

# ILCにおける反跳を用いた ヒッグス質量・断面積の解析

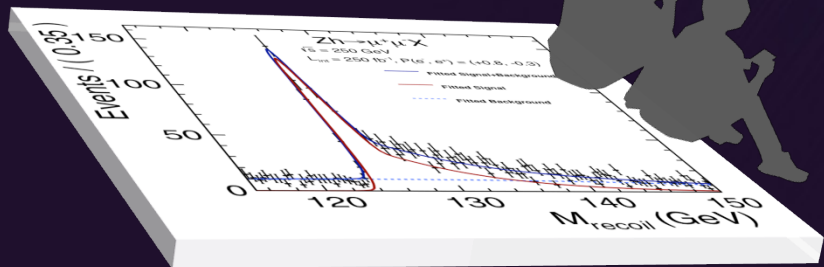
2015年3月23日 日本物理学会

綿貫峻

山本均、石川明正、Jan Strube (東北大理)  
末原大幹<sup>A</sup>、藤井恵介<sup>B</sup> (A:九州大理、B:KEK)



# 導入





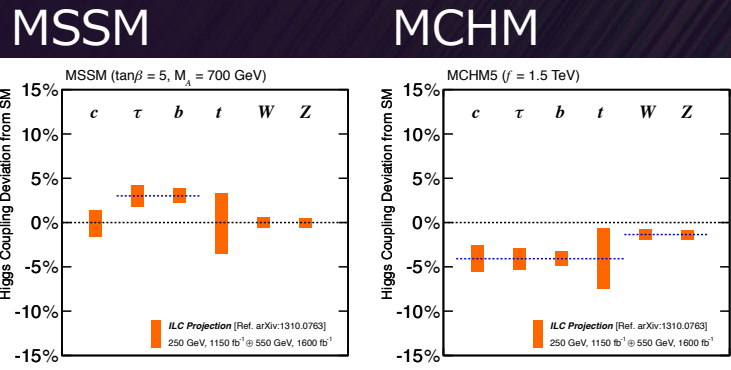
# 本研究の目的

標準模型(SM)を超える理論(BSM)の検証

→ ヒッグスと他の粒子の**結合定数**

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

=  $\sigma$  の比で計算



結合定数のSMからのずれ

- 結合定数のSMからのずれの精密測定によりBSMを同定可能
- この測定のためにはまず、**生成断面積 $\sigma$ の精密測定**が不可欠

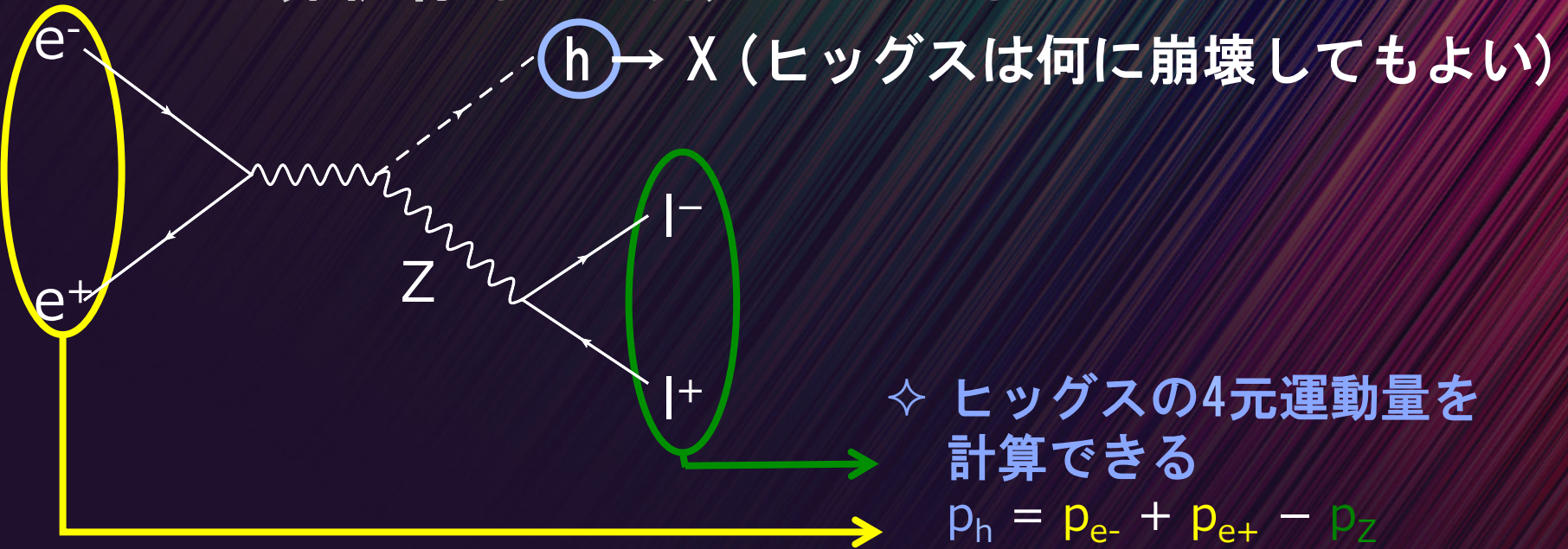
→ 反跳手法が使える  
ILCはまさに最適！

ヒッグスの生成断面積と質量の測定精度を見積もる



# 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 $\sigma$ の測定ができる



ヒッグスを  
再構成したい

直接

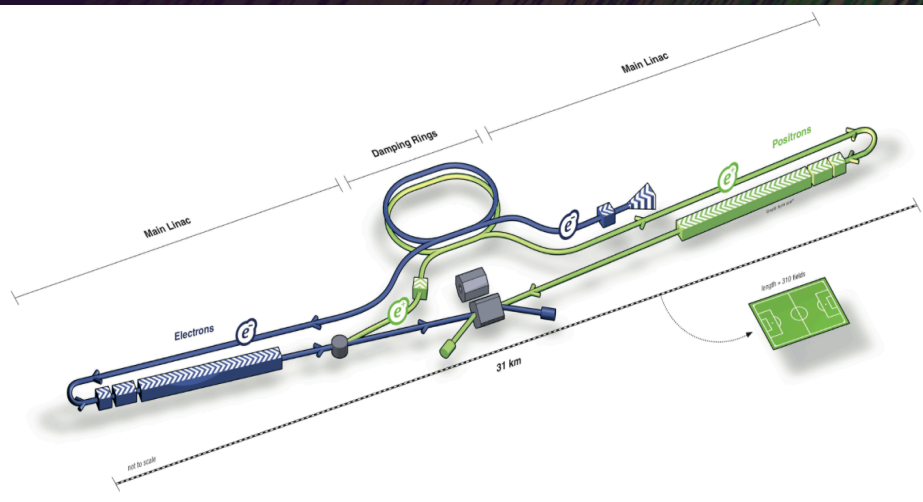
ヒッグスの崩壊モデルに依存してしまう

反跳

モデルに非依存



# 国際リニアコライダー(ILC)実験



## ■ 概要

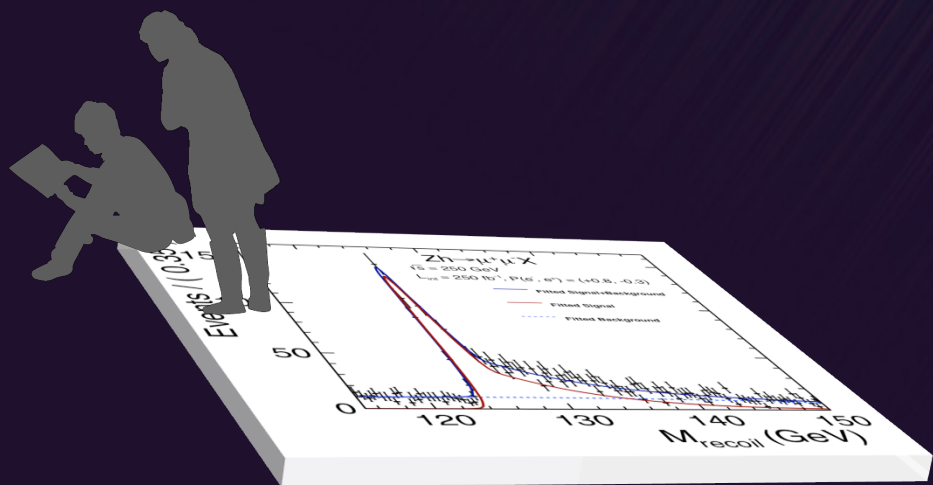
- $e^+e^-$ 衝突型の線形加速器
- $E_{\text{CMS}} = 250, 350, 500 \text{ GeV}$   
(アップグレードで1TeV)
- ビーム電子・陽電子の  
スピン偏極を設定できる

## ■ 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**



# 解析





# シミュレーション条件とZ選別

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 <sup>-1</sup>	$P(e^-, e^+)$ $=(\pm 0.8, \mp 0.3)$

- 信号事象： $e^+e^- \rightarrow Zh \rightarrow \mu\mu h, eeh$
- 背景事象： $l^+l^-, l^+l^-\nu\nu, l^+l^-ff$   
(ただしfは $\nu$ とtを除くフェルミオン)

## Z選別

- カロリメータで落としたエネルギーを用いてレプトンを選び、Z質量に最も近いペアを信号事象候補とする
  - $\tau$ 由来のレプトンを除くためインパクトパラメータに上限( $\mu\mu h$ チャンネル)
  - $eeh$ チャンネルでは制動放射 $\gamma$ をリカバリ



# 事象選別

di-lepton  
events



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

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

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

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

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

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

Likelihood

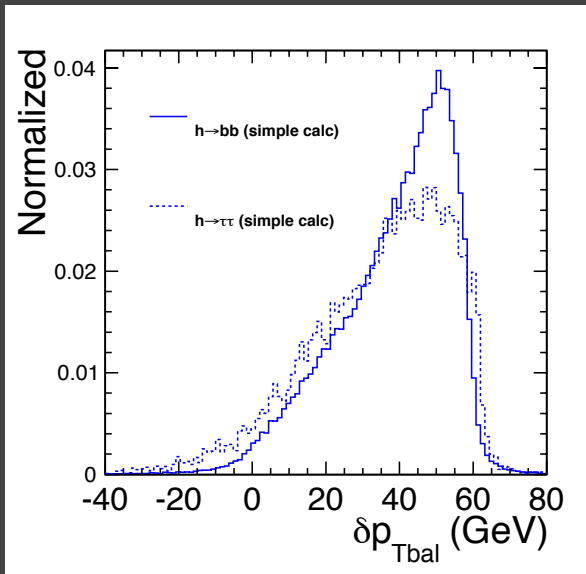


# 事象選別

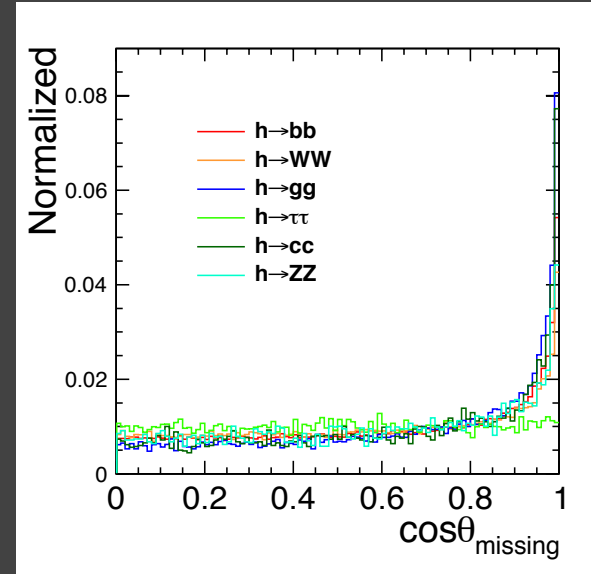
信号事象の選別効率は、ヒッグス崩壊モードに非依存としたい。

- $\delta P_{Tbal} \equiv p_{Tdl} - p_{T\gamma}$  と  $\cos\theta_{missing}$  が  $h \rightarrow \tau\tau$  モードに対してバイアスを持つ

→ 選別に工夫が必要



$\delta p_{Tbal}$  (シンプルな定義)



$\cos\theta_{missing}$

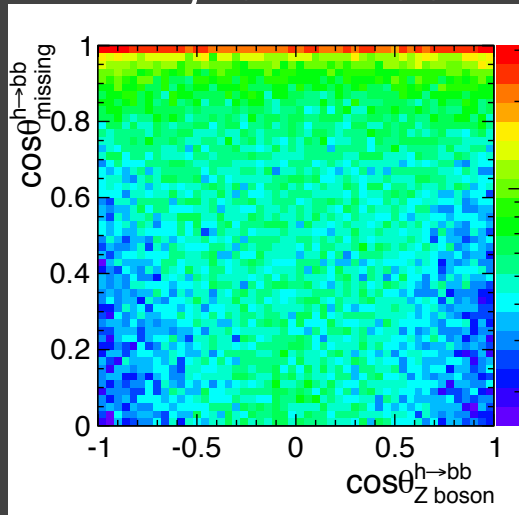


# 事象選別

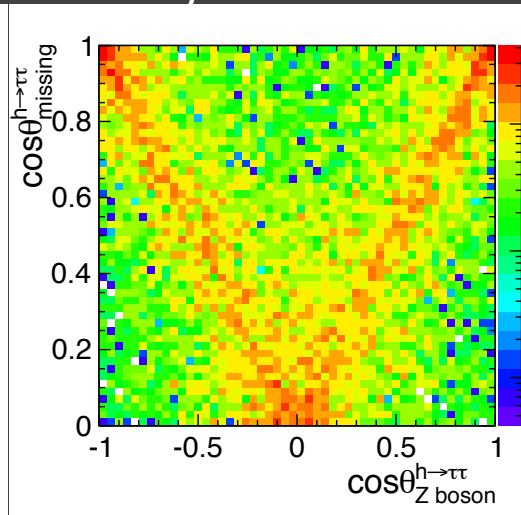
信号事象の選別効率は、ヒッグス崩壊モードに非依存としたい。

- $\delta P_{Tbal} \equiv p_{Tdl} - p_{T\gamma}$  に用いる  $\gamma$  に制限 (JPS2014@東海大)
- $\cos\theta_{missing}$  を Z の生成角  $\cos\theta$  で緩和

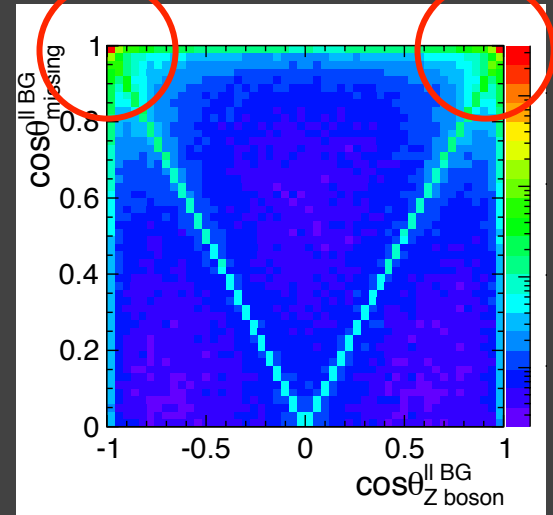
Signal  $h \rightarrow bb$



Signal  $h \rightarrow \tau\tau$



$|+|-$  BG

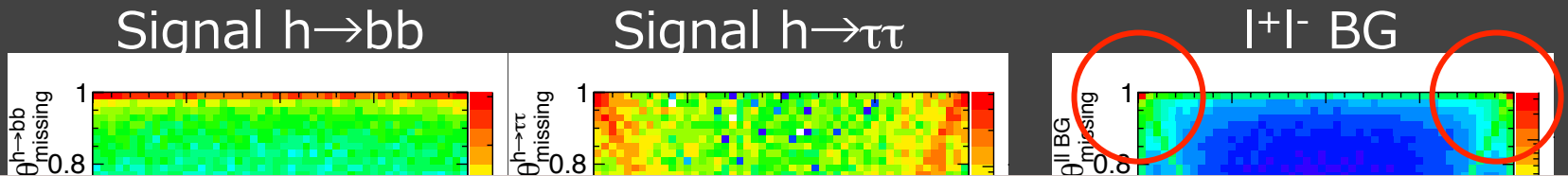




# 事象選別

信号事象の選別効率は、ヒッグス崩壊モードに非依存としたい。

- $\delta P_{Tbal} \equiv p_{Tdl} - p_{T\gamma}$  に用いる  $\gamma$  に制限 (JPS2014@東海大)
- $\cos\theta_{missing}$  を Z の生成角  $\cos\theta$  で緩和

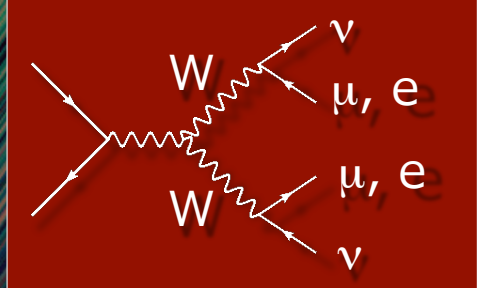


これによりモード別の選別効率のふらつきを3%→1%に改善



di-lepton events

# 事象選別



左巻き  $P(e^-, e^+) = (-0.8, +0.3)$

$\mu\mu h$	signal	$\parallel$	$\parallel_{\nu\nu}$	$\parallel_{ff}$
No Cut	2603	3245302	507166	390041
After Cut	1588	427	2049	1269
eeh	signal	$\parallel$	$\parallel_{\nu\nu}$	$\parallel_{ff}$
No Cut	2729	7831081	520624	404279
After Cut	1101	1256	1781	833

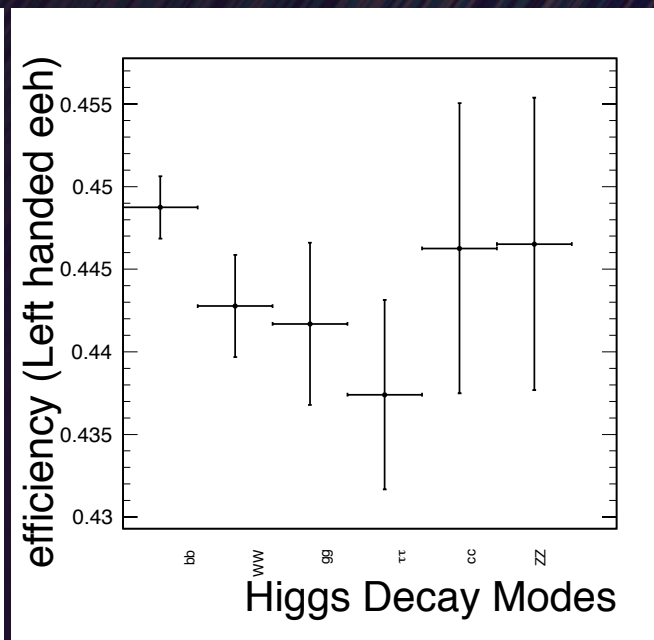
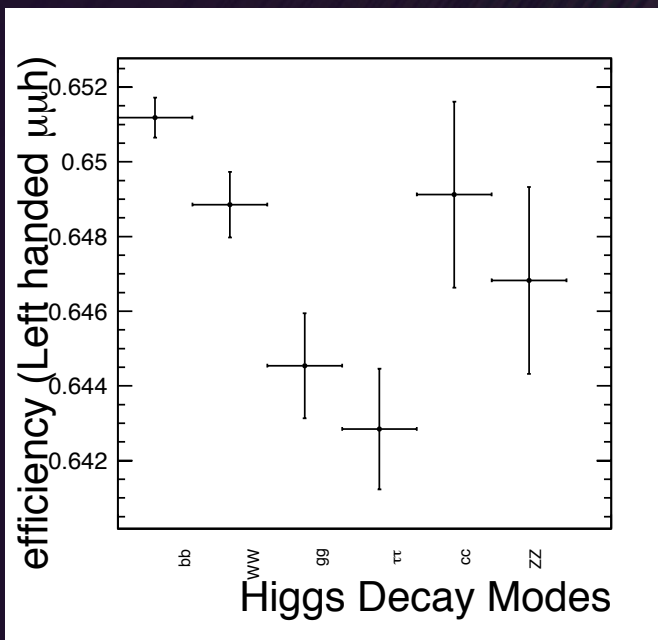
右巻き  $P(e^-, e^+) = (+0.8, -0.3)$

$\mu\mu h$	signal	$\parallel$	$\parallel_{\nu\nu}$	$\parallel_{ff}$
No Cut	1756	2591926	51768	330876
After Cut	1113	287	323	650
eeh	signal	$\parallel$	$\parallel_{\nu\nu}$	$\parallel_{ff}$
No Cut	1844	7343955	52853	358595
After Cut	742	927	230	393



# 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

$\mu$ チャンネル左巻き

eチャンネル左巻き



# フィットとToy-MC解析

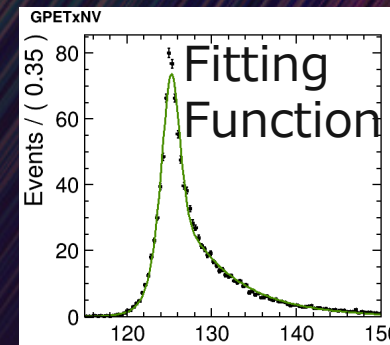
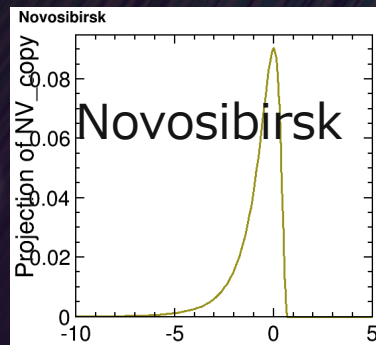
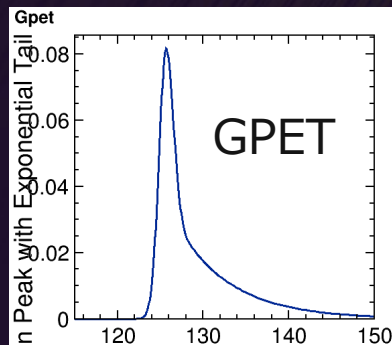
- フィット関数

- Signal : GPETとNovosibirsk関数の畳み込み

- GPET : Gaussian Peak with Exponential Tail

- Novosibirsk : カロリメータの応答を表す

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



※eeh distribution

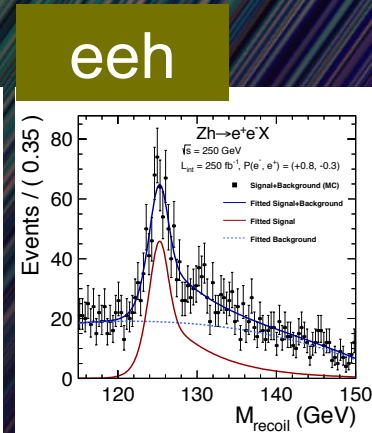
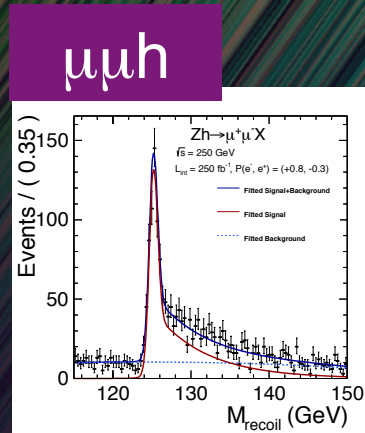
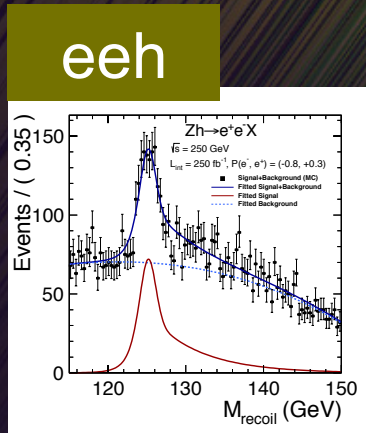
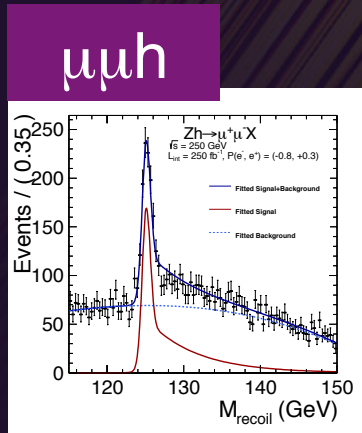
- BG : 3次関数

- これを元に偽実験(Toy-MC)を生成

- PDFの形に関する変数以外(mean,  $N_{\text{signal}}$ ,  $N_{\text{BG}}$ )を自由パラメータとしてフィット

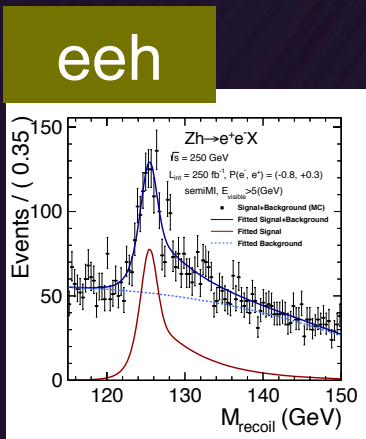
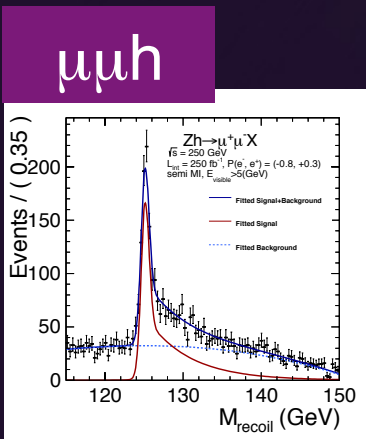


# フィット結果



左巻き偏極、モデル非依存

右巻き偏極、モデル非依存



左巻き偏極、準モデル非依存

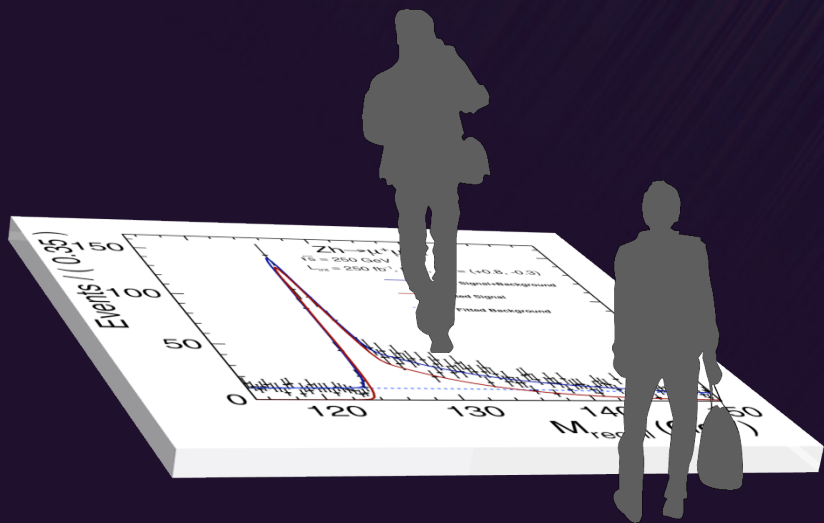
$\mu\mu h, ee h$ @250GeV		combined	
		左巻き	右巻き
モデル非依存	$\Delta\sigma/\sigma$	3.4%	3.2%
	$\Delta mass$ [MeV]	32	30
準モデル非依存	$\Delta\sigma/\sigma$	3.1%	
	$\Delta mass$ [MeV]	31	

※準モデル非依存解析では可視エネルギー

JPS@早稲田大学 を用いた事象選別を行っている

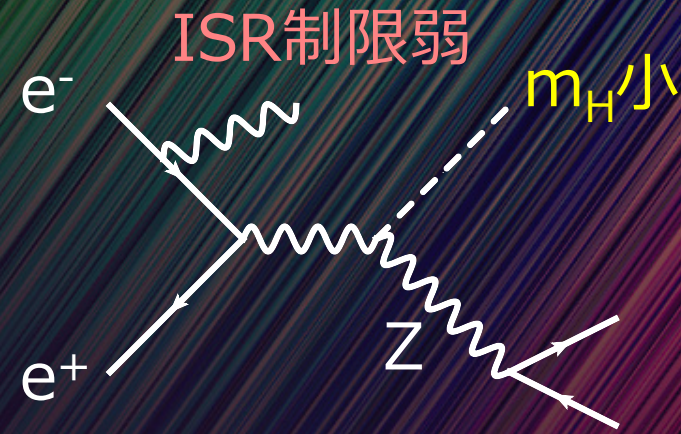
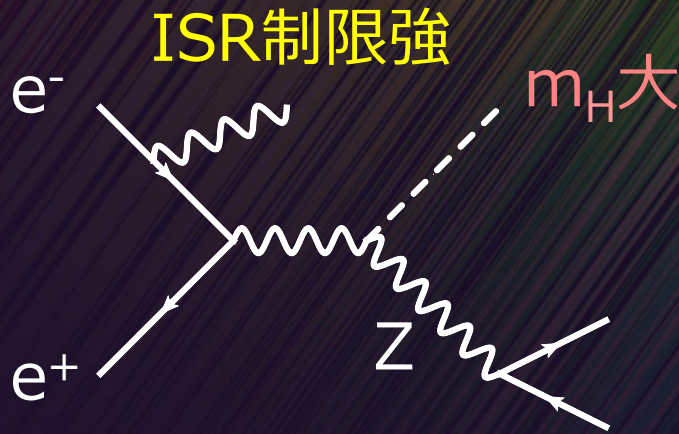


# 質量テンプレート法





# GPETによる質量解析の問題点

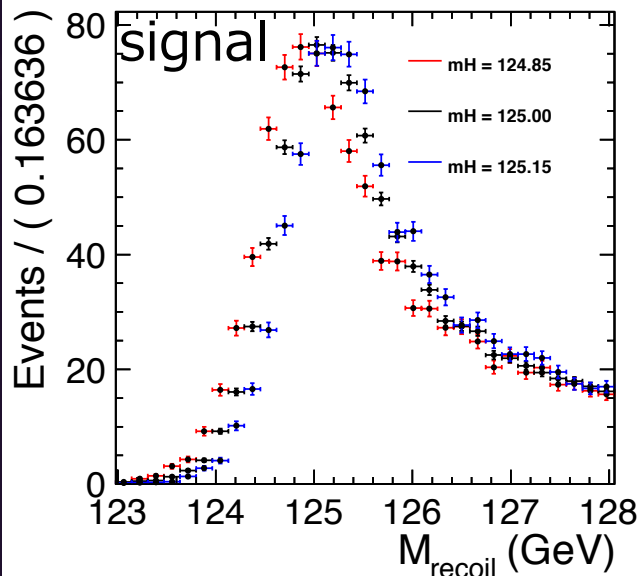


- GPET中心値は質量を正しく表せない
- $m_H$ はPDFのテールに影響を与える
  - ヒッグス質量が軽い(重い)ほどISR  $\gamma$ のエネルギーが大き  
く(小さく)なり得る
    - 反跳質量テールが大き  
く(小さく)なる。
- ISRなどによる分布の違いを含んだ解析が必要
  - **Mass Template Method**

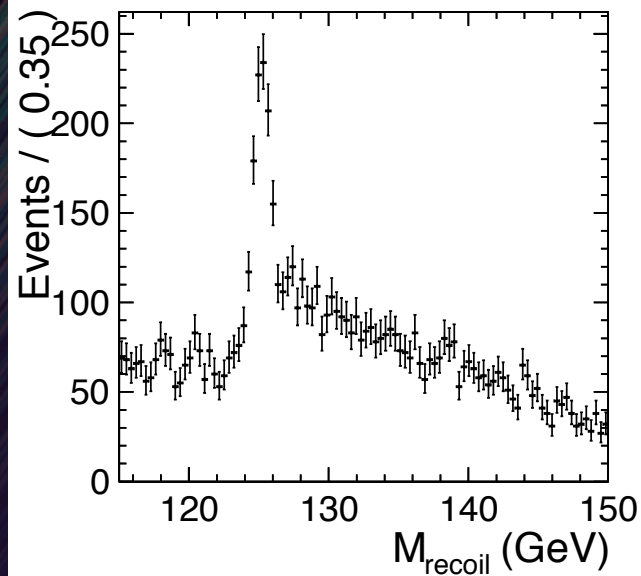


# 質量テンプレート法

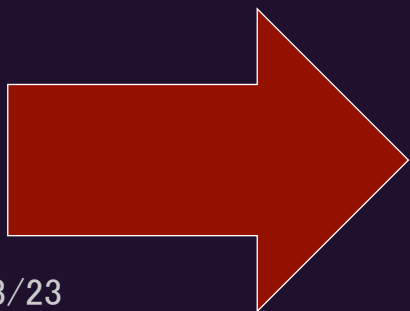
異なるヒッグス質量でシミュレーションした  
テンプレートサンプル ( $m_H = 124.85 \sim 125.20 \text{ GeV}$ )



$M_{\text{recoil}}$  を  
フィット



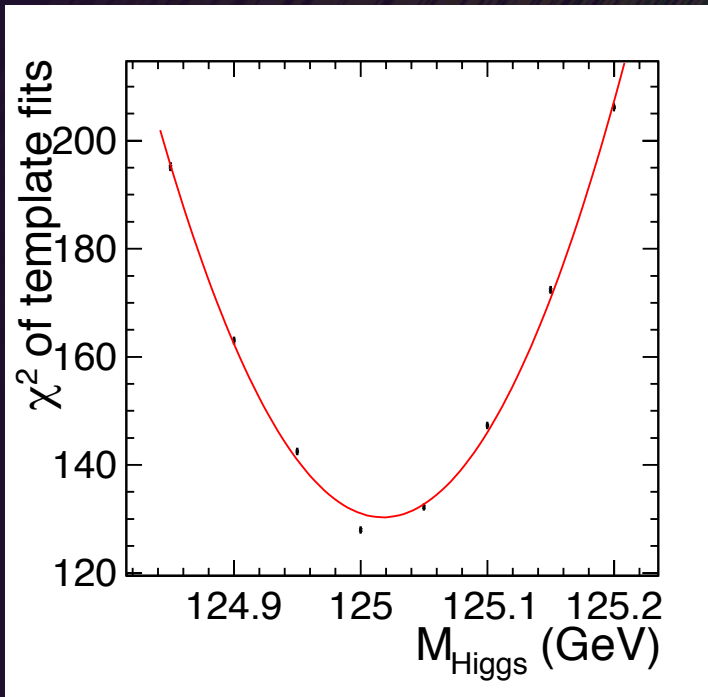
テンプレートPDFの $m_H$ が  
真値に近いほど $\chi^2$ は小さい



$\chi^2$ 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

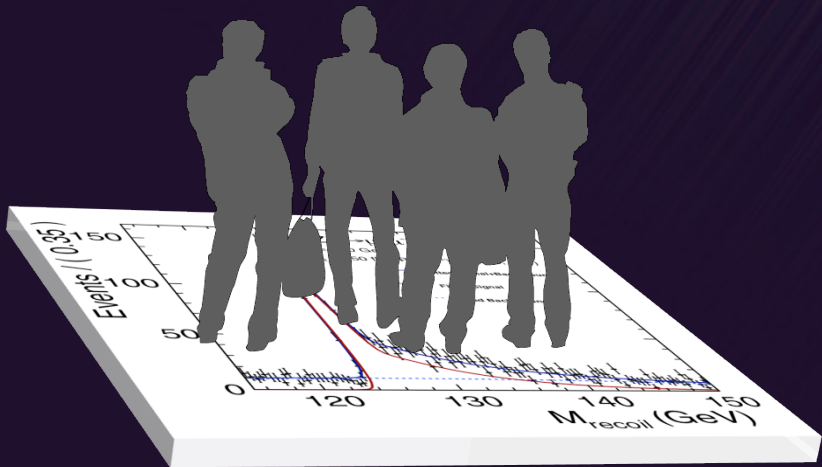


- $\chi^2$ プロットを2次関数でフィット
- 最小点が $m_H$ の測定値に対応
- $\chi^2$ を+1上昇させる幅が $\Delta\text{mass}$ に対応
- $m_H = 125.018 \pm 0.021 \text{ GeV}$

※ 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



# まとめ





# 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%
	$\Delta\text{mass} [\text{MeV}]$	32	30
準モデル非依存	$\Delta\sigma/\sigma$	3.1%	
	$\Delta\text{mass} [\text{MeV}]$	31	

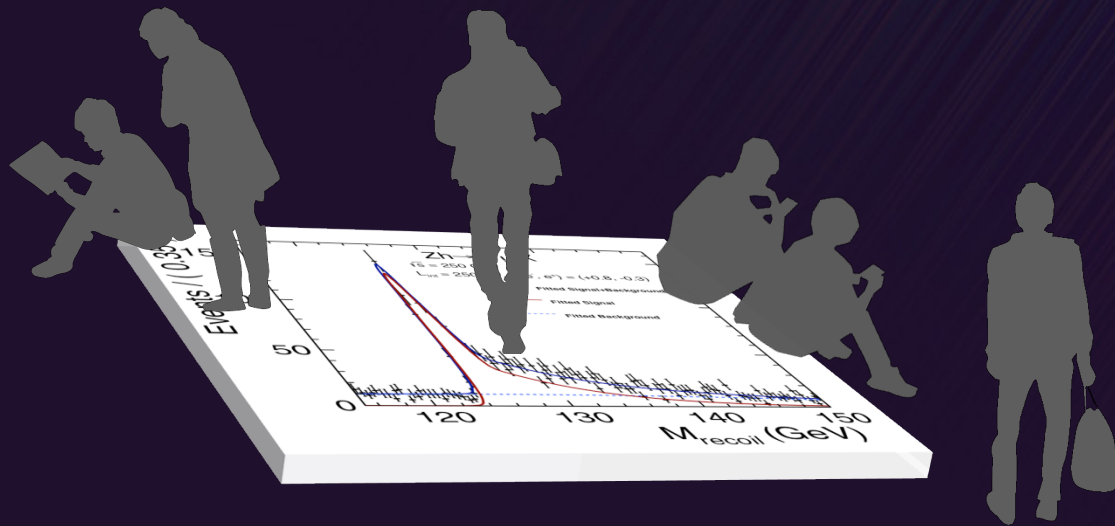


# まとめ(2/2)

- 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
- 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



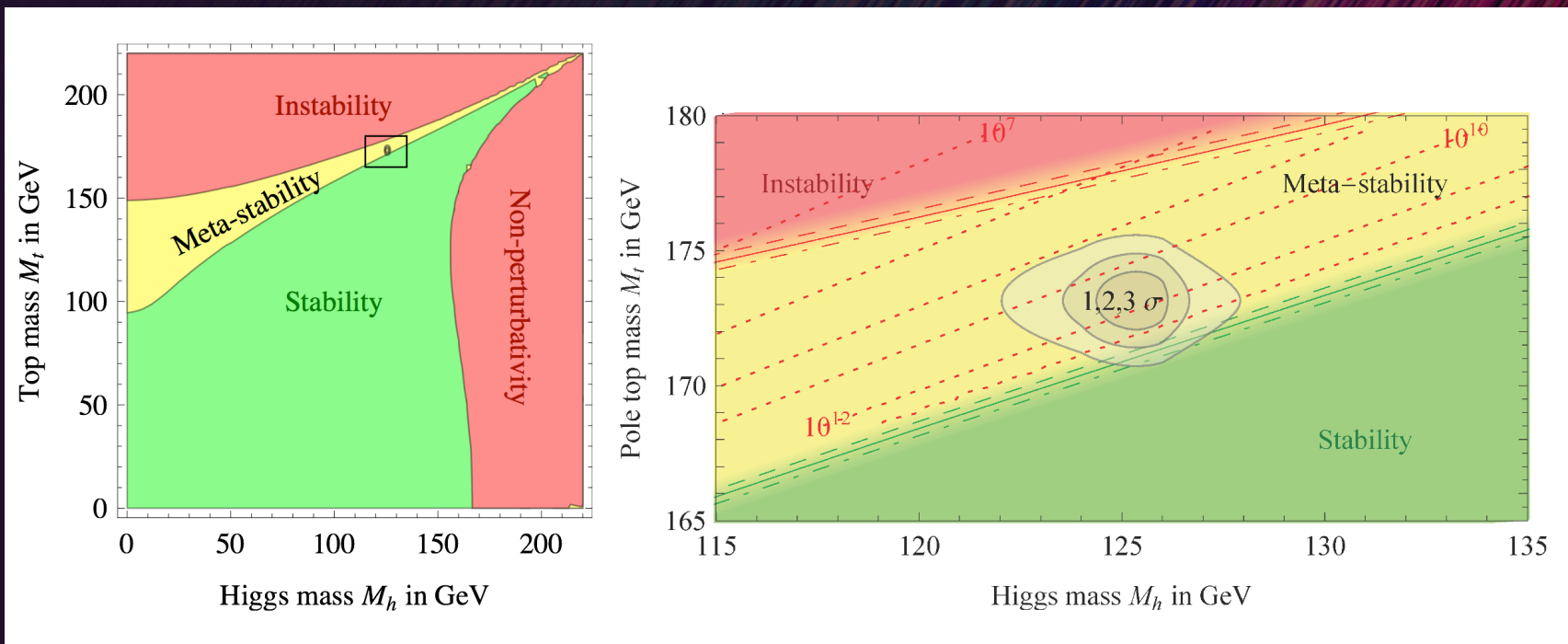
# バックアップ





# 質量測定

- $h \rightarrow WW^*$ のBRの測定に必要
  - 片方のWがoff-shellのため、ヒッグス質量に依存
- 真空の安定性(ヒッグスもトップ質量と同じく重要なパラメータ)





# レプトン選別

$p_{\text{track}}$

$E_{\text{ECAL}}/E_{\text{total}}$

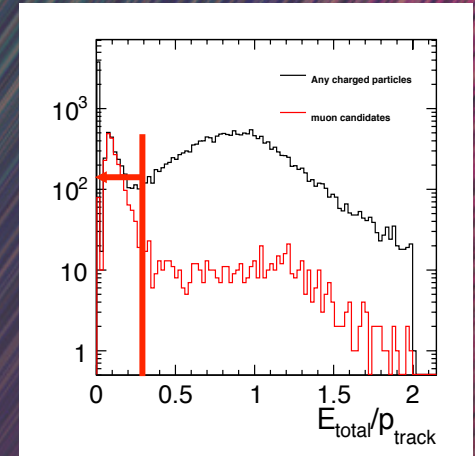
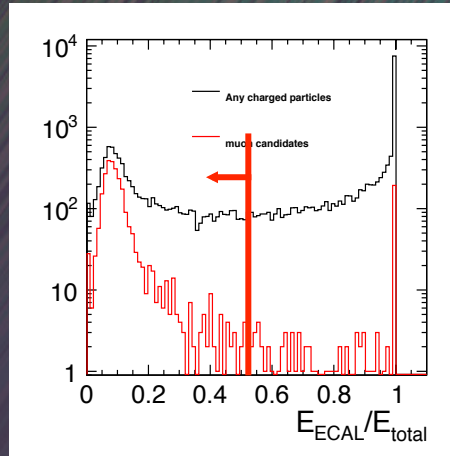
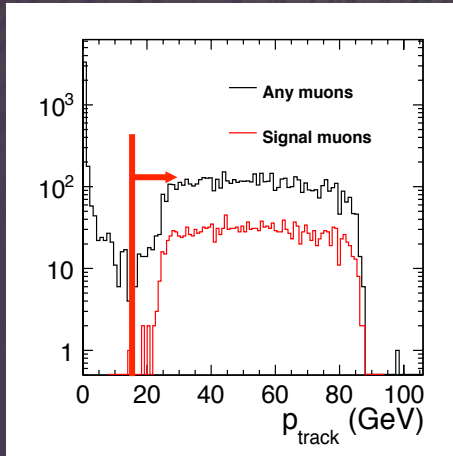
$E_{\text{total}}/p_{\text{track}}$

$\mu$   
選別

$> 15\text{GeV}$

$< 0.5$

$< 0.3$

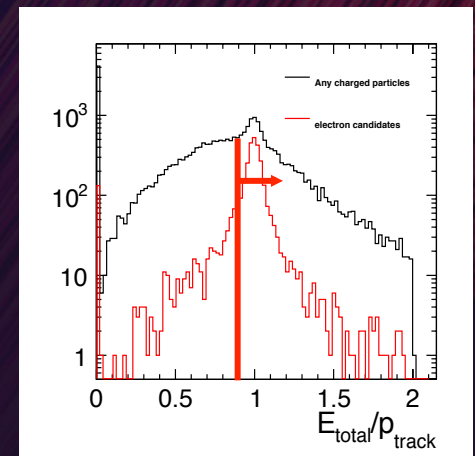
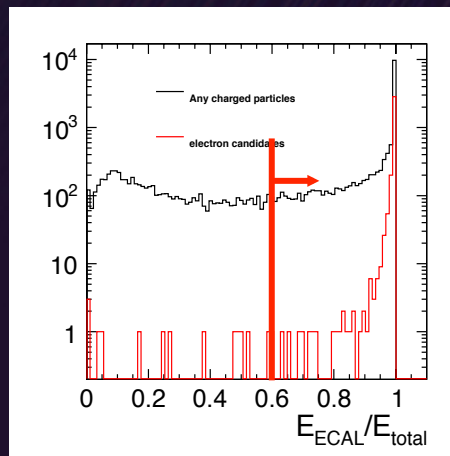
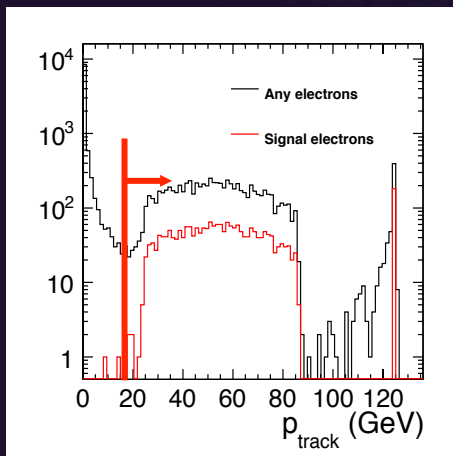


$e$   
選別

$> 15\text{GeV}$

$> 0.6$

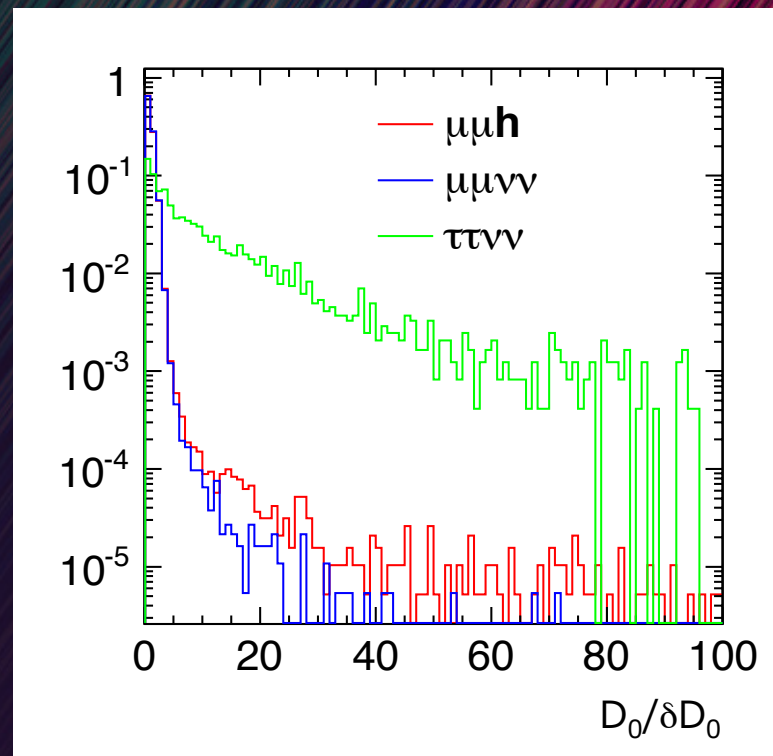
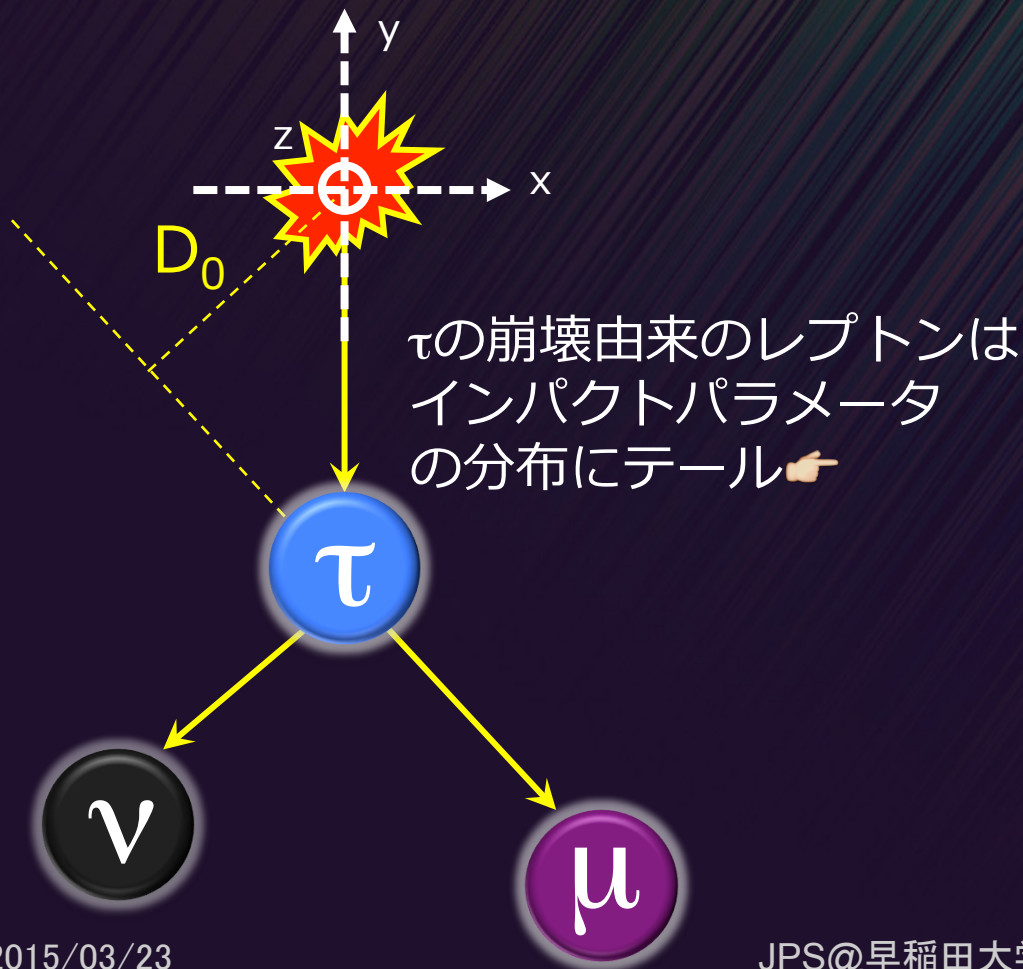
$> 0.9$





# 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、 $\mu$ トラックのxy平面でのインパクトパラメータに上限 ( $D_0/\delta D_0 < 5$ )

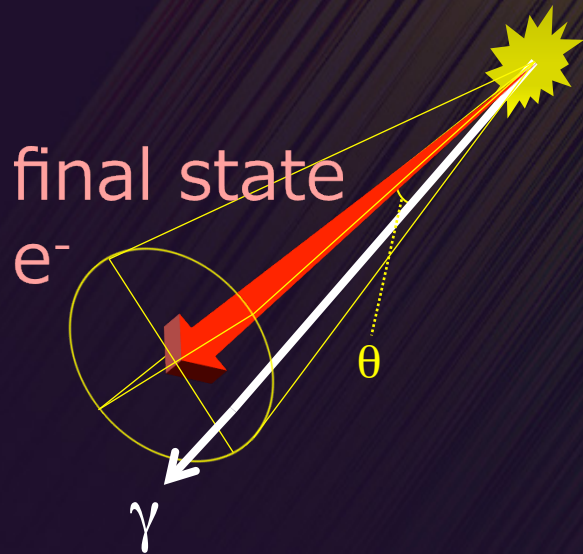


インパクトパラメータ分布

$\tau\nu\nu$ などのBGを削減



# 制動放射リカバリ

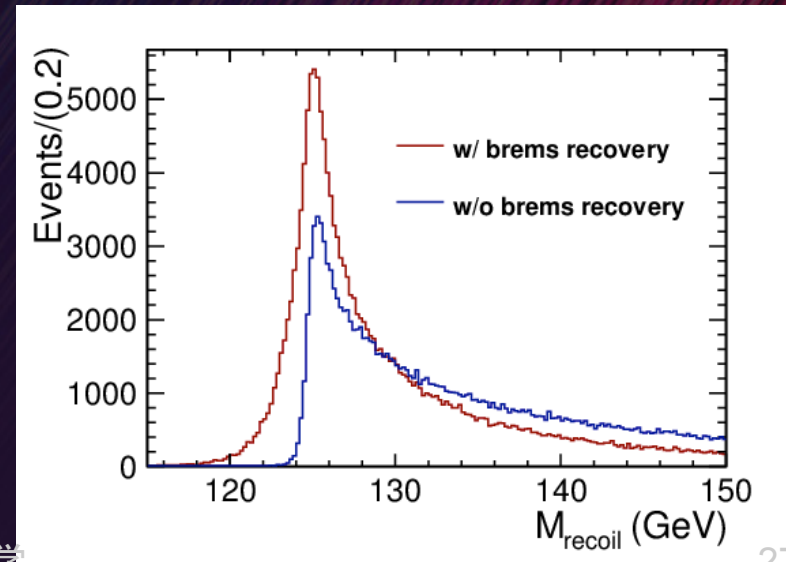


recovery条件

- 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 $\gamma$ の $(E, p)$ を足す  
= 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  
➡  $\sigma$ 測定精度が劇的に向上





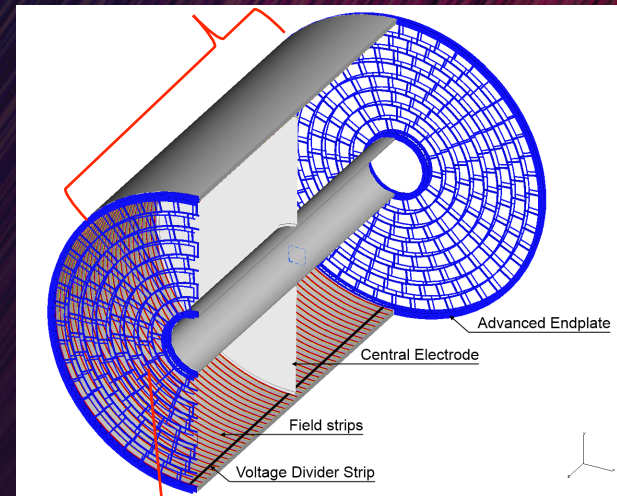
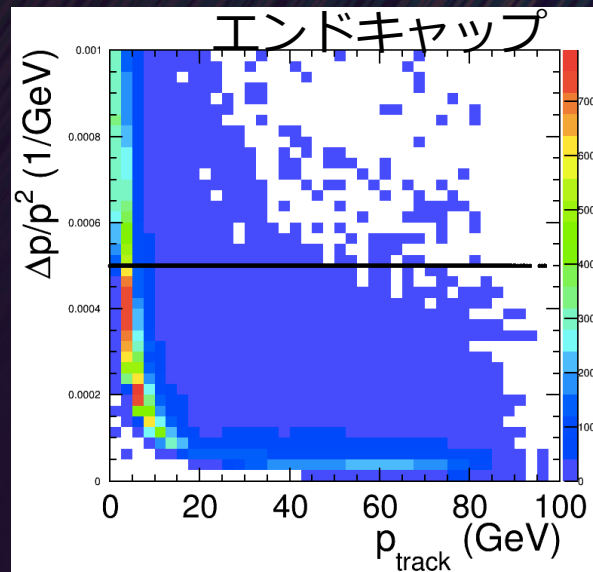
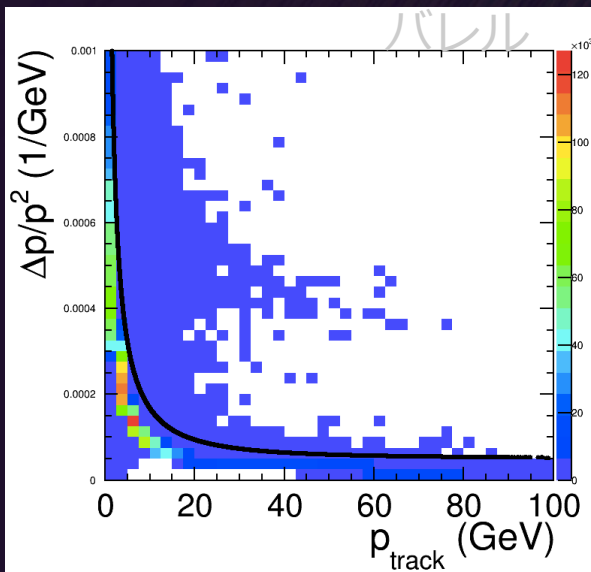
# 質の悪いトラックの除去

- 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  $\cos\theta > 0.78$ )

バレルと  
エンドキャップで  
異なるカット



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



# 横運動量 $p_{Tdl}$

di-lepton events

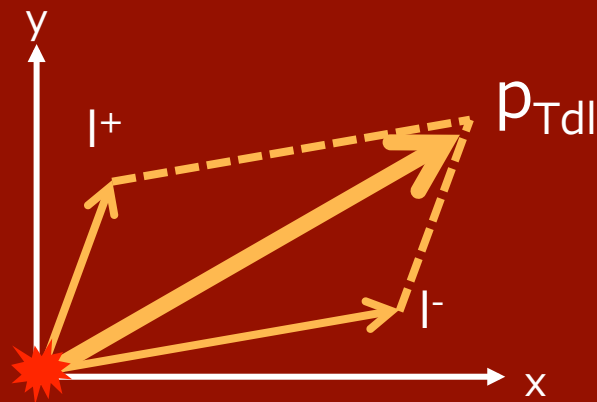


$p_{Tdl} > 20 \text{ GeV}$

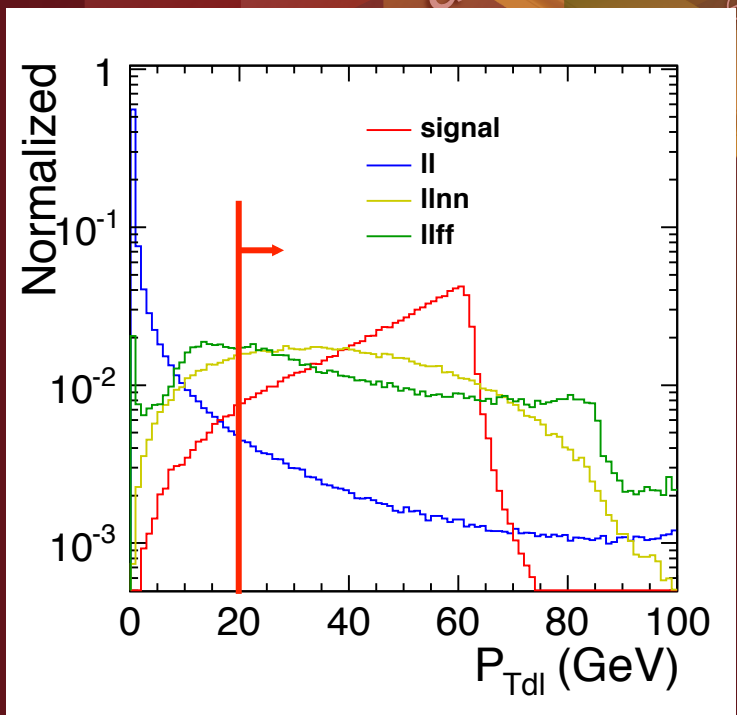
$M_{dl} \in (80, 100) [\text{GeV}]$

$\cos\theta \in (-0.2, 1)$

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



back-to-backに飛びやすい $l+l-$   
BGは $p_{Tdl}$ が0にピークを持つ



Likelihood



# 不変質量 $M_{dl}$

di-lepton events

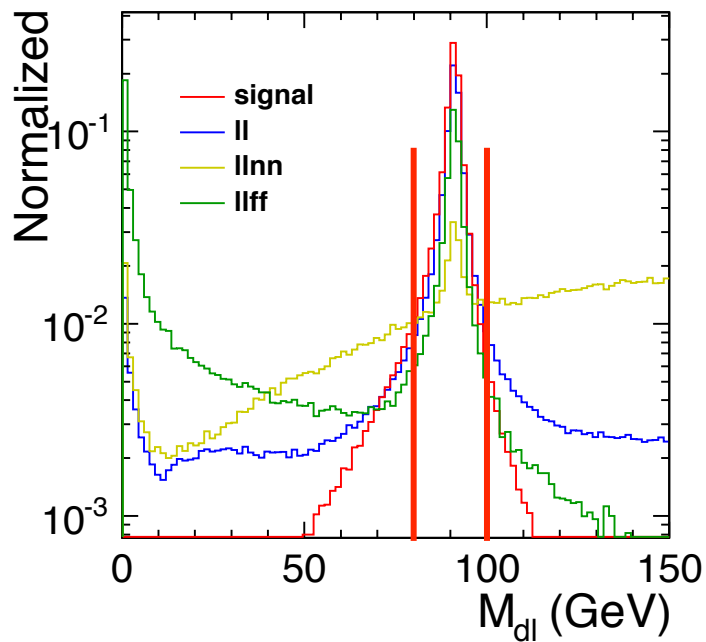
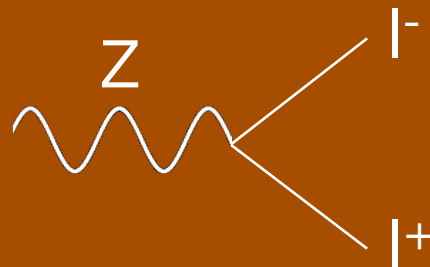


$p_{Tdl} > 20 \text{ GeV}$

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

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

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





# 方位角差 Acoplanarity

di-lepton events

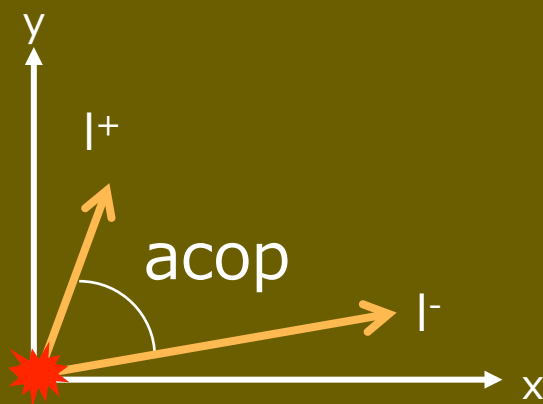
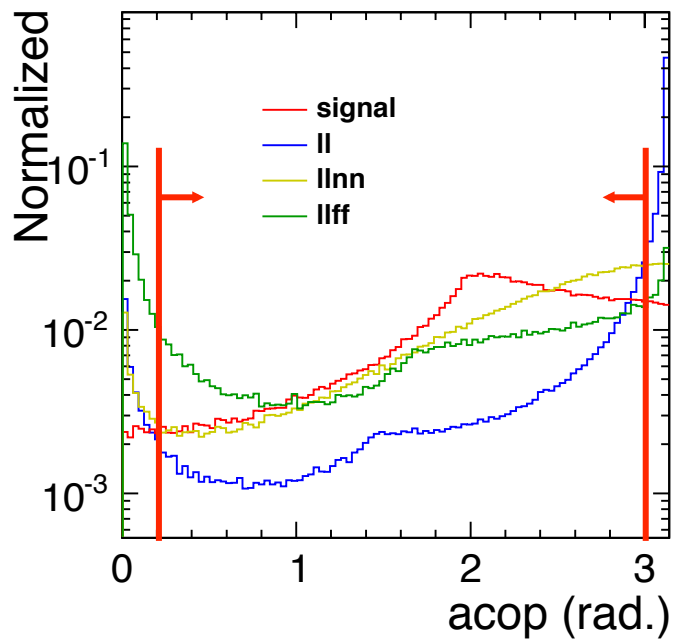


$p_{Tdl} > 20 \text{ GeV}$

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

$acop \in (0.2, 3.0)$

$acop \in (0.2, 3.0)$



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 $\pi$ にピーク



# 横運動量差 $\delta P_{Tbal}$

di-lepton events

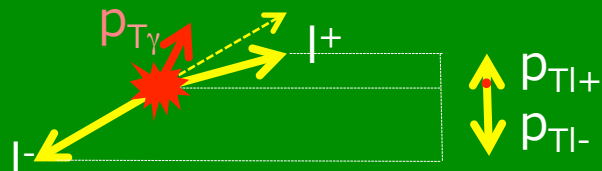


$p_{Tdl} > 20 \text{ GeV}$

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

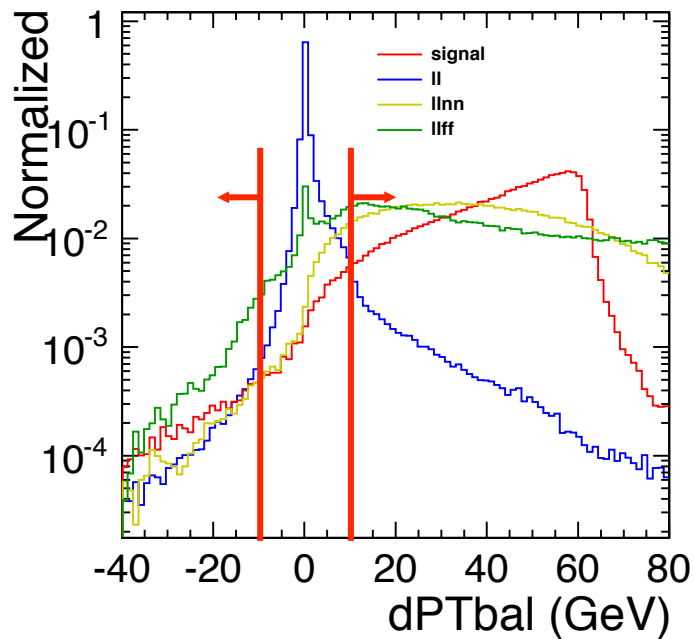
$a_{cop} \in (0.2, 3.0)$

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



$\delta P_{Tbal}$  : レプトン対と  
高エネルギー $\gamma$ 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



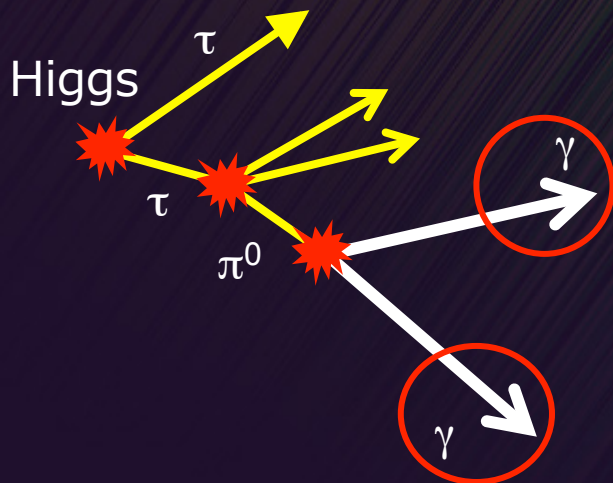
$\cos\theta_{missing} < 0$

$M_{recoil} \in (10, 20) \text{ GeV}$

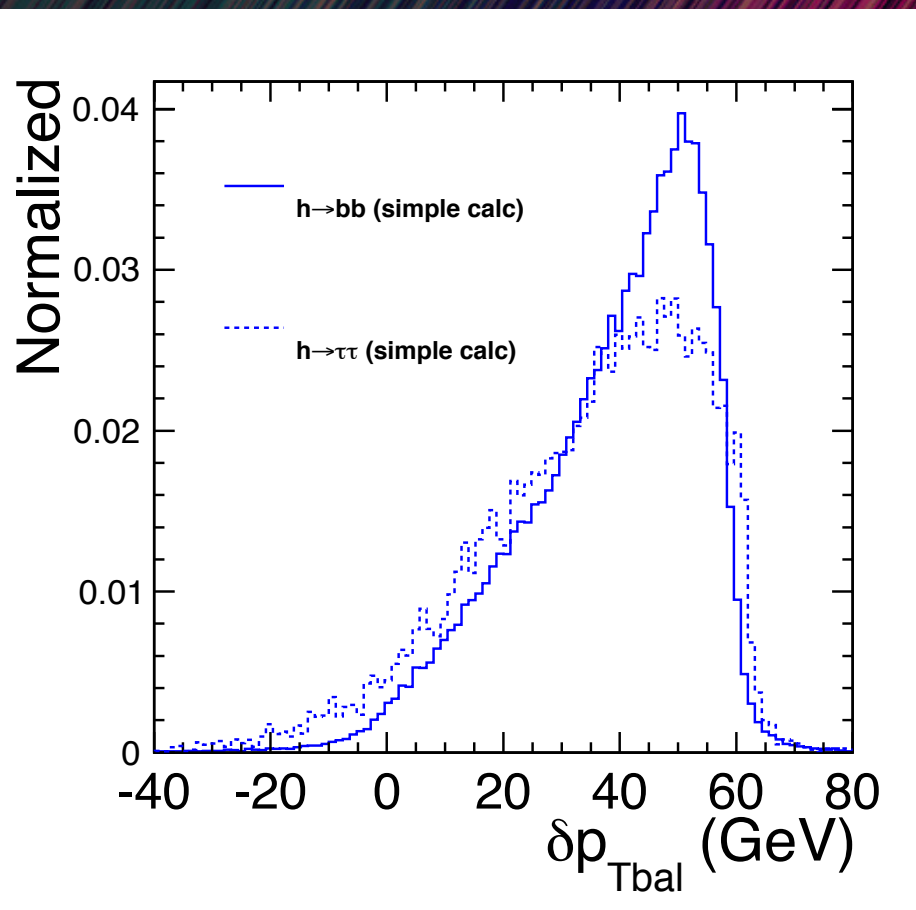


# $\delta p_{Tbal}$ のバイアス排除

- $\delta P_{Tbal} = (\text{レプトン対の} p_T) - (\text{高エネルギー}\gamma\text{の} p_T)$
- 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



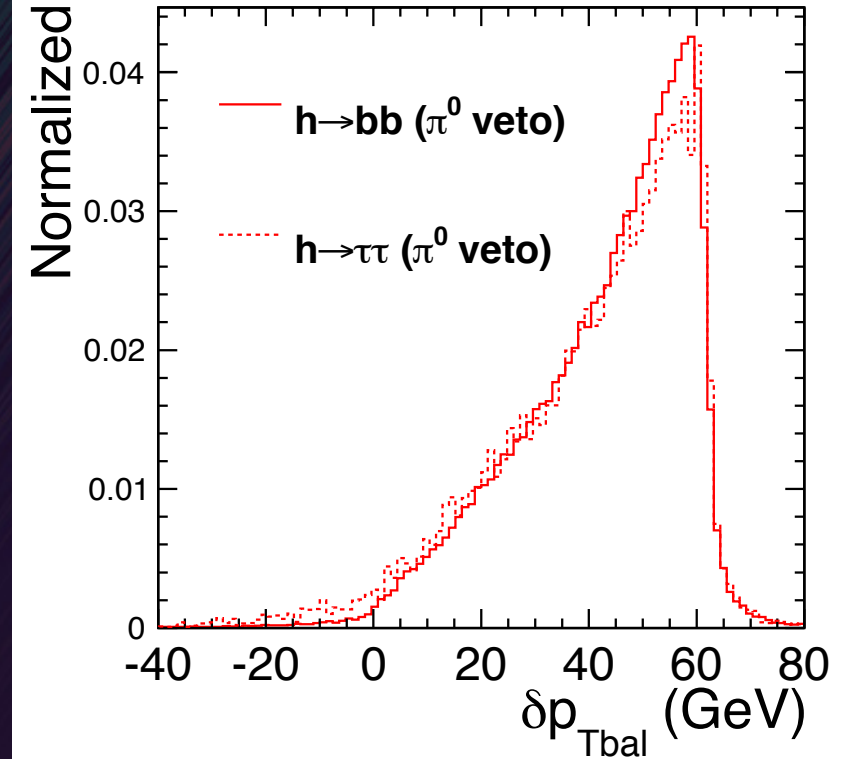
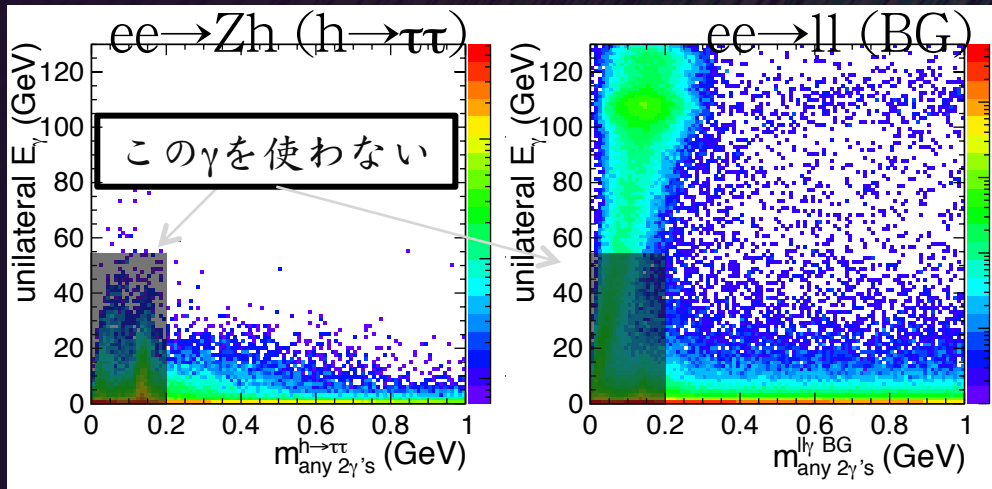
この $\gamma$ を拾うと、 $h \rightarrow \tau\tau$ の $\delta p_{Tbal}$ カットのみeff.が下がる👉





# 使用する $\gamma$ の制限

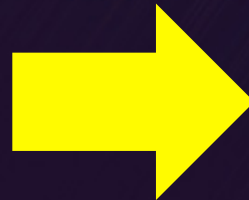
- $h \rightarrow \tau\tau$ の $\gamma$ は大量の $\pi^0$ 中間子が原因
  - $2\gamma$ の不変質量  $\sim m_\pi$ にピーク
  - 崩壊を重ねるのでエネルギーはあまり大きくない



使用する $\gamma$ 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

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

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

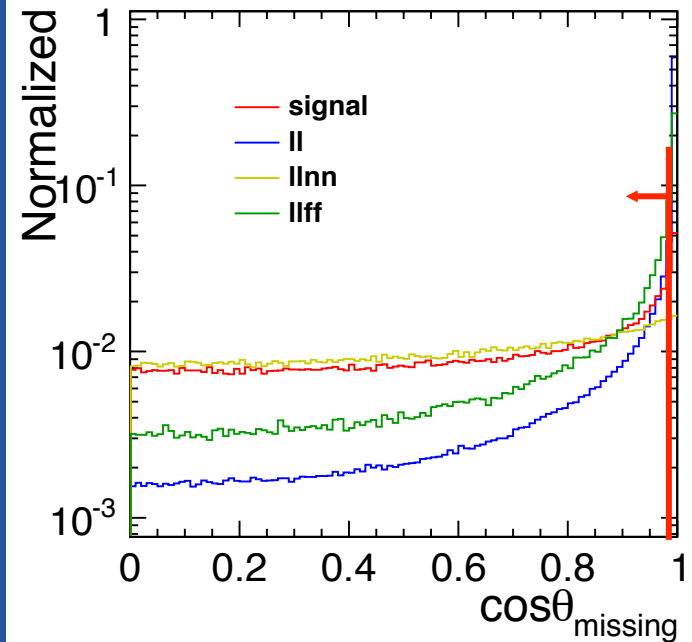
$M_{dl} \in (80, 100) [\text{GeV}]$

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

$(-10, 10) [\text{GeV}]$

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

$(-10, 10) [\text{GeV}]$



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

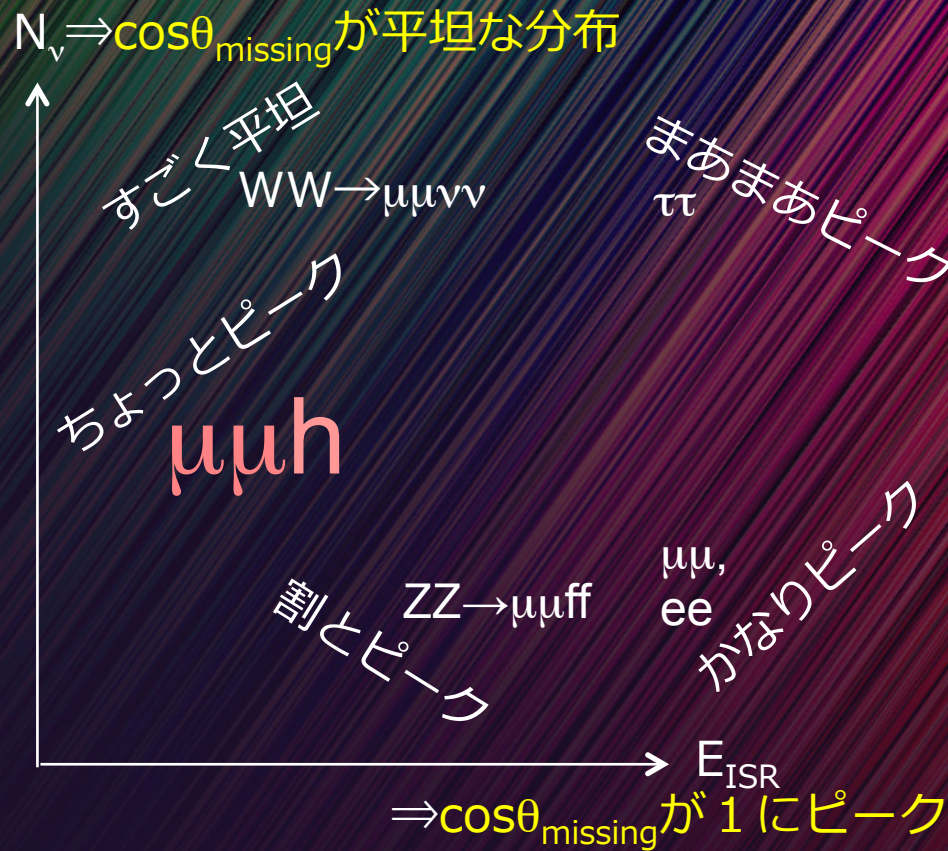
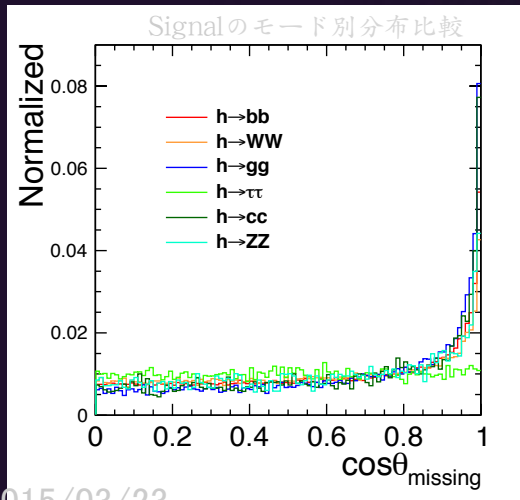
検出されない粒子の角度分布  
 $\mathbf{p}_{\text{miss}} = -\sum \mathbf{p}_{\text{obs}}$  の  $\cos\theta$   
 ll+ BGなどは  $\cos\theta_{\text{missing}} = 1$  に  
 鋭いピークを持つ



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

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

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



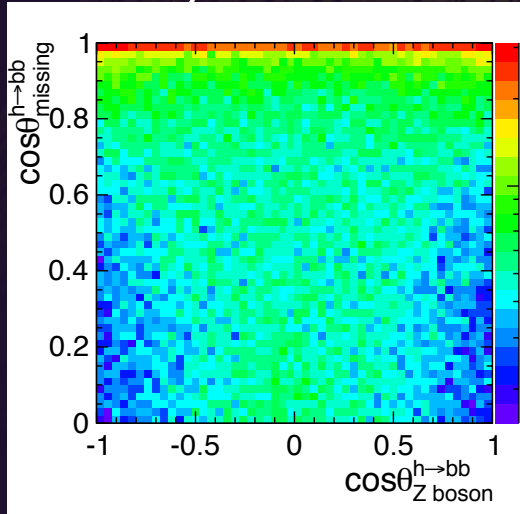
単に $\cos\theta_{\text{missing}}$ だけかけると、 $h \rightarrow \tau\tau$ だけ検出効率が高くなる

→ Zの生成角度 $\cos\theta_{\text{dl}}$ で緩和

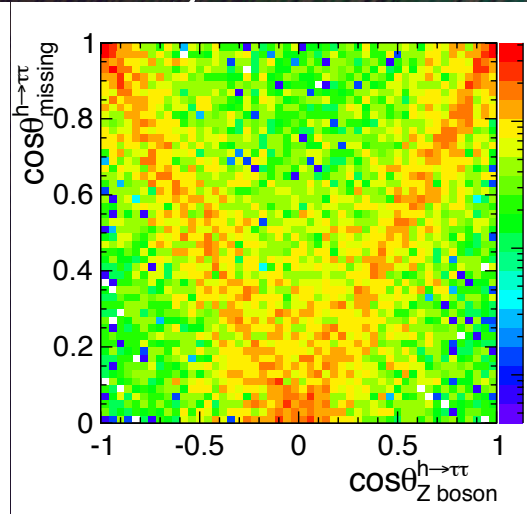


# $\cos\theta_{\text{missing}}$ 選別の緩和

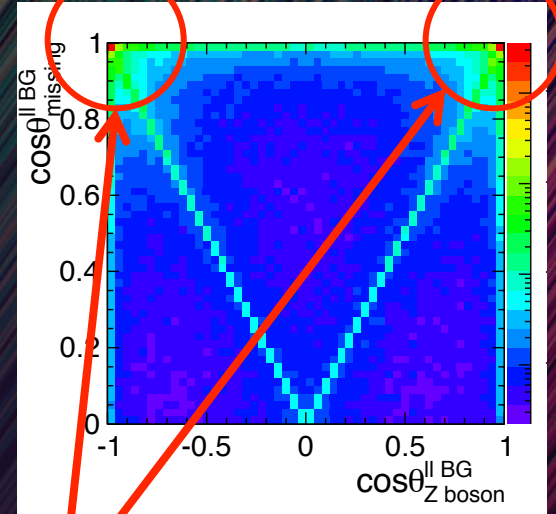
Signal  $h \rightarrow b\bar{b}$



Signal  $h \rightarrow \tau\tau$

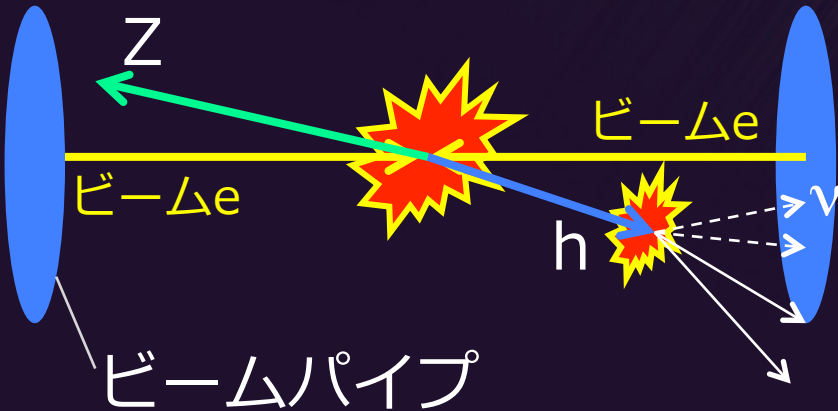


$l+l-$  BG



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  
 $\Rightarrow \nu$ がブーストされビームパイプに多く入射するようないベントならバイアスはない





# 反跳質量 $M_{\text{recoil}}$

di-lepton events



$p_{T\text{dl}} > 20 \text{ GeV}$

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

$\cos\theta \in (0.2, 3.0)$

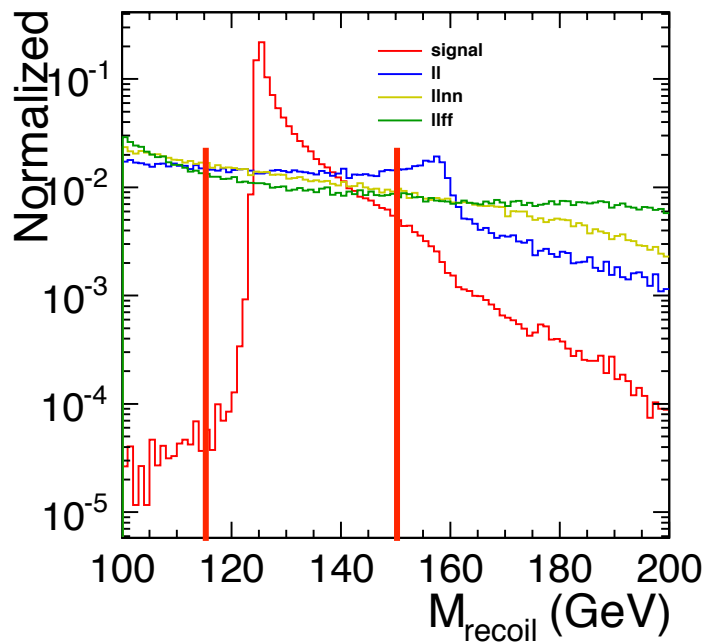
$M_{\text{recoil}} \in (115, 150) [\text{GeV}]$

フィッティングに適した領域を設定

$\cos\theta_{\text{missing}} < 0.9$

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

Likelihood





# 尤度関数 Likelihood

di-lepton events



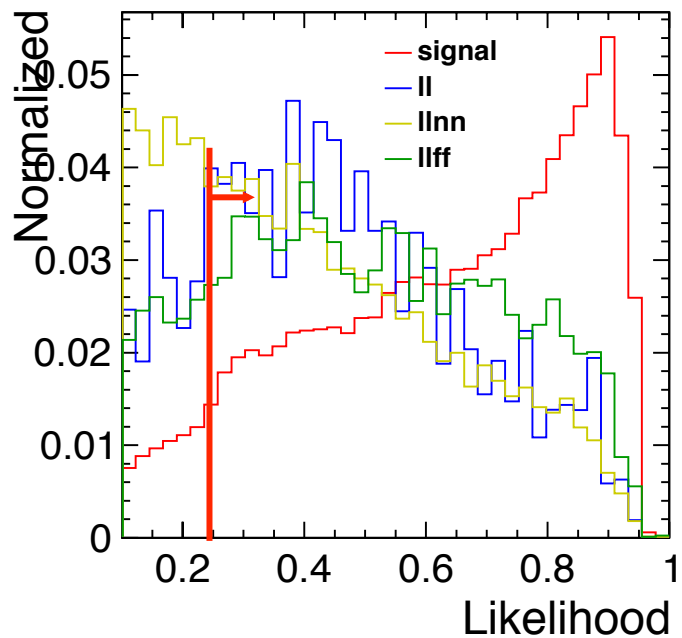
$p_{Tdl} > 20 \text{ GeV}$

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

$\cos\theta \in (0.2, 3.1)$

## 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

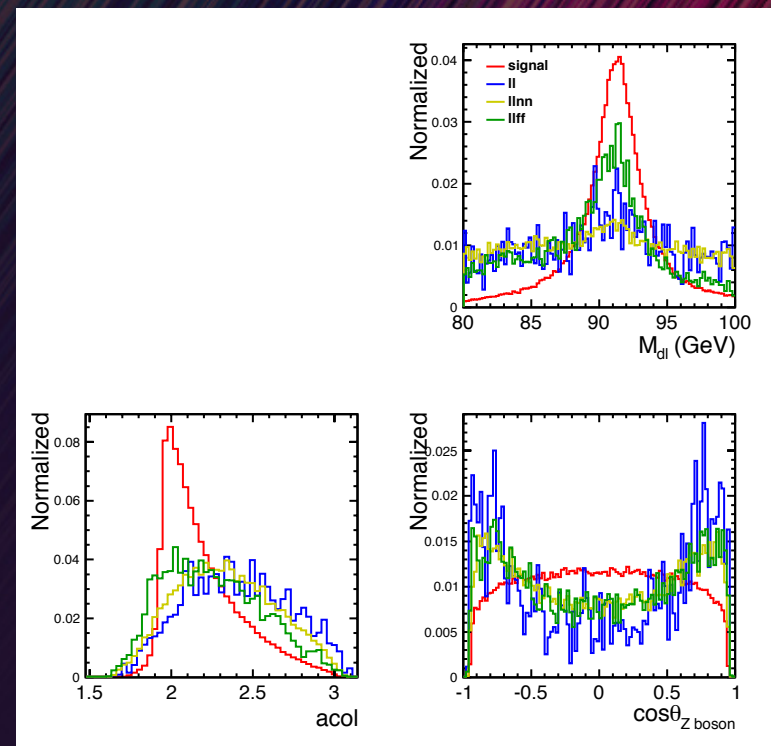
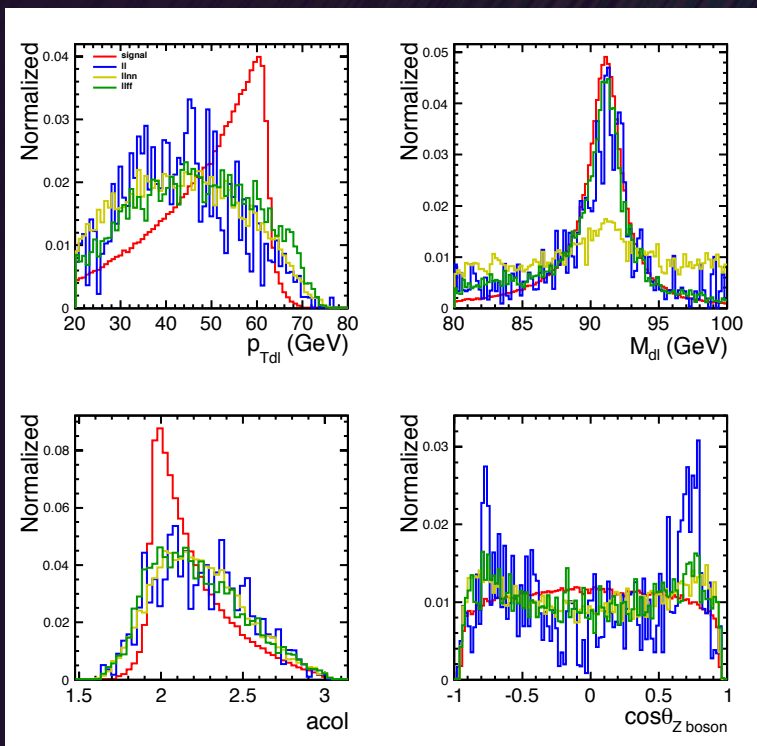
- $p_{Tdl}$
- $M_{dl}$
- Acolinearity
- $\cos\theta_{dl}$

– 定義に使うPDFの  $M_{recoil} \in (115, 150)$

## ■ $eeh$ チャンネル

- $M_{dl}$
- Acolinearity
- $\cos\theta_{dl}$

–  $M_{recoil} \in (120, 140)$



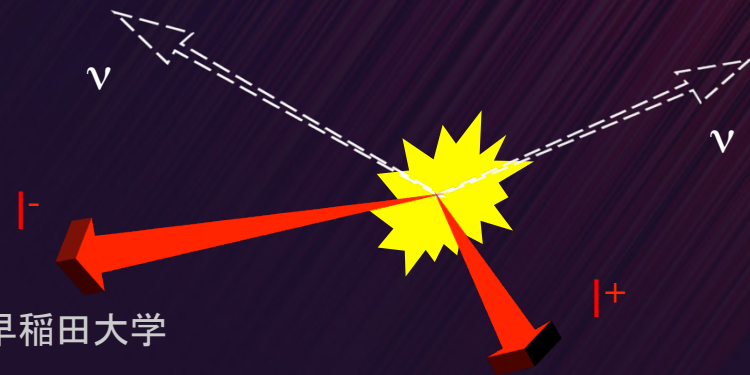
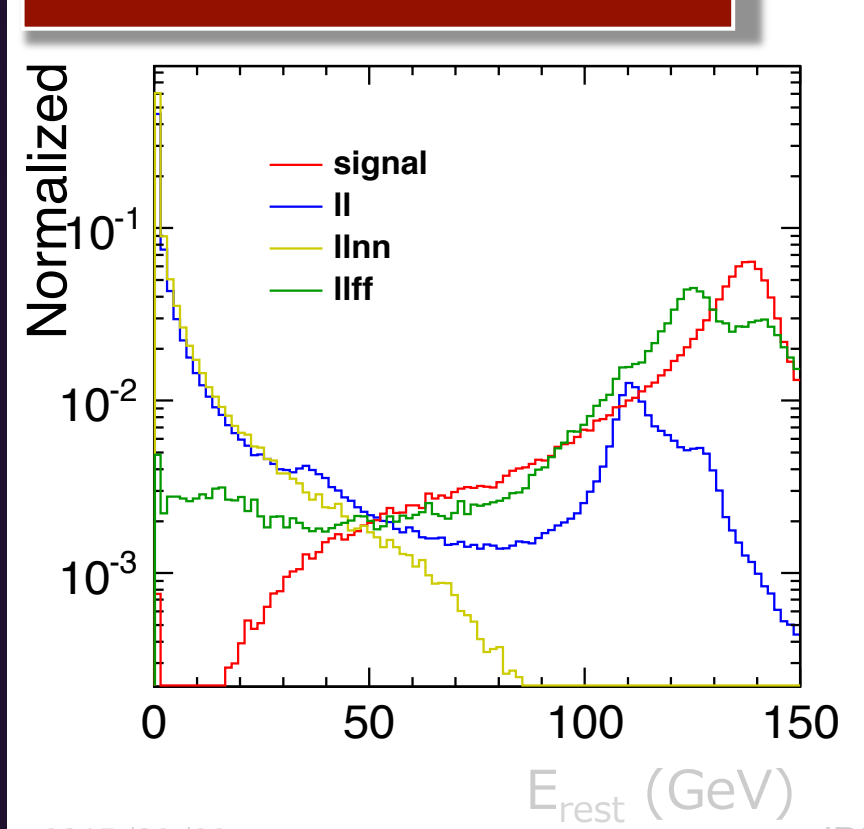


# 準モデル非依存解析

$\mu\mu h$	signal	$ll$	$ll\nu\nu$	$llff$	others
1500	427	2049	1269	7	
$\mu\mu h$	signal	$ll$	$ll\nu\nu$	$llff$	others
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

- $ll\nu\nu$  BGを排除するために  $E_{rest}$  を用いたカットを採用
- $E_{rest} \equiv E_{detected} - E_{di-lepton} > 5\text{GeV}$
- 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	$ll$	$ll\nu\nu$	$llff$	others
$\sim$ Likelihood	1588	427	2049	1269	7
$E_{rest}$	1586	427	641	1269	7
eeh	signal	$ll$	$ll\nu\nu$	$llff$	others
$\sim$ Likelihood	1101	1256	1781	833	4
$E_{rest}$	1100	1256	671	833	4

- $ll\nu\nu$ 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

