

国際リニアコライダーにおけるトップクォーク 対生成閾値領域の研究

2013/9/22 @高知大

堀口朋裕 (東北大学)

石川明正、清裕一郎¹、末原大幹、隅野行成、藤井恵介²、山本均
東北大，¹順天堂大，²KEK

目次

➤ 導入

本研究の目的
断面積の測定

➤ シミュレーションと再構成

信号事象と背景事象
シミュレーション
再構成法(6-Jet, 4-Jet)

➤ 事象選別

➤ トップ湯川結合

統計誤差の見積もり

➤ トップの質量、崩壊幅

NNLOの理論断面積計算で
の統計誤差の見積もり

➤ まとめ

導入

本研究の目的

ILC350GeVの運転における
トップクォークの

➤ **質量** {
▪ $\overline{\text{MS}}$ scheme
▪ Potential subtraction scheme

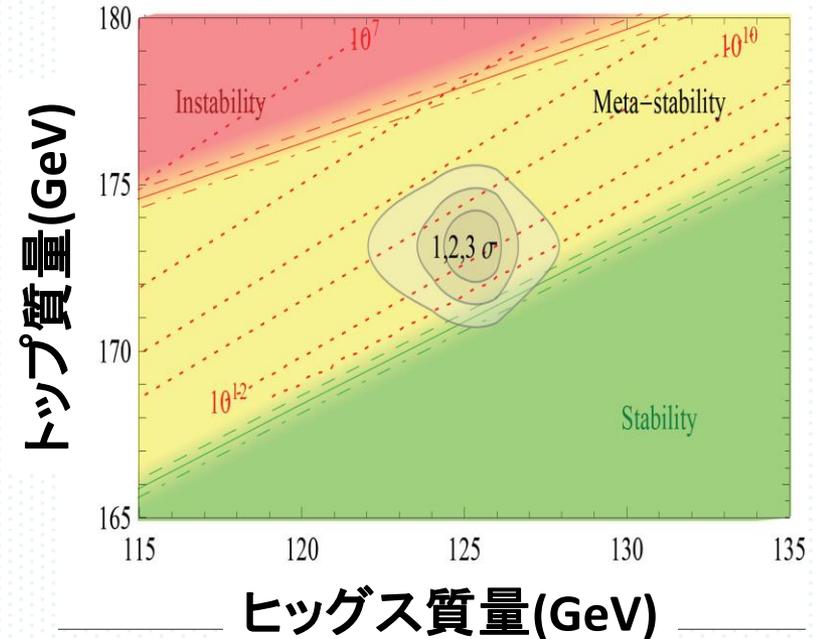
➤ **崩壊幅**
anomalous coupling, exotic decay

➤ **トップ湯川結合**

➤ **(強い相互作用の結合定数)**

➤ **トップ対共鳴状態でのQCD波動関数**

真空の安定性の評価



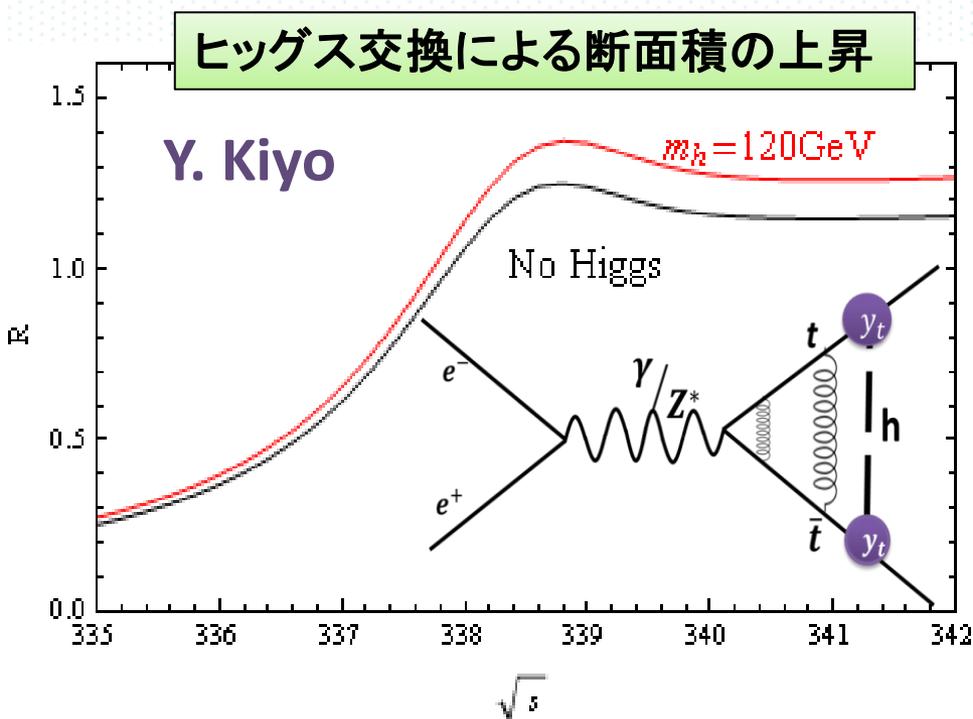
JHEP 1210, 140 (2012)

全断面積測定と質量、崩壊幅、トップ湯川結合

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

閾値スキャンをして断面積を測定しフィットすることで
基本パラメータの精密測定が可能になる

◎閾値付近では potential subtracted(PS) mass** という強い相互作用
との相関が小さい質量が定義可能 ** [arXiv:hep-ph/9804241](https://arxiv.org/abs/hep-ph/9804241)

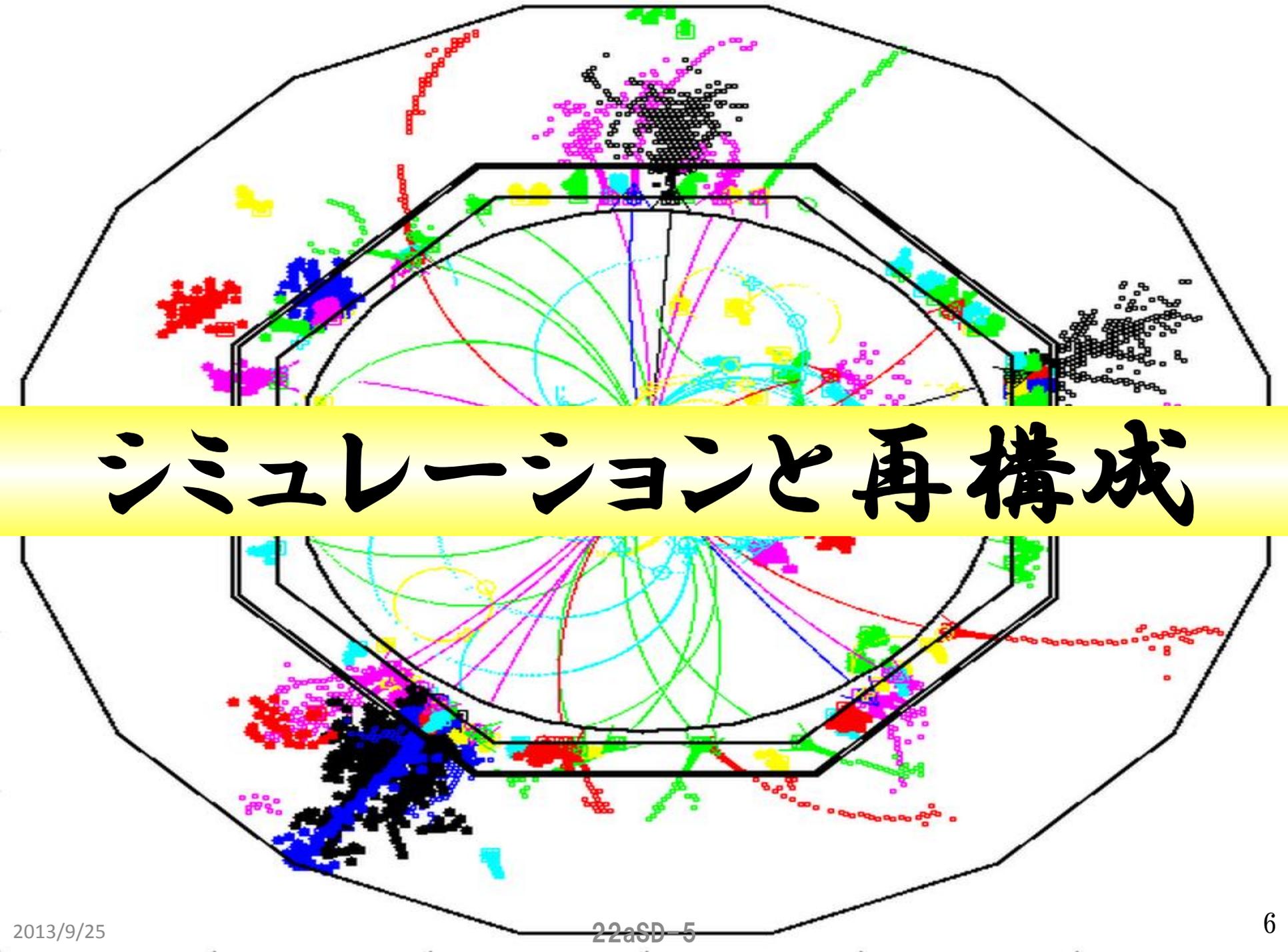


ヒッグスがトップ対の間を交換することで断面積が

$9 \pm 4 \%$

上昇する。

断面積を精密測定し $\sqrt{s}=500\text{GeV}$ の $t\bar{t}h$ の直接測定前に **トップ湯川結合** の測定を試みる。



シミュレーションと再構成

信号事象と背景事象

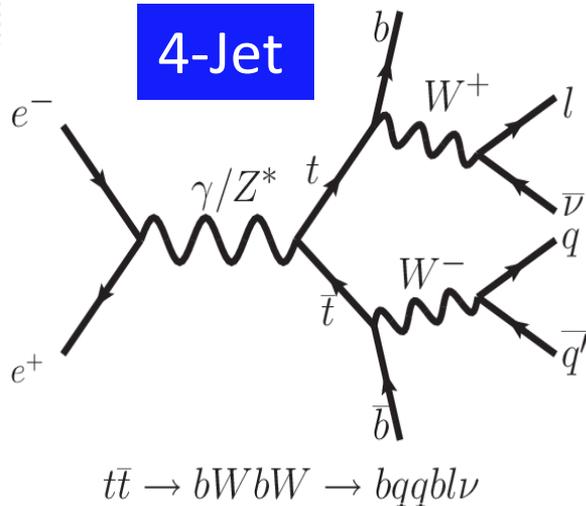
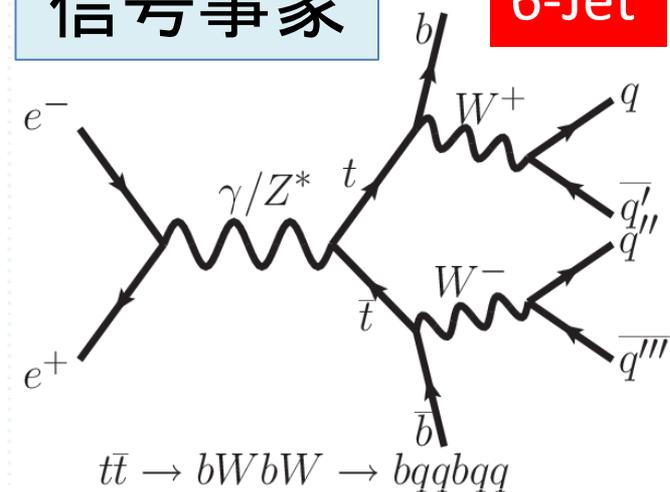
信号事象

6-Jet

4-Jet

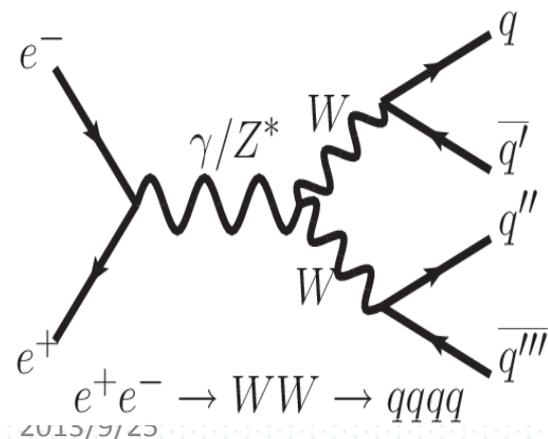
崩壊分岐比

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

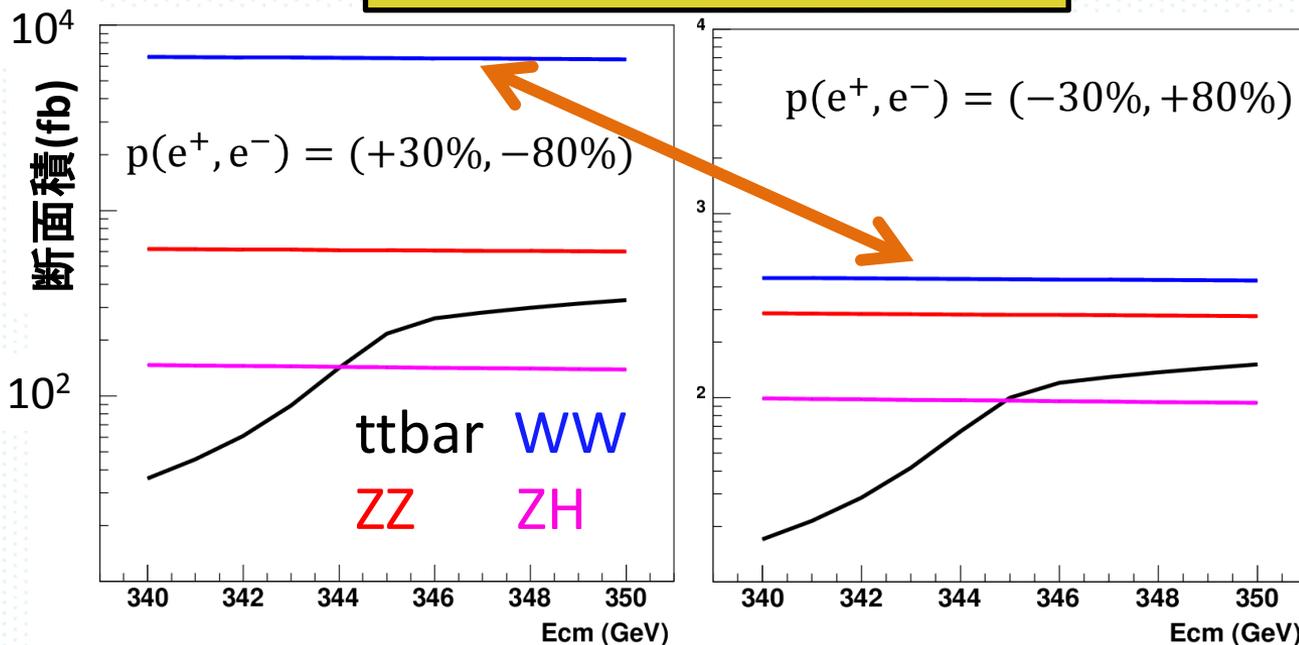


主な背景事象

WW, ZZ, ZH



断面積のエネルギー依存性



シミュレーション

トップの質量(MC mass)	174 GeV
重心系エネルギー(E_{CM}) (<u>閾値スキャン</u>)	<u>340 - 350GeV (1 GeVごとに11点)</u>
<u>偏極率</u> (pol)	$p(e^+, e^-) = (-30\%, +80\%), (+30\%, -80\%)$ (ここでは <u>右巻き</u> 、 <u>左巻き</u> と呼ぶ)
積分ルミノシティ	10 fb⁻¹ (各E_{CM} & pol, 計220fb⁻¹) ※350GeVの運転スケジュール未定
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.)

ILD検出器の詳細技術設計書に則った最新のシミュレーション結果

Jetの再構成と孤立レプトンの抽出

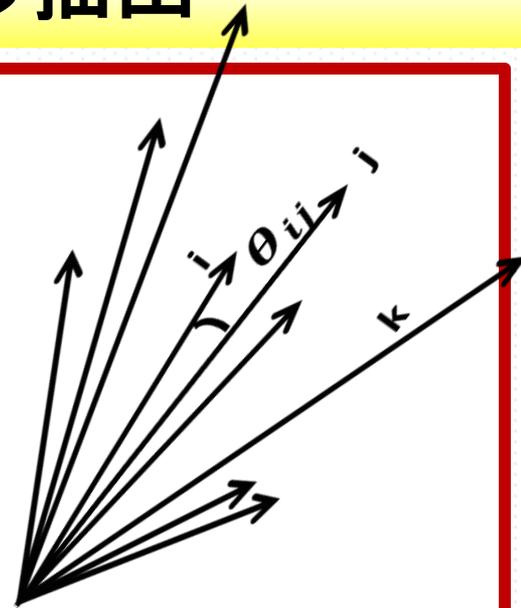
◎Durham アルゴリズムで粒子群をjetに再構成

○Y値の最小化

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

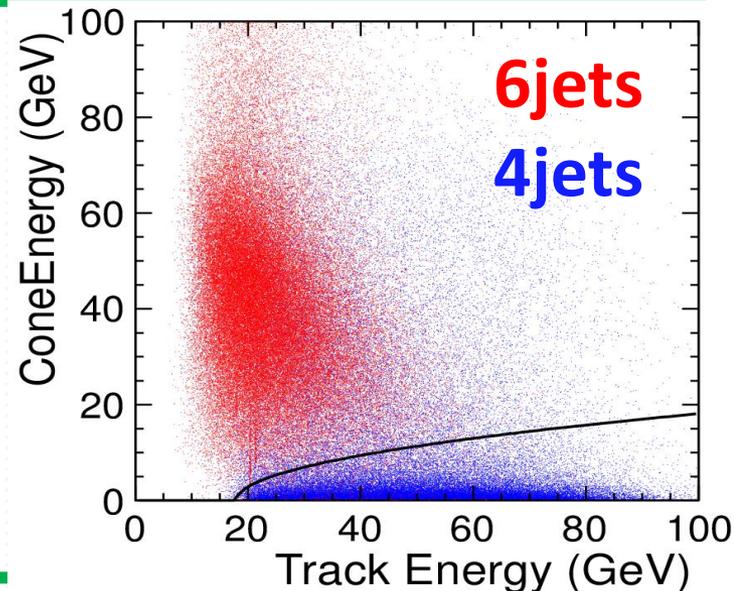
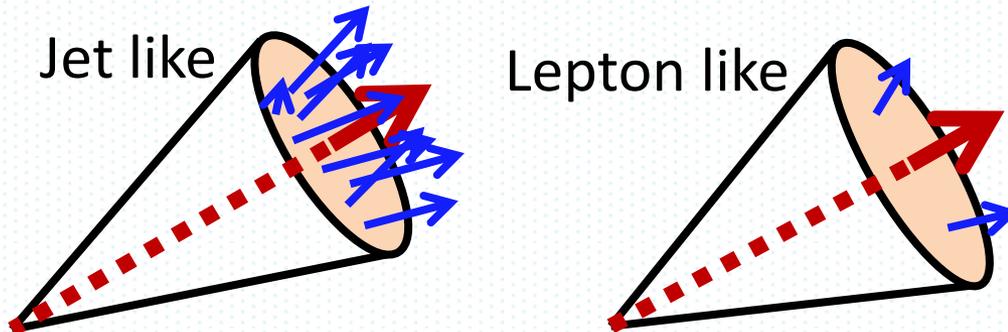
Y_{ij} が最小になる*i,j*を見つけ出し強制的に一つにまとめる

$p_1 p_2 \dots p_i p_j p_k \dots p_{n-1} p_n$ \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。



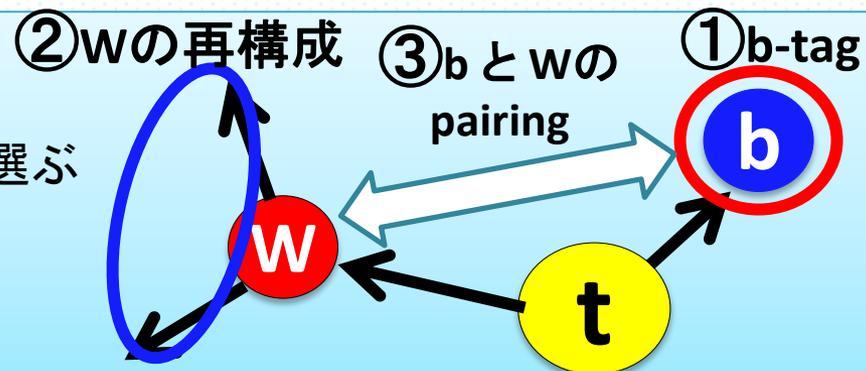
6jets

4jets

再構成 (6-Jet & 4-Jet)

◎トップの再構成(6-Jet)

- ① bクォークタギングツールでbらしいJetを2つ選ぶ
- ② 残りのJet 4本でWを2つ再構成
- ③ bとWを組み合わせてトップを再構成
- ④ χ^2 により最適化



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

◎トップの再構成(4-Jet)

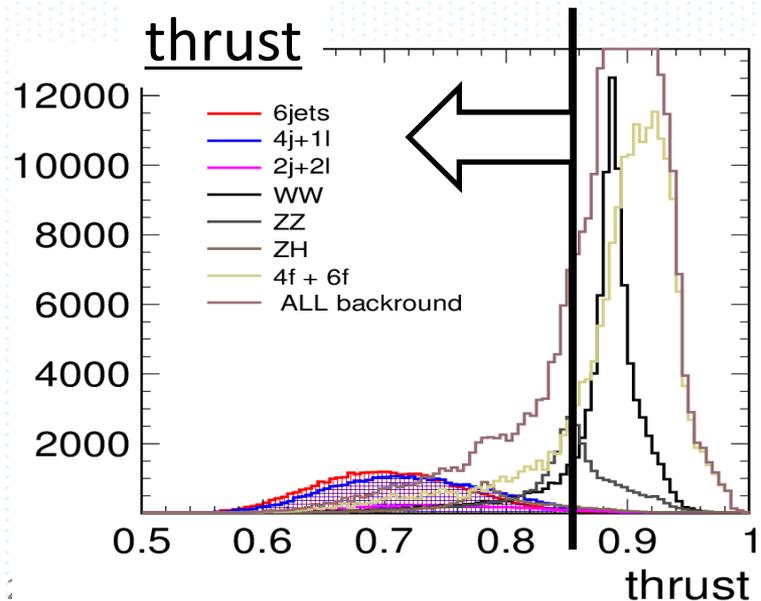
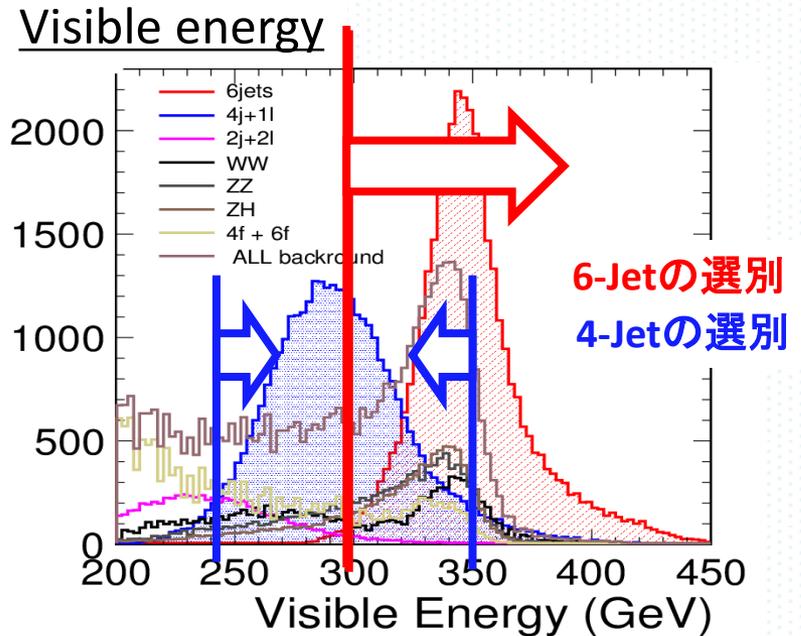
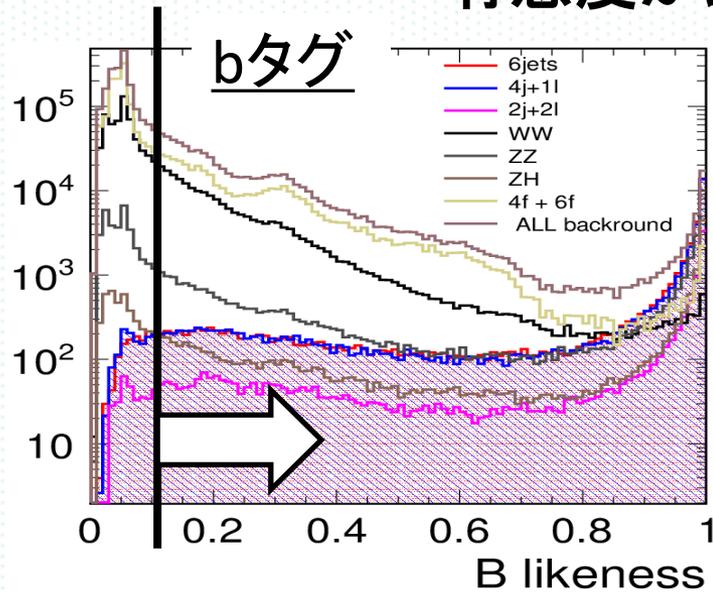
- ① 孤立レプトン抽出後の粒子群からDurhamで4-Jetに再構成
- ② bクォークタギングツールでbらしいJetを2つ選ぶ
- ③ Wの再構成: 損失した4元運動量をニュートリノの4元運動量とみなし孤立レプトンと組み合わせWを再構成する。残り2本のJetでWを再構成
- ④ Wとbを組み合わせてトップを再構成し、 χ^2 で最適化する。

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

事象選別

事象選別

有意度が最大になるように選別する



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
- ◎Wの質量

選別結果 6Jet @350GeV 左巻き

$$\int \mathcal{L}(t) dt = 10 \text{ (fb}^{-1}\text{)}$$

信号

背景事象

$$S = \frac{\text{signal}}{\sqrt{\text{signal} + \text{background}}}$$

Ecm=350(GeV)	tt6j	tt4j	tt2j	WW	ZZ	ZH	6f	S _{6j}
Generated	3287	3166	762	65328	6008	1389	469	11.6
btag1 > 0.1 × 2	3126	2986	717	7275	2818	981	382	17
Thrust<0.84	3082	2870	638	835	919	812	366	29
Evis>300 GeV	3049	1100	29	419	595	602	203	39.1
# of lepton = 0	3018	367	2	416	593	596	185	41.7
missPt<38GeV	3005	193	0	416	589	589	183	42.4
m _t >100 × 2	2991	187	0	351	493	497	181	43.5
y ₄₅ > 0.0015 y ₅₆ >0.0007	2924	146	0	143	152	168	172	48
# of pfos<86	2895	120	0	92	128	151	165	48.6
M _w >30GeV × 2	2884	116	0	87	118	141	164	48.7

6f: トップが出ない6フェルミオン過程

断面積の統計誤差: $1/48.7 = 2.1\%$

選別結果 4Jet @350GeV 左巻き

$$\int \mathcal{L}(t) dt = 10 \text{ (fb}^{-1}\text{)}$$

信号



背景事象

$$S = \frac{\text{signal}}{\sqrt{\text{signal} + \text{background}}}$$

Ecm=350(GeV)	tt4j	tt6j	tt2j	WW	ZZ	ZH	6f+4f	S _{4j}
Generated	3166	3287	762	65328	6008	1389	130817	11.2
# of lepton = 1	2406	135	224	1484	119	103	60007	9.5
btag1 > 0.1 × 2	2245	127	212	111	32	35	2661	30.5
Thrust < 0.845	2184	126	185	21	15	29	404	40.1
missPt > 9 GeV	2142	40	183	3	4	22	397	40.5
240 < Evis < 350 GeV	1996	27	77	2	4	16	127	42.1
m _t > 100 × 2	1971	18	66	1	3	14	83	42.4
# of pfos < 160 # of pfos > 50	1963	17	53	1	3	12	55	42.8

4f : ZZ, WWがハドロンとレプトンに崩壊するものの合計

断面積の統計誤差 : $1/42.8 = 2.3\%$

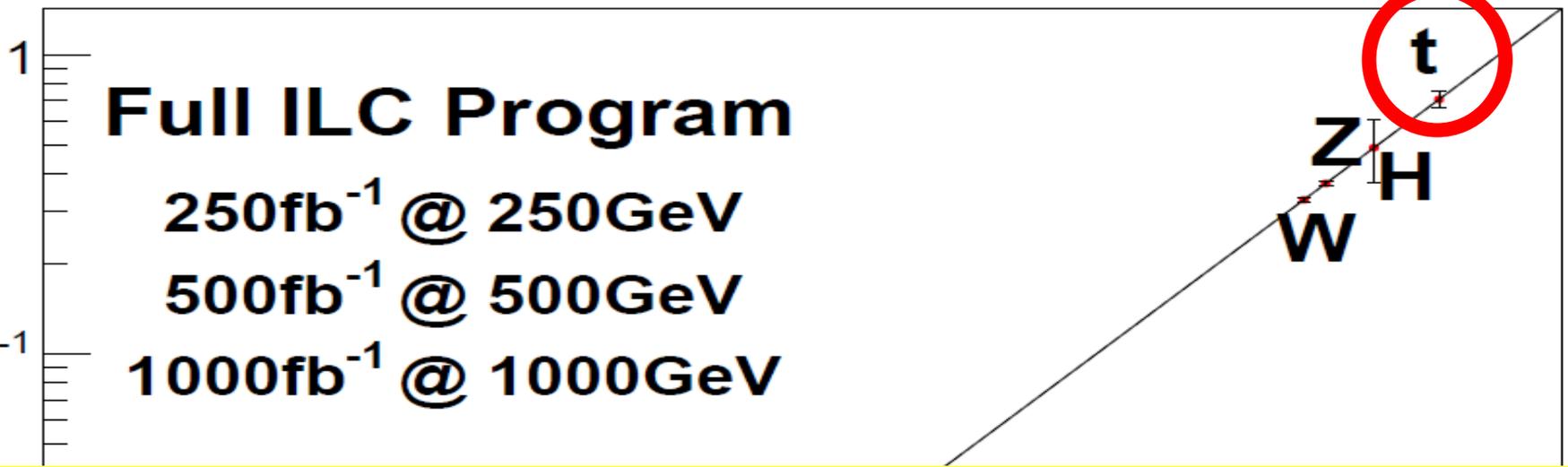
Coupling to Higgs

Full ILC Program

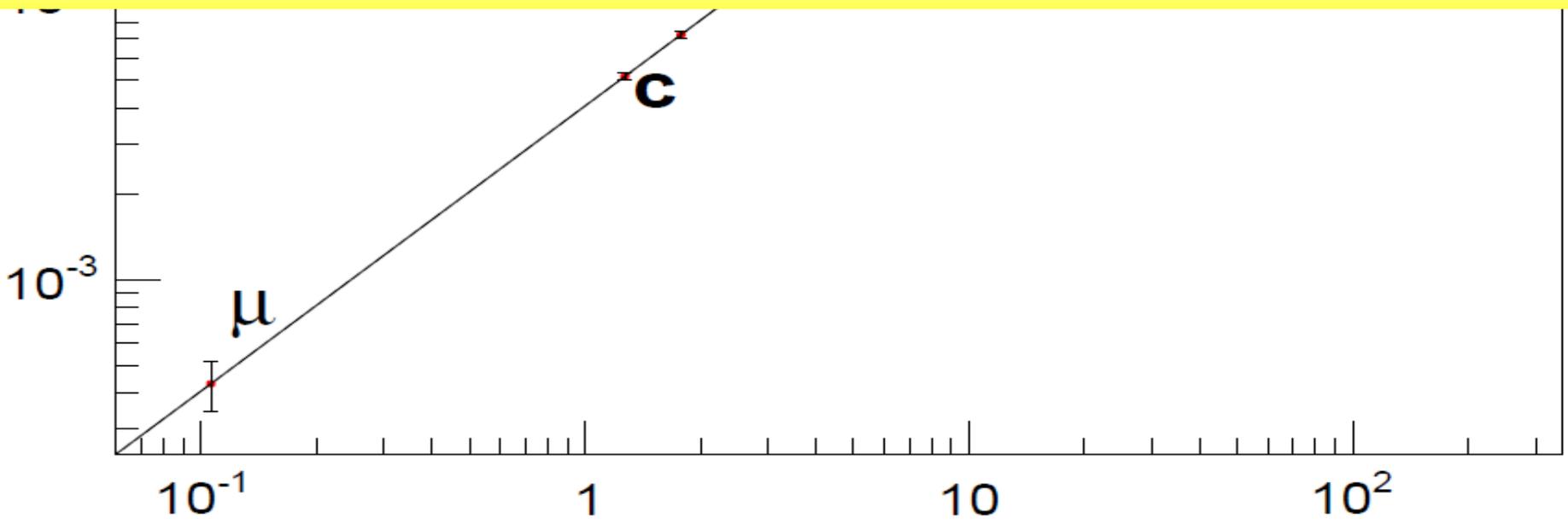
250fb⁻¹ @ 250GeV

500fb⁻¹ @ 500GeV

1000fb⁻¹ @ 1000GeV



トップ陽子結合の測定



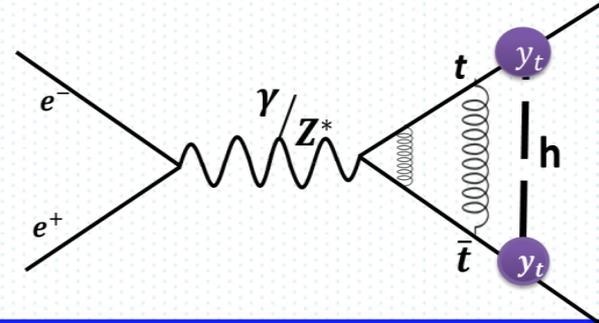
トップ湯川結合の統計誤差の見積もり

全エネルギー(340 - 350GeV)と偏極、6-Jet, 4-Jetの有意度からトップ湯川結合の統計誤差を見積もった。

ヒッグス交換の効果で9%断面積が上昇

$$\sigma \propto \left| \mathcal{M}_{no\ higgs\ exchange} + y_t^2 \mathcal{M}_{higgs\ exchange} \right|^2$$

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



統計誤差	6-Jet (Left)	6-Jet (Right)	4-Jet (Left)	4-Jet (Right)	6 + 4-Jet (Left)	6 + 4-Jet (Right)	Combined ALL
断面積	0.8%	1.2%	0.9%	1.3%	0.6%	0.9%	
トップ湯川	5.0%	7.2%	5.1%	7.9%	3.6%	5.4%	3.0%

トツプの質量と崩壊幅の測定

断面積のフィット①

◎理論断面積テーブルの作成:

α_s を固定し、トップ質量(PS質量)、崩壊幅、重心系エネルギーを変えてテンプレートを作成。

◎LOからNNLOへスケール:

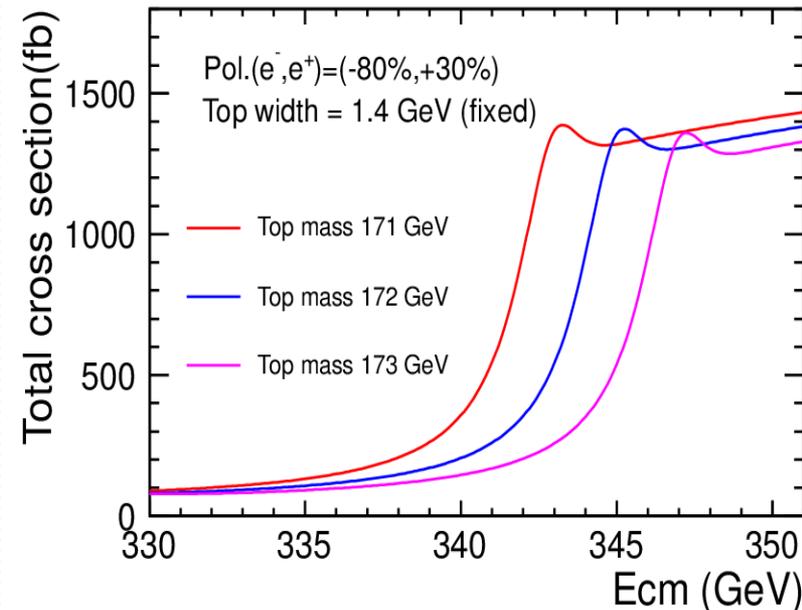
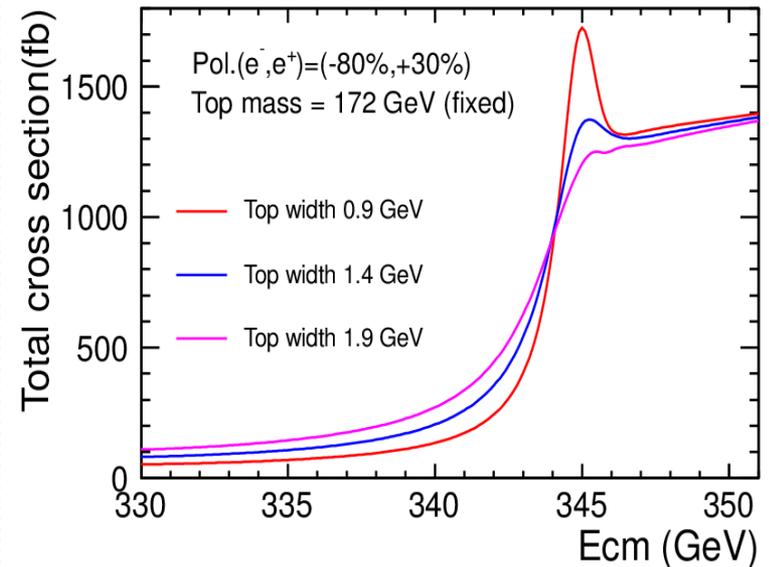
LOで行った選別の検出効率を用いてNNLOの信号数にスケールする。

◎断面積のフィット

Toy-MC法を用いてフィットする。
中心値を

$$(m_t^{\text{PS}}, \Gamma_t) = (172.000, 1.400)$$

として、スケールした信号数(NNLO)と背景事象数(LO)をポアソン分布に従う乱数で振り、質量と崩壊幅を内挿して同時フィットを行う。



断面積のフィット②

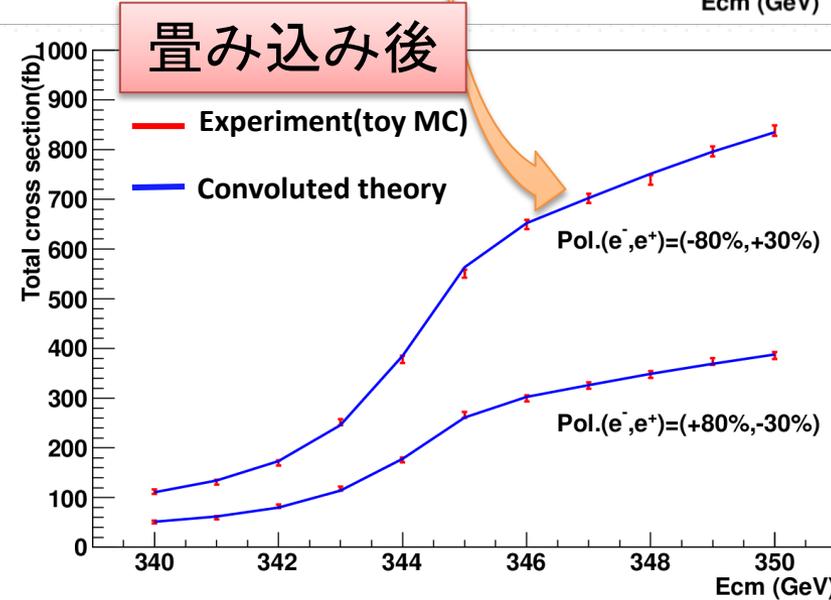
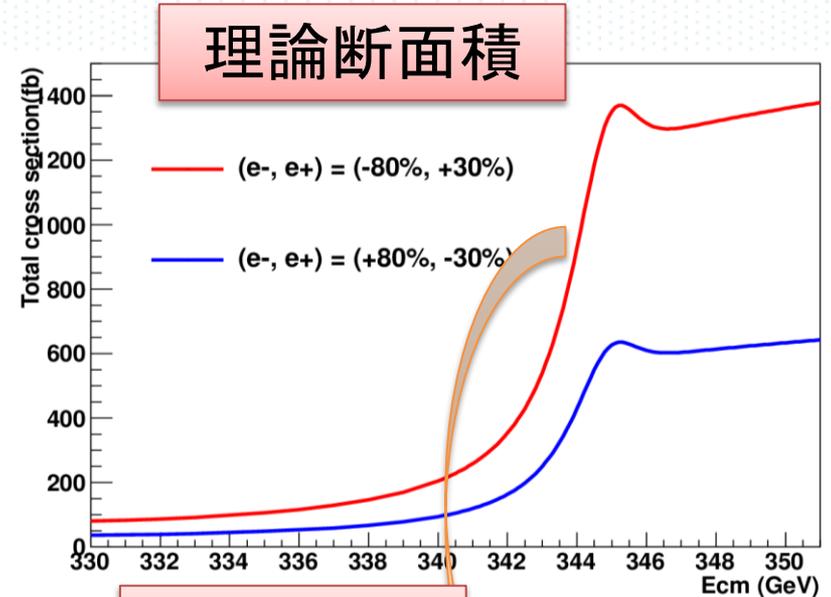
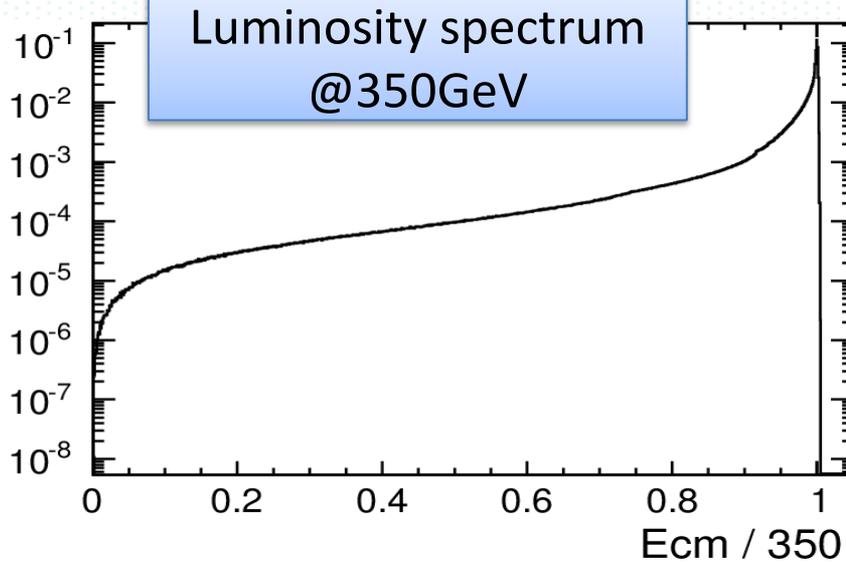
◎閾値付近の断面積測定のためビーム効果を考えなければならない



ルミノシテイスpekトラムを用いて
理論断面積を畳み込む。

$$\sigma_{conv.}(\sqrt{s}) = \int_0^1 \mathcal{L}(t) \sigma_{th}(\sqrt{s} - t) dt$$

\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



フィット結果

統計誤差	$m_t^{PS}(\text{GeV})$ 6Jet	$\Gamma_t(\text{GeV})$ 6Jet	$m_t^{PS}(\text{GeV})$ 4Jet	$\Gamma_t(\text{GeV})$ 4Jet
Left(110fb ⁻¹)	172.000 ± 0.023	1.400 ± 0.029	171.999 ± 0.024	1.400 ± 0.030
Right(110fb ⁻¹)	172.000 ± 0.034	1.399 ± 0.042	171.999 ± 0.033	1.397 ± 0.042
Left (110fb ⁻¹) + Right(110fb ⁻¹)	172.000 ± 0.020	1.399 ± 0.024	172.000 ± 0.019	1.399 ± 0.025

Combined 6Jet +
Combined 4Jet

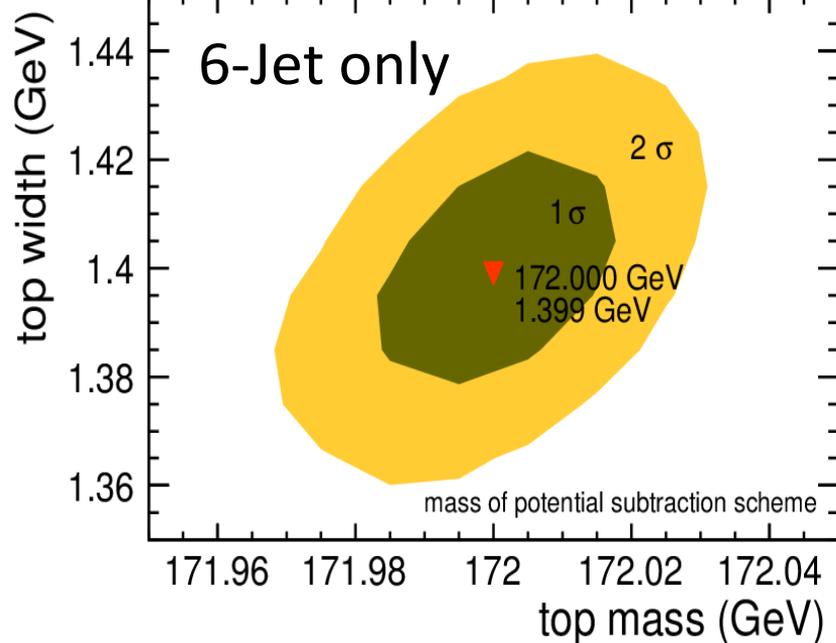
$m_t^{PS}(\text{GeV})$

172.000 ± 0.014

$\Gamma_t(\text{GeV})$

1.400 ± 0.017

※断面積の理論計算には
100MeV程度の不定性がある



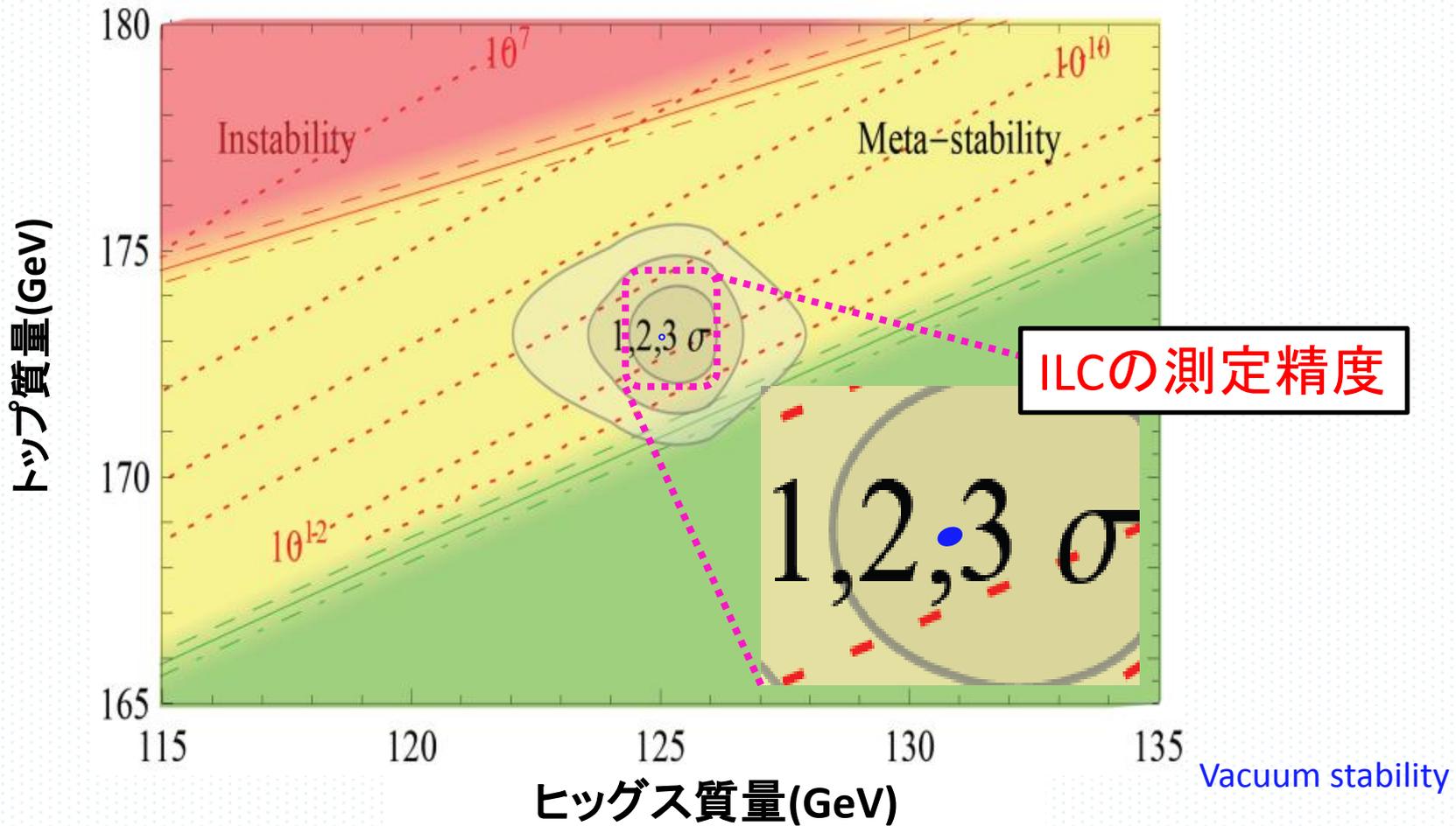
◎ PS → MS mass $m_t^{\overline{MS}} \sim m_t^{PS} - \frac{4}{3\pi}(m_t^{PS} - 20)\alpha_s + \dots$

現在の \overline{MS} 質量 : $m_t^{\overline{MS}} = 160^{+5}_{-4}(\text{GeV})$ [PDG](#)

$\alpha_s(M_Z)$	PDG 0.1184 ± 0.0007 (0.6%)
$m_t^{\overline{MS}}(\text{GeV})$	163.80 ± 0.013(stat) ± 0.054(α_s) ± ...

フィット結果

ILC実現の際に期待される
真空の安定性の評価の精度



ヒッグスの測定精度は μh の反跳質量
(綿貫氏の発表 22aSD-3 より)

まとめと今後

<まとめ>

- トップが6-Jetと4-Jetが終状態の事象を信号とみなし、ILCが実現した際のトップ湯川結合、トップの質量、崩壊幅の統計エラーを見積もった。
- トップ湯川結合の統計誤差: **3.0%**
- PS massの精度: **14** MeV
 $\overline{MS}mass$ の精度: 13 MeV (stat) + 54 MeV(α_s) + ...
- 崩壊幅の測定精度: **17** MeV

<今後>

- 前後非対称度の測定
- QCD波動関数の測定