

国際リニアコライダーにおける トップクォークの電弱結合の研究

東北大学 素粒子実験グループ
佐藤 瑤

研究の概要

- 国際リニアコライダーについて
- トップクォークの電弱結合について

国際リニアコライダー (ILC) について

ILC = International Linear Collider

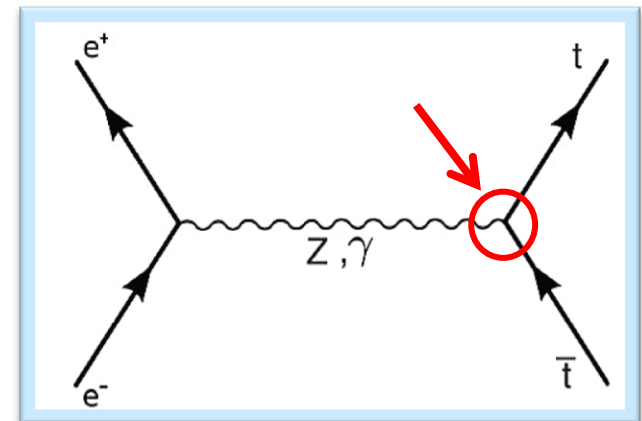
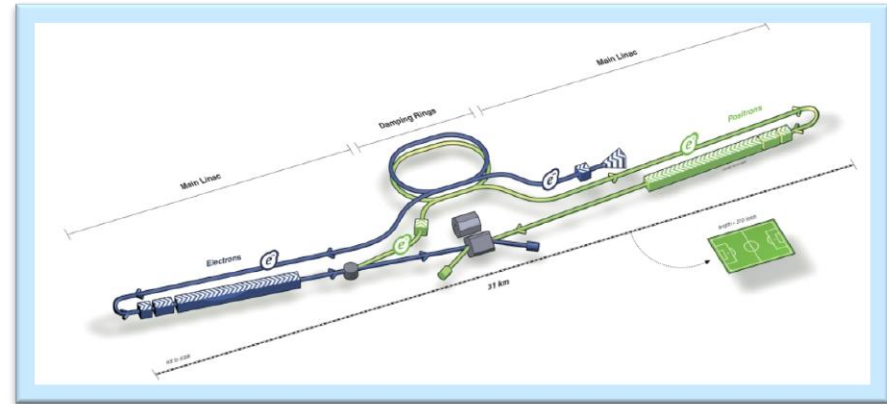
- 電子-陽電子衝突型の線形加速器
- 電子、陽電子を偏極可能
- 背景事象が少なく精密測定が可能

主なパラメータ

- 全長: 31 km \rightarrow 50 km
- 重心系エネルギー: 250, 350, 500 GeV \rightarrow 1 TeV
- ルミノシティ: $1.8 \times 10^{-34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ @ 500 GeV
- ビーム偏極: $P(e^-, e^+) = (-0.8, +0.3), (+0.8, -0.3)$

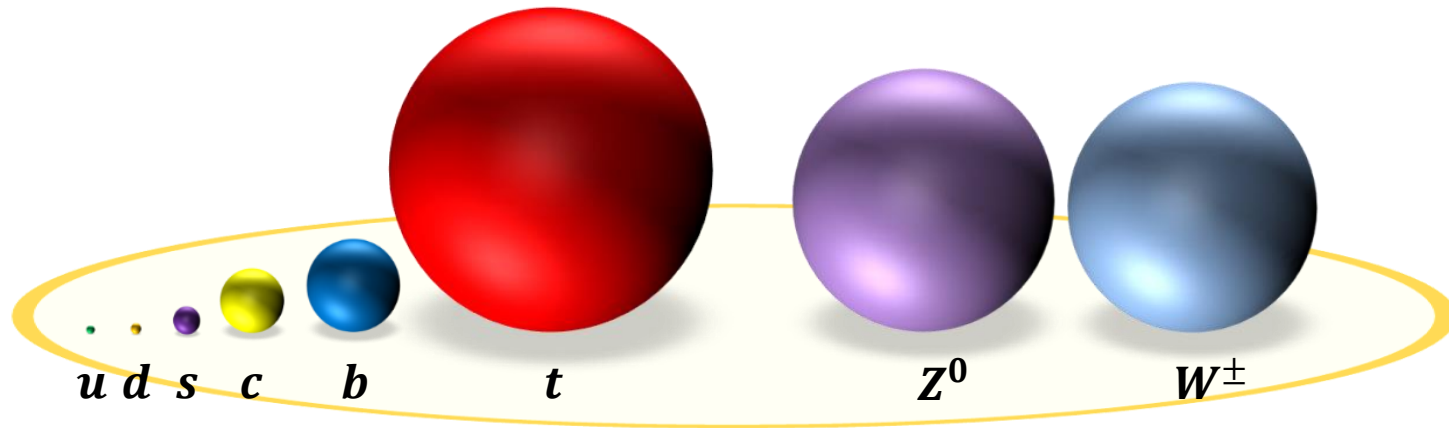
目的とする物理

- ヒッグス粒子の精密測定
- トップクォークの精密測定
- 新物理の探索



トップクォークの電弱結合

トップクォークの特徴の一つ：他のクォークに比べて異常に質量が大きい！

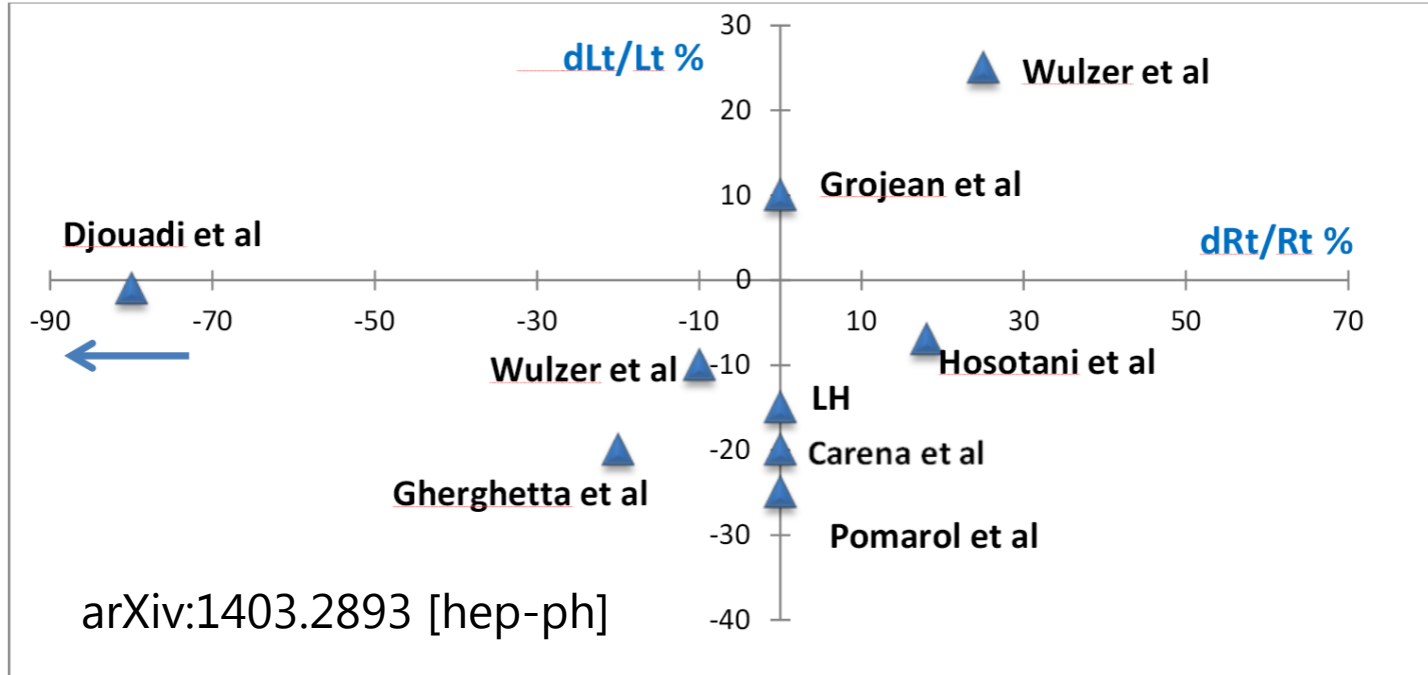


M_b	M_t	M_Z	M_W
4.2 GeV	174 GeV	91.2 GeV	80.4 GeV

→WとZの質量と同じオーダー = 電弱対称性の破れのスケール

トップクォークの電弱結合は新物理の探針となる！！

トッブクォークの電弱結合



新物理のモデルで t_L, t_R とZの結合定数が標準模型からどれだけずれるか示したグラフ

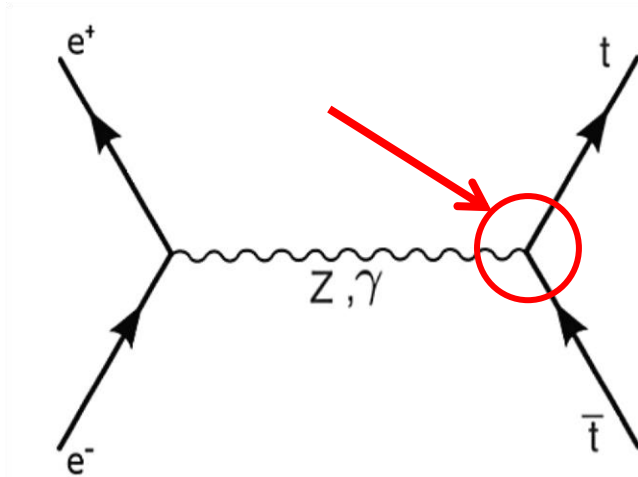
これらを識別できる精度があればILCで物理モデルの推定が可能！

本研究の目的

ILCにおけるトッブクォークとZ, γ との結合定数の測定精度を見積もること

ILCにおけるトップ電弱結合の測定

ILCでは ttZ と $tt\gamma$ の寄与が混合した状態で観測される



しかし...ILCではビームの偏極を操作することが可能!!!

異なる偏極で断面積と前後非対称度の二つを測定（どちらも結合定数に関連する量）

→ $g_L^\gamma, g_R^\gamma, g_L^Z, g_R^Z$ をそれぞれ求めることができる

(二つの観測量の誤差が結合定数の誤差につながる)

結合定数の測定には $\sqrt{s} = 500 \text{ GeV}$ が最適

解析の手法

- トップ対の終状態
- 再構成の流れ

■ トップ対の終状態

トップはほぼ100%,bとWに崩壊

トップ対の終状態は以下のように分類される ;

(1) Fully hadronic channel (46.2%)

→ 6つのジェット

(2) Semi leptonic channel (43.5%)

→ 4つのジェット + 1つの荷電レプトン + 1つのニュートリノ

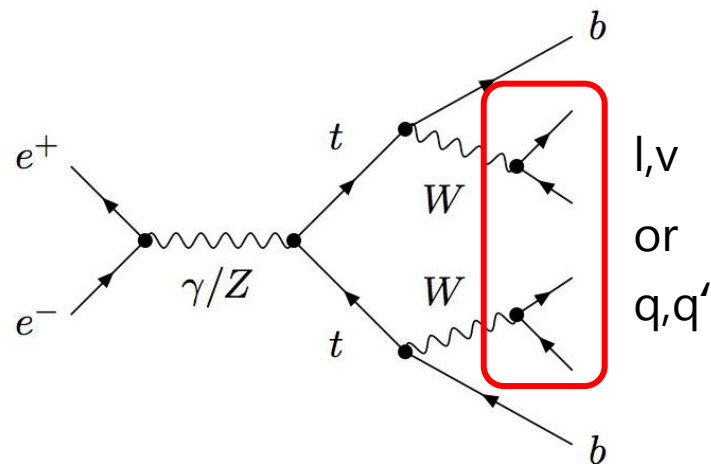
(3) Fully leptonic channel (10.3%)

→ 2つのジェット + 2つの荷電レプトン + 2つのニュートリノ

(2)はフランスのグループが以前解析を行っていた → 結果の再現

(1)と(3)はまだなされていない → 今後新たに解析を進める必要あり

最初の目標は(2)の結果の再現、将来的には残りの終状態の解析も行う



再構成のながれ

Semi leptonic channel の特徴は孤立レプトンと二つのb jetの存在

→これらを利用してその他の事象と区別することが可能！

以下のように再構成をしていく

- **孤立レプトンの抽出**

Wから直接崩壊した孤立レプトンを抽出する

- **$\gamma\gamma \rightarrow$ hadrons の除去**

$\gamma\gamma \rightarrow$ hadrons 過程によって生じる粒子を取り除く

- **ジェットの再構成**

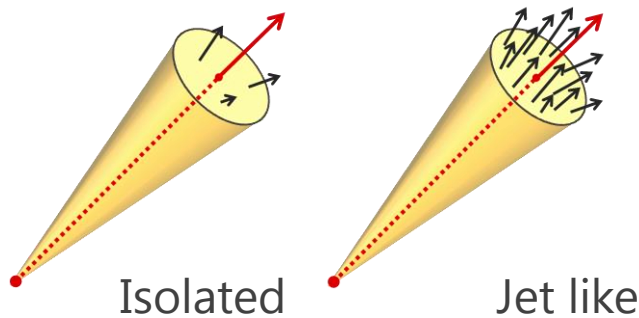
残りの粒子を4つのジェットに再構成する (ダーラムアルゴリズム)

- **トップクォークの再構成**

以上の情報 (+ α) を用いてトップ対を再構成する

孤立レプトンの抽出と $\gamma\gamma \rightarrow \text{hadrons}$ の除去

孤立レプトンの抽出



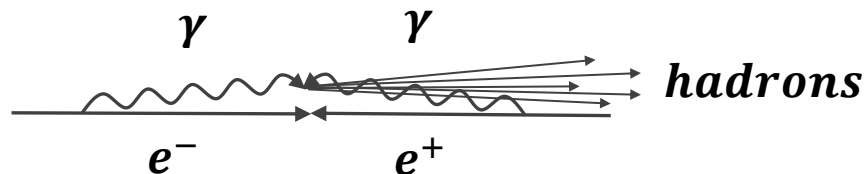
孤立レプトン(Wから直接崩壊した荷電レプトン)の特徴
運動量が大きい & 周りの粒子が少ない

運動量の大きい電子とミュオンを中心にコーンを作り、
最も孤立したレプトンを抽出する (数が0の場合はここで終了)

$$P_l > 5 \text{ GeV}, \quad \cos \theta_{cone} = 0.95, \quad \frac{E_l}{E_{cone}} \sim 1$$

$\gamma\gamma \rightarrow \text{hadrons}$ の除去

光子同士の反応によるハドロンが
ジェットの再構成に影響を及ぼす



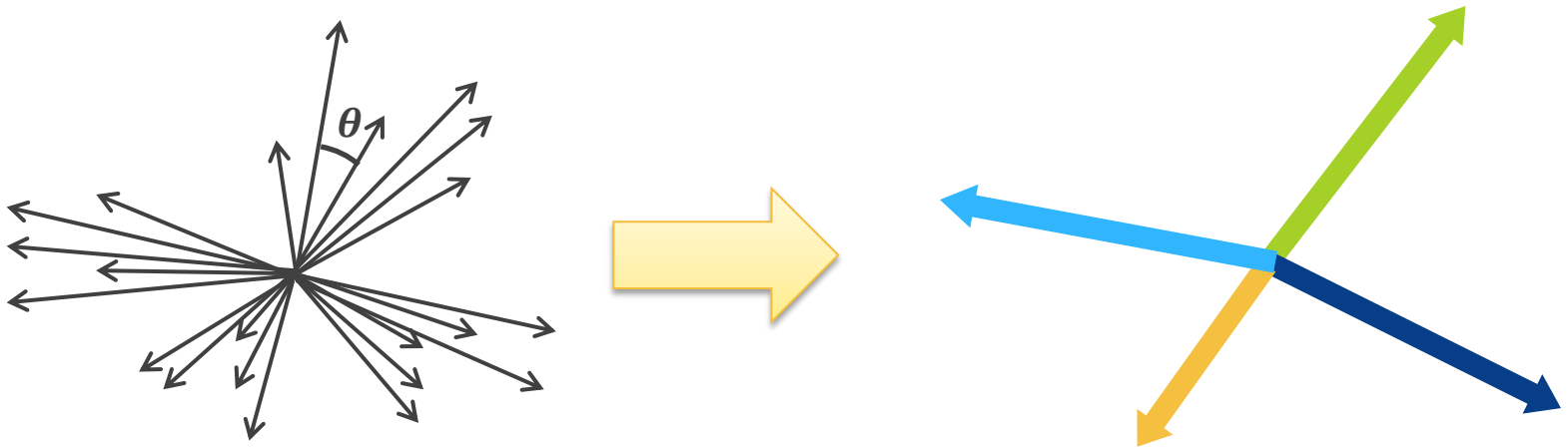
→ ビーム軸に対して垂直な運動量 (P_t) が小さい粒子を取り除く

■ ジェットの再構成

□ ダーラムアルゴリズム

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

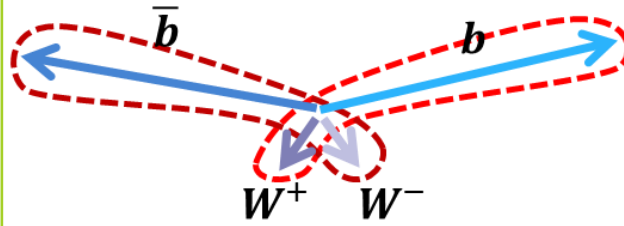
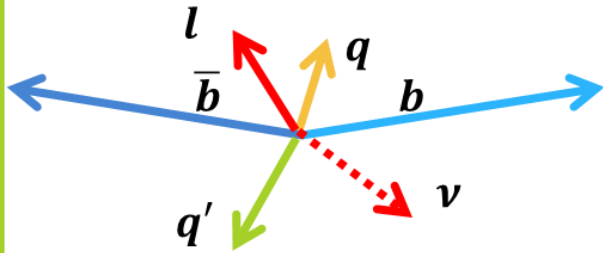
yが最も小さくなる組み合わせを探し出し一つにまとめる工程を、
目標の数（今は4つ）になるまで強制的に繰り返す



トッブクォークの再構成

再構成の流れ

崩壊の流れ



- 孤立レプトンの抽出
- $\gamma\gamma \rightarrow \text{hadrons}$ の除去
- ジェットの再構成
- +
- (始状態)-(全粒子)でニュートリノを再構成
- bらしいジェットを二つ選ぶ

- Wを二つ再構成

- トップを二つ再構成

より正しい組み合わせを選択するために、
次で定義される値で最適化

$$(m_{cand.lep.} - m_t)^2 + (m_{cand.had.} - m_t)^2$$

(要検討、後述)

結果と考察

シミュレーション条件：

$$\sqrt{s} = 500 \text{ GeV}, P(e^-, e^+) = (-1, +1), (+1, -1)$$

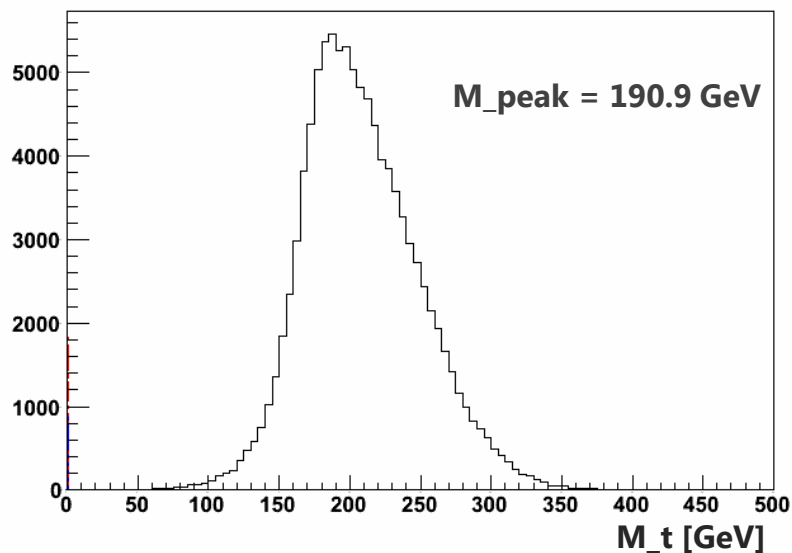
(左巻き, 右巻きと表記)

- 再構成後のトップの質量分布と極角分布
- Migration 効果について

■ 再構成後のトップの質量分布

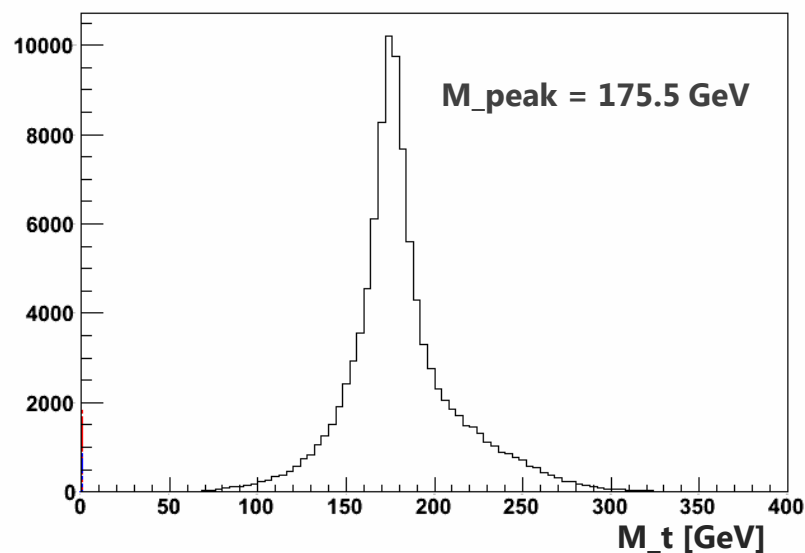
(解析には直接の関連はないが、再構成の精度を見ることができる)

レプトン



- ・ 全体的に大きいほうにずれている
(ニュートリノを大きく見積もり過ぎている)

ハドロン



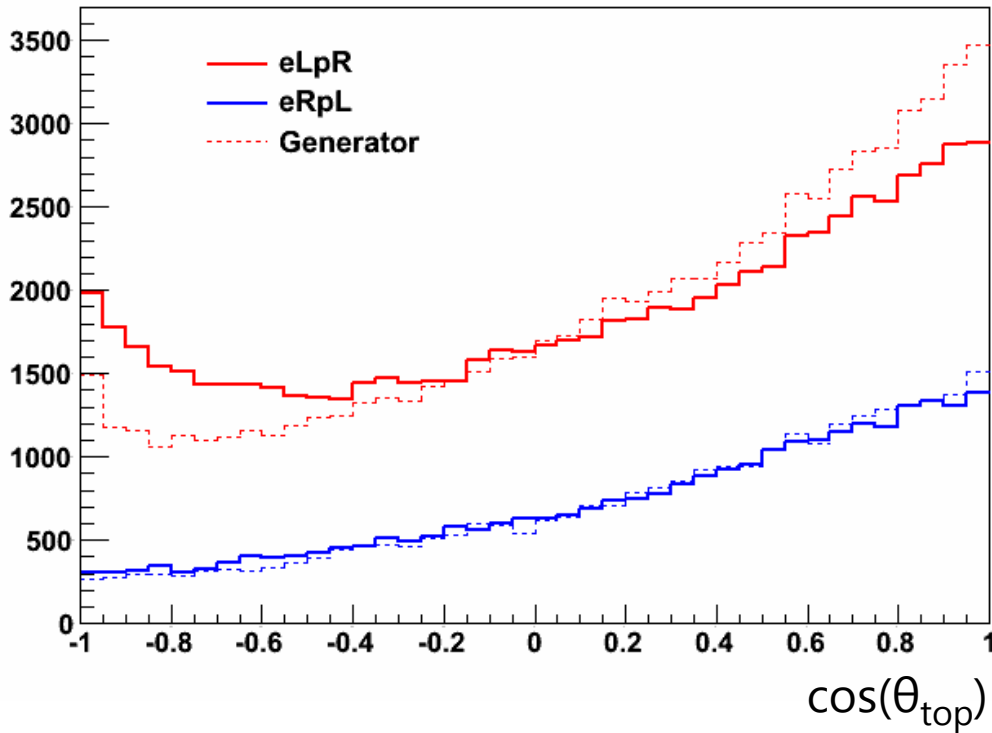
- ・ ピークは正しい位置に出ている
- ・ 裾の幅が大きい

→前後非対称度の測定には**ハドロン側**を用いる

レプトン側は孤立レプトンからWの電荷を決定するのに使用

☐ (ハドロンに崩壊する)トップの極角分布

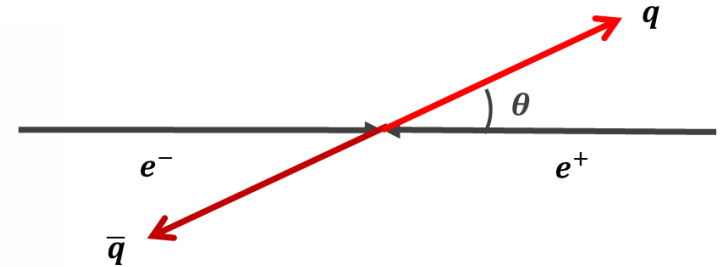
観測量の一つである前後非対称度の測定に直結



これは**Migration効果**とよばれている

前後非対称度の測定にとって**重大な問題!**

→なぜ左巻きするときだけ分布がずれるのか?



• **左巻き $P=(-1,+1)$:**

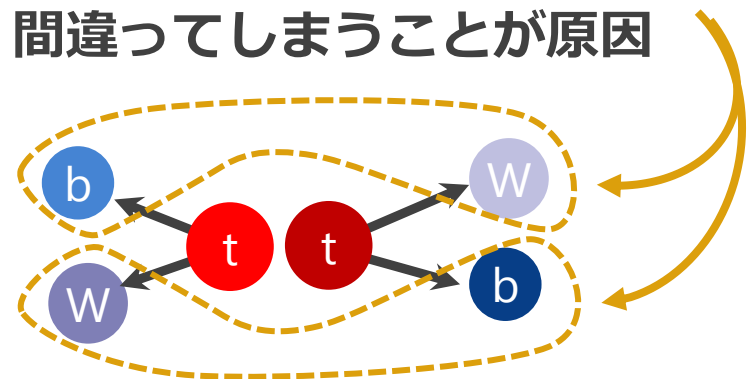
一部の分布が約 π だけずれている

• **右巻き $P=(+1,-1)$:**

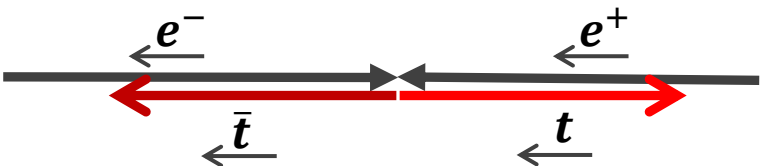
正しく再構成できているように見える

→Wとbの組み合わせ方を

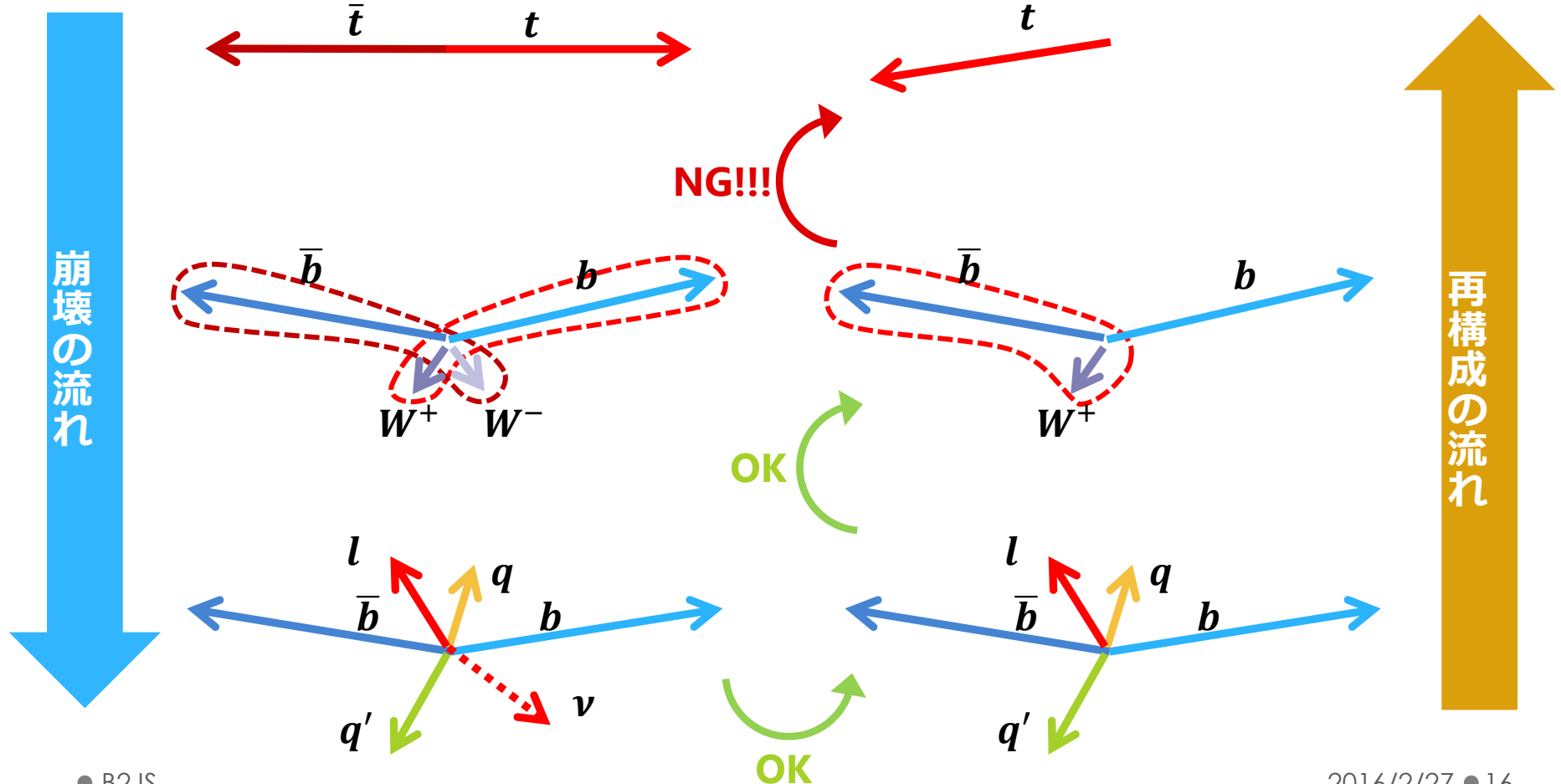
間違ってしまうことが原因



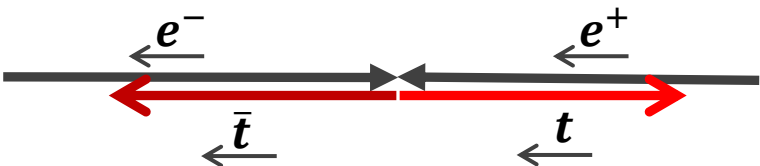
左巻きするとき (例: t がハドロンに崩壊)



$\theta = 0$ 付近では
電子: left-handed \rightarrow **t : left-handed**
 となる確率が高い



左巻きするとき (例: tがハドロンに崩壊)

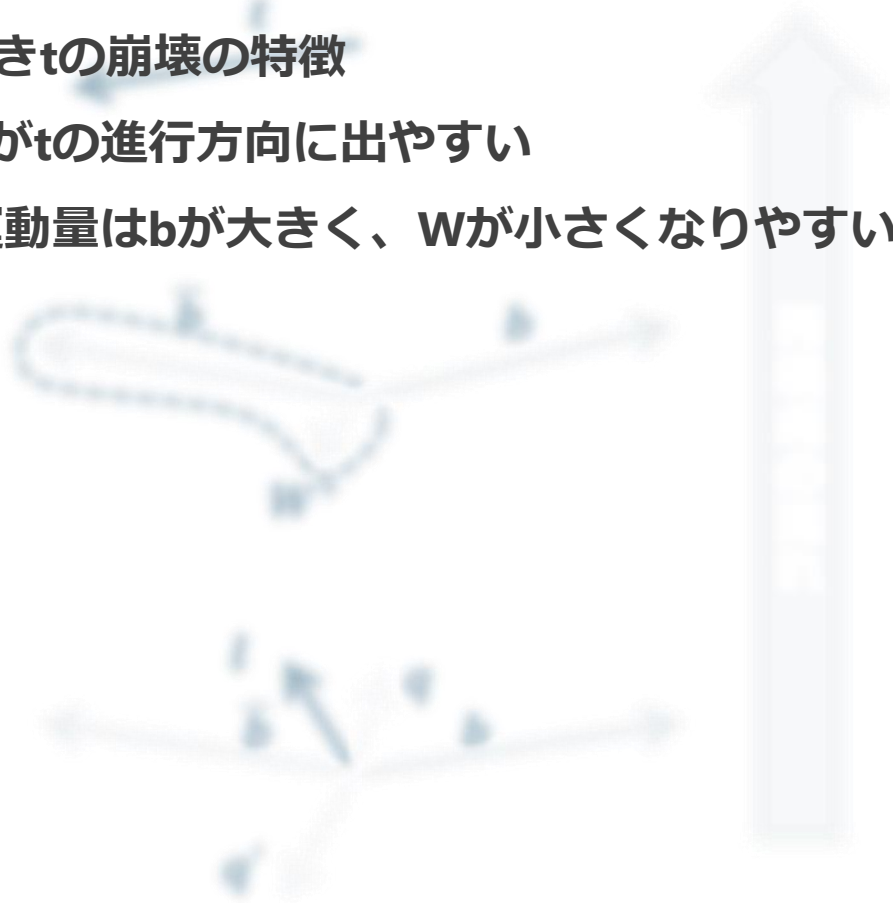
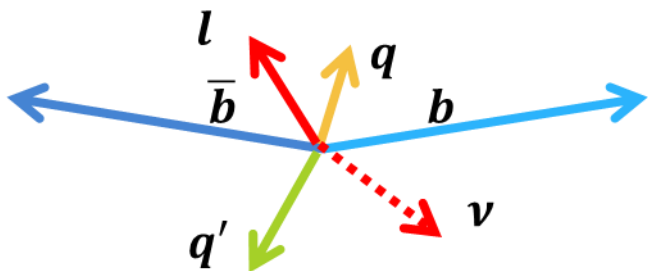
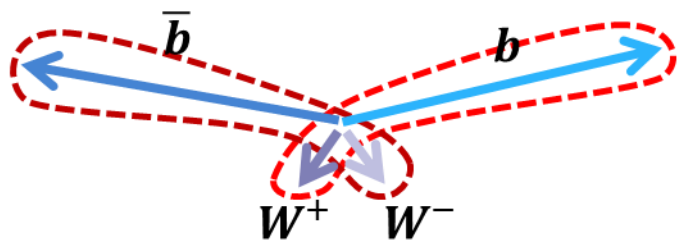


$\theta = 0$ 付近では
電子 : left-handed \rightarrow t : left-handed
 となる確率が高い

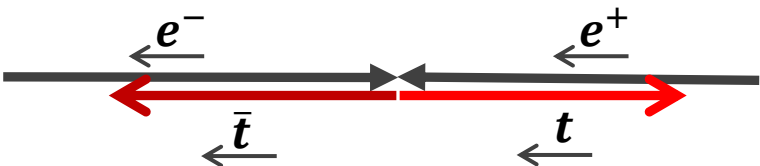


左巻きtの崩壊の特徴

- bがtの進行方向に出やすい
- 運動量はbが大きく、Wが小さくなりやすい



左巻きするとき (例: tがハドロンに崩壊)

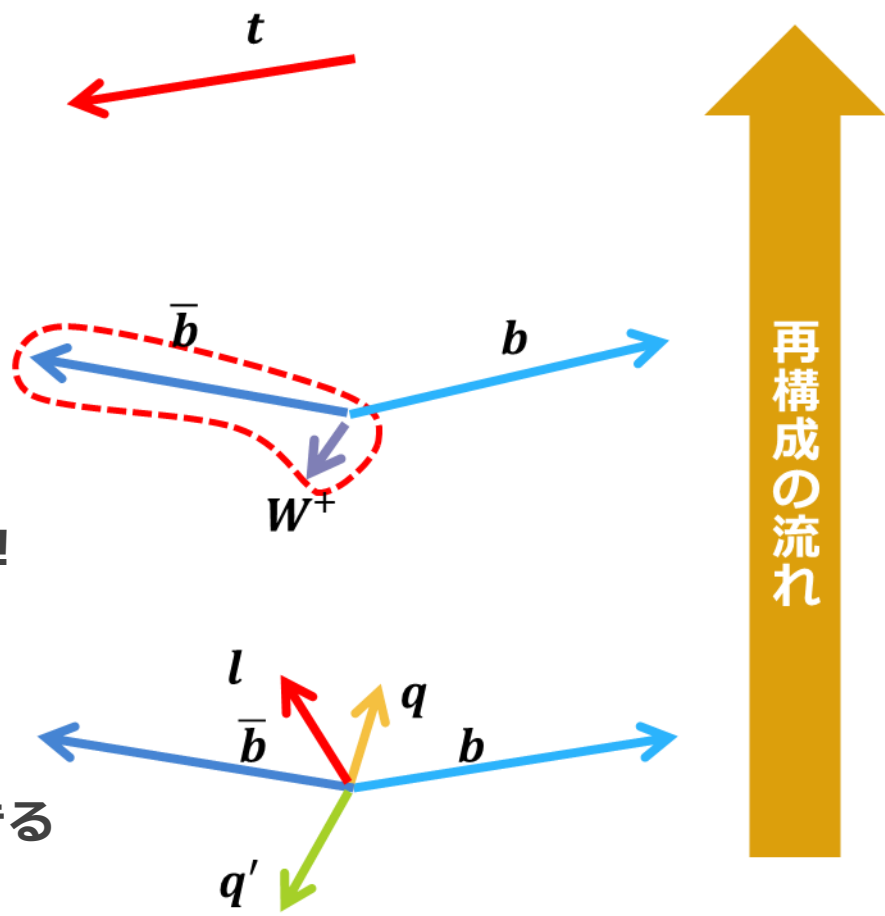


$\theta = 0$ 付近では
電子 : left-handed \rightarrow **t : left-handed**
 となる確率が高い

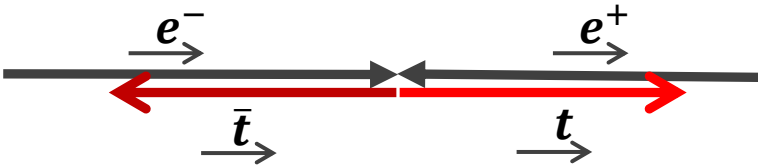
bの運動量が大きいため、
topの方向が約 π だけずれてしまう

bとanti-bは識別していないため、
 W+とanti-bを組み合わせてしまった！！

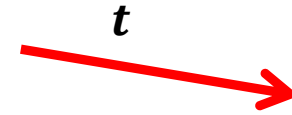
b tagから、b jetとc,q jetを識別できる
 leptonの電荷から、W+かW-を識別できる



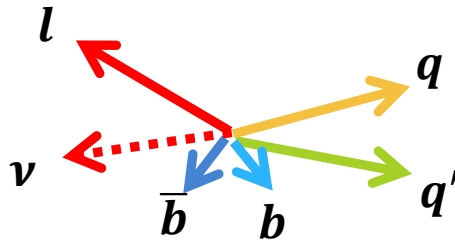
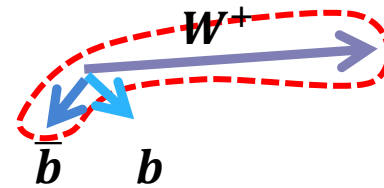
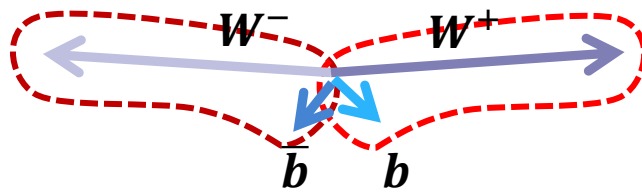
右巻きするとき (例: tがハドロンに崩壊)



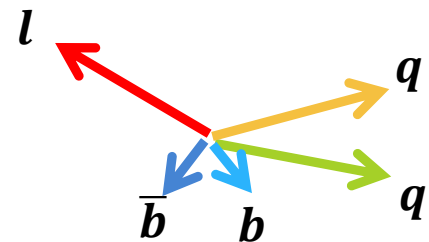
$\theta = 0$ 付近では
 電子: **right-handed** \rightarrow **t**: **right-handed**
 となる確率が高い



NG!!!



OK

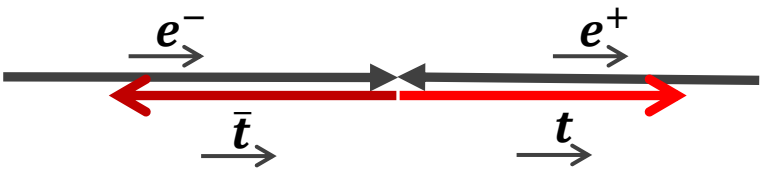


OK

崩壊の流れ

再構成の流れ

右巻きするとき (例: tがハドロンに崩壊)

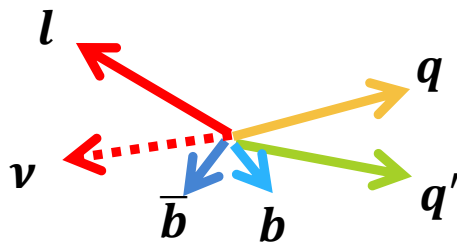
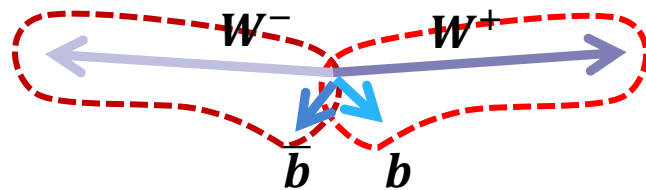


$\theta = 0$ 付近では
 電子: **right-handed** \rightarrow **t**: **right-handed**
 となる確率が高い



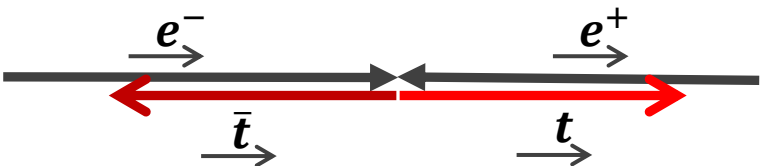
右巻きtの崩壊の特徴

- Wがtopの進行方向に出やすい
- 運動量はWが大きく、bが小さくなりやすい



崩壊の流れ

右巻きするとき (例: tがハドロンに崩壊)

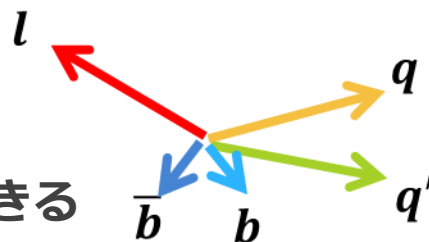
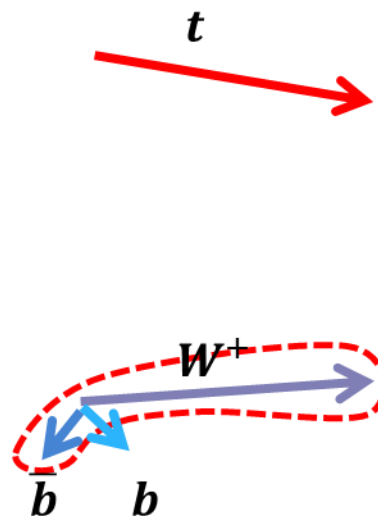


$\theta = 0$ 付近では
 電子: **right-handed** \rightarrow **t**: **right-handed**
 となる確率が高い

bの運動量は小さいため
 topの方向はあまり変わらない

bとanti-bは識別していないため、
 W+とanti-bを組み合わせてしまった！！

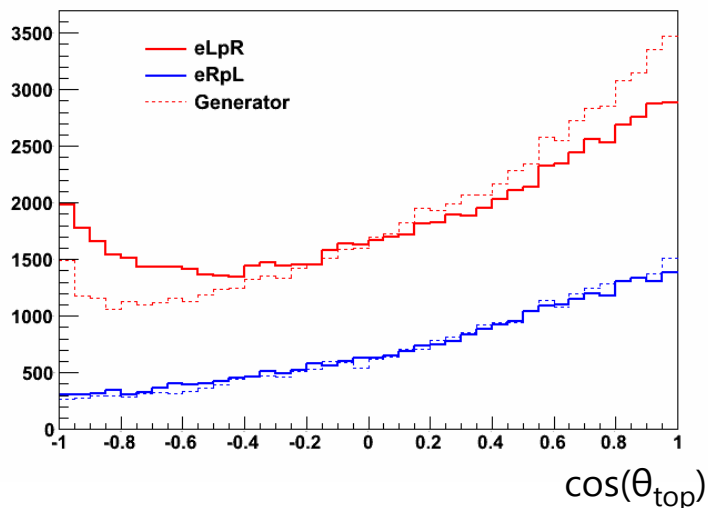
b tagから、b jetとc,q jetを識別できる
 leptonの電荷から、W+かW-を識別できる



再構成の流れ

カットをかけた場合の極角分布

カット前



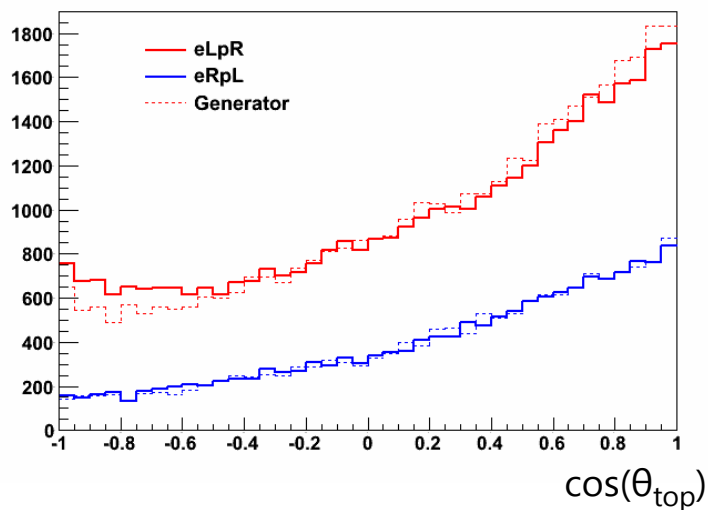
- ・ハドロン側のトップの質量によるカットを行った
($160 < M_t < 190$ GeV を要求)

→ 左巻きイベントにおいて改善が見られる

→ 検出効率は左巻き、右巻きそれぞれ

69.02% → 35.95%, 69.23% → 38.06% に低下

カット後



質量のカットではこれ以上の改善は見られなかった

検出効率を保ち、migration effectを除くことが

今後の最も重要な課題の一つ！

例：異なるカットを加える、 χ^2 の定義を見直す、

B-charge methodを用いる...等

📄 考えられる改善方法

1. χ^2 による方法

$$\chi^2 = \left(\frac{\gamma_t - 1.435}{\sigma_{\gamma_t}} \right)^2 + \left(\frac{p_b^* - 68}{\sigma_{p_b^*}} \right)^2 + \left(\frac{\cos \theta_{bw} - 0.23}{\sigma_{\cos \theta_{bw}}} \right)^2$$

γ_t : トップのローレンツファクター, p_b^* : トップの静止系でのb(W)の運動量の大きさ, θ_{bw} : bとWの角度

→ トップ質量による選択の代わりに用いることで改善が期待される

2. B charge method

bジェットが、b, anti-bのどちらなのかがわかれば正確に再構成することができる

→ bジェットのうち $P_t > 100$ GeVの粒子の電荷からbジェットの電荷を計算 (現段階)

現在使用しているLCFIPlusパッケージは、

この測定において最適化されておらず、今後精度の向上が見込まれる

まとめと今後の予定

まとめ

- トップクォークの電弱結合は新物理の重要な探針であり、ILCはその測定において非常に優れている
- 観測量の一つである前後非対称度は、bジェットとWの組み合わせの不一致によって精度が悪い
- 今後の最大の課題は検出効率を保ちつつMigration効果を取り除くことである

今後の予定

- 主な背景事象の解析も行い、事象選択の有意度を見積もる
- 残りの終状態についても理解を進め、解析の準備を行う
- Matrix elementとよばれる手法をフルシミュレーションに適用するために研究を行う



予備スライド

偏極について

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

例) $P(e^-, e^+) = (-0.8, +0.3)$ の計算方法

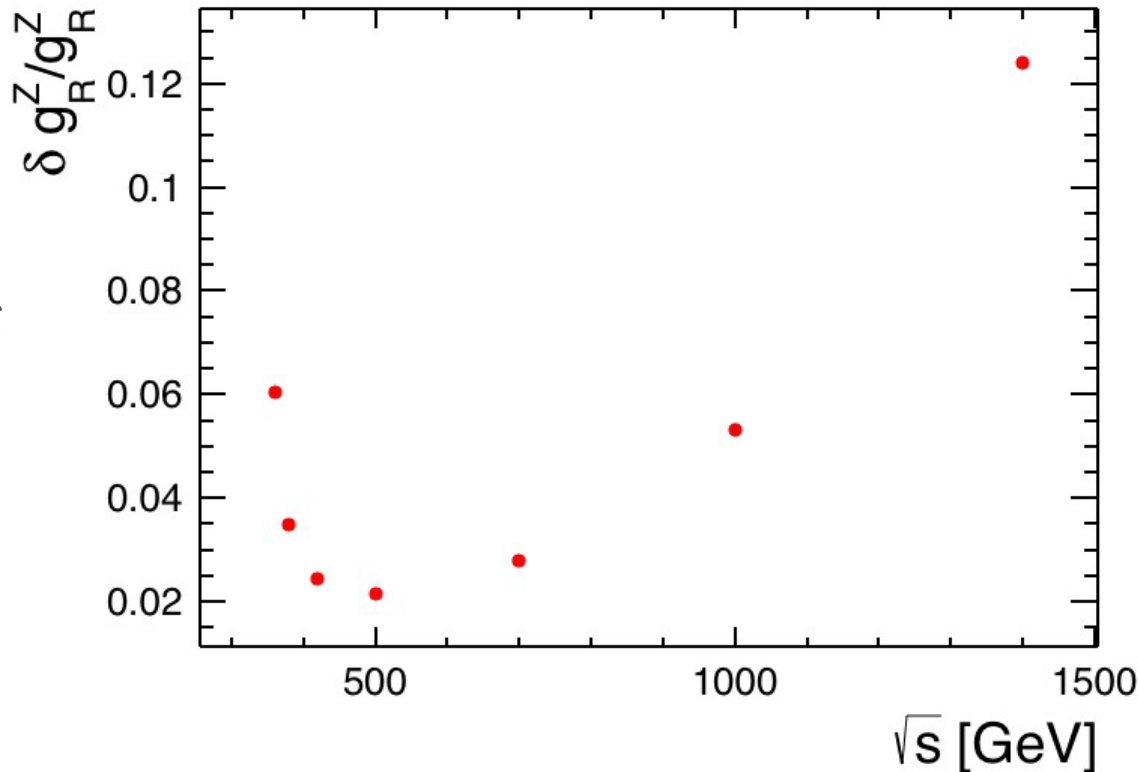
$$\text{電子： } -0.8 = \frac{0.1 - 0.9}{0.1 + 0.9}, \quad \text{陽電子： } +0.3 = \frac{0.65 - 0.35}{0.65 + 0.35}$$

シミュレーション結果から、実際の偏極の場合を計算できる；

$$\sigma_{-0.8, +0.3} = (0.9 \times 0.65) \times \sigma_{-1, +1} + (0.1 \times 0.35) \times \sigma_{-1, +1}$$

重心系エネルギーと測定精度

エネルギーが
小さいと
axial vector の
カップリングが
消えてしまう



エネルギーが
大きいと
断面積が小さく
なり精度が落ちる

ILC Tokusui
Workshop 2015
Roman Poeschl

重心系エネルギーが400~700 GeVが精度がよい

ただし、もっと高いエネルギーのほうが精度が良いもある

→今後1 TeVでの測定も興味のあるオプションである

☐ $\gamma\gamma \rightarrow$ hadronsの除去に用いる k_t アルゴリズム

$$\Delta R_{ij}^2 = (y_i - y_j)^2 + (\phi_i - \phi_j)^2$$

$$d_{iB} = p_{ti}^2, \quad d_{ij} = \min(p_{ti}^2, p_{tj}^2) \frac{\Delta R_{ij}^2}{R^2}$$

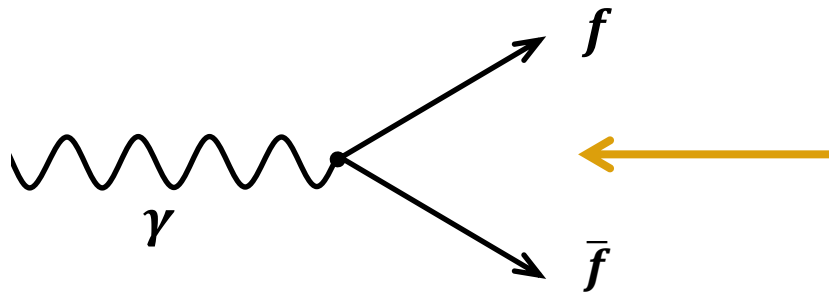
全ての粒子（の組み合わせ）について d_{iB} , d_{ij} を計算

最も小さいのが d_{iB} の場合 i はオーバーレイとして除去

最も小さいのが d_{ij} の場合 i, j を一つにまとめる

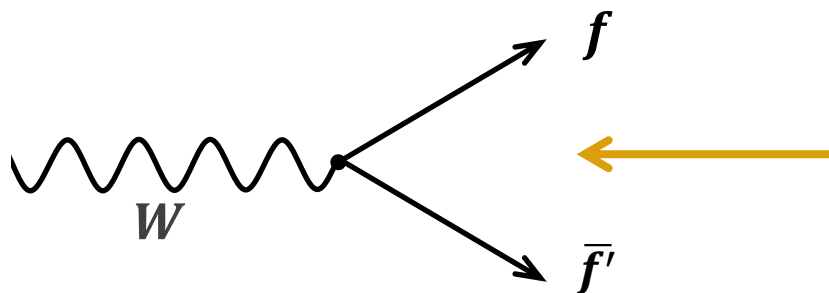
今回は $R=1.5$ とし、残りの粒子が4つになるまで繰り返した

電弱結合の崩壊点のファクター



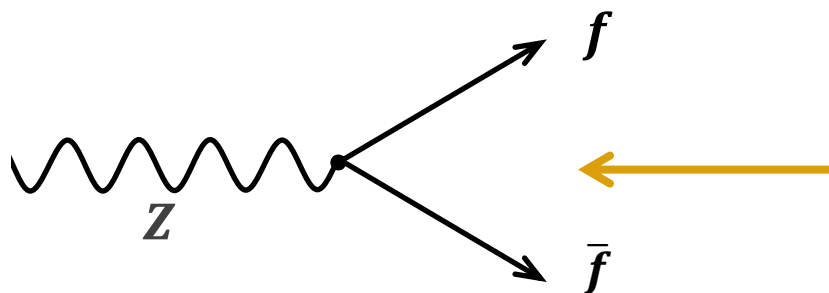
A Feynman diagram showing a photon (γ) on the left, represented by a wavy line. It splits into two fermions (f and \bar{f}) on the right, represented by straight lines. A yellow arrow points from the right towards the vertex, representing an incoming fermion.

$$-ieQ_f\gamma^\mu$$



A Feynman diagram showing a W boson (W) on the left, represented by a wavy line. It splits into two fermions (f and \bar{f}') on the right, represented by straight lines. A yellow arrow points from the right towards the vertex, representing an incoming fermion.

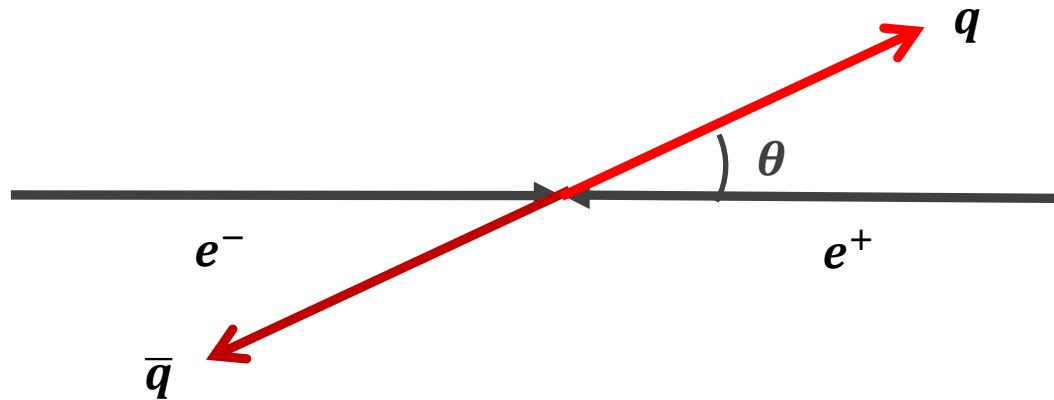
$$-i\frac{g}{\sqrt{2}}\gamma^\mu(1-\gamma^5)$$



A Feynman diagram showing a Z boson (Z) on the left, represented by a wavy line. It splits into two fermions (f and \bar{f}) on the right, represented by straight lines. A yellow arrow points from the right towards the vertex, representing an incoming fermion.

$$-i\frac{g}{\cos\theta_W}\gamma^\mu\frac{1}{2}(c_V^f - c_A^f\gamma^5)$$

$e^- e^+ \rightarrow q \bar{q}$ の微分断面積



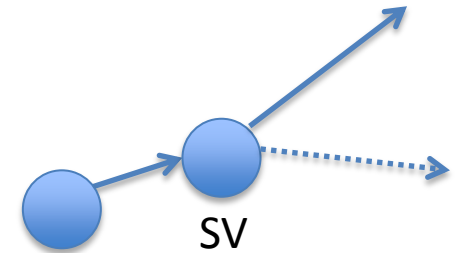
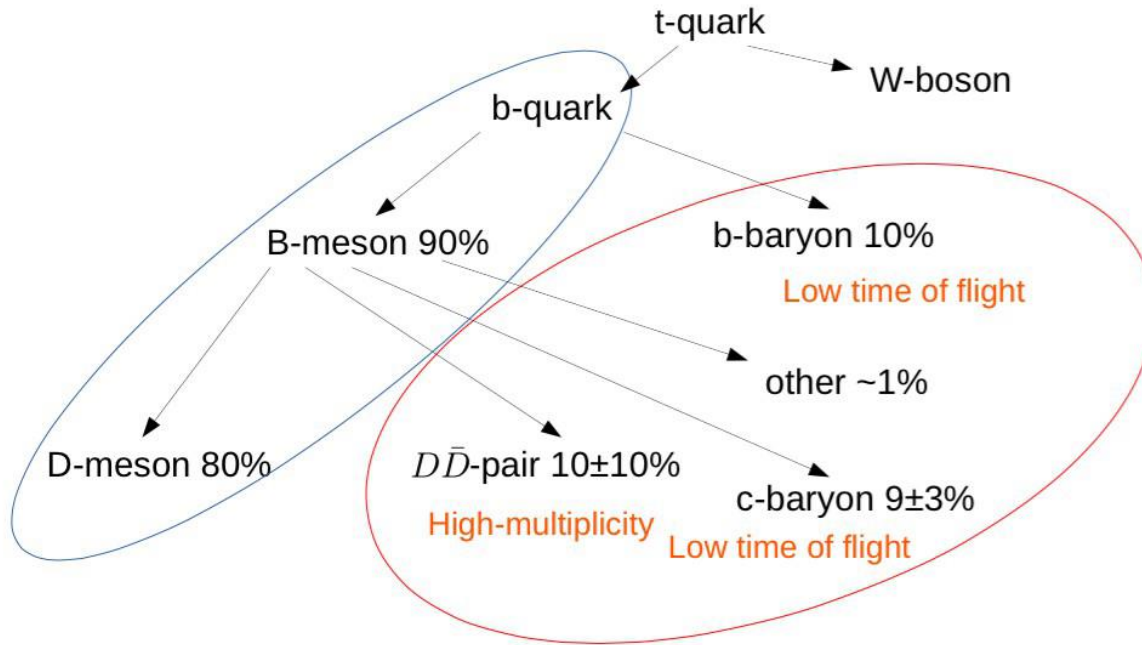
微分断面積の例：

$$\frac{d\sigma(e_L^- e_R^+ \rightarrow q_L \bar{q}_R)}{d\Omega} = 3 \frac{\alpha^2}{4s} (1 + \cos \theta)^2 |Q_q + r c_L^\mu c_L^e|^2$$

$$(c_R = c_V - c_A, \quad c_R = c_V + c_A)$$

bクォークの崩壊モード

- Hadronization and decay modes of b-quark:



4

bジェットはVertexが三つ (ほかのジェットは一つか二つ)

→ bジェットをタグする情報の一つとして用いられている

📦 トップクォークの崩壊

標準模型でのトップクォークの崩壊

(m_b , EWの補正を加えると値は変化するが
二番目が一番大きいのは同じ)

標準模型のV-A構造のために

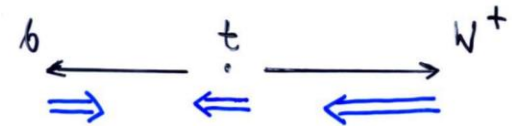
トップのスピンの向きにWが出やすい

→ トップ左巻き：bの運動量が大さい

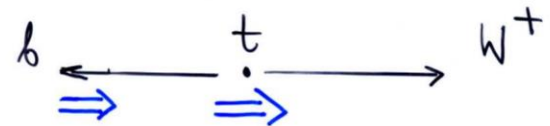
→ トップ右巻き：Wの運動量が大さい

となる確率が大きくなる！！

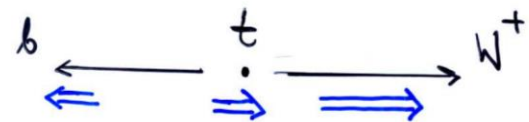
$t \rightarrow W^+(h_W = -1)$ allowed:
 $Prob(h_W = -1) \simeq 30\%$



$t \rightarrow W^+(h_W = 0)$ allowed: $Prob(h_W = 0) \simeq 70\%$



$t \rightarrow W^+(h_W = +1)$ forbidden for $m_b = 0$



31st Johns Hopkins workshop
Werner Bernreuther