

重心エネルギー 500 GeV ILC における $h \rightarrow \mu^+ \mu^-$ モードの解析

川田真一

概要

¹ 本ノートは重心エネルギー 500 GeV で $h \rightarrow \mu^+ \mu^-$ モードの解析を行った際の記録である。このモードは ILD 最適化プロセスの物理ベンチマークの 1 つとして取り上げられているものであり、物理として崩壊分岐比の測定を目指すものである。

本研究の第一歩としてまず SGV サンプルを用いた解析を行い、その後フルシミュレーションサンプルを使った解析を行った。本ノートではその両方を記述する。

¹リリースノート

- 2016 年 7 月 22 日 執筆
- 2016 年 7 月 29 日 改訂、タイプミス等修正
- 2016 年 8 月 2 日 レイアウト調整
- 2016 年 8 月 31 日 タイプミス等修正
- 2016 年 9 月 13 日 改訂、数字の間違いを修正

1 序論

現在 ILD グループは、ILD 測定器最適化を行っている。もちろん各種の物理を精度良く測定したければ巨大な測定器を作ればいいが、それではコストがかかりすぎてしまう。各種の解析結果をインプットとして使い、最適な測定器のサイズやテクノロジーを追求していくプロセスである。

色々な観点から測定器最適化を行うことができるが、ここでは物理ベンチマークプロセスに注目する。表 1 は物理ベンチマークプロセスの一覧である。そしてここでは、 $h \rightarrow \mu^+ \mu^-$ の解析を行っていく。

表 1: ILD 物理ベンチマークプロセス一覧 [1]。JER (JES) は jet energy resolution (jet energy scale) を表す。

プロセス	物理	測定器パフォーマンス	\sqrt{s} (GeV)
$h \rightarrow cc$	BR	c -tag, JER	any
$h \rightarrow \mu\mu$	BR	high p tracking	500
$h \rightarrow \tau\tau$	BR, CP	τ reco., PID, track separation	250
$h \rightarrow bb$	M_h , BR	JES, JER, b -tag	500
$h \rightarrow$ invisible, $Z \rightarrow qq$	Higgs portal	JER	250
$evW \rightarrow evqq$	M_W , triple gauge coupling	JES, JER	500
$t\bar{t} \rightarrow 6$ jet	top coupling, A_{FB}	b -tag, jet charge	500
$\chi_1^+ \chi_1^-, \chi_2^0 \chi_1^0$, near degenerated	natural SUSY	low p tracking, PID	500
γXX	WIMPs	photon ES and ER, hermiticity	500

2 反応断面積と事象数

125 GeV の Higgs boson がミューオン対に崩壊する分岐比は 2.2×10^{-4} である [2]。ILC cross section database [3] による数字と、ILC におけるランニングシナリオ「H20」（約 20 年間 ILC を稼働させるシナリオ）[4, 5] を照らし合わせると、期待される事象数はそれぞれ表 2 および表 3 のようになる（左巻き偏極および右巻き偏極のみ）。左巻き偏極の場合、最も支配的なのは $\nu\bar{\nu}h$ プロセス、次に $q\bar{q}h$ プロセスであり、その他は絶望的である。右巻き偏極の場合、 $q\bar{q}h$ プロセスが最も多いがそれでも事象数は 20 を切る。

表 2: $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}h$, $h \rightarrow \mu^+\mu^-$ の期待される事象数。電子（陽電子）の偏極はそれぞれ $P(e^-) = -0.8$, $P(e^+) = +0.3$ と仮定している。

プロセス	eL.pR	eR.pL	eL.pL	eR.pR	計
$q\bar{q}h$	23.7	0.9	—	—	24.6
e^+e^-h	3.1	0.1	0.7	0.1	4.0
$\mu^+\mu^-h$	1.2	0.0	—	—	1.2
$\tau^+\tau^-h$	1.2	0.0	—	—	1.2
$\nu\bar{\nu}h$	59.8	0.3	—	—	60.1

表 3: $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}h$, $h \rightarrow \mu^+\mu^-$ の期待される事象数。電子（陽電子）の偏極はそれぞれ $P(e^-) = +0.8$, $P(e^+) = -0.3$ と仮定している。

プロセス	eL.pR	eR.pL	eL.pL	eR.pR	計
$q\bar{q}h$	1.4	15.2	—	—	16.6
e^+e^-h	0.2	1.5	0.1	0.7	2.5
$\mu^+\mu^-h$	0.1	0.8	—	—	0.9
$\tau^+\tau^-h$	0.1	0.8	—	—	0.9
$\nu\bar{\nu}h$	3.6	4.5	—	—	8.1

3 解析の準備

本解析では最も統計量が多い、左巻き偏極時の $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}h \rightarrow \nu\bar{\nu}\mu^+\mu^-$ をシグナルとして考える。種々の detector configuration を試す前に、最初のベンチマークとして、DBD configuration [6] を考えるのがよいだろう。この条件の下で測定器シミュレーションまで行った SM バックグラウンドは一応作成されている。本解析ではこれらのバックグラウンドを全て解析に含めた。この解析で使用したサンプルは以下の場所に置いてあるものである（2016年6月時点）。

`/pnfs/desy.de/ilc/prod/ilc/mc-dbd/ild/dst-merged/500-TDR_ws`

ただし 4f プロセスにおける WW hadronic と ZZ hadronic、および 6f プロセスは解析に含めなかった。4f hadronic は大量に荷電粒子を生成するため、シグナルとの分離は容易にできると考え使用しなかった。6f は一部のプロセスが 2 重に含まれていることを懸念して現在は用いていない。今後はこれも解析に含めるべきであろう。

次にシグナルサンプルであるが、 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}h$, $h \rightarrow \mu^+\mu^-$ の stdhep [7] ファイルは既に存在する。しかし測定器シミュレーションまで通した slcio [8] ファイルは存在していなかった。そこでまず初めに簡易シミュレーションツールである SGV [9] を使用し、測定器シミュレーションを通したサンプルを作成した。SGV は簡易なツールであるため、例えばカロリメータにおけるエネルギー損失などはある定数で決められているなど、いわゆるフルシミュレーションではないことに注意が必要である。しかし測定器の geometry を変更するなどといったことが容易にできるため、種々の detector configuration を試す場合は SGV を使う方がよいだろう。フルシミュレーションだと十分な事象数を生成するためには相当量の時間を消費しなくてはならないためである。

その後、DBD configuration によるフルシミュレーションサンプルが作成された。これは ILCDirac [10] を用いて作成されたサンプルである。これを用いた解析は後の章で記述することとする。

4 SGV サンプルを用いた解析

ここでは SGV サンプルを用いた解析について記述する。

4.1 事象再構成

ミューオンの再構成の手順として、以下の 4 つを要求した。続く 4 つの図は、シグナルにおける各パラメータの分布図である。

- $E_{\text{track}} > 15 \text{ GeV}$

- $\frac{E_{\text{ECAL}}}{E_{\text{ECAL}} + E_{\text{HCAL}}} < 0.5$
- $\frac{E_{\text{ECAL}} + E_{\text{HCAL}}}{|P_{\text{track}}|} < 0.3$
- $\left| \frac{d_0}{\sigma(d_0)} \right| < 3$

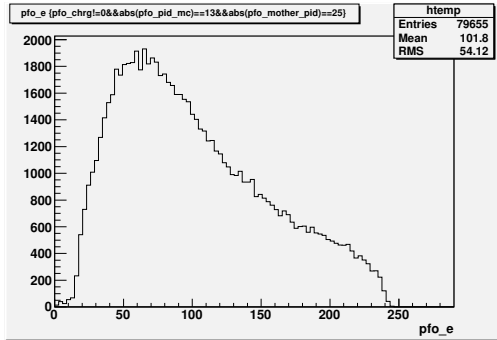


図 1: E_{track} 分布。

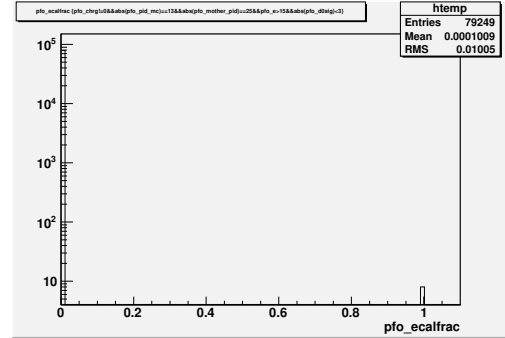


図 2: $\frac{E_{\text{ECAL}}}{E_{\text{ECAL}} + E_{\text{HCAL}}}$ 分布。

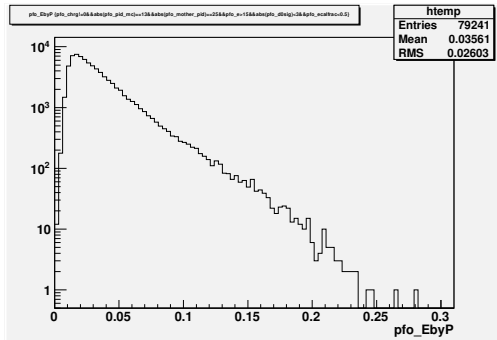


図 3: $\frac{E_{\text{ECAL}} + E_{\text{HCAL}}}{|P_{\text{track}}|}$ 分布。

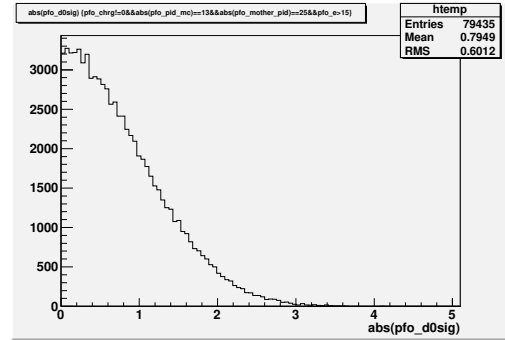


図 4: $\left| \frac{d_0}{\sigma(d_0)} \right|$ 分布。

これらを要求すると、シグナル事象に対してちょうど1本の μ^+ とちょうど1本の μ^- を再構成できた割合は98.4%であった。しかしながらエネルギー損失の分布から分かるように、これはSGVサンプルであることを忘れてはならない。

さらにこれらの後に、FSR photonの影響を補正する措置を加えた。FSRなどのためにミュオン対の不変質量スペクトルは低い方になってしまうため、これを補正することを目的としている。再構成されたミュオンからの角度が $\cos\theta > 0.99$ である中性粒子の4元運動量をミュオンに加えることによって補正を行った。以下の2つの図は、ミュオン対の不変質量を補正ありなしで比較したものである（全範囲およびズームアップ）。黒が補正なし、青が $\cos\theta > 0.99$ で補正した場合のヒストグラムである。見ての通り、ピーク領域では補正を適用した方がイベント数が多いことが分かる。

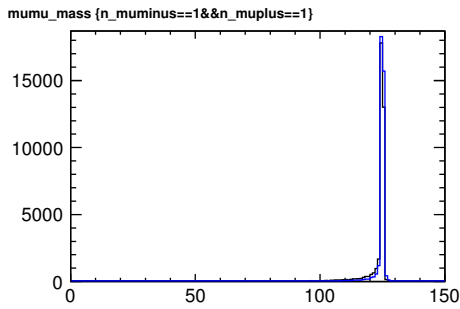


図 5: ミューオン対の不変質量分布。ビン幅は 1 GeV / bin である。

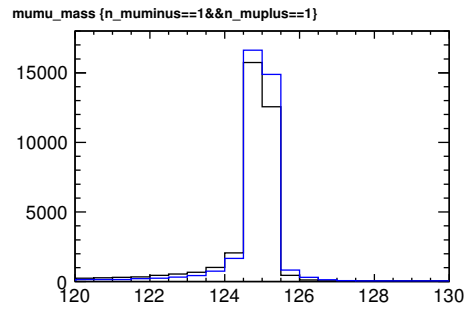


図 6: ミューオン対の不変質量分布（ズームアップ）。ビン幅は 0.5 GeV / bin である。

4.2 解析

最適化を始める前の事前の選別として以下を要求した。

- ちょうど 1 本の μ^+ とちょうど 1 本の μ^- がある
- イベント中の荷電粒子の数が 4 本以下
- $124 < M_{\mu\mu} < 126$ GeV

ここで $M_{\mu\mu}$ は再構成されたミューオン対の不変質量（FSR 補正あり）である。以下の 2 つの図はそれぞれ荷電粒子の数および $M_{\mu\mu}$ である。

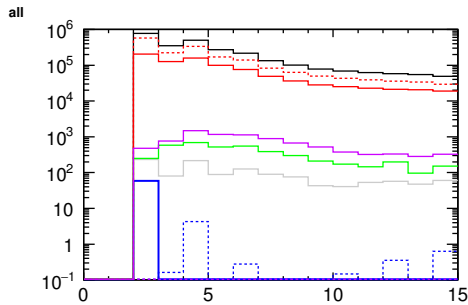


図 7: 事象中の荷電粒子の数の分布。

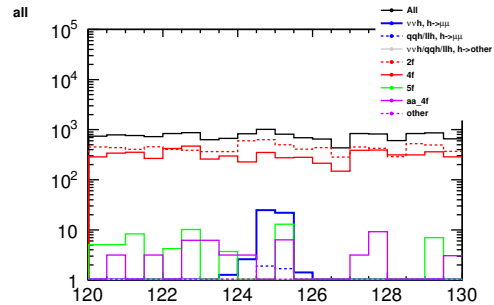


図 8: ミューオン対の不変質量分布。

その後、最適なカットとして以下を適用した。

- 可視エネルギー $E_{vis} < 285$ GeV
- $P_t > 50$ GeV
- $thrust < 0.91$

ここにおける P_t は事象中で観測された全ての粒子の 4 元運動量を足し合わせて得られた 4 元運動量から計算される横方向運動量である。以下の 3 つの図はそれぞれの変数の分布である。

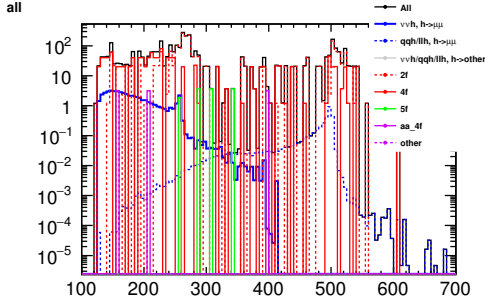


図 9: E_{vis} 分布。

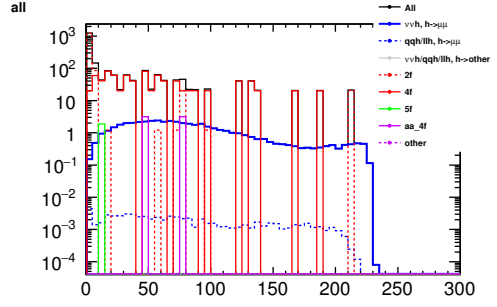


図 10: P_t 分布。

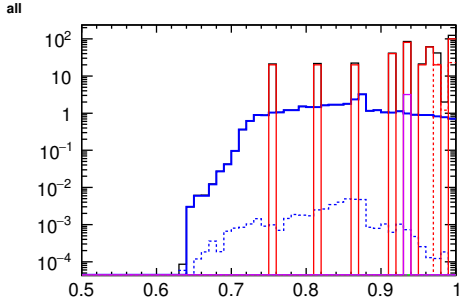


図 11: thrust 分布。

表 4 は SGV サンプルを用いた場合のカットテーブルである。

表 4: SGV サンプルを用いた時のカットテーブル。

	$\nu\nu h$	$qqh+\ell\ell h$	ffh				
	$h \rightarrow \mu\mu$	$h \rightarrow \mu\mu$	$h \rightarrow \text{other}$	2f	4f	5f	$\gamma\gamma \rightarrow 4f$
No cut	60.04	20.20	4.119×10^5	4.273×10^7	$3,802 \times 10^7$	2.208×10^5	3.356×10^5
# μ^\pm	58.93	18.25	6669.55	1.998×10^6	1.125×10^6	5891.06	1.095×10^4
# tracks	58.93	4.47	528.13	1.135×10^6	4.901×10^5	1523.30	2725.73
$M_{\mu\mu}$	50.71	3.86	0	2135.56	1133.50	12.92	9.45
E_{vis}	50.19	0.08	0	1354.20	845.73	1.88	6.30
P_t	35.73	0.05	0	44.81	381.91	0	3.15
thrust	27.61	0.05	0	0	60.26	0	0

この解析から $N_{\text{sig}} = 27.61$ 、 $N_{\text{bkg}} = 60.31$ が得られた。ゆえに統計的有意性 (significance) は $\frac{27.61}{\sqrt{27.61 + 60.31}} =$

2.94、精度は $\frac{\Delta(\sigma \times \text{BR})}{(\sigma \times \text{BR})} = 34\%$ となる。

5 フルシミュレーションサンプルを用いた解析

ここではフルシミュレーションサンプルを用いた解析について記述する。

5.1 事象再構成

ミューオンの再構成の手順として、以下の5つを要求した。続く5つの図は、シグナルにおける各パラメータの分布図である。

- $E_{\text{track}} > 15 \text{ GeV}$
- $\frac{E_{\text{ECAL}}}{E_{\text{ECAL}} + E_{\text{HCAL}}} < 0.6$
- $\frac{E_{\text{ECAL}} + E_{\text{HCAL}}}{|P_{\text{track}}|} < 0.4$
- $E_{\text{yoke}} > 1 \text{ GeV}$
- $\left| \frac{d_0}{\sigma(d_0)} \right| < 5$

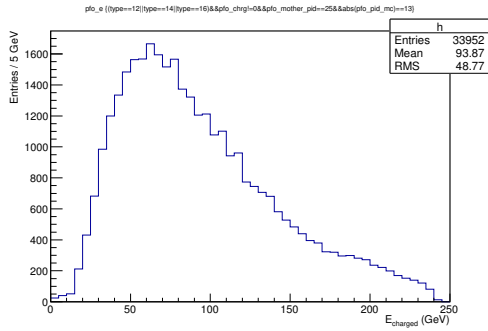


図 12: E_{track} 分布。

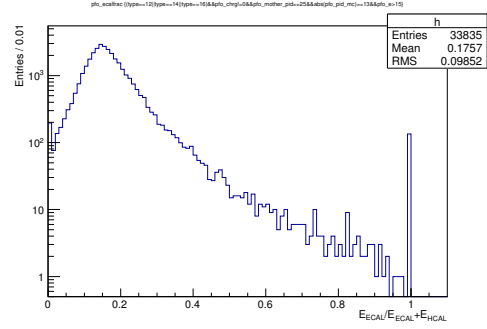


図 13: $\frac{E_{\text{ECAL}}}{E_{\text{ECAL}} + E_{\text{HCAL}}}$ 分布。

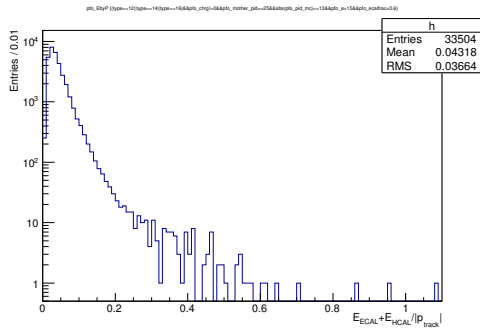


図 14: $\frac{E_{\text{ECAL}} + E_{\text{HCAL}}}{|P_{\text{track}}|}$ 分布。

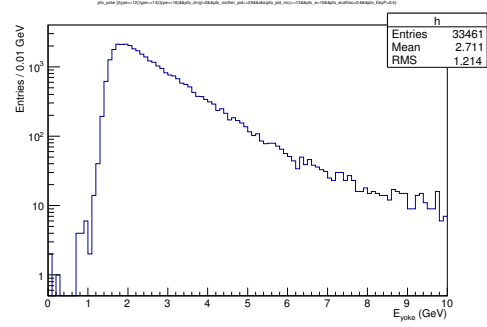


図 15: E_{yoke} 分布。

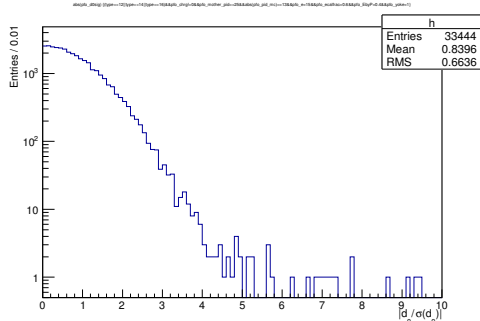


図 16: $\left| \frac{d_0}{\sigma(d_0)} \right|$ 分布。

これらを要求すると、シグナル事象に対してちょうど1本の μ^+ とちょうど1本の μ^- を再構成できた割合は 94.6%であった。

さらにこれらの後に、FSR photon の影響を補正する措置を加えた。補正の仕方は4章と同じである。以下の2つの図は、ミューオン対の不変質量を補正ありなしで比較したものである（全範囲およびズームアップ）。黒が補正なし、青が $\cos \theta > 0.99$ で補正した場合のヒストグラムである。

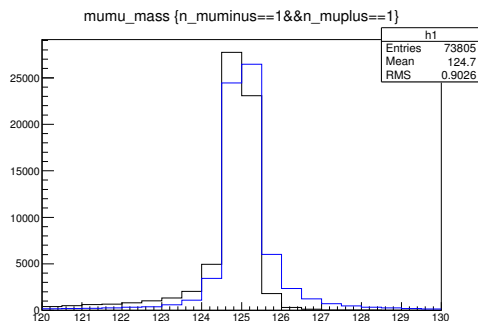
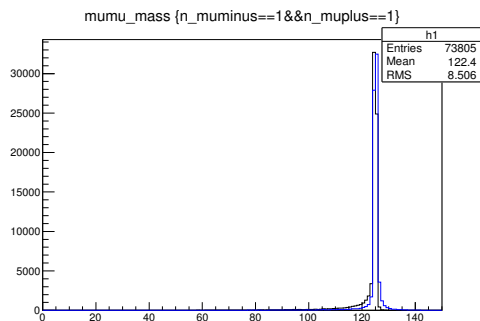


図 17: ミューオン対の不変質量分布。ピン幅は 1 GeV 図 18: ミューオン対の不変質量分布（ズームアップ）。ピン幅は 0.5 GeV / bin である。

5.2 解析

最適化を始める前の事前の選別として以下を要求した。

- ちょうど1本の μ^+ とちょうど1本の μ^- がある
- イベント中のエネルギー 15 GeV 以上の荷電粒子の数 ($N_{E>15\text{GeV}}^{\text{track}}$) が4本以下
- $124 < M_{\mu\mu} < 126$ GeV

ここで $M_{\mu\mu}$ は再構成されたミューオン対の不変質量（FSR 補正あり）である。 $N_{E>15\text{GeV}}^{\text{track}}$ に対するカットを設けたのは、いわゆる $\gamma\gamma \rightarrow \text{hadrons}$ バックグラウンドの影響を避けるためである。このバックグラウンドのために、シグナルミューオン以外の荷電粒子が生成されてしまう。ゆえに、単なる荷電粒子の本数ではこの影響が強く残ってしまい、有効な変数とはならない。しかし $\gamma\gamma \rightarrow \text{hadrons}$ バックグラウンドはエネルギーの低い粒子が多く、このような変数を用いることで影響を抑えることができる。以下の2つの図はそれぞれ $N_{E>15\text{GeV}}^{\text{track}}$ および $M_{\mu\mu}$ である。

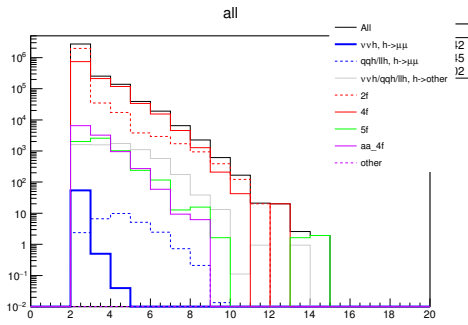


図 19: $N_{E>15\text{GeV}}^{\text{track}}$ 分布。

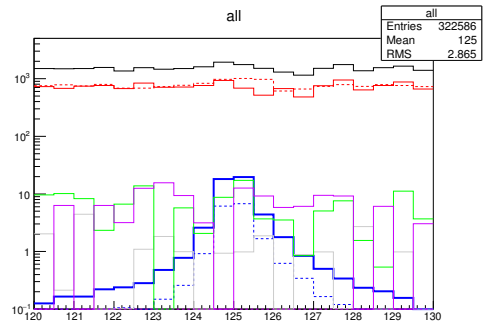


図 20: ミューオン対の不変質量分布。

その後、最適なカットとして以下を適用した。

- 可視エネルギー $E_{\text{vis}} < 335$ GeV
- $P_t > 25$ GeV
- $\text{thrust} < 0.91$
- $|\cos \theta_{\text{thrust}}| < 0.98$
- $|\cos \theta_{\text{miss}}| < 0.98$

ここにおける P_t は事象中で観測された全ての粒子の 4 元運動量を足し合わせて得られた 4 元運動量から計算される横方向運動量である。 θ_{thrust} はビーム軸と thrust 軸との間の角度、 θ_{miss} は missing angle を表し、事象中で観測された粒子の 4 元運動量の総和から得られる 4 元運動量のベクトル方向とビーム軸との間の角度である。以下の 5 つの図はそれぞれの変数の分布である。

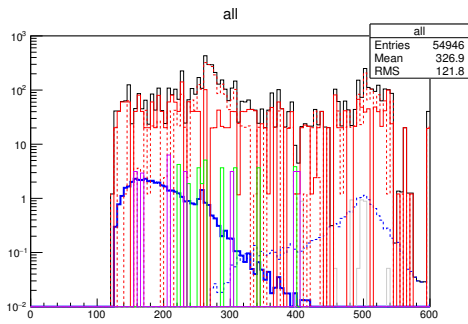


図 21: E_{vis} 分布。

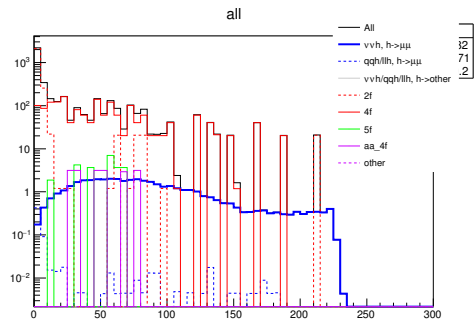


図 22: P_t 分布。

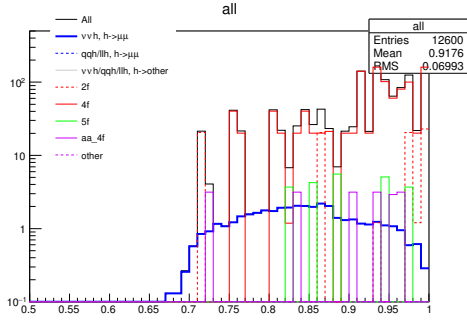


図 23: thrust 分布。

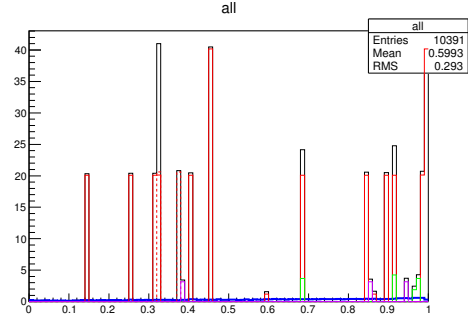


図 24: $\cos \theta_{\text{thrust}}$ 分布。

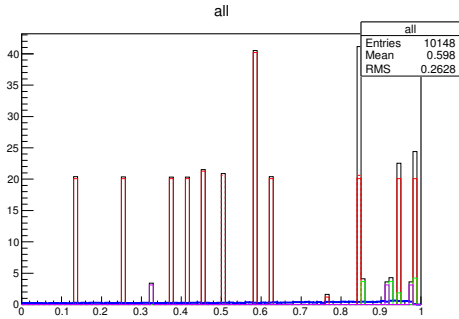


図 25: $\cos \theta_{\text{miss}}$ 分布。

表 5 はフルシミュレーションサンプルを用いた場合のカットテーブルである。

表 5: フルシミュレーションサンプルを用いた時のカットテーブル。

	vvh	$qqh+\ell\ell h$	ffh	2f	4f	5f	$\gamma\gamma \rightarrow 4f$
	$h \rightarrow \mu\mu$	$h \rightarrow \mu\mu$	$h \rightarrow \text{other}$				
No cut	57.53	31.13	4.116×10^5	4.225×10^7	$3,808 \times 10^7$	2.209×10^5	3.356×10^5
$\# \mu^\pm$	54.41	27.46	6818.81	2.025×10^6	1.124×10^6	5979.80	1.109×10^4
$\# N_{E>15\text{GeV}}^{\text{track}}$	54.41	18.92	4920.84	2.015×10^6	1.069×10^6	5592.42	1.074×10^4
$M_{\mu\mu}$	44.70	15.46	3.80	3782.87	2894.26	31.63	24.96
E_{vis}	44.26	0.71	0	2454.88	1721.20	24.10	18.66
P_t	40.95	0.15	0	87.20	1129.30	22.22	18.66
thrust	32.88	0.15	0	41.19	283.65	13.46	9.45
$ \cos \theta_{\text{thrust}} $	31.86	0.14	0	41.19	223.35	13.46	9.45
$ \cos \theta_{\text{miss}} $	31.77	0.14	0	41.19	203.26	9.24	9.45

この解析から $N_{\text{sig}} = 31.77$ 、 $N_{\text{bkg}} = 263.28$ が得られた。ゆえに統計的有意性は $\frac{31.77}{\sqrt{31.77 + 263.28}} = 1.85$ 、精度は $\frac{\Delta(\sigma \times \text{BR})}{(\sigma \times \text{BR})} = 54\%$ となる。

6 結論・今後の進展

重心エネルギー 500 GeV の下で、 $h \rightarrow \mu^+ \mu^-$ チャンネルの検討を行った。非常に小さい崩壊分岐比ゆえ、この解析は統計的に難しい。解析は SGV サンプルとフルシミュレーションサンプルの両方を用いて行った。

SGV サンプルを用いた解析では $\frac{\Delta(\sigma \times \text{BR})}{(\sigma \times \text{BR})} = 34\%$ となったが、フルシミュレーションサンプルでは 54% となり、相対的に約 50% 程度悪化している。これは $\gamma\gamma \rightarrow \text{hadrons}$ バックグラウンドの影響が強く、荷電粒子の本数の変数が SGV の時に比べて有効に働いていないことが挙げられる。

今後の課題としては、FSR 補正を含めた上でのミューオン対の測定誤差 $\sigma(M_{\mu^+\mu^-})$ の導入およびそれを用いた re-weighting が考えられる。さらなる最適化を目指す場合は、前述の σ に加えて、ミューオン間の角度 $\theta_{\mu^+\mu^-}$ 、2 つのうちエネルギーの高いミューオンの各種物理量などを導入し、さらにそれらを TMVA に投入することが考えられる。ただしバックグラウンドの統計量は絶望的に足りないため、TMVA を用いるには注意が必要である。また、 $e^+e^- \rightarrow Zh$ (Higgs-strahlung) プロセスと $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}h$ (WW -fusion) プロセスを切り分ける際にどうするか、という点も残っている。

参考文献

- [1] Junping Tian, Keisuke Fujii, Jenny List
“physics benchmarks for detector optimisation”
ILD Software & Optimization Workshop (2016/Feb./22-26)
- [2] SM Higgs Branching Ratio and Total Decay Widths (update in CERN Report4 2016)
<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/LHCPhysics/CERNYellowReportPageBR>
- [3] <http://www-jlcl.kek.jp/jlcl/en/ilc-xsec-db>
- [4] Keisuke Fujii, Christophe Grojean, Michael E. Peskin, Tim Barklow, Yuanning Gao, Shinya Kanemura, Hyungdo Kim, Jenny List, Mihoko Nojiri, Maxim Perelstein, Roman Pöschl, Jürgen Reuter, Frank Simon, Tomohiko Tanabe, Jaehoon Yu, James D. Wells, Hitoshi Murayama, Hitoshi Yamamoto
“Physics Case for the International Linear Collider”
arXiv:1506.05992v2 [hep-ex] (2015)
- [5] T. Barklow, J. Brau, K. Fujii, J. Gao, J. List, N. Walker, K. Yokoya
“ILC Operating Scenarios”
arXiv:1506.07830v1 [hep-ex] (2015)
- [6] Ties Behnke, James E. Brau, Philip Burrows, Juan Fuster, Michael Peskin, Marcel Stanitzki, Yasuhiro Sugimoto, Sakue Yamada, Hitoshi Yamamoto
“The International Linear Collider Technical Design Report Volume 4: Detectors”
arXiv:1306.6329 [hep-ex] (2013)
- [7] Lynn Garren
“Stdhep 5.06.01 Monte Carlo Standardization at FNAL Fortran and C Implementation” (2006)
<http://cepa.fnal.gov/psm/stdhep/>
- [8] F. Gaede, T. Behnke, N. Graf, T. Johnson
“LCIO — A persistency framework for linear collider simulation studies”
arXiv:physics/0306114 [physics.data-an] (2003), proceedings of CHEP03
- [9] Mikael Berggren
“SGV 3.0 — a fast detector simulation”
arXiv:1203.0217 [physics.ins-det] (2012)
- [10] <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CLIC/DiracUsage>