

国際リニアコライダーにおける EWIMPの間接探索

東北大学 素粒子実験グループ

江田 優人

2017 2 25

B2JS

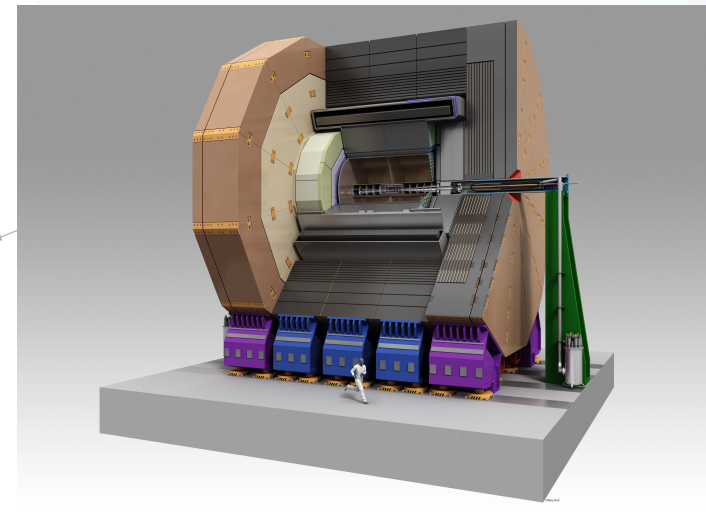
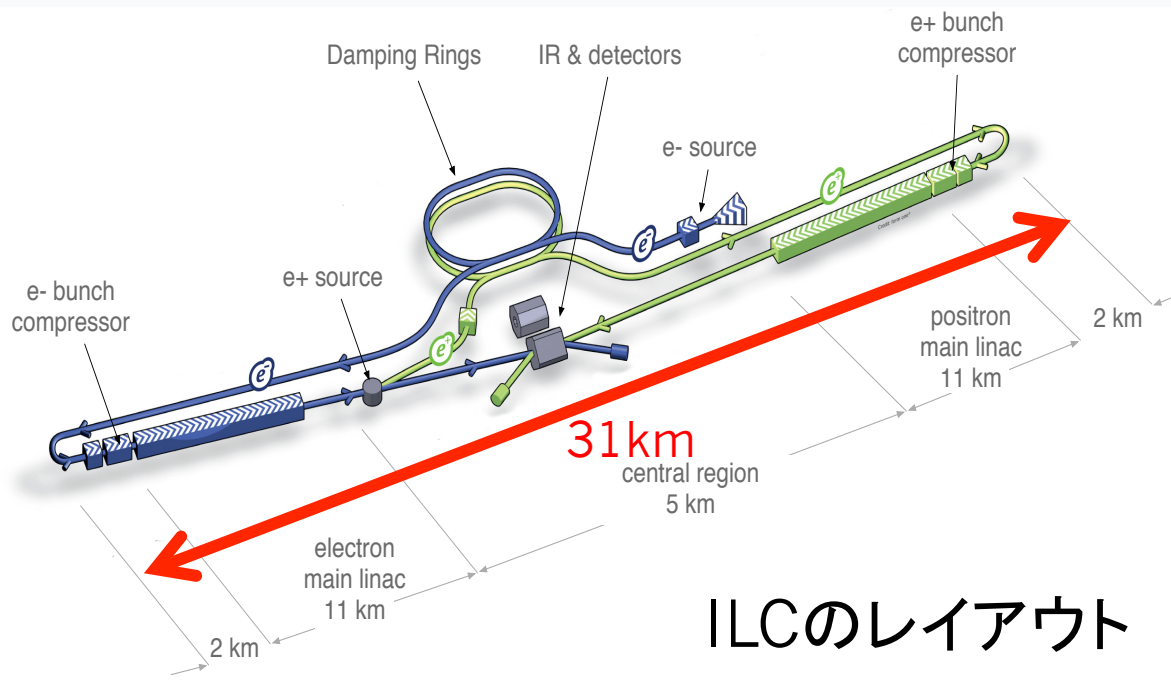
目次

- 国際リニアコライダーとは
- EWIMPについて
- ILCでの測定
- 解析
- まとめ
- 今後

国際リニアコライダーとは

国際リニアコライダー

- ・ International Linear Collider(ILC)
- ・ 全長31kmの電子・陽電子衝突型線形加速器
- ・ 重心エネルギーの範囲は250GeVから500GeV(31km)→1TeV(50km)
- ・ 検出器はILD,SiDを並べ交互に稼働させる



ILD検出器

国際リニアコライダーの目的

標準理論粒子の精密測定

ヒッグス粒子の精密測定

重心系エネルギー250GeV,500GeV,(1TeV)

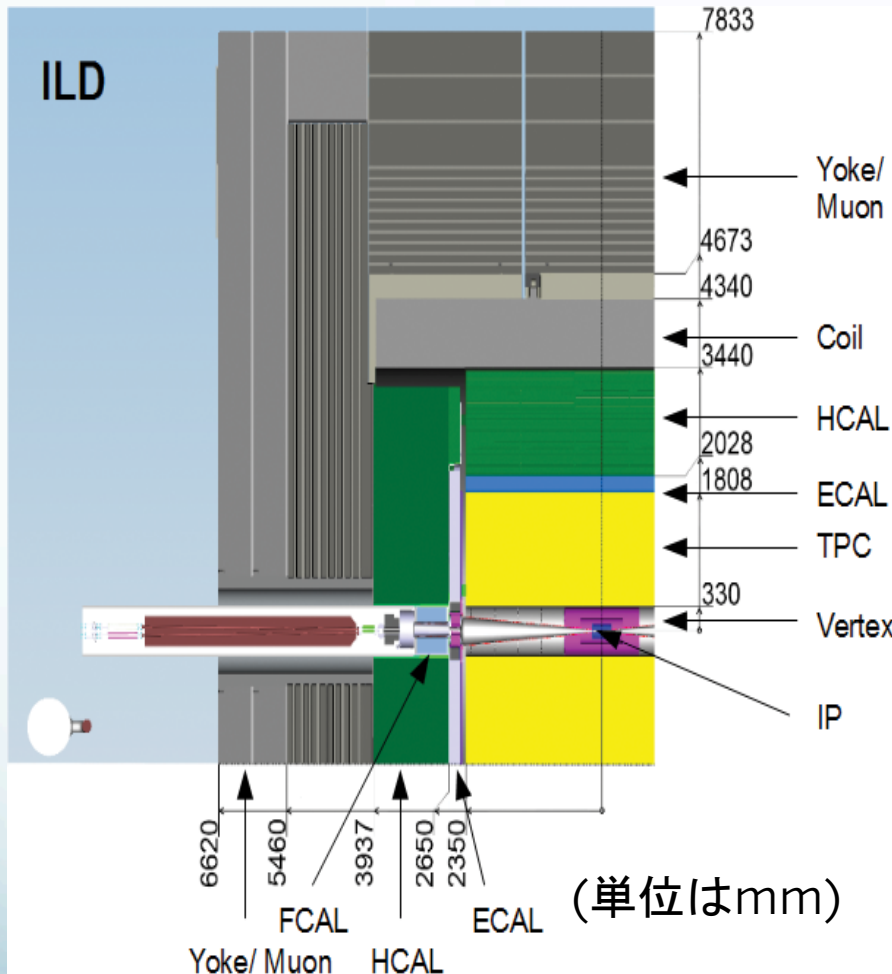
トップクォークの精密測定

重心系エネルギー350GeV,500GeV,(1TeV)

標準理論を超える物理の調査

新物理の探索

ILD検出器での粒子の測定



Vertex Detector

粒子の崩壊点の測定

TPC(運動量分解能は $5 \times 10^{-5}/\text{GeV}$)
荷電粒子の飛跡を再構成し運動量を測定

ECAL

光子のエネルギーの測定とレプトンの同定

HCAL

ハドロンシャワーを利用しエネルギーを測定

コイル

荷電粒子を曲げるための磁場をかける(3.5T)

Yoke/Muon

ミュオンは全てを通過し

YokeやMuon detectorで測定される

これらのプロセスを経ることで粒子の測定ができる

EWIMPについて

宇宙観測による暗黒物質

銀河の質量(観測からは銀河全体の質量はほとんど中心にあるとされる): M 、
中心からの距離: r 、回転速度: ω 、回転している星やガスなどの質量: m

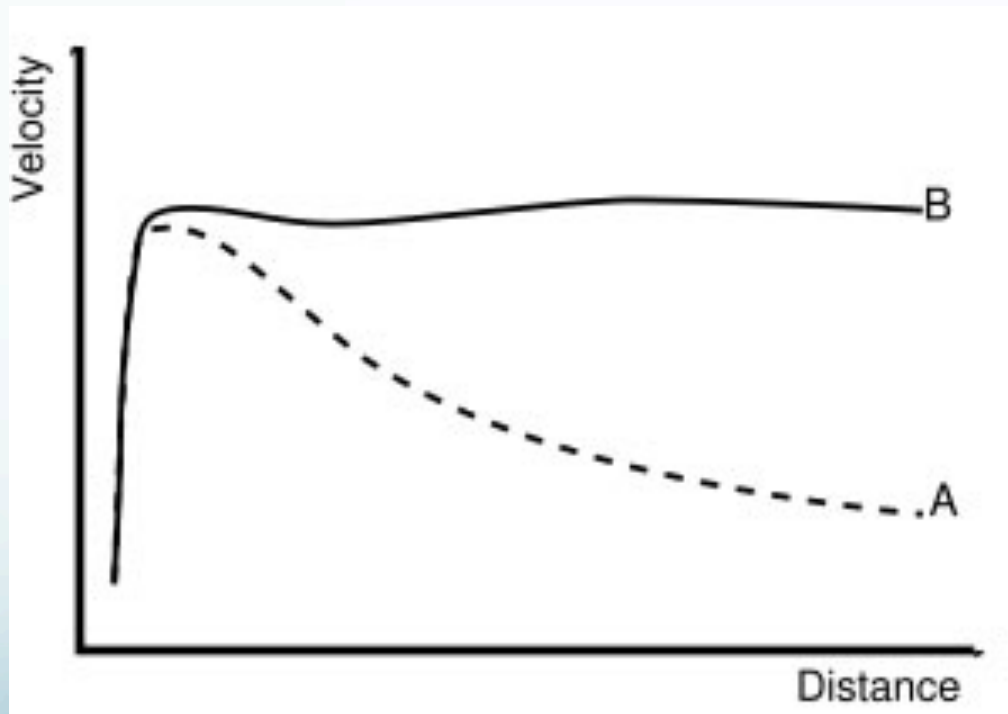
$$F = mr\omega^2 = m \frac{v^2}{r} \quad \text{遠心力}$$

$$F = G \frac{mM}{r^2} \quad \text{万有引力} \\ (\text{Gは万有引力定数})$$

とすると、力の釣り合いから

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}} \quad \text{がわかる}$$

Aの点線は理論的な速度変化
しかし観測結果はBのように距離
が離れていても速度が大きい



標準理論の粒子だけでは説明できない何かがある
→その説明できないものを**暗黒物質**と名付けた

EWIMP

EWIMP(ElectroWeak-Interacting Massive Particle)とは

$SU(2)_L$ に従うシングレットでない暗黒物質で、対消滅して標準理論の粒子(γ や W)になる粒子の総称

例

- ・ハイパーチャージ $Y=0$, $SU(2)_L$ トリプレットのフェルミオン
→SUSYモデルのwino LSPと一致
- ・ハイパーチャージ $Y=\pm 1/2$, $SU(2)_L$ ダブレットのフェルミオン
→SUSYモデルのHiggsino LSPと一致

LSP(the Lightest Supersymmetric Particle、最も軽い超対称性粒子)

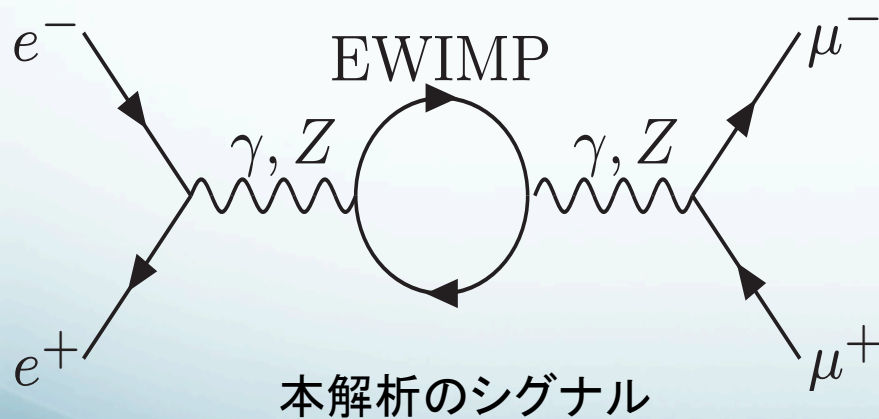
EWIMP探索

- $2m_{\text{EWIMP}}$ (粒子2個分の質量) $< \sqrt{s}$ (重心系エネルギー)

EWIMPは直接作られる

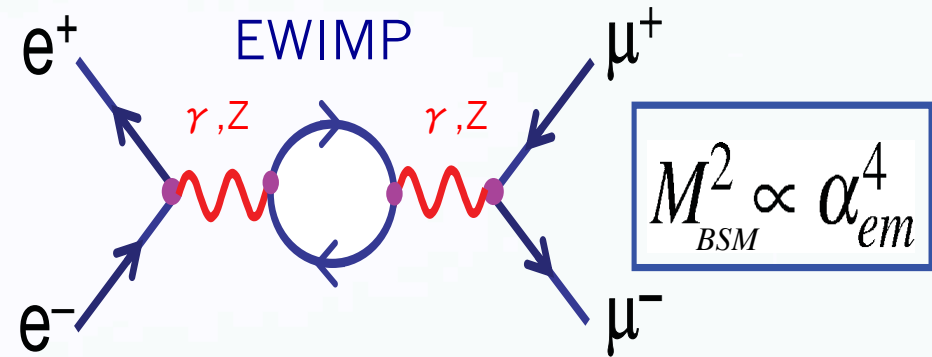
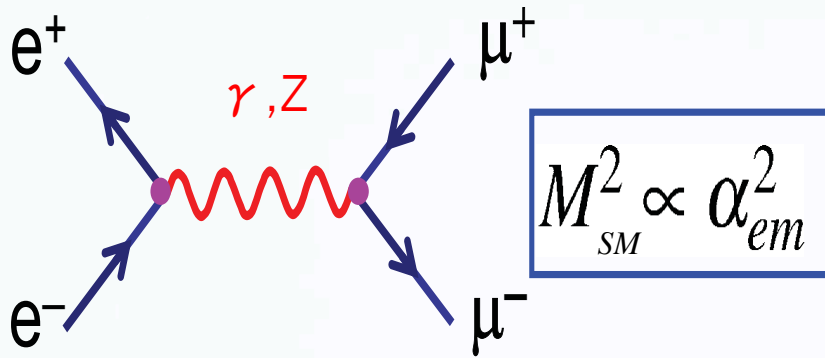
- $2m_{\text{EWIMP}} > \sqrt{s}$ (この場合で見積もる)

EWIMPは作られないが**標準理論の過程に影響を与える**



ビームエネルギーが質量より小さくてもEWIMPのloopの補正は働く

→EWIMP(この場合フェルミオン)のレプトン(ミュオン)対生成への1-loopの補正を考える



微分断面積: $\frac{d\sigma}{d\Omega} \propto |M_{SM} + M_{BSM}|^2$

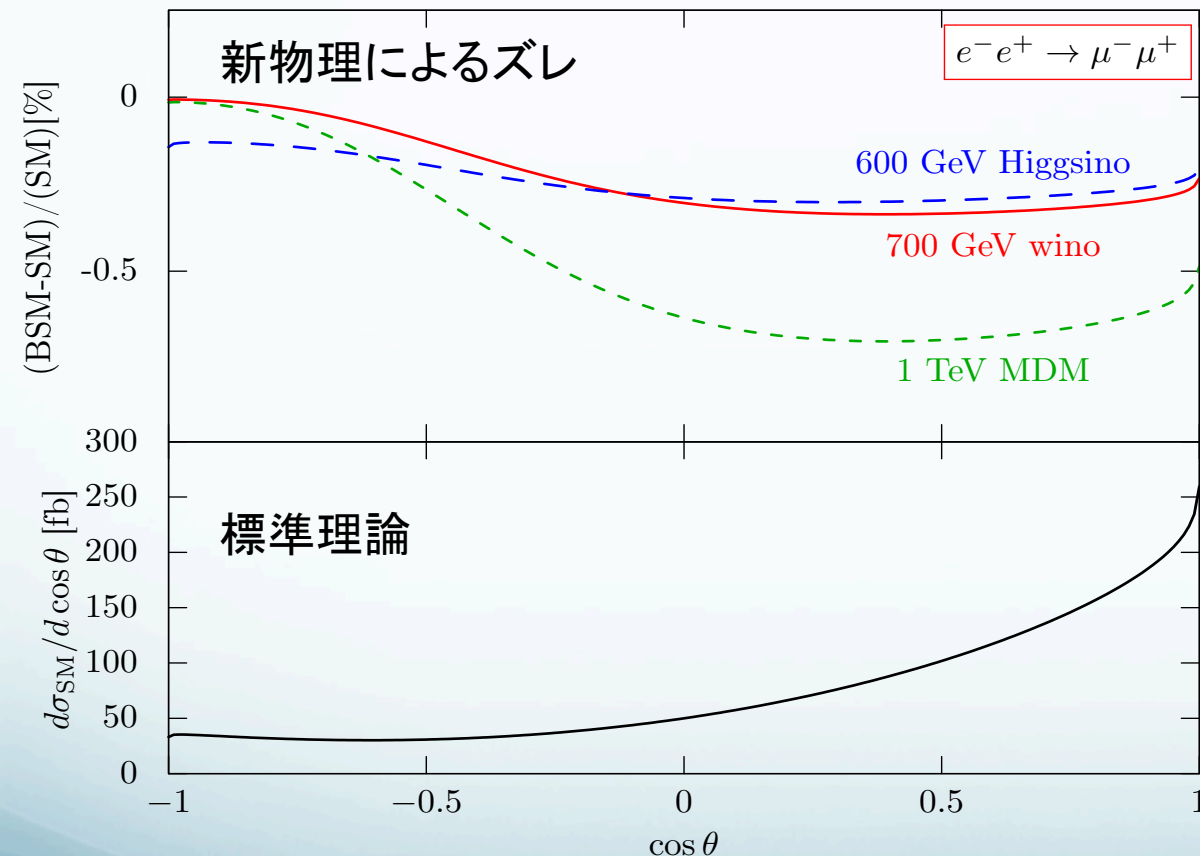
ループがあるプロセスとないプロセスの
確率振幅の干渉を考える

微分断面積の標準理論からのズレを調べる

ILCでの測定

標準理論での角度分布と EWIMPによる微分断面積への寄与

example



仮定として

重心系エネルギー \sqrt{s} : 1 TeV

e^- ビームの偏極 P_- : -80%

e^+ ビームの偏極 P_+ : +60%

(ILCの1 TeVベースラインでは
 P_- が-80%, P_+ が+20%)

MDMとはMinimal Dark Matter

M. Cirelli, N. Fornengo, and A. Strumia, Nucl.Phys. B753, 178

解析

重心系250GeVでの $e^-e^+ \rightarrow \mu^- \mu^+$ の解析

○シミュレーションセットアップ条件

モンテカルロサンプル $ee \rightarrow ll (l = \mu, \tau)$

重心系エネルギー 250GeV

検出器モデル 詳細技術設計書(TDR)

ルミノシティスペクトラムの影響

- ISR
- Beam energy spread
- Beamstrahlung

再構成の手順

2本の孤立した荷電粒子を組み合わせて事象を再構成する

1. ミューオンの抽出

$E_{\text{ECAL}}/E_{\text{total}} < \sim 0.3$ (電子との区別)

$E_{\text{yoke}} > \sim 1.2 \text{ GeV}$ (ミューオンの検出)

$P_{\text{track}} > \sim 5 \text{ GeV}/c$ (低運動量のバックグラウンドの排除)

2. コーンカットによる孤立ミューオンの抽出

ジェット由来の事象を排除(次のスライドで紹介)

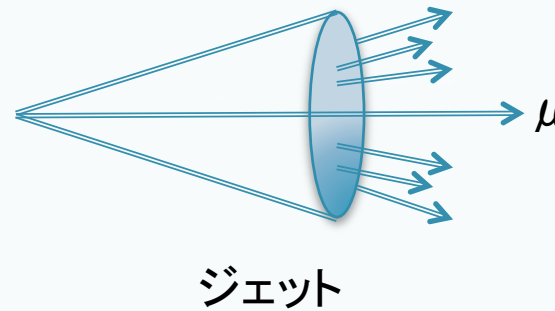
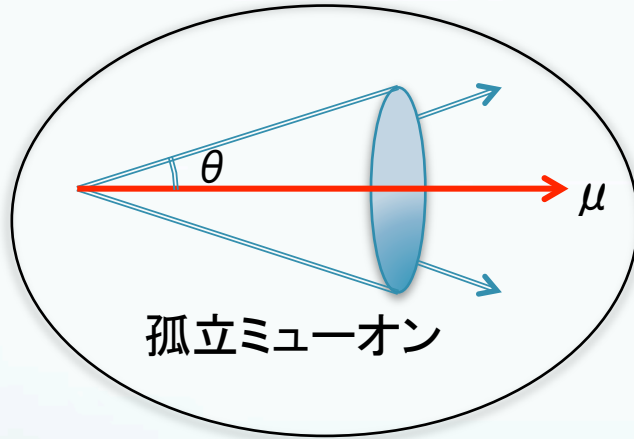
3. 孤立レプトン=2の要求

今後は検出効率を上げるため選別方法を最適化し他のイベントも含める

孤立レプトン

ジェット由来のミュオンを排除するために孤立レプトンを定義する

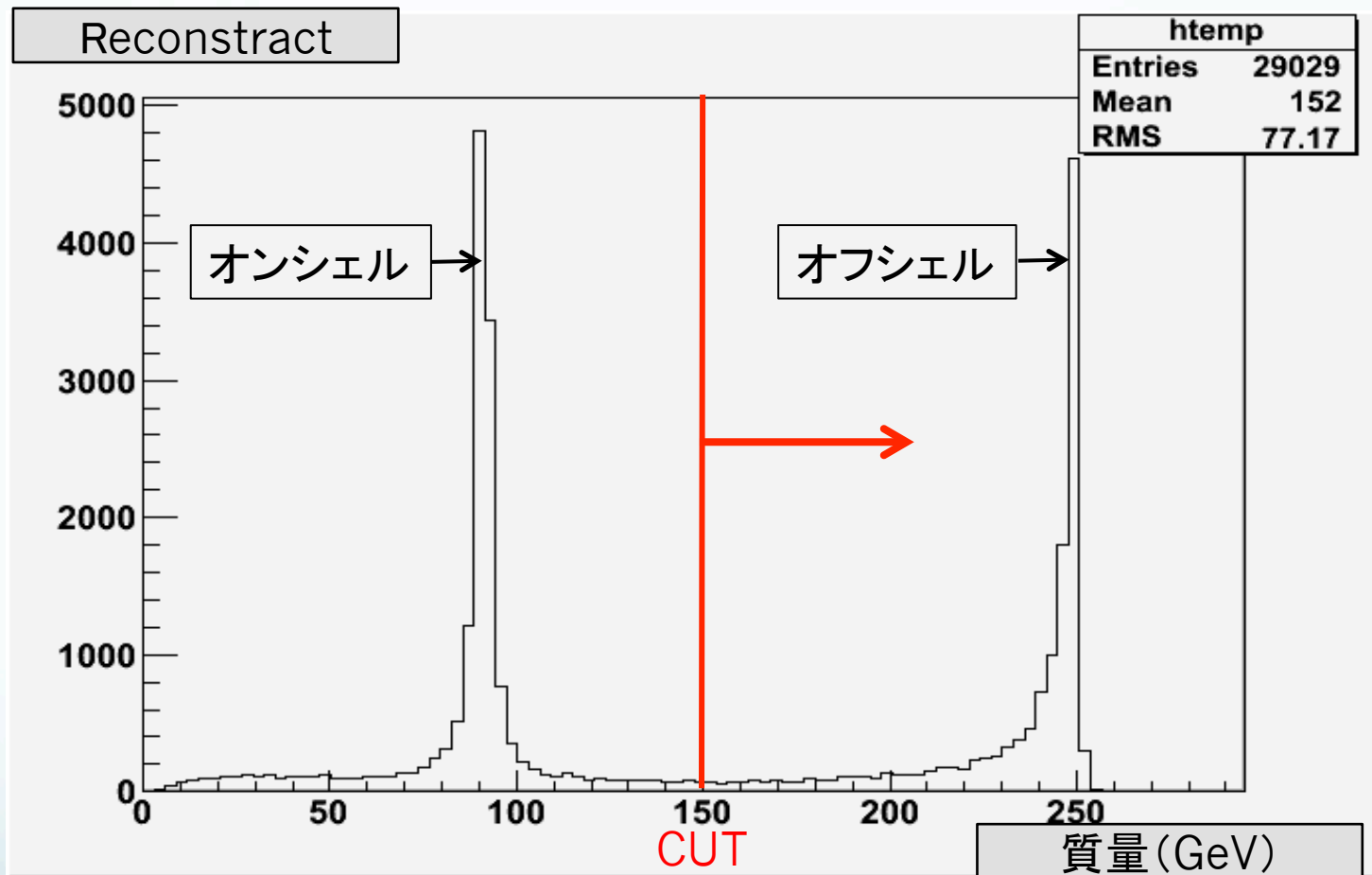
→ $e^-e^+ \rightarrow \mu^- \mu^+$ の孤立しているミュオン



角度 θ の上の図のような円錐を考える

$\cos \theta_{\text{cone}} = 0.95$ 、 $E_{\mu} / E_{\text{cone}} \sim 1$ などの条件で抽出する

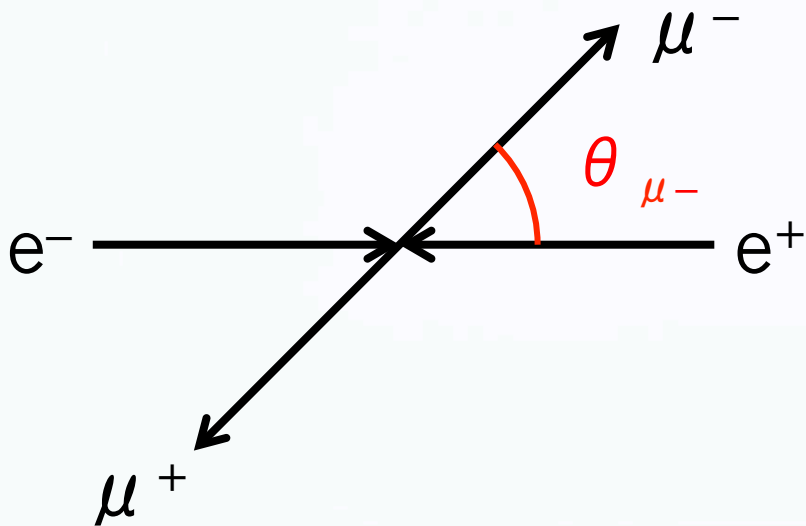
ミューオンペアの不変質量($m_{\mu\mu}$)



250GeVのテールは γ を放出しエネルギーが下がった始状態の粒子が原因
90GeV付近のピークはZボソンが媒介粒子

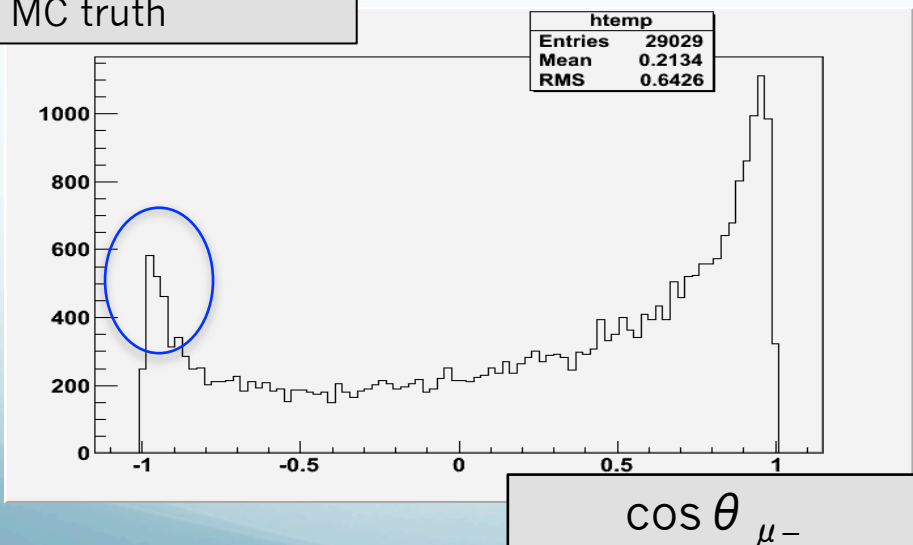
→ミューオンの角度分布ではオフシエルを見たい($m_{\mu\mu} > 150\text{GeV}$)

ミューオンの角度分布(カット前)

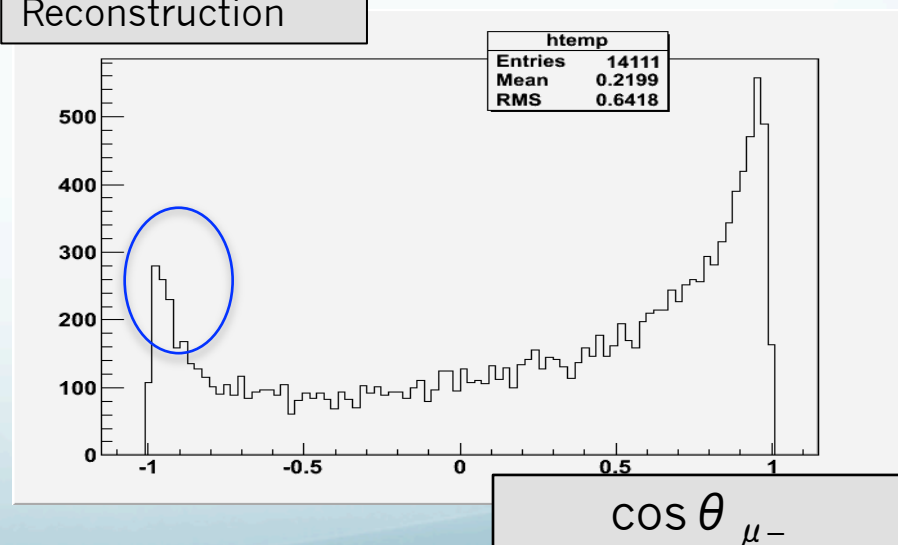


ミューオンは電子のビームの運動方向に散乱されやすい($\theta_{\mu^-}=0$ 、 $\cos \theta_{\mu^-}=1$)
しかし、 -1 にピークがある

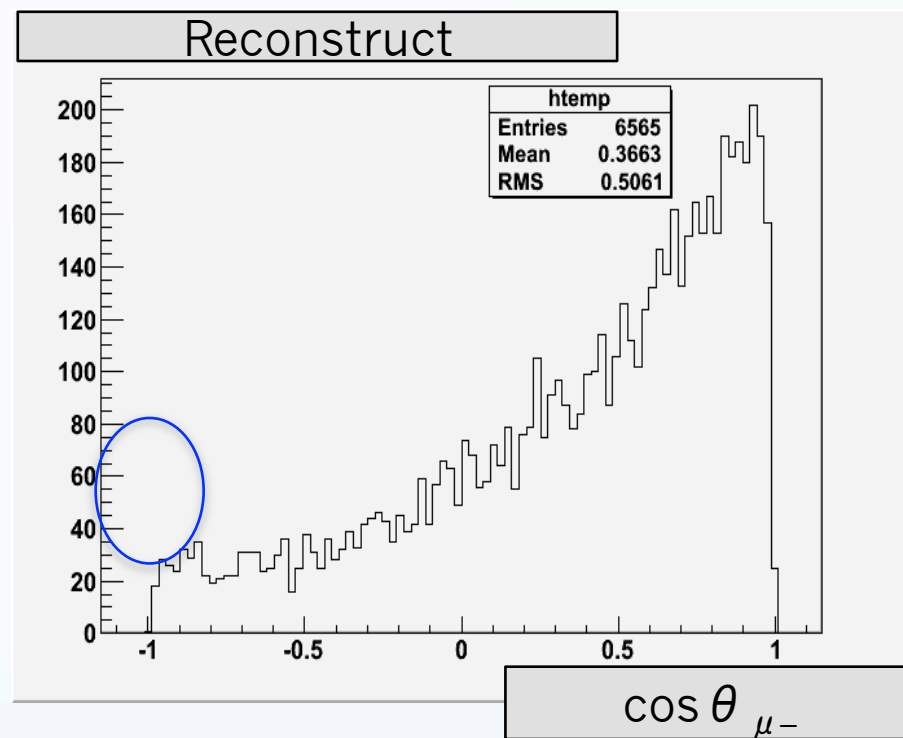
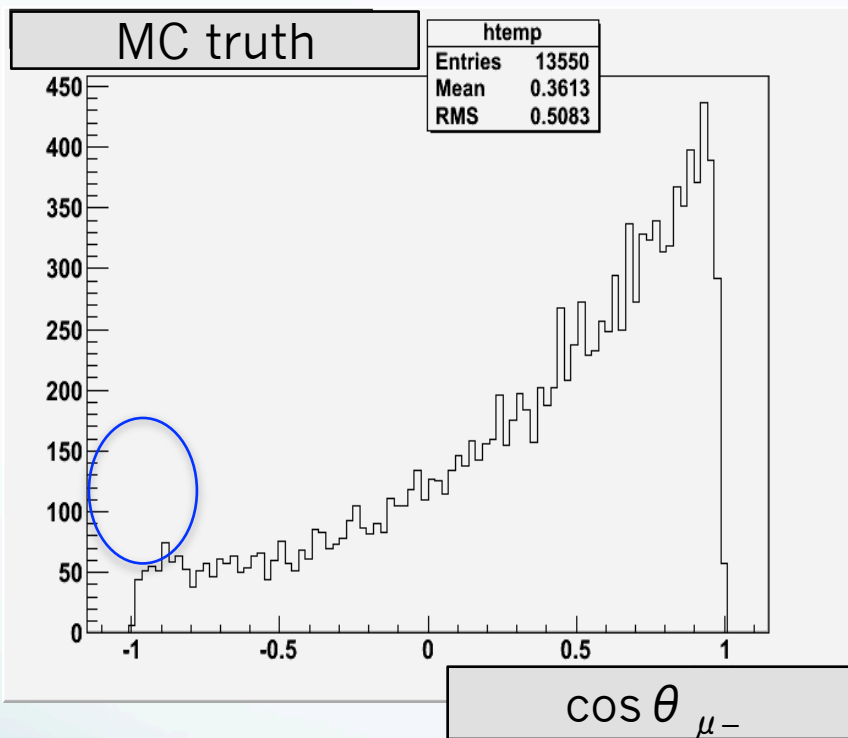
MC truth



Reconstruction



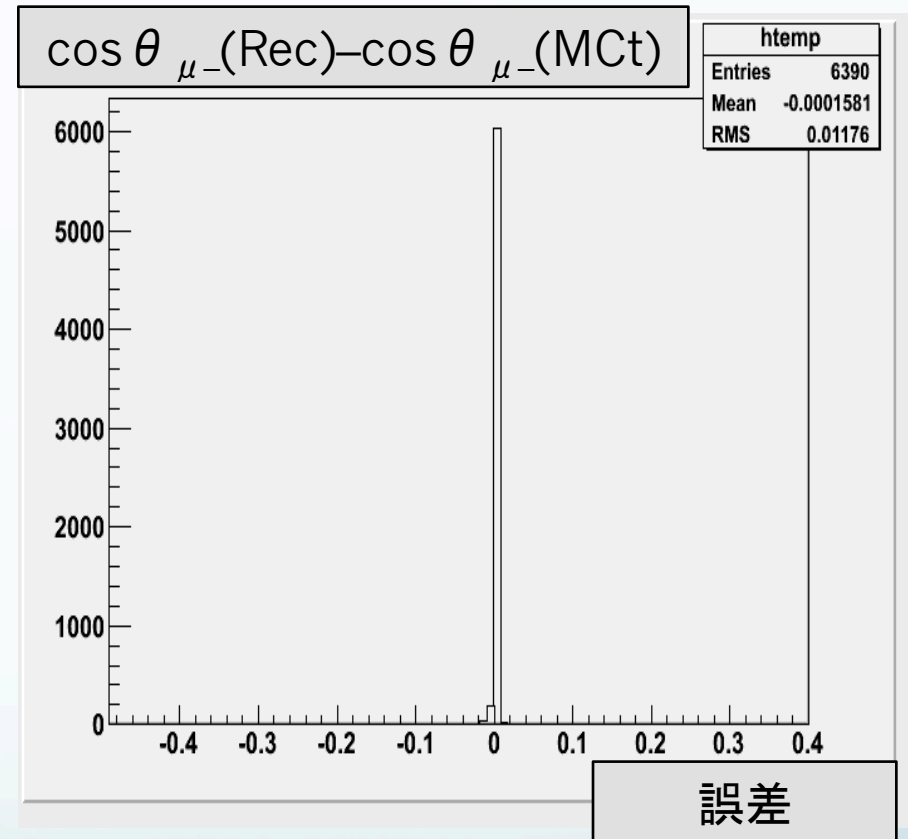
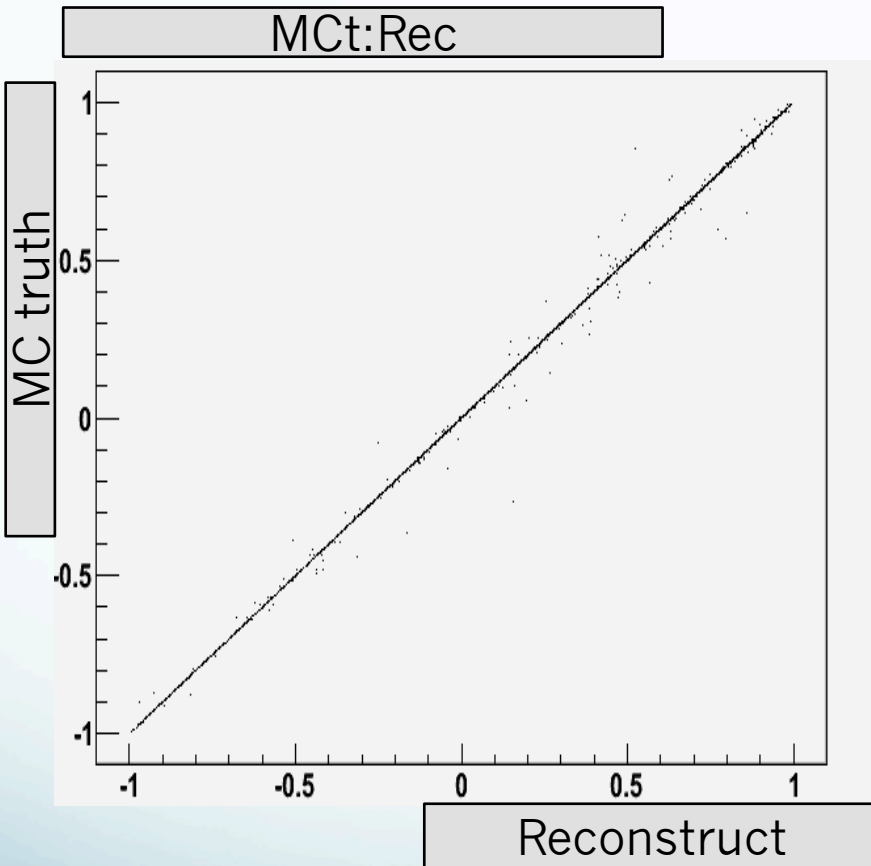
90GeVのピークをカット($m_{\mu\mu} > 150\text{GeV}$)



-1のピークがなくなった

→原因はオンシェルZボソン

MC truthと再構成のミューオンの角度分布の 2次元プロットと誤差



再構成の $\cos \theta_{\mu^-}$ とMC truthの $\cos \theta_{\mu^-}$ の相関をチェックして
線形になった
誤差が非常に小さいことが確認できた

まとめ

- ILCでは素粒子の精密な測定が可能である
- EWIMPの直接測定ができない場合の $ee \rightarrow \mu \mu$ の過程への1-loopレベルの影響の感度を見積もる
- ミューオン対生成の標準理論からのズレを調べることでEWIMPの寄与がわかる
- $ee \rightarrow \mu \mu$ のシミュレーションの解析で不変質量の分布と角度分布を生成し、 Z の寄与を排除することで正しく再構成できることを確認した

今後

- ・孤立レプトンの抽出を改良し検出効率を上げる
- ・生成断面積の測定をする

さらにその後・・・

- ・ミューオン以外の粒子への崩壊過程も調べる
- ・重心系エネルギーを上げて解析を行う

ありがとうございました

Back up

ビーム偏極

- 偏極とはビームのスピンの向きがどれだけ揃っているかを示す値

弱い相互作用は左巻きの粒子としか反応しないため
断面積が大きくなる

偏極の定義式

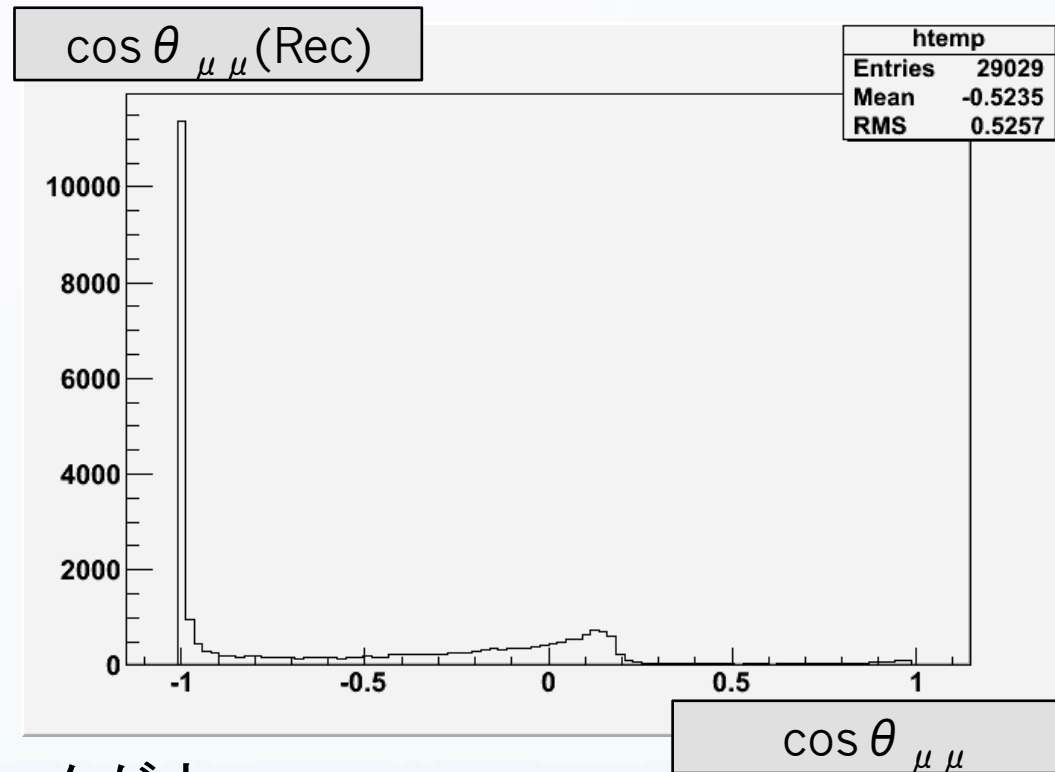
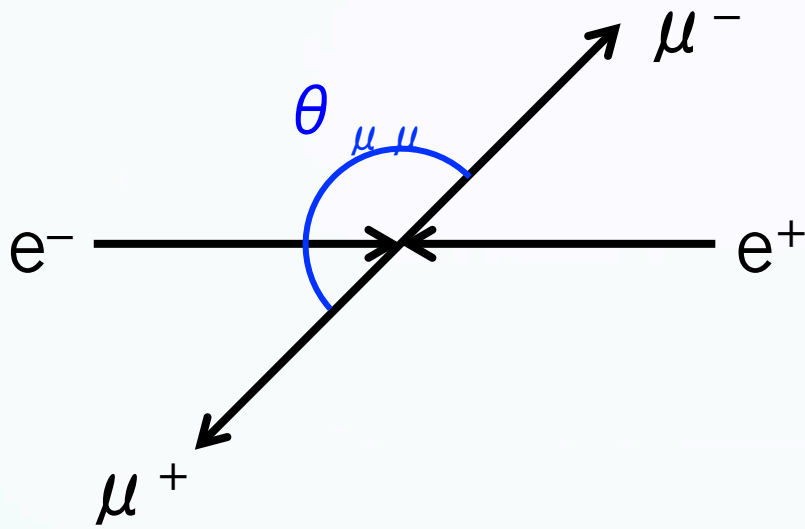
$$P_{\pm} = \frac{N_{e_R^{\pm}} - N_{e_L^{\pm}}}{N_{e_R^{\pm}} + N_{e_L^{\pm}}}$$

ILCでは、電子の偏極は $P_- = -80\%$ 、陽電子の偏極は $P_+ = +30\%$
 $N_{e_{\pm R}} + N_{e_{\pm L}} = 100$ とすると

$P_- = -80\%$ のとき、 $N_{e_{-R}} = 10$ 、 $N_{e_{-L}} = 90$

$P_+ = +30\%$ のとき、 $N_{e_{+R}} = 65$ 、 $N_{e_{+L}} = 35$ ということの意味する

ミューオンペアの角度分布

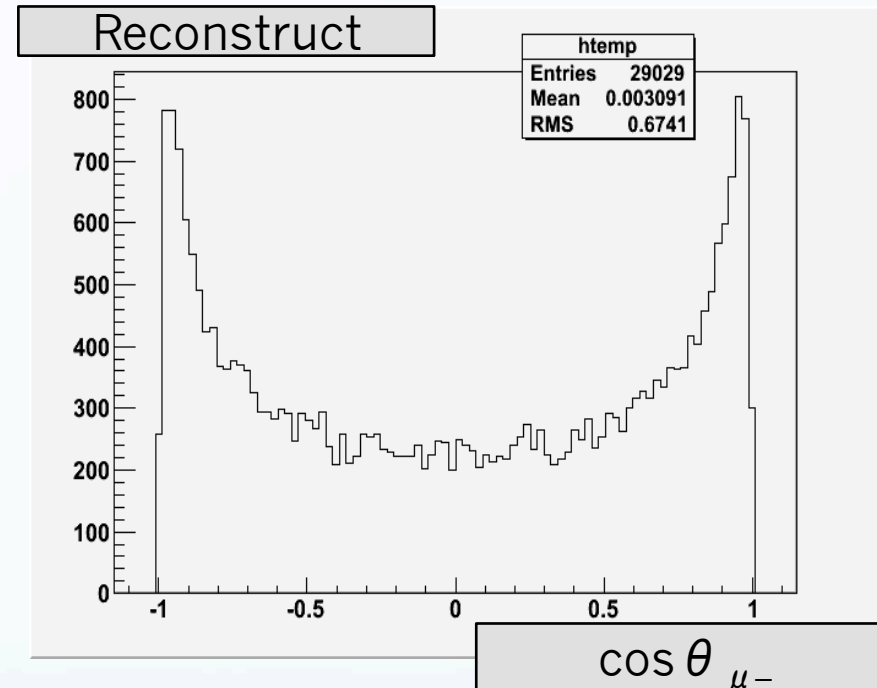
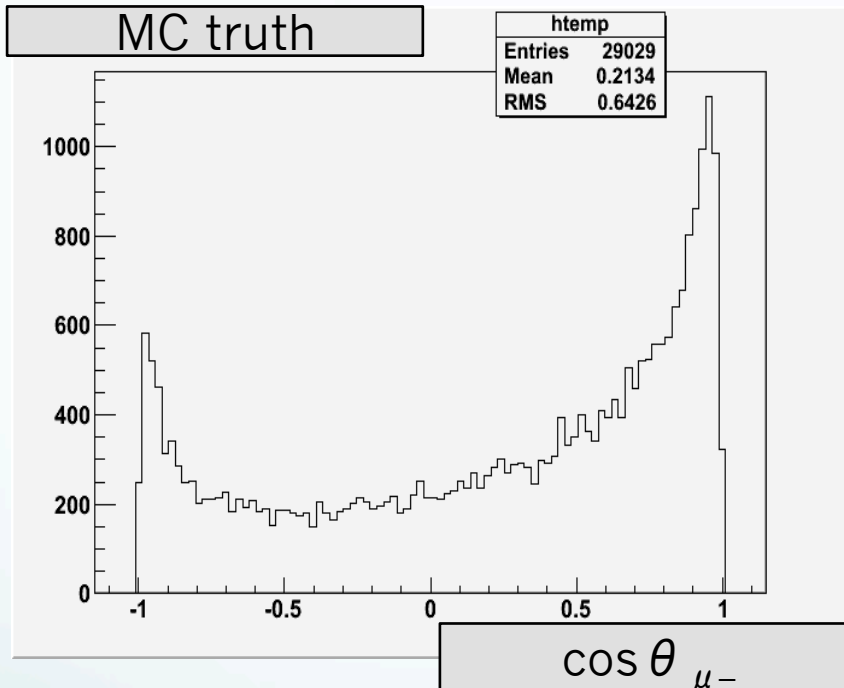


$\theta_{\mu\mu} = 180^\circ$ ($\cos \theta_{\mu\mu} = -1$) でピークが立つ

$\theta_{\mu\mu}$ が 180° にならないミューオンペアが存在する

ISRで e^-e^+ ビームがエネルギーを失いビームエネルギーに差が生じることでエネルギーが相対的に大きいビームの運動方向にブーストされる

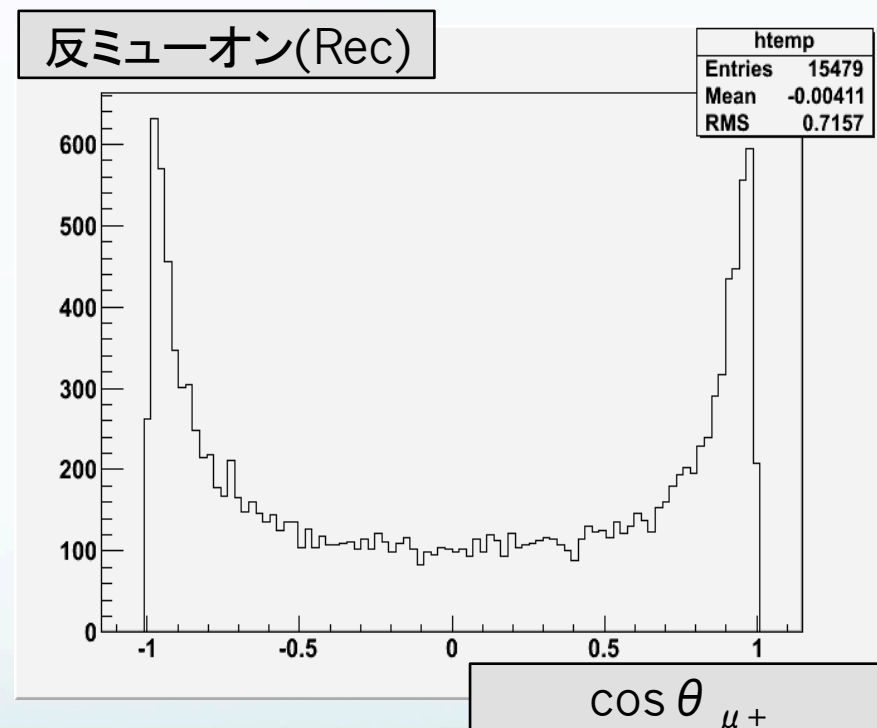
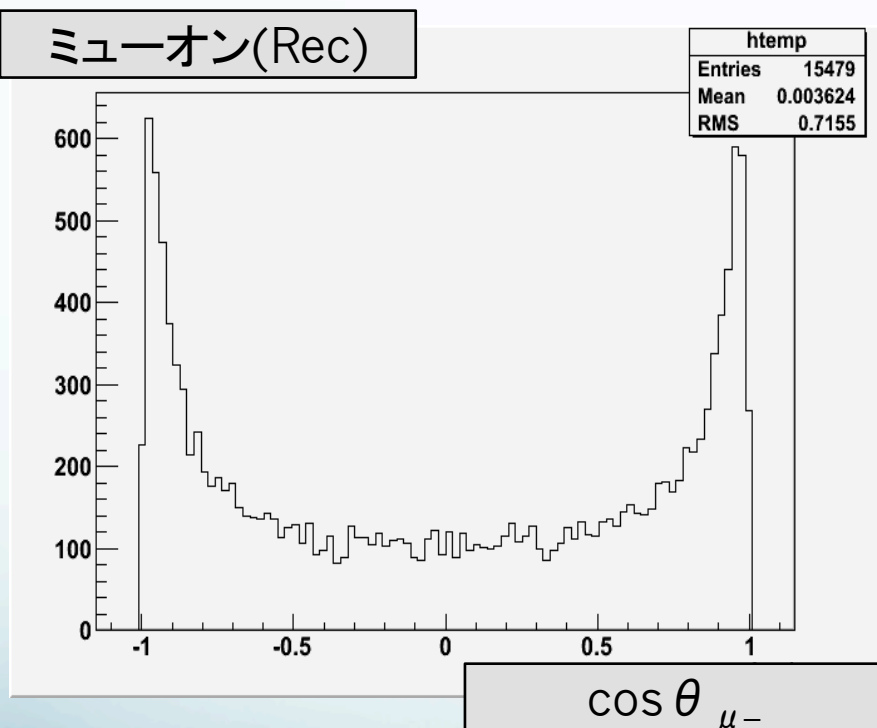
角度分布の再構成



何も設定せずに再構成すると右の図のようになる
-1に+1と同じ大きさのピークがあるのは再構成で全てのミュオンを選択しているからで電荷が-1のものだけを選択する必要がある
→(スライドの20ページの右の図)

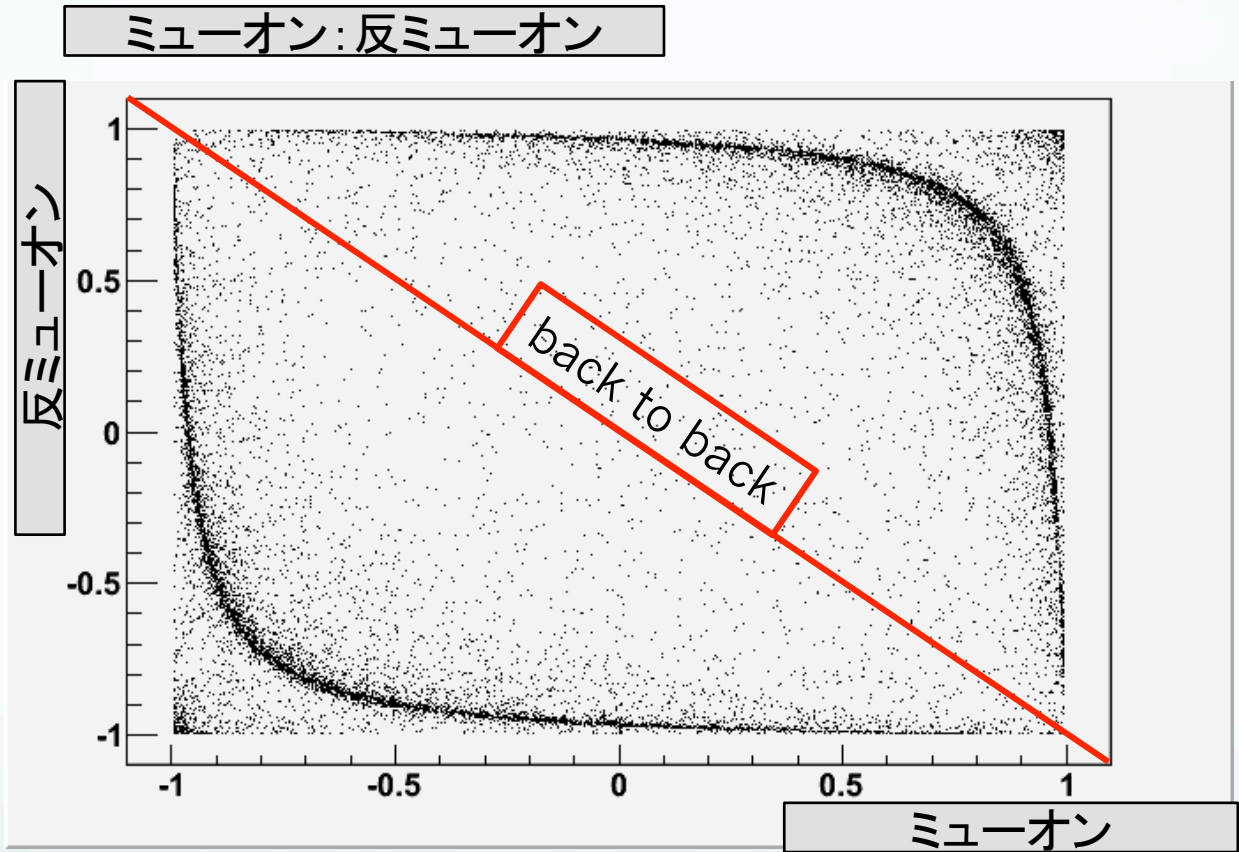
オンシェルZボソンが媒介するときの ミュオンと反ミュオンの角度分布

($m_{\mu\mu} < 150\text{GeV}$)



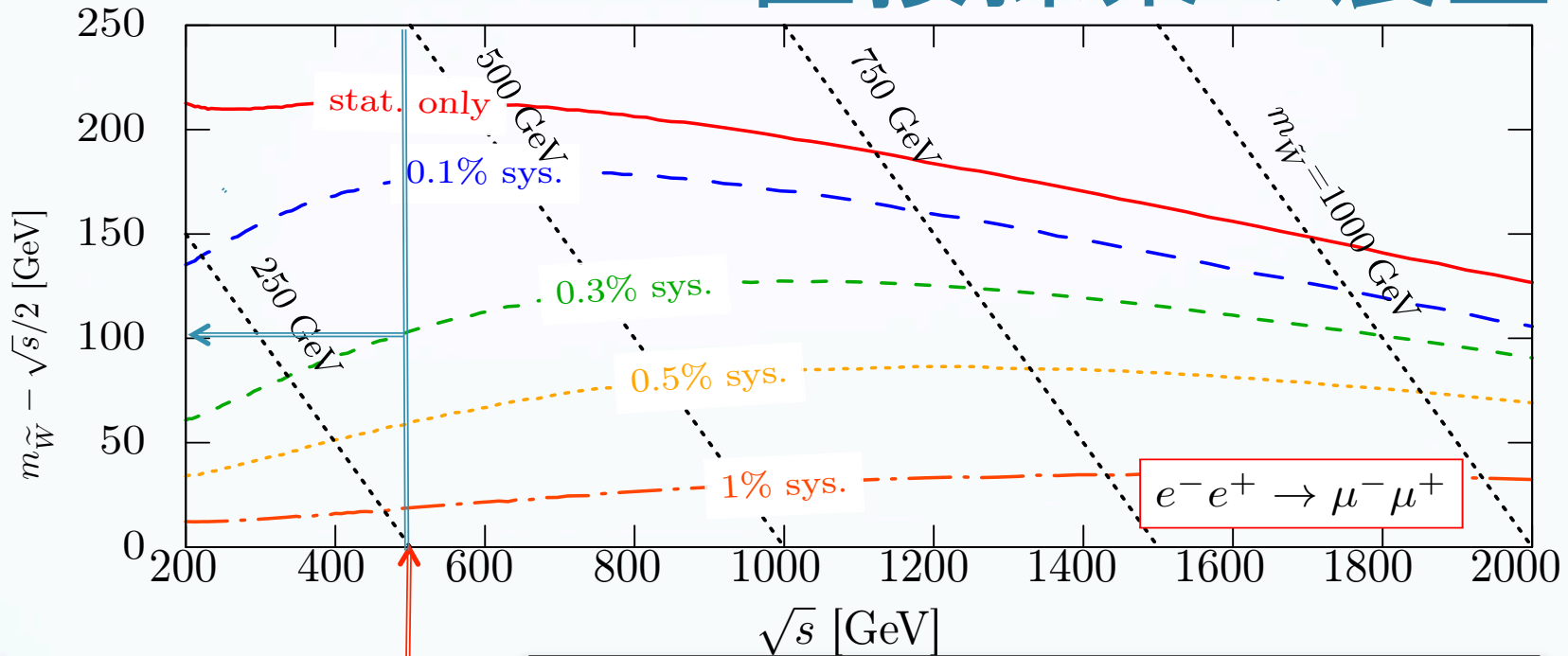
どちらかのビーム方向に偏っている

Zボソンが媒介するときのミュオンペアの角度の比較



back to backにはならず、どちらかにブーストしていることがわかる
例えば、電子ビームのエネルギーが小さいとミュオンペアは
どちらも陽電子ビームが走る方向に飛んでいく

wino mass 直接探索の展望



wino LSP (n=3 & Y=0, Majorana fermion)
 L=3ab⁻¹、P₋=-80%、P₊=+60%

$\sqrt{s}=500\text{GeV}$

例えば

0.3%の系統誤差

→

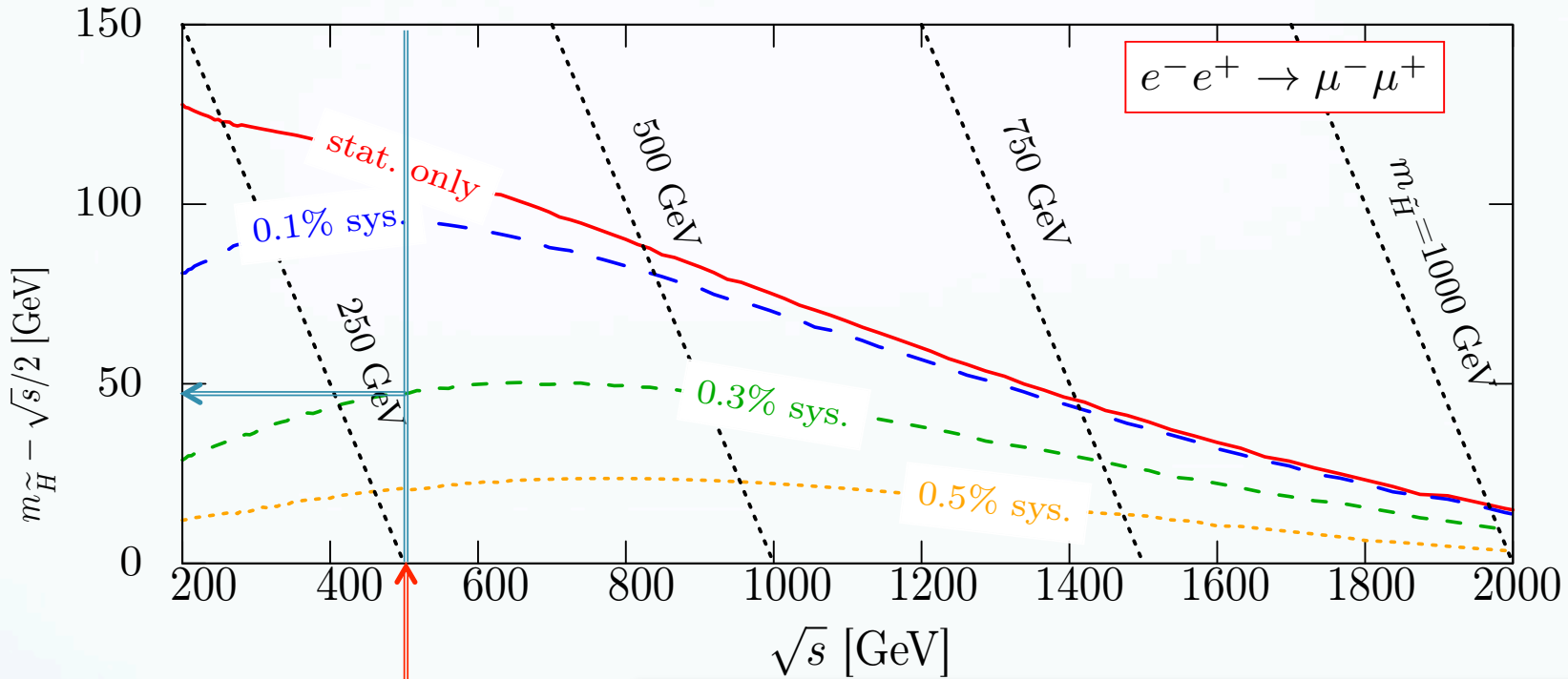
$$m_{\tilde{W}} - \sqrt{s}/2 = 100\text{GeV}$$

$$m_{\tilde{W}} = 100 + 250 = 350\text{GeV}$$

質量が350GeVより小さければ直接測定できる可能性がある

e⁻e⁺ → μ⁻μ⁺の生成断面積が0.1%のオーダーの系統誤差で測定された時のwinoの感度を示す

Higgsino mass 直接探索の展望



Higgsino LSP ($n=2$ & $Y=\pm 1/2$, Dirac fermion)
 $L=3\text{ab}^{-1}$, $P_{-}=-80\%$, $P_{+}=+60\%$

例えば $\sqrt{s}=500\text{GeV}$

0.3%の系統誤差 \rightarrow $m_{\tilde{H}} - \sqrt{s}/2 = 45\text{GeV}$
 $m_{\tilde{H}} = 45 + 250 = 295\text{GeV}$

質量が295GeVより小さければ直接測定できる可能性がある

winoに比べ系統誤差が大きくなると感度が悪い