



ILCにおけるトツプクオーク 対生成閾値領域の研究

2013/11/26 @三重
堀口朋裕 (東北大学)

目次

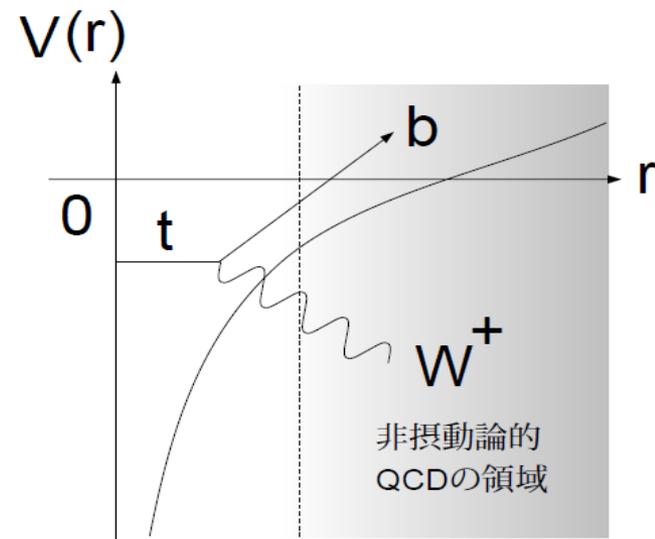
- トップクォーク
- 国際リニアコライダー
- モチベーション
 - 断面積測定
 - 閾値スキャン
 - 測定項目
- シミュレーション条件
- 再構成法
- 事象選別
- 結果
 - トップ湯川結合の測定
 - 質量、崩壊幅のフィット
- まとめ

トップクォーク

- 1995年にTevatronで発見
- 質量がほかのクォークに比べ非常に重い。
 - 約173GeV \Rightarrow EWSBスケールに関係??
- 崩壊幅が大きく寿命が短い。

$$\Gamma_t \simeq \frac{G_F m_t^3}{8\sqrt{2}\pi} |V_{tb}|^2 \sim 1.5 [\text{GeV}] \gg \Lambda_{\text{QCD}}$$

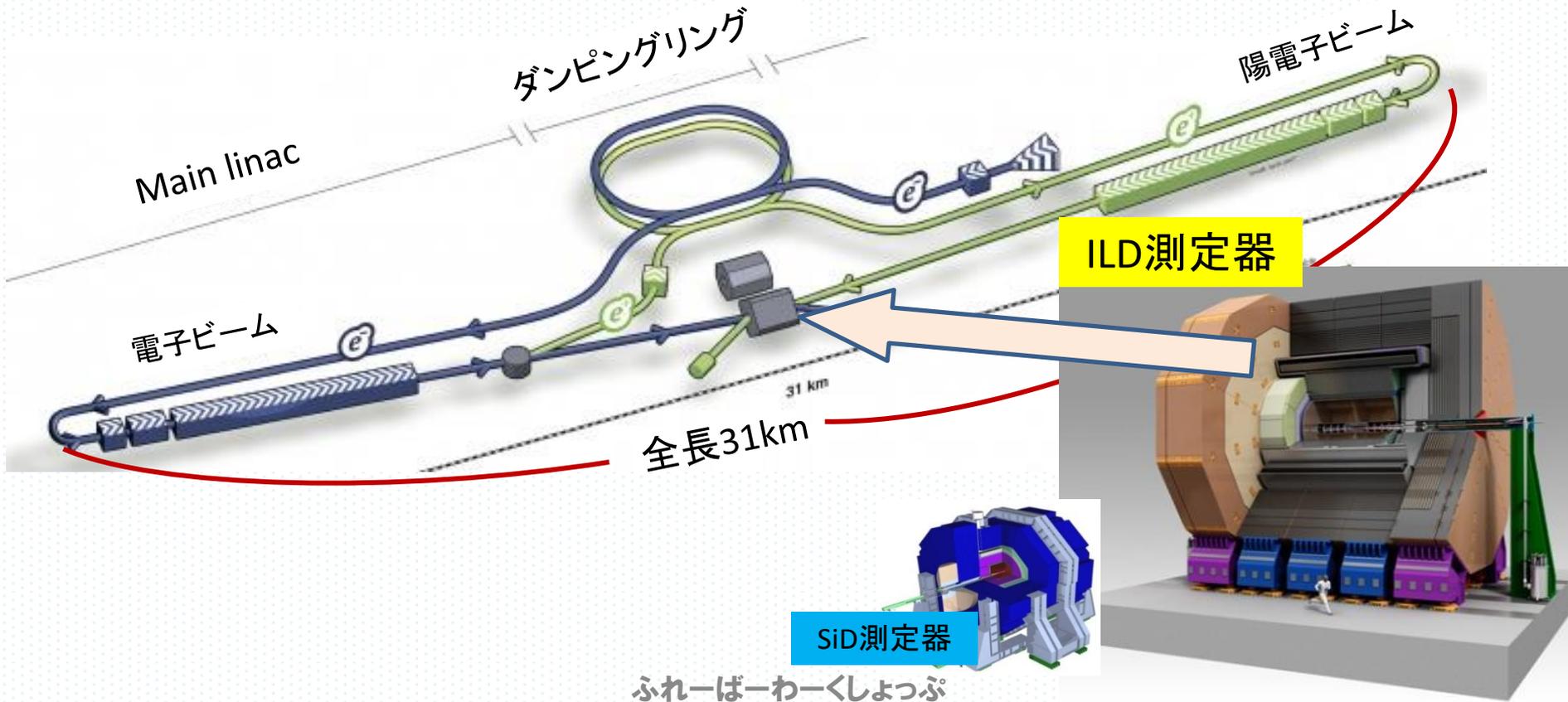
- ハドロン化前 & 非摂動領域になる前に崩壊
- クォークの性質を見るのに最適
- ハドロンコライダーで測定した質量はよくわからない質量
 - $173.5 \pm 0.6 \pm 0.8 \text{ GeV}$ (PDG)
 - ジェットの再構成をした不変質量分布ではカラーを持った粒子を厳密に知ることはできない。
 - 明確な理論の定義のある質量がほしい。
 - ex) M_{sbar} mass $160 \pm 5 \text{ GeV}$ (PDG)
 - ILCで高精度の断面積測定により質量の決定



閾値付近のトップ対共鳴状態の振舞

国際リニアコライダー

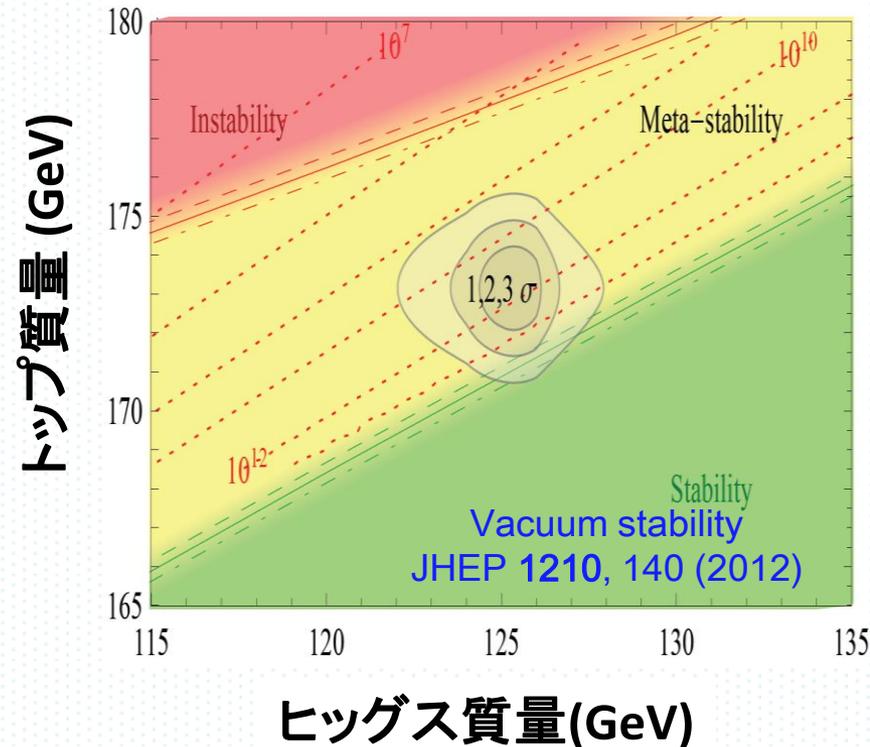
- 全長31kmの電子陽電子衝突型の線形加速器
 - 距離を伸ばしてup grade可能
- 重心系エネルギー: 250 - 500 GeV ⇒ 1 TeV
- クリーンな環境、エネルギーと偏極を設定可
 - 閾値スキャン測定が可能



目的

- トップクォークの質量(m_t)
 - \overline{MS} scheme ($m_t^{\overline{MS}}$)
 - Potential subtraction scheme** (m_t^{PS})
 - ** Potential subtraction scheme
 - arXiv:hep-ph/9804241
- 崩壊幅(Γ_t)
 - anomalous coupling
 - exotic decay
- トップ湯川結合(y_t)
- 強い相互作用の結合定数 α_s
- QCD波動方程式

真空の安定性の評価



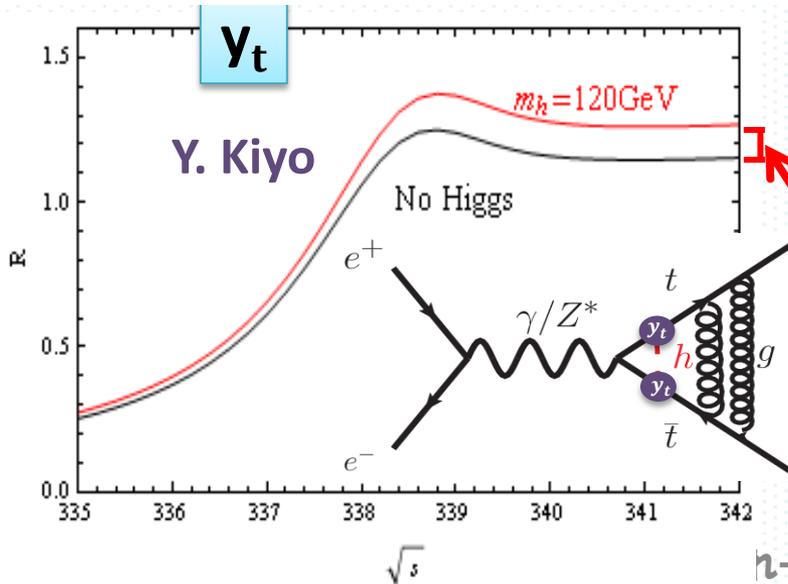
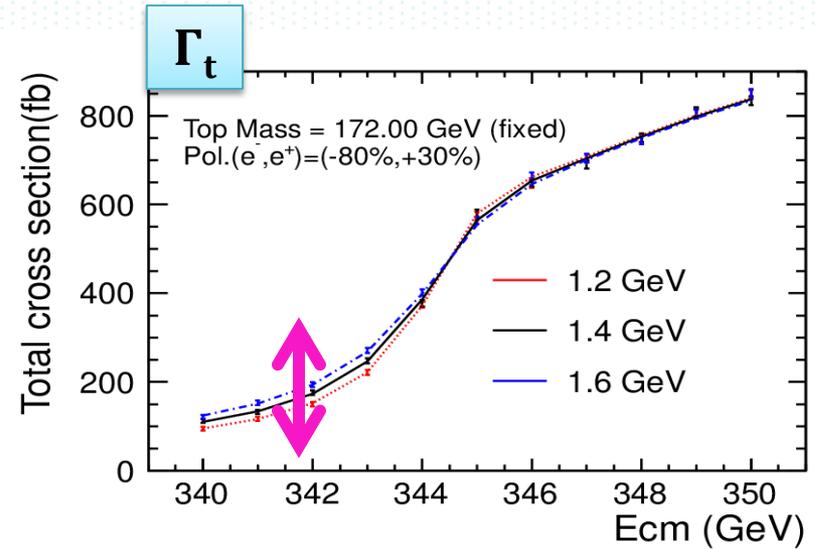
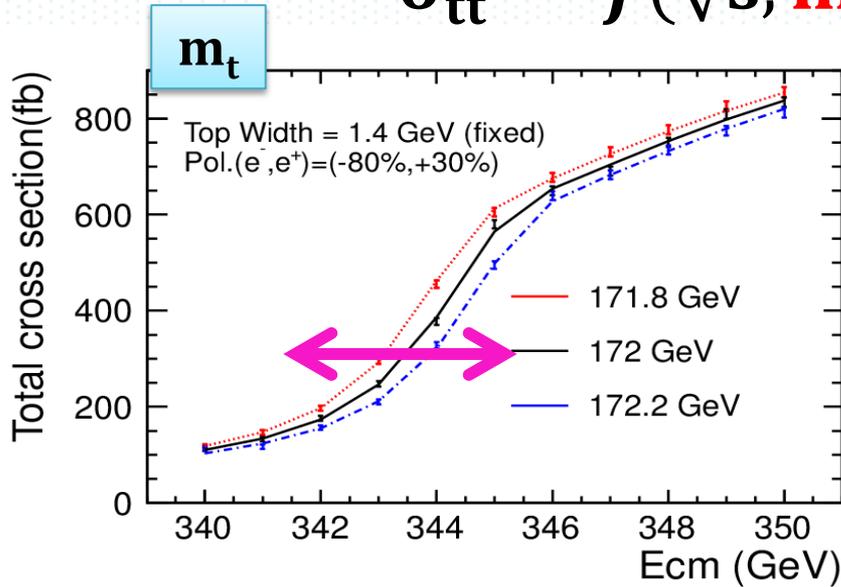
m_t, Γ_t and y_t の測定

$$\sigma_{tt} = f(\sqrt{s}, m_t, \Gamma_t, \alpha_s, m_h, y_t)$$

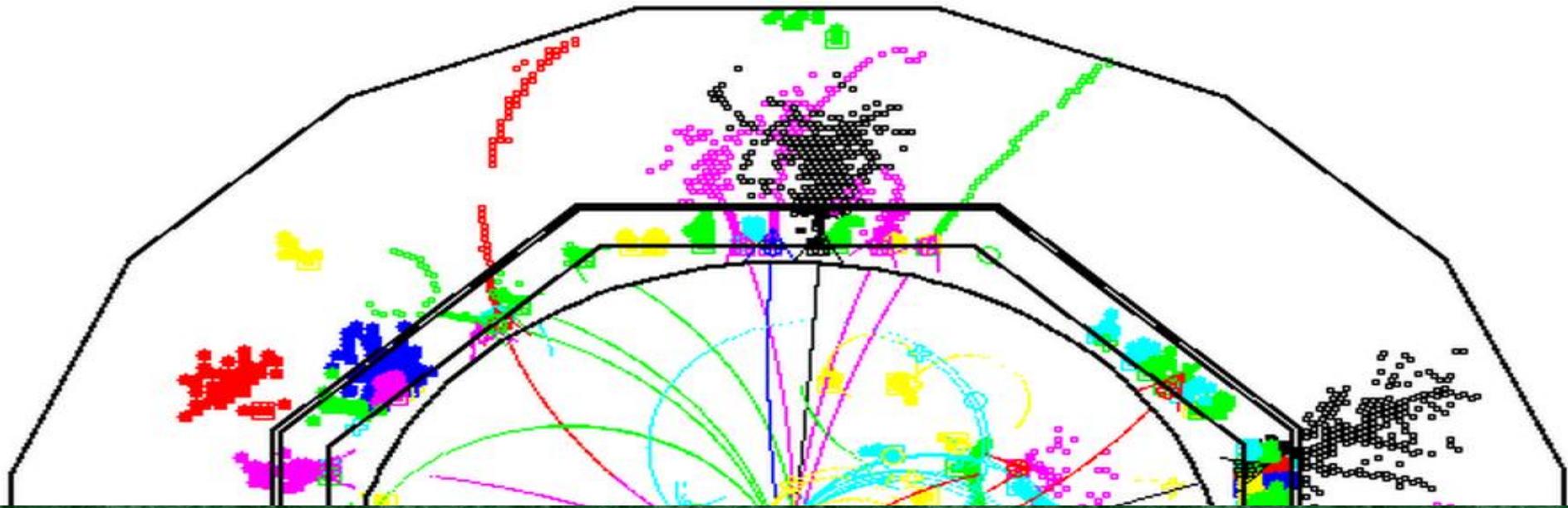
理論誤差:

現在 4% @NNLO

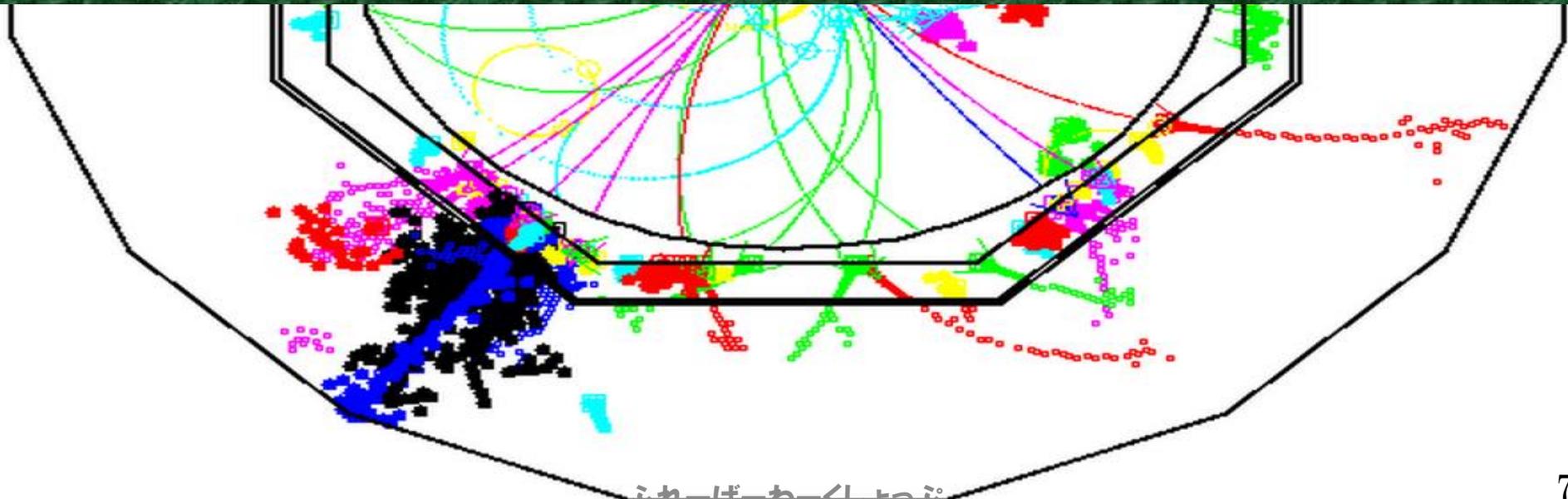
将来 3-2.5% @NNNLO



ヒッグス交換による断面積上昇は**9%**
500GeVの直接測定の前にトップ湯川を見積もる!!



シミュレーションと再構成



シミュレーション

トップ質量	174 GeV
重心系エネルギー (E_{CM}) (閾値 scan)	<u>341 - 350 GeV (1 GeVごと)</u>
偏極	$p(e^+, e^-) = (+0.3, -0.8), (-0.3, +0.8)$ ("Left", "Right")
積分ルミノシティ	5 fb ⁻¹ (各 E_{CM} , 偏極ごと、total 100fb ⁻¹) ※350GeVの運転スケジュールは未定、公式ではない
イベント生成	Physsim (LO ,no higgs exchange/on QCD enhancement, on ISR/ beamstrahlung/beam energy spread)
検出器シミュレーション	ILD_01_v05 (DBD ver.)

Full simulation with the ILD detector is performed.

信号事象と背景事象

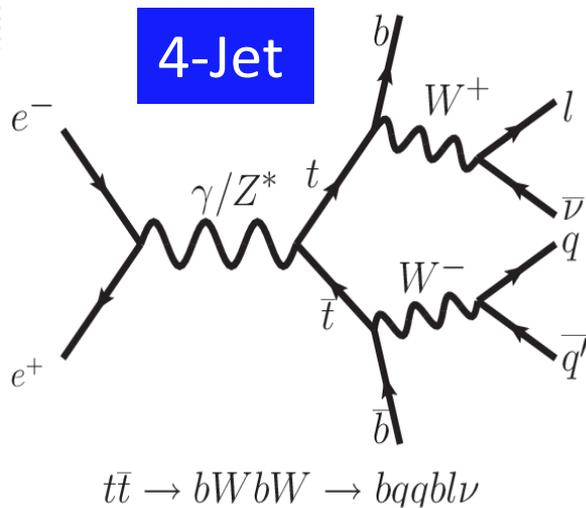
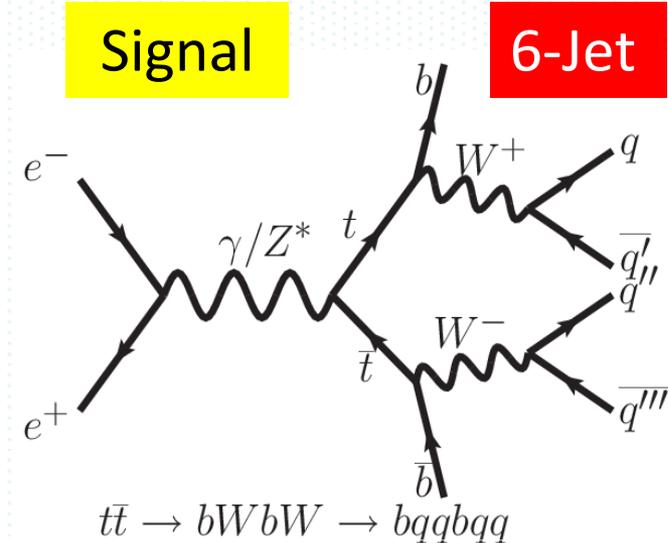
Signal

6-Jet

4-Jet

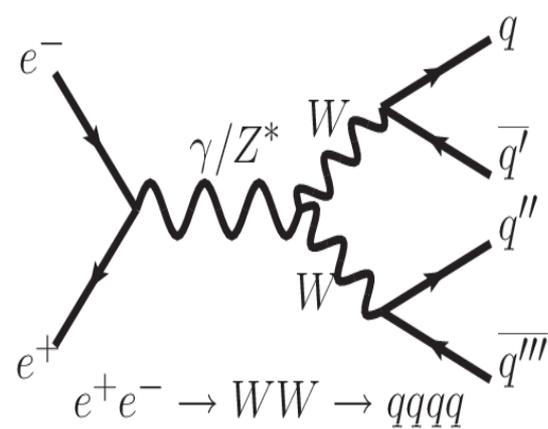
崩壊分岐比

6-Jet	45%
4-Jet	44%
2-Jet	11%

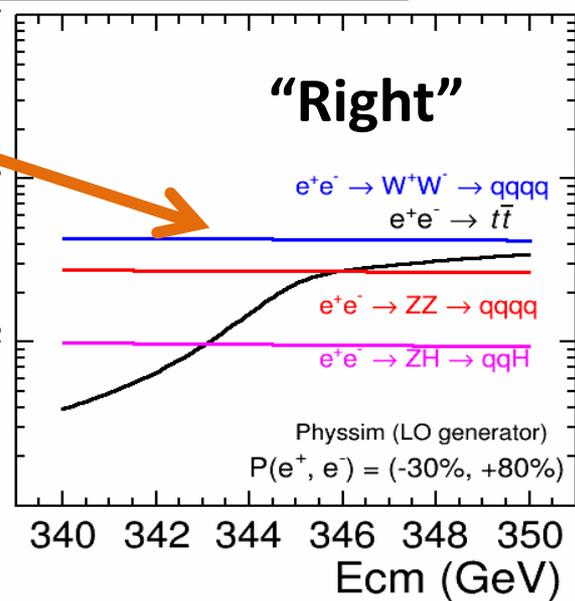
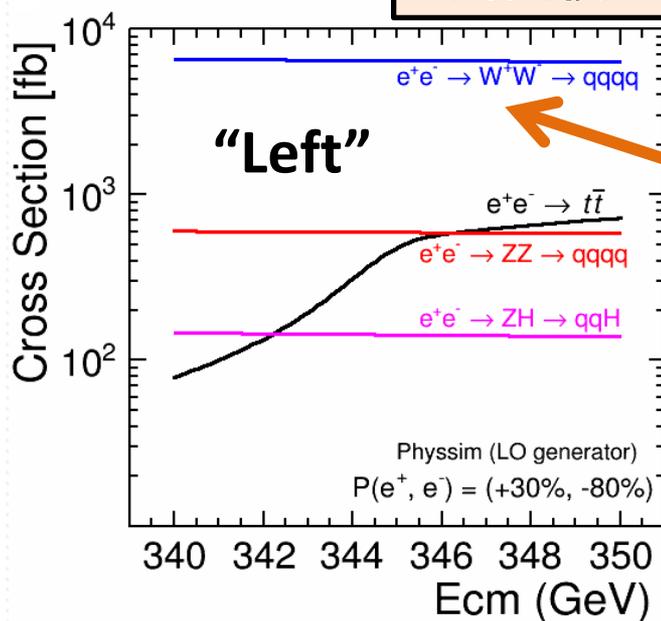


Main BG.

WW, ZZ, ZH



断面積のエネルギー依存性



Jetの再構成と孤立レプトンの抽出

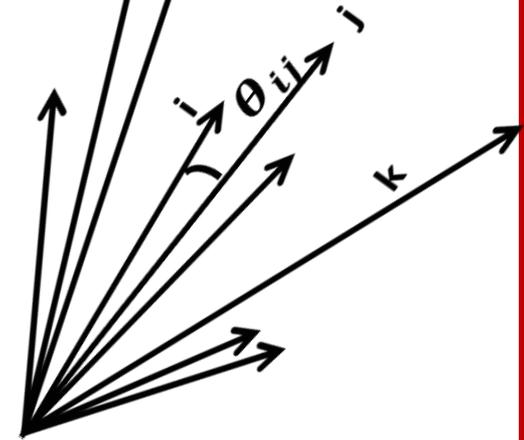
◎Durham アルゴリズムで粒子群をjetに再構成

○Y値の最小化

$$Y_{ij} = \frac{2\min(E_i^2, E_j^2)(1 - \cos \theta_{ij})}{E_{vis}^2}$$

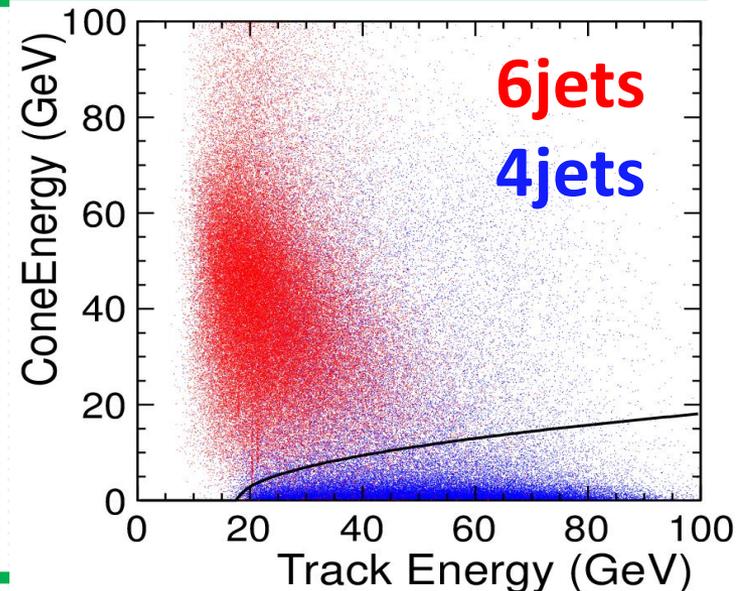
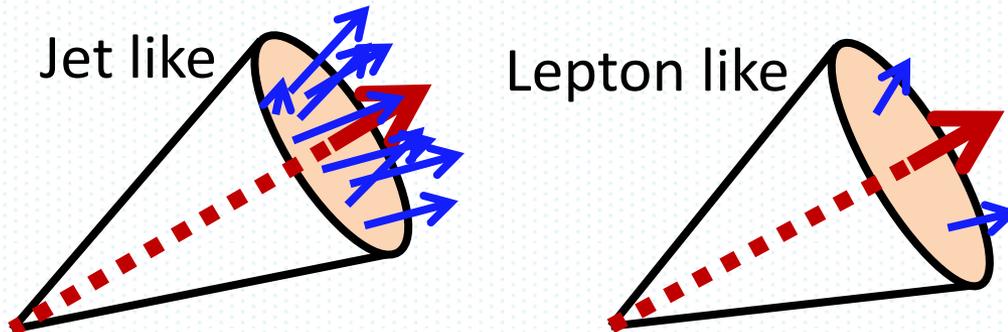
Y_{ij} が最小になる*i,j*を見つけ出し強制的に一つにまとめる

$p_1 p_2 \dots p_i p_j p_k \dots p_{n-1} p_n$ \longrightarrow $p_1 p_2 \dots p_{i'} p_k \dots p_{n-2} p_{n-1}$



◎孤立レプトンの抽出

高い運動量を持つトラックを中心にコーンを作る。
コーン内のエネルギーが小さいものを選び出す。



再構成 (6-Jet & 4-Jet)

再構成	6-Jet	4-Jet
Background Overlay の除去 (anti- k_T algorithm)		
孤立レプトン (l_{iso}) の抽出 (コーンカット)	# of $l_{iso} = 0$	# of $l_{iso} = 1$
ジェットの再構成 (ダーラムアルゴリズム)	Cluster to 6jets	Cluster to 4jets
bらしいジェットを2本選ぶ (LCFIPlus)	-	-
Wを2つ再構成	$q_1 + q_2$ & $q_3 + q_4$	$q_1 + q_2$ & $l_{iso} + \nu$
トップを2つ再構成	-	-
χ^2 を用いて最適化	①	②

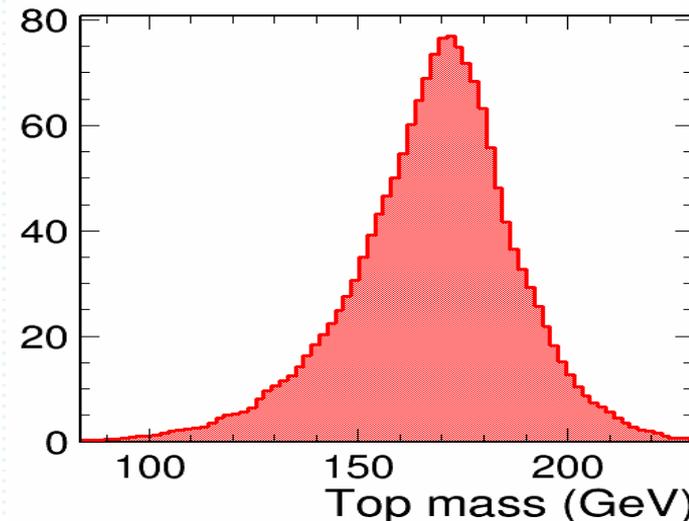
①

$$\chi_{6\text{-Jet}}^2 = \frac{(m_{3j^a\text{reco.}} - m_t)^2}{\sigma_t^2} + \frac{(m_{3j^b\text{reco.}} - m_t)^2}{\sigma_t^2} + \frac{(m_{2j^a\text{reco.}} - m_w)^2}{\sigma_w^2} + \frac{(m_{2j^b\text{reco.}} - m_w)^2}{\sigma_w^2}$$

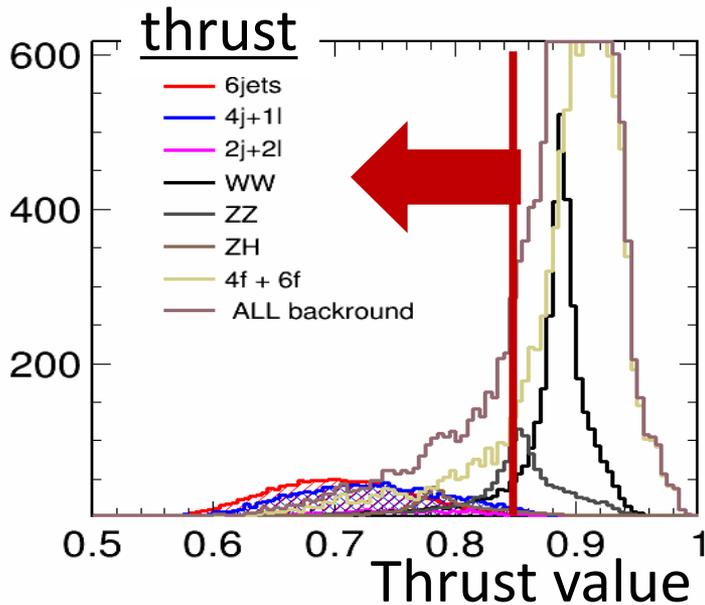
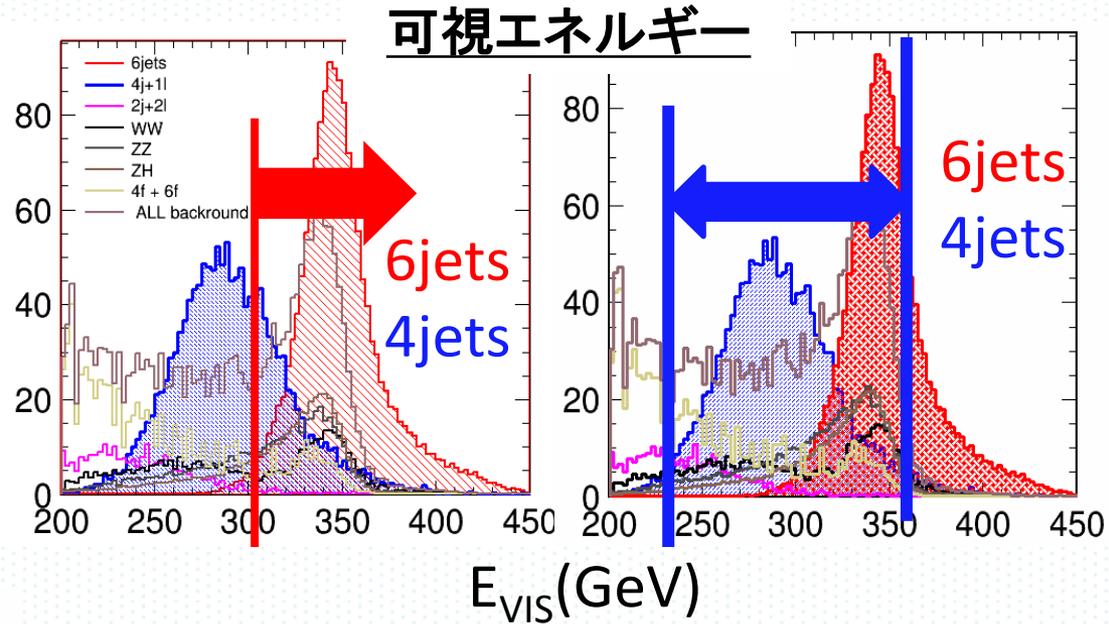
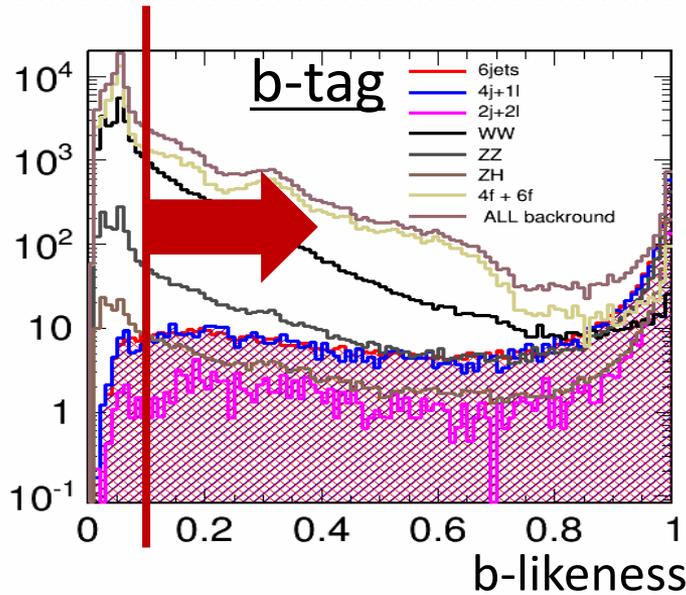
②

$$\chi_{4\text{-Jet}}^2 = \frac{(m_{3j\text{reco.}} - m_t)^2}{\sigma_t^2} + \frac{(m_{jl\nu\text{reco.}} - m_t)^2}{\sigma_t^2} + \frac{(m_{2j\text{reco.}} - m_w)^2}{\sigma_w^2}$$

Reconstructed top mass



事象選別



その他のカット

- ◎ Y値カット
- ◎ 孤立レプトン数
- ◎ トップ質量
- ◎ 損失した横方向の運動量
- ◎ 粒子数

選別結果 6-Jet @350GeV

Left	tt6j	tt4j	tt2j	WW	ZZ	ZH	6f	S_{6j}
Generated	1643	1583	381	32664	3004	694	65408	8.2
# of lepton = 0	1591	358	18	32076	2956	638	35005	5.9
btag > 0.1 × 2	1513	340	17	3580	1395	472	6056	13.1
Thrust < 0.84	1491	320	14	407	454	392	716	24.2
Evis > 300 GeV	1475	114	0	205	294	295	58	29.8
missPt < 38 GeV	1469	58	0	204	292	292	56	30.2
$m_{\ell} > 100 \text{ GeV} \times 2$	1462	56	0	173	245	246	45	31
$y_{45} > 0.0015$ $y_{56} > 0.0007$	1411	36	0	65	67	76	33	34.3
# of pfos < 86	1398	31	0	41	57	70	32	34.6

Right	tt6j	tt4j	tt2j	WW	ZZ	ZH	6f	S_{6j}
Generated	786	757	182	2162	1386	468	4379	10.4
# of lepton = 0	760	171	8	2122	1365	431	2290	9
btag > 0.065 × 2	745	167	8	537	772	343	650	13.1
Thrust < 0.84	734	157	6	64	204	284	89	18.7
Evis > 300 GeV	725	55	0	32	125	213	13	21.3
missPt < 38 GeV	722	28	0	32	124	211	12	21.5
$m_{\ell} > 100 \text{ GeV} \times 2$	719	27	0	27	105	178	11	22
$y_{45} > 0.0015$ $y_{56} > 0.0007$	693	18	0	10	29	57	10	24.2
# of pfos < 86	686	15	0	6	23	52	10	24.4

$$\int \mathcal{L}(t) dt = 5(\text{fb}^{-1})$$

$$S = \frac{N_{Sig}}{\sqrt{N_{Sig} + N_{BG}}}$$

Statistical error

$$\frac{\delta\sigma_{t\bar{t}}}{\sigma}_{\text{Left}} = 2.9\%$$

$$\frac{\delta\sigma_{t\bar{t}}}{\sigma}_{\text{Right}} = 4.1\%$$

6f: 6 fermion final state except ttbar

選別結果4-Jet @350GeV

Left	tt4j	tt6j	tt2j	WW	ZZ	ZH	6f+4f	S_{4j}
Generated	1583	1643	381	32664	3004	694	65408	7.9
# of lepton = 1	1203	67	112	742	59	51	30003	6.7
btag > 0.1 × 2	1122	63	106	55	16	17	1330	21.6
Thrust < 0.845	1092	63	92	10	7	14	201	28.4
230 < Evis < 360 GeV	1048	45	50	8	6	12	77	29.6
missPt < 38 GeV	1027	16	49	1	2	8	75	29.9
$m_t > 100$ GeV × 2	1011	10	40	0	1	7	45	30.2
# of pfos > 50								
# of pfos < 160	1006	9	31	0	1	6	30	30.5

Right	tt4j	tt6j	tt2j	WW	ZZ	ZH	6f+4f	S_{4j}
Generated	757	786	182	2162	1386	468	4379	10
# of lepton = 1	576	31	53	50	27	35	2018	10.9
btag > 0.065 × 2	554	30	51	7	9	14	161	19.2
Thrust < 0.845	539	30	45	1	3	12	30	20.9
230 < Evis < 360 GeV	517	22	25	1	3	10	12	21.2
missPt < 38 GeV	506	7	24	0	1	7	12	21.4
$m_t > 100$ GeV × 2	498	4	20	0	0	6	8	21.5
# of pfos > 50								
# of pfos < 160	496	4	16	0	0	5	6	21.6

4f: the total # of events semi-leptonic decay of ZZ, WW
 6f: 6 fermion final state except ttbar

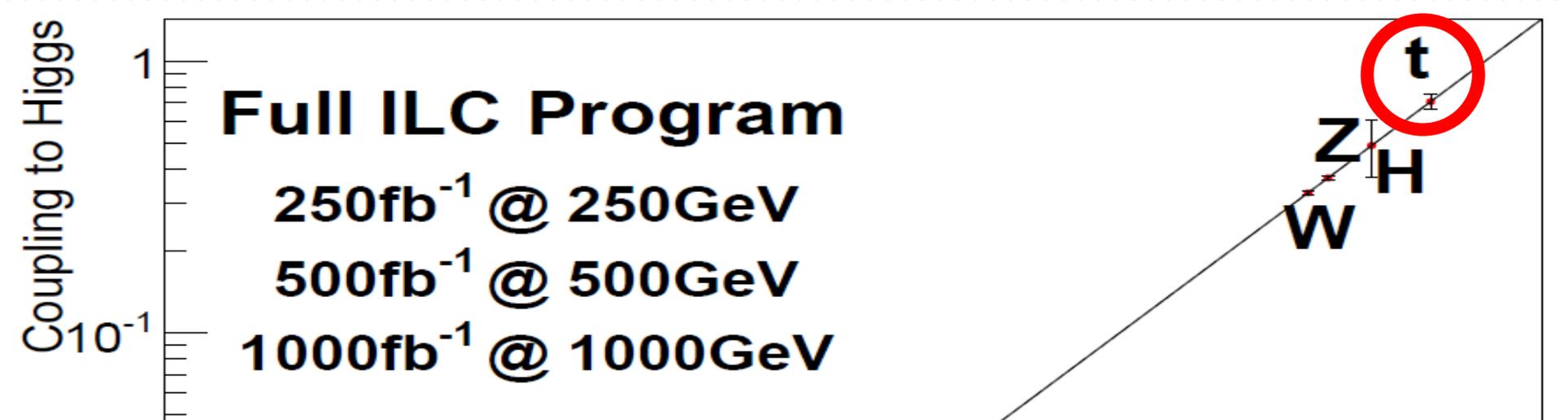
$$\int \mathcal{L}(t) dt = 5(\text{fb}^{-1})$$

$$S = \frac{N_{Sig}}{\sqrt{N_{Sig} + N_{BG.}}}$$

Statistical error

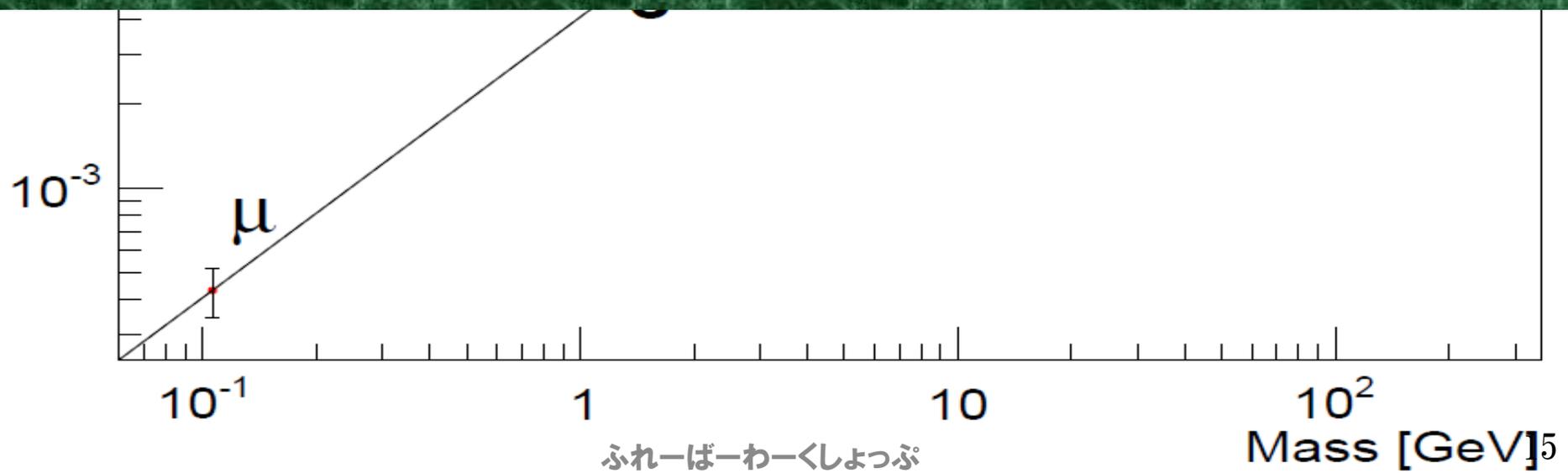
$$\frac{\delta\sigma_{t\bar{t}}}{\sigma}_{\text{Left}} = 3.3\%$$

$$\frac{\delta\sigma_{t\bar{t}}}{\sigma}_{\text{Right}} = 4.6\%$$



結果

—トップ湯川結合の測定—



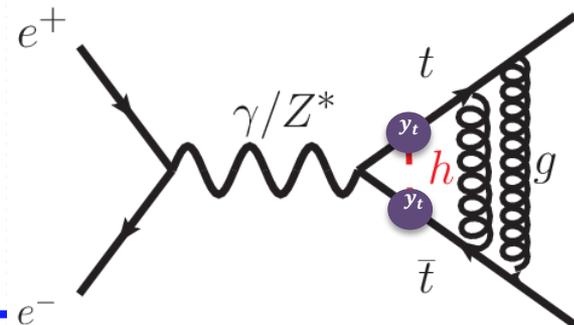
トップ湯川結合

二つの偏極、全 E_{CM} (341 – 350 GeV)の有意度を用いて
トップ湯川結合の統計誤差を見積もる。

The cross section is enhanced about **9%** by exchanging the Higgs boson !!

$$\sigma_{t\bar{t}} \propto |\mathcal{M}_{no\ higgs\ exchange} + y_t^2 \mathcal{M}_{higgs\ exchange}|^2$$

$$\frac{\delta y_t}{y_t} \sim \frac{109 \times \frac{1}{2} \times \frac{\delta\sigma}{\sigma}}{9}$$



Stat. Error (50 fb ⁻¹)	6-Jet (Left)	6-Jet (Right)	4-Jet (Left)	4-Jet (Right)	6-Jet + 4-Jet (Left)	6-Jet + 4-Jet (Right)	Combined (100 fb ⁻¹)
$\frac{\delta\sigma}{\sigma}$	1.2%	1.7%	1.3%	1.9%	0.9%	1.3%	
$\frac{\delta y_t}{y_t}$	7.2%	10.2%	8.0%	11.3%	5.4%	7.6%	4.4%

結果

-質量、崩壊幅の測定-

畳み込み

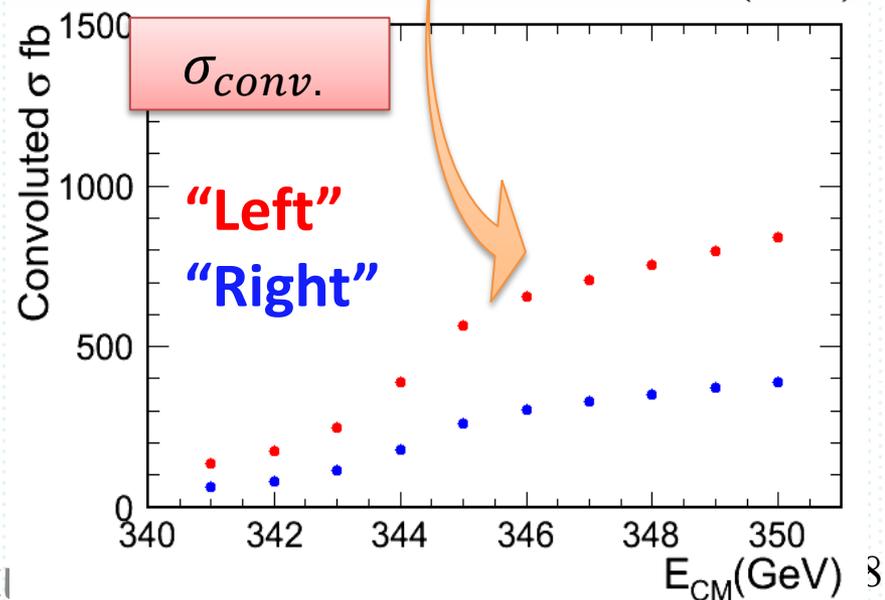
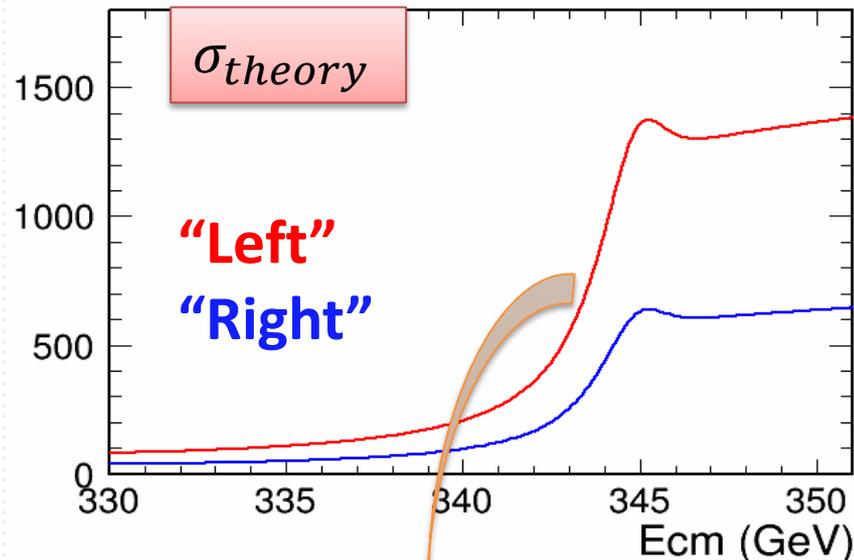
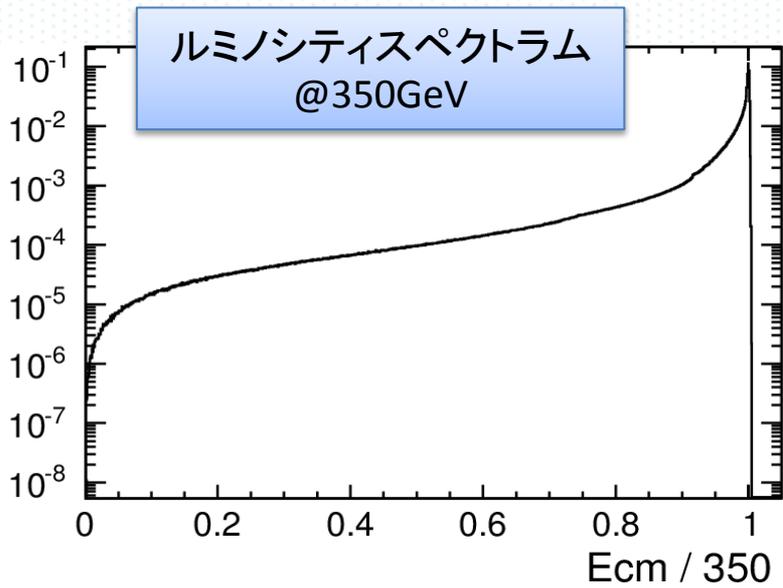
◎閾値付近ではビーム効果を考えなければならない!!



ルミノシテイスpekトラムを用いて
理論断面積を畳こむ

$$\sigma_{conv.}(\sqrt{s}) = \int \mathcal{L}(t)\sigma_{th}(t)dt$$

\mathcal{L} : ルミノシテイスpekトラム、 \sqrt{s} : 重心系エネルギー
 σ_{th} : 理論断面積, $\sigma_{conv.}$: 畳み込んだ断面積
 $t(=\sqrt{s'/s})$ ($\sqrt{s'}$: 衝突エネルギー)



フィット

➤ 断面積のテンプレート作成:

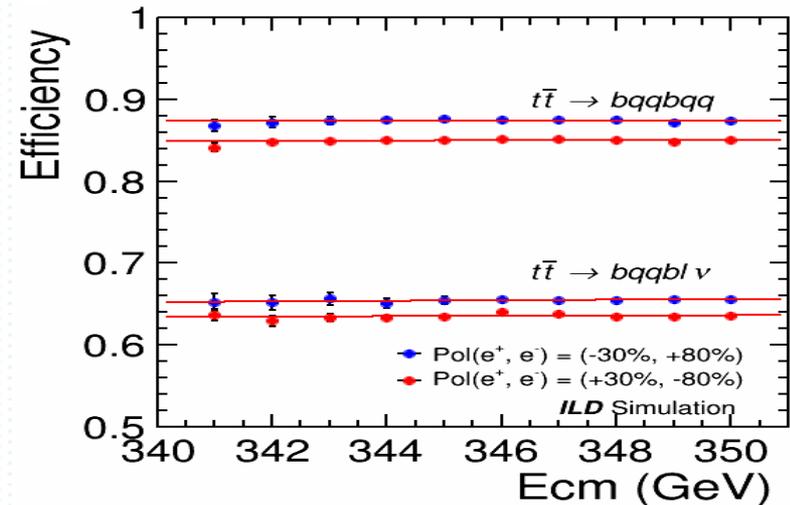
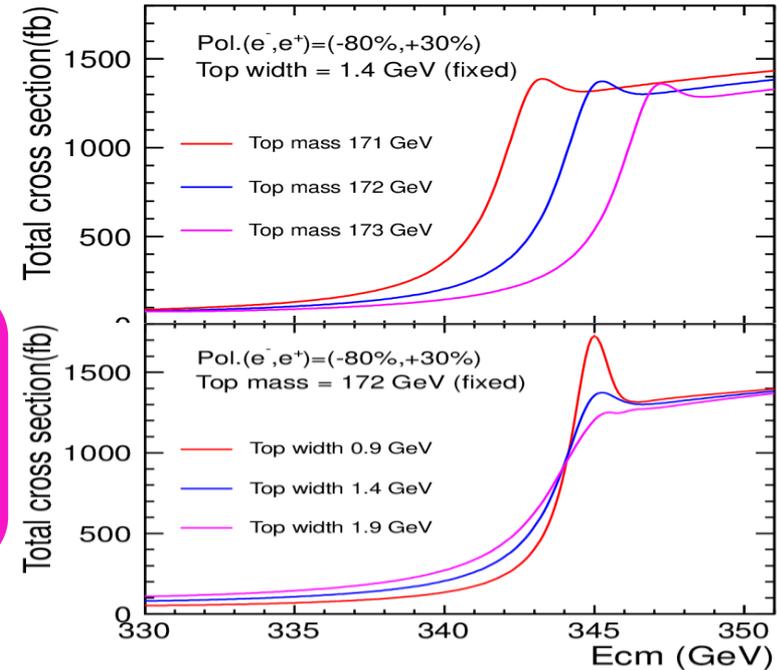
- m_t^{PS} , Γ_t and E_{CM} を動かす
- α_s and y_t を固定

ILCは10年後(くらい)に開始(できたらいいな)。その頃には α_s が格子QCDで高精度で決められていると予想したため m_t^{PS} , Γ_t でフィット。

- 中心値
(m_t^{PS} , Γ_t) = (172.000, 1.400)

➤ LOの解析結果を畳み込んだNNLOにスケールしてToy-MCで2次元フィット:

- 断面積のスケール検出効率(LO)を用いてNNLOの断面積にスケールする。
- ポアソンに従う乱数を生成
- 内挿して(m_t^{PS} , Γ_t) の2次元フィット



結果

Stat. Error (MeV)	6-Jet		4-Jet	
	m_t^{PS}	Γ_t	m_t^{PS}	Γ_t
Left(50fb ⁻¹)	28	40	33	48
Right(50fb ⁻¹)	42	63	48	67
Left (50fb ⁻¹) + Right(50fb ⁻¹)	23	34	27	39

Combined ALL

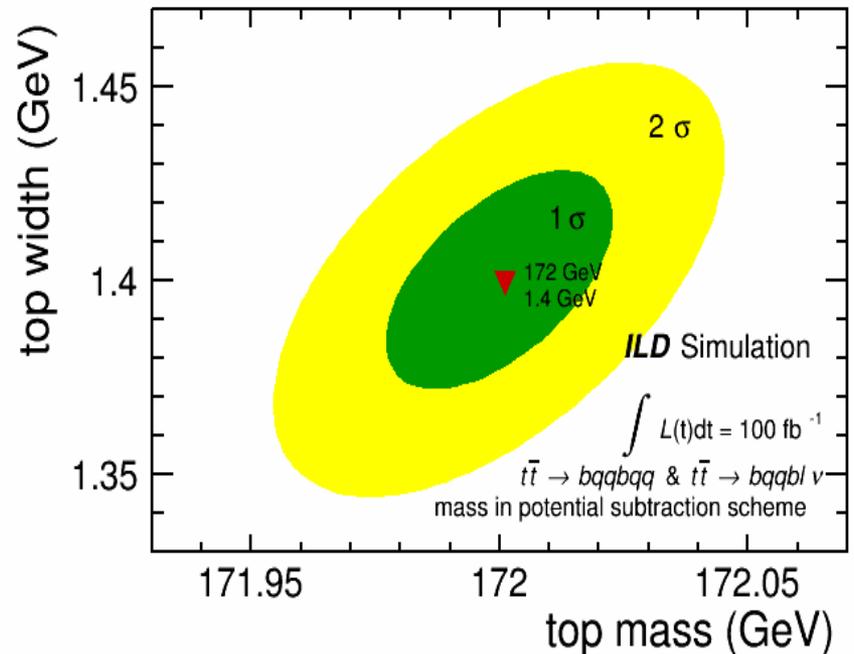
m_t^{PS} (GeV)	Γ_t (GeV)
172.001 ± 0.018	1.399 ± 0.026

⊙ PS → MS mass

$$m_t^{\overline{MS}} \sim m_t^{PS} - \frac{4}{3\pi}(m_t^{PS} - 20)\alpha_s + \dots$$

$$m_t^{\overline{MS}} = 160^{+5}_{-4} \text{ (GeV)} \quad \text{PDG}$$

$$m_t^{\overline{MS}} = 163.800 \pm 0.017 \text{ (stat.) (GeV)}$$



まとめと予定

➤ まとめ

- トップ湯川結合、質量、崩壊幅の統計誤差を6-Jetと4-Jetの終状態を用いて解析した。
- $5 \text{ fb}^{-1} \times 20 \text{ 点}, 100 \text{ fb}^{-1}$
 - $(10 E_{\text{CM}} \times 2 \text{ 偏極})$

$\Delta y_t / y_t$	4.4 %
m_t^{PS}	$172.001 \pm \mathbf{0.018}$ (GeV)
$m_t^{\overline{\text{MS}}}$	$163.800 \pm \mathbf{0.017}$ (GeV)
Γ_t	$1.399 \pm \mathbf{0.026}$ (GeV)

➤ 今後

- 前後非対称度の測定

バックアップ

閾値付近での ルミノシティスペクトラム

