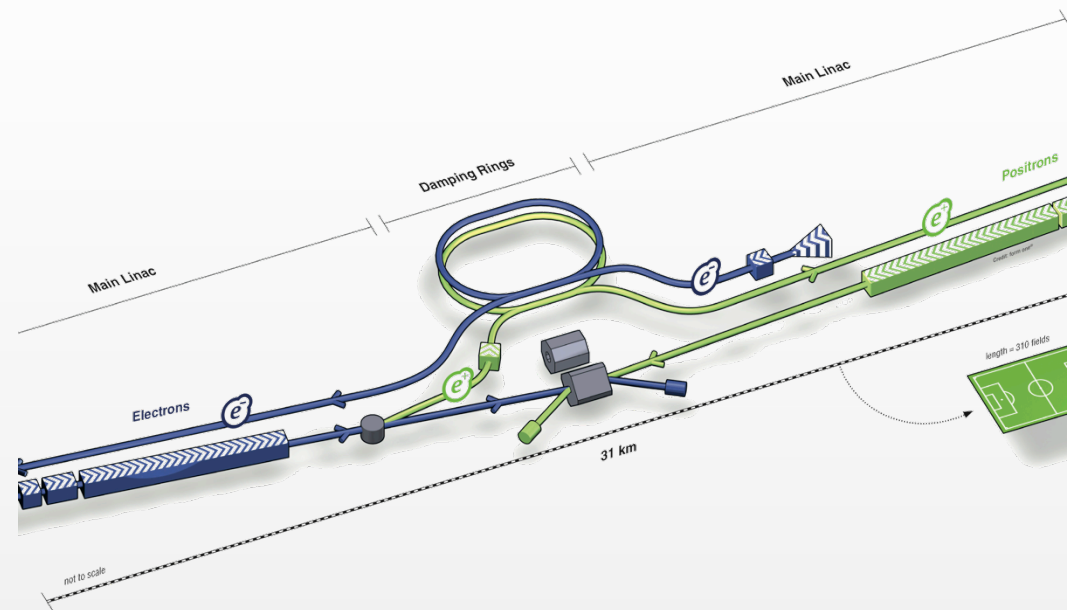
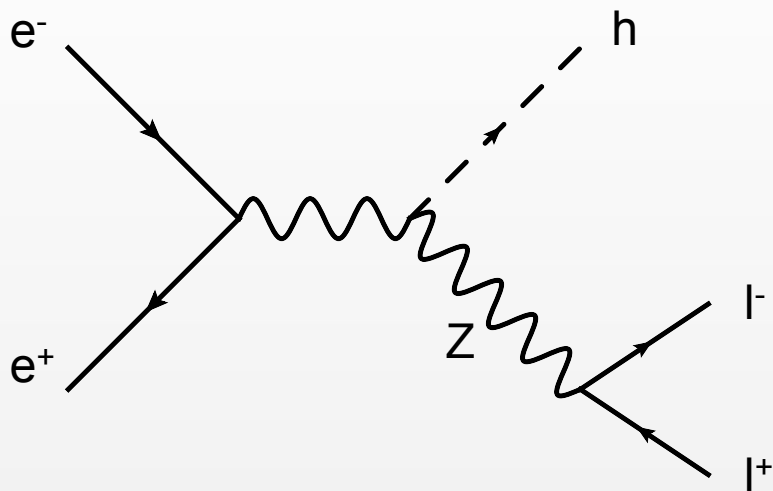


国際リニアコライダーにおける ヒッグス質量・生成断面積の 精密測定

2014年12月9日
東北大学理学研究科
綿貫峻

ILC実験



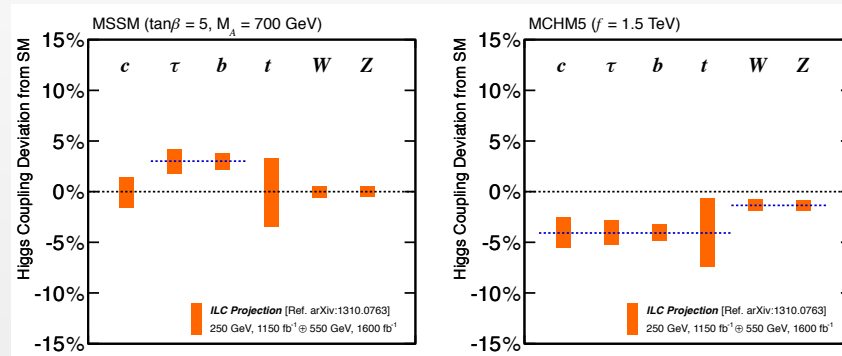
- 電子・陽電子衝突の次世代線形加速器
- $E_{\text{CMS}}=250, 350, 500$ (GeV), さらに1TeVまでアップグレード予定
- ビームのspin偏極を調整可(ルミノシティ上げたりBGを抑制したり)
- **反跳を用いたヒッグスの精密測定が可能!**

ILC計画でのヒッグス測定

- LHCで見つかったヒッグスは標準模型(SM)で予言されていたものと同じか？

– 新物理ではヒッグスの結合定数 g がSMと違う

$$g_{HAA}^2 \propto \Gamma(H \rightarrow AA) = \Gamma_H \times BR(H \rightarrow AA)$$

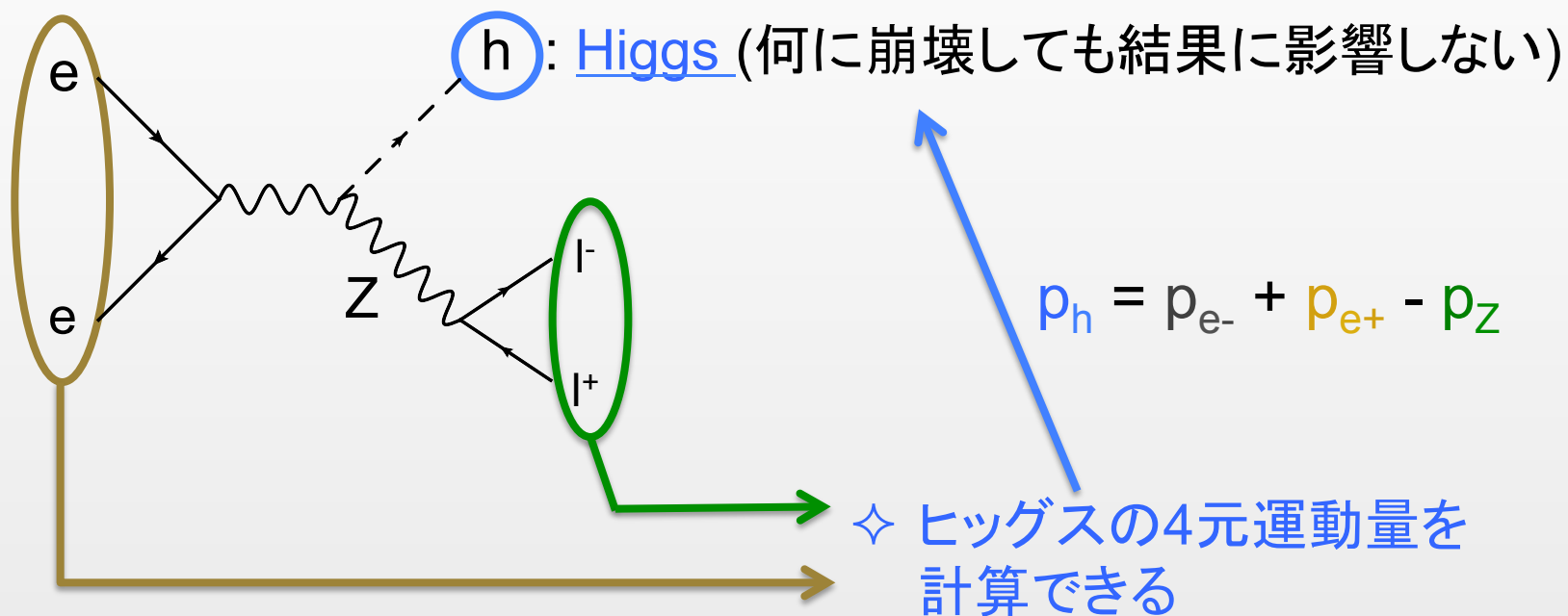


– でもLHCだと $\sigma \times BR$ しか測れない・・・

- ILCで断面積 σ と全崩壊幅 Γ_H を精密に測れる！
→ こいつが分かれば Γ_H とBRを決定できる
- ILCをつくる最大の目的と言っても過言ではない

どうやって σ を測るか

- 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できない、反跳による解析ができる



ヒッグスを測定したい

Directly

ヒッグスの崩壊モデルに依存してしまう

Recoil method

Model Independent

本解析の目的

モデル非依存性を保ちつつ、どこまでの精度で σ と m_{Higgs} を測定できるか？

- 想定する状況は以下

Production Mode	Higgs mass (GeV)	E_{CM} (GeV)	Integrated Luminosity	Spin Polarization	Detector Simulation
$e^+e^- \rightarrow Zh \rightarrow \mu\mu h, eeh$	125	250	250 fb ⁻¹	$P(e^-, e^+) = (\mp 0.8, \pm 0.3)$	ILD_01_v05 (DBD ver.)

- 250GeVはヒッグス生成に向いている。
- Zのレプトン崩壊モード (特に $\mu\mu h$ チャンネル)は精度が高い。

キーワード

1. モデル非依存性

- BGのカットはヒッグス崩壊モードに対して均一でないといけない (signal efficiencyのモード別からつきは一定以下に抑える)

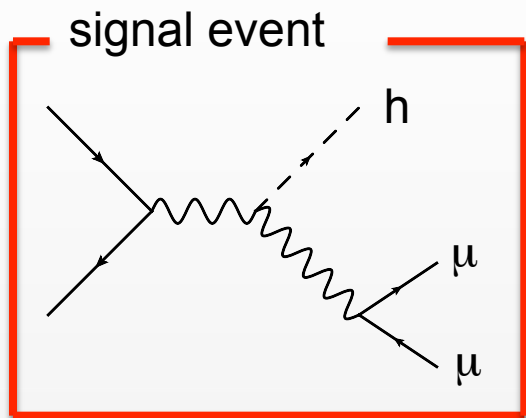
2. 精密測定

- モデル非依存を保ちつつ σ の測定精度を最大にする
- スピン偏極は左巻きと右巻きどちらがよいか？

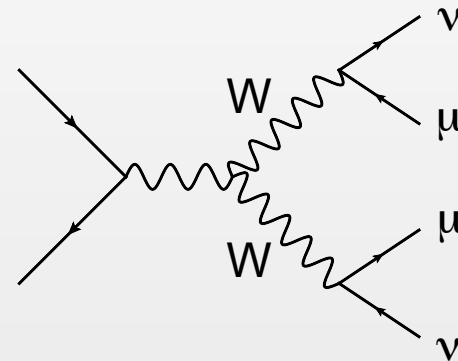
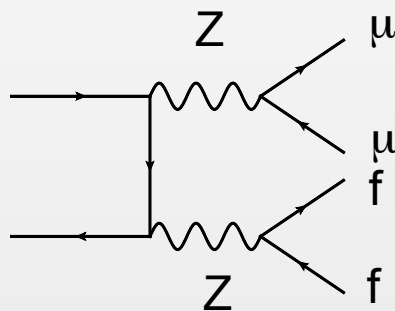
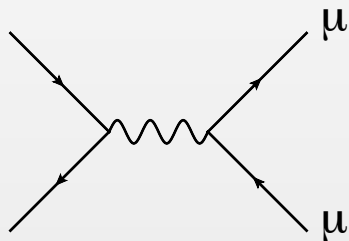
3. Mass template method

- Toy-MCにおけるバイアスを除外しヒッグス質量を決定するための解析

Signal and Background Events



- レプトン対が出てくるようなのがBGになる



- 最後まで残るのは $\mu\mu(\gamma)$ 、 $\mu\mu\nu\nu$ 、 $\mu\mu f\bar{f}$
- 右巻きスピンの偏極なら $\mu\mu\nu\nu$ は抑制される

解析の流れ

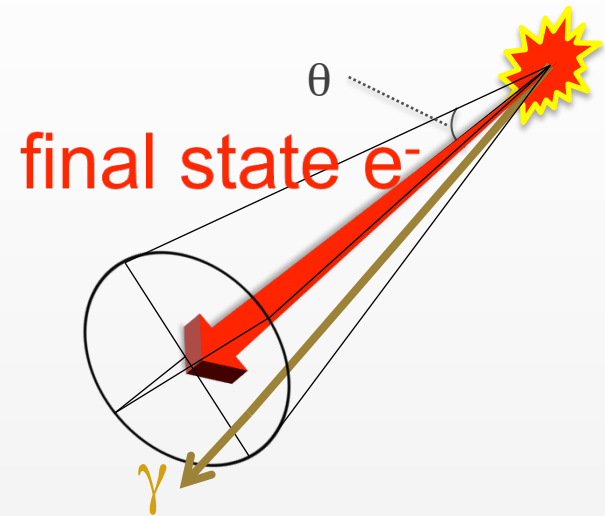
- レプトン対を見つける
- BGを排除する
- フィットして N_{sig} を見積もる
 - Toy-MCを使って統計誤差を調べる

Lepton Selection

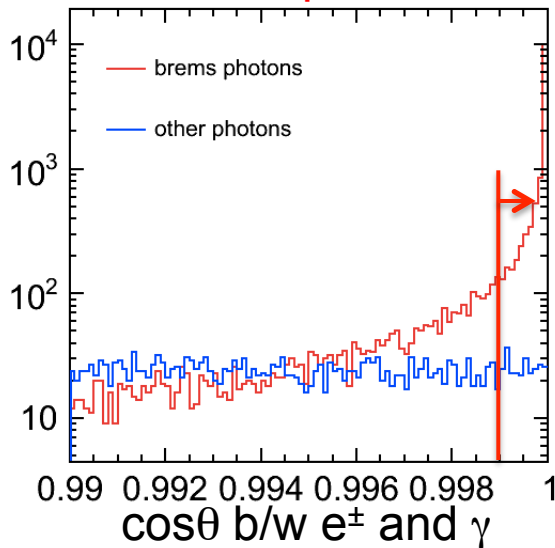
- ミューオン(電子)を見つけてくる
 - カロリメータのdeposited energyから
- Good track selection
 - エラーの小さい優良な飛跡を使う
- インパクトパラメータ条件
 - τ から崩壊したレプトンを除外
- Bremsstrahlung recovery
 - 電子の制動放射から放出された γ を回収

Bremsstrahlung Recovery

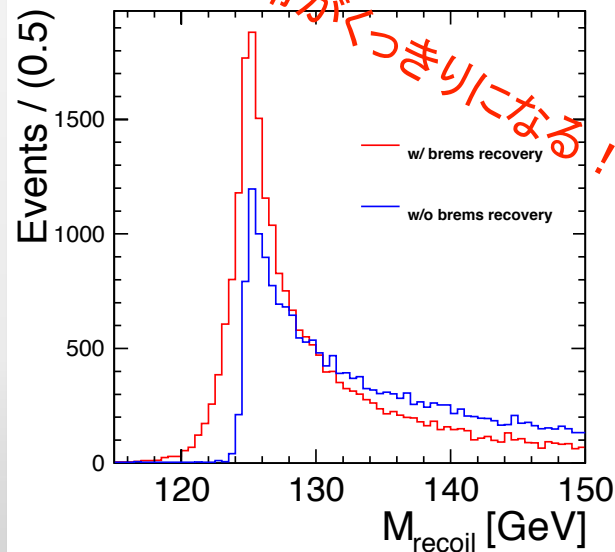
- Only for eeh channel, momentum of photon around **final state electron** is added to the electron.
 - $\cos\theta > 0.9995$
 - $\cos\theta > 0.999$ & $E_{\text{photon}}/E_{\text{electron}} > 0.03$
 - not split photon
- This process contributes to the distribution of recoil mass significantly.



こいつらの p^{μ} を回収すると、



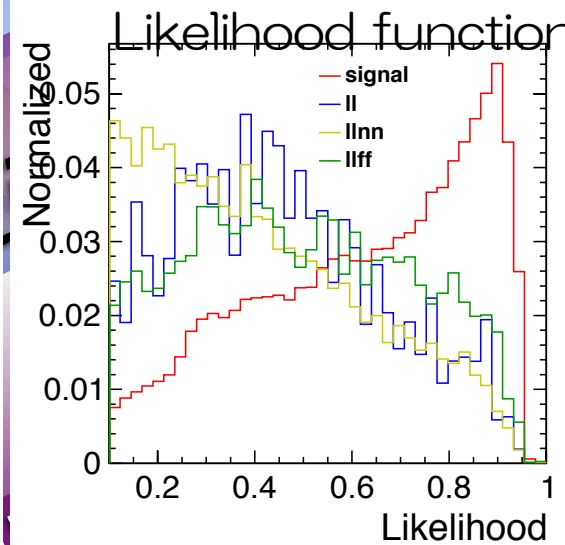
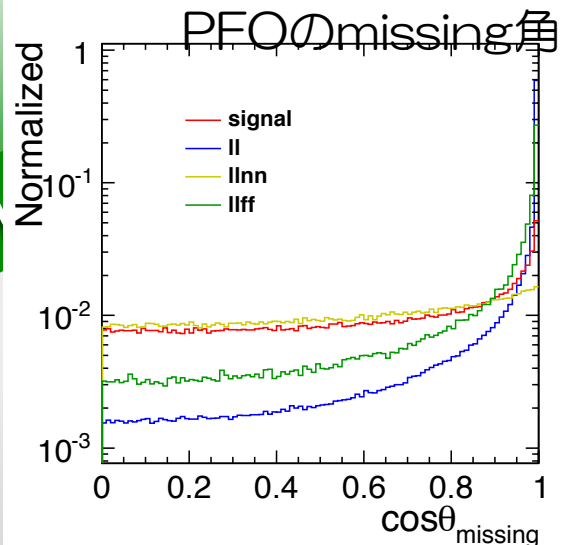
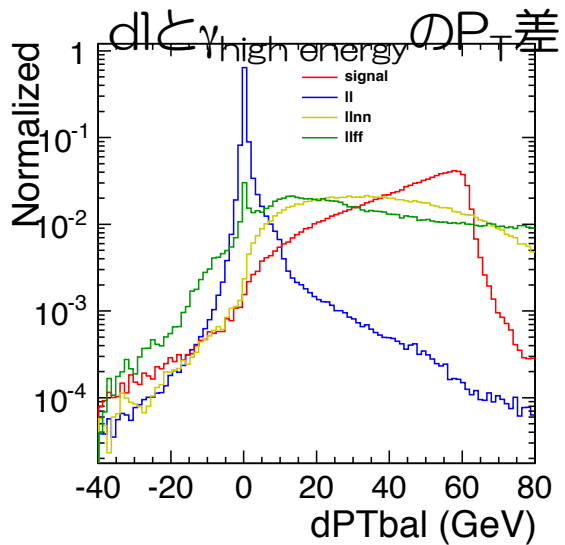
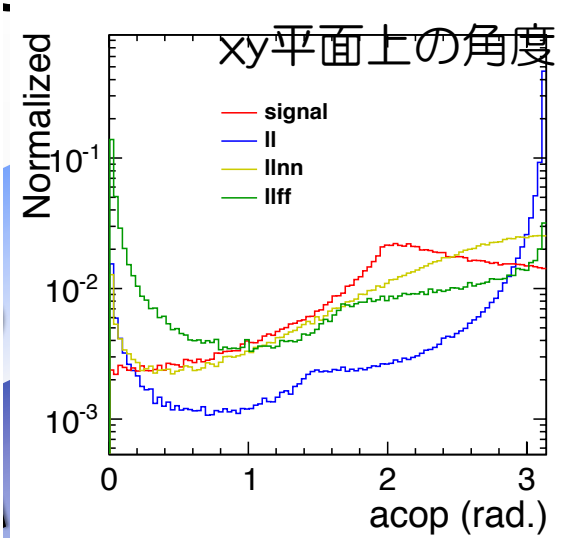
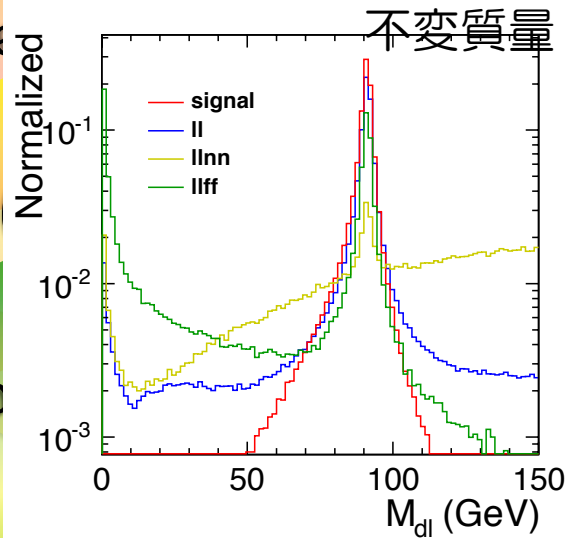
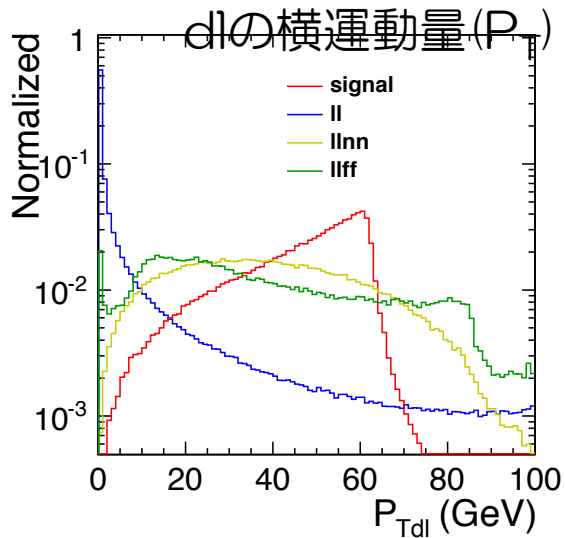
分布がくつきりになる!



BG Rejection



RG Rejection



BG Rejection

Left Handed Case

$\mu\mu h$	signal	ll	llvv	llff	others
No Cut	2603	3.2M	507166	390041	7.1M
After Cut	1386	322	1479	1054	3
eeh	signal	ll	llvv	llff	others
No Cut	2729	7.8M	520624	404279	2.5M
After Cut	1190	1496	2203	937	4

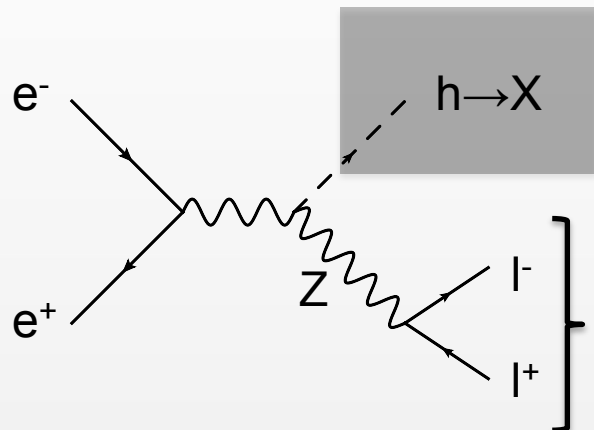
Right Handed Case

$\mu\mu h$	signal	ll	llvv	llff	others
No Cut	1756	2.6M	51768	330876	6.3M
After Cut	1113	287	323	650	3
eeh	signal	ll	llvv	llff	others
No Cut	1844	7.3M	52853	358595	1.5M
After Cut	742	927	230	393	1

BG with neutrino is suppressed significantly

カットの持つバイアス

- signalのcut efficiencyはヒッグスがなにに崩壊しても無関係であって欲しい



極端な話ヒッグスが
全部 $h \rightarrow ZZ \rightarrow 4\nu$ に崩壊しても
解析には影響しないのが理想

こいつらだけ見てる分には問題ないんだけど…
七色カットの内、 δP_{Tbal} と $\cos\theta_{missing}$ は例外

- が、実際には $h \rightarrow \tau\tau$ に崩壊すると、カットに使う δP_{Tbal} と $\cos\theta_{missing}$ の分布が変わってしまう
- これはまずい (モデル非依存性瓦解の危機)
ので、うまいことバイアスを除去するよう工夫
- 詳しくはバックアップスライドを見てほしい

Signal Efficiency

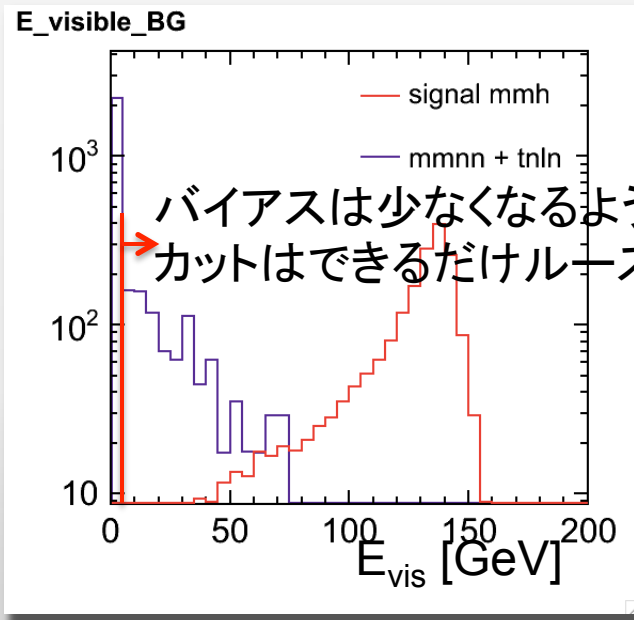
- Signalのヒッグス崩壊モード別のefficiency
- ぶらつきはほとんど無くなった ⇒ **Model independent**

H decay mode	$\mu\mu h$ efficiency [%]	eeh efficiency [%]
bb	55.61	45.62
WW	55.39	44.95
gluglu	55.16	45.02
$\tau\tau$	55.42	44.49
cc	55.60	45.14
ZZ	54.04	45.51

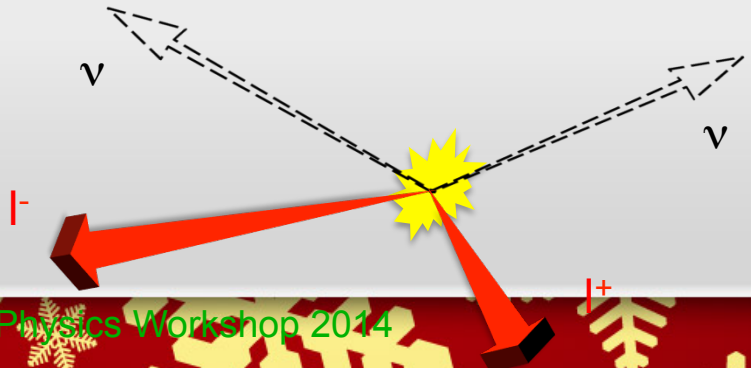
Visible Energy Selection (Semi-MI analysis)

$\mu\mu h$	signal	ll	llvv	llff	others
After Cut	1386	322	1479	1054	3
		ll	llvv	llff	others
		1496	2203	937	4

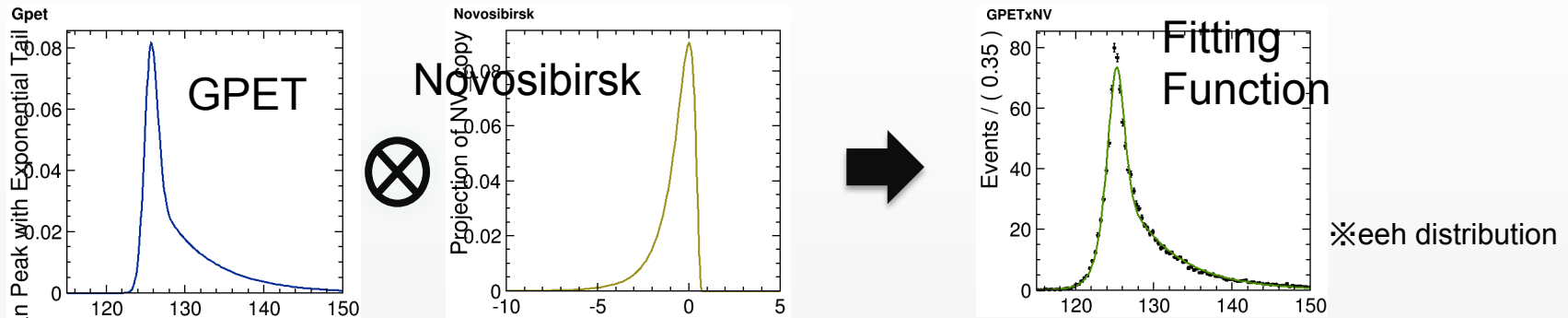
左巻き偏極だとニュートリノを含むBGが支配的な傾向



- バイアスの排除はできない(or 難しいが)、 ν を含むBGの排除には E_{vis} が有効
- $E_{vis} := E_{PFOs} - E_{di-lepton} > 5$ (GeV)
- ヒッグスのinvisible decay(左巻きで0.9%、右巻きで0.7%のupper limit, 95%CL)の影響は、それについての解析の結果を使えば補填できるはず



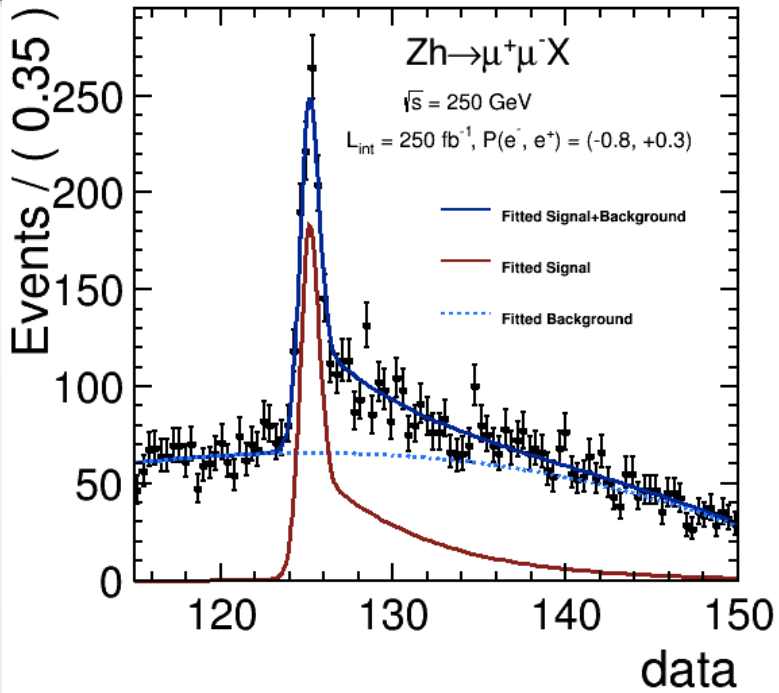
Fitting Function



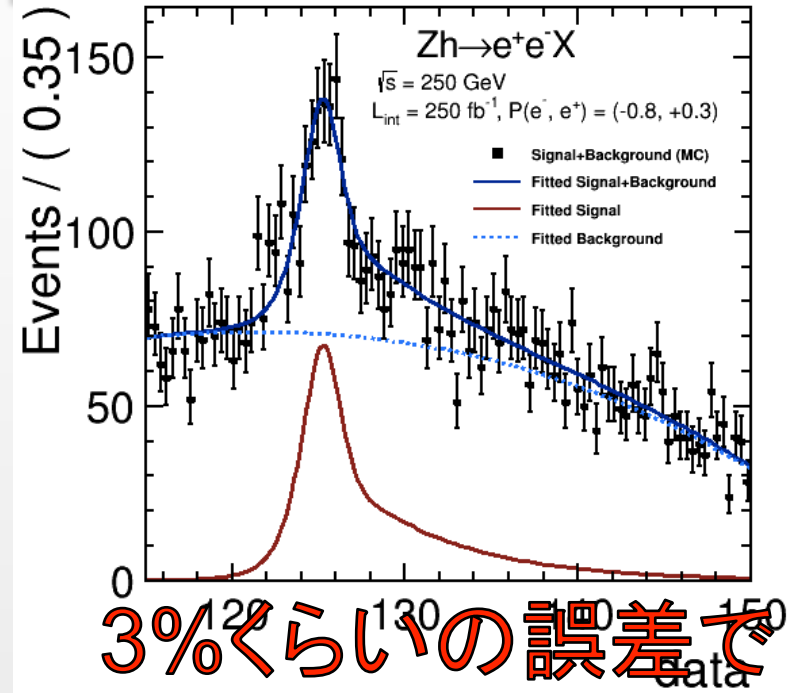
- Signalのフィット関数はGPETとNovosibirskの畳み込み
 - GPETはガウス関数と指数関数の組み合わせ
 - Novosibirskはレプトン検出の不定性を表現するためのスパイス [Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 441 (2000) 401-426]
- BGは3次関数
- あとはそれを元にToy-MC(偽実験)をたくさん作って、Yieldsの統計的ふらつきを見る

Fitting Results (Left Handed)

$\mu\mu h$



$ee h$

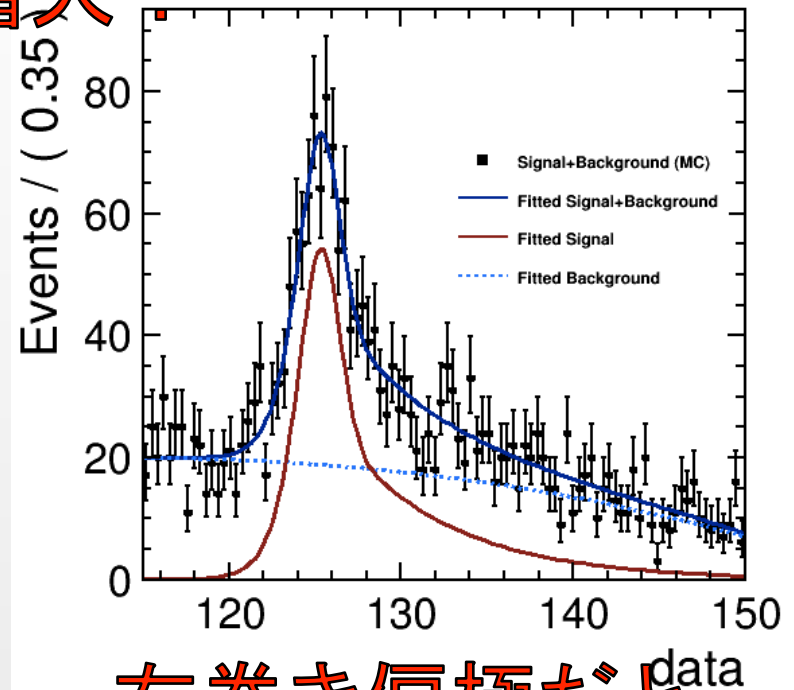
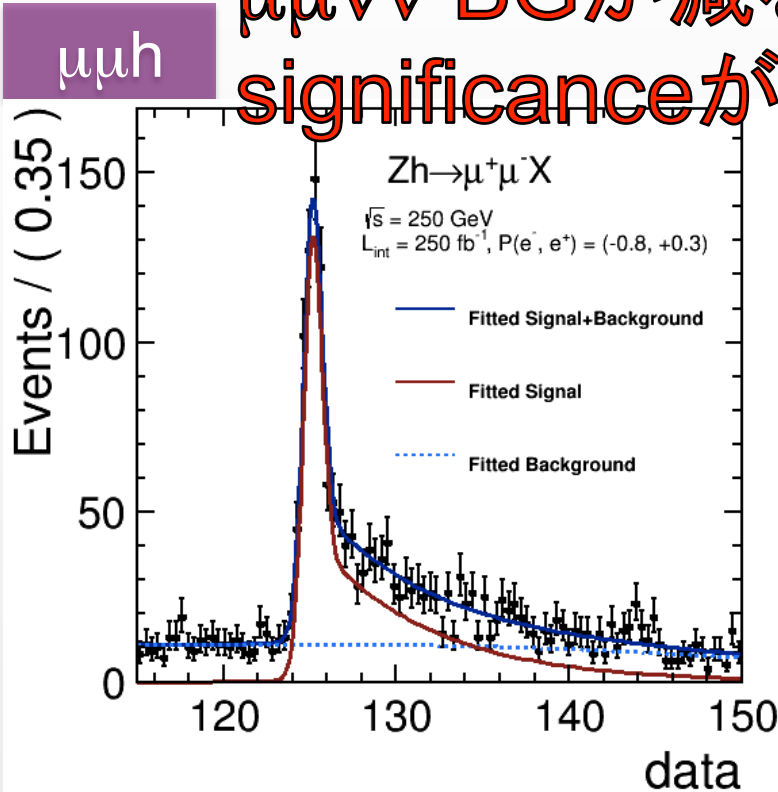


3%くらいの誤差で
σを決定できる

L=250fb ⁻¹ P(e-,e+)=(-0.8,+0.3)	$\mu\mu h$		$ee h$		e combined	
	MI	semi-MI	MI	semi-MI	MI	semi-MI
$\Delta\sigma/\sigma$	4.2%	3.8%	6.0%	5.6%	3.4%	3.1%
$\Delta\text{mass [MeV]}$	34	33	231	89	34	31

Fitting Results (Right Handed)

$\mu\mu\nu$ BGが減るので
significanceが増大!



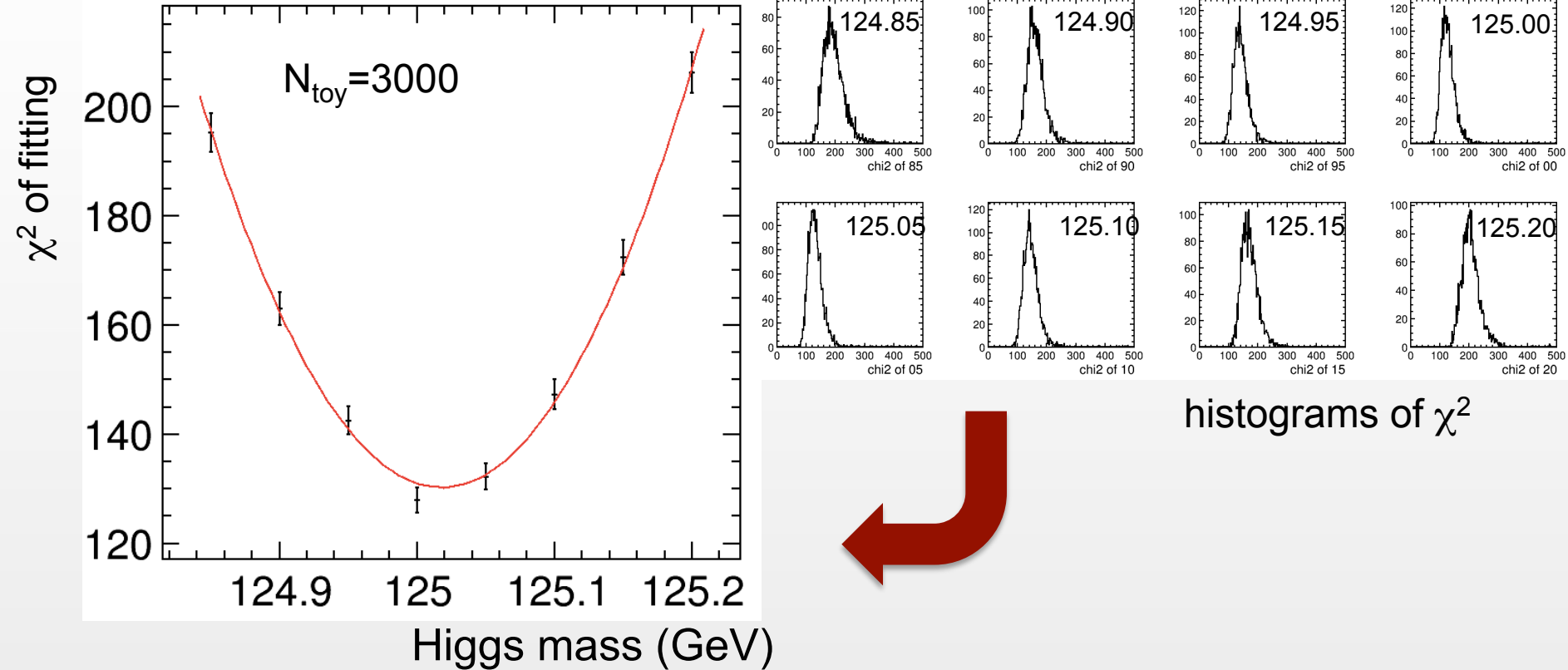
右巻き偏極だと
ちよつと精度が増す

$L=250\text{fb}^{-1}$ $P(e^-, e^+)=(+0.8, -0.3)$	$\mu\mu h$	$ee h$	combined
$\Delta\sigma/\sigma$	3.8%	6.0%	3.2%
$\Delta\text{mass} [\text{MeV}]$	31	214	31

Mass Template Method

- Toy-MCでも m_{Higgs} のふらつきは見られるが質量の違いがISRにかける制限までは再現できない
 - ISRが反跳質量のtailを作るので、 E_{ISR} 分布が変わればtailも変わる
- そこで m_h を微妙に変えたtemplate sampleを用意して、そこから得たPDFでフィット
- Δm_{Higgs} が大きいほど χ^2 も大きくなる
- χ^2 分布を2次関数でフィットして、最小点がヒッグス質量に対応する
- χ^2 を1上昇させる幅がエラー

Fitting Result



- Minimum position :
 $x = 125.018 \pm 0.021$ (GeV)

Summary

- ILCでの反跳を使ったヒッグスの σ 測定は非常に重要
- 反跳の解析ではモデル非依存性が大きなアドバンテージ
- 3%くらいの精度で σ を決定できる（系統誤差はbeam spectrumが大きい）
- ヒッグス崩壊モデルの依存性は小さくできる
- Mass Template Methodを使うと m_{Higgs} も21 MeV くらいの精度で決定できる

$\mu\mu h, eeh$ @250GeV		$\mu\mu h$		eeh		combined	
		Left	Right	Left	Right	Left	Right
MI	cross section	4.2%	3.8%	6.0%	6.0%	3.4%	3.2%
	mass [MeV]	34	31	231	214	34	31
semi-MI	cross section	3.8%		5.6%		3.1%	
	mass [MeV]	33		89		31	

BACK UP SLIDES



Lepton Selection

- Muon (electron) selection

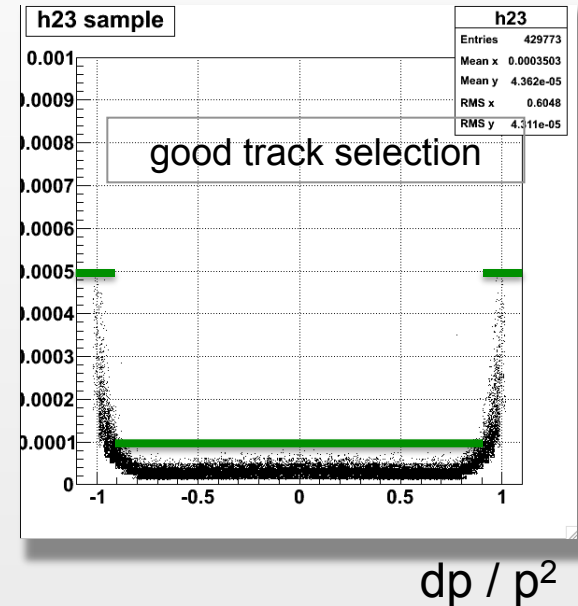
- Momentum $p > 15$ [GeV]
- Small (Large) energy deposited in calorimeters
 - $E_{\text{ecal}} / E_{\text{total}} < 0.5$ (> 0.6)
 - $E_{\text{total}} / p_{\text{track}} < 0.3$ (> 0.9)

- Good track selection

- Track with small error (different selections between polar angle of tracks, barrel or end cap)
 - $dp / p^2 < 2.5 \times 10^{-5} \oplus 8 \times 10^{-4} / p$
(for $\cos\theta < 0.78$)
 - $dp / p^2 < 5 \times 10^{-4}$
(for $\cos\theta > 0.78$)

- Impact parameter (only for muon)

- To suppress muons from tau decays which tend to have large impact parameters.
 - $D_0 / dD_0 < 5$



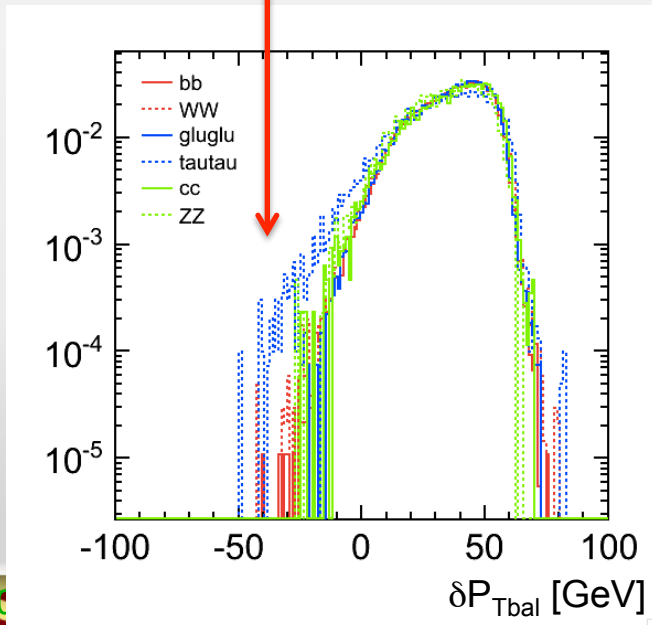
Unbiased Selection

- 単純にカットをかけようとするすると δP_{Tbal} と $\cos\theta_{missing}$ は $h \rightarrow \tau\tau$ に対してバイアスを持ってしまう

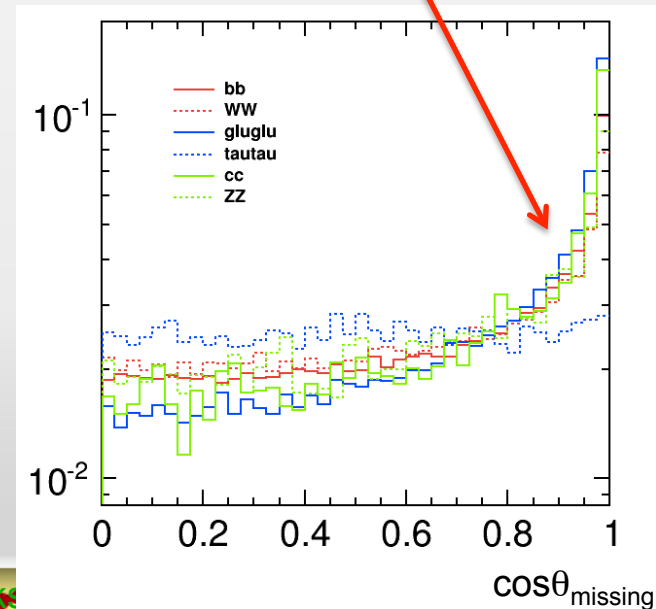
δP_{Tbal}

$\cos\theta_{missing}$

- $\delta P_{Tbal} = P_{Tdl} - P_{T\ photon} \notin (-10, 10)$
- $h \rightarrow \tau\tau$ はテールが長い(よく落ちる)
- $\cos\theta$ of all PFOs < 0.99
- $h \rightarrow \tau\tau$ は平坦(あんま落ちない)

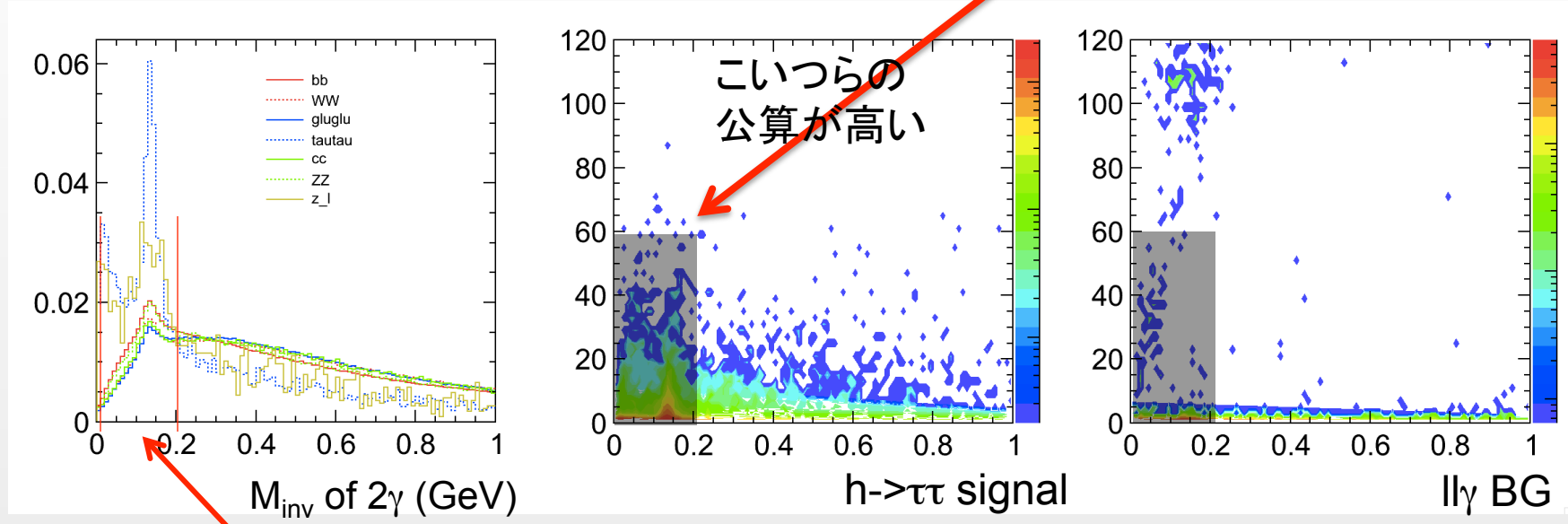


これはよくないから
改善しないとイケない

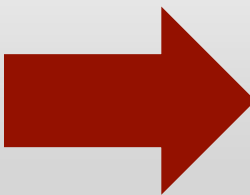


Bias Suppression (for δP_{Tbal})

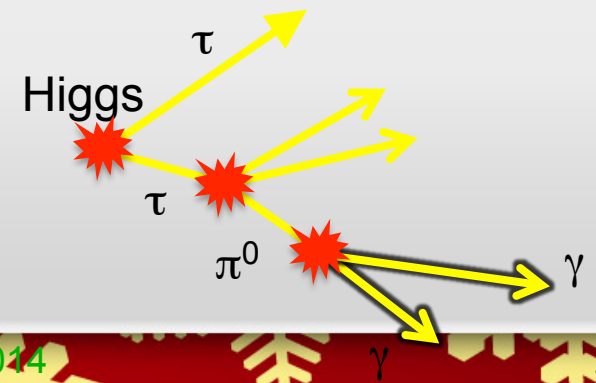
- ヒッグスから崩壊した τ から崩壊した π^0 から崩壊した γ を間違って拾っているのが、 δP_{Tbal} のバイアスの原因



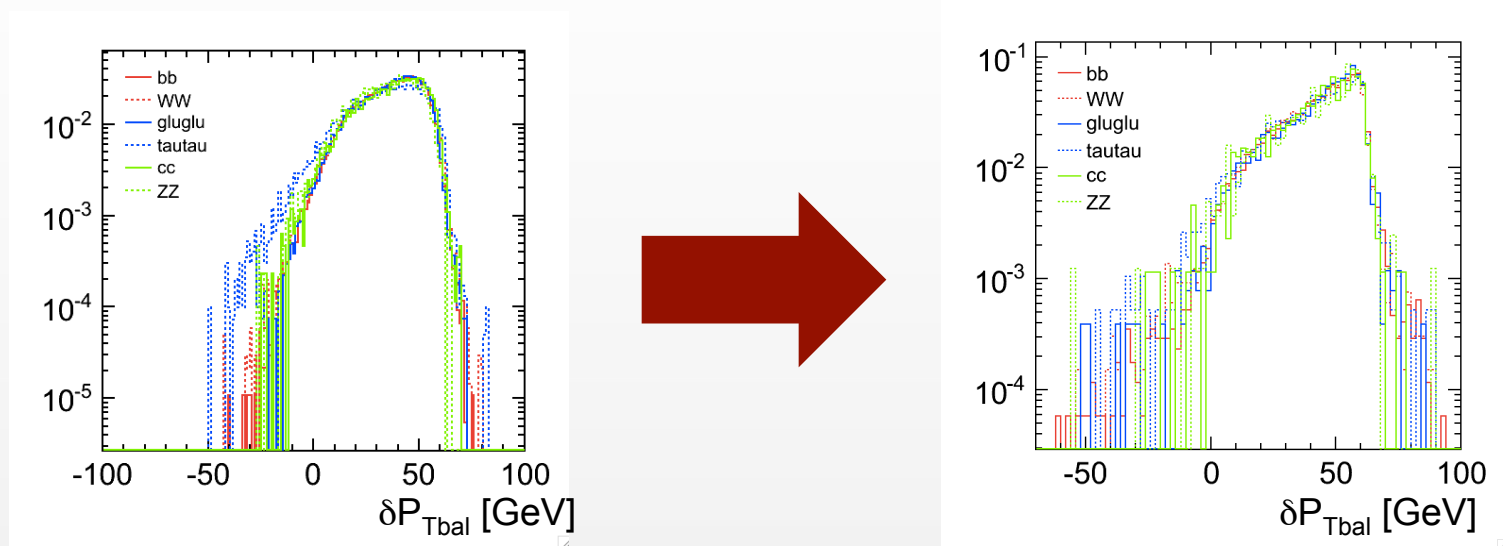
In $h \rightarrow \tau\tau$, there is a peak at $m_{2\gamma} \sim m_\pi$



condition of used γ
$m_{2\gamma} > 0.2$ [GeV]
or $E_\gamma > 60$ [GeV]



Bias Suppression (for δP_{Tbal})

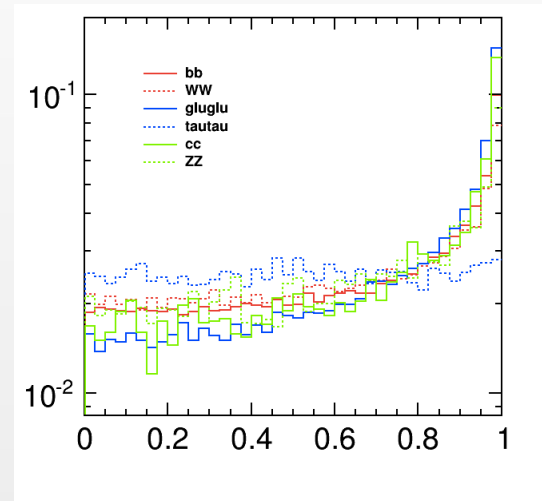
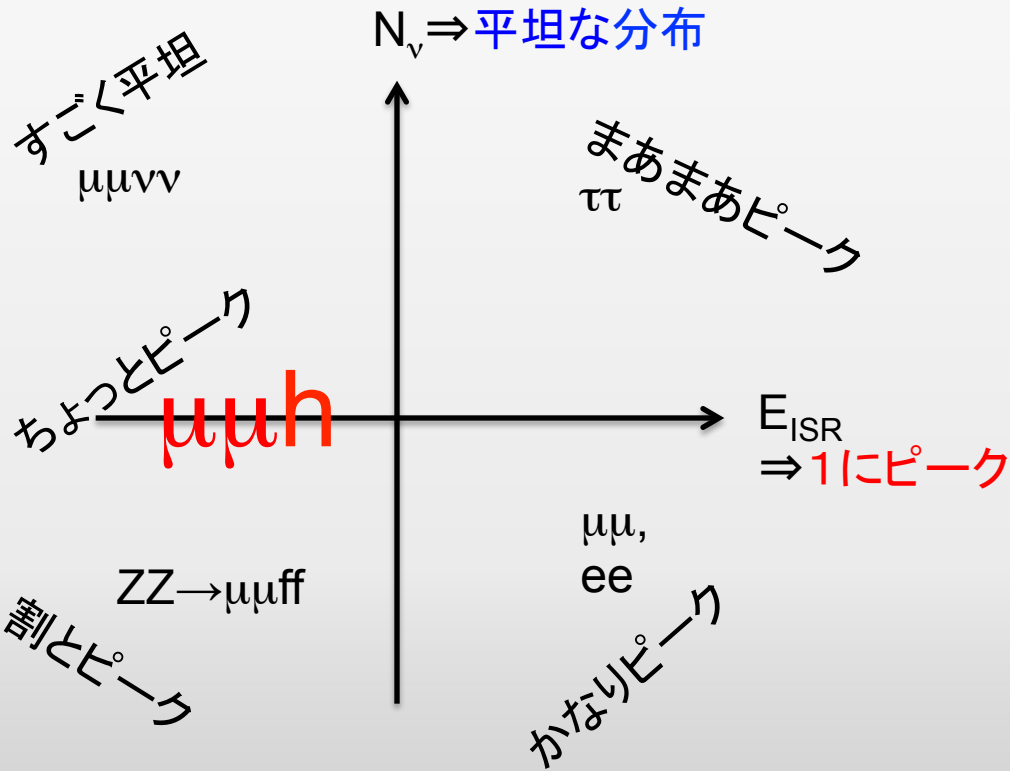


Comparison old & new	efficiency of dP_{Tbal} cut			
	bb	$\tau\tau$	cc	z_l (BG)
Simple calc.	99.4%	95.3%	99.0%	14.5%
My calc.	99.8%	97.8%	99.6%	22.2%

- バイアスが減った。BGの排除効率も悪くなったが仕方ない。

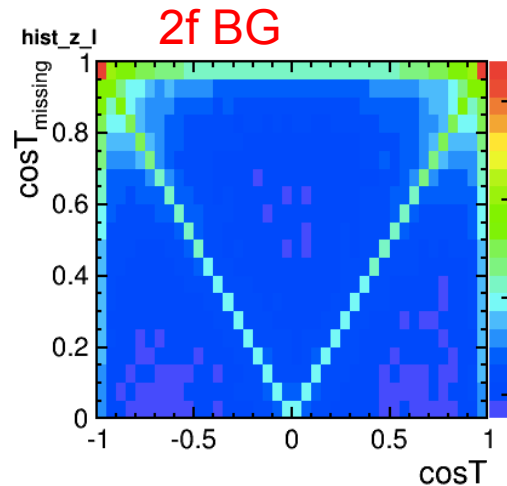
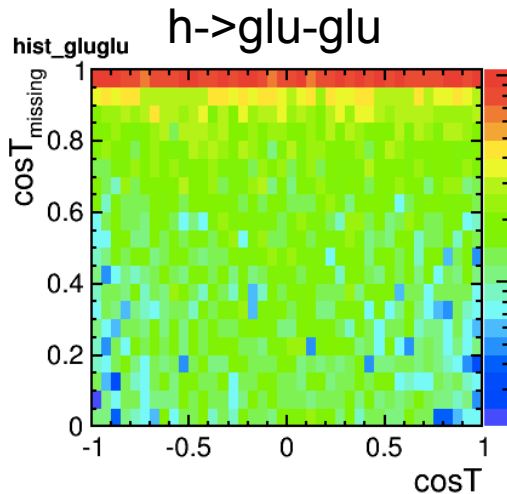
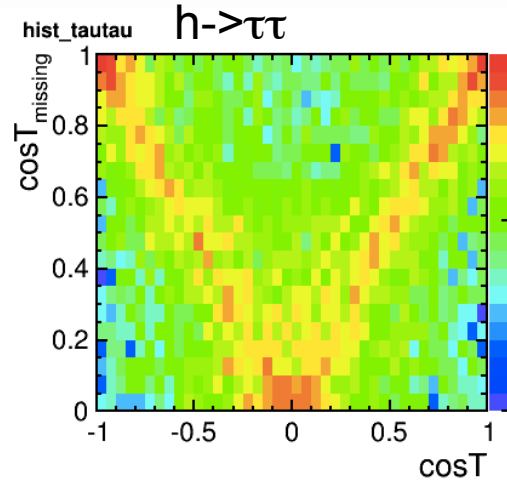
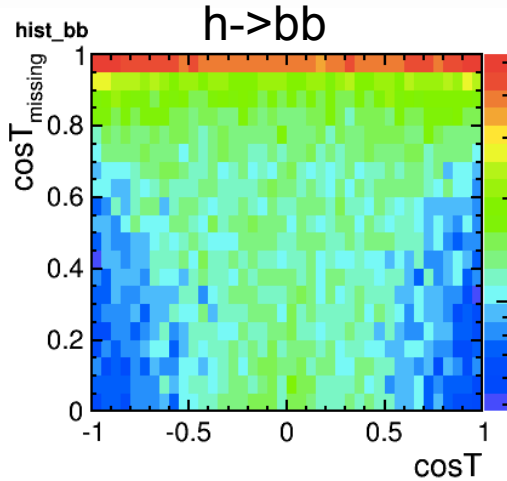
Bias for $\cos\theta_{\text{missing}}$

- $\cos\theta_{\text{missing}}$: 検出されなかった粒子の生成角度 $\cos\theta$
- この分布は、
終状態の ν の数 vs ISR のエネルギー
の優勢具合によって平坦になるか $|\cos\theta_{\text{missing}}|=1$ にピークを持つかが決まる
- Signal も少し落ちるが、 $1+$ や $1-ff$ を落とせるのが大きい



Signal は概ね、1 に若干ピークを持つはずだが、 $h \rightarrow \tau\tau$ モードは ν を出すので、こいつだけすごく平坦になってしまう

Bias Suppression (for $\cos\theta_{\text{missing}}$)



- じゃあh→ττ由来のνが前後方向に行くケースだけ考えればバイアスは少なくなるはず！
- もちろんヒッグスを直接見る訳ではなく、Zボソンが前後方向に飛ぶという条件を課す：
 - $|\cos\theta_{\text{missing}}| < 0.99$
 - or $|\cos\theta_{z\text{-boson}}| < 0.8$
- BGの排除効率が悪くなるが、バイアスはほぼ無視できるレベルに改善される

	bb	glu-glu	ττ	BG (II)
$\cos\theta_{\text{miss}} < 0.99$	95.1%	92.8%	99.2%	41.1%
$\cos\theta_{\text{miss}} < 0.99$ or $ \cos\theta < 0.8$	99.3%	99.1%	99.8%	74.6%

← Previous

← New

Efficiency of E_{visible}

H decay mode	$\mu\mu h$ (E_{vis} eff.)	After all cut	eeh (E_{vis} eff.)	After all cut
bb	100%	66.31%	98.68%	39.14%
WW	100%	66.00%	98.31%	38.67%
gluglu	100%	65.40%	98.67%	38.82%
$\tau\tau$	99.94%	65.66%	98.43%	37.82%
cc	100%	66.32%	98.25%	39.43%
ZZ	96.64%	63.98%	94.84%	37.90%

Bias as expected from SM.

※ Some selections are optimized for semi-MI analysis, so that eff. is different from MI case.

