

ILC実験のための崩壊点検出器 FPCCDの中性子耐性評価と改善

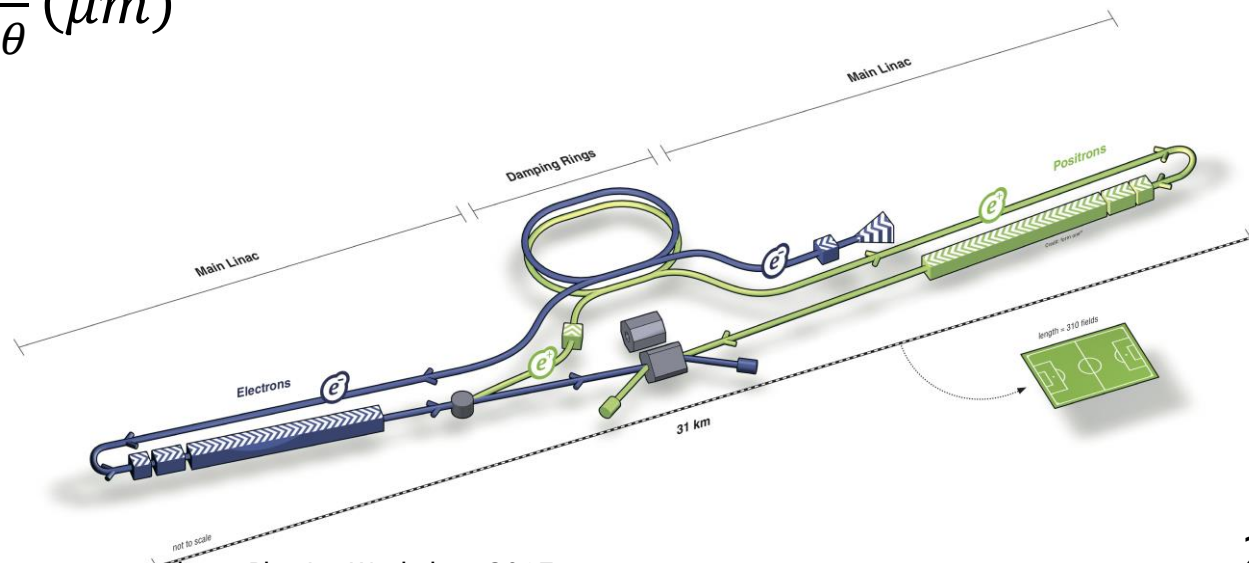
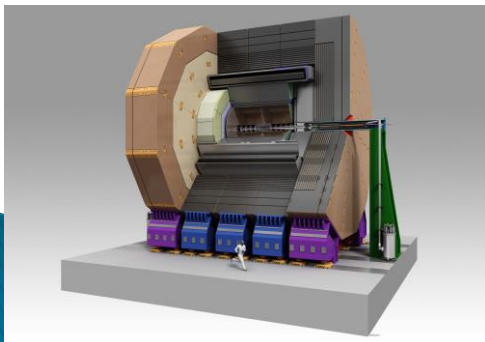
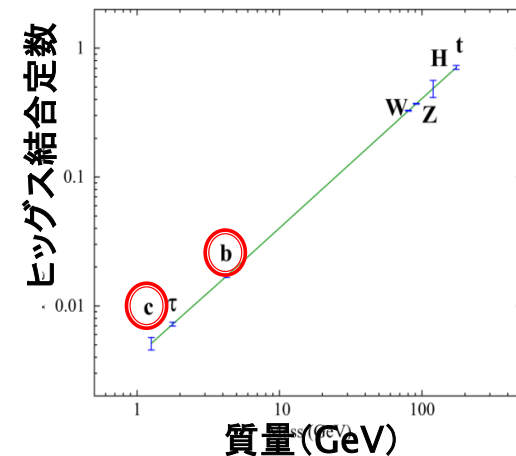
2017年10月31日 Flavor Physics Workshop 2017

東北大学 博士1年 村井峻亮
on behalf of FPCCD group

国際リニアコライダー(ILC)実験

- ▶ e^+e^- 衝突型の線型加速器
 - 重心系エネルギー: 250GeV(→500GeV, 1TeV)
- ▶ 主な目的: ヒッグスの結合定数の測定
 - b,cクォークの識別→崩壊点検出利用
- ▶ 要求される衝突径数分解能
 - $\sigma \leq 5 \oplus \frac{10}{p\beta \sin^{3/2} \theta} (\mu m)$

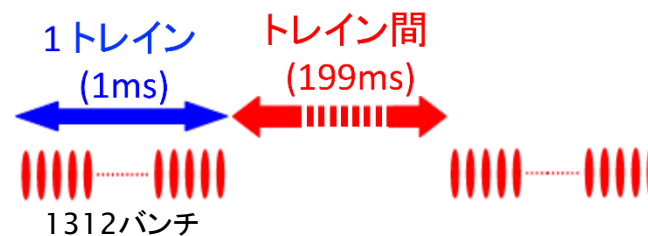
質量と結合定数の関係



ILCにおける崩壊点検出器

- ▶ 正確なトラッキングのためにピクセル占有率数%以下が要求される
 - 通常サイズ($25\mu\text{m} \times 25\mu\text{m}$)のピクセル検出器で1トレイン信号を蓄積すると、最内層(半径1.6cm)で占有率が10%以上

- ▶ 占有率を下げる2つの方法
 - ① 1トレイン中に何回も読み出す
 - ② ピクセルサイズを小さくする



ILCのビーム構造

②を採用したのが



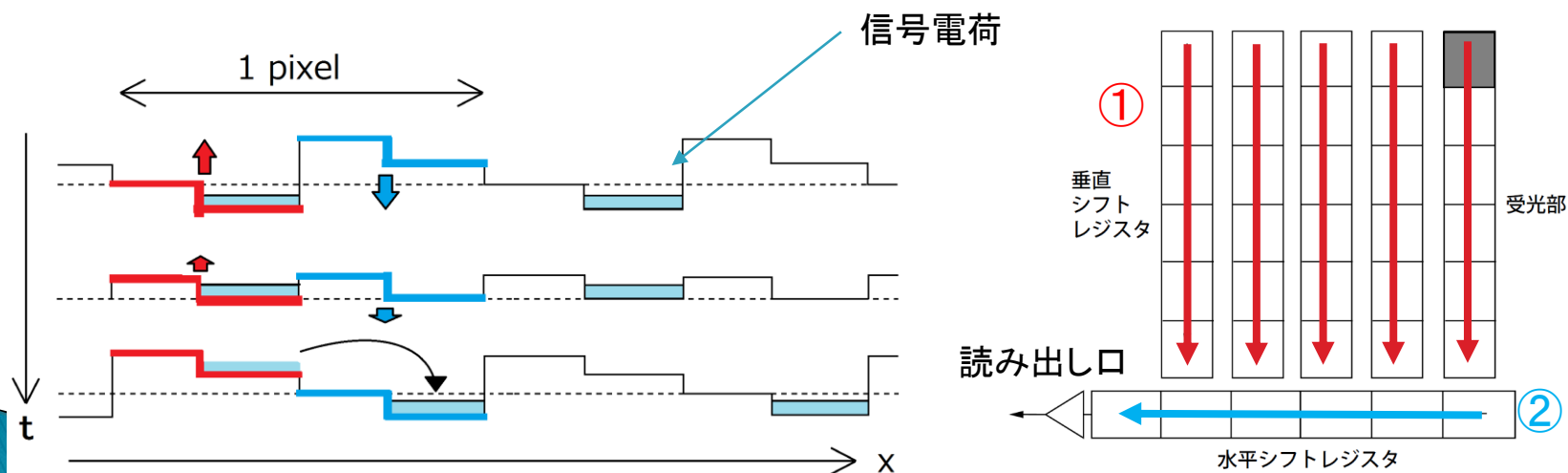
Fine Pixel CCD
= FPCCD

ピクセルサイズ
 $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ で
ピクセル占有率~数%
を達成!

CCDセンサー

▶ CCD (charge coupled device)

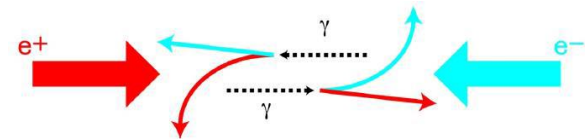
- 一般的にビデオカメラ、デジタルカメラなどに使用されているイメージセンサー
- 半導体(シリコン)のピクセル検出器でMOS素子が並んでできている
- 1つの読み出し口に対してピクセルが複数つながっていて、電荷をピクセル内をバケツリレーのように転送させることにより信号を読み出す



電荷転送時のポテンシャル図

CCDの概要図

放射線ダメージ



ペアバックグラウンド

▶ ILCでの放射線 (1312bunch, 0.5×10^7 sec, $E_{CM} = 500$ GeV)

- ペアバックグラウンド: 2.07×10^{11} e / cm^2 / year
- ビームダンプからの中性子: 9.25×10^8 1MeVn_{eq} / cm^2 / year

▶ 放射線によるCCDへの主な影響

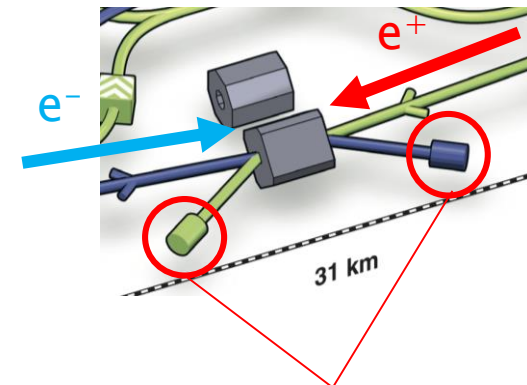
- バルクダメージ - シリコン原子が動くことによる格子欠陥
 - Non-ionizing energy loss(NIEL): 放射線の物質内での損失エネルギーのうち、バルクダメージに使用されたエネルギー
- サーフフェイスダメージ - 放射線による酸化膜周辺での電離

▶ NIEL仮定

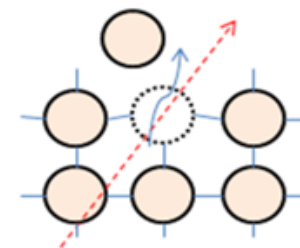
- 半導体のバルクダメージはNIELに比例すると仮定
- 30MeV電子のNIELダメージは1MeV中性子の1/16
 - 2.07×10^{11} e / cm^2 / year → 1.29×10^{10} 1MeVn_{eq} / cm^2 / year

▶ 必要な放射線耐性

- 3年間の使用と安全係数3
- → 1.24×10^{11} 1MeVn_{eq} / cm^2



ビームダンプ



格子欠陥イメージ図 5

電荷転送効率の悪化

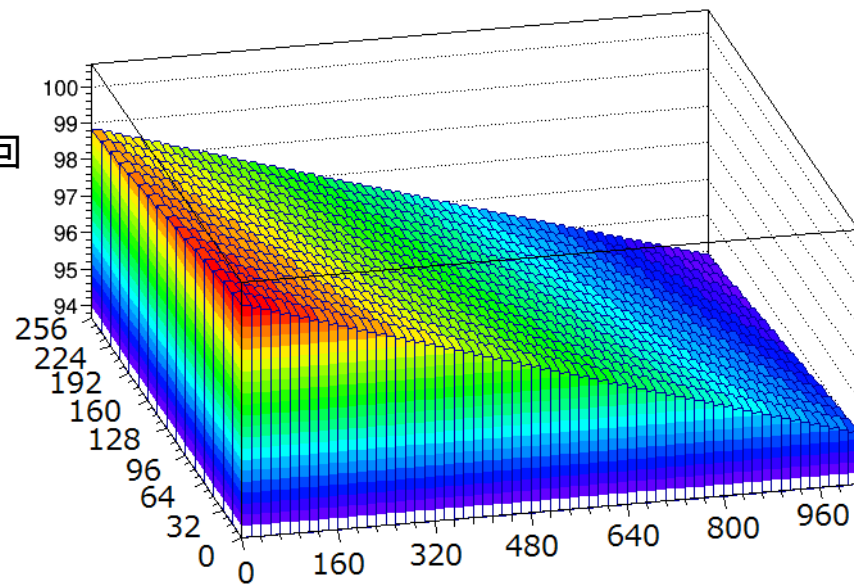
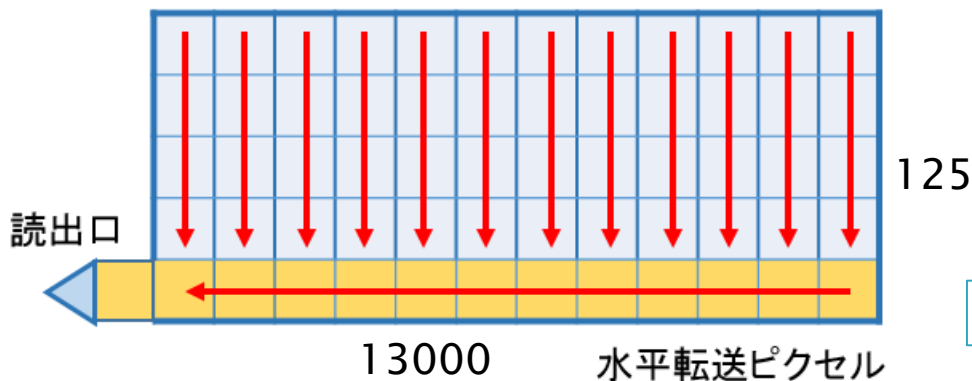
▶ Charge Transfer Inefficiency (CTI: 電荷転送非効率)

- 格子欠陥により電荷損失が起こる
- CTIをピクセルからピクセルに一回転送したときの非効率と定義する
- 信号電荷を Q_0 とすると、 n 回転送後には下の式で示される Q_n になる。

$$Q(x, y) = Q_0(1 - CTI_h)^x(1 - CTI_v)^y$$

実際のCCDでは水平転送13000回に対して垂直転送125回となっていて電荷転送に占める割合は水平転送が支配的

垂直転送ピクセル

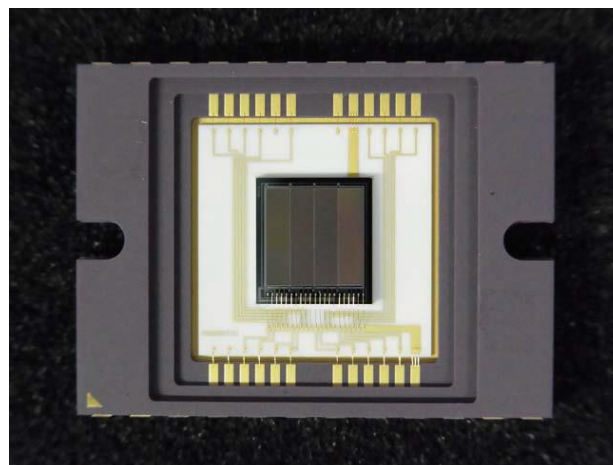


(0,0) が読み出し口

上式のプロット
x, y軸がピクセル位置
z軸が信号の大きさ 6

中性子ビームテスト

- ▶ 日付: 2014/10/15-17
- ▶ 場所: CYRIC@東北大学(東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター)
- ▶ Fluence: $1.78 \times 10^{10} n_{eq}/cm^2$ (1.5h)
 - ILC19年分の中性子量
 - 必要な放射線耐性の1/7のNIELダメージ
- ▶ CCD試作機
 - ピクセルサイズ: $(6\mu m)^2$
 - ピクセル数: 1024x255
 - 浜松ホトニクス製
 - 型番: CPK1-14-CP502-07



CTI測定

▶ 測定条件

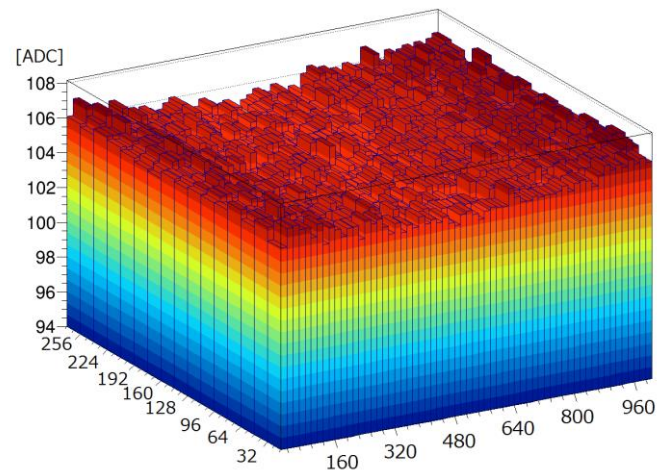
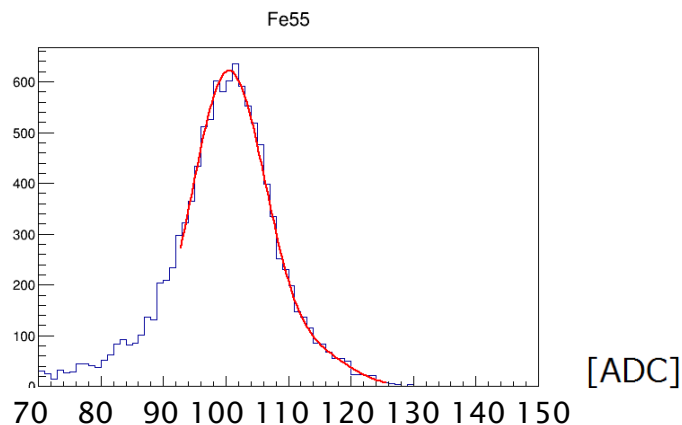
- 温度: -40°C
- クロック周波数: 6MHz
- 線源: Fe55
 - 5.9keVのX線を信号として用いる

▶ フィット関数

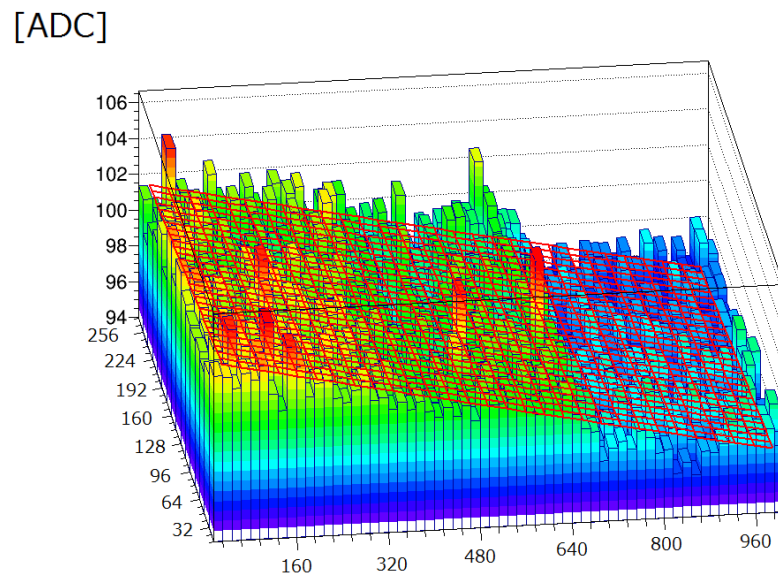
- $Q(x, y) = Q_0(1 - CTI_h)^x(1 - CTI_v)^y$

▶ 結果

$$\left\{ \begin{array}{l} CTI_h = (5.93 \pm 0.05) \times 10^{-5} \\ CTI_v = (7.32 \pm 0.22) \times 10^{-5} \end{array} \right.$$



中性子照射前CCDのX線信号分布



中性子照射後CCDのX線信号分布 8

CTIの性能評価

- ▶ CTIが大きいと信号電荷が小さくなる
→S/N比に影響

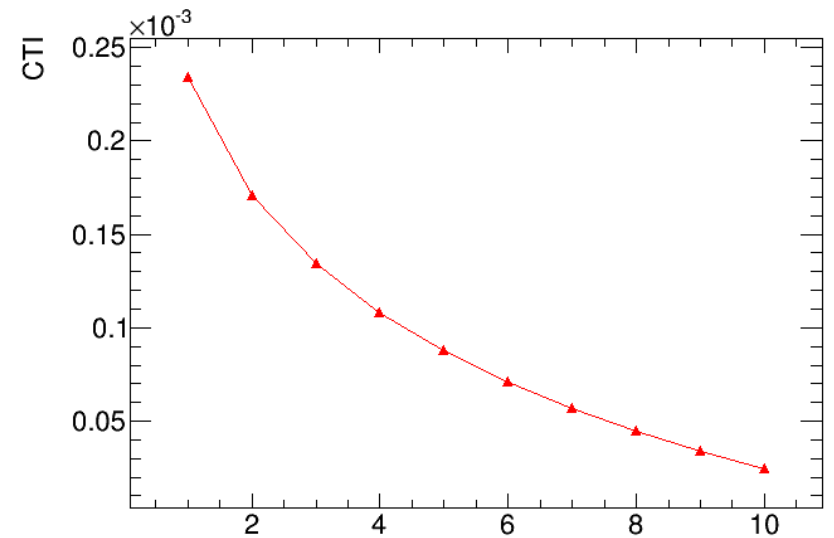
$$S/N = \frac{(1 - CTI)^{11000} \times 400}{42}$$

- ▶ CYRICでの中性子照射量: $1.78 \times 10^{10} \text{ 1MeVn}_{eq} / \text{cm}^2$
- ▶ 必要な放射線耐性: $1.24 \times 10^{11} \text{ 1MeVn}_{eq} / \text{cm}^2$
 - 今回の実験の7倍に相当

ノイズ: 42電子
最小信号: 400電子
転送回数: 11000

▶ 性能評価

- 測定結果を7倍悪化させ、要求性能と比較
- $CTI_{measured} \times 7 = 41.5 \times 10^{-5}$
- **S/N=0.1 → CTIの改善が必要**
- S/N比10を目指す
- $CTI < 2.45 \times 10^{-5}$



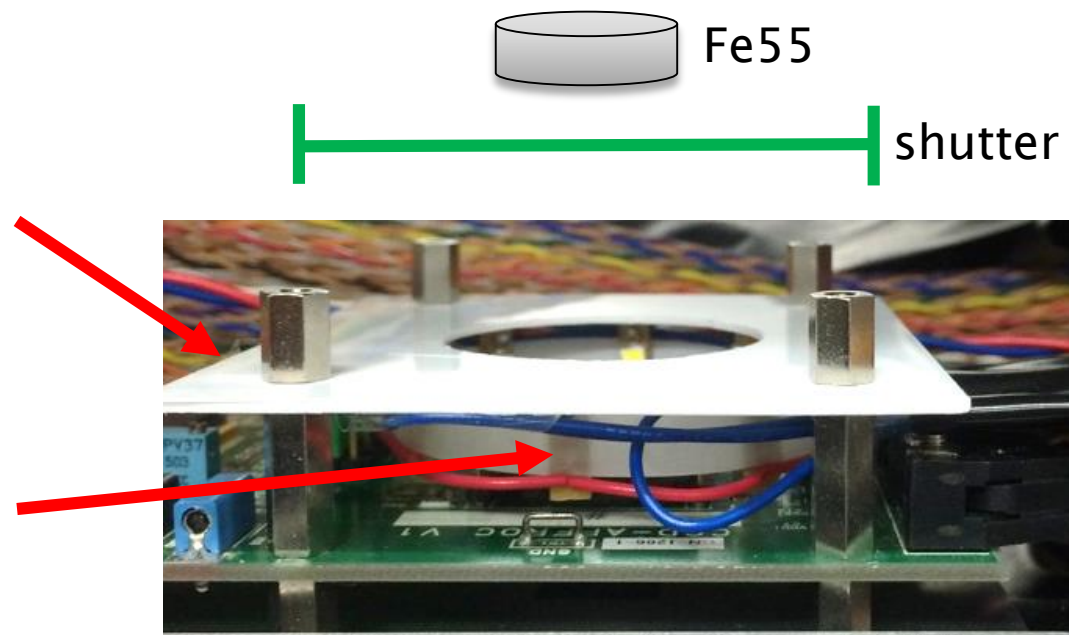
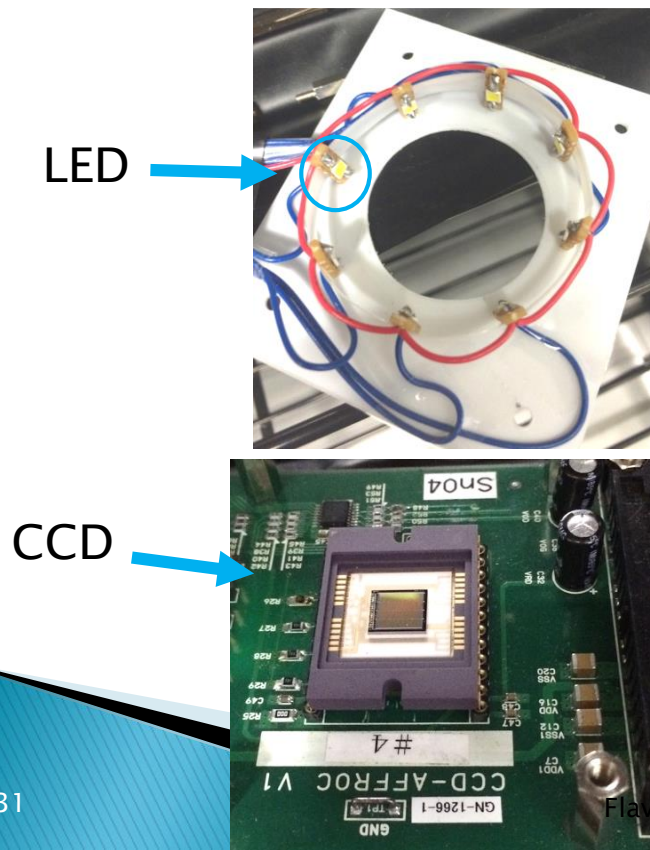
S/N比とCTIの関係 S/N_9

Fat-zero charge injection

- ▶ 電荷転送効率の改善
 - 転送効率悪化の原因は格子欠陥
⇒ 格子欠陥にあらかじめ電荷をトラップさせることにより、信号電荷のトラップを減らす
- ▶ Fat-zero charge injection
 - バックグラウンド電流を流すことにより、トラップを埋めCTIを改善させる
 - 電氣的にピクセルに直接注入
 - ピクセル全体に均一に流すことは難しい
 - Dark currentを利用
 - クロックパルス電圧を変更することでdark currentの量を調節可能
 - 本実験ではLEDで光をCCDに照射し、発生した電荷をFat-zero chargeとする

セットアップ

- ▶ 8個のLEDが等間隔でCCDの周りに設置される。
- ▶ LEDは並列に接続され等電圧を加えられる。
- ▶ 中央の穴の上にFe55線源が設置される。

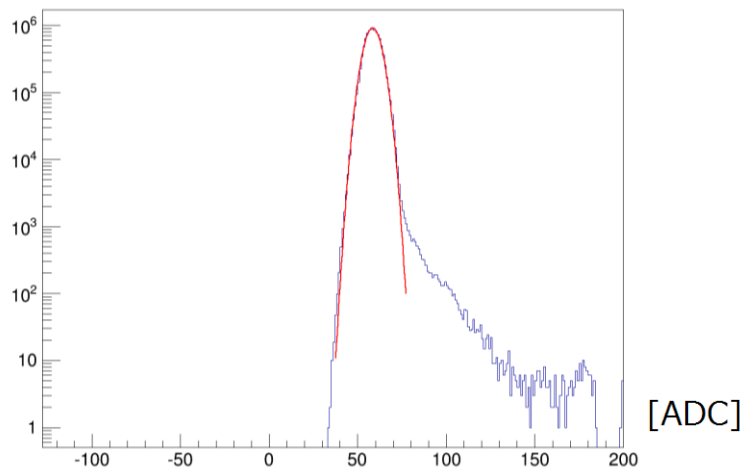


測定結果

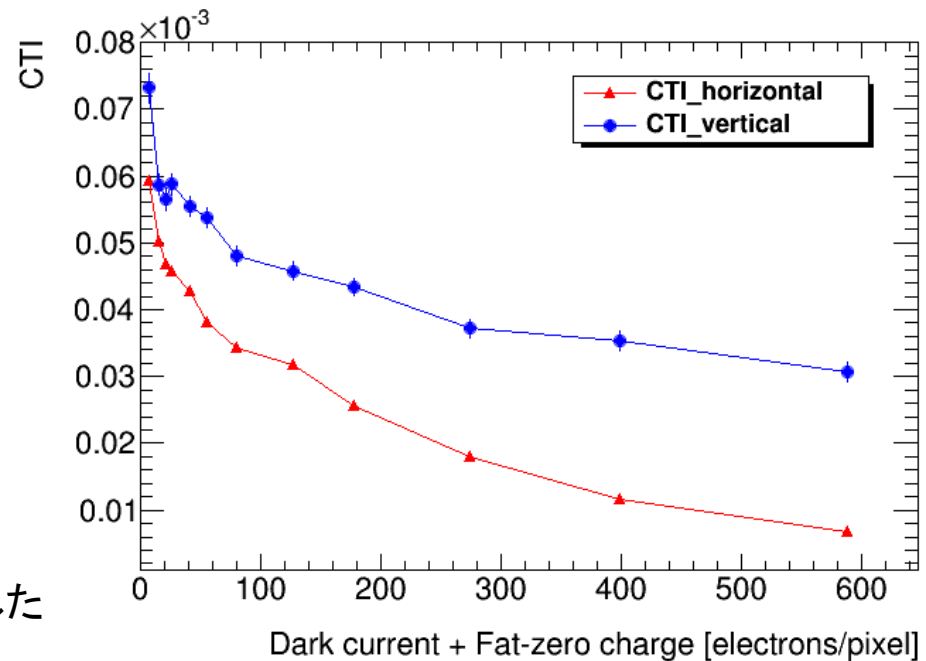
	Fat zero charge無し	600電子/pixel 注入
CTI_h	$(5.93 \pm 0.05) \times 10^{-5}$	$(0.68 \pm 0.04) \times 10^{-5}$
CTI_v	$(7.32 \pm 0.22) \times 10^{-5}$	$(3.07 \pm 0.15) \times 10^{-5}$

▶ CTI_h は9倍、 CTI_v は2倍の改善

- 水平転送回数は垂直転送回数に比べ非常に多いため、 CTI_h は電荷損失において支配的でありほぼ9倍の改善が見込まれる



600電子注入時のdark charge
Fat zero chargeによりペDESTALが移動した



CTIとS/N比

▶ Fat zero chargeによるショットノイズ

- ノイズが増加し、CTIへの要求が厳しくなる

▶ 測定結果との比較

- 同様に性能を7倍悪化させ、S/N比を計算
- 600電子注入時、S/N=4.9
- → 目標とするS/N比10には届かない

$$S/N = \frac{(1 - CTI)^{11000} \times 400}{42}$$



$$S/N = \frac{(1 - CTI)^{11000} \times 400}{\sqrt{42^2 + N_{Fatzero}}}$$

▶ 改善案

- 水平転送ピクセルの小型化
 - Fat zero charge injection の効果はピクセルサイズに依存する
- ノッチチャンネル
- アニールリング
- 回路のノイズを減らす

※さらに電荷を注入するとS/N比は改善すると予想されるが、現在の読出し回路の仕様によりこれ以上電荷を増加できない

まとめ

- ▶ ILC実験の崩壊点検出器の候補としてFPCCDを開発している。
- ▶ 試作FPCCDへ中性子照射試験を行い、中性子耐性を評価した。
 - CTI: S/N比0.14となり要求性能を満たさない
- ▶ CTIの改善
 - LEDを用いたFat Zero charge injectionで、 CTI_h は9倍、 CTI_v は2倍の改善を達成した。
- ▶ Fat zero charge injection によりCTIの性能が回復することを確かめた。
- ▶ ILCへ使用するためには更なる改善が必要



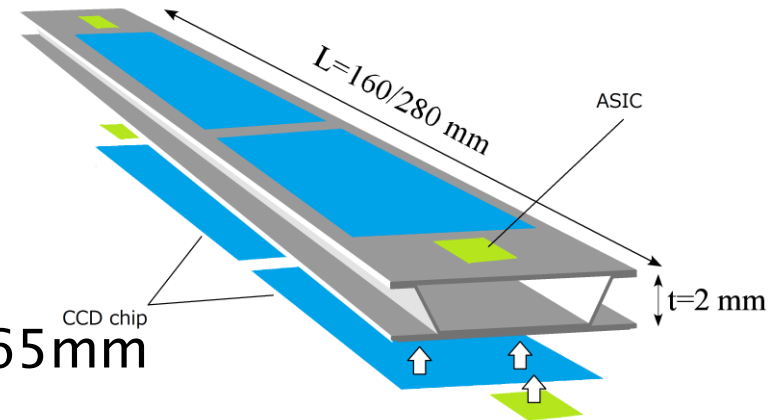
FPCCD崩壊点検出器

▶ Fine Pixel CCD

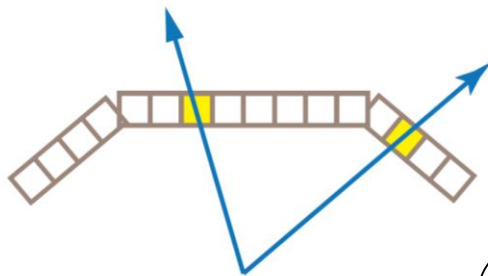
- ピクセルサイズ: $5\mu\text{m}\times 5\mu\text{m}$
- 有感領域の厚み: $15\mu\text{m}$
- ピクセル数: $13000(\text{H})\times 125(\text{V})/\text{ch}$
- センサーサイズ(最内層): $10.24\text{mm}\times 65\text{mm}$
- -40°C で使用される

▶ 特徴

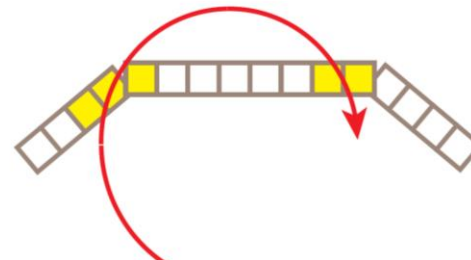
- 高い空間分解能
- 全空乏→電荷の拡散が抑えられる
- 電磁波によるノイズ(EMIノイズ)を受けない(トレイン間読出し)
- ヒット分布からバックグラウンド除去できる



FPCCDラダー



シグナル

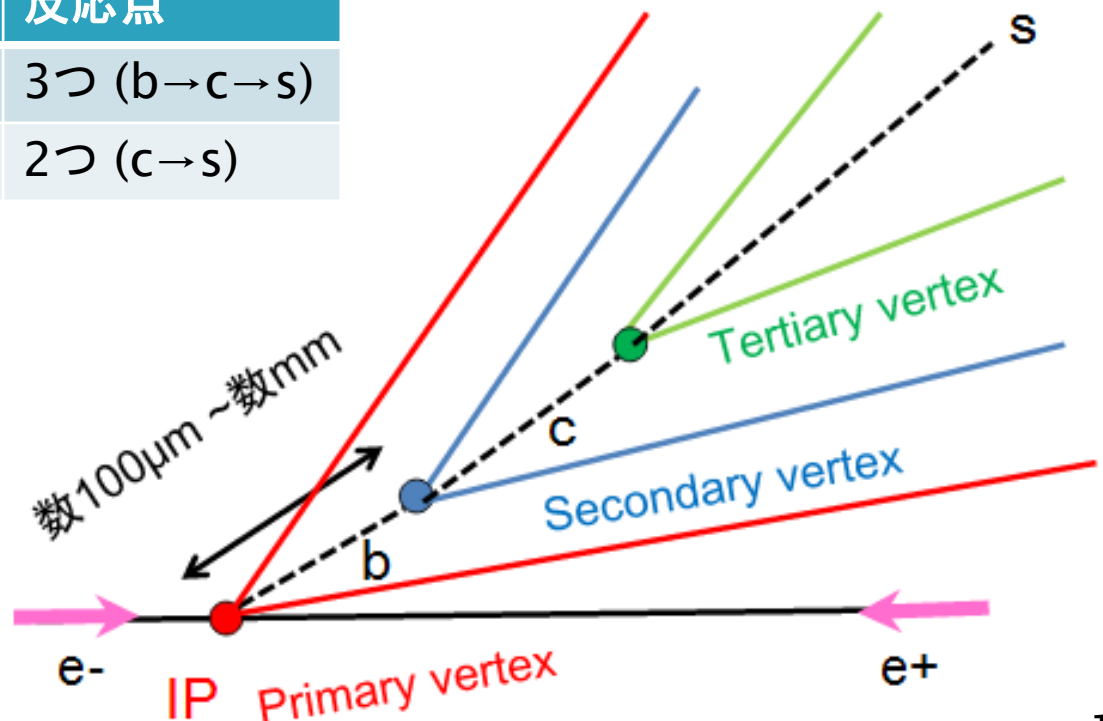


フレーバータグ

- ▶ b, cハドロンは数ps程度の短い寿命のため、衝突点から少し飛んで崩壊

	寿命	反応点
bハドロン	1.5ps	3つ (b→c→s)
cハドロン	0.4ps	2つ (c→s)

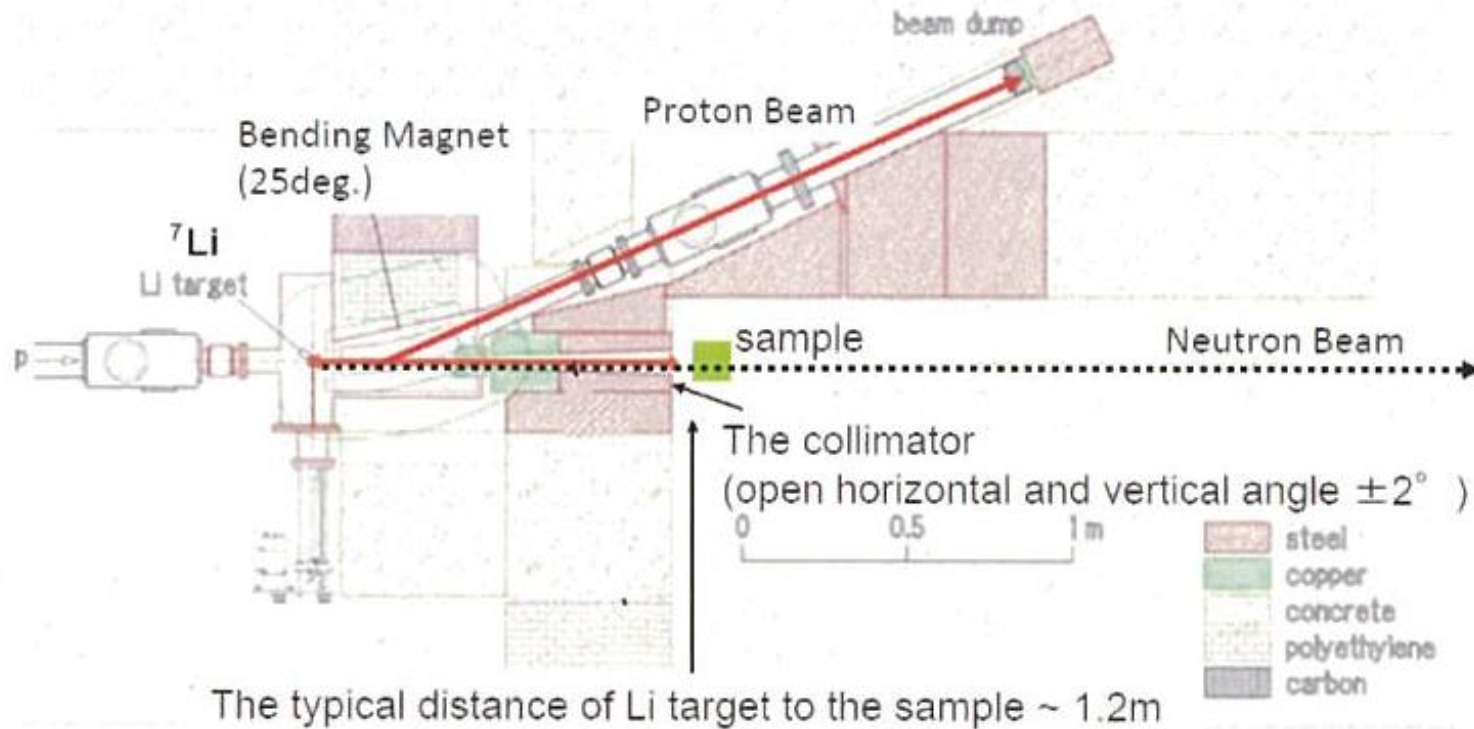
→数 μm の精度の崩壊点検出



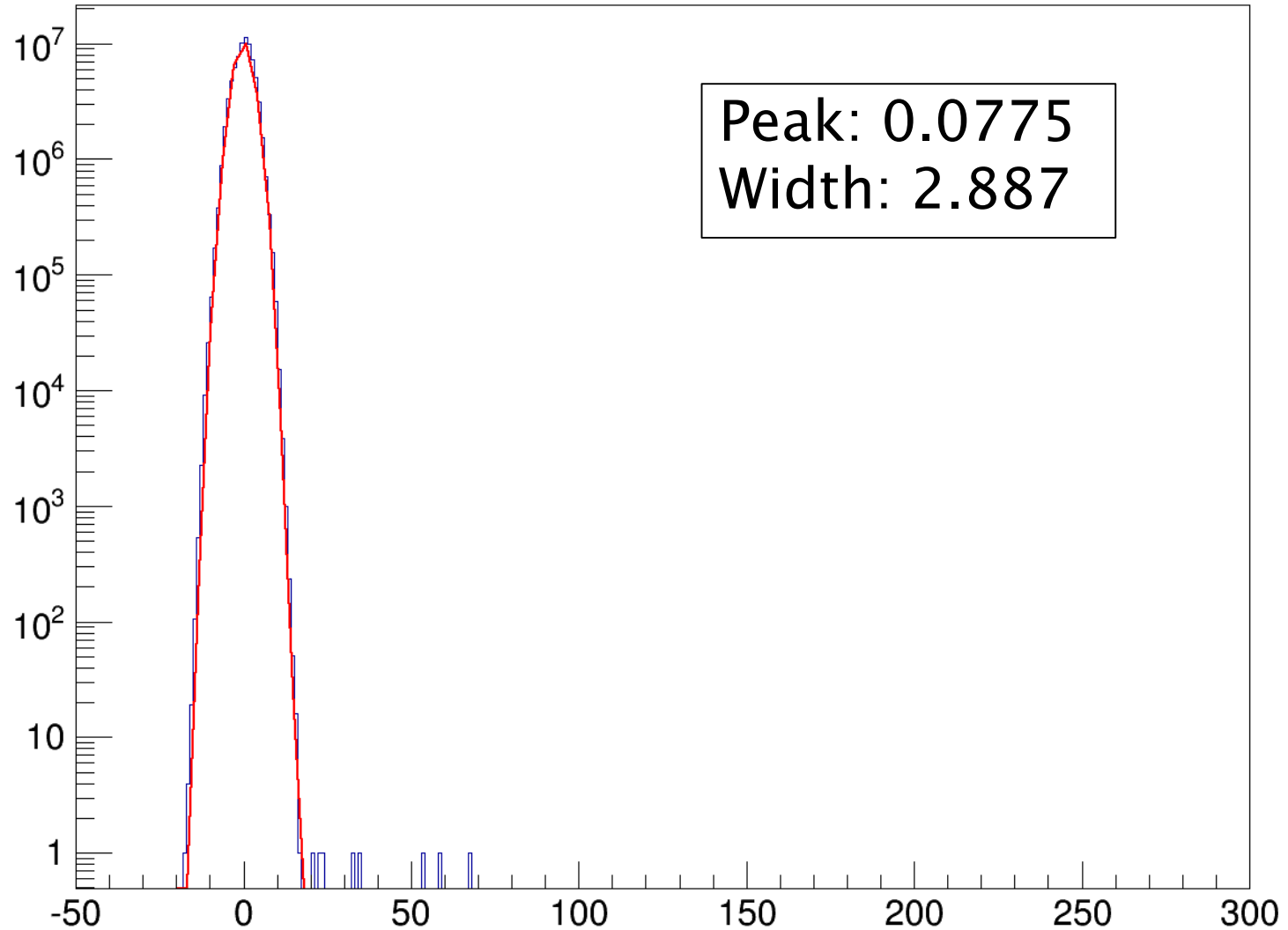
ペアバックグラウンド量推定

- ▶ Pair backgrounds
 - $6.32 / \text{hits} / \text{cm}^2 / \text{BX}$ at $E_{\text{CM}} = 500 \text{ GeV}$
- ▶ Expected hits/year assuming 0.5×10^7 sec operation
 - $6.32 \times 1312 \text{ (BX/train)} \times 5 \text{ (train/sec)} \times 0.5 \times 10^7 \text{ (sec)} =$
 $2.07 \times 10^{11} \text{ e} / \text{cm}^2 / \text{year}$

CYRICビームライン



Dark charge 200msec



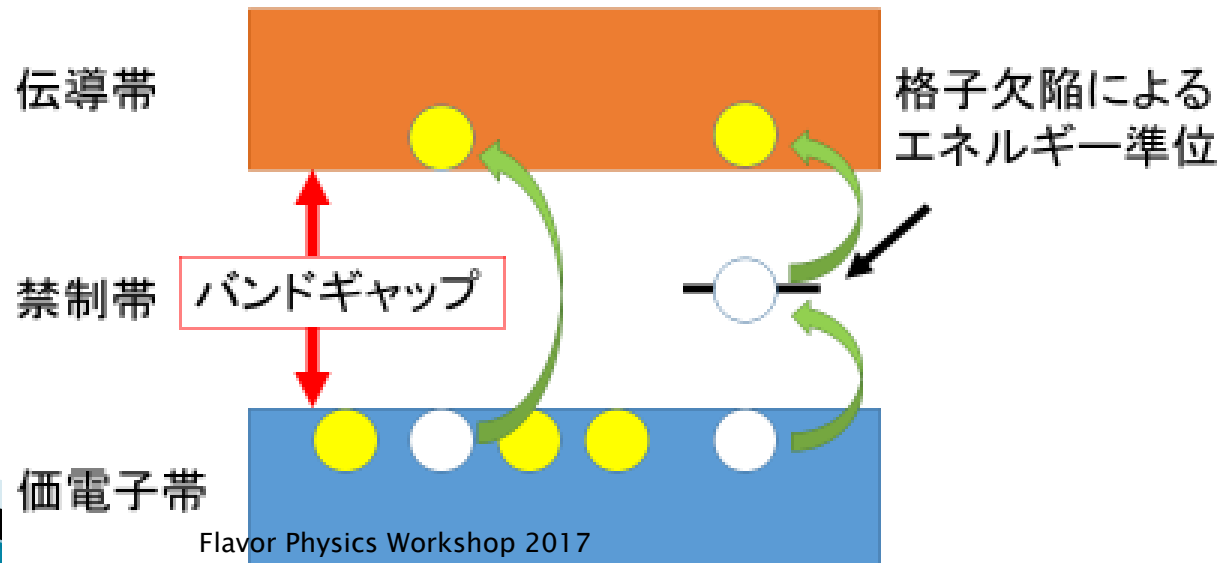
ダークカレントとホットピクセル

Dark current: 熱励起により信号として読み出される電荷

Hot pixel: 他のピクセルと比べて特に大きなdark currentを持つピクセル

▶ 放射線による影響

- 格子欠陥の増加
 - 格子欠陥があると禁制帯にエネルギー準位でき、熱運動により伝導体に励起される確率が増加する。
 - → dark currentの増加
- Defect clusterの発生
 - 中性子や陽子などの重い粒子がシリコン原子に衝突すると多重衝突を起こし、複数の原子の移動による格子欠陥(defect cluster)が発生する。Dark currentが不均一に増加する
 - → hot pixelの発生

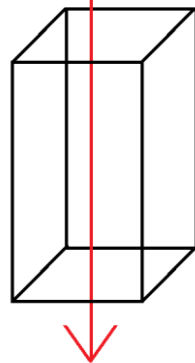


ノイズと最小信号

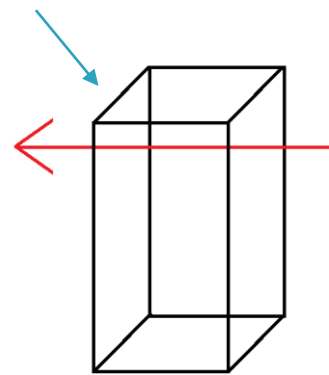
- ▶ ノイズ: 42電子
 - Dark charge(200msec)の幅
- ▶ 最小信号: 550電子
 - MIPはシリコン内で80 電子/ μm 生成
 - MIPがピクセルへ水平入射すると5 μm 通過

1 pixel = $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$

荷電粒子



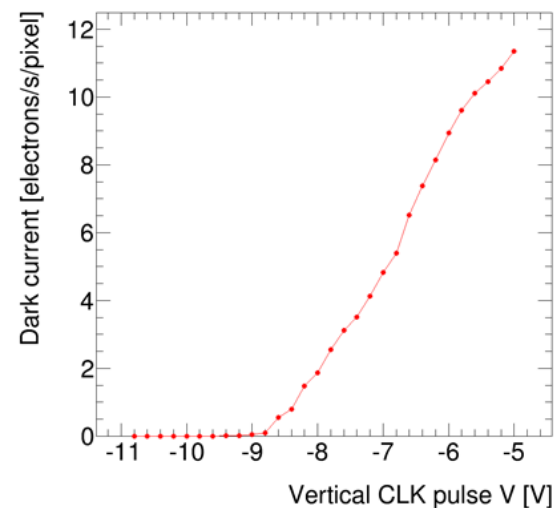
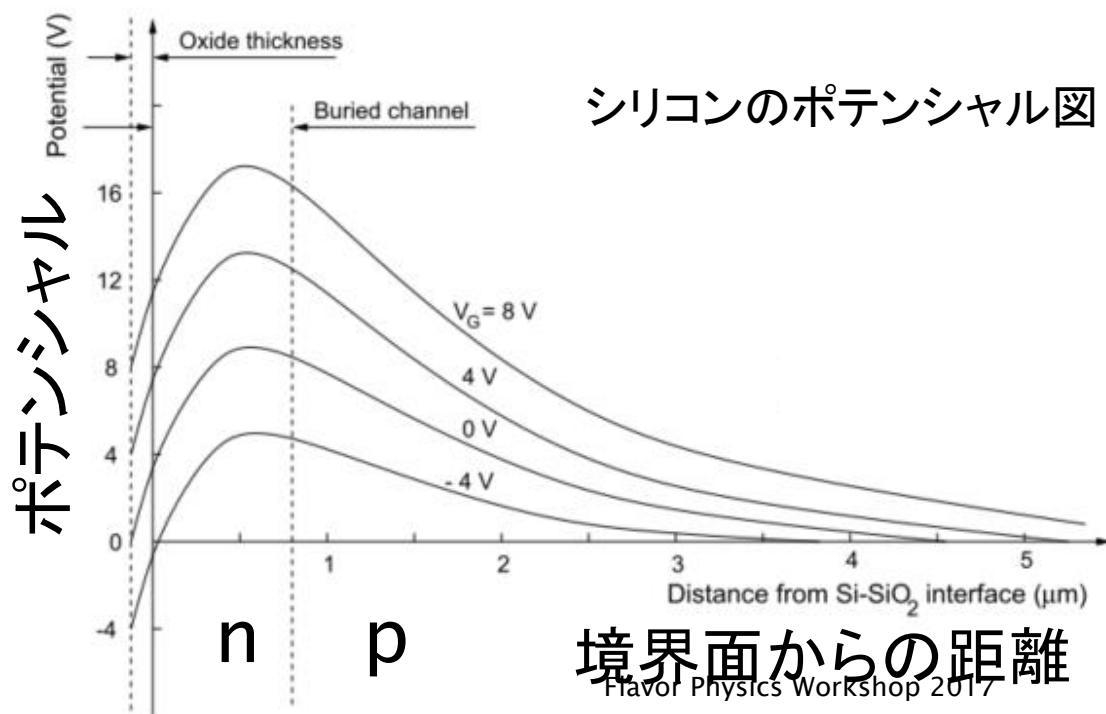
垂直入射
 $1200 = 80 \text{電子} \times 15\mu\text{m}$



水平入射
 $400 = 80 \text{電子} \times 5\mu\text{m}$

MPP(Multi Pinned Phase)モード

- ▶ ダークカレントの主な原因はSi-SiO₂境界に存在する格子欠陥
- ▶ 境界面にホールを供給することで発生した暗電荷と再結合し、ダークカレントが抑えられる。
 - 負電圧を電極に加えることで境界面のポテンシャルが負になる
 - → 周囲からホールが境界面へ供給される



改善案

- ▶ Fat-zero chargeの効果は水平転送ピクセルサイズに依存

水平転送ピクセル	Fat zero charge無し	600電子/ $(6\mu\text{m})^2$	改善率
$6\mu\text{m} \times 12\mu\text{m}$	$CTI_h = 5.93 \times 10^{-5}$	$CTI_h = 0.68 \times 10^{-5}$	Factor 9
$6\mu\text{m} \times 18\mu\text{m}$	$CTI_h = 5.45 \times 10^{-5}$	$CTI_h = 1.05 \times 10^{-5}$	Factor 5
$6\mu\text{m} \times 24\mu\text{m}$	$CTI_h = 4.85 \times 10^{-5}$	$CTI_h = 1.89 \times 10^{-5}$	Factor 3

- ▶ 水平転送ピクセルを小さくすることでFat-zero chargeによるCTIの改善がより効果的になる

改善案

▶ ノッチチャンネル

- シリコンに添加物を入れることでポテンシャルの高い場所が作られ、ノッチチャンネルと呼ばれる。
- 転送される電荷はノッチチャンネルを通るため、通過する格子欠陥の数が減り転送効率が改善される。

▶ アニールング

- シリコンの格子欠陥が高温下で回復
- 100°Cで168時間のアニールング後、CTIが2-3倍改善した

E. Martin, et al. IEEE Trans, Nucl. Sci. vol. 58, No.3, 2011

▶ ノイズの低下

- CTIへの要求を緩くする

