



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

“Study of the threshold region of
top quark pair production at the ILC”

2014/ 02/ 03

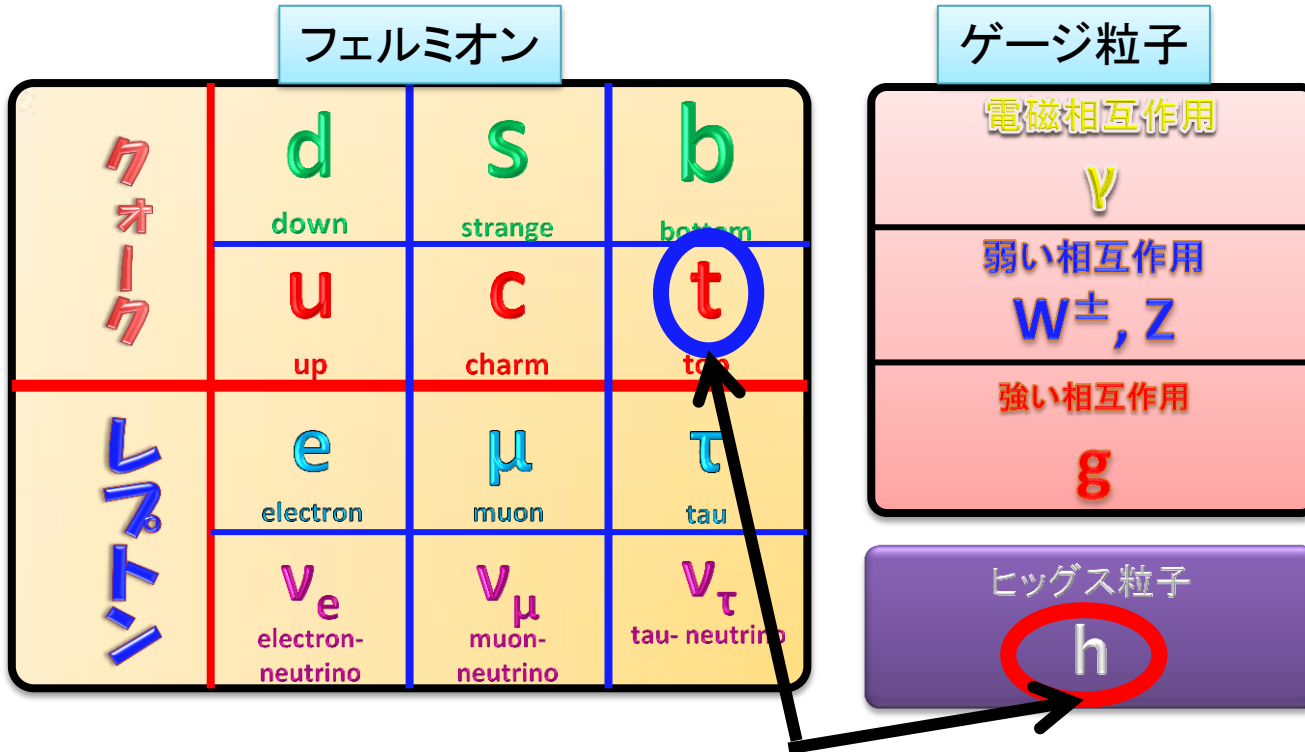
修士論文発表

素粒子実験 堀口朋裕

導入

- 標準模型
- トップクォーク

標準模型



精密測定されていない！！

○ヒッグス

2012年発見。素粒子に質量を与える。

○トップクォーク

標準模型で最も重い粒子($m_t \sim 173 \text{ GeV}$ 、 $y_t \sim 1$)。電弱対称性の破れに関係？

⇒ 本研究の目的はILCのターゲットの1つであるトップクォークの
パラメータの測定精度を見積もる。

トップクォーク

- 1995年にTevatronで発見
- 崩壊幅が大きい

$$\Gamma_t \simeq \frac{G_F m_t^3}{8\sqrt{2}\pi} |V_{tb}|^2 \sim 1.4 \text{ GeV} \gg \Lambda_{\text{QCD}} (\sim 300 \text{ MeV})$$

- ハドロン化前に崩壊
- 漸近自由性のエネルギースケールに位置するため摂動計算が可能

➤ トップのパラメータ

- トップクォーク湯川結合(y_t)

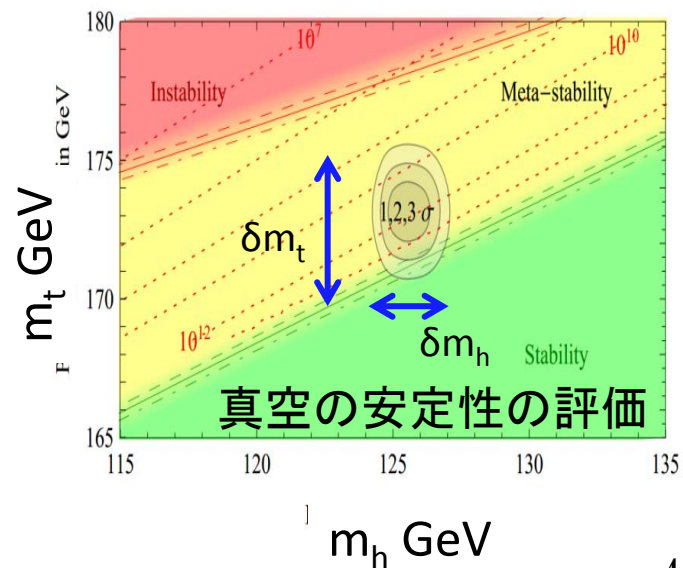
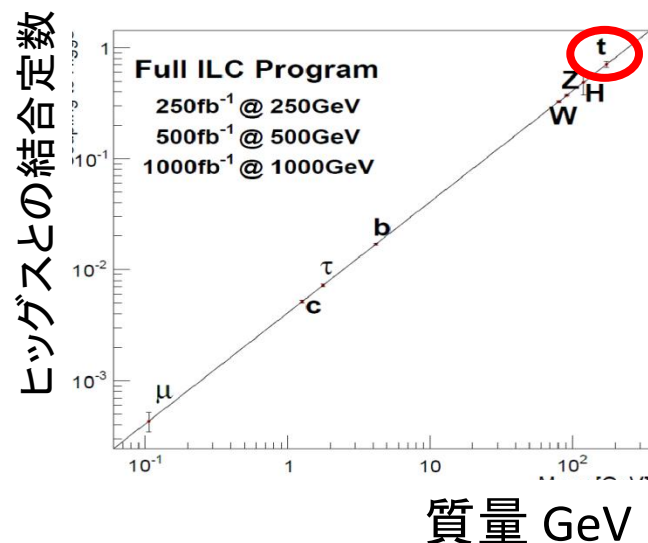
ヒッグス機構のテスト。標準模型が正しければ質量とヒッグスとの結合は比例関係。 $y_t \sim 1$

- 質量(m_t)

標準模型のパラメータ。理論計算の重要なインプット。Ex) 真空の安定性の評価

- 崩壊幅(Γ_t)

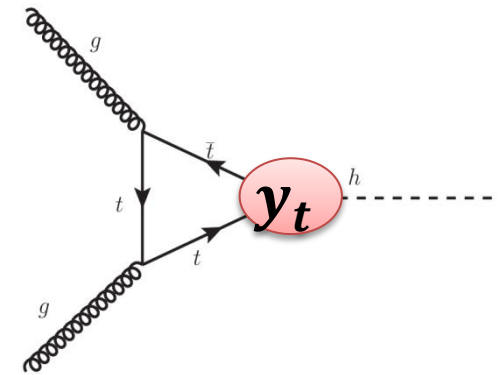
異常結合に感度



ハドロンコライダーでの測定

➤ y_t の測定

- tth(直接測定)が観測されていない
 - gghはあるので存在はする
 - LHC $\sqrt{s} = 14$ TeVの運転で16%(300fb⁻¹)、9%(3000fb⁻¹)の統計誤差



➤ m_t の測定

- MC質量 ジェットの再構成により測定

PDG : $m_t = 173.5 \pm 0.6(stat.) \pm 0.8(syst.) GeV$

- \overline{MS} 質量 断面積測定により測定

D0 : $m_t^{\overline{MS}} = 160^{+4.8}_{-4.3} GeV$

- ハドロンコライダーでは理論的に定義された質量を高精度で決定できない。

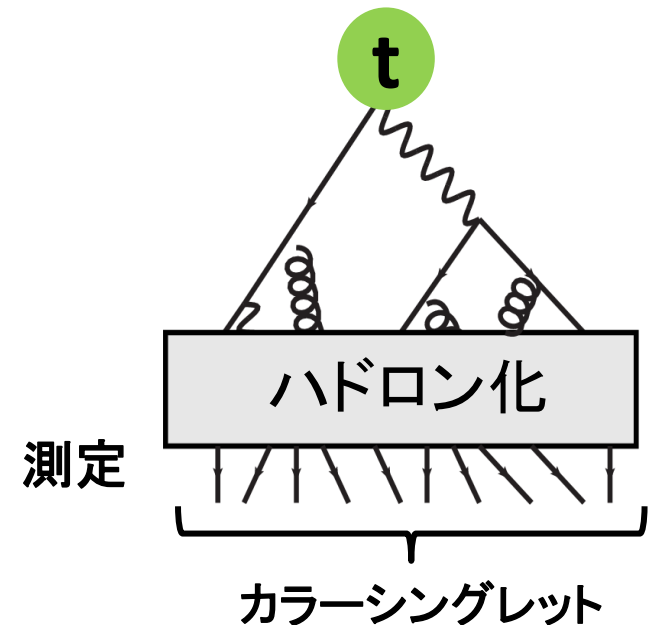
➤ Γ_t の測定

CDF : $0.3 < \Gamma_t < 4.4 GeV$

D0 : $\Gamma_t = 1.99^{+0.69}_{-0.55} GeV$

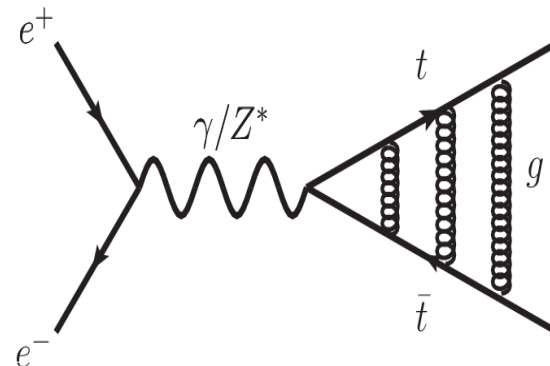
生成

カラー粒子



ILCでの測定：トップ対生成閾値領域の測定

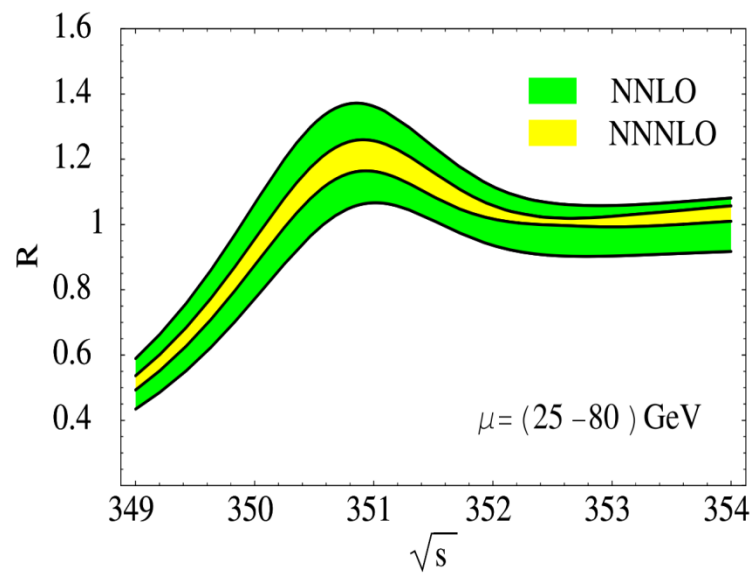
- $\sqrt{s}=350\text{GeV}$ ではトップ対がほぼ静止系で生成
 - グルーオンが何度も交換することによる断面積の上昇効果
 - α_s が大きいいため理論計算の誤差が大きい: NNLOで5%
→将来的には2-3%



- 断面積測定
 - 閾値スキャンにより断面積が依存するトップのパラメータの決定が可能。

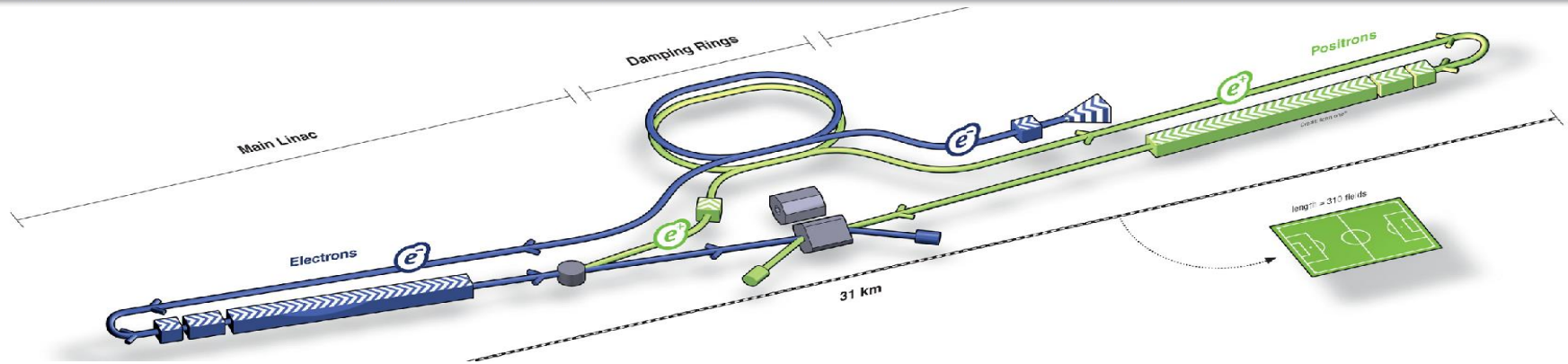
$$\sigma_{tt} \propto f(\sqrt{s}, m_t, \Gamma_t, \alpha_s, y_t, m_h)$$

- 本研究で用いる質量
"**Potential Subtracted**" 質量(m_t^{PS})
 - 束縛状態を作るときに定義可能な質量を用いる。



国際リニアコライダー (ILC) 実験

国際リニアコライダー (物理+加速器)

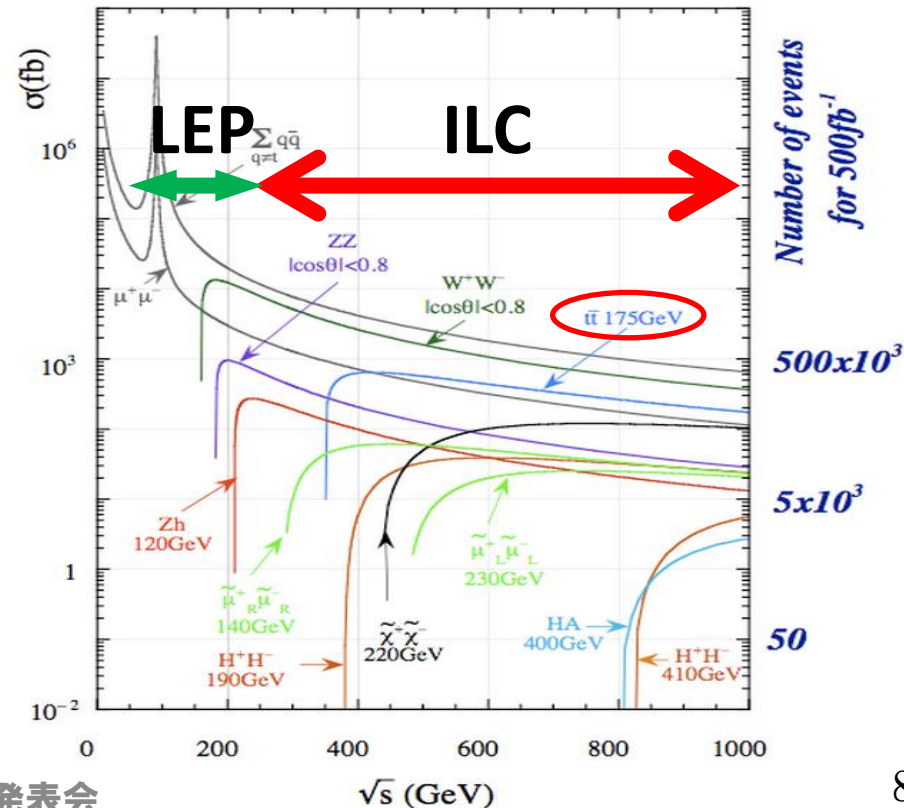


➤ 加速器

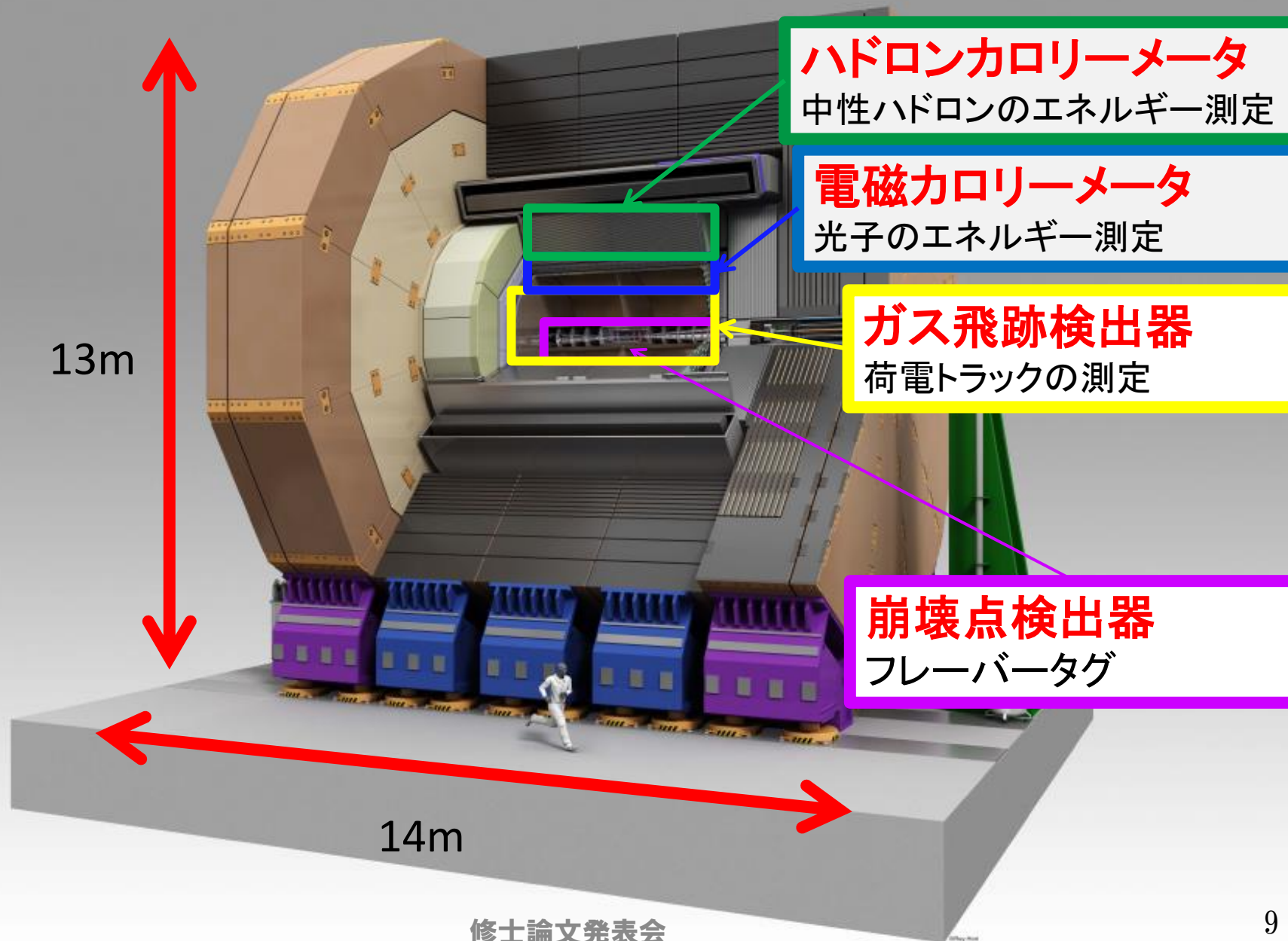
- 電子陽電子衝突型線形加速器
- 第1期
 - 全長31km、 $\sqrt{s} = 250 - 500$ GeV
- 第2期
 - 全長50km、 $\sqrt{s} = 1$ TeV
- 電子±80%、陽電子±30%の偏極が可能

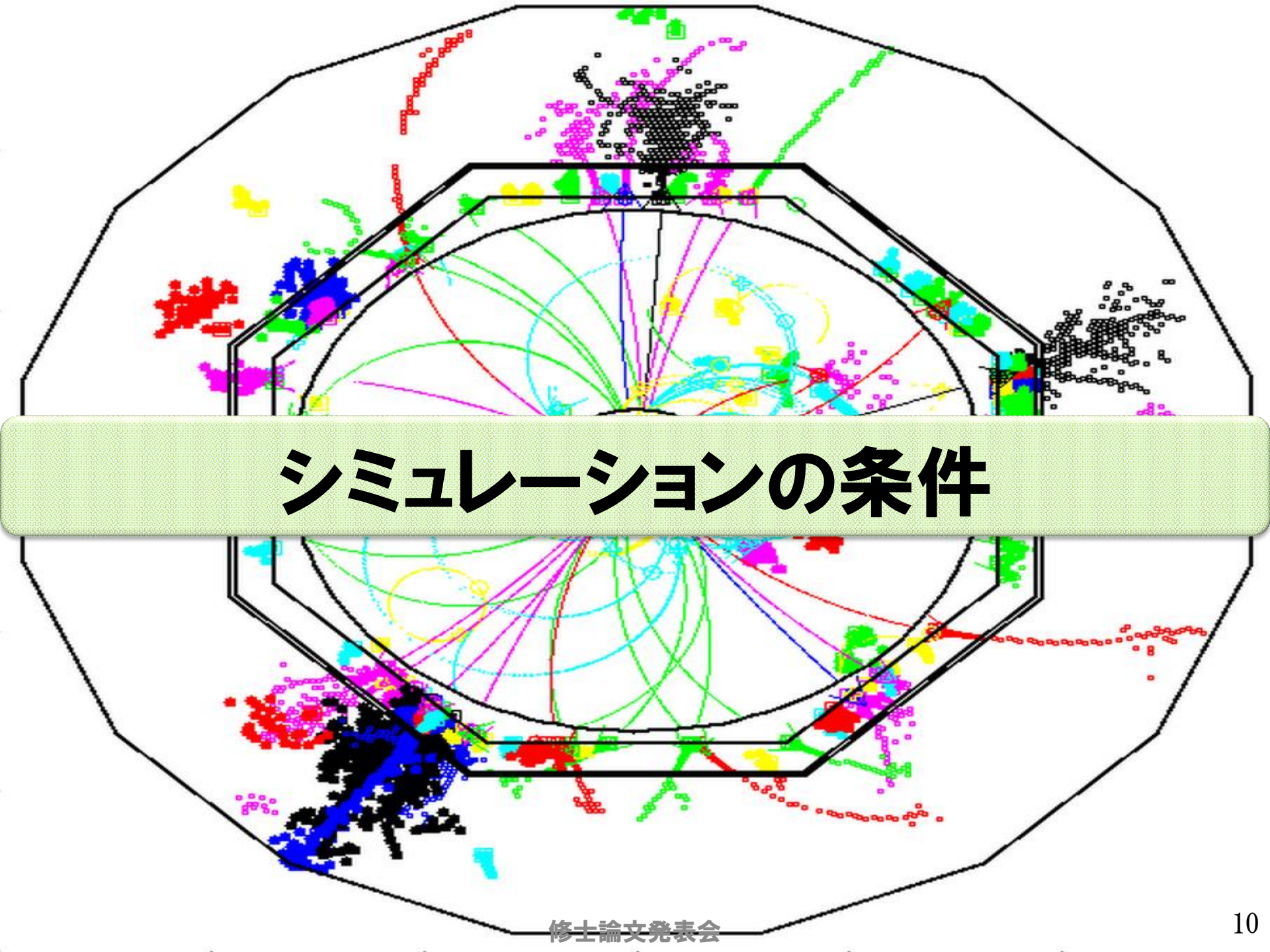
➤ 物理

- 新物理探索
- ヒッグスの精密測定
- トップクォークの全容解明



国際リニアコライダー (検出器)





シミュレーションの条件

シミュレーション

トップ質量

174 GeV

\sqrt{s} (閾値 スキャン)

341 - 350 GeV (1 GeVごと)

偏極

$P(e^+, e^-) = (+0.3, -0.8), (-0.3, +0.8)$
“左巻き”, “右巻き”と表記

積分ルミノシティ

各点 5 fb^{-1} (total 100 fb^{-1} , 約一年間の蓄積)
※350 GeVの運転スケジュールは未定、公式ではない

検出器モデル

ILD_01_v05
(詳細技術設計書に則ったモデル)

イベント生成

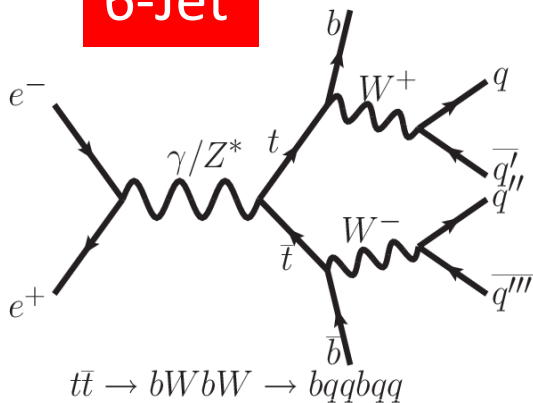
Physsim
(含: 閾値断面積上昇効果、ビーム効果(ISR/
beamstrahlung/beam energy spread))

信号事象と背景事象

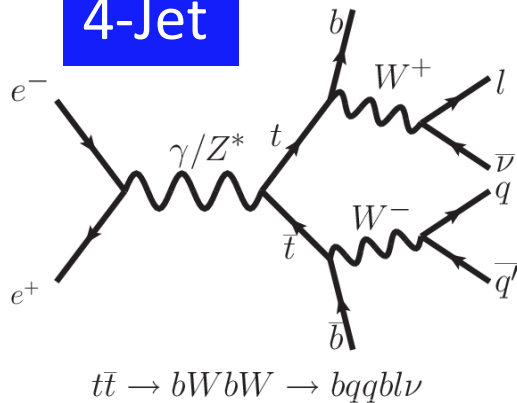
信号

トップはほぼbとWに崩壊するのでWの崩壊過程で種類分け

6-Jet



4-Jet



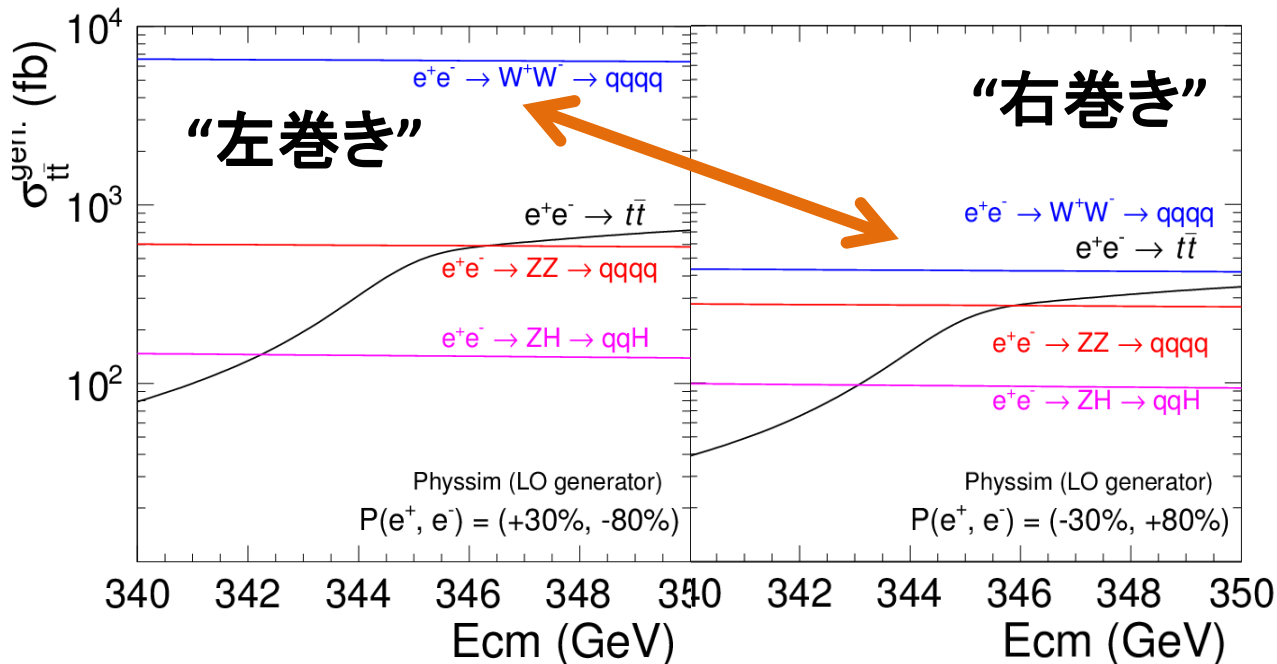
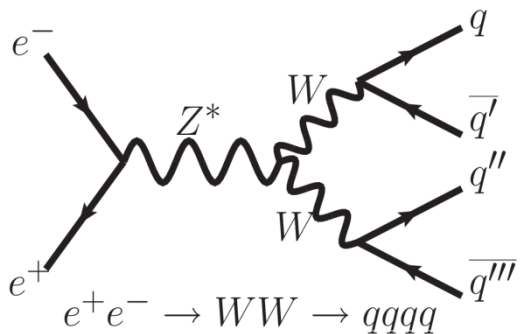
崩壊分岐比

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

背景事象

標準模型の崩壊過程

メイン: WW, ZZ, ZH





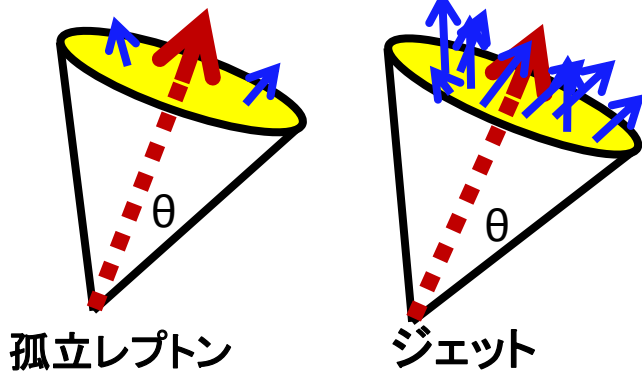
再構成

- Wから直接崩壊するレプトンの抽出
 - 孤立レプトンを定義
- ジェットの再構成
 - ダーラムアルゴリズム
- トップクォークの再構成

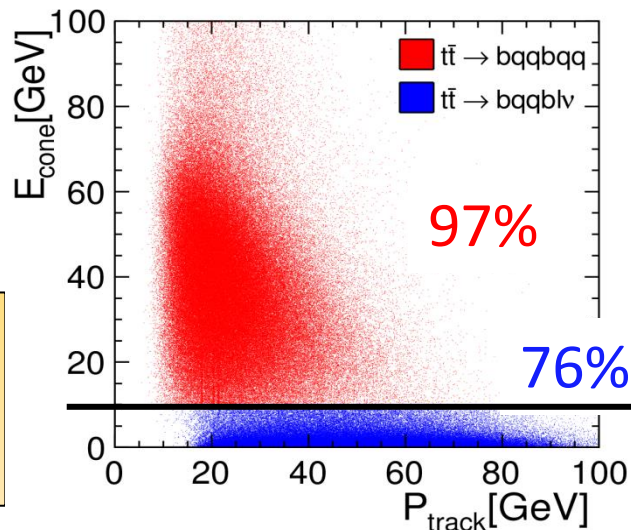
孤立レプトンの抽出とジェットの再構成

◎コーンカットによる孤立レプトンの抽出

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



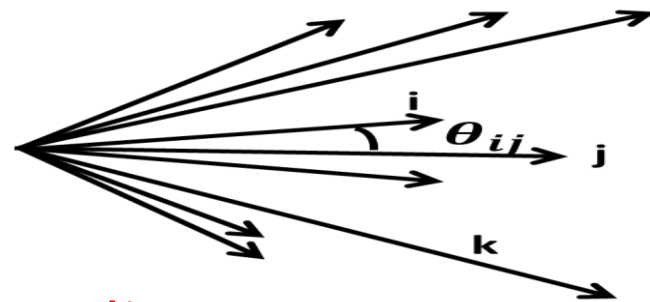
$P_{\text{track}} > 15 \text{ GeV}$
頂角 $\cos\theta = 0.96$
 $E_{\text{cone}} < 10 \text{ GeV}$



◎ダーラムアルゴリズムで粒子群をjetに再構成

○Y値の最小化

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

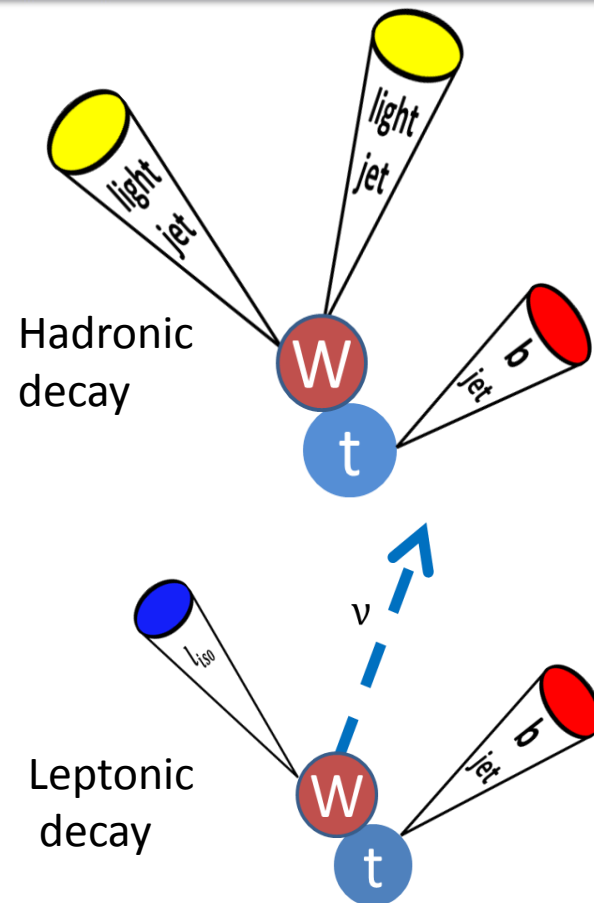


Y_{ij} が最小になる i, j を見つけ出し **強制的に目標のジェット数** までまとめる

$$p_1 p_2 \dots p_i p_j p_k \dots p_{n-1} p_n \longrightarrow j_1 j_2 j_3 \dots j_{n-1} j_n$$

トップ対の再構成 (6-Jet & 4-Jet)

再構成	6-Jet	4-Jet
孤立レプトン(l_{iso})抽出	# of $l_{iso} = 0$	# of $l_{iso} = 1$
anti- k_T アルゴリズムによるビーム背景事象の除去		
ジェットの再構成	6本	4本
bらしいジェットを2本選ぶ	btag \times 2	btag \times 2
Wを再構成 \times 2	$q_1 + q_2$ & $q_3 + q_4$	$q_1 + q_2$ & $l_{iso} + \nu$
トップを再構成 \times 2	(b jet + W) \times 2	(b jet + W) \times 2
χ^2 で最適化	$\chi^2_{6\text{-Jet}}$	$\chi^2_{4\text{-Jet}}$

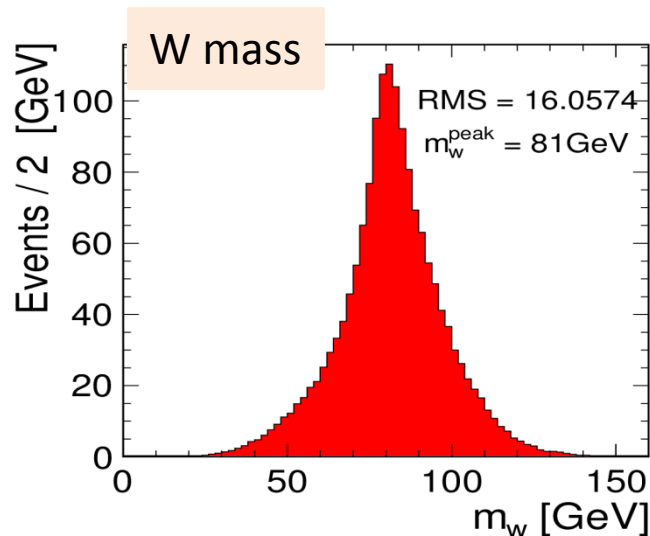


$$\chi^2_{6\text{-Jet}} = \frac{(m_{3j^a\text{reco.}} - m_t)^2}{\sigma_t^2} + \frac{(m_{3j^b\text{reco.}} - m_t)^2}{\sigma_t^2} + \frac{(m_{2j^a\text{reco.}} - m_w)^2}{\sigma_w^2} + \frac{(m_{2j^b\text{reco.}} - m_w)^2}{\sigma_w^2}$$

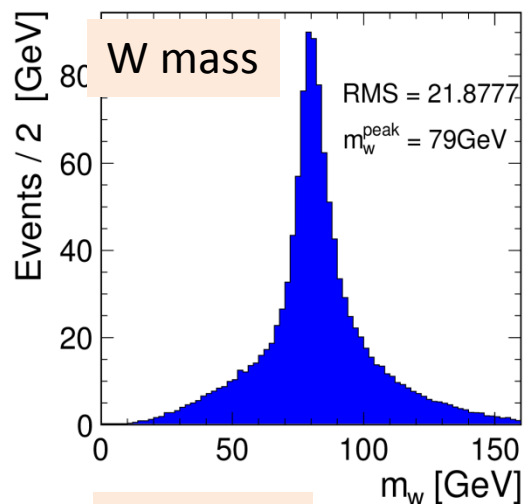
$$\chi^2_{4\text{-Jet}} = \frac{(m_{3j\text{reco.}} - m_t)^2}{\sigma_t^2} + \frac{(m_{jl\nu\text{reco.}} - m_t)^2}{\sigma_t^2} + \frac{(m_{2j\text{reco.}} - m_w)^2}{\sigma_w^2}$$

再構成後の質量分布

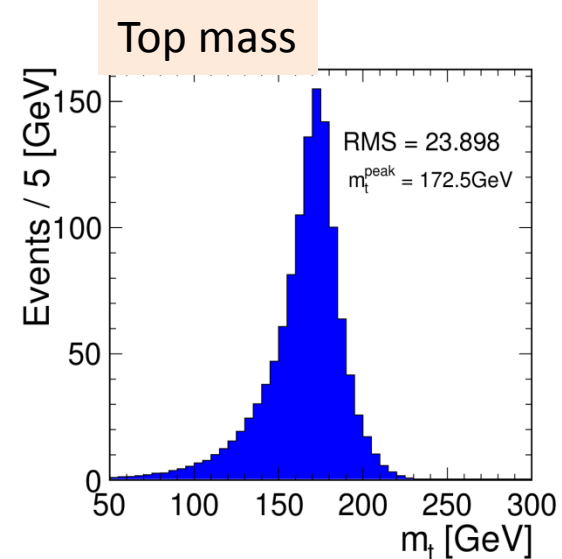
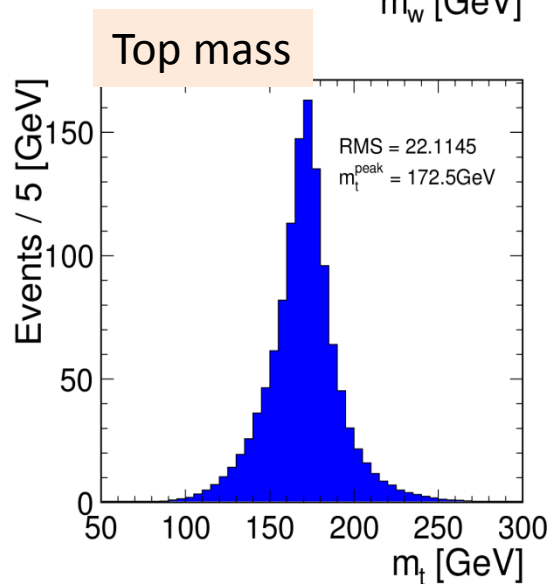
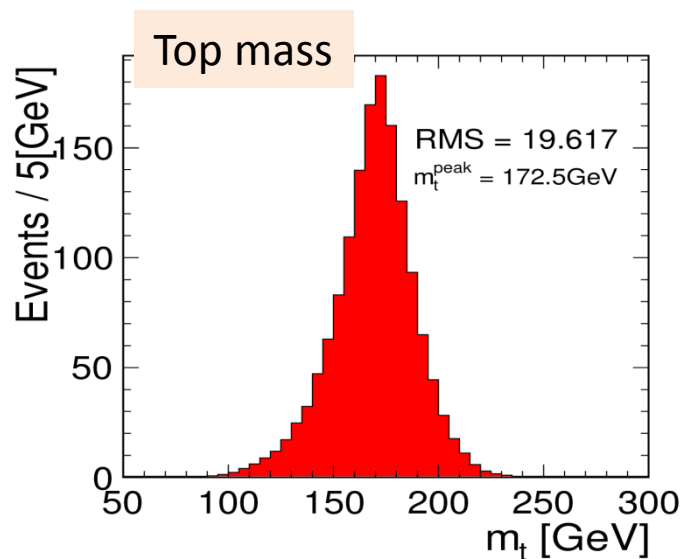
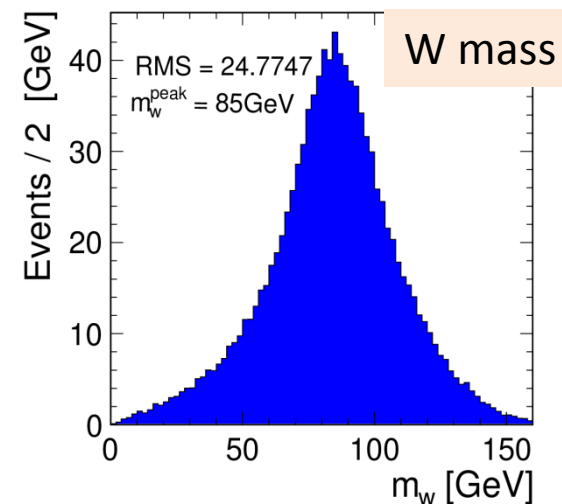
6-Jet



4-Jet
ハドロン



レプトン



事象選別

➤ 背景事象の除去

- 有意度が最大になるように選別
- 信号事象が支配的なため検出効率を落とさないためカットはきつく入れない

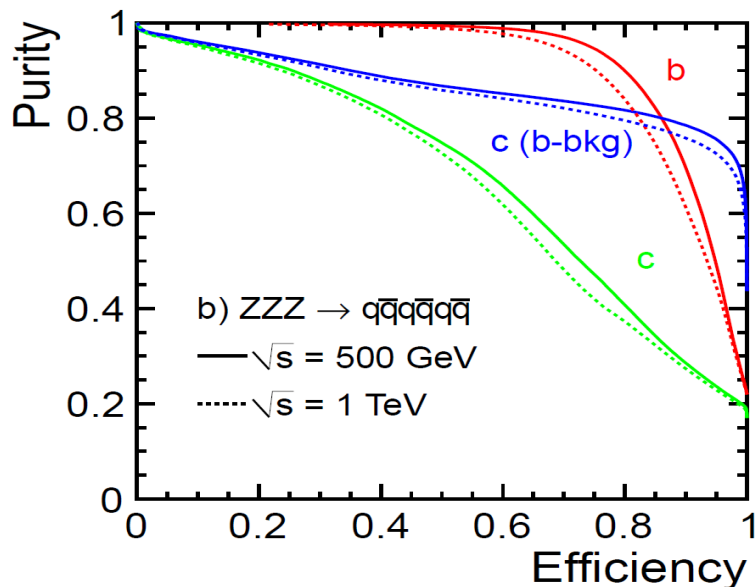
運動学的カット (1)

トップの再構成で要求したbのクオリティカット

<bクォークタグ>

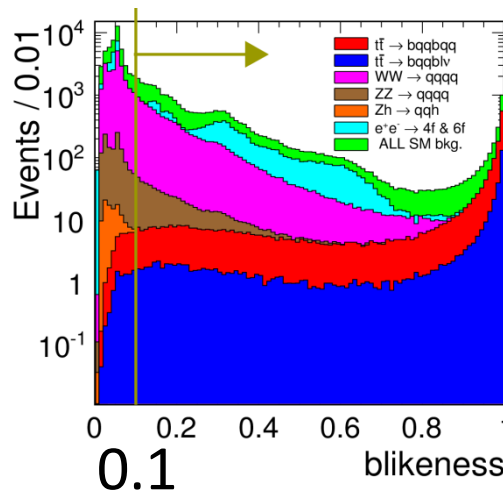
- 主に崩壊点の情報を用いた多変数解析により”bらしさ”を0~1で数値化。1に近いほどbらしいジェット。

bタグのパフォーマンス

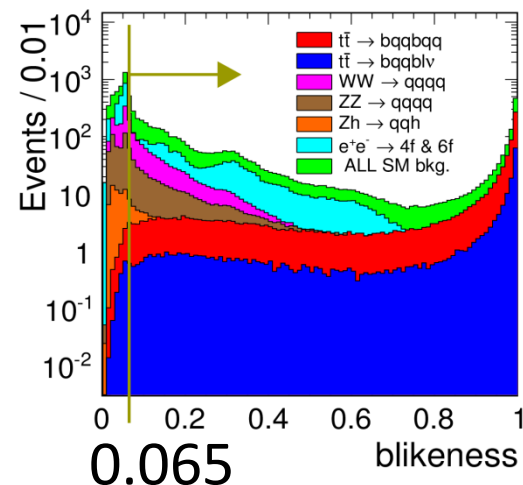


➤ bタグによるカット

- トップはbWに崩壊するので2つのbクォークを要求
- bが出ないイベント、特にWWを排除できる。



6-Jet 左巻き



6-Jet 右巻き

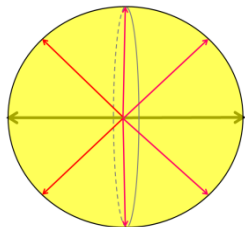
右巻きの方が背景事象数が少ないので
カットを緩くする

運動学的カット (2)

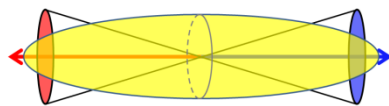
➤ スラスト

- イベント形状
軽いクォークなど、トップよりboostされるものを排除。

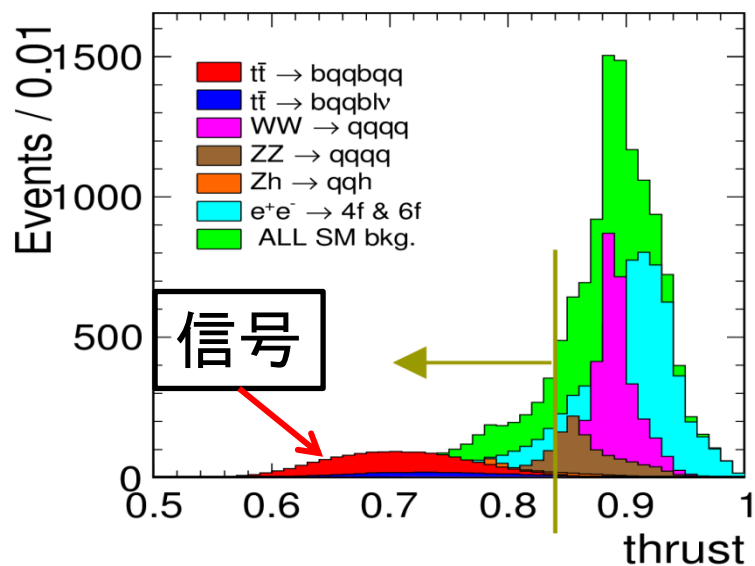
$$T = \max_{\vec{n}} \frac{\sum_i |\vec{p}_i \cdot \vec{n}|}{\sum_i |\vec{p}_i|}$$



T ~ 1/2



T ~ 1



その他のカット

- 可視エネルギー
 - ニュートリノイベントの選別
- 損失横運動量
 - ニュートリノイベントの選別
- トップの質量
 - 再構成ができていないもの
- Y値(6-Jetの解析に用いた)
 - ジェットクラスタリング、ジェットの本数
- 粒子数
 - ニュートリノイベント、クォークが出るイベント

選別結果 6-Jet @350GeV

$$\int \mathcal{L}(t) dt = 5(\text{fb}^{-1}) \quad S = \frac{N_{Sig}}{\sqrt{N_{Sig} + N_{BG.}}}$$

左巻き	tt6j	tt4j	tt2j	WW	ZZ	ZH	6f+4f	S_{6j}
Generated	1643	1583	381	32664	3004	694	71691	4.9
# of lepton = 0	1592	357	19	32079	2957	638	39983	5.7
btag > 0.1 × 2	1515	340	18	3601	1398	471	7399	12.5
Thrust < 0.84	1485	313	13	398	433	383	1084	23.2
Evis > 290 GeV	1481	159	1	218	310	309	90	29.2
missPt < 38 GeV	1473	72	0	217	307	303	80	29.7
$m_t > 100 \text{ GeV} \times 2$	1467	69	0	180	253	255	63	30.7
y45 > 0.0015								
y56 > 0.0007	1419	45	0	68	71	80	36	34.2
# of pfos > 86	1406	38	0	45	59	73	33	34.6

S/N

5.67

$\delta\sigma/\sigma$

2.9%

選別まとめ

左巻き

\sqrt{s} GeV	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350
$S_{6\text{-Jet}}$	9.5	11.8	15.4	20.9	27.1	30.3	31.6	32.7	33.7	34.6
$\delta\sigma/\sigma_{6\text{-Jet}}$	10.5	8.5	6.5	4.8	3.7	3.3	3.2	3.1	3.0	2.9
$S_{4\text{-Jet}}$	10.2	12.2	15.1	19.7	24.7	27.4	28.4	29.3	30.1	30.8
$\delta\sigma/\sigma_{4\text{-Jet}}$	9.8	8.2	6.6	5.1	4.0	3.6	3.5	3.4	3.3	3.2

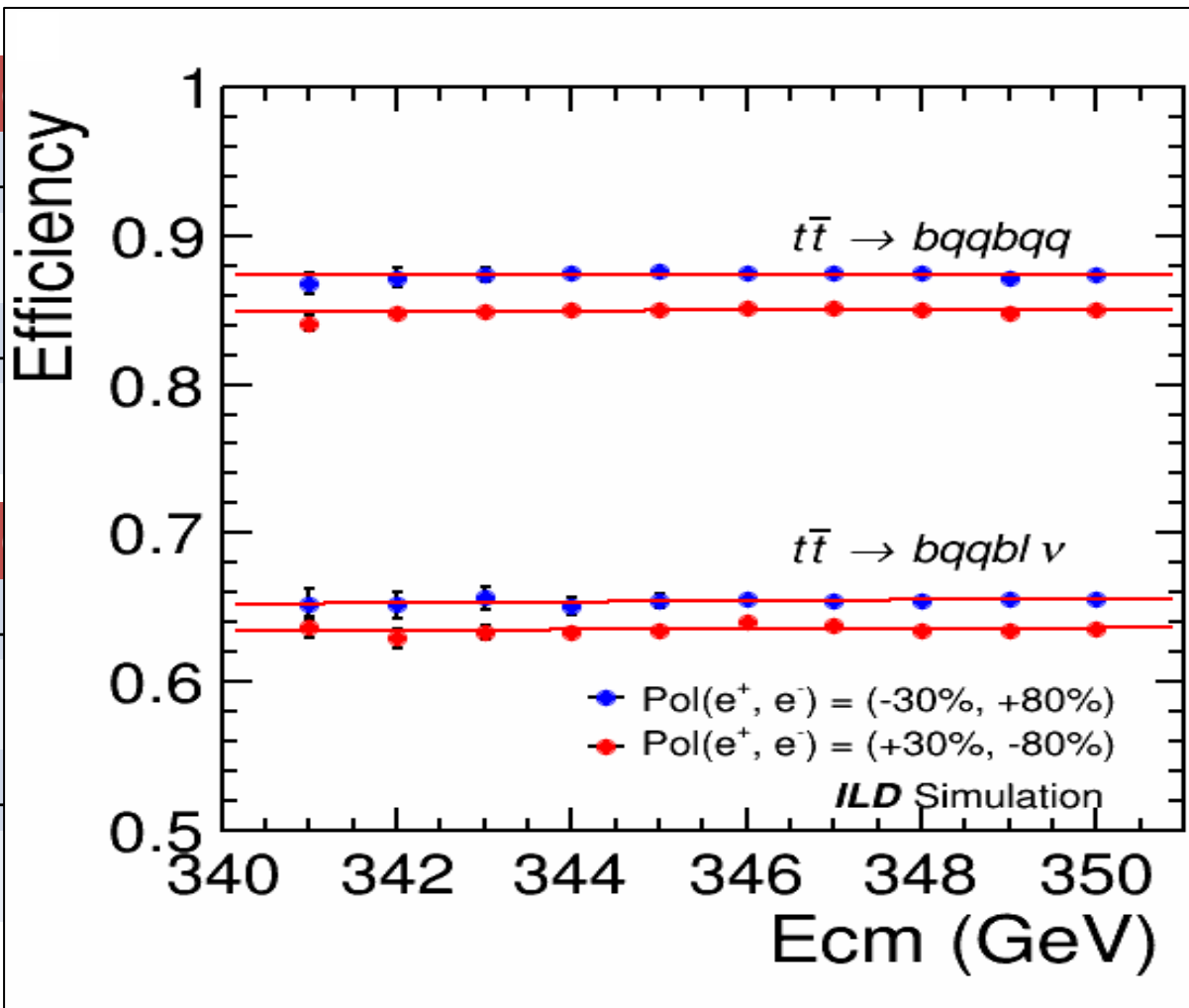
右巻き

\sqrt{s} GeV	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350
$S_{6\text{-Jet}}$	6.9	8.6	11.1	14.9	19.2	21.4	22.3	23	23.7	24.3
$\delta\sigma/\sigma_{6\text{-Jet}}$	14.5	11.6	9.0	6.7	5.2	4.7	4.5	4.3	4.2	4.1
$S_{4\text{-Jet}}$	7.5	8.9	11	14	17.5	19.3	20	20.7	21.3	21.8
$\delta\sigma/\sigma_{4\text{-Jet}}$	13.3	11.2	9.1	7.1	5.7	5.2	5.0	4.8	4.7	4.6

選別まとめ

左巻き

\sqrt{s}
 S_6
 $\delta\sigma/\sigma$
 S_4
 $\delta\sigma/\sigma$

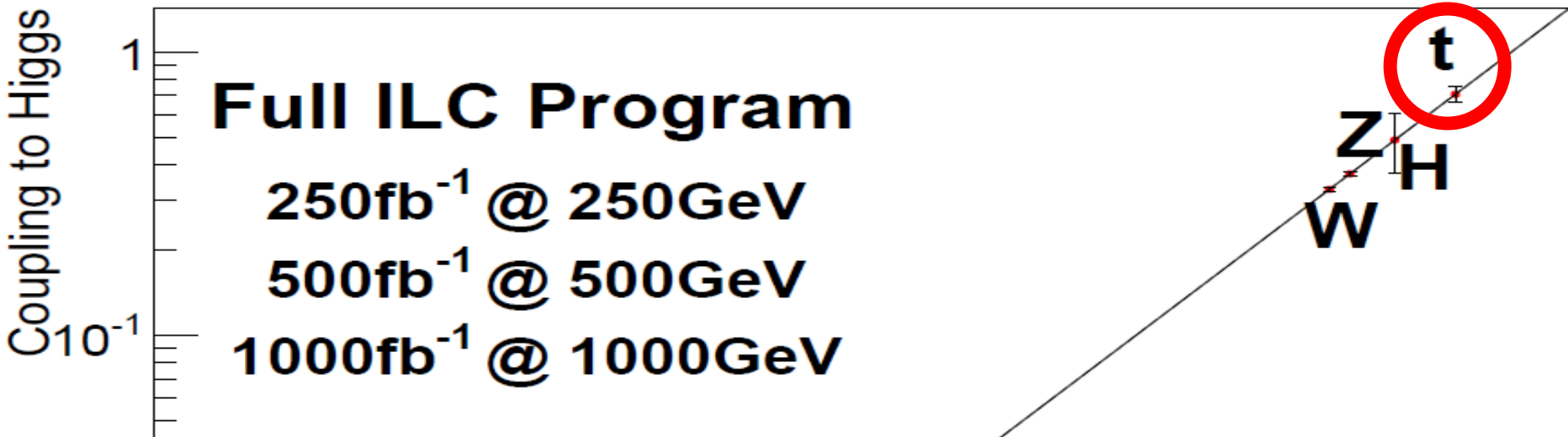


	349	350
\sqrt{s}	34.7	34.6
S_6	33.7	34.6
$\delta\sigma/\sigma$	3.1	2.9
S_4	30.3	30.8
$\delta\sigma/\sigma$	3.4	3.2

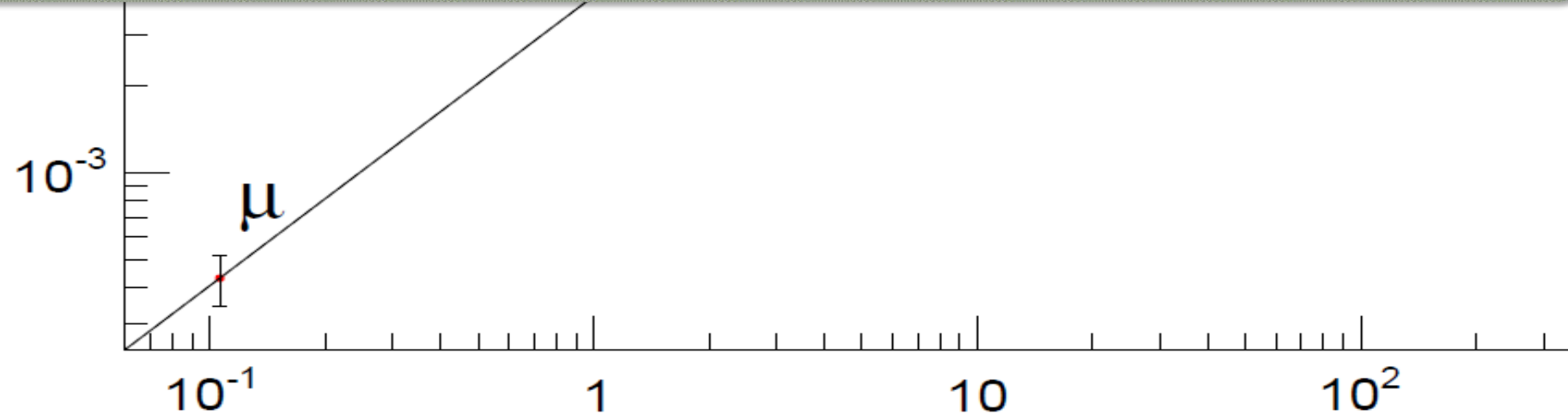
右巻き

\sqrt{s}
 S_6
 $\delta\sigma/\sigma$
 S_4
 $\delta\sigma/\sigma$

	349	350
\sqrt{s}	23.8	24.3
S_6	23.7	24.3
$\delta\sigma/\sigma$	4.3	4.1
S_4	21.7	21.8
$\delta\sigma/\sigma$	4.8	4.6



解析
- トップ湯川結合の測定 -



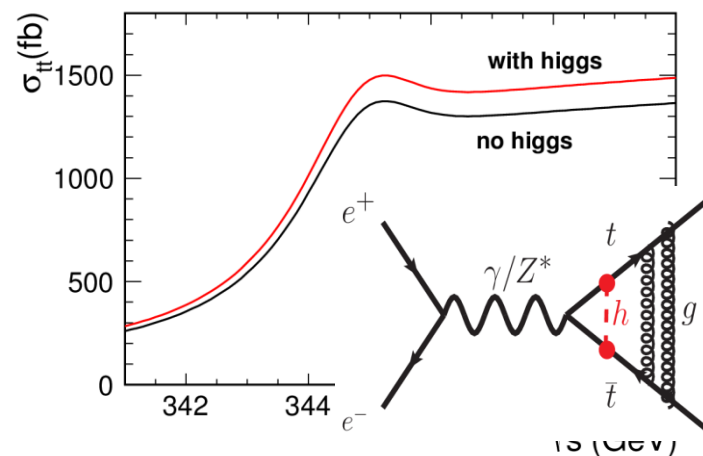
トップ湯川結合

二つの偏極、 $\sqrt{s}=341\sim 350\text{GeV}$ の選別から得た有意度を用いて、トップ湯川の統計誤差を見積もる。

ヒッグスがトップの断面積に与える影響は、ヒッグスがトップ対の間を交換することによる**9%**の断面積上昇。

$$\sigma_{tt} \propto |\mathcal{M}_{w/o\ higgs} + y_t^2 \mathcal{M}_{w/\ higgs}|^2$$

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



統計誤差 各偏極 50 fb ⁻¹	6-Jet (左巻き)	6-Jet (右巻き)	4-Jet (左巻き)	4-Jet (右巻き)	6-Jet + 4-Jet (左巻き)	6-Jet + 4-Jet (右巻き)	崩壊過程、各偏極の統合 (100 fb ⁻¹)
$\frac{\delta\sigma}{\sigma}$	1.2%	1.7%	1.3%	1.9%	0.9%	1.3%	4.4%
$\frac{\delta y_t}{y_t}$	7.2%	10.2%	8.0%	11.3%	5.4%	7.6%	
y_t	7.2%	10.2%	8.0%	11.3%	5.4%	7.6%	

解析

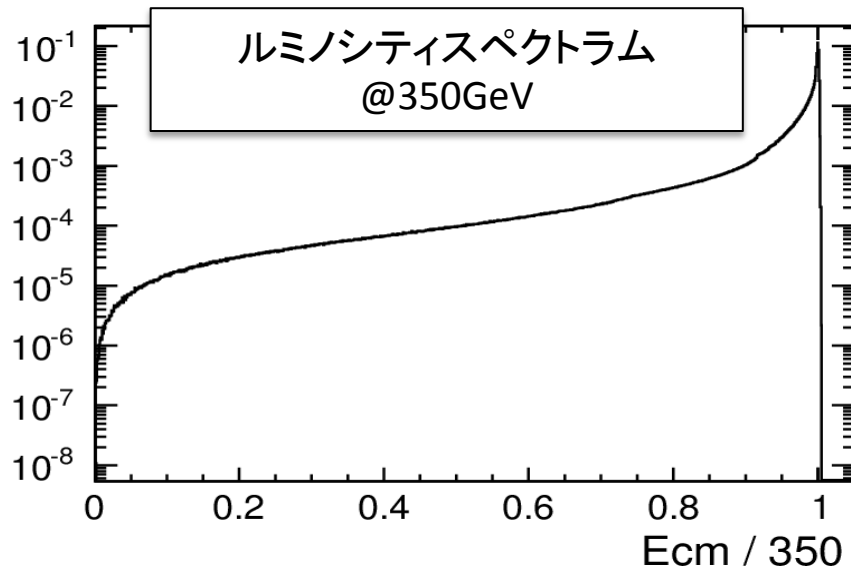
-質量、崩壊幅の測定-

- 断面積のフィットによって求める
 - ルミノシティスペクトラムの畳み込み
 - NNLOの理論計算とのテンプレートフィット

ビーム効果の畳み込み

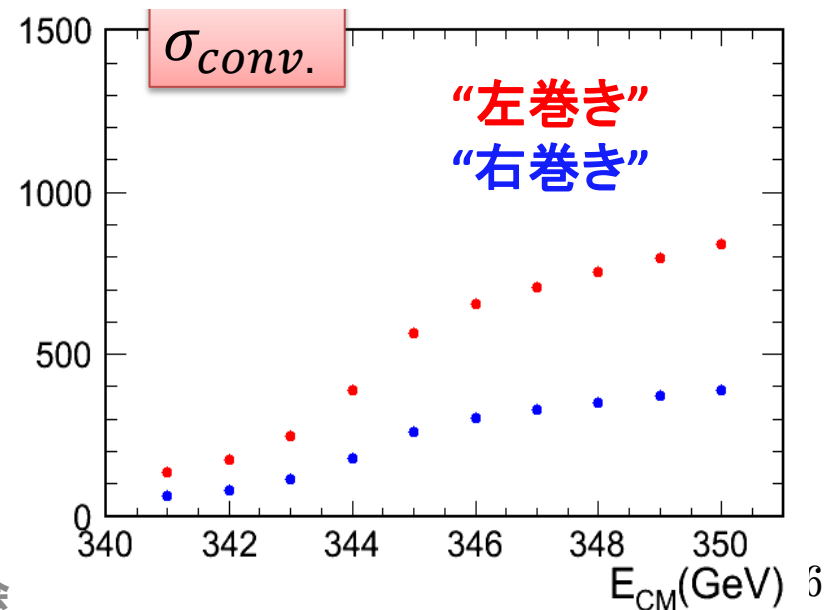
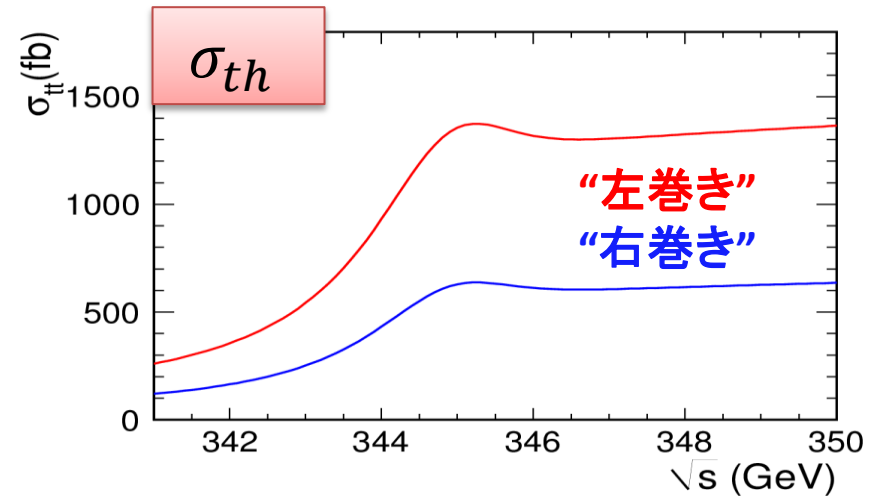
◎閾値領域の測定ではビーム効果により
エネルギーが落ちるとトップ生成に関わる

ルミノシテイスpekトラム(衝突エネルギーの分布)を抽出して理論断面積の畳み込み積分



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

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



断面積のフィット方法

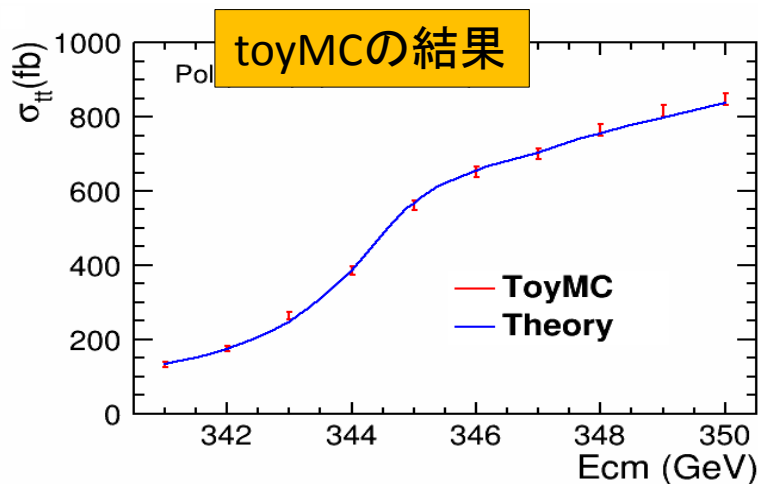
➤ 断面積のテンプレート作成:

- m_t^{PS} 、 Γ_t 、 E_{CM} を変動させ断面積のグリッドを作成
- 中心値 $(m_t^{PS}, \Gamma_t) = (172.000, 1.400)$
- α_s 、 y_t を固定

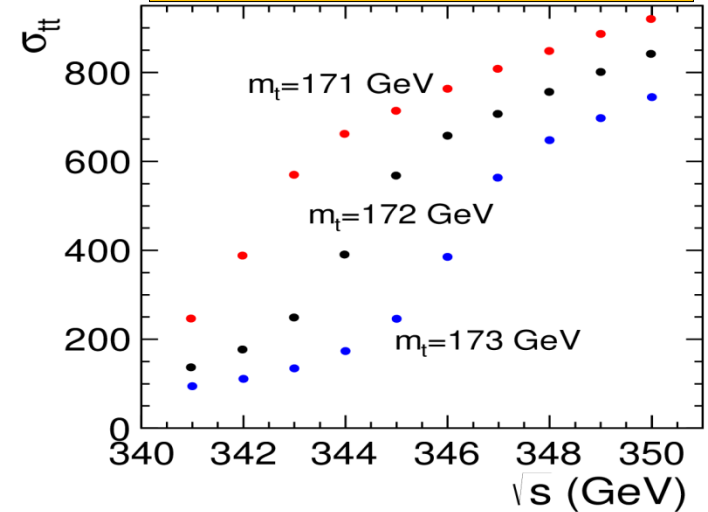
m_t と α_s でフィットする方法もあるが、今後 α_s が格子QCDで高精度で決められていると予想したため m_t^{PS} 、 Γ_t でフィット。

➤ ToyMC

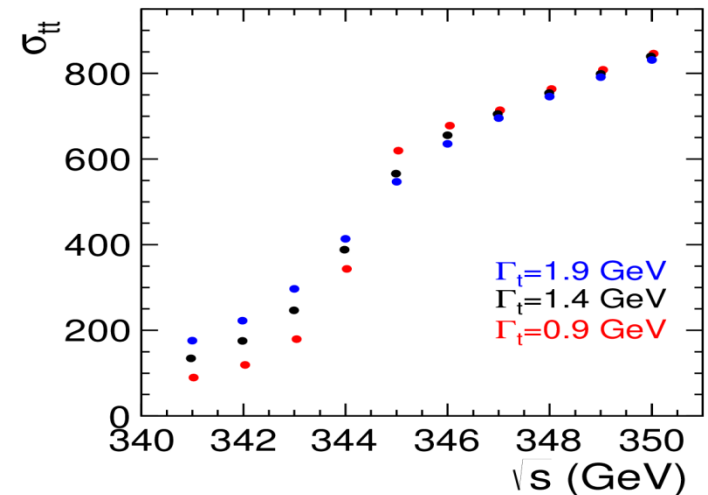
- LOの断面積をNNLOにスケール
- 各エネルギー一点で m_t^{PS} 、 Γ_t を内挿し、断面積のフィット
- 全エネルギー一点を用いて m_t^{PS} 、 Γ_t の最適化



質量を動かしたテンプレート



崩壊幅を動かしたテンプレート



結果

統計誤差(MeV)	6-Jet		4-Jet	
	m_t^{PS}	Γ_t	m_t^{PS}	Γ_t
左巻き(50fb^{-1})	28	40	33	48
右巻き(50fb^{-1})	42	63	48	67
左巻き(50fb^{-1})+右巻き(50fb^{-1})	23	34	27	39

中心値 : $m_t^{PS} = 172.000 \text{ GeV}$, $\Gamma_t = 1.400 \text{ GeV}$

全ての統合

$m_t^{PS}(\text{GeV})$	$\Gamma_t(\text{GeV})$
172.001 ± 0.018	1.399 ± 0.026

◎ $PS \rightarrow \overline{MS}$ 質量

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

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

ディスカッション

➤ 主な系統誤差

- 実験側: ルミノシティスペクトラムの抽出
- 理論側: 理論計算の誤差 (Snowmass inputより)

項目	y_t	m_t^{PS}	$m_t^{\overline{MS}}$	Γ_t
統計誤差	4.4%	18 MeV	17 MeV	26 MeV
実験	Unknown	~80MeV	~80MeV	Unknown
理論	22%	>100 MeV	>100MeV	Unknown
その他	Unknown	unknown	変換誤差※	Unknown

➤ トップ湯川結合

- 短期間で高統計量が得られる
- 理論計算: 現状は22%。10年後11%?

➤ 質量

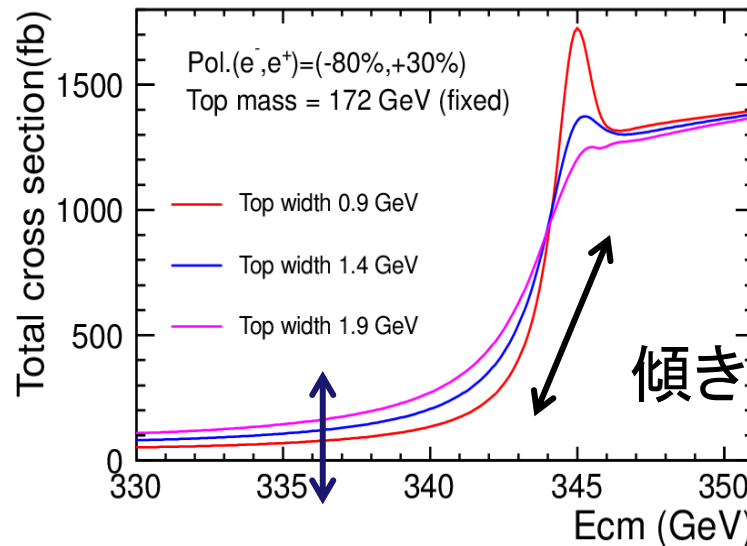
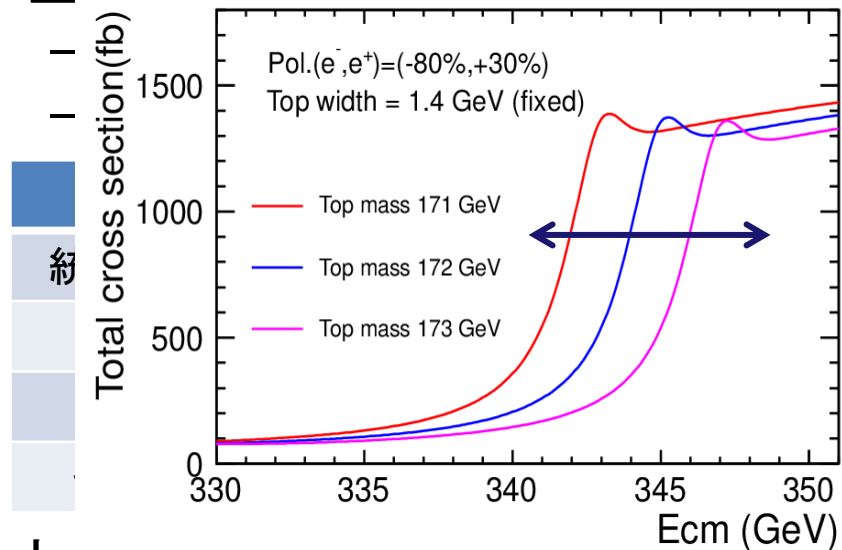
- ※ PS → \overline{MS} に変換誤差
 - 理論式の誤差 10 MeV, α_s の不定性 (現在: 54 MeV, 10年後: ??)
- \overline{MS} 質量の精度が現在の約30倍向上 (D0は4.5 GeVの誤差)

➤ 崩壊幅

- 系統誤差のstudyはされていない。
- ルミノシティスペクトラムの誤差は m_t ほど大きくないと予想

ディスカッション

➤ 主



➤ ト

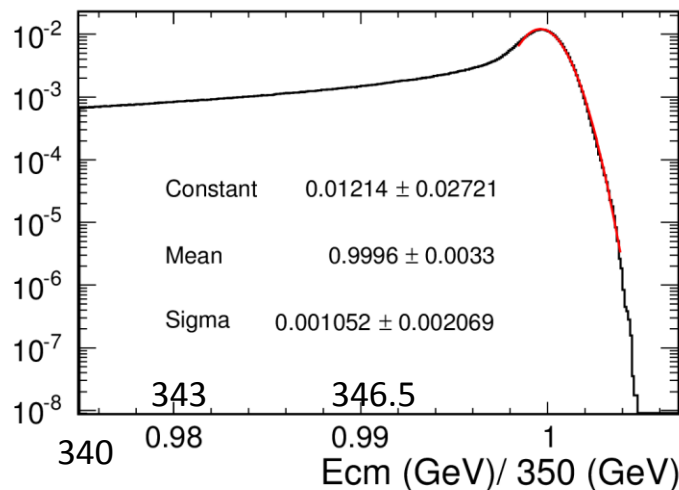
- 短期間で高統計量が得られる
- 理論計算: 現

➤ 質量

- ※ PS → \overline{MS}
- 理論式
- \overline{MS} 質量の精

➤ 崩壊幅

- 系統誤差の
- ルミノシティ



10年後: ??)

いと予想

まとめ

- ILCの $\sqrt{s}=350\text{GeV}$ 付近では、閾値スキャンをしてトップクォーク対生成断面積の測定による m_t 、 Γ_t の決定が可能。 y_t にも感度。
- 本解析では6-Jetと4-Jetを用いて y_t 、 m_t 、 Γ_t の統計誤差をフルシミュレーション解析で見積もった。
- 質量の測定精度は現在のものとは比べ、約30倍の向上が見込める。

統計誤差

$\Delta y_t / y_t$	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)

予備

スライド

偏極率

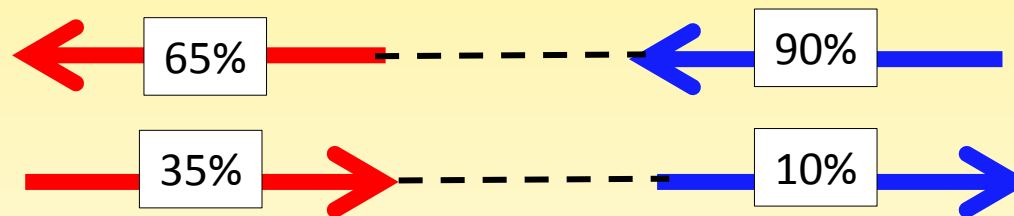
- ILCでは偏極により反応率をコントロールすることが可能(最大偏極(e^+, e^-) = ($\pm 30, \mp 80$))。

$$\text{偏極率の定義 : } P = \frac{e_R - e_L}{e_R + e_L}$$

例) (e^+, e^-) = ($+30, -80$)の計算例

右巻き左巻きの比の計算

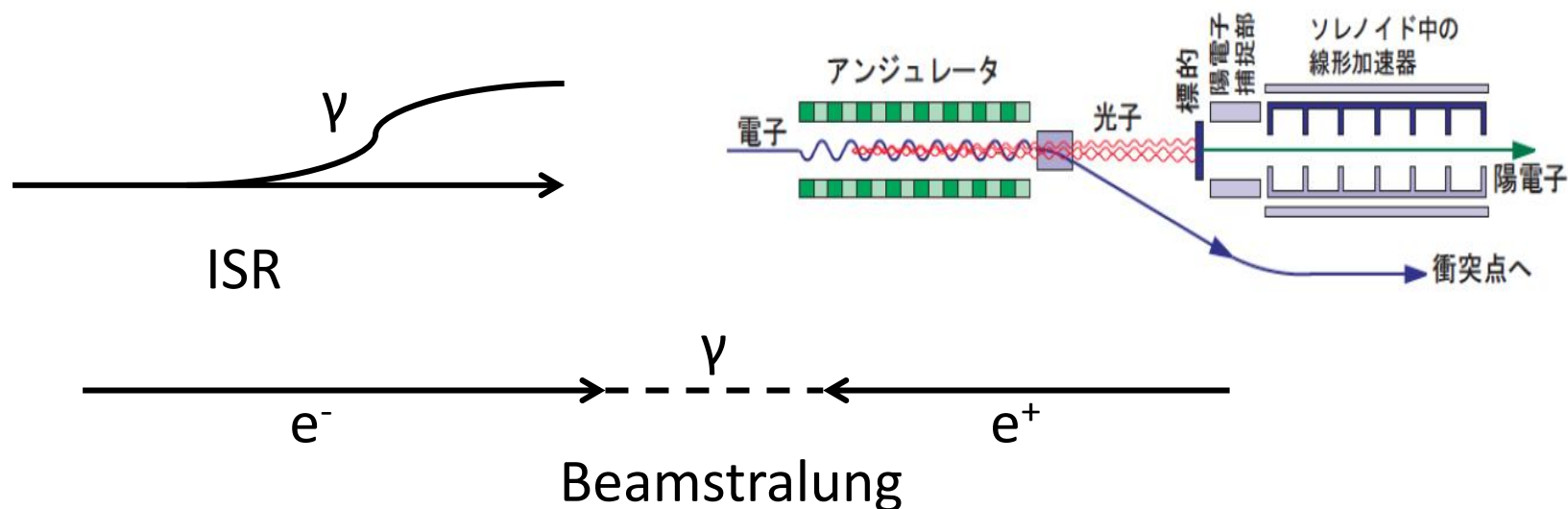
$$\text{陽電子 : } +0.3 = \frac{0.65 - 0.35}{0.65 + 0.35} \quad \text{電子 : } -0.8 = \frac{0.1 - 0.9}{0.1 + 0.9}$$



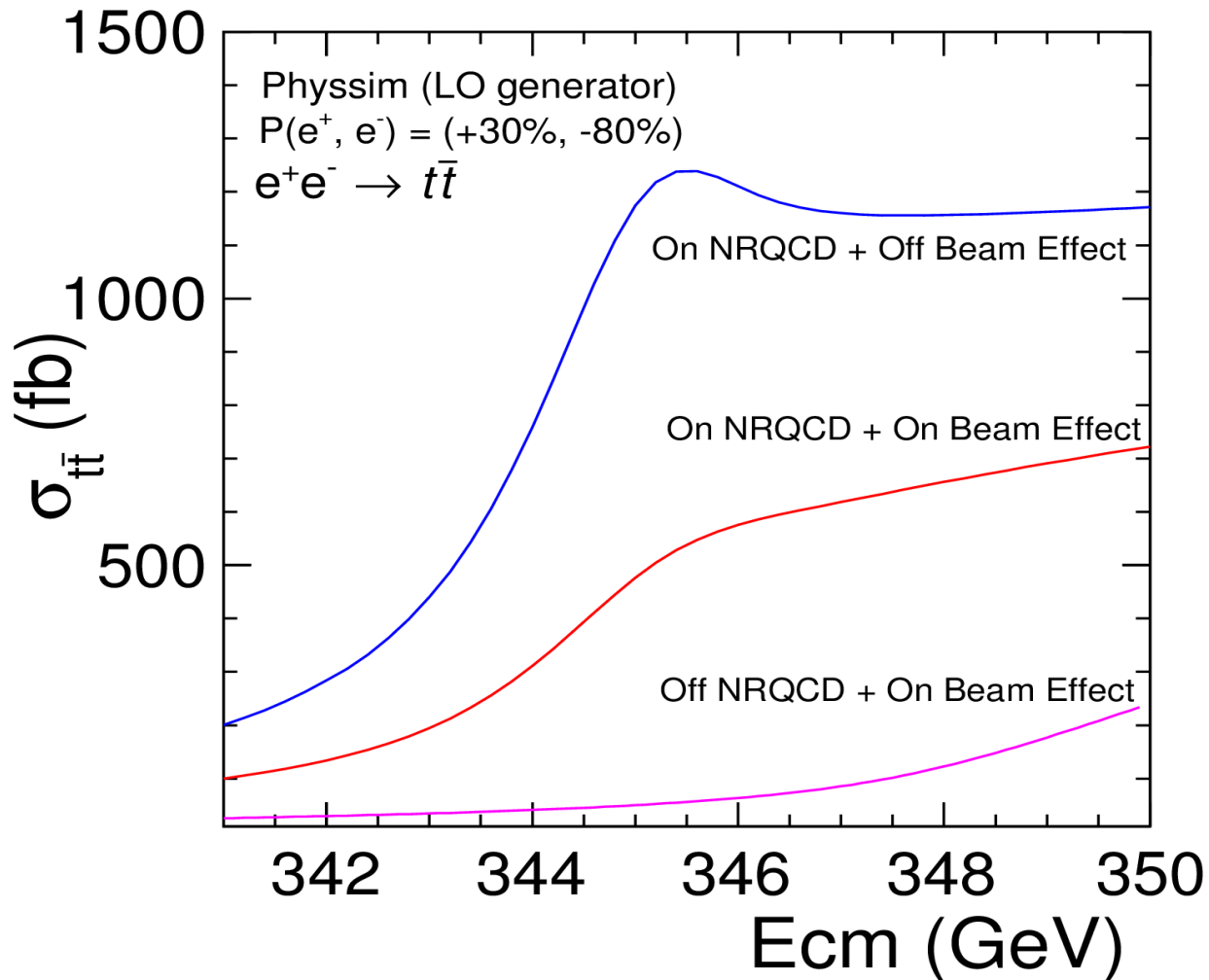
$$\sigma_{e_R^+ 30\% e_L^- 80\%} = (0.65 \times 0.9) \times \sigma_{e_R^+ e_L^-} + (0.35 \times 0.1) \times \sigma_{e_L^+ e_R^-}$$

ビーム効果

- Initial State Radiation
 - 電子陽電子が γ を放出する現象
- Beam Energy Spread
 - 陽電子生成の際、電子はアンジュレータを通るためエネルギーに揺らぎができる現象
- Beamstrahlung
 - 対になるバンチが電磁相互作用により γ を放出する現象



ビーム効果とQCD効果による断面積の変化

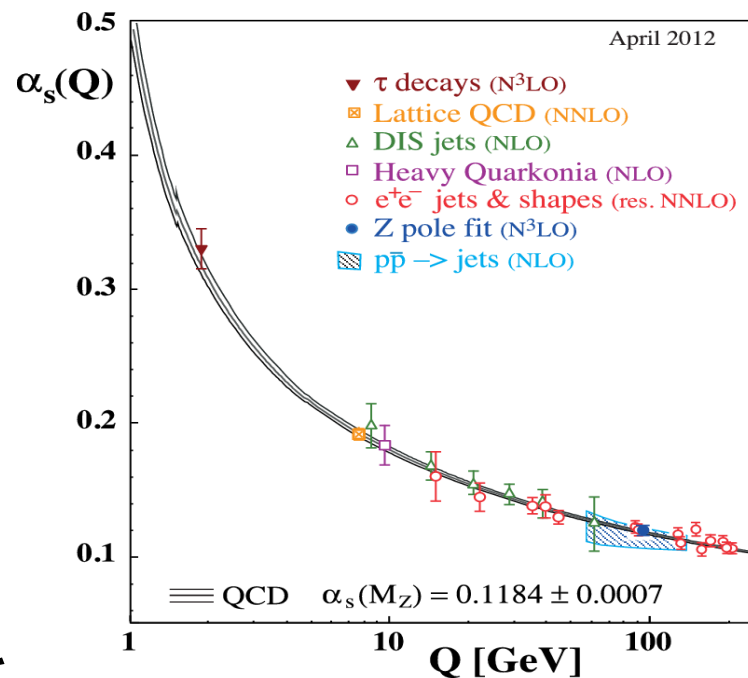


漸近自由性

- α_s はエネルギー依存性が強い
 - Λ_{QCD} は α_s が発散する値

$$\alpha_s(Q^2) = \frac{12\pi}{(33 - 2N_f) \ln\left(\frac{Q^2}{\Lambda_{\text{QCD}}}\right)}$$

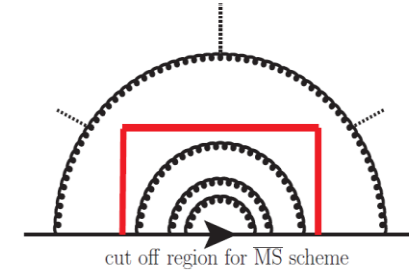
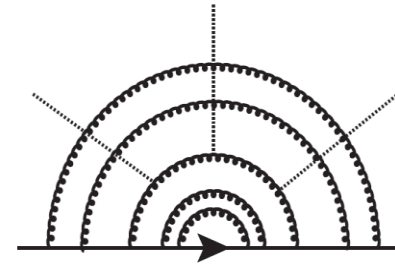
- エネルギースケールが小さいと α_s が大きく摂動計算が収束しない。エネルギースケールが大きくなると α_s が小さくなり摂動計算可能になる。



質量の定義

➤ ポール質量

- 静止系のエネルギー
- 全てのgluonの相互作用を考慮



➤ \overline{MS} 質量

- エネルギースケールでカットオフ m_t の定義では m_t 自信に置く

➤ Potential Subtracted 質量

- 束縛状態を作るときに定義可
- $r=0$ の時の波動関数で定義
- ポール質量の不定性をポテンシャルでキャンセル

➤ 1S質量

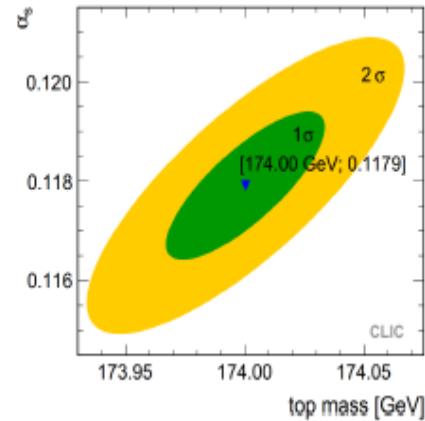
- PS質量とほぼ同じ定義
- 波動関数の期待値をとる

$$V_{\text{QCD}}(r) = \int \frac{d^3\vec{q}}{(2\pi)^3} e^{i\vec{q}\cdot\vec{r}} \tilde{V}(q)$$
$$m_{\text{PS}} = m_{\text{pole}} + \int \frac{d^3\vec{q}}{(2\pi)^3} \tilde{V}(q)$$
$$m_{1\text{S}} = m_{\text{pole}} + \langle V_{\text{QCD}}(r) \rangle$$

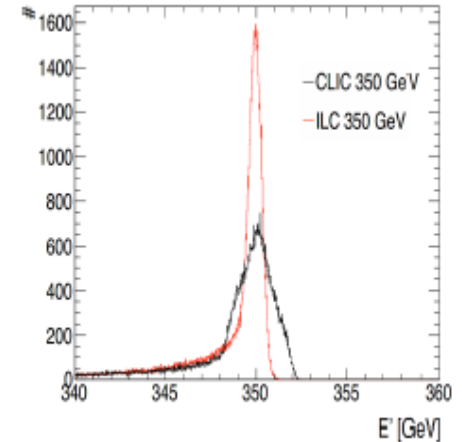
他実験との比較

➤ CLIC

- 100fb^{-1} の統計
- m_t^{1S} と α_s の2Dフィット
- $\delta m_t^{1S} = 34\text{MeV}$

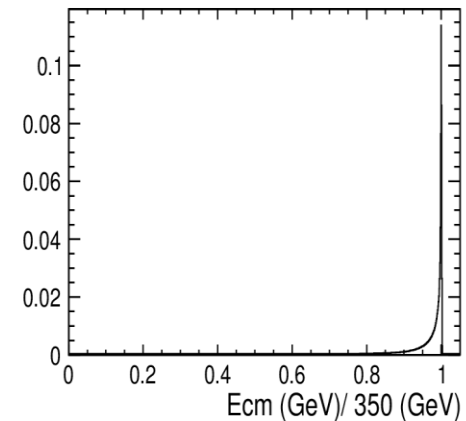
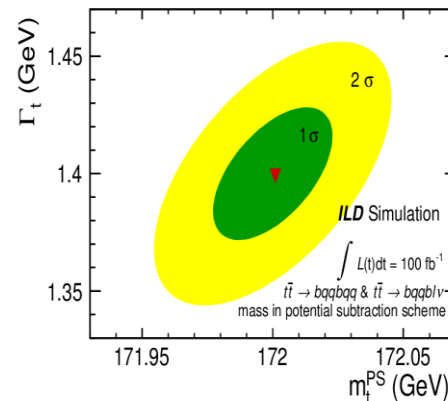


ルミノシティスペクトラム



➤ ILC

- 100fb^{-1} の統計
- m_t^{PS} と Γ_t の2Dフィット
- $m_t^{\text{PS}} = 18\text{MEV}$



フレーバータグ (LCFIPlus)

➤ 多変数解析

– Boosted decision trees を用いた解析

- 入力変数を与えて「トレーニング」すると関数を定義してジェットを抽出。

➤ 崩壊点の情報

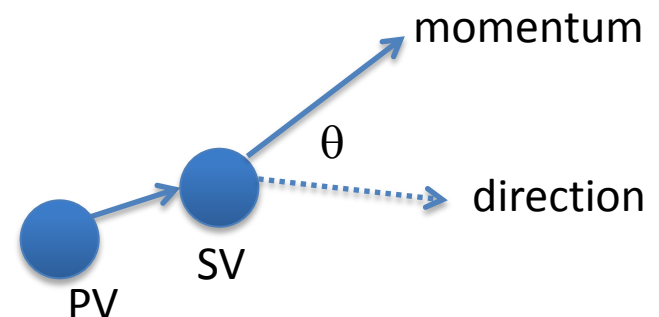
– Vertex mass

– Primary vertex(PV)

– Secondary vertex(SV)

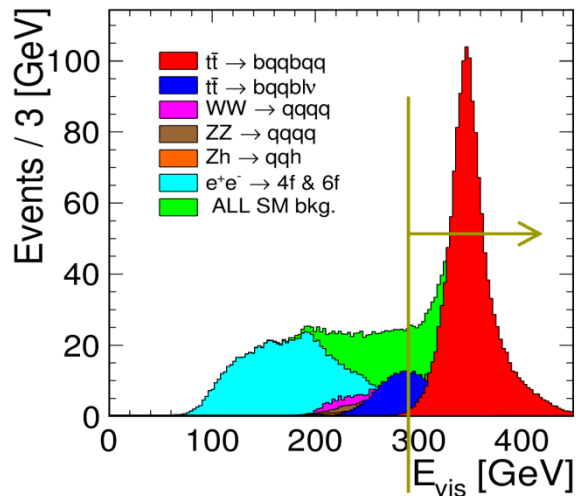
– 崩壊点からの距離

など

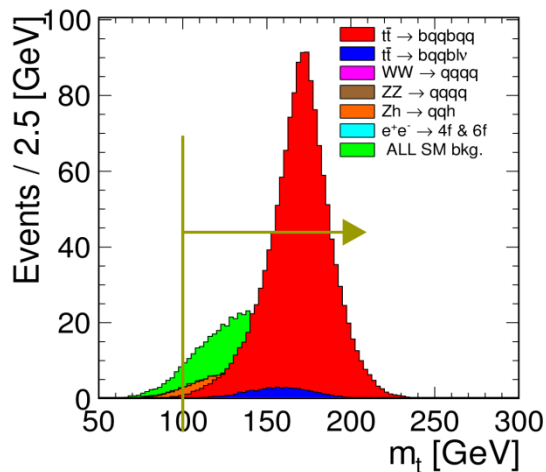


その他カット

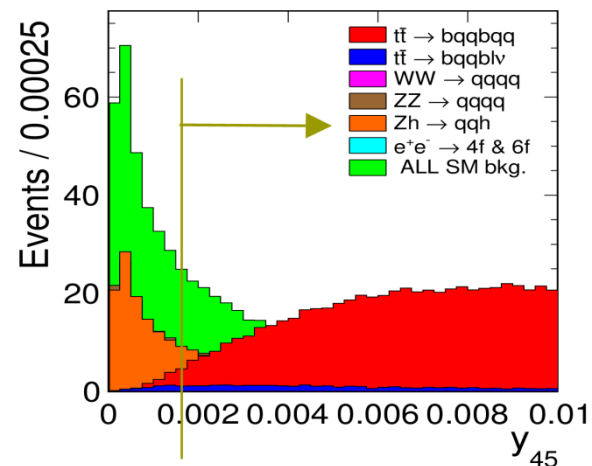
可視エネルギー



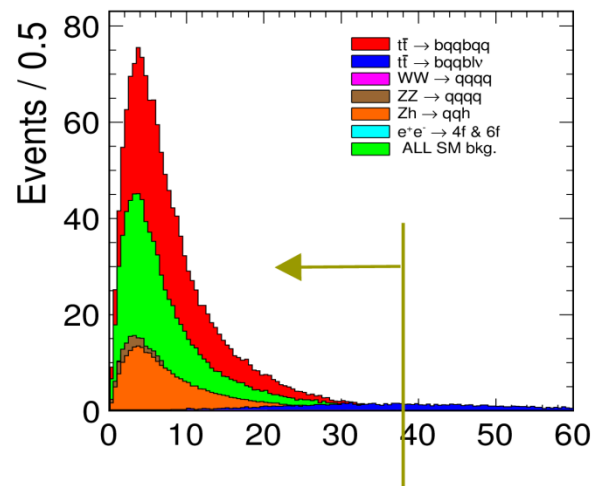
トップ質量



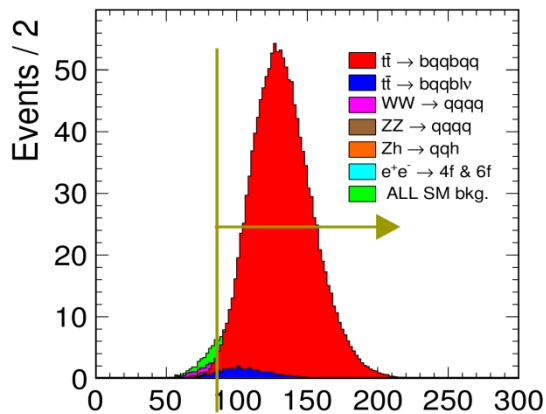
Y45



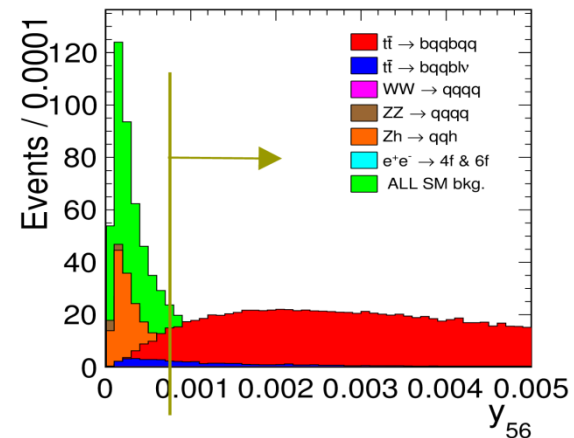
損失横運動量



粒子数



Y56



検出器の要求

➤ 衝突係数分解能

1項目:各層の位置分解能

2項目:多重クーロン散乱

$$\sigma_{ip} = 5\mu\text{m} \oplus 10\mu\text{m} / p \sin^{3/2} \theta$$

➤ トラッキング

$$\sigma(1/pT) = 5 \times 10^{-5} / \text{GeV}$$

➤ ジェットエネルギー分解能

$$\sigma_E / E = 0.3 / \sqrt{E(\text{GeV})}$$

➤ これに加え Particle Flow Algorithm を採用

ジェット要素	ジェットに占める割合	検出器	σ_E/E
荷電粒子	60%	飛跡検出器	$0.00002 \times E$
光子	30%	ECAL	$0.2/E$
中性ハドロン	10%	HCAL	$0.6/E$

表 5.1: ジェットの組成と ILD 検出器の分解能