



ミグダル効果観測のための ガスTPCにおけるDAQ開発

神戸大学 濱田悠斗

身内賢太郎, 金崎奎, 東野聡, 大藤瑞乃,

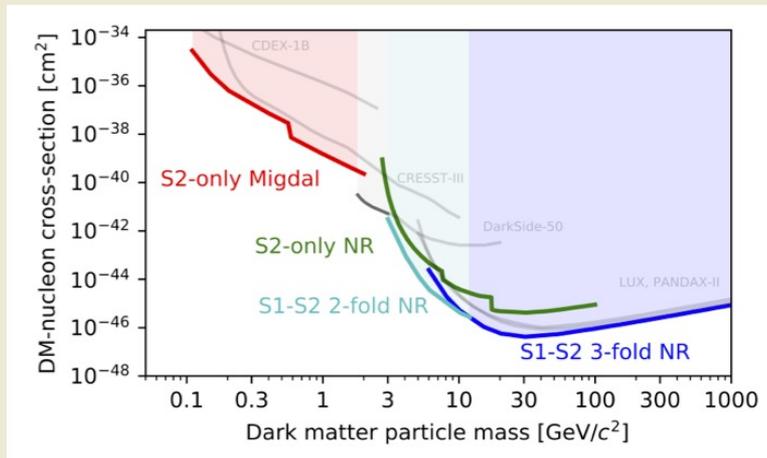
中村輝石, 内山偉貴, 吉田将, 池田智法

もくじ

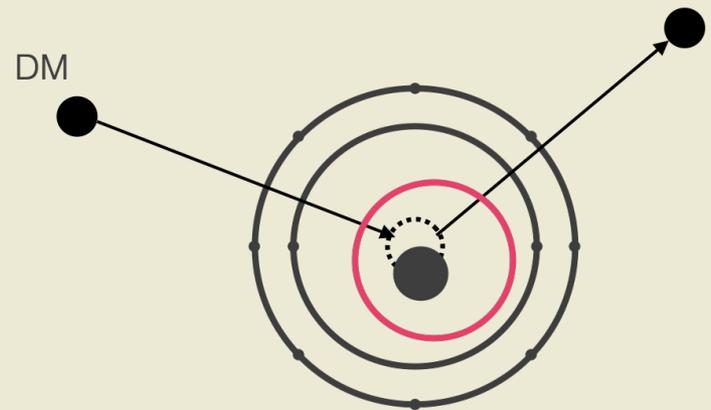
- 暗黒物質の直接探索
- ミグダル効果
- ミグダル効果の観測可能性
- MIRACLUE実験のstatus
 - 10cm Ar ガスTPC・第一回ビーム試験
 - 30cm Ar ガスTPC (開発中)
- DAQアップグレード作業
- 展望・まとめ

暗黒物質の直接探索

- WIMP: Weakly Interacting Massive Particle
 - DMの有力候補
 - SM粒子と相互作用すると仮定して直接探索されている
- 超対称性理論からも 100GeV ~ 10TeV と予言されている
 - まだ見つかっていない
 - sub-GeV領域の探索も -> ミグダル効果



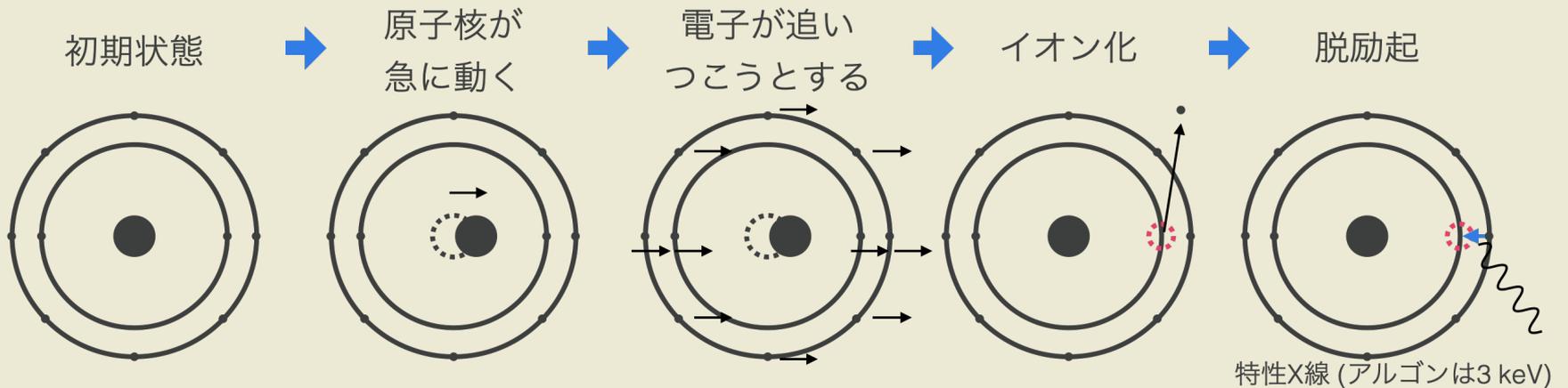
Jacques Pienaar TAUP2021



動いた原子核の
運動エネルギーぶんを検出

ミグダル効果

- 原子核が急に動くときに低確率で追加の励起/電離が起こる
 - 量子力学の計算から導かれる
 - 軽いDMの探索領域を広げる

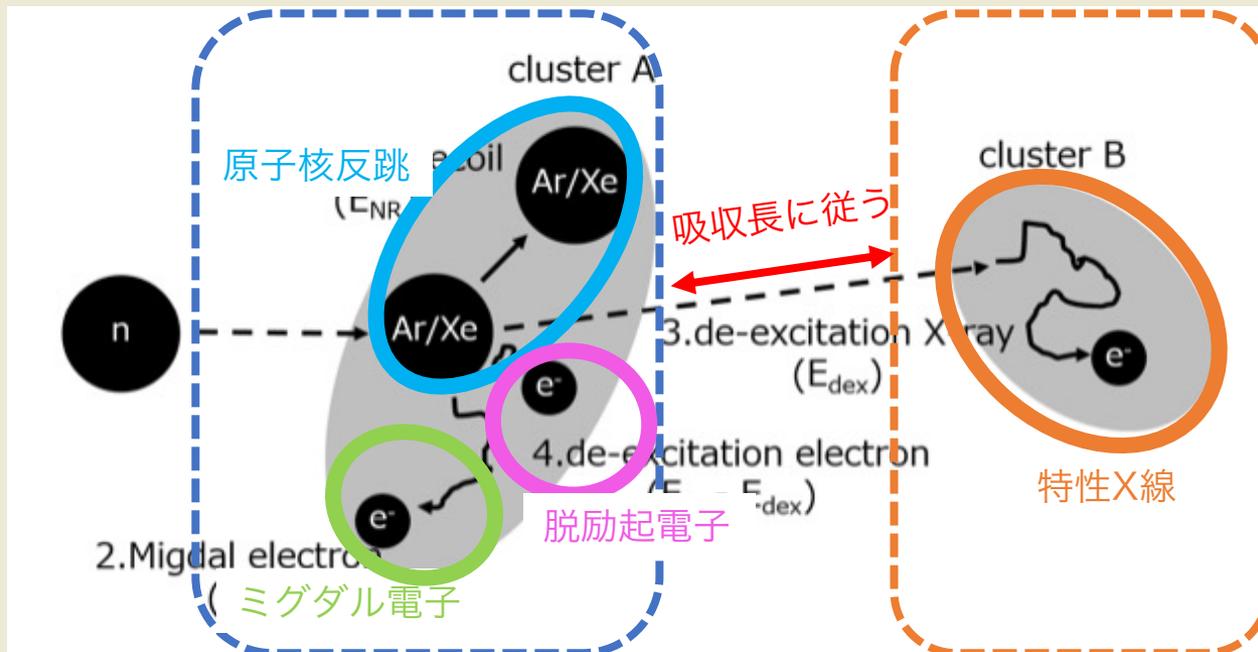


- しかし、原子核反跳に伴うミグダル効果の観測事例はない
 - 初観測を目指す -> MIRACLUE実験

Migdal effect Investigation
as RARE event CLUES

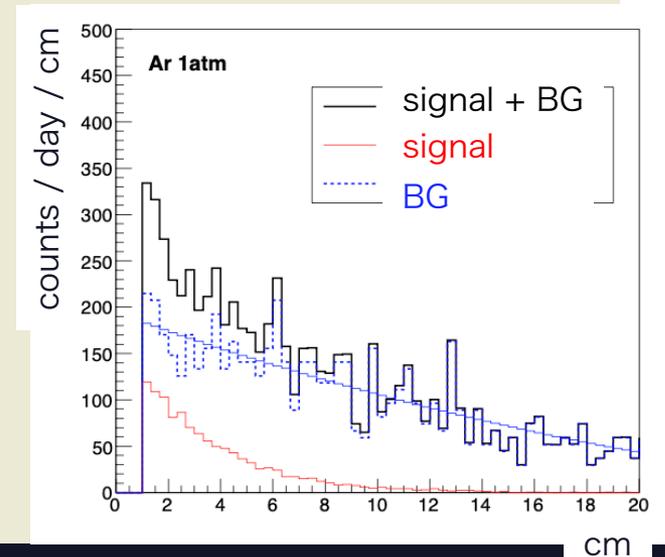
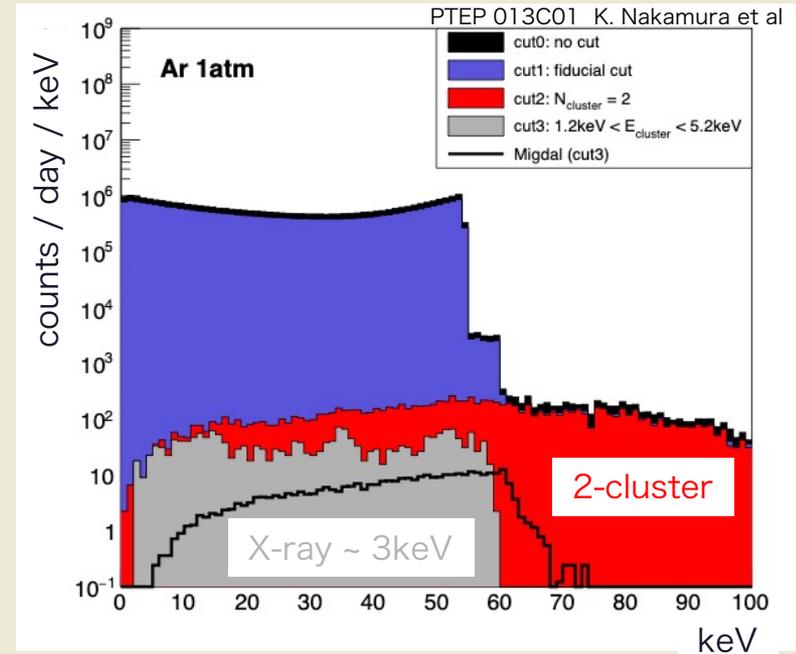
ミグダル効果観測に向けて

- 原子核反跳によるミグダル効果の初観測を目指す
 - ガスTPCに中性子ビームを照射
 - 原子核反跳とK殻電離に伴う特性X線放出のプロセスに注目
 - 適切なガス (圧) を選べば2つのクラスターを分離できる → BG排除
 - クラスターBは固定のエネルギー → BG排除



予想されるBG

- 目的の2クラスター事象のBGは？
(Ar 1atm)
 - 中性子の多重散乱
 - (n, γ) によるガンマ線
 - BGを除去できる要因
 - 2クラスターであること
 - 特性X線のクラスターが3keV付近であること
 - クラスタースペースの分布
 - これもBG排除に貢献
- > 位置分解能に強いTPCの出番



MIRACLUE実験: 概要

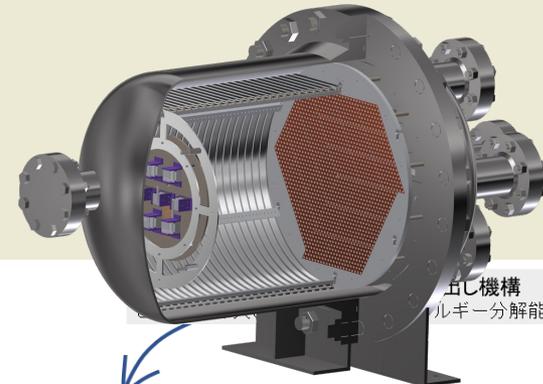
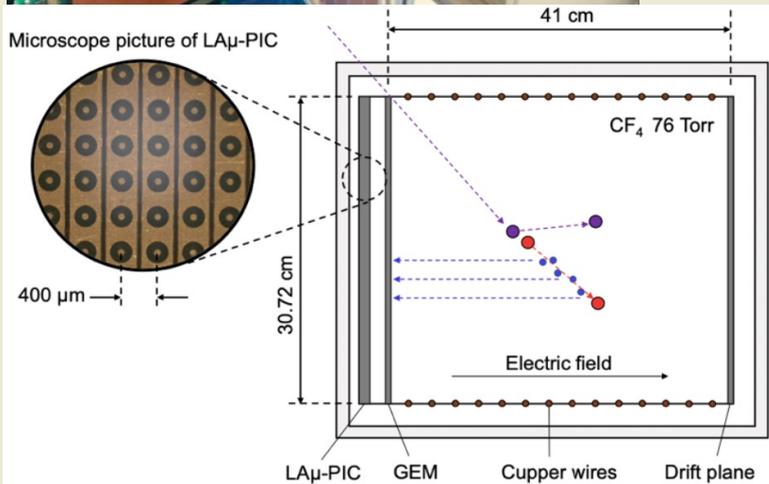
- 既存のガスTPC技術を用いてミグダル効果の観測を目指す



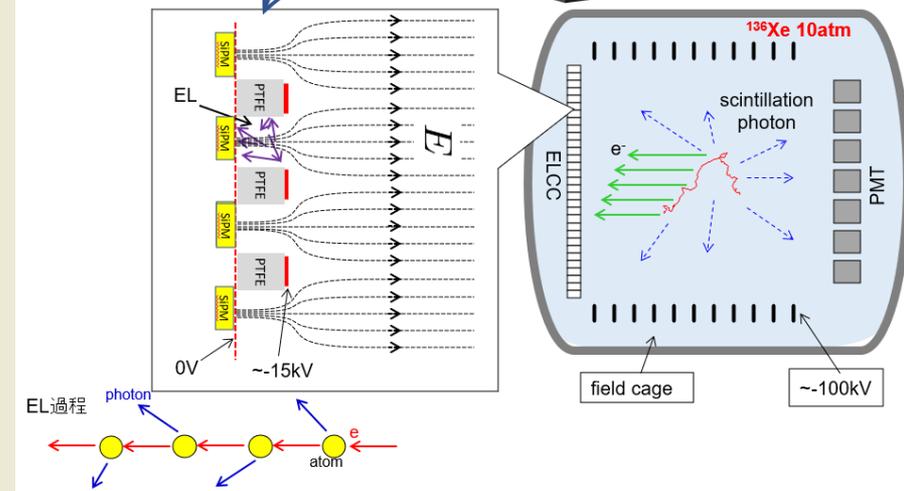
DM探索
Ar 1atm, GEM + μ -PIC



0 $\nu\beta\beta$ 探索
高圧Xe, ELCC + MPPC



出し機構
ルギー分解能を実現



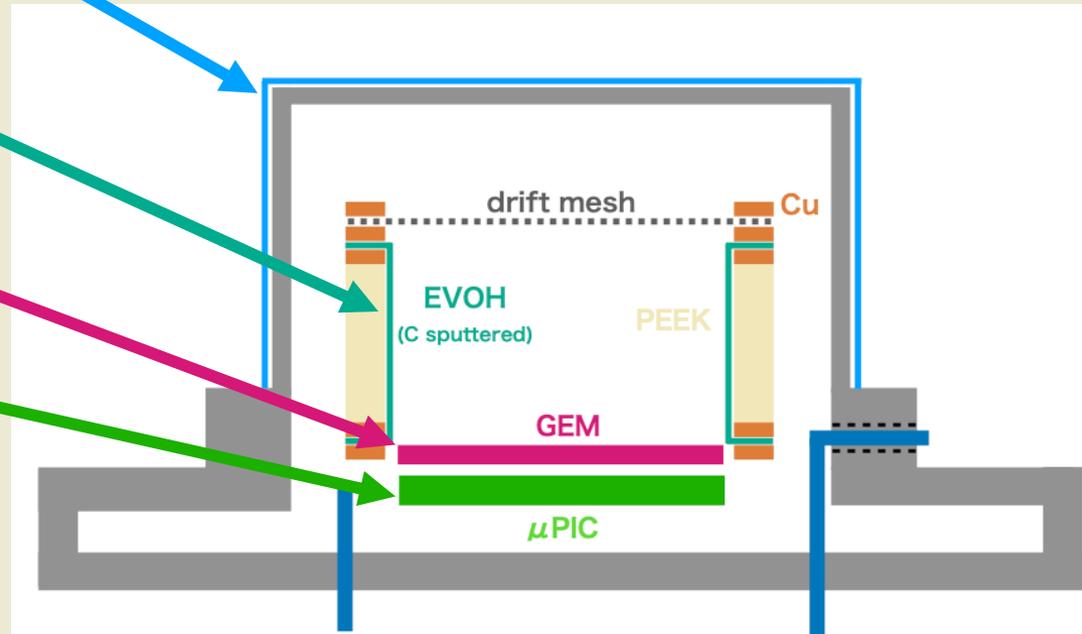
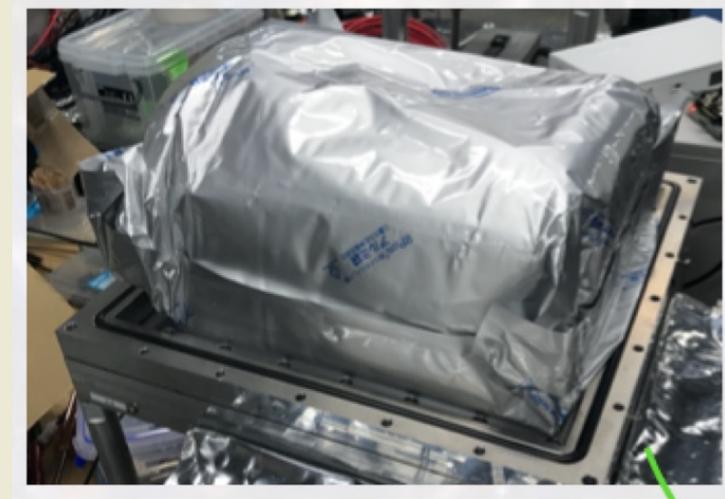
MIRACLUE実験: Ar TPC

- 第一回ビーム試験 (2022/04)
 - 10cm角 Ar TPC
 - 中性子ビーム環境下での動作を試験した
- 第二回ビーム試験 (2022/12)
 - 30cm角 Ar TPC ←現在開発中！
 - 大きくなった検出器で統計を稼ぎたい



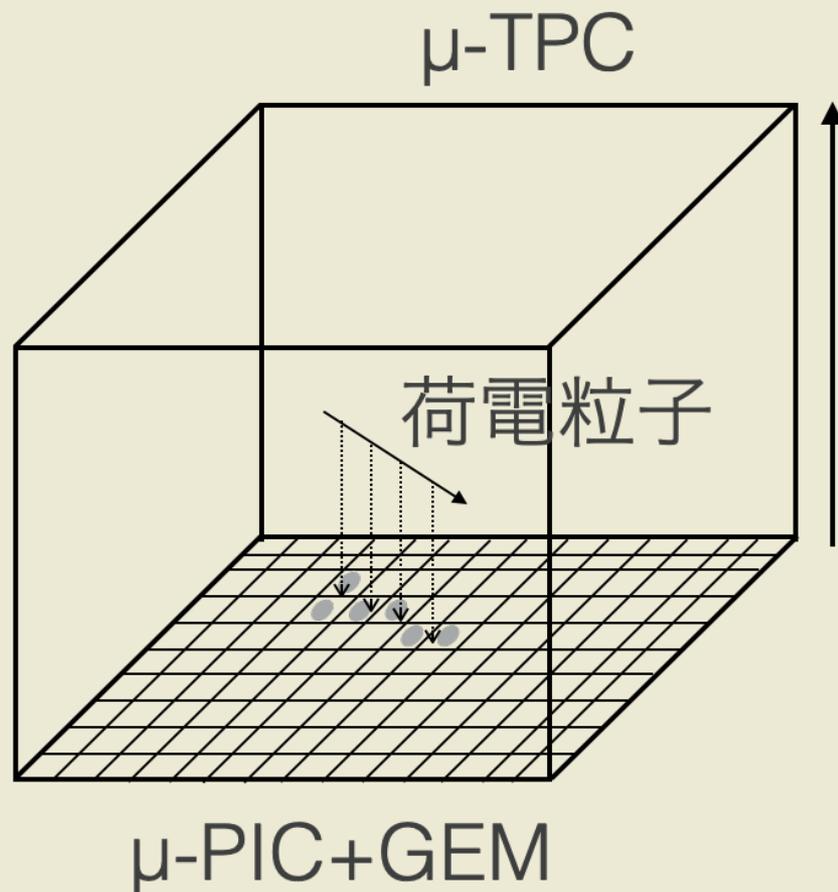
10cm角TPC: 特徴

- Ar + C₂H₆ (9:1) 1atm
 - 3keV X線で吸収長3cm
- 低質量なガスバリア
 - BG削減のため
- 抵抗性薄膜での電場形成
- GEMで前置増幅
- μ -PICで増幅/読み出し
 - 2D ストリップ (256×2 ch)
 - 400 μ m ピッチ



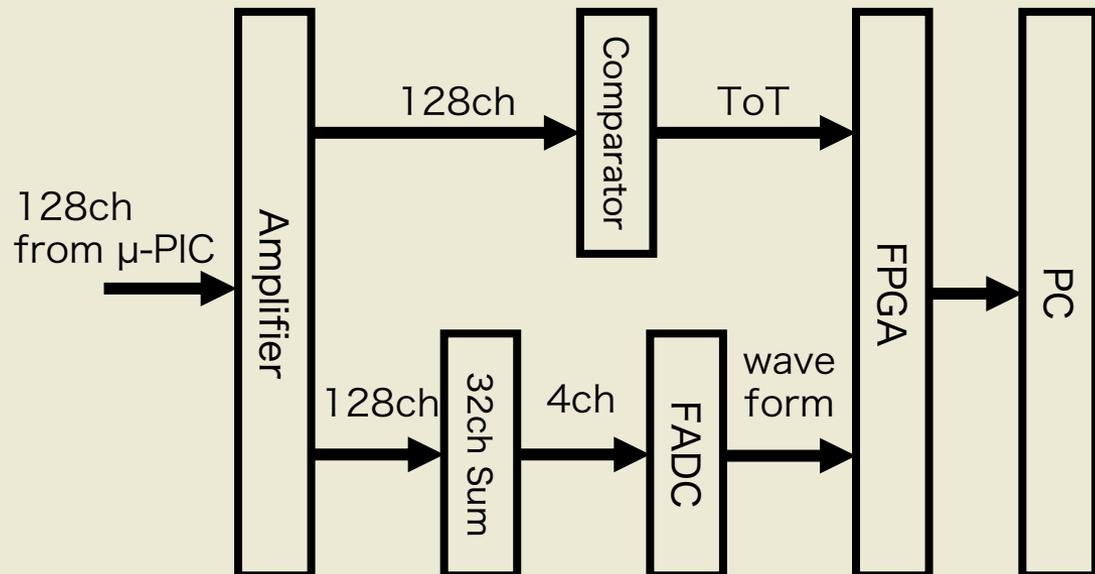
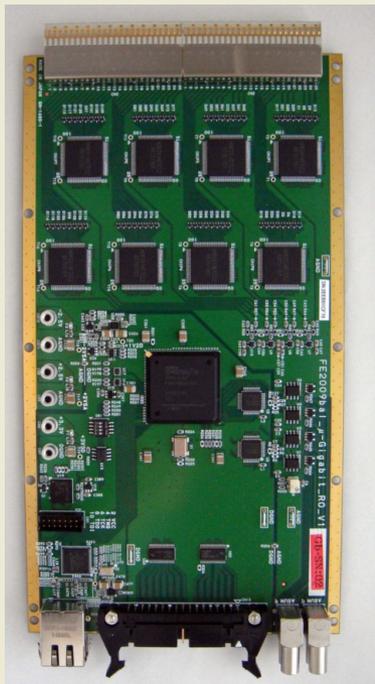
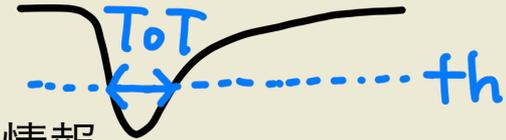
10cm角TPC: 検出方法

- μ -PICでの3次元飛跡検出方法
 - 荷電粒子がTPC内のガスを電離
 - 電離電子が μ -PICへドリフトされる
 - 格子状に貼られたストリップから電子の二次元座標を取得
 - 信号の時間差からz軸方向の座標を取得



10cm角TPC: DAQ

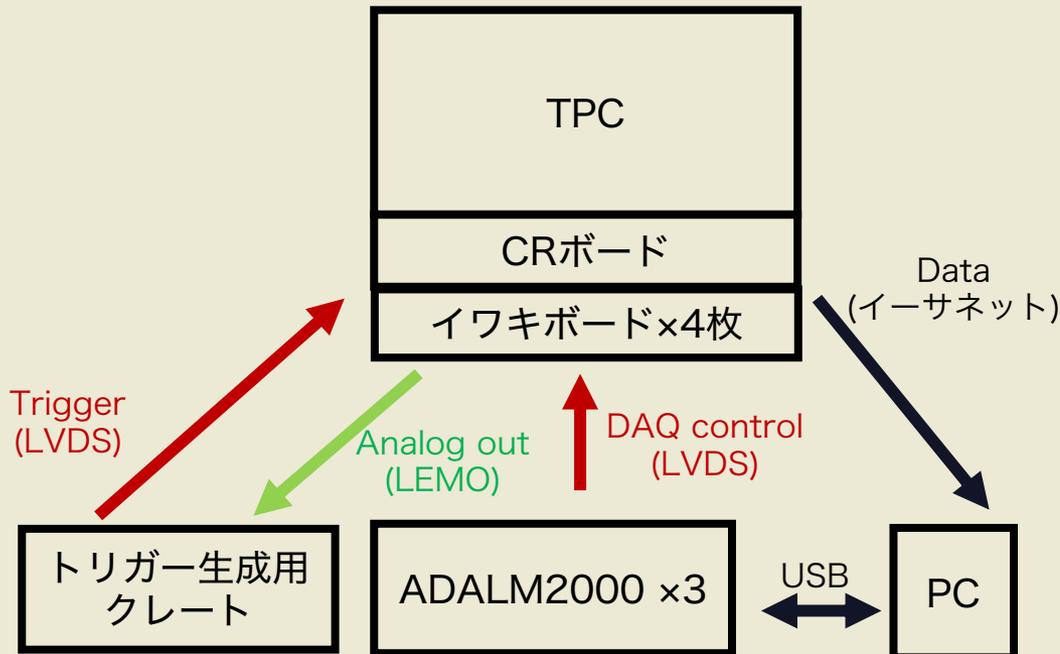
- こんなフロントエンドボードを使います
 - Bee Beans Gigabit_RO_V1_BOARD (イワキボードと呼んでいる)
 - 入力：128ch アナログ (μ -PICからの信号)
 - 出力：128ch ToT (Time over Threshold) , 4ch 波形情報



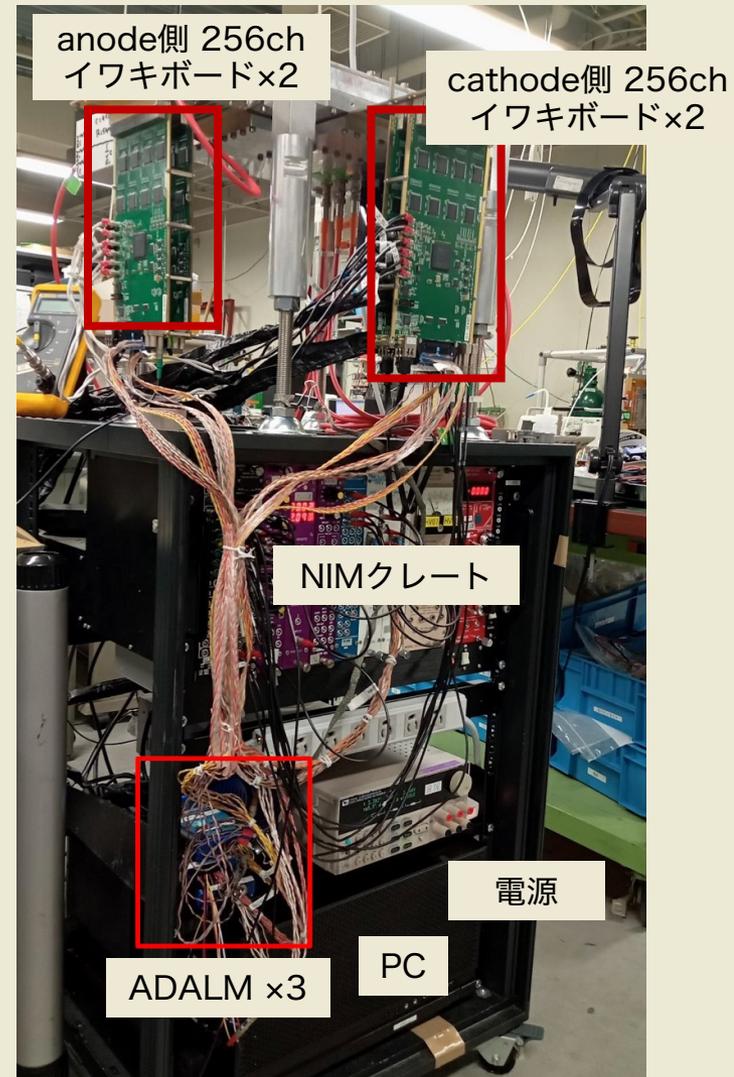
10cm角TPC: DAQ

• 得られる情報

- 512ch ToT → 3次元飛跡
- 16ch 波形情報 → エネルギーデポジット

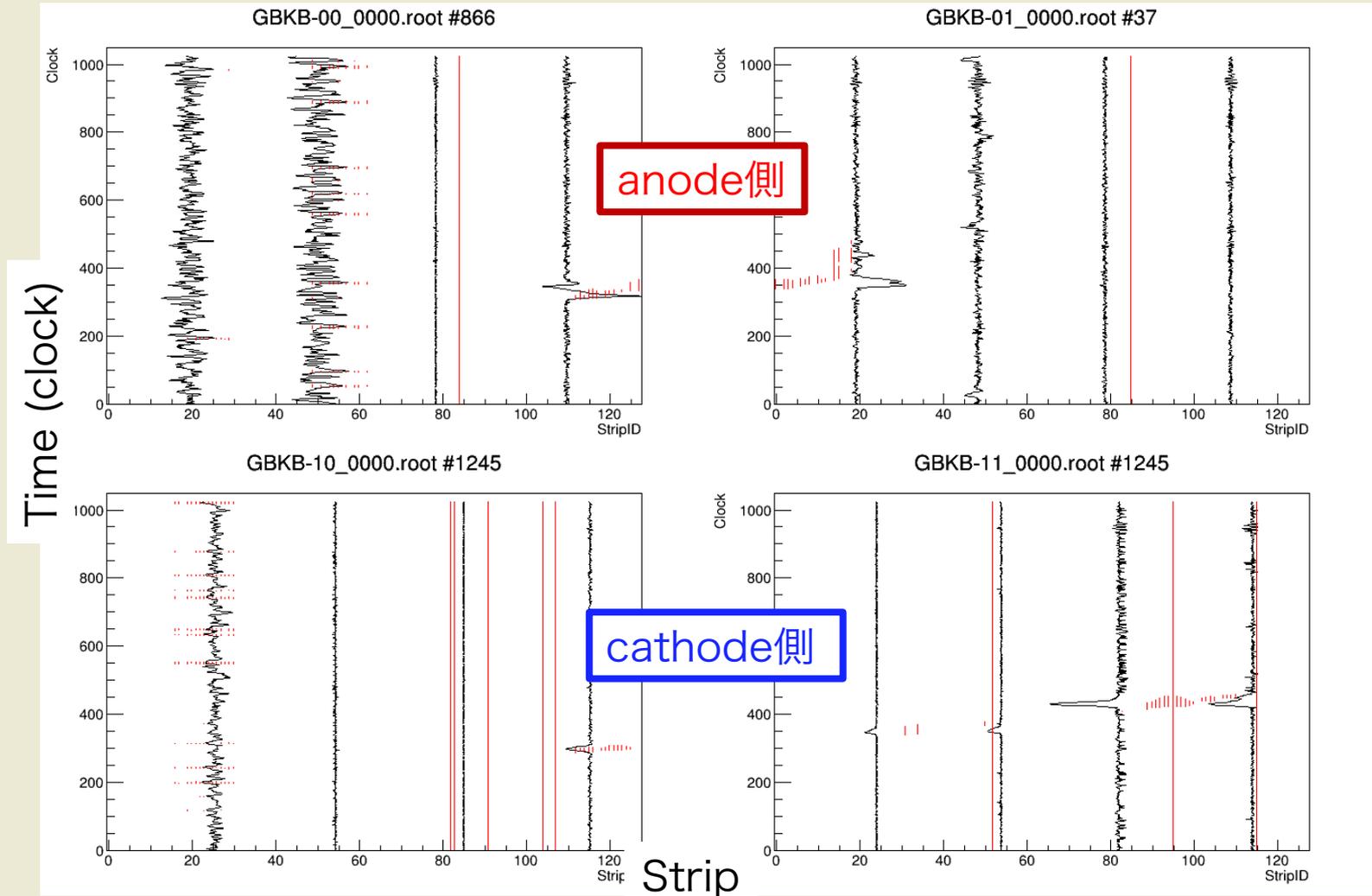


ADALM2000:
PCからデジタル信号を出すために使う



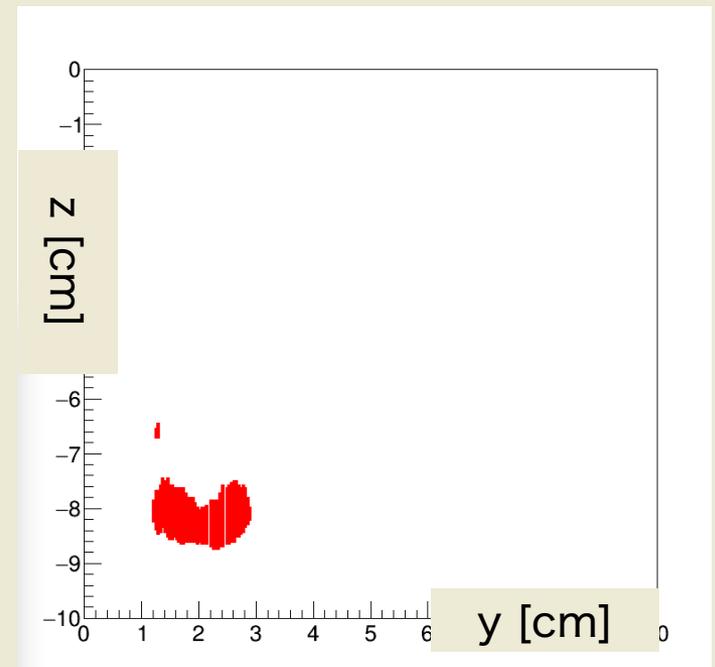
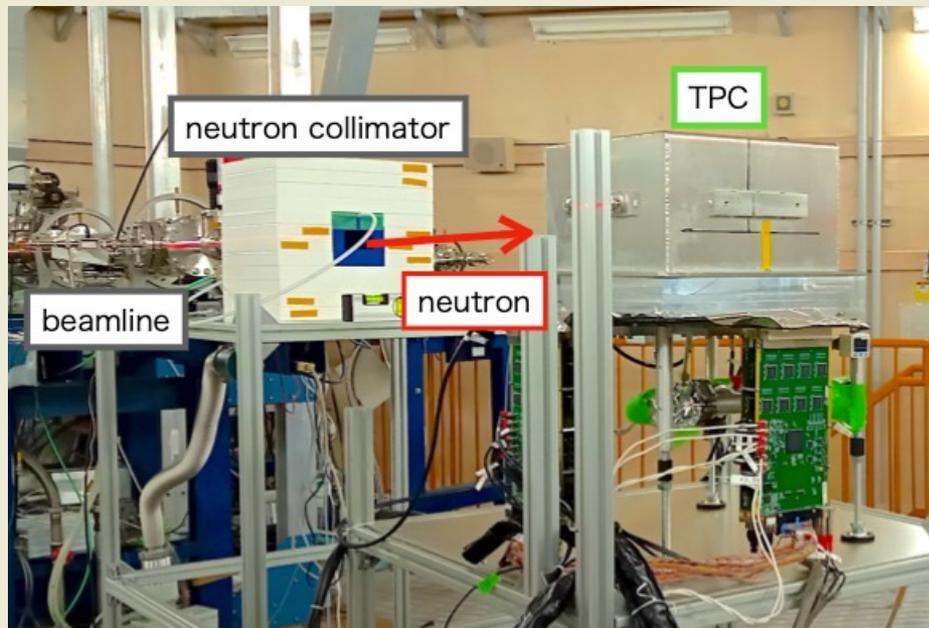
10cm角TPC: DAQ

- 1event 分の生データ (に近いもの)



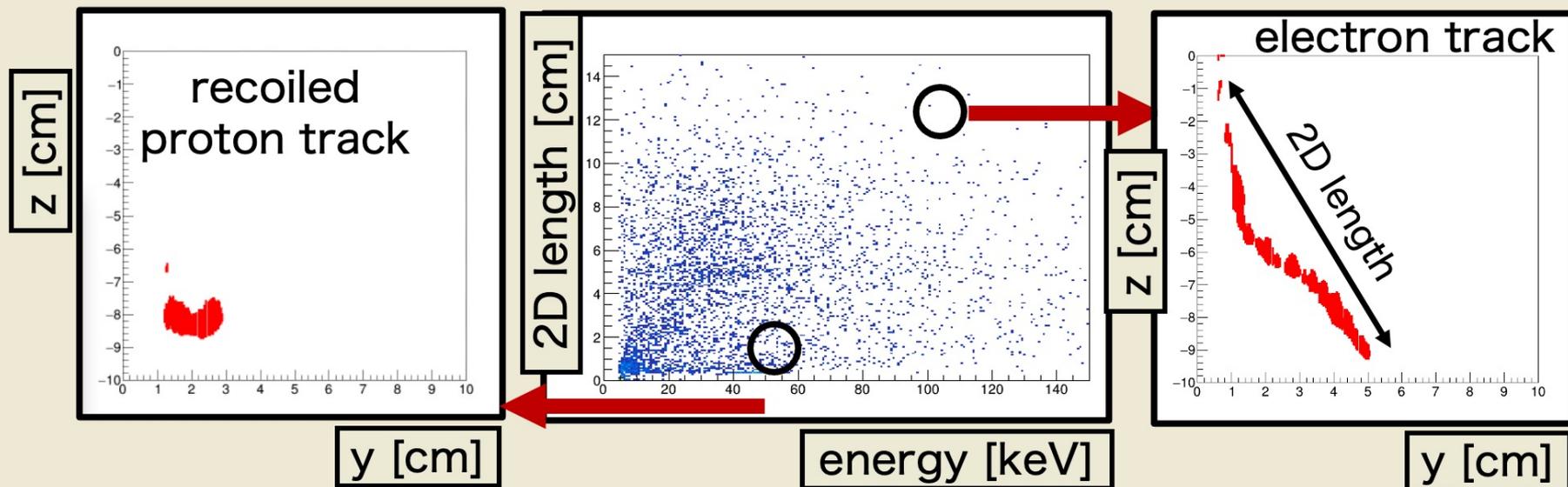
第一回ビーム試験

- 2022/04 @ AIST
 - 565keV DC中性子ビーム
- 二次元飛跡のみ検出できた (エレキ系トラブル)
- 中性子ビーム環境下で原子核反跳が捉えられた



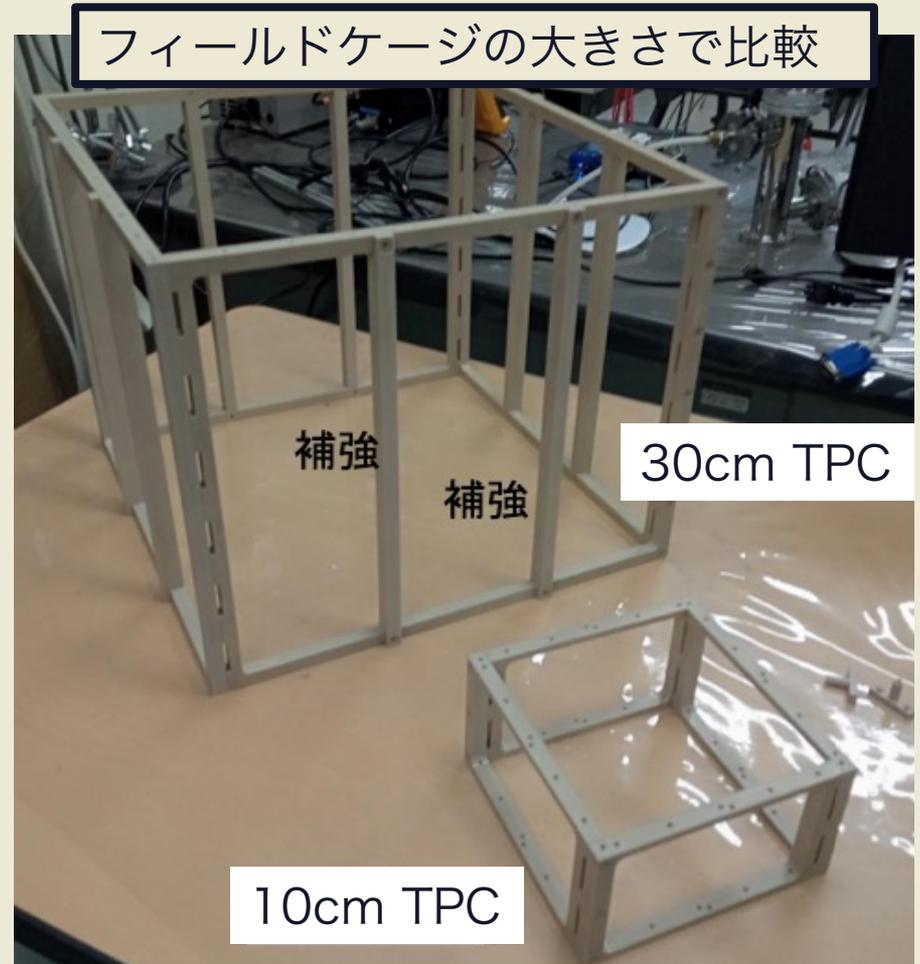
第一回ビーム試験

- 他にも
- 原子核反跳と電子反跳のシグナルが分離できた
- エネルギー vs 飛跡長
 - 二次元飛跡しか見えないので、射影の長さ



30cm角 TPC

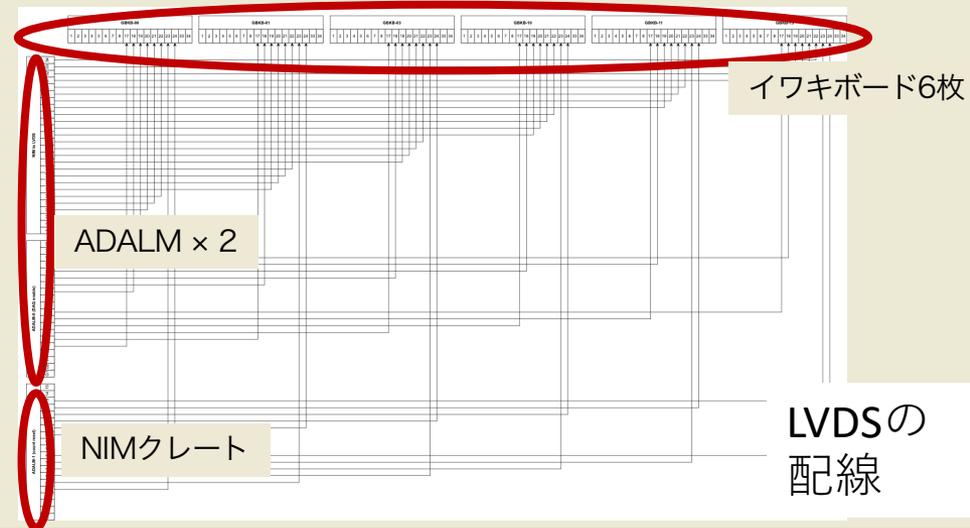
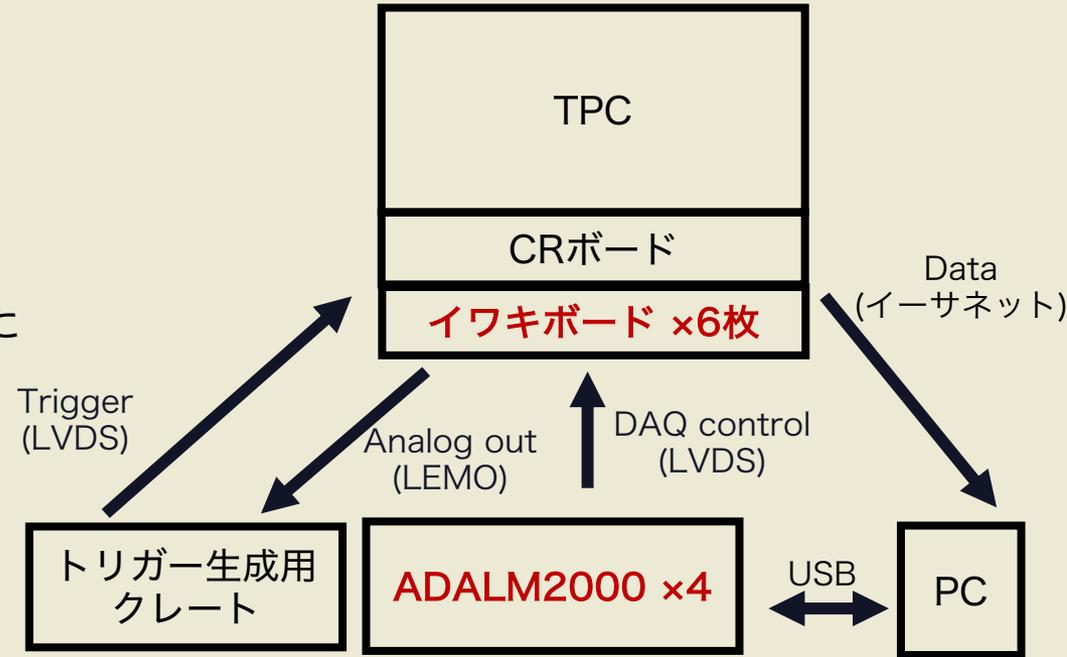
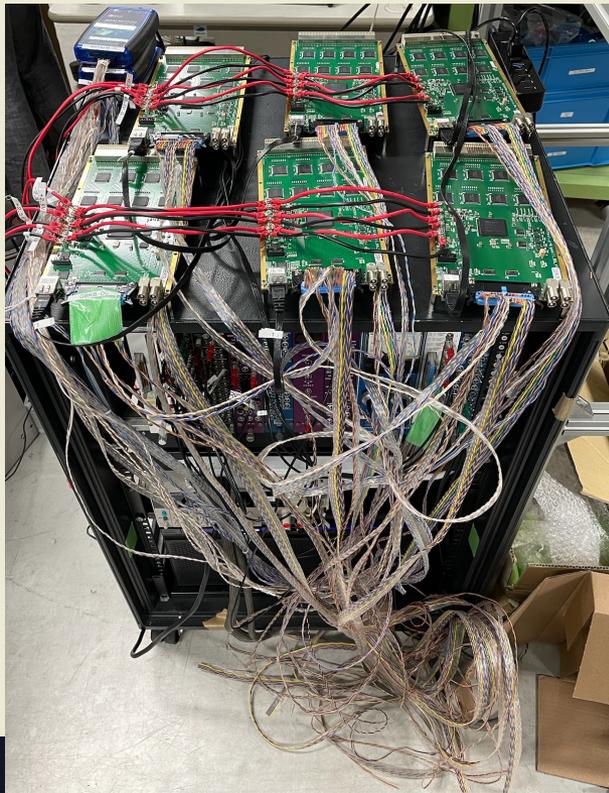
- 第二回ビーム試験に向けて大型化したTPCを開発中
- 10cmからの変更点
 - μ -PIC : 10cm角 \rightarrow 30cm角
 - ピッチ : 400 μ m \rightarrow 800 μ m
 - チャンネル数 : 512 \rightarrow 786
 - ボード数 : 4枚 \rightarrow 6枚



DAQのアップグレード

30cm角 TPC: DAQ

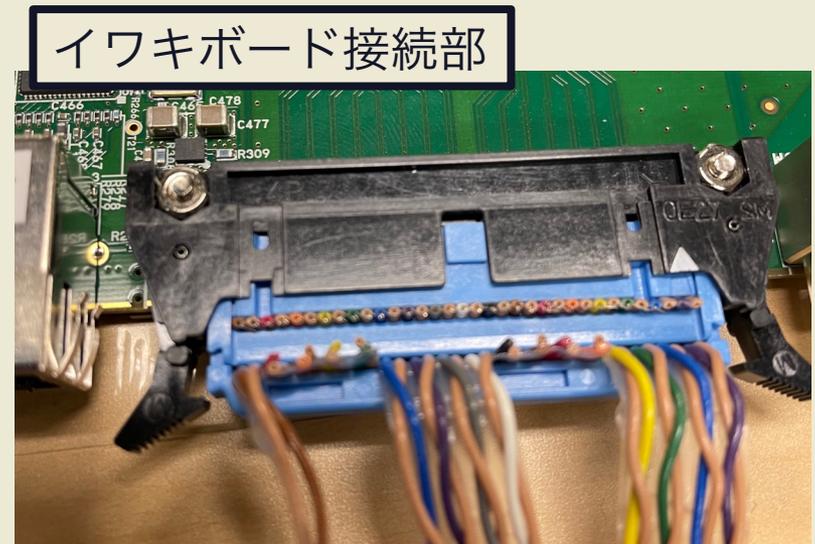
- DAQのアップグレード
- ボードの増加に伴って
 - DAQソフトウェアを書き換えた
 - LVDSケーブルを新調



LVDSの配線

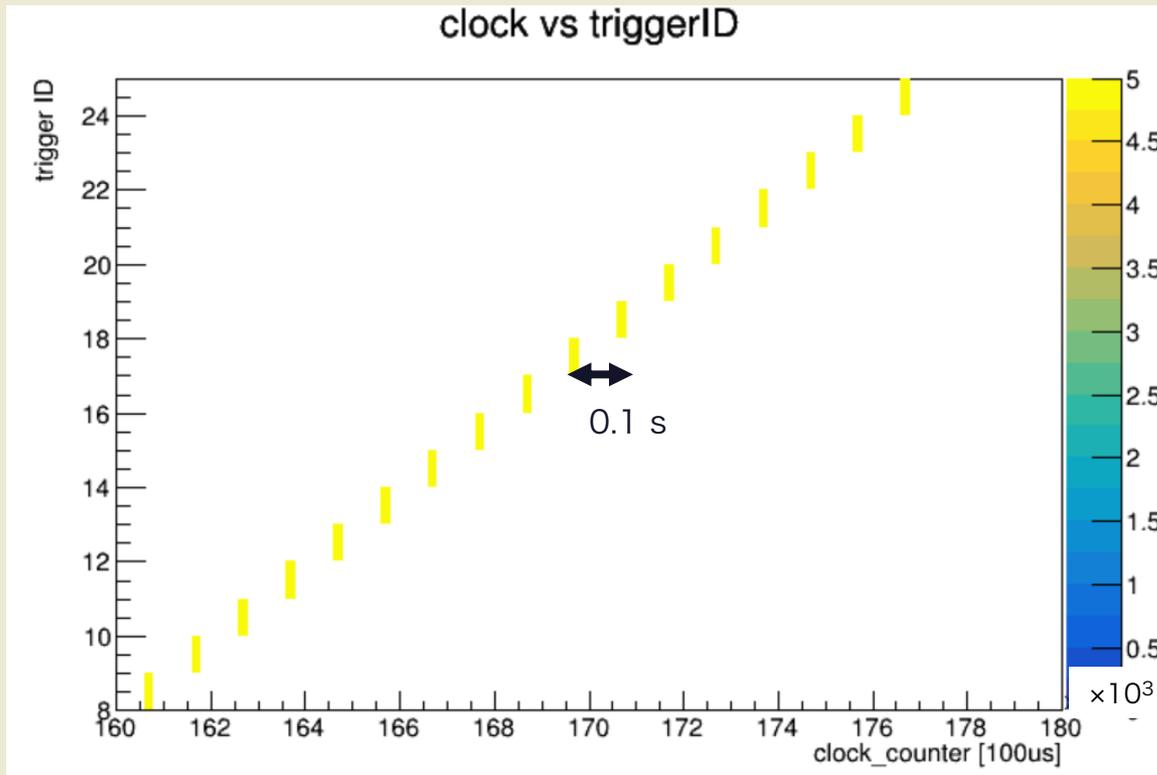
30cm角 TPC: ケーブル

- ケーブルの製作
 - 3つのモノを繋ぐ
 - ADALM, NIMクレート, イワキボード
 - 今は不恰好な感じ
- 未来
 - 専用のものを発注する
 - 中継ボードを作る
 - ADALMやめてFPGA



30cm角 TPC: DAQ

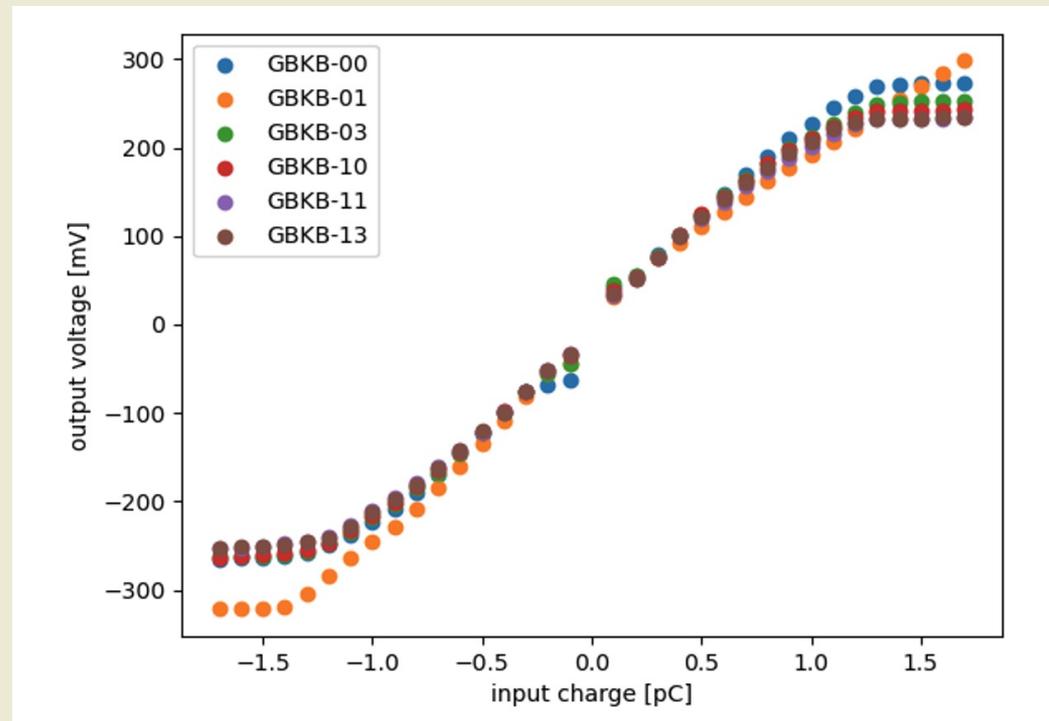
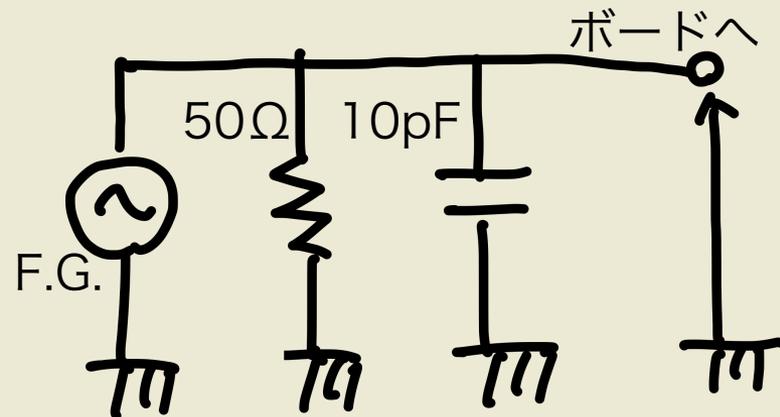
- 10Hzのテストトリガーを入れて試験
 - 5枚のボードで同期できていることを確認
 - もう一枚はケーブル不良



30cm角 TPC: ゲイン測定

- 電荷入力に対する応答を確認した
 - 入力電荷 ± 1.0 pC の範囲で線形性がある
 - 増幅率 = 200 mV/pC

電荷入力の回路



今後の展望

- 第二回ビーム試験に向けて30cm TPCを完成させる
 - ハードウェアと合体
 - DAQの最適化
 - gain
 - threshold
 - DAC
- ミグダル効果観測へ
 - 原子核反跳を伴うミグダル効果に制限をかけたい

まとめ

- 低質量DMの直接探索に有用なミグダル効果
- 原子核反跳によるミグダル効果の初観測を目指すMIRACLUE実験
- 中性子ビーム環境下, 10cm TPCで原子核反跳を観測できた
- 第二回ビーム試験に向けて 30cm TPC 開発中

backup

イベントレートの見積もり

- 目的の2クラスター事象はどの程度あるか？
 - AISTでの中性子ビームを仮定
 - エネルギー：565keV (陽子とリチウムの ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ 反応を利用)
 - フラックス：1000 / cm^2 / sec (at 1m)
 - Ar 1atm / Xe 8atm (30 cm^3)

ガス	Ar 1atm	Xe 8atm
X線エネルギー ($K\alpha$)	3keV	30keV
X線吸収長	2.95cm	2.19 cm
イベントレート	603 events / day	975 events / day

PTEP 013C01 K. Nakamura et al

- -> イベントレートの的には検出できそう