. データセットがある
2. 前述の関数でフィットする
3. PDFが手に入る
4. PDFを元に乱数でイベントを生成する (Toy-MC)



偽実験解析



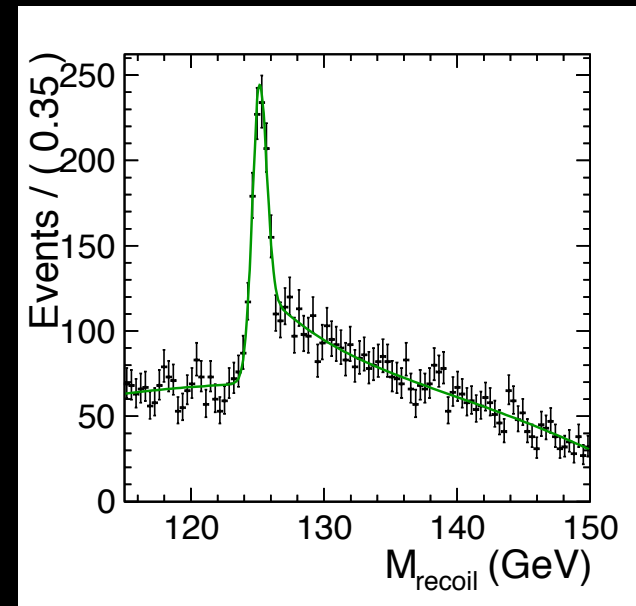
1. データセットがある
2. 前述の関数でフィットする
3. PDFが手に入る
4. PDFを元に乱数でイベントを生成する (Toy-MC)
5. SignalとBGを合体、擬似的なILC実験の結果を生成



偽実験解析



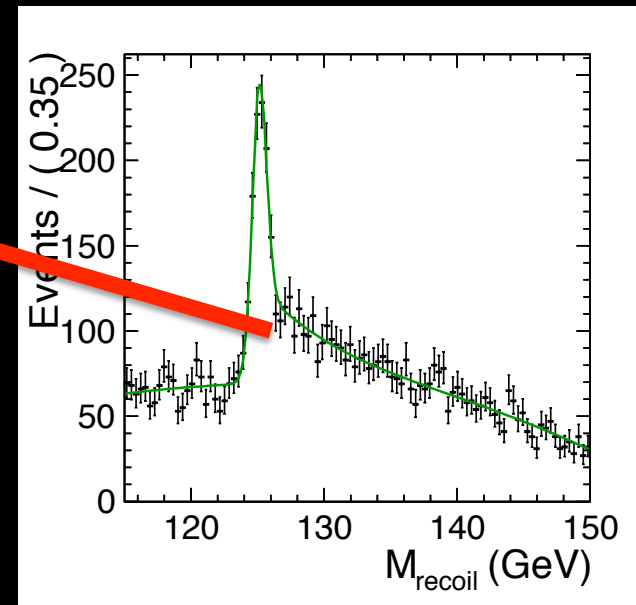
1. データセットがある
2. 前述の関数でフィットする
3. PDFが手に入る
4. PDFを元に乱数でイベントを生成する (Toy-MC)
5. SignalとBGを合体、擬似的なILC実験の結果を生成
6. Signal+BGのPDF(イベント数と中心値のみ浮動)で分布をフィット



偽実験解析



1. データセットがある
2. 前述の関数でフィットする
3. PDFが手に入る
4. PDFを元に乱数でイベントを生成する (Toy-MC)
5. SignalとBGを合体、擬似的なILC実験の結果を生成
6. Signal+BGのPDF(イベント数と中心値のみ浮動)で分布をフィット
7. 1実験分のパラメータを得る (イベント数と中心値)



偽実験解析



1. データセットがある
2. 前述の関数でフィットする
3. PDFが手に入る
4. PDFを元に乱数でイベントを生成する (Toy-MC)
5. SignalとBGを合体、擬似的なILC実験の結果を生成
6. Signal+BGのPDF(イベント数と中心値のみ浮動)で分布をフィット
7. 1実験分のパラメータを得る (イベント数と中心値)
8. 4~7を繰り返し、Signalのイベント数と M_{recoil} の中心値のヒストグラムを得る
➡ 幅がヒッグスの断面積と質量の統計誤差に対応する

偽実験

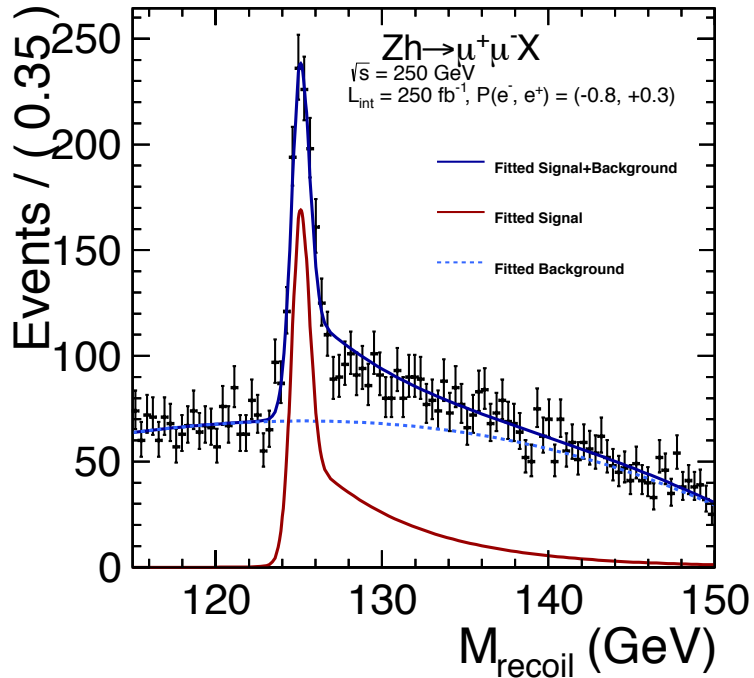


結果

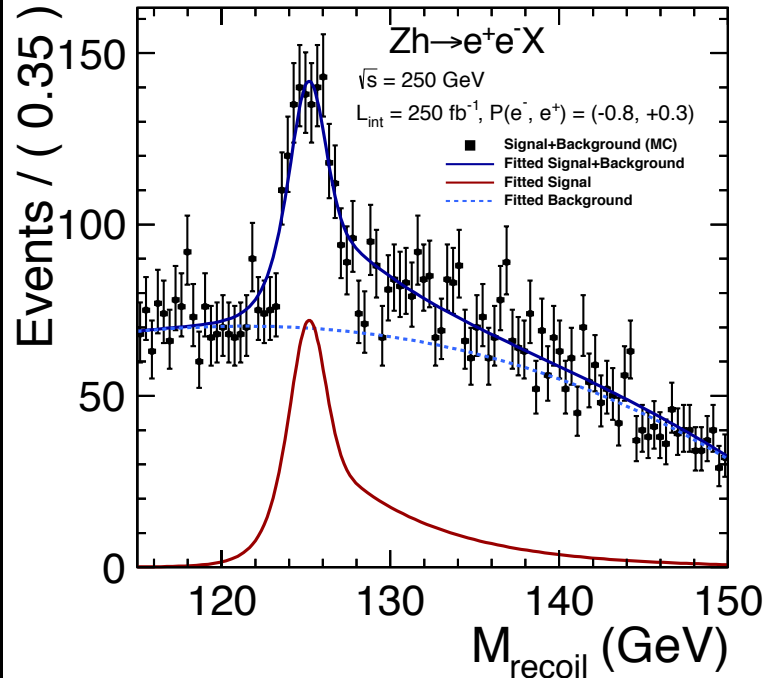
~ Results ~

解析結果 (左巻き偏極)

$\mu\mu h$



$ee h$



$L=250\text{fb}^{-1}$
 $P(e^-, e^+) = (-0.8, +0.3)$

$\mu\mu h$

$ee h$

combined

$\Delta\sigma/\sigma$

4.2%

6.2%

3.4%

$\Delta\text{mass} [\text{MeV}]$

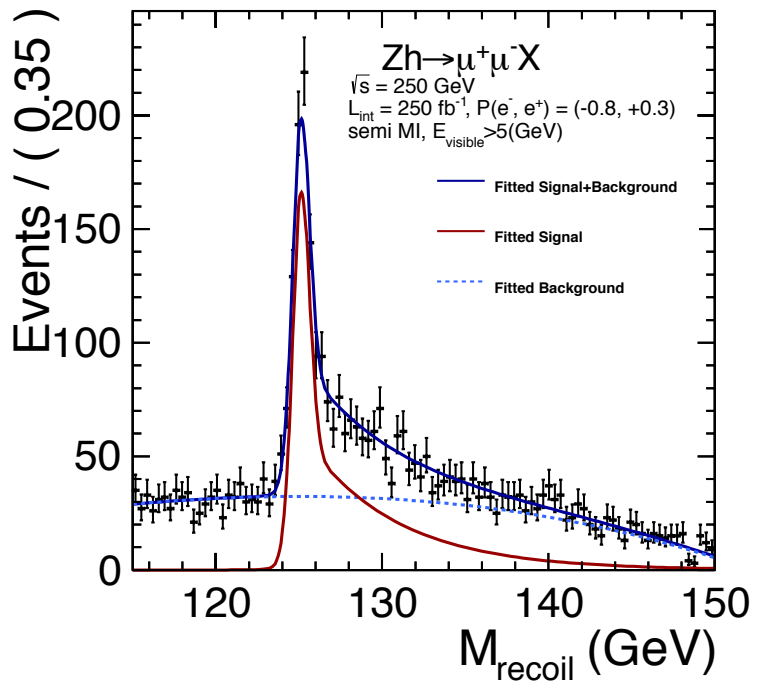
34

117

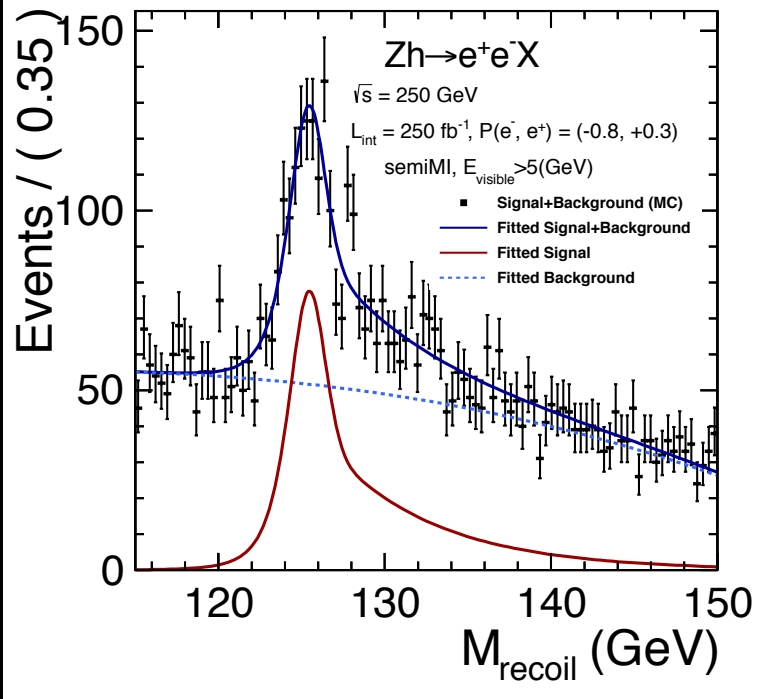
32

解析結果 (準モデル非依存解析)

$\mu\mu h$



$ee h$



$L=250\text{fb}^{-1}$
 $P(e^-, e^+) = (-0.8, +0.3)$
 $E_{\text{visible}} > 5(\text{GeV})$

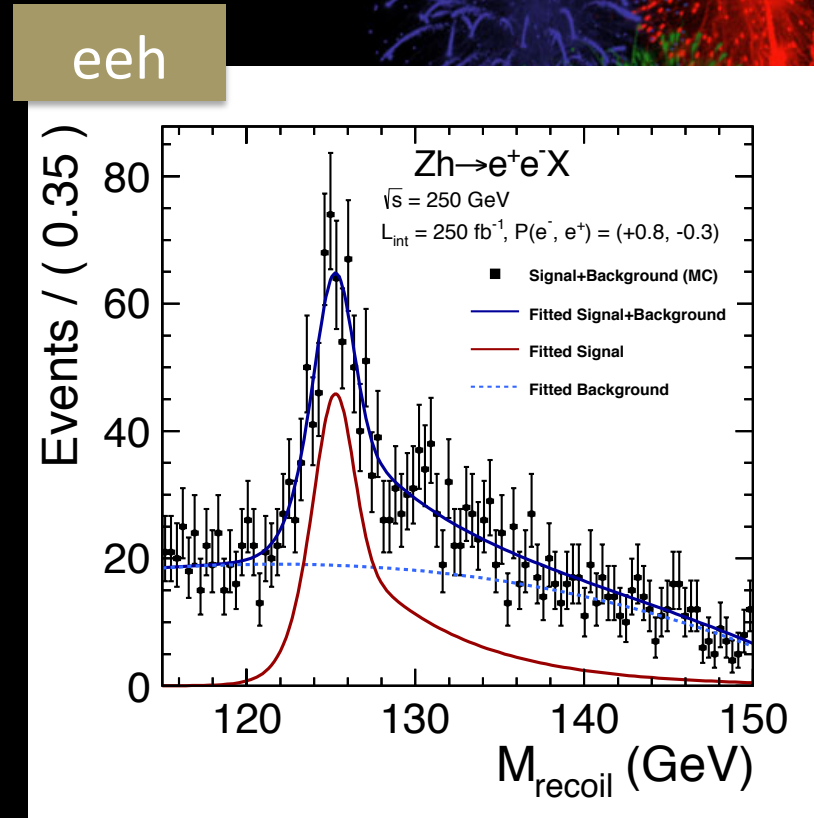
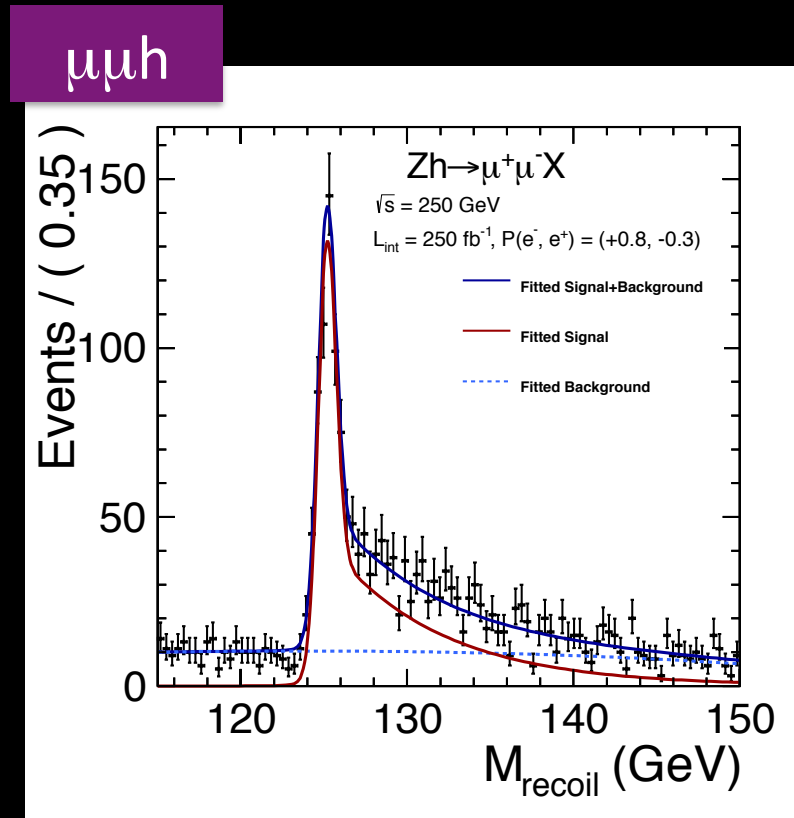
$\mu\mu h$

$ee h$

combined

$\Delta\sigma/\sigma$	3.8%	5.5%	3.1%
$\Delta\text{mass} [\text{MeV}]$	33	107	31

解析結果 (右巻き偏極)



$L = 250 \text{ fb}^{-1}$
 $P(e^-, e^+) = (+0.8, -0.3)$

$\mu\mu h$

eeh

combined

$\Delta\sigma/\sigma$

3.8%

6.2%

3.2%

$\Delta\text{mass} [\text{MeV}]$

31

125

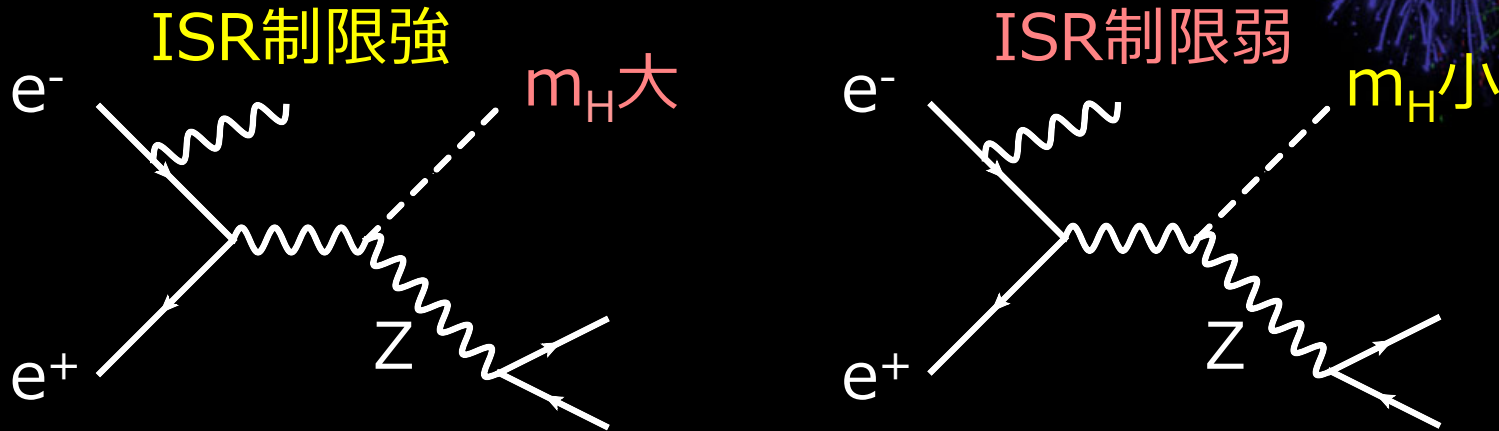
30



質量解析

~ Mass Template Method ~

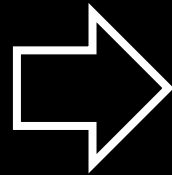
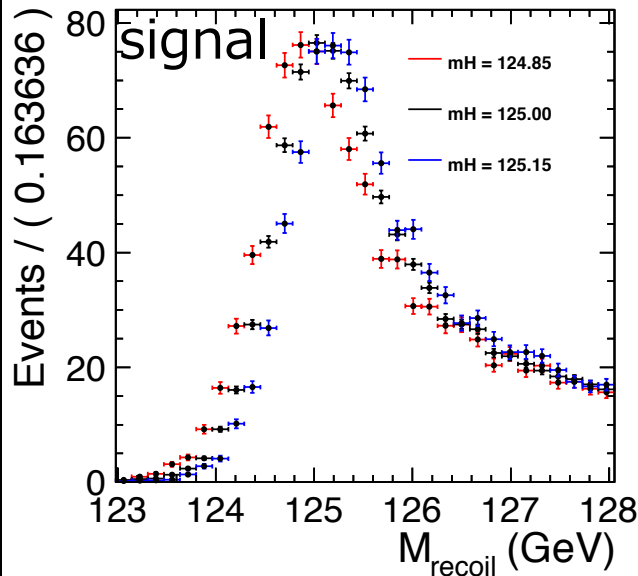
偽実験解析における質量測定の問題点



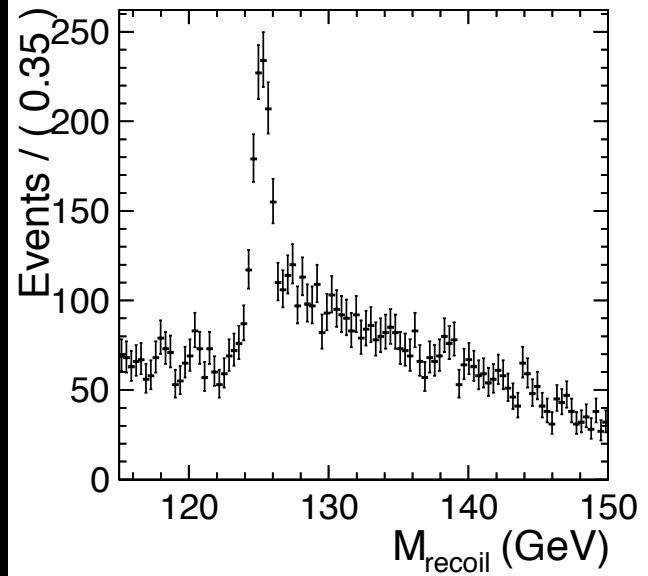
- GPET中心値は質量を正しく表せない(pull分布にずれ)
- m_H はPDFのテールに影響を与える
 - ISRにかかる制限が変わるため
- 偽実験解析はビームスペクトラムによる系統誤差を考慮できない
- ISRなどによる分布の違いを含んだ解析が必要
 - ➔ **Mass Template Method**

質量テンプレート法

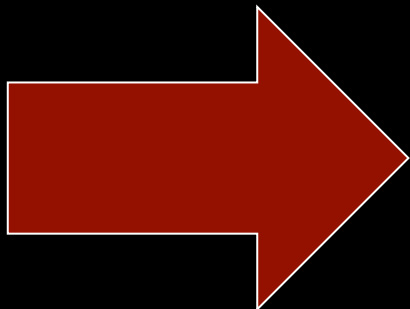
異なるヒッグス質量でシミュレーションした
テンプレートサンプル ($m_H = 124.85 \sim 125.20 \text{ GeV}$)



M_{recoil} を
フィット

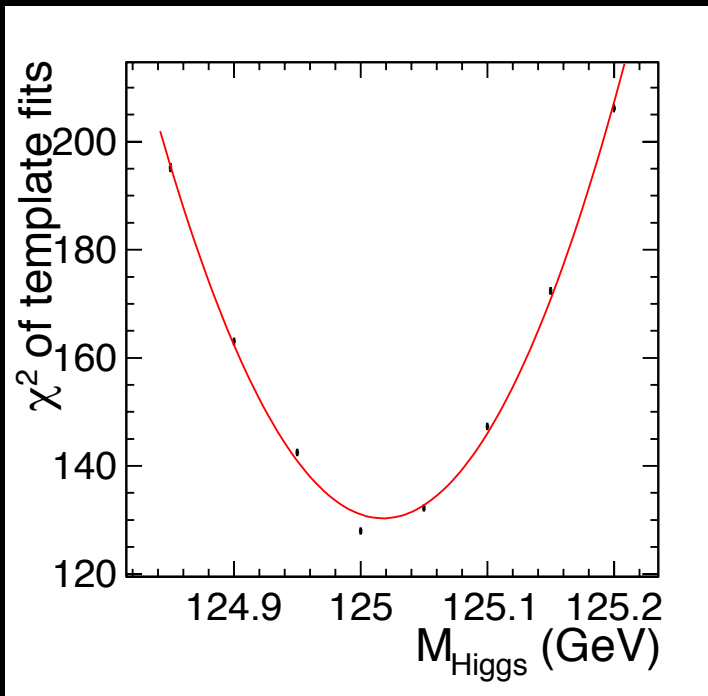


テンプレートPDFの m_H が
真値に近いほど χ^2 は小さい



χ^2 の分布から最尤の m_H を推定

テンプレート法のフィット結果



- χ^2 プロットを2次関数でフィット
- 最小点が m_H の測定値に対応
- χ^2 を+1上昇させる幅が Δmass に対応
- $m_H = 125.018 \pm 0.021 \text{ GeV}$

※ LHCの最新の結果： $m_H = 125.36 \pm 0.37 \pm 0.18 \text{ GeV}$
と比べて非常に高精度な測定が可能



CP 混合

~ Additional Higgs Search ~

ヒッグスCP混合



- SMではヒッグス h のCPは完全にeven
- SUSYに代表される2HDM(2 Higgs Doublet Model)ではCP oddのヒッグス A がSMのヒッグス h と**量子的混合状態**を取り得る

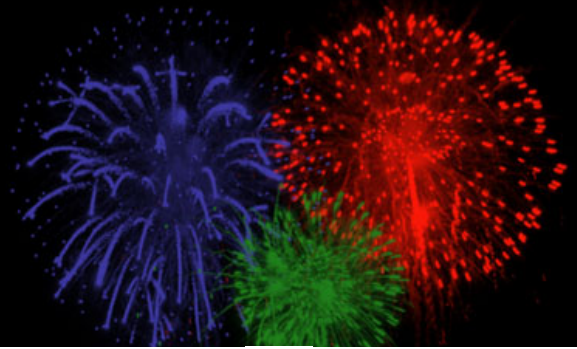
$$M_{\phi Z} = M_{hZ} + \eta \cdot M_{AZ}$$

- その際 $ee \rightarrow Zh$ イベントの $d\sigma/d\cos\theta$ 分布が**前後非対称性**を持つ：

$$\frac{d\sigma}{d\cos\theta} = \frac{G_F^2 M_Z^6 \beta}{16\pi} \frac{1}{D_Z(s)} (v_e^2 + a_e^2) \left[1 + \frac{s\beta^2}{8M_Z^2} (1 - \cos^2\theta) + \eta \frac{v_e a_e}{v_e^2 + a_e^2} \frac{2s\beta}{M_Z^2} \cos\theta + \eta^2 \frac{s^2 \beta^2}{4M_Z^4} \left(1 - \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) \right]$$

→ **Zボソンの生成角度の非対称性から η を計算**

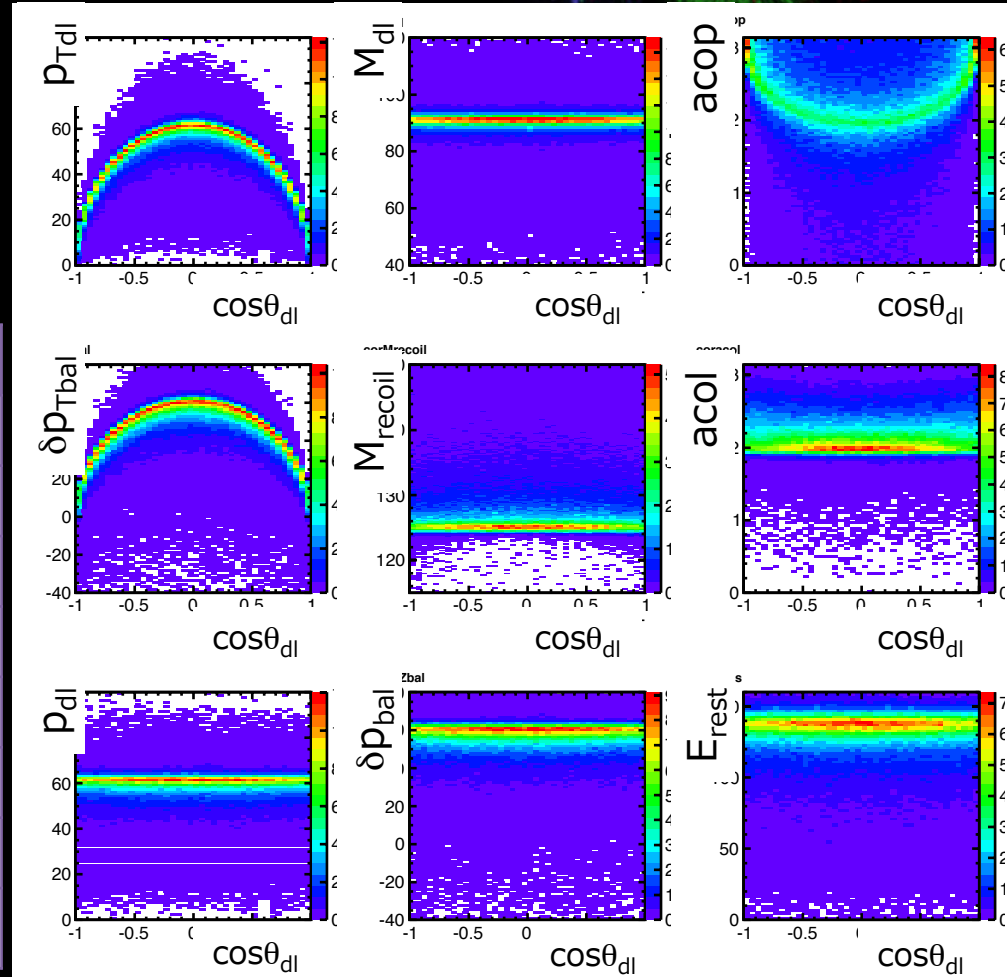
解析条件



■ 解析条件は反跳解析と同様

– Signalは $e^+e^- \rightarrow Zh \rightarrow \mu\mu h$

■ ただし見る分布は $\cos\theta_{dl}$ なので、BG排除は $\cos\theta_{dl}$ と相関のないもので行う

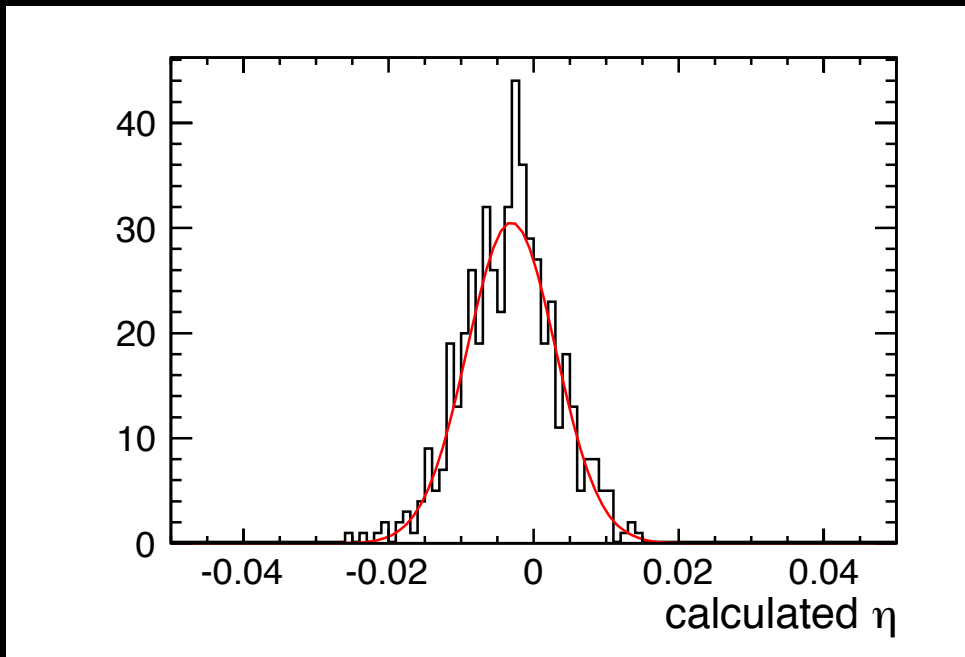


反跳質量	CP混合
P_{Tdl}	P_{dl}
M_{dl}	M_{dl}
$acop$	$acol$
δP_{Tbal}	δP_{bal}
$\cos\theta_{missing}$	
M_{recoil}	M_{recoil}
Likelihood	
$E_{visible}$	$(E_{visible})$ not used now

CP混合解析(SM)



- SM($\eta=0$)のサンプルを用いる
 - $\cos\theta_{dl}$ 分布を M_{recoil} 分布のフィットにより取得
 - MCから得られた $eff.$ による補正を行う
 - $\cos\theta_{dl}$ を2次関数でフィットし理論式から η を計算
- 偽実験を用いた解析により統計誤差を見積もる



$$\eta = (-3.03 \pm 6.09) \times 10^{-3}$$



総括

~ Summary ~

まとめ(1/2)



- 反跳を用いたヒッグス精密測定は、国際リニアコライダーにおける最も重要な物理のひとつである
- 本研究の反跳質量解析により高い精度で**Zh生成断面積・ヒッグス質量**を測定可能であり、結合定数の精密測定から**BSMの検証**を行うことができる

$\mu\mu h, eeh@250\text{GeV}$		combined	
		左巻き	右巻き
モデル非依存	$\Delta\sigma/\sigma$	3.4%	3.2%
	$\Delta\text{mass} [\text{MeV}]$	34	31
準モデル非依存	$\Delta\sigma/\sigma$	3.1%	
	$\Delta\text{mass} [\text{MeV}]$	31	

まとめ(2/2)



- またテンプレートサンプルを用いることにより
ビームスペクトラムの効果を含めてヒッグス質量
を測定することができる
- 質量テンプレート法によりヒッグス質量の測定は
 $\Delta m_{\text{Higgs}} = 21 \text{ MeV}$ の精度で可能である
- Zボソンの生成角度の非対称度から、CP evenの
ヒッグスhとCP oddのヒッグスAとの混合 η を測定
可能である
- この手法によりSM($\eta=0$)の場合の η 測定は、
 $\Delta\eta = 6.09 \times 10^{-3}$ の精度であることが分かった



ご清聴ありがとうございました
~ Thank you for listening ~



裏方

~ The Backup Slides ~

Tohoku University



• Laboratory •

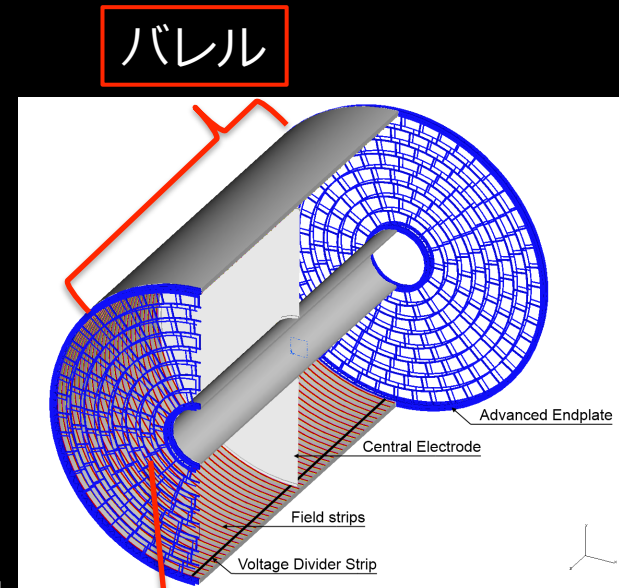
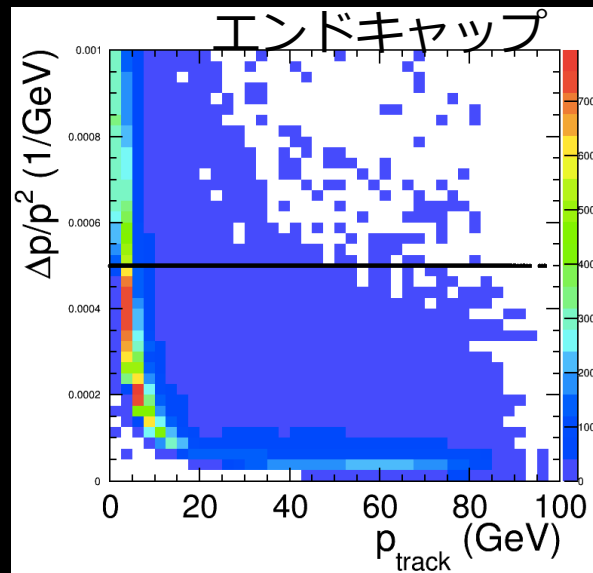
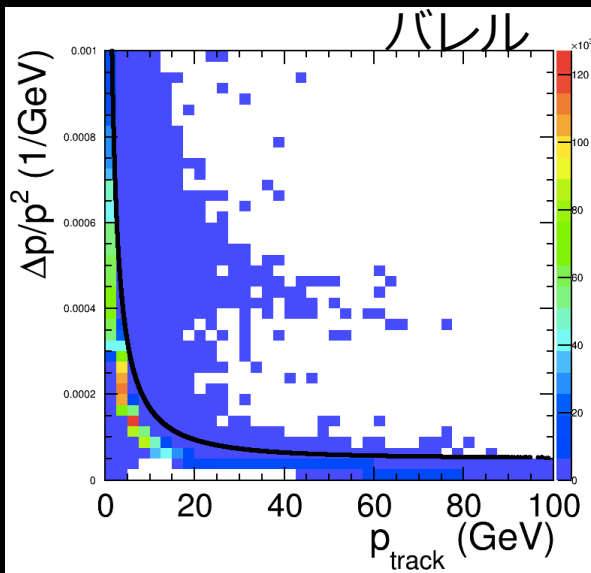
質の悪いトラックの除去



バレルと
エンドキャップで
異なるカット

■ エラーの大きいトラックは除く

- $dp / p^2 < 2.5 \times 10^{-5} \oplus 8 \times 10^{-4} / p$
(for $\cos\theta < 0.78$)
- $dp / p^2 < 5 \times 10^{-4}$
(for $\cos\theta > 0.78$)



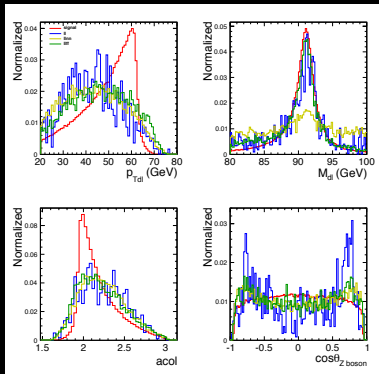
クオリティの高いトラックを厳選できる

エンドキャップ

Likelihoodの入力変数

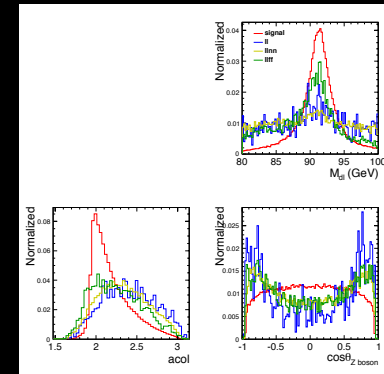
■ $\mu\mu h$ チャンネル

- 横運動量 p_{Tdl}
- 不変質量 M_{dl}
- レプトン対角度 Acolinearity
- Zボソン生成角度 $\cos\theta_{Z\text{ boson}}$
- 定義に使うPDFの $M_{\text{recoil}} \in (115, 150)$

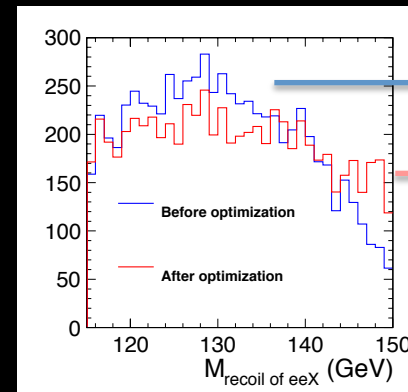


■ eehチャンネル

- M_{dl}
 - Acolinearity
 - $\cos\theta_{Z\text{ boson}}$
- } detune
- $M_{\text{recoil}} \in (120, 140)$



■ eehチャンネルは $\mu\mu h$ と比較してBG反跳質量分布がSignalピーク付近にバンプを持ちやすいため入力変数を $\mu\mu h$ と変える



→ detune前

→ detune後

カットテーブル



選別項目	信号事象 $\mu\mu h$	背景事象	ll	ll $\nu\nu$	llff	others
No Cut	2603	11266736	3245302	507166	390041	7124227
μ selection	2406	1498071	1304146	127360	65825	740
precut	2278	41430	17200	16286	7874	70
$p_{Tdl} \geq 20$ GeV	2161	30972	9965	14095	6852	59
$M_{dl} \in (80,100)$ GeV	2036	21883	7891	8147	5808	37
$acop \in (0.2,3.0)$	1903	19824	6825	7659	5306	33
$\delta p_{Tbal} \notin (-10,10)$ GeV	1894	14490	1751	7518	5189	33
$\cos \theta_{missing} \leq 0.99 \vee \cos \theta \leq 0.8$	1882	13621	1257	7517	4815	30
$M_{recoil} \in (120,140)$ GeV	1730	5239	536	3116	1575	12
Likelihood ≥ 0.25	1588	3752	427	2049	1269	7

選別項目	信号事象 $\mu\mu h$	背景事象	ll	ll $\nu\nu$	llff	others
No Cut	1756	9303174	2591926	51768	330876	6328604
μ selection	1627	1077417	1017274	13545	46201	397
precut	1540	18118	12073	1883	4137	26
$p_{Tdl} \geq 20$ GeV	1461	12289	7110	1659	3504	16
$M_{dl} \in (80,100)$ GeV	1375	9538	5560	1125	2843	9
$acop \in (0.2,3.0)$	1285	8433	4766	1052	2607	8
$\delta p_{Tbal} \notin (-10,10)$ GeV	1278	4739	1155	1039	2537	8
$\cos \theta_{missing} \leq 0.99 \vee \cos \theta \leq 0.8$	1270	4214	853	1039	2313	8
$M_{recoil} \in (120,140)$ GeV	1166	1486	345	391	747	3
Likelihood ≥ 0.18	1113	1263	287	323	650	3

$\mu\mu h$ 左巻き

$\mu\mu h$ 右巻き

選別項目	信号事象 eeh	背景事象	ll	ll $\nu\nu$	llff	others
No Cut	2729	11266736	7831081	520624	404279	2510752
e selection	2169	3767540	3443775	154387	160969	8409
precut	1998	144342	104825	27701	11663	152
$p_{Tdl} \geq 20$ GeV	1889	88263	55029	24213	8897	124
$M_{dl} \in (80,100)$ GeV	1736	52283	32214	13532	6468	68
$acop \in (0.2,3.0)$	1622	43514	25160	12430	5868	56
$\delta p_{Tbal} \notin (-10,10)$ GeV	1601	28287	10524	12137	5573	53
$\cos \theta_{missing} \leq 0.99 \vee \cos \theta \leq 0.8$	1592	26254	8904	12137	5162	52
$M_{recoil} \in (120,140)$	1448	10558	3601	5228	1714	15
Likelihood ≥ 0.44	1101	3873	1256	1781	833	4

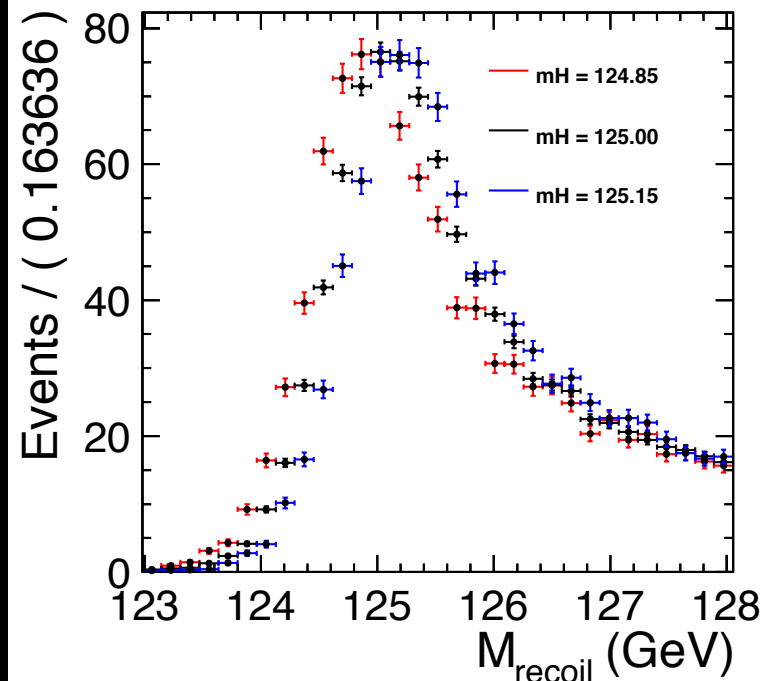
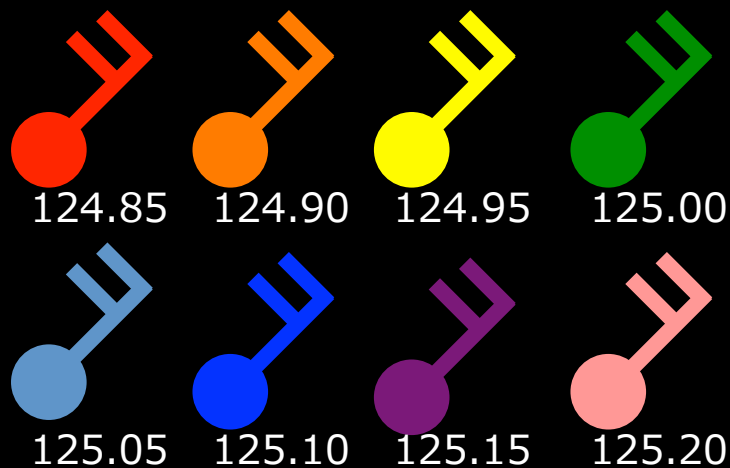
選別項目	信号事象 eeh	背景事象	ll	ll $\nu\nu$	llff	others
No Cut	1844	9303174	7343955	52853	358595	1547771
e selection	1449	3483563	3318161	16634	143414	5354
precut	1333	107353	96541	2947	7814	52
$p_{Tdl} \geq 20$ GeV	1267	58037	49907	2562	5534	34
$M_{dl} \in (80,100)$ GeV	1168	33979	28687	1576	3697	19
$acop \in (0.2,3.0)$	1091	27875	23072	1463	3325	15
$\delta p_{Tbal} \notin (-10,10)$ GeV	1076	13779	9258	1432	3077	12
$\cos \theta_{missing} \leq 0.99 \vee \cos \theta \leq 0.8$	1069	12232	8003	1431	2787	11
$M_{recoil} \in (120,140)$ GeV	975	4816	3292	567	952	5
Likelihood ≥ 0.50	742	1551	927	230	393	1

eeh左巻き

eeh右巻き

質量テンプレート法

異なるヒッグス質量でシミュレーションした
テンプレートサンプル ($m_H = 124.85 \sim 125.20 \text{ GeV}$)



χ^2 の分布から最尤の m_H を推定

CP混合解析(SM)



TDR sample

MC

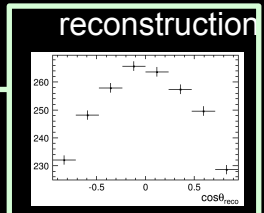
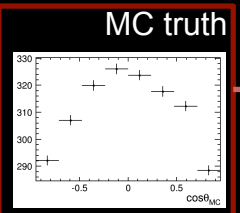
Reco.

1000 times Toy-MC

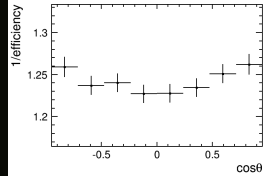
cosθの各ビンの反跳質量分布

反跳分布のフィットにより、
Signalイベント数をビン別取得

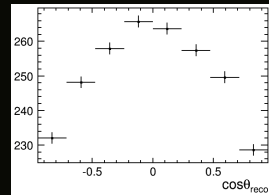
500 times
η calculations



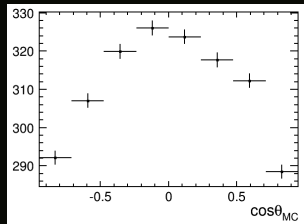
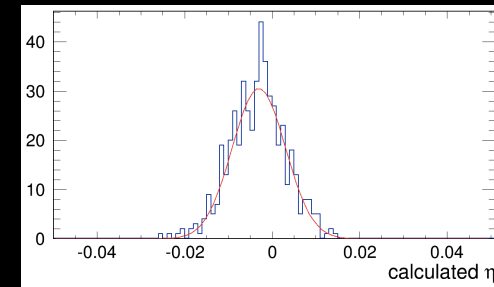
1/efficiency



eff.
補正



再構成cosθ



Calculate η from fit parameters

$$\frac{d\sigma}{d\cos\theta} = \frac{G_F^2 M_Z^6 \beta}{16\pi} \frac{1}{D_Z(s)} (v_e^2 + a_e^2) \left[1 + \frac{s\beta^2}{8M_Z^2} (1 - \cos^2\theta) + \eta \frac{v_e a_e}{v_e^2 + a_e^2} \frac{2s\beta}{M_Z^2} \cos\theta + \eta^2 \frac{s^2 \beta^2}{4M_Z^4} \left(1 - \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) \right]$$

cosθ toy-MC at gen. level

η =
(-3.03 ± 6.09) × 10⁻³

