

# Pair monitor開発のための シミュレーション研究

東北大学 素粒子実験研究グループ  
山口信二郎



# Outline

1, ILC

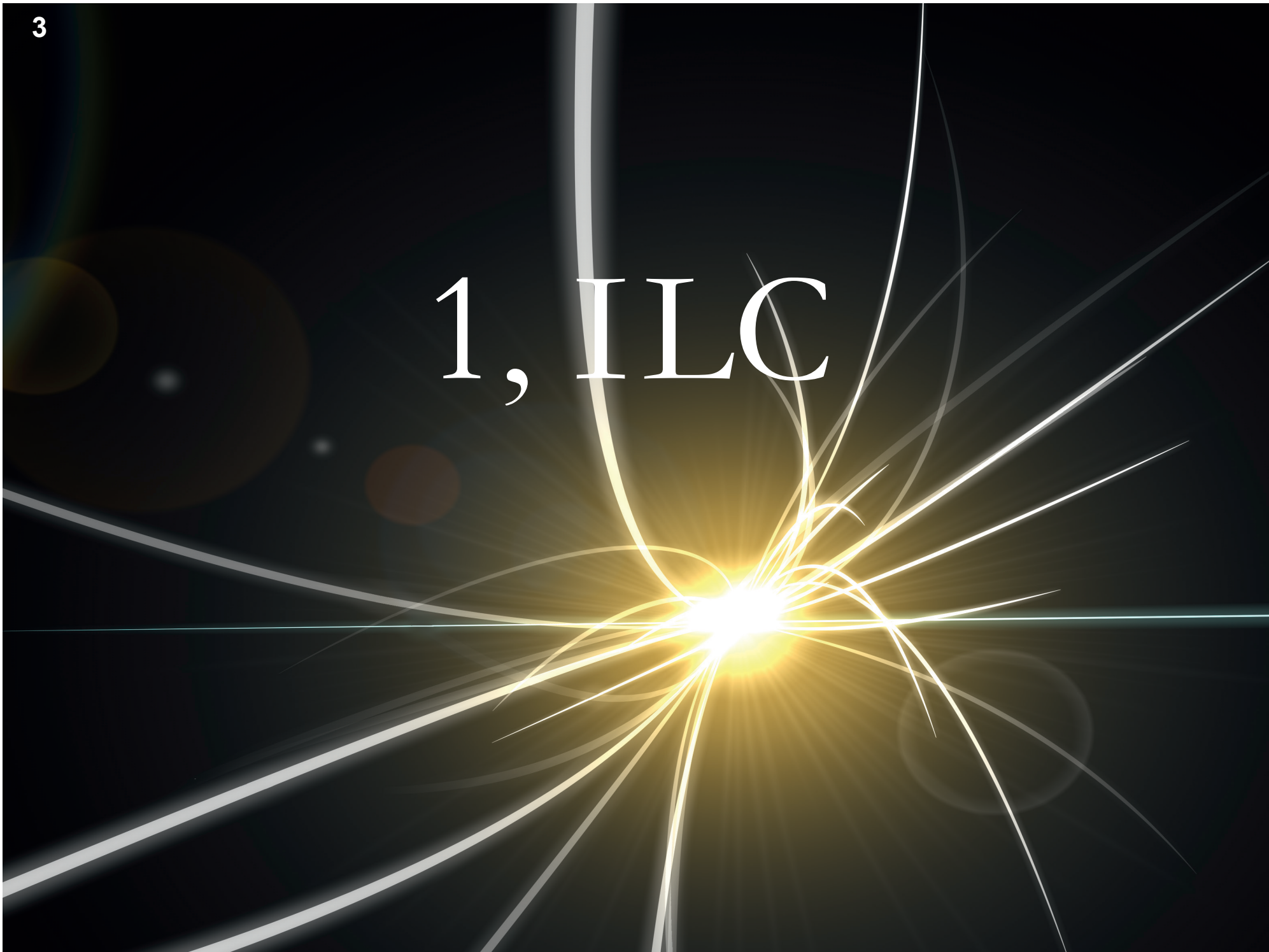
2, Pair Monitor in Fcal

3, Pair Monitor

4, Simulation

5, Summary and Plan

# 1, ILC



## 1-1 International Linear Collider

全長約30km、重心系エネルギー200~500 GeVの  
高ルミノシティ電子-陽電子線形加速器。

### 目的

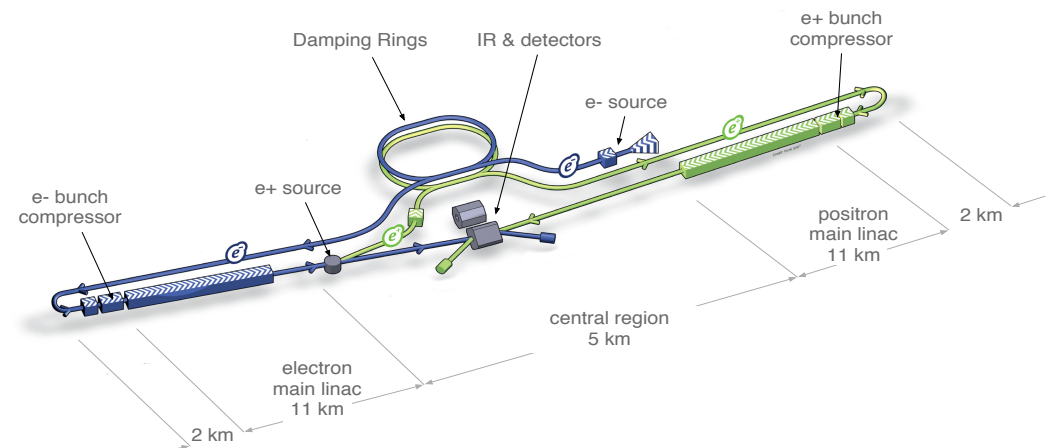
- 新粒子(超対称性粒子)の探索。
- Higgs,t-quarkの精密測定。

### 長所

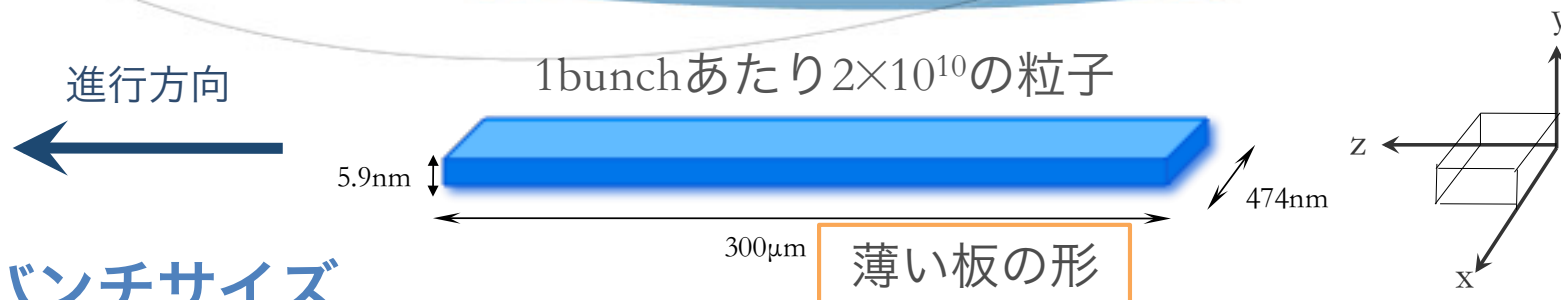
- Hadron衝突型よりもBackgroundが少ない=興味ある物理の比率が高い。
- $e^+e^-$ は素粒子なので初期状態がはっきりしており、精密測定が可能。
- WとZの区別が付きやすい。
- $e^+e^-$ を偏極できる。(見たい物理のを見やすくできる)

### 短所

- 線形なので1度しか衝突できない。



## 1-2 Beamの特徴



### ● バンチサイズ

- $(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z) = (474 \text{ nm}, 5.9 \text{ nm}, 300 \text{ } \mu\text{m})$   
→ Beam面積はLHCの約19万分の1倍。
- サイズを絞る事により高ルミノシティを実現。  
1度の衝突でもOK!

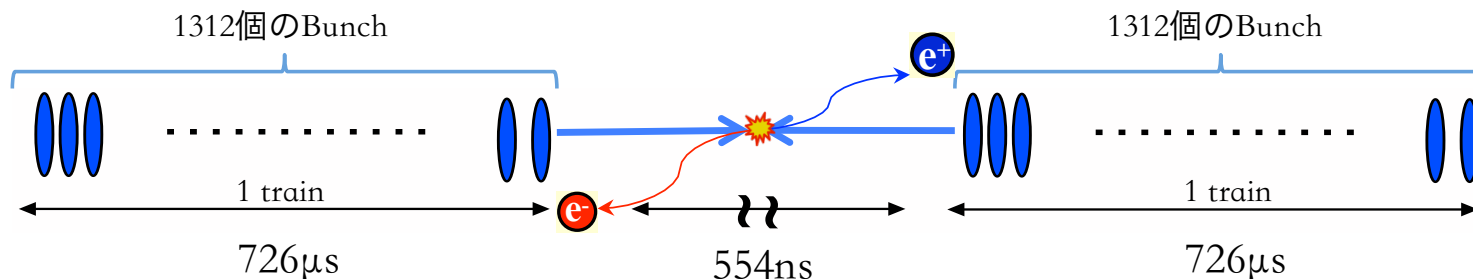
$$\mathcal{L} = \frac{1}{4\pi} \frac{f_{rep} n_b N^2}{\sigma_x \sigma_y} \times H_D$$

Luminosityはビーム面積に反比例

### ● トレイン

Bunchの集まり。 1トレインあたり1312個のBunchを含む。

Bunchの間隔は554ns。 726μsecで1トレインが衝突し終わる。

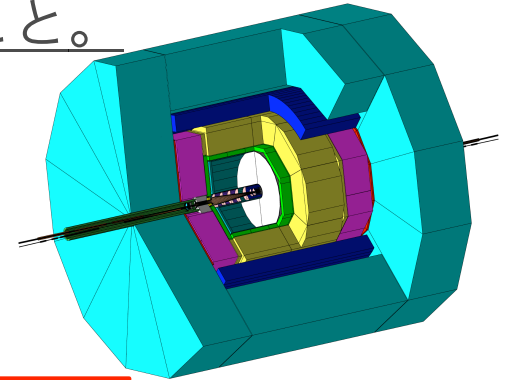


2, Pair monitor in Fcal

# 2, Pair Monitor in Fcal

## 2-1 Fcal

Fcalとは、Forward Calorimeter(前方検出器)のこと。  
Beam軸のすぐ近くに配置される。



### 目的

Beamの情報(Luminosity, Energy, Shape)を得る事。  
これらの情報は主に**ビームの補正**に用いられる。

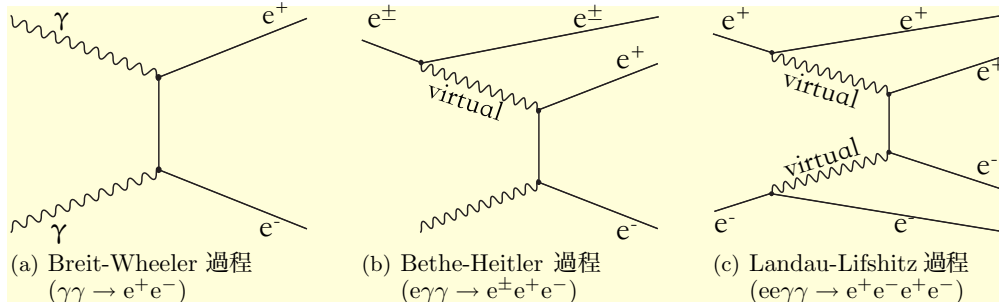
### 何を見るか

1bunch衝突で $10^5$ 個のPair

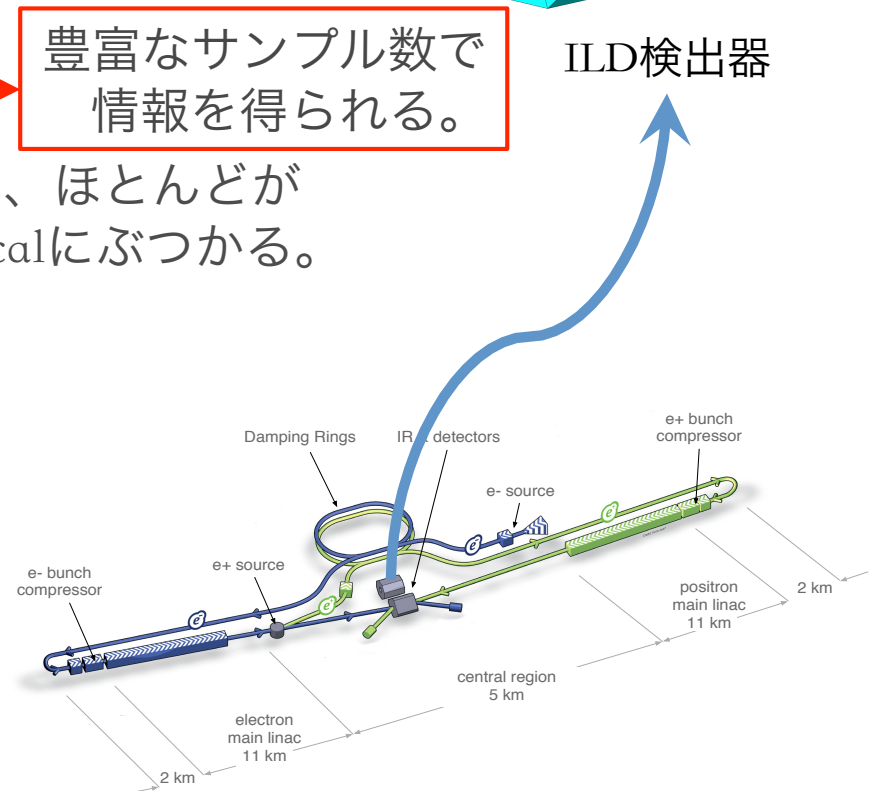
豊富なサンプル数で  
情報を得られる。

Pair Backgroundを見る。Pair backgroundは、ほとんどが  
ビーム軸に沿って飛び、ビーム軸付近のFcalにぶつかる。

↓  
軸から約1cmの範囲



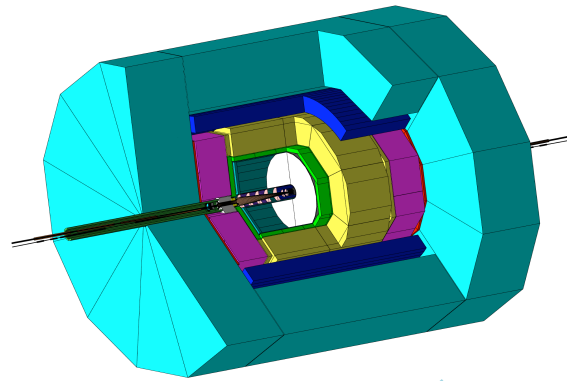
Beam strahlungによるPair Background生成



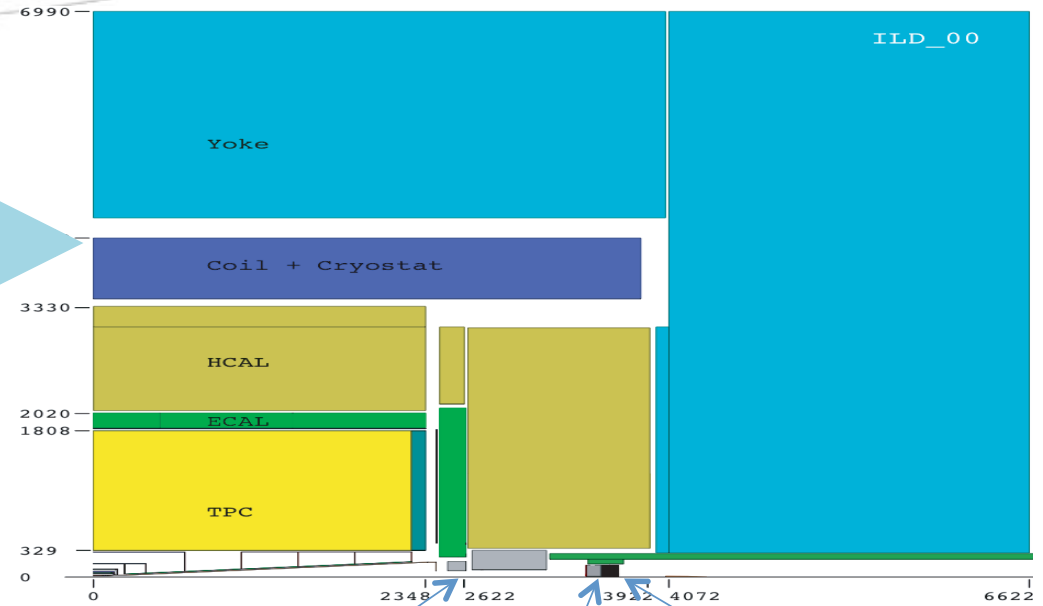
# 2, Pair Monitor in Fcal

## 2-2 Fcalの位置

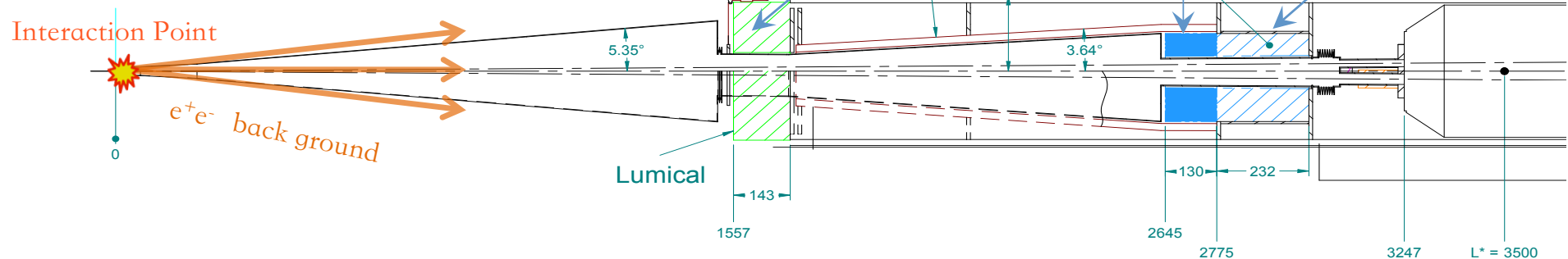
ILD検出器



断面図(yz plane)



Beam pipe付近の図





## 2, Pair Monitor in Fcal

### 2-3 それぞれの役割

#### ◆ Lumical

ルミノシティを精密に測定する。0.1 % 以下の測定精度。  
極角 32 ~ 74 mrad

#### ◆ BeamCal

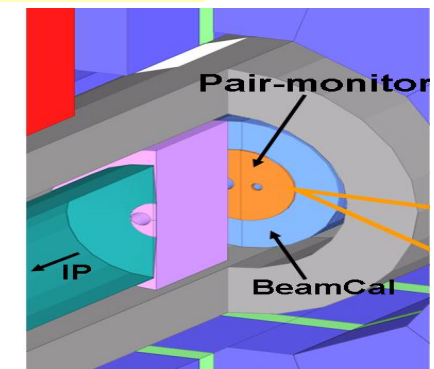
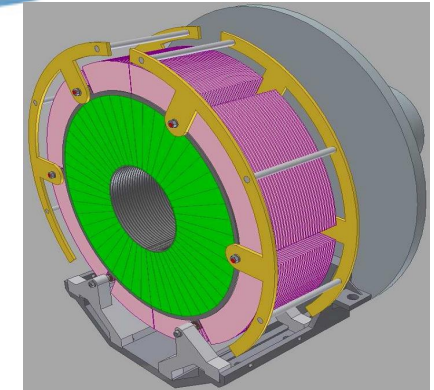
ペアバックグラウンドのエネルギー 損失の分布から、ルミノシティ  
エネルギー分布を見積もる。 極角 5 ~ 40 mrad

#### ◆ Pair monitor

ペアモニタは衝突点の**ビーム形状**を測定するためのシリコン  
ピクセル検出器。モニタを見てBeamの**状態を判断**。

↑  
ビームサイズが小さいので衝突, 形成が難しい。

↓  
これらの情報を加速器にフィードバックして  
ビームを調整する。



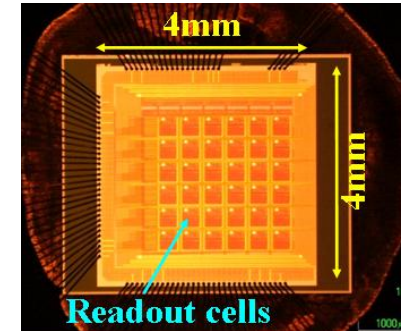
# 3,Pair Monitor

# 3, Pair Monitor

## 3-1パラメータと原理

### 主なパラメータ

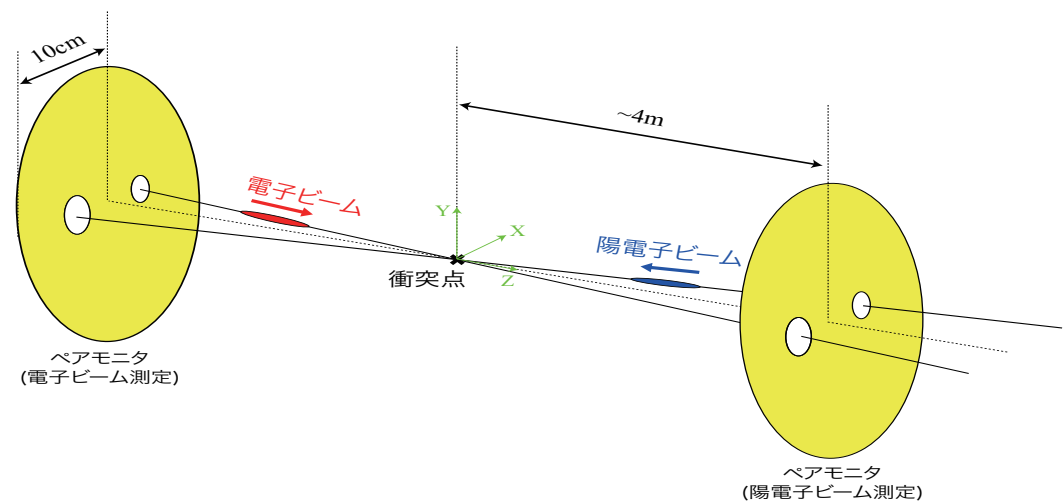
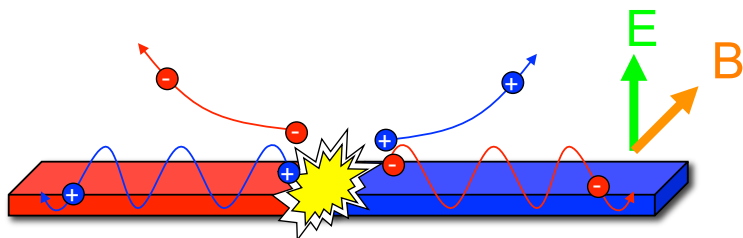
- 半径：10cm
- 厚さ：200 $\mu\text{m}$
- 衝突点からの距離：4m
- Pixelサイズ：400 $\mu\text{m}$ ×400 $\mu\text{m}$
- Pixelの数：190,000
- 1bunch毎に読み出す。



### 原理

Pair backgroundは、ビームの作る電磁場により、散乱、螺旋運動をする。電磁場はビームの形状に依存するので、ペアモニタに届く粒子はビーム情報を持っている。

Pair Backgroundを見てビームの形状を知る事が出来る。



# 3, Pair Monitor

## 3-2 Simulation

### ◆ Motivation

ハードウェアを開発するぞ！ → 最新の要求性能のデータが**無い**...☹



自分でシミュレーションする。

### ◆ Event Generation

ビームが衝突した時にどのようなEventが起こるか。

Pair Monitorの役割は、ビームの調整。

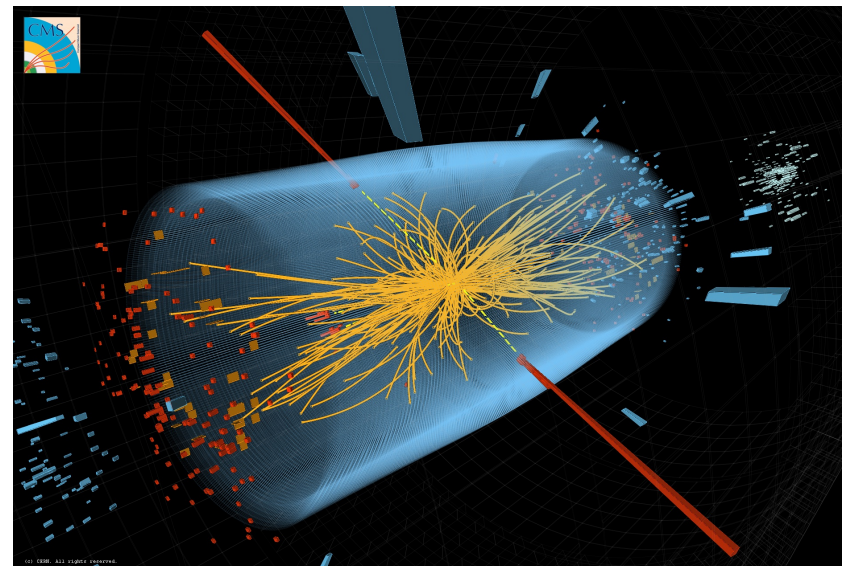
ビーム作りが**上手く行っていない場合**を最新のビーム情報を元にシミュレーションする！

### ◆ Soft と Parameter

Soft : Guinear Pigを用いた。

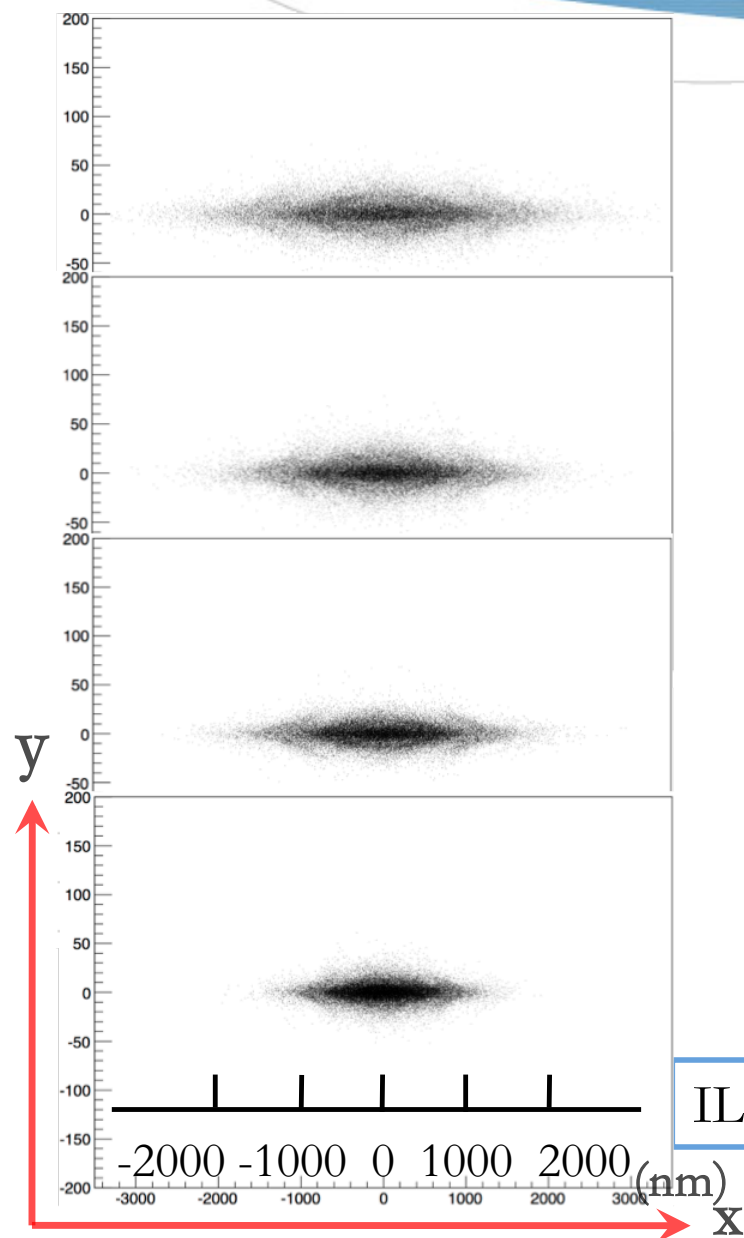
主なParameter

- E : 重心系Energy [GeV]
- N : 1Bunchあたりの粒子数
- $\sigma_{x,y,z}$  : ビームサイズ[nm, $\mu$ m]
- $\epsilon_{x,y}$  : エミッタンス
- **offset** : ビーム軸からの**ズレ**[nm]



# 4 Simulation

## 4-1 TDR : 相互作用後のBeam

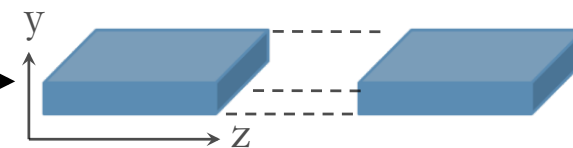


200GeV  
 $\sigma_x = 904\text{nm}$   
 $\sigma_y = 7.8\text{nm}$

250GeV  
 $\sigma_x = 729\text{nm}$   
 $\sigma_y = 7.7\text{nm}$

350GeV  
 $\sigma_x = 684\text{nm}$   
 $\sigma_y = 5.9\text{nm}$

500GeV  
 $\sigma_x = 474\text{nm}$   
 $\sigma_y = 5.9\text{nm}$

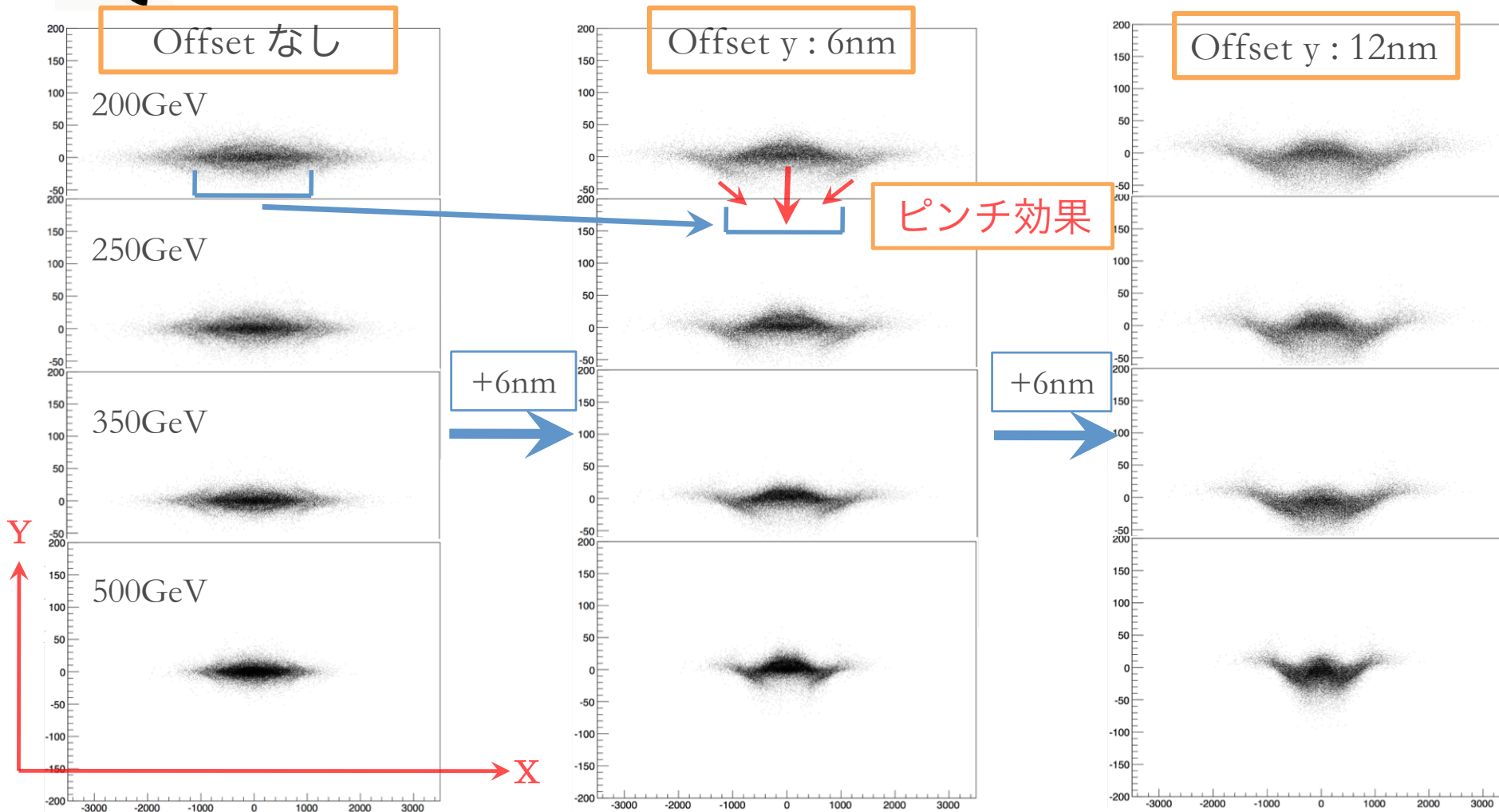
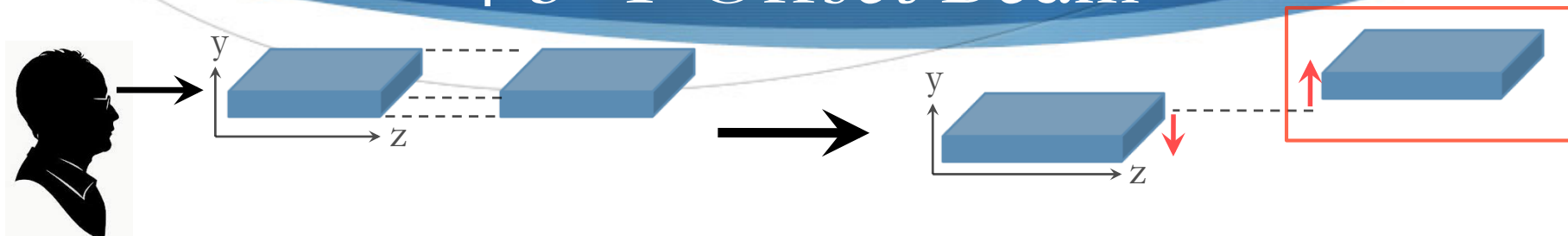


TDRのデータ通りに  
形を出力できた。

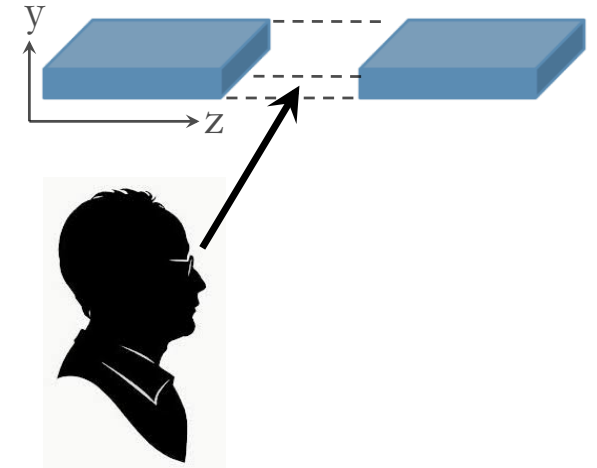
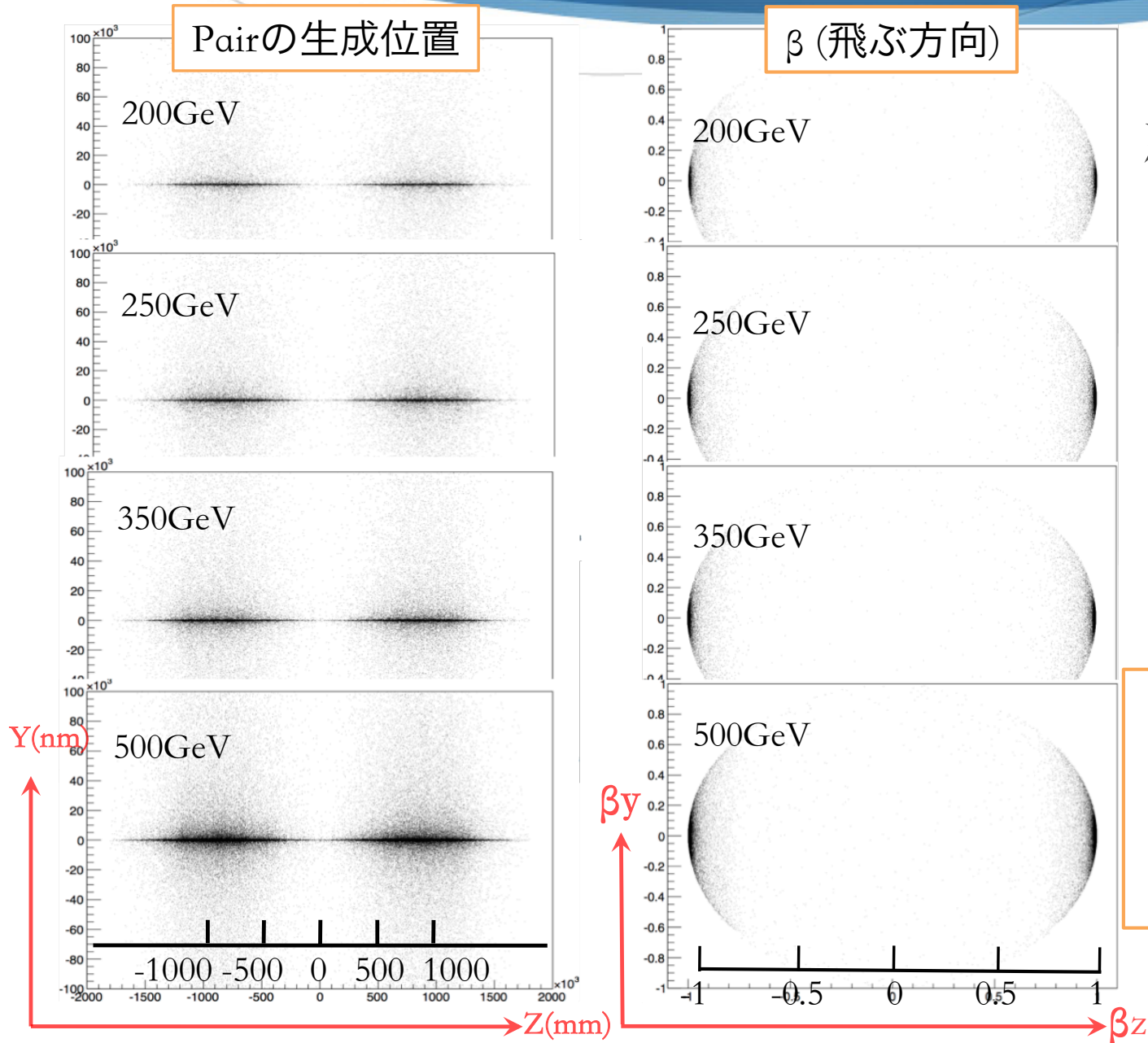
ILCのTDRのパラメータ

# 4 Simulation

## 4-3 Y-Offset Beam



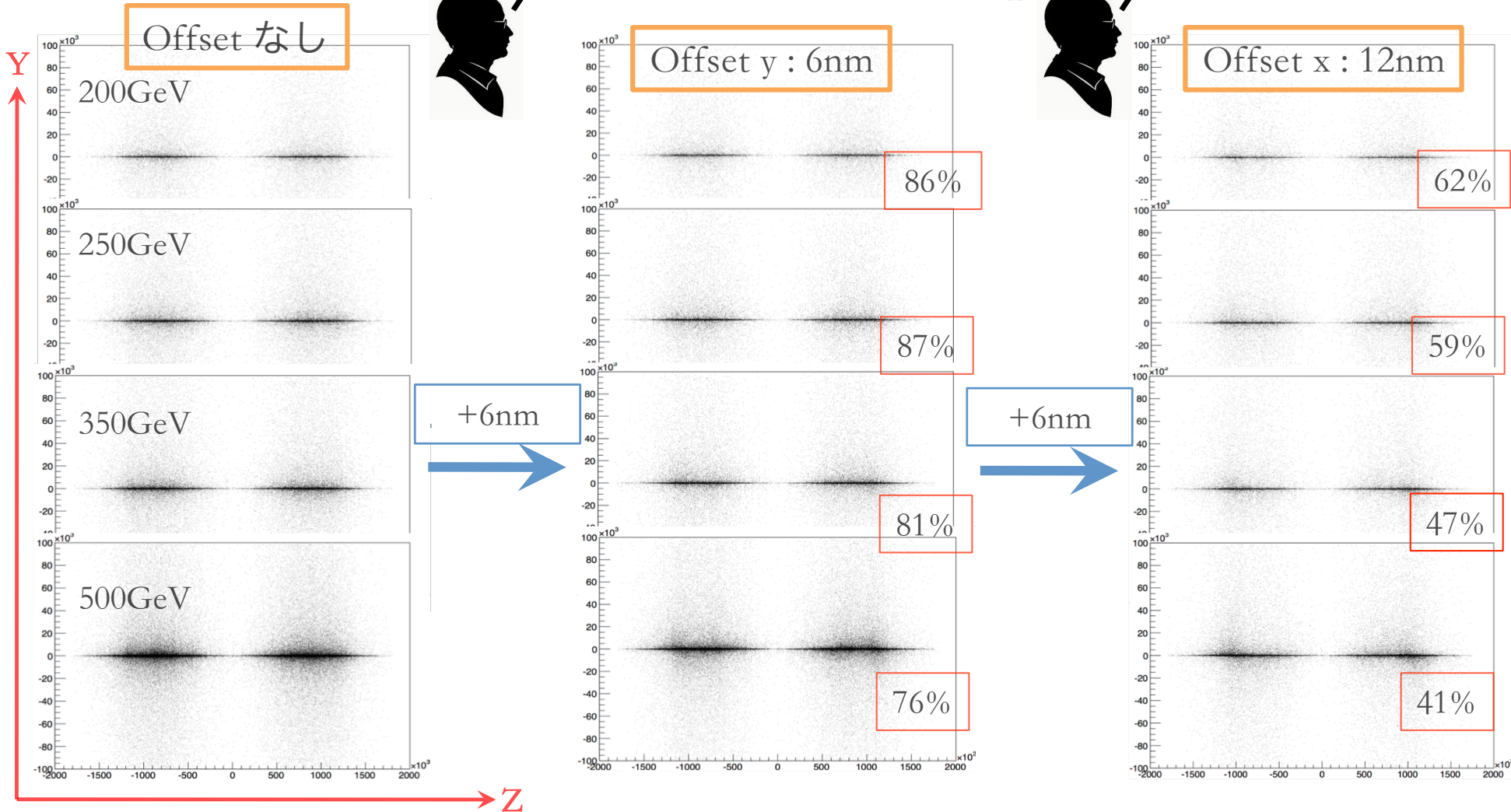
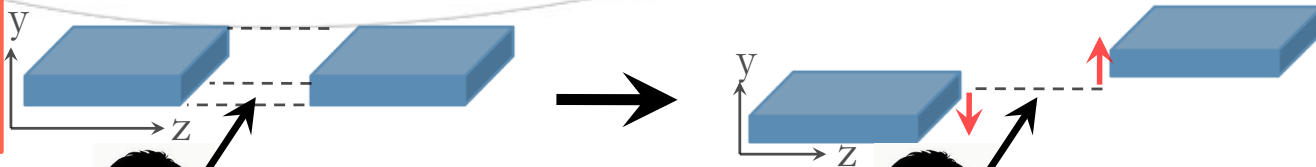
## 4-2 Pair バックグラウンド



- EnergyによってPairの生成量の変化が見える。
- 位置、方向の変化はほとんど無い。

## 4-4 Offset Pair Background

Offsetが、Pair Backgroundの量に大きく影響





# Summary and Plan

## Summary

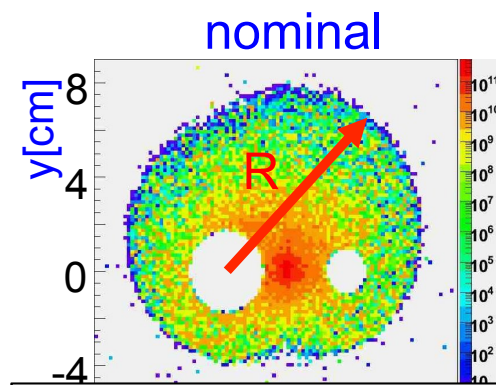
Event Generationに成功し、バンチが衝突するとどのようにビームが変化し、ペアが発生するのを見る事が出来た。

## Plan

物理シミュレータで、仮想ペアモニタをビーム軸付近に配置し、どのようにPair Backgroundが写るかシミュレーションする。

こんな感じ

要求性能がわかったら、ハードウェアの開発をして行く。



4年前の卒業生による図

ご清聴ありがとうございました。

# 要求性能の変化

1pixelにいくつのHitがあるか

開発当初、係数率は1になるように設計。

ビームパラメータ、ペアモニタの位置の変化

係数率が1.4に。  
卒業生がこの時のデータについてシミュレーション、開発。

ビームパラメータが再び変化

500GeV

- 1train中のbunch数 [個]
- エミッタンス  $(\gamma\epsilon_x, \gamma\epsilon_y)$  [ $\mu\text{m}$ ]
- ベータ関数  $(\beta_x, \beta_y)$  [mm]
- ビームサイズ  $(\sigma_x, \sigma_y)$  [nm]

旧データ

2625  
(10,0.04)  
(20,0.4)  
(639,5.7)

TDR

1312  
(10,0.034)  
(20,0.4)  
(639,5.7)

## Y offset に対する pair background 量の変化

Offsetなし → 6nm → 12nm

200GeV

39160 → 33654 → 24107      100% 85.9% 61.6%

250GeV

61556 → 53319 → 36275      100% 86.6% 58.9%

350GeV

79111 → 64163 → 37439      100% 81.1% 47.3%

500GeV

173229 → 131989 → 71756      100% 76.2% 41.4%

# Back up

## 1, ILC

- ◆ LHCでは、約28分にHiggsのイベントが一つ。背景事象が多すぎて、トリガーが必要。
- ◆ ILCでは全ての事象を終状態まで追えるので、特殊な選別がいらない。
- ◆ 興味あるイベントが起こる確率は、全体の $10^{-7} \sim 10^{-13}$ の割合である。  
→ILCでは、Higgs eventは全対消滅の1%。
- ◆ LHCでは、Protonはcompositeなので、重い粒子の断面積が小さい。
- ◆ Higgs Eventは $e^+e^-$ 対消滅Eventの内の1%。(LHCは約 $10^{-10}$ !!)
  
- ◆ LHCのビームサイズ $(\sigma_x, \sigma_y) = (23\mu\text{m}, 23\mu\text{m})$ 。  
1bunch当たり、 $1.4 \times 10^{11}$ 個の陽子。

# Back up

## 1, ILC

- ◆ LHC : 全ての計算はQCD. Protonが内部構造を持つ事による不確定性が大きく、高次の摂動が必要。

例えばHiggsのCross Sectionでは、1次摂動項だけでは100%の誤差がある。10%未満のエラーの為には、NNLO correction以上が必要だが、これは現在のところ単純な反応しか計算できない。

- ◆  $e^+e^-$ は素粒子であり、電弱相互作用しかしない。

断面積に対する放射の1次の摂動項だけで数%の誤差しか無い。

ILCではbosonの存在にsensitiveなので、精密なSMの $e^+e^- \rightarrow ff$

のcross sectionの予言からのズレを見る事でZを検出できる。

ILCはとにかく精密測定できる。

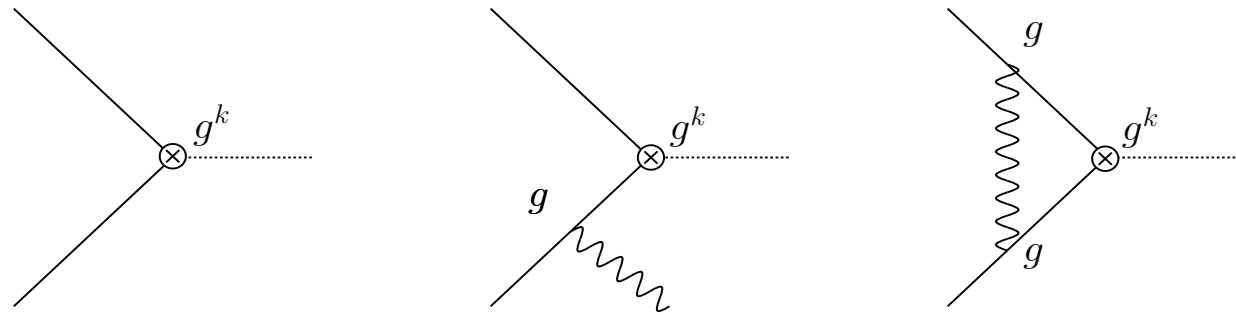
# Back up 1, ILC

*LO, NLO, ...*

Perturbation theory for amplitude:

$$M(g) = g^k M_0 + g^{k+1} M_1 + g^{k+2} M_2 + \dots$$

Corresponding to



Square ( $\alpha = g^2$ )

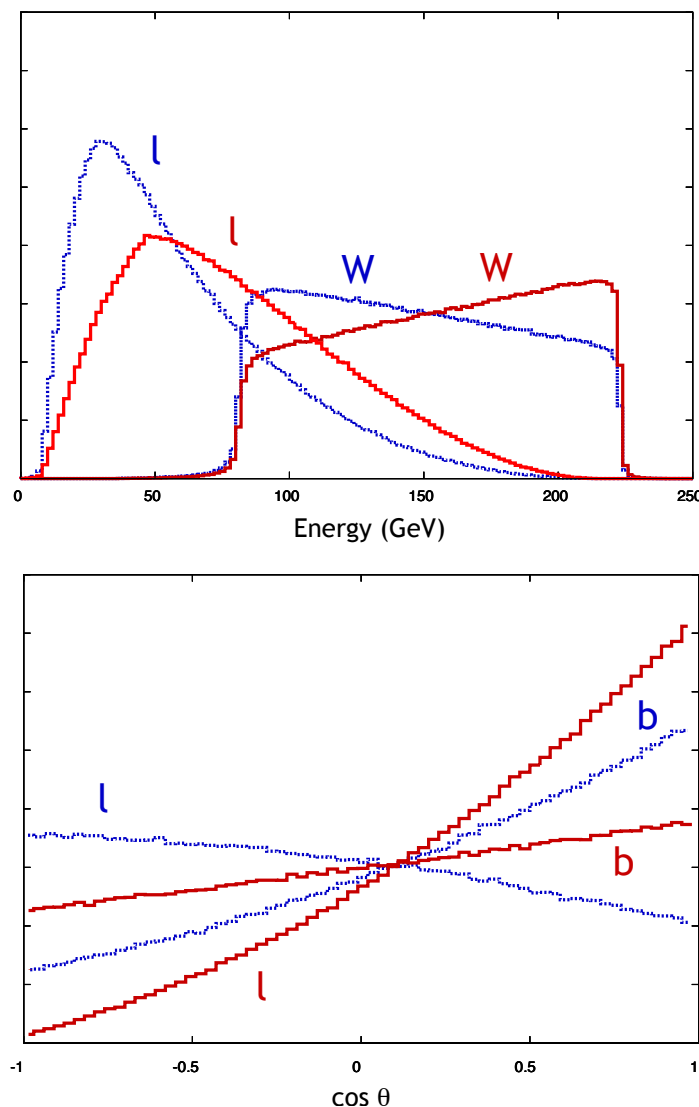
$$|M(\dots g)|^2 = \underbrace{\alpha^k |M_0|^2}_{LO} + \underbrace{\alpha^{k+1} \left[ |M_1|^2 + (M_2^\dagger M_0 + M_0^\dagger M_2) \right]}_{NLO} + \dots$$

# Back up

## 1, ILC-Spinの効果

**Figure 1.2**

Spin asymmetries in  $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}$ : For the two fully polarized beam initial state ( $e_R^-e_L^+$  - red, solid,  $e_L^-e_R^+$  - blue, dotted), the figures show: Top: the energy distributions of the  $W$  and  $\ell$  (or  $d, s$  quark). Bottom: the  $\cos\theta$  distributions of the  $b$  and  $\ell$ .



このように、スピンを変えると起こる事象の確率が変わる。(P非対称性)

見たいEventを増やしたり、Backgroundを減らしたりするのに用いられる。



# Back up 2, Pair Monitor

- Yoke

$\mu$ などを検出

- Coil + Cryostat

Coil : 磁場を発生。

Cryostat : 装置冷却

- HCAL

Jet中の中性HadronのEnergyを測定。

吸収層: ステンレス銅 (Fe)

検出層: シンチレータもしくはGas.

- ECAL

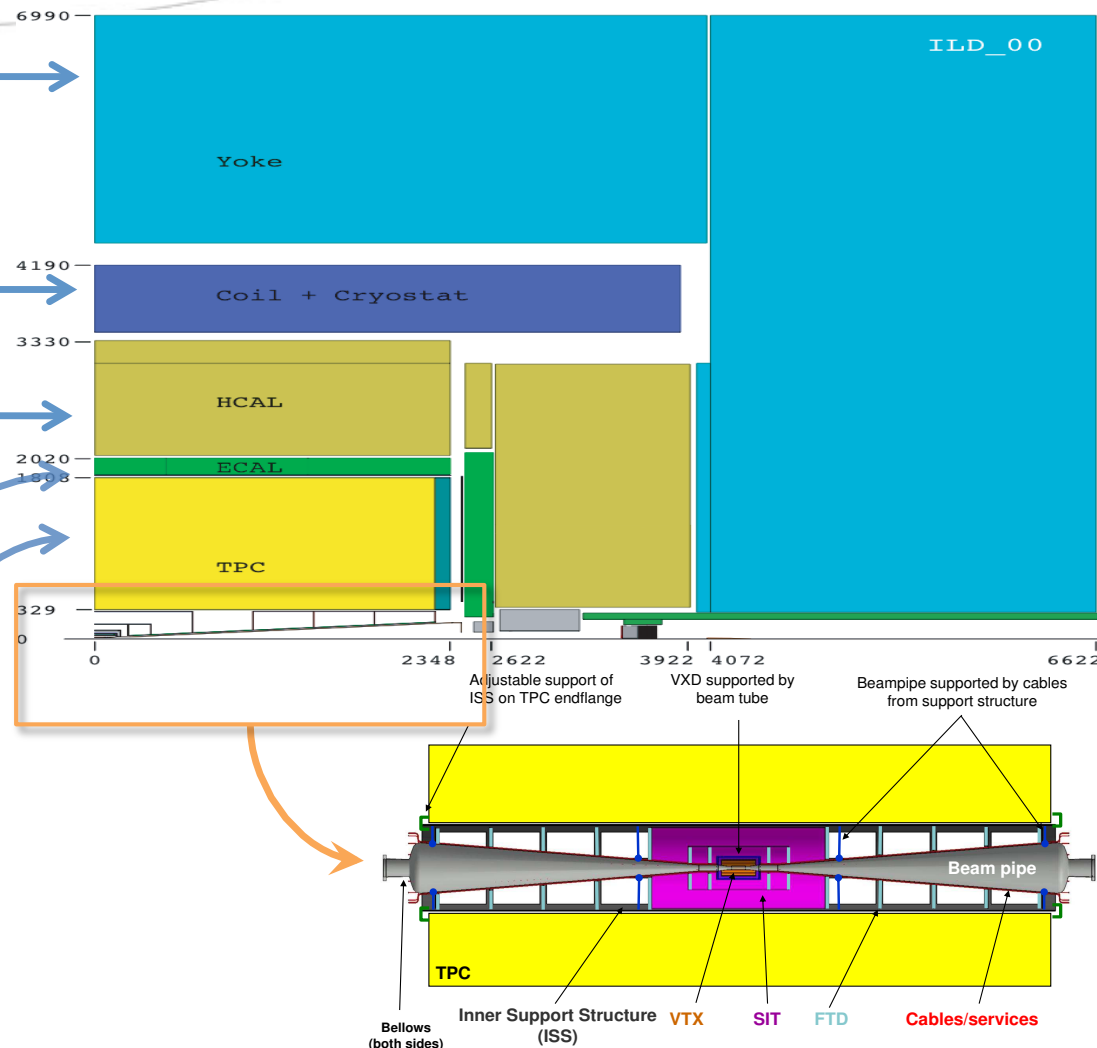
Jet中のPhotonのEnergyを測定。

吸収層: タングステン

検出層: Si, シンチレータ

- TPC

荷電粒子の飛跡を3次元的に再構成するためのガス検出器



# Back up ILC Parameter

| Centre-of-mass energy                       | $E_{CM}$           | GeV   | 200   | 230   | 250   | 350  | 500  |
|---|--------------------|---|-------|-------|-------|------|------|
| Luminosity pulse repetition rate            |                    | Hz  | 5     | 5     | 5     | 5    | 5    |
| Positron production mode                    |                    |   | 10 Hz | 10 Hz | 10 Hz | nom. | nom. |
| Estimated AC power                          | $P_{AC}$           | MW  | 114   | 119   | 122   | 121  | 163  |
| Bunch population                            | $N$                | $\times 10^{10}$                                | 2     | 2     | 2     | 2    | 2    |
| Number of bunches                           | $n_b$              |   | 1312  | 1312  | 1312  | 1312 | 1312 |
| Linac bunch interval                        | $\Delta t_b$       | ns  | 554   | 554   | 554   | 554  | 554  |
| RMS bunch length                            | $\sigma_z$         | $\mu\text{m}$                                   | 300   | 300   | 300   | 300  | 300  |
| Normalized horizontal emittance at IP       | $\gamma\epsilon_x$ | $\mu\text{m}$                                   | 10    | 10    | 10    | 10   | 10   |
| Normalized vertical emittance at IP         | $\gamma\epsilon_y$ | nm  | 35    | 35    | 35    | 35   | 35   |
| Horizontal beta function at IP              | $\beta_x^*$        | mm  | 16    | 14    | 13    | 16   | 11   |
| Vertical beta function at IP                | $\beta_y^*$        | mm  | 0.34  | 0.38  | 0.41  | 0.34 | 0.48 |
| RMS horizontal beam size at IP              | $\sigma_x^*$       | nm  | 904   | 789   | 729   | 684  | 474  |
| RMS vertical beam size at IP                | $\sigma_y^*$       | nm  | 7.8   | 7.7   | 7.7   | 5.9  | 5.9  |
| Vertical disruption parameter               | $D_y$              |   | 24.3  | 24.5  | 24.5  | 24.3 | 24.6 |
| Fractional RMS energy loss to beamstrahlung | $\delta_{BS}$      | %   | 0.65  | 0.83  | 0.97  | 1.9  | 4.5  |
| Luminosity                                  | $L$                | $\times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ | 0.56  | 0.67  | 0.75  | 1.0  | 1.8  |
| Fraction of $L$ in top 1% $E_{CM}$          | $L_{0.01}$         | %   | 91    | 89    | 87    | 77   | 58   |
| Electron polarisation                       | $P_-$              | %   | 80    | 80    | 80    | 80   | 80   |
| Positron polarisation                       | $P_+$              | %   | 30    | 30    | 30    | 30   | 30   |
| Electron relative energy spread at IP       | $\Delta p/p$       | %   | 0.20  | 0.19  | 0.19  | 0.16 | 0.13 |
| Positron relative energy spread at IP       | $\Delta p/p$       | %   | 0.19  | 0.17  | 0.15  | 0.10 | 0.07 |

# 旧ILCのパラメータ

表 4.1: ILC のビームパラメータ

| パラメータ  |            | 単位               |
|--|------------|------------------|
| 重心系エネルギー   | 500        | GeV              |
| 衝突交差角  | 14         | mrad             |
| ソレノイド磁場  | 3.5        | T                |
| 1バンチ中の粒子数  | 2          | $\times 10^{10}$ |
| 1トレイン中のバンチ数  | 2625       |                  |
| バンチ間隔  | 369        | ns               |
| リニアック繰り返し周波数                                       | 5          | Hz               |
| 規格化エミッタンス ( $\gamma\epsilon_x, \gamma\epsilon_y$ ) | (10, 0.04) | mm · mrad        |
| ベータ関数 ( $\beta_x, \beta_y$ )                       | (20, 0.4)  | mm               |
| ビームサイズ ( $\sigma_x, \sigma_y$ )                    | (639, 5.7) | nm               |
| バンチ長   | 300        | $\mu$ m          |

# Back up ILC Parameter

**Table 2.1**

Major physics processes to be studied by the ILC at various energies. The table indicates the various Standard Model reactions that will be accessed at increasing collider energies, and the major physics goals of the study of these reactions. A reaction listed at a given energy will of course be studied at all higher energies.

| Energy       | Reaction  | Physics Goal  |
|--------------|---|---|
| 91 GeV       | $e^+e^- \rightarrow Z$  | ultra-precision electroweak   |
| 160 GeV      | $e^+e^- \rightarrow WW$   | ultra-precision $W$ mass  |
| 250 GeV      | $e^+e^- \rightarrow Zh$   | precision Higgs couplings   |
| 350–400 GeV  | $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}$<br>$e^+e^- \rightarrow WW$<br>$e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}h$  | top quark mass and couplings<br>precision $W$ couplings<br>precision Higgs couplings  |
| 500 GeV      | $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$<br>$e^+e^- \rightarrow t\bar{t}h$<br>$e^+e^- \rightarrow Zh\bar{h}$<br>$e^+e^- \rightarrow \tilde{\chi}\tilde{\chi}$<br>$e^+e^- \rightarrow AH, H^+H^-$ | precision search for $Z'$<br>Higgs coupling to top<br>Higgs self-coupling<br>search for supersymmetry<br>search for extended Higgs states |
| 700–1000 GeV | $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}hh$<br>$e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}VV$<br>$e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}t\bar{t}$<br>$e^+e^- \rightarrow \tilde{t}\tilde{t}^*$                  | Higgs self-coupling<br>composite Higgs sector<br>composite Higgs and top<br>search for supersymmetry                                      |

91GeV,160GeVのBeamデータがあればシミュレーションしたい

# Back up Pair Monitor Parameter

|                                     |                 |
|-------------------------------------|-----------------|
| Hole radius (Upstream)              | 1 cm            |
| Hole radius (Downstream)            | 1.8 cm          |
| $R_{\text{outer}}$ (sensitive area) | 10 cm           |
| Thickness of sensor layer           | 0.2 ~ 0.3 mm    |
| Tilt angle                          | 7 mrad          |
| Pixel size                          | 0.4 mm × 0.4 mm |
| Total number of readout pixel       | 190000          |

# Back up LHC Parameter

The following table lists the important parameters for the LHC.

| Quantity                            | number                                   |
|-------------------------------------|--|
| Circumference                       | 26 659 m                                 |
| Dipole operating temperature        | 1.9 K (-271.3°C)                         |
| Number of magnets                   | 9593                                     |
| Number of main dipoles              | 1232                                     |
| Number of main quadrupoles          | 392                                      |
| Number of RF cavities               | 8 per beam                               |
| Nominal energy, protons             | 7 TeV                                    |
| Nominal energy, ions                | 2.76 TeV/u (*)                           |
| Peak magnetic dipole field          | 8.33 T                                   |
| Min. distance between bunches       | ~7 m                                     |
| Design luminosity                   | $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ |
| No. of bunches per proton beam      | 2808                                     |
| No. of protons per bunch (at start) | $1.1 \times 10^{11}$                     |
| Number of turns per second          | 11 245                                   |
| Number of collisions per second     | 600 million                              |

(\*) Energy per nucleon