

# PHYSICS AT ILC



TOHOKU  
UNIVERSITY

末原 大幹  
(東北大学)

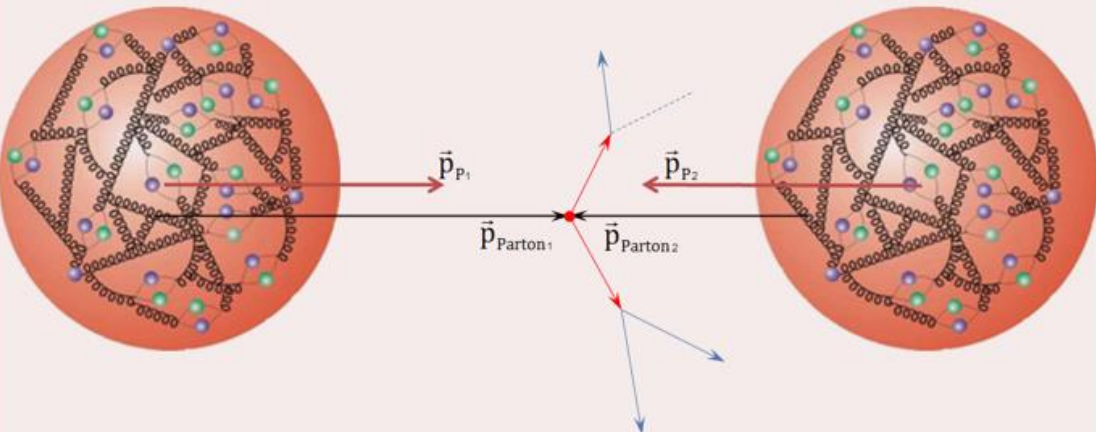
# テーマ

|                | 理論 | 物理解析 |     | 測定器 |     | 加速器 |
|----------------|----|------|-----|-----|-----|-----|
|                |    | 若手   | シニア | 若手  | シニア |     |
| イントロ           |    |      |     |     |     |     |
| 物理解析の手法        | △  | ◎    | △   | ○   | △   | △   |
| ILCの物理性能とその信頼性 | ◎  | △    | ○   | △   | ◎   | ◎   |

# LHC

proton 1

proton 2



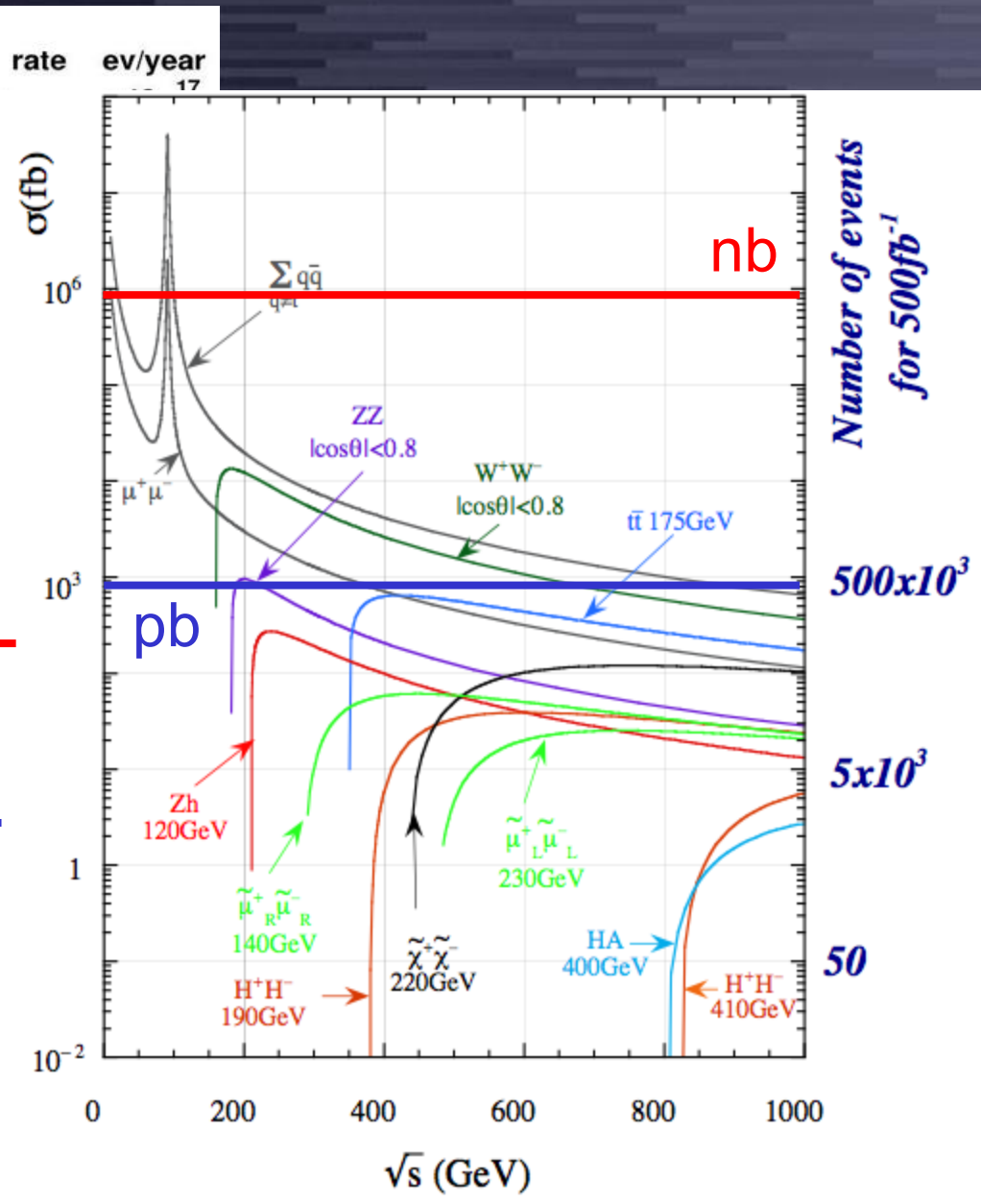
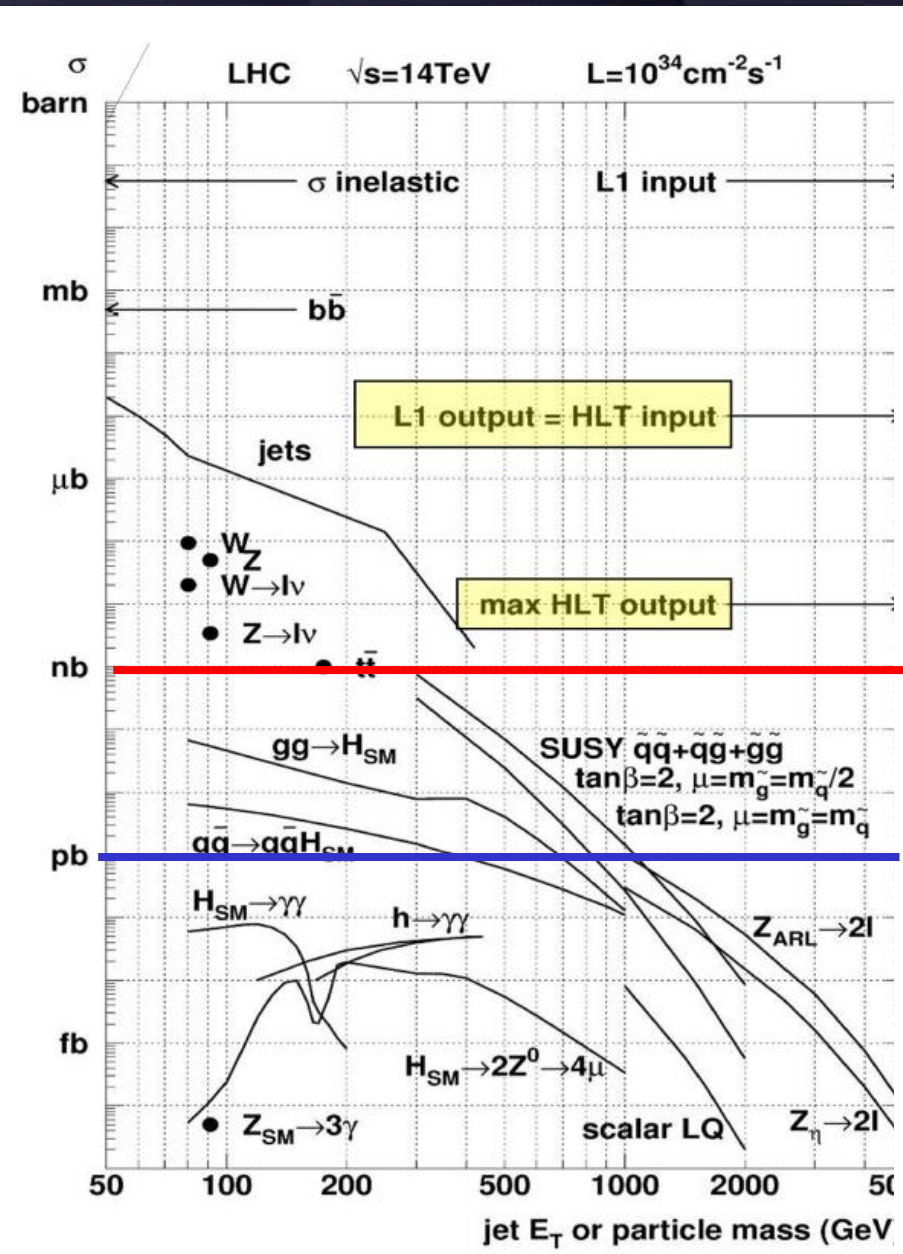
- エネルギー: 高い
- 反応確率: 高い
- 背景事象: 多い
- 反応エネルギー: 一部 (複合粒子なので)
- $p_T$ で高E事象を選択

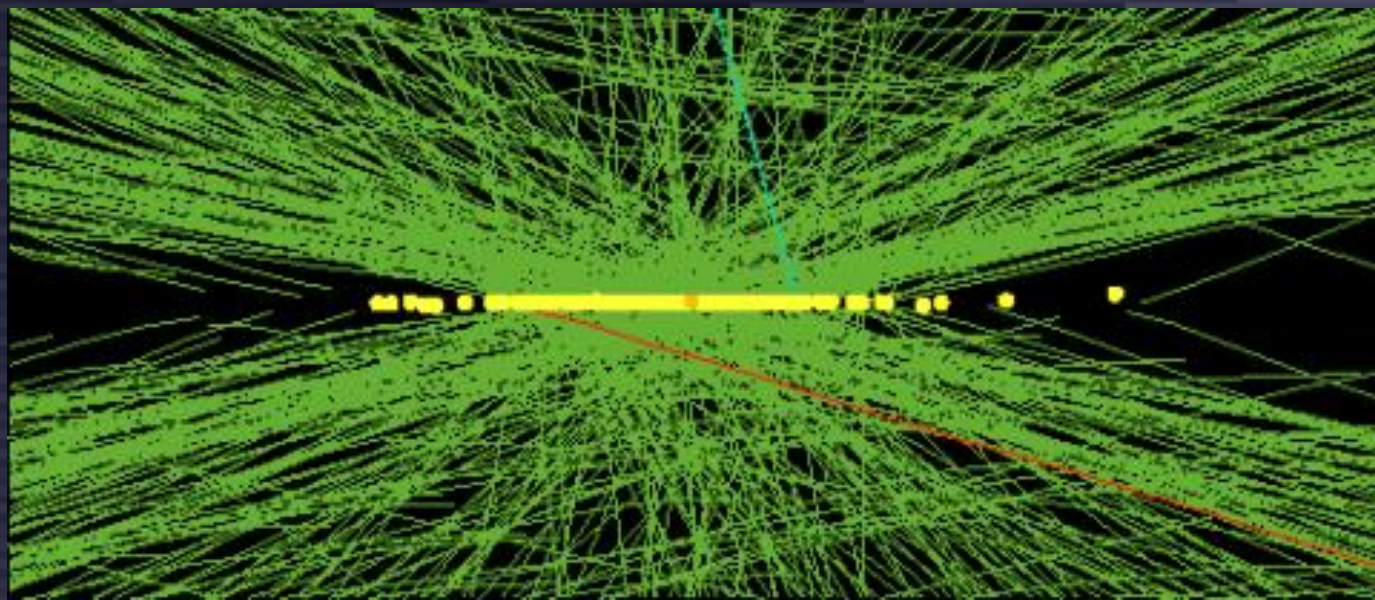
# ILC



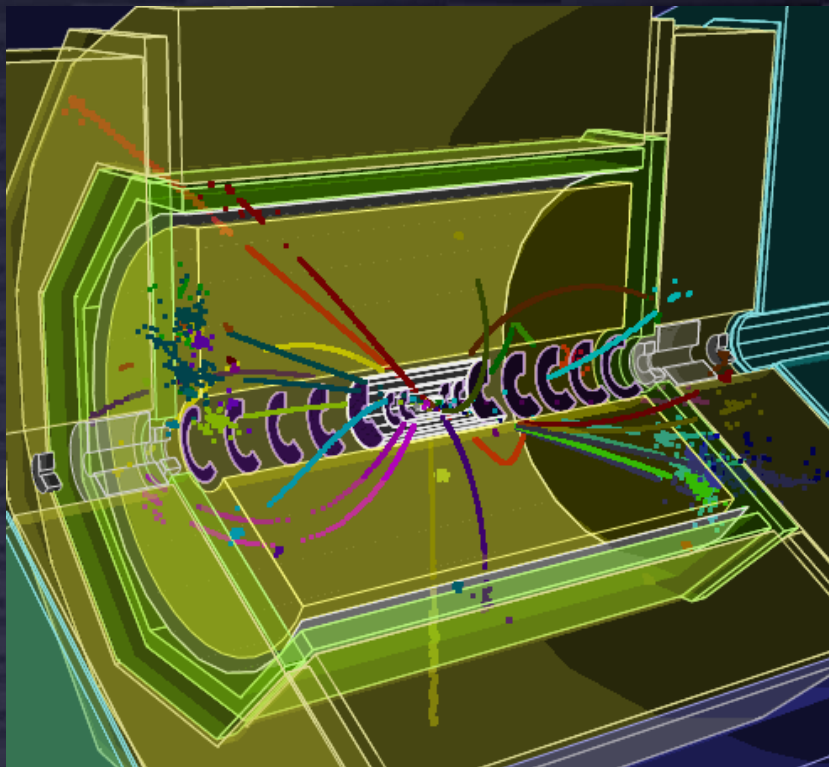
- エネルギー: 低め
- 反応確率: 低め
- 背景事象: 少ない
- 全反応エネルギーが使える
- 4元運動量保存が使える ( $p_T$ だけでなく $p_z$ も)
- 偏極が使える

# 断面積: LHCとILC





CMS,  
78個のパイル  
アップされた  
衝突点再構成



ILC (ILD),  
 $Z_h \rightarrow \mu\mu b\bar{b}$

# ILCで見る物理

- Higgs

- SUSY

- top

- other BSM

- W/Z

# Higgs は TeV物理の窓!

GeV world  
where SM is  
dominant

Fermion  
mass generation  
by Yukawa coupling

TeV world  
where SM is just  
a perturbation

Electroweak  
symmetry breaking

“The last fundamental  
piece unproved in  
Standard Model”



Vacuum  
condensation  
& hhh coupling

Higgs issues

- Naturalness
- Composite Higgs?
- Multiple Higgs?

BSM  
(SUSY?)

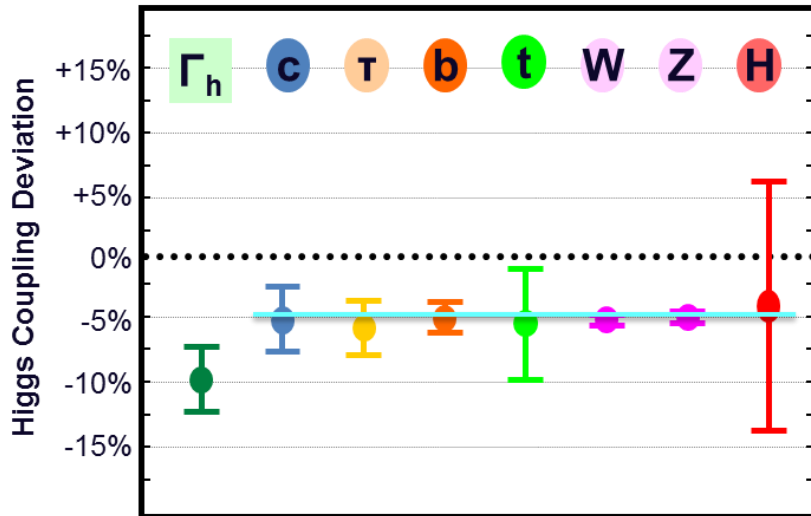
Dark  
Matter?

Baryo-  
genesis?

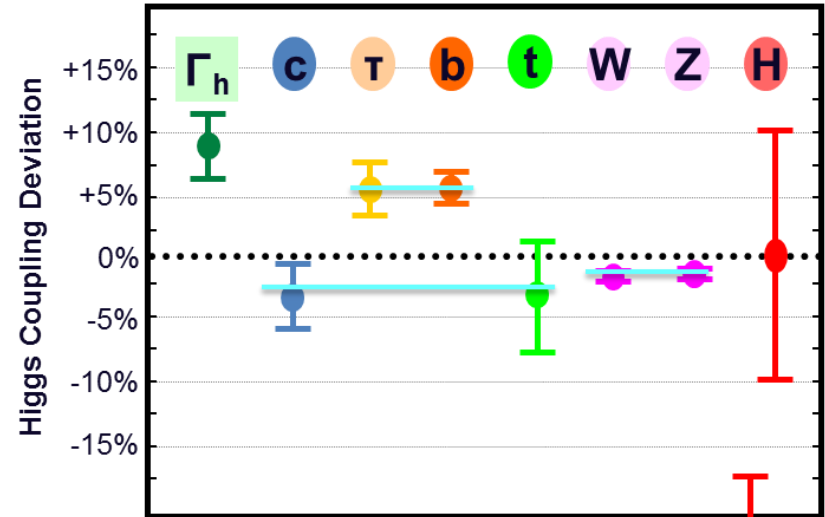
# Higgs and BSM theories

実際のずれはモデル依存だが数%の精度で測りたい

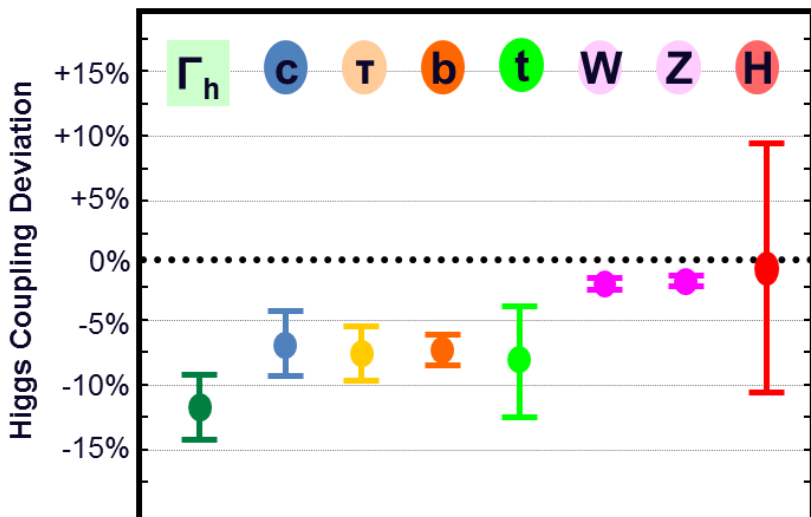
### Singlet Mixing



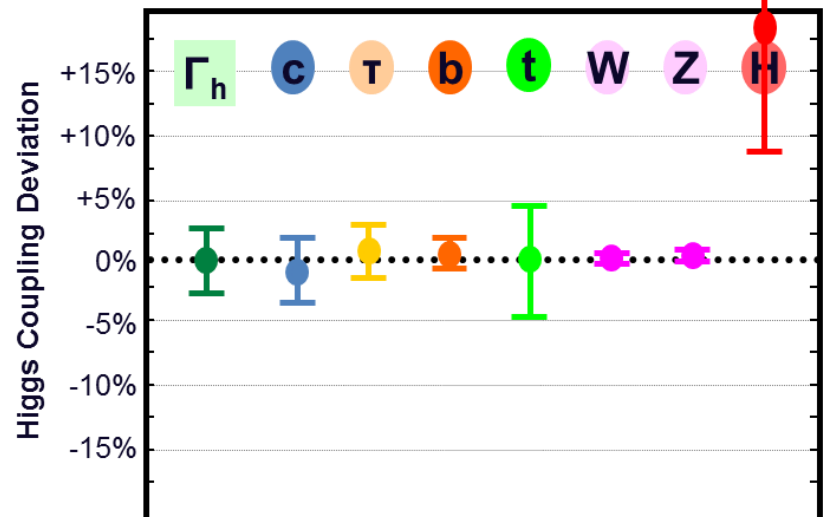
### MSSM / Type II 2HDM



### Composite Higgs



### Electroweak Baryogenesis





MC, reconstruction, analysis

# 物理解析の手法

# 物理解析の流れ

イベント生成  
(シグナル/バックグラウンド)

モデル→粒子

測定器シミュレーション

粒子→ヒット

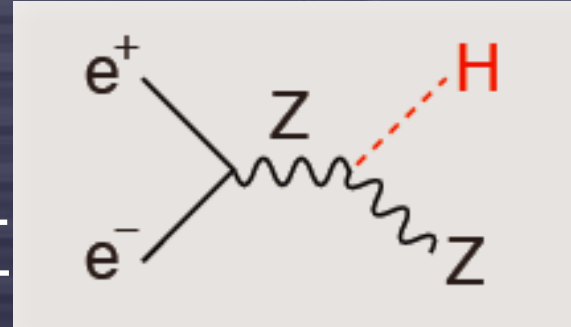
再構成

ヒット→粒子

解析 (カット、フィット、  
物理パラメータ導出など)

粒子→モデル

# イベント生成



- モデルからMatrix elementを計算
  - 標準理論、いろんなBSM理論
  - シグナル / バックグラウンドそれぞれ
- Phase spaceを積分して微分断面積を計算
  - 4元運動量、偏極、各粒子
- 断面積の分布に従ってランダムにイベント生成
  - ビームスペクトル、ISR/FSRを考慮
- カラー粒子のハドロン化
  - 中寿命粒子(b,cハドロン)の崩壊
  - タウの崩壊は特別なコードを使う

# イベントジェネレータ私見

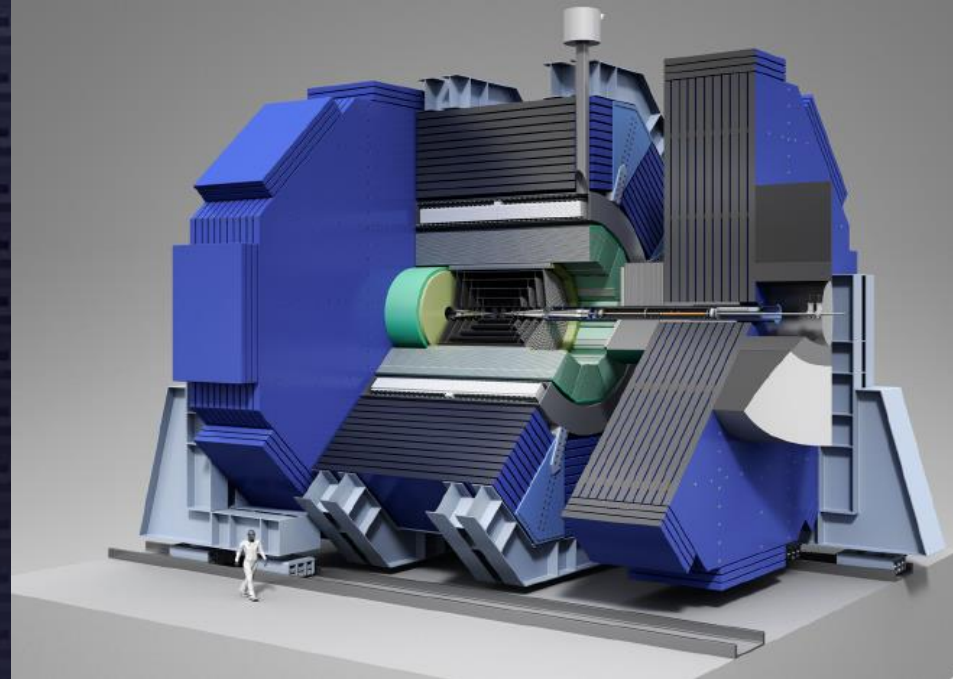
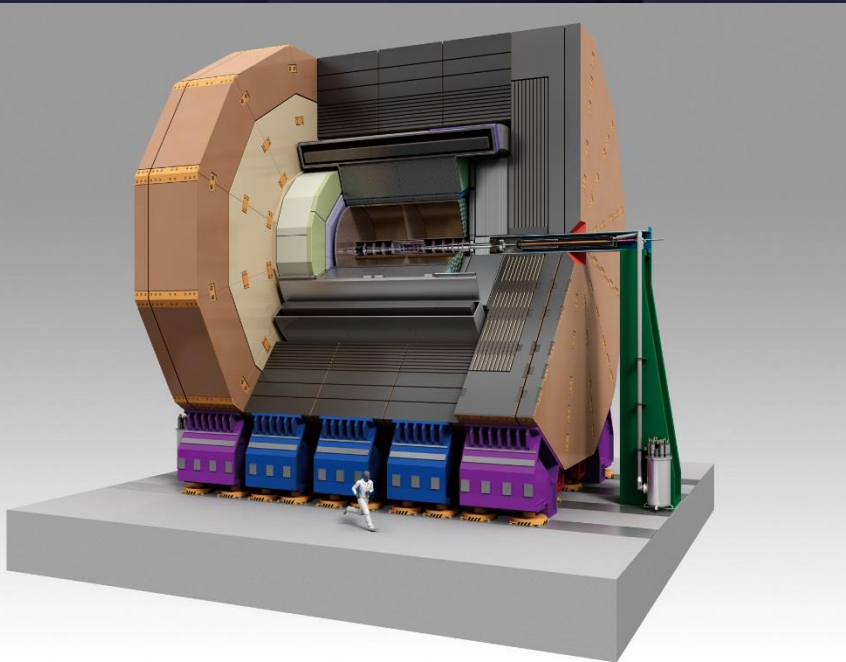
|          | whizard    | physsim | MadGraph | pythia | tauola |
|----------|------------|---------|----------|--------|--------|
| 断面積計算    | ○          | ○       | ○        | 一応可能   |        |
| 用途       | SM/SUSY    | SM/BSM  | 理論等      | 使ってない  |        |
| 柔軟性      | △          | ◎       | ○        | ×      |        |
| 手間       | ○          | △       | ◎        |        |        |
| beam/ISR | ◎          | ○       | × ?      |        |        |
| ハドロン化    | →          | →       | →        | ○      |        |
| タウ崩壊     |            |         |          | →      | ○      |
| 使い方      | whizard.in | コード書く   | 設定ファイル   |        |        |

- ILC標準サンプルは主にwhizard (一部physsim)で生成
- BSM等は(日本では)physsimで作ることが多い
- MadGraphはフルシミュレーションでは使ってない
- pythiaは最近のはLEP tunedのパラメータを使用
- tauolaはtauの偏極を考慮した崩壊に必要

# 測定器シミュレーション

- 生成した粒子を「測定器」内で発生させる
  - 衝突角(14 mrad), ビームスポット(to be done)
- 測定器中の物質との相互作用
  - 荷電粒子のionization, カロリメータでのシャワー等
  - 長寿命粒子の崩壊( $K_0$ など)
- 各「測定器」へのenergy deposit→「ヒット」
- Geant4 (高エネルギー汎用) ← Mokka (ILD)
- 精緻な測定器モデル(dead region, ladder etc)
- 多量の計算機パワーが必要 ( $O(1分)/event$ )

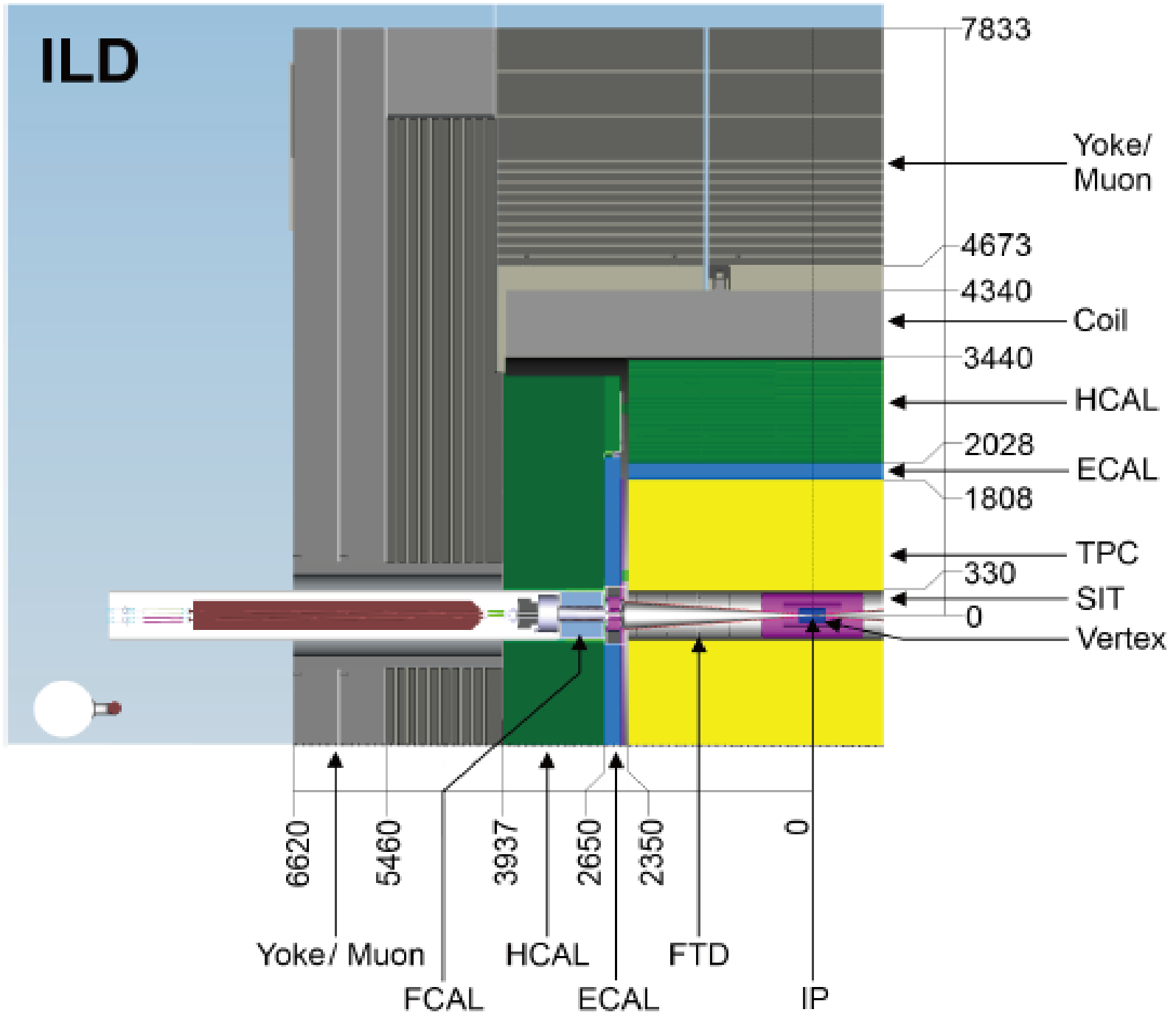
# ILCの測定器: ILDとSiD



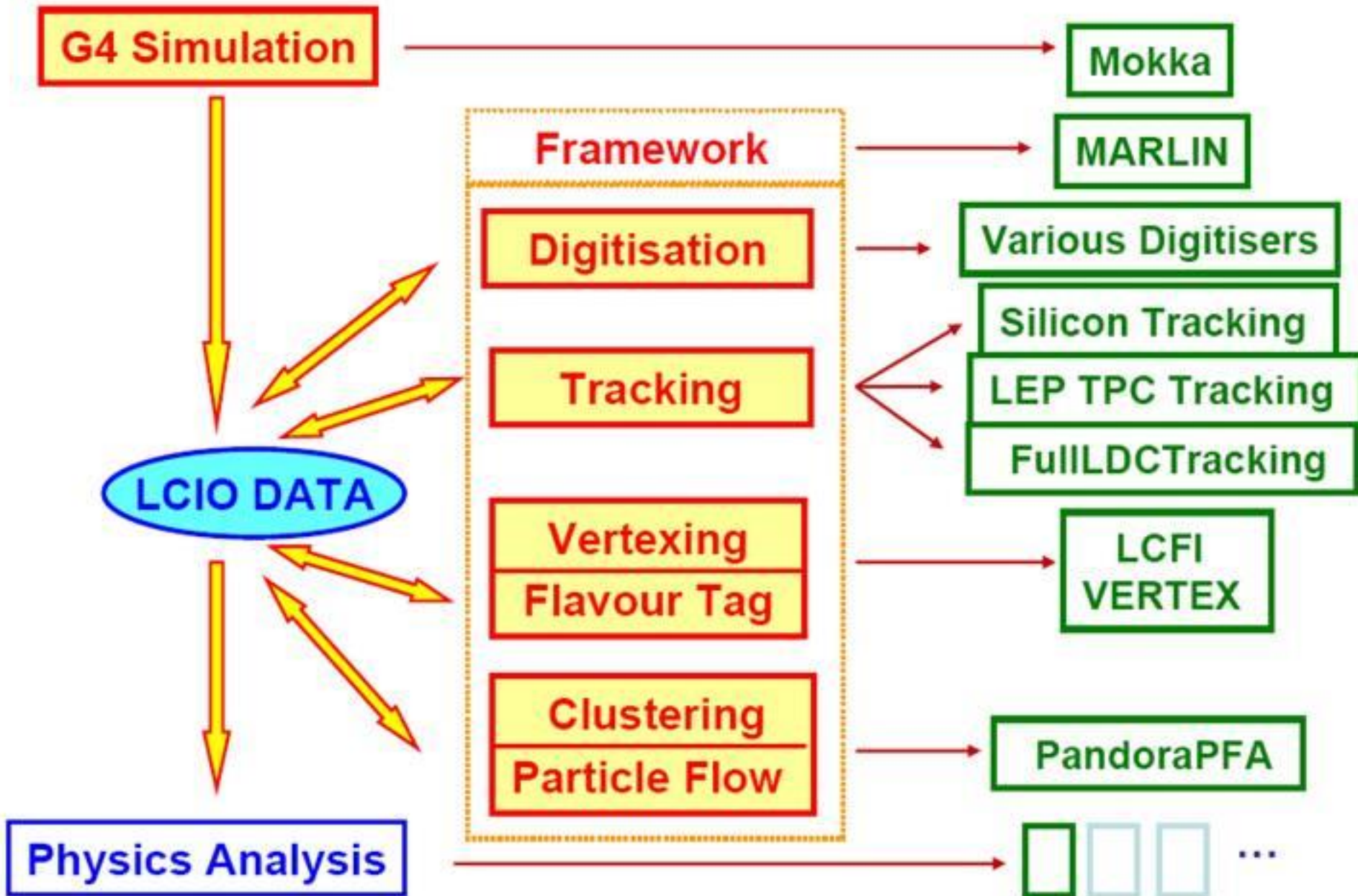
高い分解能で見たいphysicsをより正確に描き出す

- トラックの位置、エネルギー分解能
  - 高いクォークフレーバー識別能
- 高いジェットエネルギー分解能
  - Particle Flow

# ILD



# 再構成のフレームワーク





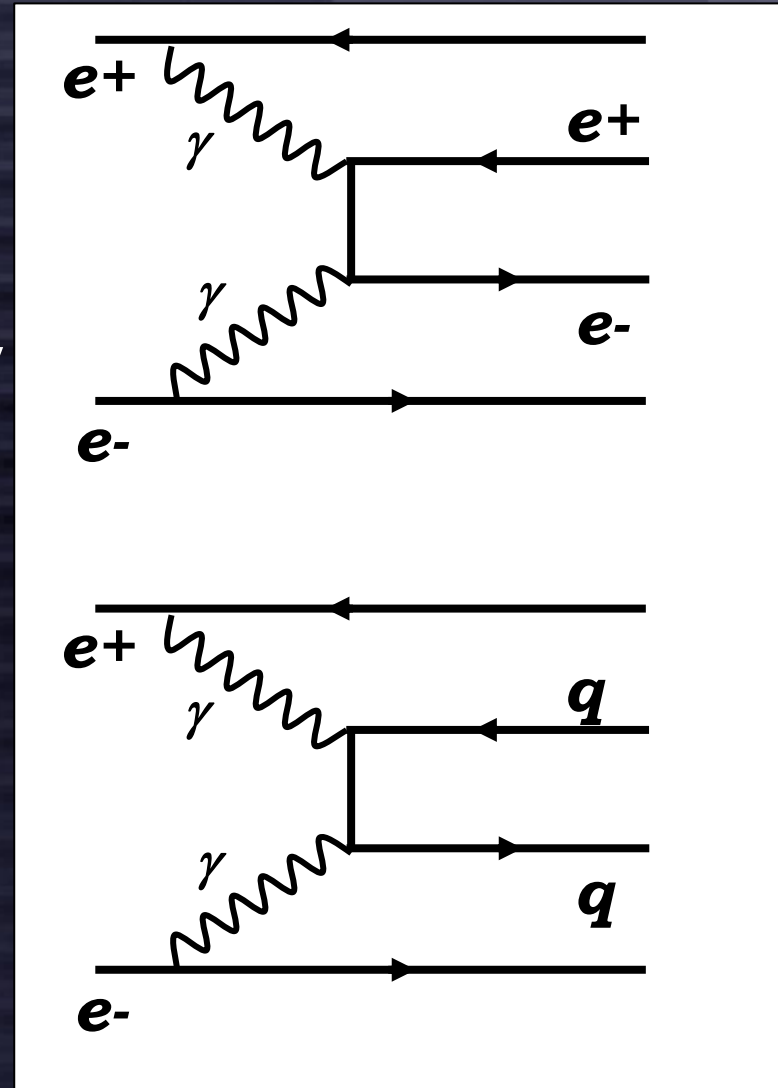
# 再構成1: digitization

- シミュレーションの結果はenergy deposit
- 測定器の性能により得られる反応はenergy depositより劣化する
  - 有限のピクセルサイズ
  - ドrift中の電荷の広がり(TPC)など
- これらの効果を入れて「測定器のヒット」を生成
- ここで実データと比較できるヒットが完成  
ここから先は実データの時と同じことをする

# ビームバックグラウンド

incoherent scattering of beamstrahlung photons to

- $e^+e^-$  pairs  
vertex detectorのoccupancy  
とforward detectorに効く  
物理インパクトは未確認
- qq pairs (minijets)  
物理インパクト大  
物理イベントに重ねる処理  
1.7 / bunch @ 500 GeV,  
4.1 / bunch @ 1 TeV



# 再構成2: tracking

Vertex detector

trackがどこから来たか

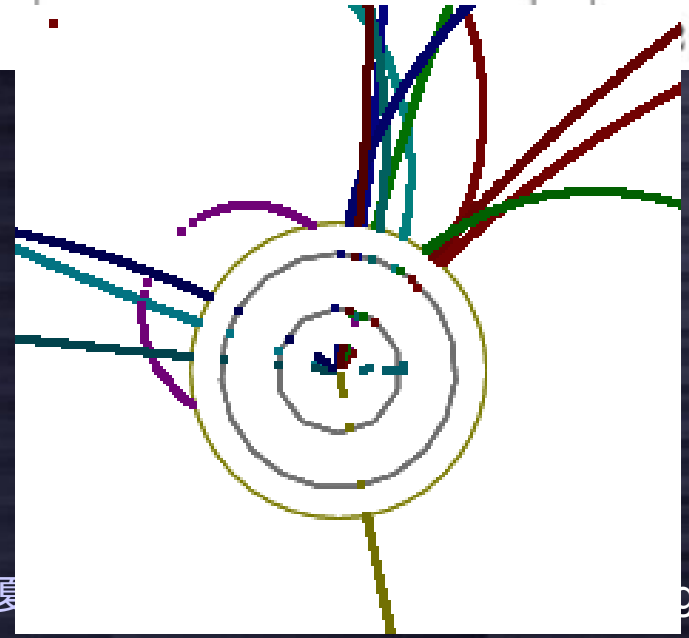
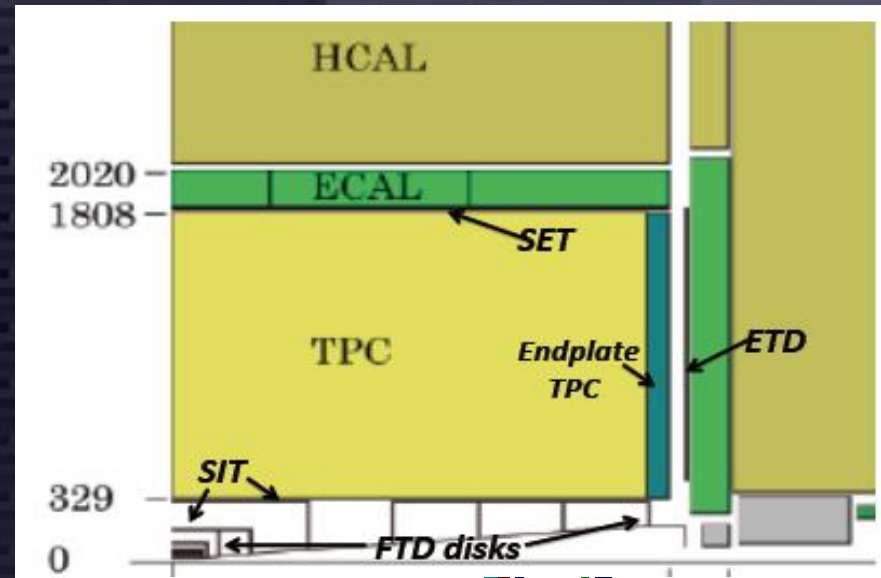
Silicon inner tracker

タイムスタンプ

Time projection chamber

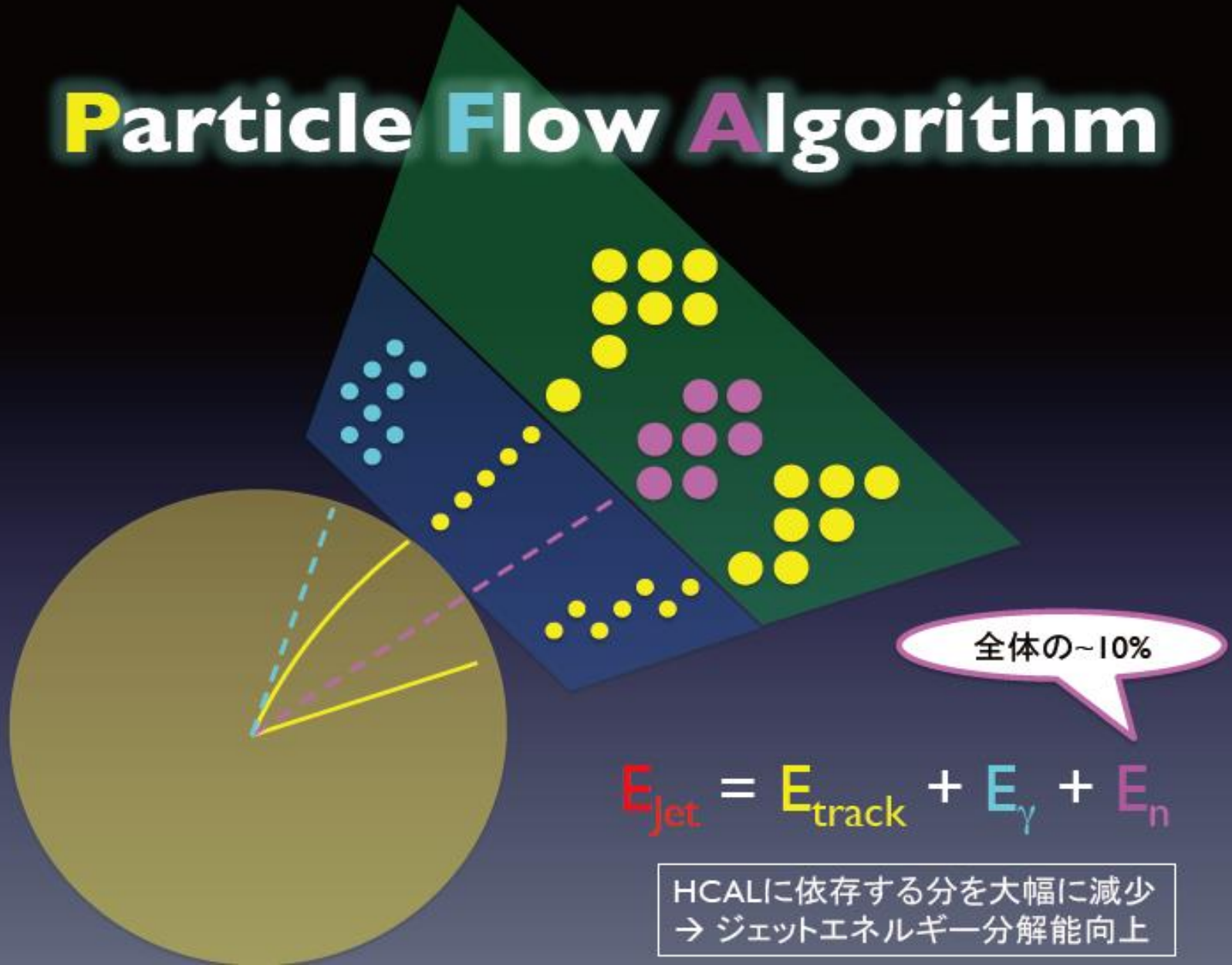
運動量測定の本

- Track seedを作る  
Vertex+SIT, TPCそれぞれ
- つなげていく  
Helix fit, Kalman filter, など
- Silicon trackとTPC trackをつなげる  
Refitする



# 再構成3: Jet energy測定

## Particle Flow Algorithm



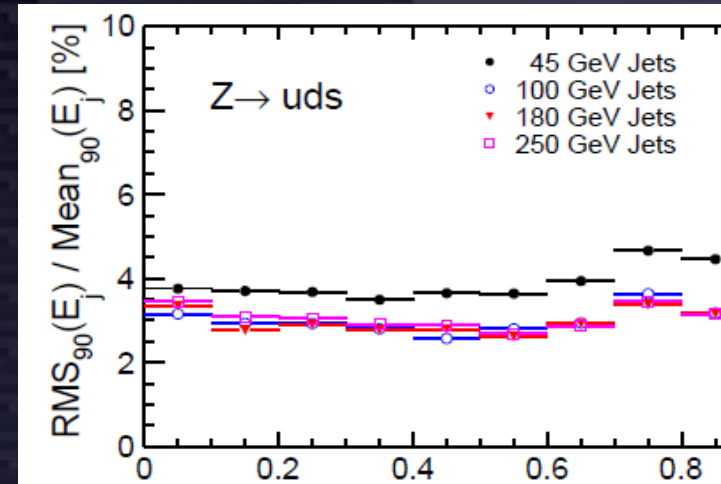
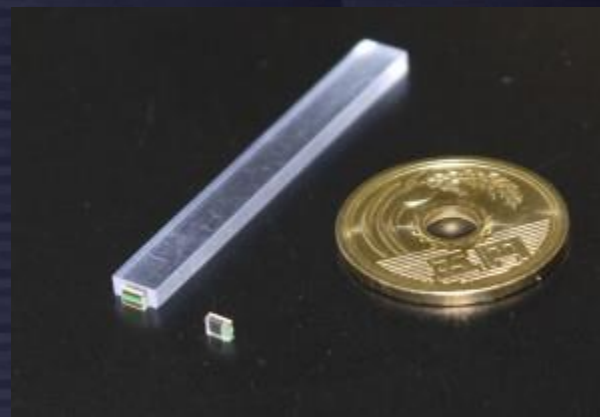
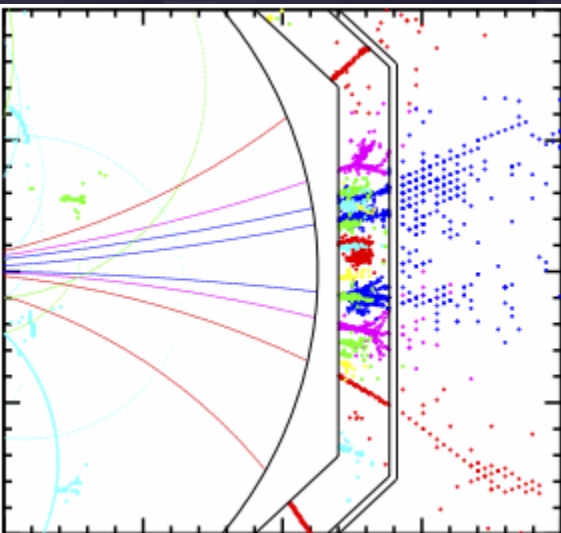
# “Real” Particle Flow Calorimetry

Separate “particle-by-particle” in jets

- need high granular calorimeter – typ. 5x5 mm<sup>2</sup> in ECAL

|                  | Detector | Fraction | Resolution                             | Identical case (100 GeV)            |
|------------------|----------|----------|----------------------------------------|-------------------------------------|
| Charged Particle | Tracker  | ~ 60%    | 0.1% / $p_T \sin\theta$ (GeV) for each | negligible contribution             |
| Photon           | ECAL     | ~ 30%    | 15% / $\sqrt{E}$ (GeV)                 | $15 / \sqrt{30} \times 30\% = 0.82$ |
| Neutral Hadron   | HCAL     | ~ 10%    | 60% / $\sqrt{E}$ (GeV)                 | $60 / \sqrt{10} \times 10\% = 1.90$ |
| ILC Calorimetry  | All      |          | 30% / $\sqrt{E}$ (GeV)                 | $0.82+1.90 = 2.72$ GeV              |

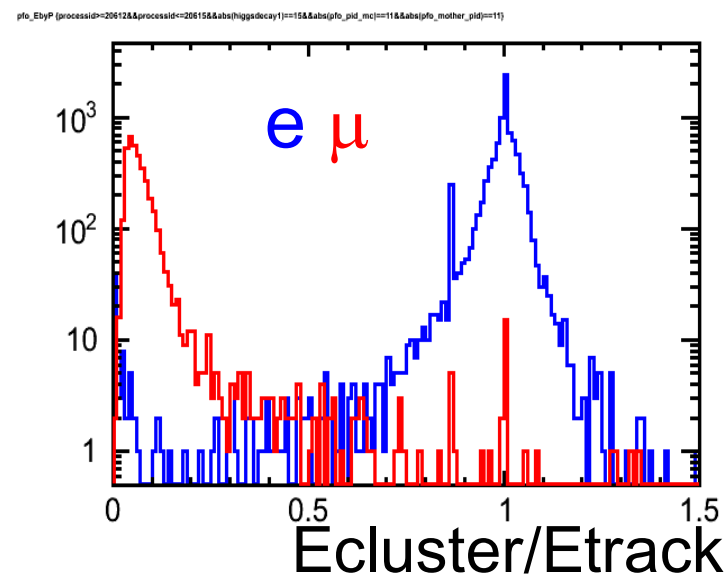
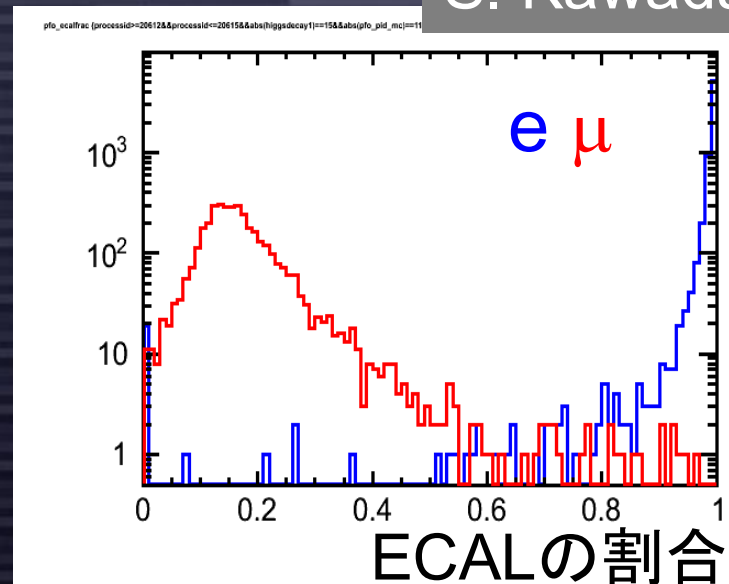
ILD



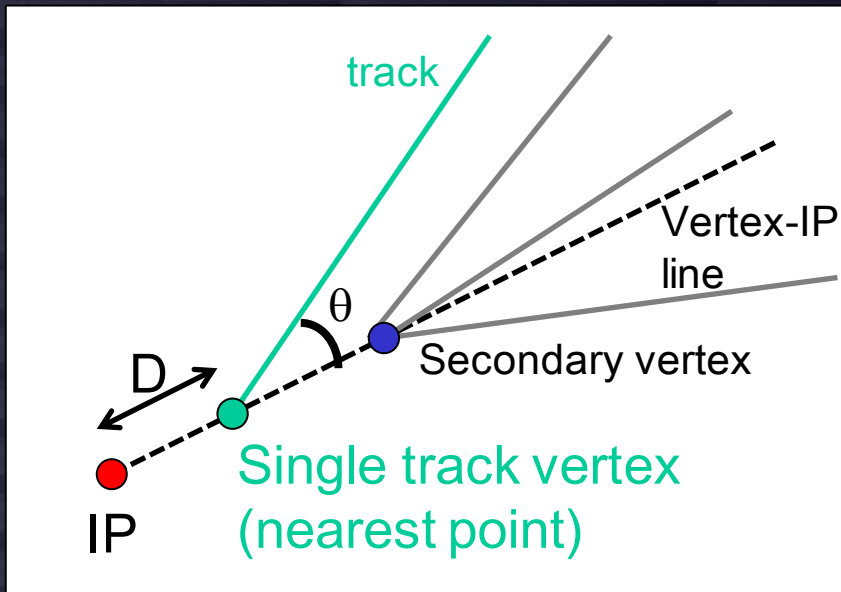
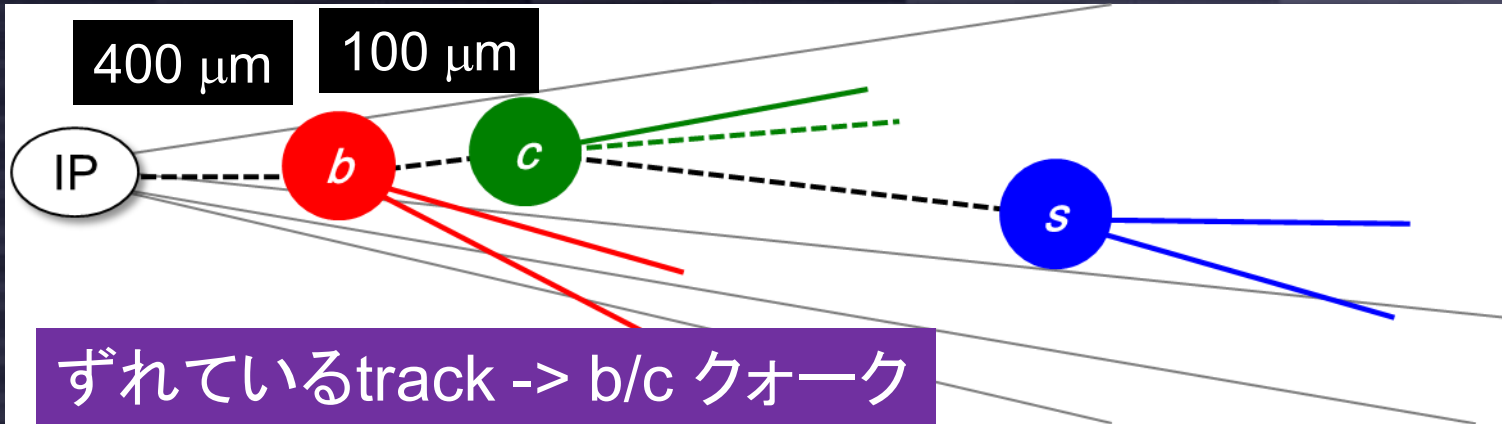
# 再構成4: lepton ID

S. Kawada

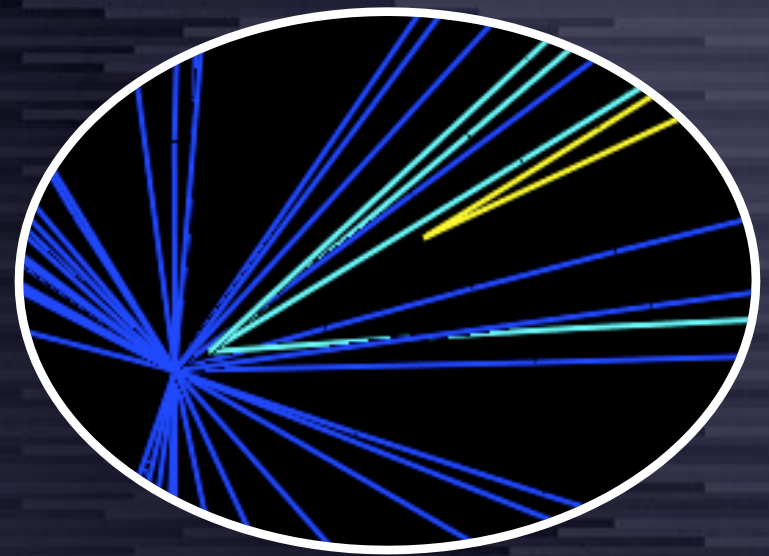
- isolate lepton (jet化前に取り除く)
  - ECALに落ちたエネルギーの割合
  - cluster energyとtrack energyの比
  - muon detector
  - isolation (見たいプロセスで異なる)
    - cone energyを使うことが多い
- jet lepton (flavor taggingに使う)
  - 同様のものをフレーバー識別コード内に実装
- 本当はcalorimeter内の形状も使える



# 再構成5: バーテックス検出



1本しかなくても!



実際のMCイベント

# 再構成6: jet clustering

- $y$ が一番小さいpairをつけていく

$$y = \frac{2 \min(E_1, E_2)^2 (1 - \cos \theta_{ij})}{Q^2}$$

(Durham, 他のもある)

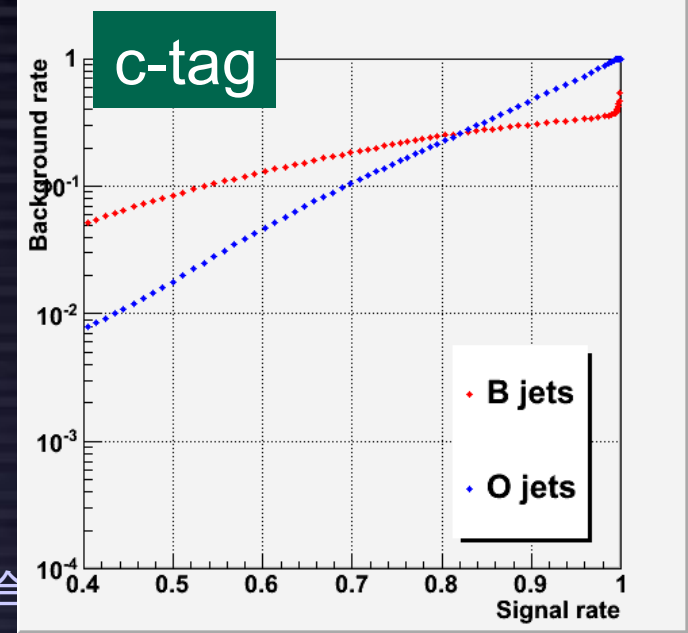
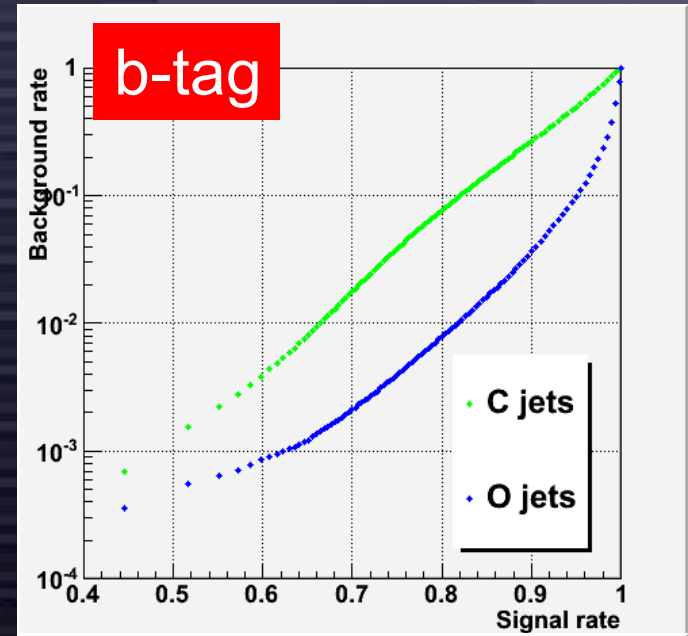
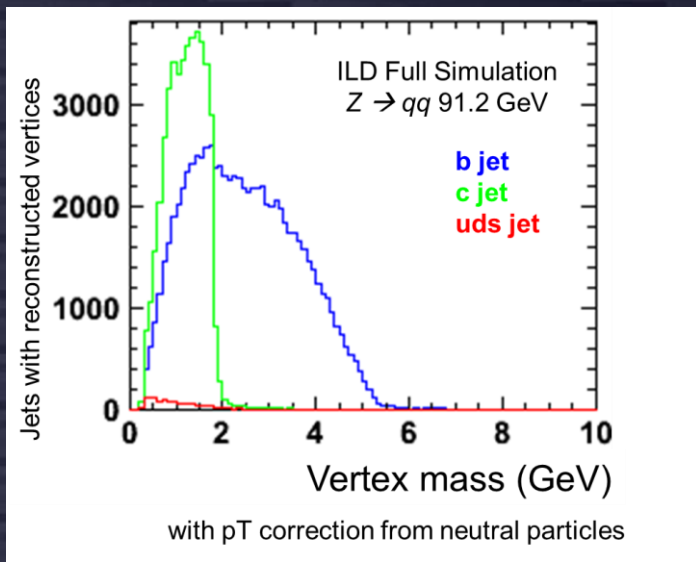


- multi-jetではどうしても間違える→多大な影響
  - そもそもjetの存在自体が近似
- vertexを使ってbを優先的にとる方法
- 前方のbeam起因粒子を落とすのにも使う
  - anti-kT clustering etc.



# 再構成7: フレーバー識別

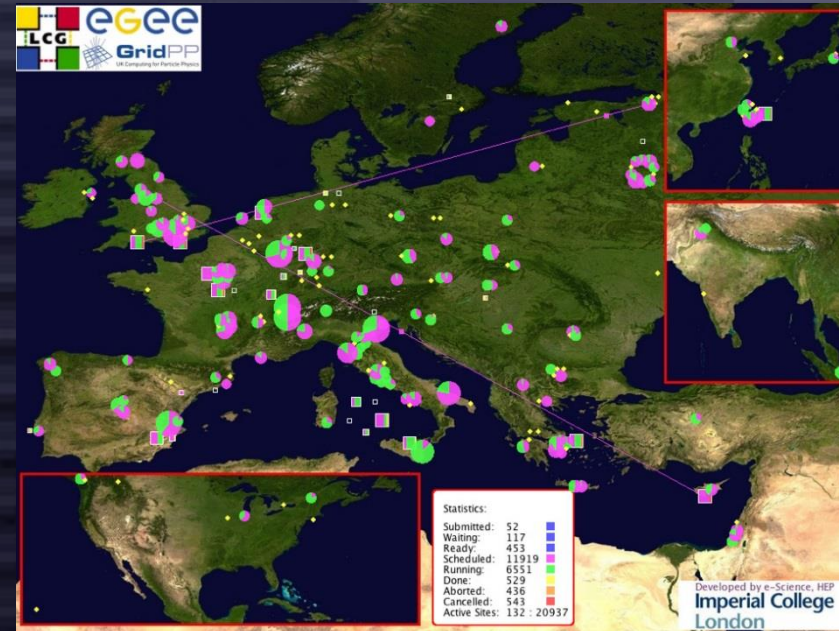
- 多変量解析で分離
  - vertexの数(通常, single)
    - 実際には場合分け
  - vertex mass
  - trackのimpact parameter
  - 関連した変数(~20)



# 計算機資源

- Grid

- 世界中で共有する  
計算機資源
- 主にMC jobを投入
- データ共有としても重要
- Diracでjob管理できる



- local

- KEKCC (~3000 nodes)  
GridのKEK SEとデータ共有
- ほとんどの解析はKEKCCで行われている

# 解析の目的

モデル

シグナル

バックグラウンド

- 一致・不一致の検証
- パラメータの決定

- シグナルの量を決める
- モデルとの一致を見る
- 変数の値を決める

- シグナルがないことを確認する
- モデルとの不一致を見る

$$\delta\sigma = \sqrt{(S+N) / S}$$

$$\text{significance} = S / \sqrt{N}$$

Sを増やす, Nを減らす → いかとうまく選ぶか  
Sを2倍にする = Nを1/4にする  
(N dominant の場合)

# イベントのリストアップと重み付け

## イベントのリストアップ

- シグナル → 自分で用意することが多い  
SMヒッグスなどは用意されている場合も
- SMバックグラウンド → 再構成済の「標準サンプル」を主に使う  
効きそうなプロセスだけ入れる or 全部入れる

## イベントの重み付け

$$w = \sigma \times L \times p(e^-) \times p(e^+) / S$$

$\sigma$ : cross section,  $L$ : luminosity,  $S$ : 持っているイベント数

$p(e^-)$ :  $e^-$ のpolarizationが一致する割合 (90% or 10%)

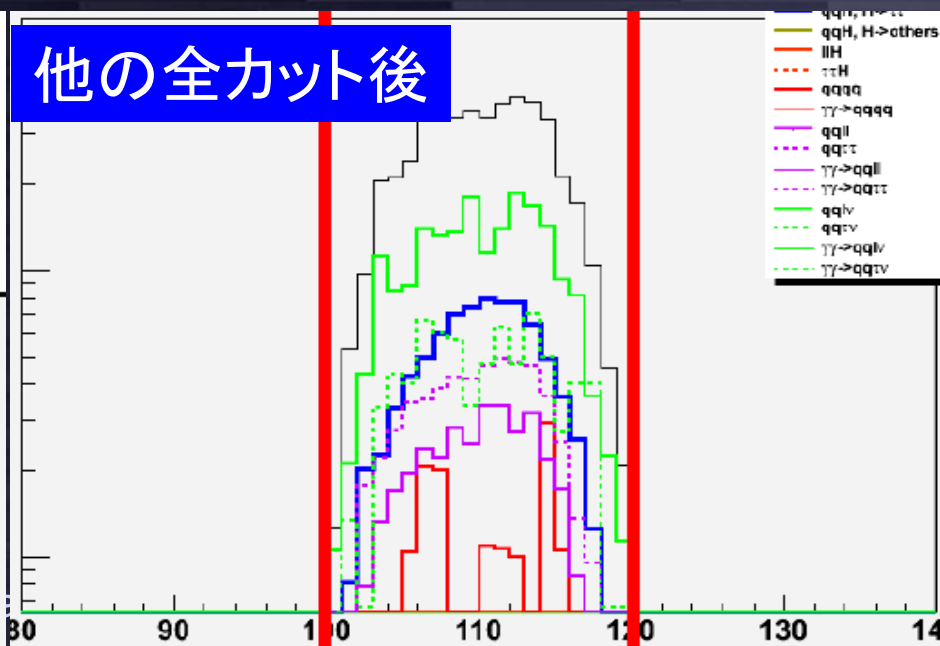
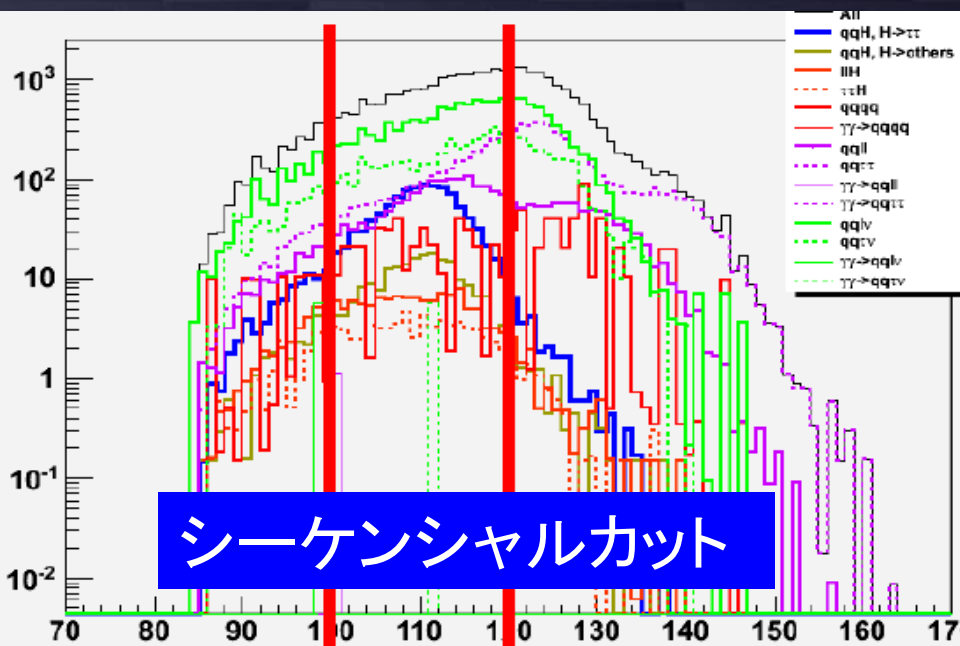
$p(e^+)$ :  $e^+$ のpolarizationが一致する割合 (65% or 35%)

## 重み付けの適用

- 重み付けの割合だけ選ぶ (誤差が正しい)
- 各イベントに重みをつける (高統計)

# イベント識別1: カット

- シグナルが少ない領域を捨ててS/Nを向上
- シグナルを多く切りすぎないように注意
- 他のすべてのカットをかけた後再度分布をチェックする
- 系統誤差の影響を評価しやすい



# イベント識別2: 多変量解析(TMVA)

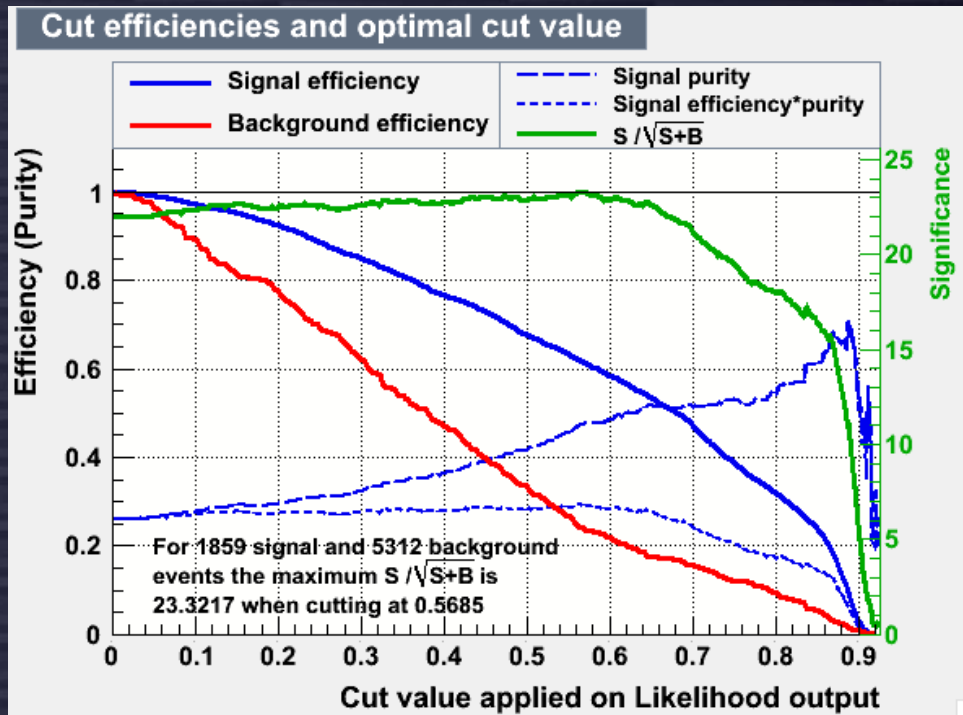
- いくつかの変数を同時に使って“シグナルらしさ”を抽出
- いくつかの方法
  - ニューラルネット
  - BDT
  - likelihood etc.

使う変数を構成

トレーニング

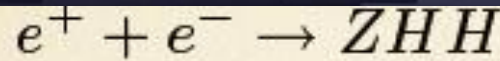
カット値の決定

TMVA outputでカット



# 精度の見積1: ただ数える

$P(e^-, e^+) = (-0.8, 0.3)$



$M(H) = 120 \text{ GeV}$

$\int L dt = 2 \text{ ab}^{-1}$

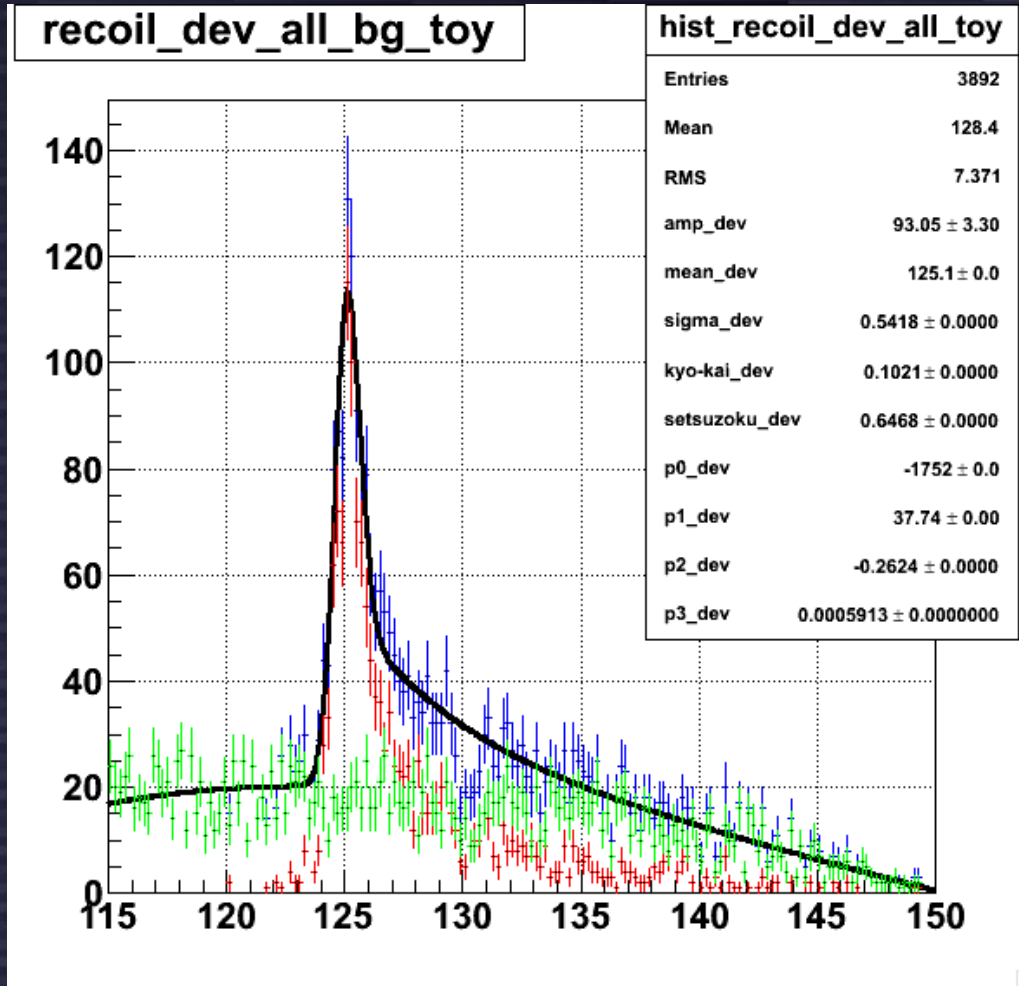
| Energy (GeV) | Modes                                                | signal | background | significance |                  |
|--------------|------------------------------------------------------|--------|------------|--------------|------------------|
|              |                                                      |        |            | excess (I)   | measurement (II) |
| 500          | $ZHH \rightarrow (l\bar{l})(b\bar{b})(b\bar{b})$     | 3.7    | 4.3        | 1.5 $\sigma$ | 1.1 $\sigma$     |
|              |                                                      | 4.5    | 6.0        | 1.5 $\sigma$ | 1.2 $\sigma$     |
| 500          | $ZHH \rightarrow (\nu\bar{\nu})(b\bar{b})(b\bar{b})$ | 8.5    | 7.9        | 2.5 $\sigma$ | 2.1 $\sigma$     |
| 500          | $ZHH \rightarrow (q\bar{q})(b\bar{b})(b\bar{b})$     | 13.6   | 30.7       | 2.2 $\sigma$ | 2.0 $\sigma$     |
|              |                                                      | 18.8   | 90.6       | 1.9 $\sigma$ | 1.8 $\sigma$     |

$S / \sqrt{N}$

$S / \sqrt{N+S}$

測定精度を求める場合と、モデルの判別を目的とする場合で significance の定義が違うので注意

# 精度の見積2: フィットする



フィットパラメータを使って  
見たい変数を抽出

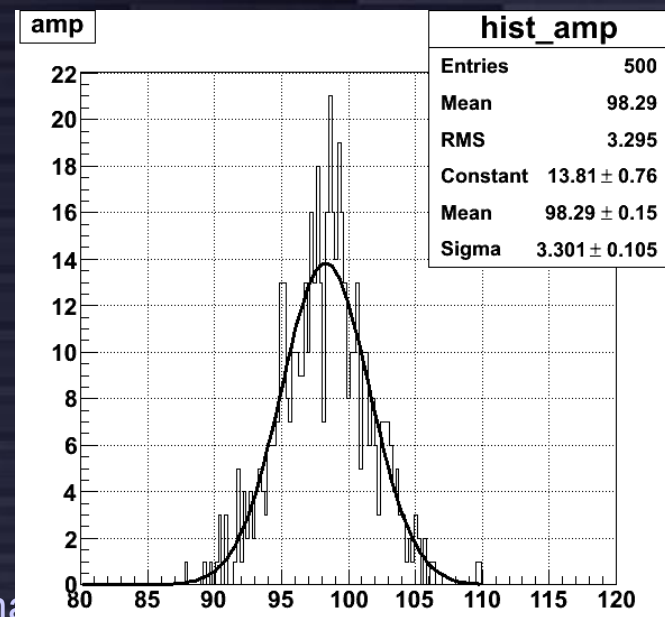
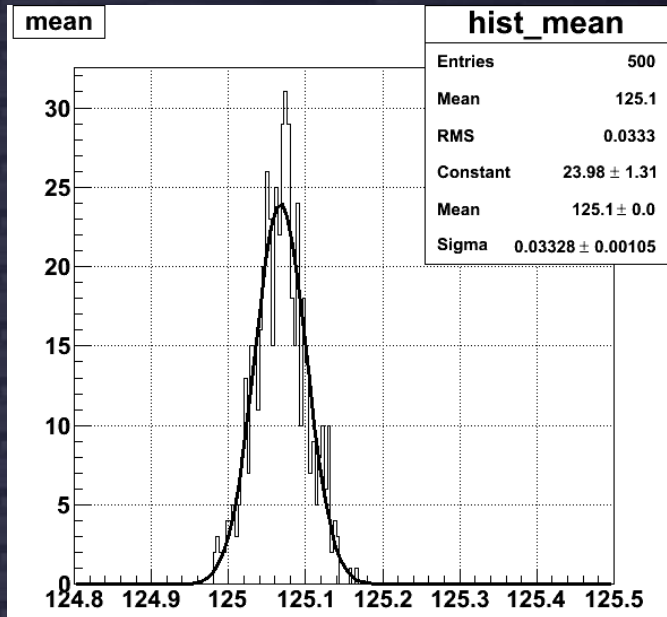
フィットエラーが見たい  
変数の測定精度となる

$\chi^2 / \text{NDF}$ をチェック  
→ 1に近ければfitはよい  
1より大きい場合fitが  
うまく合っていない  
1より小さい場合たいてい  
エラーの付け方が  
間違っている

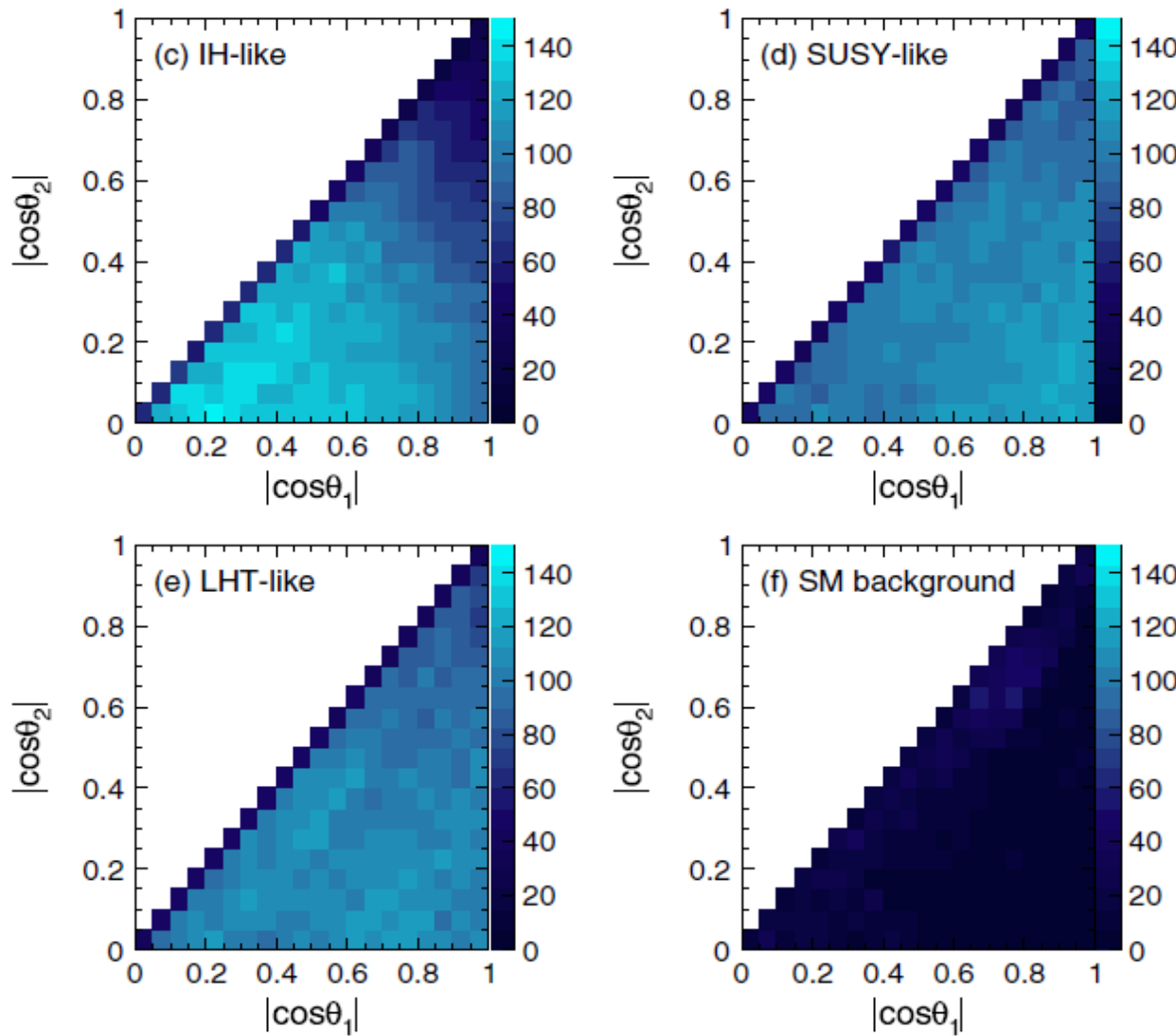


# 精度の見積4: Toy-MC

- 各binの値をpoisson分布で振る  
(振る前は高統計サンプルが望ましい、またはフィットした分布を使う)
- フィット等をやり直して測定値を求める
- 多数回繰り返して測定値分布を作る



# 精度の見積3: template fit



それぞれのtemplate  
と”data”の $\chi^2$ を  
調べる  
(この場合は  
Toy-MCを併用)



モデル識別性能  
を評価

パラメータ決定  
にも使える  
(隣接パラメータの  
内挿を使う等)

# 解析手法まとめ

- イベント生成
- 測定器シミュレーション
- 再構成
- シグナル選別
- 値の抽出

→ ILCでの測定感度

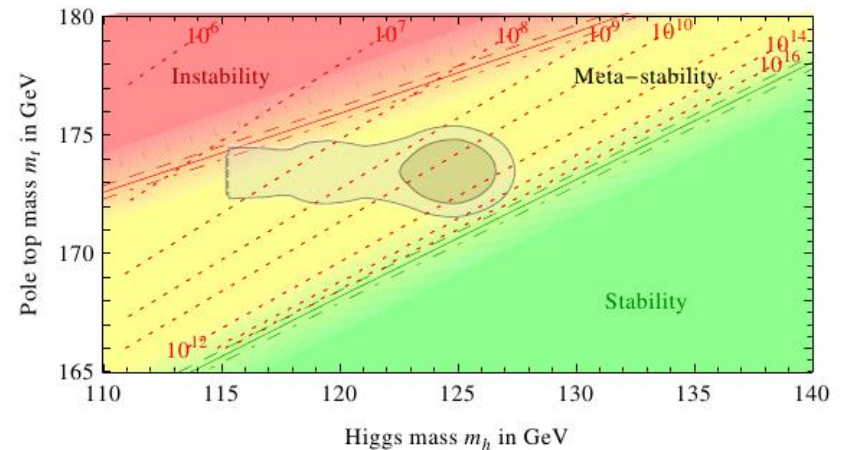
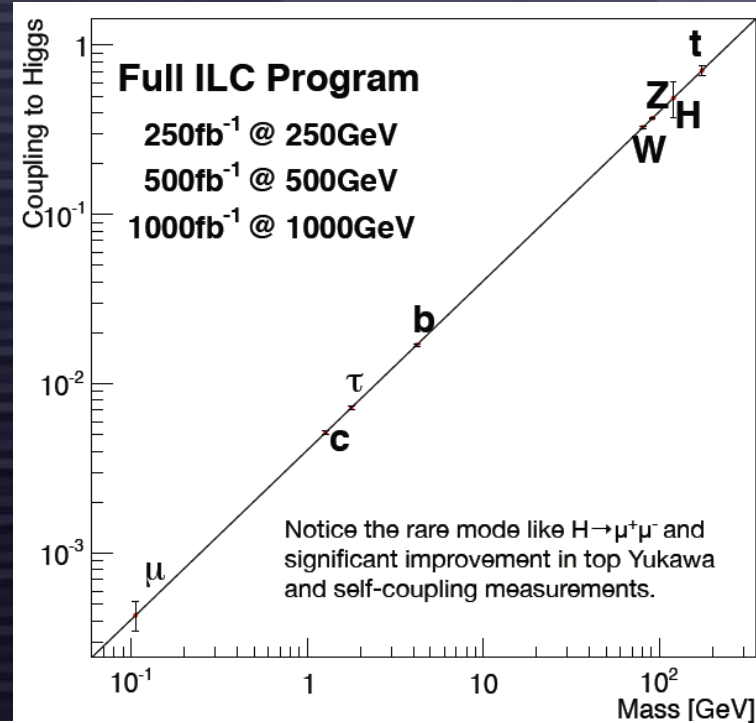
HL-LHC – ILC – CLIC – TLEP – muon collider

# ILCの物理性能と信頼性

# HIGGS

# ILCのヒッグス展望

- Higgs couplingの精密測定
  - mass generationの検証
  - 新物理に感度
    - ヒッグスは複数か
    - ヒッグスはcompositeか
- Higgs massの超精密測定
  - 真空の安定性



# Higgs崩壞分岐比

Summary table of Higgs measurements @ ILC

250 GeV: 250 fb<sup>-1</sup>  
 500 GeV: 500 fb<sup>-1</sup>  
 1 TeV: 1000 fb<sup>-1</sup>

MH = 125 GeV  
 P(e-,e+)=(-0.8,+0.3) @ 250, 500 GeV  
 P(e-,e+)=(-0.8,+0.2) @ 1 TeV

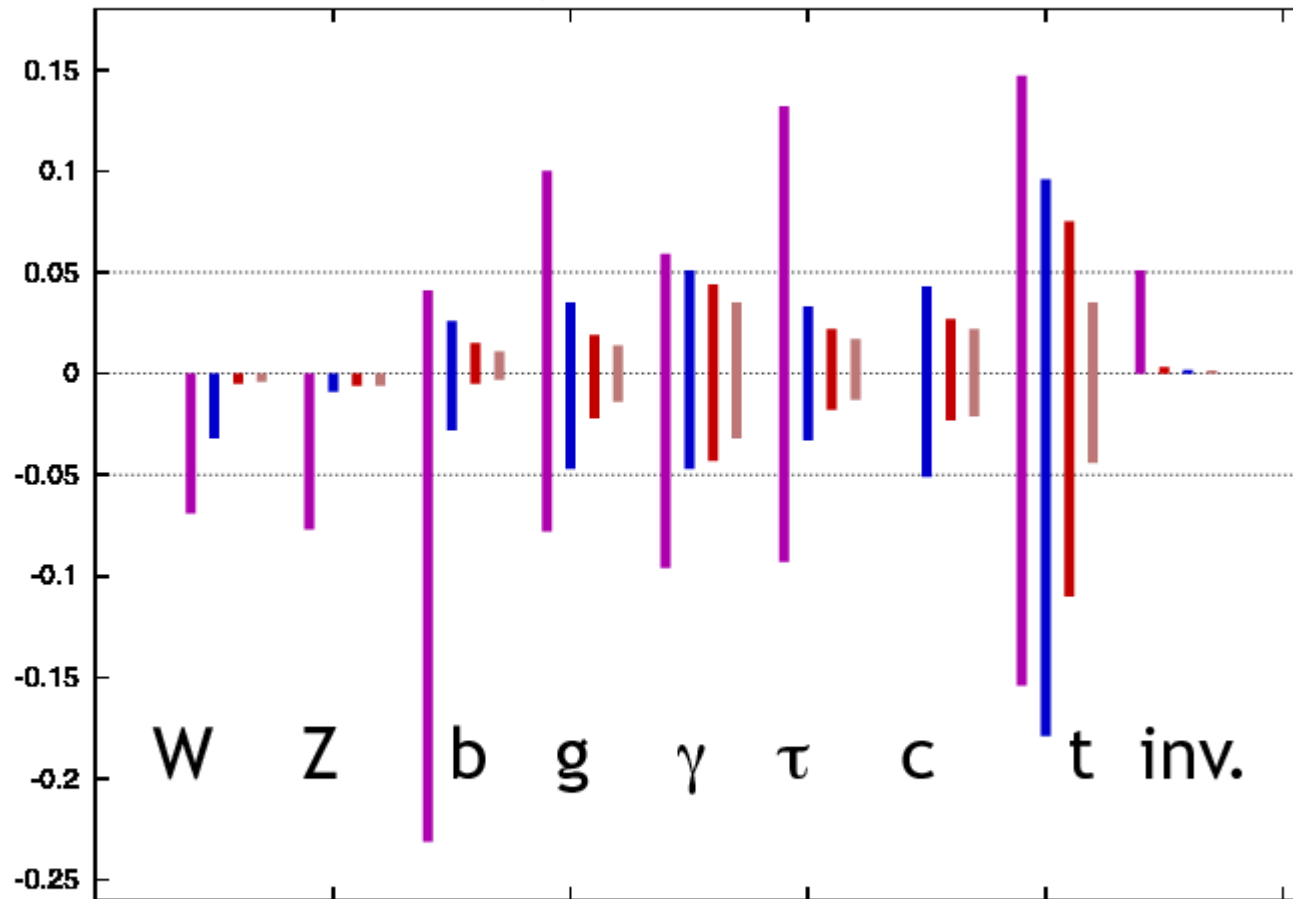
ILD-DBD

| ECM                  | @ 250 GeV    |              | @ 500 GeV    |              | @ 1 TeV      |
|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| luminosity · fb      | 250          |              | 500          |              | 1000         |
| polarization (e-,e+) | (-0.8, +0.3) |              | (-0.8, +0.3) |              | (-0.8, +0.2) |
| process              | ZH           | vvH(fusion)  | ZH           | vvH(fusion)  | vvH(fusion)  |
| cross section        | 2.6%         | -            | -            |              |              |
|                      | $\sigma$ -Br | $\sigma$ -Br | $\sigma$ -Br | $\sigma$ -Br | $\sigma$ -Br |
| H-->bb               | 1.2%         | 10.5%        | 1.8%         | 0.66%        | 0.32%        |
| H-->cc               | 8.3%         |              | 13%          | 6.2%         | 3.1%         |
| H-->gg               | 7.0%         |              | 11%          | 4.1%         | 2.3%         |
| H-->WW*              | 6.4%         |              | 9.2%         | 2.4%         | 1.6%         |
| H-->ττ               | 4.2%         |              | 5.4%         | 9.0%         | 3.1%         |
| H-->ZZ*              | 19%          |              | 25%          | 8.2%         | 4.1%         |
| H-->γγ               | 29-38%       |              | 29-38%       | 20-26%       | 7-10%        |
| H-->μμ               |              | -            |              | -            | 31%          |
| ttH, H-->bb          |              | -            |              | 28%          | 6.0%         |
| H-->Inv. (95% C.L.)  |              | < 1.0%       |              | -            |              |

being updated by new studies with mH = 125 GeV

# happy scenario?

$g(hAA)/g(hAA)|_{SM} - 1$  LHC/ILC1/ILC/ILCTeV





# 論争 @ snowmass

Table 2.1: Expected performance on the Higgs boson couplings from the LHC and  $e^+e^-$  colliders, as compiled from the Higgs Factory 2012 workshop. Many studies are quite recent and still ongoing.

| Accelerator →                                  | LHC                        | HL-LHC                      | ILC                                          | Full ILC                              | CLIC                                                                                 | LEP3, 4 IP                                     | TLEP, 4 IP                                                                                |
|------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Physical Quantity<br>↓                         | 300 fb <sup>-1</sup> /expt | 3000 fb <sup>-1</sup> /expt | 250 GeV<br>250 fb <sup>-1</sup><br><br>5 yrs | 250+350+<br>1000 GeV<br><br>5yrs each | 350 GeV (500 fb <sup>-1</sup> )<br>1.4 TeV (1.5 ab <sup>-1</sup> )<br><br>5 yrs each | 240 GeV<br>2 ab <sup>-1</sup> (*)<br><br>5 yrs | 240 GeV<br>10 ab <sup>-1</sup> 5 yrs (*)<br><br>350 GeV<br>1.4 ab <sup>-1</sup> 5 yrs (*) |
| $N_H$                                          | $1.7 \times 10^7$          | $1.7 \times 10^8$           | $6 \times 10^4$ ZH                           | $10^5$ ZH<br>$1.4 \times 10^5$ Hvv    | $7.5 \times 10^4$ ZH<br>$4.7 \times 10^5$ Hvv                                        | $4 \times 10^5$ ZH                             | $2 \times 10^6$ ZH<br>$3.5 \times 10^4$ Hvv                                               |
| $m_H$ (MeV)                                    | 100                        | 50                          | 35                                           | 35                                    | 100                                                                                  | 26                                             | 7                                                                                         |
| $\Delta\Gamma_H / \Gamma_H$                    | --                         | --                          | 10%                                          | 3%                                    | ongoing                                                                              | 4%                                             | 1.3%                                                                                      |
| $\Delta\Gamma_{inv} / \Gamma_H$                | Indirect<br>(30%?)         | Indirect<br>(10%?)          | 1.5%                                         | 1.0%                                  | ongoing                                                                              | 0.35%                                          | 0.15%                                                                                     |
| $\Delta g_{H\gamma\gamma} / g_{H\gamma\gamma}$ | 6.5 – 5.1%                 | 5.4 – 1.5%                  | --                                           | 5%                                    | ongoing                                                                              | 3.4%                                           | 1.4%                                                                                      |
| $\Delta g_{HZZ} / g_{HZZ}$                     | 11 – 5.7%                  | 7.5 – 2.7%                  | 4.5%                                         | 2.5%                                  | < 3%                                                                                 | 2.2%                                           | 0.7%                                                                                      |
| $\Delta g_{HWW} / g_{HWW}$                     | 5.7 – 2.7%                 | 4.5 – 1.0%                  | 4.3%                                         | 1%                                    | ~1%                                                                                  | 1.5%                                           | 0.25%                                                                                     |
| $\Delta g_{HZZ} / g_{HZZ}$                     | 5.7 – 2.7%                 | 4.5 – 1.0%                  | 1.3%                                         | 1.5%                                  | ~1%                                                                                  | 0.65%                                          | 0.2%                                                                                      |
| $\Delta g_{HHH} / g_{HHH}$                     | --                         | < 30%<br>(2 expts)          | --                                           | ~30%                                  | ~22%<br>(~11% at 3 TeV)                                                              | --                                             | --                                                                                        |
| $\Delta g_{HAAA} / g_{HAAA}$                   | < 30%                      | < 10%                       | --                                           | --                                    | 10%                                                                                  | 14%                                            | 7%                                                                                        |
| $\Delta g_{Htt} / g_{Htt}$                     | 8.5 – 5.1%                 | 5.4 – 2.0%                  | 3.5%                                         | 2.5%                                  | ≤ 3%                                                                                 | 1.5%                                           | 0.4%                                                                                      |
| $\Delta g_{Hcc} / g_{Hcc}$                     | --                         | --                          | 3.7%                                         | 2%                                    | 2%                                                                                   | 2.0%                                           | 0.65%                                                                                     |
| $\Delta g_{Hbb} / g_{Hbb}$                     | 15 – 6.9%                  | 11 – 2.7%                   | 1.4%                                         | 1%                                    | 1%                                                                                   | 0.7%                                           | 0.22%                                                                                     |
| $\Delta g_{Htt} / g_{Htt}$                     | 14 – 8.7%                  | 8.0 – 3.9%                  | --                                           | 5%                                    | 3%                                                                                   | --                                             | 30%                                                                                       |

Report of the ICFA Beam Dynamics Workshop  
*“Accelerators for a Higgs Factory: Linear vs. Circular”*  
 (HF2012)

# 論争

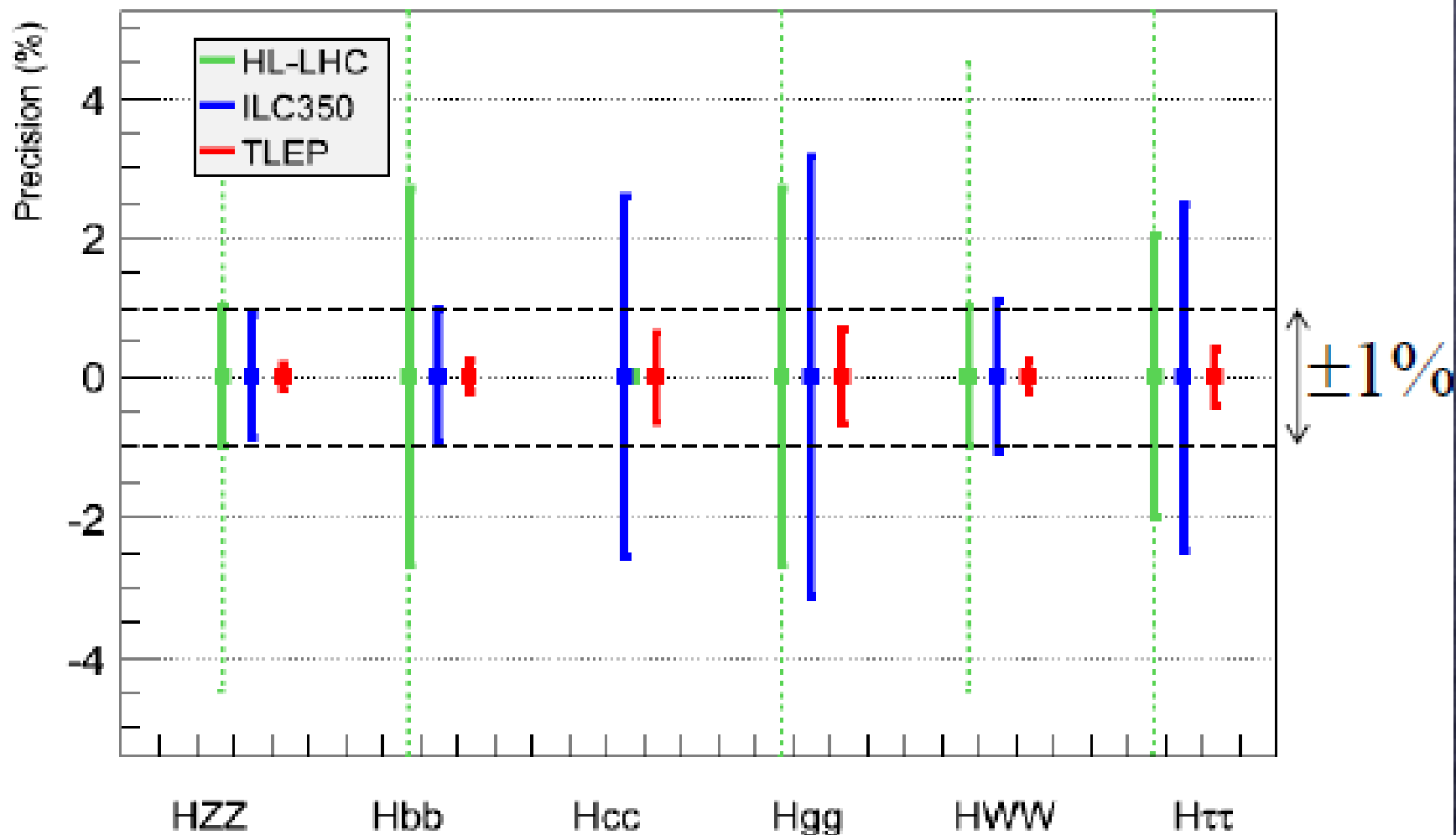
## EW Precision at Future Colliders

| Accelerator →<br>Quantity ↓         | HL-LHC<br>3000fb <sup>-1</sup> /exp | ILC (250)<br>250 fb <sup>-1</sup> | ILC<br>(250+350+1000)                                          | LEP3<br>240<br>4 IP  | TLEP<br>240 +350<br>4 IP |       |       |
|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------|--------------------------|-------|-------|
| Approx. date                        | 2030-35                             | 2030-35?                          | >2045?                                                         | 2035?                | 2035?                    |       |       |
| N <sub>H</sub>                      | 1.7 x 10 <sup>8</sup>               | 5 10 <sup>4</sup> ZH              | (10 <sup>5</sup> ZH)<br>(1.4 10 <sup>5</sup> H <sub>νν</sub> ) | 4 10 <sup>5</sup> ZH | 2 10 <sup>6</sup> ZH     |       |       |
| Δm <sub>H</sub> (MeV)               | 50                                  | 35                                | 35                                                             | 26                   | 7                        |       |       |
| ΔΓ <sub>H</sub> /Γ <sub>H</sub>     | —                                   | 10%                               | 11%                                                            | 3%                   | 4%                       | 1.3%  |       |
| ΔΓ <sub>inv</sub> /Γ <sub>H</sub>   | Indirect (?)                        | 1.5%                              | 0.95%                                                          | 1.0%                 | 0.35%                    | 0.15% |       |
| Δg <sub>Hγγ</sub> /g <sub>Hγγ</sub> | 1.5%                                | —                                 | 20%                                                            | 5%                   | 5%                       | 3.4%  | 1.4%  |
| Δg <sub>Hgg</sub> /g <sub>Hgg</sub> | 2.7%                                | 4.5%                              | 3.5%                                                           | 2.5%                 | 1.2%                     | 2.2%  | 0.7%  |
| Δg <sub>Hww</sub> /g <sub>Hww</sub> | 1.0%                                | 4.3%                              | 2.1%                                                           | 1%                   | <<1%                     | 1.5%  | 0.25% |
| Δg <sub>HZZ</sub> /g <sub>HZZ</sub> | 1.0%                                | 1.3%                              | 1.3%                                                           | 1.5%                 | <<1%                     | 0.65% | 0.2%  |
| Δg <sub>HHH</sub> /g <sub>HHH</sub> | < 30%<br>(2 exp.)                   | —                                 | —                                                              | ~30%                 | <26%                     | —     | —     |
| Δg <sub>Hμμ</sub> /g <sub>Hμμ</sub> | <10%                                | —                                 | —                                                              | —                    | 16%                      | 14%   | 7%    |
| Δg <sub>Hττ</sub> /g <sub>Hττ</sub> | 2.0%                                | 3.5%                              | 2.1%                                                           | 2.5%                 | 1.5%                     | 1.5%  | 0.4%  |
| Δg <sub>Hcc</sub> /g <sub>Hcc</sub> | —                                   | 3.7%                              | 4.3%                                                           | 2%                   | 1.5%                     | 2.0%  | 0.65% |
| Δg <sub>Hbb</sub> /g <sub>Hbb</sub> | 2.7%                                | 1.4%                              | 0.6%                                                           | 1%                   | 0.2%                     | 0.7%  | 0.22% |
| Δg <sub>Htt</sub> /g <sub>Htt</sub> | 3.9%                                | —                                 | —                                                              | 15%                  | 3%                       | —     | 30%   |
| Δm <sub>t</sub> (MeV)               | 500-800                             | —                                 | —                                                              | 20                   | —                        | —     | 20    |
| Δm <sub>W</sub> (MeV)               | ~10                                 | —                                 | —                                                              | —                    | —                        | —     | < 1   |

??

注: ΔgはBRの半分になっている

# TLEP??



# まず ILC vs HL-LHC

- ILCでしかできないこと
  - Total cross section: recoil mass
  - Invisible decay ( $< 1\%$ )
  - $h \rightarrow cc$
  - $\sim 10\%$   $hhh$  (1 TeV ILC)
- HL-LHCのほうがいいこと
  - $h \rightarrow \gamma\gamma$
  - 少し早く、安くできそう
  - 主なチャンネルはILCとあまり変わらないように見える、しかし...

# 不確実なHL-LHC

EW Precision  
at HL-LHC :  
Summary

| Accelerator →<br>quantity ↓         | LHC<br>300 fb <sup>-1</sup> /exp | HL-LHC<br>3000 fb <sup>-1</sup> /exp |
|-------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|
| Approx. date                        | 2021                             | 2030-35 ?                            |
| N <sub>H</sub>                      | 1.7 x 10 <sup>7</sup>            | 1.7 x 10 <sup>8</sup>                |
| Δm <sub>H</sub> (MeV)               | 100                              | 50                                   |
| ΔΓ <sub>H</sub> /Γ <sub>H</sub>     | —                                | —                                    |
| ΔΓ <sub>inv</sub> /Γ <sub>H</sub>   | Indirect (?)                     | Indirect (?)                         |
| Δg <sub>Hττ</sub> /g <sub>Hττ</sub> | 6.5 – 5.1%                       | 5.4 – 1.5%                           |
| Δg <sub>Hgg</sub> /g <sub>Hgg</sub> | 11 – 5.7%                        | 7.5 – 2.7%                           |
| Δg <sub>Hww</sub> /g <sub>Hww</sub> | 5.7 – 2.7%                       | 4.5 – 1.0%                           |
| Δg <sub>HZZ</sub> /g <sub>HZZ</sub> | 5.7 – 2.7%                       | 4.5 – 1.0%                           |
| Δg <sub>HHH</sub> /g <sub>HHH</sub> | —                                | < 30%<br>(2 exp.)                    |
| Δg <sub>Hμμ</sub> /g <sub>Hμμ</sub> | <30%                             | <10%                                 |
| Δg <sub>Hττ</sub> /g <sub>Hττ</sub> | 8.5 – 5.1%                       | 5.4 – 2.0%                           |
| Δg <sub>Hcc</sub> /g <sub>Hcc</sub> | —                                | —                                    |
| Δg <sub>Hbb</sub> /g <sub>Hbb</sub> | 15 – 6.9%                        | 11 – 2.7%                            |
| Δg <sub>Htt</sub> /g <sub>Htt</sub> | 14 – 8.7%                        | 8.0 – 3.9%                           |
| Δm <sub>t</sub> (MeV)               | 800-1000                         | 500-800                              |
| Δm <sub>W</sub> (MeV)               |                                  | ~10                                  |

Δg<sub>HXX</sub> ~ 3-9% for 300 fb<sup>-1</sup>  
~ 1-4% for 3000 fb<sup>-1</sup>

with scaling of syst. errors

統計ではなく、理論とsystematicが  
決めている → 予測困難

g<sub>HHH</sub>はさらなる検証が必要

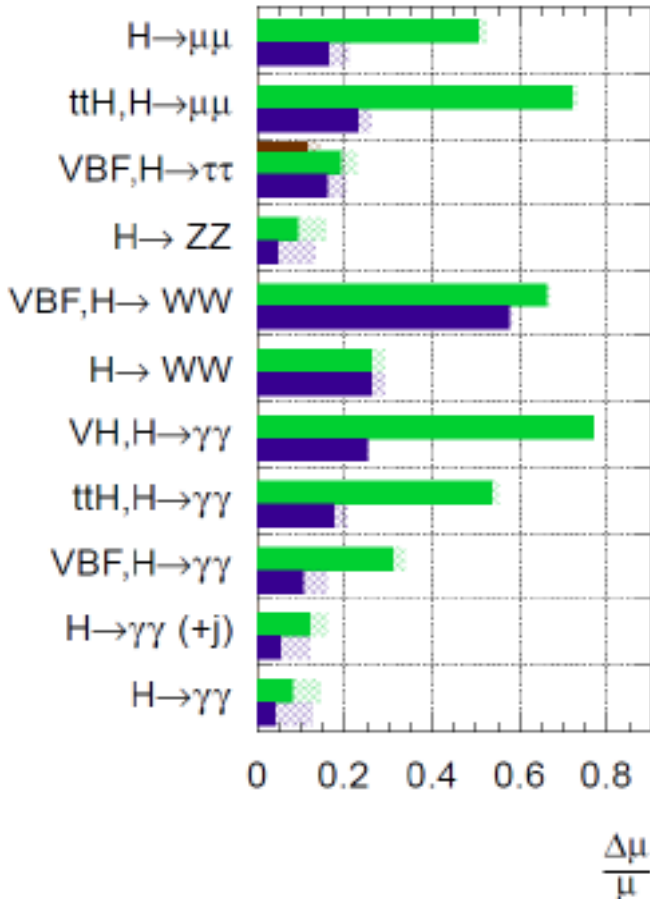
Aleksan

# ATLAS (昨日の中村さんのトーク)

ATLAS Preliminary (Simulation)

$\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$ :  $\int Ldt=300 \text{ fb}^{-1}$ ;  $\int Ldt=3000 \text{ fb}^{-1}$

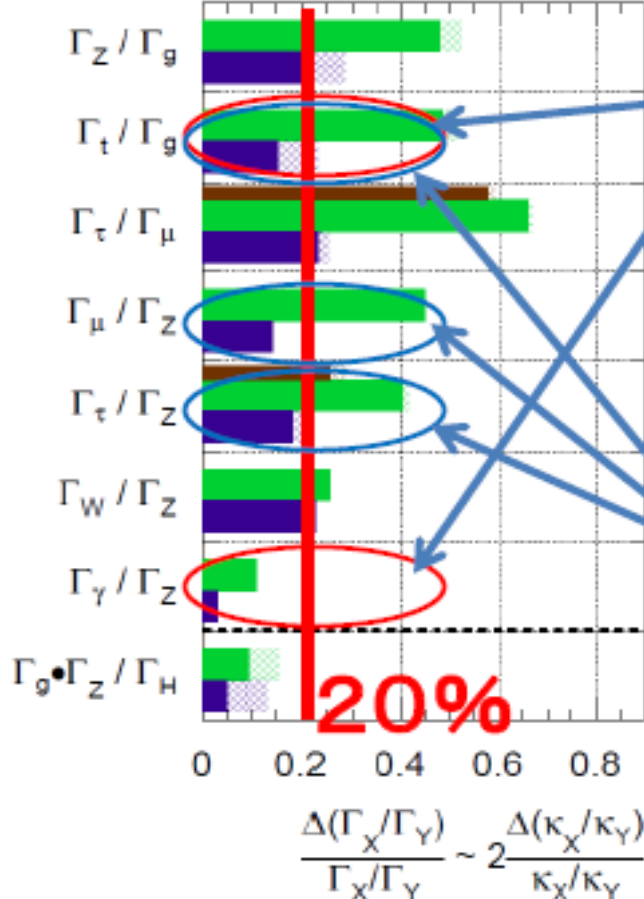
$\int Ldt=300 \text{ fb}^{-1}$  extrapolated from 7+8 TeV



ATLAS Preliminary (Simulation)

$\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$ :  $\int Ldt=300 \text{ fb}^{-1}$ ;  $\int Ldt=3000 \text{ fb}^{-1}$

$\int Ldt=300 \text{ fb}^{-1}$  extrapolated from 7+8 TeV



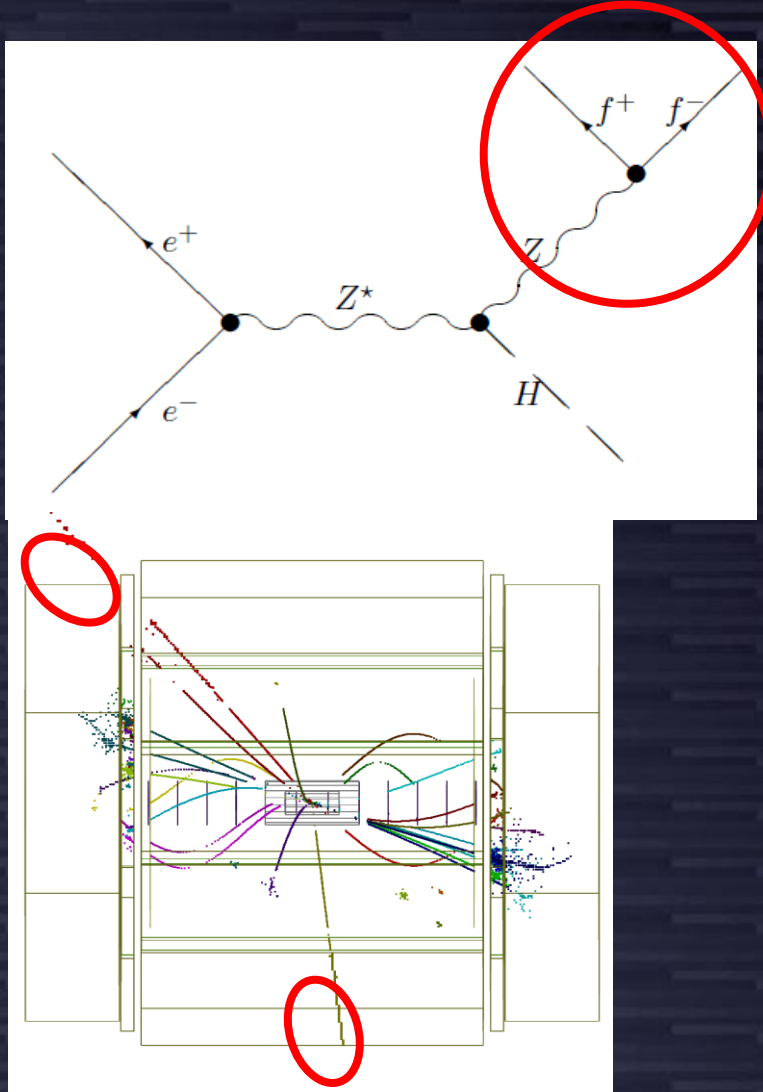
新物理に感度

湯川の測定精度 (@3000fb<sup>-1</sup>)

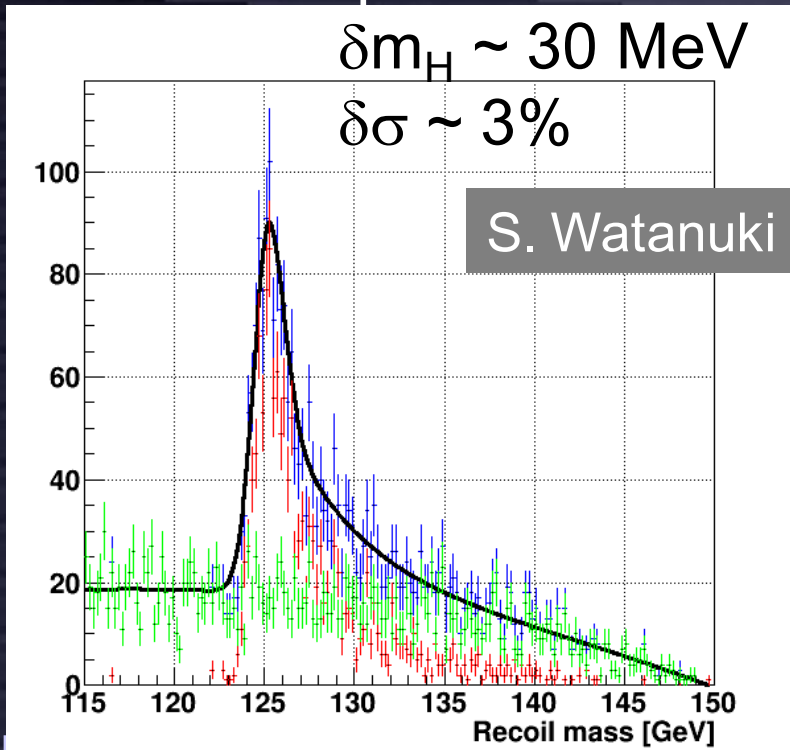
- $\Upsilon_t \sim 15\%$
- $\Upsilon_\mu \sim 10\%$
- $\Upsilon_\tau \sim 10\%$

$$\frac{\Delta(\Gamma_X/\Gamma_Y)}{\Gamma_X/\Gamma_Y} \sim 2 \frac{\Delta(\kappa_X/\kappa_Y)}{\kappa_X/\kappa_Y}$$

# Higgs recoil: “Absolute hZ coupling”



- “Higgsを見るのにHiggsを見ない”  
→ 反跳される $Z \rightarrow \ell\ell$ のみを使う  
(4-momentum conservation)
- “Higgsを見ない”のでどんな崩壊でも関係なく見える  
→ model independent



qq(bb) recoilも要検討?

# $h \rightarrow qq @ 250 \text{ GeV}$

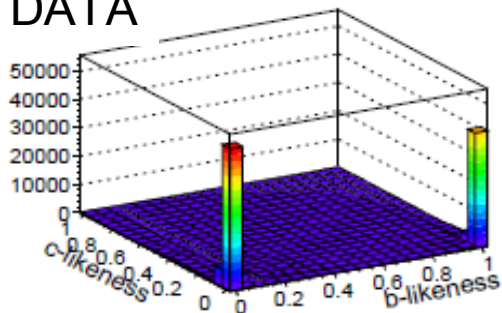
| Cut                 | Sig.         | Bkg.     |
|---------------------|--------------|----------|
| Gen.                | 19360        | 44827100 |
| All cuts            | 6731         | 19058    |
| <i>LR</i> cut       | 4753         | 3593     |
| Significance (Eff.) | 52.0 (24.5%) |          |

nnh channel

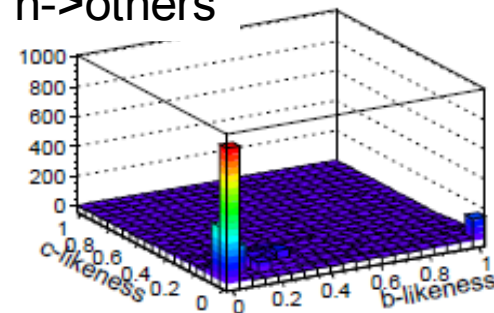
| Cut                 | Sig.         | Bkg.     |
|---------------------|--------------|----------|
| Gen.                | 52507        | 44827100 |
| All cuts            | 16350        | 411785   |
| <i>LR</i> cut       | 13726        | 166807   |
| Significance (Eff.) | 32.3 (26.1%) |          |

qqh channel

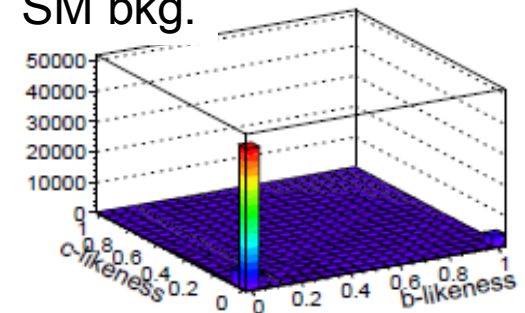
DATA



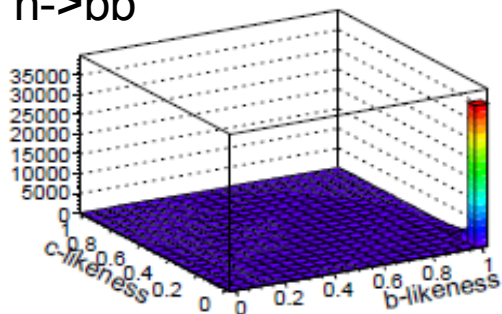
$h \rightarrow$ others



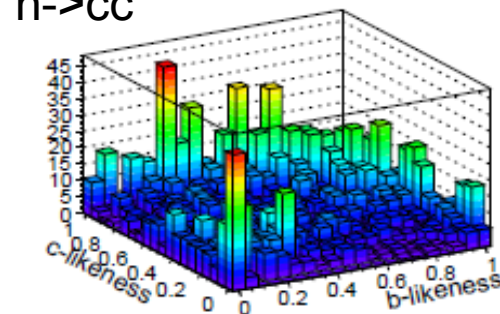
SM bkg.



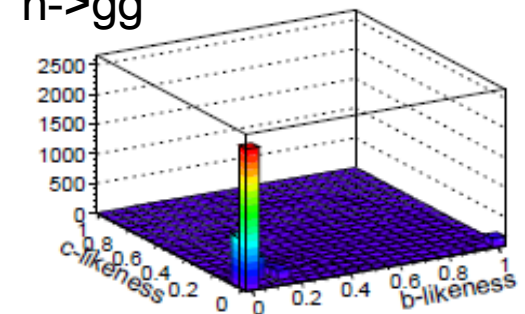
$h \rightarrow bb$



$h \rightarrow cc$



$h \rightarrow gg$





# nnhh @ 1 TeV

DBD analysis (no gam-gam overlay):

## signal and backgrounds (reduction table)

Polarization:  $(e^-, e^+) = (-0.8, +0.2)$   $E_{cm} = 1 \text{ TeV}$ ,  $M_H = 120 \text{ GeV}$

$\int L = 2 \text{ ab}^{-1}$

|              | Expected           | Generated          | pre-selection | cut1  | cut2 | cut3 | cut4 |
|--------------|--------------------|--------------------|---------------|-------|------|------|------|
| vvhh (WW F)  | 272                | $1.05 \times 10^5$ | 127           | 107   | 77.2 | 47.6 | 35.7 |
| vvhh (ZHH)   | 74.0               | $2.85 \times 10^5$ | 32.7          | 19.7  | 6.68 | 4.88 | 3.88 |
| vvbbbb       | 650                | $2.87 \times 10^5$ | 553           | 505   | 146  | 6.21 | 4.62 |
| vvccbb       | 1070               | $1.76 \times 10^5$ | 269           | 242   | 63.3 | 2.69 | 0.19 |
| yyxyyx       | $3.74 \times 10^5$ | $1.64 \times 10^6$ | 18951         | 4422  | 38.5 | 26.7 | 1.83 |
| yyxyev       | $1.50 \times 10^5$ | $6.21 \times 10^5$ | 812           | 424   | 44.4 | 11.0 | 0.73 |
| yyxylv       | $2.57 \times 10^5$ | $1.17 \times 10^6$ | 13457         | 4975  | 202  | 84.5 | 4.86 |
| vvZH         | 3125               | $7.56 \times 10^4$ | 522           | 467   | 257  | 30.6 | 17.6 |
| BG           | $7.86 \times 10^5$ |                    | 34597         | 11054 | 758  | 167  | 33.7 |
| significance | 0.30               |                    | 0.68          | 1.01  | 2.67 | 3.25 | 4.29 |

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma} \approx 23\%$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx 20\% \text{ (18\%)} \text{ (with weighting)}$$

Double Higgs excess significance:  $7.2\sigma$

# モデル非依存カップリングの導出

To extract BR from  $\sigma \times \text{BR}$ , we need  $\sigma$  from the recoil mass measurement.  
 -->  $\Delta\sigma/\sigma=2.6\%$  eventually limits the BR measurements.

To extract couplings from BRs, we need the total width:

$$g_{HAA}^2 \propto \Gamma(H \rightarrow AA) = \Gamma_H \cdot \text{BR}(H \rightarrow AA)$$

To determine the total width, we need at least one partial width and corresponding BR:

$$\Gamma_H = \Gamma(H \rightarrow AA) / \text{BR}(H \rightarrow AA)$$

In principle, we can use  $A=Z$ , or  $W$  for which we can measure both the BRs and the couplings:

$\text{BR}(H \rightarrow ZZ^*)$

$\Gamma(H \rightarrow ZZ^*)$

BR=O(1%): precision limited by low stat.  
 for  $H \rightarrow ZZ^*$  events       $250 \text{ fb}^{-1} @ 250 \text{ GeV}$   
 $\Delta\Gamma_H/\Gamma_H \simeq 20\%$

$\Gamma(H \rightarrow WW^*)$

$\text{BR}(H \rightarrow WW^*)$

More advantageous but not easy at low E

$250 \text{ fb}^{-1} @ 250 \text{ GeV}$   
 $\Delta\Gamma_H/\Gamma_H \simeq 11\%$

C.F.Durig, Helmholtz Alliance  
 6th WS, Dec. 2012

# ILCの数字はmodel independent!

J. Tian, EPS13

250 GeV: 250 fb-1  
 500 GeV: 500 fb-1  
 1 TeV: 1000 fb-1

MH = 125 GeV  
 P(e-,e+) = (-0.8,+0.3) @ 250, 500 GeV  
 P(e-,e+) = (-0.8,+0.2) @ 1 TeV

Canonical

| coupling $\Delta g/g$             | 250 GeV | 250 GeV + 500 GeV |        | 250 GeV + 500 GeV + 1 TeV |        |
|-----------------------------------|---------|-------------------|--------|---------------------------|--------|
| HZZ                               | 1.3%    | 1.3%              |        | 1.3%                      |        |
| HWW                               | 4.8%    | 1.4%              |        | 1.4%                      |        |
| Hbb                               | 5.3%    | 1.8%              |        | 1.5%                      |        |
| Hcc                               | 6.8%    | 2.9%              |        | 2.0%                      |        |
| Hgg                               | 6.4%    | 2.4%              |        | 1.8%                      |        |
| H $\tau\tau$                      | 5.7%    | 2.4%              |        | 1.9%                      |        |
| H $\gamma\gamma$                  | 18%     | 8.4%              |        | 4.1%                      |        |
| H $\mu\mu$                        | -       | -                 |        | 16%                       |        |
| $\Gamma_0$                        | 11%     | 5.9%              |        | 5.6%                      |        |
| Htt                               | -       | 14%               |        | 3.2%                      |        |
| Br(H $\rightarrow$ Inv.) 95% C.L. | < 1.0%  | < 1.0%            |        | < 1.0%                    |        |
| HHH                               | -       | 104%              | 66%(*) | 26%                       | 17%(*) |

Total cross sectionのエラーが乗っている (前の比較表では無視)

# HL-ILC

250 GeV: 1150 fb-1  
 500 GeV: 1600 fb-1  
 1 TeV: 2500 fb-1

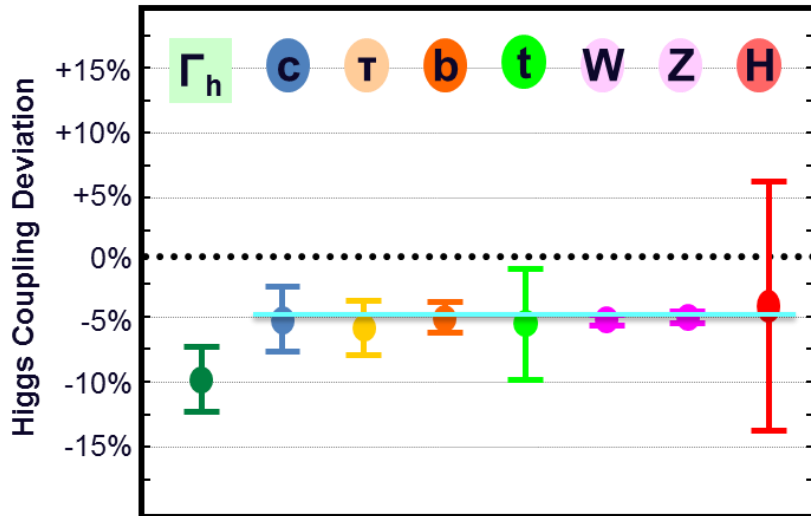
MH = 125 GeV  
 P(e-,e+)=(-0.8,+0.3) @ 250, 500 GeV  
 P(e-,e+)=(-0.8,+0.2) @ 1 TeV

LumiUP

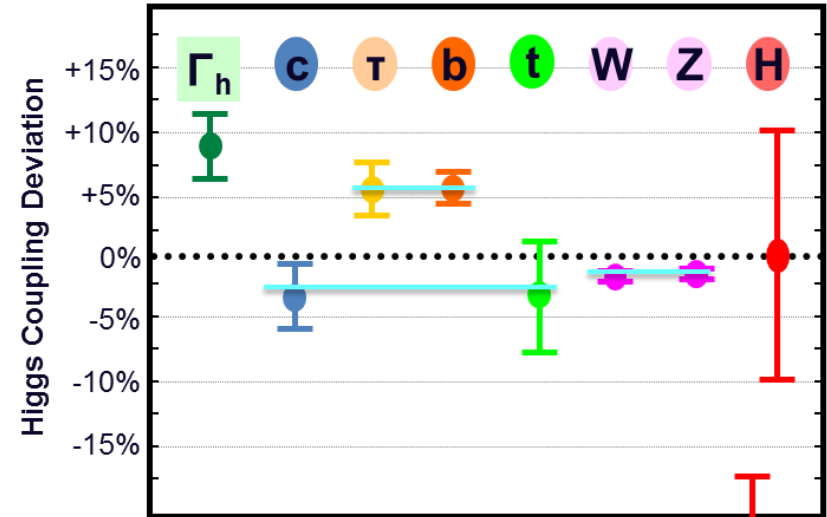
| coupling $\Delta g/g$             | 250 GeV | 250 GeV + 500 GeV |        | 250 GeV + 500 GeV + 1 TeV |        |
|-----------------------------------|---------|-------------------|--------|---------------------------|--------|
| HZZ                               | 0.61%   | 0.61%             |        | 0.61%                     |        |
| HWW                               | 2.3%    | 0.67%             |        | 0.65%                     |        |
| Hbb                               | 2.5%    | 0.90%             |        | 0.74%                     |        |
| Hcc                               | 3.2%    | 1.5%              |        | 1.1%                      |        |
| Hgg                               | 3.0%    | 1.3%              |        | 0.93%                     |        |
| H $\tau\tau$                      | 2.7%    | 1.2%              |        | 0.99%                     |        |
| H $\gamma\gamma$                  | 8.2%    | 4.5%              |        | 2.4%                      |        |
| H $\mu\mu$                        | -       | -                 |        | 10%                       |        |
| $\Gamma_0$                        | 5.4%    | 2.8%              |        | 2.7%                      |        |
| Htt                               | -       | 7.8%              |        | 2.0%                      |        |
| Br(H $\rightarrow$ Inv.) 95% C.L. | < 0.47% | < 0.47%           |        | < 0.47%                   |        |
| HHH                               | -       | 58%               | 37%(*) | 16%                       | 10%(*) |

# Higgs and BSM theories

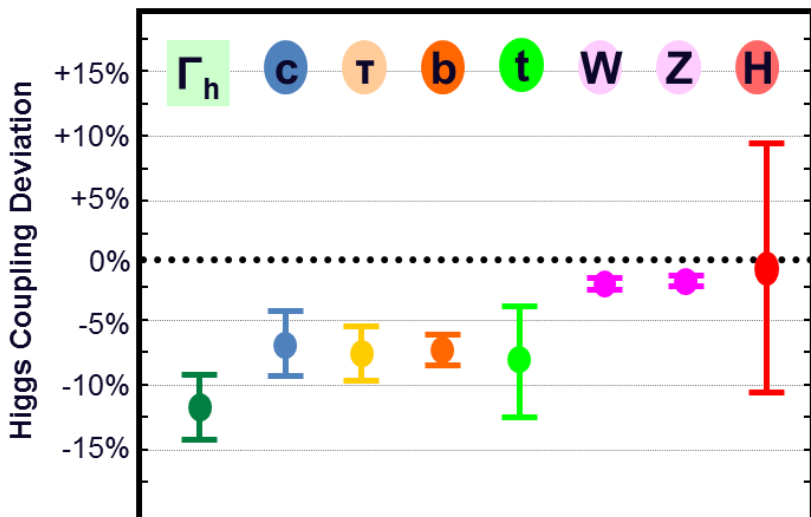
Singlet Mixing



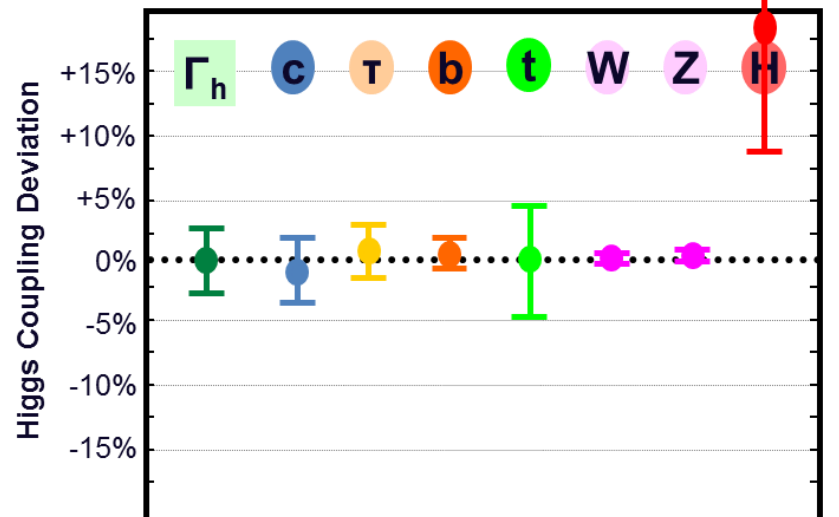
MSSM / Type II 2HDM



Composite Higgs



Electroweak Baryogenesis



# まとめ: ILC vs HL-LHC higgs

- HL-LHCがうまくいけば、 $hWW$ ,  $hZZ$ ,  $hbb$ などの相対的なずれは $O(\%)$ でわかる
  - ただし理論と系統誤差次第
- absolute cross sectionの測定のためILCは絶対必要。ほとんどのモードでHL-LHCとコンパラ以上の性能はある。
- コンパラなのでcombineする効果が大い
- 1 TeVまでいけばself couplingも

# ILCの系統誤差

- まじめな検討をはじめようとしているところ
- $h \rightarrow bb$ へのb-tagの誤差は統計誤差よりfactor程度少ない予想(おそらく統計dominant)
- recoil massはパラメータが少ないので系統誤差が入る余地が小さい
- S/Nが悪くMVAに大きく依存している解析では注意が必要
  - 特にself coupling, top yukawa

# TLEP



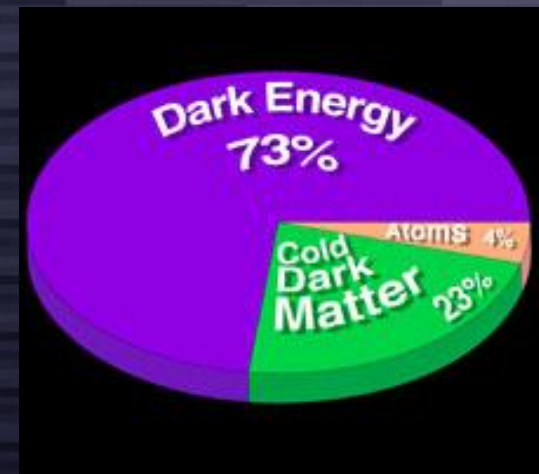
- 80-100 km  $e^+e^-$  ring collider
  - 100 TeV pp colliderにupgradeする前提
- Studyは始まったばかり
  - 建設へはまだ問題がたくさん、解析の信頼性もまだ
  - タイムスケールもILCよりだいぶ先
- 350 GeVでILCとコンパラ、500 GeVは無理  
240 GeVでは1桁多いluminosity
  - ただし4IPの場合
- 偏極は難しい

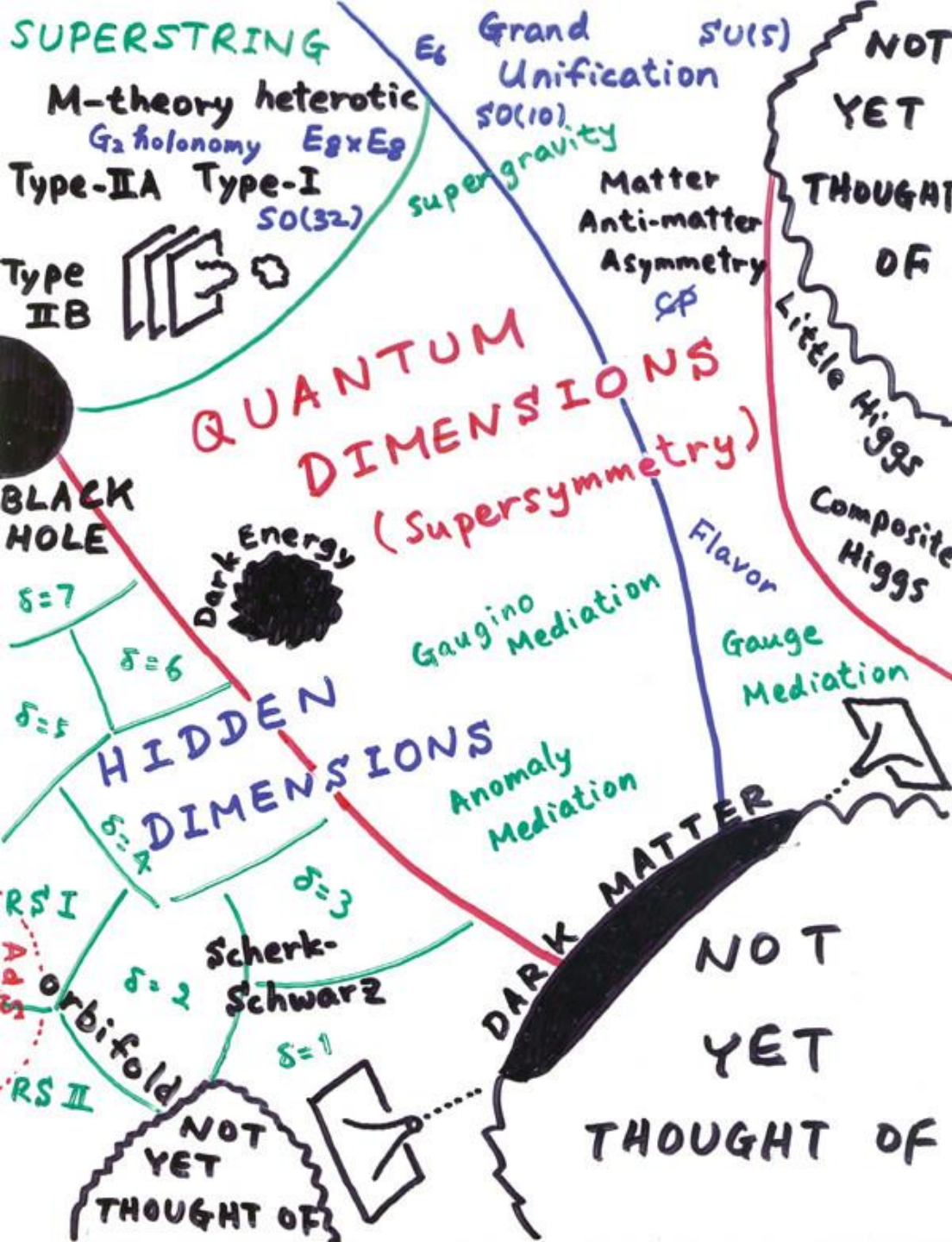


**BSM**

# 標準理論で未解決の問題

- ヒッグス質量の量子補正  
(naturalness problem)
- ダークマター・ダークエネルギー
  - 見えている物質は全体の4%  
残りの23%を説明する必要
- 宇宙の物質生成(baryogenesis)
- ニュートリノ質量
  - Right-handed neutrino?



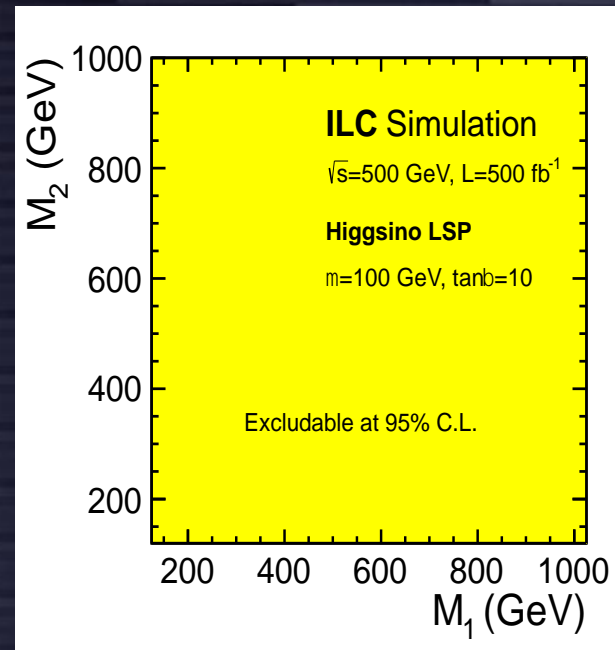
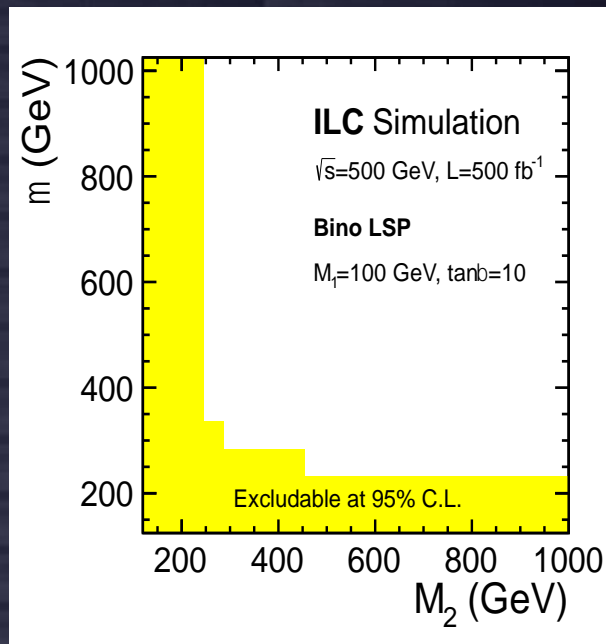


何が新物理か  
現時点での予測は困難

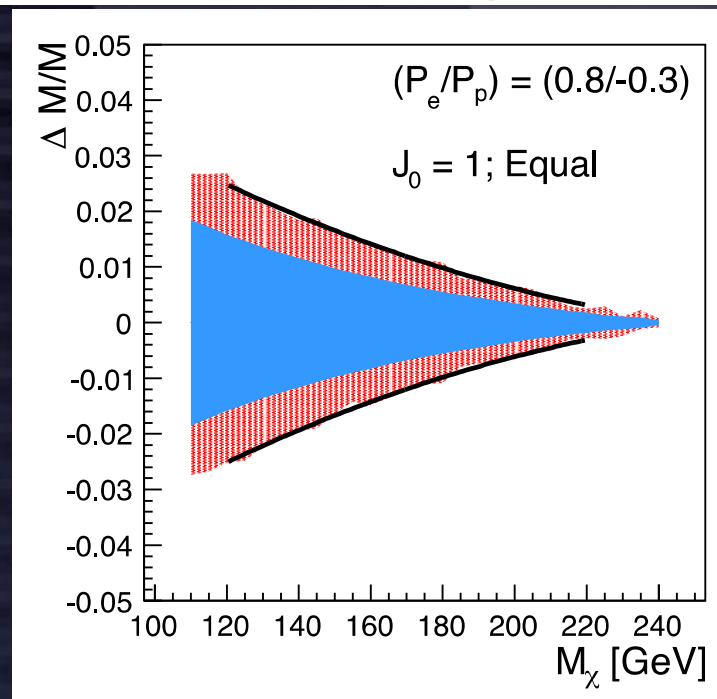
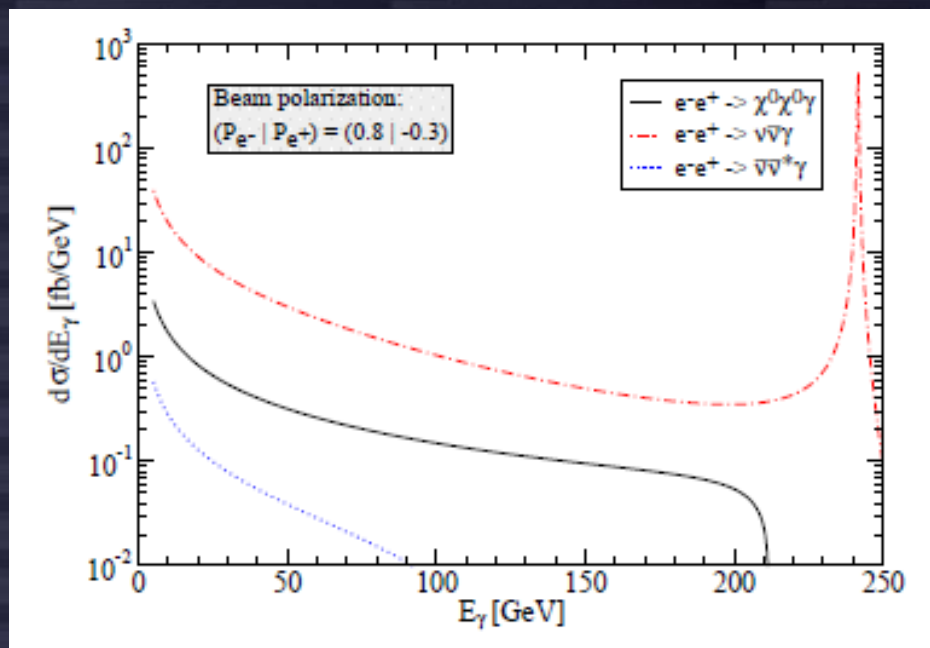
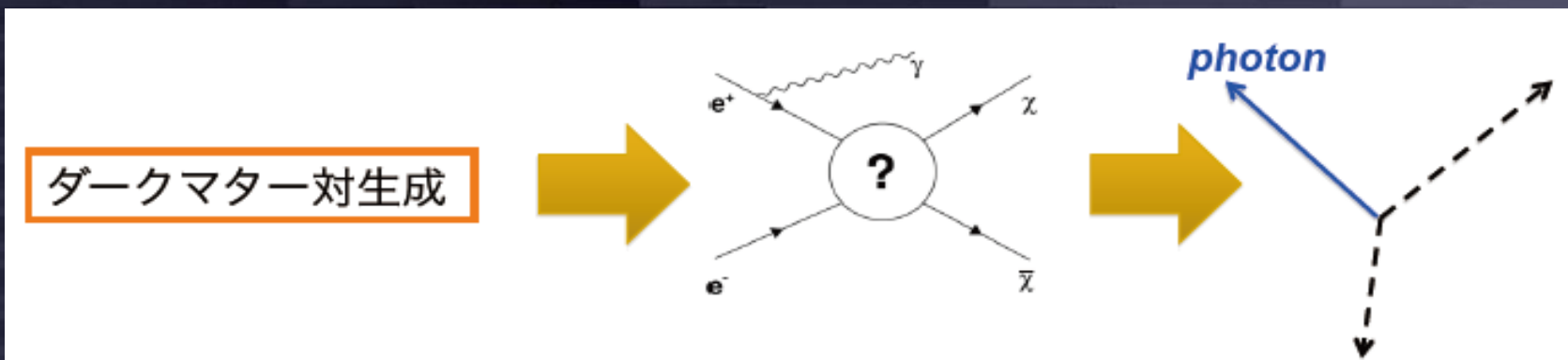
- ヒッグスの精密測定  
新物理のエネルギー  
スケールを決める
- ヒッグス以外の精密測定  
(top, W, Z'探索など)
- 直接探索  
LHCで見つからない  
モードも探索可  
energy reachが重要

# SUSY - Higgsino search

- Higgsinoだけが軽く, bino/winoが重いシナリオ
  - chargino, neutralinoのmassが縮退
  - 階層性問題OK
  - LHCでは困難(出てくる粒子がsoftすぎる)

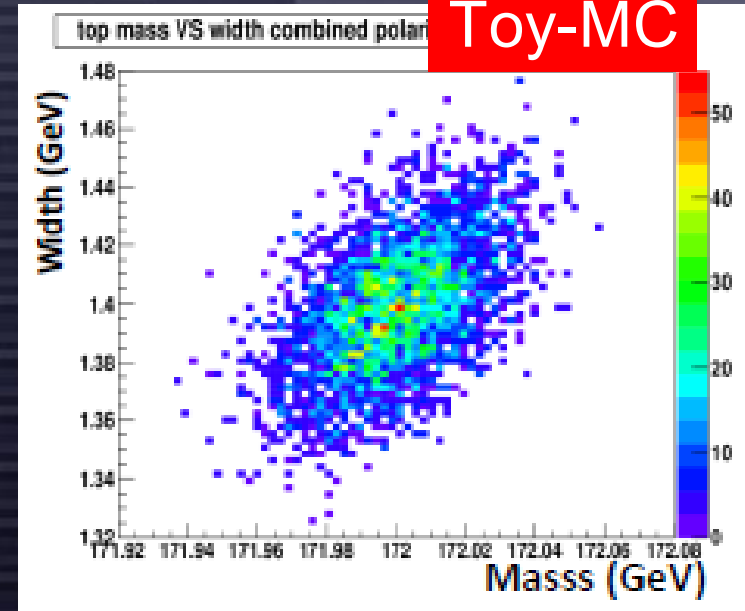
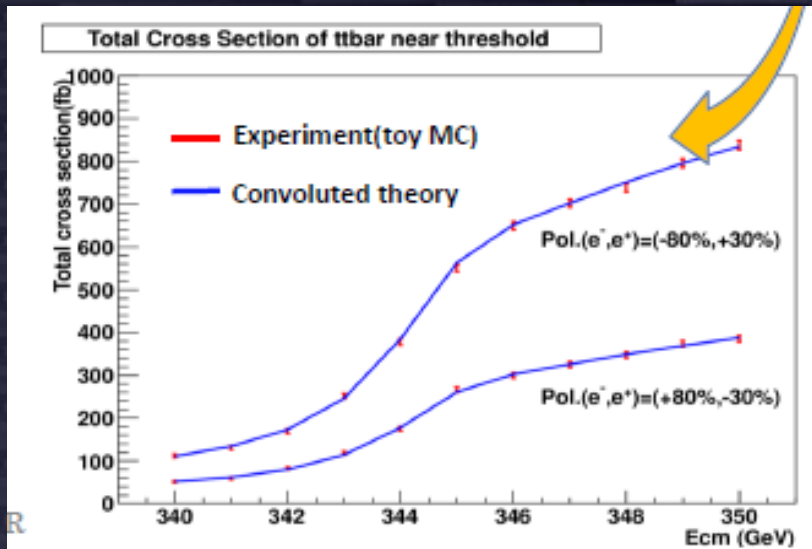


# “ダークマターしか見えない”ケース



# tt threshold

Toy-MC



|                                                           | PS Mass(GeV)    | Width(GeV)    |
|-----------------------------------------------------------|-----------------|---------------|
| Left(110fb <sup>-1</sup> )                                | 172.000 ± 0.021 | 1.400 ± 0.025 |
| Right(110fb <sup>-1</sup> )                               | 172.000 ± 0.030 | 1.399 ± 0.037 |
| Left (110fb <sup>-1</sup> ) + Right(110fb <sup>-1</sup> ) | 172.000 ± 0.017 | 1.399 ± 0.021 |

|                           |                                                  |                                                  |
|---------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| $\alpha_s(M_Z)$           | PDG 0.1184 ± 0.0007 (0.6%)                       | Future? 0.1184 ± 0.00012 (0.1%)                  |
| $\overline{MS}$ mass(GeV) | 163.80 ± 0.016(stat) ± 0.054( $\alpha_s$ ) ± ... | 163.80 ± 0.016(stat) ± 0.009( $\alpha_s$ ) ± ... |

# ILCの物理的意義まとめ

- Model-independentなヒッグス解析
  - recoil massは絶対に必要な測定
  - $hbb$ ,  $hcc$ ,  $hWW$  (@500 GeV)に大きな感度
  - > 1 TeVにアップグレード ( $tth$ ,  $hhh$ )
  - luminosityもアップグレード可能
- BSMモデルもより広汎にカバー
  - “Higgsino-only” モデル
  - energy reachが重要 → LC
- HL-LHC, ILC, TLEPすべて意義あり
  - HL-LHC → ILC → TLEP, 1TeV LC → ...





# “中寿命” stau search

gravitino mass  $\sim 1$  eV

