

重心エネルギー 500 GeV ILC における $h \rightarrow \mu^+ \mu^-$ モードの解析 — part 2

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り、文献 [1] の続きである。ここでは MC サンプル量を増やした際の解析とその結果について記述する。

¹リリースノート

- 2016 年 8 月 10 日 執筆
- 2016 年 8 月 14 日 解析における間違いを見つけたため全面修正
- 2016 年 8 月 31 日 タイプミス修正

1 サンプル増量

前回の解析 [1] でも多くの MC サンプルを使用したのが、特に 4f プロセスはウェイトが大きかった。また一部のサンプルはそもそも解析に加わっていなかった。今回はそれらのサンプルも増量して解析を行う。具体的には以下のプロセスである。

- $e^\pm\gamma \rightarrow 3f$ (新規追加、SGV [2])
- $\gamma\gamma \rightarrow 2f$ (新規追加、SGV)
- $e^+e^- \rightarrow 4f$
 - WW hadronic (新規追加)
 - ZZ hadronic (新規追加)
 - singleZnunu leptonic (増量)
 - ZZWWMix leptonic (増量)
 - singleZsingleWMix leptonic (増量)
 - singleZee leptonic (増量)

それぞれ、8月2日時点での以下の場所にあるサンプルを用いた。

- $e^\pm\gamma \rightarrow 3f$ および $\gamma\gamma \rightarrow 2f$:
`/pnfs/desy.de/ilc/users/berggren/mc-dbd/sgv-dst_6/500-TDR_ws/1f_3f(aa_2f)`
- $e^+e^- \rightarrow 4f$:
`/pnfs/desy.de/ilc/prod/ilc/mc-dbd/ild/dst-merged/500-TDR_ws/XXX`

解析において仮定する反応断面積の数字や積分ルミノシティなどは文献 [1] で用いたものと同じである。 $e^\pm\gamma \rightarrow 3f$ と $\gamma\gamma \rightarrow 2f$ の反応断面積の数字は、slcio ファイルの数字そのものを使用した。また、追加生成された 4f slcio ファイルにおける process パラメータが単に 4f としか書かれていなかったのもので、これらは自身のプロセッサで temporary に対応して読み込んだ。

2 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。

2.1 事象再構成

ミューオンの再構成手順および FSR 補正の手順は文献 [1] で用いた手順と全く同じである。

2.2 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3つの図はそれぞれ荷電粒子の数、 $M_{\mu\mu}$ およびシグナル領域のズームアップである。

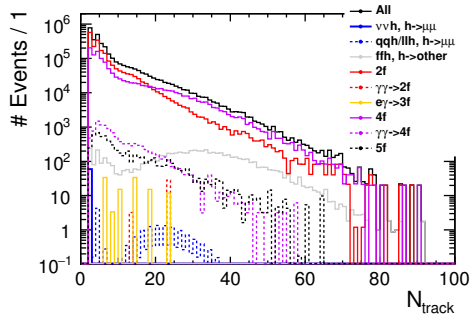


図 1: 事象中の荷電粒子の数の分布。

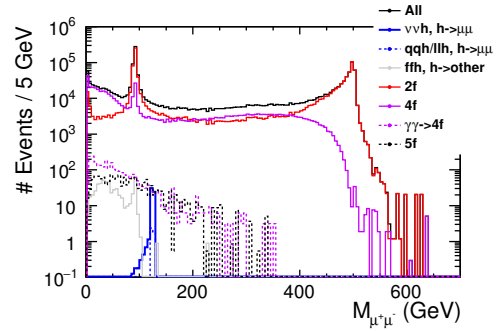


図 2: ミューオン対の不変質量分布。

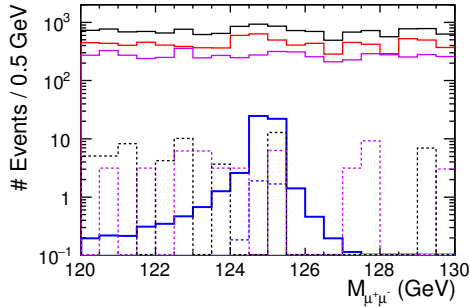


図 3: ミューオン対の不変質量分布 (シグナル領域のズームアップ)。

この時点で、新たに追加したサンプルである $e^\pm\gamma \rightarrow 3f$ と $\gamma\gamma \rightarrow 2f$ は全て消え去った。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 $E_{\text{vis}} < 285$ GeV
- $P_t > 50$ GeV
- $\text{thrust} < 0.88$
- $|\cos\theta_{\text{thrust}}| < 0.96$

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4つの図はそれぞれの変数の分布である。

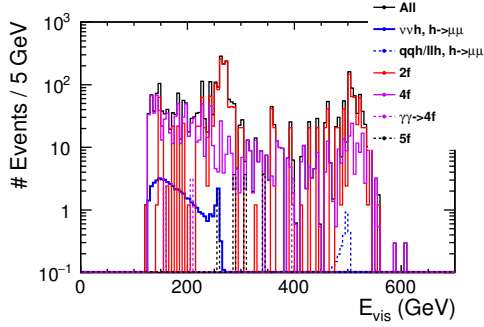


図 4: E_{vis} 分布。

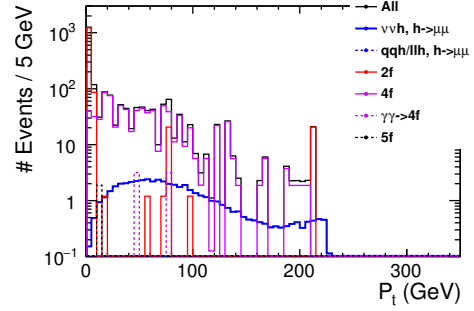


図 5: P_t 分布。

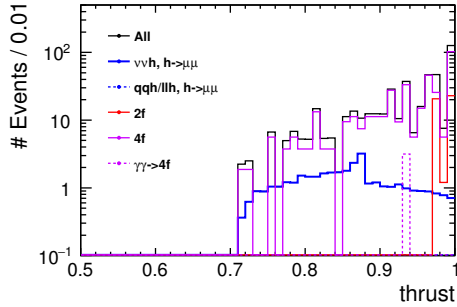


図 6: thrust 分布。

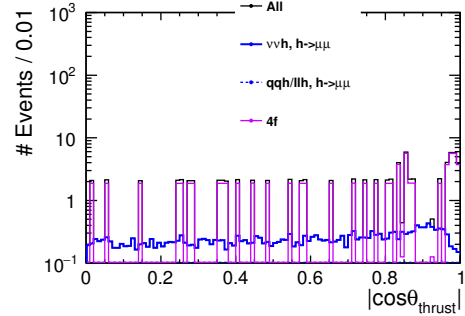


図 7: $|\cos \theta_{\text{thrust}}|$ 分布。

表 1 は SGV サンプルを用いた場合のカットテーブルである。

表 1: SGV サンプルを用いた時のカットテーブル。

	$\nu\nu h$ $h \rightarrow \mu\mu$	$qqh + \ell\ell h$ $h \rightarrow \mu\mu$	ffh $h \rightarrow \text{other}$	2f	$\gamma\gamma \rightarrow 2f$	3f	4f	$\gamma\gamma \rightarrow 4f$	5f
No cut	60.07	20.19	4.116×10^5	4.224×10^7	4.283×10^9	4.269×10^8	4.592×10^7	3.356×10^5	2.209×10^5
$\# \mu^\pm$	58.95	18.24	6669.72	1.999×10^6	31.33	112.83	1.136×10^6	1.095×10^4	5891.07
# tracks	58.95	4.47	528.13	1.135×10^6	0	0	4.917×10^5	2725.73	1523.30
$M_{\mu\mu}$	50.74	3.86	0	2135.56	0	0	1150.16	9.45	12.92
E_{vis}	50.21	0.07	0	1354.20	0	0	810.57	6.30	1.88
P_t	35.75	0.05	0	44.81	0	0	379.31	3.15	0
thrust	24.20	0.04	0	0	0	0	75.20	0	0
$ \theta_{\text{thrust}} $	23.41	0.04	0	0	0	0	56.48	0	0

この解析から $N_{\text{sig}} = 23.41$ 、 $N_{\text{bkg}} = 56.52$ が得られた。ゆえに統計的有意性は $\frac{23.41}{\sqrt{23.41 + 56.62}} = 2.62$ 、精度は $\frac{\Delta(\sigma \times \text{BR})}{(\sigma \times \text{BR})} = 38\%$ となる。

3 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。

3.1 事象再構成

ミューオンの再構成の手順は、基本的に文献 [1] のものと同じである。ただし 3f と $\gamma\gamma \rightarrow 2f$ は SGV サンプルであるため、ヨークにおける情報が保存されていない。ゆえに、 $E_{\text{yoke}} > 1$ GeV の条件を外してミュー

オンの再構成手順とした。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%であり、再構成の効率そのものは変化なしであった。なお、FSR補正は文献 [1] と同様である。

3.2 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 P_t が5 GeV以上の荷電粒子の数 ($N_{P_t > 5\text{GeV}}^{\text{track}}$) 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。 $N_{P_t > 5\text{GeV}}^{\text{track}}$ 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 P_t 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。これは前回 [1] からの改良を目指したポイントである。以下の3つの図はそれぞれ $N_{P_t > 5\text{GeV}}^{\text{track}}$ 、 $M_{\mu\mu}$ およびそのズームアップである。

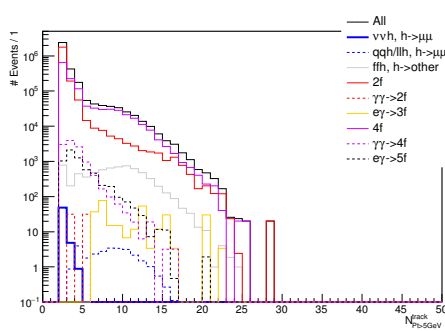


図 8: $N_{P_t > 5\text{GeV}}^{\text{track}}$ 分布。

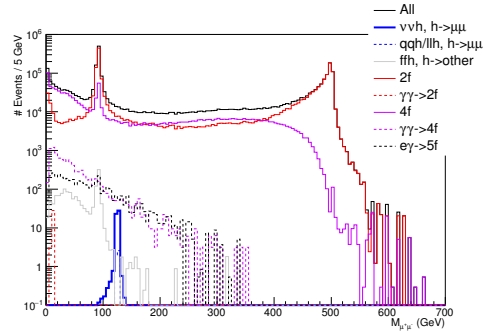


図 9: ミューオン対の不変質量分布。

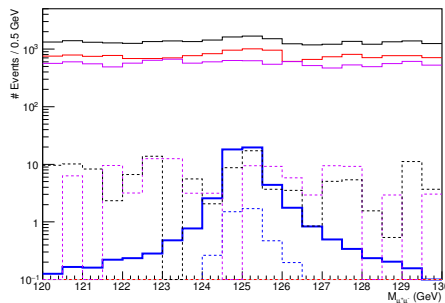


図 10: ミューオン対の不変質量分布 (ズームアップ)。

この時点で3fプロセスは完全に消えた。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 $E_{\text{vis}} < 315$ GeV

- $P_t > 65 \text{ GeV}$
- $\text{thrust} < 0.88$
- $|\cos \theta_{\text{thrust}}| < 0.96$

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 軸の間の角度を表す。以下の4つの図はそれぞれの変数の分布である。

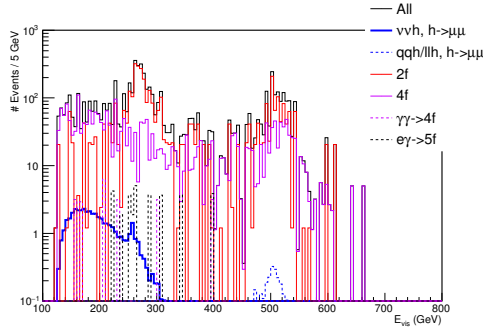


図 11: E_{vis} 分布。

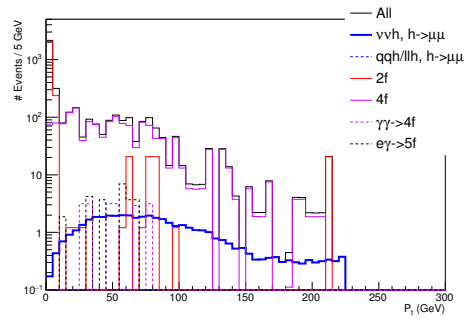


図 12: P_t 分布。

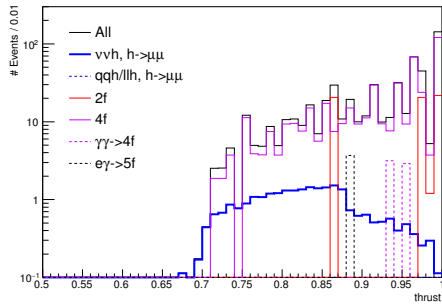


図 13: thrust 分布。

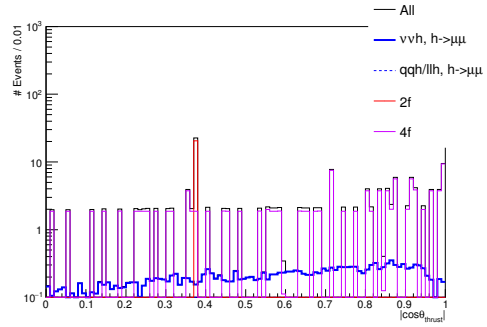


図 14: $\cos \theta_{\text{thrust}}$ 分布。

表 2 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 2: 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。

	$\nu\nu h$ $h \rightarrow \mu\mu$	$qqh + \ell\ell h$ $h \rightarrow \mu\mu$	$f\bar{f}h$ $h \rightarrow \text{other}$	2f	$\gamma\gamma \rightarrow 2f$	3f	4f	$\gamma\gamma \rightarrow 4f$	5f
No cut	57.53	31.13	4.116×10^5	4.224×10^7	4.283×10^9	4.269×10^8	4.592×10^7	3.356×10^5	2.209×10^5
# μ^\pm	54.39	27.39	6895.00	2.071×10^6	62.62	299.75	1.209×10^6	1.131×10^4	6125.00
# $N_{\text{Track}}^{F_t > 5 \text{ GeV}}$	54.27	4.89	1425.76	2.014×10^6	31.28	0	9.826×10^5	9544.48	4411.00
$M_{\mu\mu}$	44.61	3.94	0	3741.41	0	0	2407.24	21.81	31.63
E_{vis}	43.88	0.17	0	2390.68	0	0	1529.57	18.66	24.10
P_t	25.97	0.07	0	64.20	0	0	457.80	6.07	3.68
thrust	20.48	0.05	0	20.60	0	0	118.92	0	0
θ_{thrust}	19.84	0.05	0	20.60	0	0	102.07	0	0

この解析から $N_{\text{sig}} = 19.84$ 、 $N_{\text{bkg}} = 122.72$ が得られた。ゆえに統計的有意性は $\frac{19.84}{\sqrt{19.84 + 122.72}} = 1.66$ 、精度は $\frac{\Delta(\sigma \times \text{BR})}{(\sigma \times \text{BR})} = 60\%$ となる。

4 結論・今後の進展

文献 [1] からの進展として、MC サンプルを増量して統計誤差の削減を図った。さらに今まで考えてこなかったプロセスも解析に含めた。結果として、SGV サンプルを用いた場合で 38%、フルシミュレーション サンプルを用いた場合で 60% という結果となった。いずれも文献 [1] の結果に比べて相対的に 10% 程度悪化した。しかし新たに追加した $3f$ や $\gamma\gamma \rightarrow 2f$ プロセスは全てカットすることができた。

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。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、という点もある。

参考文献

- [1] 川田真一 “重心エネルギー 500 GeV ILC における $h \rightarrow \mu^+\mu^-$ モードの解析”
- [2] Mikael Berggren
“SGV 3.0 — a fast detector simulation”
arXiv:1203.0217 [physics.ins-det] (2012)