



ピクセル読み出しガスTPC開発

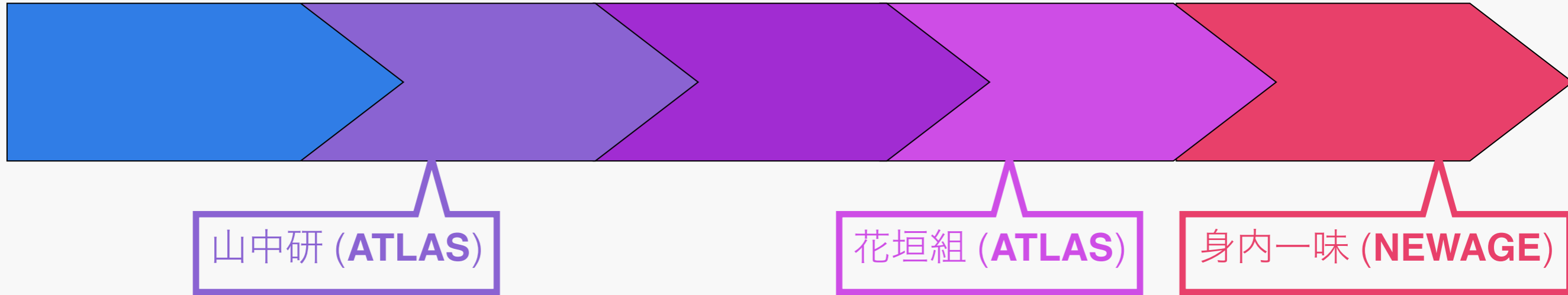
(を開始したばかりですというお話)

神戸大 東野 聡

2022年 2月 21日

自己紹介 (経歴)

愛知県安城市に生まれ育つ 2007-2013年 阪大 (学部、修士) 2013-2015年 企業で働く 2015-2020年 総研大 (博士) 2020年- 神戸大 (ポスドク)



- 修士でシリコンストリップ検出器開発
 - ➔ エレキ基板 + FPGA (ファームウェア) + ソフトウェア開発
- 博士でシリコンピクセル + ヒッグスの解析
 - ➔ トップ湯川結合の探索 (ttH過程、 $H \rightarrow \gamma\gamma$ チャンネル)
- ポスドクでダークマター探索にコンバート

大企業から(中)小企業へ

CERN Accelerating science Sign in Directory

Collaboration Site | Physics Results

ABOUT DISCOVER RESOURCES UPDATES SEARCH

Detector Physics Collaboration Visit

The Collaboration

ATLAS is one of the largest collaborative efforts ever attempted in science.

Organisational Structure

ATLAS is a collaboration of physicists, engineers, technicians, students and support staff from around the world. It is one of the largest collaborative efforts ever attempted in science, with over 5500 members and almost 3000 scientific authors. The success of ATLAS relies on the close collaboration of research teams located at CERN, and at member universities and laboratories worldwide.

ATLAS elects its leadership and has an [organisational structure](#) that allows teams to self-manage, and members to be directly involved in decision-making processes. Scientists usually work in small groups, choosing the research areas and data that interest them most. Any output from the collaboration is shared by all members and is subject to rigorous review and fact-checking processes before results are made public. The success of the collaboration is bound by individual commitment to physics and the prospect of exciting new results that can only be achieved with a complete and coherent collaborative effort.

The only way to realise such a challenging project, with the required intellectual and financial resources, and to maximise its scientific output is through international collaboration. Large project funds are investments from funding agencies of countries participating in ATLAS. There are also contributions from CERN, and some resources from individual universities.

| | | | |
|--------------------|--------------|-----------|-------------------|
| 3000 | 181 | 41 | 1200 |
| Scientific authors | Institutions | Countries | Doctoral students |



准教授 × 1
ポスドク × 1
D3 × 1 (卒業)
M2 × 1 (卒業)
M1 × 1

圧倒的マンパワー不足
に悩まされる...



“全部自分でやる”という大変さ→やりがい

<https://atlas.cern/discover/collaboration>
(2022/2/15時点)

イントロダクション

～ ダークマター (DM) 直接探索と Directionality ～

謎の質量

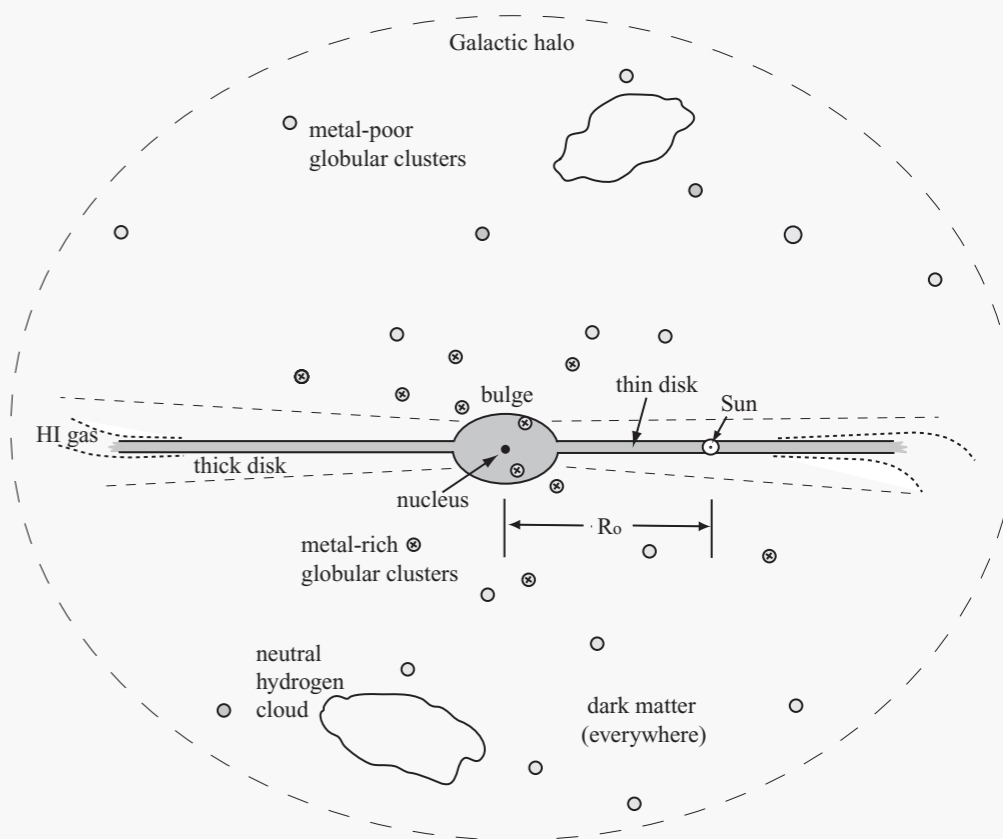
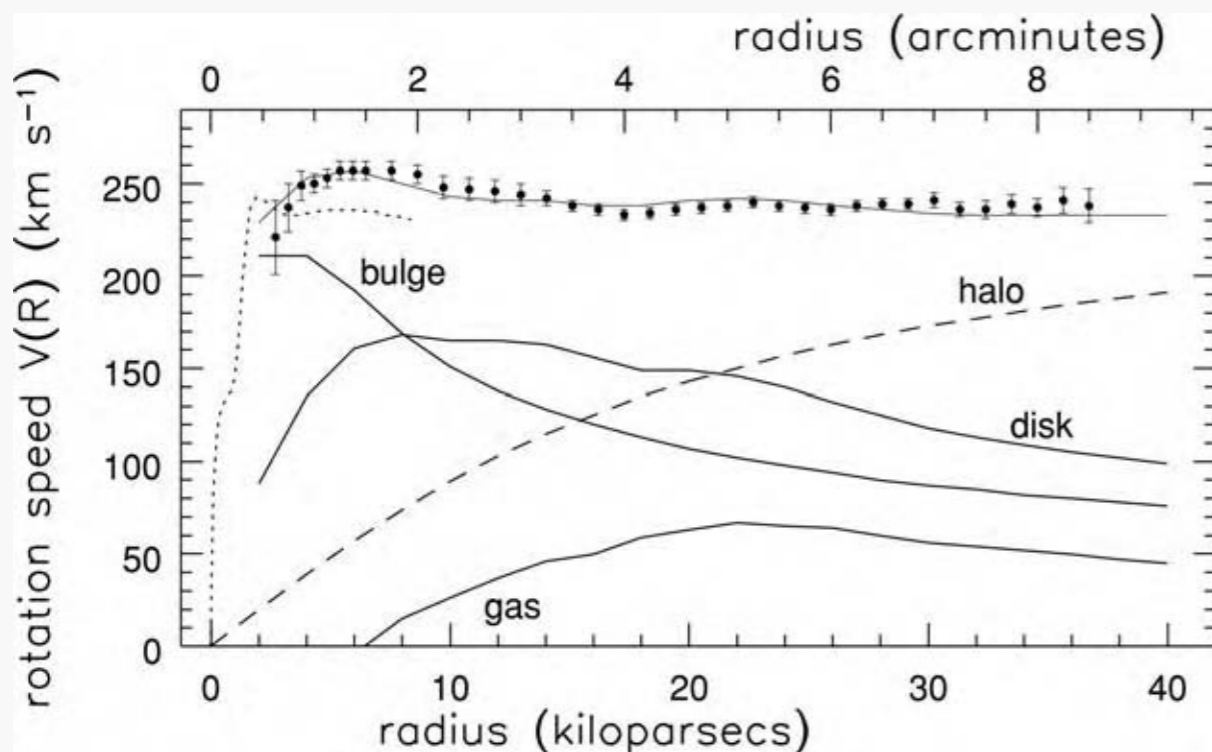
- 銀河の回転速度が計算と合わない！

→ 銀河の質量分布は“見えている”星から予想

▶ ディスク状 (天の川) に星は分布しているみたい

→ ...と思いきや観測結果と矛盾 → 銀河(の周り)に謎の質量を持つ物質がある？

= 粒子?
これを探す!



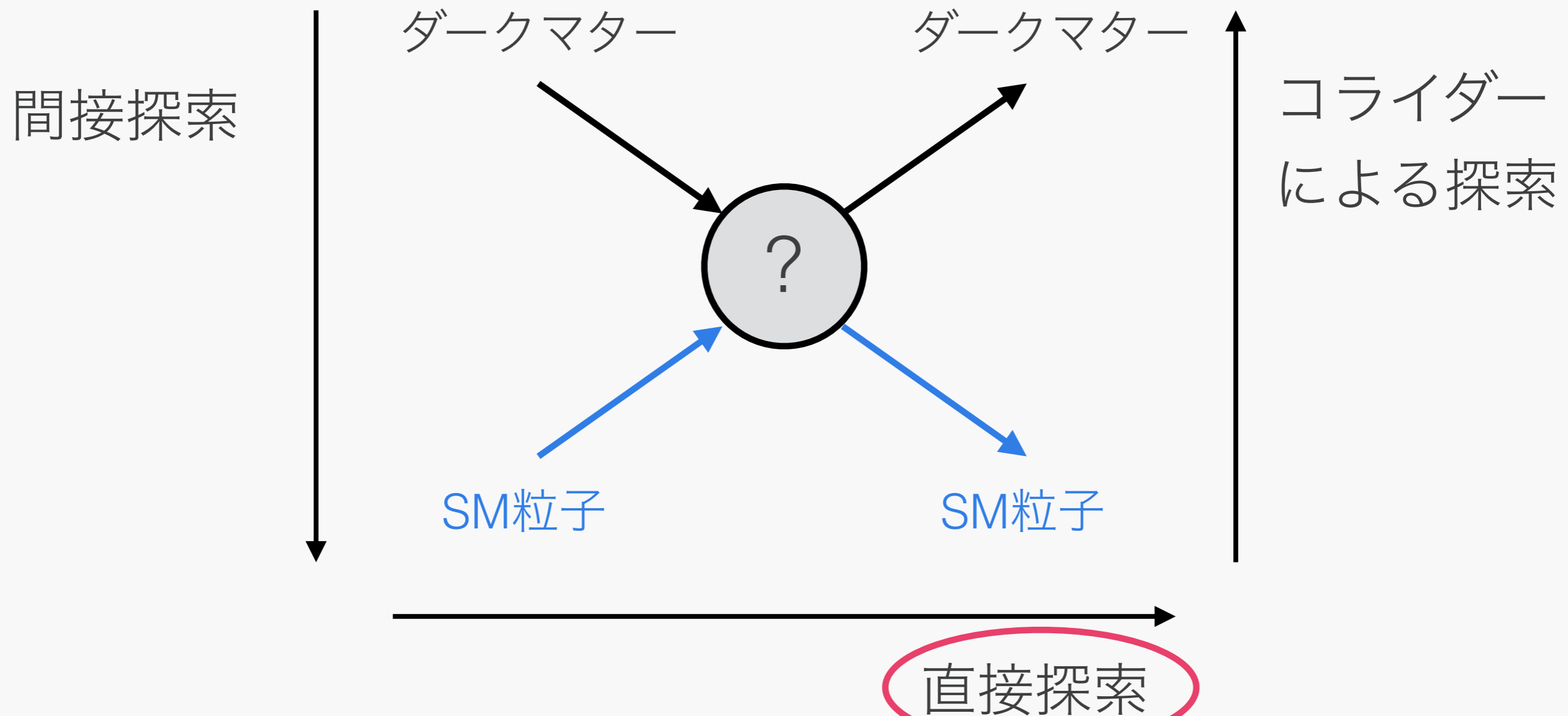
$$v = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}$$

どんなMass分布か
回転速度からわかる

銀河はこんな構成?

いろいろな探索のしかた

ダークマターがSM粒子と(重力相互作用に加えて他の)
相互作用をするとしてみる



DM (WIMP) 直接探索

- Weakly Interacting Massive Particle (WIMP)
- 銀河内をふらついている (熱運動) ところに太陽系が突進
 - 相対的にWIMPが銀河回転方向からやってくる
- 物質中のSM粒子をなんらかの相互作用で反跳させる



直接探索がつけた制限

XENON1T, LUX, PandaX

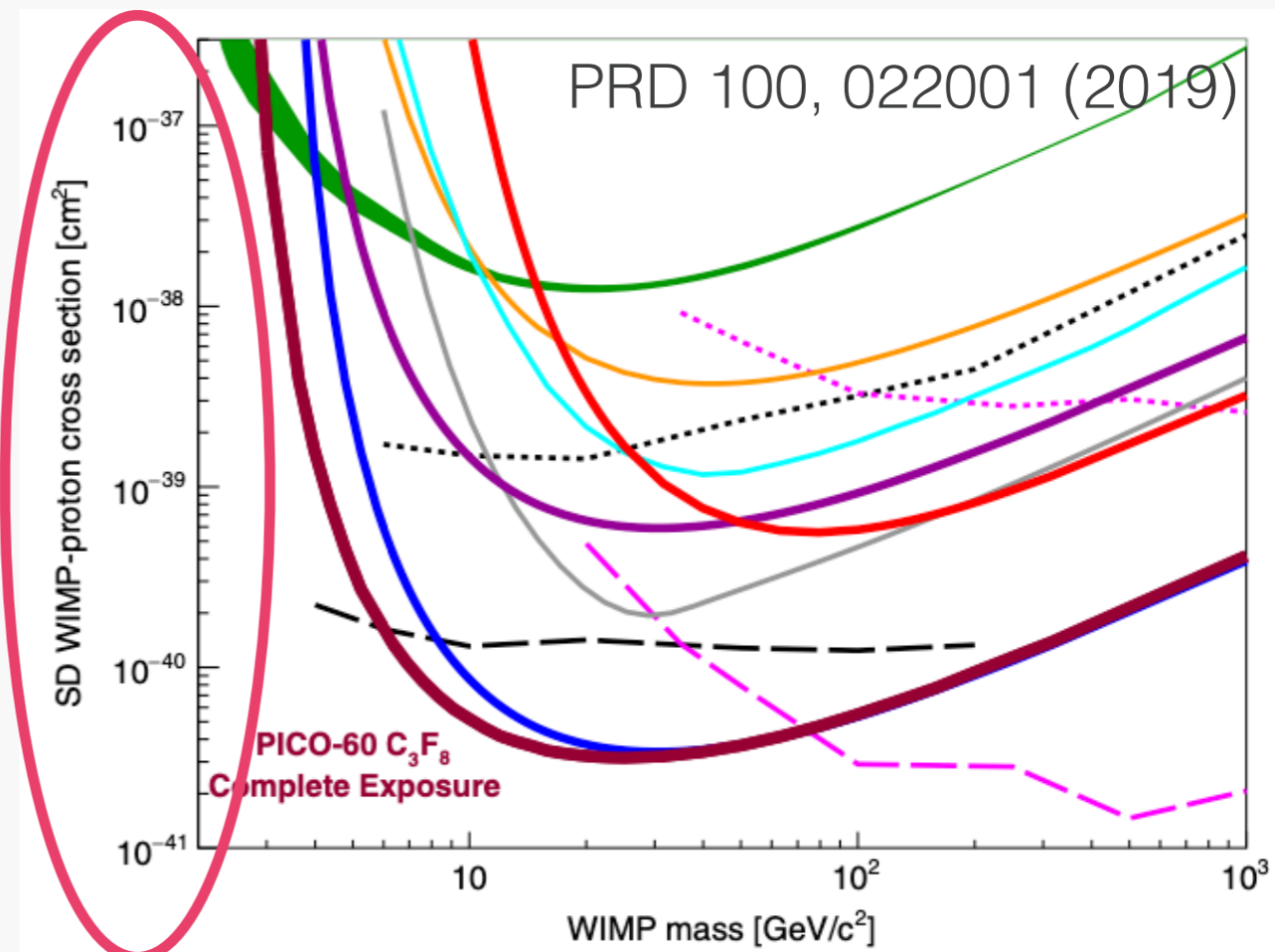
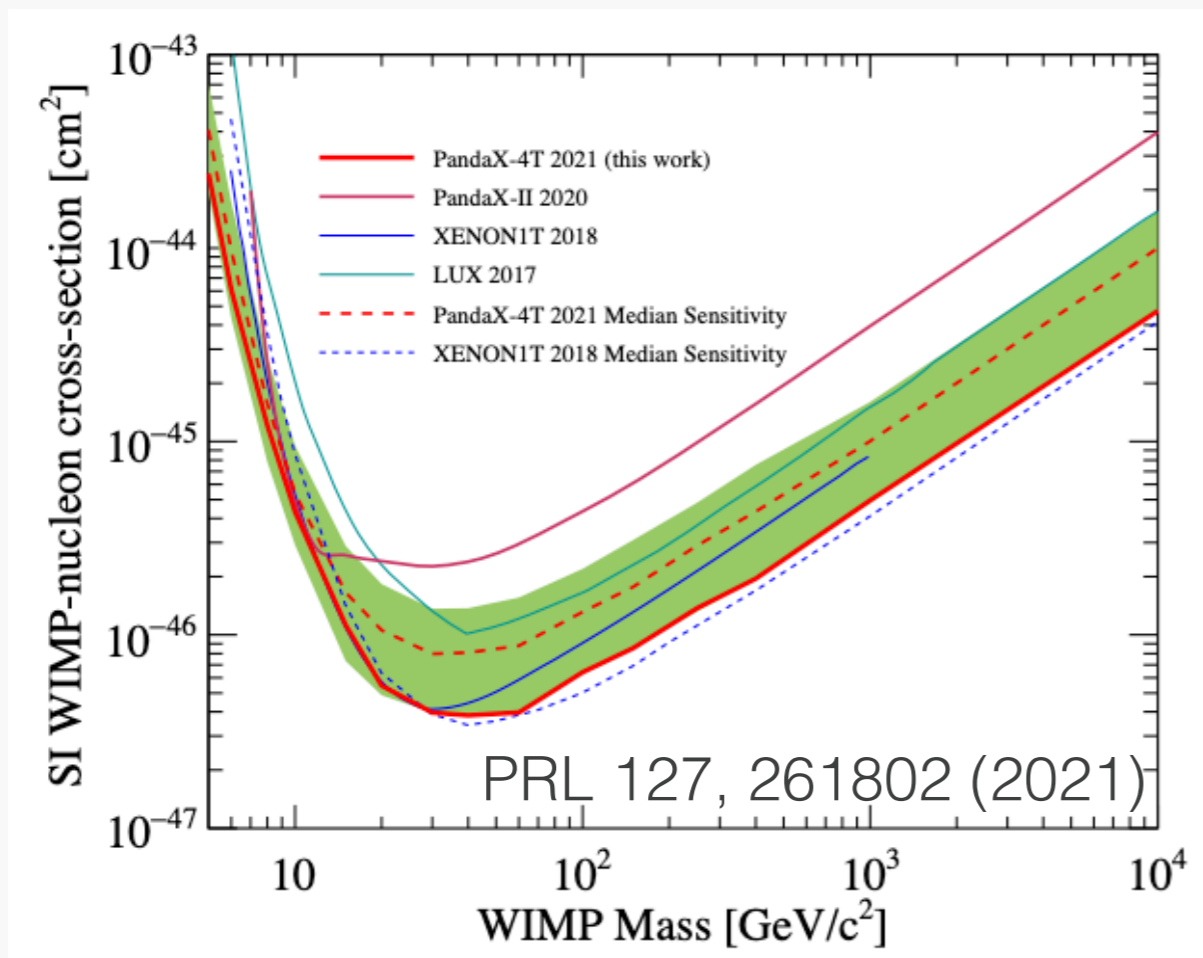
PICO

- 群雄割拠

→ 最近はXe 2相型TPCやバブルチェンバーが強い→大質量化 (ターゲット増やす)

- 我々の実験: NEWAGEも直接探索実験

→ うすうすのガスがターゲット...



直接探索がつけた制限

- 群雄割拠

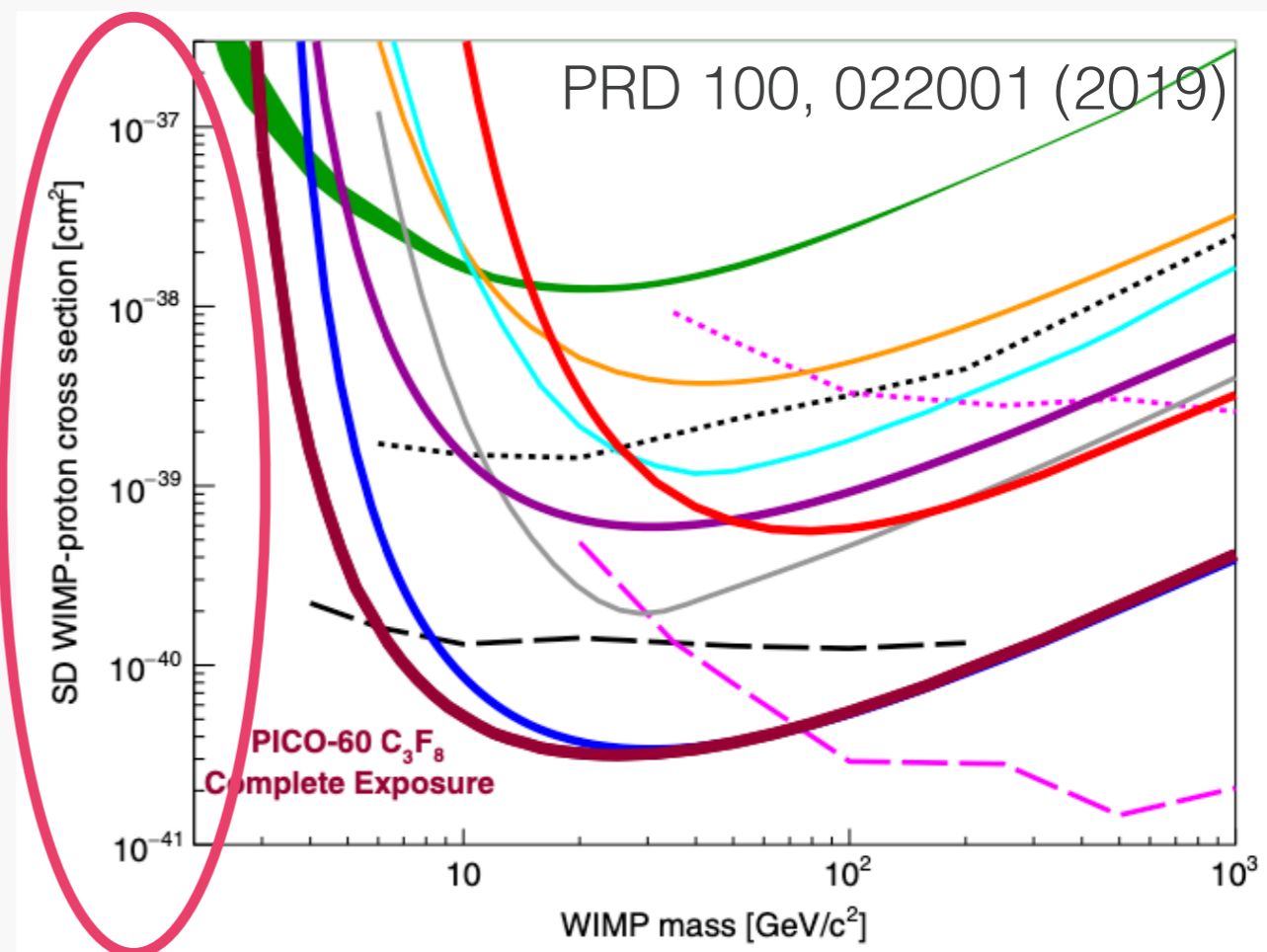
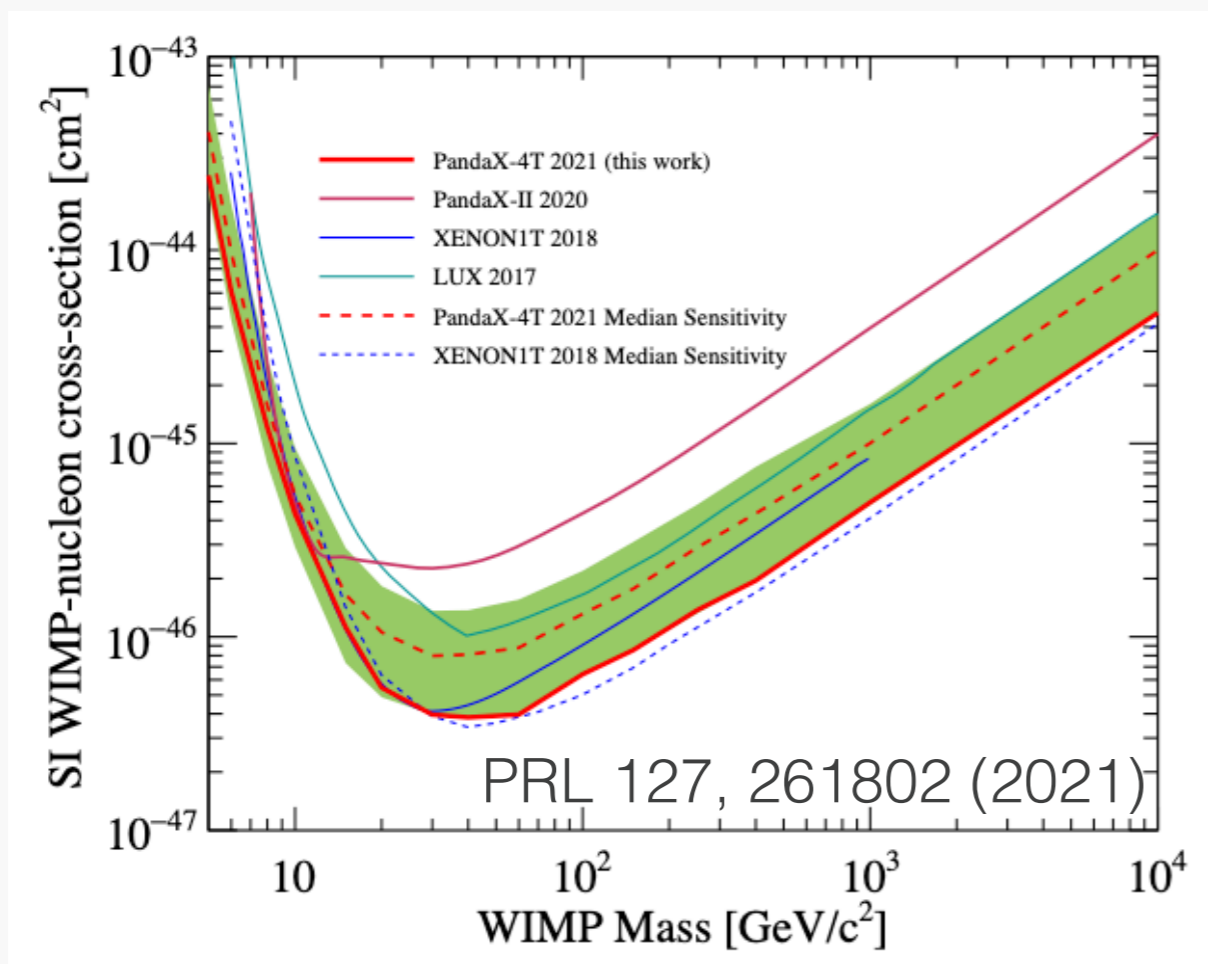
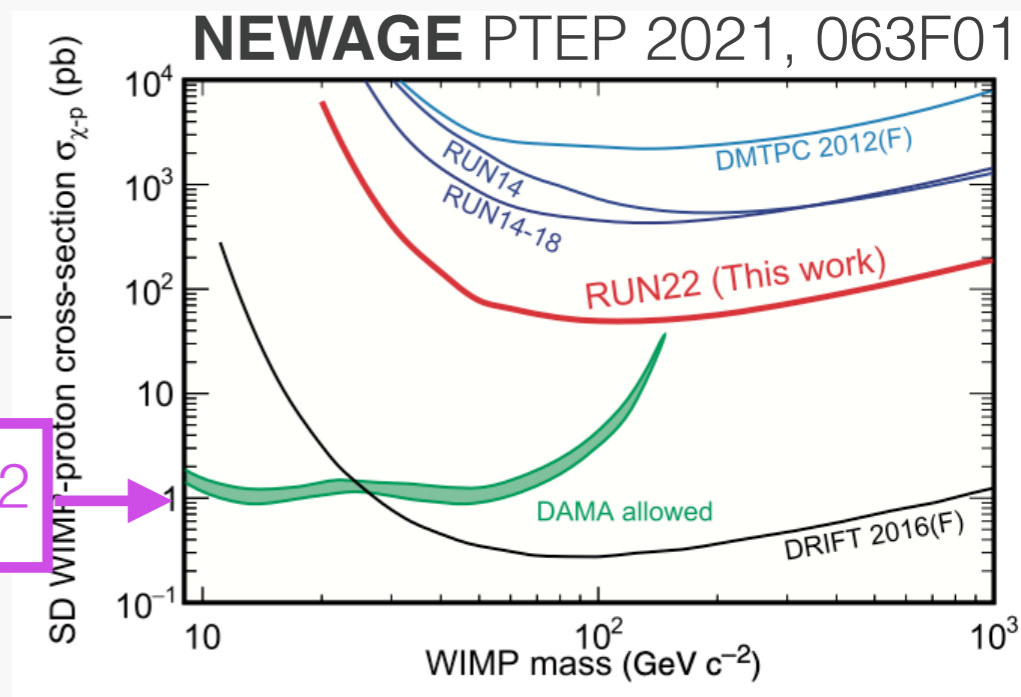
XENON1T, LUX, PandaX

PICO

→ 最近はXe 2相型TPCやバブルチェンバーが強い

- 我々の実験: NEWAGEも直接探索で 10^{-36} cm^2

→ うすうすのガスがターゲット...

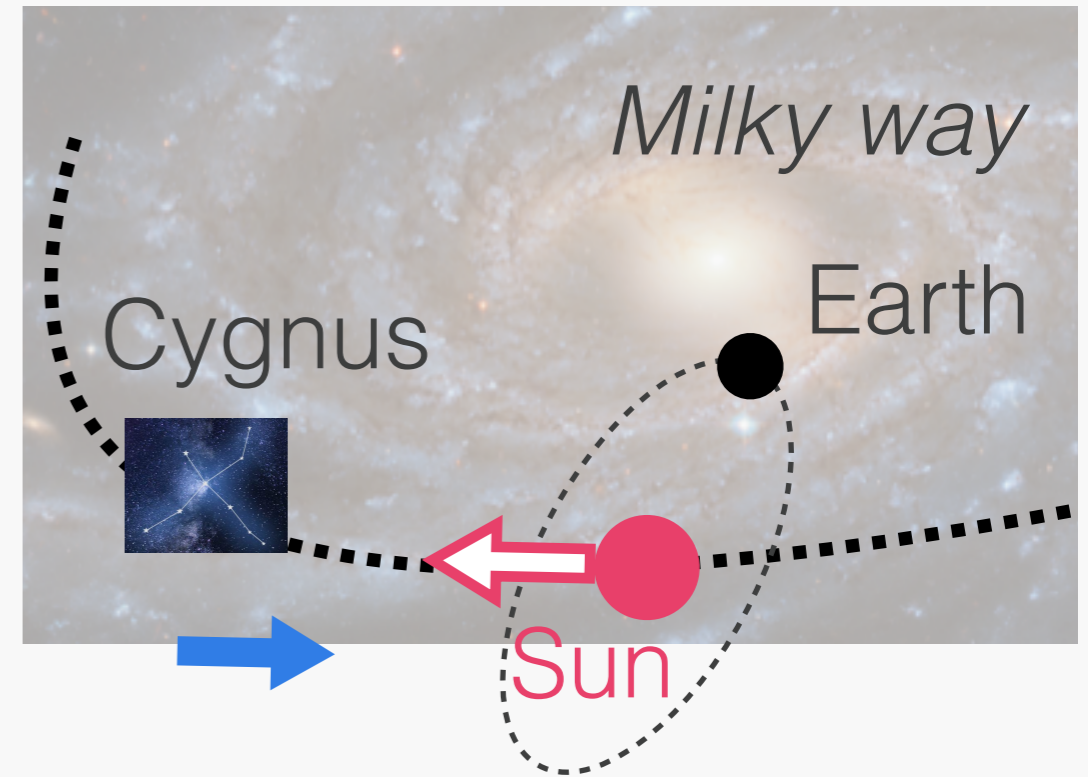


方向感度を持った暗黒物質 (WIMP) 直接探索

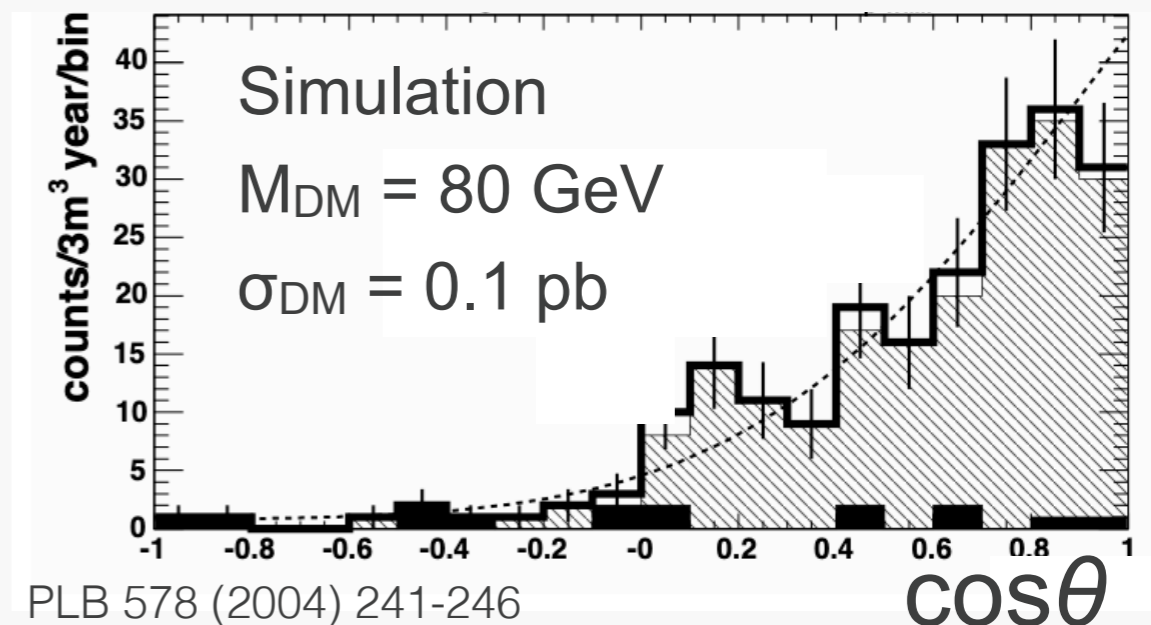
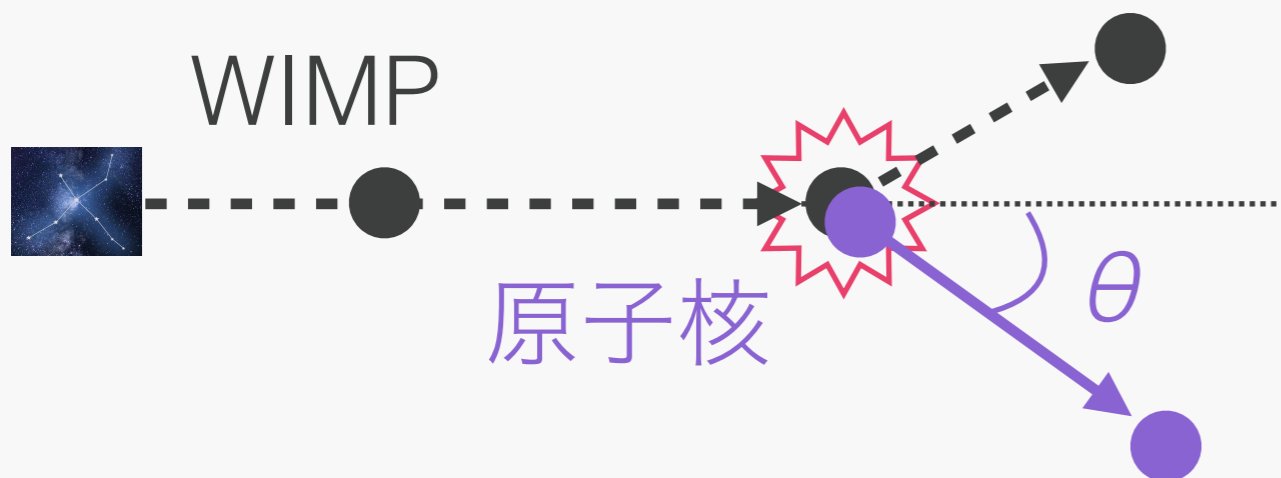
- 原子核反跳から到来方向を知る
 - 散乱角測定 ≡ 反跳粒子の飛跡検出
- 低反跳エネルギー事象も角度測りたい

▶ ターゲット密度薄くする

▶ 超短飛跡検出 (エマルジョン)



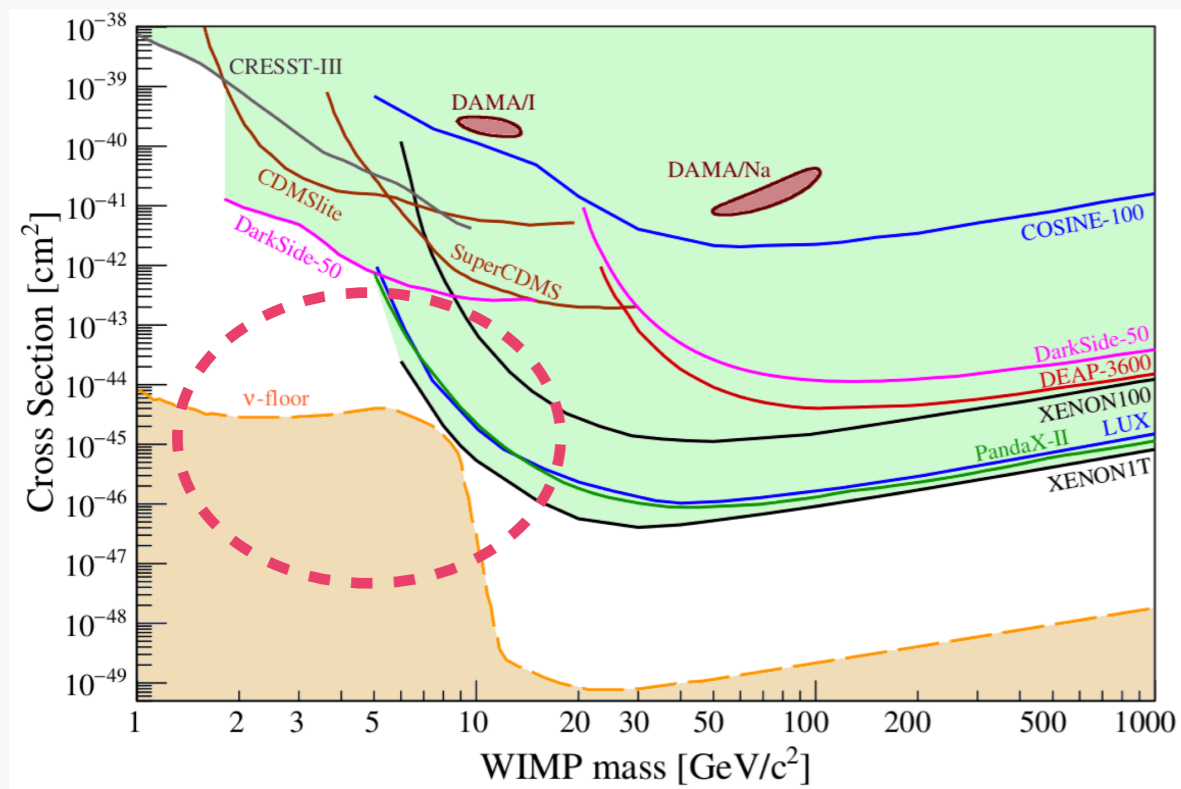
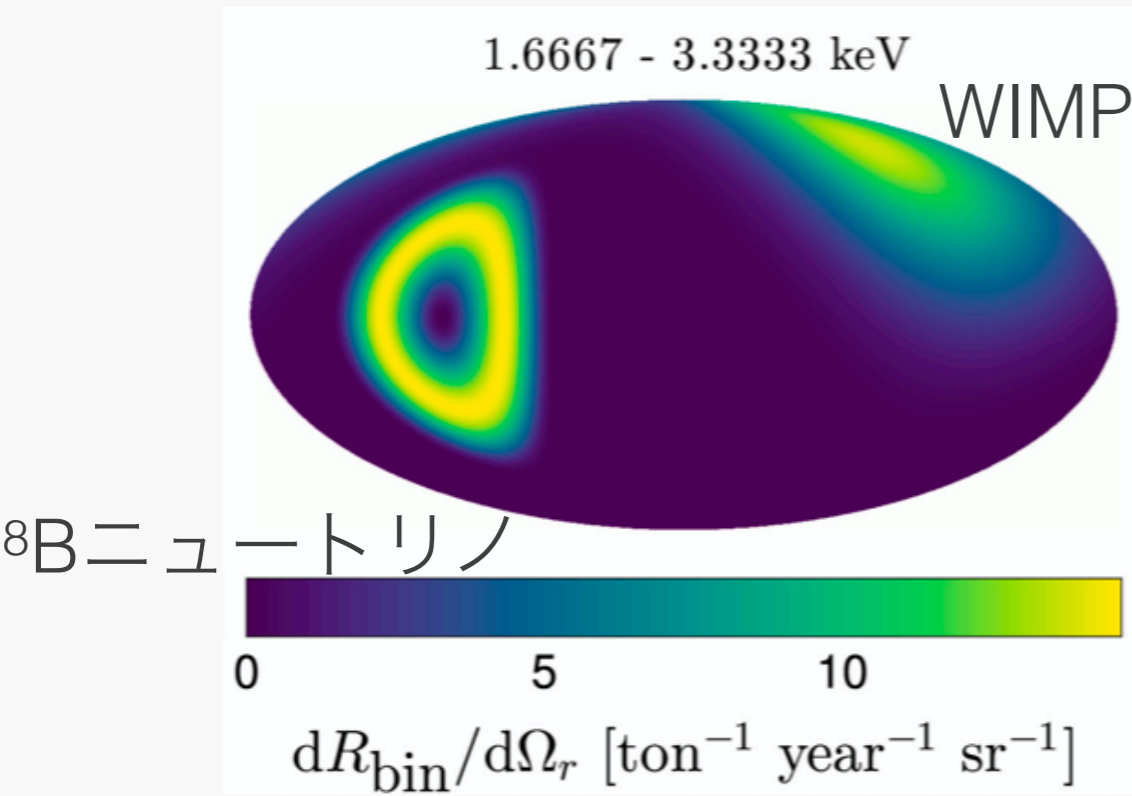
WIMP wind from Cygnus!



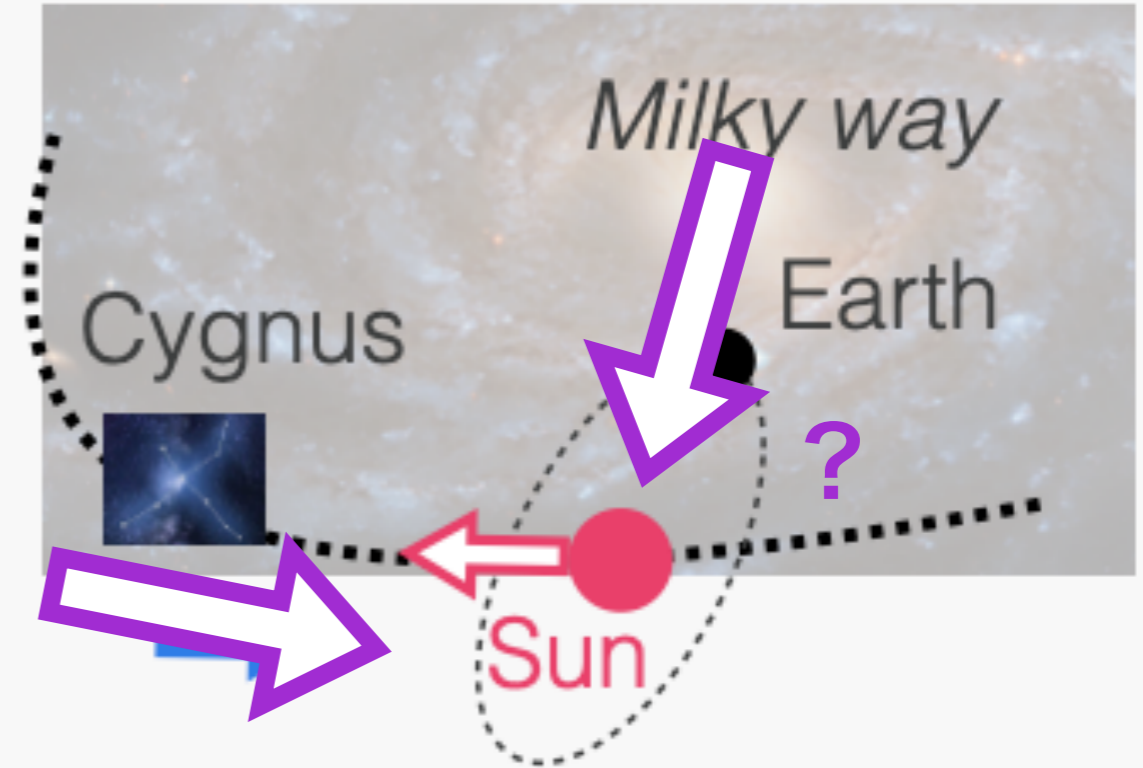
PLB 578 (2004) 241-246

恩恵

“ニュートリノフロア”開拓



さまざまなDMモデル検証

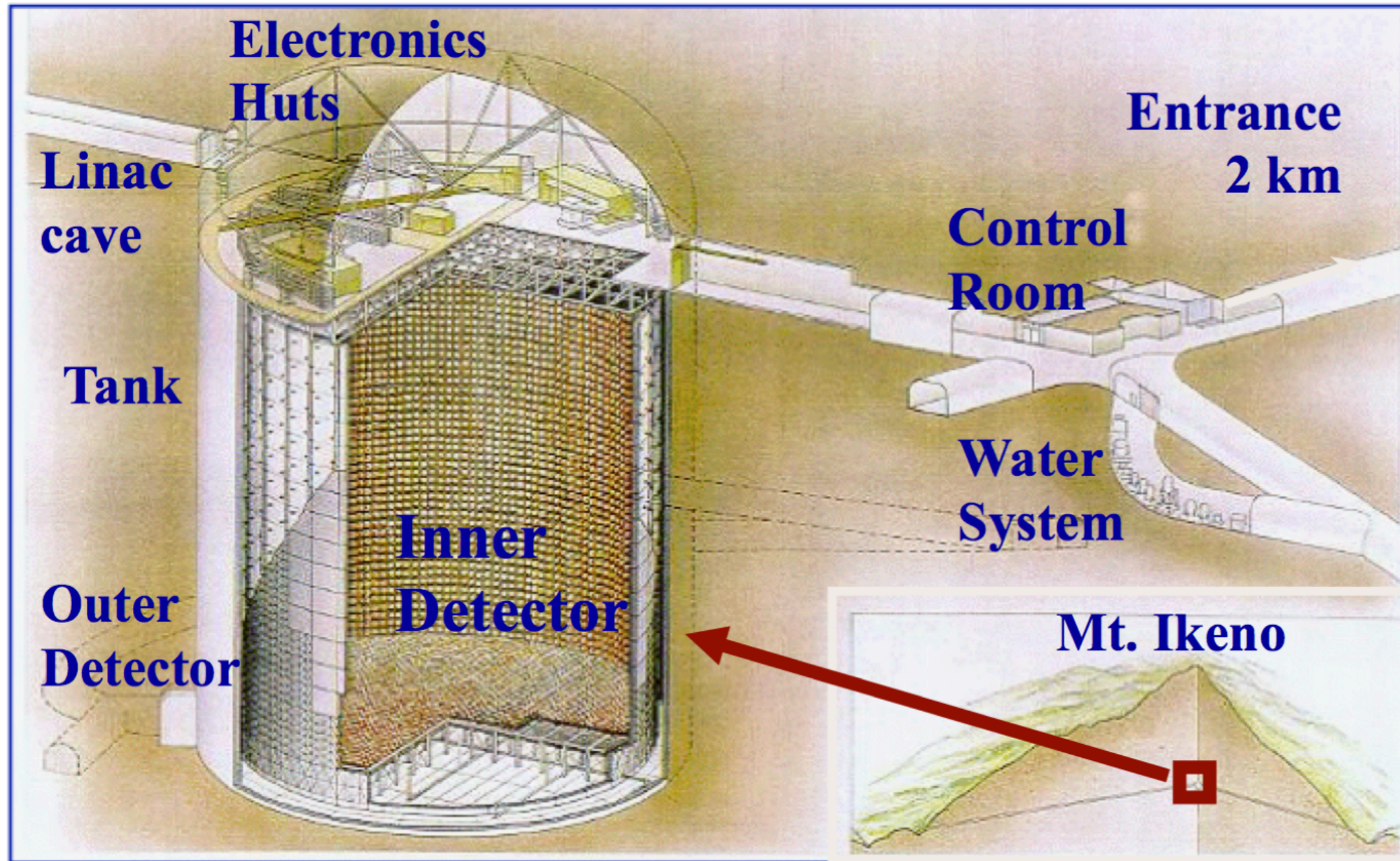


DMが他から到来する可能性

e.g. 宇宙線によるboosted DM
→ 銀河中心から到来しやすい

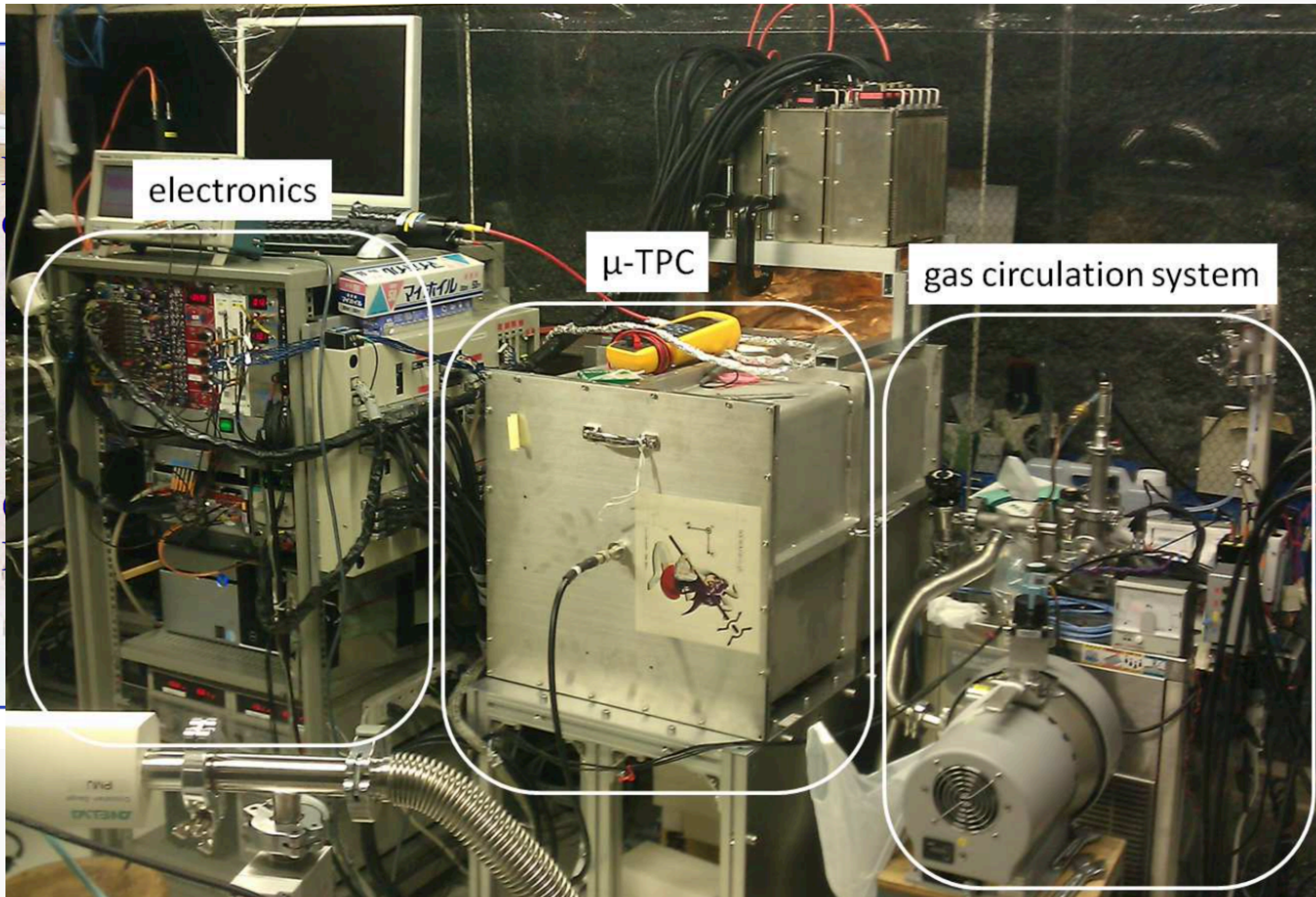


NEWAGE

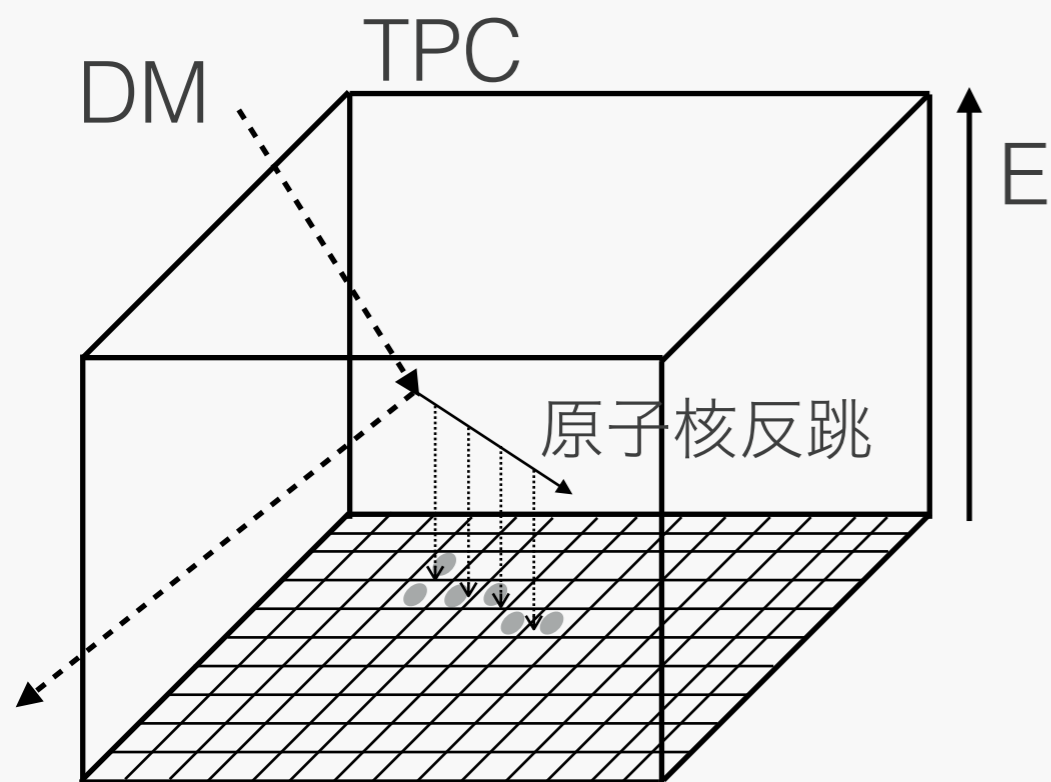


神岡にて極低BG環境で実験

NEWAGE



ガスTPCによる3次元飛跡検出



- ターゲットはTPC中のガス (CF_4)
- 飛跡から原子核反跳方向測定

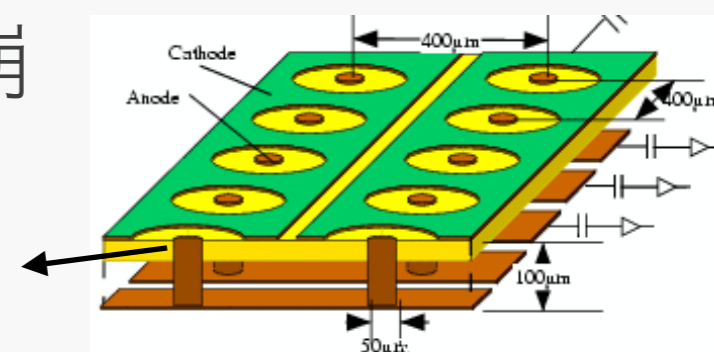
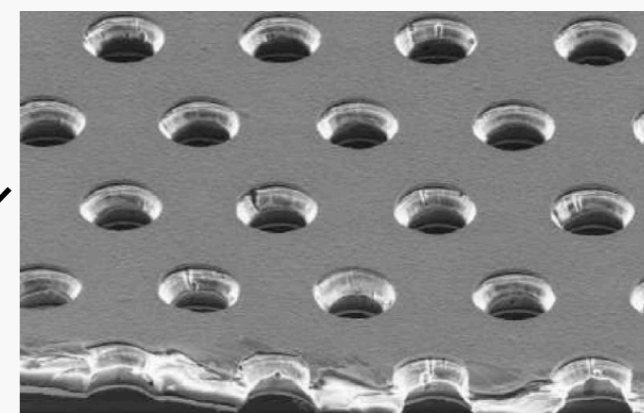
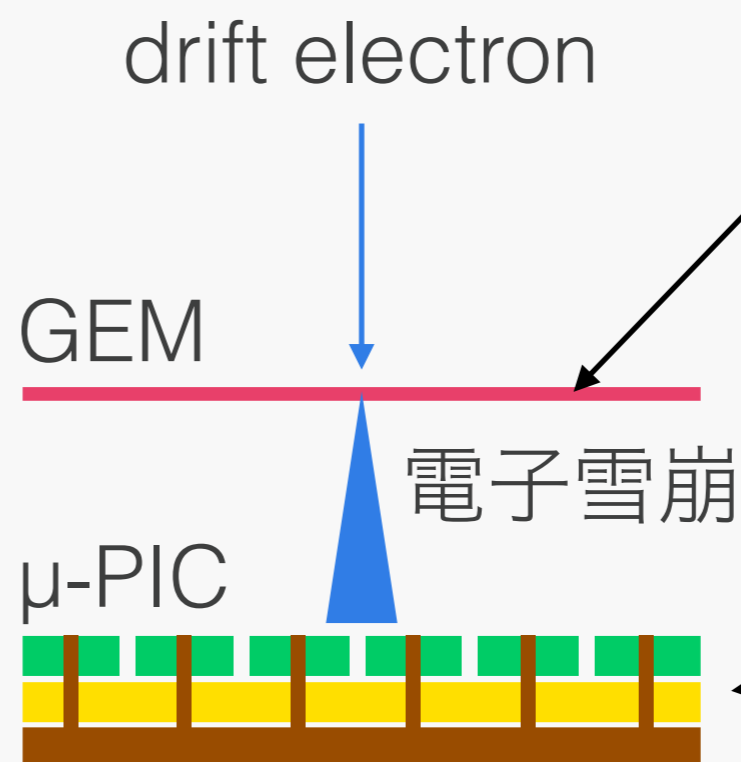
2次元位置検出器 + ドリフト時間

→ 3次元飛跡でWIMP探索 (世界唯一)

- 2次元読み出しはu-PICが担う

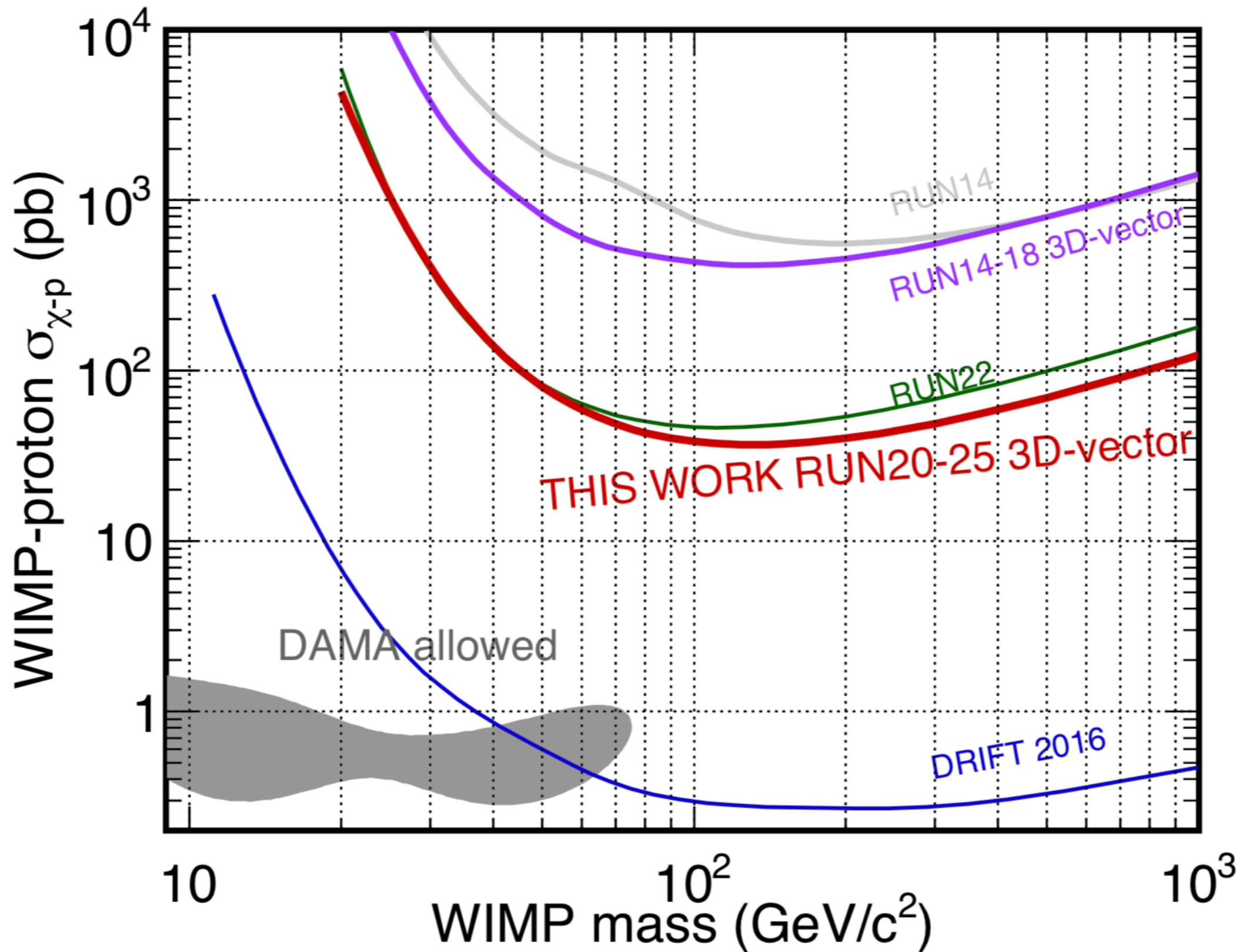
→ **400 um** ピッチの2D strip

- ガス増幅はGEM + μ -PIC



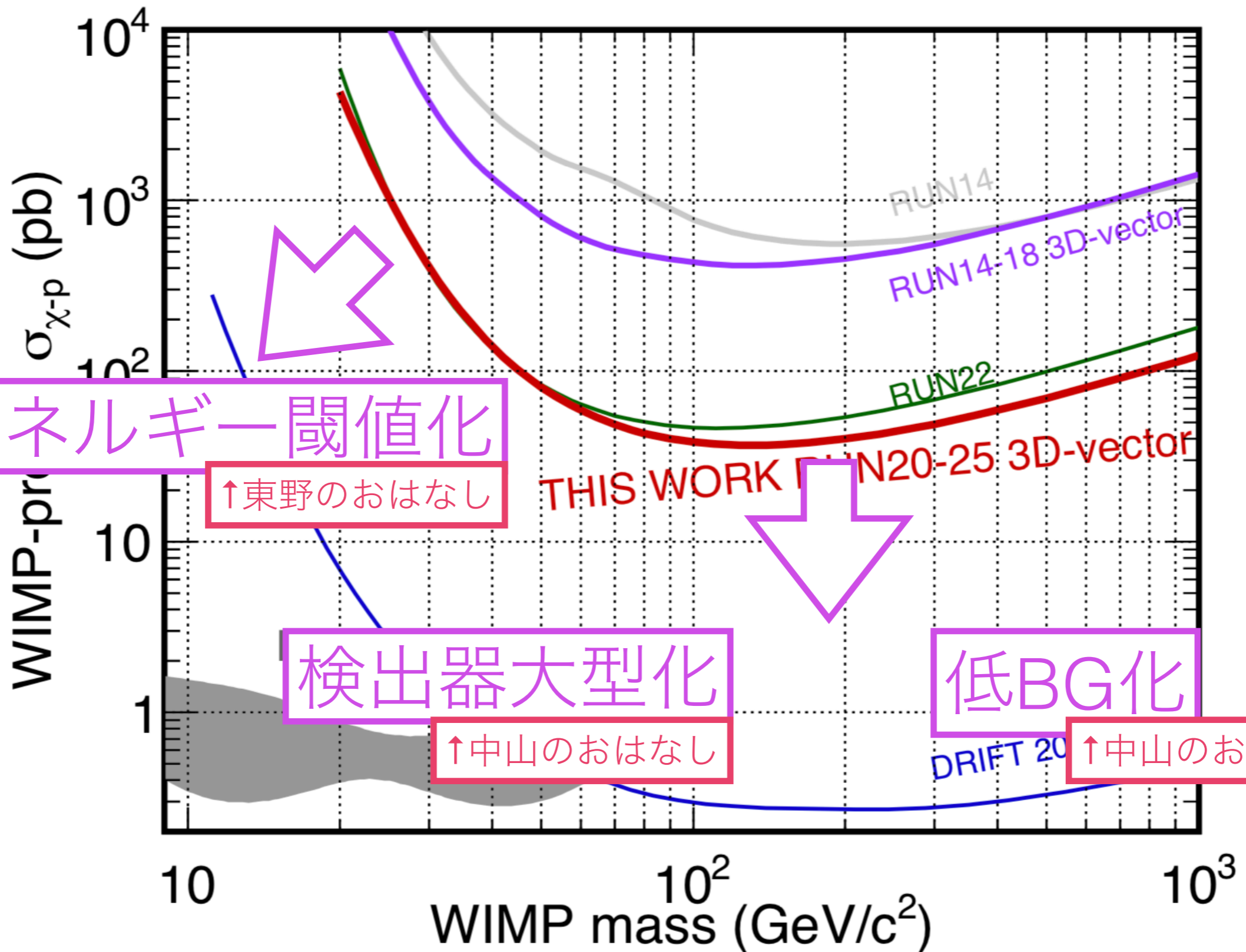
NEWAGEの戦略

島田拓弥 修士論文 神戸大 2021年2月



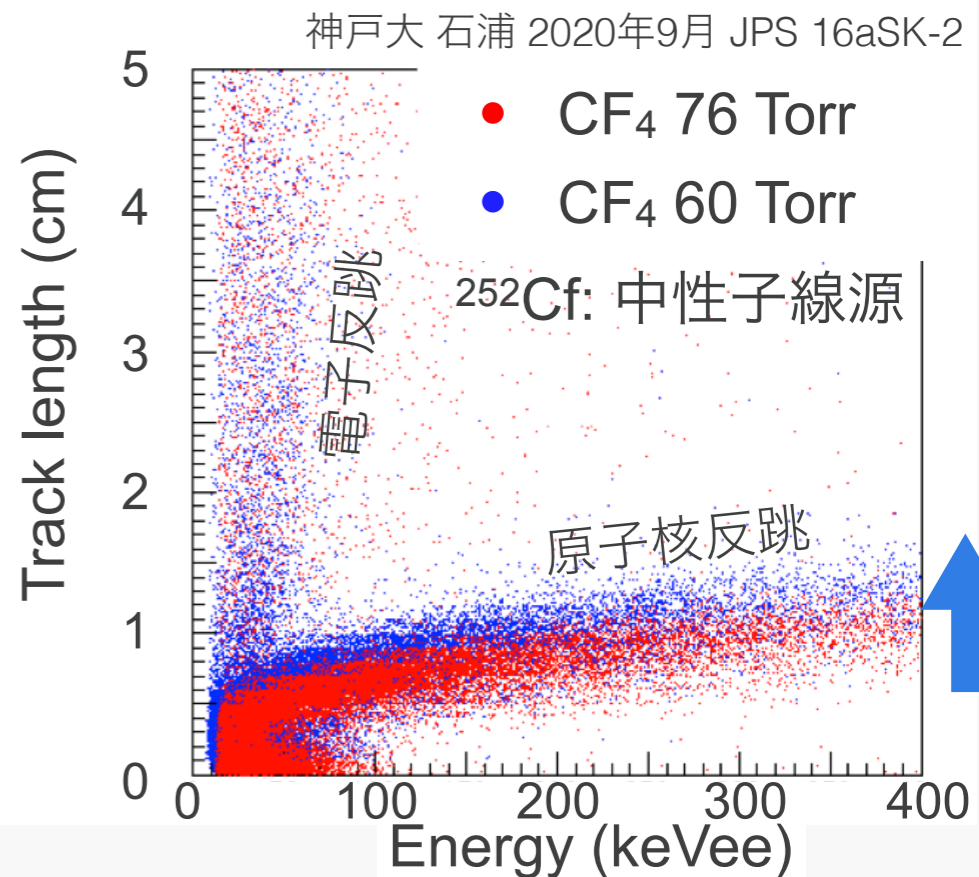
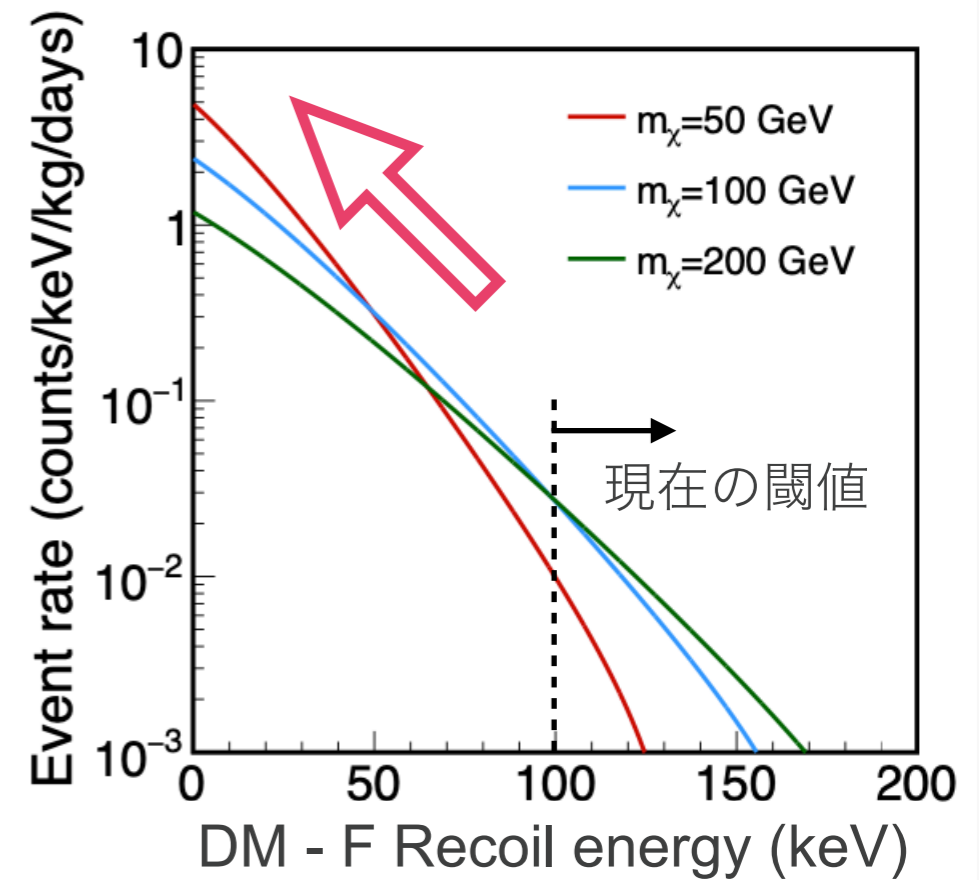
NEWAGEの戦略

島田拓弥 修士論文 神戸大 2021年2月



低反跳エネルギーのイベント検出へ

- 低エネルギーほど高レート
 - 特に低質量WIMP
- **短飛跡**のため再構成困難
 - 読み出しピッチ (400 μm) で律速
- 方針は2つ
 - ガス圧下げる (飛跡のばす)
 - より微細な読み出し検出器作る



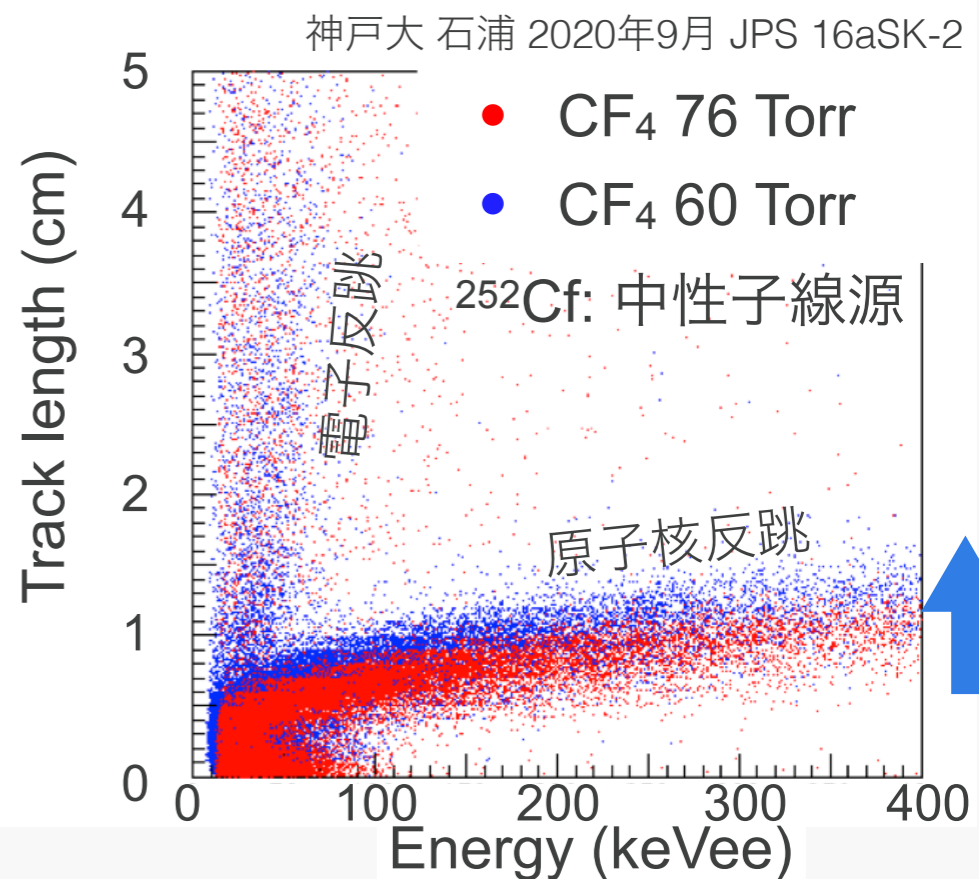
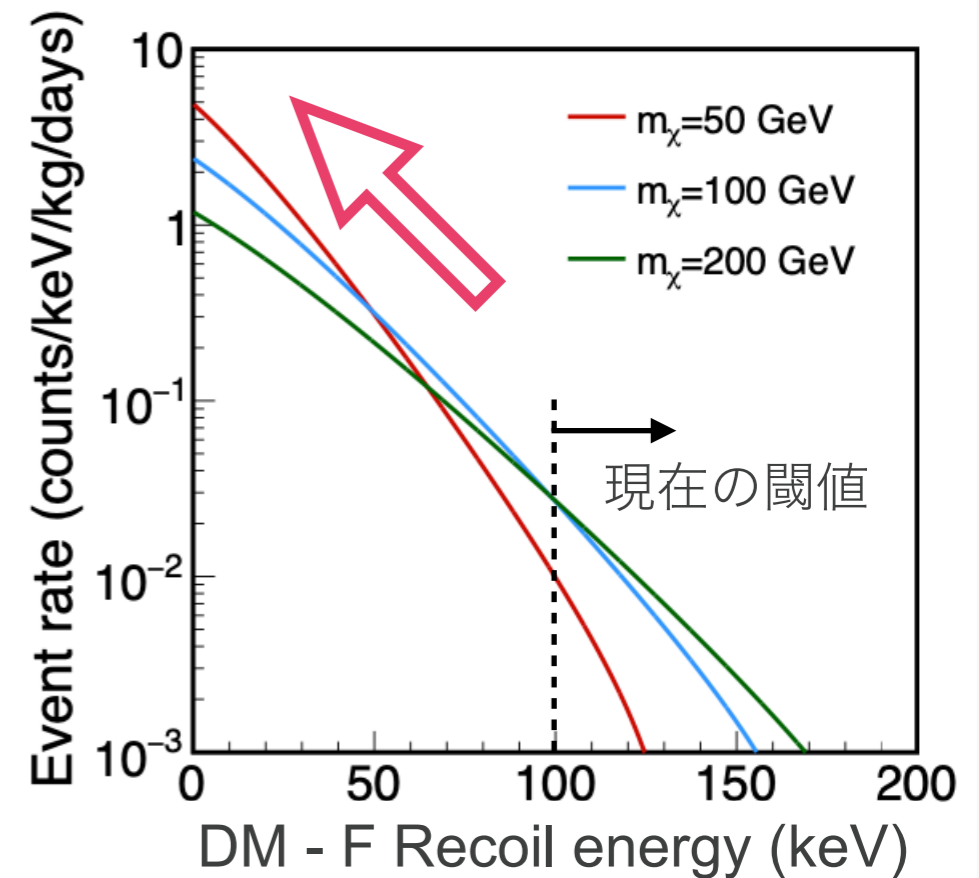
低反跳エネルギーのイベント検出へ

- 低エネルギーほど高レート
 - 特に低質量WIMP
- **短飛跡**のため再構成困難
 - 読み出しピッチ (400 μm) で律速

- 方針は2つ

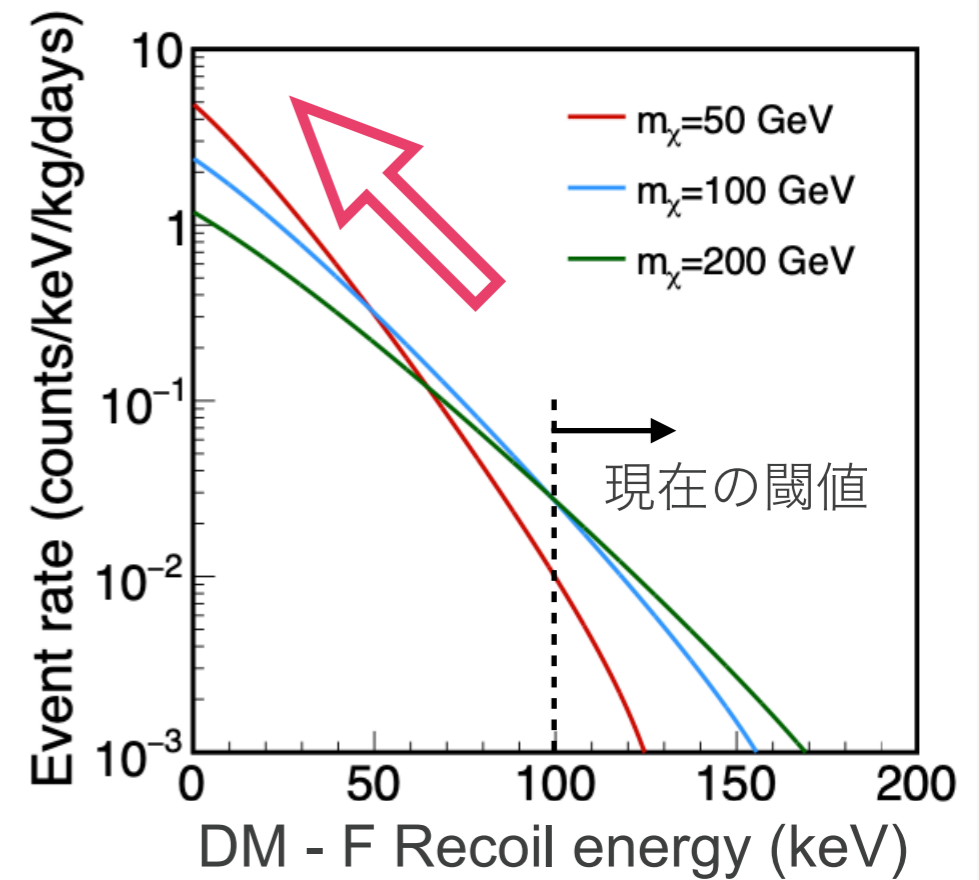
カンタン (もうやった)

- ガス圧下げる (飛跡のばす)
- より微細な読み出し検出器作る



低反跳エネルギーのイベント検出へ

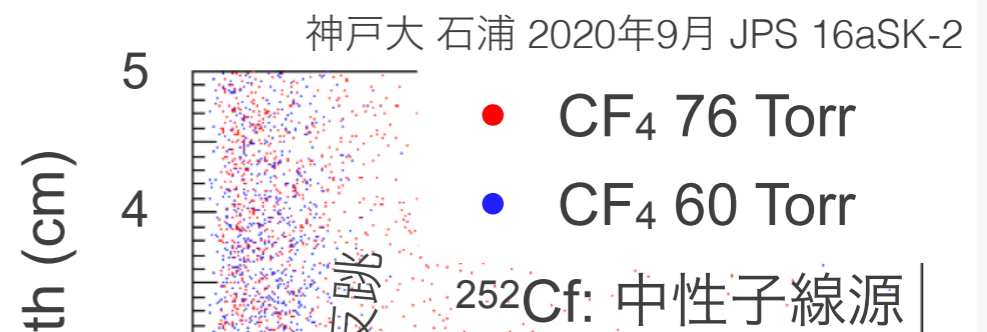
- 低エネルギーほど高レート
 - 特に低質量WIMP
- **短飛跡**のため再構成困難
 - 読み出しピッチ (400 μm) で律速



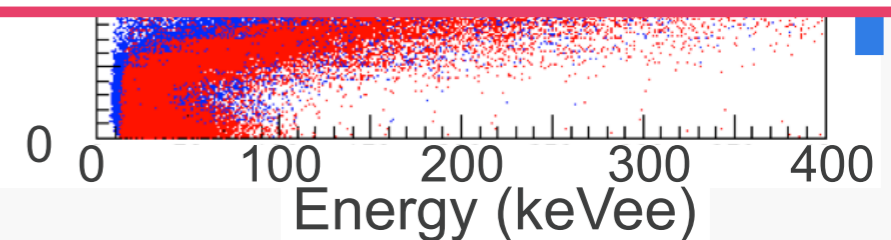
- 方針は2つ

カンタン (もうやった)

- ガス圧下げる (飛跡のばす)
- より微細な読み出し検出器作る



難しい (金も時間もかかる)
でも次の一手 + 技術革新に必要



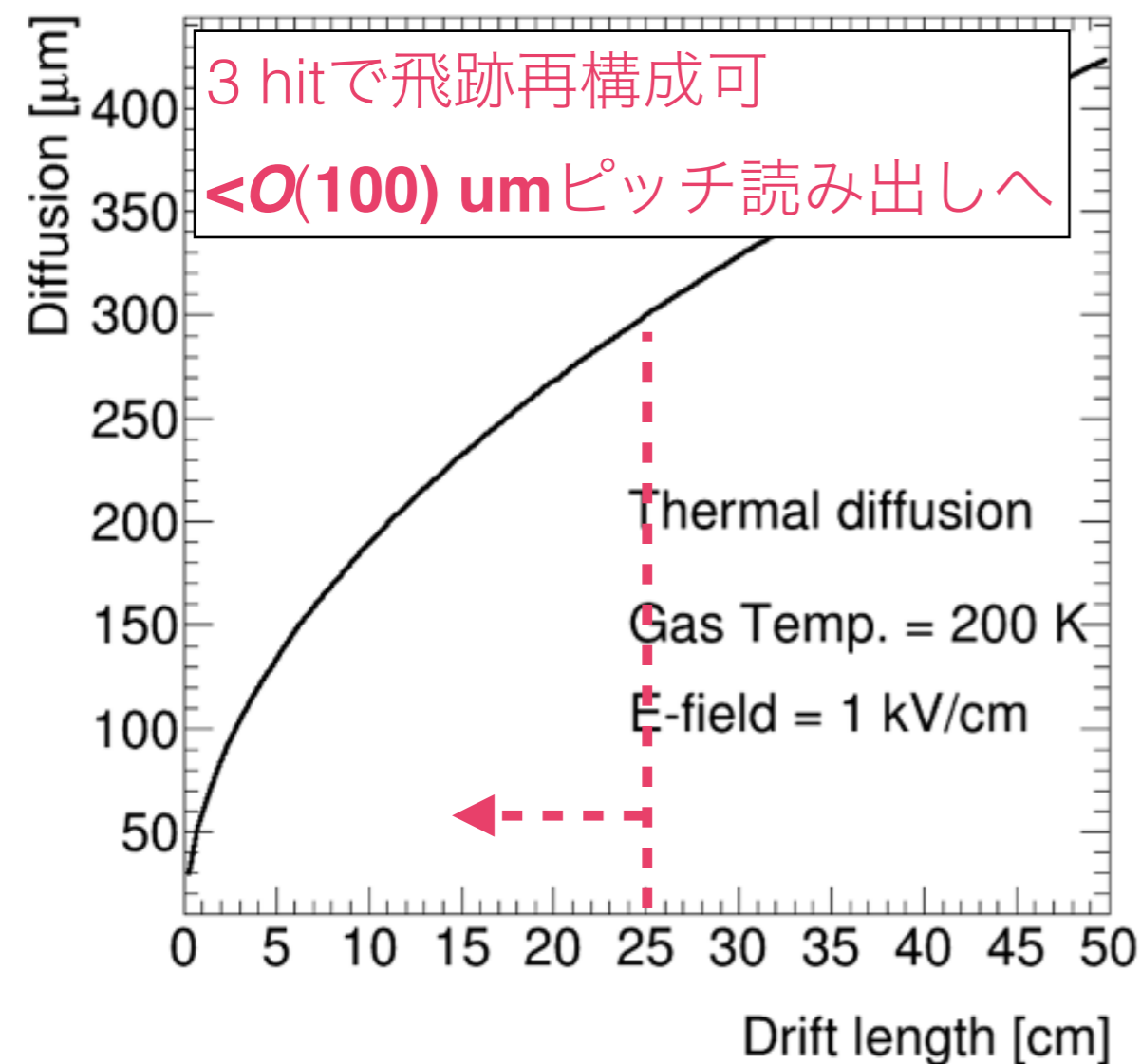
拡散問題の打開: 「陰イオンガス」

- ドリフト電子が横方向に数mmの拡散
 - ➔ このままでは微細な検出器作っても意味ない
- ドリフトする荷電粒子を電子から陰イオンへ変更→**ゆっくり低拡散**

拡散問題の打開: 「陰イオンガス」

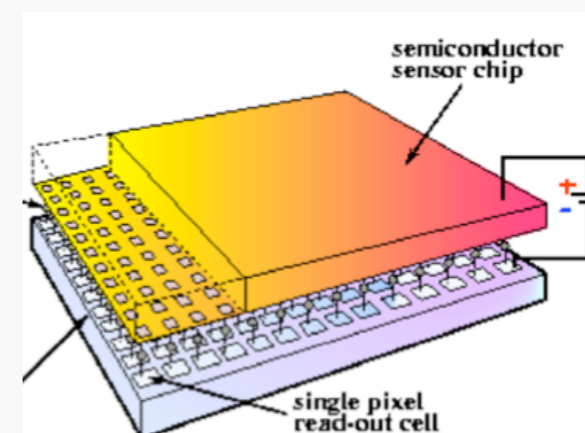
- ドリフト電子が横方向に数mmの拡散
 - このままでは微細な検出器作っても意味ない
- ドリフトする荷電粒子を電子から陰イオンへ変更→**ゆっくり低拡散**

NEWAGEのドリフト距離↓



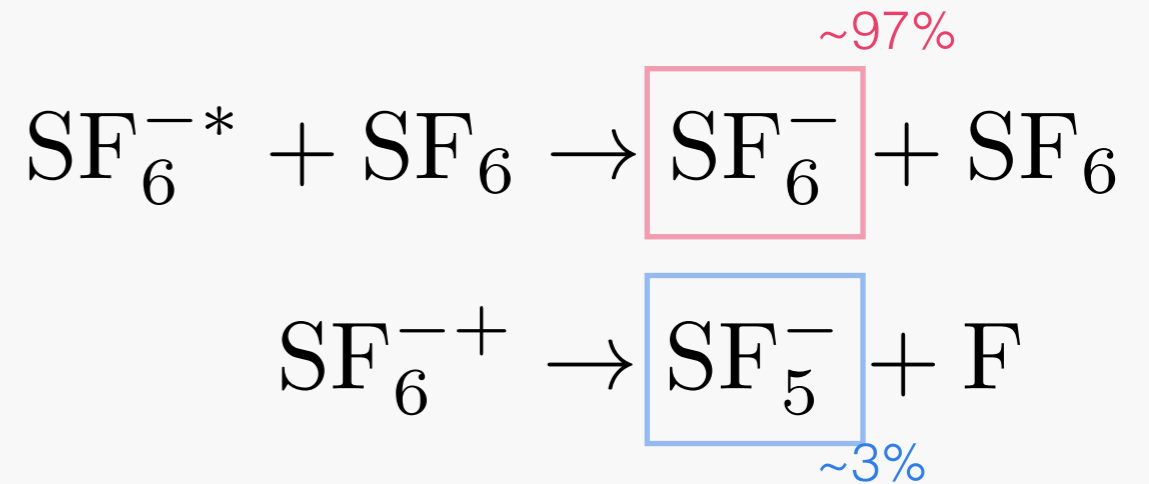
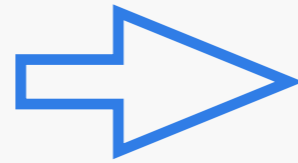
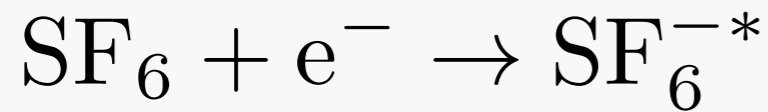
超微細読み出しへの
道が開けた

新型検出器開発へ



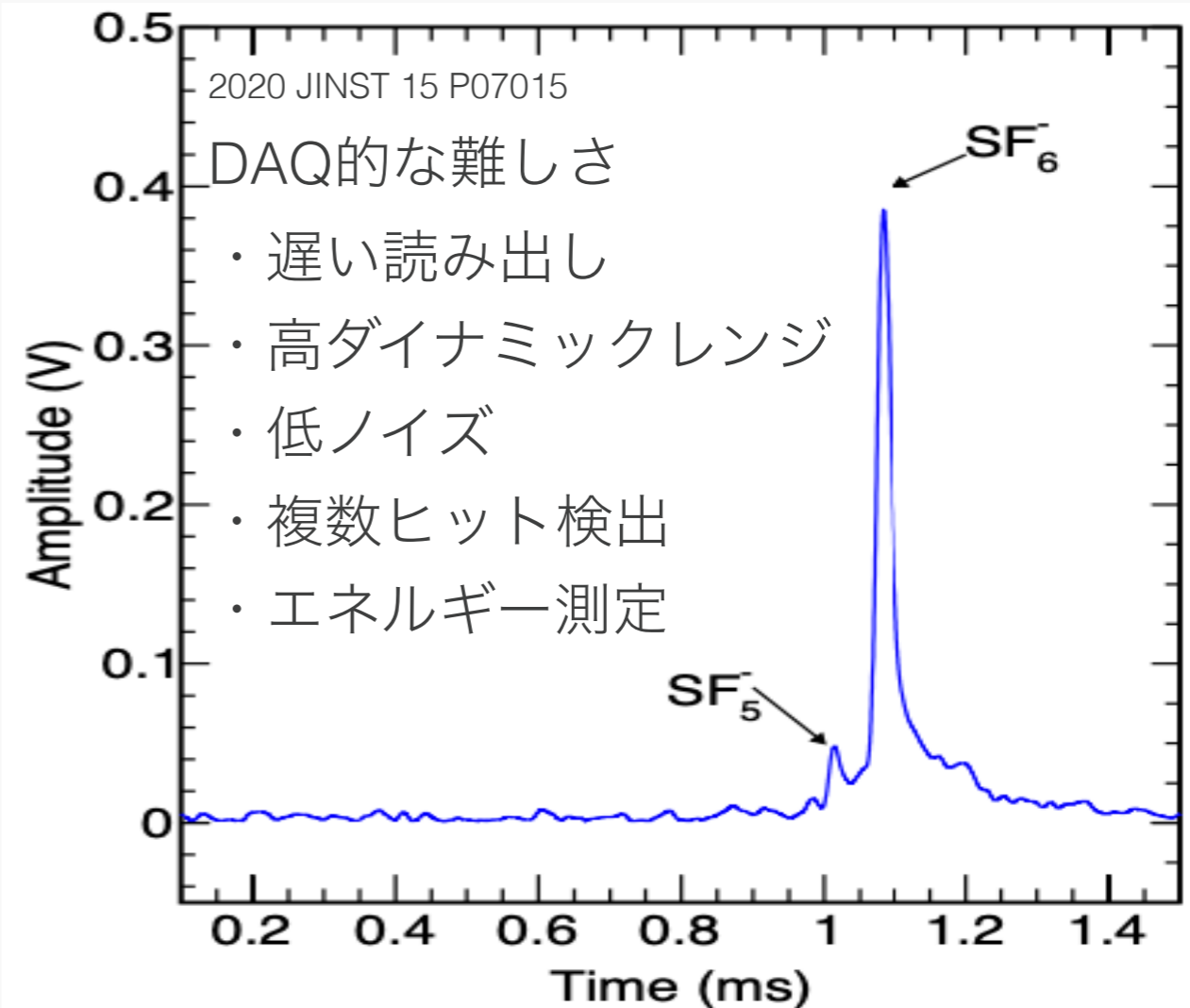
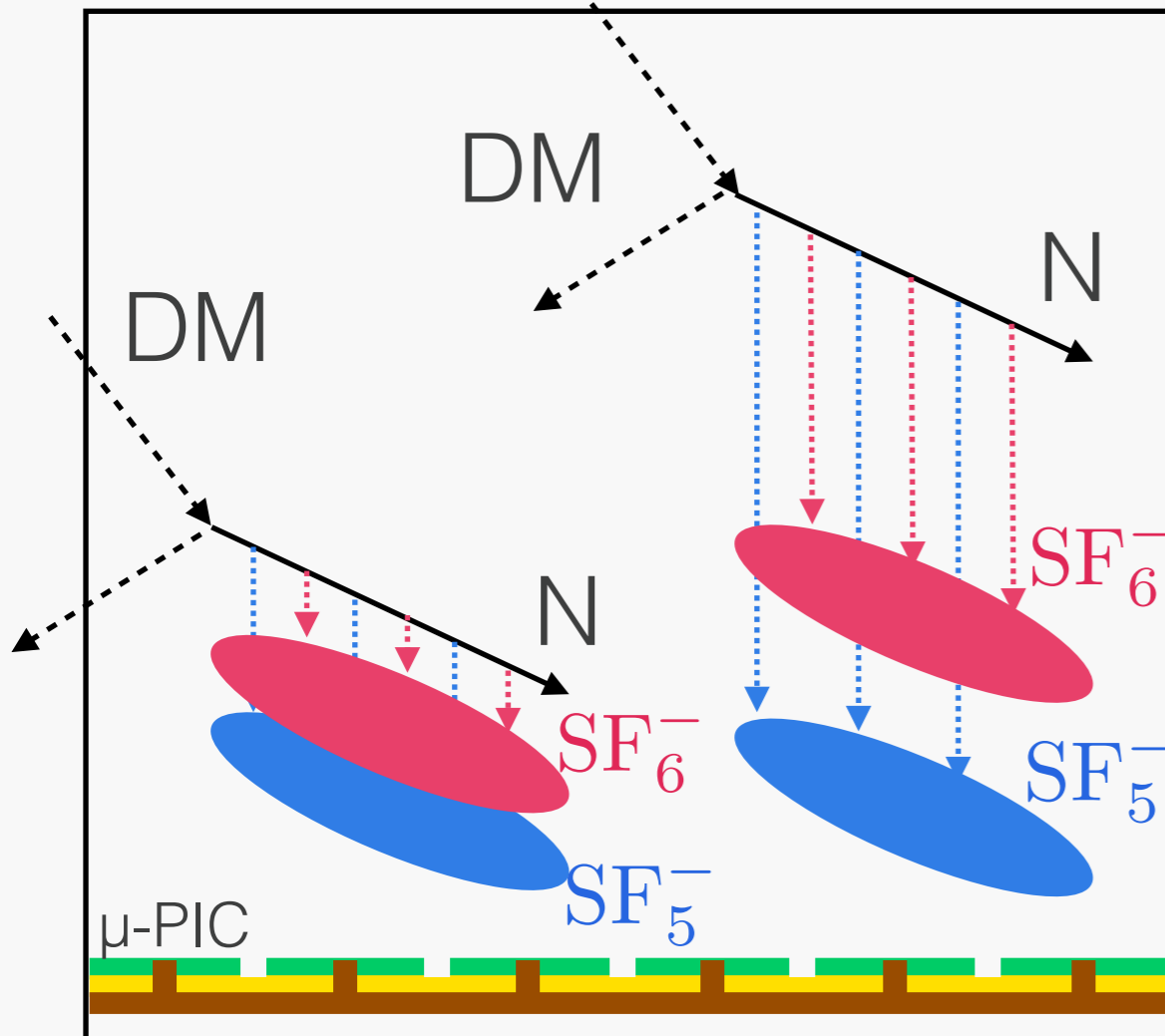
シリコンのように
ピクセル読み出しで
微細化できれば
なおよし!

陰イオンガスSF₆: 2種類の陰イオン形成



時間差からドリフト方向の絶対位置測定可→より低拡散事象の選別

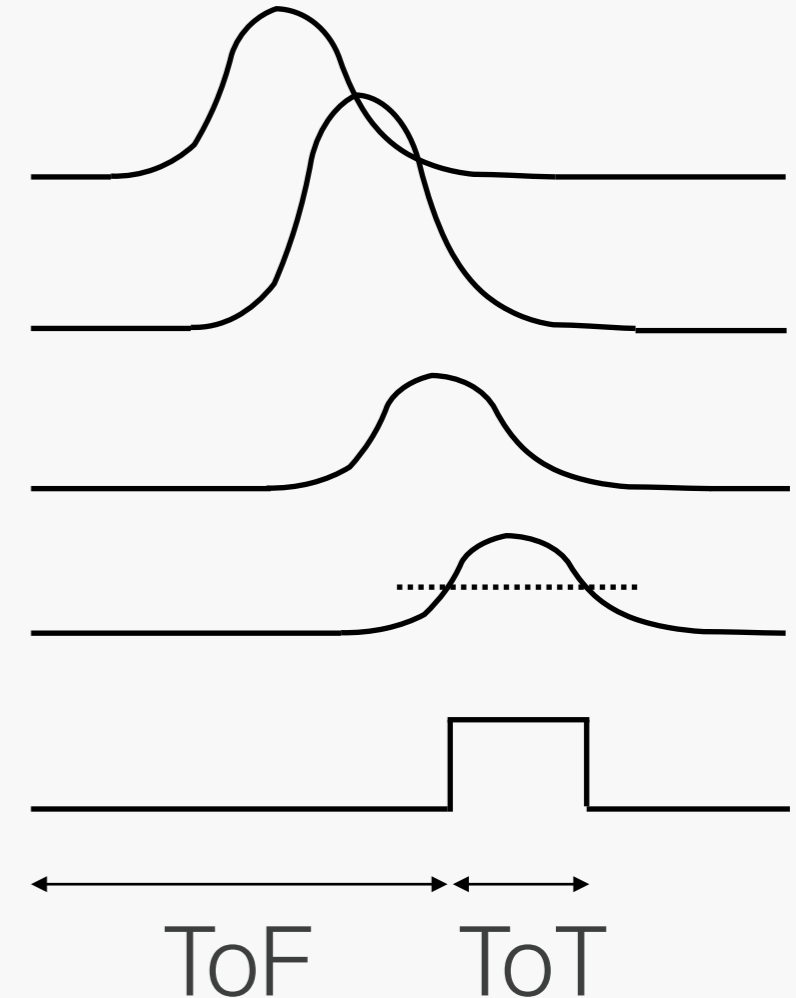
ただし特徴的な波形の解析が必要



やるべきこと

- マルチヒット検出
- 時間情報検出
- エネルギー検出

→ 右図のような波形幅 (ToT) と検出時間 (ToF)



- できれば波形情報 (FADC) を取りたいがpixelごとには無謀...
 - ダブルパルスの信号が特徴的なのでできれば波形解析までしたい
- 既存のASICを使い回すのも無理そうだ→ **ASIC開発へ**

ASIC開発

~人の助けを借りる~

プロトタイプASIC: QPIX

- ピクセルガスTPC読み出し用ASIC

- ➔ 大昔にバグ残してポシヤった

- ➔ おおよその機能はついている

- ▶ これの応用開発をすることにした

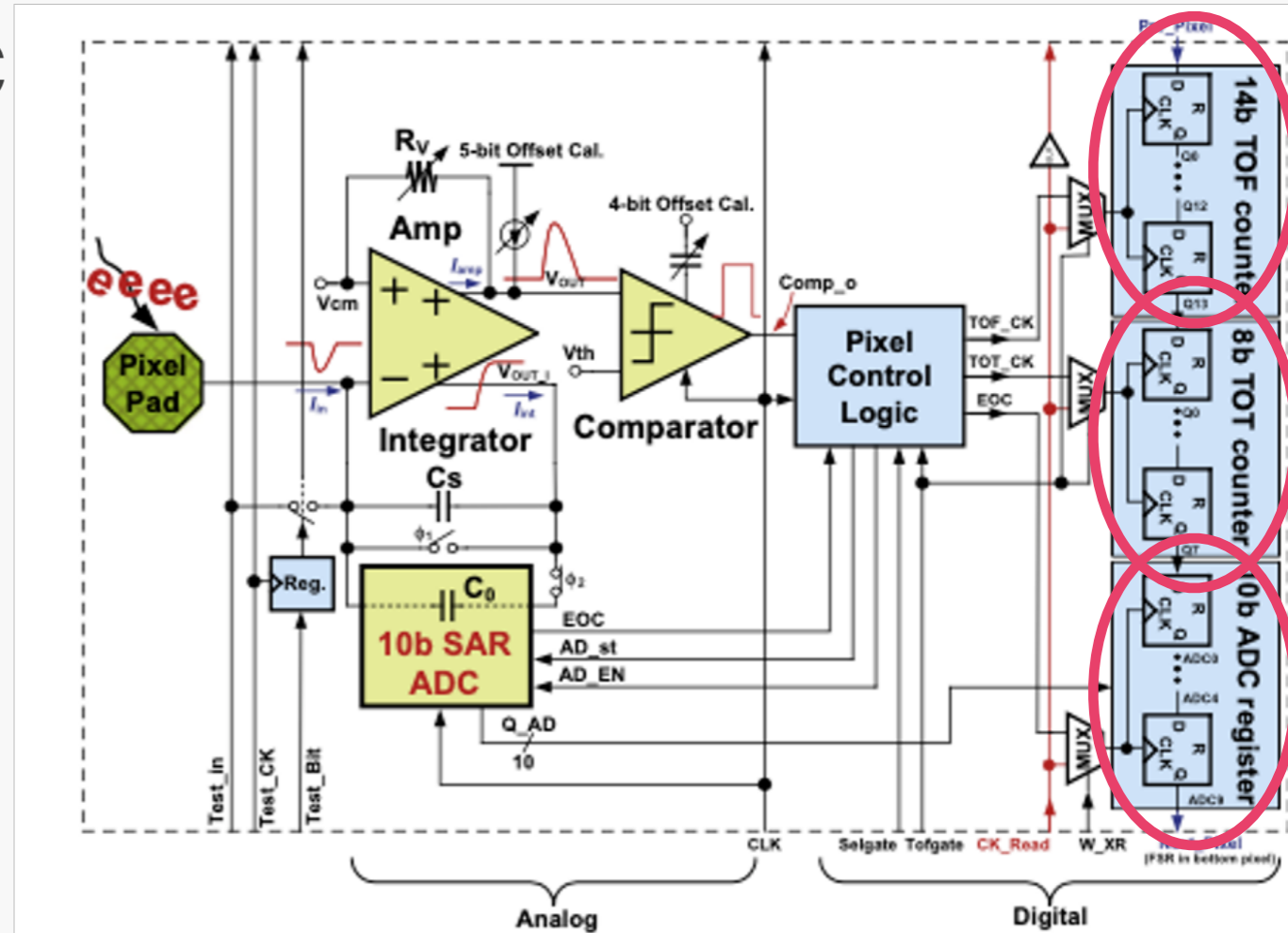
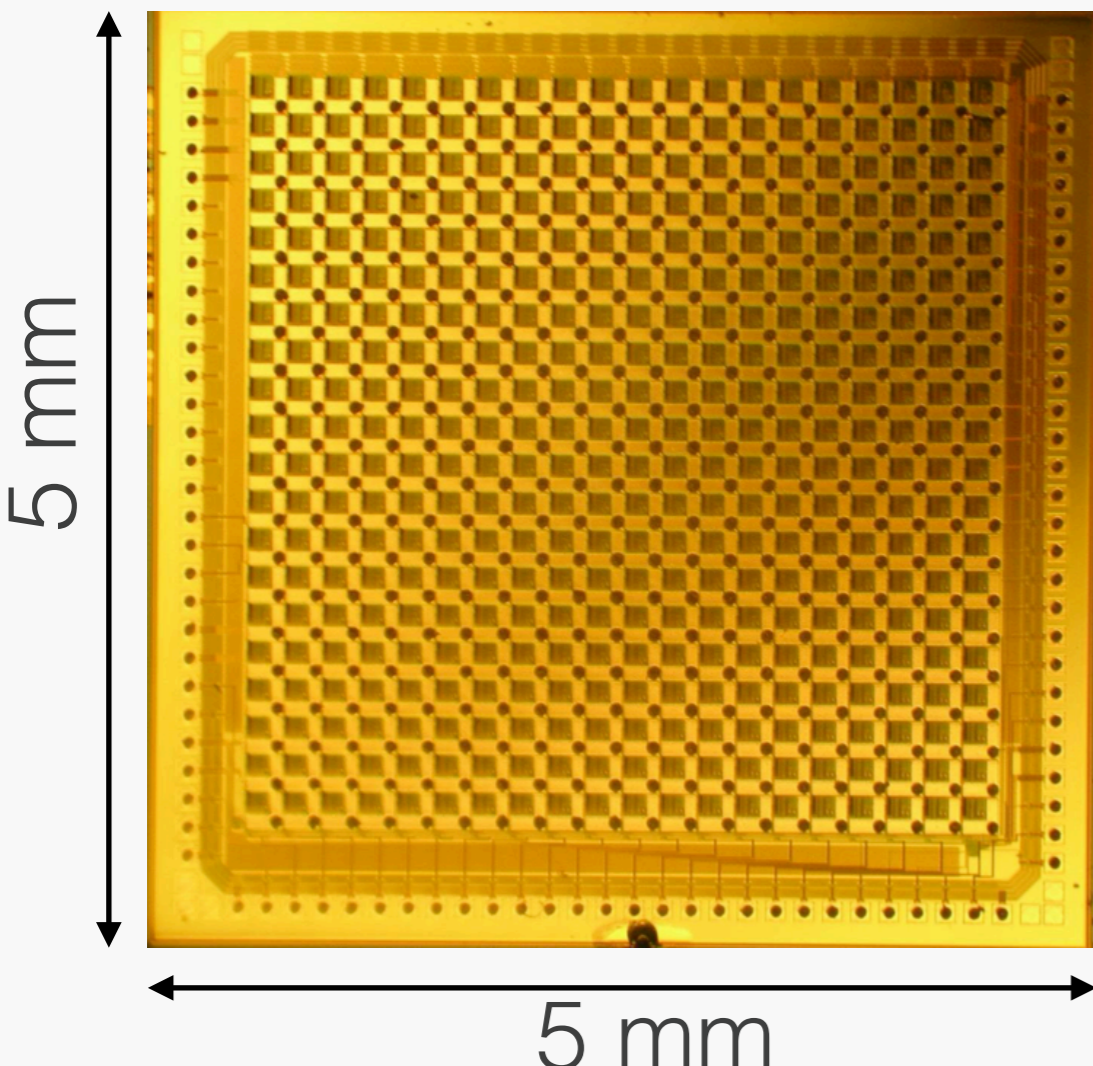


Fig. 2. Schematic of the pixel cell in Qpix v.1.

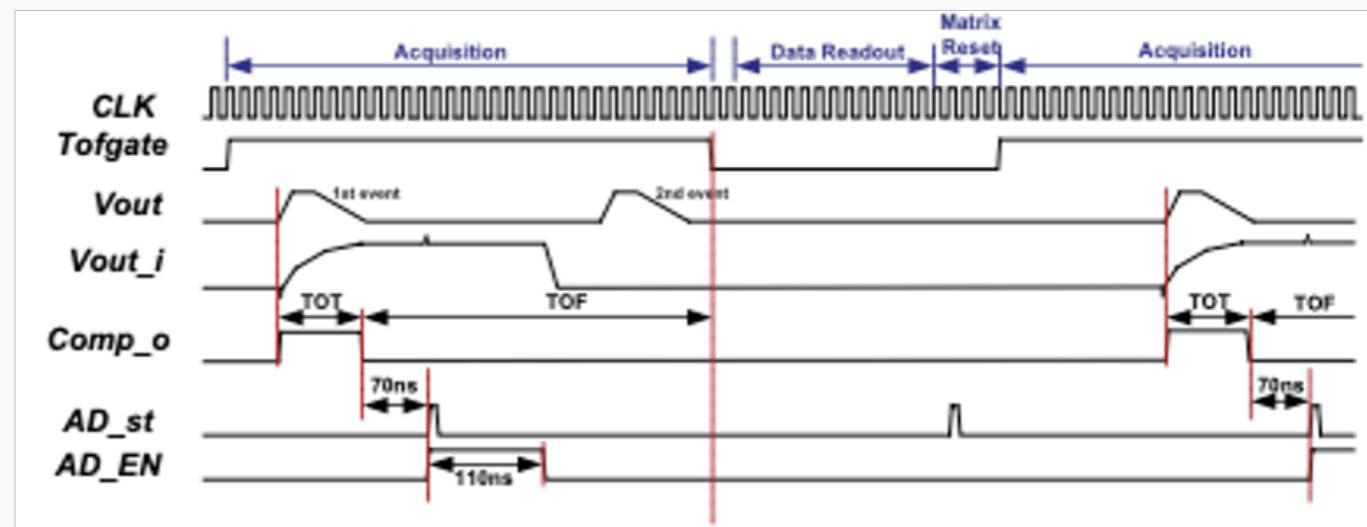
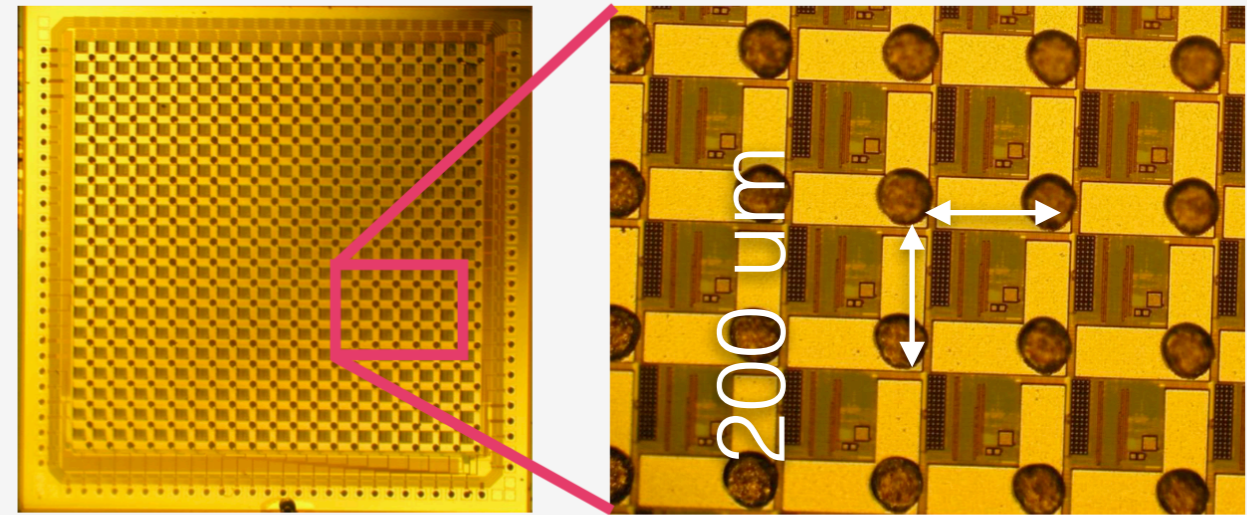


Fig. 3. Working timing chart of Qpix v.1.

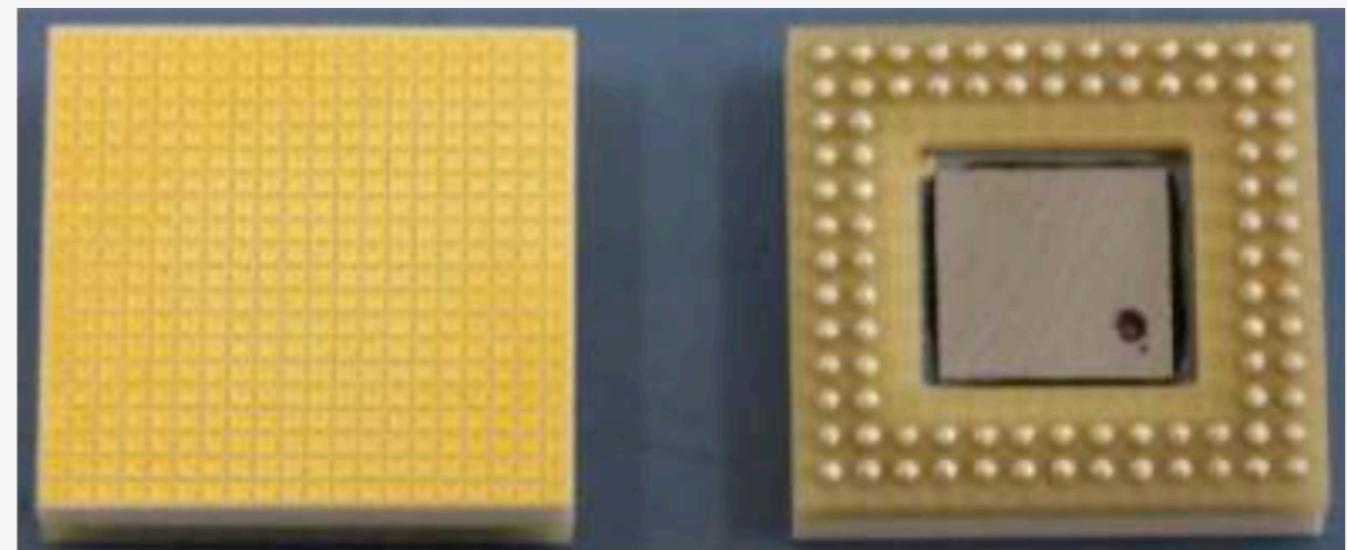
金属パッドのバンプボンディング

- QPIXはLTCC (セラミック) にパッドをつけてASICに接続していた
 - LTCCとASICをバンプボンディング、さらにLTCCと基板をバンプボンディング
 - モノは佐賀大に置いてあった(まま眠ってた)ので自分たちで一旦試験しよう

※この写真はQPIXでなくて
STRIPIXというやつが実装されてる

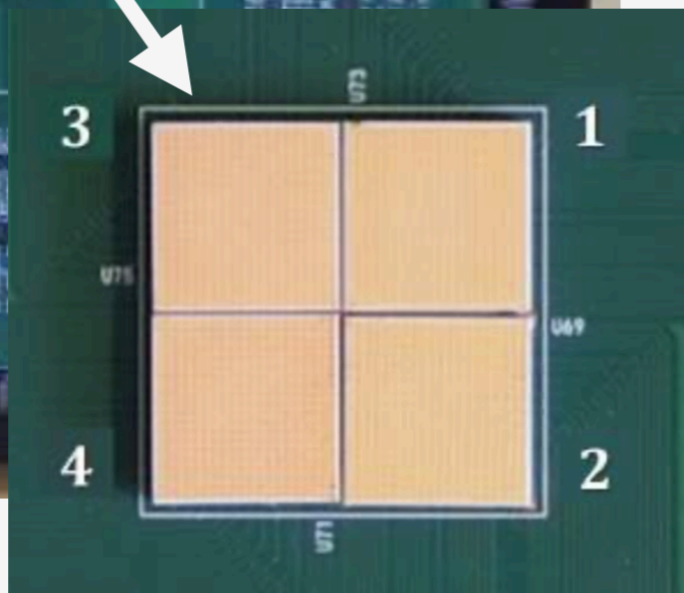


ASIC

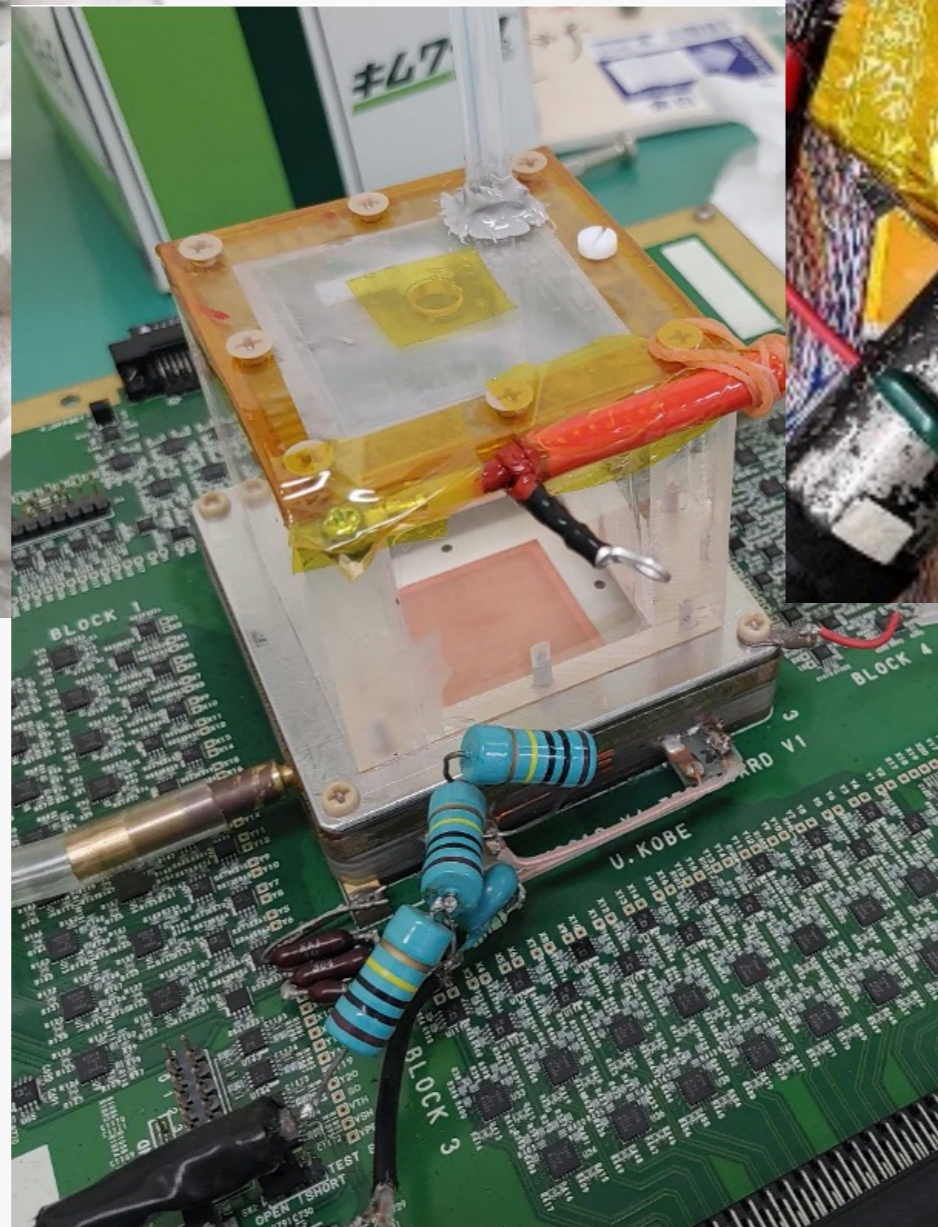


21 500 umピッチ

LTCC + ASIC



LTCC金属パッド動作確認

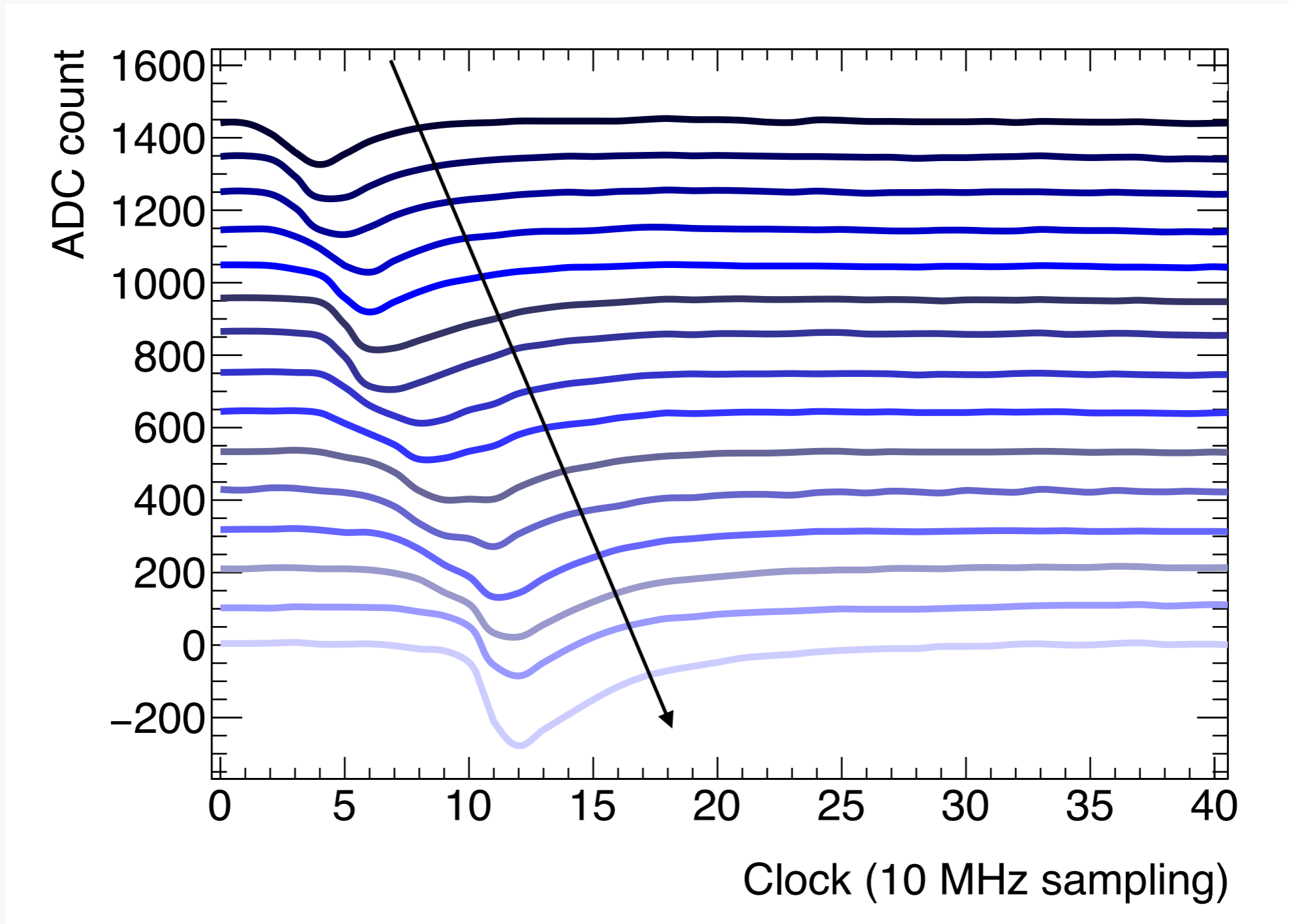


アクリルスケスケTPC
(P10ガスフロー)を
学生に作らせる

GEM × 3で増幅

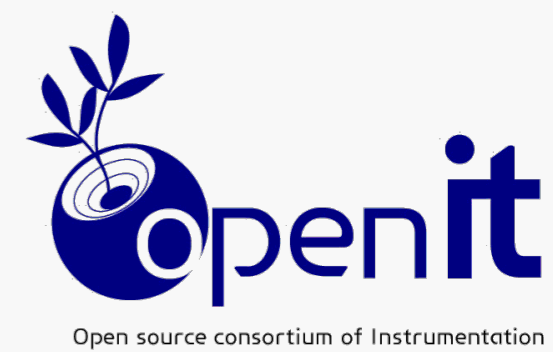
宇宙線muonでTPCとしての
動作確認 @佐賀大

TPC波形



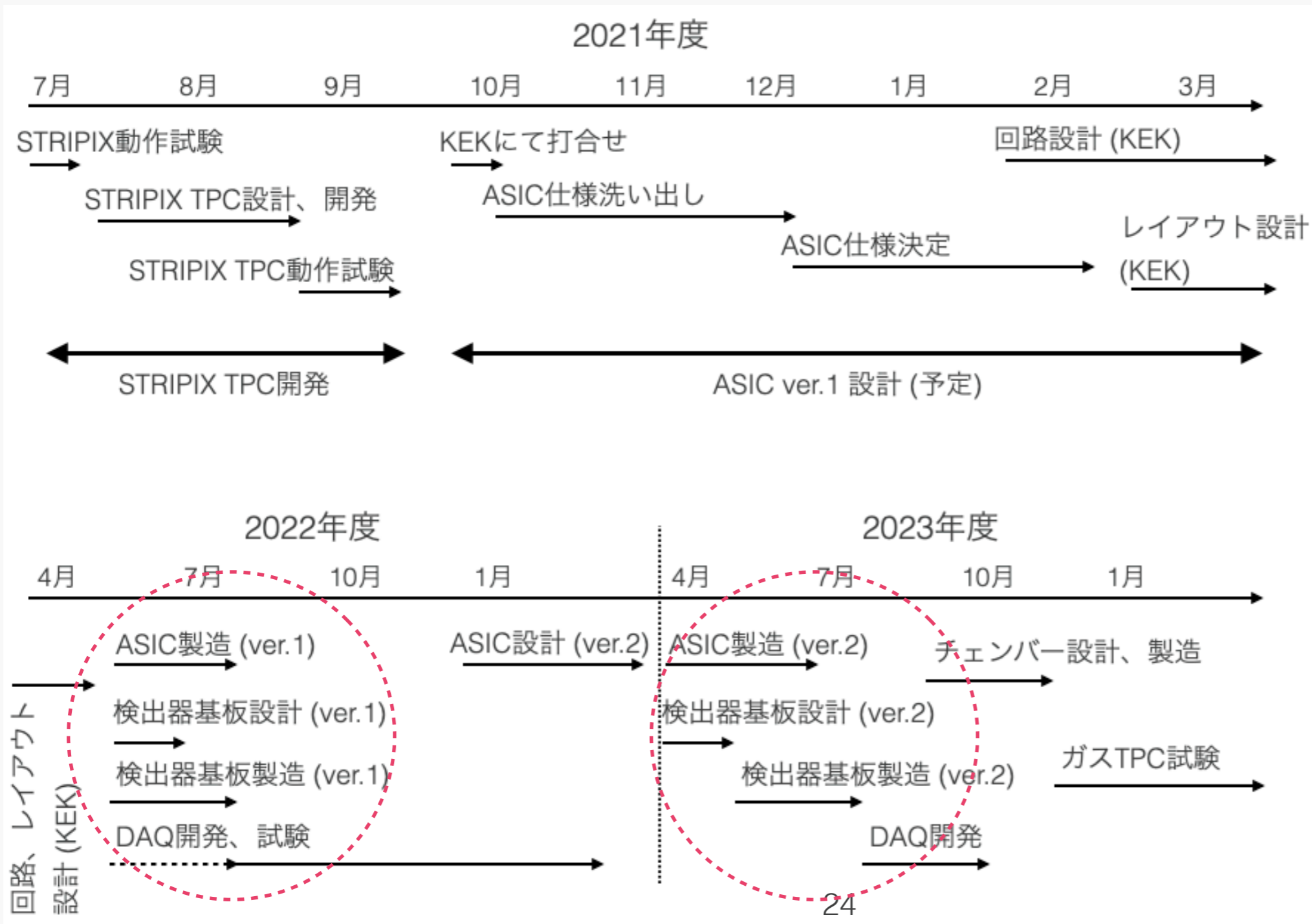
動作確認OK！これでASICさえできればTPCとして機能する！

新ASIC開発相談 @ KEK



- E-SysのASIC設計者に突撃 (KEK 宮原氏、田中氏)

➔ QPIXの仕様 + 陰イオンガス利用に向けて仕様のすり合わせ → 設計開始



2022年6月の
プロセスで
第一弾作成



バグ出しののち
第二弾作成へ

ASIC要求 (今のところ)

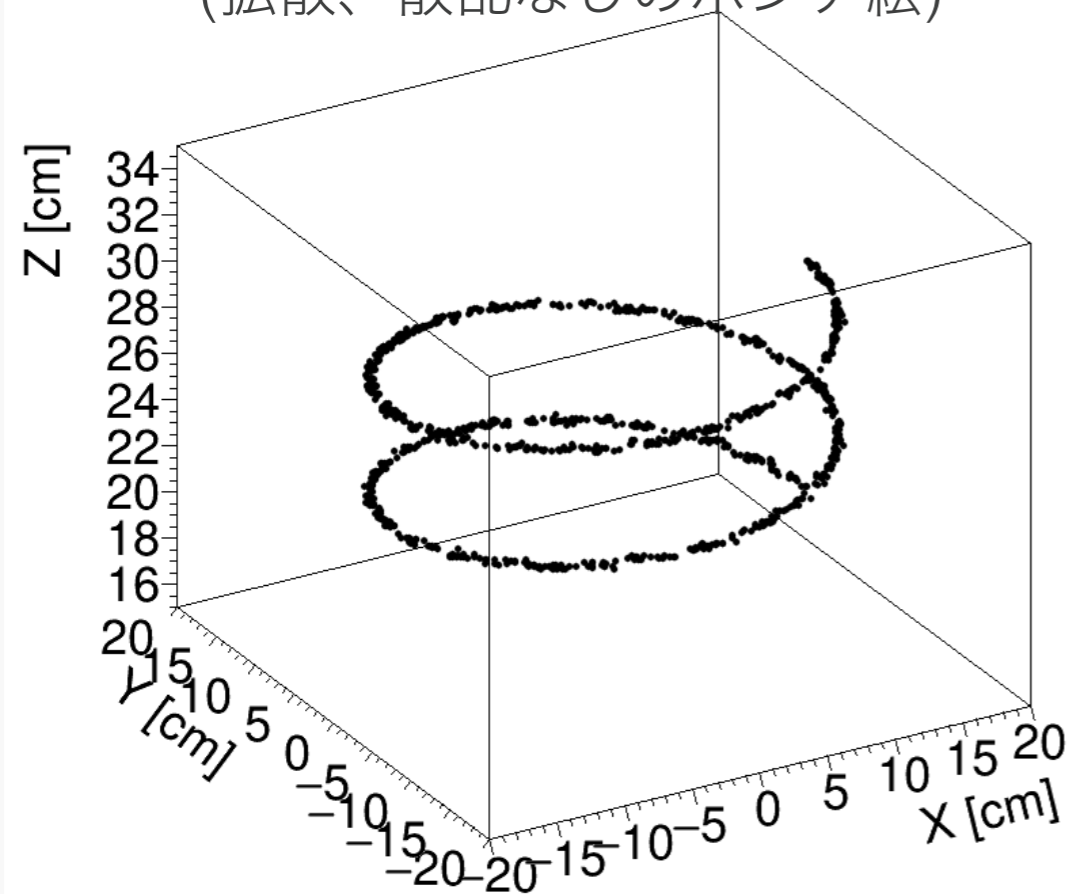
- 50 μm 角ピクセル、12 \times 12 channels (プロトタイプ版)、2 mm角チップサイズ
 - LTCCパッドで100 μm \times 100 μm に引き伸ばす
- 各チャンネルに16 bit ToF + 10 bit ToT (10 MHz)
 - ToF, ToTは4 hitぶん読み出す (複数ヒット読み出し対応)
- 角チャンネルの波形読み出し (10 bit FADC), 100 MHz sampling
 - 16チャンネルのマルチプレックス読み出しによりADCの数を削減 (samplingは粗い)
- アナログ回路はやや陰イオンガス特化
 - 立ち上がり時間: 1 or 4 μs 、時定数: 5 or 20 μs
 - ダイナミックレンジ: ± 1600 pC、ENC < 200 e

デジタルは情報詰め込み
アナログは陰イオンの
ドリフト速度のせいでゆっくり

期待されるデータ (ポンチ絵)

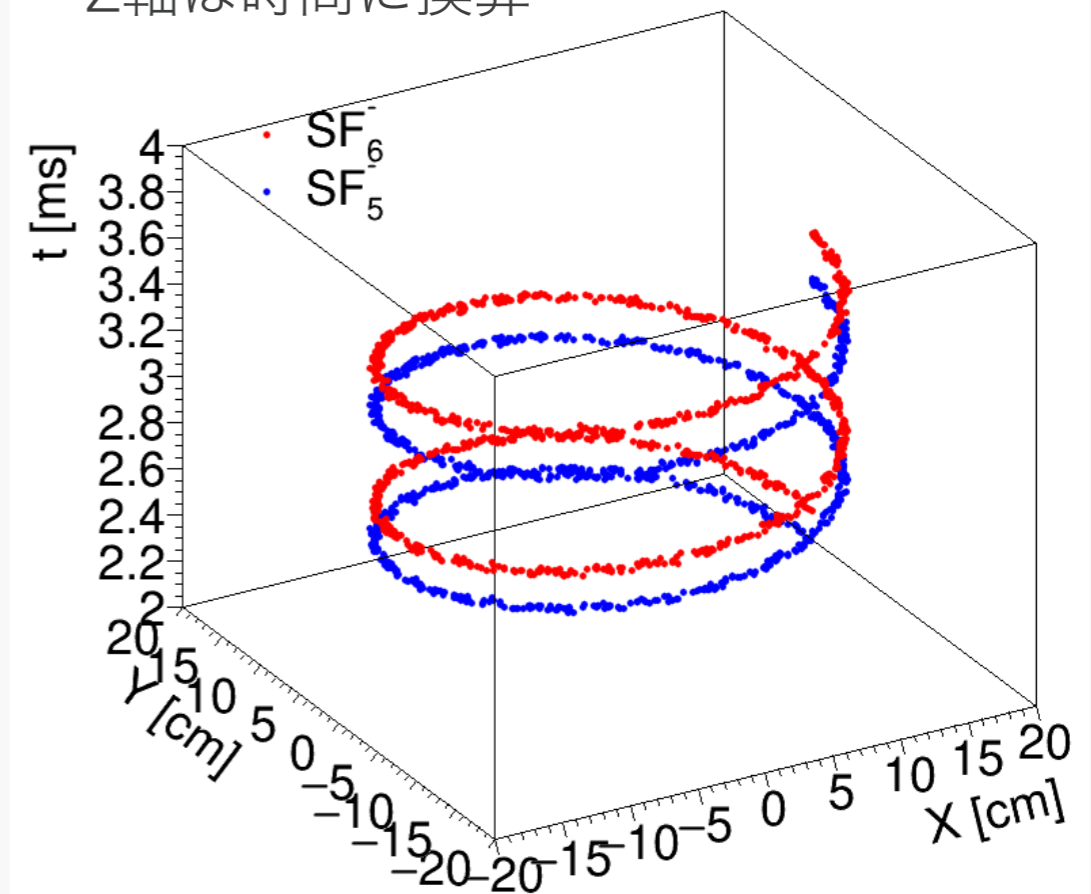
e.g. 磁場かけた電子の飛跡

(拡散、散乱なしのポンチ絵)



陰イオンガスSF₆による2種類の信号

Z軸は時間に換算



1ピクセルぶんだけ取り出すと...



こんな感じのデジタル信号が得られる

26 16チャンネル (400 um × 400 um) の波形も！

課題

- なんとといってもコスト、大面積のカバー必要
 - ➔ 現状たった1 mm角 → 30 cm角へ (9 M channel)
- バンプボンディング (50 um角ではだいぶ難しそう)
- 消費電力
 - ➔ ADCをずっと動かすことになりそうで電力バカ食い
 - ➔ 実用化に向けて機能を減らすことになるかも

**困難は百も承知、金がかかるのも最初からわかっている
でも数十年後にむけて努力は惜しまない**

Summary

- ガスTPCの微細読み出しに向けてピクセル型ASIC開発開始
 - ➔ 陰イオンガスによりドリフトの拡散抑制
 - ➔ $< O(100 \text{ um})$ の読み出しが意味を持つようになった
- QPIXをプロトタイプとしてASIC設計中
 - ➔ 2022年6月にプロセス開始、9月ごろ試作一号機完成
 - ▶ バグ出しののち年内に二号機の設計開始、次年度製造へ
 - **ここで仕様アップデート可能。使いたい人は要求を教えてください！**
- 最新技術に目を光らせる