

# 2017年度 修士論文

重心系エネルギー 250 GeV の国際リニアコライダーにおける  
2-fermion 終状態の精密測定による新物理探索性能の研究

九州大学大学院 理学府 物理学専攻  
粒子物理学分野 素粒子実験研究室

山城 大知

指導教員 川越 清以

2018年2月26日



九州大学  
KYUSHU UNIVERSITY



# 概要

国際リニアコライダー (ILC) は次世代の電子陽電子衝突型線形加速器であり、現在初期段階で全長は 20 km 、重心系エネルギーは 250 GeV で実験ができるように計画されている。

電子陽電子衝突によるフェルミオンペアの生成過程 ( $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$ ) は重いゲージボソン ( $Z'$ ) の生成に感度がある。LHC では直接重い粒子によるピークを根拠に新粒子を見つけるのに対して、ILC では重い粒子によって生じる標準模型からのずれを観測し、間接的に新粒子の存在を示すことができる。

重心系エネルギーが 500 GeV 以上の ILC におけるフェルミオンペアの感度については、すでに理論計算及びシミュレーションを用いた物理解析がなされており、新物理モデルによって  $Z'$  の質量が 4 -10 TeV までなら十分に感度があるとされている。しかし、ILC はまずはヒッグスファクトリーとして重心系エネルギーが 250 GeV で建設される方針であり、そのため重心系エネルギーが 250 GeV の ILC における  $Z'$  の探索のためのシミュレーションを用いた物理解析が求められていた。

本研究では、重心系エネルギーが 250 GeV の ILC が  $Z'$  のような重いゲージボソンなどの新物理や WIMP (weakly-interacting massive particle) の間接探索を行えるかを評価した。本研究は ILC のビーム特性や検出器の詳細を踏まえたモンテカルロシミュレーションを用いて生成したイベントを解析することにより行った。具体的には、各フェルミオンペアの終状態 ( $e^-e^+, \mu^-\mu^+, \tau^-\tau^+, b\bar{b}, c\bar{c}$ ) ごとにシグナルと背景事象を弁別し、ビーム軸に対する生成粒子の角度分布を求めた。この角度分布からそれぞれの角度での統計誤差を計算し、標準模型と新物理の微分断面積のずれから  $Z'$  の質量ごとに標準模型と無矛盾になる確率を求めた。この上で、重心系エネルギーが 250 GeV の ILC において  $3\sigma$  の mass reach、すなわち探索可能な  $Z'$  の質量の上限を求めた。

これらの解析の結果、 $Z'$  の新物理モデルにおいては、新物理モデルによって 1.4 - 4.0 TeV の質量の  $Z'$  に感度があることがわかった。また、WIMP の間接探索においては、左巻き運用 ( $e_L^-e_R^+$ ) で ILC での直接測定での限界 (125 GeV) より重い質量の WIMP を探索可能であることがわかった。また、 $Z'$  モデルの一つで新しく提案されている Gauge Higgs Unification model(GHU) には、右巻き運用 ( $e_R^-e_L^+$ ) において、十分感度があることがわかった。



# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>イントロダクション</b>	<b>15</b>
1.1	ILC と LHC	16
1.2	ILC の建設設計画について	16
1.3	$Z'$ の探索について	17
1.4	研究課題	17
<b>第 2 章</b>	<b>ILC と ILD</b>	<b>19</b>
2.1	ILC	19
2.2	ILD	22
2.2.1	PFA (Particle Flow Algorithm)	22
2.2.2	崩壊点検出器	24
2.2.3	飛跡検出器	24
2.2.4	電磁カロリメータ	24
2.2.5	ハドロンカロリメータ	25
2.2.6	リターンヨークとミューオン検出器	25
<b>第 3 章</b>	<b>シミュレーションと イベントサンプル</b>	<b>26</b>
3.1	用いた信号事象と主な背景事象	26
3.1.1	$e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^-$ イベント ( $\ell = e, \mu, \tau$ )	26
3.1.2	$e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$ イベント ( $q = b, c$ )	27
3.1.3	4 フェルミオンイベント	28
3.1.4	イベントサンプルの混合	28
3.2	イベントサンプルの生成	31
3.3	検出器シミュレーションと ILD 標準イベント再構成	31
3.4	本解析で用いるイベント再構成	31
3.4.1	Tau Jet Finder (TaJet)	32
3.4.2	Flavor Tagging	32
3.4.3	Charge ID	33

---

第 4 章	チャンネル毎のイベント選別	35
4.1	$e^+e^- \rightarrow e^+e^-$	35
4.2	$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$	40
4.3	$e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$	45
4.4	$e^+e^- \rightarrow b\bar{b}$	49
4.5	$e^+e^- \rightarrow c\bar{c}$	53
第 5 章	BSM モデルとの比較と考察	56
5.1	SSM、 $E_6$ モデルによる $Z'$ ポソンの効果	57
5.1.1	解析結果	58
5.2	Gauge Higgs Unification (GHU)	67
5.3	WIMP の探索	69
第 6 章	結論	72
付録 A		73
参考文献		78

# 図目次

1.1	標準理論を構成する素粒子 . . . . .	15
1.2	新物理 (Beyond Standard Model : BSM) が含まれている場合のフェルミオンペア生成のファインマンダイアグラム . . . . .	17
2.1	ILC 完成時の全景予想図 (TDR における計画時 : 全長 31km)[1] . . . . .	19
2.2	ILC の運転シナリオ [6] . . . . .	20
2.3	陽電子の生成機構 . . . . .	21
2.4	ILC の中央にあるダンピングリング。黄色の部分がダンピングリング (DR) である。 . . . . .	21
2.5	超伝導加速空洞 . . . . .	22
2.6	クライオモジュールのイメージ . . . . .	22
2.7	ILD . . . . .	23
2.8	SiD . . . . .	23
2.9	PFA のイメージ図。一つの色が一つの粒子を表しており、ジェット中の粒子の再構成が行われている . . . . .	23
3.1	2 lepton process . . . . .	27
3.2	Bhabha 散乱の $t$ -channel . . . . .	27
3.3	2 quark process . . . . .	27
4.1	軌跡のエネルギーの分布。横軸はエネルギー軌跡のエネルギー、縦軸はイベント数。赤線はシグナル ( $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ )、青線は 2 lepton の背景事象 ( $e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^- (\ell = \mu, \tau)$ )、緑線は 4 lepton の背景事象を示す。 . . . . .	36
4.2	track とカロリメーターのエネルギーの比の分布。横軸は $E_{\text{CAL}} / E_{\text{tr}}$ 、縦軸はイベント数 (対数スケール)。赤線はシグナル ( $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ )、青線は 2 lepton の背景事象 ( $e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^- (\ell = \mu, \tau)$ )、緑線は 4 lepton の背景事象を示す。この分布は、条件 1 の選別後のものである。 . . . . .	37

4.3	電磁カロリメーターとハドロンカロリメーターで落としたエネルギーの比の分布。横軸は $E_{\text{ECAL}}/(E_{\text{ECAL}} + E_{\text{HCAL}})$ 、縦軸はイベント数(対数スケール)。赤線はシグナル ( $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ )、青線は 2 lepton の背景事象 ( $e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^- (\ell = \mu, \tau)$ ) 緑線は 4 lepton の背景事象を示す。この分布は、条件 2 の選別後のものである。	38
4.4	track エネルギーの合計の分布。横軸は track のエネルギーの合計、縦軸はイベント数。赤線はシグナル ( $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ )、青線は 2 lepton の背景事象 ( $e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^- (\ell = \mu, \tau)$ ) 緑線は 4 lepton の背景事象を示す。この分布は、条件 3 の選別後のものである。	38
4.5	$e^-$ のビーム軸に対する角度分布。横軸は $\cos \theta$ 、縦軸はイベント数(対数スケール)。赤線はシグナル ( $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ )、青線は 2 lepton の背景事象 ( $e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^- (\ell = \mu, \tau)$ ) 緑線は 4 lepton の背景事象を示す。この分布は、条件 4 の選別後のものである。	39
4.6	軌跡のエネルギーの分布。横軸はエネルギー軌跡のエネルギー、縦軸はイベント数。赤線はシグナル ( $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ )、青線は 2 lepton の背景事象 ( $e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^- (\ell = e, \tau)$ ) 緑線は 4 lepton の背景事象を示す。	40
4.7	track とカロリメーターのエネルギーの比の分布。横軸は $E_{\text{CAL}} / E_{\text{tr}}$ 、縦軸はイベント数(対数スケール)。赤線はシグナル ( $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ )、青線は 2 lepton の背景事象 ( $e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^- (\ell = e, \tau)$ ) 緑線は 4 lepton の背景事象を示す。この分布は、条件 1 の選別後のものである。	41
4.8	電磁カロリメーターとハドロンカロリメーターで落としたエネルギーの比の分布。横軸は $E_{\text{ECAL}}/(E_{\text{ECAL}} + E_{\text{HCAL}})$ 、縦軸はイベント数(対数スケール)。赤線はシグナル ( $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ )、青線は 2 lepton の背景事象 ( $e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^- (\ell = e, \tau)$ ) 緑線は 4 lepton の背景事象を示す。この分布は、条件 2 の選別後のものである。	42
4.9	track エネルギーの合計の分布。横軸は track のエネルギーの合計、縦軸はイベント数。赤線はシグナル ( $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ )、青線は 2 lepton の背景事象 ( $e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^- (\ell = e, \tau)$ ) 緑線は 4 lepton の背景事象を示す。この分布は、条件 3 の選別後のものである。	43
4.10	$\mu^-$ のビーム軸に対する角度分布。横軸は $\cos \theta$ 、縦軸はイベント数。赤線はシグナル ( $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ )、青線は 2 lepton の背景事象 ( $e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^- (\ell = e, \tau)$ ) 緑線は 4 lepton の背景事象を示す。この分布は、条件 4 の選別後のものである。	44
4.11	再構成されたジェットの本数の分布。横軸はジェットの本数、縦軸はイベント数。赤線はシグナル ( $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ )、青線は 2 lepton の背景事象 ( $e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^- (\ell = e, \mu)$ ) 緑線は 4 lepton の背景事象を示す。	45

4.12	二本のジェットがなす角度の分布。横軸は角度の余弦、縦軸はイベント数(対数スケール)。赤線はシグナル( $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ )、青線は2 lepton の背景事象( $e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^- (\ell = e, \mu)$ )、緑線は4 lepton の背景事象を示す。 . . . . .	46
4.13	ビーム軸に対する角度の分布。縦軸はビーム軸に対する角度の余弦、縦軸はイベント数。赤線はシグナル( $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ )、青線は2 lepton の背景事象( $e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^- (\ell = e, \mu)$ )、緑線は4 lepton の背景事象を示す。この分布は、条件3の選別後のものである。 . . . . .	47
4.14	$E_{\text{vis}}$ の分布。横軸はジェットのエネルギー、縦軸はイベント数。赤線はシグナル( $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ )、青線は2 lepton の背景事象( $e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^- (\ell = e, \mu)$ )、緑線は4 lepton の背景事象を示す。この分布は、条件4の選別後のものである。 . . . . .	48
4.15	各事象の二本のジェットの btag の内、大きい方の分布。横軸は btag、縦軸はイベント数(対数スケール)。赤線はシグナル事象、青線は背景事象の2クォークの事象、緑線は4 フェルミオンの事象である。 . . . . .	49
4.16	各事象の二本のジェットの btag の内、小さい方の分布。横軸は btag、縦軸はイベント数(対数スケール)。赤線はシグナル事象、青線は背景事象の2クォークの事象、緑線は4 フェルミオンの事象である。 . . . . .	49
4.17	2 本のジェットのエネルギーの差の分布。縦軸はイベント数。赤線はシグナル事象、青線は背景事象の2 hadron の事象、緑線は4 hadron の事象である。この分布は、条件1の選別後のものである。 . . . . .	50
4.18	2 本のジェットの間の角度の余弦の分布。縦軸はイベント数。赤線はシグナル事象、青線は背景事象の2 クォークの事象、緑線は4 フェルミオンの事象である。この分布は、条件1の選別後のものである。 . . . . .	50
4.19	二本のジェットのエネルギー合計の分布。横軸は二本のジェットのエネルギーの和、縦軸はイベント数。赤線はシグナル事象、青線は背景事象の2 クォークの事象、緑線は4 フェルミオンの事象である。この分布は、条件2の選別後のものである。 . . . . .	51
4.20	各事象の二本のジェットの ctag の内、大きい方の分布。横軸は ctag、縦軸はイベント数。赤線はシグナル事象、青線は背景事象の2 クォークの事象、緑線は4 フェルミオンの事象である。 . . . . .	53
4.21	各事象の二本のジェットの ctag の内、小さい方の分布。横軸は ctag、縦軸はイベント数。赤線はシグナル事象、青線は背景事象の2 クォークの事象、緑線は4 フェルミオンの事象である。 . . . . .	53
4.22	$\theta_{cc}$ の余弦の分布。縦軸はイベント数。赤線はシグナル事象、青線は背景事象の2 クォークの事象、緑線は4 フェルミオンの事象である。 . . . . .	54

4.23	二本のジェットのエネルギー合計の分布。横軸は二本のジェットのエネルギーの和、縦軸はイベント数。赤線はシグナル事象、青線は背景事象の2クォークの事象、緑線は4フェルミオンの事象である。この分布は、条件2の選別後のものである。	54
5.1	各レプトンチャンネルにおけるビーム軸に対する角度分布。左(右)図は左(右)偏極時の角度分布を表している。上段、中段、下段の図はそれぞれ $e^+e^-$ , $\mu^+\mu^-$ 及び $\tau^+\tau^-$ チャンネル。 $e^+e^-$ チャンネルの縦軸は対数スケールでそれ以外のチャンネルは線形スケールである。赤(青)線はそれぞれシグナル事象(背景事象)である。	58
5.2	各ハドロンチャンネルにおけるビーム軸に対する角度分布。左(右)図は左(右)偏極時の角度分布を表している。上段、下段はそれぞれ $b\bar{b}$ , $c\bar{c}$ チャンネル赤線はCharge IDが成功しているシグナル。青線はCharge IDが上手くいかず反転しているシグナル。緑線は背景事象。	59
5.3	$Z'$ のSSM及び $E_6$ モデルにおける標準理論の $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ の反応断面積とのずれ。赤(青)線は $Z'$ の質量が2.5(5.0)TeVの場合のずれを表している。エラーバーは今回の解析で期待される精度を表している。	61
5.4	$Z'$ のSSM及び $E_6$ モデルにおける標準理論の $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ の反応断面積とのずれ。赤(青)線は $Z'$ の質量が2.5(5.0)TeVの場合のずれを表している。エラーバーは今回の解析で期待される精度を表している	62
5.5	$Z'$ のSSM及び $E_6$ モデルにおける標準理論の $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ の反応断面積とのずれ。赤(青)線は $Z'$ の質量が2.5(5.0)TeVの場合のずれを表している。エラーバーは今回の解析で期待される精度を表している。	63
5.6	$Z'$ のSSM及び $E_6$ モデルにおける標準理論の $e^+e^- \rightarrow b\bar{b}$ の反応断面積とのずれ。 $Z'$ の質量が2.5TeVの場合のずれを表しており、赤線はCharge IDのefficiencyが100%の場合、青線は今回の解析(60%)の場合である。エラーバーは今回の解析で期待される精度を表している。	64
5.7	$Z'$ のSSM及び $E_6$ モデルにおける標準理論の $e^+e^- \rightarrow c\bar{c}$ の反応断面積とのずれ。 $Z'$ の質量が2.5TeVの場合のずれを表しており、赤線はCharge IDのefficiencyが100%の場合、青線は今回の解析(60%)の場合である。エラーバーは今回の解析で期待される精度を表している。	65
5.8	$Z'$ モデルのずれが標準模型と無矛盾になる確率を示すグラフ。これはレプトンチャンネルを合わせたものである。横軸は、仮定した $Z'$ の質量で縦軸が確率。下図は $3\sigma$ から $5\sigma$ の範囲内で標準模型のずれが見られる範囲を拡大したもの	66

5.9	$Z'$ モデルのそれが標準模型と無矛盾になる確率を示すグラフ。横軸は仮定した $Z'$ の質量で、縦軸が確率。左図はレプトンチャンネルと $b\bar{b}$ チャンネルを合わせたもの、右図はレプトンチャンネルと $b\bar{b}, c\bar{c}$ チャンネルを合わせたものである。 . . . . .	66
5.10	電子陽電子ビームの偏極具合による標準模型と GHU モデルとの反応断面積のそれを示すグラフ [20]。 $P_{\text{eff}} = (P_{e^-} - P_{e^+})/(1 - P_{e^-}P_{e^+})$ 。 $P$ はビームの偏極度を表す。青(赤)線は $\theta_H = 0.115$ ( $0.0737$ ) の線であることを示す。実線(破線)は重心系エネルギーが $250$ GeV ( $500$ GeV) の場合であることを示す。 . . . . .	67
5.11	$Z'$ の Gauge Higgs Unification モデルにおける標準理論の $e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^-$ の反応断面積とのずれ。すべて右巻き偏極の時のものである。上段、中段、下段の図はそれぞれ $e^+e^-$ 、 $\mu^+\mu^-$ や $\tau^+\tau^-$ チャンネルのそれを表している。エラーバーは今回の解析で期待される精度を表している。 . . . . .	68
5.12	WIMP モデルのファインマンダイアグラム . . . . .	69
5.13	WIMP モデルにおける標準理論の $e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^-$ の反応断面積とのずれ。上段、中段、下段はそれぞれ Higgsino ( $n = 2, Y = \pm 1/2$ )、wino ( $n = 3, Y = 0$ ) 及び Minimal Dark Matter(MDM) ( $n = 5, Y = 0$ ) である。ここで、 $n$ は $SU(2)_L$ $n$ -plet、 $Y$ は $U(1)_Y$ は hypercharge である。各線は図中にある色で示す WIMP の質量を示している。左列、中央列、右列の図はそれぞれ $e^+e^-$ 、 $\mu^+\mu^-$ や $\tau^+\tau^-$ チャンネルのそれを表している。エラーバーは今回の解析で期待される精度を表している。 . . . . .	70
5.14	$Z'$ モデルのそれが標準模型と無矛盾になる確率を示すグラフ。これはレプトンチャンネルを合わせたものである。横軸は、仮定した $Z'$ の質量で縦軸が確率。下図は $3\sigma$ から $5\sigma$ の範囲内で標準模型のそれが見られる範囲を拡大したもの . . . . .	71

# 表目次

3.1	左巻き偏極時の生成イベントのイベント数及び重み付けの値 (Bhabha 散乱は Appendix 参照)。偏極については、eL.pR:左巻き偏極 100%( $(e^-, e^+)$ = ( -1.0, +1.0 ))、eR.pL:右巻き偏極 100%( $(e^-, e^+)$ = ( +1.0, -1.0 ))、eL.pL:( $e^-, e^+$ ) = ( -1.0, -1.0 )、eR.pL:( $e^-, e^+$ ) = ( +1.0, +1.0 )を意味する。上段はレプトンのチャンネルで、下段はハドロンのチャンネルで用いたシグナル及び背景事象である。 . . . . .	29
3.2	右巻き偏極の時の生成イベントのイベント数及び重み付けの値 (Bhabha 散乱は Appendix 参照)。偏極については、eL.pR:左巻き偏極 100%( $(e^-, e^+)$ = ( -1.0, +1.0 ))、eR.pL:右巻き偏極 100%( $(e^-, e^+)$ = ( +1.0, -1.0 ))、eL.pL:( $e^-, e^+$ ) = ( -1.0, -1.0 )、eR.pL:( $e^-, e^+$ ) = ( +1.0, +1.0 )を意味する。上段はレプトンのチャンネルで、下段はハドロンのチャンネルで用いたシグナル及び背景事象である。 . . . . .	30
3.3	$e^-e^+ \rightarrow b\bar{b}$ チャンネルにおける Charge ID の結果。ジェットごとの崩壊点の数で場合分けを行い、条件を順番に適用し最適な efficiency を探した (詳細は本文参照)。各条件でジェットごとの電荷を求め、2 本の電荷の差を取り Charge ID ができているかを判断した。表の「+」は Charge ID が成功しているイベント、「0」判断保留、「-」は電荷が逆転しており Charge ID が上手くいかないイベントを意味する。判断保留のイベントは次の条件でさらに判断をしていく (最大で 3 条件まで)。表中のイベント数は偏極による重み付けはしていない。 . . . . .	34
4.1	$e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ チャンネルの左巻き偏極におけるイベント選別の結果。詳しい選別のパラメーターは本文参照。全イベントとは 3.2 章で説明した事前選別後のイベント数である。 . . . . .	37
4.2	$e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ チャンネルの右巻き偏極におけるイベント選別の結果。詳しい選別のパラメーターは本文参照。全イベントとは 3.2 章で説明した事前選別後のイベント数である。 . . . . .	37

4.3	$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ チャンネルの左巻き偏極におけるイベント選別の結果。詳しい選別のパラメーターは本文参照。全イベントとは 3.2 章で説明した事前選別後のイベント数である。 . . . . .	42
4.4	$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ チャンネルの右巻き偏極におけるイベント選別の結果。詳しい選別のパラメーターは本文参照。全イベントとは 3.2 章で説明した事前選別後のイベント数である。 . . . . .	43
4.5	$e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ チャンネルの左巻き偏極におけるイベント選別の結果。詳しい選別のパラメーターは本文参照。全イベントとは 3.3 章で説明した再構成及び事前選別後のイベント数である。 . . . . .	47
4.6	$e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ チャンネルの右巻き偏極におけるイベント選別の結果。詳しい選別のパラメーターは本文参照。全イベントとは 3.3 章で説明した再構成及び事前選別後のイベント数である。 . . . . .	48
4.7	$e^+e^- \rightarrow b\bar{b}$ チャンネルの左巻き偏極におけるイベント選別の結果。表中の括弧は charge ID により判断保留になったイベントを含む。詳しい選別のパラメーターは本文参照。全イベントとは 3.3 章で説明した再構成後のイベント数である。 . . . . .	51
4.8	$e^+e^- \rightarrow b\bar{b}$ チャンネルの右巻き偏極におけるイベント選別の結果。表中の括弧は charge ID により判断保留になったイベントを含む。詳しい選別のパラメーターは本文参照。全イベントとは 3.3 章で説明した再構成後のイベント数である。 . . . . .	52
4.9	$e^+e^- \rightarrow c\bar{c}$ チャンネルの左巻き偏極におけるイベント選別の結果。表中の括弧は charge ID により判断保留になったイベントを含む。詳しい選別のパラメーターは本文参照。全イベントとは 3.3 章で説明した再構成後のイベント数である。 . . . . .	55
4.10	$e^+e^- \rightarrow c\bar{c}$ チャンネルの右巻き偏極におけるイベント選別の結果。表中の括弧は charge ID により判断保留になったイベントを含む。詳しい選別のパラメーターは本文参照。全イベントとは 3.3 章で説明した再構成後のイベント数である。 . . . . .	55
5.1	重心系エネルギー 250 GeV の ILC の $e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^-$ の測定で $3\sigma$ 以上のずれで検出可能な $Z'$ の質量の上限。チャンネルを追加して質量の上限が下がる場合は、追加前の上限の値を用いている。これは $\chi^2$ の値が 1 のまま bin 数が増えると確率が上がるためである。 . . . . .	60
5.2	解析を行う WIMP のモデル . . . . .	69
5.3	重心系エネルギー 250 GeV の ILC の $e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^-$ の測定で $3\sigma$ 以上のずれで検出可能な $Z'$ の質量の上限。左巻き偏極の場合のみを示している。 . . . . .	70

A.1	左巻き偏極の時の Bhabha 散乱の重み付けの値。左巻き偏極 100%( $(e^-, e^+)$ $= (-1.0, +1.0)$ )。	73
A.2	左巻き偏極の時の Bhabha 散乱の重み付けの値。(右巻き偏極 100%( $(e^-, e^+)$ $= (+1.0, -1.0)$ )	73
A.3	左巻き偏極の時の Bhabha 散乱の重み付けの値。 $((e^-, e^+) = (-1.0, -1.0))$ 。	74
A.4	左巻き偏極の時の Bhabha 散乱の重み付けの値。 $((e^-, e^+) = (+1.0, +1.0))$	74
A.5	右巻き偏極の時の Bhabha 散乱の重み付けの値。左巻き偏極 100%( $(e^-, e^+)$ $= (-1.0, +1.0)$ )。	75
A.6	右巻き偏極の時の Bhabha 散乱の重み付けの値。(右巻き偏極 100%( $(e^-, e^+)$ $= (+1.0, -1.0)$ )	75
A.7	右巻き偏極の時の Bhabha 散乱の重み付けの値。 $((e^-, e^+) = (-1.0, -1.0))$ 。	76
A.8	右巻き偏極の時の Bhabha 散乱の重み付けの値。 $((e^-, e^+) = (+1.0, +1.0))$	76

# 第1章

## イントロダクション

素粒子物理学では、これまで物質を構成する粒子と相互作用を記述する標準理論を発展させてきた。この理論では物質を構成するクォークとレプトン、力を媒介するゲージ粒子、そして物質に質量を与えるヒッグス粒子と 17 種類の粒子で構成される。

フェルミオン			ボソン
クォーク	$u$ アップ	$c$ チャーム	$t$ トップ
レプトン	$d$ ダウ	$s$ ストレンジ	$b$ ボトム
$\nu_e$ 電子ν	$\nu_\mu$ ミューν	$\nu_\tau$ タウν	$\gamma$ 光子
$e$ 電子	$\mu$ ミュー	$\tau$ タウ	$g$ グルーオン
			$W$ $W$ ボソン
			$Z$ $Z$ ボソン
			$H$ ヒッグス

図 1.1 標準理論を構成する素粒子

クォークとレプトンはそれぞれ 6 種類あり、スピンが  $1/2$  のフェルミオンである。クォークには電荷  $+2/3$  のアップ ( $u$ ), チャーム ( $c$ ), トップ ( $t$ ) と、電荷  $-1/3$  のダウ ( $d$ ), ストレンジ ( $s$ ), ボトム ( $b$ ) が存在する。レプトンは  $-1$  の電荷を持つ電子 ( $e^-$ ), ミューオン ( $\mu^-$ ), タウ ( $\tau^-$ ) と電荷を持たない電子ニュートリノ ( $\nu_e$ ), ミューニュートリノ ( $\nu_\mu$ ), タウニュートリノ ( $\nu_\tau$ ) がある。これらはそれぞれ順番に第一世代、第二世代、第三世代と呼ばれ、質量が異なる。ゲージ粒子は、スピンが整数のスピンを持っておりボソンと呼ばれる。ボソンには電磁相互作用を媒介する光子 ( $\gamma$ ), 強い相互作用を行うグルーオン ( $g$ ), 弱い相互作用を行うウィークボソン ( $W^\pm, Z^0$ ) が存在する。粒子の質量を生み出すヒッグス粒子には、Large Hadron Collider (LHC) における ATLAS および CMS 実験によって、2012 年に発見された。このヒッグス粒子の発見をもって標準理論は一応完成したが、ダークマターの存在や相互作用が未統合であ

る問題など多くの未解決課題がある。そのため標準理論を超えた新しい物理が必要とされており、これら新物理の検証および発見のために国際リニアコライダー計画への関心が高まっている。

## 1.1 ILC と LHC

国際リニアコライダー（以下 ILC）は次世代の電子陽電子衝突型線形加速器である。粒子の加速には超電導加速空洞を用いており、電子（陽電子）を求めている重心系エネルギーまで加速させ衝突させる。岩手県の北上山地が候補地とされており、現在の計画では、全長は 20 km で重心系エネルギーは 250 GeV（ギガ電子ボルト :  $10^9$  eV）である。将来的には全長 31-50 km まで拡張し、重心系エネルギーも 500 GeV-1 TeV（テラ電子ボルト :  $10^{12}$  eV）まで拡張する計画である。ILC では素粒子である電子とその反粒子である陽電子を衝突させるため、衝突時のエネルギーのすべてを粒子の生成に利用できる。現在世界最大の Large Hadron Collider（以下 LHC）は陽子と陽子を衝突させる円形加速器であり、重心系エネルギーは 13 TeV を誇る。しかし、陽子は素粒子ではなく内部構造を持つ粒子のため実際に衝突で用いられるエネルギーは、陽子内部のクォークやグルーオンが持つエネルギーに限られる。一方で ILC では、衝突の全エネルギーを粒子生成に利用できる特徴があることから、衝突エネルギーを調整して実験を行うことができる。また、衝突エネルギーが全ての粒子の生成に利用されるという特徴は、生成断面積や結合定数の精密測定において、4 元運動量の保存則を利用した解析を可能にする。また、電子・陽電子はレプトンのため量子色力学（Quantum Chromo Dynamics: 以下 QCD）による不定性が少なく反応断面積などの高精細な理論予測が可能である。

## 1.2 ILC の建設設計について

ILC は 2013 年に公表された技術設計書 (TDR)[1] では重心系エネルギー 500 GeV で運用できるように設計されていた。しかし、2016 年 12 月の国際会議 LCWS2016 から ILC を早期実現させるために、コスト削減のための議論が研究者の間で行われていた。リニアコライダー・コラボレーション (LCC) 物理・測定器グループと高エネルギー物理学研究者会議 (JAHEP) が、ヒッグス粒子の精密測定に焦点を当てた、いわゆる「ヒッグス・ファクトリー」として 250 GeV の重心系エネルギーで開始する ILC を建設することには、十分な物理的な意義があるという検討結果に至り、2017 年 11 月に国際将来加速器委員会 (ICFA) がこの結果を支持するという声明を発表した [2]。検討結果では、ILC は Technical Design Report (以下 TDR)[1] の重心系エネルギーが 500 GeV の場合に比べて最大 40% のコスト削減が可能であるということを示しており、声明ではこれによりホスト国である日本政府が ILC を本格的に検討するように推奨している。

### 1.3 $Z'$ の探索について

先述の通り ILC には、背景事象が少なく QCD の不定性の影響が少ない。これらを生かして、反応断面積や角度分布を精密測定を行い、標準模型からのずれを高精度で見ることができる。この中でフェルミオンペアの生成 ( $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$ ) には重いゲージボソン ( $Z'$ ) にの生成に感度がある。新粒子を介する新物理が存在する場合、図 1.2 のような干渉の一乗の項をずれとして見ることができる。

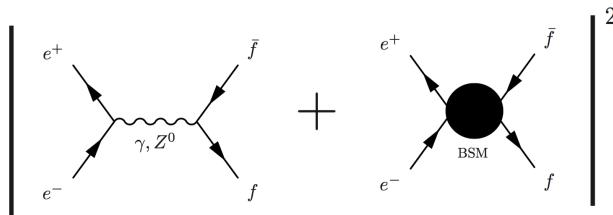


図 1.2 新物理 (Beyond Standard Model : BSM) が含まれている場合のフェルミオンペア生成のファインマンダイアグラム

そのため、ILCにおいては重い粒子によって生じる標準模型からのずれを測定し、間接的に新粒子の存在を示すことができる。

標準模型を超える物理 (BSM : Beyond Standard Model) については 5 章で述べるが、現在の LHC の測定では、ATLAS 実験において 新物理モデルの一つである SSM モデルの  $Z'$  の質量は  $Z' \rightarrow l^+l^-$  ( $l = e, \mu$ ) のチャンネルでは 4.5 TeV,  $Z' \rightarrow \tau^+\tau^-$  のチャンネルでは 2.4 TeV まで棄却されている [3, 4]。

TDR や先行研究 [5] にもある通り、重心系エネルギーが 500 GeV 以上の ILC におけるフェルミオンペアの感度についてはすでに理論計算及びシミュレーションを用いた解析がなされており、モデルによって  $Z'$  の質量が 5 -10 TeV 以下なら十分に感度があるとされている。ただ、先述の通り ILC はまずはヒッグスファクトリーとして重心系エネルギーが 250 GeV で建設されることが方針として決まっている。そのため、重心系エネルギーが 250 GeV の ILC における  $Z'$  の探索のフルシミュレーションが求められている。

### 1.4 研究課題

本研究では、重心系エネルギーが 250 GeV の ILC が  $Z'$  のような重いゲージボソンなどの新物理の探索が行えるかを評価する。ILC は計画中の加速器であるため、本研究は ILC のビーム特性や検出器の詳細を踏まえたモンテカルロシミュレーションを用いて生成したイベントを解析することにより行った。本研究ではシグナルと背景事象を弁別し、フェルミオンペアの生成過程における角度分布を調べて、標準理論を超えた物理と比較する。この結果は、ILC

運転シナリオの検討に対して寄与するものになる。

## 第 2 章

# ILC と ILD

### 2.1 ILC

ILC(図 2.1)[?] は先述の通り、全長 20.5 km(最大アップグレード時 50 km) の大型線形加速器である。加速系では超電導加速空洞を用いており、この部分で重心系エネルギーに達するまで加速する。これまで主流だった LHC のような円形加速器とは異なり、線形加速器は衝突の機会は加速した後の 1 回に限られるためである。また、高い衝突輝度 (Luminosity) を保つために高度に収束したビームを必要とする。このため鉛直方向に 5.9 nm, 水平方向に 474 nm の薄板状のビームを用いることが計画されている。高い収束を達成するためにはビームの向きをそろえる必要があるため、運動量の広がりも小さくする必要がある。

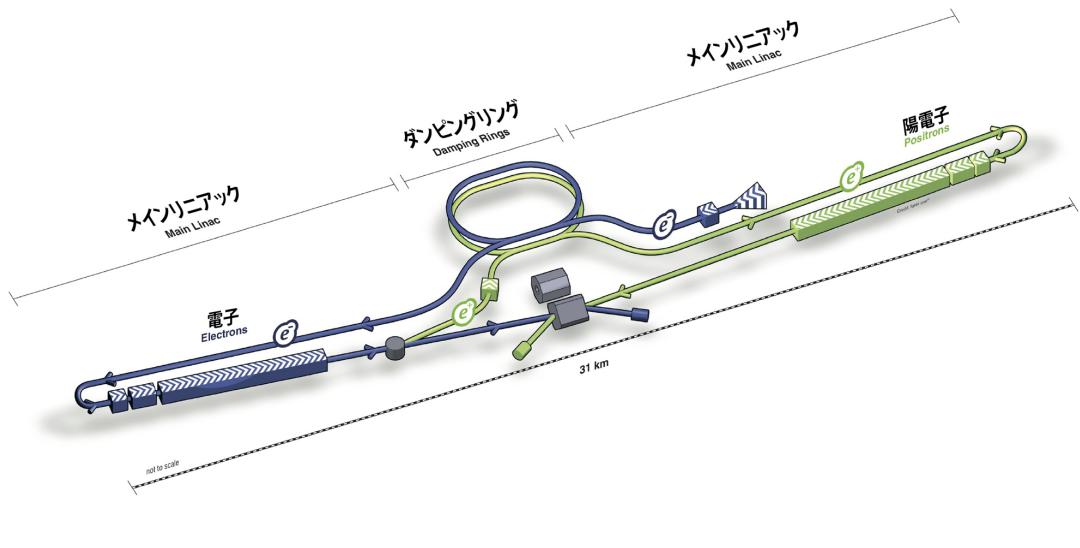


図 2.1 ILC 完成時の全景予想図 (TDR における計画時 : 全長 31km)[1]

図 2.2 は “H-20-staged” と呼ばれる運転計画シナリオである [6]。二つとも、はじめに重心系エネルギーを 250 GeV にして運転し、トンネル拡張などのアップグレードを得て 350

GeV<sup>\*1</sup>, 500 GeVで運転する計画である。“H-20-staged”シナリオ(図2.2(a))は、250 GeVで15年、全体の運転計画を26年とした時の積分ルミノシティを表している。”H-20-staged-BS”シナリオ(図2.2(b))は[7]に示されているルミノシティの改善を行った場合の運転計画で図2.2(a)よりも短くなっている。どちらのシナリオでも最終的な積分ルミノシティはTDRにおける計画と同じである。

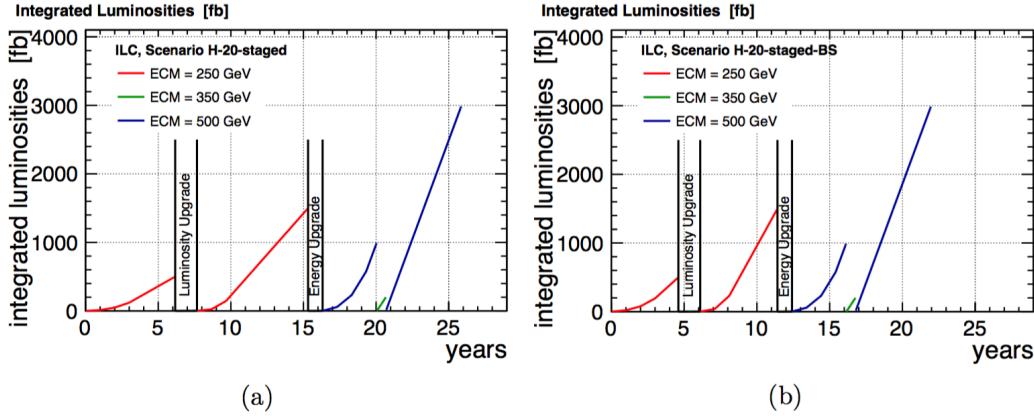


図2.2 ILCの運転シナリオ [6]

ILCでは偏極した電子・陽電子ビームを用いる。電子・陽電子の偏極を用いることで特定の物理反応の生成レートを増やしたり、背景事象を減らすことができる。今回の解析においては、背景事象の一つとなる  $e^+e^- \rightarrow W^+W^- \rightarrow 4f$  イベントの低減が挙げられる。 $W$  粒子が  $SU(2)_L$  の対称性から左巻きのレプトンにのみ結合するためであり、右巻き偏極電子を用いることで  $W^+W^-$  の背景事象を低減することができる。また、今回評価を行う新物理モデルによっては、偏極した場合、微分断面積が標準模型と大きくずれるものがあり、評価に役立っている。

ILCの電子源として、偏極したレーザーをGaAs標的に照射した際に光電効果によって生成される偏極電子を用いる。陽電子源としてはTDRではアンジュレータと呼ばれる磁場の向きを変えて電子の軌道を蛇行させる機構を用いて生成する(図2.3)。主線形加速器により150 GeV程度に加速された電子をアンジュレータに通過させることで制動放射によって円偏光した光子を放出させる。この光子をチタン標的に入射することで電子陽電子を対生成させる。磁場によって陽電子は分離され、ダンピングリングに輸送される。

生成された偏極電子は常伝導加速管で電子の集合体であるバンチという構造に成形される。このバンチには  $2 \times 10^{10}$  個の電子(陽電子)が詰まつてあり、ダンピングリング(図2.4)に輸送される。

ダンピングリングでは生成された電子(陽電子)の運動量方向を成形する。生成されたバンチのビームは様々な運動量を持っているため、そのまま衝突させてもルミノシティが低くなり

<sup>\*1</sup> 主にトップクォークの精密測定が目的である

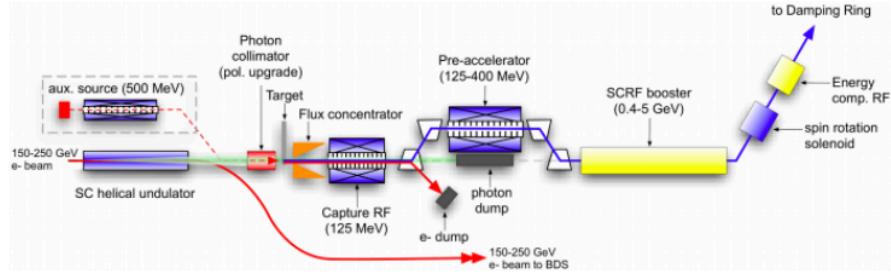


図 2.3 陽電子の生成機構

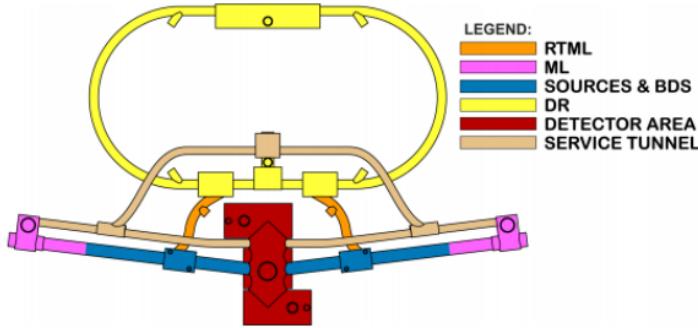


図 2.4 ILC の中央にあるダンピングリング。黄色の部分がダンピングリング (DR) である。

効率が悪い。ビームのルミノシティは

$$\mathcal{L} = f \frac{n_1 n_2}{4\pi\sigma_x\sigma_y} \quad (2.1)$$

と定義される。 $f$  はビームの周波数 (ILCにおいては 5 Hz)、 $n_1, n_2$  はそれぞれバンチトレイン<sup>\*2</sup>に含まれる電子・陽電子の数、 $\sigma_x, \sigma_y$  はビームサイズに対応する値である。ビームサイズを小さくすると高いルミノシティが実現できることがわかる。ビームサイズを小さくするためにはエミッタスという値を小さくすることが重要であり、ILC ではダンピングリングでビームの横方向の運動量を減少させる手法を用いる。エミッタスは  $x$  と  $y$  をビームの進行方向に対してそれぞれ垂直な軸とした時、

$$\epsilon_x = \sqrt{\langle (x - \langle x \rangle)^2 \rangle \langle (x' - \langle x' \rangle)^2 \rangle - \langle (x - \langle x \rangle)(x' - \langle x' \rangle) \rangle^2} \quad (2.2)$$

と定義される。 $x$  と  $x'$  ( $= p_x/p_s$ ) はそれぞれ粒子の位置と方位角で、 $p_s$  はビームの接線方向への運動量である。 $y$  も  $x$  と同様に計算ができる。電子・陽電子はダンピングリング内で軌道を曲げるられることによって制動放射によって光子を放出する。この光子は電子・陽電子が持つ運動量の接線方向に放出されるため、ビームの横方向の運動量が一部減衰する。その後、ダンピングリング中の直線部分においてビームが失った全運動量と等しくなるように縦方向の運動量を補充する。これによりビームの縦運動量を保ちつつ、横方向の広がりを減衰させることができる。

<sup>\*2</sup> バンチトレインは 1312 個のバンチと呼ばれるビームの集合体である。(TDRにおいてはどの重心系エネルギーにおいてもバンチ及びバンチトレインの値は同じである)

最終的なビームサイズは

$$\sigma_x = \sqrt{\beta_x \gamma_e \epsilon_x} \quad (2.3)$$

であり、ビームサイズはエミッタンスに強く依存することがわかる。ここで、 $\beta_x = \langle (x - \langle x \rangle)^2 \rangle / \langle J_x \rangle$  ( $\langle J_x \rangle$  は全運動量の平均)、 $\gamma_e = 1 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$  である。 $\sigma_y$  も同様に計算ができる。ダンピングリングでエミッタンスを小さくしたビームはバンチ構造を保ちながら、ビーム輸送系へと運ばれる。輸送系では 15 GeV 程度まで加速され主線形加速器に運ばれる。TDRにおいて、重心系エネルギーは 500 GeV に達する必要があるため、11 km の超伝導加速空洞は平均加速勾配 31.5 MeV/m を達成する必要がある。ILC では電子・陽電子ビーム系で約 16000 本のニオブ製の加速空洞(図 2.5)が必要とされる。この加速空洞はクライオモジュール(図 2.6)に挿入されて超伝導状態を維持される。超伝導加速空洞の各セルは、内部をビームバンチが通過する際に、常に前向きの電場がかかるよう 1.3 GHz の高周波を用いた RF (Radio Frequency) ユニットによって制御され、粒子を加速する。



図 2.5 超伝導加速空洞

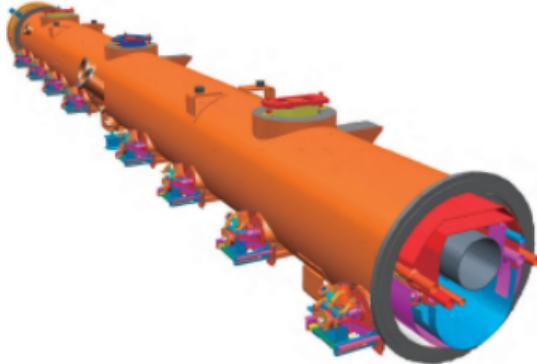


図 2.6 クライオモジュールのイメージ

## 2.2 ILD

ILC の検出器として、ILD (International Large Detector) (図 2.7) と SiD (Silicon Detector) (図 2.8) の 2 種類がある。ILD は日本をはじめアジアおよびヨーロッパ、SiD は主にアメリカにより開発設計が行なわれている。この二つの検出器が電子・陽電子ビームの中心に設置されるが、ビームラインは一つしかないため、push-pull 方式で測定器を交互に置く計画である。これらの検出器は次節で述べる PFA (Particle Flow Algorithm) に基づいたイベントの再構成に最適化された検出器である。本研究では、ILD 検出器モデルを用いたシミュレーション事象の解析のため、以降は ILD 検出器の構造について述べる。

### 2.2.1 PFA (Particle Flow Algorithm)

ジェットを含む終状態には多くのクォークやグルーオンが含まれている。このため、ハドロンチャンネルを利用する上では、ジェットの粒子を検出し、正確に再構成をする必要がある。

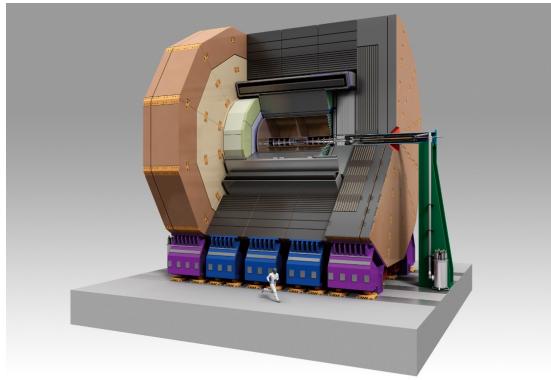


図 2.7 ILD

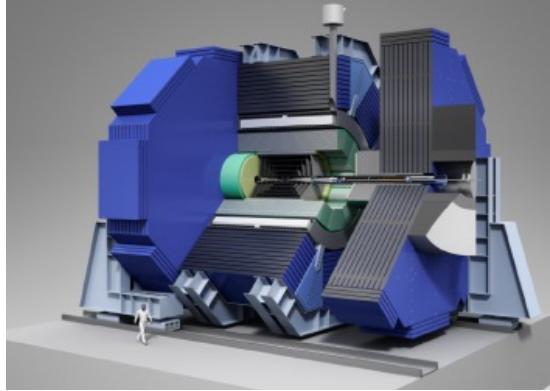


図 2.8 SiD

ILC ではこのイベントの再構成に PFA (Particle Flow Algorithm)[8] を用いており、本研究のシミュレーションでも PFA に基づいて解析を行っている。

PFA はジェット中に含まれる粒子を一つ一つ識別し、粒子の種類によって運動量やエネルギーの測定を最適な測定器で行う。荷電粒子の運動量は飛跡検出器で測定される。光子は電磁カロリメータでエネルギーを測定し、中性のハドロンは電磁カロリメーターやハドロンカロリメータでエネルギーを測定する。

荷電粒子の測定をカロリメータで行うため、クラスターを分離し荷電粒子のクラスターのエネルギーはジェットエネルギー再構成では用いないそのため、カロリメータでの荷電粒子によるシャワーを正確に分けることが PFA では必要になる。

PFA を用いることによって、ジェットのエネルギーの分解能が向上し、 $W$  と  $Z$  の不变質量による判別が可能になる。

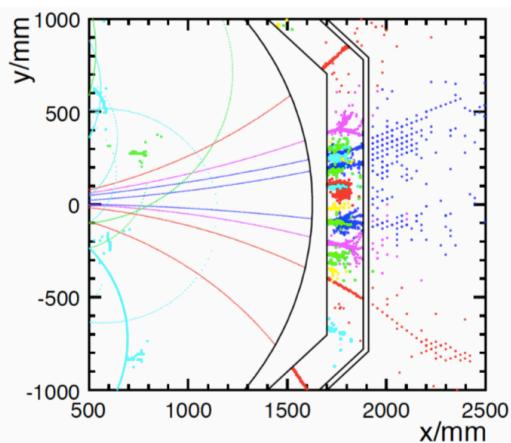


図 2.9 PFA のイメージ図。一つの色が一つの粒子を表しており、ジェット中の粒子の再構成が行われている

## 2.2.2 崩壊点検出器

崩壊点検出器はビームの衝突点に最も近い検出器であり、粒子の崩壊点と荷電粒子の飛跡を正確に再構成するための検出器である。 $B$  中間子や  $D$  中間子など衝突点付近で崩壊する粒子の崩壊点を測定して、 $b$  クォークや  $c$  クォークを同定する目的がある。この目的を達成するために、数  $\mu m$  以下の位置分解能を持つことが必要である。

## 2.2.3 飛跡検出器

飛跡検出器としては TPC (Time Projection Chamber) とシリコン検出器が用いられる。TPC 内部はガスで満たされており、検出器中央から両側のエンドキャップに向かって電場がかかっている。TPC 内部を通過する荷電粒子により、内部のガスが電離し、電場によって電離した電子(陽電子)がエンドキャップにあるカソードに向かって移動する。検出したカソードの位置によってパラレル方向(xy 軸)の飛跡を、電離してからカソードに到達する時間を測定してビーム方向(z 軸)の飛跡を捉える。また、崩壊点検出器と TPC を補完するために中央のパラレル領域に SIT (Silicon Internal Tracker)、前方領域に FTD (Forward Tracking Detector)、さらに電磁カロリメータへの入射位置と時間の測定のために SET (Silicon External Tracker) と ETD (End-cap Tracking Detector) が設置される。ここで用いられるシリコンセンサーはストリップ型である。

## 2.2.4 電磁カロリメータ

カロリメータは入射粒子に内部でカスケードシャワーを起こさせてエネルギーを全て落とさせる。ILC の電磁カロリメーターは検出層と吸収層を交互に重ね合わせたサンプリング型カロリメータである<sup>\*3</sup>。

吸収層にはタングステンを用いており、この層で入射粒子にカスケードシャワーを起こさせる。タングステンは鉄、銅や鉛と比べると高価であるが、放射長 ( $X_0 = 3.5 \text{ mm}$ )<sup>\*4</sup> およびモリエール半径 ( $R_M = 9.3 \text{ mm}$ )<sup>\*5</sup> が小さいため、小型で精度の良い電磁カロリメータを可能にする。

検出層には、DBDにおいてピクセル型のシリコンセンサーを用いている。このシリコンセンサーは  $5.5 \times 5.5 \text{ mm}^2$  のピクセルを 256 個持ち、このピクセルによってシャワー内の粒子の位置を高い分解能で得られる。シリコンセンサーには逆バイアス電圧が印加されている。荷電粒子がセンサー内を通過すると、電子と正孔(hole)を生成する。これらは、印加された電圧

<sup>\*3</sup> サンプリング型と対照的に吸収と検出を一体で行う全吸収型のカロリメーターもある。高密度な無機結晶シンチレーターや鉛ガラスが使用される。エネルギー分解能が非常に優れているが、コストがかかりジェットの分離が難しい。

<sup>\*4</sup> 入射粒子のエネルギーが  $1/e$  となるまでに必要な平均距離

<sup>\*5</sup> シャワーのエネルギーの 90 % が入る半径

によって、それぞれ反対側の電極に集められる。電子正孔対の数は粒子の数に比例するため、電極に集められた正孔の数によって粒子数が測定できる。この粒子数からカロリメータ内で落とすエネルギーを推定することが可能である。

現在、検出層のオプションとして衝突点側の数層にピクセル型シリコンセンサーとは異なるゲイン付きの位置感度型シリコンセンサー (PSD 型) を用いることが提案されている。PSD 型センサー電極を細かく細分化することなく高い位置分解能を得ることができ、 $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$  の再構成や飛跡検出器の一部として用いることなどが期待されており、研究が進められている [9]。

### 2.2.5 ハドロンカロリメータ

ハドロンカロリメータは荷電ハドロンと中性ハドロンのエネルギー損失を分離しつつ中性ハドロンのエネルギーを正確に測定する。電磁カロリメータと同様にサンプリング型を採用しており、吸収層には鉄が用いられている。検出層には二つの候補があり、シンチレータータイルを用いるアナログ読み出しの AHCAL とガス検出器を用いるセミ・デジタル読み出しの SDHCAL が提案されている。

### 2.2.6 リターンヨークとミューオン検出器

ハドロンカロリメータの外側にあるソレノイドコイルによって内部に 3.5 T の磁場を発生させる。ソレノイドコイルの全長は 7.4 m、内径 3.6 m、外径が 4.1 m の 5 つのモジュールによって形成されている。リターンヨークはソレノイドコイルによる磁場を効率的に高磁場にし、この磁場が外部に漏れるのを防ぐ機構であり、リターンヨークは鉄の板の層構造になっている。それぞれの層の間には検出器が設置されており、これがミューオン検出器としての役割を果たす。ミューオン検出器が ILD の最も外側に設置されているのは、ミューオンはカロリメーターを超えて通過してくるためである。ミューオン検出器の情報は飛跡検出器などの情報と対応づけて PFA による解析の精度を上げることができる。

## 第3章

# シミュレーションと イベントサンプル

本研究は、次世代加速器実験へ向けた研究であり、モンテカルロシミュレーションを用いて生成された事象の解析を行う。シミュレーションでは、実際の実験において観測が期待される事象を再現する必要がある。そのため、ビームの特性や、検出器の詳細をシミュレーション上に構成する必要がある。今回の ILC における物理・検出器シミュレーションでは KEKCC[10] と呼ばれる計算機システム上に存在する ILCSof[11] を用いる。ILCSof は ILC での実験時のビームや、検出器の構造を導入したシミュレーション・及び解析ソフトウェアである。今回はまず、一部イベントサンプルを WHIZARD[12] や PYTHIA[13] で作成し、Geant4[14] を基にした Mokka で検出器シミュレーションを行う。さらにすでに KEKCC 上にあるサンプルを Marlin[15] を通して、再構成及びイベント選別を行う。これらの詳細について、本章と次章にわたり説明する。

### 3.1 用いた信号事象と主な背景事象

#### 3.1.1 $e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^-$ イベント ( $\ell = e, \mu, \tau$ )

$e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^-$  ( $\ell = e, \mu, \tau$ ) は 2 lepton のシグナルとして用いられるチャンネルである (図 3.1)。これらはすべて  $s$  channel である。Bhabha 散乱 ( $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ ) には  $t$  channel(図 3.2) も含まれるが、この  $t$  channel の過程は重いゲージボソンに感度がないと考えられるため、イベント選別の際にできるだけ除外する。

電子 ( $e^-$ )・陽電子 ( $e^+$ ) は電荷を持つため、飛跡検出器で運動量を測定できる。また、電磁カロリメーターでシャワーを起こしてエネルギーを測定される。電子は安定粒子のため、検出器内部で崩壊することはない。

ミュー粒子 ( $\mu^-, \mu^+$ ) は電荷を持つため電子と同じように運動量を測定できる。しかし、電磁カロリメーター・ハドロンカロリメーター内では電離損失のみでありあまりエネルギーを落とさない。PFA では検出器の最も外側にあるミューオン検出器によって、ミューオンが生成

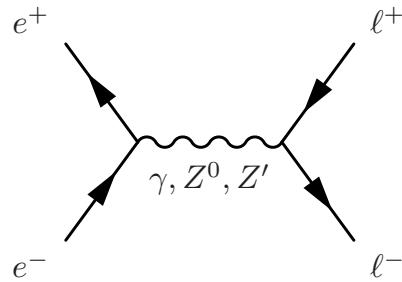
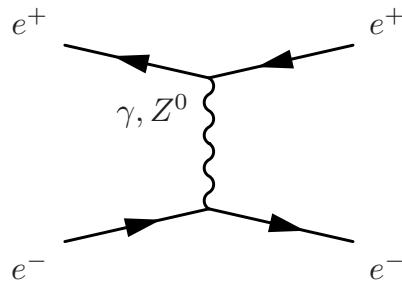


図 3.1 2 lepton process

図 3.2 Bhabha 散乱の  $t$ -channel

されたかを判断する。ミュー粒子の平均寿命は  $2.2 \times 10^{-6}$  秒であるため、ILD 内部での崩壊はほとんどない。

タウ粒子 ( $\tau^-, \tau^+$ ) の平均寿命は  $2.9 \times 10^{-13}$  秒と短いため、検出器内部で崩壊し、他のレプトンやハドロンに崩壊する。主な崩壊として、 $\tau^- \rightarrow \rho\nu$ (25.5%)、 $\tau^- \rightarrow \mu^-\bar{\nu}_\mu\nu_\tau$ (17.4%)、 $\tau^- \rightarrow e^-\bar{\nu}_e\nu_\tau$ (17.8%)、 $\tau^- \rightarrow \pi^-\nu_\tau$ (10.4%)、などがある。その他、 $\pi$  中間子を複数出す崩壊や、 $K$  中間子を含む崩壊もある。メソンなどハドロンを含む崩壊ではジェットを生じるため、3.4.1 節で説明する Tau Jet Finder (TaJet) でイベントの再構成を行った後に解析を行う。

### 3.1.2 $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$ イベント ( $q = b, c$ )

$e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$  は 2 クォークのシグナルとして用いられるチャンネルである。(図 3.3)

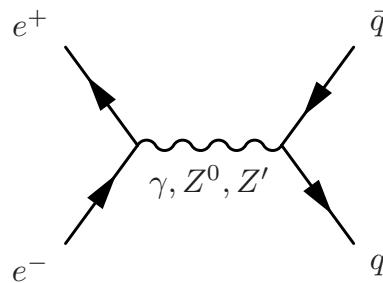


図 3.3 2 quark process

今回は  $b$  クォークおよび  $c$  クウォークのチャンネルでの解析を行う。これらのクウォークを含

む中間子 ( $B$  や  $D$ ) は崩壊点検出器中で崩壊し、ジェットを生成する。そのため、後述する Flavor tagging や Charge ID を行った後に解析を行う。

### 3.1.3 4 フェルミオンイベント

今回は主な背景事象として 4 フェルミオン事象を考慮する。4 フェルミオンイベントは左巻き偏極において多く含まれており、大きな背景事象となる。右巻き偏極においては生成される  $WW$  の反応断面積が小さいため、左巻き偏極に比べ背景事象は少なくなる。

4 つのフェルミオンを出す過程としては  $e^+e^- \rightarrow WW, ZZ$  および  $e^+e^- \rightarrow Z\ell\ell$ , などがある。

それぞれのゲージボソンは  $W^+ \rightarrow \ell^+\nu, W^- \rightarrow \ell^-\bar{\nu}, Z^0 \rightarrow \ell^-\ell^+, \nu\bar{\nu}$  などに崩壊する。ゲージボソンが二つ生成される過程では終状態によってはゲージボソンが干渉し、区別ができないことがある。 $e^+e^- \rightarrow WW \rightarrow \mu^+\nu_\mu\mu^-\bar{\nu}_\mu$  と  $e^+e^- \rightarrow ZZ \rightarrow \mu^+\mu^-\nu_\mu\nu_\mu$  を例にとると、この過程では終状態の粒子が同じであり、中間状態の区別ができないものである。今回はこのイベントも同様に含んでおり、表 3.1.4 と表 3.1.4 において、これらのイベントは  $e^+e^- \rightarrow WW, ZZ \rightarrow \ell\nu\ell\nu$  および  $e^+e^- \rightarrow WW, ZZ \rightarrow q_1\bar{q}_1q_2\bar{q}_2$  と表記している。

### 3.1.4 イベントサンプルの混合

本研究で用いたイベントサンプルは重心系エネルギー 250 GeV を想定したものである。ILC での実験は衝突に利用する電子・陽電子を偏極させることが可能である。そこで、本解析においては左巻き偏極  $(e^-, e^+) = (-0.8, +0.3)$  と右巻き偏極  $(e^-, e^+) = (+0.8, -0.3)$  の両方を想定して解析を行った。H20-staging scenario では、重心系エネルギー 250 GeV の ILC の統計量は全体で  $2000 \text{ fb}^{-1}$  であり、その中で右巻き左巻きそれぞれで 45% ずつ、つまりそれぞれ偏極で  $900 \text{ fb}^{-1}$  となっている<sup>\*1</sup>。シミュレーション上では、100% 偏極した場合のイベントが生成されているため、解析をする上で必要な偏極にするためにそれぞれの偏極のイベントを適切な割合で混合し、偏極を考慮した際のイベント数を計算するために重み付けをする必要がある。イベントサンプルを混合の際の重み付けを求める式を式 3.1 に示す。

$$\text{weight} = \frac{N_{\text{ana}}}{\sigma \times \mathcal{L}_{\text{sim}}} \quad (3.1)$$

ここで  $\sigma$  は偏極を考慮したイベントサンプルの生成断面積、 $\mathcal{L}$  は積分ルミノシティである。添字の ana 及び sim はそれぞれ解析時の時とシミュレーション時のことを示す。今回用いたイベントサンプルと重みの値を偏極ごとに表 3.1.4 と表 3.1.4 に示す。

---

<sup>\*1</sup> その他、 $(e^-, e^+) = (+0.8, +0.3)$  及び  $(e^-, e^+) = (-0.8, -0.3)$  の偏極でそれぞれ 5% ( $100 \text{ fb}^{-1}$ ) の統計量を溜めるように運用される方針である。

表 3.1 左巻き偏極時の生成イベントのイベント数及び重み付けの値 (Bhabha 散乱は Appendix 参照)。偏極については、eL.pR:左巻き偏極 100%( $(e^-, e^+) = (-1.0, +1.0)$ )、eR.pL:右巻き偏極 100%( $(e^-, e^+) = (+1.0, -1.0)$ )、eL.pL: $(e^-, e^+) = (-1.0, -1.0)$ 、eR.pL: $(e^-, e^+) = (+1.0, +1.0)$ を意味する。上段はレプトンのチャンネルで、下段はハドロンのチャンネルで用いたシグナル及び背景事象である。

イベント	偏極	$\sigma$ (fb)	$N_{\text{ana}}$	$\mathcal{L}_{\text{sim}}(\text{fb}^{-1})$	weight
$e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^- (\ell = \mu, \tau)$	eL.pR	21226	2125992	526.5	5.257
$e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^- (\ell = \mu, \tau)$	eR.pL	16470	1646769	31.5	0.315
$e^+e^- \rightarrow WW \rightarrow \ell_1\nu_1\ell_2\nu_2$	eL.pR	1564	399207	526.5	2.063
$e^+e^- \rightarrow WW \rightarrow \ell_1\nu_1\ell_2\nu_2$	eR.pL	15	10000	31.5	0.046
$e^+e^- \rightarrow WW, ZZ \rightarrow \ell\nu\ell\nu$	eL.pR	1636	410208	526.5	2.100
$e^+e^- \rightarrow WW, ZZ \rightarrow \ell\nu\ell\nu$	eR.pL	54	20000	31.5	0.085
$e^+e^- \rightarrow ZZ \rightarrow \ell\ell\ell\ell, \nu\nu\nu\nu$	eL.pR	158	40000	526.5	2.079
$e^+e^- \rightarrow ZZ \rightarrow \ell\ell\ell\ell, \nu\nu\nu\nu$	eR.pL	100	30000	31.5	0.104
$e^+e^- \rightarrow W\ell\nu$	eL.pL	40	10000	283.5	1.133
$e^+e^- \rightarrow W\ell\nu$	eL.pR	3335	835717	526.5	2.100
$e^+e^- \rightarrow W\ell\nu$	eR.pL	40	10000	31.5	0.126
$e^+e^- \rightarrow W\ell\nu$	eR.pR	29	10000	58.5	0.170
$e^+e^- \rightarrow Z\ell\ell$	eL.pL	1010	255136	283.5	1.122
$e^+e^- \rightarrow Z\ell\ell$	eL.pR	1084	272923	526.5	2.091
$e^+e^- \rightarrow Z\ell\ell$	eR.pL	1008	254967	31.5	0.125
$e^+e^- \rightarrow Z\ell\ell$	eR.pR	1020	254967	58.5	0.234
$e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$	eL.pR	129149	1747094	526.5	38.920
$e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$	eR.pL	71273	1426200	31.5	1.574
$e^+e^- \rightarrow WW \rightarrow q_1\bar{q}_2q_3\bar{q}_4$	eL.pR	14874	1074479	526.5	7.288
$e^+e^- \rightarrow WW \rightarrow q_1\bar{q}_2q_3\bar{q}_4$	eR.pL	136	34576	31.5	0.124
$e^+e^- \rightarrow WW, ZZ \rightarrow q_1\bar{q}_1q_2\bar{q}_2$	eL.pR	12383	999222	526.5	6.525
$e^+e^- \rightarrow WW, ZZ \rightarrow q_1\bar{q}_1q_2\bar{q}_2$	eR.pL	225	56562	31.5	0.125
$e^+e^- \rightarrow ZZ \rightarrow q\bar{q}q\bar{q}$	eL.pR	1402	106573	526.5	6.927
$e^+e^- \rightarrow ZZ \rightarrow q\bar{q}q\bar{q}$	eR.pL	605	151328	31.5	0.126
$e^+e^- \rightarrow ZZ \rightarrow q_1\bar{q}_2\ell\ell$	eL.pR	1422	356445	526.5	2.100
$e^+e^- \rightarrow ZZ \rightarrow q_1\bar{q}_2\ell\ell$	eR.pL	714	178638	31.5	0.125
$e^+e^- \rightarrow WW \rightarrow q_1\bar{q}_2\ell\nu$	eL.pR	18781	470462	526.5	21.018
$e^+e^- \rightarrow WW \rightarrow q_1\bar{q}_2\ell\nu$	eR.pL	173	43458	31.5	0.125

表 3.2 右巻き偏極の時の生成イベントのイベント数及び重み付けの値 (Bhabha 散乱は Appendix 参照)。偏極については、eL.pR:左巻き偏極 100%( $(e^-, e^+) = (-1.0, +1.0)$ )、eR.pL:右巻き偏極 100%( $(e^-, e^+) = (+1.0, -1.0)$ )、eL.pL: $(e^-, e^+) = (-1.0, -1.0)$ 、eR.pL: $(e^-, e^+) = (+1.0, +1.0)$ を意味する。上段はレプトンのチャンネルで、下段はハドロンのチャンネルで用いたシグナル及び背景事象である。

イベント	偏極	$\sigma$ (fb)	$N_{\text{ana}}$	$\mathcal{L}_{\text{sim}}$ (fb $^{-1}$ )	weight
$e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^- (\ell = \mu, \tau)$	eL.pR	21226	2125992	31.5	0.315
$e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^- (\ell = \mu, \tau)$	eR.pL	16470	1646769	526.5	5.266
$e^+e^- \rightarrow WW \rightarrow \ell_1\nu_1\ell_2\nu_2$	eL.pR	1564	399207	31.5	0.123
$e^+e^- \rightarrow WW \rightarrow \ell_1\nu_1\ell_2\nu_2$	eR.pL	15	10000	526.5	0.774
$e^+e^- \rightarrow WW, ZZ \rightarrow \ell\nu\ell\nu$	eL.pR	1636	410208	31.5	0.126
$e^+e^- \rightarrow WW, ZZ \rightarrow \ell\nu\ell\nu$	eR.pL	54	20000	526.5	1.420
$e^+e^- \rightarrow ZZ \rightarrow \ell\ell\ell\ell, \nu\nu\nu\nu$	eL.pR	158	40000	31.5	0.124
$e^+e^- \rightarrow ZZ \rightarrow \ell\ell\ell\ell, \nu\nu\nu\nu$	eR.pL	100	30000	526.5	1.746
$e^+e^- \rightarrow W\ell\nu$	eL.pL	40	10000	58.5	0.234
$e^+e^- \rightarrow W\ell\nu$	eL.pR	3335	835717	31.5	0.126
$e^+e^- \rightarrow W\ell\nu$	eR.pL	40	10000	526.5	2.102
$e^+e^- \rightarrow W\ell\nu$	eR.pR	298	10000	283.5	0.825
$e^+e^- \rightarrow Z\ell\ell$	eL.pL	1010	255136	58.5	0.231
$e^+e^- \rightarrow Z\ell\ell$	eL.pR	1084	272923	31.5	0.125
$e^+e^- \rightarrow Z\ell\ell$	eR.pL	1008	254967	526.5	2.082
$e^+e^- \rightarrow Z\ell\ell$	eR.pR	1020	254967	283.5	1.134
$e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$	eL.pR	129149	13.53	31.5	2.329
$e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$	eR.pL	71273	20.01	526.5	26.311
$e^+e^- \rightarrow WW \rightarrow q_1\bar{q}_2q_3\bar{q}_4$	eL.pR	14874	72.24	31.5	0.436
$e^+e^- \rightarrow WW \rightarrow q_1\bar{q}_2q_3\bar{q}_4$	eR.pL	136	253.57	526.5	2.076
$e^+e^- \rightarrow WW, ZZ \rightarrow q_1\bar{q}_1q_2\bar{q}_2$	eL.pR	12383	80.69	31.5	0.390
$e^+e^- \rightarrow WW, ZZ \rightarrow q_1\bar{q}_1q_2\bar{q}_2$	eR.pL	225	251.56	526.5	2.093
$e^+e^- \rightarrow ZZ \rightarrow q\bar{q}q\bar{q}$	eL.pR	1402	76.01	31.5	0.414
$e^+e^- \rightarrow ZZ \rightarrow q\bar{q}q\bar{q}$	eR.pL	605	250.14	526.5	2.105
$e^+e^- \rightarrow ZZ \rightarrow q_1\bar{q}_2\ell\ell$	eL.pR	1422	250.64	31.5	0.126
$e^+e^- \rightarrow ZZ \rightarrow q_1\bar{q}_2\ell\ell$	eR.pL	714	250.36	526.5	2.103
$e^+e^- \rightarrow WW \rightarrow q_1\bar{q}_2\ell\nu$	eL.pR	18781	25.05	31.5	1.257
$e^+e^- \rightarrow WW \rightarrow q_1\bar{q}_2\ell\nu$	eR.pL	173	251.59	526.5	2.093

## 3.2 イベントサンプルの生成

先述の通り、イベントサンプルの生成は PYTHIA (ver 6.4) が内蔵された WHIZARD ( ver 1.95 )を用いて行われる。Whizard では位相する過程のイベント生成の計算を行い、PYTHIA ではハドロン化 (hadronization) を行う。このイベントサンプル生成の際は 100% 偏極した状態を生成されており、前節の通り解析の際に ILC で行う偏極に合わせて適切な割合で混合される。

今回用いるイベントのうち Bhabha 散乱 ( $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ ) においては、ほとんどがビーム方向に散乱し、大角度散乱のイベントが少なくなる。そのため、イベント生成にともなう計算量の増大を避けるために、 $|\cos\theta| > 0.97$  または  $e^+e^-$  のエネルギーの合計が 200 GeV 以下のものはイベント生成の時点で落としている。この事前選別よりもさらに厳しい条件でイベント選定を行うため、この選別は本解析には影響しない。また、Bhabha 散乱を全ての生成角度でまとめて生成すると、垂直方向イベントの生成が極端に少なくなる。そのため、ビーム軸に対する生成角度を  $\theta$  とすると、 $-0.97 < \cos\theta < -0.9$ ,  $-0.9 < \cos\theta < -0.8$ ,  $-0.8 < \cos\theta < -0.7$ , ...,  $0.8 < \cos\theta < 0.9$ ,  $0.9 < \cos\theta < 0.97$  と  $\cos\theta$  を 0.1 刻みに分割し、それぞれの角度の範囲内で 10000 イベントずつ生成した。

## 3.3 検出器シミュレーションと ILD 標準イベント再構成

イベント生成により、生成された事象は Geant4(GEometry ANd Tracking 4)[14] をベースの Mokka で検出器シミュレーションを行う。検出器の情報としては、DBD report[16] における ILD の検出器モデル ( ILD\_v1\_05 ) を用いた。このモデルには、2 章で説明した Vertex 検出器、飛跡検出器、電磁カロリメーター、ハドロンカロリメーターを含んでおり、またソレノイド磁石によって 3.5 T の磁場が検出器にかかっている状態を仮定している。

検出器シミュレーションでは、物理シミュレータにより生成された粒子のエネルギーと運動量を、検出器モデルへ入力し、その粒子と相互作用をシミュレーションすることで各検出器にヒット情報を蓄積させる。このヒット情報は検出効率や分解能などをシミュレーションされ、その後各検出器に残った情報を用いて飛跡の再構成や崩壊点の再構成が行われる。カロリメータの情報は、PandoraPFA algorithm を用いて、クラスタリングと飛跡との接続が行われ、各粒子の対応付けがなされる。

## 3.4 本解析で用いるイベント再構成

解析に際して、イベントの選定のためにいくつかの解析オプションを導入しイベントの再構成を行った。以下にそのオプションを説明する。

### 3.4.1 Tau Jet Finder (TaJet)

タウ粒子はハドロンに崩壊する場合ジェットを生じる。今回は  $e^-e^+ \rightarrow \tau^-\tau^+$  のチャンネルにおいて Tau Jet Finder を適用し、イベント選別の前にタウジェットのクラスタリングを行った。以下一つのタウジェットを同定する手順である [17]。

1. イベント中の粒子の中でタウ粒子の候補となる最もエネルギーの高い荷電粒子を選ぶ。
2. タウ粒子候補と関連づける粒子を選ぶ。関連づける粒子の条件は、「タウ粒子候補と関連粒子の Opening angle が 50 mrad 以下」であるか、「タウ粒子と関連粒子との不变質量が 2 GeV 以下かつ Opening angle が 1 rad 以下である」ことである。
3. タウ粒子候補と関連づける粒子のエネルギーと運動量を合わせて、これを新たなタウ粒子候補として手順 2 を繰り返す。
4. 関連付けられる粒子がなくなったら、これを一つのタウジェットとする。残った粒子の中で最も高いエネルギーの粒子は別のタウ粒子の候補となる。(手順 1 に戻って新たにタウジェットクラスタリングを行う)

このクラスタリング結果は、他のレプトンチャンネルと同様にイベント選別および解析を行うことができる。

### 3.4.2 Flavor Tagging

ILC では比較的長寿命なクォークを同定するために衝突点近くに設置されている崩壊点検出器の情報を用いる。寿命の短い粒子は衝突点で生成された後すぐに崩壊するため、衝突点と崩壊点はほぼ一致し、検出される崩壊点は一つになる。一方で、 $b$  クォークや  $c$  クォークは生成された後崩壊まで数百  $\mu\text{m}$  ~ 数  $\text{mm}$  程度飛行することがある。そのため衝突点とは離れた位置に崩壊点を生成することがある。このような二次的な崩壊点を検出することによって  $b$  クォークや  $c$  クォークが生成されていたと判断することができる。

本研究においては  $e^-e^+ \rightarrow b\bar{b}$  や  $e^-e^+ \rightarrow c\bar{c}$  のチャンネルにおいて生成される  $b$  クォークや  $c$  クウォークの同定などのために、LCFIPplus[18] を用いてフレーバータグを行った。LCFIPplus では、各粒子の飛跡から再構成された二次崩壊点の数・位置・質量等の情報と、各飛跡の原点からのずれをあわせて BDT (Boosted Decision Tree) を用いた多変量解析により各ジェットのフレーバーを識別している。LCFIPplus は各ジェットに対して、 $b, c, uds$ -likeness を出力する。これらはそれぞれ  $b$  クォークらしさ、 $c$  クウォークらしさ、 $u, d, s$  のいずれかのクォークらしさを表す。それぞれのパラメーターは  $[0,1]$  の範囲内で出力され、値が 1 に近いほど、そのクォークらしさを示す。このパラメーターはのちのイベント選別で用いる。

### 3.4.3 Charge ID

ハドロンチャンネル ( $e^-e^+ \rightarrow q\bar{q}$ ) においてそれぞれのクォークの終状態を直接見ることはできないため、実際には  $B$  中間子などを含むジェットからハドロンの再構成をする必要がある。この際、クォークやグルーオンからハドロンへと崩壊していく過程はカラー一重項ではないため、ハドロンがどのクォーク（またはグルーオン）に由来するかは定義できない。そのため、モンテカルロシミュレーション（以下 MC）と再構成した粒子の対応が正確には決められない。このため、MC とジェットの方向を照らし合わせてこれらを対応付けている。

これとは別に、クォークの電荷とハドロンの電荷が一致してない場合があるためイベントに二次的な崩壊点を含む場合はその崩壊点の電荷を考慮に含めて電荷を求めないといけない。これは、クォークが分数電荷でカラー一重項ではないので、ジェットの電荷が MC ではきちんと決めることができず、また（特に低い運動量の場合）ジェットから出る多数の track の一部を見逃すことが多いためである。二次崩壊点は重いハドロンに由来するので、もとのクォークの電荷と相関が強く、ジェットの電荷を求めるのに役立つ。ただし、崩壊の仕方によっては電荷が逆転するものもあり、例えば  $\bar{b}$ （電荷 +1/3）を含む中間子である  $B^0 (= \bar{b}d)$  は約 30% の崩壊分岐比で  $D^-$  に崩壊するが、10 % は  $D_s^+$  に崩壊する。このようなイベントで電荷を誤認することを避けるため、二次崩壊点を考慮しない方が正確な電荷を得られる場合もある。今回は、ジェットごとに崩壊点の数で場合分けを行い様々な条件から最も良い efficiency を得られる条件を探した。崩壊点の合計の電荷、一つ目の崩壊点の電荷、ジェットの電荷の 3 条件でジェットごとの電荷を求め、2 本のジェットの電荷の差を取り Charge ID ができているかを判断した（表 3.3）。この結果から崩壊点があるイベントの場合、全体の崩壊点の電荷を先に考えたほうが efficiency が良くなることがわかった。この場合の efficiency は 60% である。これをもとに efficiency が良い条件で Charge ID を行い、 $e^-e^+ \rightarrow b\bar{b}$  や  $e^-e^+ \rightarrow c\bar{c}$  の解析を行う。

表 3.3  $e^-e^+ \rightarrow b\bar{b}$  チャンネルにおける Charge ID の結果。ジェットごとの崩壊点の数で場合分けを行い、条件を順番に適用し最適な efficiency を探した（詳細は本文参照）。各条件でジェットごとの電荷を求め、2本の電荷の差を取り Charge ID ができているかを判断した。表の「+」は Charge ID が成功しているイベント、「0」判断保留、「-」は電荷が逆転しており Charge ID が上手くいかないイベントを意味する。判断保留のイベントは次の条件でさらに判断をしていく（最大で3条件まで）。表中のイベント数は偏極による重み付けはしていない。

Jet1	Jet2	条件 1	+	0	-	条件 2	+	0	-
2	2	B	57042	30046	29545	A	14822	7459	7765
2	2	A	63328	24894	28411	B	10369	7459	7066
2	1	B	76748	60794	44257	A	24591	21520	14683
2	1	A	83417	55611	42771	B	18590	21520	15501
2	0	B	19239	67602	9065	A	29456	19469	18677
2	0	A	42781	29199	23926	B	6000	19469	3730
1	1	B	28157	31528	17870	C	15262	4985	11281
1	0	B	35064	39606	23072	C	18700	6355	14551
1	0	C	46805	15357	35580	B	5299	6355	3703
0	0	C	18113	5532	13611	-			

Jet1	Jet2	条件 3	+	0	-	efficiency	purity
2	2	C	3538	1231	2690	64.65%	65.34%
2	2	C	3538	1231	2690	66.22%	66.93%
2	1	C	10310	3542	7668	61.41%	62.63%
2	1	C	10310	3542	7668	61.78%	63.01%
2	0	C	9045	3217	7207	60.20%	62.29%
2	0	C	9045	3217	7207	60.29%	62.39%
1	1	-				55.98%	59.83%
1	0	-				55.01%	58.83%
1	0	-				53.31%	57.01%
0	0	-				48.62%	57.10%

条件 A	崩壊点の合計の電荷
条件 B	一つ目の崩壊点の電荷
条件 C	ジェットの電荷

## 第4章

# チャンネル毎のイベント選別

この章では、各チャンネルの終状態のシグナルと背景事象の弁別を行い、ビーム軸に対する生成粒子の角度分布を求める過程を説明する。

### 4.1 $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$

$e^+e^- \rightarrow e^+e^-$  のイベント選別では、2 lepton のイベント及び 4 lepton のイベントを用いる。これらは 3.2 章で説明した事前選別を行った後のイベントである。シグナルは  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$  であり、背景事象は  $e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^- (\ell = \mu, \tau)$  及び 4 lepton のイベントになる。クォークを含む終状態はここでは含んでいない。最初に、最も高いエネルギーを持つ軌跡 (track) を、正電荷を持つものと負電荷を持つものでそれぞれ 1 本ずつ選定した。その上で以下の条件を順番に適用しイベントの選別を行った。

1. それぞれの track のエネルギーが 10 GeV 以上であること。
2. track によるエネルギー ( $E_{\text{tr}}$ ) とカロリメーターで落としたエネルギー ( $E_{\text{CAL}}$ ) の比率が  $E_{\text{CAL}} / E_{\text{tr}} > 0.6$  であること。
3. 電磁カロリメーターで落とすエネルギーとハドロンカロリメーターで落とすエネルギーにおいて、 $E_{\text{ECAL}} / (E_{\text{ECAL}} + E_{\text{HCAL}}) > 0.9$  を満たすこと。
4. 2 本の track のエネルギーの和が 230 GeV 以上であること。
5. ビーム軸に対する角度  $\theta$  に対して、 $|\cos \theta| < 0.95$  を満たすこと。

ここで、 $E_{\text{CAL}} = E_{\text{ECAL}} + E_{\text{HCAL}}$  である。

条件 1 では、レプトンの識別が複雑になる低いエネルギーのイベントを除いている (図 4.1)。エネルギーの低いミューオンはカロリメーターで止まり、タウのジェットから生じる  $\pi$  中間子も電磁カロリメーターで落とすエネルギーが多くなるため、識別方法が変わってくる。

条件 2 は、電子識別の一つである。多くの電子・陽電子は電磁カロリメーターの中で相互作用しエネルギーを落とす。そのため、track によるエネルギーとカロリメーターで落としたエネルギーの比率が 1 に近くなる。今回は、図 4.2 から電子のイベントが多くなる  $E_{\text{CAL}} /$

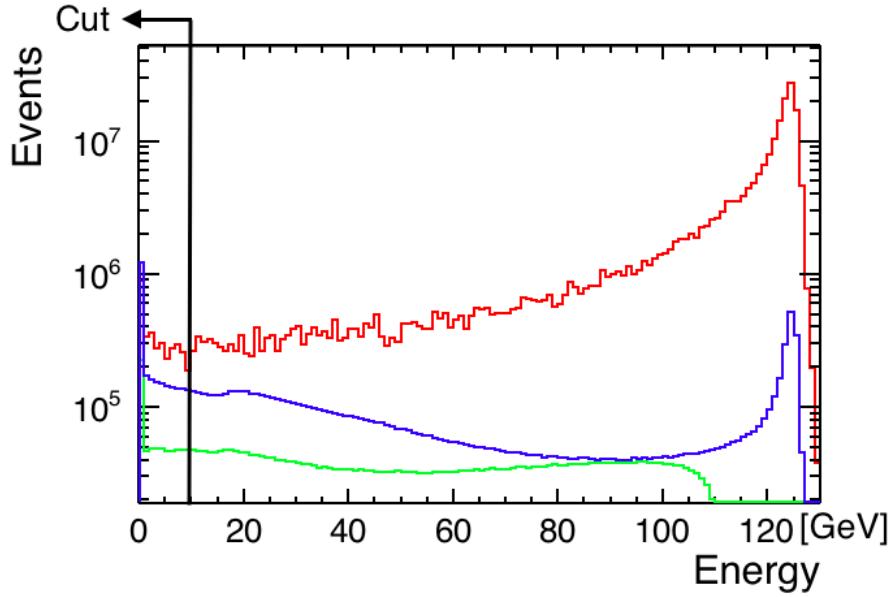


図 4.1 軌跡のエネルギーの分布。横軸はエネルギー軌跡のエネルギー、縦軸はイベント数。赤線はシグナル ( $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ )、青線は 2 lepton の背景事象 ( $e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^- (\ell = \mu, \tau)$ )、緑線は 4 lepton の背景事象を示す。

$E_{\text{tr}} > 0.6$  を採用した。このカットによって、カロリメーターであまりエネルギーを落とさない  $\mu^-\mu^+$  のイベントやゲージボソンを二つ出す 4 レプトンのイベントの多くを落とすことができる。

条件 3 もまた電子識別の一つである。ここでは、電磁カロリメーターとハドロンカロリメーターのどちらで粒子がエネルギーを落としたかを示す。カットで用いた  $E_{\text{ECAL}}/(E_{\text{ECAL}} + E_{\text{HCAL}})$  は、値が 1 に近いほど粒子が電磁カロリメーターでエネルギーを落とした割合が高いということを示している。図 4.3 から電子のイベントが多くなる  $E_{\text{ECAL}}/(E_{\text{ECAL}} + E_{\text{HCAL}}) > 0.9$  をイベントとして採用した。このカットによって  $\pi$  中間子に崩壊する  $\tau^-\tau^+$  のイベントを落とすことができる。

条件 4 では本解析で見たい高いエネルギーのイベントを選別している。エネルギーの和が 250 GeV 付近にあるものは、ビームラインのエネルギーをそのまま終状態まで見える状態で維持してきたイベントであり、今回の重い粒子に対する新物理についての感度が期待できる部分である。今回は、track のエネルギーの合計が 230 GeV 以上のものを採用した。図 4.4 では、track のエネルギーの合計の分布を表しているが、事前選別やこれ以前のイベント選別により、エネルギーの低い Bhabha 散乱や、背景事象はほとんど見えていない。

条件 5 では、ビーム軸方向の Bhabha 散乱のイベントのカットを目的としている。ビーム方向のイベントは  $t$  channel のイベントを多く含んでいるためである。また、ビーム軸方向の 4 レプトンのイベントをカットする役割も果たしている。(図 4.5)

$e^+e^- \rightarrow e^+e^-$  におけるイベント選別の結果を偏極ごとに表 4.1 及び表 4.2 に示す。どの背景事象も選別を通してシグナルに対して 0.1% 以下にカットできていることがわかる。

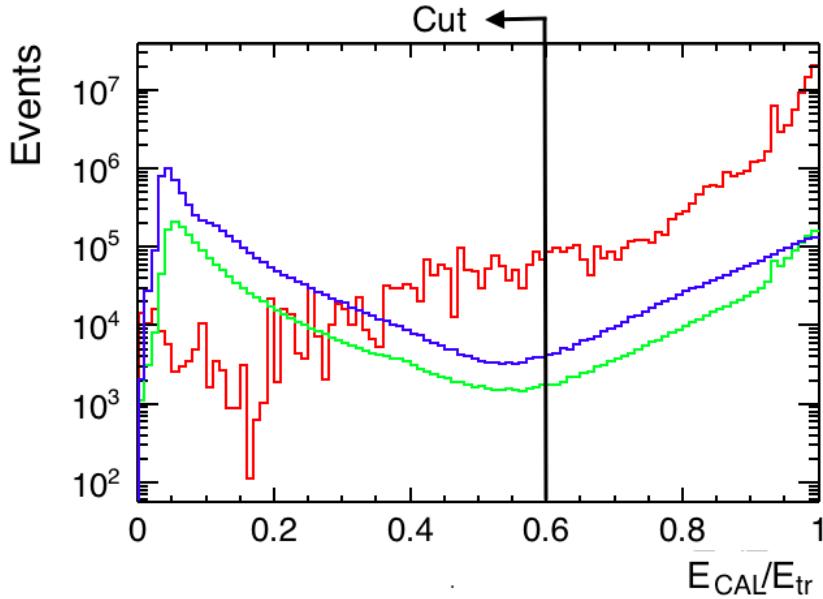


図 4.2 track とカロリメーターのエネルギーの比の分布。横軸は  $E_{\text{CAL}} / E_{\text{tr}}$ 、縦軸はイベント数(対数スケール)。赤線はシグナル ( $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ )、青線は 2 lepton の背景事象 ( $e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^- (\ell = \mu, \tau)$ )、緑線は 4 lepton の背景事象を示す。この分布は、条件 1 の選別後のものである。

表 4.1  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$  チャンネルの左巻き偏極におけるイベント選別の結果。詳しい選別のパラメーターは本文参照。全イベントとは 3.2 章で説明した事前選別後のイベント数である。

$e^+e^- \rightarrow e^+e^-$	$e_L^- e_R^+$					
	シグナル ( $e^-e^+$ )	$\mu^-\mu^+$	$\tau^-\tau^+$	$4f\text{-WorZ}$	$4f\text{-WWorZZ}$	
全イベント	$2.15690 \times 10^8$	$6.13256 \times 10^6$	$5.56195 \times 10^6$	$1.77339 \times 10^6$	$2.71815 \times 10^6$	
$E_{\text{tr}} > 10 \text{ GeV}$	$2.12295 \times 10^8$	$5.02628 \times 10^6$	$3.72290 \times 10^6$	$1.38056 \times 10^6$	$2.27021 \times 10^6$	
Clu./Tra.	$2.09656 \times 10^8$	5,052	$2.75277 \times 10^6$	222,284	$1.17127 \times 10^6$	
$E/(E+H)$	$2.09294 \times 10^8$	3,268	406,424	28,054	820,928	
$E_{\text{sum}} > 230 \text{ GeV}$	$1.04732 \times 10^8$	0	44	0	39,968	
$ \cos \theta  < 0.95$	$5.58036 \times 10^7$	0	16	0	9,954	

表 4.2  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$  チャンネルの右巻き偏極におけるイベント選別の結果。詳しい選別のパラメーターは本文参照。全イベントとは 3.2 章で説明した事前選別後のイベント数である。

$e^+e^- \rightarrow e^+e^-$	$e_R^- e_L^+$					
	シグナル ( $e^-e^+$ )	$\mu^-\mu^+$	$\tau^-\tau^+$	$4f\text{-WorZ}$	$4f\text{-WWorZZ}$	
全イベント	$2.10218 \times 10^8$	$5.00995 \times 10^6$	$4.33014 \times 10^6$	$1.04595 \times 10^6$	194,316	
$E_{\text{tr}} > 10 \text{ GeV}$	$2.06724 \times 10^8$	$3.94267 \times 10^6$	$2.83618 \times 10^6$	825,404	140,142	
Clu./Tra.	$2.04250 \times 10^8$	4,253	$2.11613 \times 10^6$	615,126	23,979	
$E/(E+H)$	$2.03936 \times 10^8$	2,877	307,045	561,858	3,129	
$E_{\text{sum}} > 230 \text{ GeV}$	$1.01561 \times 10^8$	0	29	38,726	0	
$ \cos \theta  < 0.95$	$5.44705 \times 10^7$	0	11	9,558	0	

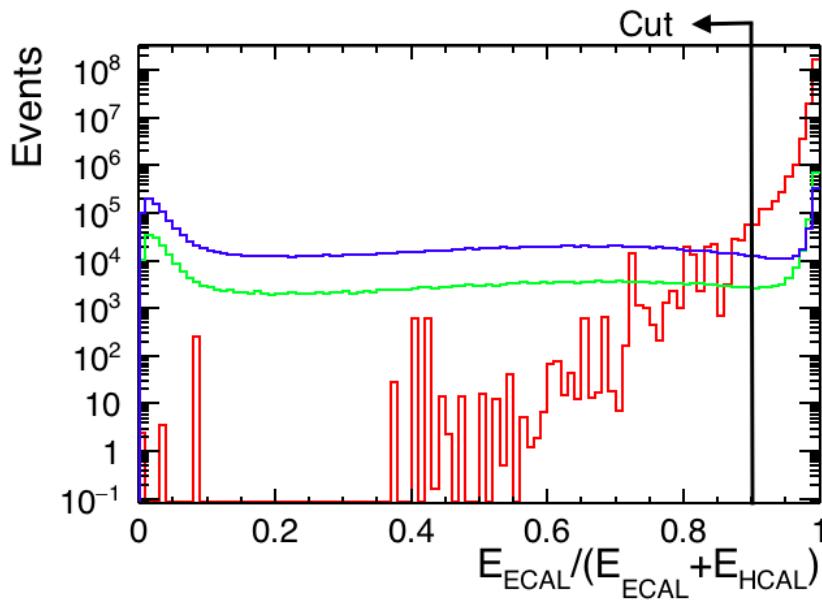


図 4.3 電磁カロリメーターとハドロンカロリメーターで落としたエネルギーの比の分布。横軸は  $E_{\text{ECAL}}/(E_{\text{ECAL}} + E_{\text{HCAL}})$ 、縦軸はイベント数(対数スケール)。赤線はシグナル ( $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ )、青線は 2 lepton の背景事象 ( $e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^- (\ell = \mu, \tau)$ )、緑線は 4 lepton の背景事象を示す。この分布は、条件 2 の選別後のものである。

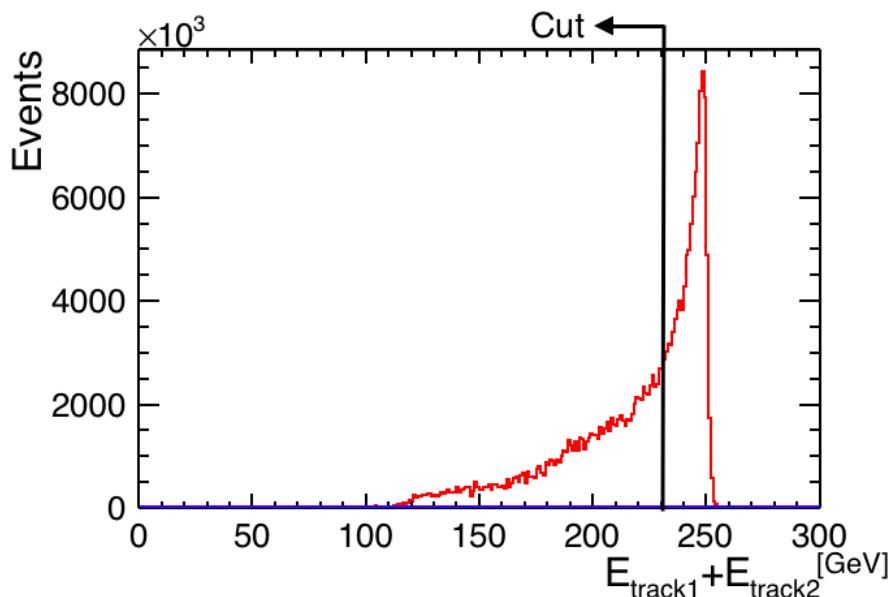


図 4.4 track エネルギーの合計の分布。横軸は track のエネルギーの合計、縦軸はイベント数。赤線はシグナル ( $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ )、青線は 2 lepton の背景事象 ( $e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^- (\ell = \mu, \tau)$ )、緑線は 4 lepton の背景事象を示す。この分布は、条件 3 の選別後のものである。

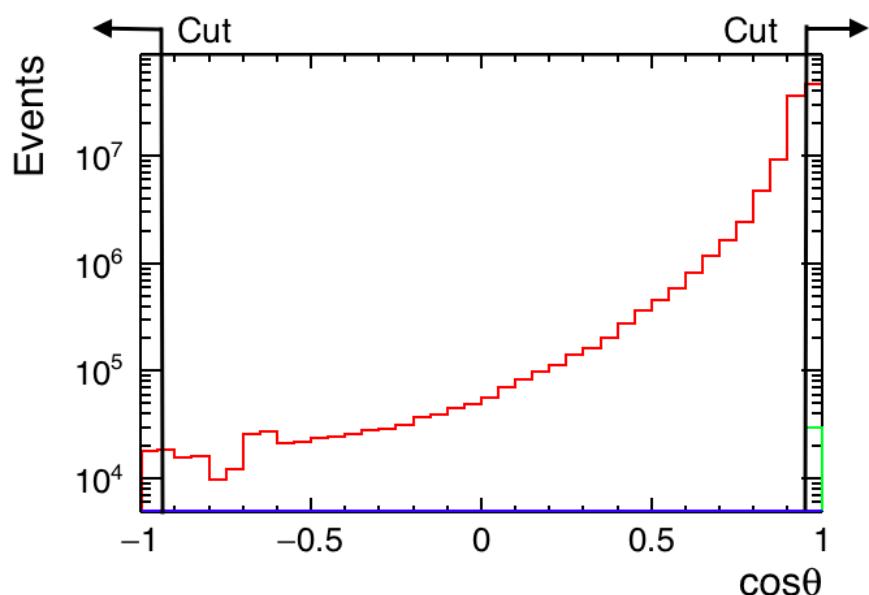


図 4.5  $e^-$  のビーム軸に対する角度分布。横軸は  $\cos\theta$ 、縦軸はイベント数(対数スケール)。赤線はシグナル( $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ )、青線は2 lepton の背景事象( $e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^- (\ell = \mu, \tau)$ )、緑線は4 lepton の背景事象を示す。この分布は、条件4の選別後のものである。

## 4.2 $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$

$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$  のイベント選別では、2 lepton のイベント及び 4 lepton のイベントを用いる。これらは 3.2 章で説明した事前選別を行った後のイベントである。シグナルは  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$  であり、背景事象は  $e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^- (\ell = e, \tau)$  及び 4 lepton のイベントになる。クォークを含む終状態はここでは含んでいない。最初に、最も高いエネルギーを持つ軌跡(track)を、正電荷を持つものと負電荷を持つものでそれぞれ 1 本ずつ選定した。その上で以下の条件を順番に適用しイベントの選別を行った。

1. それぞれの track のエネルギーが 10 GeV 以上であること。
2. track によるエネルギー ( $E_{\text{tr}}$ ) とカロリメーターで落としたエネルギー ( $E_{\text{CAL}}$ ) の比率が  $E_{\text{CAL}} / E_{\text{tr}} < 0.6$  であること。
3. 電磁カロリメーターで落とすエネルギーとハドロンカロリメーターで落とすエネルギーにおいて、 $E_{\text{ECAL}} / (E_{\text{ECAL}} + E_{\text{HCAL}}) < 0.5$  を満たすこと。
4. 2 本の track のエネルギーの和が 230 GeV 以上であること。
5. ビーム軸に対する角度  $\theta$  に対して、 $|\cos \theta| < 0.95$  を満たすこと。

$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$  におけるイベント選別は、ミューオン選別を除いてほぼ同じである。

条件 1 では、レプトンの識別が複雑になる低いエネルギーのイベントを除いている(図 4.6)。ここは  $e^+e^-$  チャンネルと同じであるため詳細は前節を参照。

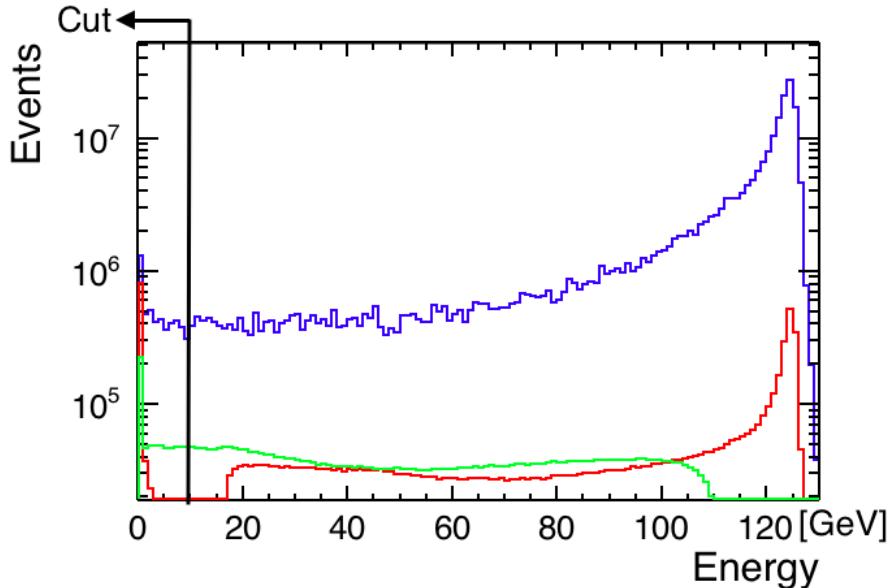


図 4.6 軌跡のエネルギーの分布。横軸はエネルギー軌跡のエネルギー、縦軸はイベント数。赤線はシグナル ( $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ )、青線は 2 lepton の背景事象 ( $e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^- (\ell = e, \tau)$ )、緑線は 4 lepton の背景事象を示す。

条件 2 は、ミューオン選別の一つである。ミューオンはほとんどカロリメーター内では相互作用せずエネルギーをほとんど落とさない。そのため、track によるエネルギーとカロリメーターで落としたエネルギーの比率が 0 に近くなる。今回は、図 4.7 から電子のイベントが多くなる  $E_{\text{CAL}} / E_{\text{tr}} < 0.6$  以下を採用した。このカットによって、電磁カロリメーターで多くのエネルギーを落とす  $e^-e^+$  のイベントをカットすることができる。

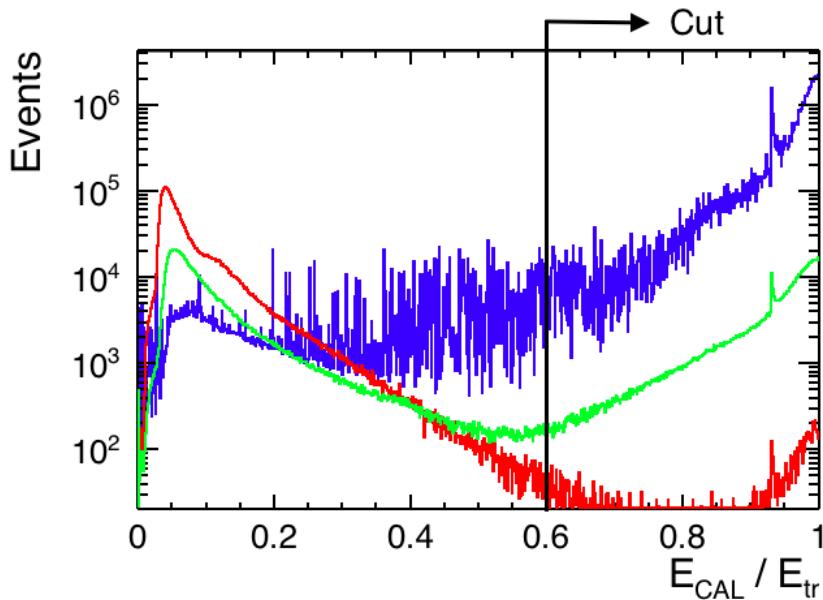


図 4.7 track とカロリメーターのエネルギーの比の分布。横軸は  $E_{\text{CAL}} / E_{\text{tr}}$ 、縦軸はイベント数(対数スケール)。赤線はシグナル ( $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ )、青線は 2 lepton の背景事象 ( $e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^- (\ell = e, \tau)$ )、緑線は 4 lepton の背景事象を示す。この分布は、条件 1 の選別後のものである。

条件 3 もまたミューオン選別の一つである。ミューオンは電磁カロリメーターを抜けてハドロンカロリメーターにも到達するため、ここでも相互作用をし若干のエネルギーを落とす。このため、 $e^+e^-$  のイベントに比べハドロンカロリメーターで検出したエネルギーが多くなる。ここでは、電磁カロリメーターで多くのエネルギーを落とす  $e^-e^+$ (Bhabha 散乱を含む) をさらにカットすることを目的としている。図 4.8 では  $E_{\text{ECAL}}/(E_{\text{ECAL}} + E_{\text{HCAL}})$  のイベントを表しているが、カットの対象である  $E_{\text{ECAL}}/(E_{\text{ECAL}} + E_{\text{HCAL}}) > 0.5$  以上では、Bhabha 散乱とみられるイベントが顕著にある。

条件 4 では track のエネルギーの合計から、 $\tau^-\tau^+$  のイベント、4 fermion のイベントをカットすることを目的に行う。図 4.9 ではそれ以前のカットによりほとんどの  $\tau^-\tau^+$  や 4 fermion のイベントが落ちているが、70 - 210 GeV にある背景事象をカットする。また、シグナルの 140 GeV にあるピークは、Radiative return<sup>\*1</sup>によるものであるのでこれもカットする。<sup>\*2</sup>

<sup>\*1</sup> エネルギーの高い光子を出すイベントで、新物理に対する感度はない

<sup>\*2</sup>  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$  チャンネルにおける同様のイベント選別(図 4.4)において 140 GeV の ピークがないのは、Bhabha 散乱のイベント生成時に低いエネルギーのイベントをカットしているためである。(3.2 章参照)

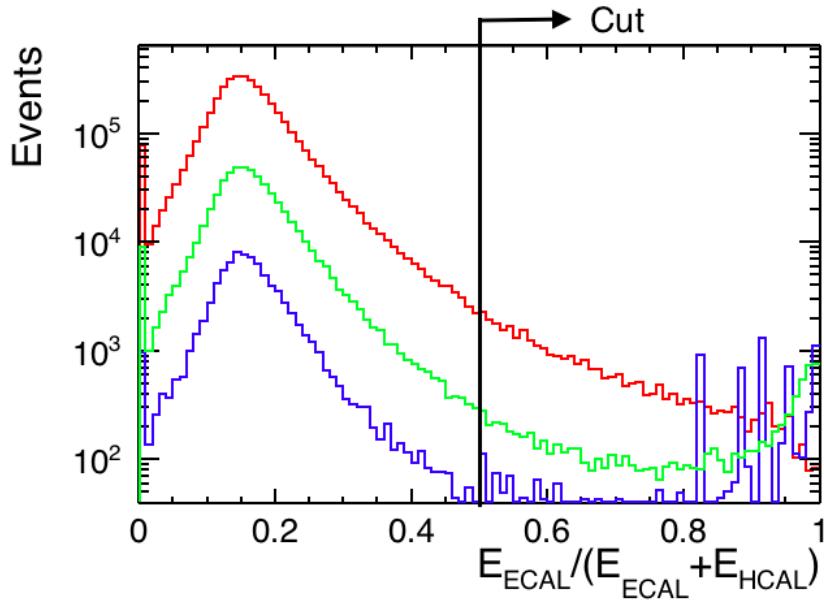


図 4.8 電磁カロリメーターとハドロンカロリメーターで落としたエネルギーの比の分布。横軸は  $E_{\text{ECAL}}/(E_{\text{ECAL}} + E_{\text{HCAL}})$ 、縦軸はイベント数(対数スケール)。赤線はシグナル ( $e^-e^+ \rightarrow \mu^+\mu^-$ )、青線は 2 lepton の背景事象 ( $e^-e^+ \rightarrow \ell^+\ell^- (\ell = e, \tau)$ )、緑線は 4 lepton の背景事象を示す。この分布は、条件 2 の選別後のものである。

条件 5 では、 $e^-e^+$  同様にビーム軸方向の Bhabha 散乱のイベントのカットを目的としている。ビーム方向のイベントは  $t$  channel のイベントを多く含んでいるためである。(図 4.5)  $\cos \theta = 0$  付近でミューオンの分布が凹みがあるのは、この部分は飛跡検出器である TPC の中央にあるカソードで不感領域があり、他の領域に比べて検出できるイベント数が少なくなるためである。

$e^-e^+ \rightarrow \mu^+\mu^-$  におけるイベント選別の結果を偏極ごとに表 4.3 及び表 4.4 に示す。どの背景事象も選別を通してシグナルに対して 0.1% 以下にカットできていることがわかる。

表 4.3  $e^-e^+ \rightarrow \mu^+\mu^-$  チャンネルの左巻き偏極におけるイベント選別の結果。詳しい選別のパラメーターは本文参照。全イベントとは 3.2 章で説明した事前選別後のイベント数である。

$e^-e^+ \rightarrow \mu^+\mu^-$	$e_L^-e_R^+$				
	シグナル ( $\mu^-\mu^+$ )	$e^-e^+$	$\tau^-\tau^+$	$4f\text{-WorZ}$	$4f\text{-WWorZZ}$
全イベント	$6.13256 \times 10^6$	$2.15690 \times 10^8$	$5.56195 \times 10^6$	$2.71815 \times 10^6$	$1.77339 \times 10^6$
$E_{\text{tr}} > 10 \text{ GeV}$	$5.02628 \times 10^6$	$2.12295 \times 10^8$	$3.72290 \times 10^6$	$2.27021 \times 10^6$	$1.38056 \times 10^6$
Clu./Tra.	$4.05422 \times 10^6$	5,487	85,953	13,673	558,751
$E/(E+H)$	$3.96288 \times 10^6$	0	79,626	5,811	544,667
$E_{\text{sum}} > 230 \text{ GeV}$	$1.60739 \times 10^6$	0	11	1	742
$ \cos \theta  < 0.95$	$1.51643 \times 10^6$	0	11	1	712

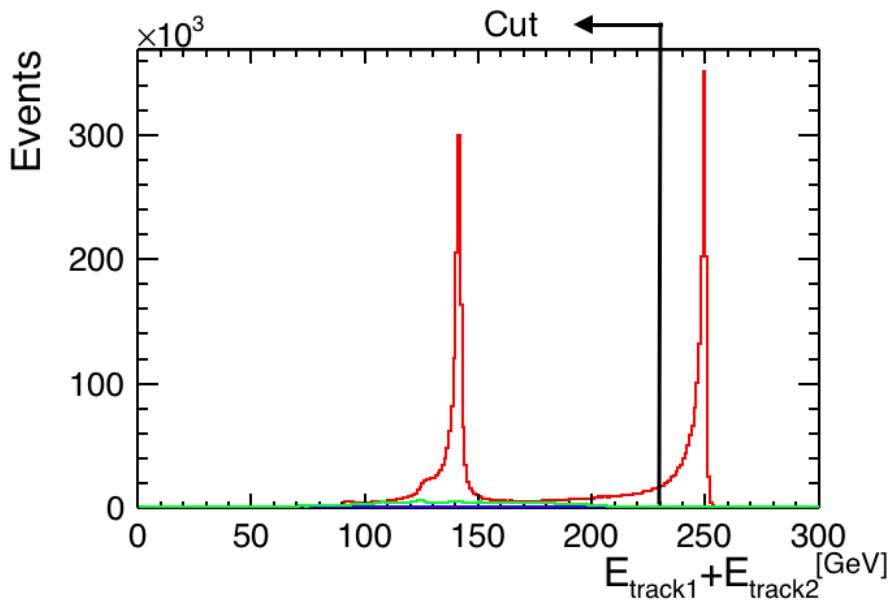


図 4.9 track エネルギーの合計の分布。横軸は track のエネルギーの合計、縦軸はイベント数。赤線はシグナル ( $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ )、青線は 2 lepton の背景事象 ( $e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^- (\ell = e, \tau)$ )、緑線は 4 lepton の背景事象を示す。この分布は、条件 3 の選別後のものである。

表 4.4  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$  チャンネルの右巻き偏極におけるイベント選別の結果。詳しい選別のパラメーターは本文参照。全イベントとは 3.2 章で説明した事前選別後のイベント数である。

$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$	$e_R^-e_L^+$	シグナル ( $\mu^-\mu^+$ )	$e^-e^+$	$\tau^-\tau^+$	$4f\text{-}W\text{or}Z$	$4f\text{-}WW\text{or}ZZ$
全イベント	$5.00995 \times 10^6$	$2.10218 \times 10^8$	$4.33014 \times 10^6$		194,316	$1.04595 \times 10^6$
$E_{\text{tr}} > 10 \text{ GeV}$	$3.94267 \times 10^6$	$2.06724 \times 10^8$	$2.83618 \times 10^6$		140,142	825,404
Clu./Tra.	$3.17907 \times 10^6$		8,901	62,502	67,225	7,513
$E/(E+H)$	$3.10756 \times 10^6$		0	57,868	65,639	4,683
$E_{\text{sum}} > 230 \text{ GeV}$	$1.34170 \times 10^6$		0	1	591	6
$ \cos \theta  < 0.95$	$1.26702 \times 10^6$		0	1	573	5

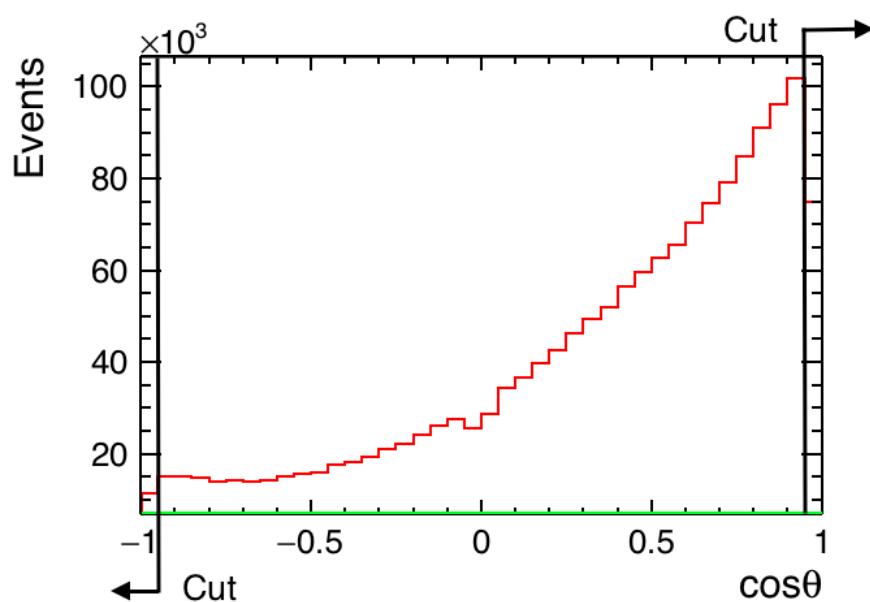


図 4.10  $\mu^-$  のビーム軸に対する角度分布。横軸は  $\cos\theta$ 、縦軸はイベント数。赤線はシグナル ( $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ )、青線は 2 lepton の背景事象 ( $e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^- (\ell = e, \tau)$ )、緑線は 4 lepton の背景事象を示す。この分布は、条件 4 の選別後のものである。

### 4.3 $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$

$e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$  のイベント選別では、2 lepton のイベント及び 4 lepton のイベントを用いる。シグナルは  $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$  であり、背景事象は  $e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^- (\ell = e, \mu)$  及び 4 lepton のイベントになる。これらのイベントは 3.2 章で説明した事前選別を行い、3.4.1 章の Tau Jet Finder を行った後のイベントである。その上で以下の選別手法を順番に用いた。

1. ジェットが 2 本であること
2. それぞれのジェットのエネルギーが 10 GeV 以上であること。
3. 2 本のジェットの間の角度 ( $\theta_{cc}$ ) が 178 度以上であること。
4. ビーム軸に対する角度  $\theta$  に対して、 $|\cos \theta| < 0.95$  を満たすこと。
5. visible energy<sup>\*3</sup> が 50 GeV 以上かつ 200 GeV 以下であること。

条件 1 で、ジェットが 2 本であるイベントを選び、最も高いエネルギーを持つジェットを、正電荷を持つものと負電荷を持つものでそれぞれ 1 本ずつ選定した（図 4.11）。

条件 2 では、レプトンの識別が複雑になる低いエネルギーのイベントを除いている。ここは  $e$  チャンネルと同じであるため詳細は 4.1 節を参照。

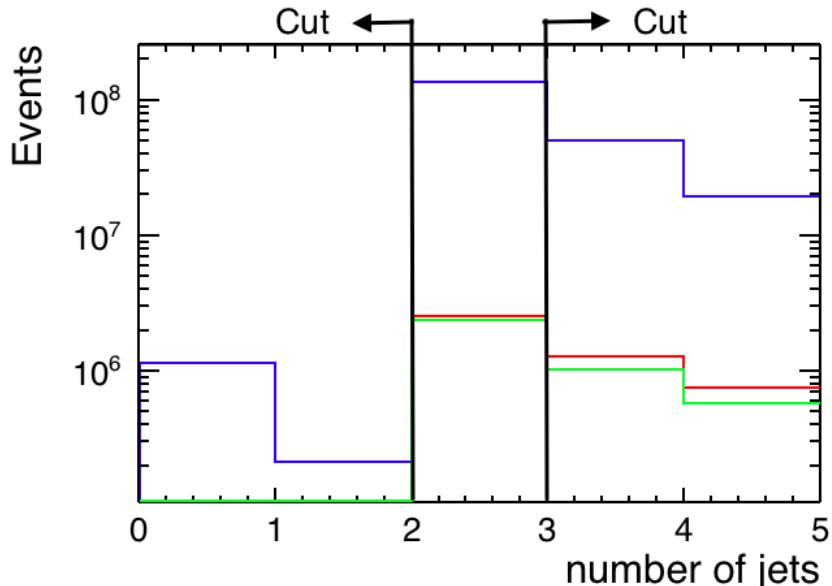


図 4.11 再構成されたジェットの本数の分布。横軸はジェットの本数、縦軸はイベント数。赤線はシグナル ( $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ )、青線は 2 lepton の背景事象 ( $e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^- (\ell = e, \mu)$ )、緑線は 4 lepton の背景事象を示す。

<sup>\*3</sup> この解析においては、2 本のジェットのエネルギーの合計のことである。これは、この地点で全てのイベントのジェットが 2 本であるためである。

2 fermion のイベントでは終状態の粒子は運動量保存の関係からお互いに正反対の方向に飛んでいく。そのため、条件 3 では二本のジェットの成す角度が、178 度以上のものを選ぶ（図 4.12）。図 4.12 の 2 fermion イベントでの  $\cos \theta_{cc} = 0.15$  にあるピークは Radiative return であると言える。

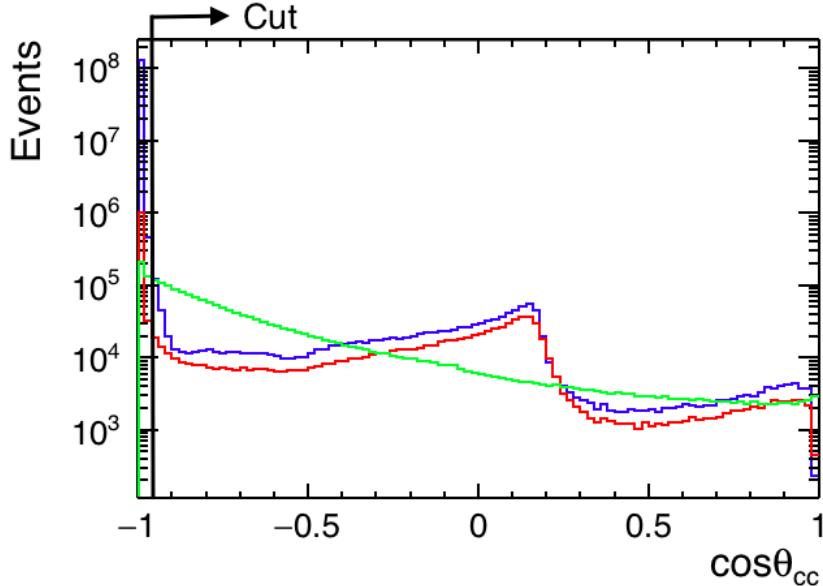


図 4.12 二本のジェットがなす角度の分布。横軸は角度の余弦、縦軸はイベント数（対数スケール）。赤線はシグナル ( $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ )、青線は 2 lepton の背景事象 ( $e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^- (\ell = e, \mu)$ )、緑線は 4 lepton の背景事象を示す。

条件 4 では他のレプトンチャンネル同様にビーム軸に対する角度分布から、ビーム方向のイベントをカットしていく。（図 4.13）

条件 5 ではジェット中に見えているエネルギー（visible energy:  $E_{\text{vis}}$ ）から、 $\tau$  のイベントを残していく。図 4.14 を見ると、シグナルは 150 GeV がピークであるのに対して背景事象となる 2 fermion のイベントが多くが 200 GeV 以上である。また、 $e\gamma \rightarrow 1f/3f$  や  $\gamma\gamma \rightarrow 2f$  の背景事象をなくすため、50 GeV 以下のエネルギーのイベントをカットしている。

$e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$  におけるイベント選別の結果を偏極ごとに表 4.5 及び表 4.6 に示す。どの背景事象も他のレプトンチャンネルと比べて多く残っているが、シグナル事象に対して 1% 以下にカットできている。

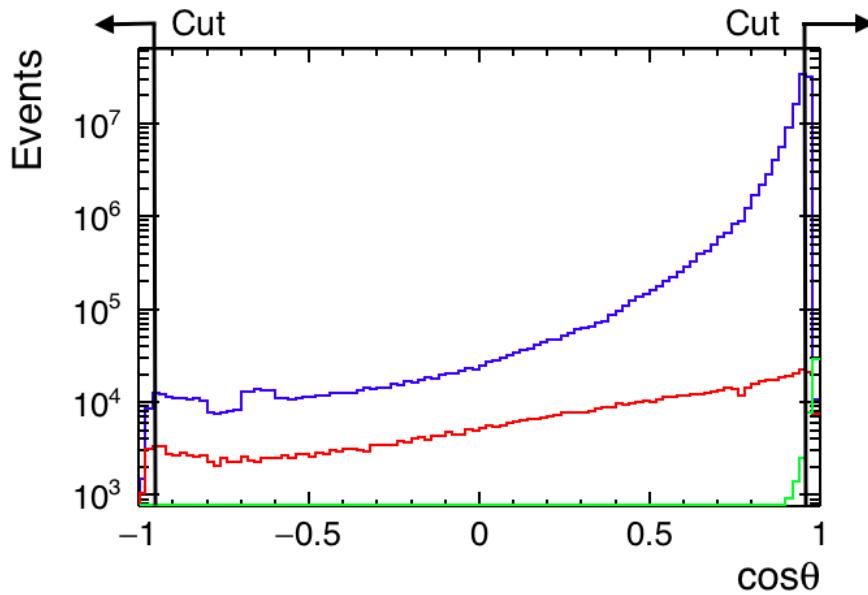


図 4.13 ビーム軸に対する角度の分布。縦軸はビーム軸に対する角度の余弦、縦軸はイベント数。赤線はシグナル ( $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ )、青線は 2 lepton の背景事象 ( $e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^- (\ell = e, \mu)$ )、緑線は 4 lepton の背景事象を示す。この分布は、条件 3 の選別後のものである。

表 4.5  $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$  チャンネルの左巻き偏極におけるイベント選別の結果。詳しい選別のパラメーターは本文参照。全イベントとは 3.3 章で説明した再構成及び事前選別後のイベント数である。

$e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$	$e_L^-e_R^+$	シグナル ( $\tau^-\tau^+$ )	$e^-e^+$	$\mu^-\mu^+$	$4f\text{-Wor}Z$	$4f\text{-WWor}ZZ$
全イベント	$5.56195 \times 10^6$	$2.15690 \times 10^8$	$6.13256 \times 10^8$	$2.71815 \times 10^6$	$1.77339 \times 10^6$	
2 jets	$2.55082 \times 10^6$	$1.31705 \times 10^8$	$2.80175 \times 10^6$	$1.26483 \times 10^6$	$1.07723 \times 10^6$	
$E_{\text{tr}} > 10 \text{ GeV}$	$1.88541 \times 10^6$	$1.29708 \times 10^8$	$2.51634 \times 10^6$	$1.10930 \times 10^6$		$909,404$
$\theta_{cc} > 178 \text{ deg.}$	705,080	$1.15268 \times 10^8$	974,556	44,245		2,350
$ \cos \theta  < 0.95$	657,524	$6.02875 \times 10^7$	908,131	6,168		2,135
$50 < E_{\text{vis}} < 200 \text{ GeV}$	586,998	10,876	2,064	1,746		1,807

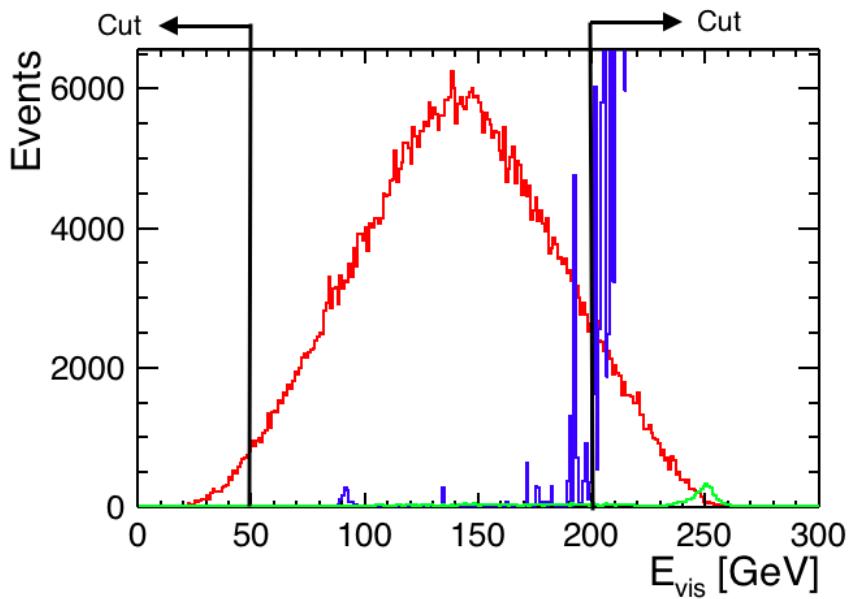


図 4.14  $E_{\text{vis}}$  の分布。横軸はジェットのエネルギー、縦軸はイベント数。赤線はシグナル ( $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ )、青線は 2 lepton の背景事象 ( $e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^- (\ell = e, \mu)$ )、緑線は 4 lepton の背景事象を示す。この分布は、条件 4 の選別後のものである。

表 4.6  $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$  チャンネルの右巻き偏極におけるイベント選別の結果。詳しい選別のパラメーターは本文参照。全イベントとは 3.3 章で説明した再構成及び事前選別後のイベント数である。

$e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$	$e_R^-e_L^+$				
	シグナル ( $\tau^-\tau^+$ )	$e^-e^+$	$\mu^-\mu^+$	$4f\text{-WorZ}$	$4f\text{-WWorZZ}$
全イベント	$4.33014 \times 10^6$	$2.10218 \times 10^8$	$5.00995 \times 10^6$	$1.04595 \times 10^6$	194,316
2 jets	$3.92879 \times 10^6$	$1.27567 \times 10^8$	$4.47745 \times 10^6$	222,879	95,093
$E_{\text{tr}} > 10 \text{ GeV}$	$1.43610 \times 10^6$	$1.25580 \times 10^8$	$1.97196 \times 10^6$	163,558	74,336
$\theta_{cc} > 178 \text{ deg.}$	568,321	$1.11594 \times 10^8$	813,061	40,503	204
$ \cos \theta  < 0.95$	529,530	$5.86137 \times 10^7$	758,292	3,925	179
$50 < E_{\text{vis}} < 200 \text{ GeV}$	454,703	12,063	1,498	166	138

## 4.4 $e^+e^- \rightarrow b\bar{b}$

$e^+e^- \rightarrow b\bar{b}$  のイベント選別では、2 クォークのイベント、4 フェルミオンのハドロニック崩壊のイベントを用いる。4 フェルミオンのハドロニック崩壊にはクォークとレプトンの両方を出すイベントも含んでいる（例： $e^+e^- \rightarrow q_1\bar{q}_2\ell\nu$ ）。これらのイベントは 3.4.2 章の flavor tagging 及び 3.4.3 章の charge ID を適用している。シグナルは  $e^+e^- \rightarrow b\bar{b}$  であり、背景事象は  $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}(q = u, d, s, c)$  の 2 クウォークのイベント、4 フェルミオンのハドロニック崩壊のイベントになる。最初に、高いエネルギーを持つジェットを 2 本選び、その上で以下の選別方法を順番に用いた。

1. 2 本のジェットのそれぞれの  $b$  likeness が大きい方が 0.8 以上、小さい方が 0.5 以上であること。
2. 2 本のジェットのエネルギーの差が 20 GeV 以下であること。
3. 2 本のジェットの間の角度 ( $\theta_{cc}$ ) が 178 度以上であること。
4. ジェットのエネルギーの合計が 230 GeV 以上であること。

条件 1 では、flavor tagging で求めた  $b$  likeness を用いて選別を行う。図 4.15 及び図 4.16 の分布から、できるだけシグナル事象を残して、背景事象を除くように事象選別の閾値を決めた。

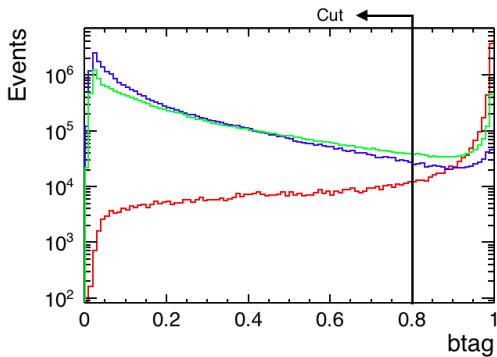


図 4.15 各事象の二つのジェットの btag の内、大きい方の分布。横軸は btag、縦軸はイベント数(対数スケール)。赤線はシグナル事象、青線は背景事象の 2 クォークの事象、緑線は 4 フェルミオンの事象である。

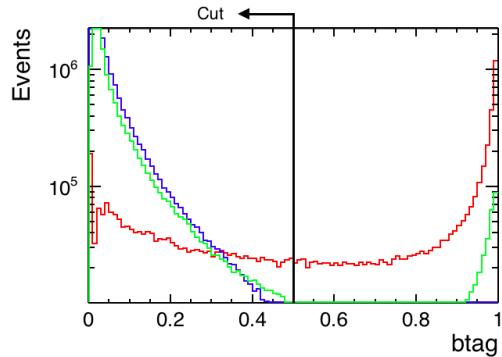


図 4.16 各事象の二つのジェットの btag の内、小さい方の分布。横軸は btag、縦軸はイベント数(対数スケール)。赤線はシグナル事象、青線は背景事象の 2 クウォークの事象、緑線は 4 フェルミオンの事象である。

条件 2 では、ジェットのエネルギーの差をとることで radiative return のイベントをカットする（図 4.17）。

条件 3 では 2 本のジェットの間の角度 ( $\theta_{cc}$ ) を見ることで、back-to-back の事象を選ぶ。2 fermion のイベントでは終状態の粒子は運動量保存の関係からお互いに正反対の方向に飛んで

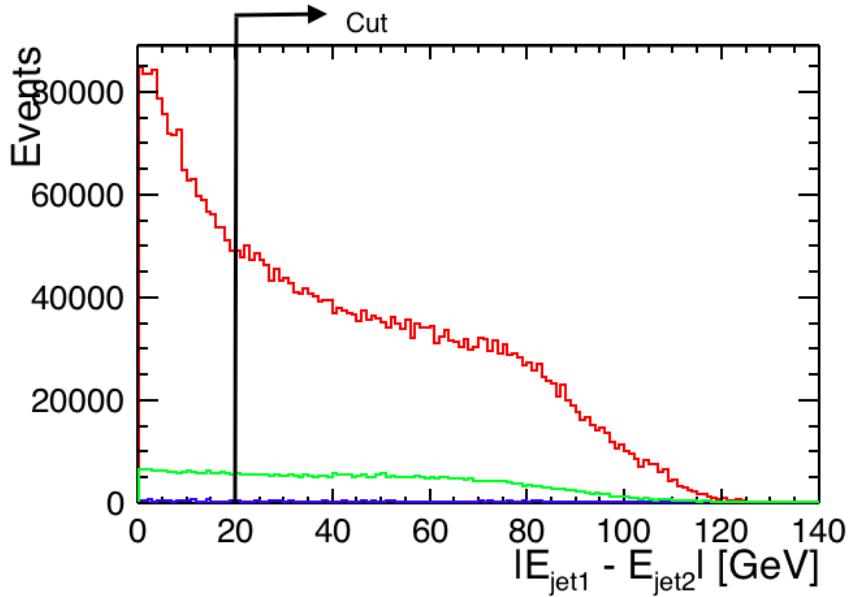


図 4.17 2 本のジェットのエネルギーの差の分布。縦軸はイベント数。赤線はシグナル事象、青線は背景事象の 2 hadron の事象、緑線は 4 hadron の事象である。この分布は、条件 1 の選別後のものである。

いくためである。

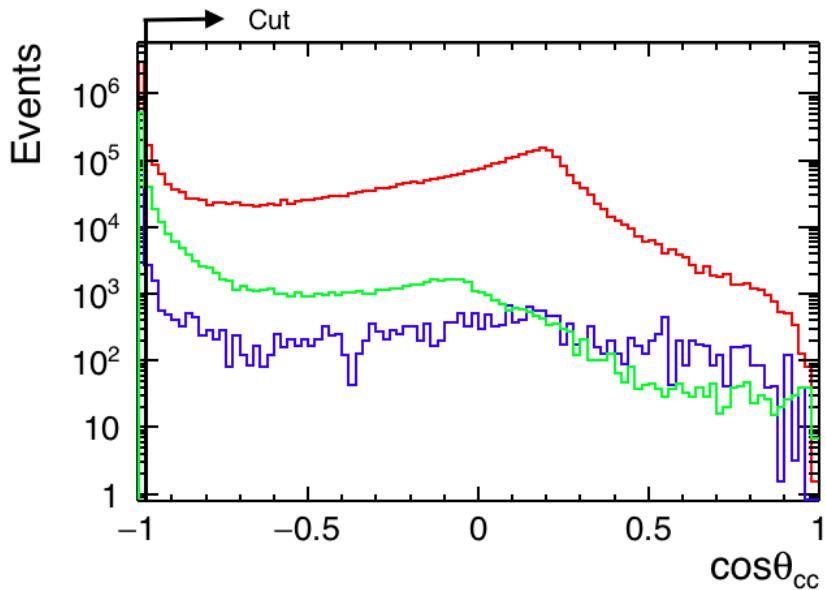


図 4.18 2 本のジェットの間の角度の余弦の分布。縦軸はイベント数。赤線はシグナル事象、青線は背景事象の 2 クォークの事象、緑線は 4 フェルミオンの事象である。この分布は、条件 1 の選別後のものである。

条件 4 ではイベントのジェットのエネルギーの合計をとることによって Radiative return のイベント (140 GeV のピーク) をカットする。

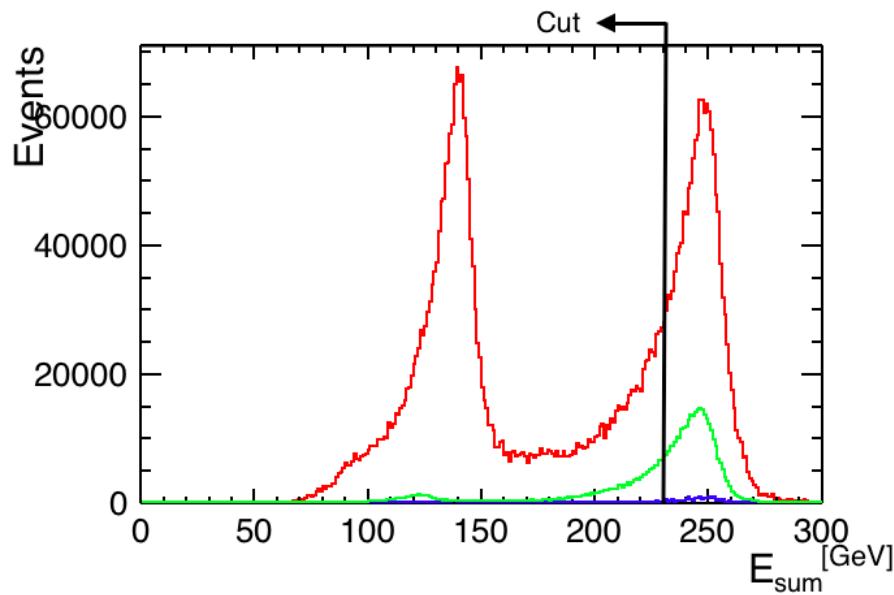


図 4.19 二つのジェットのエネルギー合計の分布。横軸は二つのジェットのエネルギーの和、縦軸はイベント数。赤線はシグナル事象、青線は背景事象の 2 クォークの事象、緑線は 4 フェルミオンの事象である。この分布は、条件 2 の選別後のものである。

$e^+e^- \rightarrow b\bar{b}$  におけるイベント選別の結果を偏極ごとに表 4.7 及び表 4.8 に示す。WW による 4 フェルミオンの背景事象が比較的残っており、改善の余地があると言える。

表 4.7  $e^+e^- \rightarrow b\bar{b}$  チャンネルの左巻き偏極におけるイベント選別の結果。表中の括弧は charge ID により判断保留になったイベントを含む。詳しい選別のパラメーターは本文参照。全イベントとは 3.3 章で説明した再構成後のイベント数である。

$e^+e^- \rightarrow b\bar{b}$	$e_L^- e_R^+$			
	シグナル ( $b\bar{b}$ )	$q\bar{q}(q = u, d, s, c)$	$qq\bar{q}\bar{q}$	$q\bar{q}\ell\ell$
全イベント	$1.07137 \times 10^7$ ( $1.65745 \times 10^7$ )	$3.69393 \times 10^7$	$1.307531 \times 10^6$	8,813,410
$b$ likeness	$6.70713 \times 10^6$	86,217	563,988	103,668
$ E_1 - E_2  < 20\text{GeV}$	$2.09593 \times 10^6$	25,511	138,754	27,071
$\cos\theta_{cc} < -0.99939$	812,351	12,990	40,010	2,290
$E_{\text{sum}} > 230 \text{ GeV}$	724,918	12,350	37,491	1,982

表 4.8  $e^+e^- \rightarrow b\bar{b}$  チャンネルの右巻き偏極におけるイベント選別の結果。表中の括弧は charge ID により判断保留になったイベントを含む。詳しい選別のパラメーターは本文参照。全イベントとは 3.3 章で説明した再構成後のイベント数である。

$e^+e^- \rightarrow b\bar{b}$	$e_R^-e_L^+$			
	シグナル ( $b\bar{b}$ )	$q\bar{q}(q = u, d, s, c)$	$qq\bar{q}\bar{q}$	$q\bar{q}\ell\ell$
全イベント	$7.71452 \times 10^6$ ( $7.99098 \times 10^6$ )	$2.76335 \times 10^7$	$1.17836^6$	925,953
$b$ likeness	$4.61306 \times 10^6$	59,113	101,836	45,122
$ E_1 - E_2  < 20$ GeV	$1.16538 \times 10^6$	18,043	23,959	11,864
$\cos \theta_{cc} < -0.99939$	319,136	8,406	6,886	1,164
$E_{\text{sum}} > 230$ GeV	286,377	8,080	6,423	1,041

## 4.5 $e^+e^- \rightarrow c\bar{c}$

$e^+e^- \rightarrow b\bar{b}$  のイベント選別では、2 クォークのイベント、4 フェルミオンのハドロニック崩壊のイベントを用いる。これらのイベントは 3.4.2 章の flavor tagging 及び 3.4.3 章の charge ID を適用している。シグナルは  $e^+e^- \rightarrow c\bar{c}$  であり、背景事象は  $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}(q = u, d, s, b)$  の 2 クォークのイベント、4 フェルミオンのハドロニック崩壊のイベントになる。最初に、高いエネルギーを持つジェットを 2 本選び、その上で以下の選別方法を順番に用いた。

1. 2 本のジェットのそれぞれの  $c$  likeness が大きい方が 0.8 以上、小さい方が 0.5 以上
2. 2 本のジェットの間の角度 ( $\theta_{cc}$ ) が 178 度以上であること。
3. ジェットのエネルギーの合計が 230 GeV 以上であること

条件 1 では、Flavor Tagging で求めた  $ctag$  を用いて選別を行う。図 4.20 及び図 4.21 の分布から、できるだけシグナル事象を残して、背景事象を除くように事象選別の閾値を決めた。

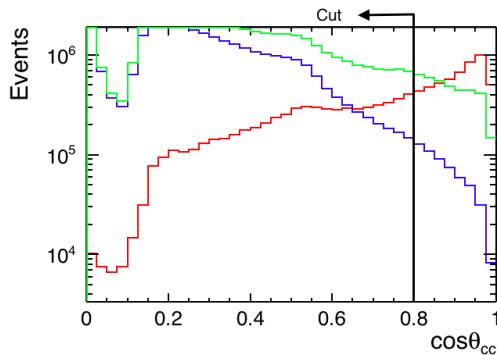


図 4.20 各事象の二つのジェットの  $ctag$  の内、大きい方の分布。横軸は  $ctag$ 、縦軸はイベント数。赤線はシグナル事象、青線は背景事象の 2 クォークの事象、緑線は 4 フェルミオンの事象である。

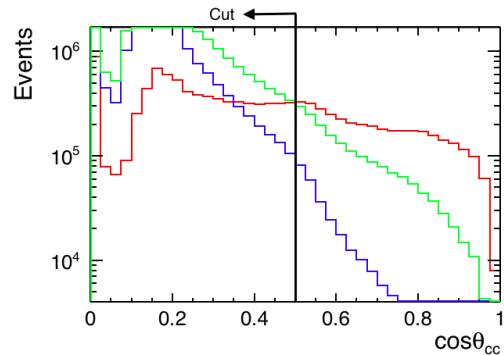


図 4.21 各事象の二つのジェットの  $ctag$  の内、小さい方の分布。横軸は  $ctag$ 、縦軸はイベント数。赤線はシグナル事象、青線は背景事象の 2 クォークの事象、緑線は 4 フェルミオンの事象である。

条件 2 では二つのジェットの成す角度から、back-to-back の事象を選ぶ。2 fermion のイベントでは終状態の粒子は運動量保存の関係からお互いに正反対の方向に飛んでいくためである。

条件 3 ではイベントのジェットのエネルギーの合計をとることによって Radiative return のイベント (140 GeV のピーク) をカットする。

$e^+e^- \rightarrow c\bar{c}$  におけるイベント選別の結果を偏極ごとに表 4.9 及び表 4.10 に示す。WW による 4 fermion の背景事象が比較的残っており、改善の余地があると言える。

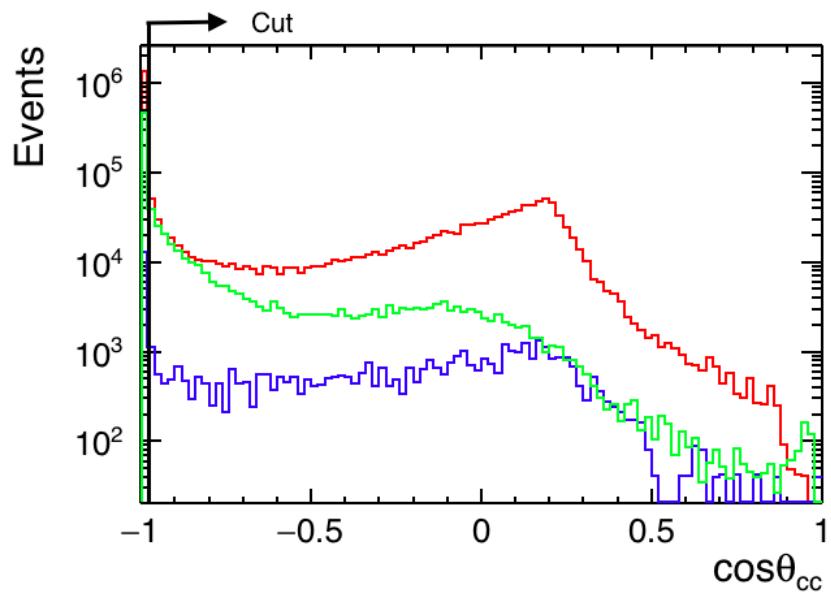


図 4.22  $\theta_{cc}$  の余弦の分布。縦軸はイベント数。赤線はシグナル事象、青線は背景事象の 2 クォークの事象、緑線は 4 フェルミオンの事象である。

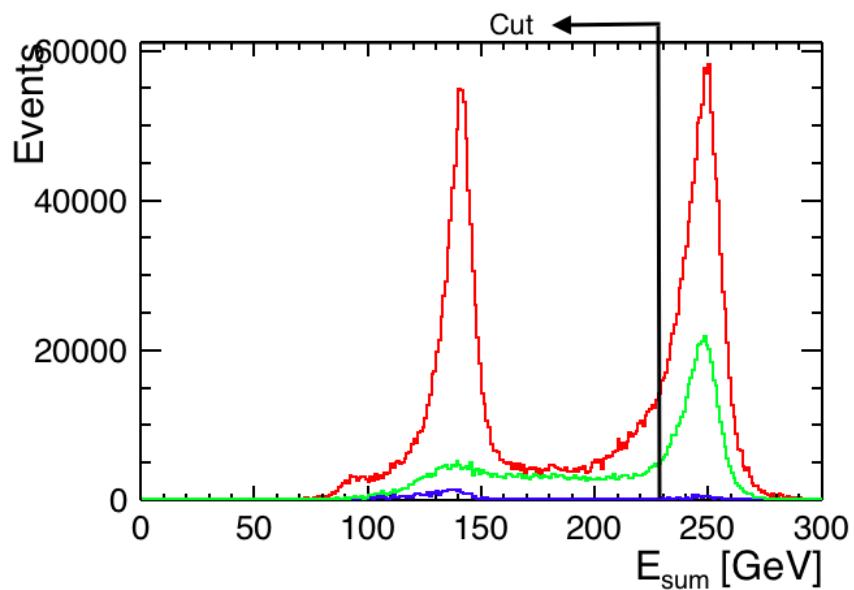


図 4.23 二つのジェットのエネルギー合計の分布。横軸は二つのジェットのエネルギーの和、縦軸はイベント数。赤線はシグナル事象、青線は背景事象の 2 クォークの事象、緑線は 4 フェルミオンの事象である。この分布は、条件 2 の選別後のものである。

表 4.9  $e^+e^- \rightarrow c\bar{c}$  チャンネルの左巻き偏極におけるイベント選別の結果。表中の括弧は charge ID により判断保留になったイベントを含む。詳しい選別のパラメーターは本文参照。全イベントとは 3.3 章で説明した再構成後のイベント数である。

$e^+e^- \rightarrow c\bar{c}$	$e_L^- e_R^+$	シグナル ( $c\bar{c}$ )	$q\bar{q}(q = u, d, s, b)$	$qq\bar{q}\bar{q}$	$q\bar{q}\ell\ell$
全イベント		$1.38467 \times 10^7$ ( $1.70212 \times 10^7$ )	$3.58547 \times 10^7$	$1.30753 \times 10^7$	$8.81341 \times 10^6$
$c$ likeness		$3.24113 \times 10^6$	55,892	482,204	$2.53296 \times 10^6$
$\cos \theta_{cc} < -0.99939$		$1.02334 \times 10^6$	7,141	164,125	3,569
$E_{sum} > 230$ GeV		916,279	5,516	159,049	2,531

表 4.10  $e^+e^- \rightarrow c\bar{c}$  チャンネルの右巻き偏極におけるイベント選別の結果。表中の括弧は charge ID により判断保留になったイベントを含む。詳しい選別のパラメーターは本文参照。全イベントとは 3.3 章で説明した再構成後のイベント数である。

$e^+e^- \rightarrow c\bar{c}$	$e_R^- e_L^+$	シグナル ( $c\bar{c}$ )	$q\bar{q}(q = u, d, s, b)$	$qq\bar{q}\bar{q}$	$q\bar{q}\ell\ell$
cc R		$8.31734 \times 10^6$ ( $9.57864 \times 10^6$ )	$2.63643 \times 10^7$	$1.17836 \times 10^6$	$6.00581 \times 10^6$
全イベント		$1.84280 \times 10^6$	39,052	48,015	36,648
$c$ likeness		533,635	3,337	16,089	1,651
$\cos \theta_{cc} < -0.99939$		475,578	2,742	15,551	1,293

## 第 5 章

# BSM モデルとの比較と考察

図 5.1 及び図 5.2 はそれぞれ負の電荷を持った粒子 ( $e^-, \mu^-, \tau^-, b, \bar{c}$ ) のイベント選別後のビーム軸に対する角度分布である。このシミュレーションにおいては、入射電子は左から  $\mathbf{p} = (0, 0, p)$ 、陽電子は右から  $\mathbf{p} = (0, 0, -p)$  でやってくるため、生成される正粒子 ( $e^-, \mu^-, \tau^-, b$ ) の前方散乱により  $\cos\theta$  が 1 近い方にイベントが偏る。反粒子 ( $\bar{c}$ ) はその逆である。なお、右巻き偏極時の  $b$  の角度分布を示す図 5.2 の右上のヒストグラムにおいて、 $\cos\theta = -1$  側にも多くのシグナル事象が残っている。これはイベント選別後もな Radiative return によるイベントが多く残っているものと考えられ、今後 photon ID を導入して改善を行う必要がある。新物理がある場合、反応断面積の値のずれによりこれらの角度分布にもずれが生じる。

角度分布の  $i$  番目の bin の ILC における精度 ( $\delta\sigma_i/\sigma_i(\text{SM})$ ) の評価は

$$\frac{\delta\sigma_i}{\sigma_i(\text{SM})} = \frac{\sqrt{S_i + N_i}}{S_i} \quad (5.1)$$

で求められる。ここで  $S_i$  及び  $N_i$  はそれぞれの bin におけるシグナル事象数と背景事象数である。なお、今回の解析では、系統誤差は含んでいない。

これらの角度分布をこれから  $Z'$  モデル (SSM,  $E_6$ , GHU) 及び WIMP モデルと比較して、重心系エネルギー 250 GeV の ILC での新物理探索性能の評価を行う。

各モデル探索の評価を行う手順を説明する。まず、 $i$  番目 bin の標準模型と各モデルから予言される微分断面積のずれ ( $\delta\sigma_i(\text{BSM})/\sigma_i(\text{SM})$ ) を求めて、

$$\chi^2(\text{BSM}) = \sum_i \left\{ \left( \frac{\delta\sigma_i(\text{BSM})}{\sigma_i(\text{SM})} / \frac{S_i}{\sqrt{S_i + N_i}} \right)^2 + 1 \right\}, \quad (5.2)$$

から、 $\chi^2$  値を得る。この  $\chi^2$  値から標準模型と無矛盾になる確率を求める。ここで、 $\left( \frac{\delta\sigma_i(\text{BSM})}{\sigma_i(\text{SM})} / \frac{S_i}{\sqrt{S_i + N_i}} \right)$  は  $Z'$  モデルなどの BSM によるずれを、(+1) は標準模型の場合の統計上のふらつきを示す。

ハドロンのチャンネルの場合は、Charge ID がうまくいかずに反転していることがあるため、これを考慮する必要がある。この場合、 $N$  を bin の数、 $i$  番目 Charge ID が成功してい

るシグナルを  $S_i$ 、Charge ID がうまくいかず反転しているシグナルを  $S_{Ri}$ 、背景事象を  $N_i$  とすると、ILC における精度の評価は

$$\frac{\delta\sigma_i}{\sigma_i(\text{SM})} = \frac{\sqrt{(S_i + S_{Ri}) + N_i}}{(S_i + S_{Ri})} \quad (5.3)$$

となる。反転しているシグナルでは BSM によるずれも反転しているものを用いる必要があるため、反転しているシグナルにおいては、 $i$  番目の BSM によるずれは  $(N - i + 1)$  番目の値を用いる。従って  $\chi^2$  の値は、

$$\delta S_i = \frac{\delta\sigma_i(\text{BSM})}{\sigma_i(\text{SM})} S_i, \quad \delta S_{Ri} = \frac{\delta\sigma_{N-i+1}(\text{BSM})}{\sigma_{N-i+1}(\text{SM})} S_{Ri} \quad (5.4)$$

を用いて、

$$\chi^2(\text{BSM}) = \sum_i \left\{ \left( \frac{\delta S_i + \delta S_{Ri}}{\sqrt{S_i + S_{Ri} + N_i}} \right)^2 + 1 \right\}, \quad (5.5)$$

となる。

## 5.1 SSM、 $E_6$ モデルによる $Z'$ ポソンの効果

はじめに  $Z'$  モデル [5] に対して評価を行う。この  $Z'$  とは標準理論のフェルミオンと結合する中性の新たなゲージボソンのことである。 $Z'$  の結合定数の違いはモデルによって異なるが、本節では Sequential Standard Model(以下 SSM モデル) 及び  $E_6$  モデルを用いる。

SSM モデルにおいて  $Z'$  は、標準理論のゲージボソン  $Z$  とフェルミオンとの結合定数が同じである。

一方で  $E_6$  モデルは、 $E_6 \rightarrow SO(10) \times U(1)_\psi$  と  $SO(10) \rightarrow SU(5) \times U(1)_\chi$  のように  $E_6$  を分解することによって生じる特別な  $U(1)$  に注目したモデルである [19]。 $Z'$  は二つの特別な  $U(1)$  のゲージボソン ( $Z_\psi, Z_\chi$ ) の線形結合 (式 5.6) で表される。

$$Z' = Z_\chi \cos \beta + Z_\psi \sin \beta \quad (5.6)$$

ここで  $\beta$  は  $E_6$  の自発的な破れを定義する混合角である。今回の評価では、3 つの  $\beta$  の値を用いて行った。 $\beta$  の値によって  $\chi$  モデル ( $\beta = 0$ )、 $\psi$  モデル ( $\beta = \pi/2$ )、 $\eta$  モデル ( $\beta = \pi - \arctan \sqrt{5/3}$ ) と呼ばれる。

また、Alternative Left-Right symmetric(以下 ALR モデル) は標準模型の  $SU(2)_L$  に加えて  $SU(2)_R$  を加えた  $E_6$  モデルから導かれる。これから導かれる  $Z_R$  粒子を  $Z'$  粒子とみなす。この  $Z'$  粒子は標準模型の  $Z^0$  のようにふるまうが、標準模型の粒子と結合定数が異なる。

現在、LHC による実験で SSM モデルを仮定した不变質量の再構成による直接探索の結果が出ている [3, 4]。この結果では、SSM モデルにおいて 4.5 TeV( $Z' \rightarrow e^+e^-$  と  $\mu^+\mu^-$  の合算)、2.4 TeV( $Z' \rightarrow \tau^+\tau^-$ )、1.5-1.7 TeV( $Z' \rightarrow b\bar{b}$ ) が  $Z'$  の質量の下限であるとされている。ただし、SSM 以外の  $Z'$  モデルではまだ下限は発表されていない。

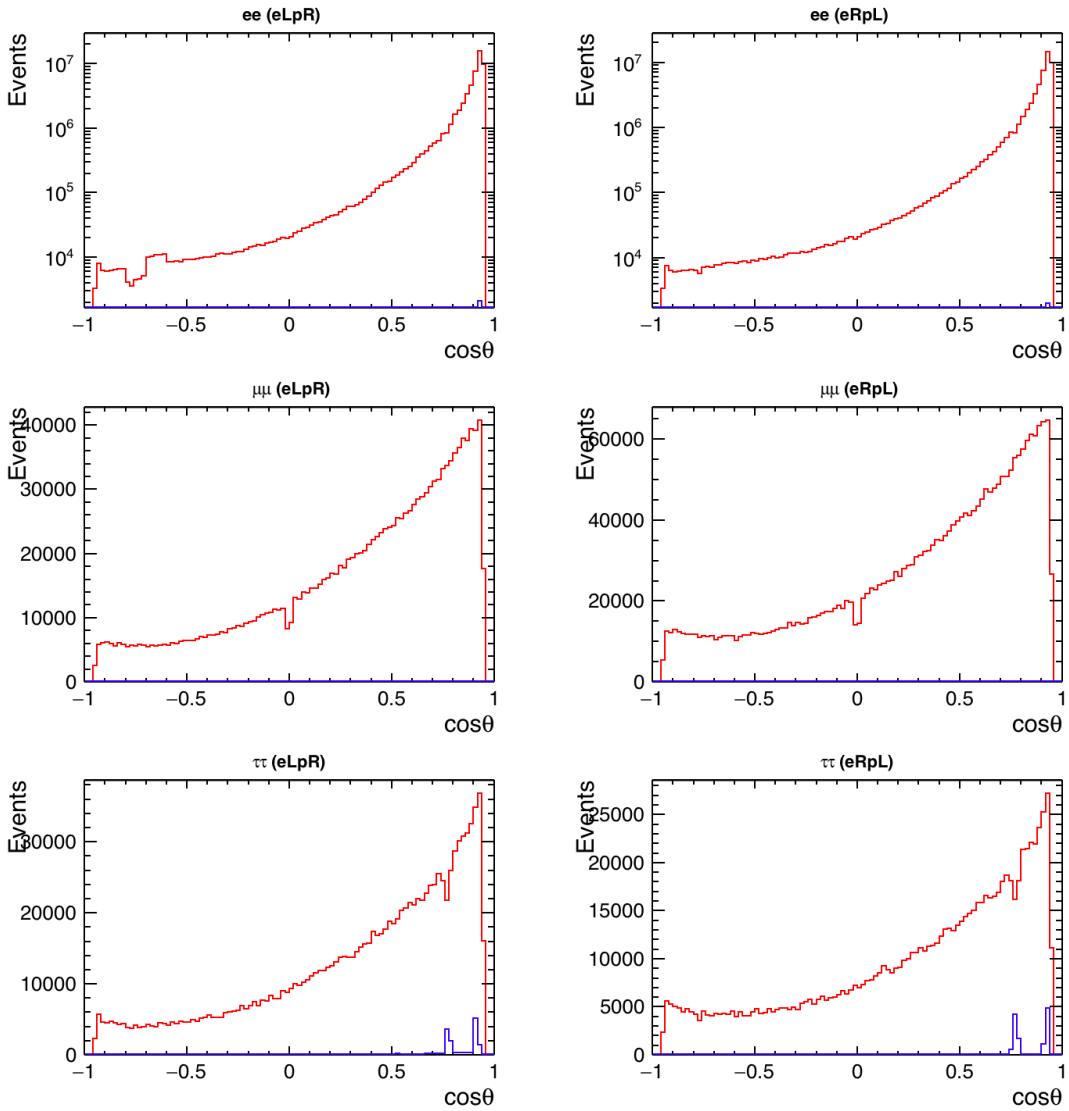


図 5.1 各レプトンチャンネルにおけるビーム軸に対する角度分布。左(右)図は左(右)偏極時の角度分布を表している。上段、中段、下段の図はそれぞれ  $e^+e^-$ ,  $\mu^+\mu^-$  及び  $\tau^+\tau^-$  チャンネル。 $e^+e^-$  チャンネルの縦軸は対数スケールでそれ以外のチャンネルは線形スケールである。赤(青)線はそれぞれシグナル事象(背景事象)である。

### 5.1.1 解析結果

図 5.3 から 5.5 は各レプトンチャンネルでの標準模型と新物理モデルとのずれを示した図である。各図はビームに対する粒子の角度の分布が、標準模型を基準にした時に新物理モデルにおいてどれくらいの割合でずれるのかを表している。黒の誤差棒は各チャンネルの角度分布から求めた  $1\sigma$  の統計誤差を表している。右巻き偏極より左巻き偏極の方が同じ質量・同じモデルを仮定した場合に標準模型とのずれが大きくなると考えられているため、ここでは左巻き偏極の場合のみ載せている。どのチャンネルにおいても ALR モデルが標準模型よりも大きくなっていることがわかる。逆に  $E_6$  の  $\psi, \eta$  モデルはここで表示しているものではほとんど標準

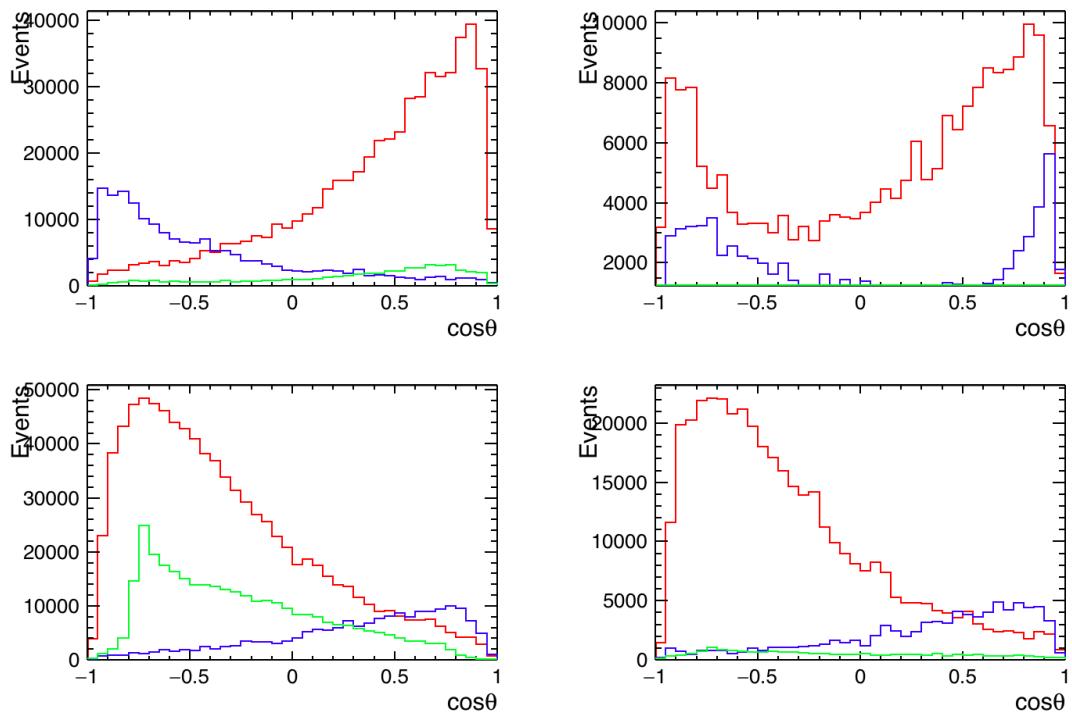


図 5.2 各ハドロンチャンネルにおけるビーム軸に対する角度分布。左(右)図は左(右)偏極時の角度分布を表している。上段、下段はそれぞれ  $b\bar{b}, c\bar{c}$  チャンネル。赤線は Charge ID が成功しているシグナル。青線は Charge ID が上手くいかず反転しているシグナル。緑線は背景事象。

模型とのずれを見ることが困難であることがうかがえる。また、これらの図では  $Z'$  の質量が 2.5 TeV の場合と 5.0 TeV の場合を仮定した場合のずれを表示しているが、どのチャンネル・モデルにおいても質量が 2.5 TeV の方は容易に発見ができるが、5.0 TeV の場合は比較的発見が難しいことがわかる。図 5.6 および図 5.7 はクォークチャンネルでの標準模型と新物理モデルとのずれを示した図である。 $b$  クォークの SSM モデルにおいては、右巻き偏極の方が BSM によるずれがかなり大きいため、右巻き偏極の場合を載せている。Charge ID の efficiency が下がることにより、角度分布のずれが小さくなり発見が難しくなることがわかる。

レプトンのチャンネルで各モデルで様々な質量を仮定して求めた  $\chi^2$  から標準模型と無矛盾になる確率を求めたグラフが、図 5.8 である。また、レプトンのチャンネルと今回解析を行ったハドロンのチャンネルを合わせて、標準模型と無矛盾になる確率を求めたグラフが図 5.9 である。この確率が低いほどその質量および新物理モデルにおいて  $Z'$  粒子が見つけやすくなるということを表す。このグラフから  $3\sigma^{*1}$  以上のずれを以って見つけることができる質量の上限をモデルごとに表したもののが表 5.1 である。

\*1  $3\sigma$  における標準模型と無矛盾になる確率は 0.0027 である。

表 5.1 重心系エネルギー 250 GeV の ILC の  $e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^-$  の測定で  $3\sigma$  以上のずれで検出可能な  $Z'$  の質量の上限。チャンネルを追加して質量の上限が下がる場合は、追加前の上限の値を用いている。これは  $\chi^2$  の値が 1 のまま bin 数が増えると確率が上がるためである。

$Z'$ model	$\ell$	$b$	$c$	$\ell + b$	$\ell + b + c$
SSM	2.8 TeV	4.5 TeV	2.7 TeV	4.5 TeV	4.5 TeV
ALR	4.0 TeV	2.9 TeV	2.8 TeV	4.0 TeV	4.0 TeV
$\chi$	2.9 TeV	2.4 TeV	1.4 TeV	2.9 TeV	2.9 TeV
$\psi$	1.4 TeV	2.1 TeV	1.4 TeV	2.1 TeV	2.1 TeV
$\eta$	1.8 TeV	2.3 TeV	1.4 TeV	2.3 TeV	2.3 TeV

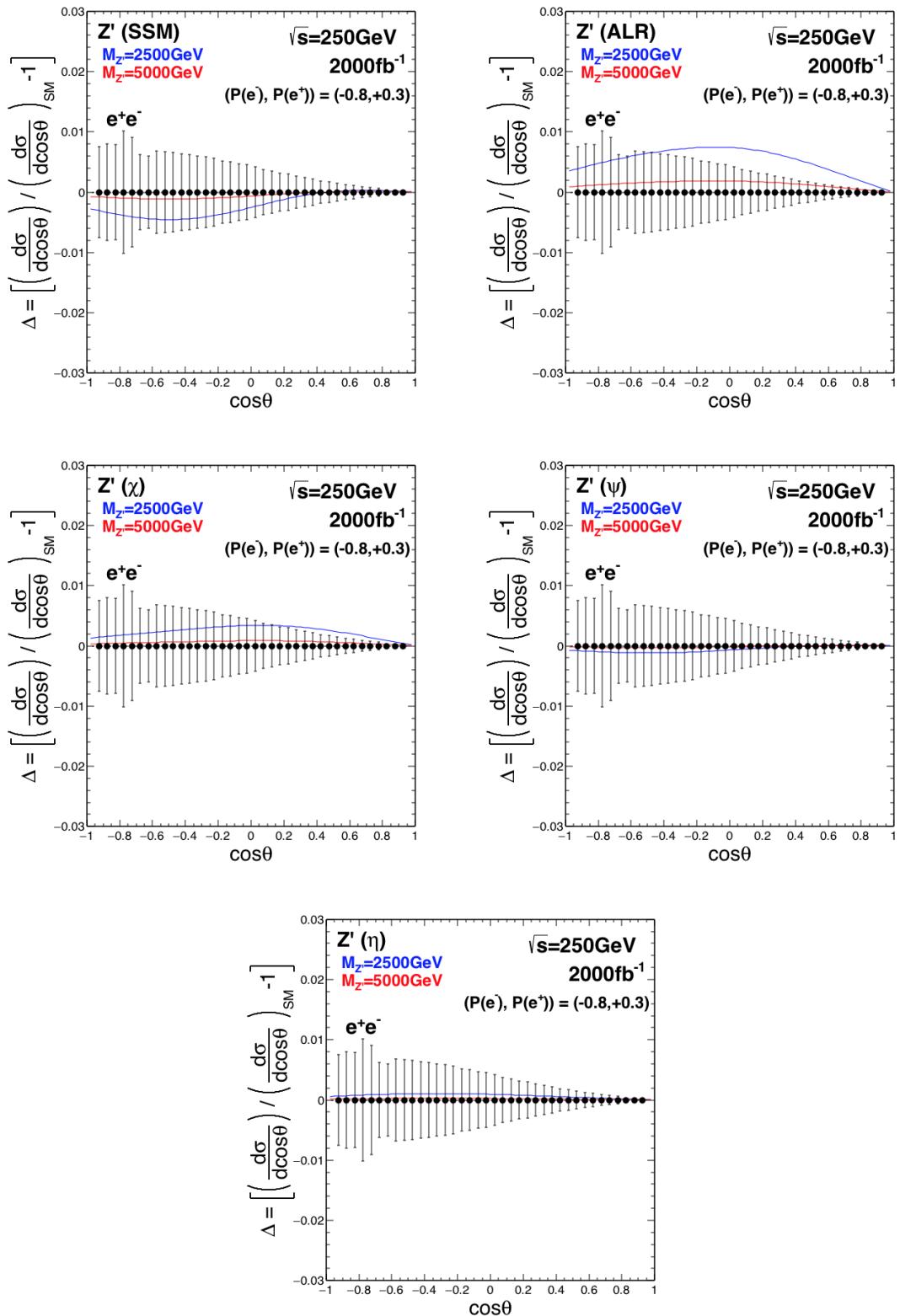


図 5.3  $Z'$  の SSM 及び  $E_6$  モデルにおける標準理論の  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$  の反応断面積とのずれ。赤(青)線は  $Z'$  の質量が 2.5 (5.0) TeV の場合のずれを表している。エラーバーは今回の解析で期待される精度を表している。

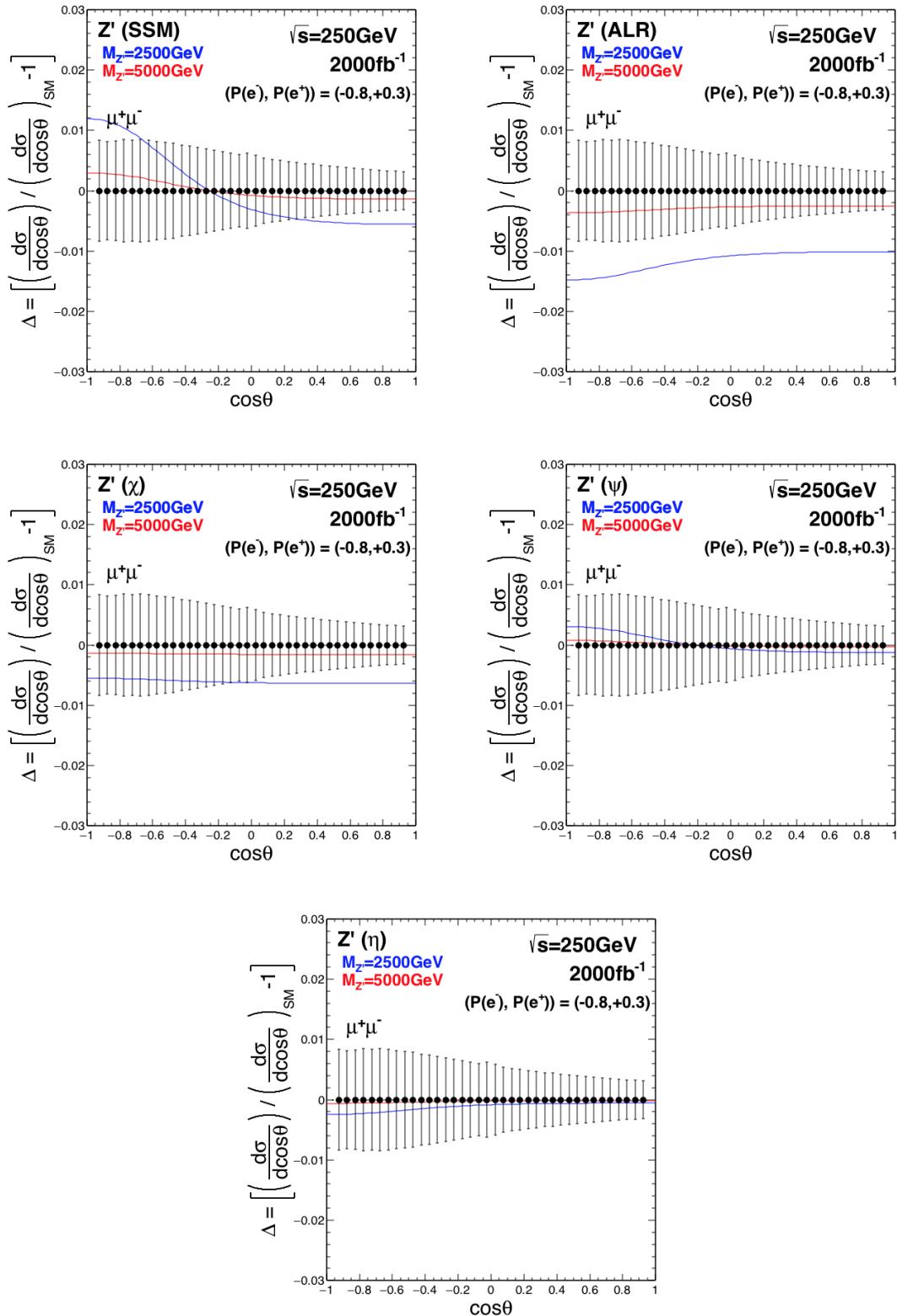


図 5.4  $Z'$  の SSM 及び  $E_6$  モデルにおける標準理論の  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$  の反応断面積とのずれ。赤(青)線は  $Z'$  の質量が 2.5(5.0) TeV の場合のずれを表している。エラーバーは今回の解析で期待される精度を表している

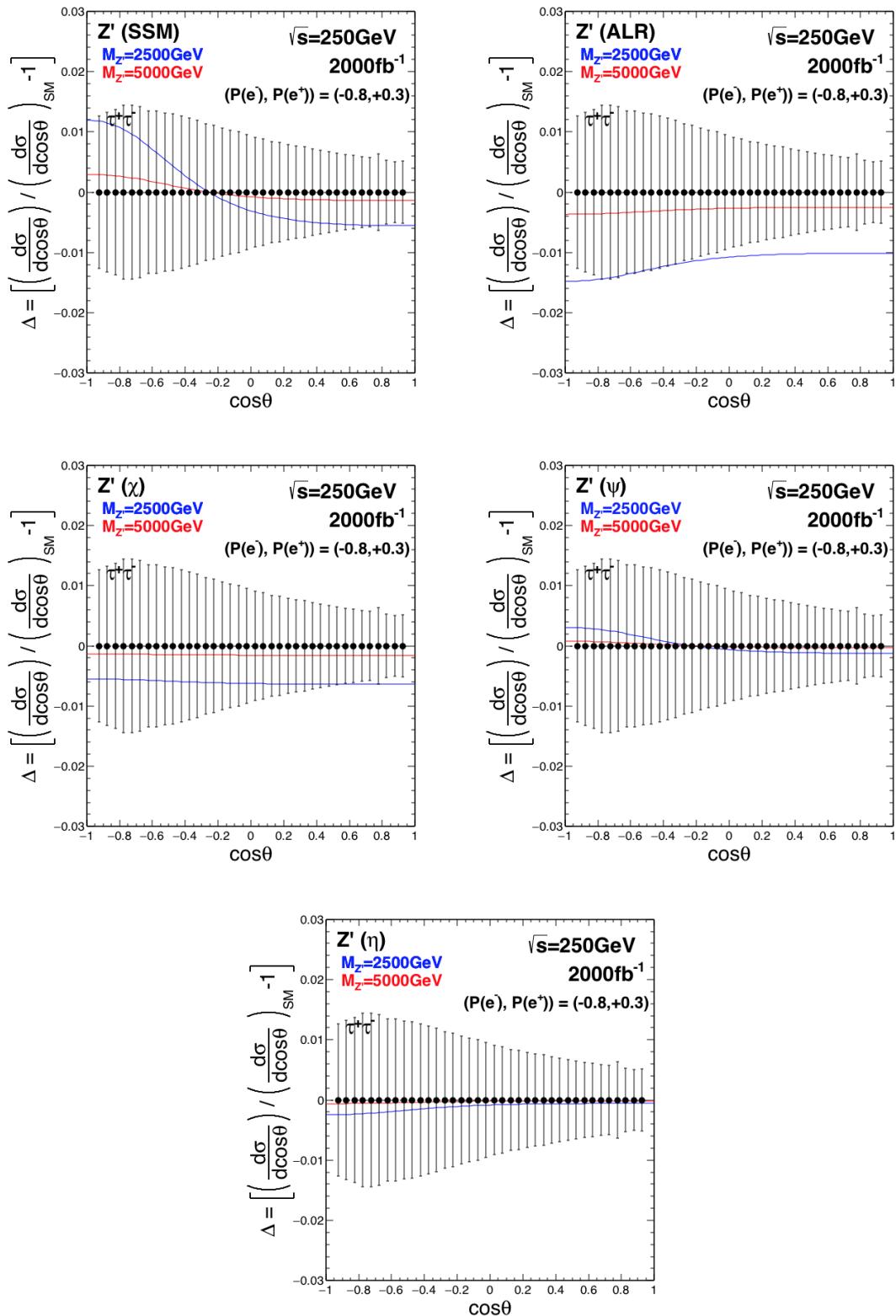


図 5.5  $Z'$  の SSM 及び  $E_6$  モデルにおける標準理論の  $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$  の反応断面積とのずれ。赤(青)線は  $Z'$  の質量が 2.5(5.0) TeV の場合のずれを表している。エラーバーは今回の解析で期待される精度を表している。

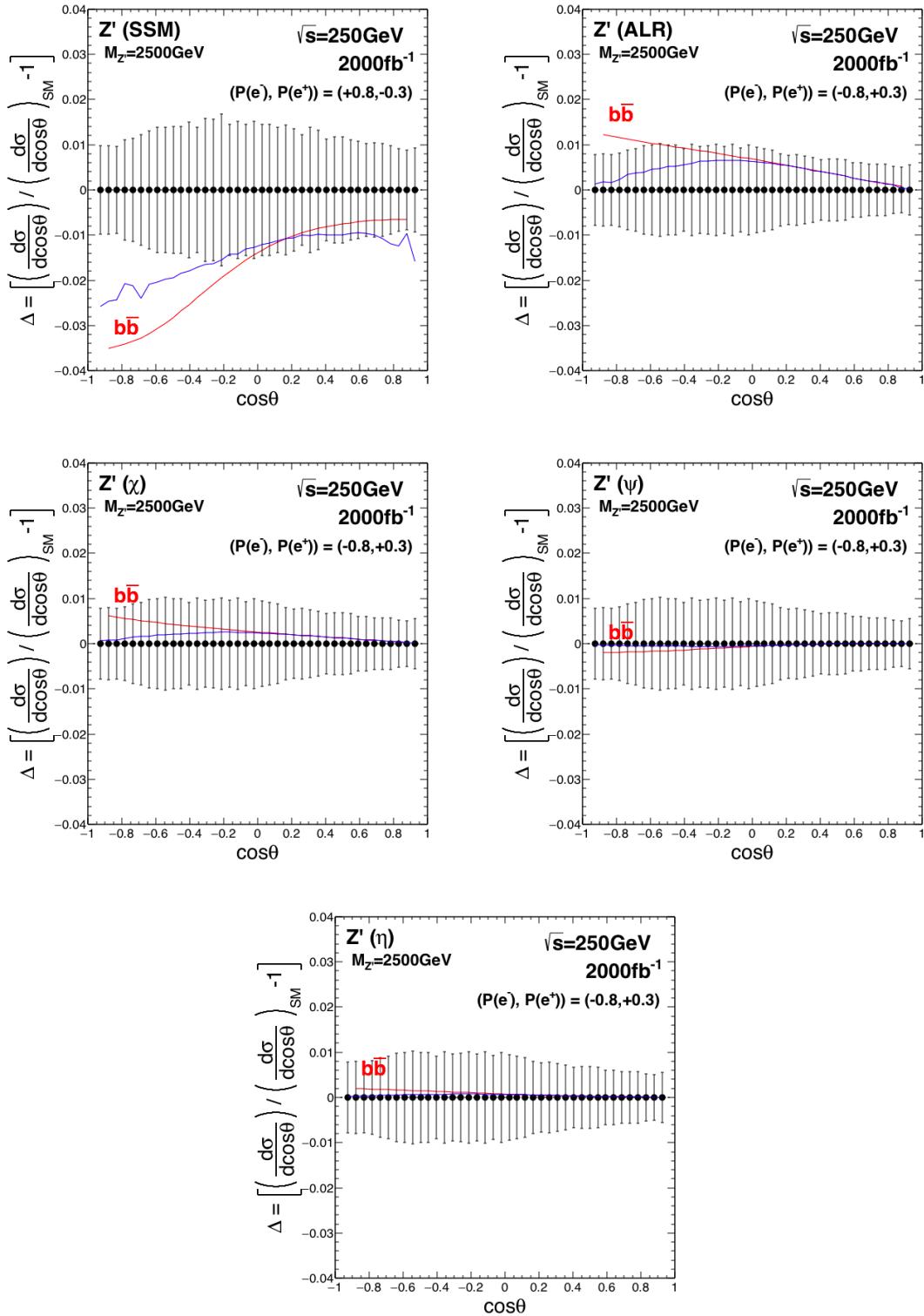


図 5.6  $Z'$  の SSM 及び  $E_6$  モデルにおける標準理論の  $e^+e^- \rightarrow b\bar{b}$  の反応断面積とのずれ。 $Z'$  の質量が 2.5 TeV の場合のずれを表しており、赤線は Charge ID の efficiency が 100% の場合、青線は今回の解析 (60%) の場合である。エラーバーは今回の解析で期待される精度を表している。

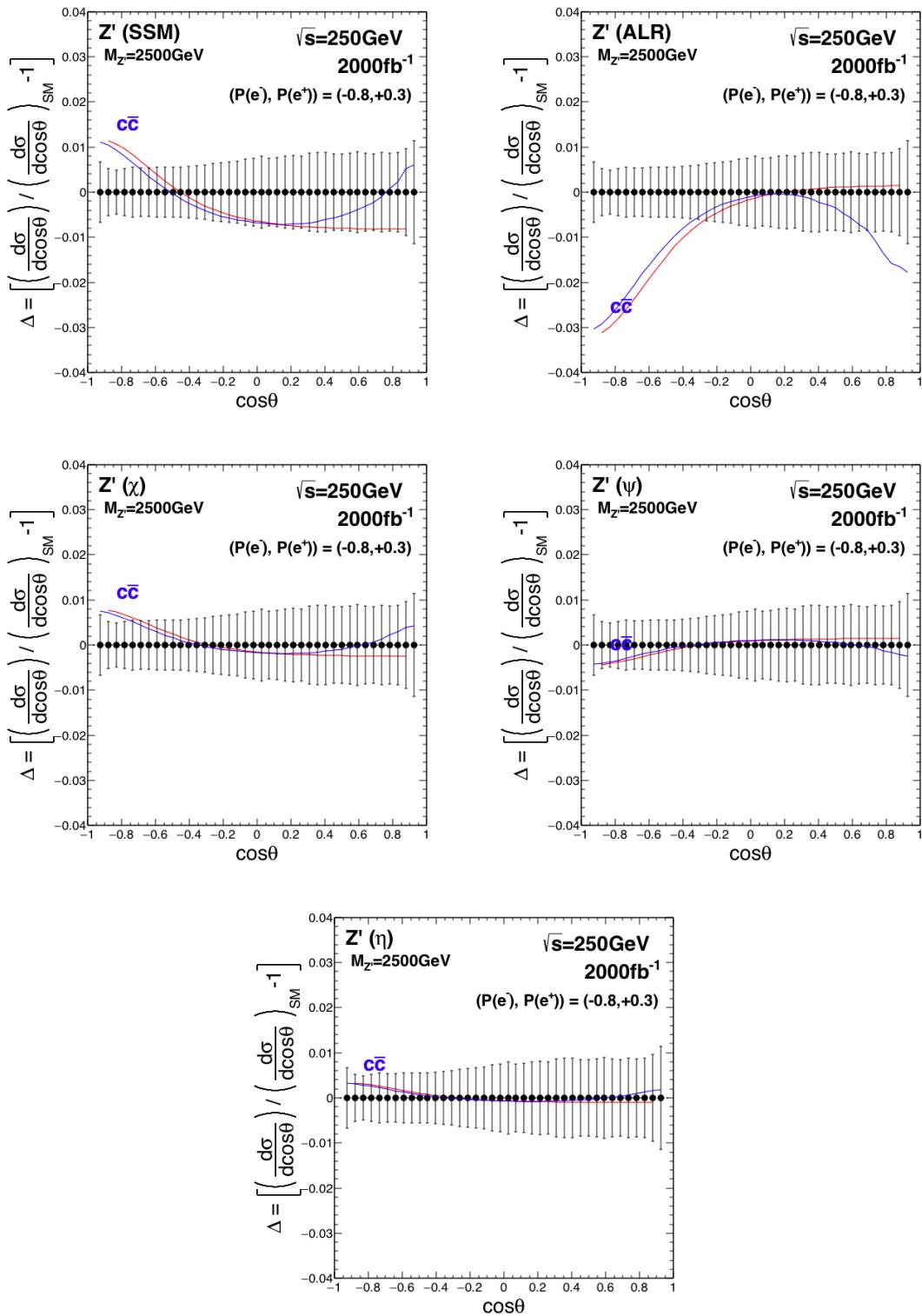


図 5.7  $Z'$  の SSM 及び  $E_6$  モデルにおける標準理論の  $e^+e^- \rightarrow c\bar{c}$  の反応断面積とのずれ。 $Z'$  の質量が 2.5 TeV の場合のずれを表しており、赤線は Charge ID の efficiency が 100% の場合、青線は今回の解析 (60%) の場合である。エラーバーは今回の解析で期待される精度を表している。

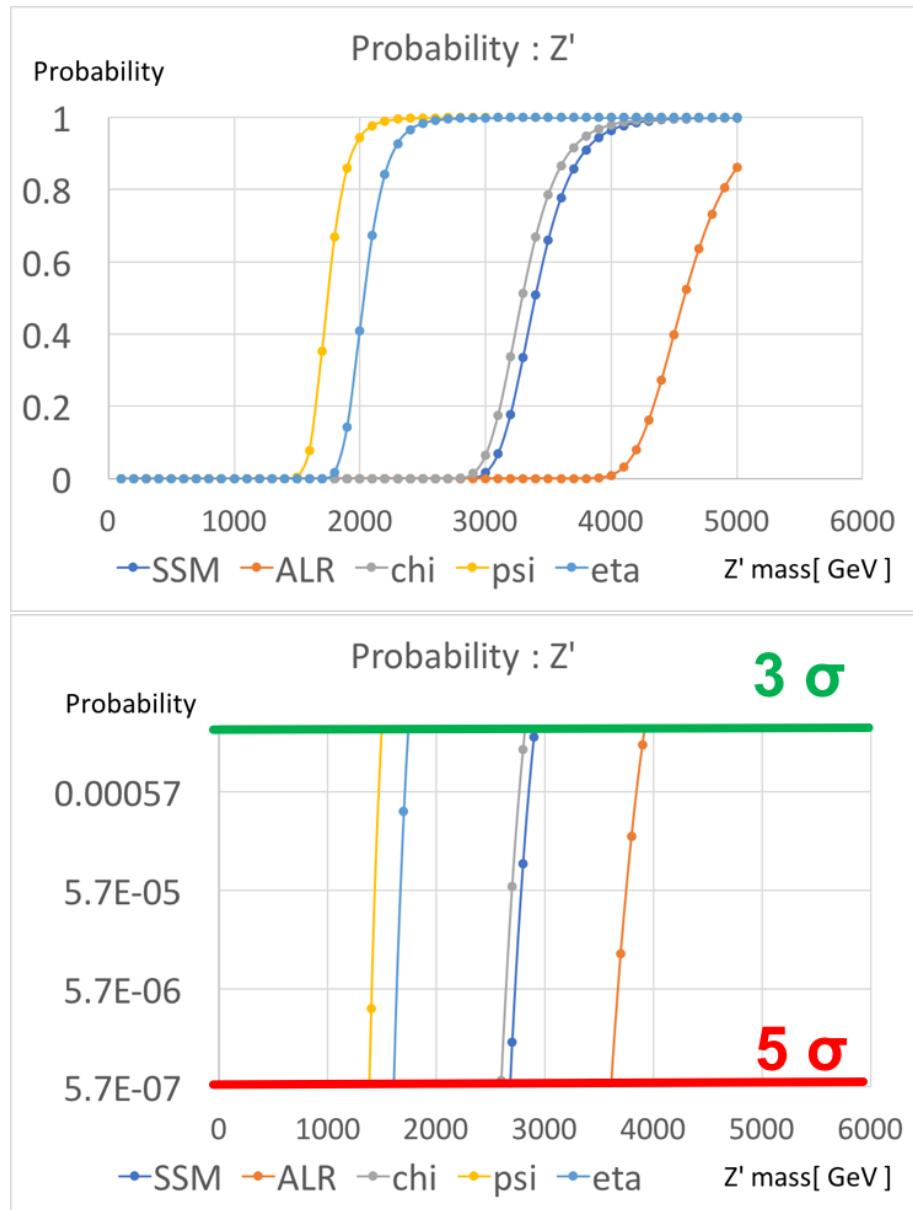


図 5.8  $Z'$  モデルのずれが標準模型と無矛盾になる確率を示すグラフ。これはレプトンチャンネルを合わせたものである。横軸は、仮定した  $Z'$  の質量で縦軸が確率。下図は  $3\sigma$  から  $5\sigma$  の範囲内で標準模型のずれが見られる範囲を拡大したもの

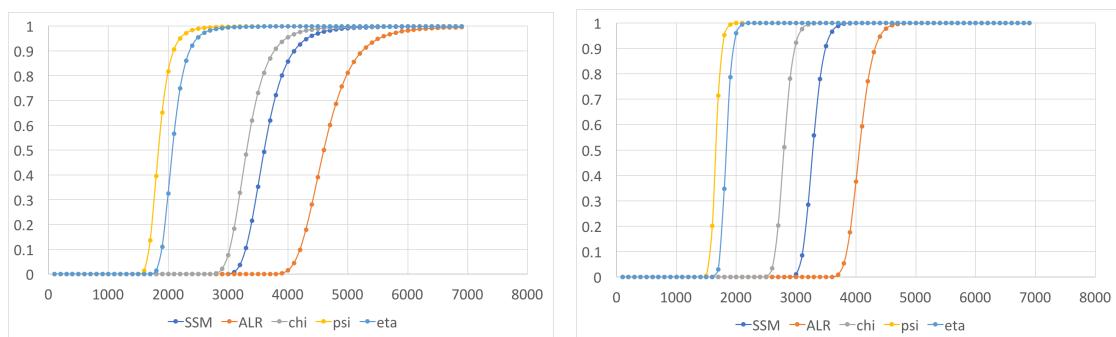


図 5.9  $Z'$  モデルのずれが標準模型と無矛盾になる確率を示すグラフ。横軸は仮定した  $Z'$  の質量で、縦軸が確率。左図はレプトンチャンネルと  $b\bar{b}$  チャンネルを合わせたもの、右図はレプトンチャンネルと  $b\bar{b}, c\bar{c}$  チャンネルを合わせたものである。

## 5.2 Gauge Higgs Unification (GHU)

Gauge Higgs Unification (GHU) モデルにおいては、Higgs 粒子はゲージポテンシャルの extra-dimensional な構成物の一部であり、これらは第 5 次元の Aharonov-Bohm(AB) の位相 ( $\theta_H$ ) の変動であらわれる [20]。図 5.10 が示す通り、右巻き偏極の場合は大きく標準模型とされることを表している。

今回の解析においては、 $\theta_H = 0.0737, 0.0917, 0.115$  の三つの値を仮定し、重心系エネルギーが 250 GeV の ILC において GHU モデルのずれを見ることができるかを判断する。なお、 $\theta_H > 0.05$  と  $\theta_H$  の値には下限があり、これより小さいと  $t$  クォークの質量が再現できなくなる。図 5.11 は各チャネルの右巻偏極での標準模型と新物理モデルとのずれを示した図である。各図はビームに対する粒子の角度の分布が、標準模型を基準にした時に新物理モデルにおいてどれくらいの割合でずれるのかを表している。黒の誤差棒は各チャネルの角度分布から求めた  $1\sigma$  の統計誤差を表している。

どの  $\theta_H$  の値・チャネルにおいても標準模型から十分ずれがあることがわかる。また、これらは標準模型と無矛盾になる確率はほぼ 0 であり、 $\theta_H$  がとりうる値の範囲内で GHU モデルが正しければレプトンチャネルの解析だけでも ILC で十分新物理を捉えることができるといえる。

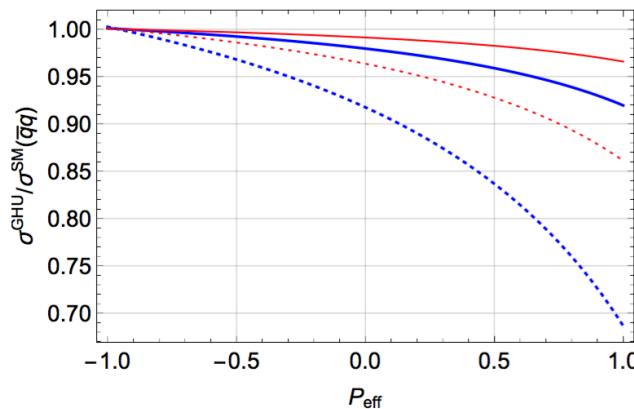


図 5.10 電子陽電子ビームの偏極具合による標準模型と GHU モデルとの反応断面積のずれを示すグラフ [20]。 $P_{\text{eff}} = (P_{e-} - P_{e+})/(1 - P_{e-} - P_{e+})$ 。 $P$  はビームの偏極度を表す。青(赤)線は  $\theta_H = 0.115$  ( $0.0737$ ) の線であることを示す。実線(破線)は重心系エネルギーが 250 GeV (500 GeV) の場合であることを示す。

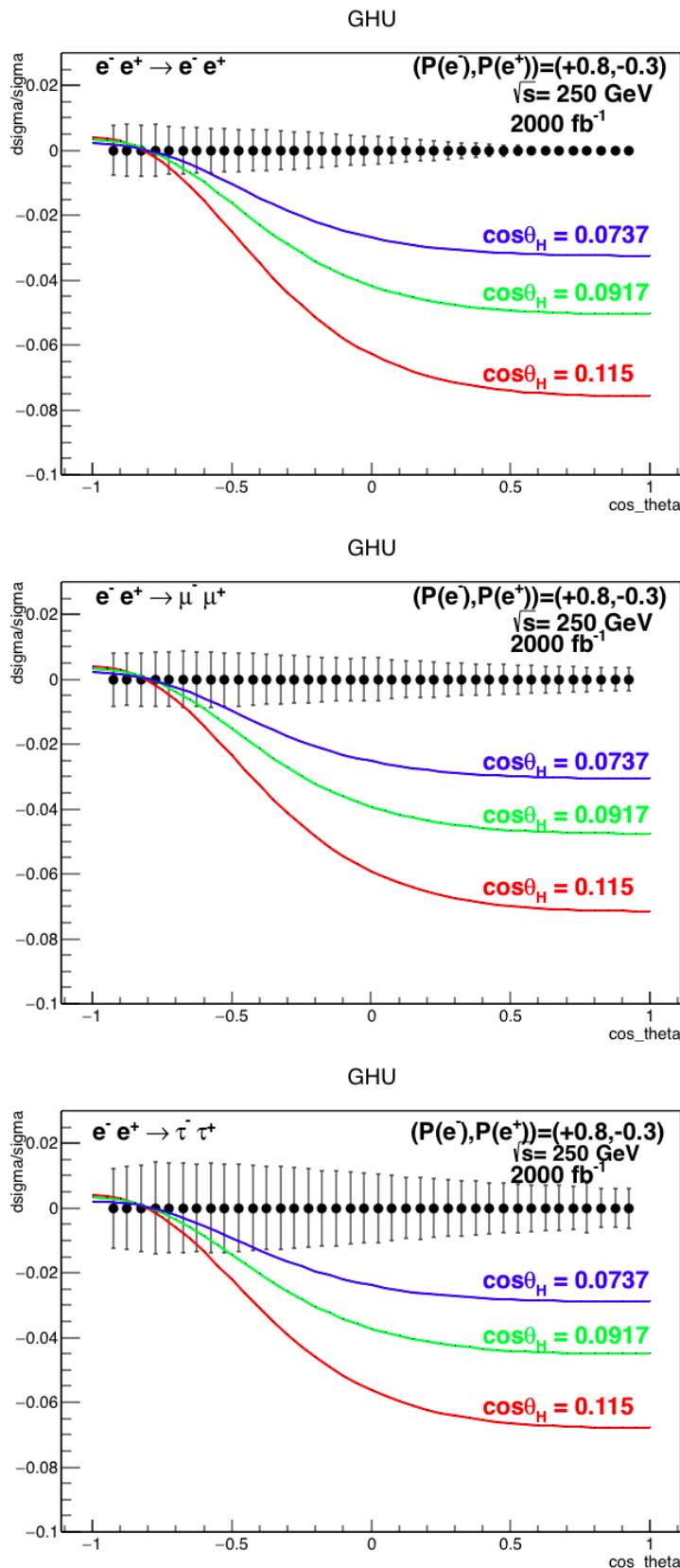


図 5.11  $Z'$  の Gauge Higgs Unification モデルにおける標準理論の  $e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^-$  の反応断面積とのずれ。すべて右巻き偏極の時のものである。上段、中段、下段の図はそれぞれ  $e^+e^-$ 、 $\mu^+\mu^-$  や  $\tau^+\tau^-$  チャンネルのずれを表している。エラーバーは今回の解析で期待される精度を表している。

### 5.3 WIMP の探索

最近提案された新物理探索法として、WIMP(weakly-interacting massive particle)による  $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  のずれを一般的に調べる方法がある [21]。これまで解析してきた 2 フェルミオン終状態の過程 ( $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$ ) に、WIMP( $\chi$ ) を導入し  $Z \rightarrow \chi\chi \rightarrow Z$  のループを含んだダイアグラム(図 5.12)を仮定すると、結合定数が変わってくる。この結合定数のずれは WIMP のスピンや質量によって異なり、WIMP モデルの詳細には依存しない。

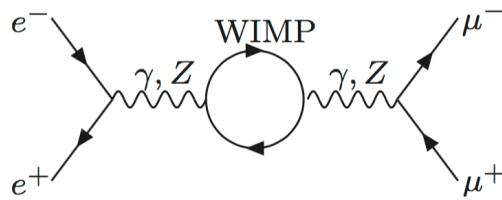


図 5.12 WIMP モデルのファインマンダイアグラム

今回は、3種類の WIMP モデルにおいて解析を行い、重心系エネルギー 250 GeV の ILCにおいて間接測定ができるかどうかを示す。用いたモデルは表 5.2 に示す。このモデルにおいては、 $SU(2)_L$  と  $U(1)_Y$  hypercharge の二つの値のみによって結合定数が変わり、ビーム軸に対する角度分布に標準模型からのずれが生じる。

表 5.2 解析を行う WIMP のモデル

WIMP model	$SU(2)_L$	$U(1)_Y$ hypercharge
wino	$n = 3$ (triplet)	0
Higgsino	$n = 2$ (douplet)	$\pm 1/2$
Minimal Dark Matter (MDM)	$n = 5$ (pentet)	0

図 5.13 は各レプトンチャンネルでの標準模型と新物理モデルとのずれを示した図である。各図はビームに対する粒子の角度の分布が、標準模型を基準にした時に新物理モデルにおいてどれくらいの割合でずれるのかを表している。黒の誤差棒は各チャンネルの角度分布から求めた  $1\sigma$  の統計誤差を表している。右巻き偏極より左巻き偏極の方が同じ質量・同じモデルを仮定した場合に標準模型とのずれが大きくなると考えられているため、ここでは左巻き偏極の場合のみ載せている。どのチャンネル・物理モデルにおいても仮定する WIMP の質量が大きくなるほど標準模型からのずれが小さくなり、発見が困難になることがわかる。

レプトンのチャンネルで各 WIMP モデルで様々な質量を仮定して求めた  $\chi^2$  から標準模型と無矛盾になる確率を求めたグラフが、図 5.14 である。この確率が低いほどその質量において WIMP 探索が行いやすいとこを示す。このグラフから  $3\sigma$  以上のずれを以って見つけることができる質量の上限をモデルごとに表したものが表 5.1 である。左巻き偏極における間接測

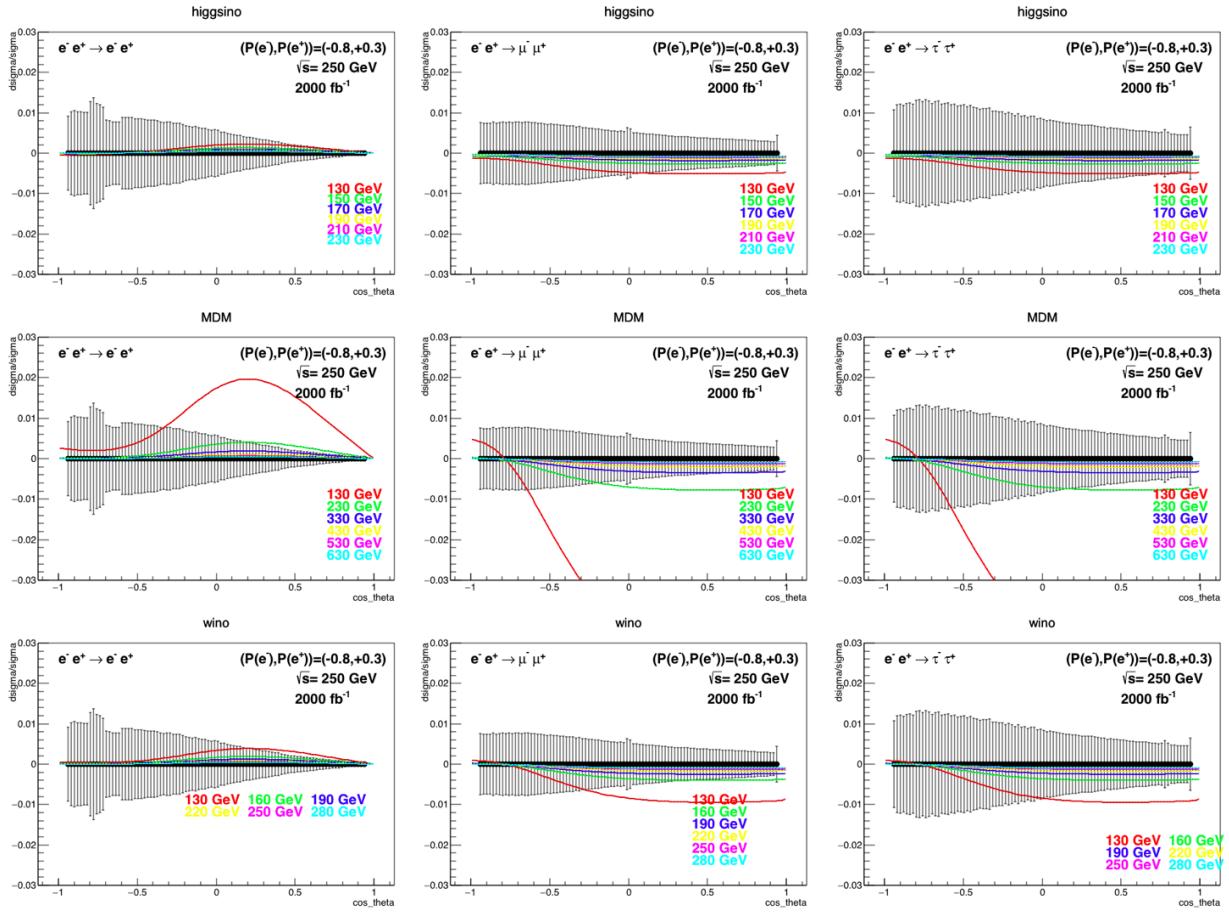


図 5.13 WIMP モデルにおける標準理論の  $e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^-$  の反応断面積とのずれ。上段、中段、下段はそれぞれ Higgsino ( $n = 2, Y = \pm 1/2$ )、wino ( $n = 3, Y = 0$ ) 及び Minimal Dark Matter(MDM) ( $n = 5, Y = 0$ ) である。ここで、 $n$  は  $SU(2)_L$   $n$ -plet 、  $Y$  は  $U(1)_Y$  は hypercharge である。各線は図中にある色で示す WIMP の質量を示している。左列、中央列、右列の図はそれぞれ  $e^+e^-$ 、 $\mu^+\mu^-$  や  $\tau^+\tau^-$  チャンネルのずれを表している。エラーバーは今回の解析で期待される制度を表している。

定では直接探索ができる限界の 125 GeV を超えて WIMP の探索が可能であるといえる。

表 5.3 重心系エネルギー 250 GeV の ILC の  $e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^-$  の測定で  $3\sigma$  以上とのずれで検出可能な  $Z'$  の質量の上限。左巻き偏極の場合のみを示している。

WIMP Model	mass reach at $3\sigma$
higgsino $e_L^- e_R^+$	150 GeV
MDM $e_L^- e_R^+$	330 GeV
wino $e_L^- e_R^+$	150 GeV

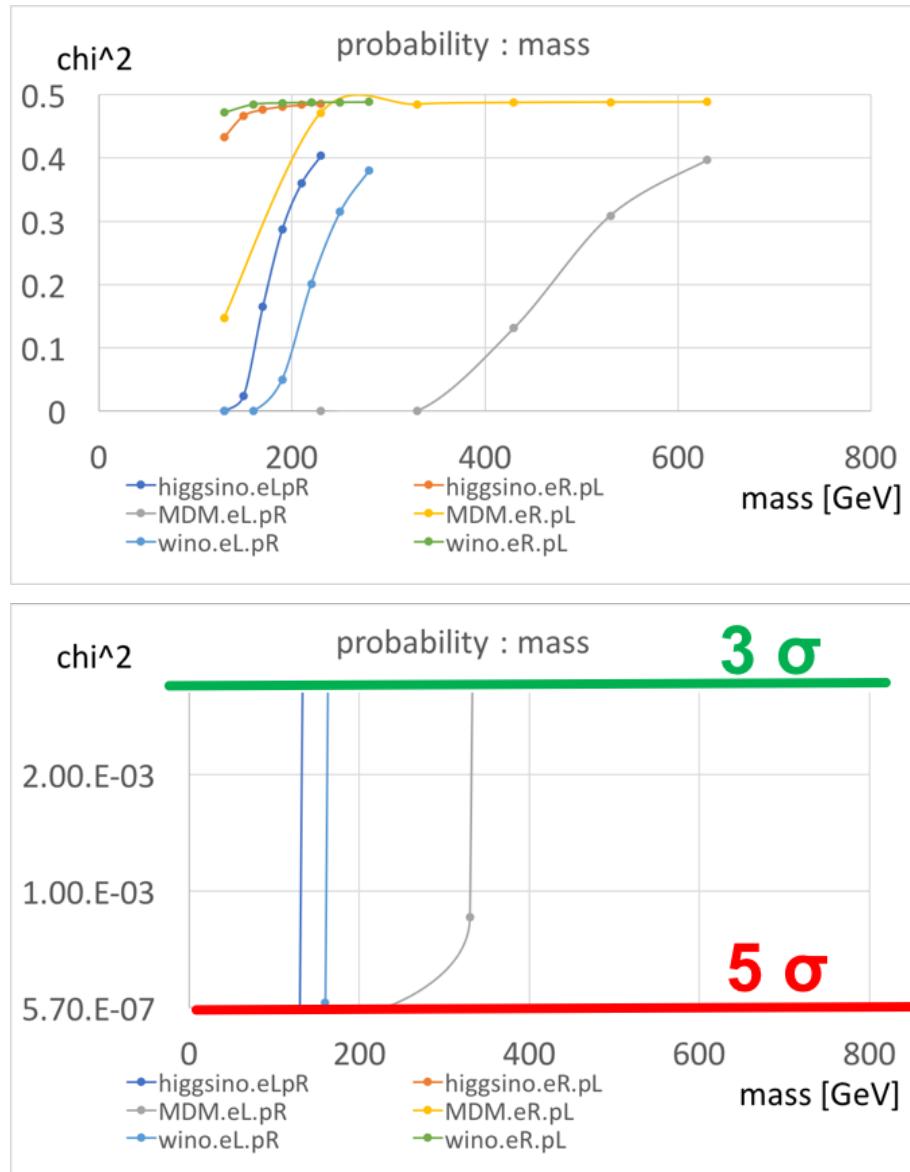


図 5.14  $Z'$  モデルのずれが標準模型と無矛盾になる確率を示すグラフ。これはレプトンチャンネルを合わせたものである。横軸は、仮定した  $Z'$  の質量で縦軸が確率。下図は  $3\sigma$  から  $5\sigma$  の範囲内で標準模型のずれが見られる範囲を拡大したもの

## 第 6 章

### 結論

重心系エネルギーが 250 GeV の ILC における 2-fermion 終状態の精密測定による物理探索の性能評価を行った。

これらの解析の結果、 $Z'$  の新物理モデルにおいては、新物理モデルによって 1.4 - 4.0 TeV の質量の  $Z'$  感度があることがわかり、現在 LHC による直接測定で棄却されている  $Z'$  の質量よりも重い範囲まで探索が可能であることがわかった。また、WIMP の間接探索においては、左巻き運用 ( $e_L^- e_R^+$ ) で ILC での直接測定での限界 (125 GeV) より重い質量の WIMP を探索可能であることがわかった。また、 $Z'$  モデルの一つで新しく提案されている Gauge Higgs Unification model (GHU) には、レプトンの各チャンネルの右巻き運用 ( $e_R^- e_L^+$ ) のみでも、十分感度があることがわかった。

$b$  クォークや  $c$  クォークの Charge ID は今回用いた方法では efficiency が 60% 程度でありまだ改善の余地がある。Charge ID が成功するイベントが増えれば観測可能な  $Z'$  の質量の上限をさらに向上させることができると考える。また、今回解析を行った終状態 ( $e^- e^+, \mu^- \mu^+, \tau^- \tau^+, b\bar{b}, c\bar{c}$ ) は全体の崩壊分岐比の 40 % 程度に過ぎない。まだ解析出来ていない終状態  $u, d, s$  クォークの場合の  $Z$  の崩壊分岐比は全体の 40% であり、これらの解析を進めることによって、さらに観測可能な  $Z'$  の質量の上限をさらに向上させることができると考える。

# 付録 A

3.1.4 章のイベントサンプルの混合による、Bhabha 散乱の重み付けの値をこの付録で示す。サンプルイベントの生成の都合上、重み付けは生成角度 ( $\theta$ ) ごとに異なる。

表 A.1 左巻き偏極の時の Bhabha 散乱の重み付けの値。左巻き偏極 100%( $(e^-, e^+) = (-1.0, +1.0)$ )。

$\cos \theta$ の範囲	$\sigma$ (fb)	weight
(-0.97, -0.90)	188337	9915.941
(-0.90, -0.80)	40912	2154.041
(-0.80, -0.70)	11726	617.385
(-0.70, -0.60)	4833	254.446
(-0.60, -0.50)	2313	121.793
(-0.50, -0.40)	1203	63.315
(-0.40, -0.30)	654	34.407
(-0.30, -0.20)	366	19.274
(-0.20, -0.10)	210	11.054
(-0.10, 0.00)	124	6.520
(0.00, 0.10)	78	4.110
(0.10, 0.20)	54	2.851
(0.20, 0.30)	43	2.279
(0.30, 0.40)	40	2.103
(0.40, 0.50)	41	2.177
(0.50, 0.60)	45	2.373
(0.60, 0.70)	50	2.650
(0.70, 0.80)	57	2.985
(0.80, 0.90)	63	3.329
(0.90, 0.97)	47	2.489

表 A.2 左巻き偏極の時の Bhabha 散乱の重み付けの値。(右巻き偏極 100%( $(e^-, e^+) = (+1.0, -1.0)$ ))

$\cos \theta$ の範囲	$\sigma$ (fb)	weight
(-0.97, -0.90)	180927	569.920
(-0.90, -0.80)	37856	119.245
(-0.80, -0.70)	10595	33.373
(-0.70, -0.60)	4302	13.551
(-0.60, -0.50)	2042	6.434
(-0.50, -0.40)	1060	3.340
(-0.40, -0.30)	576	1.815
(-0.30, -0.20)	324	1.022
(-0.20, -0.10)	188	0.592
(-0.10, 0.00)	112	0.354
(0.00, 0.10)	72	0.227
(0.10, 0.20)	52	0.162
(0.20, 0.30)	42	0.133
(0.30, 0.40)	40	0.126
(0.40, 0.50)	41	0.130
(0.50, 0.60)	45	0.142
(0.60, 0.70)	50	0.158
(0.70, 0.80)	56	0.178
(0.80, 0.90)	63	0.199
(0.90, 0.97)	47	0.149

表 A.3 左巻き偏極の時の Bhabha 散乱の重み付けの値。( $(e^-, e^+) = (-1.0, -1.0)$ )。

$\cos \theta$ の範囲	$\sigma$ (fb)	weight
(-0.97, -0.90)	166769	4727.912
(-0.90, -0.80)	33985	963.476
(-0.80, -0.70)	10137	287.378
(-0.70, -0.60)	4697	133.170
(-0.60, -0.50)	2663	75.510
(-0.50, -0.40)	1703	48.278
(-0.40, -0.30)	1174	33.280
(-0.30, -0.20)	855	24.234
(-0.20, -0.10)	647	18.332
(-0.10, 0.00)	510	14.452
(0.00, 0.10)	410	11.632
(0.10, 0.20)	338	9.577
(0.20, 0.30)	281	7.970
(0.30, 0.40)	238	6.742
(0.40, 0.50)	204	5.782
(0.50, 0.60)	177	5.016
(0.60, 0.70)	154	4.369
(0.70, 0.80)	137	3.872
(0.80, 0.90)	121	3.431
(0.90, 0.97)	75	2.128

表 A.4 左巻き偏極の時の Bhabha 散乱の重み付けの値。( $(e^-, e^+) = (+1.0, +1.0)$ )

$\cos \theta$ の範囲	$\sigma$ (fb)	weight
(-0.97, -0.90)	166769	975.599
(-0.90, -0.80)	33968	198.711
(-0.80, -0.70)	10123	59.221
(-0.70, -0.60)	4697	27.475
(-0.60, -0.50)	2662	15.571
(-0.50, -0.40)	1704	9.966
(-0.40, -0.30)	1172	6.858
(-0.30, -0.20)	856	5.010
(-0.20, -0.10)	648	3.791
(-0.10, 0.00)	508	2.974
(0.00, 0.10)	410	2.400
(0.10, 0.20)	338	1.976
(0.20, 0.30)	281	1.645
(0.30, 0.40)	238	1.391
(0.40, 0.50)	204	1.193
(0.50, 0.60)	177	1.035
(0.60, 0.70)	154	0.901
(0.70, 0.80)	137	0.800
(0.80, 0.90)	121	0.708
(0.90, 0.97)	75	0.439

表 A.5 右巻き偏極の時の Bhabha 散乱の重み付けの値。左巻き偏極 100%( $(e^-, e^+)$  =  $(-1.0, +1.0)$ )。

$\cos \theta$ の範囲	$\sigma$ (fb)	weight
(-0.97, -0.90)	188337	593.261
(-0.90, -0.80)	40912	128.874
(-0.80, -0.70)	11726	36.938
(-0.70, -0.60)	4833	15.223
(-0.60, -0.50)	2313	7.287
(-0.50, -0.40)	1203	3.788
(-0.40, -0.30)	654	2.059
(-0.30, -0.20)	366	1.153
(-0.20, -0.10)	210	0.661
(-0.10, 0.00)	124	0.390
(0.00, 0.10)	78	0.246
(0.10, 0.20)	54	0.171
(0.20, 0.30)	43	0.136
(0.30, 0.40)	40	0.126
(0.40, 0.50)	41	0.130
(0.50, 0.60)	45	0.142
(0.60, 0.70)	50	0.159
(0.70, 0.80)	57	0.179
(0.80, 0.90)	63	0.199
(0.90, 0.97)	47	0.149

表 A.6 右巻き偏極の時の Bhabha 散乱の重み付けの値。(右巻き偏極 100%( $(e^-, e^+)$  =  $(+1.0, -1.0)$ ))

$\cos \theta$ の範囲	$\sigma$ (fb)	weight
(-0.97, -0.90)	180927	9525.810
(-0.90, -0.80)	37856	1993.094
(-0.80, -0.70)	10595	557.810
(-0.70, -0.60)	4302	226.496
(-0.60, -0.50)	2042	107.533
(-0.50, -0.40)	1060	55.827
(-0.40, -0.30)	576	30.333
(-0.30, -0.20)	324	17.076
(-0.20, -0.10)	188	9.887
(-0.10, 0.00)	112	5.915
(0.00, 0.10)	72	3.792
(0.10, 0.20)	52	2.713
(0.20, 0.30)	42	2.228
(0.30, 0.40)	40	2.107
(0.40, 0.50)	41	2.176
(0.50, 0.60)	45	2.377
(0.60, 0.70)	50	2.649
(0.70, 0.80)	56	2.973
(0.80, 0.90)	63	3.330
(0.90, 0.97)	47	2.488

表 A.7 右巻き偏極の時の Bhabha 散乱の重み付けの値。( $(e^-, e^+) = (-1.0, -1.0)$ )。

$\cos \theta$ の範囲	$\sigma$ (fb)	weight
(-0.97, -0.90)	166769	975.601
(-0.90, -0.80)	33985	198.812
(-0.80, -0.70)	10137	59.300
(-0.70, -0.60)	4697	27.480
(-0.60, -0.50)	2663	15.581
(-0.50, -0.40)	1703	9.962
(-0.40, -0.30)	1174	6.867
(-0.30, -0.20)	855	5.001
(-0.20, -0.10)	647	3.783
(-0.10, 0.00)	510	2.982
(0.00, 0.10)	410	2.400
(0.10, 0.20)	338	1.976
(0.20, 0.30)	281	1.645
(0.30, 0.40)	238	1.391
(0.40, 0.50)	204	1.193
(0.50, 0.60)	177	1.035
(0.60, 0.70)	154	0.901
(0.70, 0.80)	137	0.799
(0.80, 0.90)	121	0.708
(0.90, 0.97)	75	0.439

表 A.8 右巻き偏極の時の Bhabha 散乱の重み付けの値。( $(e^-, e^+) = (+1.0, +1.0)$ )

$\cos \theta$ の範囲	$\sigma$ (fb)	weight
(-0.97, -0.90)	166769	4727.905
(-0.90, -0.80)	33968	962.982
(-0.80, -0.70)	10123	286.992
(-0.70, -0.60)	4697	133.150
(-0.60, -0.50)	2662	75.457
(-0.50, -0.40)	1704	48.295
(-0.40, -0.30)	1172	33.236
(-0.30, -0.20)	856	24.277
(-0.20, -0.10)	648	18.373
(-0.10, 0.00)	508	14.412
(0.00, 0.10)	410	11.632
(0.10, 0.20)	338	9.575
(0.20, 0.30)	281	7.971
(0.30, 0.40)	238	6.742
(0.40, 0.50)	204	5.782
(0.50, 0.60)	177	5.017
(0.60, 0.70)	154	4.369
(0.70, 0.80)	137	3.875
(0.80, 0.90)	121	3.433
(0.90, 0.97)	75	2.128

# 謝辞

本研究を遂行するにあたって、たくさんの方にお世話になりました。この場をお借りして感謝を述べさせていただきます。

まず、指導教員である川越清以先生におかれましては、学部3年生のゼミの頃からお世話になりました。また、研究室ではお忙しい中にもかかわらず気にかけていただき、また研究をサポートしてくださいました事、とても感謝しております。末原大幹先生には、本研究を遂行するにあたって必要な事を根絶丁寧に教えていただきました事、とても感謝しております。ここまで研究を遂行できたのも末原先生のご助力あってこそだと痛感しております。また、アメリカやフランスで開催された国際会議に参加させていただくなど、貴重な経験を数多くさせていただきました。東城順治先生、織田勸先生にはLHCにおける $Z'$ の探索について教えていただきました、貴重なご助言をいただき、ありがとうございました。吉岡瑞樹先生、小林大先生、中山隆志先生には解析の仕方などにおいてご助言をいただきありがとうございます。高エネルギー加速器研究機構の藤井恵介先生、大阪大学の細谷裕先生、東京大学の白井智先生には新物理モデルの理論値や計算プログラムを提供していただき、研究がスムーズに行えた事をとても感謝しております。また、ILC physics and software groupの皆様には、研究環境を提供していただいた上、ミーティング等を通して多数の助言をいただきありがとうございました。

大石航氏、中居勇樹氏、調翔平氏、富田龍彦氏、角直彦氏、高田秀佐氏には研究室の先輩として、研究活動に関する事の他にも様々なお話を聞かせていただき見識を広める事ができました。皆様の知識の深さを私も見習っていきたいと考えております。また、富田氏にはILCの物理解析を行う上で多くの助言をいただきありがとうございました。伊藤拓実氏、古賀淳氏、斎藤貴士氏、山口尚輝氏、関谷泉氏とは同じ研究室の同期として一緒に研究ができたことを嬉しく思います。真剣な議論から雑談まで非常に楽しい日々でした。三浦裕氏、森涼介氏、藤野主一氏、橋本獎平氏、宮崎祐太氏、堤裕樹氏、上原英晃氏、出口遊斗氏、川島僚介氏、永野智也氏、佐田智也氏、上杉悠人氏、彌吉拓哉氏には、研究に対し熱心に取り組んでいる姿に刺激を受ける事ができました。

最後になりますが、ここまで私を育て支援してくださった両親に、最大の感謝の気持ちを記してこの論文の結びとさせていただきます。本当にありがとうございました。

## 参考文献

- [1] Ties Behnke *et al.*, Technical Design Report - Volume 1: Executive Summary. 2013, arXiv:1306.6327.
- [2] <http://icfa.fnal.gov/wp-content/uploads/ICFA-Statement-Nov2017.pdf>
- [3] ATLAS Collaboration, Search for new high-mass phenomena in the dilepton final state using  $36 \text{ fb}^{-1}$  of proton-proton collision data at  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ , J. High Energ. Phys. (2017) **2017**: 182.
- [4] CMS Collaboration, Search for heavy resonances decaying to tau lepton pairs in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ , J. High Energ. Phys. (2017) **2017**: 48.
- [5] P. Osland *et al.*, Identification of extra neutral gauge bosons at the International Linear Collider, arXiv:0912.2806.
- [6] Keisuke Fujii, Christophe Grojean, Michael E. Peskin, Tim Barklow, Yuanning Gao, Shinya Kanemura, Hyungdo Kim, Jenny List, et al, Physics Case for the 250 GeV Stage of the International Linear Collider, arXiv:1710.07621
- [7] L. Evans and S. Michizono [Linear Collider Collaboration], “International Linear Collider Machine Staging Report 2017”, arXiv:1711.00568
- [8] M.A. Thomson, Particle Flow Calorimetry and the PandoraPFA Algorithm. Nucl. Instrum. Meth. **A611** (2009) 25-40.
- [9] Hiroaki Yamashiro, Kiyotomo Kawagoe, Taikan Suehara, Tamaki Yoshioka, Sudo Yuji, Hiroki Sumida, Performance evaluation of PSD for silicon ECAL, arXiv:1703.08091
- [10] <http://kekcc.kek.jp/service/kekcc/html/index.html>
- [11] <http://ilcsoft.desy.de/portal/>
- [12] W. Kilian, T. Ohl, J. Reuter, WHIZARD: Simulating Multi-Particle Processes at LHC and ILC, Eur. Phys. J. **C71** (2011) 1742.
- [13] Torbjörn Sjöstrand *et al.*, PYTHIA 6.4 physics and manual, J. High Energ. Phys. **05** (2006) 026.
- [14] GEANT4 Working Group, <http://geant4.web.cern.ch/geant4>
- [15] F. Gaede, "Marlin and LCCD Software tools for the ILC ", Nucl. Instrum. Meth. **A 559** (2006) 177 - 180.
- [16] Ties Behnke *et al.*, Technical Design Report - Volume 4: Detectors. 2013,

- arXiv:1306.6329.
- [17] Taikan Suehara, Analysis of Tau-pair process in the ILD reference detector model, arXiv:0909.2398.
  - [18] LCFIPlus, <https://confluence.slac.stanford.edu/display/ilc/LCFIPlus>
  - [19] Paul Langacker, The Physics of Heavy  $Z'$  Gauge Bosons, arXiv:0801.1345
  - [20] Shuichiro Funatsu, Hisaki Hatanaka, Yutaka Hosotani, Yuta Orikasa, Distinct signals of the gauge-Higgs unification in  $e^+e^-$  collider experiments, Phys. Lett. **B755** (2017) 297-302.
  - [21] Keisuke Harigaya, Koji Ichikawa, Anirban Kundu, Shigeki Matsumoto, Satoshi Shirai, Indirect Probe of Electroweak-Interacting Particles at Future Lepton Colliders, J. High Energ. Phys. (2015) **2015**: 105.