



ILC実験に於けるヒッグス・ポータル模 型でのヒッグスー暗黒物質結合定数の 測定精度評価

素粒子実験研究室

修士課程2年

山本 歩

目次

- 1. モチベーションと目的
- 2. シグナルとバックグラウンド事象の選定
- 3. 物理事象の選択
- 4. シグナル生成断面積の下限值
- 5. 考察とまとめ

モチベーションと目的

- ▶標準模型
- ▶ILC：国際線形加速器
- ▶ILC実験のヒッグスの物理 1
- ▶ILC実験のヒッグスの物理 2
- ▶ヒッグスポータル模型
- ▶研究の目的

物質粒子	ゲージ粒子		
	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	 アップ	 チャーム	 トップ
	 ダウン	 ストレンジ	 ボトム
レプトン	 ν_e eニュートリノ	 ν_μ μ ニュートリノ	 ν_τ τ ニュートリノ
	 e 電子	 μ ミューオン	 τ タウ
ヒッグス場に伴う粒子			
 H ヒッグス粒子			

- 標準模型
→素粒子間の相互作用を記述する最も正確な理論

- LHC実験でヒッグス粒子が発見
→ILC実験でのヒッグス粒子の精密測定、新物理探索が必要

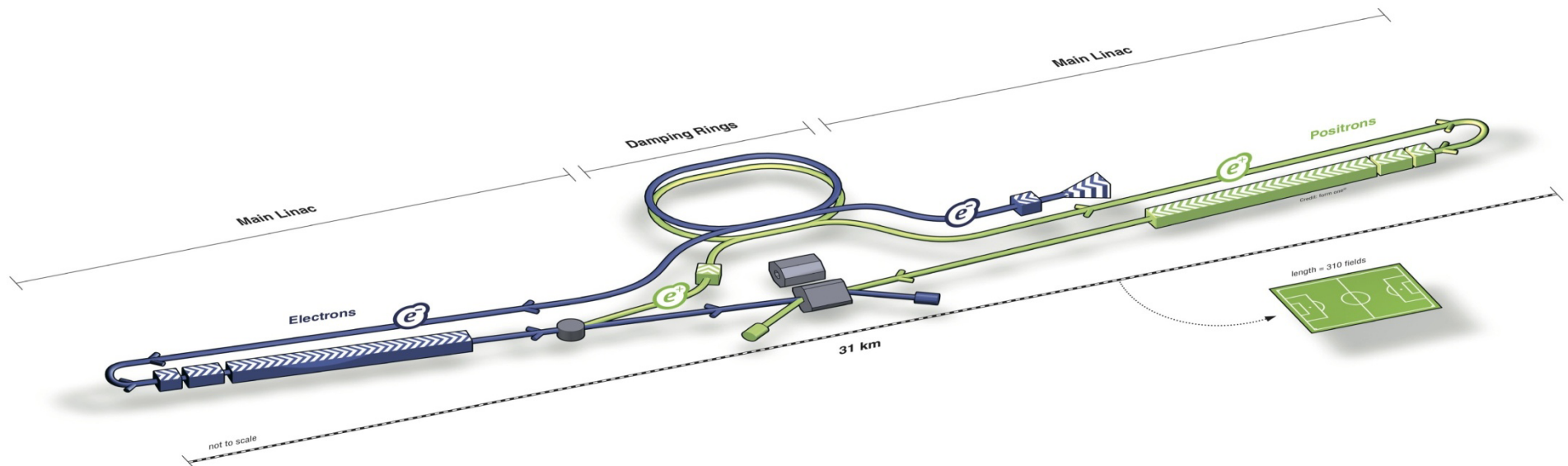
International Linear Collider (電子陽電子衝突型線形加速器)

＜電子陽電子衝突型線形加速器＞

- 1.背景事象少ないクリーンな環境
- 2.重心系エネルギーを変えられる
- 3.重心系エネルギー: $E_{CM}=250\sim 500\text{GeV}$ →将来、1TeVまでアップグレード
- 4.電子偏極(電子のスピン制御)
- 5.高ルミノシティ:高統計⇒精密測定

＜建設候補地＞

国内：北上山地、脊振山地が候補地→今年7月に一本化される見込み



IILC実験でのヒッグスの物理

6

1. ヒッグス粒子の精密測定

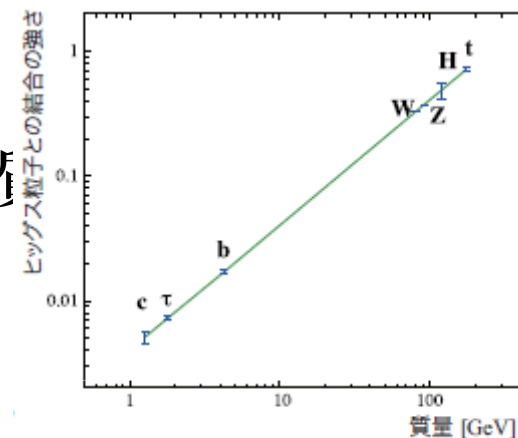
ヒッグス粒子の質量、反応断面積、崩壊分岐比の測定

2. ヒッグス粒子との湯川結合の強さの測定

ヒッグス粒子との湯川結合の強さ \propto 粒子の質量

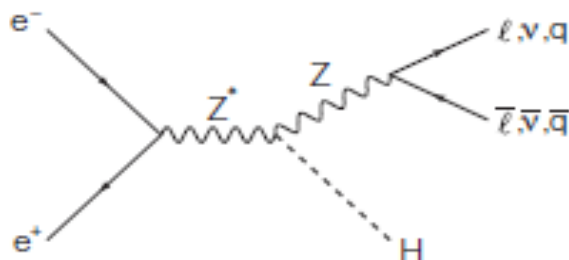
→ヒッグス機構の検証が可能

→新物理探索

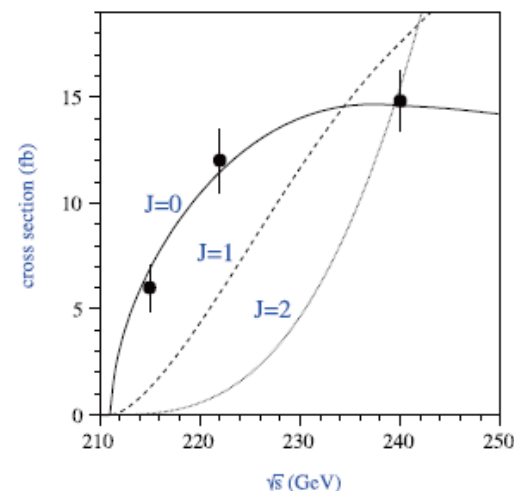


3. ヒッグス粒子のスピンの測定

ヒッグス生成断面積を重心系エネルギーで測定するによりスピンの測定



$e^+e^- \rightarrow ZH$ 過程がこれらの測定で重要



ILC実験でのヒッグスの物理

<e+e-→ZH過程の利点>

- ・ヒッグス粒子の崩壊に関わらず、Zボソンの反跳質量を求めることで、ヒッグス粒子の質量を測定可能

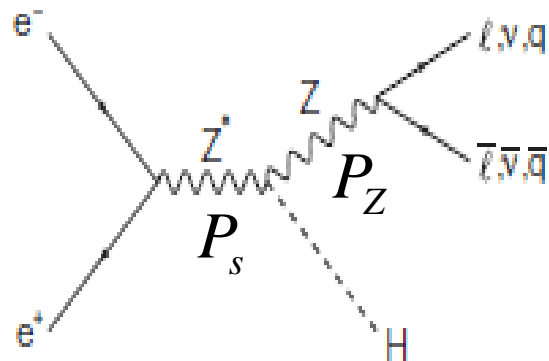


- ・たとえば、インビジブルな崩壊が観測された場合、

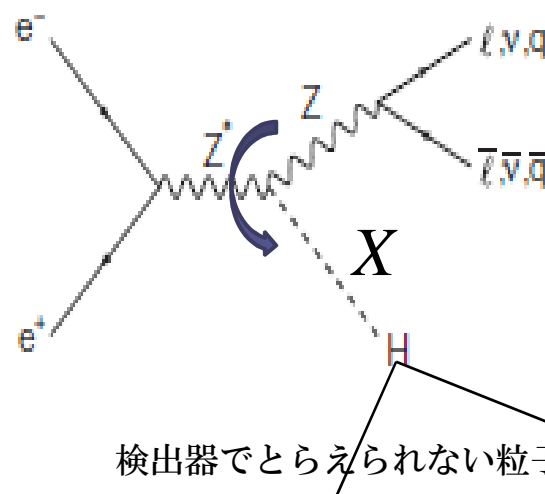
それがヒッグスボソン由来であるのかどうかを調べることで、インビジブルな崩壊が観測さ

れたら新物理が存在

→この現象を説明するモデルの一つにヒッグス・ポータルモデルがある



$$P_H = P_s - P_Z$$



検出器でとらえられない粒子に崩壊
検出器でとらえられない粒子に崩壊

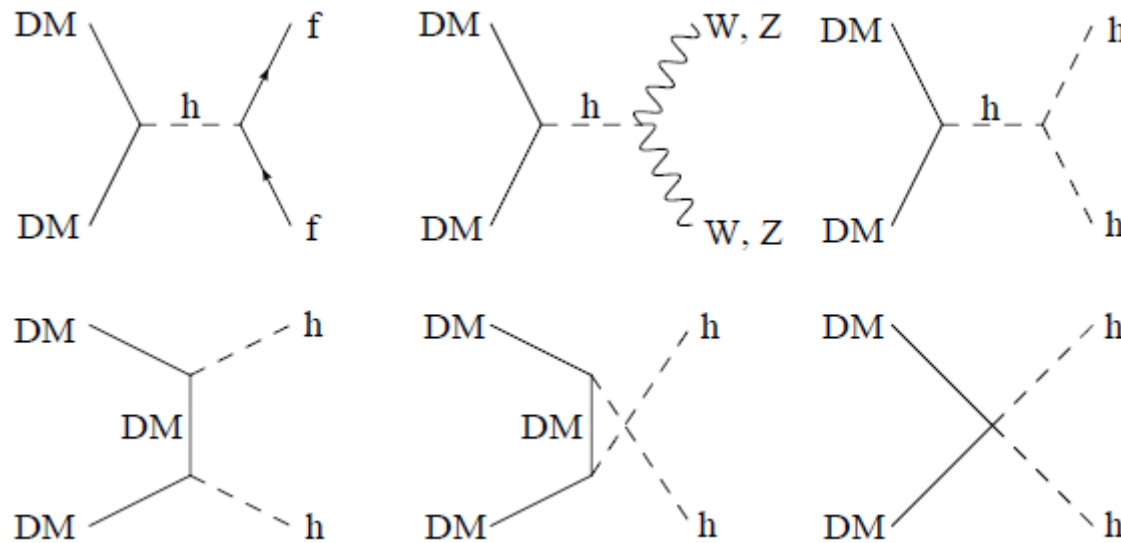
ヒッグス・ポータル模型

<ヒッグス・ポータル模型とは>

暗黒物質はヒッグスボソンとのみ結合する模型

→暗黒物質は、電磁相互作用、弱い相互作用、強い相互作用に関与しない

暗黒物質は標準模型の素粒子とヒッグスボソンを介してのみ相互作用する



研究の目的

1. 本研究では、ILC実験における、 $e^+ e^- \rightarrow ZH$ 過程に於いてインビジブルな崩壊がヒッグスボソンの直接的な崩壊であることを保障するための、生成断面積、崩壊分岐比の下限值を見積もる
2. また、ILC実験におけるインビジブルに崩壊するヒッグス観測感度を他の実験での感度と比較するため、ヒッグスポータル模型を仮定し、ヒッグスボソン-暗黒物質の結合定数の下限値を見積もり評価する

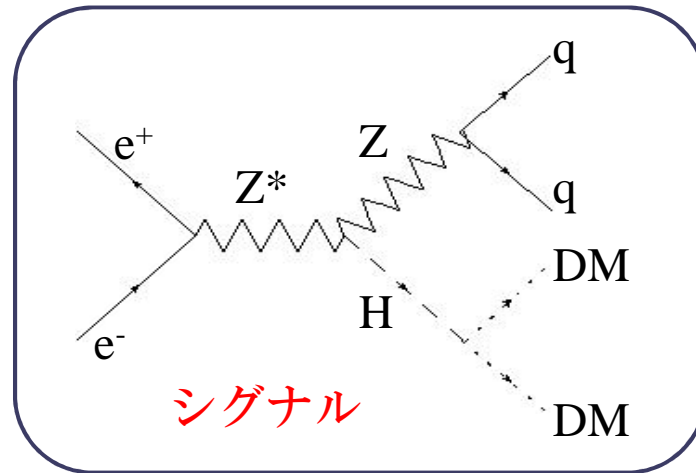
シグナルとバックグラウンド 事象の選定

- ▶シグナルとバックグラウンド事象の選定 1
- ▶シグナルとバックグラウンド事象の選定 2
- ▶解析条件

シグナルとバックグラウンド事象の選定 1

■シグナル事象

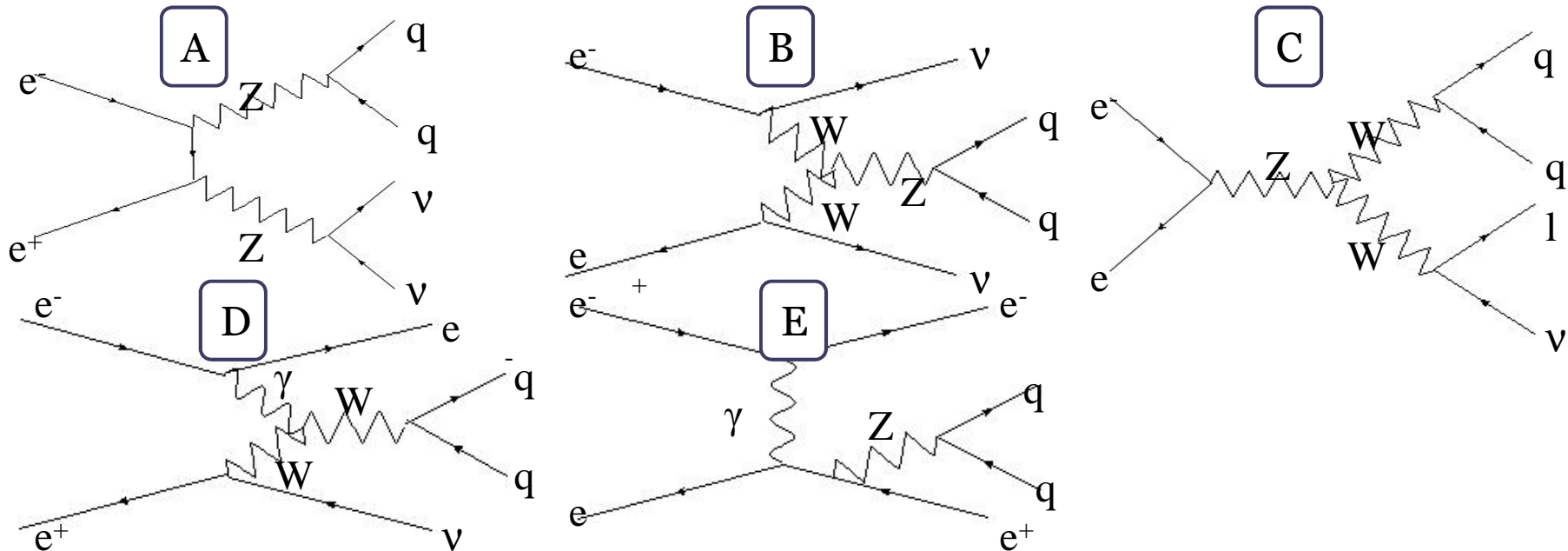
$$e^+e^- \rightarrow ZH \rightarrow qq DM DM .$$



■バックグラウンド事象

バックグラウンド事象 : その終状態がシグナル事象の終状態と類似した事象

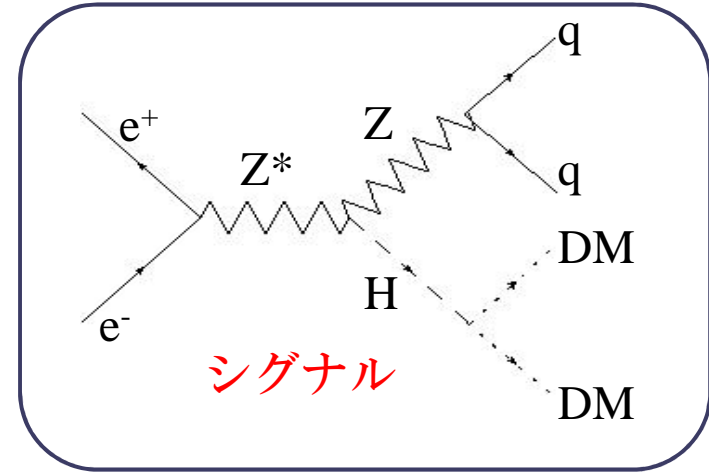
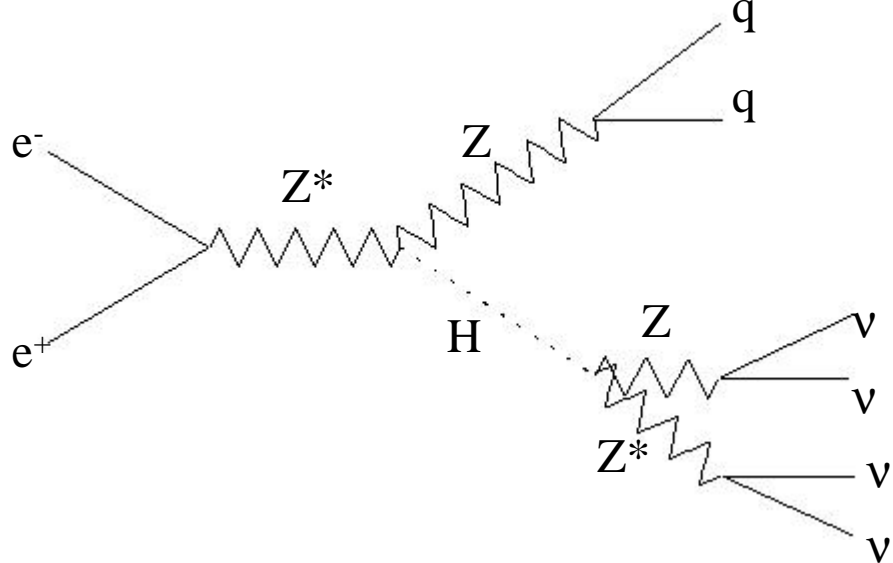
- (A) ZZ (B) $\nu\nu Z \rightarrow \nu\nu qq$ (C) WW (D) $e\nu W \rightarrow e\nu qq$ (E) $eeZ \rightarrow eeqq$



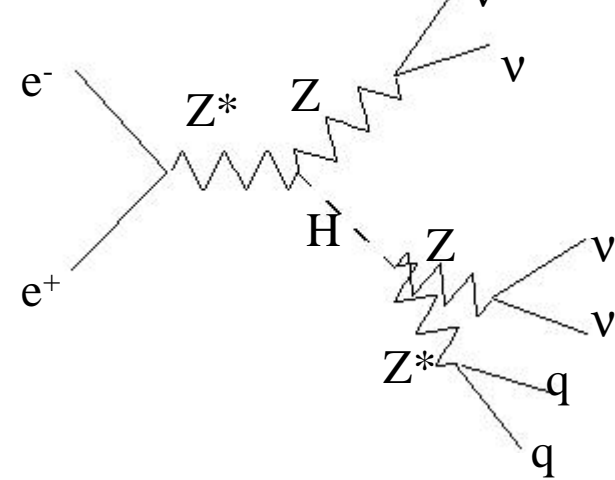
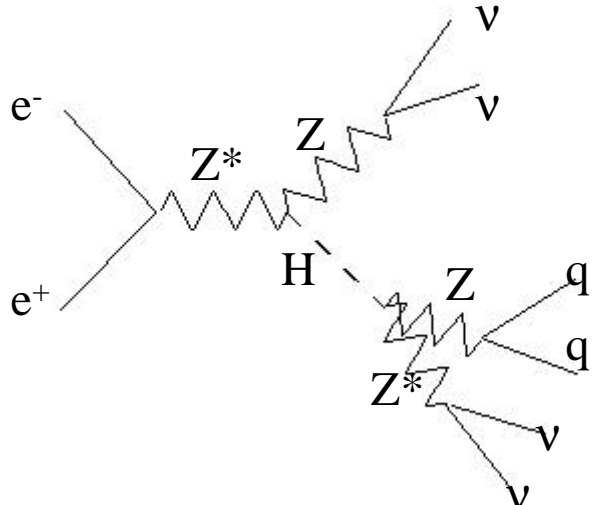
シグナルとバックグラウンド事象の選定 2

バックグラウンド事象

F $e^+e^- \rightarrow ZH \rightarrow q\bar{q}ZZ^* \rightarrow q\bar{q}vvvv$



G $e^+e^- \rightarrow ZH \rightarrow \nu\nu ZZ^* \rightarrow \nu\nu q\bar{q} \nu\nu$ **H** $e^+e^- \rightarrow ZH \rightarrow \nu\nu ZZ^* \rightarrow \nu\nu\nu q\bar{q}$



- 重心系エネルギー：Ecm=250GeV
- ルミノシティ：1[ab⁻¹]
- 電子偏極:80%
- 陽電子偏極：-30%

電子偏極

$$\frac{N_{e^-R} - N_{e^-L}}{N_{e^-R} + N_{e^-L}}$$

陽電子偏極

$$\frac{N_{e^+R} - N_{e^+L}}{N_{e^+R} + N_{e^+L}}$$

■ 模型パラメータ

- 暗黒物質のスピン：1/2
- 暗黒物質の質量：50 [GeV]
- 標準模型の適応限界Λ：1000 [GeV]
- ヒッグスボソン-暗黒物質結合定数C_F：6.86

$N_{e^-R,L}$ 右巻き、左巻き電子の数
 $N_{e^+R,L}$ 右巻き、左巻き陽電子の数

■ イベント生成

* luminosity1 [ab⁻¹] のバックグラウンドイベントの生成.

* シグナル生成断面積を 15fbと仮定.

断面積は小ささが反跳質量分布がシグナル事象と類似

表1. バックグラウンド生成断面積

Event Selection	eeZ	evW	vvZ	WW	ZZ
Cross Section [fb]	3992	684	5	2783	982

物理事象の選択

- ▶ 孤立したレプトンがない事象の選択
- ▶ ビームパイプに抜ける粒子がない事象の選択
- ▶ Zボソンの質量による事象の選択
- ▶ Likelihood Ratioによるシグナルとバックグラウンドの分離
- ▶ 反跳質量分布

孤立したレプトンがない事象

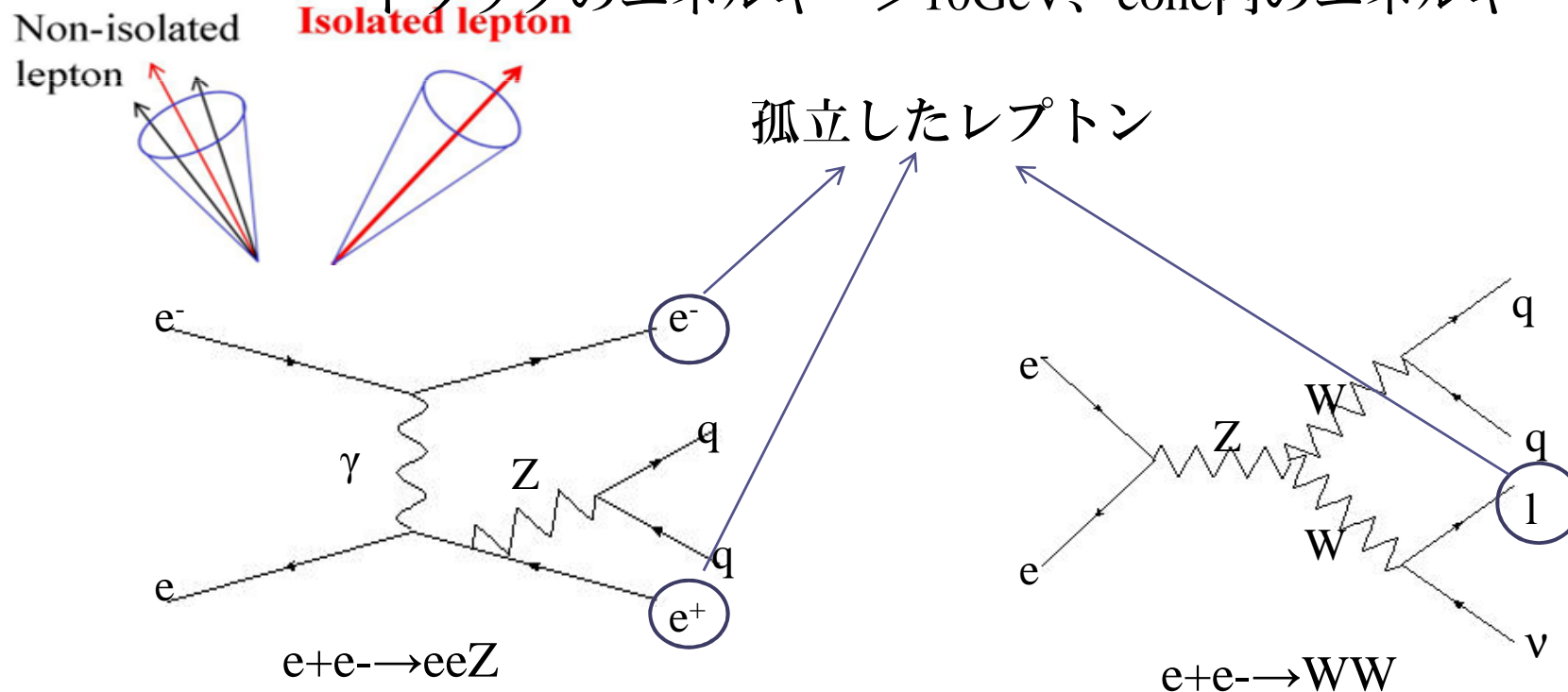
孤立したレプトンがない事象を選択→ eeZ、WWバックグラウンドをカット

- eeZ、WWのような事象にはJetと同方向に飛ぶレプトンとは別に、エネルギーの高い

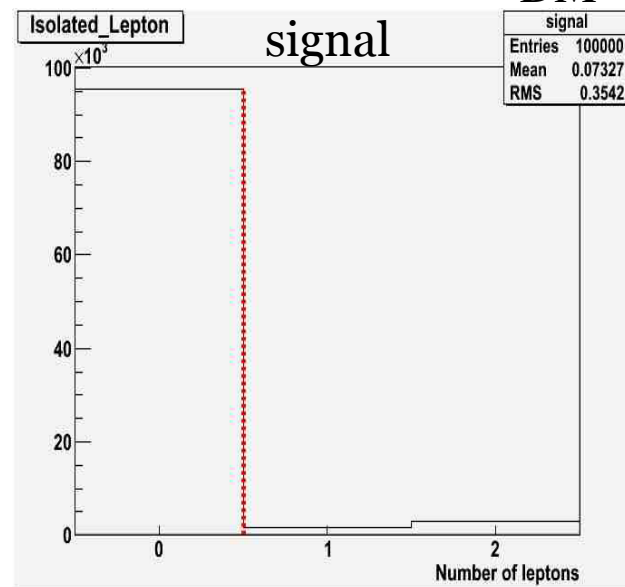
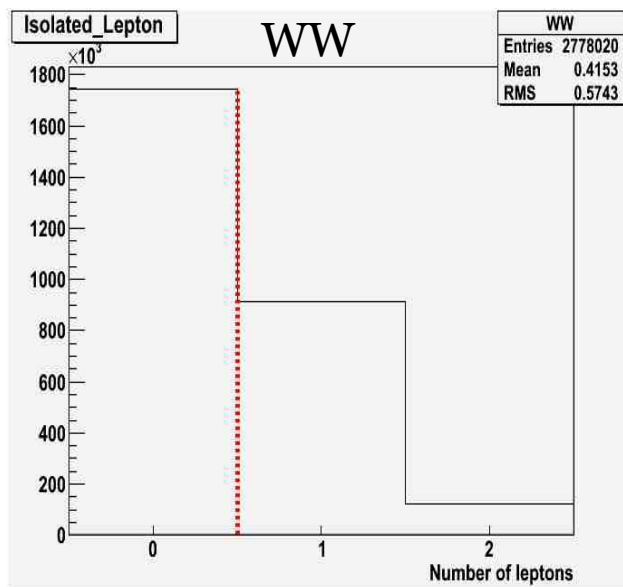
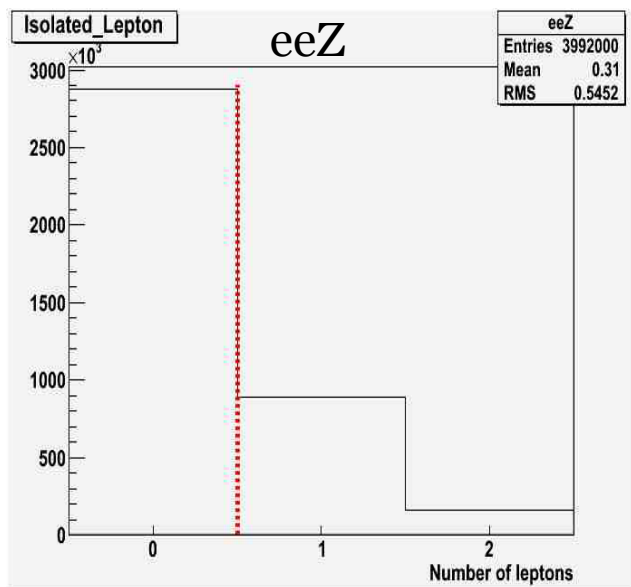
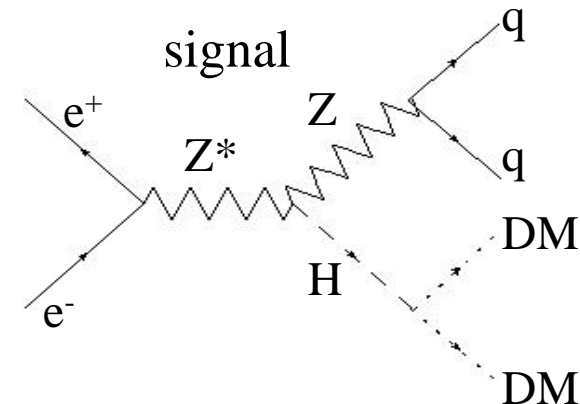
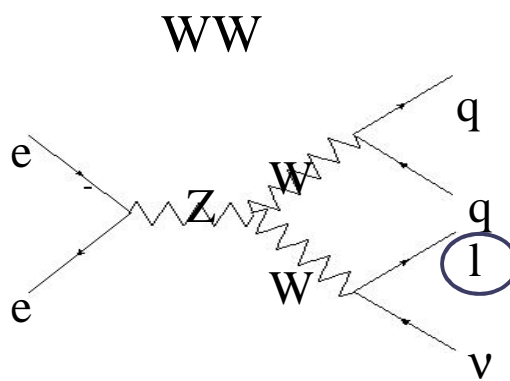
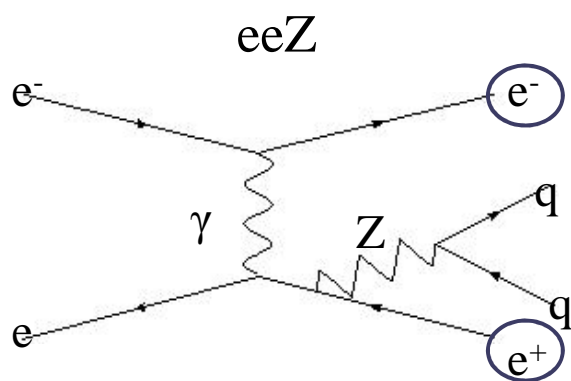
孤立したレプトンが存在する

- 孤立したレプトンの条件

トラックのエネルギー > 10 GeV、cone内のエネルギー < 1 GeV



物理事象の選択 孤立したレプトンがない事象



<ビームパイプに抜けた粒子がない事象の選択によるefficiency>

→シグナル:約98%

→バックグラウンド:約67%

物理事象の選択 ビームパイプに抜けた粒子がない事象

ビームパイプに抜けた粒子がない事象を選択→ evW 、 eeZ バックグラウンドをカット

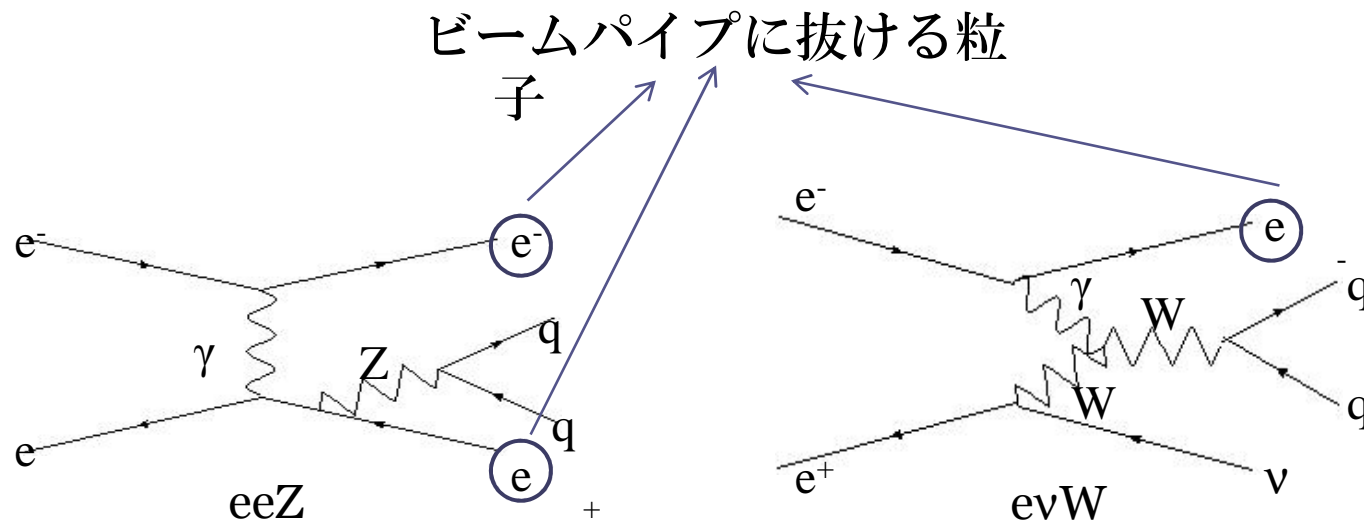
- evW 、 eeZ のようなTチャンネル事象ではビームパイプに抜ける粒子が存在
- ビームパイプに抜ける粒子の条件

条件: $E_e > 5\text{GeV}$ and $0.98 < |\cos\theta_e| < 0.9999875$

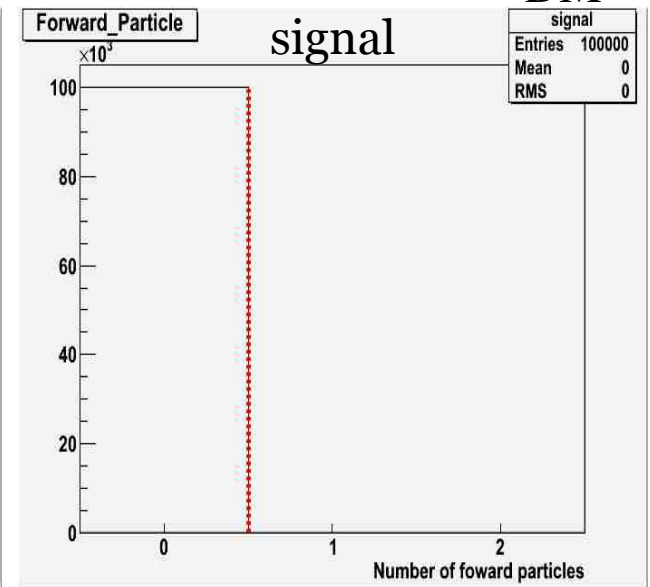
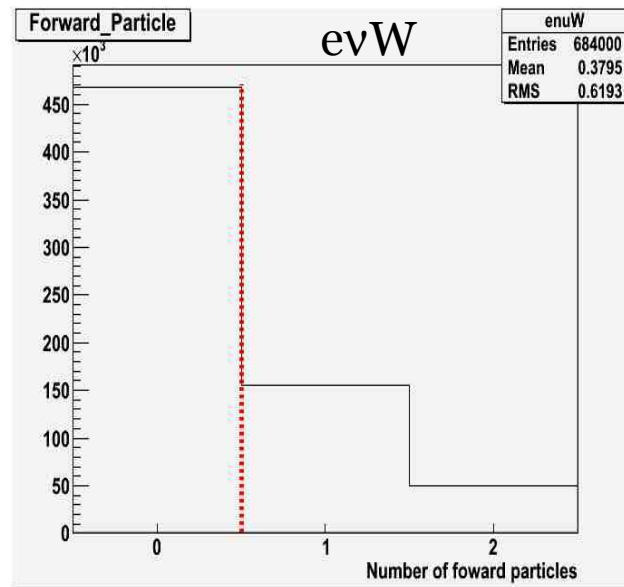
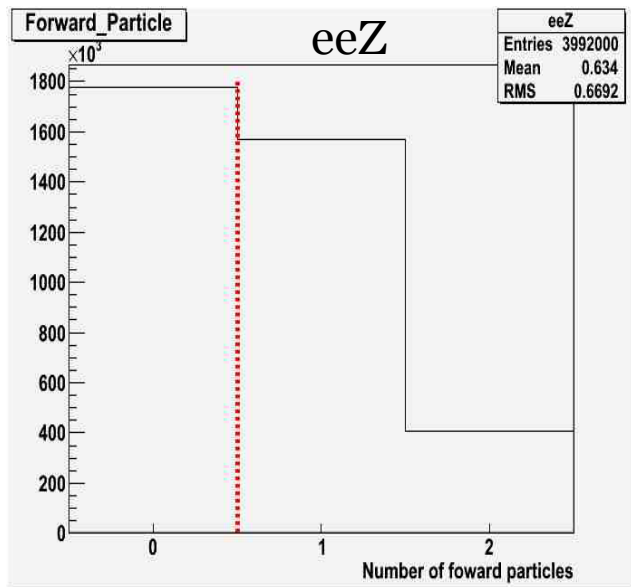
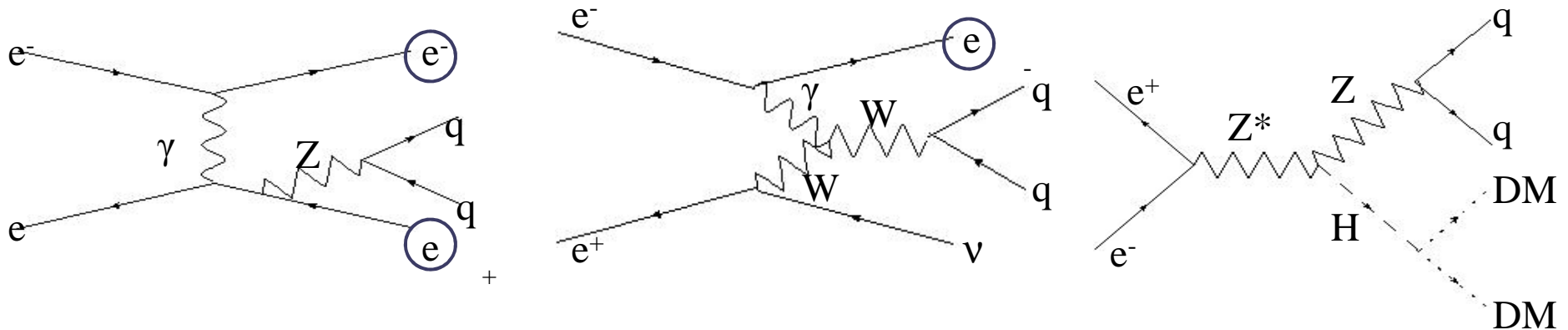
$\cos\theta_e$: 電子の散乱方向とビーム軸の形成

角

- シミュレーションソフトに前方検出器がないため、ジェネレータ情報を使用



物理事象の選択 ビームパイプに抜けた粒子がない事象



<ビームパイプに抜けた粒子がない事象の選択によるefficiency>

→シグナル:100%

→バックグラウンド:約67%

<Z ボソンの質量で選択 >

シグナルであれば、2 Jets の不変質量 はZ ボソンの質量に等しい

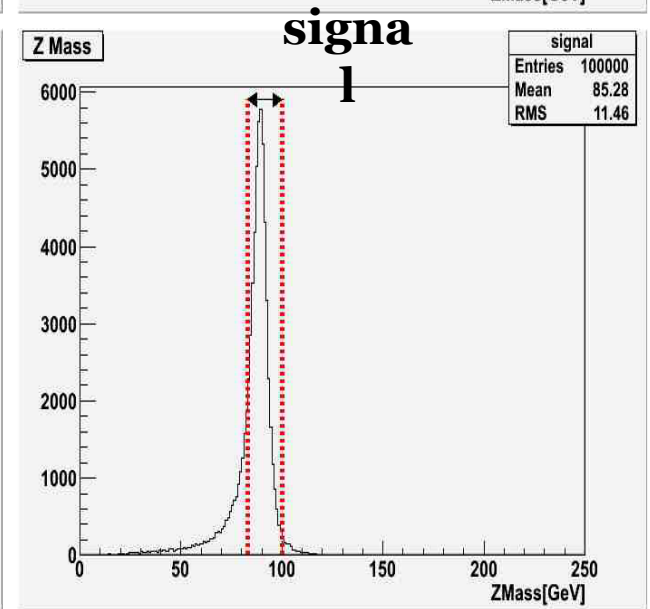
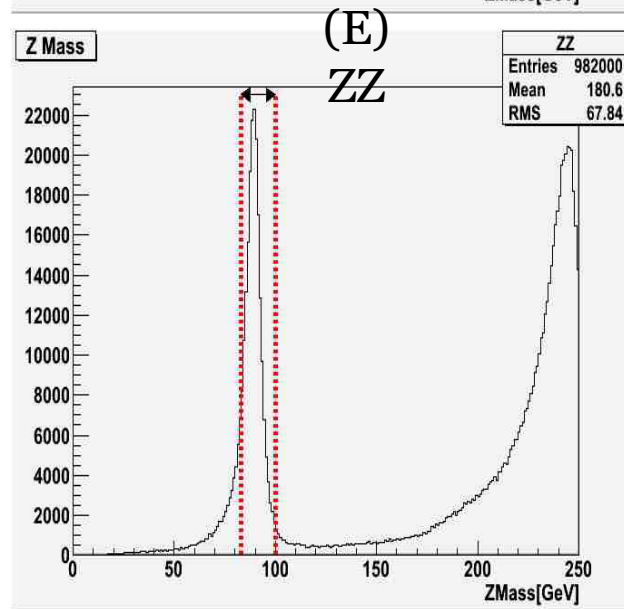
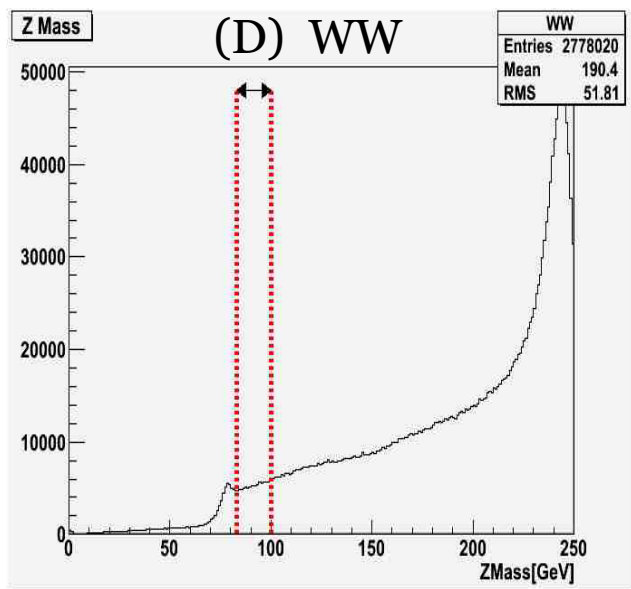
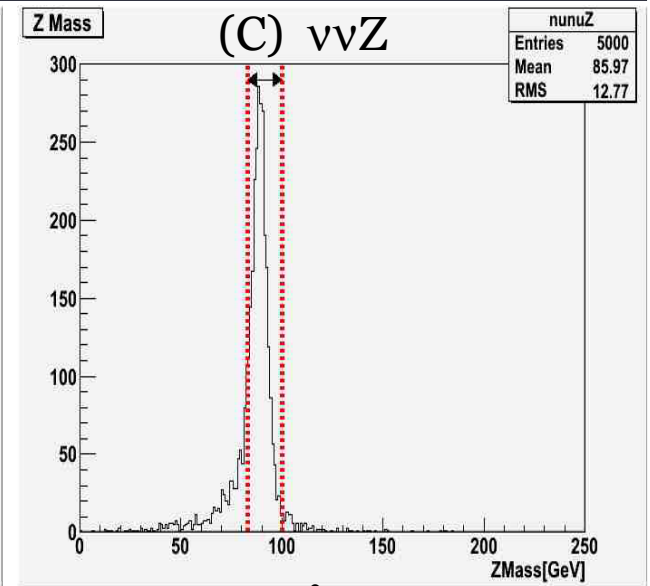
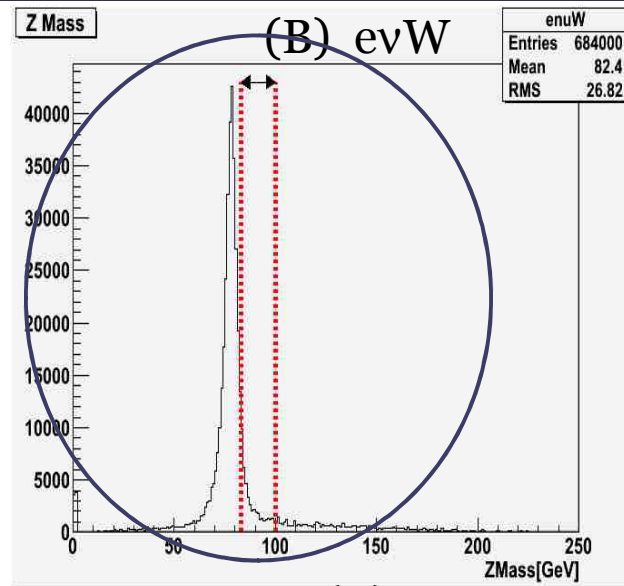
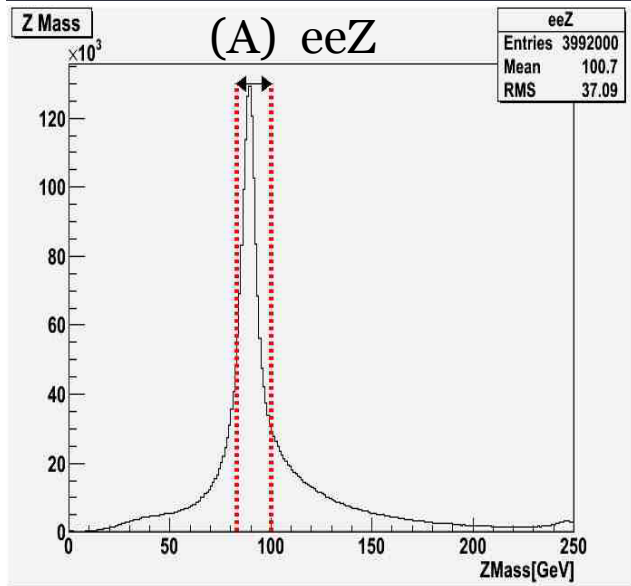
→ 83 [GeV] $\langle Z \text{ mass} \rangle < 100$ [GeV] を満たす事象を選択

<Zボソンの質量での選択によるefficiency >

→シグナル:約75%

→バックグラウンド:約42%

物理事象の選択



evWバックグラウンドが大幅にカットされている

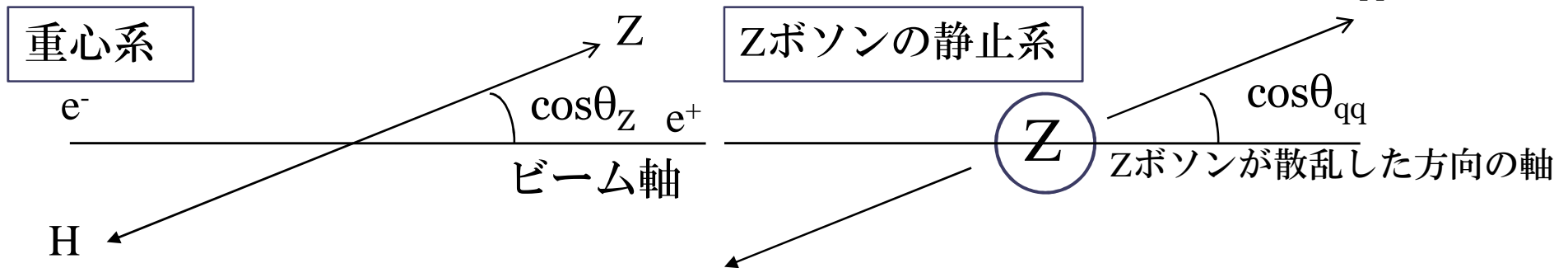
Likelihood 関数の定義

Likelihood 関数のパラメータにZボソンの運動学変数を使用

1.Zボソンの質量: Z_{mass}

2.Zボソンの散乱角度: $\cos\theta_Z$

3.Zボソンの2 Jetの崩壊角度: $\cos\theta_{qq}$



$$\text{Likelihood 関数 } L = P_{Z_{mass}} \times P_{\cos\theta} \times P_{\cos_{qq}}$$

$P_{Z_{mass}}$: Zボソンの質量の分布

$P_{\cos\theta}$: Zボソンの散乱角度分布

$P_{\cos_{qq}}$: Zボソンの2Jetの崩壊角度分布

それぞれの分布は1に規格化

Likelihood Ratio による分離

Background

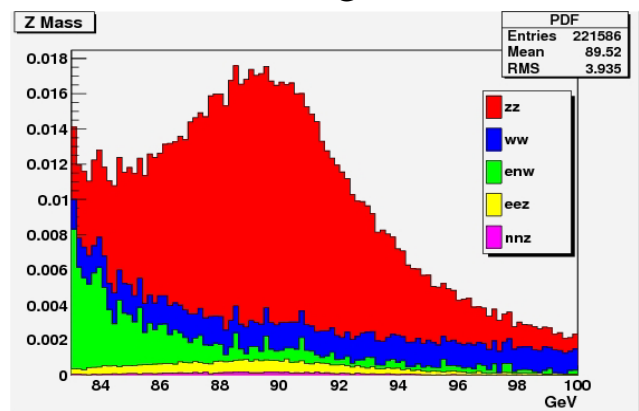
ZZ background

WW background

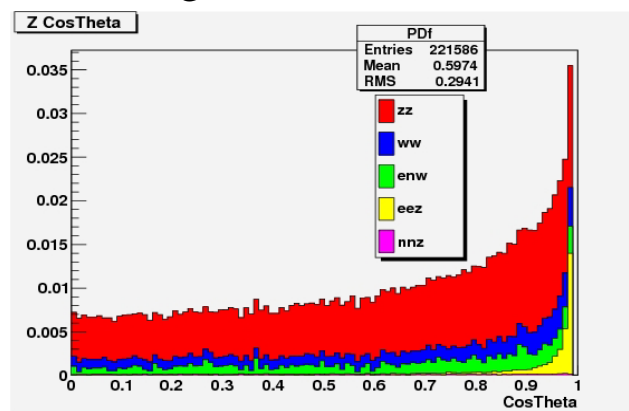
evW background

eeZ background

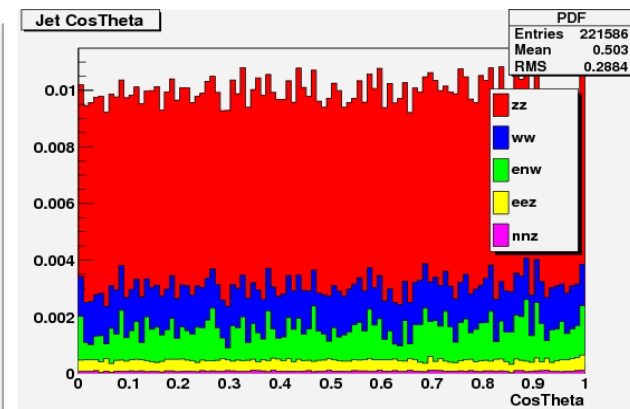
vvZ background



Zmass

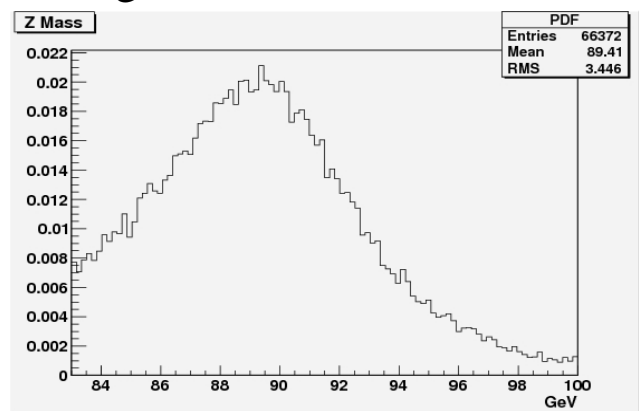


$\cos\theta_z$

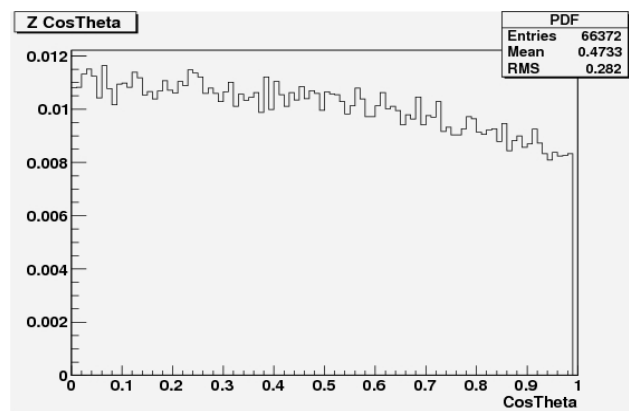


$\cos\theta_{qq}$

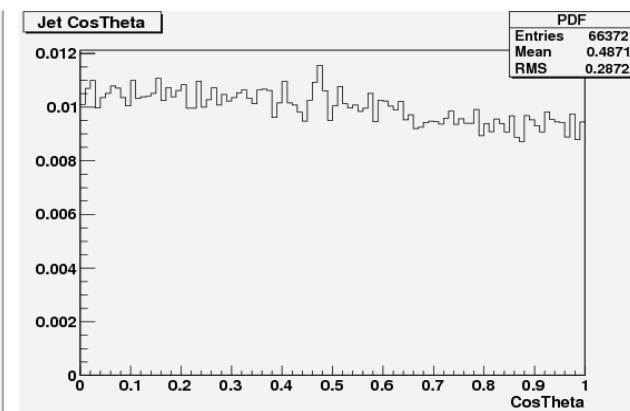
Signal



Zmass



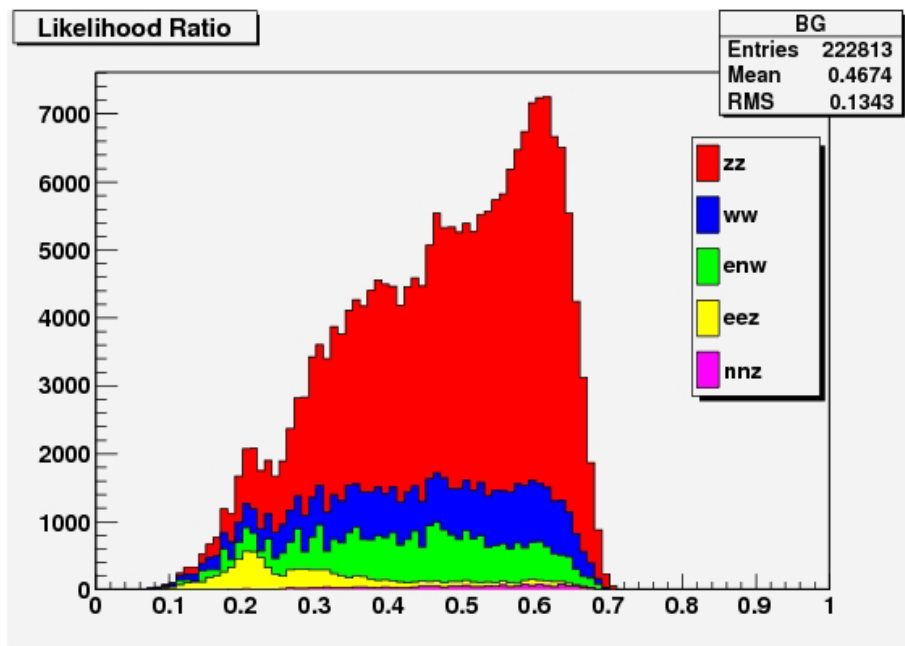
$\cos\theta_z$ $\cos\theta_z < 0.955$



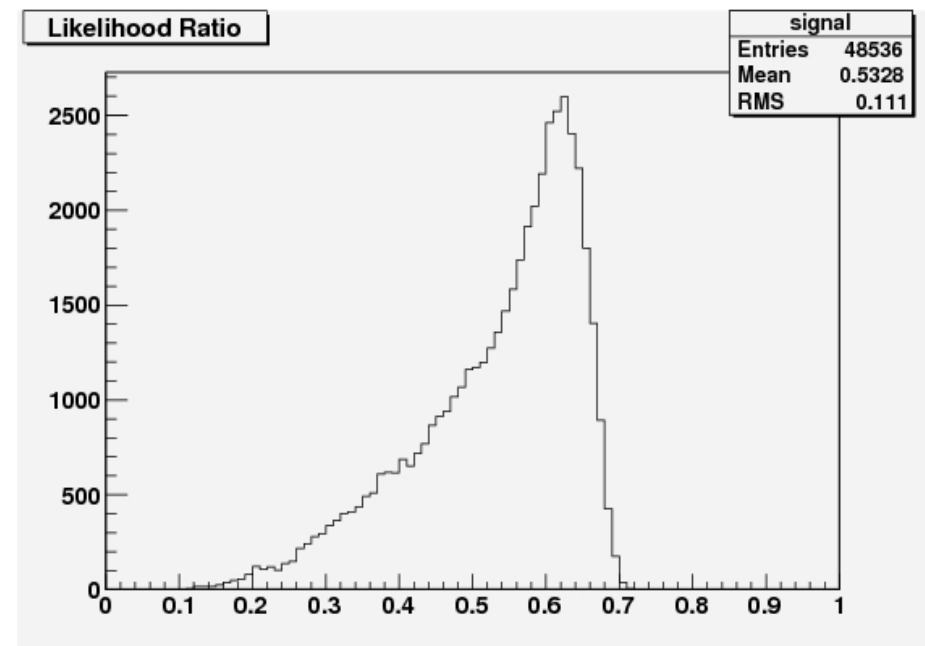
$\cos\theta_{qq}$

Likelihood Ratioの定義

$$\text{LikelihoodRatio} = \frac{L_{sig}}{L_{sig} + L_{bg}}$$



バックグラウンドのLikelihood Ratioの分布

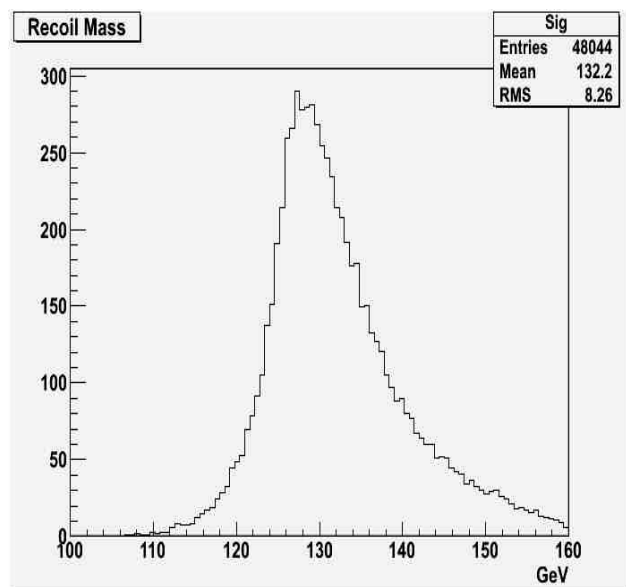


シグナルのLikelihood Ratioの分布

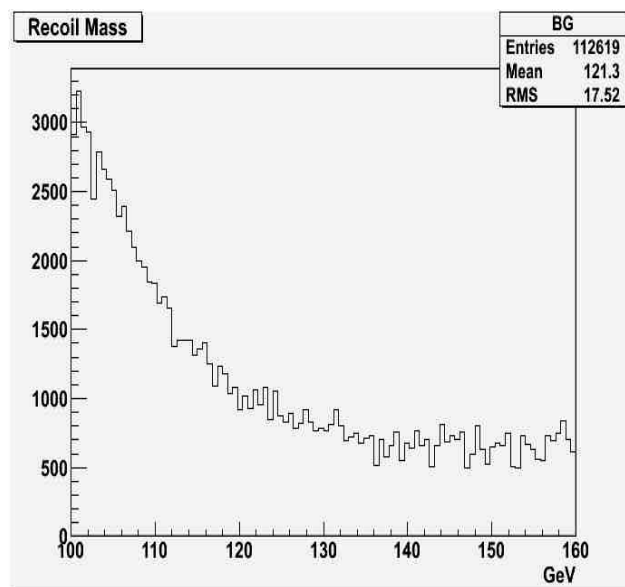
1. 孤立したレプトンがない事象の選択
2. ビームパイプに抜けた粒子がない事象の選択
3. Zボソンの質量が $83 \text{ [GeV]} < Z_{\text{mass}} < 100 \text{ [GeV]}$ の事象の選択
4. Likelihood Ratioによるシグナルとバックグラウンドの分離



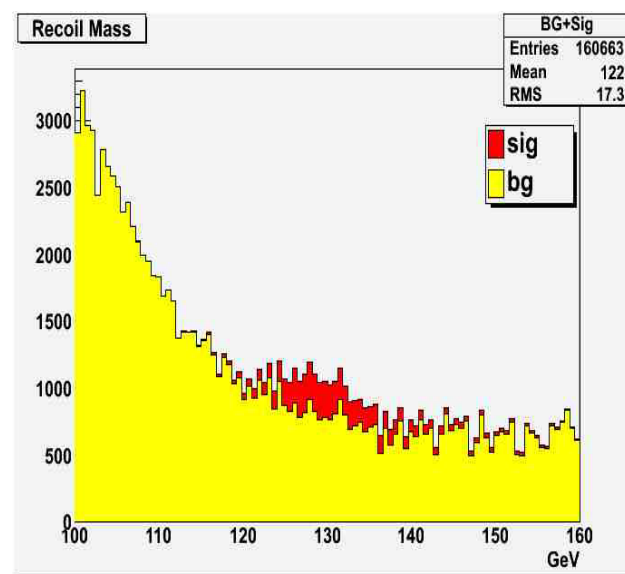
反跳質量分布



シグナル



バックグラウンド



シグナル+バックグラウンド

シグナル生成断面積の下限值

- ▶シグナル生成断面積の下限値の定義
- ▶解析で使用する反跳質量分布
- ▶フィット関数とToyMonteCalroの定義
- ▶シグナル生成断面積の下限値の導出 1
- ▶シグナル生成断面積の下限値の導出 2

シグナル生成断面積の下限值の定義

- シグナル生成断面積の下限值とは？
インビジブルな崩壊がヒッグスボソンの直接的な崩壊であることを保障するための断面積に対する下限値

- シグナル生成断面積の下限値を求めるためには？
→シグナル事象としてカウントされてしまうバックグラウンド事象のイベント数の上限値が必要



- バックグラウンドの反跳質量分布からシグナルとしてカウントされてしまうバックグラウンド事象のイベント数を出力する
フィット関数P
- 関数Pでフィットするバックグラウンドの反跳質量分布
→Toy Monte Carloで生成

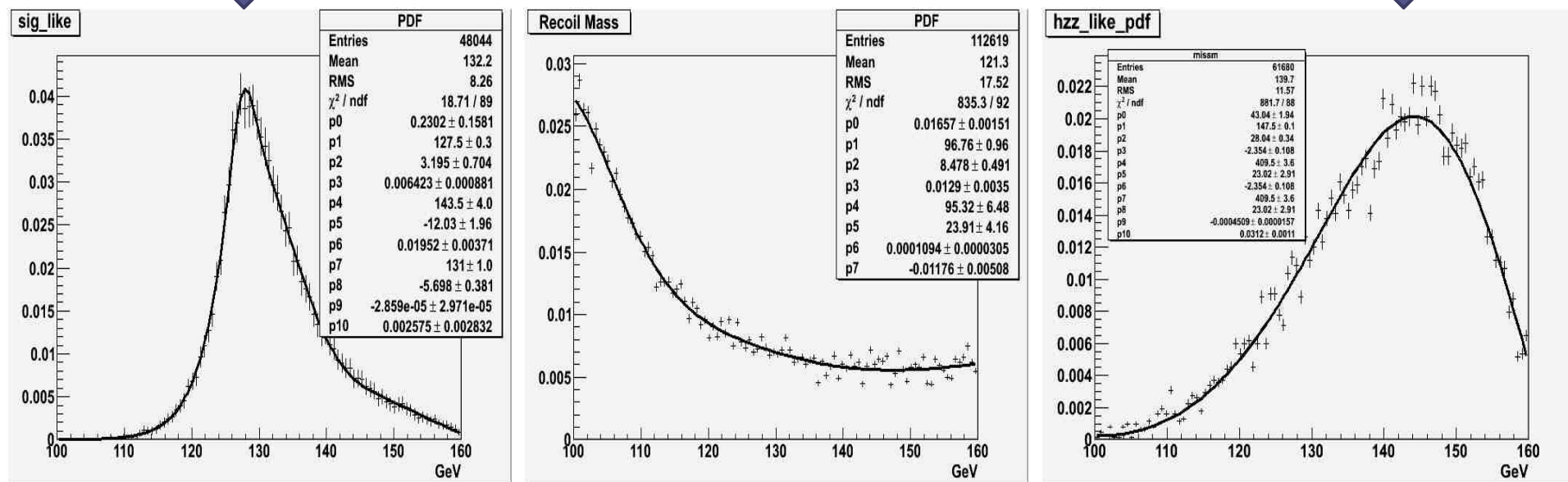
尚、シグナル生成断面積の下限値を求めるにあたってヒッグスボソンからのバックグラウンドも考慮

ヒッグスボソンからのバックグラウンドの反跳質量分布：

$A. e^+e^- \rightarrow ZH \rightarrow q\bar{q}ZZ^* \rightarrow q\bar{q}vvvv$

$B. e^+e^- \rightarrow ZH \rightarrow \nu\nu ZZ^* \rightarrow \nu\nu q\bar{q}\nu\nu$

$C. e^+e^- \rightarrow ZH \rightarrow \nu\nu ZZ^* \rightarrow \nu\nu\nu\nu q\bar{q}$



①：A,B,C事象はシグナルの反跳質量分布とほぼ一致

②：A,B,Cのフィット関数は、ガウス、ブライトウィグナー関数を合成してフィット

フィット関数とToyMonteCalroの定義

1. バックグラウンドの反跳質量分布をフィットする関数

$$P = (N_{sig} + N_{h \rightarrow 4\nu}) P_{sig} + N_{h \rightarrow ZZ^* \rightarrow q\bar{q}(v\nu)} P_{h \rightarrow ZZ^* \rightarrow q\bar{q}(v\nu)} + N_{bg} P_{bg}$$

パラメータ：

N_{sig} ：シグナルに入ってくるイベント数

N_{bg} ：バックグラウンドのイベント数

固定値：

$N_{h \rightarrow 4\nu}$ ：事象Aのイベント数

$N_{h \rightarrow ZZ^* \rightarrow qq(v\nu)}$ ：事象Bのイベント数

2. バックグラウンドの反跳質量分布の生成

$$ToyMonteCalro : X_{bg} P_{bg} + X_{h \rightarrow 4\nu} P_{h \rightarrow 4\nu} + X_{h \rightarrow ZZ^* \rightarrow q\bar{q}(v\nu)} P_{h \rightarrow ZZ^* \rightarrow q\bar{q}(v\nu)}$$

$X_{bg}, X_{h \rightarrow 4\nu}, X_{h \rightarrow ZZ^* \rightarrow qq(v\nu)}$ ：各事象のイベント数

$$A. e^+ e^- \rightarrow ZH \rightarrow q\bar{q} ZZ^* \rightarrow q\bar{q} \nu\nu\nu\nu$$

$$B. e^+ e^- \rightarrow ZH \rightarrow \nu\nu ZZ^* \rightarrow \nu\nu q\bar{q} \nu\nu$$

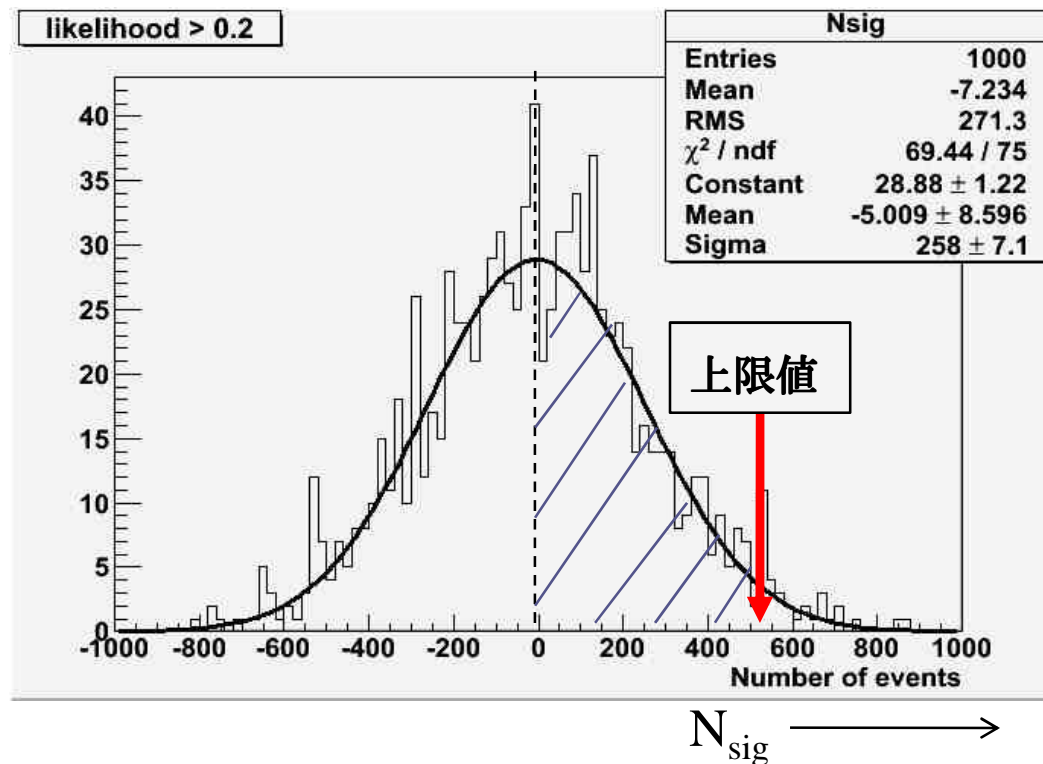
$$C. e^+ e^- \rightarrow ZH \rightarrow \nu\nu ZZ^* \rightarrow \nu\nu\nu\nu q\bar{q}$$

シグナル生成断面積の下限值の導出 1

29

シグナル事象とカウントされてしまうバックグラウンドのイベント数の上限値の見積もり

1. ToyMCによるバックグラウンドの反跳質量分布を関数Pでフィット
→シグナルのイベント数 N_{sig} が得られる
2. 1の試行を1000回実行
→パラメータ N_{sig} の分布が得られる
3. N_{sig} の分布の0以上の領域の面積のうち95%を占めるイベント数
→図の斜線部分の面積は、0以上の面積のうち95%を占める



$X < \text{Likelihood Ratio}$ ($X : 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$)の条件を課し
シグナル生成断面積の下限值を求めた

→シグナル生成断面積の下限值が最小となるLikelihood Ratio

Likelihood Ratio = 0.2

→シグナル生成断面積の下限值

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow ZH (H \rightarrow invisible)) \approx 0.8 [fb]$$

シグナル生成断面積の下限值

likelihood ratio	$N_{sig}(C.L 95\%)$	efficiency	upper limit [fb]
0	435	0.483	0.900
0.1	425	0.483	0.879
0.2	405	0.480	0.843
0.3	395	0.463	0.853
0.4	365	0.415	0.879
0.5	295	0.328	0.900
0.6	175	0.162	1.081

efficiency:検出効率

考察とまとめ

- 考察 1
- 考察 2
- まとめ

崩壊分岐比BR(H→invisible)の下限值

1. $e^+e^- \rightarrow ZH(H \rightarrow \text{invisible})$ の生成断面積の下限值：

$$\sigma_{h \rightarrow \text{invisible}}^{C.L.95\%} \approx 0.8 [fb]$$

2. 崩壊分岐比BR(H→invisible)の下限值：

$$BR(H \rightarrow \text{invisible}) = \frac{\sigma_{H \rightarrow \text{invisible}}^{C.L.95\%}}{\sigma(e^+e^- \rightarrow ZH)} \approx 0.4\%$$

→モデルを仮定せずに崩壊分岐比BR(H→invisible)の下限値を導出

→インビジブルな崩壊の崩壊分岐比が約0.4%以上である時、ヒッグスボソンがインビジブルに崩壊したということを95%の信頼度で保証

ヒッグスポソンのインビジブルな崩壊に関するILC実験の感度と、他の実験との比較

*ヒッグスポータル模型においてフェルミオン暗黒物質（質量50 [GeV]）を仮定

1. ヒッグス-フェルミオン暗黒物質の結合定数の下限値：

$$c_F / \Lambda \approx 3 \times 10^{-5} [\text{GeV}^{-1}]$$

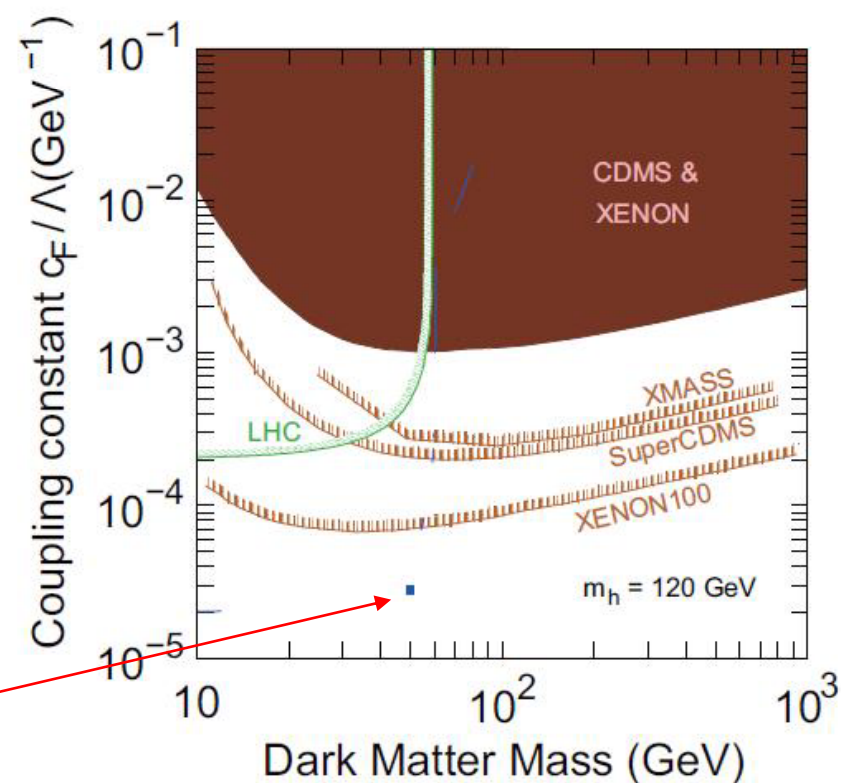
2. XENON100実験の結果：

→DM質量が50 [GeV]の場合、XENON100の結果を引用

$$c_F / \Lambda \approx 6 \times 10^{-5} [\text{GeV}^{-1}]$$

インビジブルな崩壊をするヒッグスポソンの観測に於いて、

ILC実験は他の実験よりも感度が良い



本研究で見積もった値

ILC実験に於いて、 $e^+e^- \rightarrow ZH$ に関して、ヒッグスボソンがインビジブルに崩壊する場合の解析を行った。

1. $e^+e^- \rightarrow ZH(H \rightarrow \text{invisible})$ の生成断面積の下限值：

$$\sigma_{h \rightarrow \text{invisible}}^{C.L.95\%} \approx 0.8 [fb]$$

2. 崩壊分岐比 $BR(H \rightarrow \text{invisible})$ の下限值：

$$BR(H \rightarrow \text{invisible}) = \frac{\sigma_{H \rightarrow \text{invisible}}^{C.L.95\%}}{\sigma(e^+e^- \rightarrow ZH)} \approx 0.4\%$$

3. ヒッグス-フェルミオン暗黒物質の結合定数の下限値：

*ヒッグスポータル模型においてフェルミオン暗黒物質（質量 50 [GeV]）を仮定

$$c_F / \Lambda \approx 3 \times 10^{-5} [GeV^{-1}]$$

→ILC実験での感度は他の実験の感度よりよいことがわかった

Back up

ヒッグスボソンのインビジブルな崩壊に関するILC実験の感度と、他の実験との比較

*ヒッグスポータル模型においてフェルミオン暗黒物質（質量50GeV）を仮定

1. ヒッグス-フェルミオン暗黒物質の結合定数のアッパーリミット：

$$c_F / \Lambda \approx 3 \times 10^{-5} (\text{GeV}^{-1}) \quad c_F / \Lambda = \left(\sqrt{\frac{\sigma_{H \rightarrow \text{DMDM}}^{\text{upper limit}}}{\sigma_{c_1}(e^+ e^- \rightarrow \text{ZDD})}} / \Lambda \right)$$

$\Lambda = 1000 [\text{GeV}]$ 、 Λ ：標準模型の適応限界

$\sigma_{c_1}(e^+ e^- \rightarrow \text{ZDD})$ ヒッグス-暗黒物質の結合定数を1とした時の生成断面積

2. XENON100実験の結果をヒッグスボソンの質量125GeVの場合に換算：

→DM質量が50[GeV]の場合、XENON100の結果を引用

$$c_F / \Lambda \approx 6 \times 10^{-5} (\text{GeV}^{-1})$$

$$(c_F / \Lambda)_{H_{\text{mass}} = 125 [\text{GeV}]} \approx 0.8 \times (c_F / \Lambda)_{H_{\text{mass}} = 120 [\text{GeV}]}$$