

ガスTPCを用いた暗黒物質 探索実験のための読み出し技術

神戸大 東野 聡

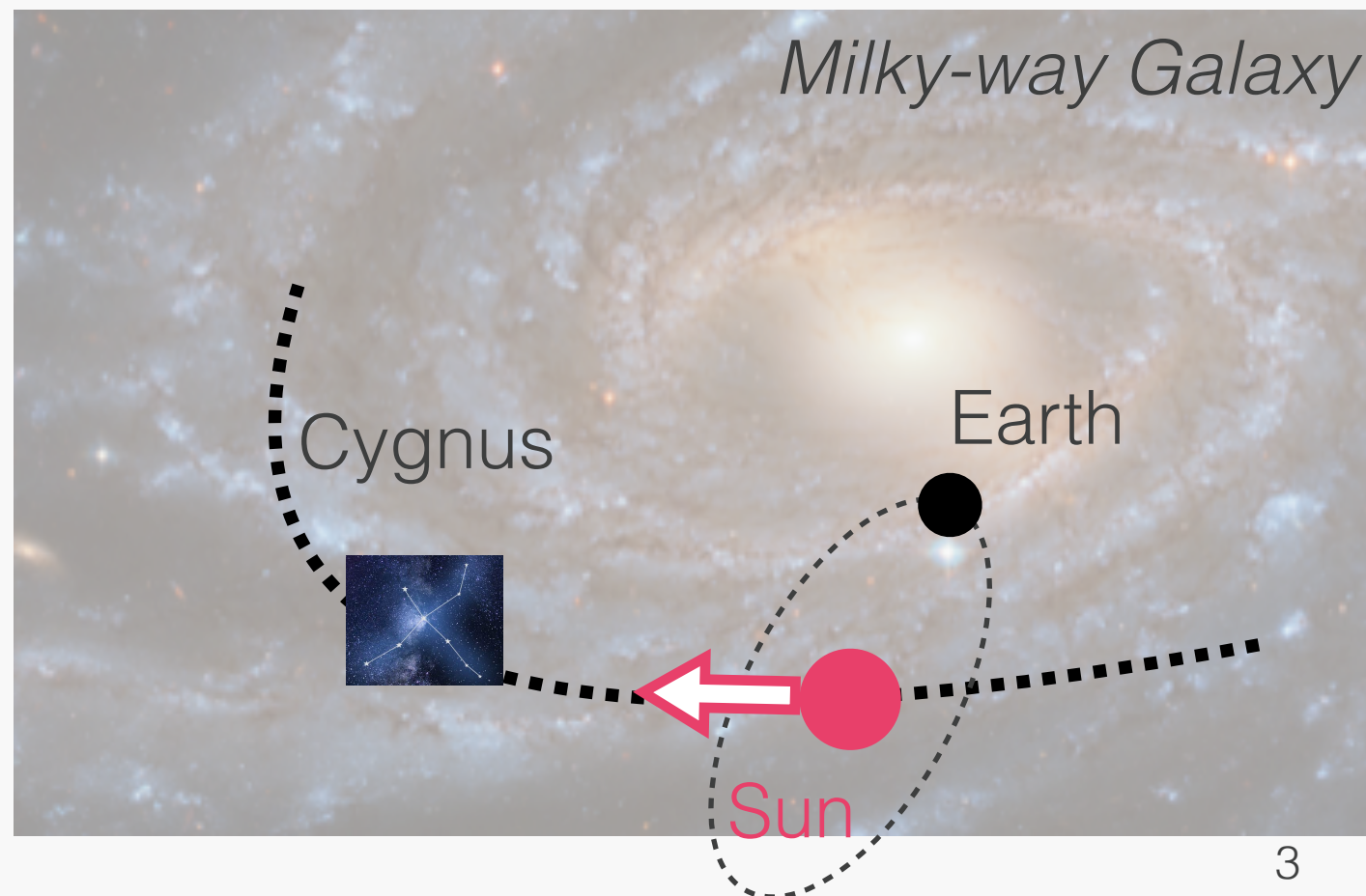
on behalf of NEWAGE and MIRACLUE groups

2025年 11月 18日

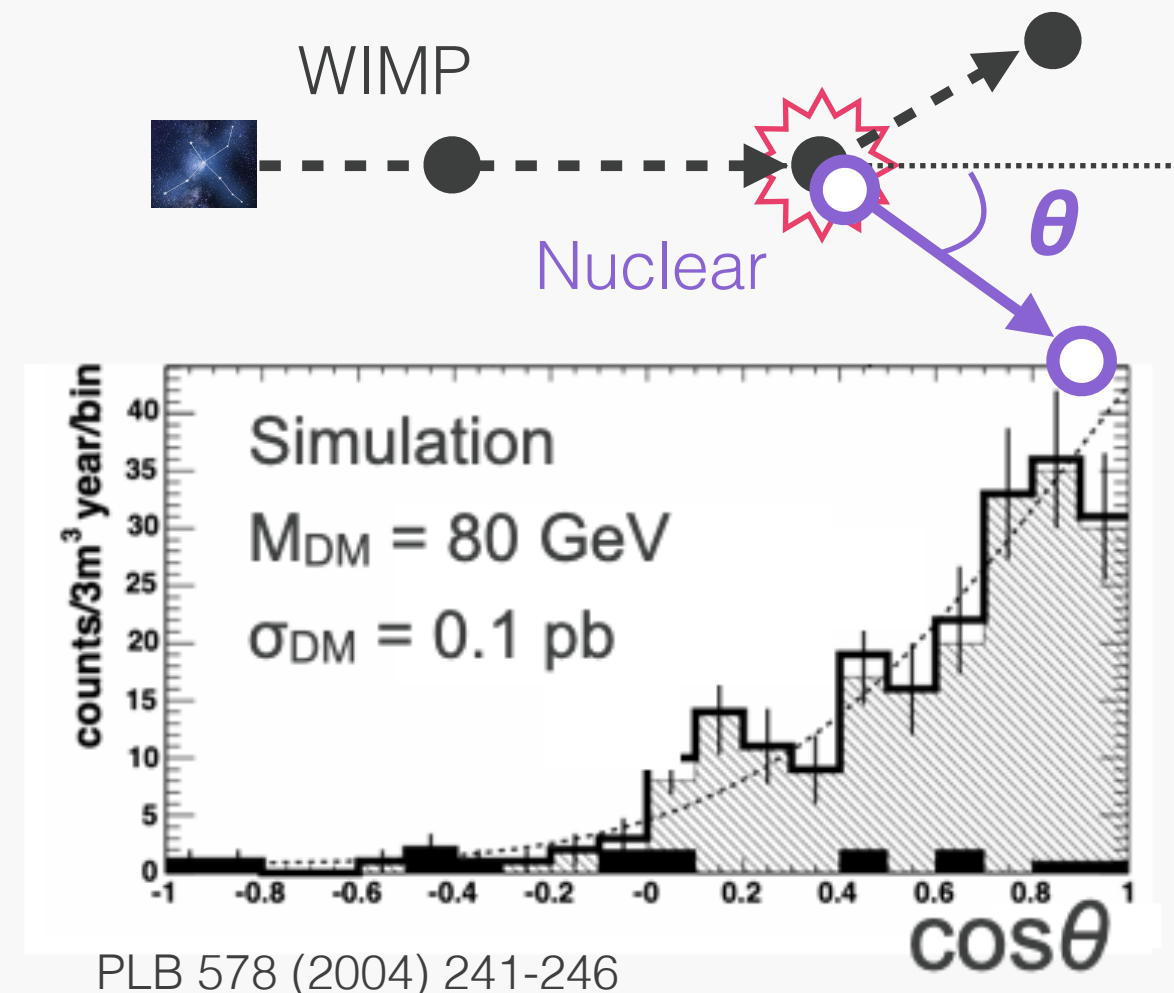
イントロダクション

方向感度を持ったWIMP直接探索

- はくちょう座方向から相対的に到来する暗黒物質 (WIMP) による原子核反跳観測
- 反跳角度を測定することで発見+よりdetailなWIMP性質理解へ
 - ➔ “ニュートリノフォグ”領域へのアクセス (発見)
 - ➔ WIMP kinematicsの理解で標準ハローモデルの検証 (性質理解)

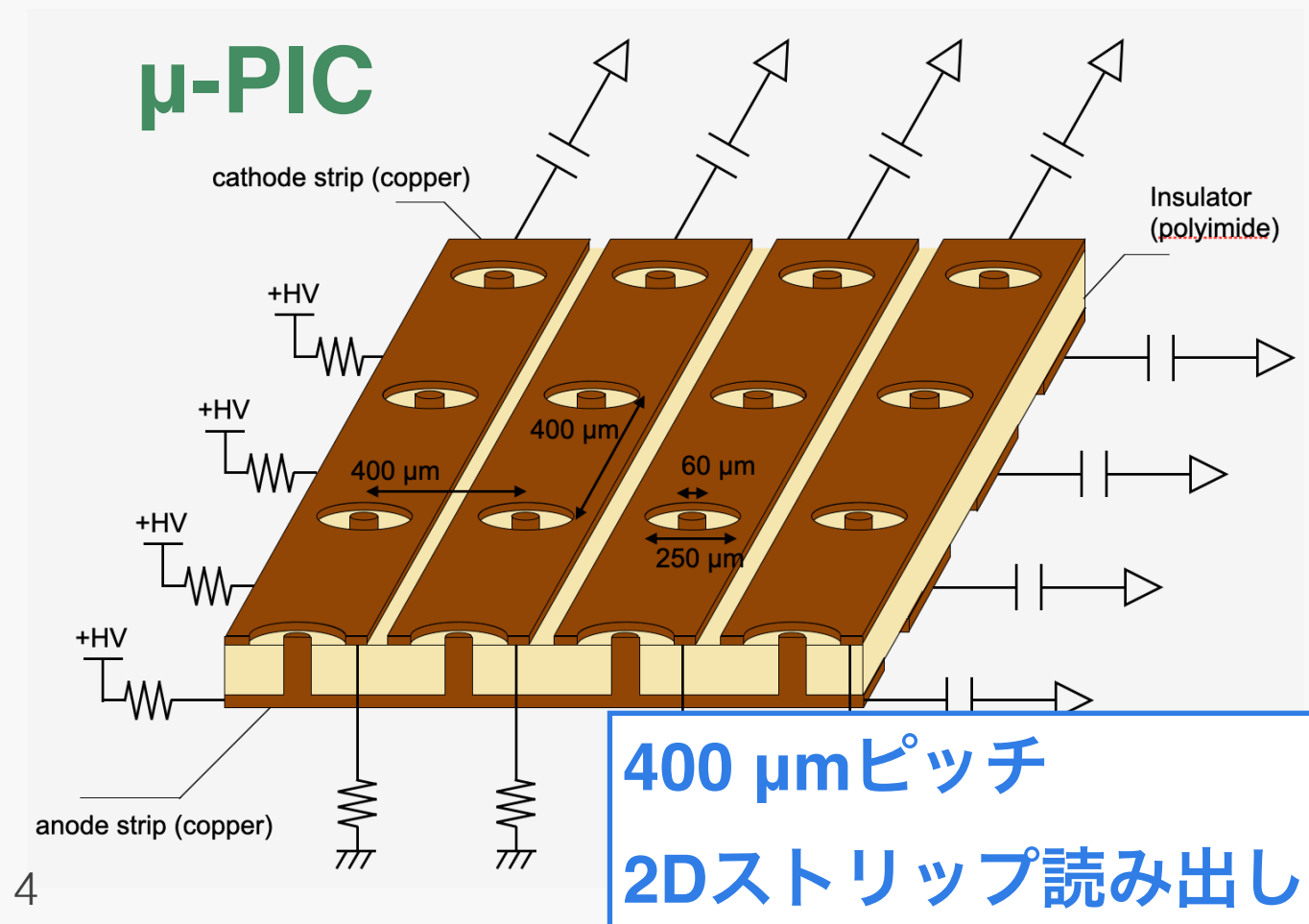
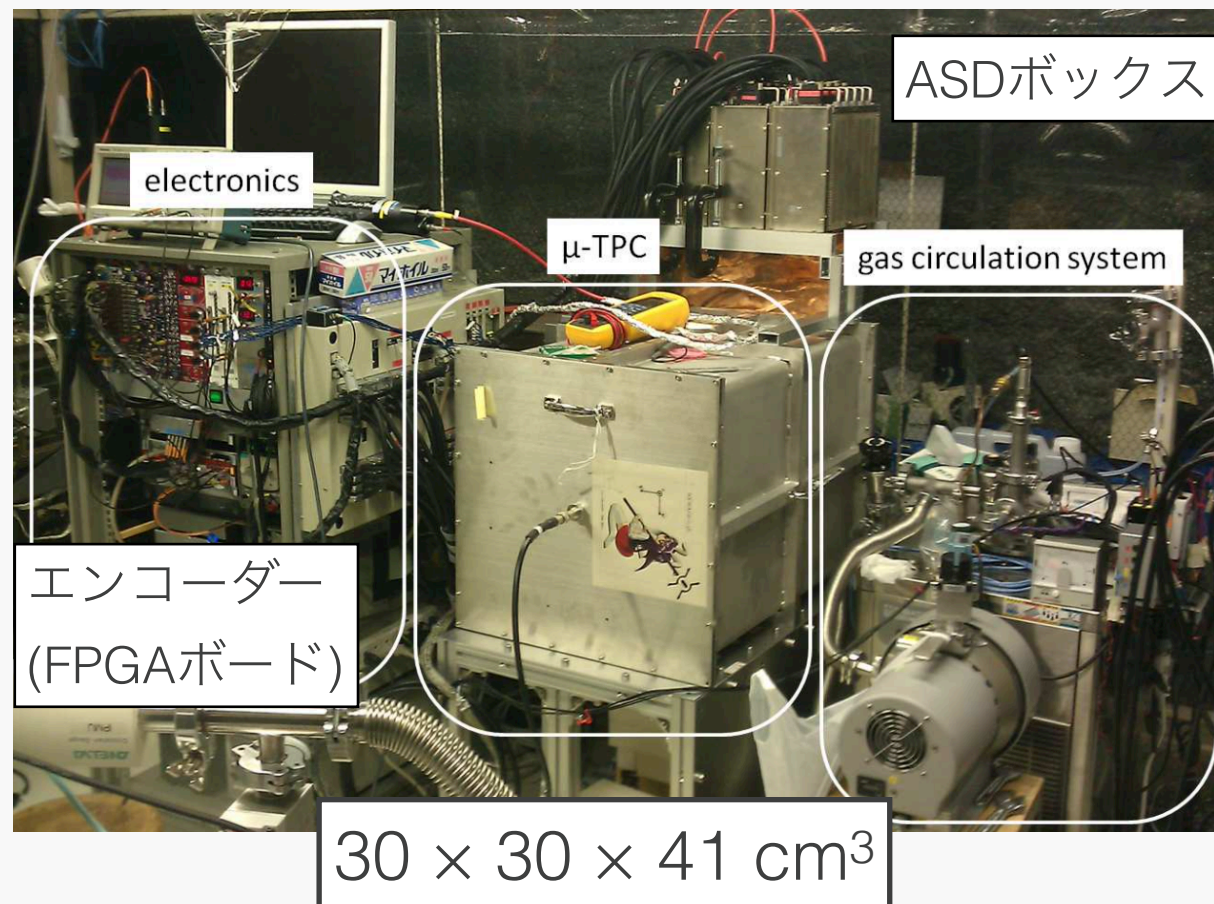
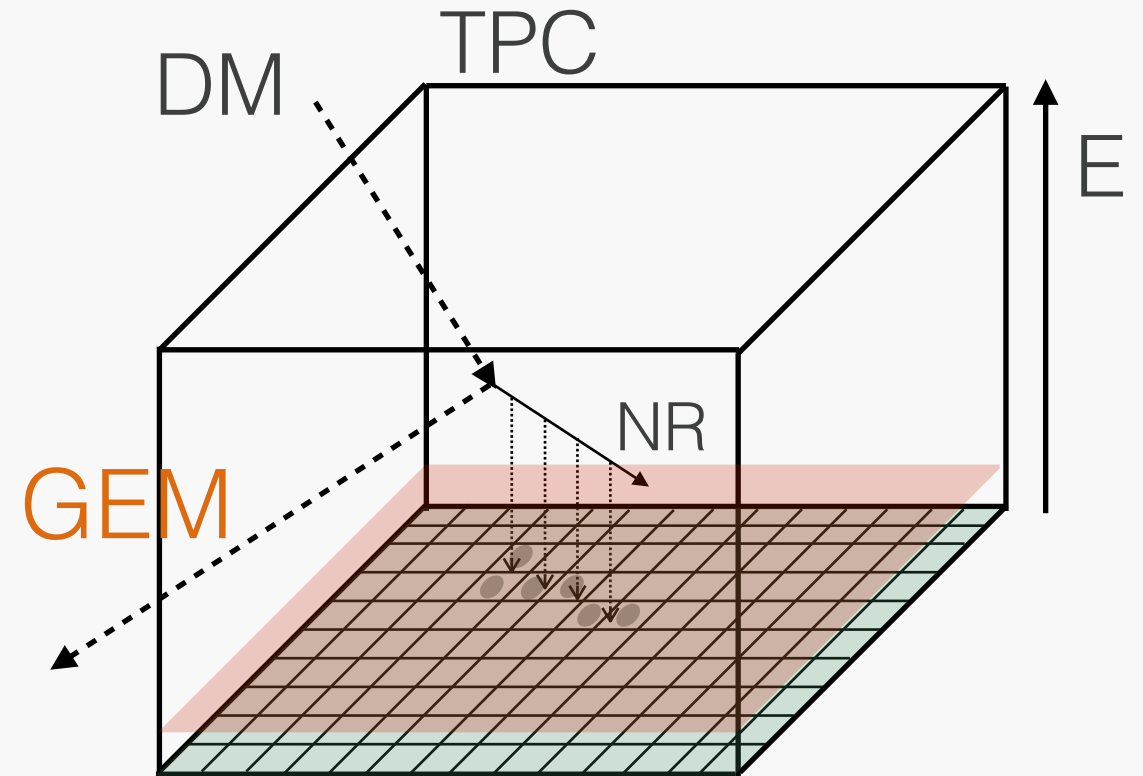


3



NEWAGE

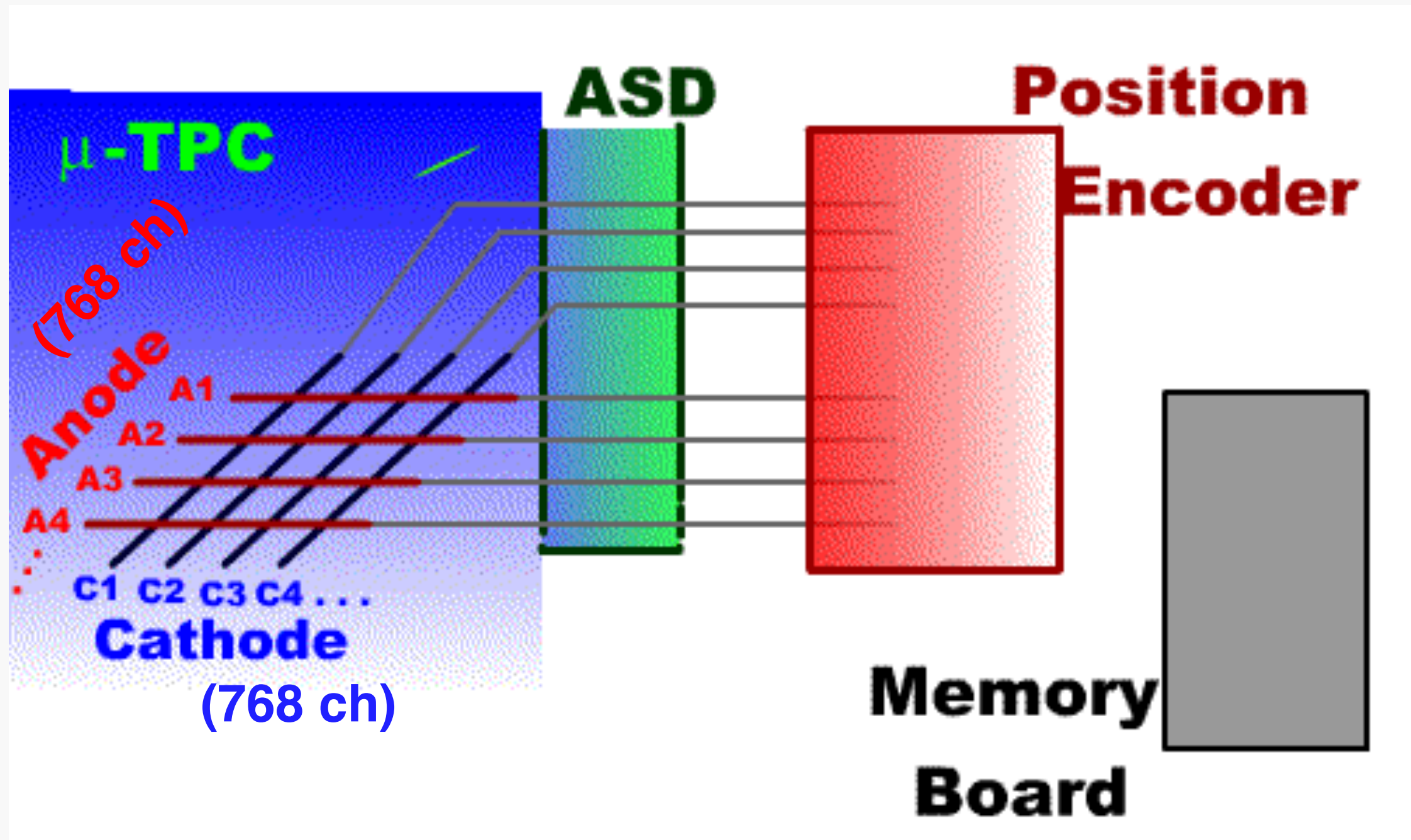
- 神岡坑内での地下実験実施中
- 低圧ガスTPCで**飛跡再構成**
 - ➔ $30 \times 30 \times 41 \text{ cm}^3$ fiducial volume
 - ➔ 低圧 CF_4 ガス (0.1 atm)



3次元飛跡再構成に向けたデータ収集

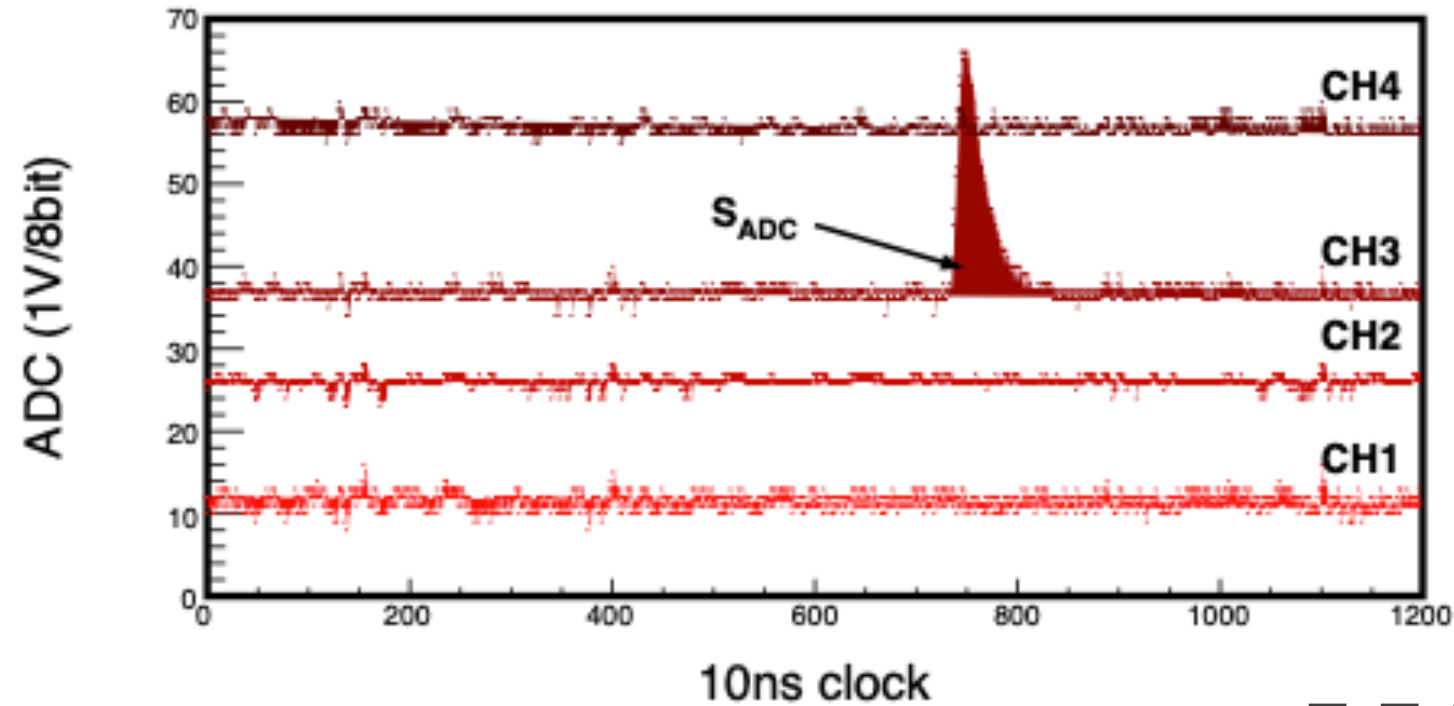
現行NEWAGEのDAQシステム

(これに加えて4チャンネルに束ねたADC波形)



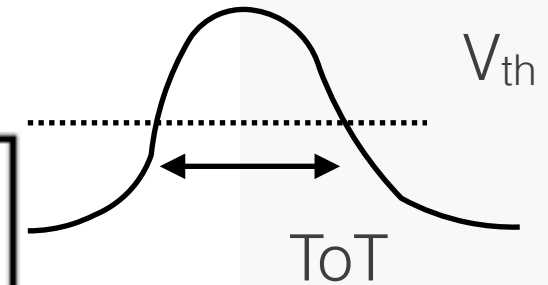
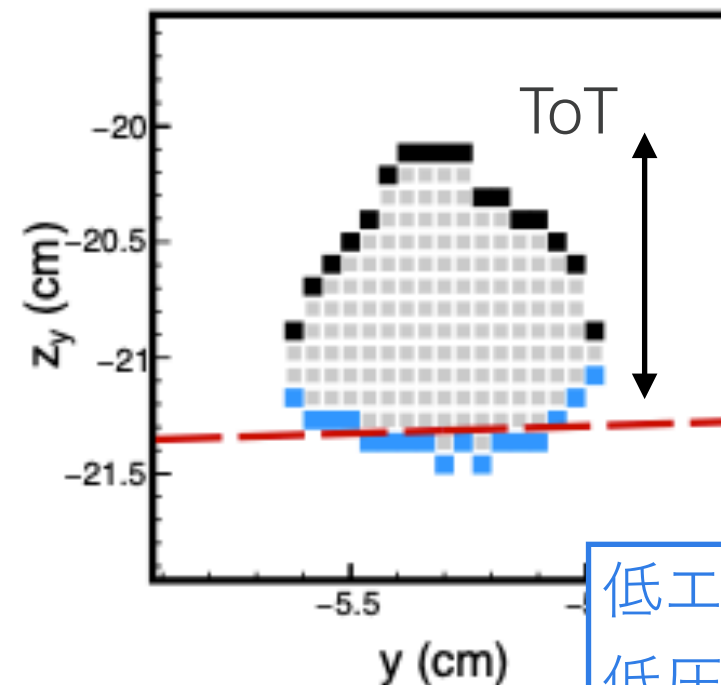
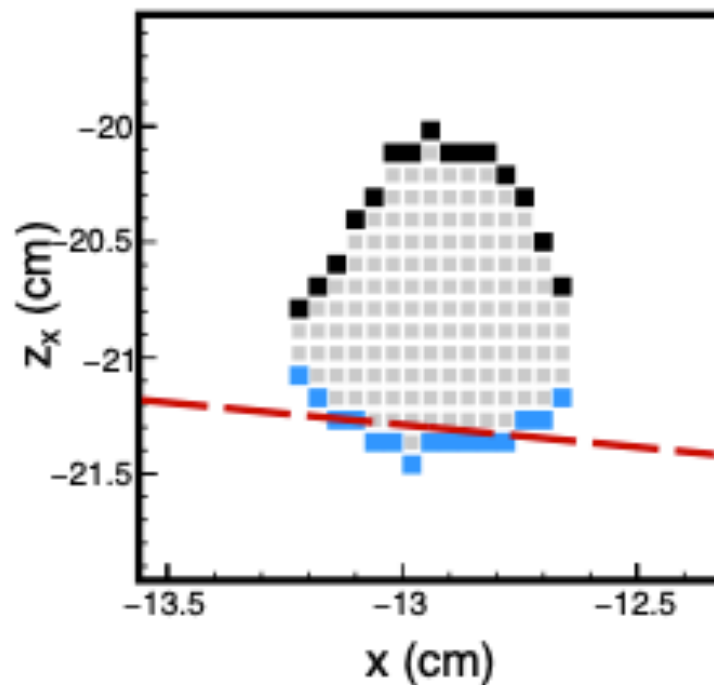
取得データ (Event display)

束ねたチャンネルの波形からエネルギー測定: 典型的には **$O(1\sim10)$ keV**



ToT (Time over Threshold)

各チャンネルのToT / ToFから飛跡を再構成



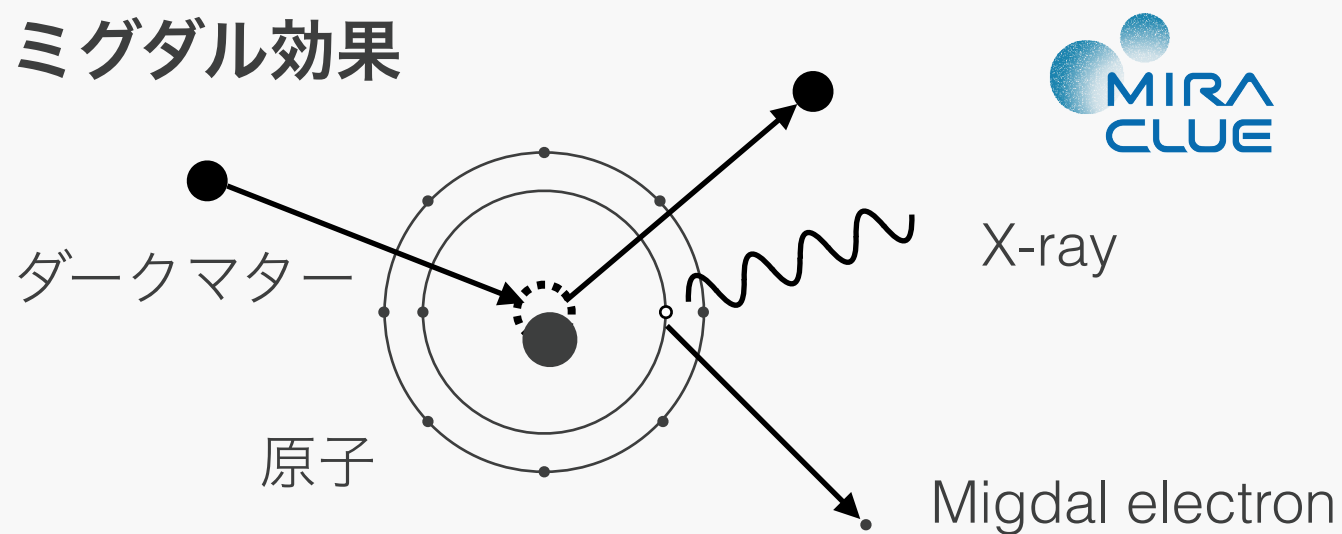
低エネルギーなので
低圧ガス使っても短飛跡

暗黒物質探索関連のアプリケーション

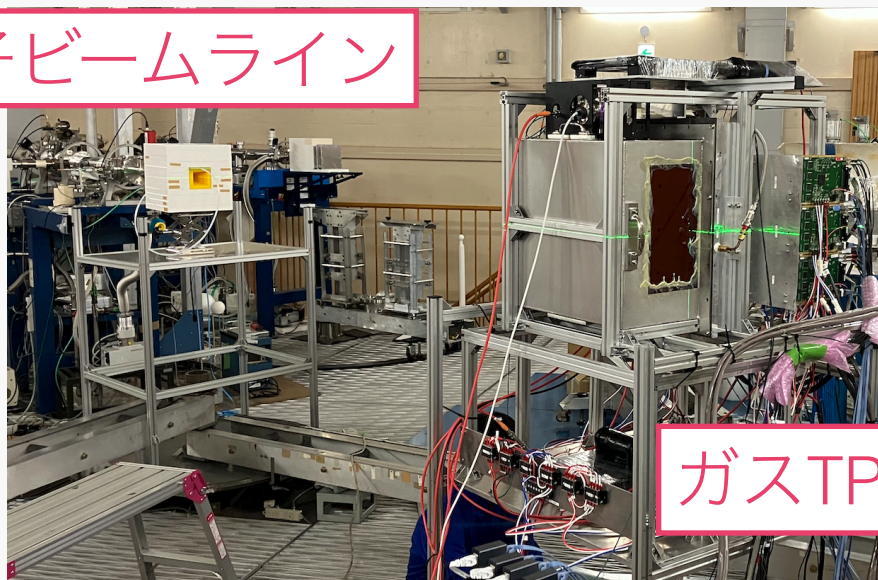
- NEWAGEの検出器技術を派生させて...

- ➡ “ミグダル効果”を初観測したい → MIRACLUE 実験: 統合DAQシステム
- ➡ 飛跡再構成精度を向上させたい → 次世代NEWAGE実験: ピクセル読み出し

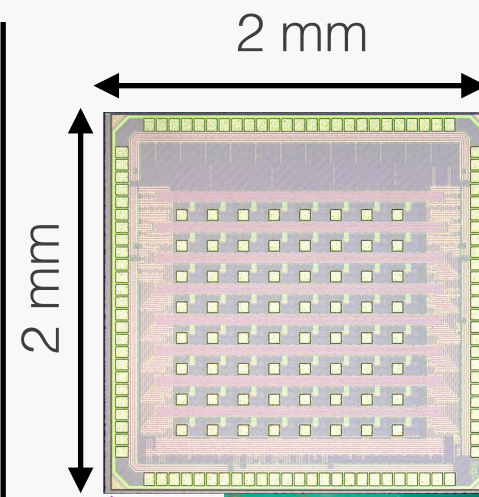
ミグダル効果



中性子ビームライン



ガスTPC



読み出しASIC “QPIX neo”
KEKと共同開発

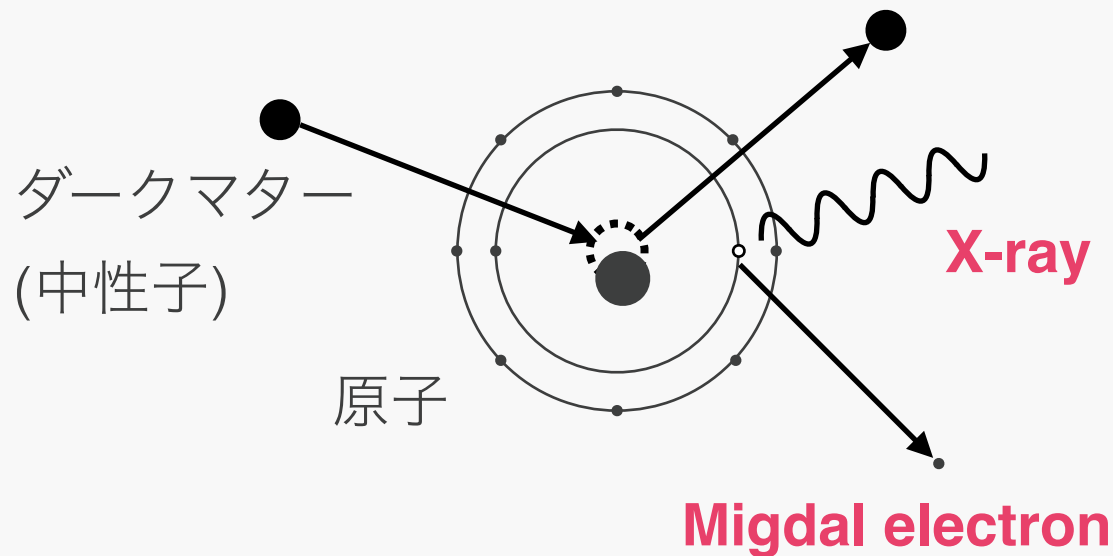
SoC (ZYNQ) board
Xilinx: ZC702 (市販)

ASIC評価基板 (自作)

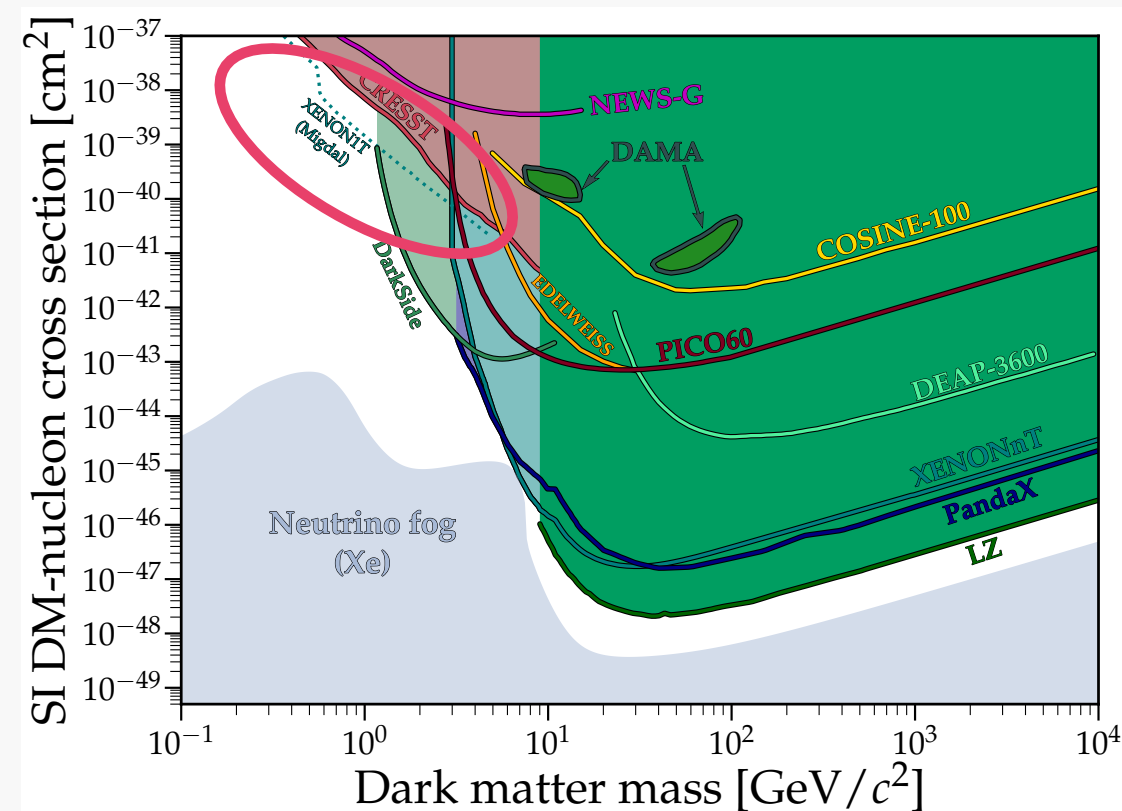
MIRACLUE

MIRACLUE実験

ミグダル効果



- 原子核が突然動くと周りの電子が励起または電離
 - ➔ 暗黒物質や中性子による原子核反跳で**稀に起こる**
- 原子核反跳 + α のエネルギー損失
 - ➔ より低エネルギー事象 (低質量DM) 探索に感度
- が、そもそも原子核反跳でのミグダル効果未検証
- ふたつの既存の検出器技術でそれぞれ観測を目指す

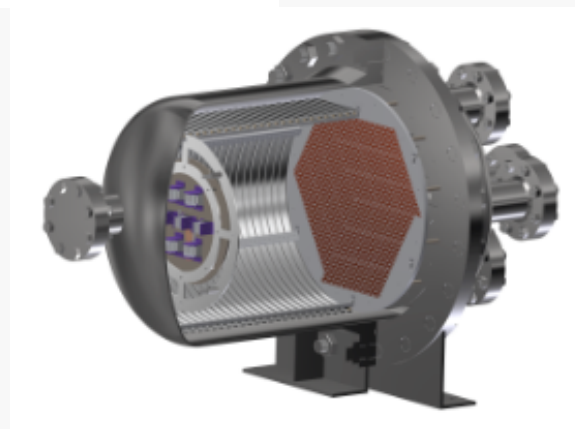


<https://github.com/cajohare/DirectDetectionPlots>

AXEL

AXEL (東北大)

高圧Xeガスでの $0\nu\beta\beta$ 探索

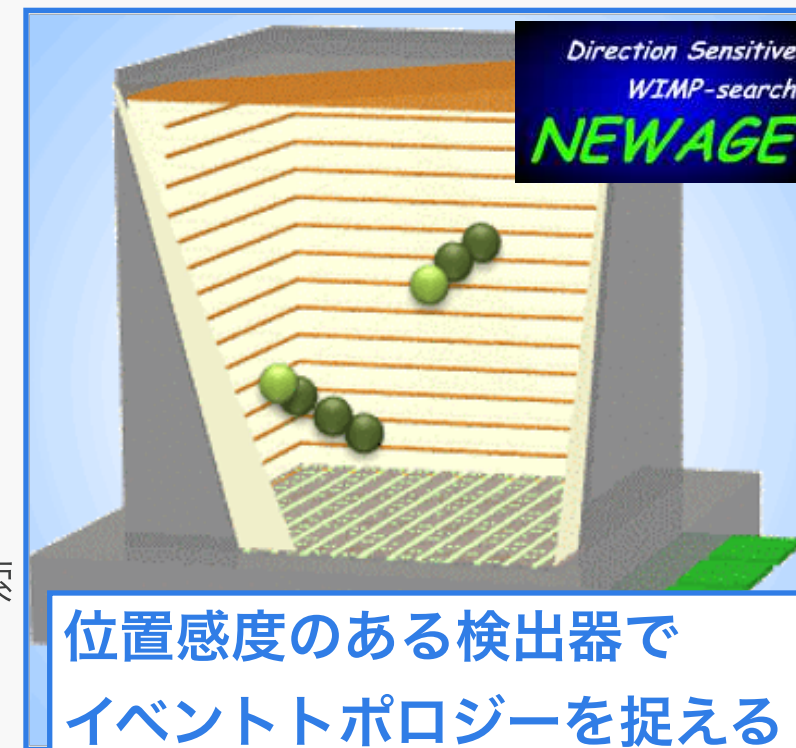


NEWAGE (神戸大)

Arガスでの暗黒物質探索

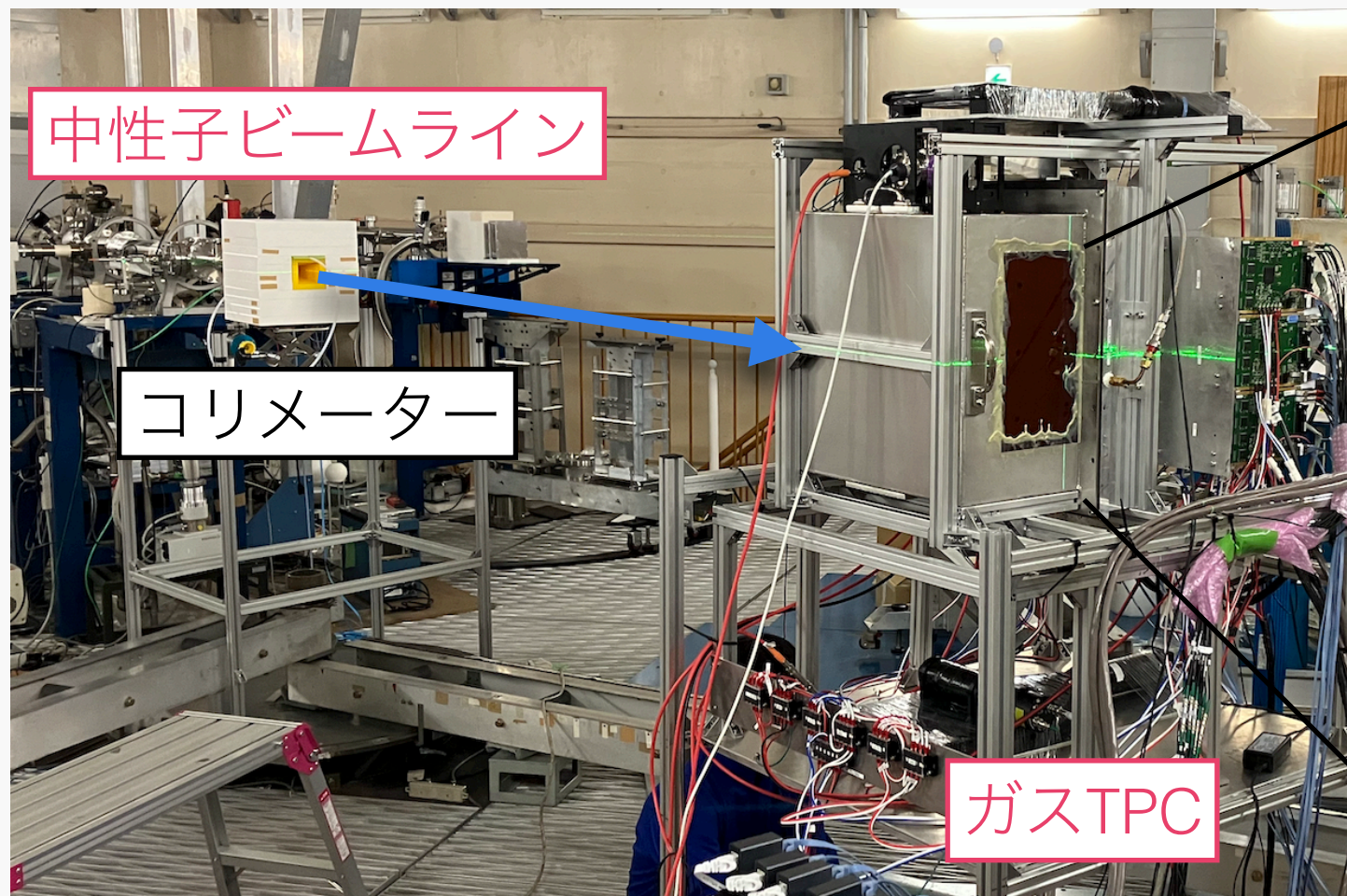
本日はこちらがメイン

9

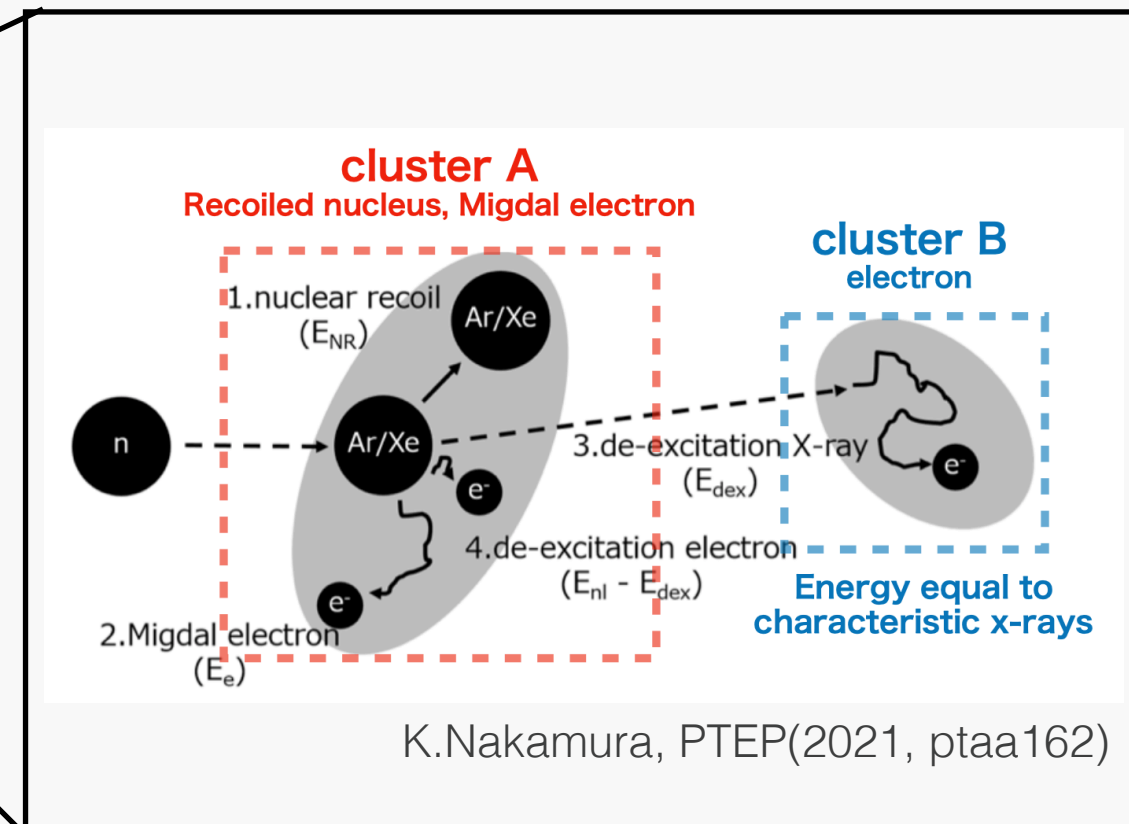


MIRACLUE-Argon team

- 「稀」なのでたくさんの中性子をぶつけていく
 - そこからミグダル効果っぽい事象を見つけ出す
- 原子核反跳 + ミグダル電子放出に伴い放出する特性X線を検出
 - (暗黒物質直接探索目線で) **高レート**で**2クラスターの位置検出**が重要



産総研 中性子標準場ビームライン

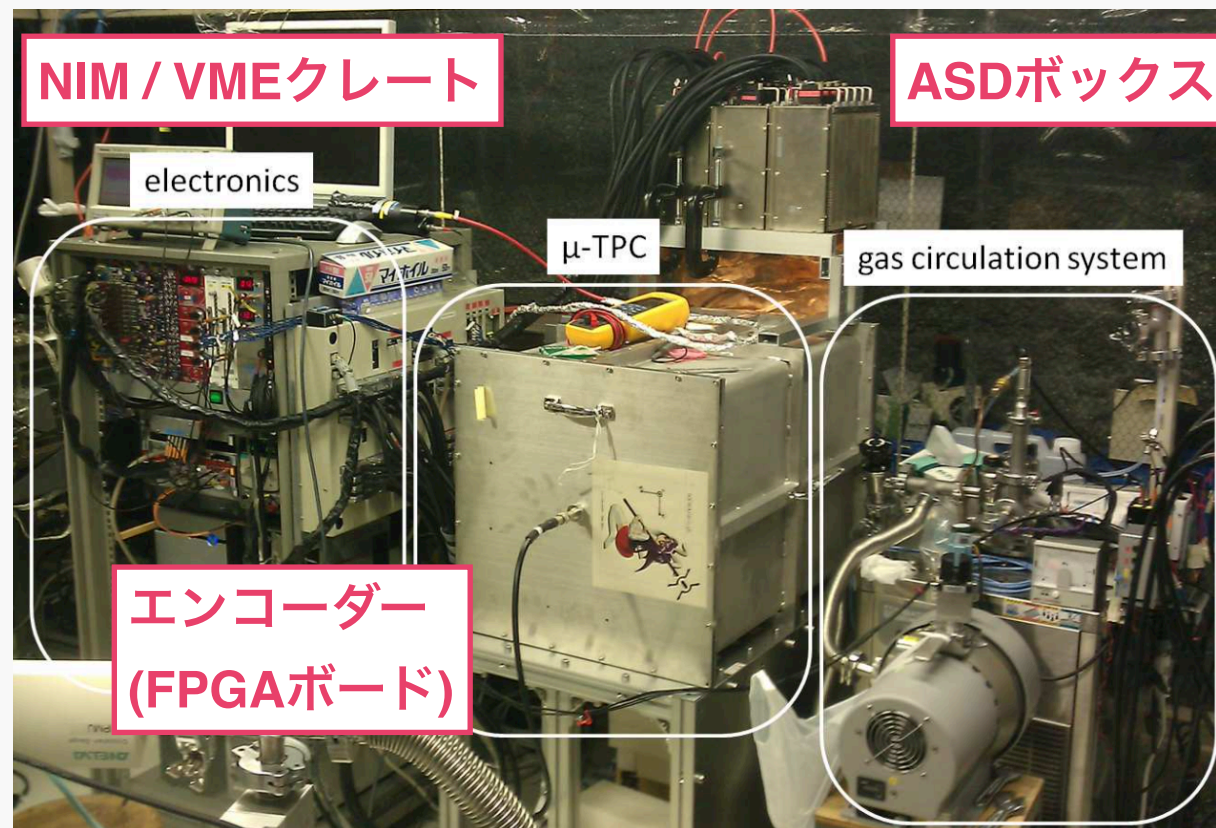


ガスTPC内で2個のクラスターヒットを検出できればOK (**イベントレート: ~1kHz**)

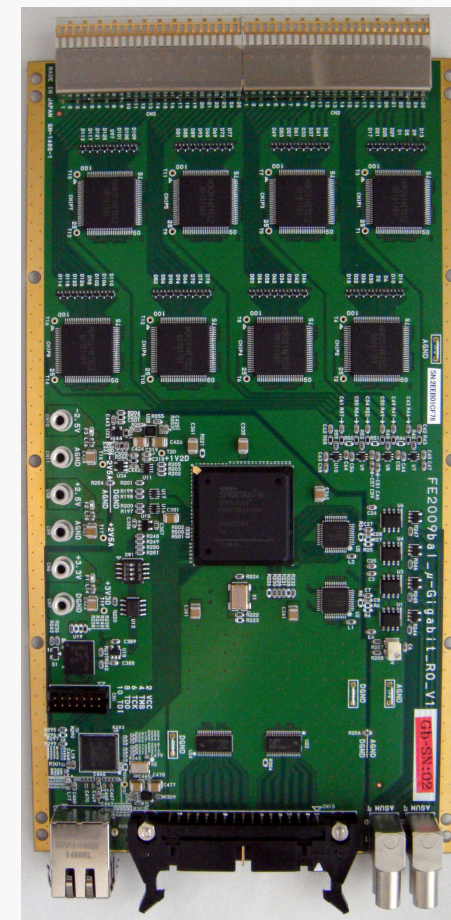
我々にとっては爆速

NEWAGE DAQシステムからの脱却

- NEWAGEが持つエレキではでかすぎ
 - ➔ 中性子も跳ね返るし物質量 (サイズ) の大きいものを持ち込みたくない
- でも新しいものを (極力) 作りたくはない → 既存の μ -PIC読み出し流用したい
 - ➔ コンパクトな既製品の読み出しボードを12枚使って読み出すことにした
 - ▶ NEWAGEからDAQほぼ一新



計1536チャンネル読み出し



FE2009bal- μ -Gigabit RO board
京大SMILE実験にて開発
(通称GBKB)

← ASD ASIC (128 ch/board)

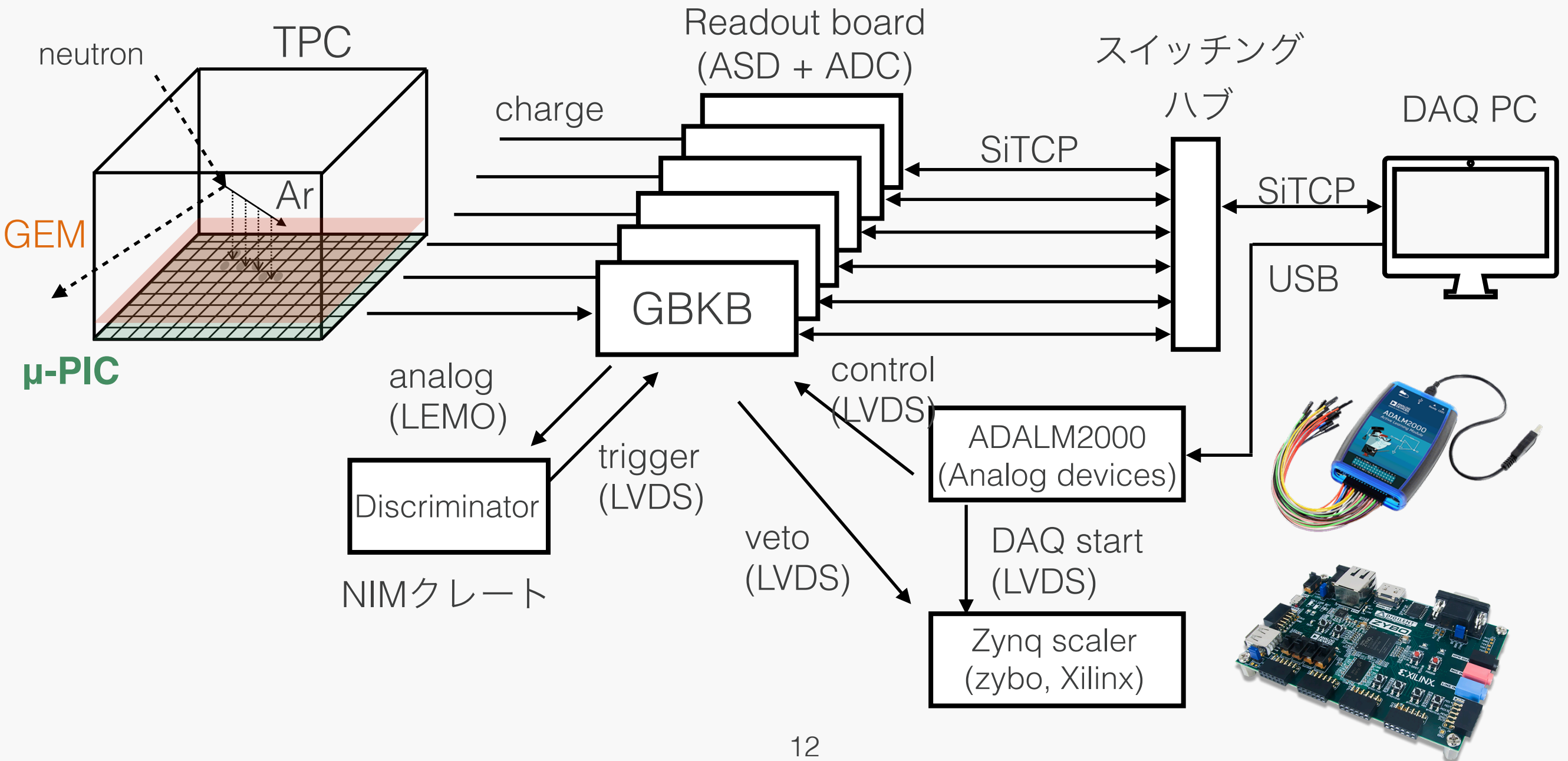
← FPGA (SPARTAN6)

というわけでこれももはや古い。
新ボードも開発済だが今日は話さない。

← SiTCPでデータ転送

← コントロールはLVDS

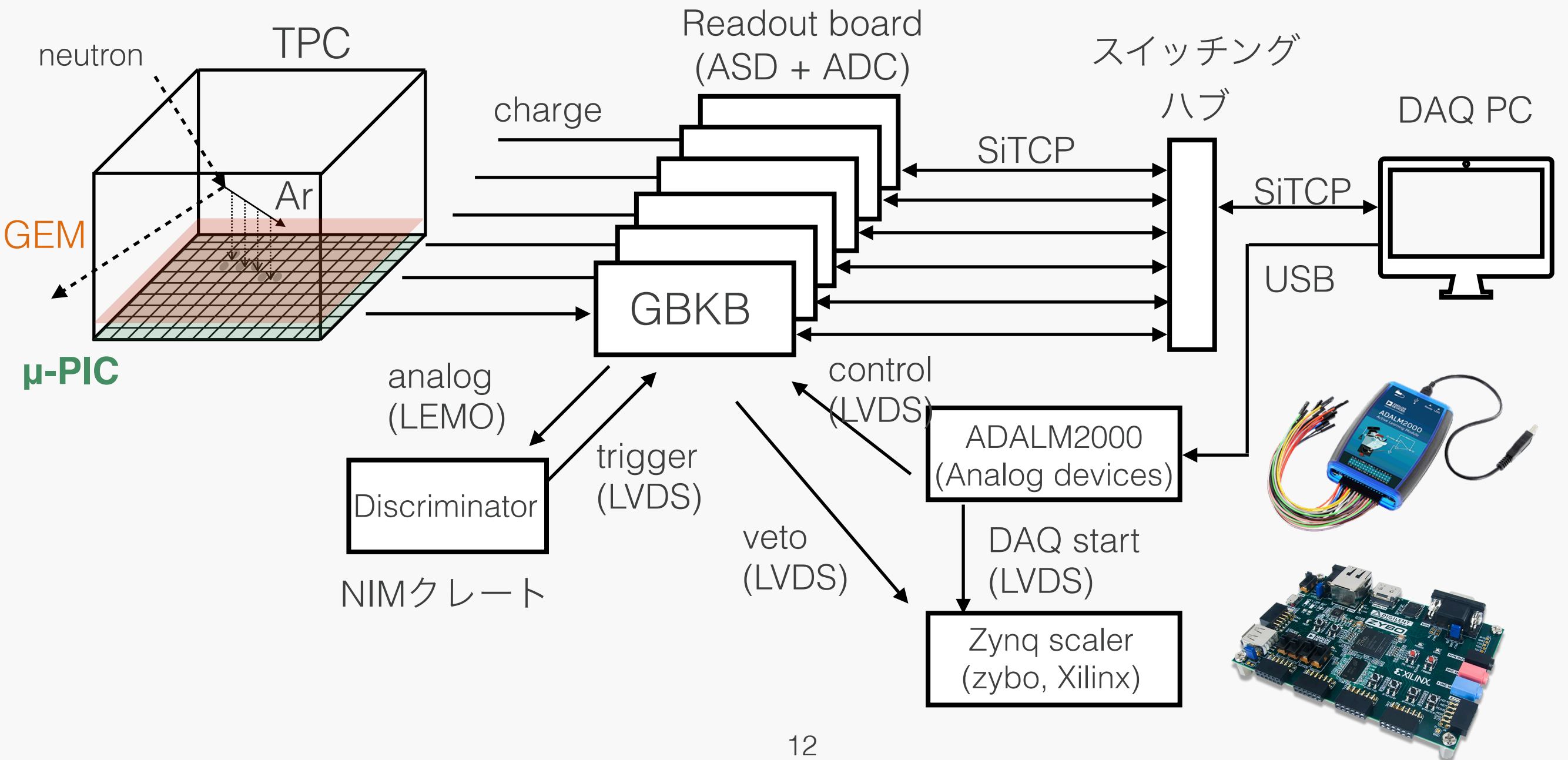
- ➡ すぐ用意できそうなものでコントロール、データ通信も1台のPCで担う



MIRACLUE Argon DAQ ver. 0

- 読み出しボードを12枚→6枚で構築 (単にボードを用意できていなかった)

12ボードに対応させたい コントロール、データ通信も1台のPCで担う

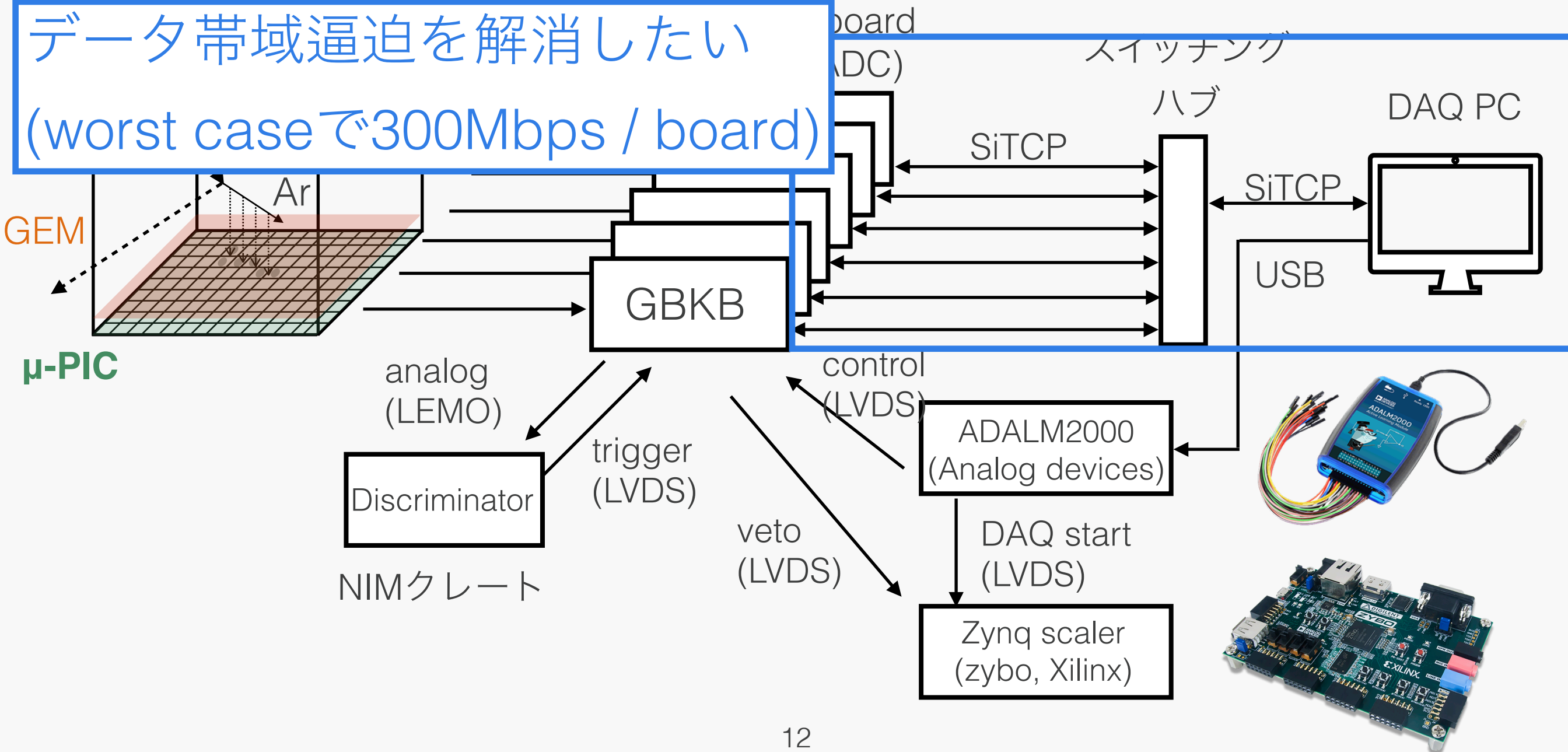


MIRACLUE Argon DAQ ver. 0

- 読み出しボードを12枚→6枚で構築 (単にボードを用意できていなかった)

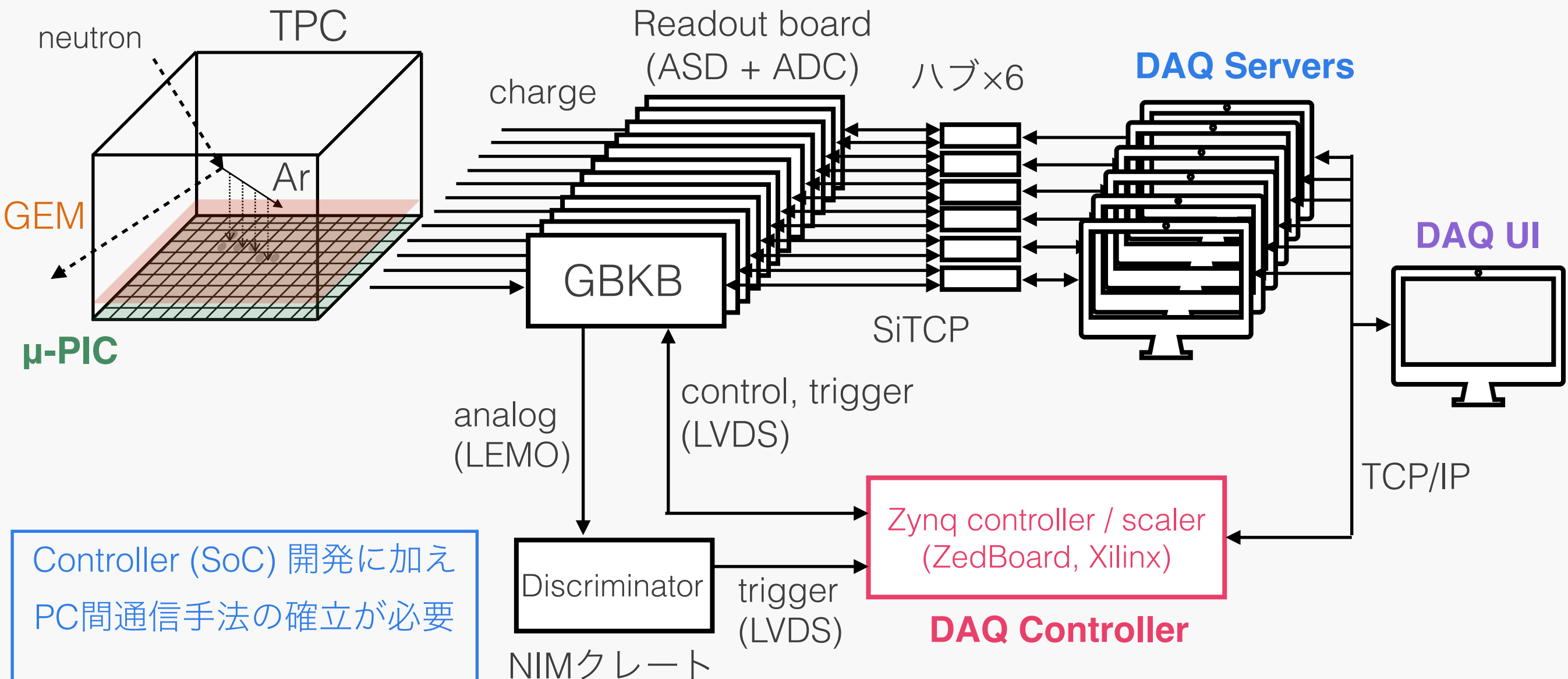
12ボードに対応させたい コントロール、データ通信も1台のPCで担う

データ帯域逼迫を解消したい
(worst caseで300Mbps / board)



MIRACLUE Argon DAQ **ver. 1**

- ボード12枚体制に拡張 (半分以上を京大SMILE実験 高田氏より拝借)
- DAQ PC 1台につき2 boardでの読み出しに分散、帯域緩和
- DAQ controllerを (結局) 開発、SoCを用いることでfirmware / software的に制御

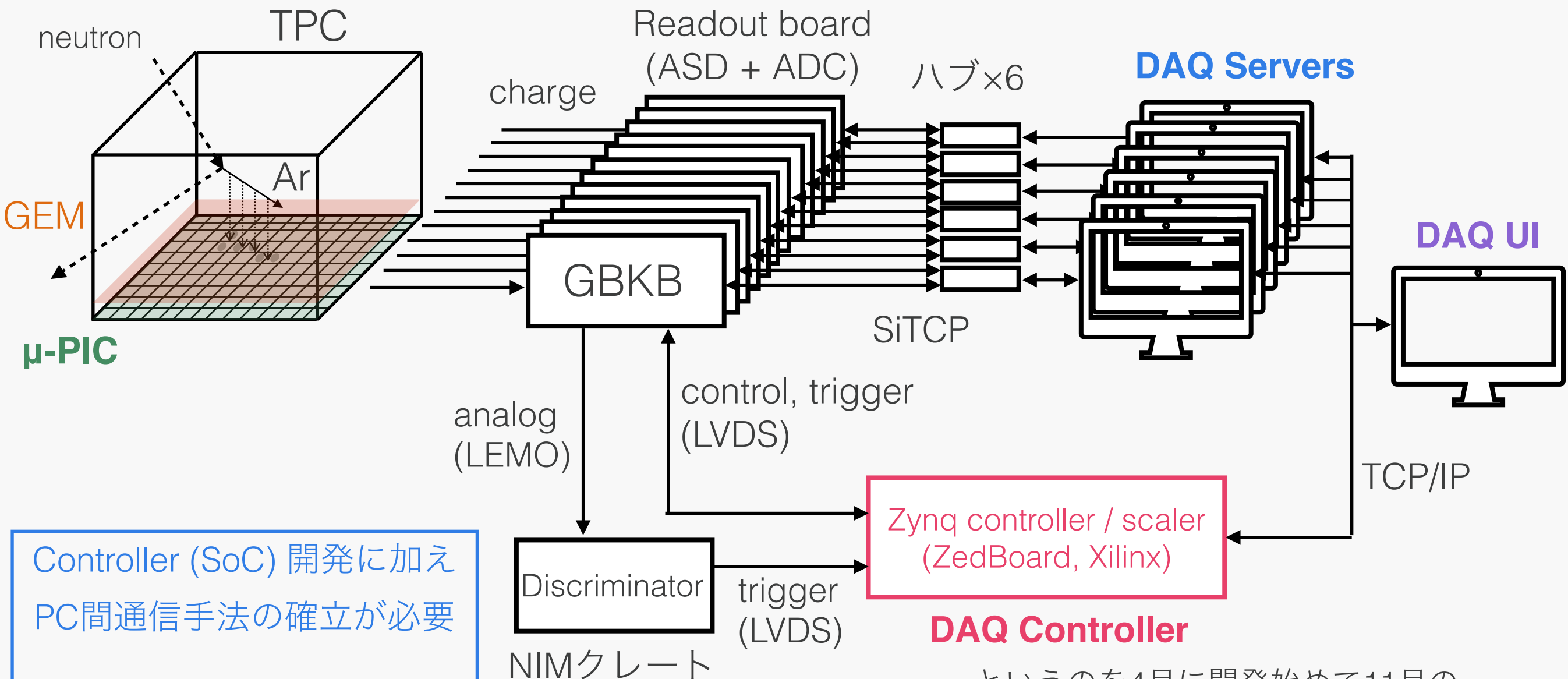


Controller (SoC) 開発に加え
PC間通信手法の確立が必要

統合DAQシステムの開発

MIRACLUE Argon DAQ **ver. 1**

- ボード12枚体制に拡張 (半分以上を京大SMILE実験 高田氏より拝借)
- DAQ PC 1台につき2 boardでの読み出しに分散、帯域緩和
- DAQ controllerを (結局) 開発、SoCを用いることでfirmware / software的に制御



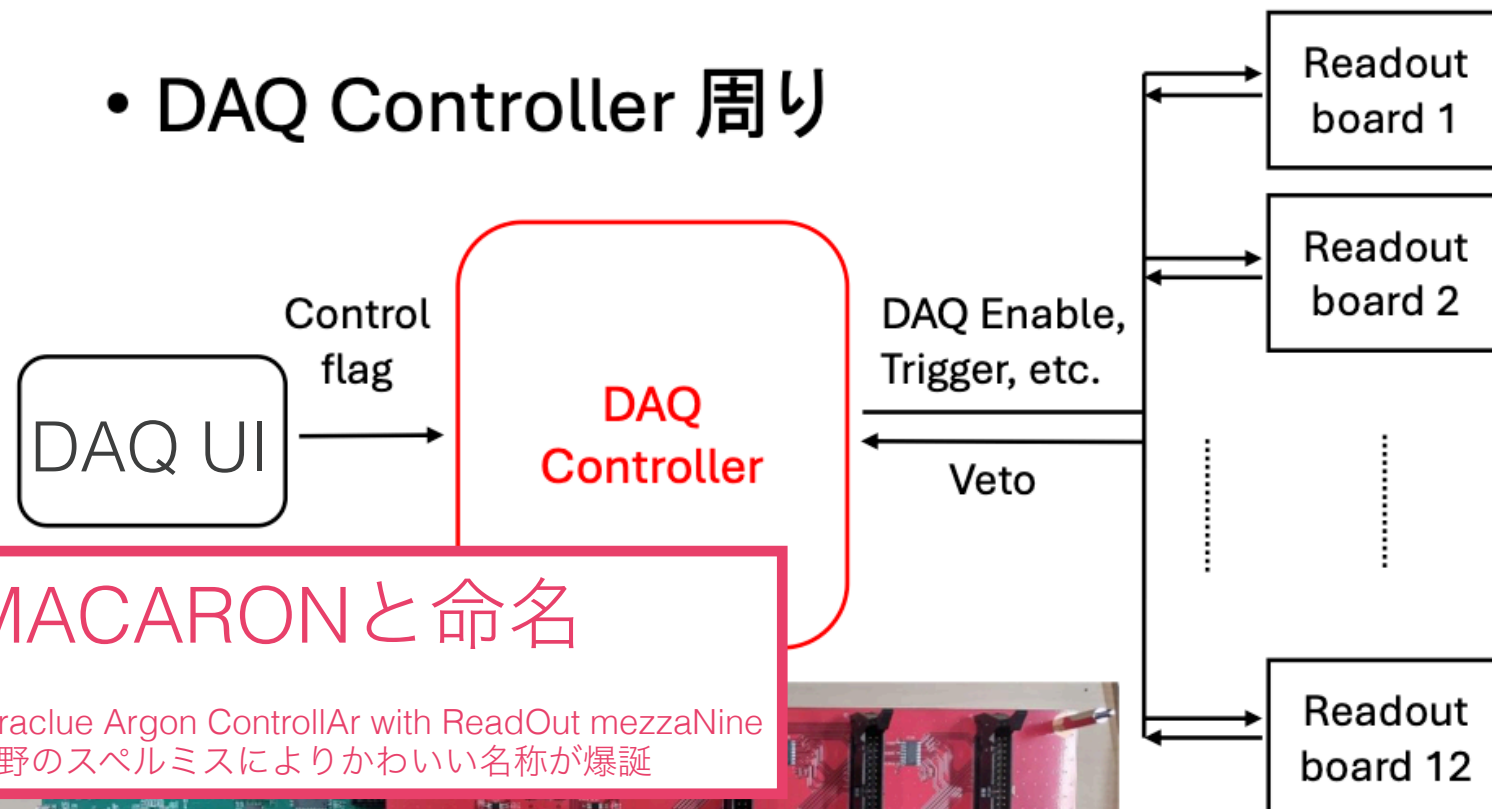
Controller (SoC) 開発に加え
PC間通信手法の確立が必要

統合DAQシステムの開発

というのを4月に開発始めて11月の
ビームタイムに間に合わせる必要があった

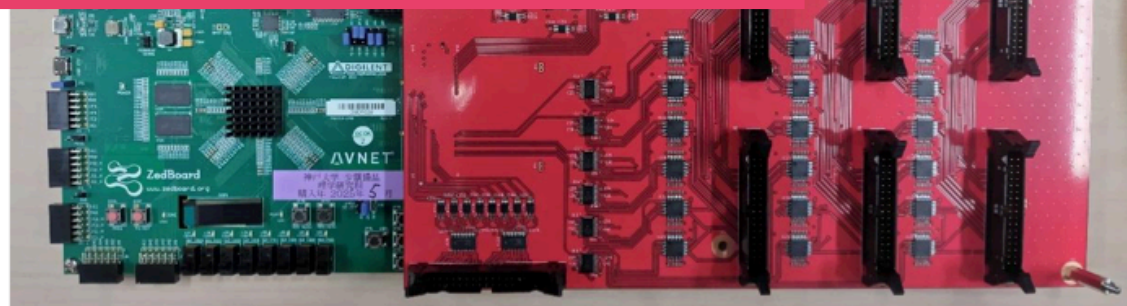
新DAQシステム

• DAQ Controller 周り



MACARONと命名

Miraclue Argon ControllAr with ReadOut mezzaNine
東野のスペルミスによりかわいい名称が爆誕



ZedBoard(SoC)

Mezzanine Card

- DAQ User Interfaceとの通信
 - Control信号の送信、受信
 - 時間のカウント
 - 信号の分配
- の機能が必要
- ➡ SoC + Mezzanine Card

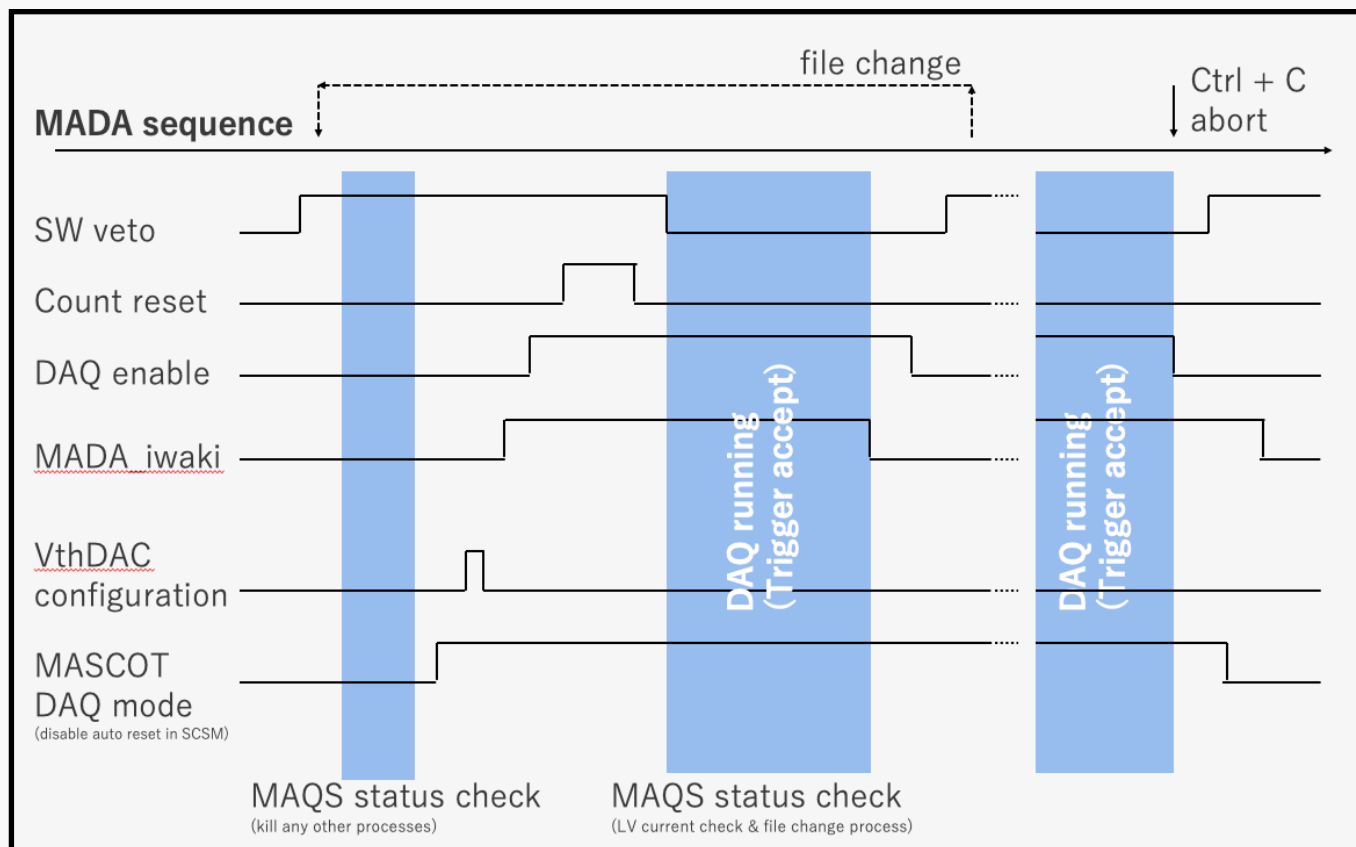
Mezzanine cardはKiCADで設計、
P板.comで製造と実装 (完全自作)

PC間連携

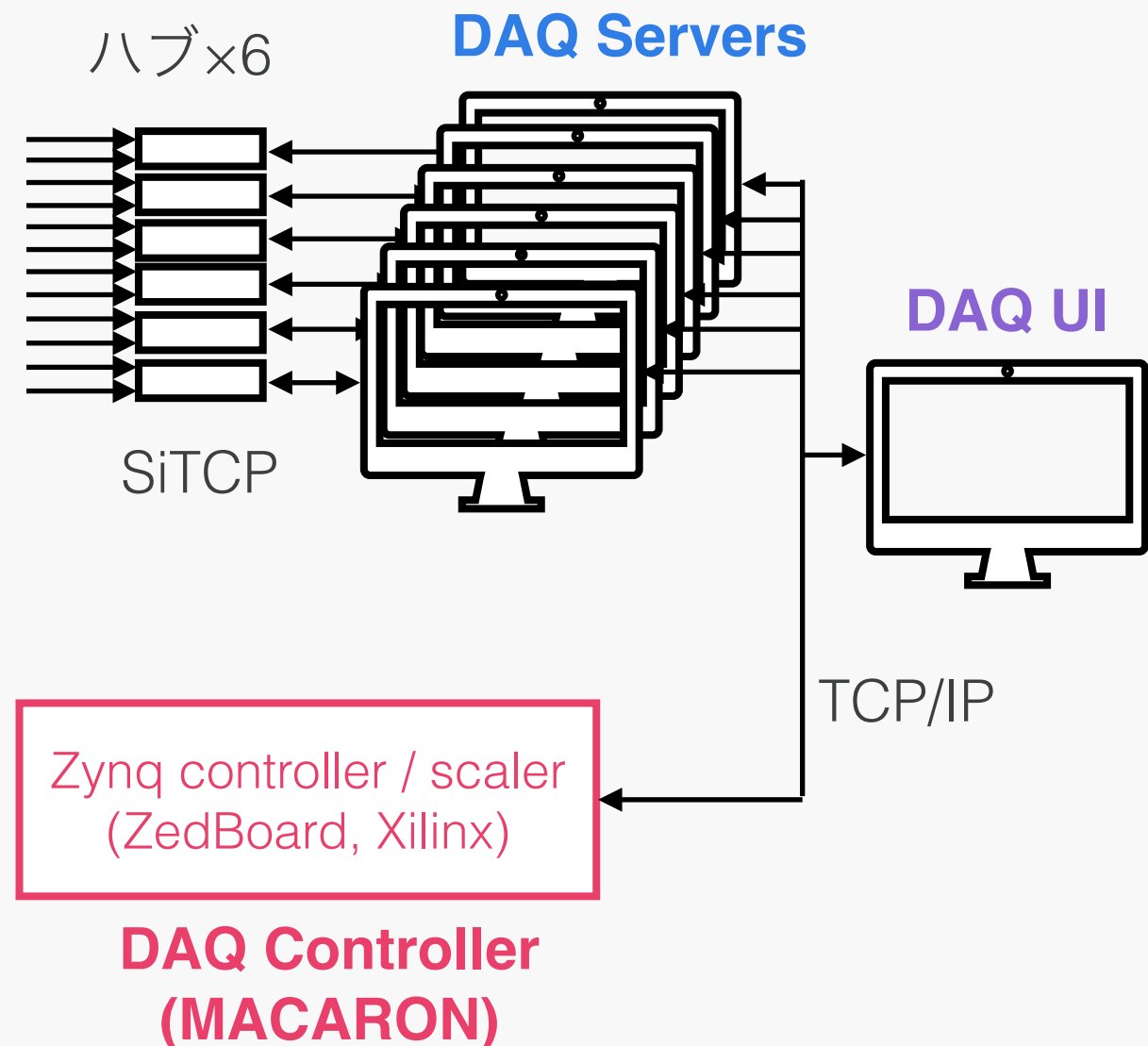
- ソケットプログラミングでDAQ UIからコマンド送信

➔ Control sequenceをDAQ UIで組んでそれぞれを動かす

➔ 現状UDP通信で動かしているが、それで正しかったかはわからない (コメントください)



詳細説明割愛、このタイミングチャートに従ってコマンドパターンを作成

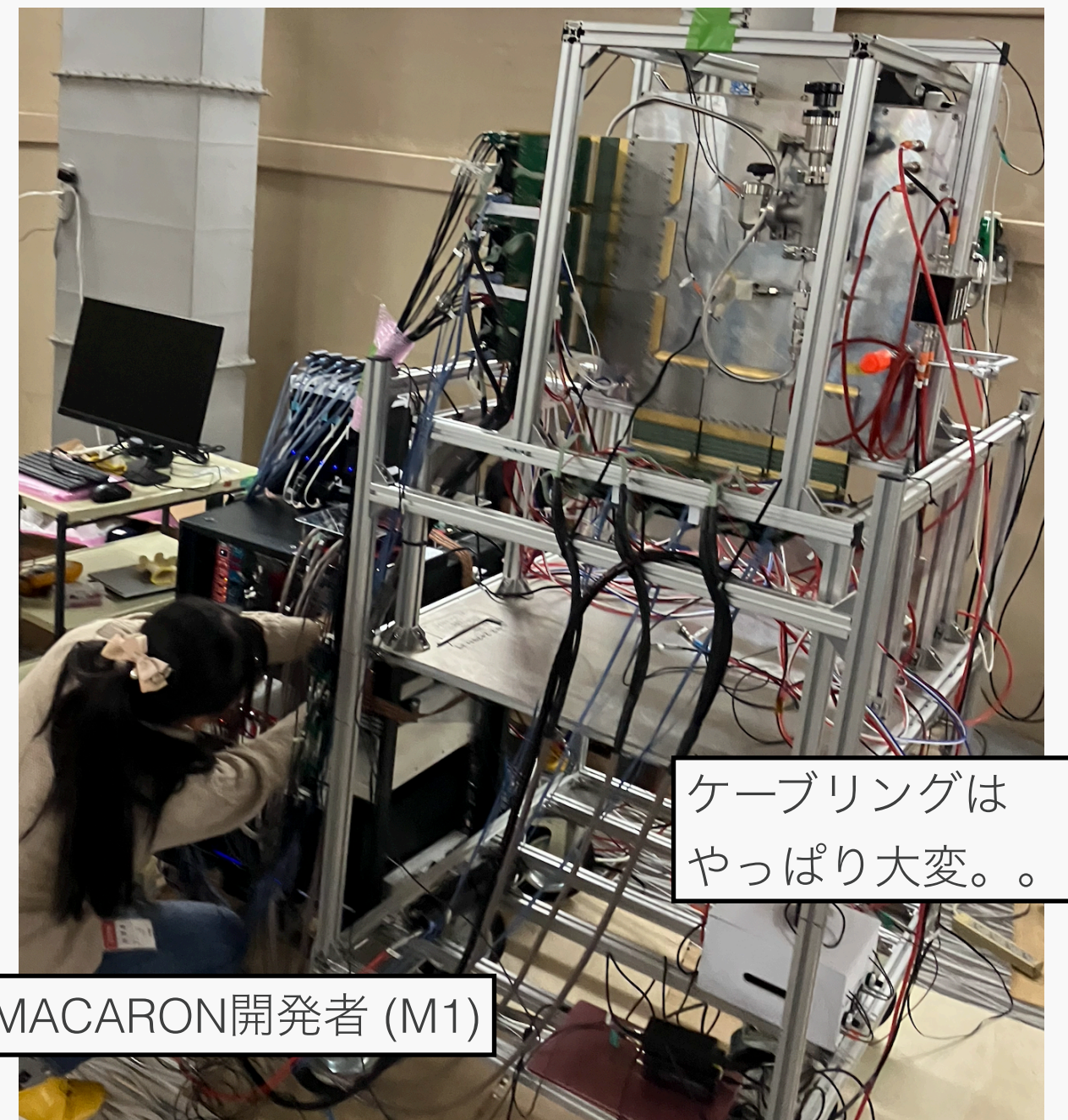
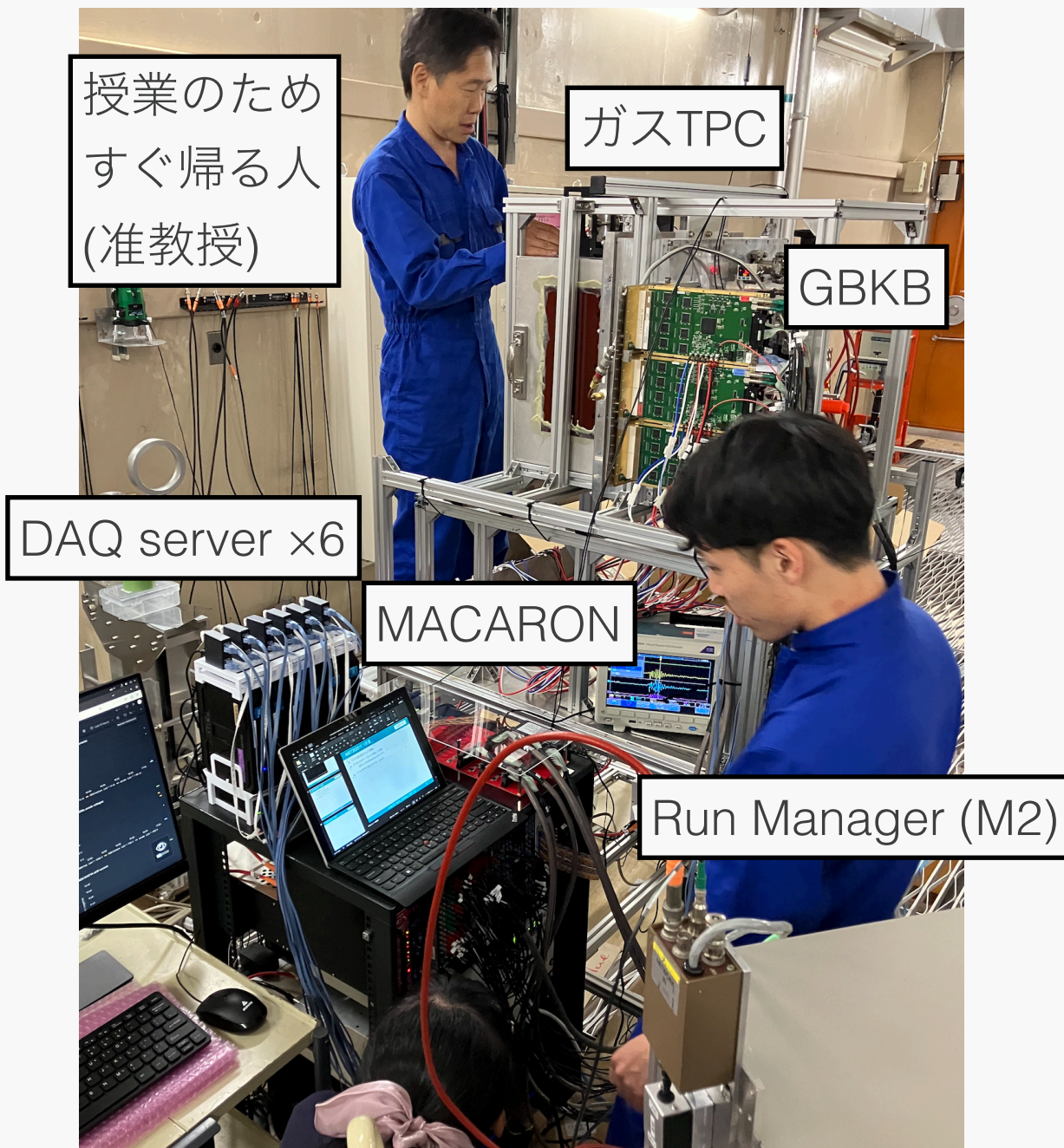


統合DAQシステム構築 @産総研

- 神戸大で統合試験を済ませたあと産総研へ

→ ビームタイム2週間前に統合試験を開始、死ぬ気でデバッグした

東野のgithubのcontribution

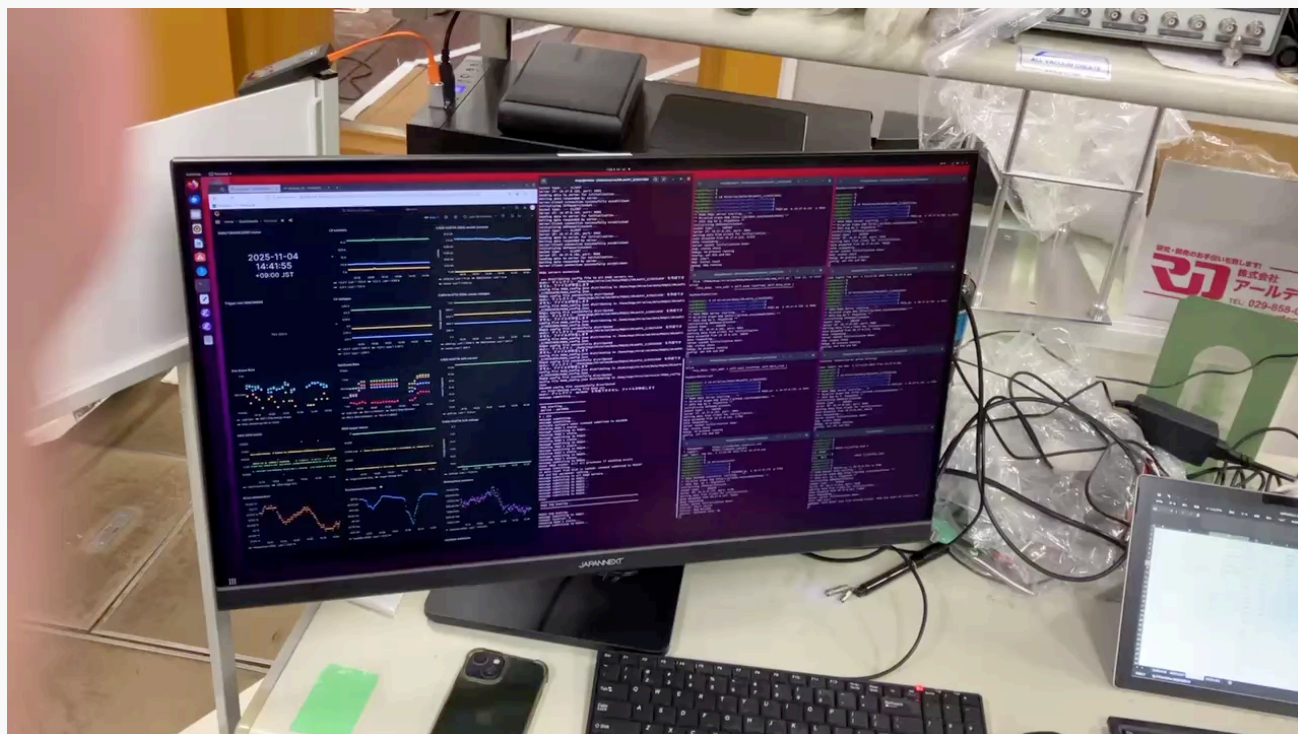
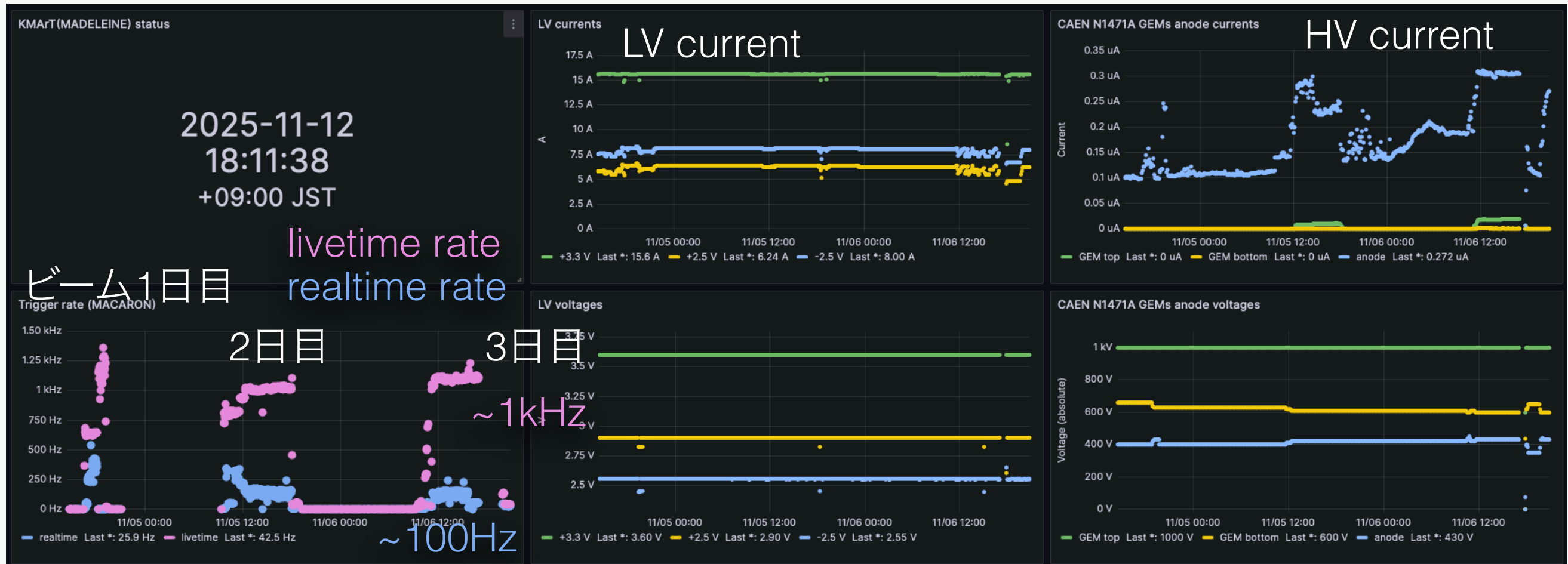


産総研ビーム実験

- 2025年11月3日-7日 (うち3日間ビーム照射)
 - ➡ 直流の中性子ビーム (565 keV)
 - ➡ ビームフラックス: $\sim 10^2$ /cm²/s (具体的な値は産総研からのデータ待ち)
 - ▶ トリガーレート的には1kHz程度 (DM直接探索からするとやはり高レート)



データ取得状況



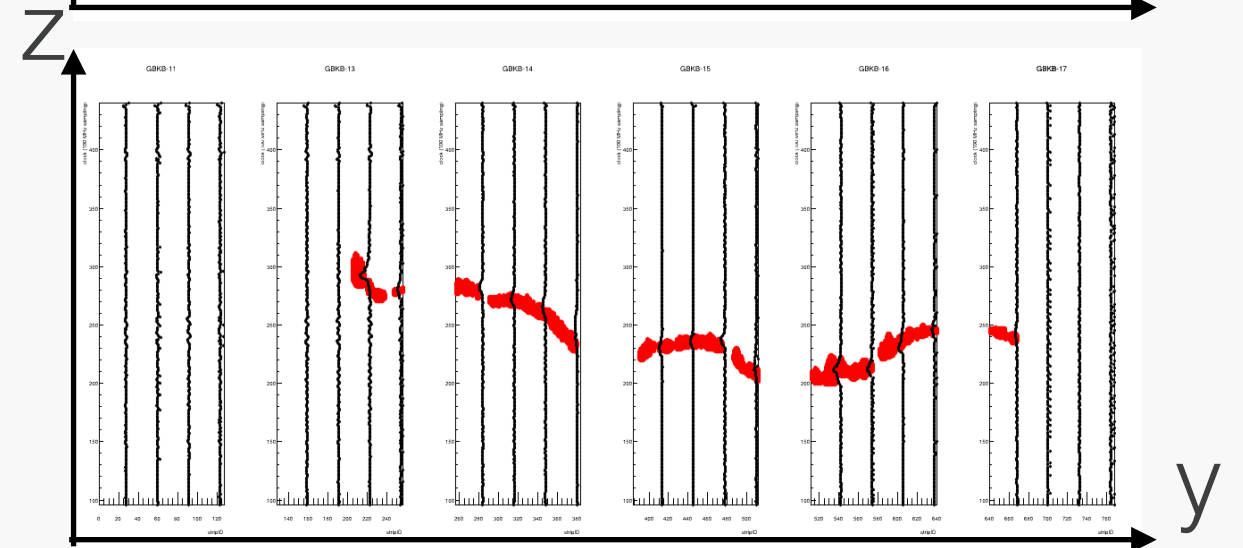
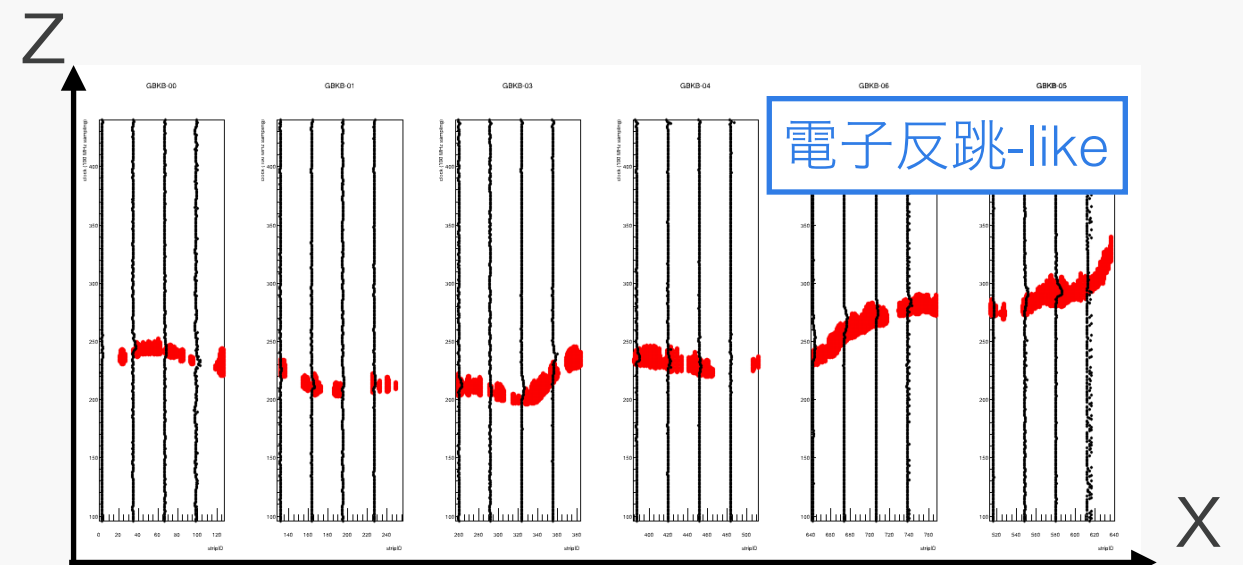
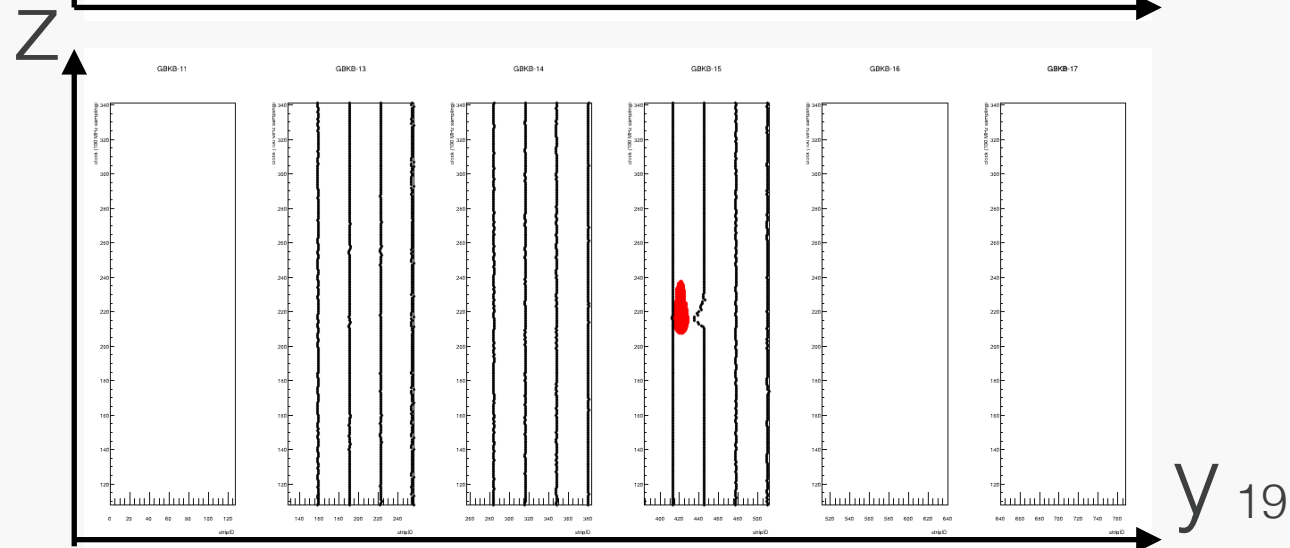
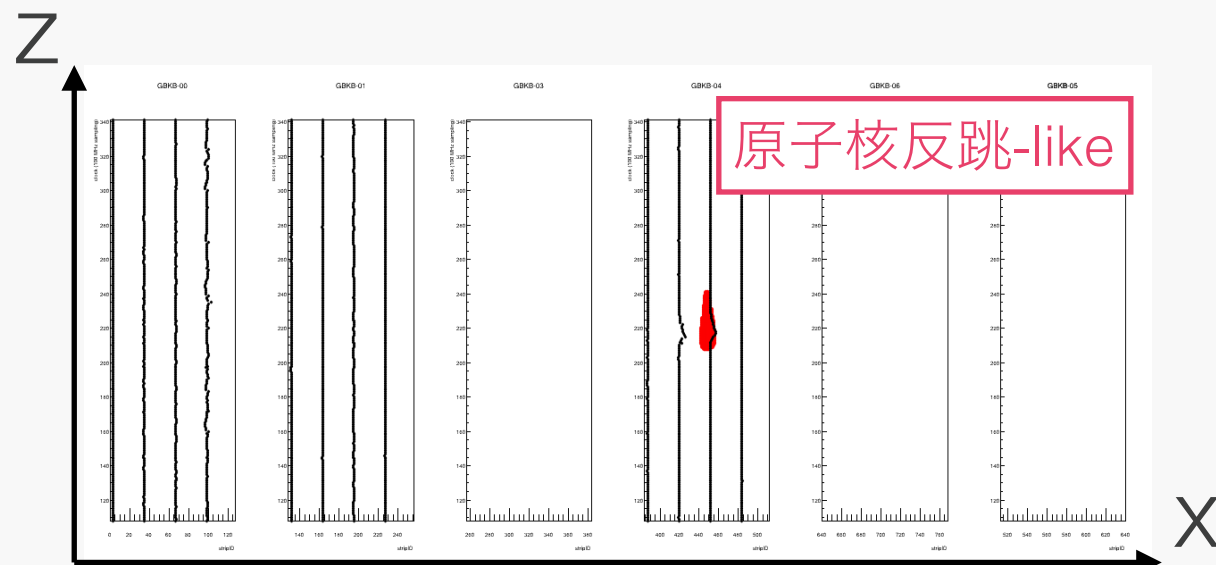
絶望的なdeadtimeは課題。

精査中だがおそらくinitializeなどに
時間がかかっている。

しかし無事使えそうなデータを
収集して帰ってくることができた！

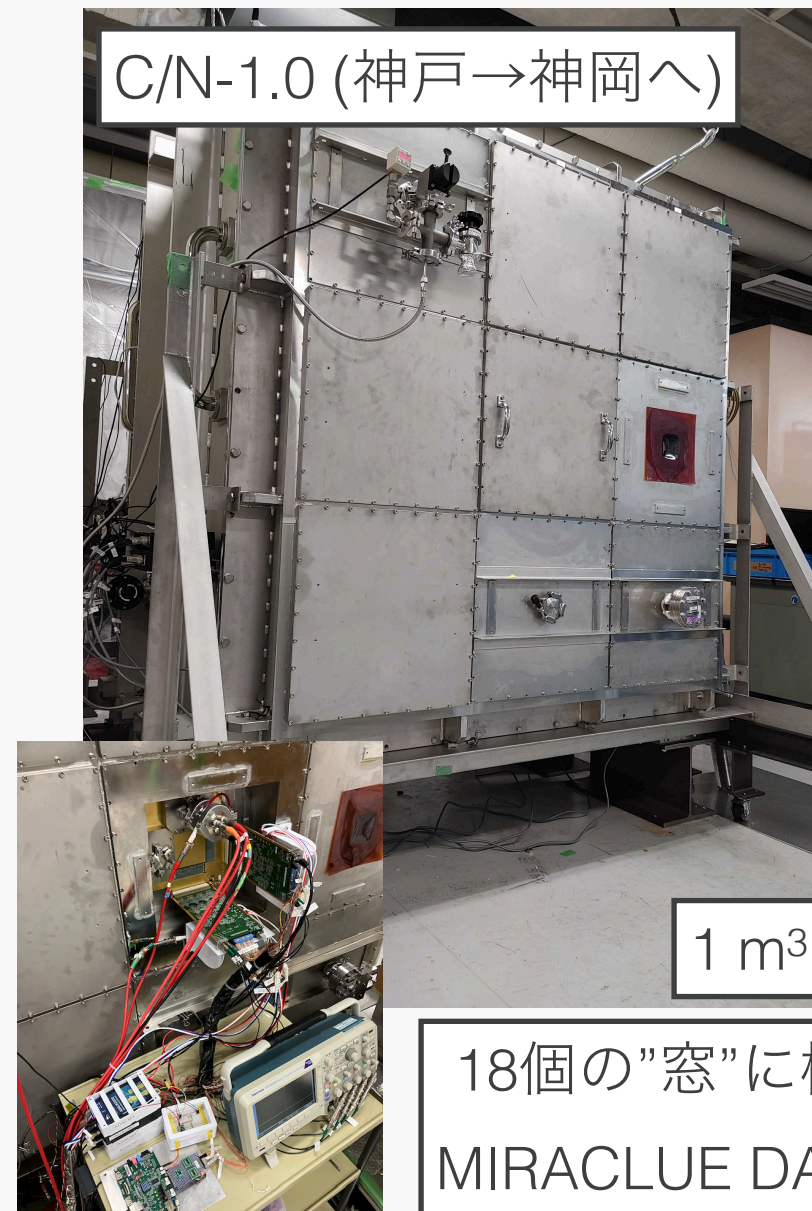
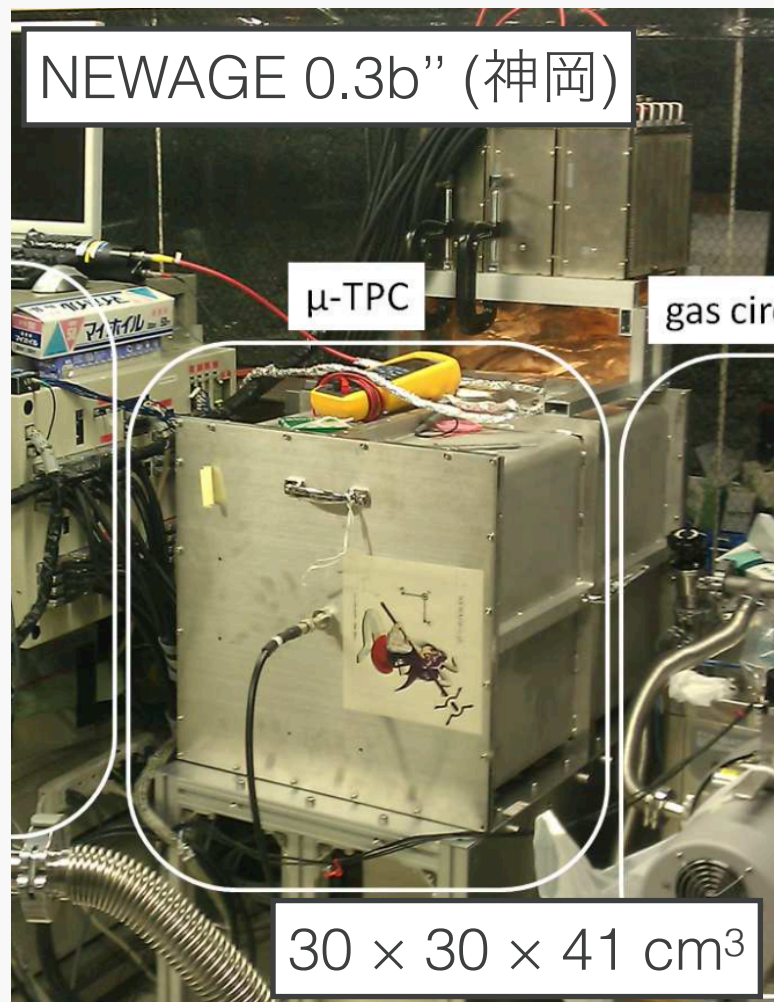
Data quality

- 中性子由来の原子核反跳を検出
 - ➔ 12ボード版の統合DAQがちゃんと機能している
- DAQ的にはdeadtimeの改善が課題だが、使えるデータが取得できたのは大収穫
- 取得データは現在絶賛解析中



NEWAGE的将来計画

- 感度向上に向けて大質量化 (大型化) 進行中
 - ➡ モジュール搭載型チェンバー “C/N-1.0” 準備中 (従来検出器を18個実装可)
- 従来DAQはすでにディスコン、MIRACLUE DAQの逆輸入を検討
 - ➡ 今回の開発はそれぞれのモジュールのDAQ統合に向けたデモンストレーションでもある

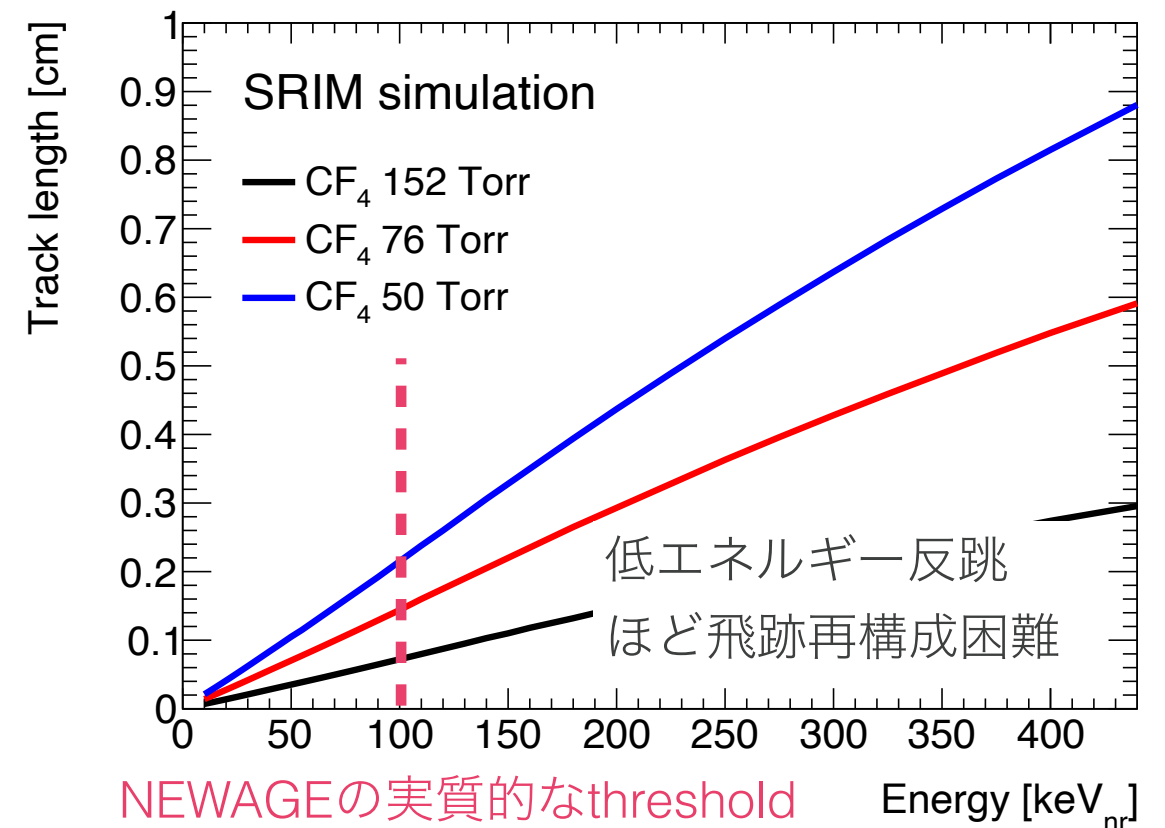
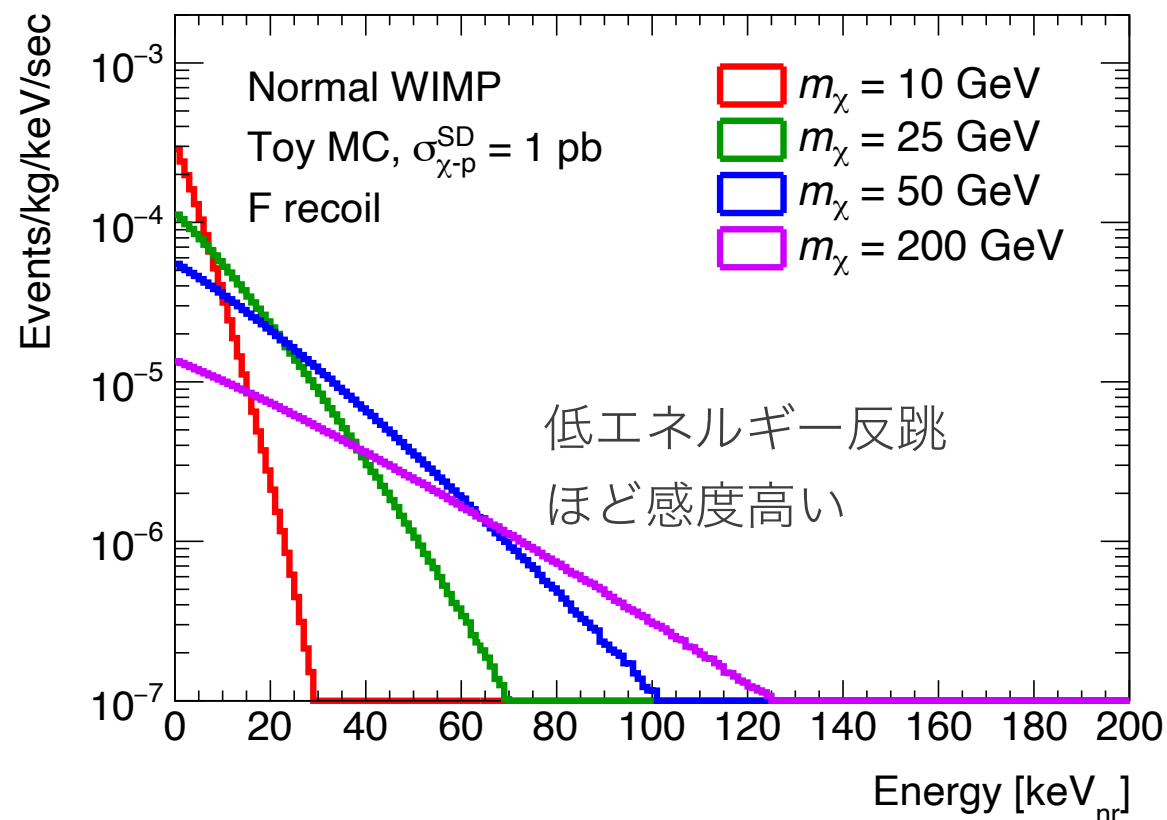


各モジュールのDAQ統合に向けたノウハウの蓄積

Pixel

短飛跡の高精度再構成

- WIMP massはEW scaleでも速度遅いので反跳エネルギーも低い
 - ➔ 反跳原子核の飛跡はミリオーダー以下
- なので反跳角を求めるための飛跡がまず組めなくなってくる
 - ➔ より低圧なガスにして飛程を伸ばす (ターゲット減る)
 - ➔ より粒度の細かい読み出し検出器を使う (値段も技術もかかる)



短飛跡の高精度再構成

- WIMP massはEW scaleでも速度遅いので反跳エネルギーも低い

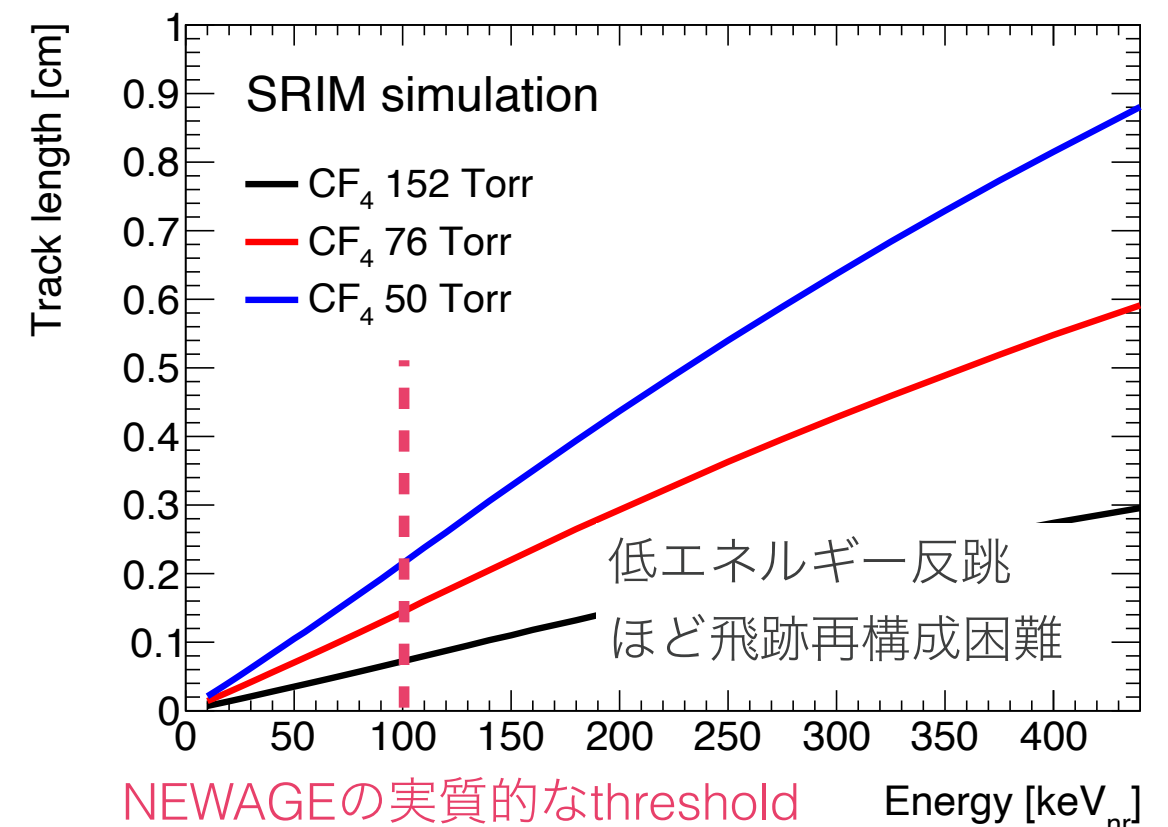
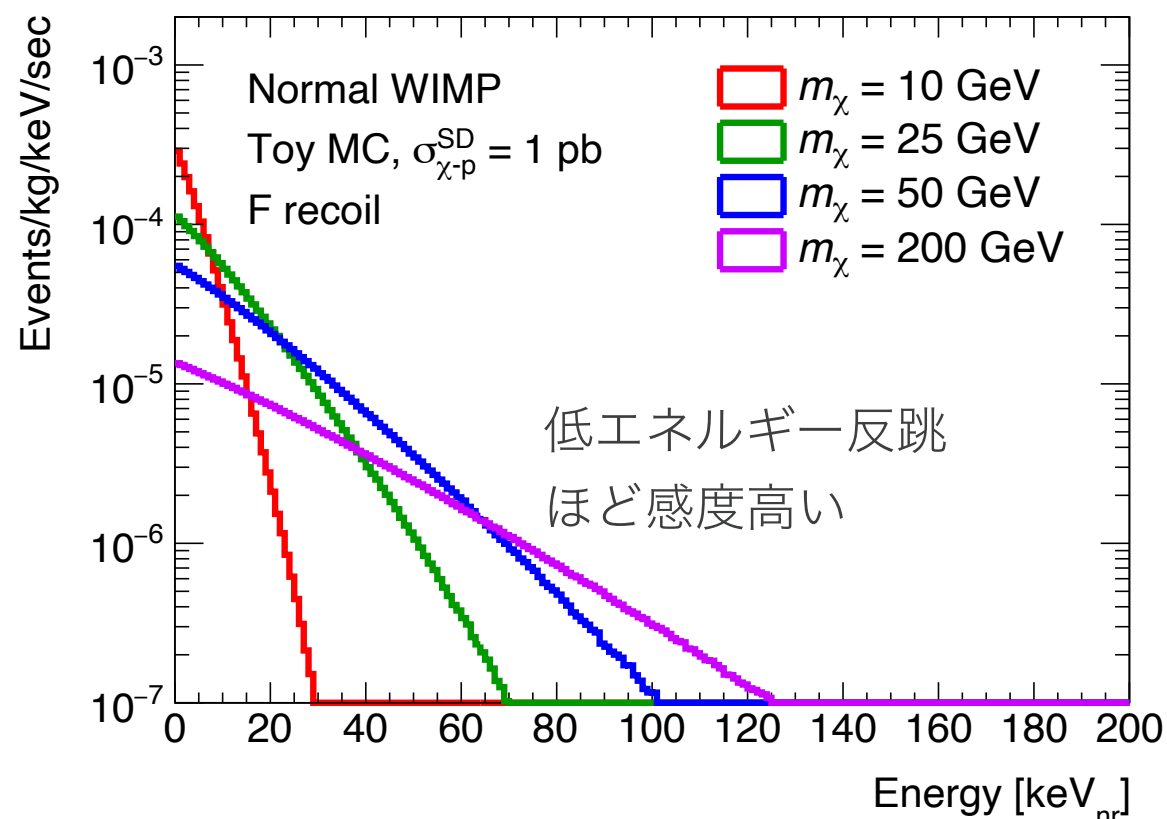
→ 反跳原子核の飛跡はミリオーダー以下

- なので反跳角を求めるための飛跡がまず組めな

どっちも必要だが
検出器側に焦点当てる

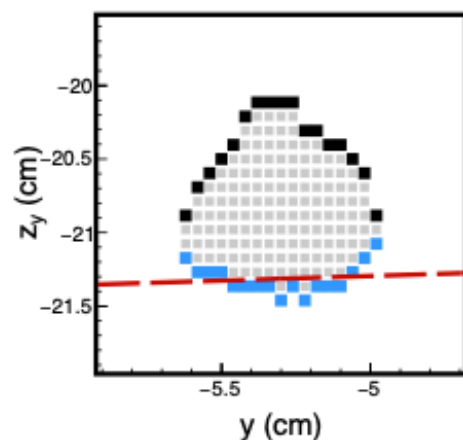
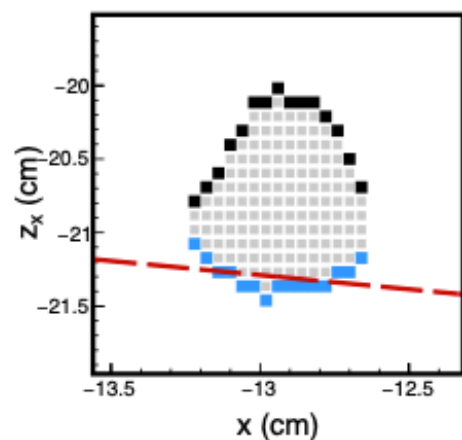
→ より低圧なガスにして飛程を伸ばす (ターゲット減る)

→ より粒度の細かい読み出し検出器を使う (値段も技術もかかる)



Pixelization

現行NEWAGEのイベント例



- ghost trackのせいで角度分解能低下

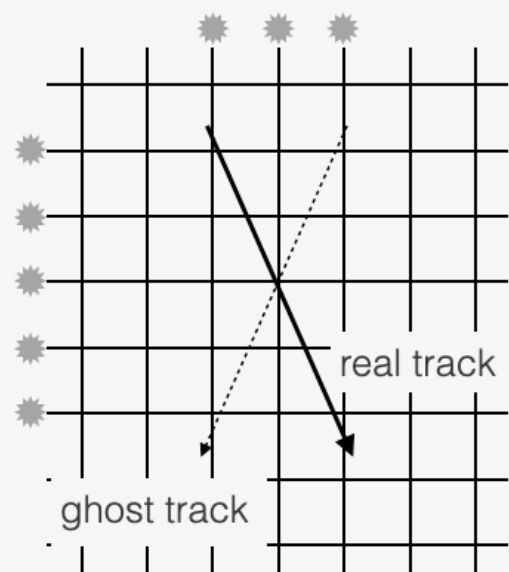
➡ ピクセル化が必要

➡ ただし読み出しチャンネルは膨大に

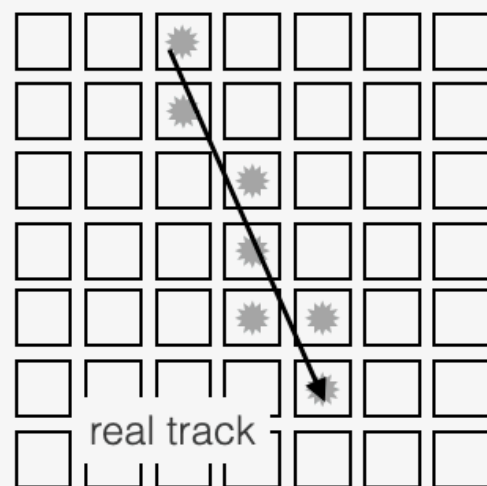
▶ ASICも新たに開発が必要



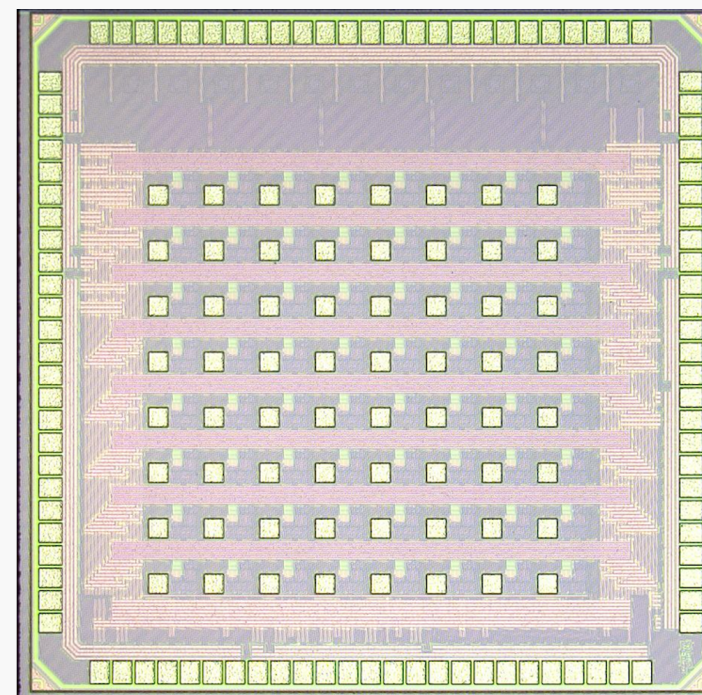
QPIX NEO



Strip readout



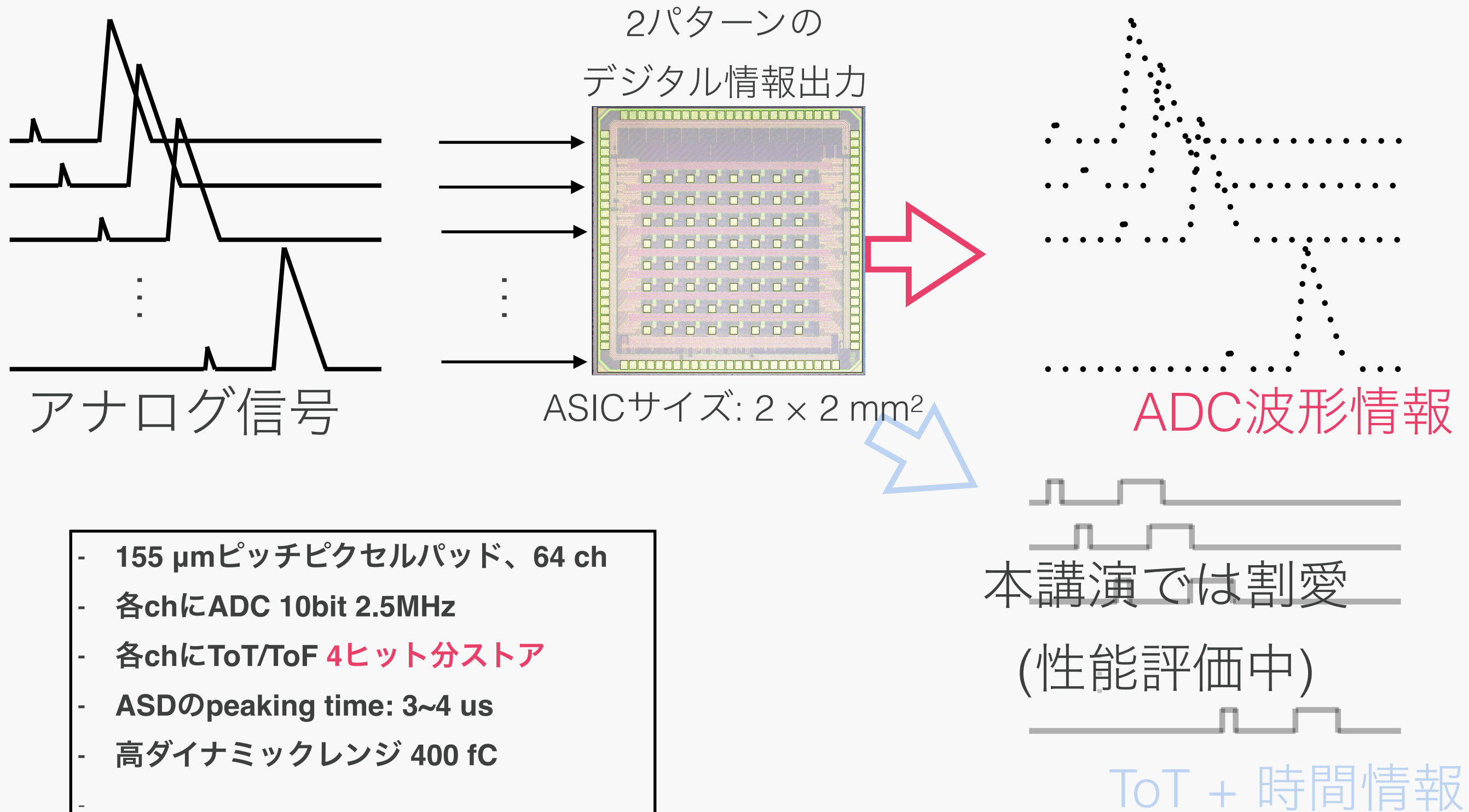
Pixel readout



KEK宮原さんに作っていただいた

23 **ピクセルガスTPCプロジェクト始動！**

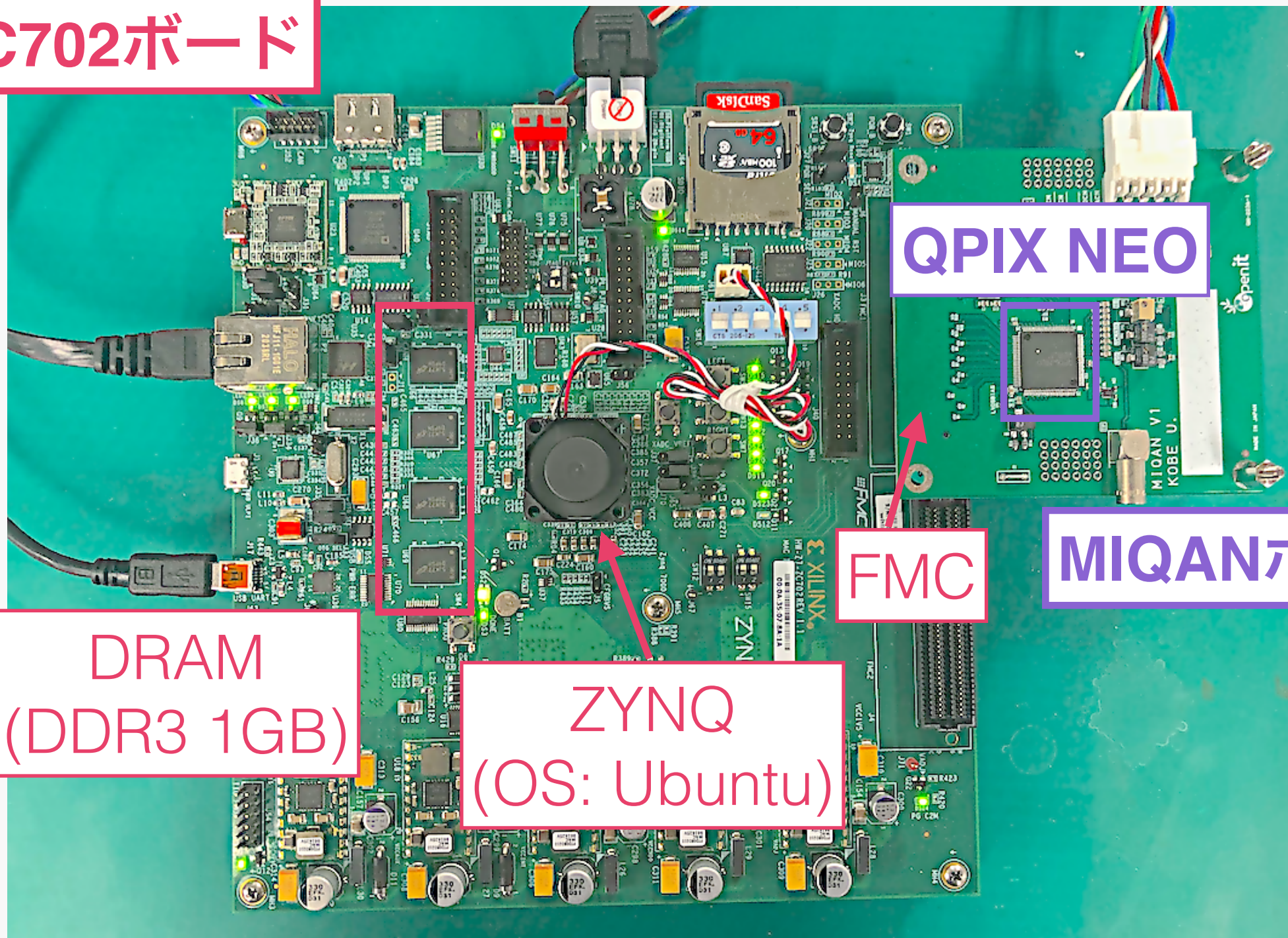
読み出しASIC: QPIX NEO



テスト用DAQシステム

- Xilinx ZYNQ (ZC702ボード) を用いてシステム構築

ZC702ボード



QPIX NEO

FMC

MIQANボード

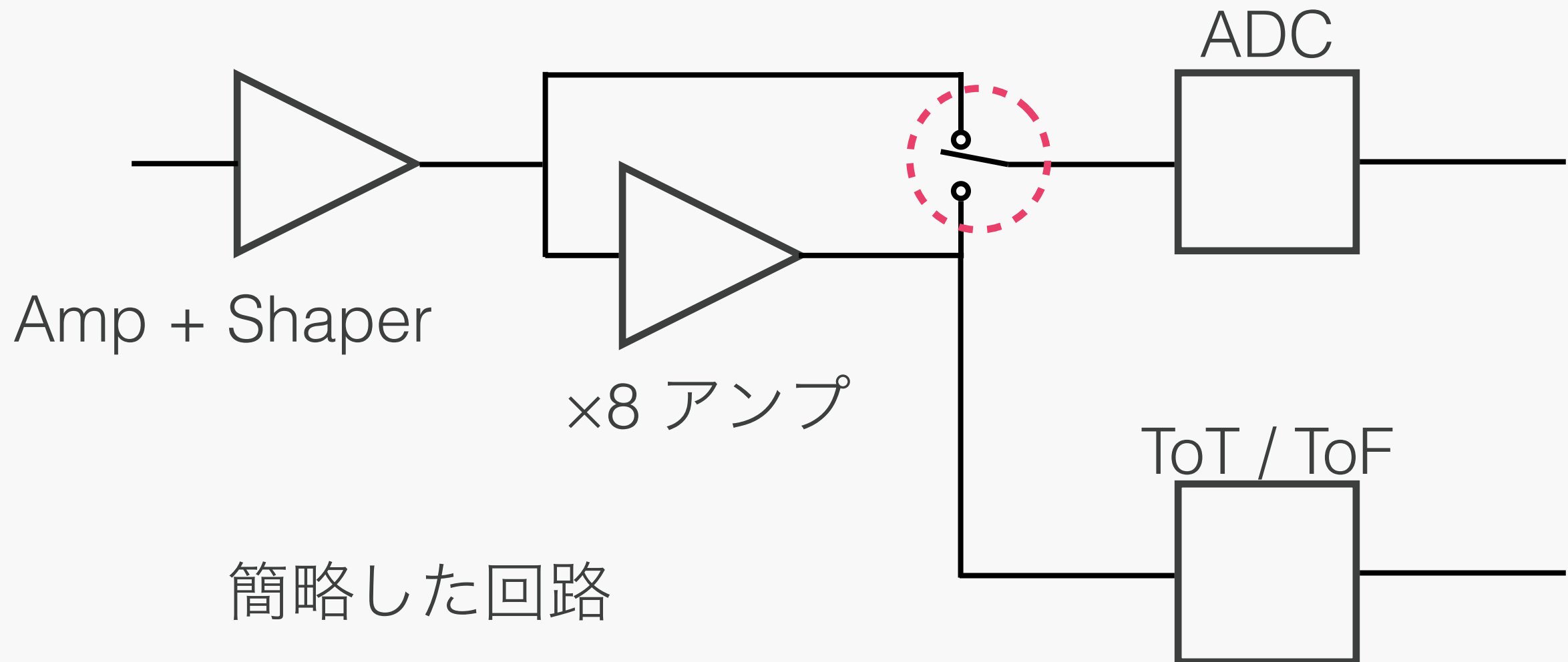
**DRAM
(DDR3 1GB)**

**ZYNQ
(OS: Ubuntu)**

自動ゲイン切り替え

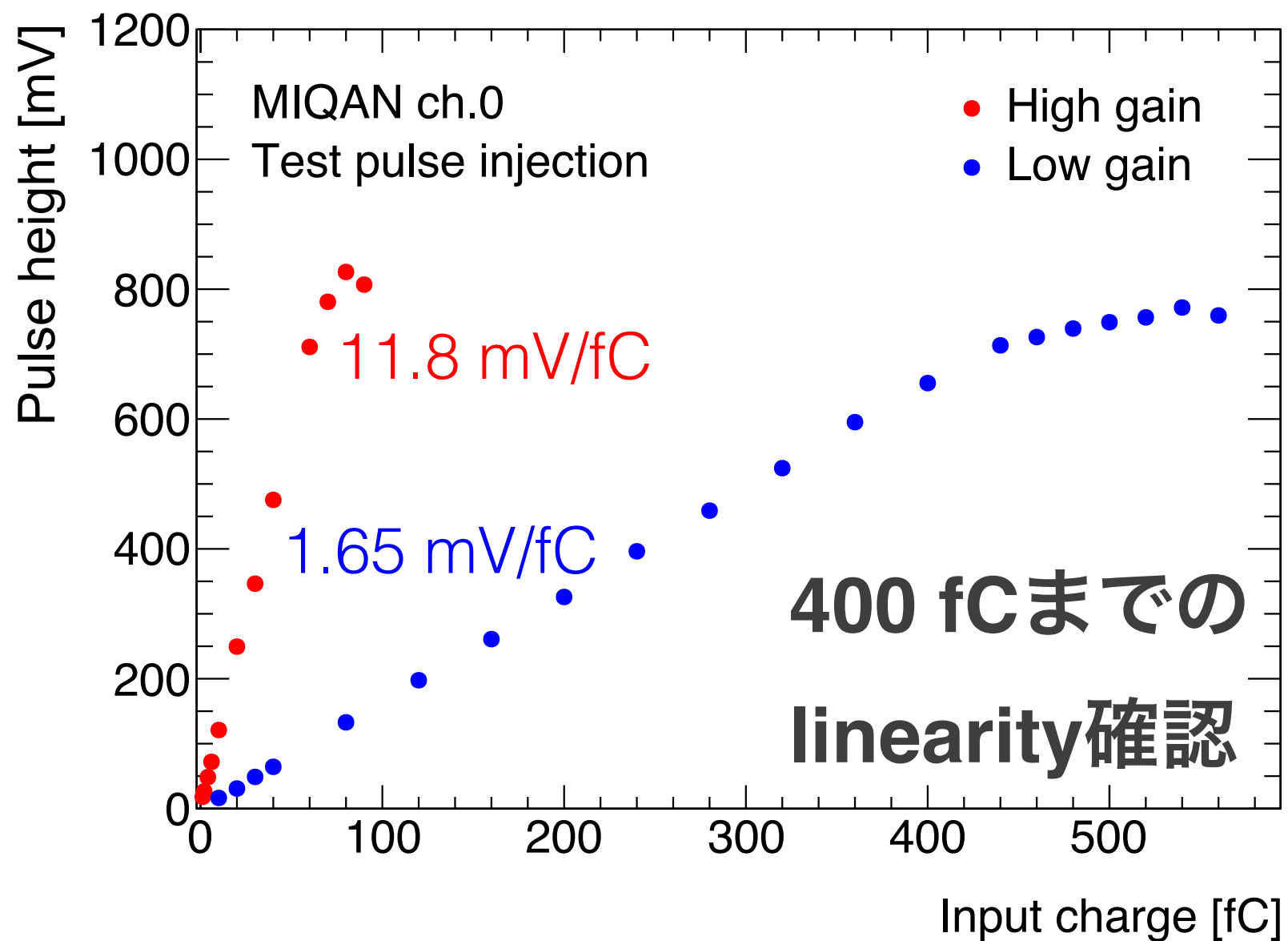
- 高ダイナミックレンジ実現のため2種類のアンプ搭載

➡ x1アンプとx8アンプがとある閾値で切り替わる

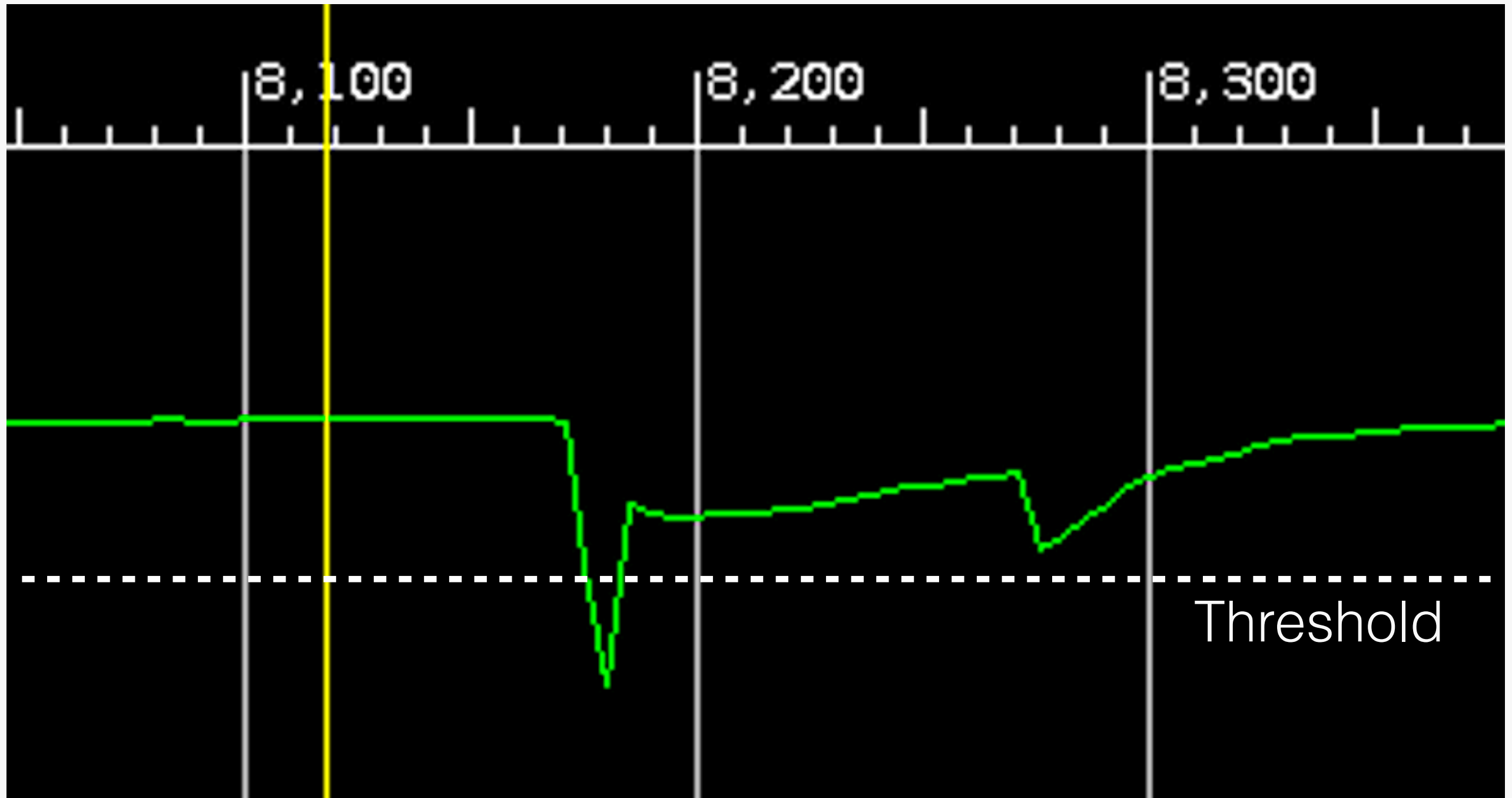


アンプのリニアリティ確認

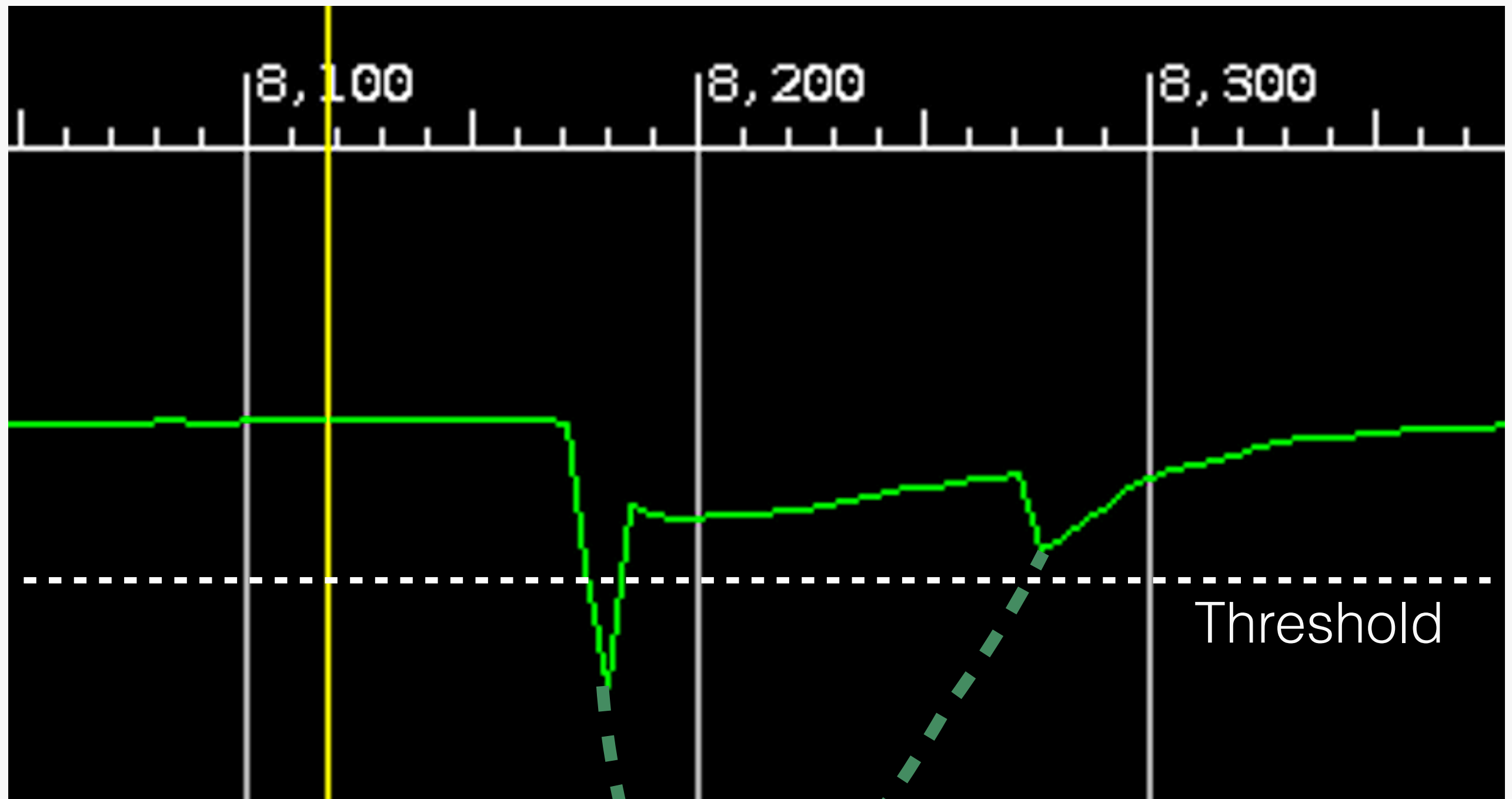
- まずはゲイン固定モードでそれぞれの性能評価
 - ➡ Configurationでゲイン設定可能
- テストパルス入力 (外部から矩形波入力→内部の0.4 pFコンデンサで電荷変換)



ゲイン自動切り替えの様子

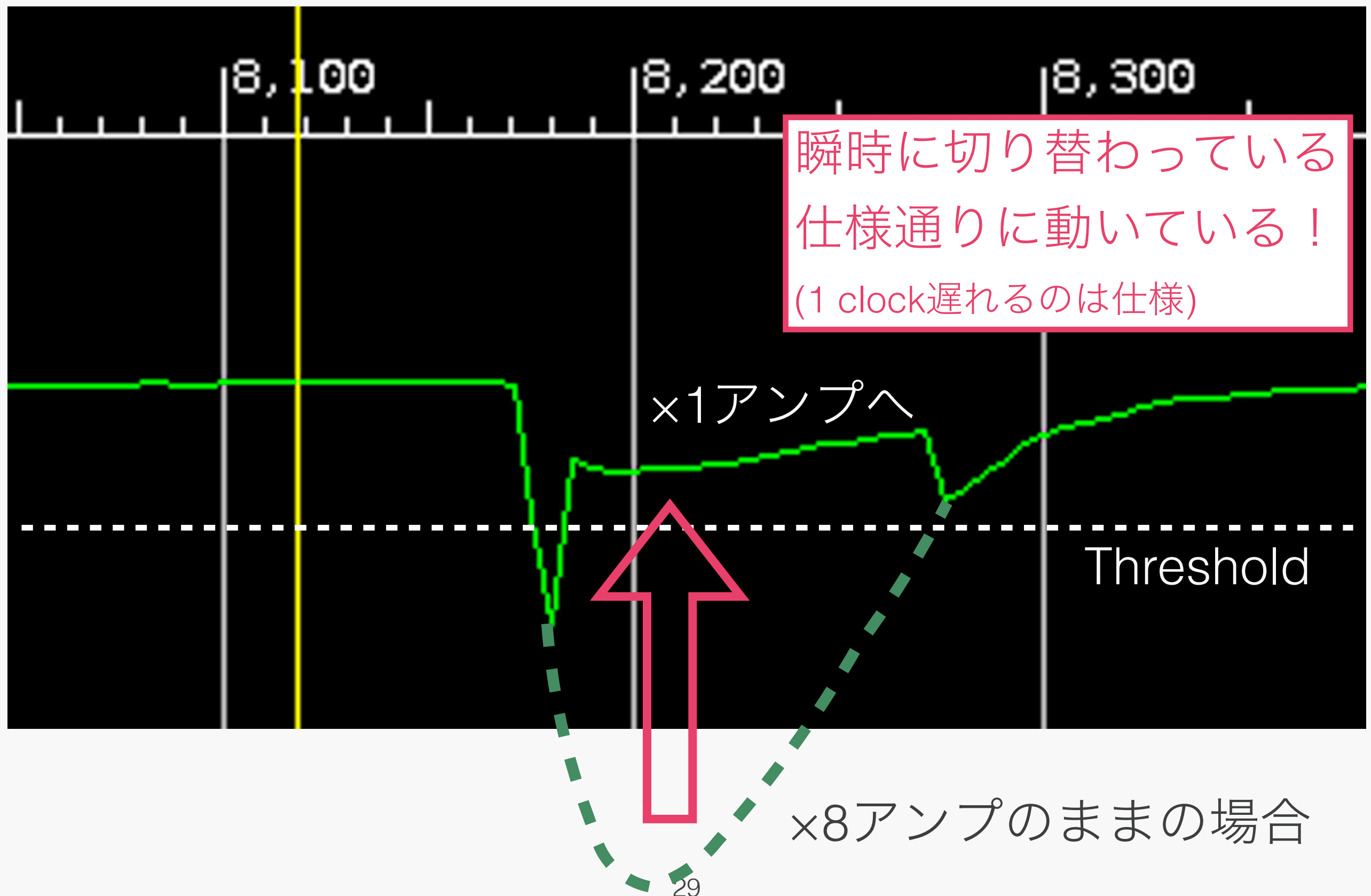


ゲイン自動切り替えの様子

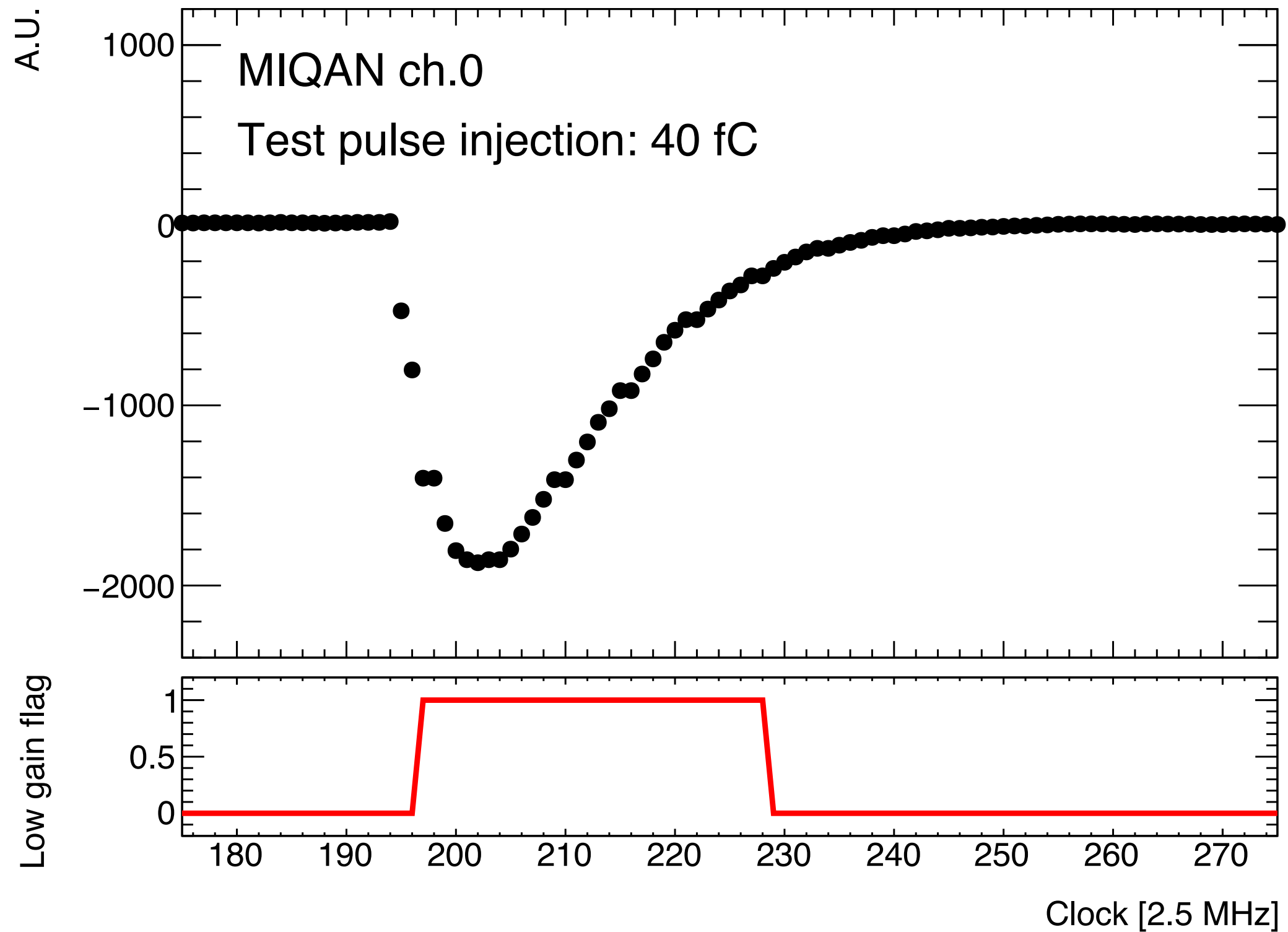


×8アンプのままの場合

ゲイン自動切り替えの様子



Waveform再構成



高ダイナミックレンジ実現、DM探索実験に利用可能

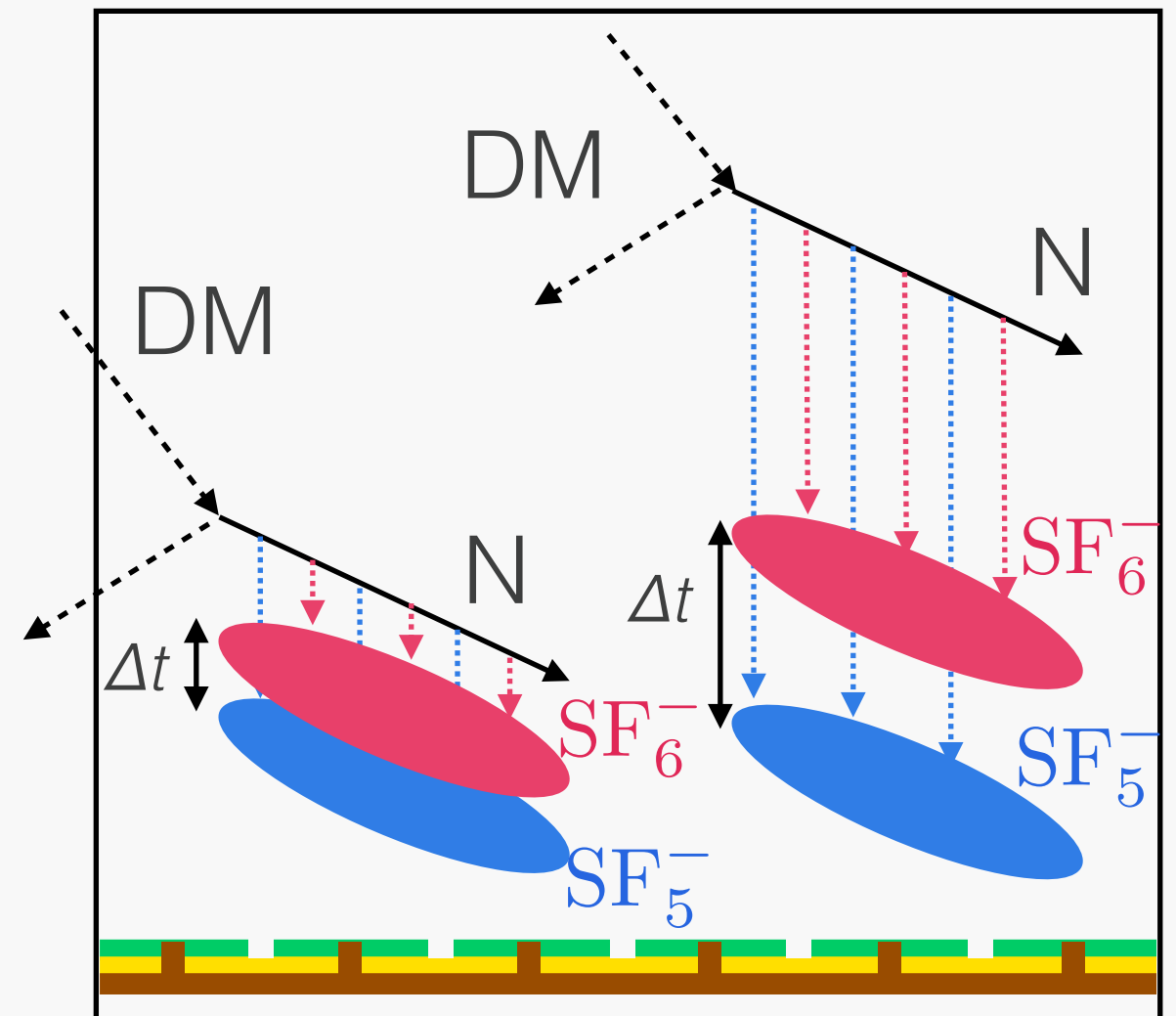
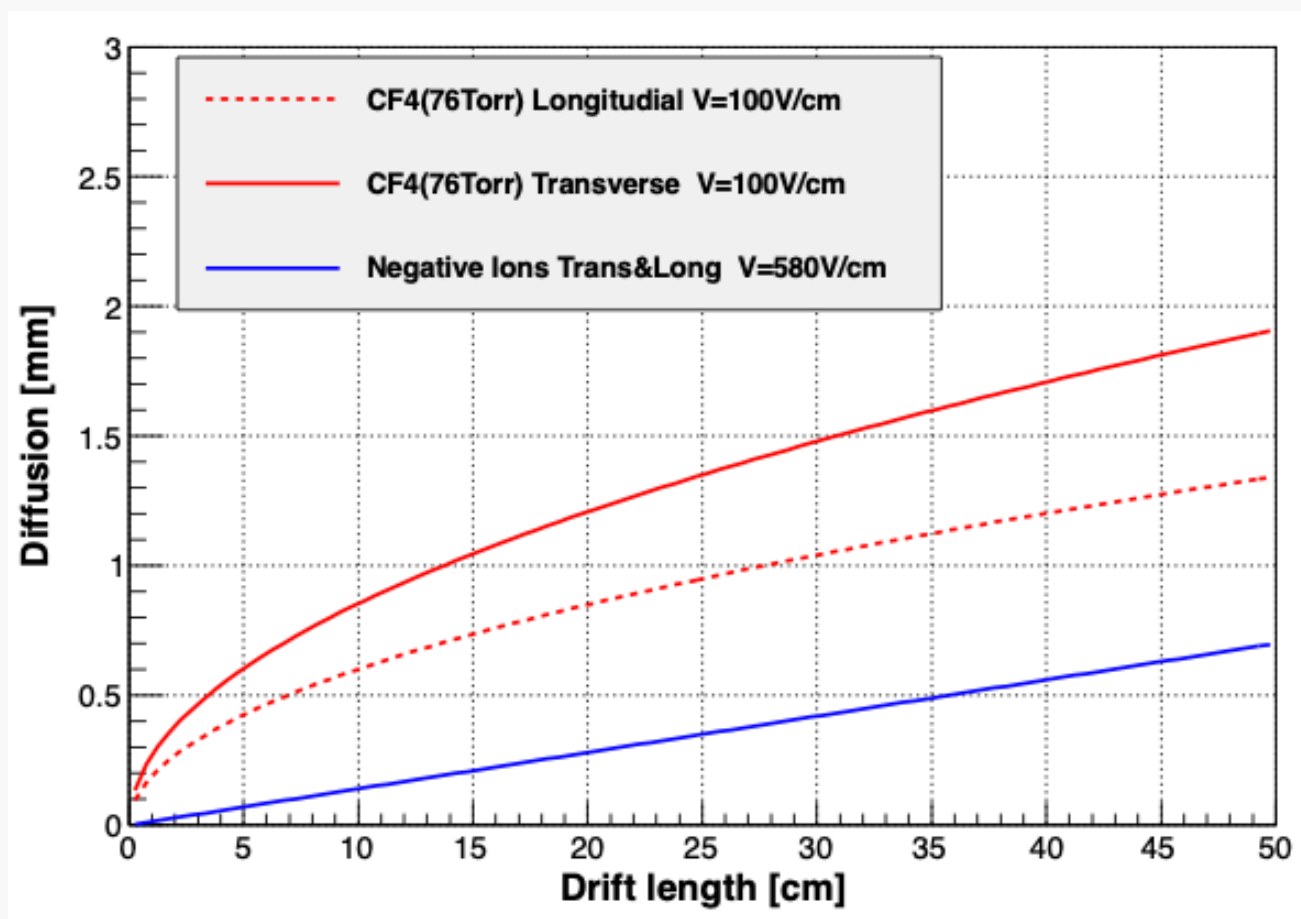
結論

- NEWAGE: ガスTPCを用いた暗黒物質直接探索実験
 - ➡ 3次元飛跡再構成技術を用いて多方面に応用
 - ➡ さらに感度向上のため新型検出器も試作中
- MIRACLUE: ミグダル効果探索実験
 - ➡ 統合DAQシステムを開発、中性子ビーム実験にて動作確認
- 次世代NEWAGE: ピクセルガスTPCを用いた暗黒物質探索
 - ➡ ASICから開発して絶賛DAQ開発中
- 低レートの地下実験でもけっこうがんばっている
 - ➡ 今後ともご助力おねがいします。興味あれば一緒になにかしましょう！

Backup

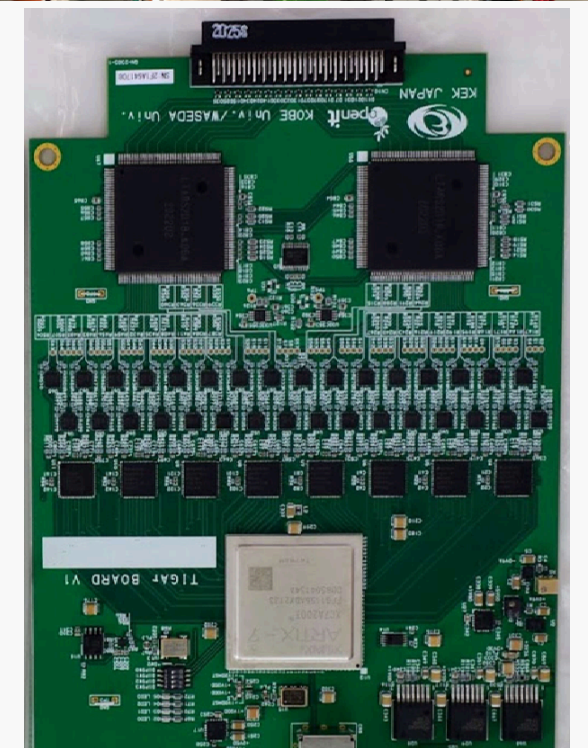
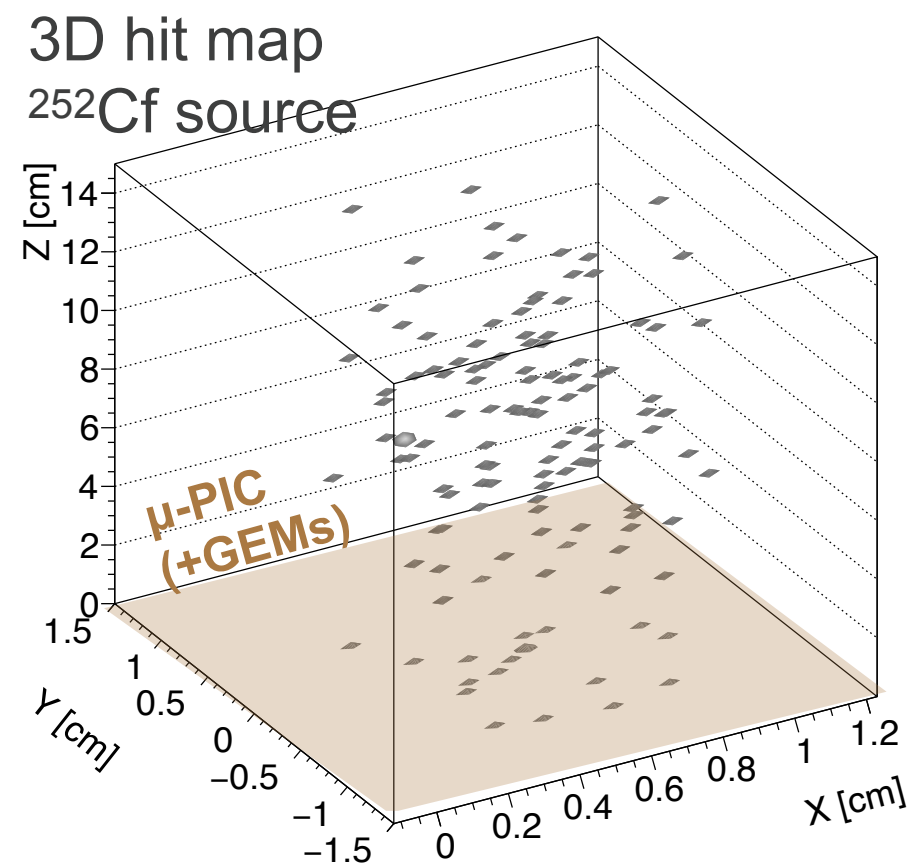
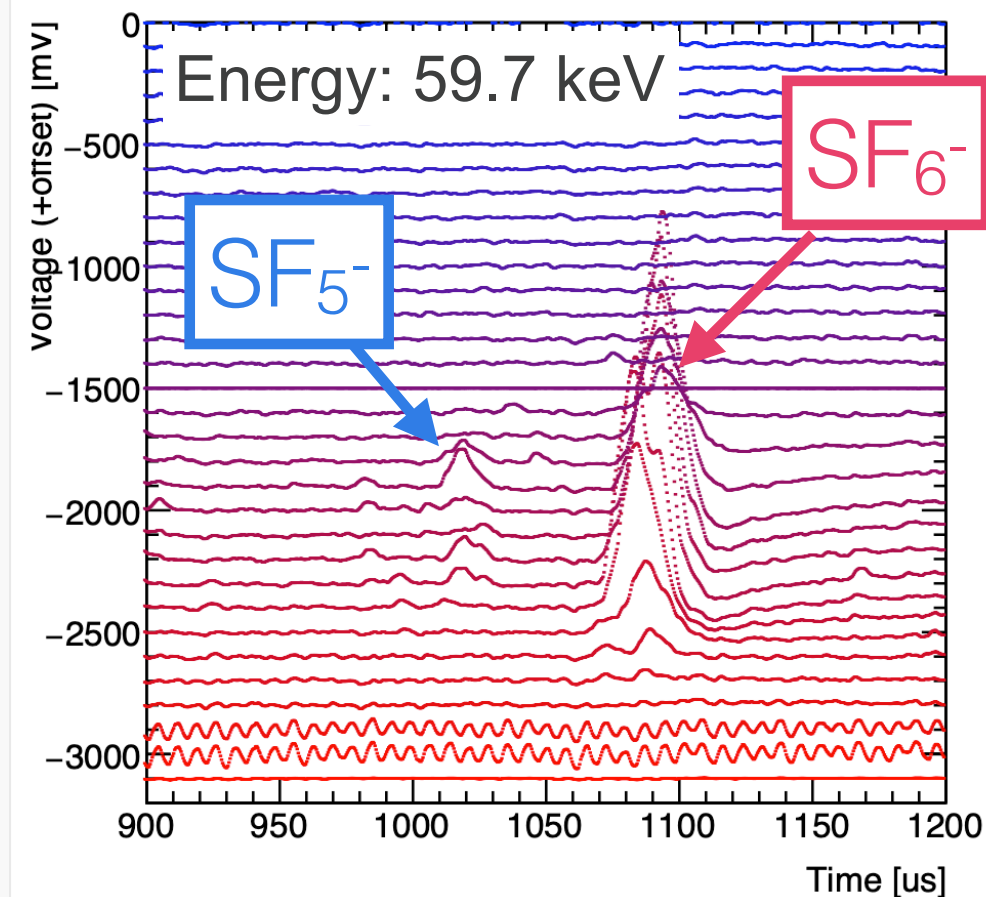
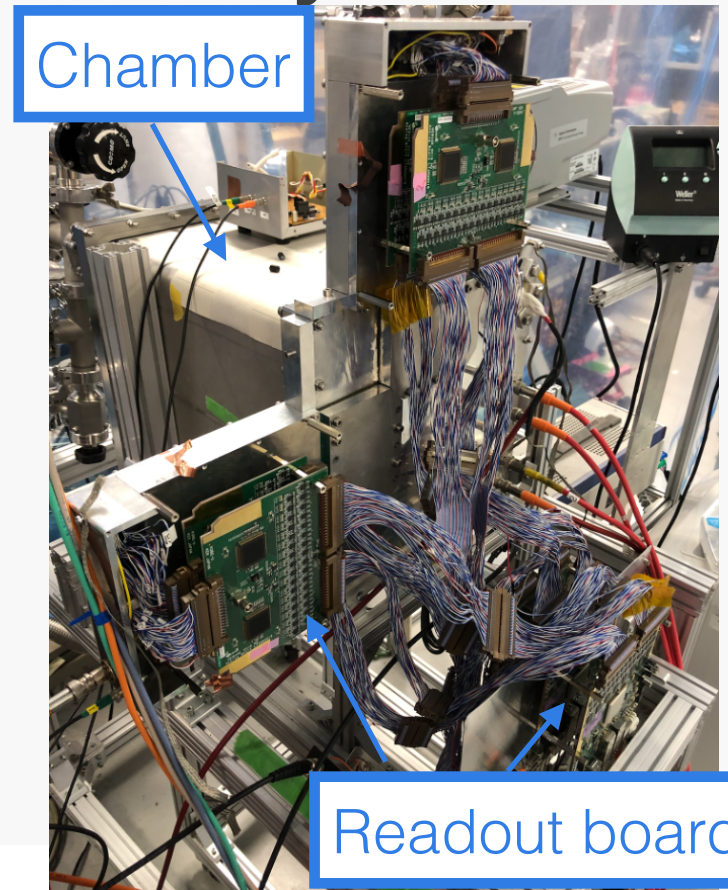
低エネルギー = 短飛跡検出に向けた戦略

- 問題点はドリフト電子の拡散と読み出しピッチ
 - “陰イオンガス” を微細読み出しで勝負
 - ▶ ガス分子が電離電子をアタッチ、大きく重たい陰イオン形成→ゆっくり低拡散なドリフト
- 陰イオンガスに SF_6 ガスを選択→絶対位置の再構成可能 (BG削減に有力)



低拡散な陰イオンガスのstudy

- 暗黒物質探索への適用はまだされていなかった
 - ➔ 専用のエレクトロニクスファームウェア開発
 - ➔ 原子核反跳の絶対位置での3次元飛跡再構成を初実証
 - ▶ arXiv: 2302.10725 / 2023 JINST 18 C06012
- 角度分解能等の評価に向けて研究継続中



NEWAGEロードマップ

2024

2025

2026

2027

...

2030

**地下測定
(~300実測日)**

CF₄、SF₆ガスでの基礎研究

2023年12月

低BG μ -PIC実装

ピクセル検出器試験
(小型検出器)

低BG μ -PIC
C/N-1.0に実装

2025年中

Module-1実装
地上測定開始

**Module-0, 1地下測定
(commissioning)**

低BG μ -PIC
C/N-1.0に実装
5モジュール使用

18モジュール運転
**1 m³ チェンバーで
地下測定**

2025年度
神岡坑内へ搬送

NEWAGE 0.3b''



30 × 30 × 41 cm³

C/N-1.0



1 m³

NEWAGEロードマップ

2024

2025

2026

2027

...

2030

地下測定
(~300実測日)

CF₄、SF₆ガスでの基礎研究

2023年12月

低BG測定をキーワードに
絶賛評価中

NEWAGE84: 東野 (本講演)

~~NEWAGE85: 柳~~ 取り消し

低BGの理解を深めて
C/N-1.0にフィードバック
その後地下実験へ

NEWAGE86: 生井

NEWAGE87: 身内

低BG μ -PIC

C/N-1.0に実装

C/N-1.0

2025年中

Module-1実装

地上測定開始

Module-0, 1地下測定
(commissioning)

低BG μ -PIC

C/N-1.0に実装

5モジュール使用

18モジュール運転

1 m³ チェンバーで
地下測定

2025年度

神岡坑内へ搬送

1 m³

NEWAGEロードマップ

2024

2025

2026

2027 ...

2030

NEWAGE 0.3b''

地下測定
(~300実測日)

NEWAGEのlimit更新
0.3b, "低BG測定"

低質量探索
小型ピクセル"低閾値"

2023年12月

低BG測定をキーワードに
絶賛評価中

NEWAGE84: 東野 (本講演)

~~NEWAGE85: 柳~~ 取り消し

低BG μ -PIC

C/N-1.0に実装

低BGの理解を深めて
C/N-1.0にフィードバック
その後地下実験へ

NEWAGE86: 生井

NEWAGE87: 身内

試験

C/N-1.0

2025年中

Module-1実装

地上測定開始

Module-0, 1地下測定
(commissioning)

低BG μ -PIC

C/N-1.0に実装

5モジュール使用

18モジュール運転

1 m³ チェンバーで
地下測定

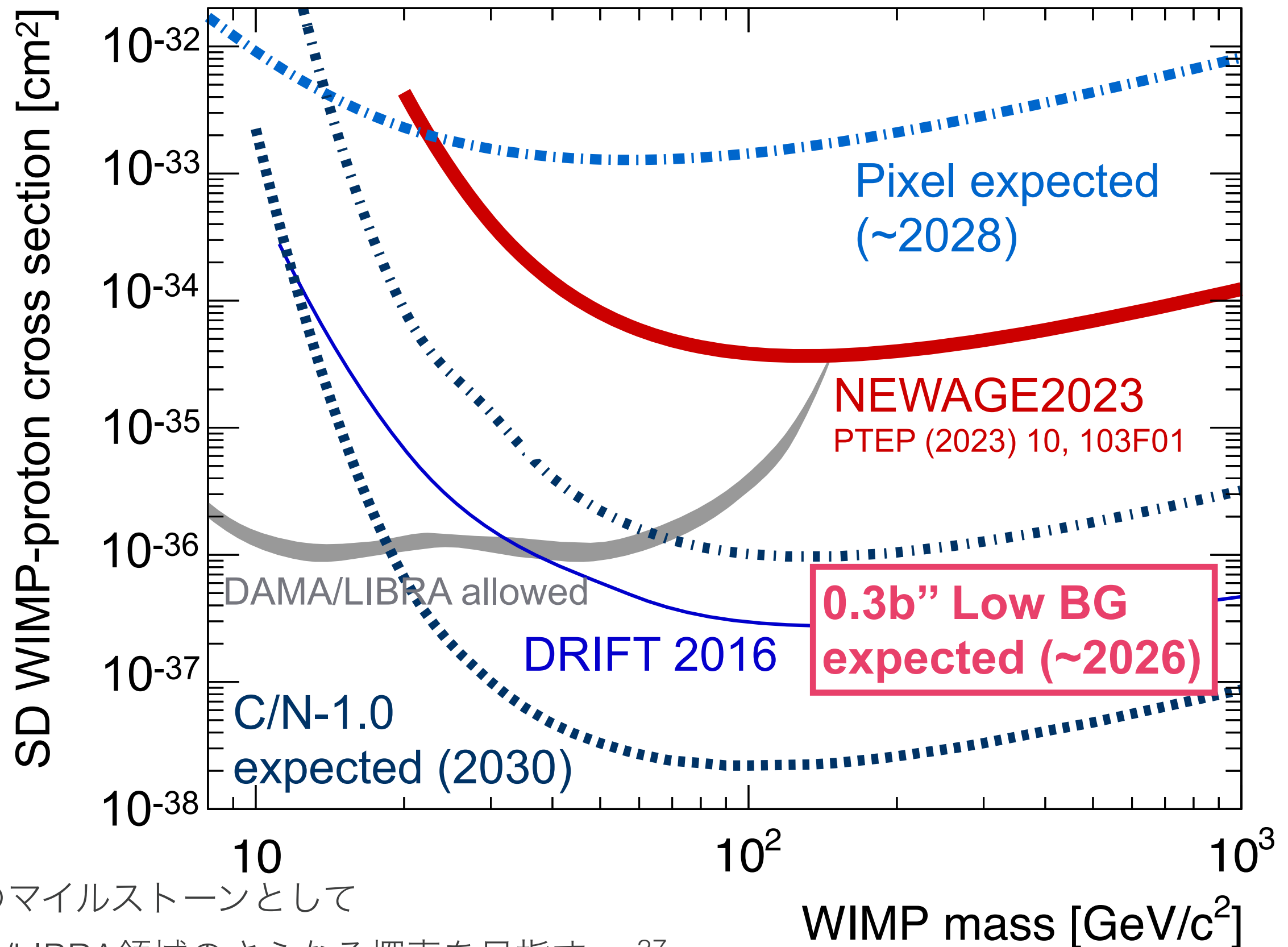
2025年度

神岡坑内へ搬送

DAMA/LIBRA領域到達
C/N-1.0, "大質量測定"

1 m³

Expected limits

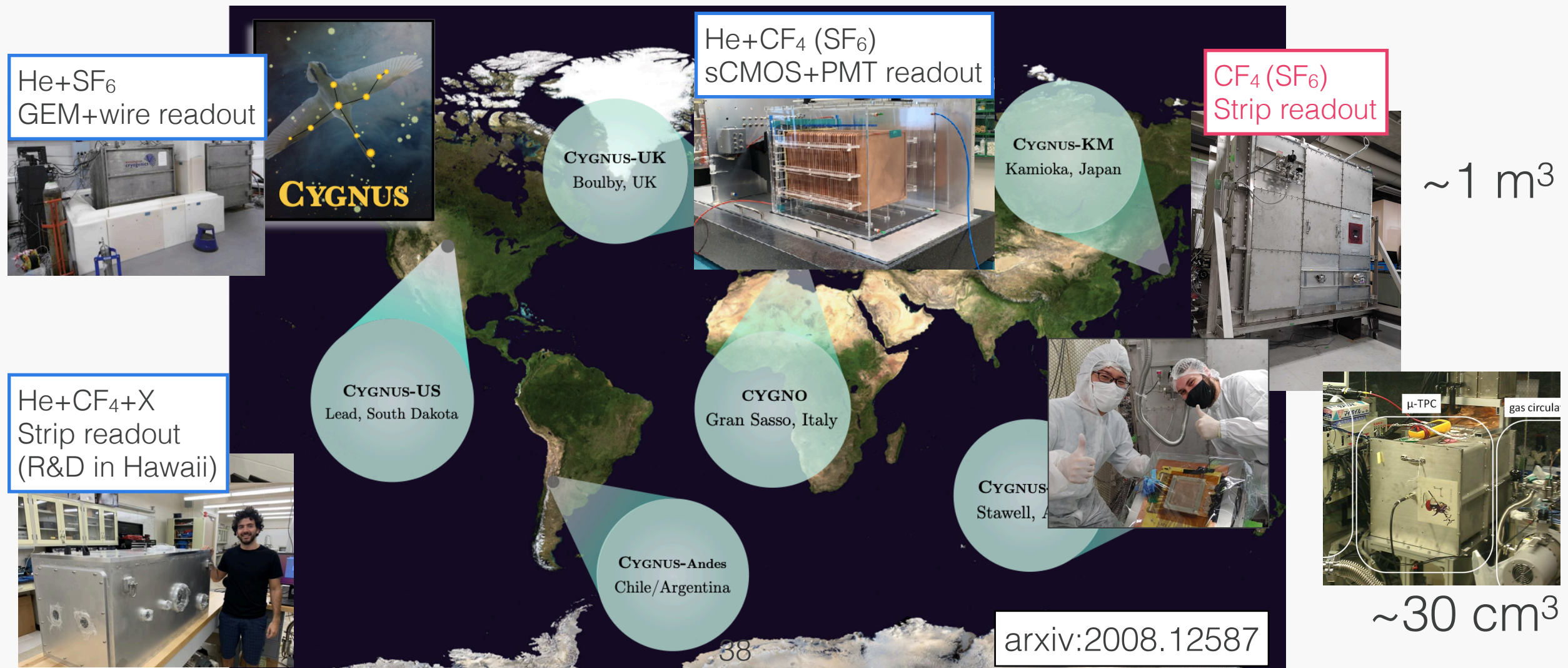


直近のマイルストーンとして

DAMA/LIBRA領域のさらなる探索を目指す

“CYGNUS” コンソーシアム

- 各地下実験施設で1 m³級のガスTPC開発中
- 将来的に結果をコンバインしてより感度を出す
 - ➔ 現在は進捗状況等をシェアしつつ各々が技術を磨いている
- 1 m³級を超えた規模では海外連携が必須、その基盤を確立



“CYGNUS / NEWAGE” ロードマップ

