

# ILCの崩壊点検出器 ~Vertex detector~



東北大学 加藤恵里子

# 様々な崩壊点検出器

## < 性能を決める要素 >

読み出し速度等デザインを決める重要事項

### ■ LHC

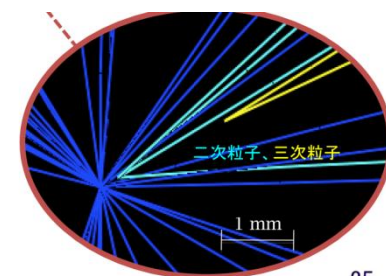
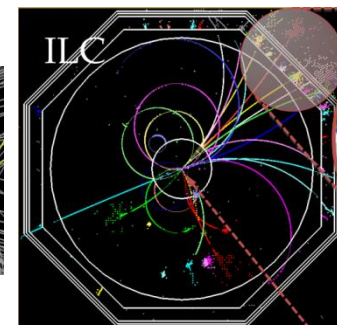
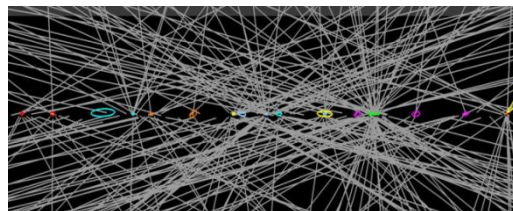
- 放射線耐性 (flavor tag)

### ■ Belle

- Trigger rate (Bの崩壊寿命差  $\sigma_{\Delta z} < 100\mu\text{m}$ )

### ■ ILC

- トレイン間200ms(5Hz)、バンチ間600ns、両方ながい。
- トリガなし。放射線制約きつくない。検出器の性能が物理で決まる。



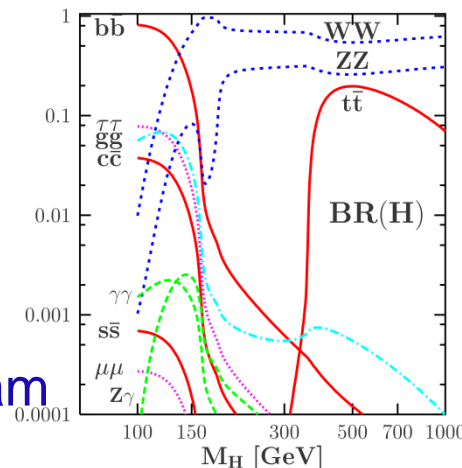
	LHC(ATLAS)	Belle	ILC
放射線耐性[1/year]	3Mrad (ion rad.)	10krad(belle2:2Mrad)	100krad
Bunch X→Trigger rate	40MHz→100kHz	500MHz→10kHz(level0)	1.7MHz→No-trigger
崩壊点分解能(a,b)	(12um,70um)	dZ方向: 28um,32um dp:22um,36um	(<5um,<10um)

# なぜ崩壊点が見たいのか



- ヒッグス発見。ヒッグスの精密測定。
  - 125GeV付近。沢山のブランチが開いている。
  - ヒッグスとの湯川結合ゲージ結合測れる。
  - ヒッグス機構の検証。 $(m \propto y_i)$

➤ ILCには最高！

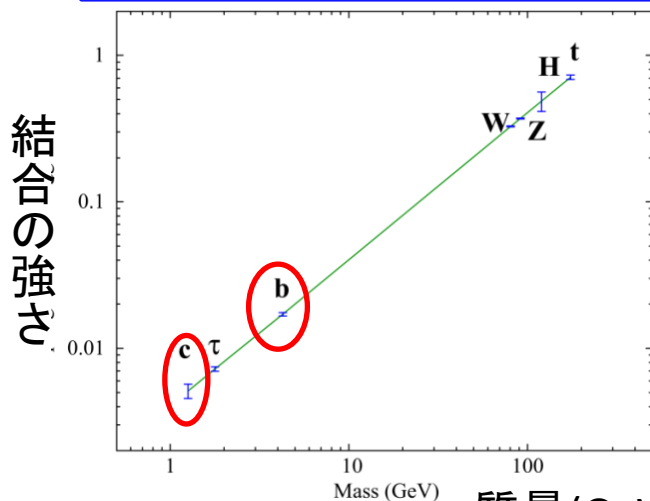


track

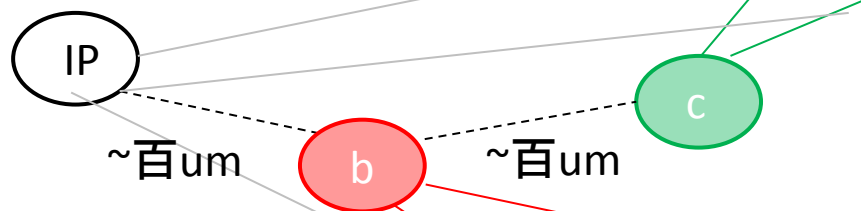
Impact param

IP

質量と結合定数の関係



フレーバータグ



軽いヒッグスはbb,ccへ崩壊する

- 高効率、高純度のフレーバー同定
- バートックスの再構成が重要

# 分解能簡単な計算

## ■ 崩壊点分解能( $\sigma_{IP} = \pi b$ )

空間分解能

3 $\mu$ m

## ■ Single point resolution(a)

- Linear fit:  $f(r) = r \cdot s + t$  (rz-平面 or 磁場無視)
- offset  $t$  の誤差  $\rightarrow$  impact parameter resolution
- 外挿距離減らしたい。空間分解能小さくしたい。

## ■ クーロン多重散乱項(b)

$$\begin{aligned} \sigma_{d0} &= r_1 \tan \omega \\ &\simeq \frac{r_1}{cp} 13.6 \text{ MeV} \sqrt{\frac{x}{x_0}} \left[ 1 + 0.038 \ln \left( \frac{x}{x_0} \right) \right] \end{aligned}$$

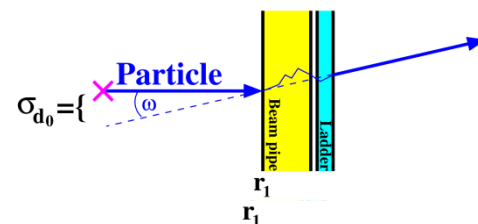
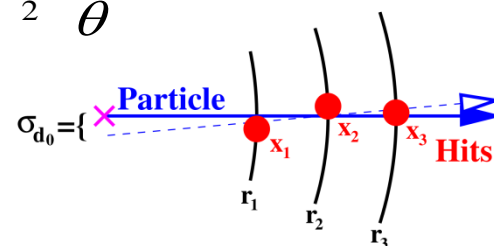
※90° 入射のとき

- Low Pは散乱大

➤ 薄く、レイヤーはIPに近づけたい。

Single point resolution クーロン多重散乱項

$$\sigma_{r\phi(rz)} = 5 \oplus \frac{10}{p\beta \sin^2 \theta} (\mu\text{m})$$



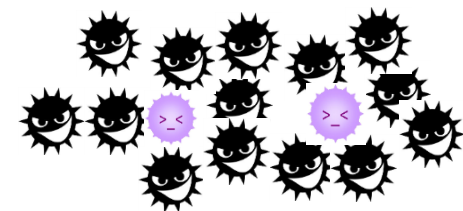
PDGより

入射荷電粒子の速度  $\beta$ 、運動量  $p$ 、  
電荷  $z$ 、通過距離  $x$ 、  
物質の厚さ  $x$ 、媒質の放射長  $x_0$

# ILCではどうい 崩壊点検出器が欲しいのか

## ■ 考慮すべきこと

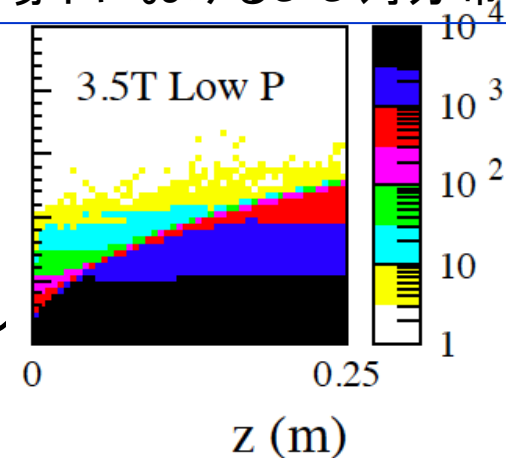
- 1.位置分解能が欲しい
- 2.クーロン多重散乱を抑えたい
- 3.トラッキングにはピクセル占有率を抑えないといけない
- 4.外挿距離短くしたい。



## ■ Geometry

- 1.サイズの小さいpixel検出器
- 2.低物質質量、レイヤーをIPに近く設置。
- 3.レイヤーをB.G分布から避ける。IPから遠ざける。
- 3.センサーのセグメンテーション細かくor多チャンネル
- 4.レイヤーIPに近づけたい。

ILD磁場下におけるe+e-対分布



# 検出器デザイン



## ■ 3ダブレット構造

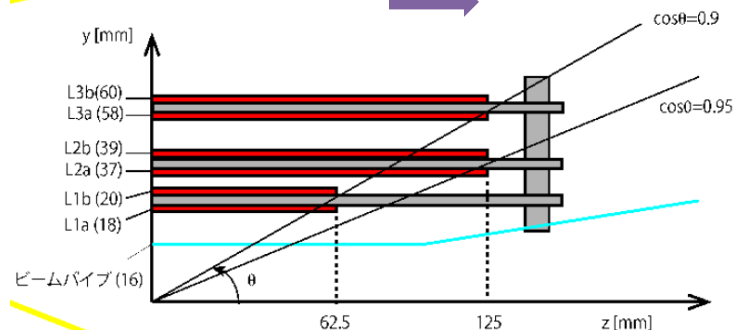
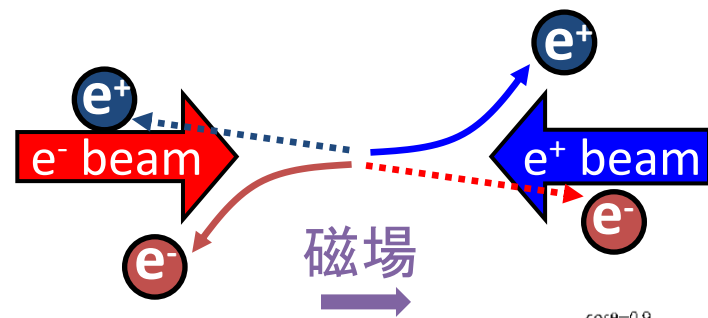
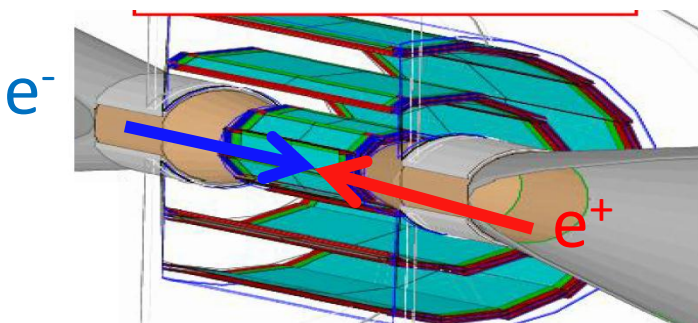
- 😊 サポート分物質量削減+ 2層目近寄れる。
- 😊 裏表のヒットの対を取ることで、low Pt BG eventを取り除ける。(ピクセル占有率 ↓)pointing accuracy

## ■ センサー層、支持層薄くする (1ladderあたり0.2% $X_0$ )

- 😊 クーロン多重散乱抑える。2mm カーボンフォーム support ladder, 50um Si ウエハー
- 😞 機械的強度弱い⇒歪み⇒幾何学的位置精度↓

## ■ 衝突点に近づける

- 😊 外挿距離減り誤差↓
- 😞 近いと放射線大↑検出器がやられる。
- 😞 近いとe+e-対BGの密度↑ピクセル占有率↑



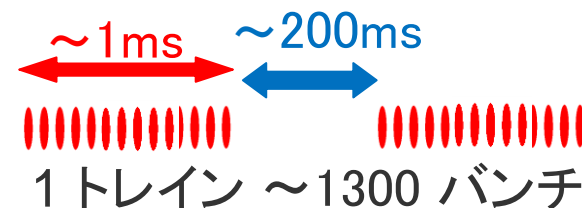
# 検出器候補



## ビーム構造

### ■ ビーム構造

- トレインの情報を200ms or 1ms で読みだす。
- 1msの場合、200msの間パワーオフ(Power Pulsing)



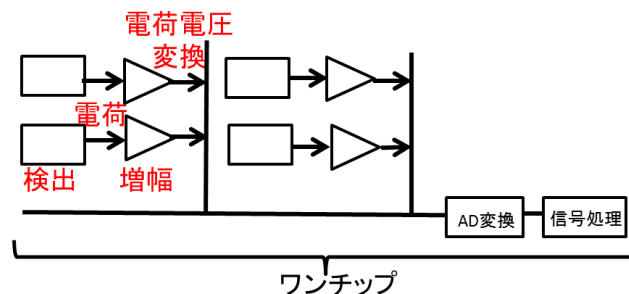
### ■ 要求

- 崩壊点分解能を満たす小さいピクセル/ピッチ。
- 薄く(Si厚さ50um)大面積にできて強度あるセンサー
- 200ms 内or 1ms 時間分割読みだし
- ピクセル占有率~1%程度
- 放射線耐性 100krad/year

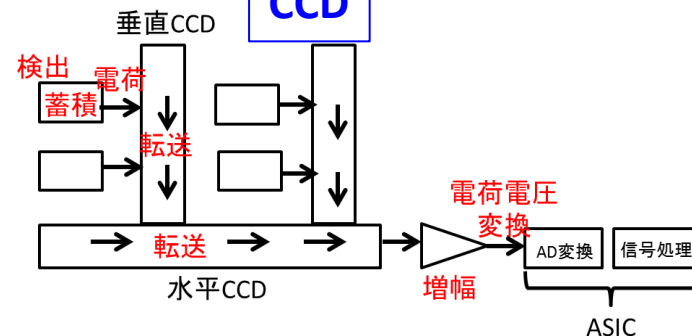
### ■ オプション(CMOS, CCD, DEPFET)

- 時間分割: MAPS(CMOS), DEPFET
- トレイン間読み出し: FPCCD(CCD)
- その他: ISIS, 3D detectors

## CMOS



## CCD



# MAPS(CMOS)

## ■ MAPS(Monolithic Active Pixel Sensor)

- Monolithic:半導体結晶基板上に回路
- Active: pixelごとに増幅。

## ■ 要求に対して

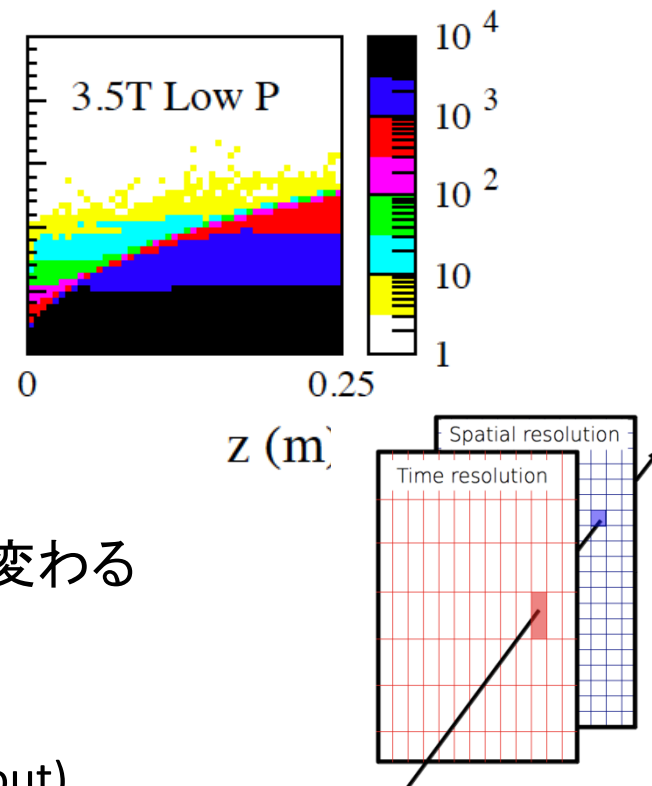
- 😊分解能満たす size $\sim(20\mu\text{m})^2$ 、厚さ $50\mu\text{m}$
- 😞hit rate(読み出し速度)、消費電力

## ■ ポイント

- Hit rate: e+e-対BG密度layer 毎にオーダー変わる

## ■ 対策

- Hit rate: 内層(内側) readout速 (pixel size)
- 内層(外側) ピクセルサイズ小 (readout)
- 消費電力: 外層: pixelサイズ大きめ、readout遅め



Layer	Specs	MIMOSA	AROM
Inner	$\lesssim 3 \mu\text{m}$	$\lesssim 3 \mu\text{m}$	$\lesssim 6 \mu\text{m}$
	25-50 $\mu\text{s}$	50 $\mu\text{s}$	10 $\mu\text{s}$
Outer	$\lesssim 5 \mu\text{m}$	$\lesssim 4 \mu\text{m}$	-
	100-200 $\mu\text{s}$	100 $\mu\text{s}$	-



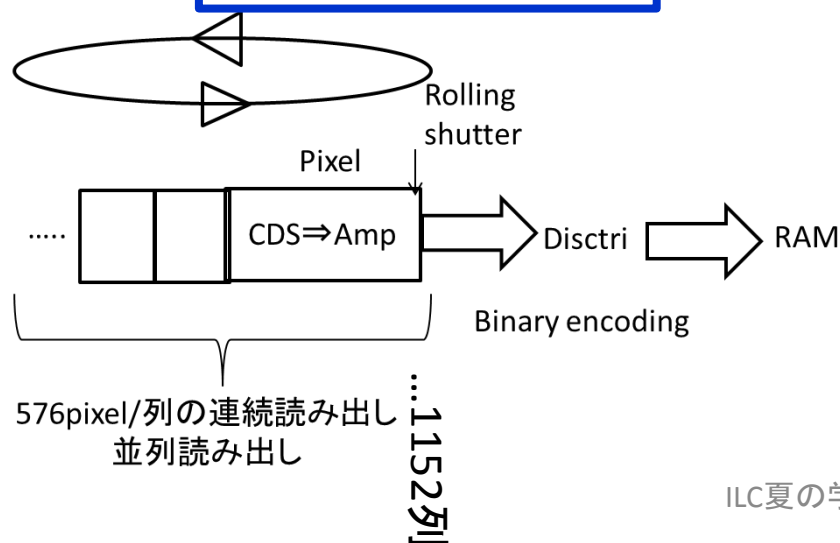
# MIMOSA仕組み



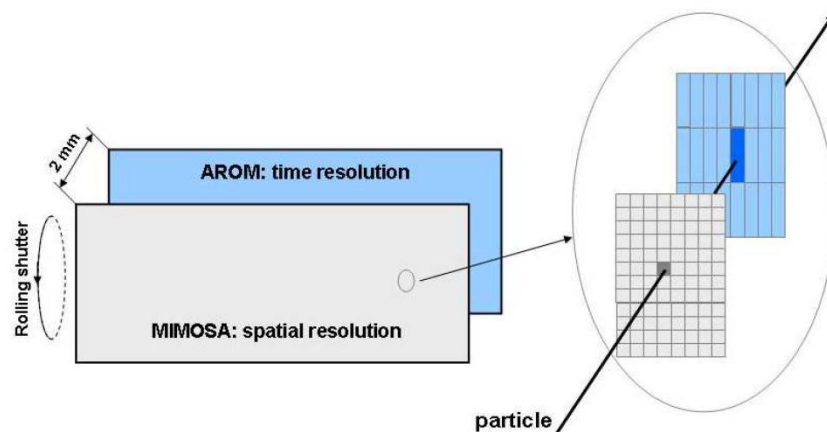
## ■ MAPSプロトタイプ(MIMOSA)仕組み

- **消費電力↓**: Rolling shutterで削減。1pixel<200ns 1152列(1列576pixel)を並列読み出し。
- **時間分解能↑**: pixel細長くして読み出し速度↑  
最内層は、1列を2分割して両面読み出しで速度↑(消費電力↑効果小)
- **空間分解能↑**: pixel小さく、読み出し速度↓

### MIMOSAの信号処理



### ラダー裏表のセンサーの関係



# FPCCDの概要

## ■ FPCCD(Fine Pixel CCD)

- トレイン間200ms読み出し。
- Size  $5 \times 5 \mu\text{m}^2$  , 50 $\mu\text{m}$  Si ウエハー、15 $\mu\text{m}$  有感領域全空乏化
- <参考>通常の小さいCCDはサイズ3 $\mu\text{m}$ 、厚さ300~500 $\mu\text{m}$ 、有感層厚さは10 $\mu\text{m}$ 以下

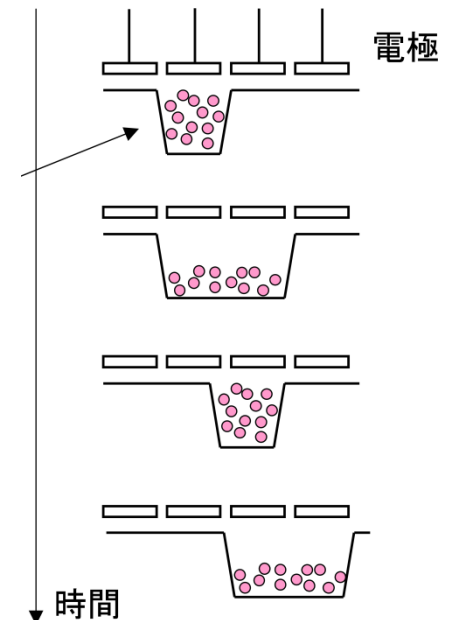
## ■ 要求に対して

- 😊 分解能満たすピクセルサイズ、厚さ50 $\mu\text{m}$
- 😞 pixel占有率、消費電力

## ■ 対策

- $5 \times 5 \mu\text{m}^2$  でピクセル占有率↓
- 2相転送方式で使用電圧数↓  
(それでも消費電力比較的大)

### バケツリレー方式



# DEPFET

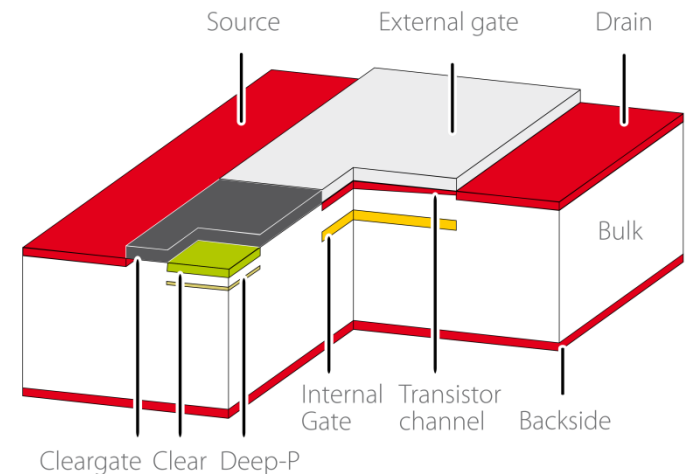
## ■ DEPFET

### ■ 要求に対して

- ☹️ Pixel size 20 $\mu\text{m}$ 角, 有感層厚さ 50 $\mu\text{m}$  全空乏化
- 😊 有感領域厚いので電荷拡散して、sharingされる影響で分解能上がる。
- (20x20x450 $\mu\text{m}$ のビームテストで空間分解能1 $\mu\text{m}$ )
- ☹️ 斜め入射BGによるpixel 占有率 $\uparrow$
- ☹️ 厚いので多重散乱 $\uparrow$
- ☹️ なかなかピクセル小 $\wedge$ 薄くできない。

### ■ Belle IIのDEPFET

- 50x75x50 $\mu\text{m}^3$
- 空間分解能10 $\mu\text{m}$ (ビームテスト)
- S/N  $\sim$ 40
- 消費電力sensor1W/ladder



# オプションの比較

## ■ DEPFET

- 😊 S/N比よい
- 😞 ピクセルを小さく・薄くは難しい。

## ■ MIMOSA

- 😊 時間分割を多くして、1TeVやno-AntiDIDなどBG変化にも対応できる。  
⇒ AROM(MIMOSA加速版)開発中。
- 😞 測定結果: 18.4um pitchで3.5um resolution ⇒ <17umへ。分解能ギリギリ。
- 😞 Efficiency 100% じゃない。
- 😞 複雑なのでちゃんとトラッキングできるかBG除去できるか分からない。

## ■ FPCCD

- 😊 空間分解能、崩壊点分解能、要求よりもはるかにいい。
- 😞 BG増えたときにピクセル占有率を減らすのに限界がある。さらにピクセルを小さくするのは難。
- 😊 S/N比よい

## ■ 一般的に、

CCD	CMOS
高感度、低雑音	一歩劣る
消費電力比較的大	消費電力小

# FPCCD崩壊点検出器の研究開発

# FPCCD崩壊点検出器の特徴

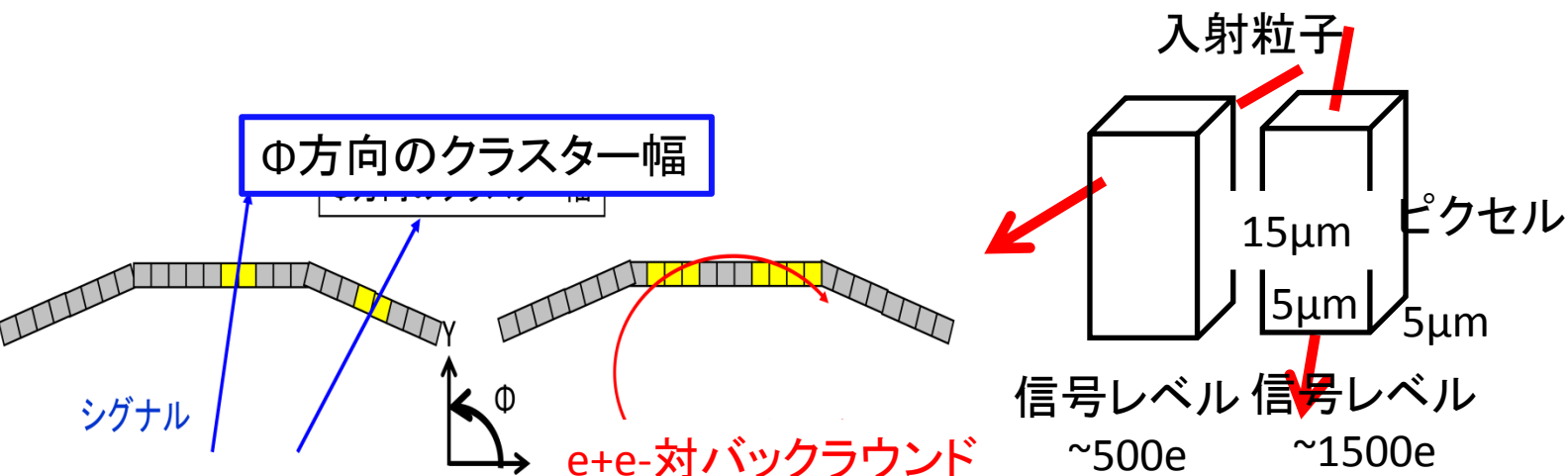
## ■ FPCCD構造 高精細ピクセル

## ■ 特徴

- ☺ 高い位置分解能( $\sigma_{R\Phi}=1\mu\text{m}$ 以下)
- ☺ ヒットクラスター形状からおおまかな入射方向が分かり、低エネルギー $e^+/e^-$ -BGの除去に使える
- ☹ ピクセルが小さいため、斜め入射粒子が生じる信号電荷が小さい。⇒低雑音読み出し回路が必要。

## 全空乏化

- ☺ 電荷拡散↓2粒子トラックの分解能力が高い。
- ☺ 電荷拡散↓pixel占有率も↓、パターン認識しやすい。



# FPCCD崩壊点検出器の特徴

## ■ FPCCD構造

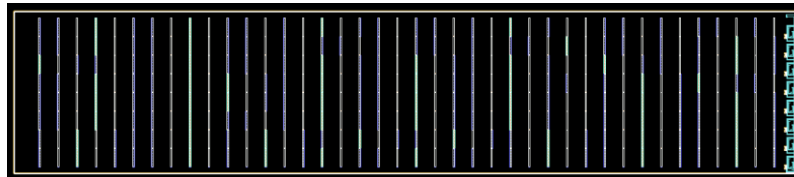
トレイン間読み出し

CCD

## ■ 特徴

- ☺ パワーサイクリングを行わない為ローレンツ力による振動の心配がない。
- ☺ 信号はトレイン間のビームの来ない時間に読み出されるため、ビームから発生する高周波ノイズの影響(EMI)を全く受けない
- ☺ センサーは、上に回路とか乗せないなので、大型ウエハーの生産が比較的容易(歩留りがよい)

有感領域: 12.3x62.4mm<sup>2</sup>    大型ウエハー

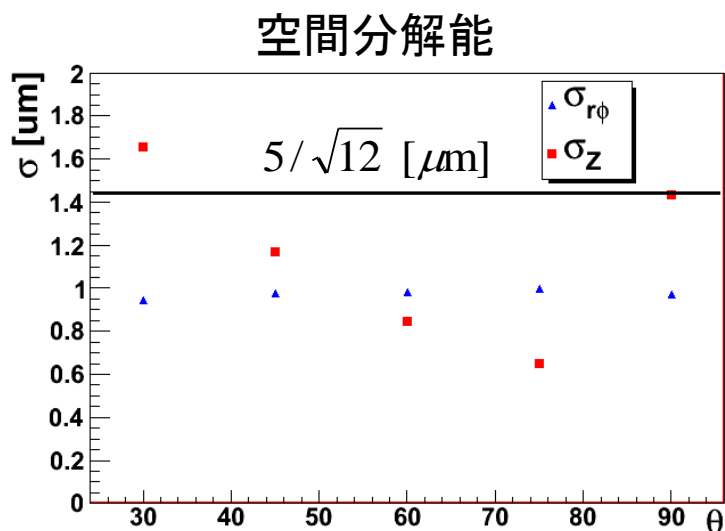


# FPCCDに期待される性能 (Ecm500GeV)

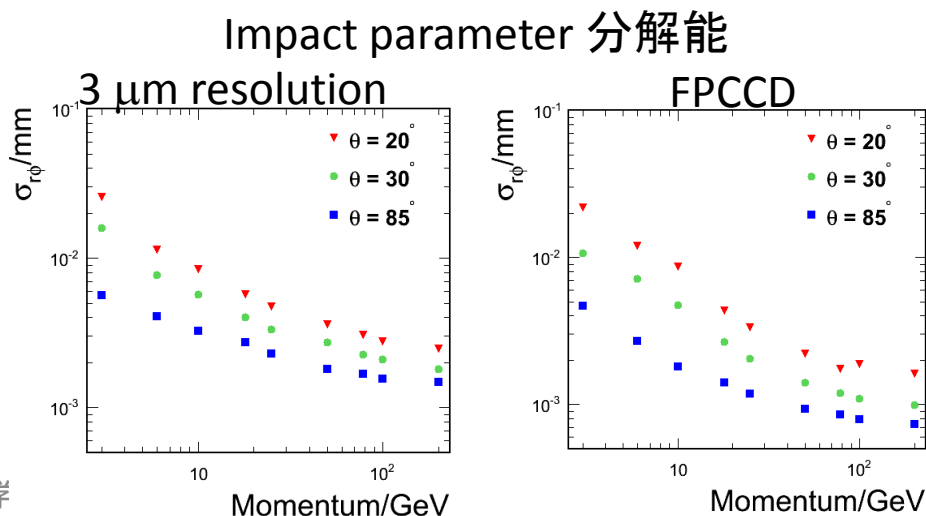
## ■ FPCCDの性能

- ピクセル占有率、最内層3% 2層目1.7%
- 空間分解能3 $\mu\text{m}$ の要求大きく下回る。
- 特に高い運動量領域で崩壊点分解能大きく向上している

⇒詳しくは東北大学、釜井氏のトークで



.C夏の学





# FPCCD検出器の要求性能

## ■ 稼働環境

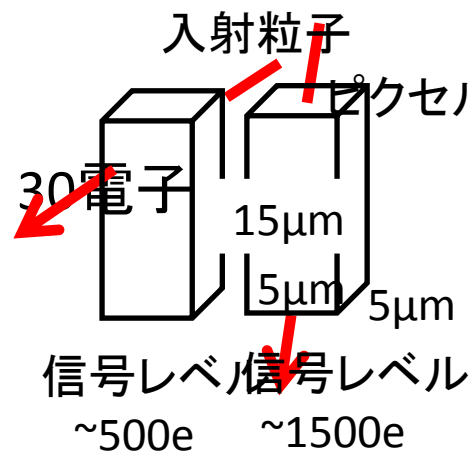
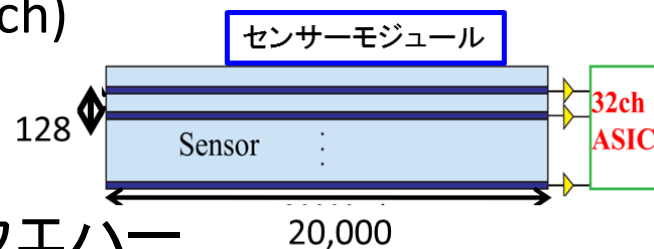
- 放射線耐性(CTE)向上のため、 $-40^{\circ}\text{C}$ 冷却運転。この温度を保つのに総消費電力 $<100\text{W}$
- 高速化の為、多チャンネル読み出し(6000ch)
- 放射線耐性 $100\text{krad/year}$

## ■ CCD

- $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ ,  $15 \mu\text{m}$ 有感領域全空乏化, $50 \mu\text{m}$ ウエハー
- ノイズ 30電子
- 消費電力 $13\text{mW/ch}$

## ■ ASIC

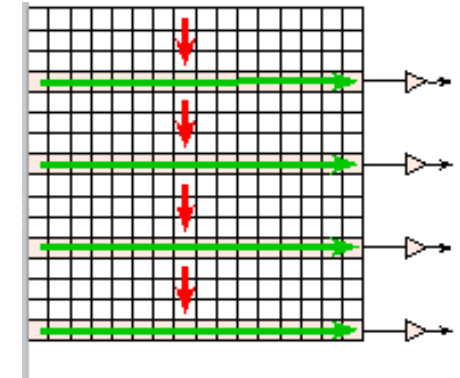
- 読み出し速度 $>10\text{Mpix/s}$
- ASICの入力信号の測定精度(ADCの精度+ノイズ) $<30$ 電子
- 消費電力 $<6\text{mW/ch}$



# CCD開発

## ■ 浜松ホトニクス(プロトタイプ作成)

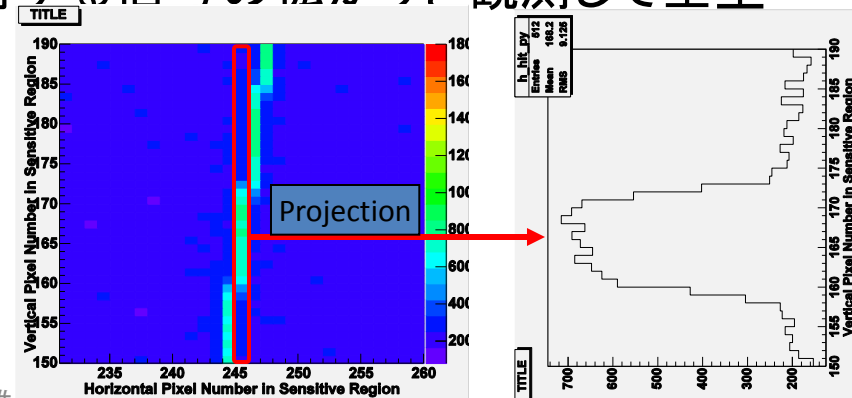
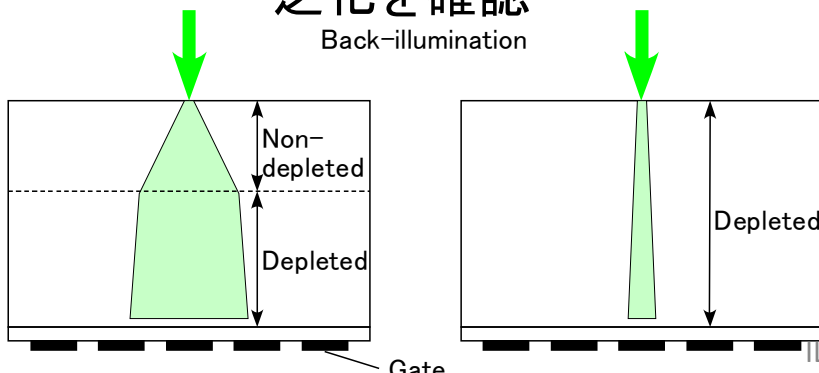
- 50um Si ウエハー, 15um/24um有感領域全空乏化
- 読み出し4ch
- Pixel size: 12, 9.6, 8um角OK → 6um角へ
- 水平転送レジスターも有感であることを確認



## ■ 全空乏化チェック

- 表から照射すると電極が邪魔。粒子反応してしまうので背面照射
- 背面からエッチングして薄く。
- 線状にフォーカスしたレーザーに対する信号の拡がりを観測して全空乏化を確認

Back-illumination



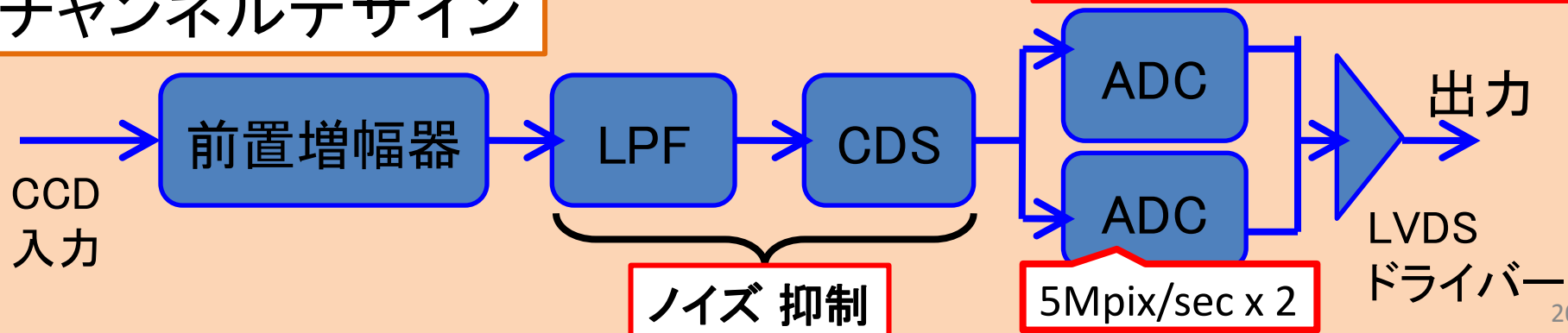
# ASIC開発

# ASICデザインの基本方針

- 消費電力 < 6mW/ch
  - 読み出し回路での主な消費電力源はADC
  - 電荷再分配型ADCを使用
- 読み出し速度 > 10 Mピクセル/s
  - 5Mピクセル/sのADCを二つ用いる。
- 入力信号の測定精度 < 30電子相当
  - ノイズ: ローパスフィルタ(LPF)、相関二重サンプリング(CDS)をもちいる。
  - AD変換: 多bitADC (5bit以上)

電荷再分配型 ADC  
(低消費電力 & 比較的高速)

## 1チャンネルデザイン

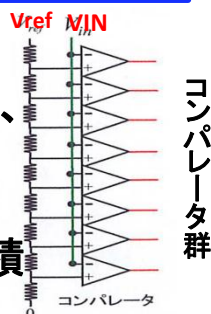


# ADCデザイン

## ■ ADCの種類

- Flash ADC, SAR (逐次比較型),  $\Delta\Sigma$  etc..

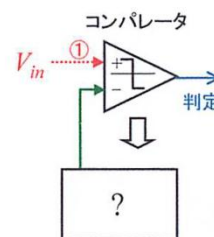
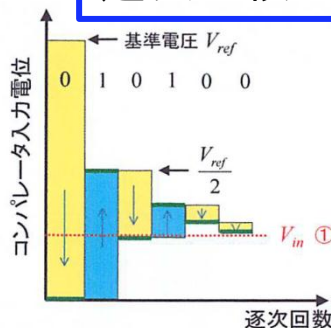
Flash ADC



参照電圧たくさん用意し、  
一度に比較。  
高速、低分解能  
高消費電力、高回路面積

コンパレータ群

逐次比較型ADC



バイナリ探索  
比較的高速、高分解能

- 分解能 × サンプルング速度で考える。

## ■ 今の仕様

- 10Mpixel/s, 1signalに10 bit使う変換
- 100MHz のCKのコンパレータが必要!! 高速! (100ns周期)
- 高分解能、高速サンプルングレート、低ノイズ、低消費電力全部満たすのは結構大変。

# 電荷再分配型ADC

## ■ 電荷再分配型ADC

- キャパシタで生じた電圧/電荷を利用した逐次比較型ADC(切り崩し型)
- 比較結果によって基準電荷の足し引きを決める。(電荷再分配)

## ■ 低消費電力

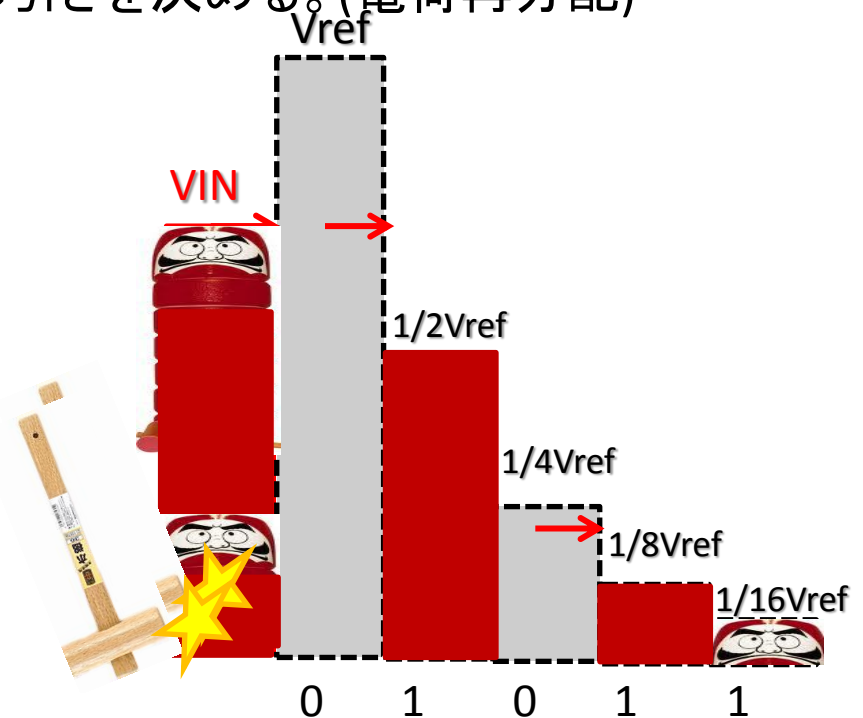
- 逐次比較→コンパレータ1個

## ■ 高精度

- バイナリ探索

## ■ 読み出し速度(サンプリングレート)

- 要求性能を満す程度まで実現可



## ■ し・か・し！！(他のADC,回路も含めて)

- 予期せぬ寄生容量、スイッチのノイズなど抑制しないとイケない。
- 回路自身を出す様々なノイズの影響なども考えないとイケない。

➤ 実機での評価、詳細なシミュレーション検証が重要。

# 試作開発状況

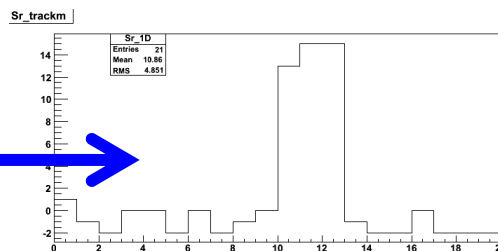
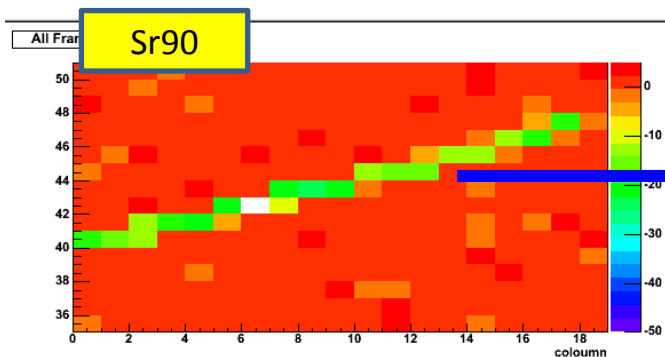
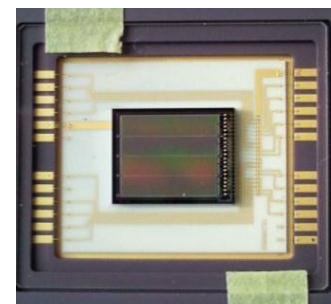
## ■ 試作読み出し回路

- 1,2次試作では、読み出し速度、ノイズに焦点。クリア
- 3次試作では、さらに消費電力対策。高速動作の安定化、回路の放射線耐性の対策も追加。

試作回路	速度[Mpix/s]	ノイズ[電子]	入力変換精度[電子相当]	消費電力[mW/ch]
要求性能	10	合わせて30電子相当以下		6
一次試作	1.5 <span style="color:red">✗</span>	40	<span style="color:red">✗</span> 50	13 @1.5Mpix/s <span style="color:red">✗</span>
二次試作	10 <span style="color:red">○</span>	6	<span style="color:red">○</span> 15	30.8@10Mpix/s <span style="color:red">✗</span>
三次試作	10 <span style="color:red">○</span>	二次と同程度	<span style="color:red">○</span> 1.2	5.4@10Mpix/s <span style="color:red">○</span>

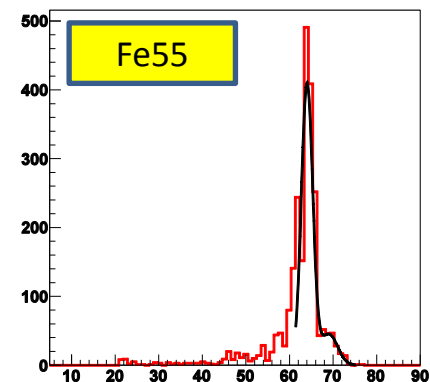
# CCD+ASICの測定結果

- 実験結果(12x12um<sup>2</sup> 有感領域15um CCD)
- Sr90(~10°C, 2.5Mpix/s)
  - 2MeVβ線
  - 隣のpixelへの染み出し見られない。
- Fe55(-40°C, 2.5Mpix/s)
  - S/N ( $\equiv 5.9\text{KeV\_peak\_mean}/\text{pedestal } \sigma$ )=46.5
  - 薄く入小さいピクセルでも非常に高いS/Nが得られた。
  - エネルギー分解能140eV



ILC夏の学校(武雄温泉)

fe55 spectrum

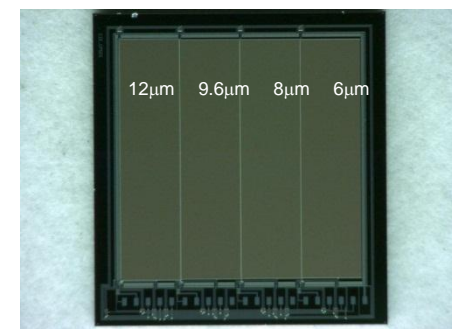




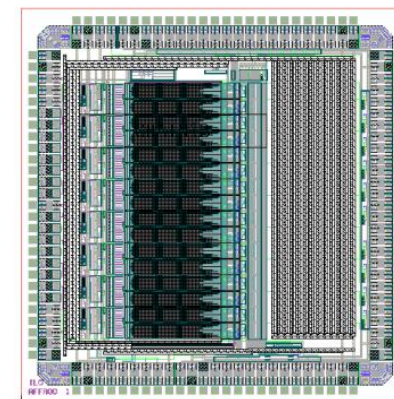
# FPCCDの今後とまとめ



- シミュレーションソフトの開発
  - トラッキングソフトの開発
  - FPCCDを用いたFlavor tagの性能評価
  - FPCCDを用いたBenchmark processの解析
  - 他のピクセルサイズの検証 他
- CCD
  - 大型ウエハー
  - ピクセルサイズ小型化
  - 放射線耐性の評価(ビームテスト)
- ASIC
  - 3次試作回路の評価
  - 放射線耐性評価
- CCD+ASIC
  - ビームテストでFPCCDの分解能を求める！！
  - 他

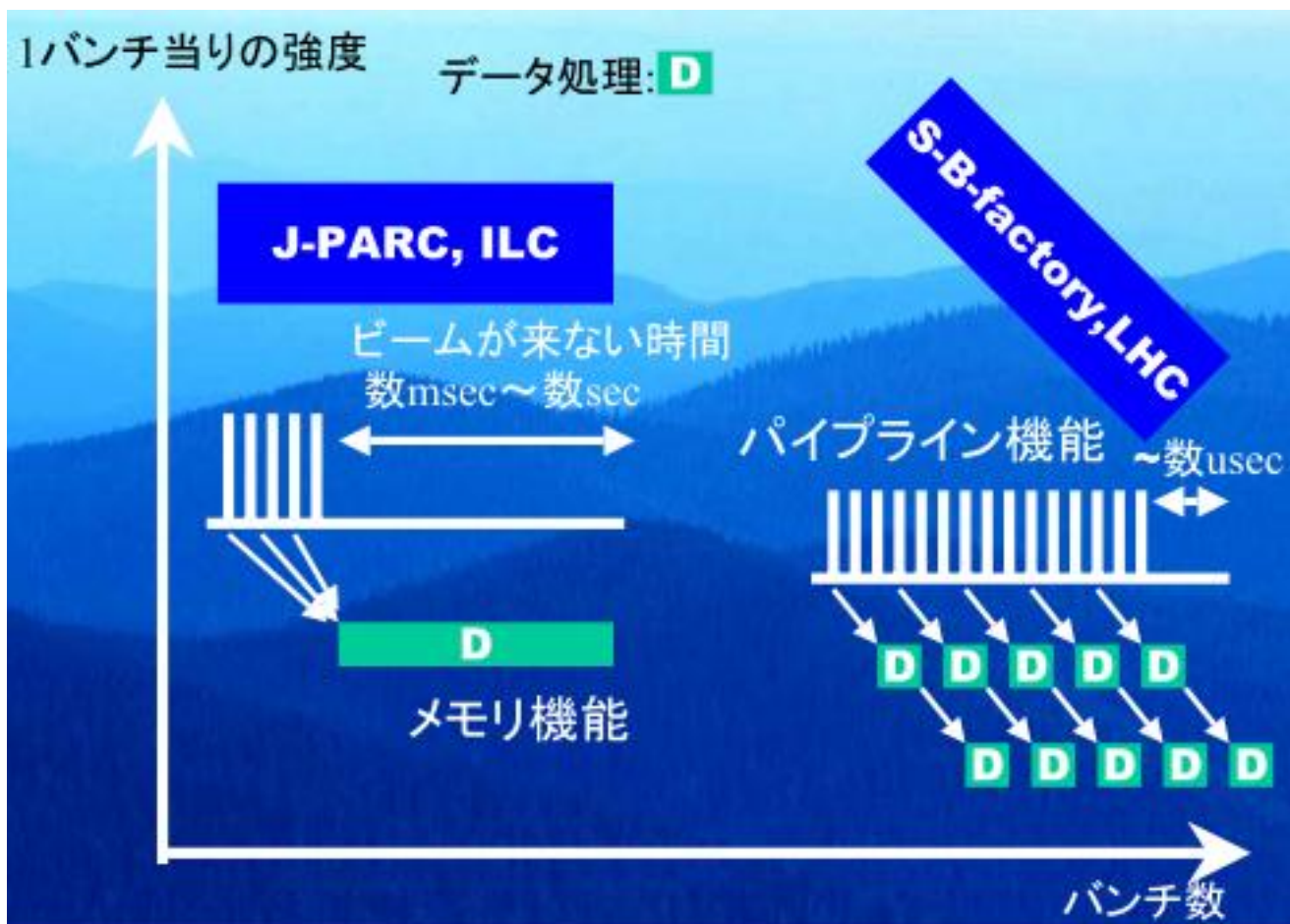


三次試作回路



# BACKUP

# 各実験のビーム構造



■ Tanaka Shinji-sanのスライドより

# Belle/BelleIIのトリガレート

## ■ Veto

- Bhabha, radiative bhabhaをvetoするトリガ。
- ただし、lumi measに用いるため、1/10 countするなどの違いはイベントごとに調整している。

## ■ トリガアルゴリズム

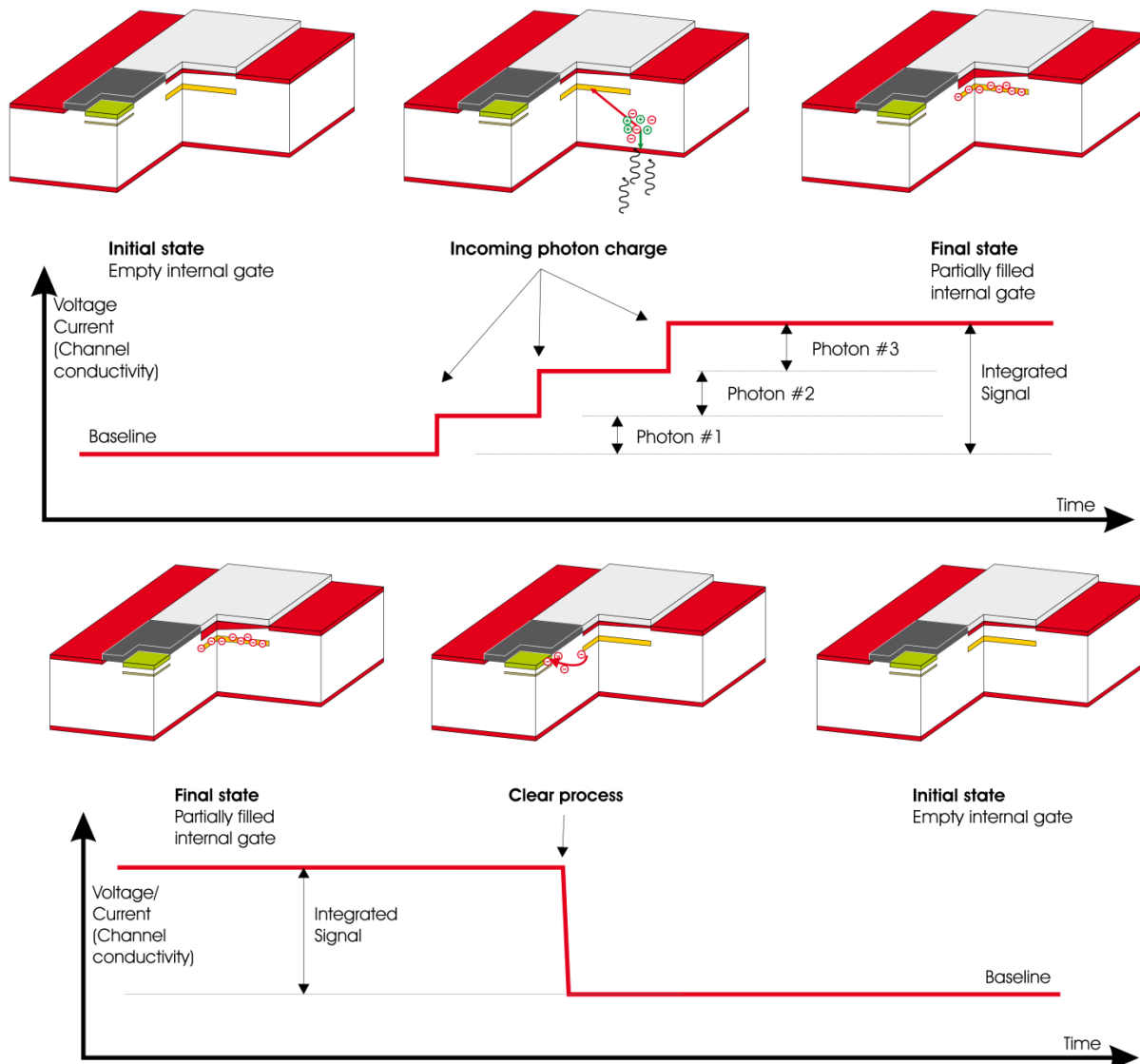
- CDCによる荷電トラック2本以上、ECALエネルギートリガ(4GeV以上)2本
- ハドロンイベントに対しては、3本, クラスタ4個を要求。
- パイプライン方式ではないので、不感(dead)時間の割合が長い。  
(belle2pipeline方式)

## ■ Trigger system

- Level0: TOF+CDC global trigger decision 600nsホールド可
- Level1: 追加で+CDC+track info+ECL 2.5us後判定(これより前はAD変換していない)

Trigger	Latency(belle1/Belle2)	Rate(belle1/Belle2)	Efficiency
Level 0	600ns/	10kHz/なし	
Level 1	2.5us/	1kHz/	99%

# DEPFETの仕組み



# DEPFET フレームレート

## ■ For Belle-II

- Half ladder size: 37.5mm
- Pixel size (z): 50 $\mu$ m(layer1), 75 $\mu$ m(layer2)
- Sampling rate: 80ns
- Multiplex: 4 fold
- Frame rate =  $(80\text{ns} \times 37.5/0.075)/4 = 10\mu\text{s}$

## ■ For ILC

- Half ladder size: 62.5mm
- Pixel size (z): 25 $\mu$ m
- Sampling rate: 80ns (仮定)
- Multiplex: 2 fold
- Frame rate =  $(80\text{ns} \times 62.5/0.025)/2 = 100\mu\text{s}$

- ILCで要求されるフレームレートは25 $\mu$ sなので、Belle-IIで達成された速度のさらに4倍高速化が要求される

# DEPFETの特徴

## ■ 空間分解能

- ビームテストを行なった450 $\mu\text{m}$ 厚のセンサーの場合、電子が空乏層を450 $\mu\text{m}$ ドリフトする間に横方向に11 $\mu\text{m}$ だけdiffusionで拡がるため(1kV/cmの場合)、charge sharingによって高い分解能が出せる
- センサーの厚みが50 $\mu\text{m}$ になると、横方向の拡がり450 $\mu\text{m}$ の場合の1/3 (4 $\mu\text{m}$ 以下) になり、ピクセルサイズが25 $\mu\text{m}$ では十分な分解能 (ILDの要求は $\sigma < 3\mu\text{m}$ ) が出るかは自明ではない

## ■ 消費電力

- Belle-II用の設計値をそのままILCのジオメトリ(16mm~60mm, 5層)に焼きなおすと1.4kW
  - パワーパルシングで1/100になり、4倍高速(内層: 100 $\mu\text{s}$ →25 $\mu\text{s}$ 、外層: 37.5mm→125mm)で4倍になるとすると  $1400 \times 4 / 100 = 56\text{W}$
- 大して低消費電力とは言えない

# BelleII のDEPFET

## ■ ピクセル・サイズ

- ILC: 分解能達成にはピクセルを小さくする必要がある。
- Belle-II: 1GeV以下のトラックが多く、ビーム・パイプでの多重散乱が優勢なのでピクセルを大きくできる
  - ILC: 25 x 25  $\mu\text{m}^2$  , Belle-II: 50 x 75  $\mu\text{m}^2$

## ■ 読み出し時間:

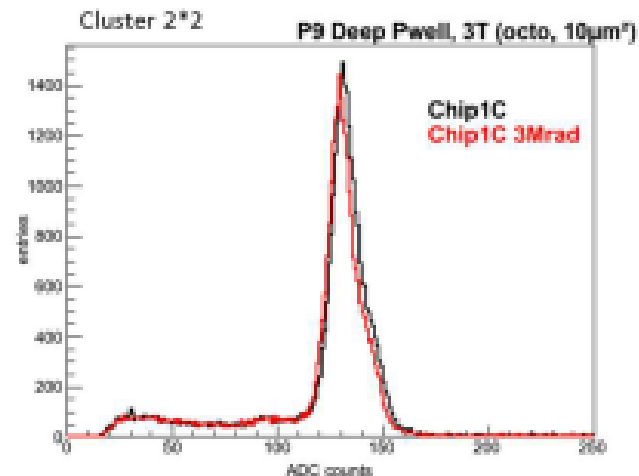
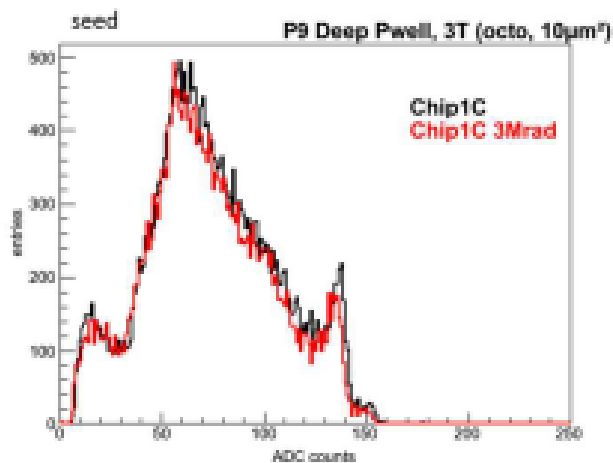
- ILCの方がピクセル・サイズが小さくアクセプタンスが大きい
- ILC: 25 ns/row, Belle-II: 80 ns/row
  - ILCの方が4倍速にしないといけない。



# MIMOSA

## ■ Fe55

– Outer layer 0.18um process test



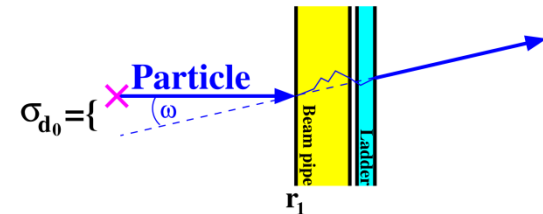
まだかなりnoisy

# 分解能の式

## ■ Single point resolution

$$\sigma_{d0} = \frac{\sqrt{\sum (\sum r_i^2 - r_i \sum r_k)^2}}{n \sum r_i^2 - \sum r_i \sum r_k} \sigma_{SP} = a$$

## ■ クーロン多重散乱項



$$\sigma_{d0} = r_1 \tan \omega$$

$$\approx \frac{r_1}{cp} 13.6 \text{ MeV} \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[ 1 + 0.038 \ln \left( \frac{x}{X_0} \right) \right]$$

$$\sigma_{d0} = \frac{r_1}{\sin \theta} \tan \omega$$

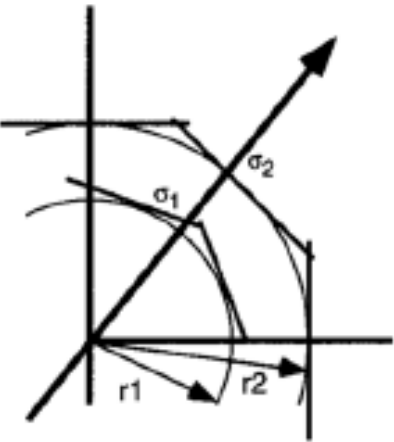
入射角  $\neq 90^\circ$   $r_1 \rightarrow \frac{r_1}{\sin \theta}$  and  $x \rightarrow \frac{x}{\sin \theta}$

$$\approx \frac{1}{cp \sin \theta \sqrt{\sin \theta}} \underbrace{r_1 13.6 \text{ MeV} \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[ 1 + 0.038 \ln \left( \frac{x}{\sin \theta X_0} \right) \right]}_b$$

# 分解能の式

## Impact Parameter Resolution

### Without Multiple Scattering



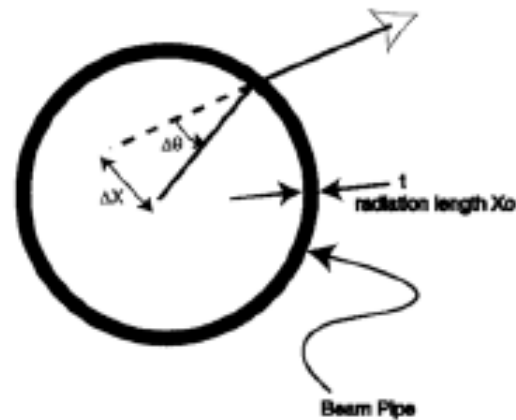
$$\sigma_I^2 = \sigma_1^2 + \frac{r_1^2}{(r_2^2 - r_1^2)} \sigma_2^2$$

So we want:

-small  $r_1$ , large  $r_2$

-small  $\sigma_1, \sigma_2$

### With Multiple Scattering



$$\Delta\theta \propto \frac{15}{P\beta} \sqrt{\frac{t}{X_0}}$$

$$\Delta X \propto \frac{r}{P\beta} \sqrt{\frac{t}{X_0}} \approx \frac{r}{P\beta} \sqrt{tZ^2\rho}$$

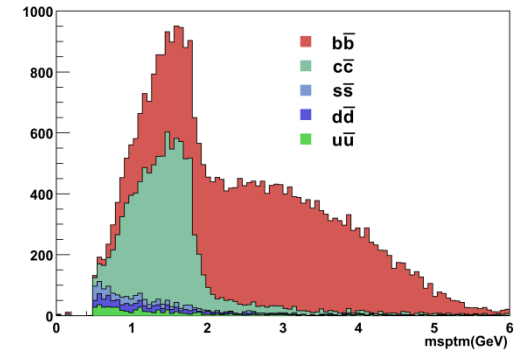
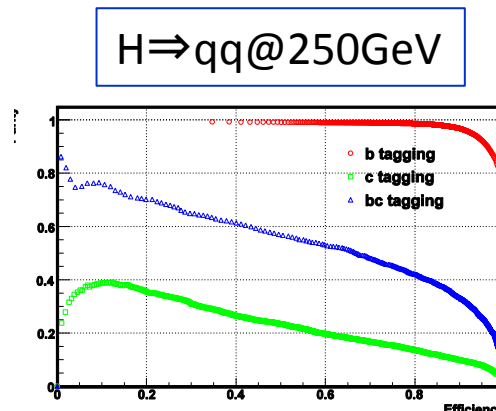
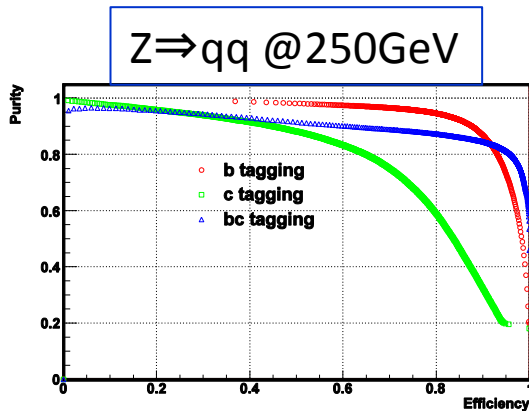
# 欲しい崩壊点分解能



## ■ フレーバータグの仕方

- 寿命( $D(c\tau)=123\mu\text{m}$  , $B(c\tau)=459\mu\text{m}$ )->impact parameter
- 質量再構成( $D(\text{mass})=1.87\text{GeV}$  , $B(\text{mass})=5.28\text{GeV}$ )
- IPから離れた荷電粒子の数( $b>c>uds$ )

## ■ フレーバータグの効率と純度



崩壊点分解能

Single point resolution

クーロン多重散乱項

空間分解能  
3um

$$\sigma_{r\phi} = 5 \oplus \frac{10}{p\beta \sin^2 \theta} (\mu\text{m})$$

$$\sigma_{rz} = 5 \oplus \frac{10}{p\beta \sin^2 \theta} (\mu\text{m})$$

# MIMOSA開発状況

## ■ 開発状況

- 測定結果: 18.4 $\mu\text{m}$  pitch 98% efficiency single point resolution 3.5 $\mu\text{m}$
- 17 $\mu\text{m}$  以下のpitchの作成。

## ■ 思想を実証: 外層からexpolateしたら、hit rate下がる(?)

- BGありでTracking efficiency の見積もりをする必要がある。

