



次世代実験の為の三次元飛跡検出器の開発
Time Projection Chamber development for next
generation experiments

平成23年度日米科学技術協力事業研究
計画申請（新規）

京都大学 身内賢太郎

概要

- ◆ 次世代実験 リニアコライダー・暗黒物質・ダ
ブルベータ等に向けた

大型(1m³)・高精細(位置分解能100μm)

TPCの開発

- ◆ 平成23年度は「共同研究の開始」を目標の一つとする。

研究体制

日本側研究者		米国側研究者(US members)	
氏名	所属	氏名(name)	所属(institution)
身内賢太郎	京都大学	Sven Vahsen	University of Hawaii
杉山晃	佐賀大学	Maurice Garcia-Sciveres	Lawrence Berkeley National Laboratory
田中真伸	KEK	John Kadyk	Lawrence Berkeley National Laboratory
房安貴弘	長崎総合科学大学	David Nygren	Lawrence Berkeley National Laboratory

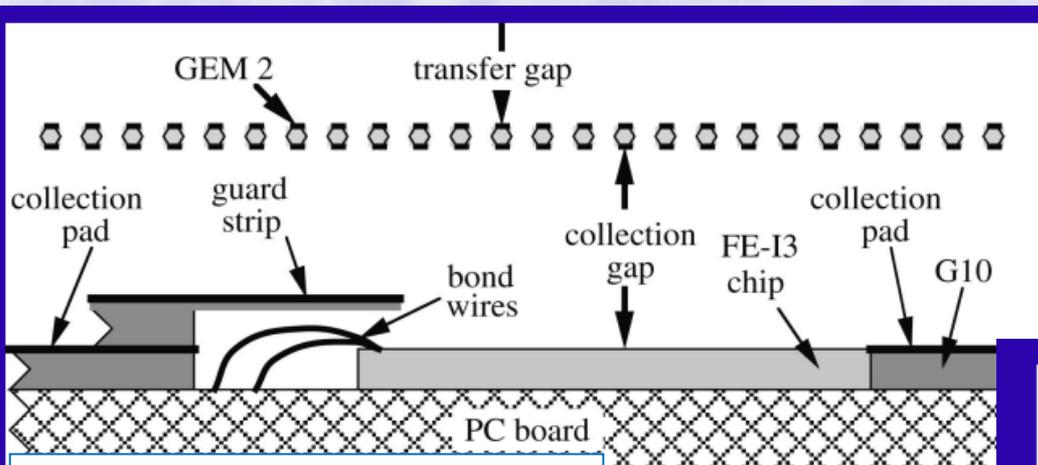
経緯

- ▶ 2009年 暗黒物質関連の国際ワークショップにて Vahsen氏(米国側代表者)と知り合う。
- ▶ 同様の開発を行っていることが分かり、共同研究の可能性を探ってみる事にした。
- ▶ 2010年9月頃、先方より「nichibei」というものがあるらしいが、出してみないか？
との申し出があった。⇒本申請に至る

研究背景（米国側）

NIMA589(2008)173

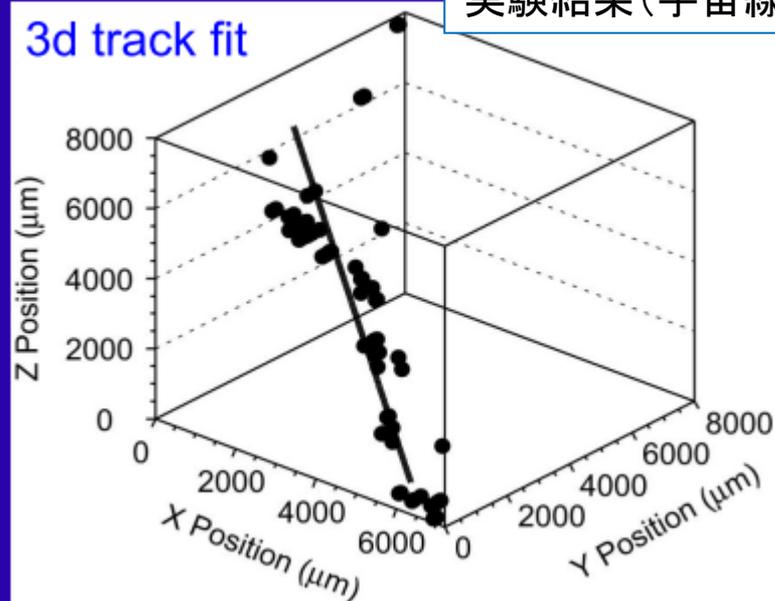
- ◆ ATLASシリコンピクセル検出器読み出し用のIC「FE-13」によるガスTPC読み出し。



FE-13を用いた実装の様子

実験結果(宇宙線)

3d track fit



強：低ノイズ実装

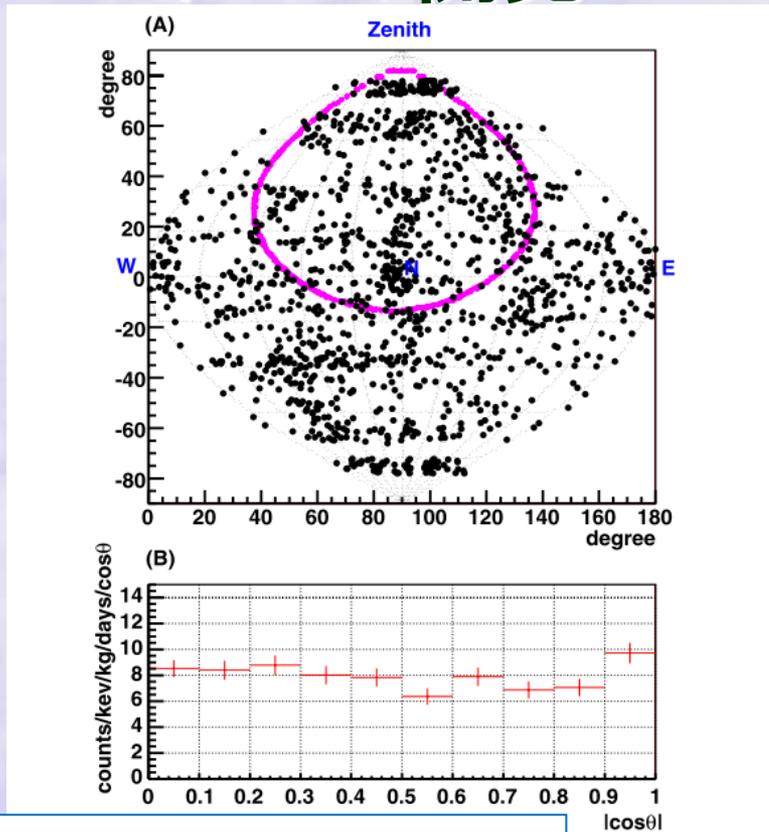
未：ガス特有の要請

研究背景（日本側）

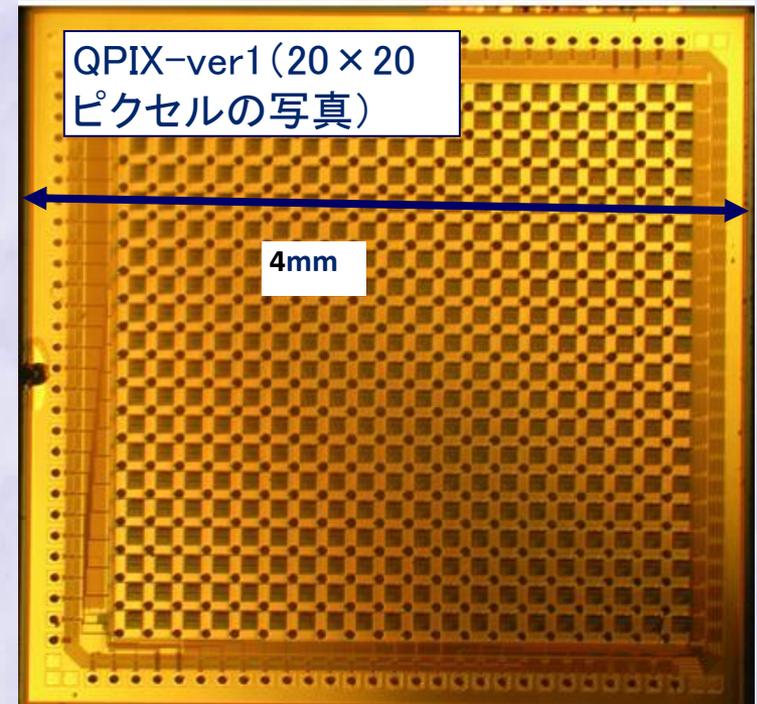
Physics Letters B 686(2010)11

◆ μ PICによる暗黒物質探索の実績

◆ QPIXの開発



方向に感度を持つ暗黒物質探索実験結果の一例



強：低BG化・高機能チップ
未：低ノイズ実装

分担

日本側研究者		米国側研究者(US members)	
氏名	役割	氏名(name)	役割
身内賢太郎	統括・低BG化	Sven Vahsen	ASIC実装
杉山晃	ILC	Maurice Garcia-Sciveres	TPC
田中真伸	QPIX	John Kadyk	TPC
房安貴弘	ILC	David Nygren	TPC

TPC : 豊富な開発実績 (米国) + 低BG化 (日本)

読み出し : 低ノイズ実装 (米国) + 高機能チップ (日本)

(米国グループは、ガス検出器に特化したASICのデザインの予定はなし。)

開発内容（読み出し）

要素	QPIX-v1(日本)	FE-I3(米国)	目標（24年度）
X,Yピッチ（ピクセルサイズ） $[\mu\text{m}^2]$	200×200	50×400	300×300
Zピッチ $[\mu\text{m}]$ †	200~1000	50~2500	300
分解能 $[\mu\text{m}^3]$ （測定値）	未測定	70×130×150	100×100×100
検出面サイズ $(\text{mm}^2/\text{unit})$	4×4	8×7.2	6×6
閾値 [fC]	35	0.3	1
最大電荷[fC]（ADC bit数）	1500（10bit）	5（TOTのみ）	100（10bit）
TPCサイズ $[\text{mm}^3]$	4×4×20	8×7.2×10	30×30×100 不感領域なし

TPC：豊富な開発実績（米国）＋低BG化（日本）

読み出し：低ノイズ実装（米国）＋高機能チップ（日本）

（米国グループは、ガス検出器に特化したASICのデザインの予定はなし。）

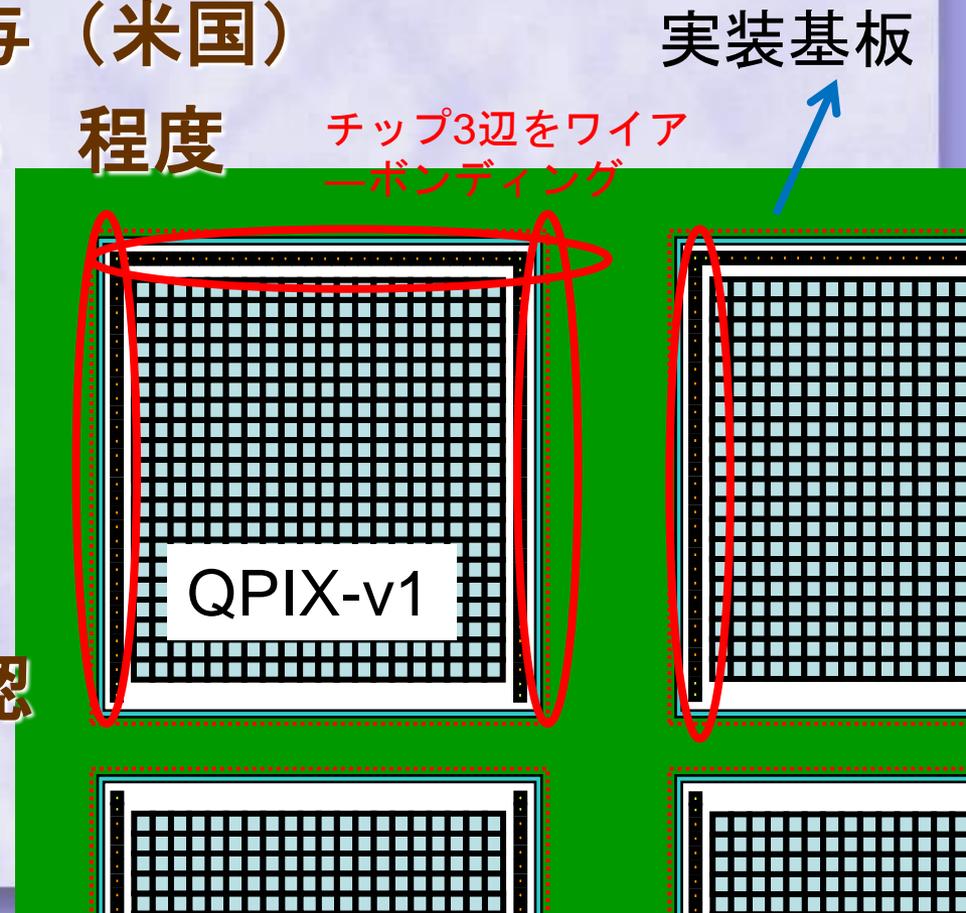
開発要素①

◆ QPIX-v1を用いたTPC製作

- デザイン済のものを増産
- 製作・実装（日本）
- 実装について技術供与（米国）
- $4 \times 4 \text{mm}^2 / \text{chip} \times 6$ 程度

◆ 目標

- 低ノイズ実装
- 位置分解能の評価
- チップ間の隙間は容認



開発要素②

◆ QPIX-v1.1設計・試作

- 米国チームの低ノイズ設計を参考にして、閾値を下げる。35fC⇒1fC
- 数ピクセルによる機能確認チップ

◆ 目標

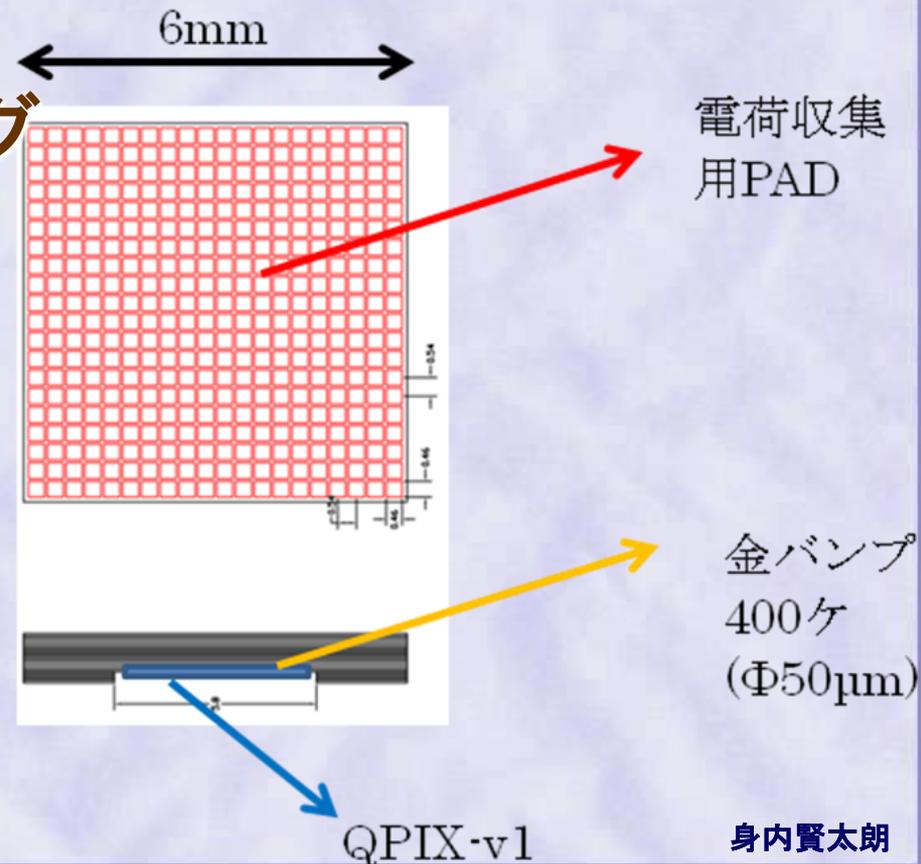
- 最大電荷/閾値の改善

要素	QPIX-v1(日本)	目標 (24年度)
X,Yピッチ (ピクセルサイズ) [μm^2]	200×200	300×300
Zピッチ [μm] †	200~1000	300
分解能 [μm^3] (測定値)	未測定	100×100×100
検出面サイズ (mm^2/unit)	4×4	6×6
閾値 [fC]	35	1
最大電荷 [fC] (ADC bit数)	1500 (10bit)	100 (10bit)
TPCサイズ [mm^3]	4×4×20	30×30×100 不感領域なし

開発要素③

◆ 隙間なく並べられる基板

- QPIXのPADに対応する電荷収集PAD
- 「拡大」する為の基板（多層セラミック）
- QPIXとの接合が技術的にチャレンジング



まとめ

- ◆ 次世代実験 リニアコライダー・暗黒物質・ダブルベータ等に向けた

大型(1m³)・高精細(位置分解能100μm)

TPCの開発

- ◆ 平成23年度は「共同研究の開始」を目標の一つとする。

予備スライド

QPIX?

◆ ピクセル読み出し ASIC with ADC

- 主にガスTPCを念頭

TOF : Time of Flight

TOT : Time over Threshold

ADC : SAR ADC

ピクセル 位置

ドリフト時間 → z座標

信号幅 → z方向電子分布

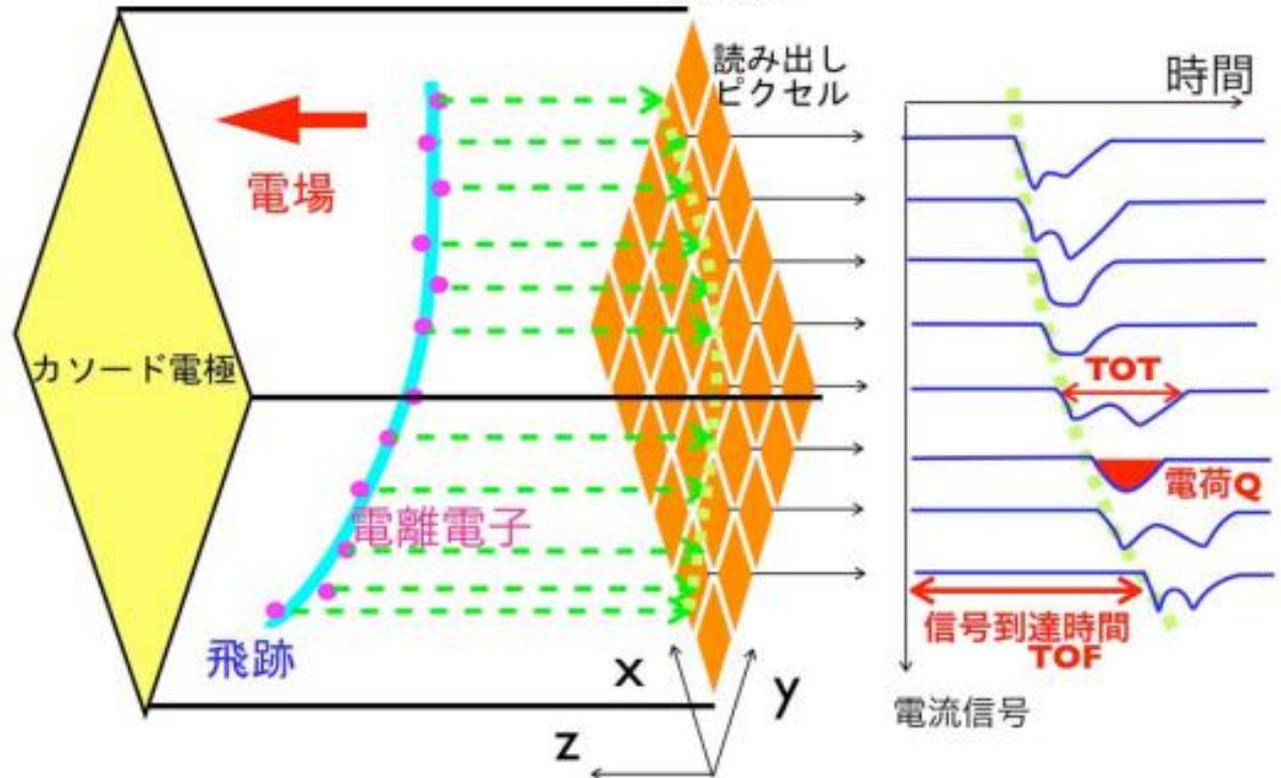
高速ADC → 電荷

→ x-y座標

Quad 情報

Quasi-3次元Pixel

Q(ADC)情報付きPixel



◆ 応用① リニアコライダーTPC(杉山)

TPC 飛跡検出器

大きな体積を覆う (直径~4m 長さ~5m)

低物質質量 (カロリメータの性能)

DC型は困難：
エンドプレートが厚い

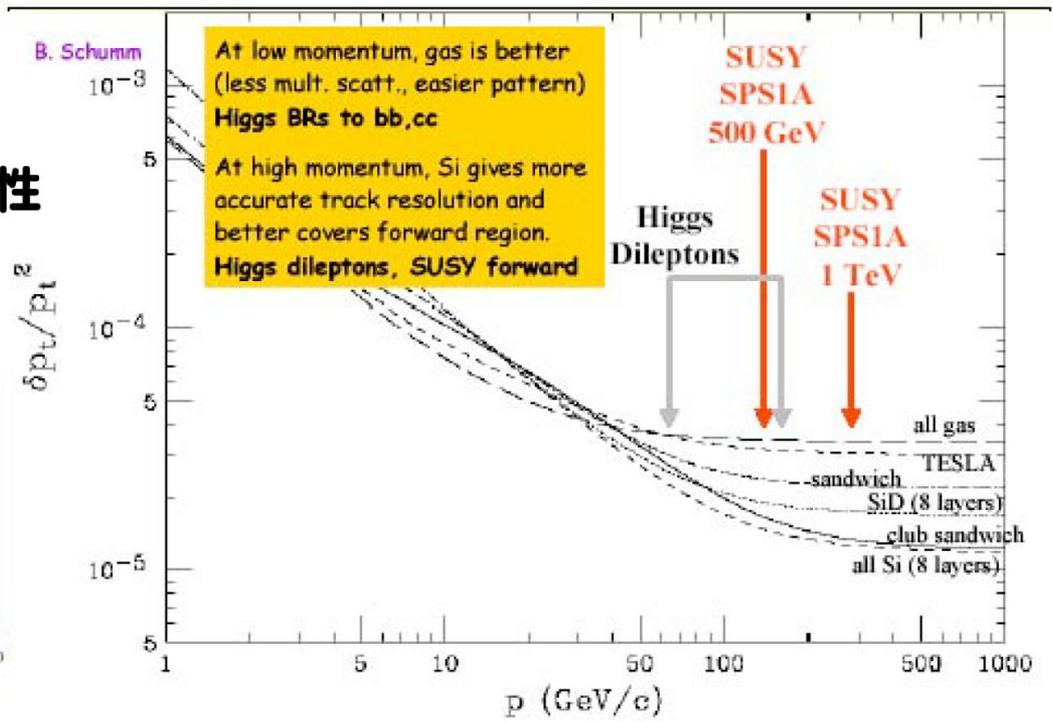
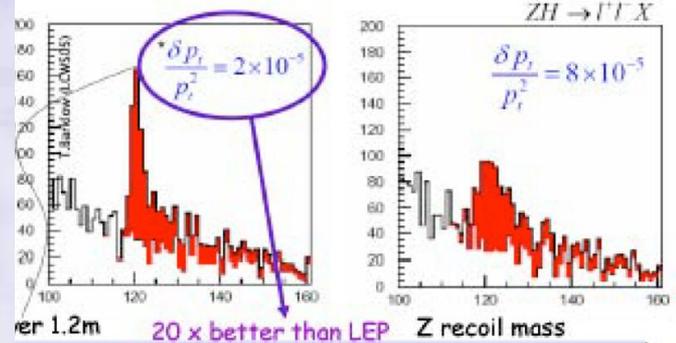
良い位置分解能

$$\sigma_{r\phi} < 150 \mu\text{m}$$

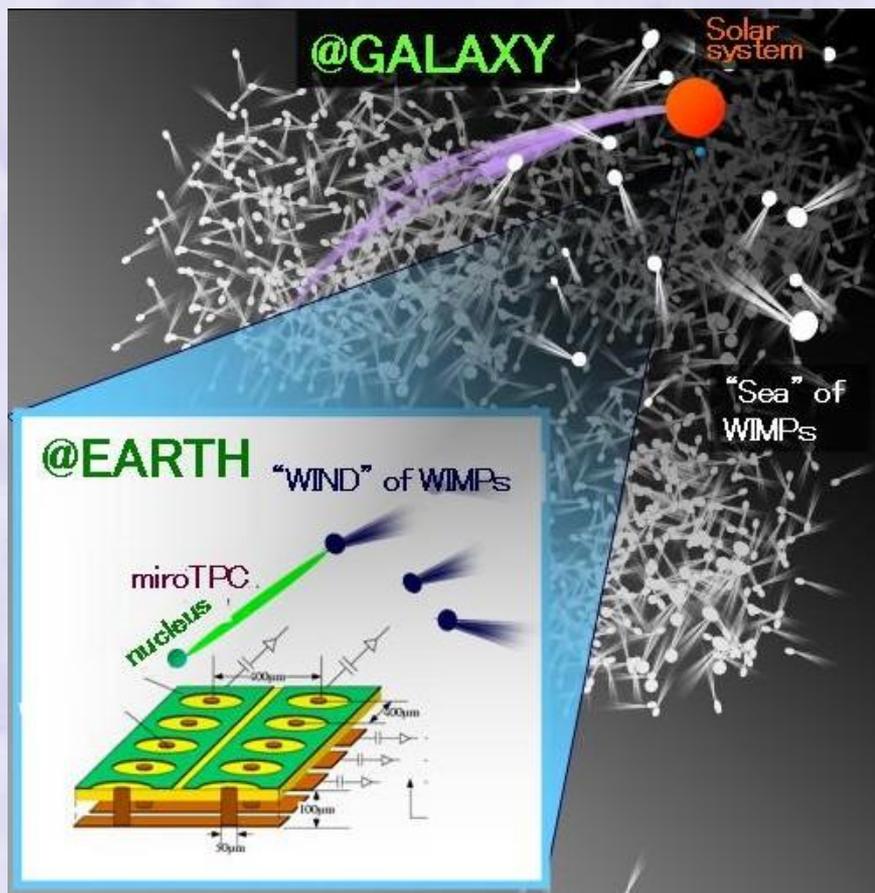
$$\frac{\sigma_{P_T}}{P_T^2} \sim 5 \times 10^{-5}$$

良い飛跡再構成効率
良い2粒子分離能

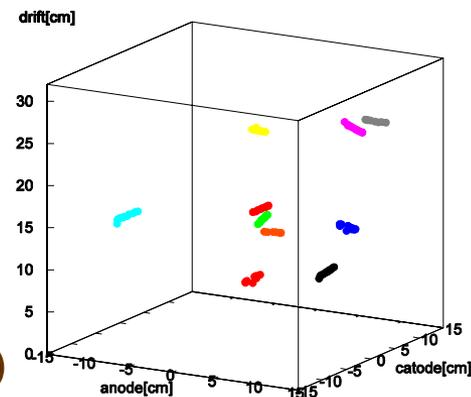
高いバックグラウンド耐性



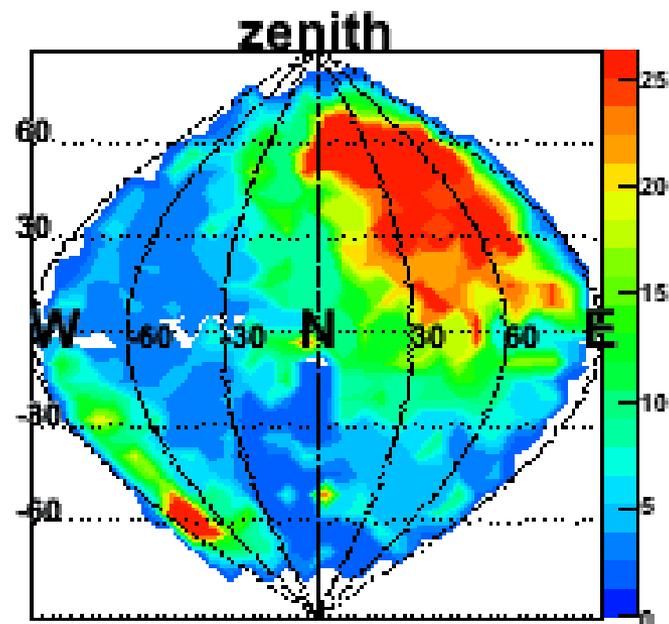
◆ 応用②ダークマタ (NEWAGE)



最新結果 Physics Letters B 686(2010)11
 地上実験 Physics Letters B 654 (2007) 58
 実験提唱 Physics Letters B 578 (2004) 241



陽子の飛跡(右)
 で書いたイメージ(下)

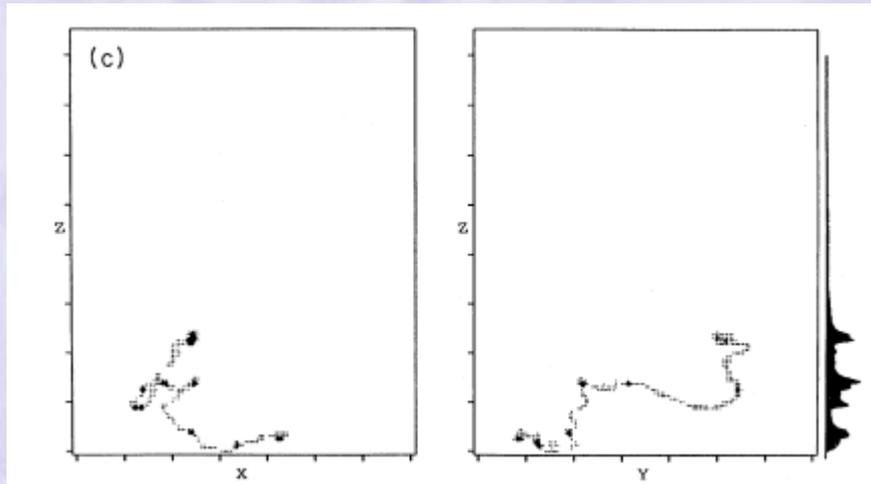


100m³規模のガスTPCをもちいた
 方向に感度をもった暗黒物質検出器

◆ 応用③ダブルベータ

XeガスTPC

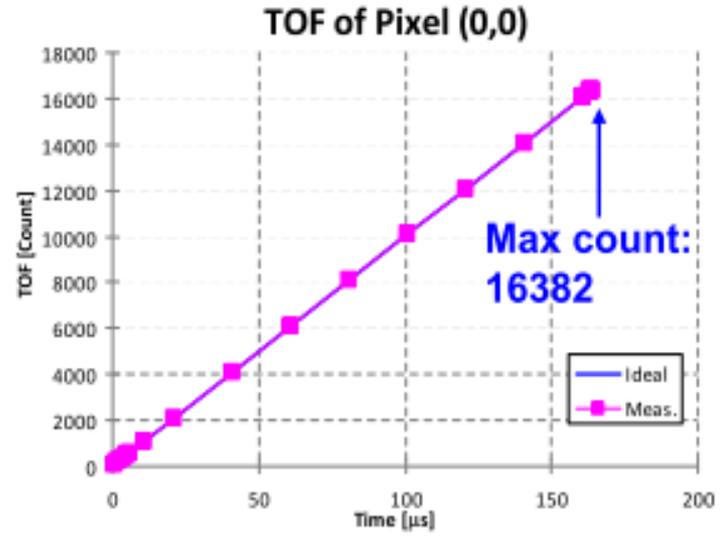
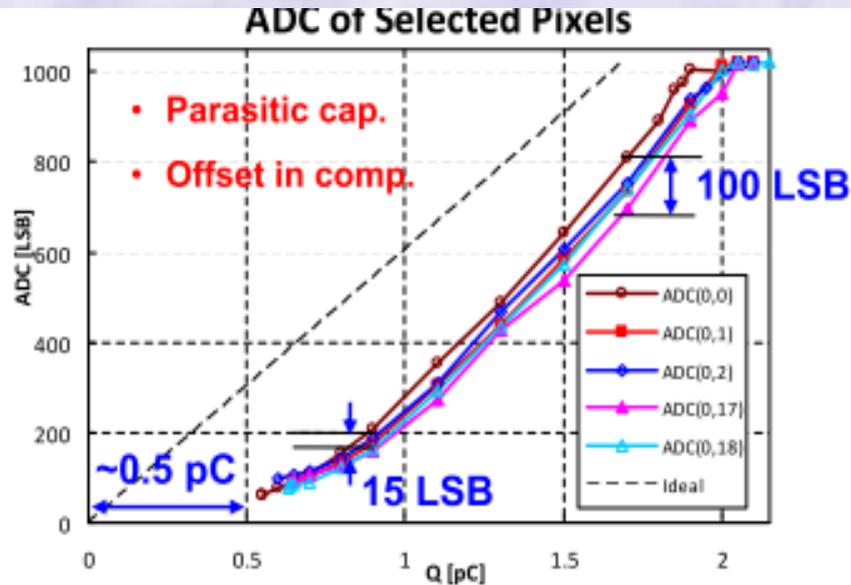
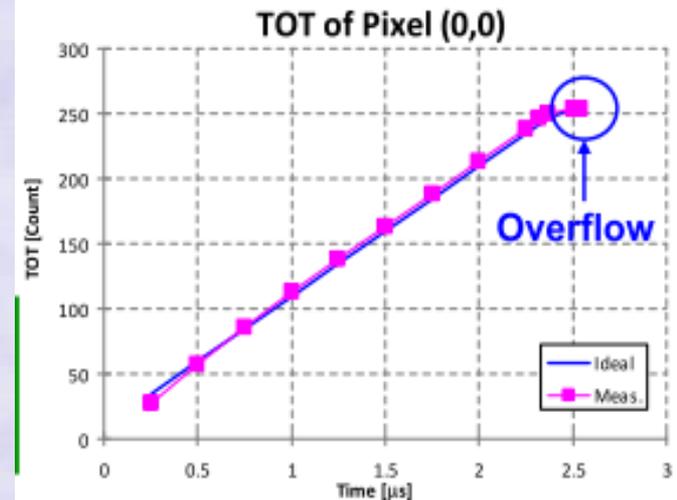
「電子二本」をシグナルとする



PRD48(1993)1009より

機能確認試験(東工大松澤研Fei氏)

ベアチップにテストパルス入力
 TOT、TOTはほぼ設計通り
 ADCは0.5pC以下の感度悪
 (テストパルス入力時の寄生容量・コンパレータのオフセット)

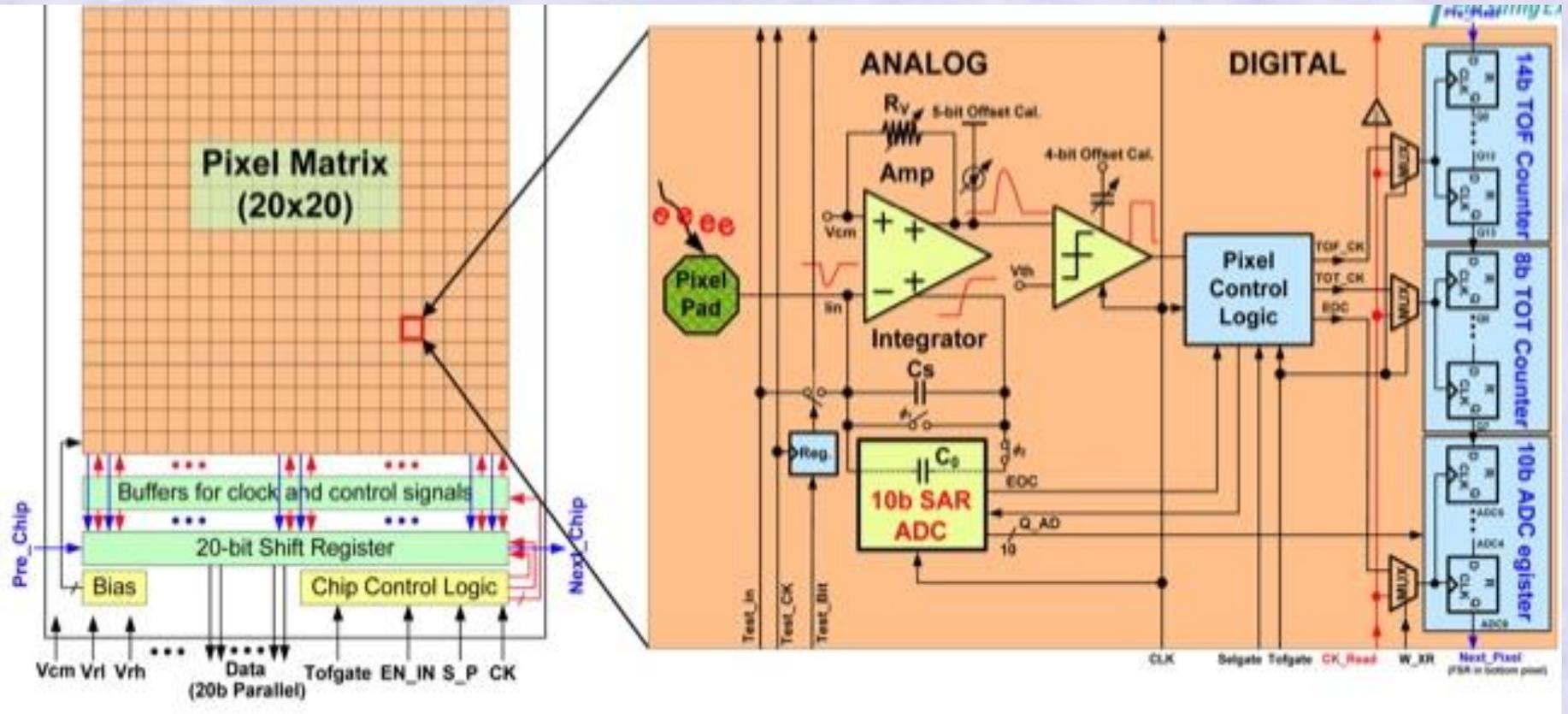


2010/05/27

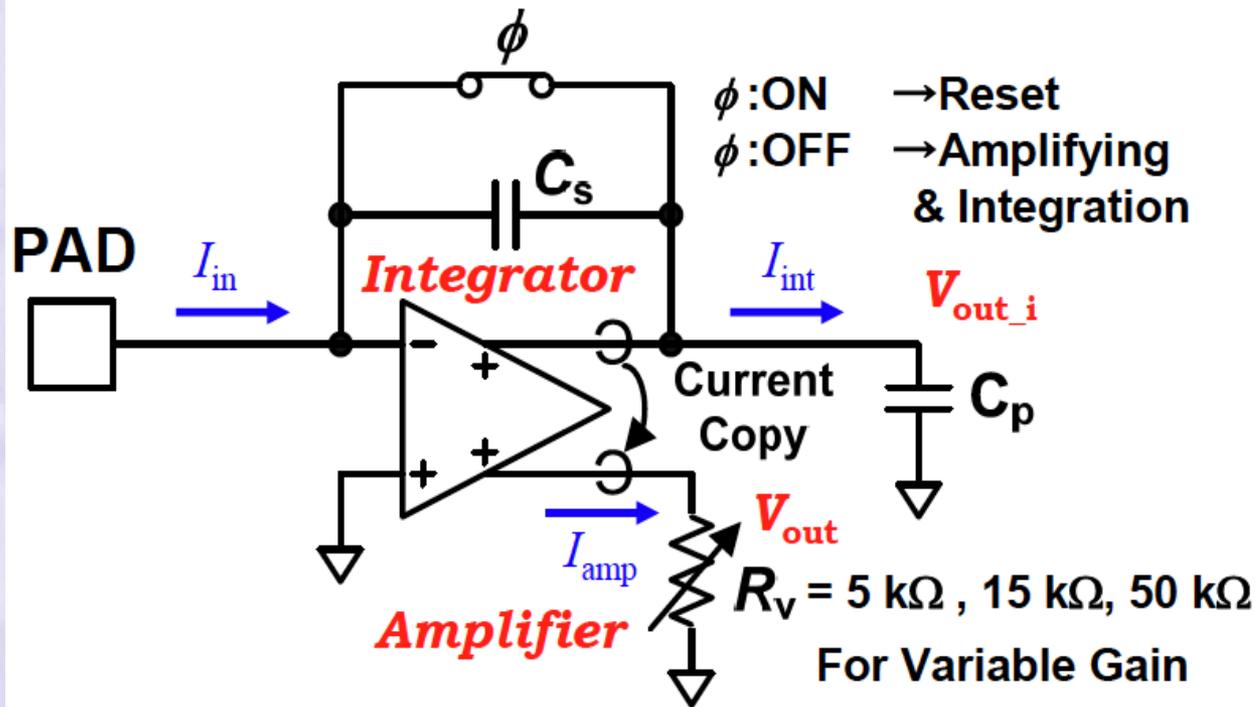
Li Fei, Tokyo Tech



Qpix ver1



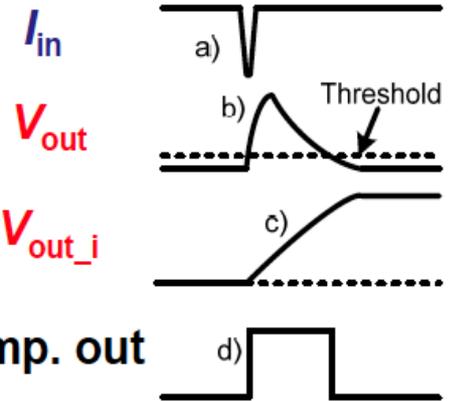
Qpix frontend part



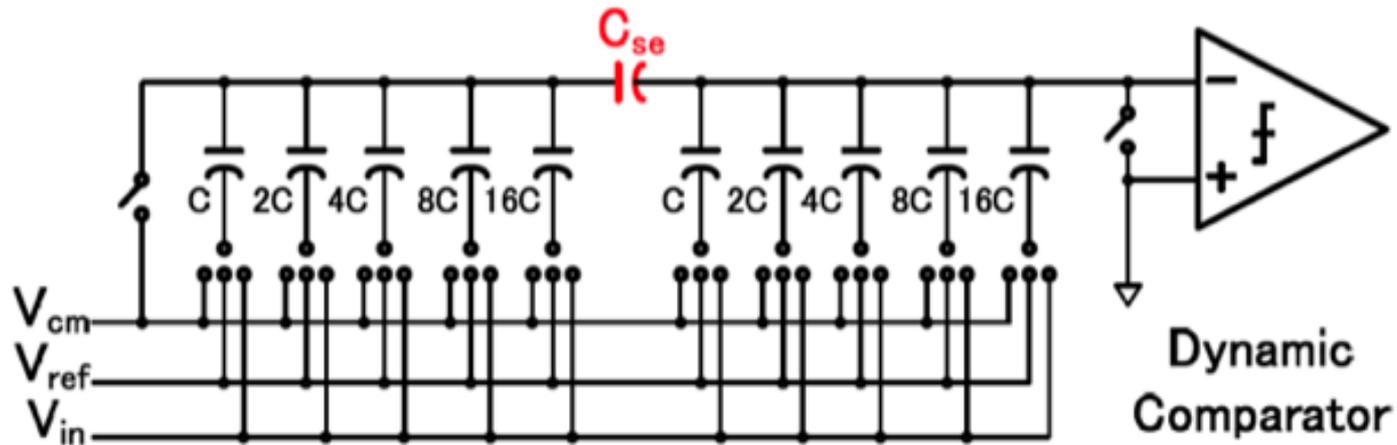
$$I_{in} \approx I_{int} \approx I_{amp}$$

$$V_{out_i} = \frac{1}{C_s} \int I_{in} dt$$

$$V_{out} = R_v I_{amp}$$



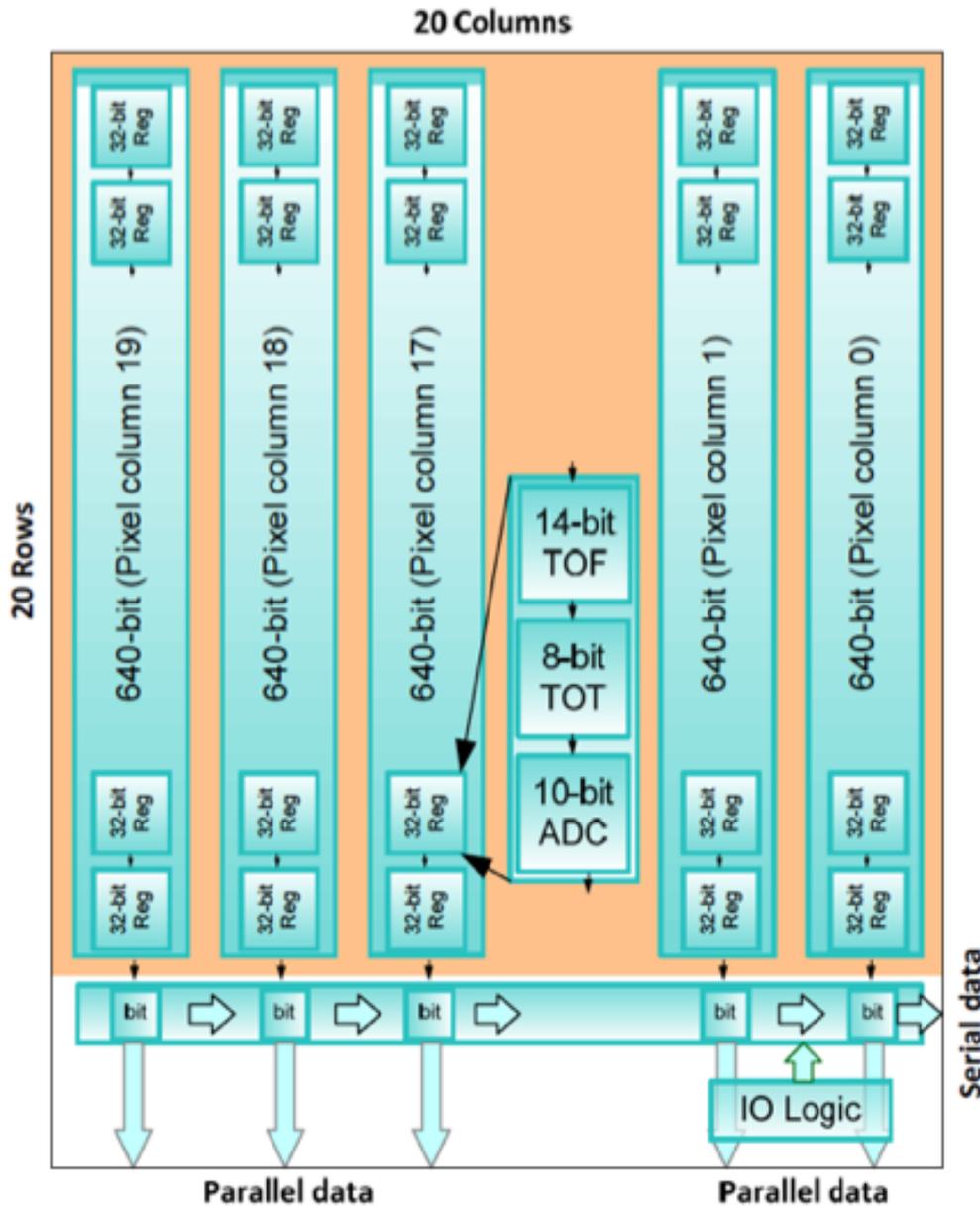
SAR (Successive Approximation Register) is the optimal candidate for Qpix



- ☺ Low power (no static current)
- ☺ Compact (2 stage weighted capacitance DAC)
- ☹ Low speed (but Qpix only needs 10 MSps)

Specification

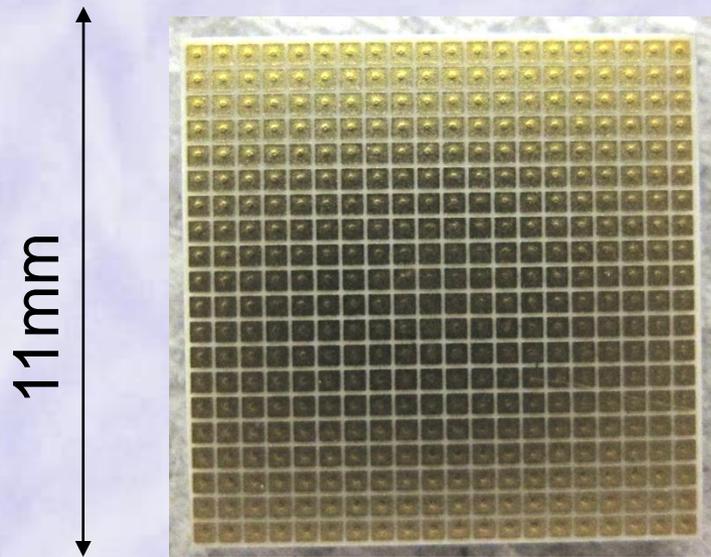
Process	0.18 μm CMOS
Resolution	10 bit (ENOB : 8.4)
Speed	10 Msps
Power	460 μW
Area	70 μm x 140 μm



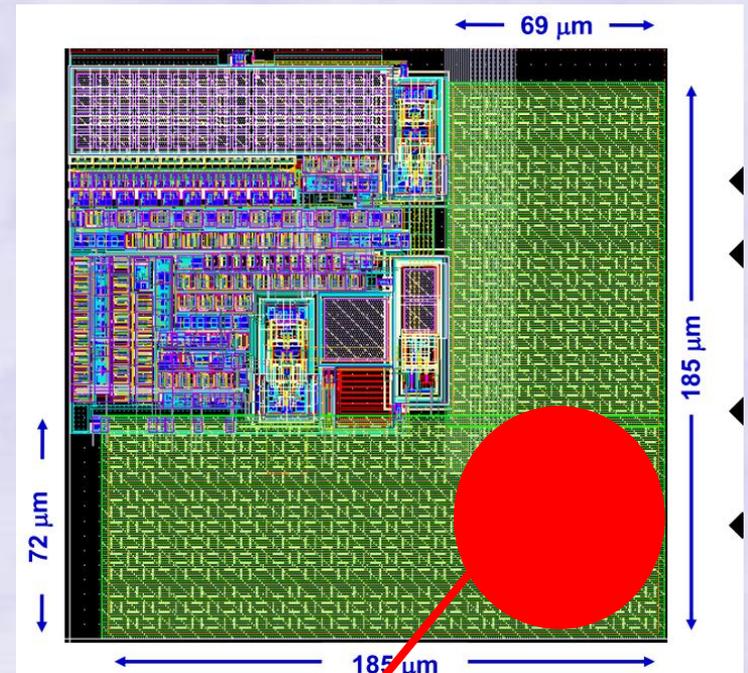
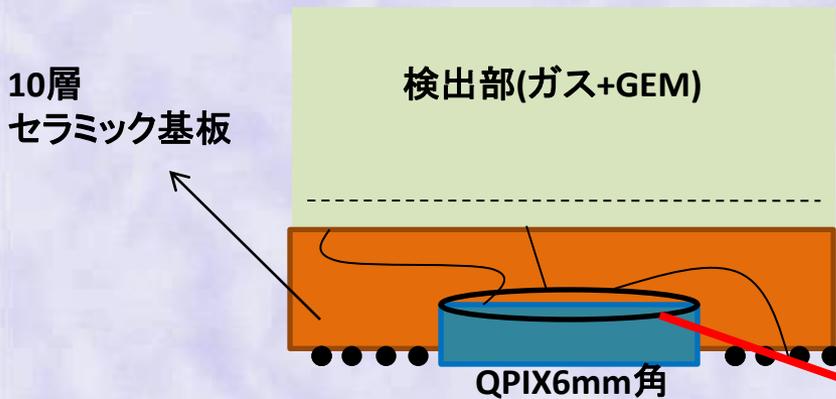
- **Serial / parallel readout mode**
- **240 Mbps readout speed is achieved. (limited by measurement environments)**
- **Readout time:
2.6 μs @ parallel mode /
54 μs @ serial mode**

◆ もうひとつの実装法 上にPAD基板を載せる

◎ : 隙間なく敷き詰められる
△ : 技術的にチャレンジング



ガス側から眺む
検出面 (PAD)
(500 μ mピッチ)

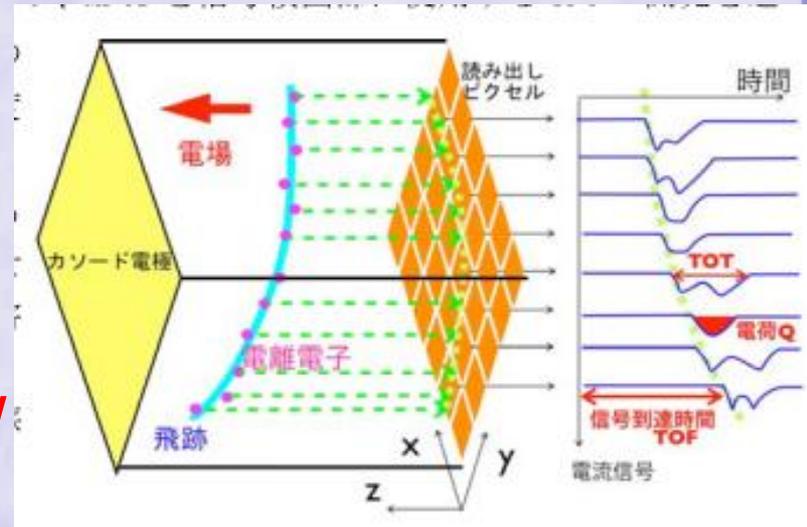


金スタッドバンプ

TIMEPIXとの差異

PIXELごとにとる情報

- TOF: 到達時間 (TIMEPIXも)
- TOT: 信号幅 (TIMEPIXも)
- SAR ADC: 全電荷(Q) **NEW**



TIMEPIX: TOTでQを測定(2次元からの拡張)
3次元の現実: TOTだけは不十分

VOXEL検出器へ

- 信号の来たところだけの情報を残す(当面)
- 多重バッファー化で3次元ピクセル(VOXEL)に(将来)

<TERMS>

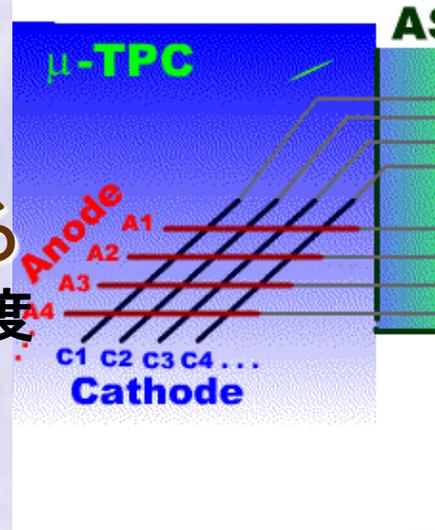
TOF(Time of Flight) :トリガーからそのピクセルがHITするまでの時間

TOT(Time Over Threshold) :そのピクセルの信号持続時間

SAR(successive approximation Register)ADC : 波形をを逐次比較するADC:

◆ TOTだけでは不十分

- もともとの飛跡の角度による不定性
- 電子雲は縦(ドリフト)(時間)方向に拡散する
 - ・ ガス種類などにも依存するが $0.1\text{mm}/\sqrt{\text{cm}}$ 程度



短ドリフト
(~もとの飛跡)

長ドリフト
(縦拡散あり)

ドリフト方向

元の飛跡

拡散後

TOT(青)は変わるが
電荷(赤)は変わらない

TOTは さらに:
飛跡の傾きの影響も受ける

TPCにとってADC情報は必須
TOTも深さ情報を得る補助情報に。