

ILCによる ヒッグスのCP量子数の シミュレーション解析

東北大学 4年
綿貫 峻

目次

- 国際リニアコライダー（ILC）の概要と特徴
- 研究概要
- 理論的な導入
 - ヒッグスのCPを解析するメリットについて
 - ヒッグス機構の概要と新しい物理
- 解析方法
 - CPを測る方法
 - カットのかけ方
- 現状と課題、およびまとめ

国際リニアコライダー(ILC)

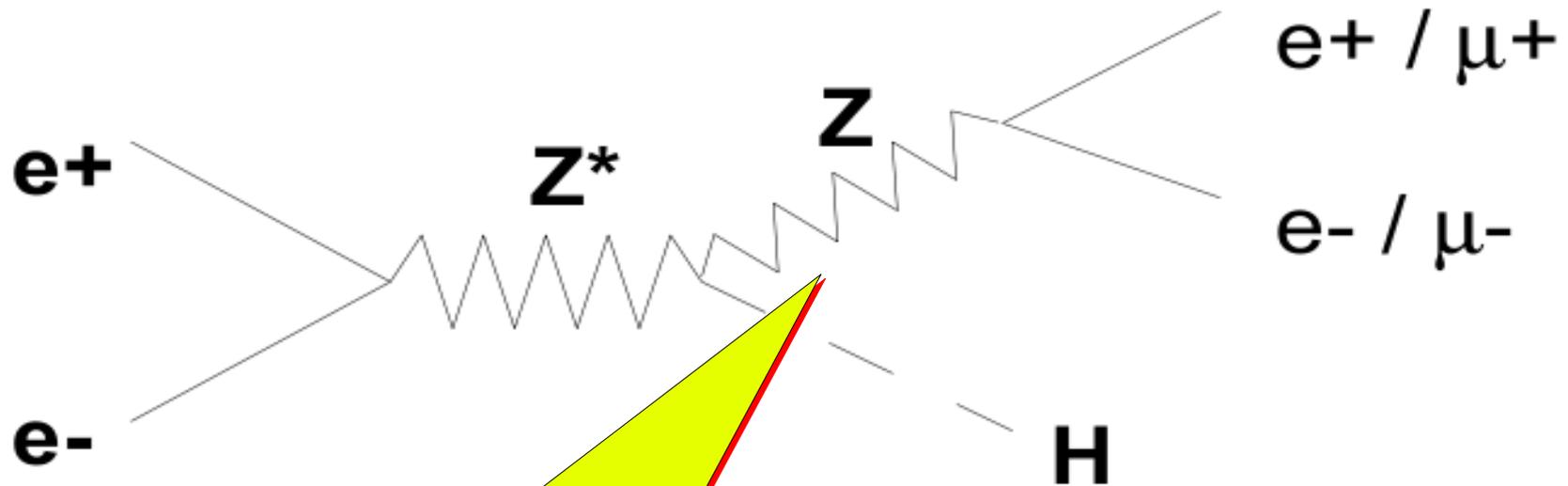
- 電子・陽電子衝突の線形加速器
- 重心系エネルギー250, 350, 500, ... [GeV]
- 250GeVでの積分ルミノシティ 250 [fb⁻¹]
- LHCに比べ反応がクリーン
- LHCが苦手とするcolor lessな軽い粒子も見つけられる
- LHCではできなかったことが、かゆい所に手が届くように可能になる！
- 測定器はILD, SiD



ヒッグスのCP解析

目的：

ZHの反応からヒッグスのCP量子数を解析



SM : CP保存
2 HDM : CP非保存

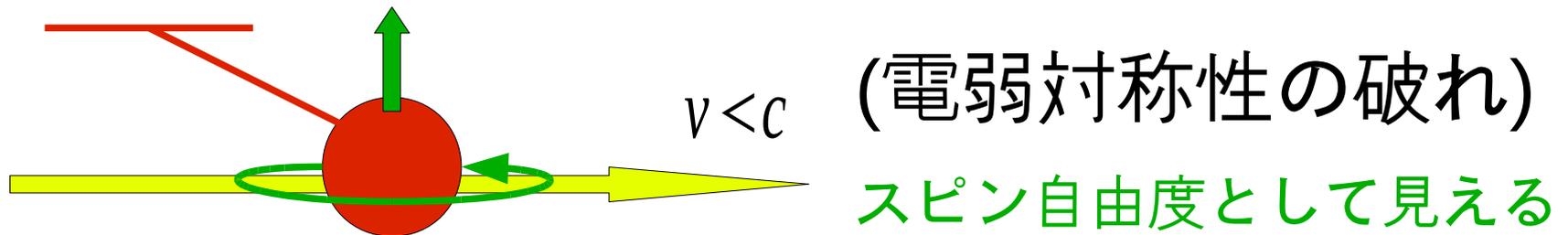
理論的な導入

そもそもヒッグス機構とは

標準理論の波動関数 $\Phi = \begin{pmatrix} G^+ \\ \frac{h+v}{\sqrt{2}} + \frac{iG^0}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$: SU(2)-doublet scalar場
=最も単純な場合を仮定

→ 4 自由度

W^\pm, Z が自由度を食べることで質量を獲得！



→ $4 - 3 = 1$ 自由度が残る

これが標準理論のヒッグスとして観測される！

...が、話題の新粒子は本当にこいつなのか？

2 Higgs Doublet Model

SUSYの波動関数 $\Phi = \begin{pmatrix} \varphi_1^0 \\ \varphi_1^- \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \varphi_2^0 \\ \varphi_2^- \end{pmatrix}$: 2重項ふたつ
=超対称性を満足

- 8自由度
- 電弱対称性の破れにより3つ食われる
- $8 - 3 = 5$ 自由度が残る
- 然るに2HDMでは5種類のヒッグスが存在！

h : SM CP偶

H^+ : 荷電ヒッグス

A^0 : 中性CP奇

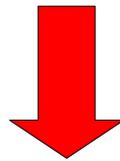
H^- : 荷電ヒッグス

H^0 : 中性ヒッグス

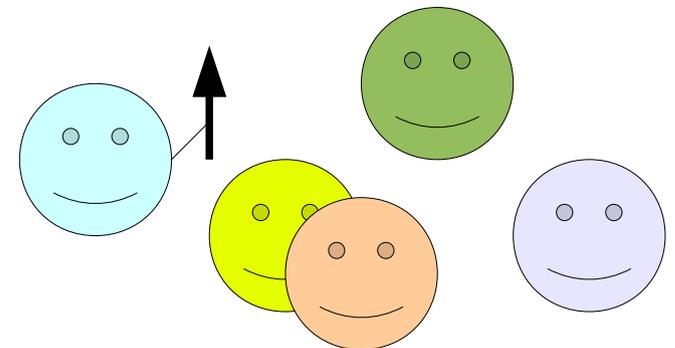
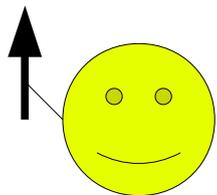
重ね合わせでCPに奇の寄与

なぜヒッグスのCPが重要か

標準理論と2HDM(新しい物理)の前提の違いのひとつが、ヒッグスのCPである



ヒッグスのCPが分かれば、新しい物理にとって強力な後押しとなる(少なくとも、その点における標準理論の欠陥の証明となる)



解析方法

最終目標

CPの偶と奇の混ざり度合 η を評価すること

後述

標準理論

- CPが保存するという前提($\eta=0$)



η はどの程度小さく測定されるかをシミュレーション！

新物理

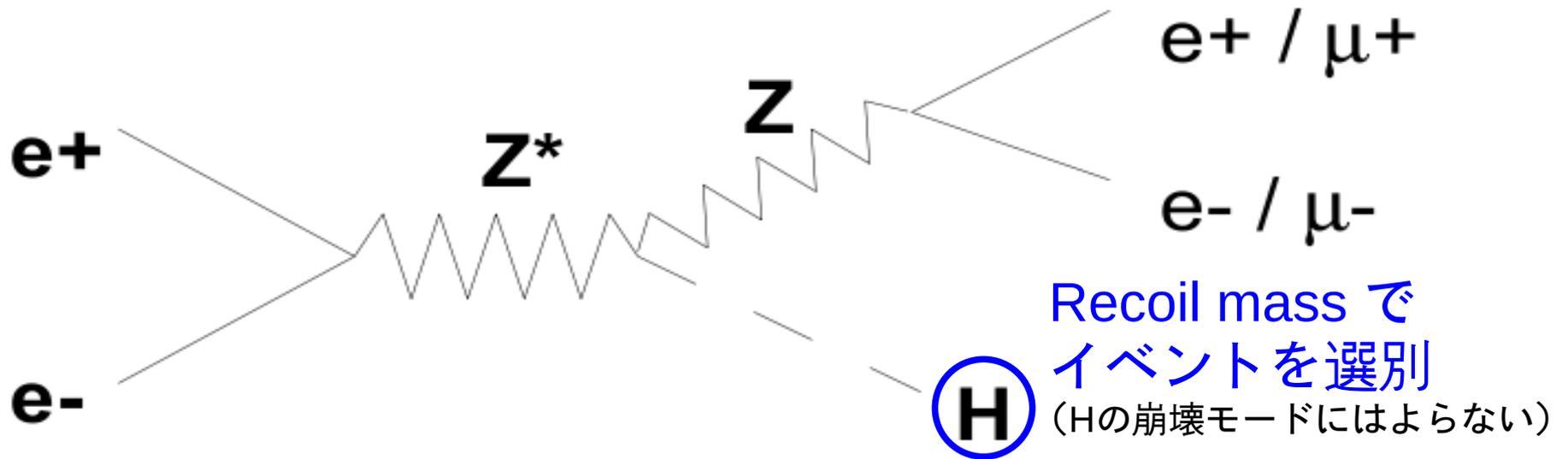
- CPが非保存であるという前提($\eta \neq 0$)



η の値を誤差も含め評価！

↑generatorの情報を変える

CPを測る為の材料



250GeVの $e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^- H$ を使う (eeHよりきれい)

$$M_{\phi Z} = M_{HZ} + \eta \times M_{AZ} \quad \longrightarrow \quad |M_{\phi Z}|^2 = |M_{HZ}|^2 + \eta \times 2 \operatorname{Re}(M_{HZ}^* M_{AZ}) + \eta^2 |M_{AZ}|^2$$

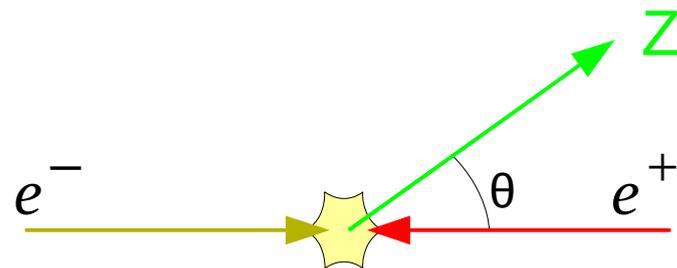
CP奇の混ざり度合 η を計測 (= 0 : SM

or $\neq 0$: 2HDM等)

これが分かればCPの性質が分かる！

CPを測る為の材料を測る為の材料

Zの生成角 θ が最も感度がよい



★微分断面積

$$\frac{d\sigma}{d\cos\theta} = \frac{G_F^2 M_Z^6 \beta}{16\pi} \frac{1}{D_Z(s)} (v_e^2 + a_e^2) \left[\underbrace{1 + \frac{s\beta^2}{8M_Z^2} \sin^2\theta}_{\text{純Even}} + \underbrace{\eta \frac{v_e a_e}{v_e^2 + a_e^2} \frac{2s\beta}{M_Z^2} \cos\theta}_{\text{混じる}} + \underbrace{\eta^2 \frac{s^2 \beta^2}{4M_Z^2} \left(1 - \sin^2\frac{\theta}{2}\right)}_{\text{純Odd}} \right]$$

純Even

混じる

純Odd

CP保存

CP非保存

CP保存

η の1次の項が現れるので、そこから判断！

→ CP偶とCP奇が干渉

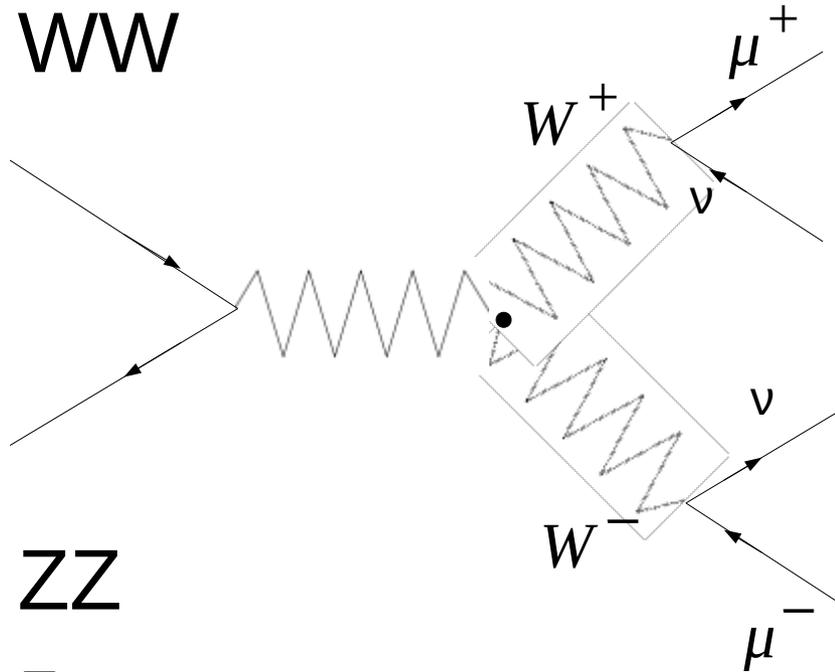
→ $\cos\theta$ によってForward backward asymmetryが見られる

...つまり、CPに奇が混じると粒子がSMと異なる方向へ飛んでく！この方向の分布を見てやろうというのが目標！

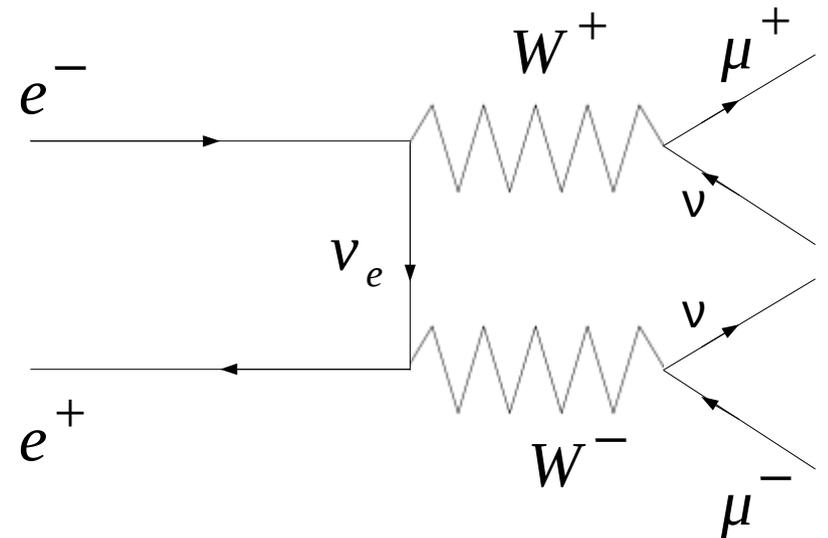
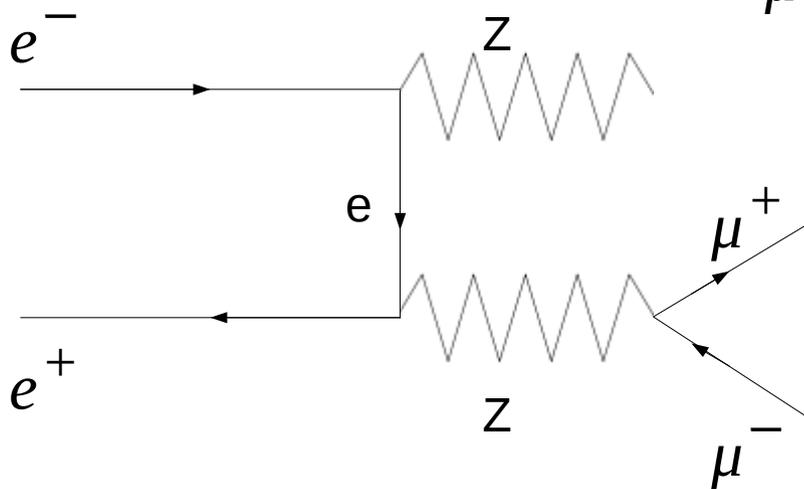
主なバックグラウンドたち

- Jet由来のミュオン (ハドロンシャワーから生まれるゴミ)

- WW

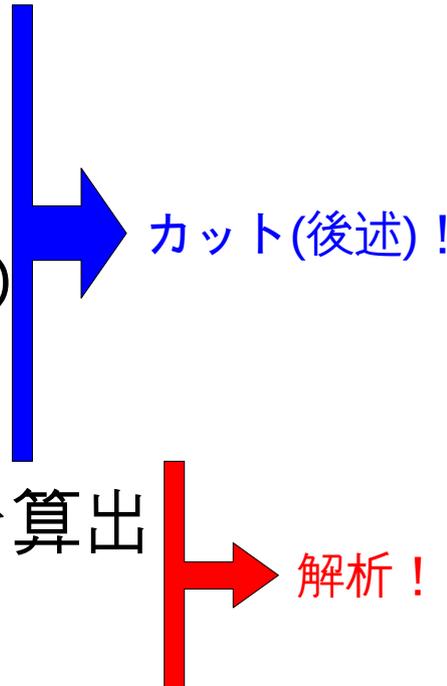


- ZZ



Jet由来やWW由来のものはエネルギーでカットできる可能性もあるが、ZZ由来のものはZから直接ペアに壊れるので、ちょっと厄介(後述)

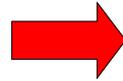
解析の流れ

- アイソレイトなミュオンを2つ見つける
 - 親粒子Zを再構成 (90GeVに程近いもの)
 - ヒッグスの反跳質量を計算 (125GeVに程近い)
 - ZZのバックグラウンドをカット
 - ミューオンの運動量から生成角度 $\cos\theta$ の分布を算出
 - 微分断面積から η を計算
 - これらを「CP偶のヒッグス」と「CPに奇の寄与があるヒッグス」の両方の仮定の下に行い、「CPが偶ならば、 η はどの程度小さいのか」および「CPに奇の寄与があるならば、 η はどの程度の値を持ち得るのか」を評価
 - できれば、より高いエネルギーでもこれらを行う
- ∵ η 1次の項は衝突エネルギーが高いほど感度がよい
- 
- The diagram consists of two vertical lines. The first is blue and has a right-pointing arrow at its base labeled 'カット(後述)!' in blue text. The second is red and has a right-pointing arrow at its base labeled '解析!' in red text. The blue line is positioned to the right of the first four list items, and the red line is positioned to the right of the fifth and sixth list items.

アイソレイトミューオンの見つけ方

発生した μ 候補すべてを参照し、以下を課す

- 電荷を持っている
- ミューオン候補のエネルギー $\geq 10\text{GeV}$
- ECALで落としたエネルギー $\leq 2.5\text{GeV}$
- HCALで落としたエネルギー $\leq 10\text{GeV}$



得られたミューオンの可能なすべてのペアについて、以下を行う

- 電荷-1の粒子と電荷+1の粒子の4元運動量を足し、不変質量 m を計算
- $|m - 91.2(\text{GeV})|$ が最も小さくなるようなペアを探し出す

※ $M_Z = 91.2\text{GeV}$

!!CAUTION!!

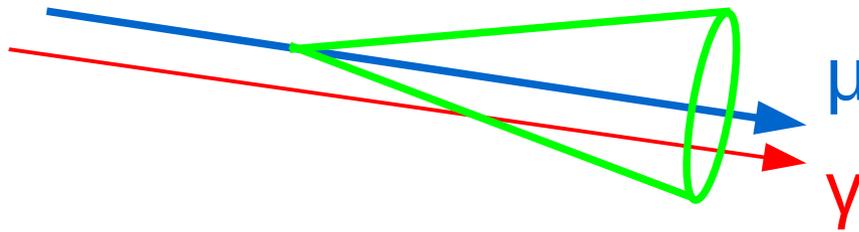
- 1.Zから壊れたミューオンは高いエネルギーを持つ
- 2.ミューオンはECAL、HCALで検出されにくい

!!CAUTION!!

ジェット由来のレプトンはエネルギーが小さい
=このカットでアイソレイトミューオンを見つけられる!

Photon radiation の足し合わせ

ミューオンの進行方向に沿って光子が放射されるような場合(Photon radiation)



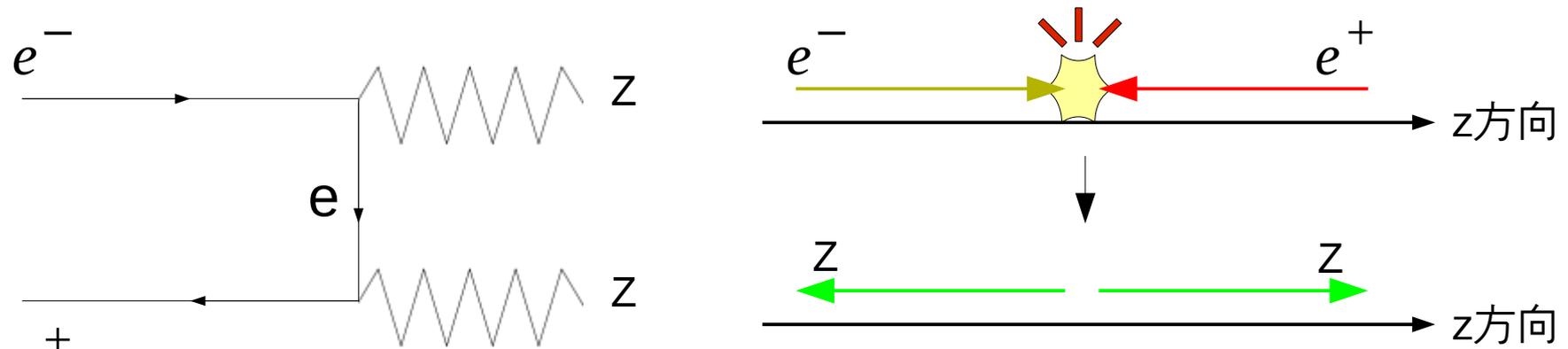
光子がミューオンのエネルギーを持ち去ってしまうので、親粒子が正しく再構成されない

$$\frac{\vec{p}_\gamma \cdot \vec{p}_\mu}{E_\gamma E_\mu} = \frac{|\vec{p}_\gamma| |\vec{p}_\mu| \cos\theta}{E_\gamma E_\mu} > 0.999$$



この条件でμから放射された光子を見つけ、μの運動量に光子のそれを加える

ZZのバックグラウンドについて



上のような反応で生成されたZがミュオンペアに壊れた時、これはバックグラウンドになる...

が、このZペアは電子-陽電子に擦られたように、ビームの進行方向に沿って飛ぶので、以下の方法でカットすることができる

- ミュオンペアの運動量のz成分の絶対値 $|p_z|$ をとる
- $|p_z| < \text{衝突エネルギーに由来するカット}$

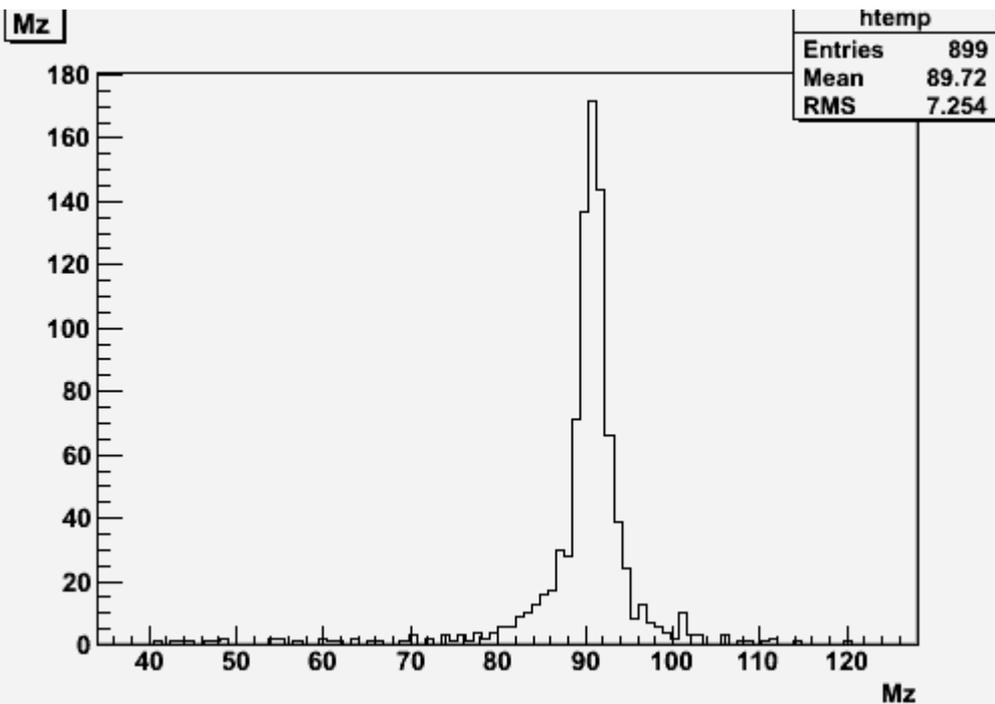
現状と課題 およびまとめ

現状その1

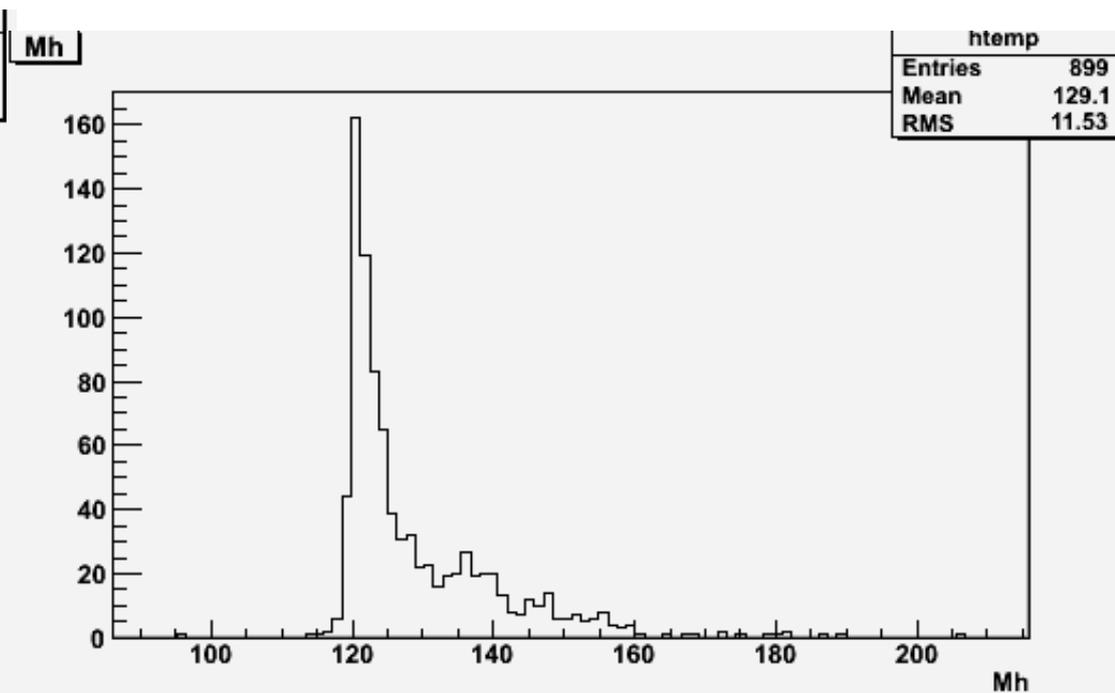
サンプルをひとつ使ってZを再構成した

- 偏極：電子-100%、陽電子+100%
- Cross section = 17.126 [fb]
- 積分ルミノシティ (250GeV) = 250 [fb⁻¹]

※下のヒストグラムは1000evt程度なので足りない



Z mass

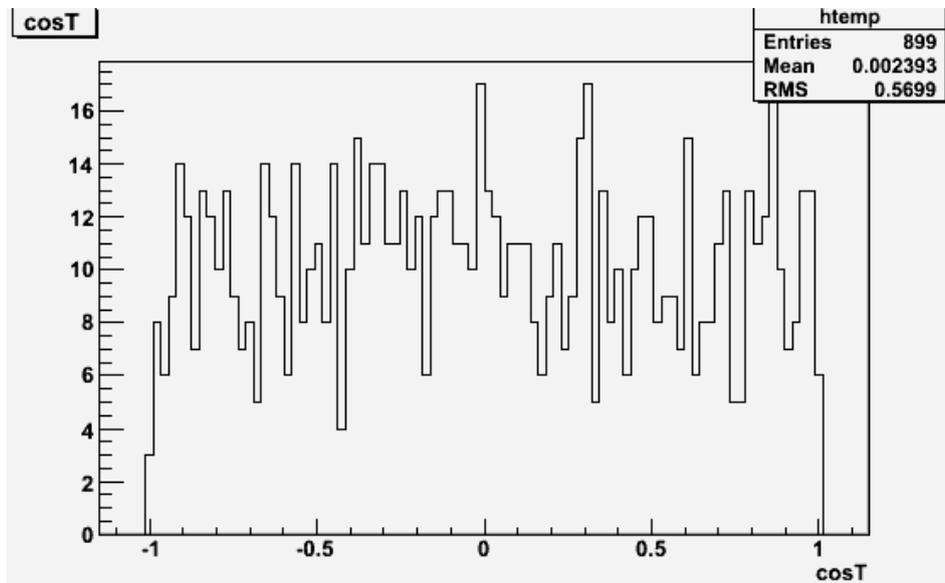


H recoil mass

現状その2

単純に再構成Zの生成角度 θ を見る(再構成情報なので efficiencyで割らなければ偏りは見えない)。

- 電子の質量が小さいので、 $|\text{運動量}| = \text{エネルギー}$ として計算する
- この要領で得た角度分布と generator情報から efficiencyを求め、微分断面積を計算する予定



今後の課題

- ZZ、反跳質量等のカットをかける
- generator情報と併せてefficiencyを求める

まとめ

ヒッグスのCPは新物理の是非を決める上で重要な物理量

ZHを用いZの角度分布の偏りから微分断面積を計算

CPの偶と奇の混ざり度合 η を評価するのが目標

ミューオンの運動量からZを再構成するところまで成功した

今後は統計数の増加と、generator情報からeffの計算を行う