



# 陰イオンガスTPCを用いた 暗黒物質探索による ニュートリノフォグ<sup>1</sup>開拓

神戸大 東野 聡

2025年 3月 6日

# イントロダクション

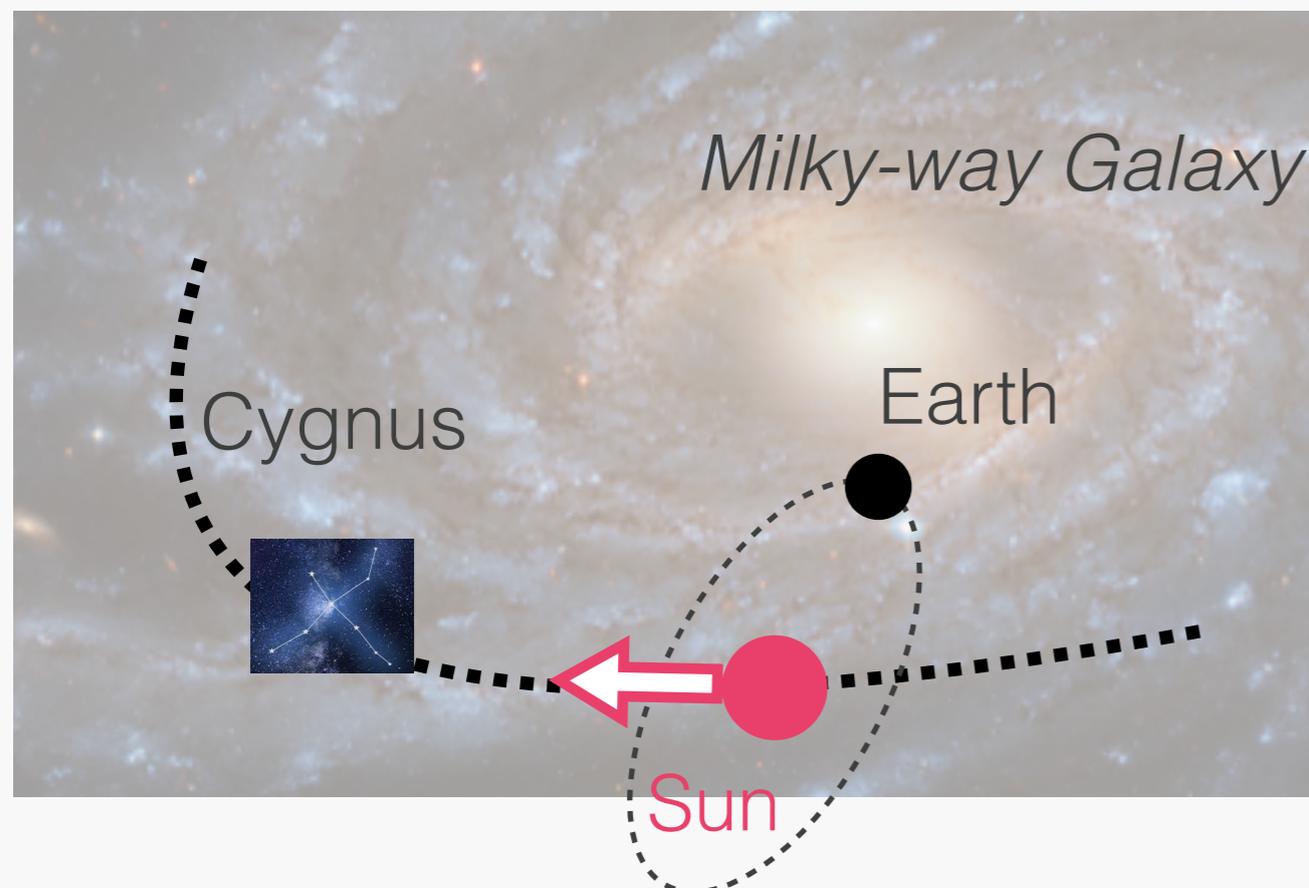
(少し長めに話します)

# 方向感度をもつ暗黒物質探索

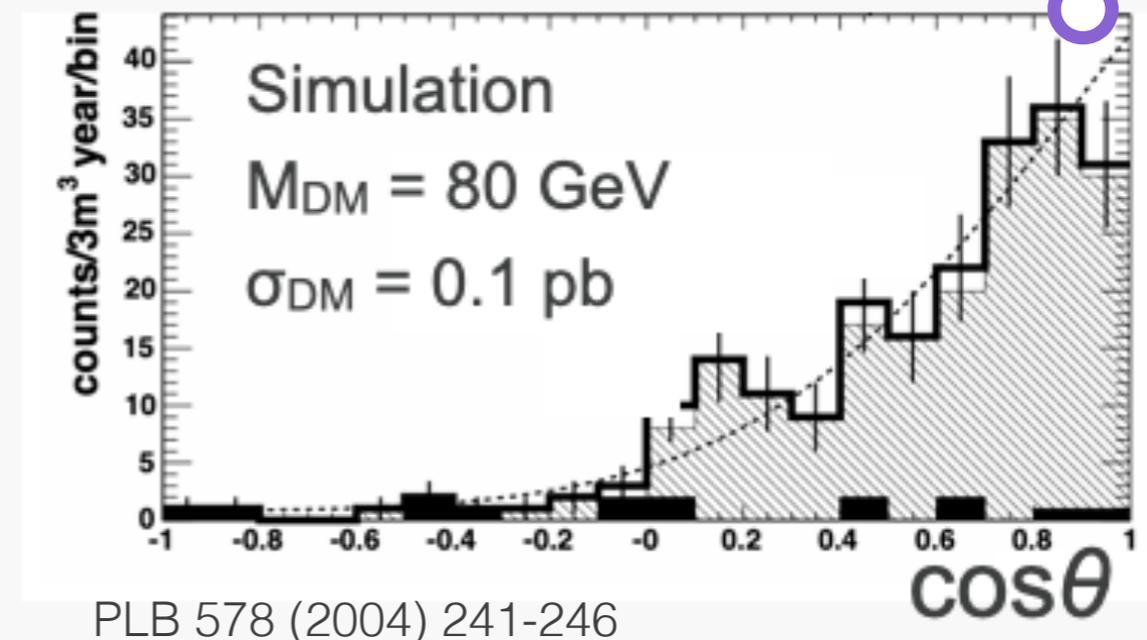
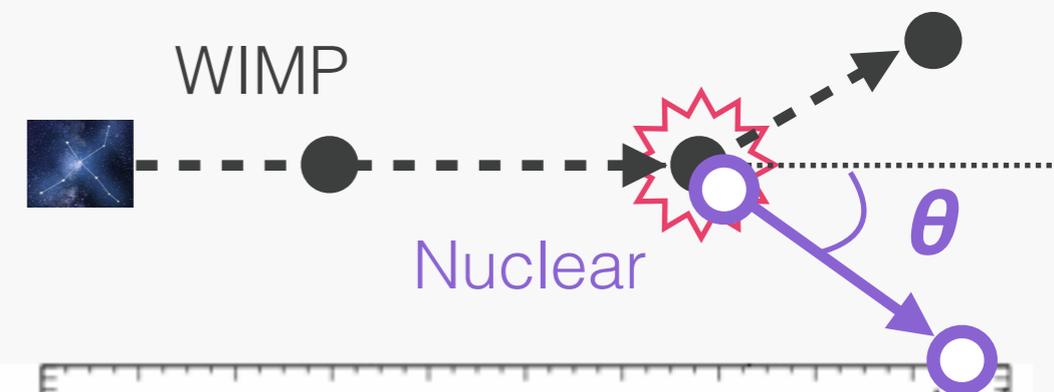
- はくちょう座方向からくる暗黒物質 (WIMP) による原子核反跳の散乱角測定
- 標準ハローモデルを裏付ける強い証拠
  - ➔ 近年、銀河中心にてDMが散乱 & 加速されるモデルも検証中

▶ CRDM (Cosmic Ray-boosted DM) や Self-interacting DM など

- 暗黒物質の発見から性質理解へ



3



PLB 578 (2004) 241-246

# ニュートリノフォグ

- XENONnT実験により $^8\text{B}$  CEvNS観測

少しわかりやすく言うと

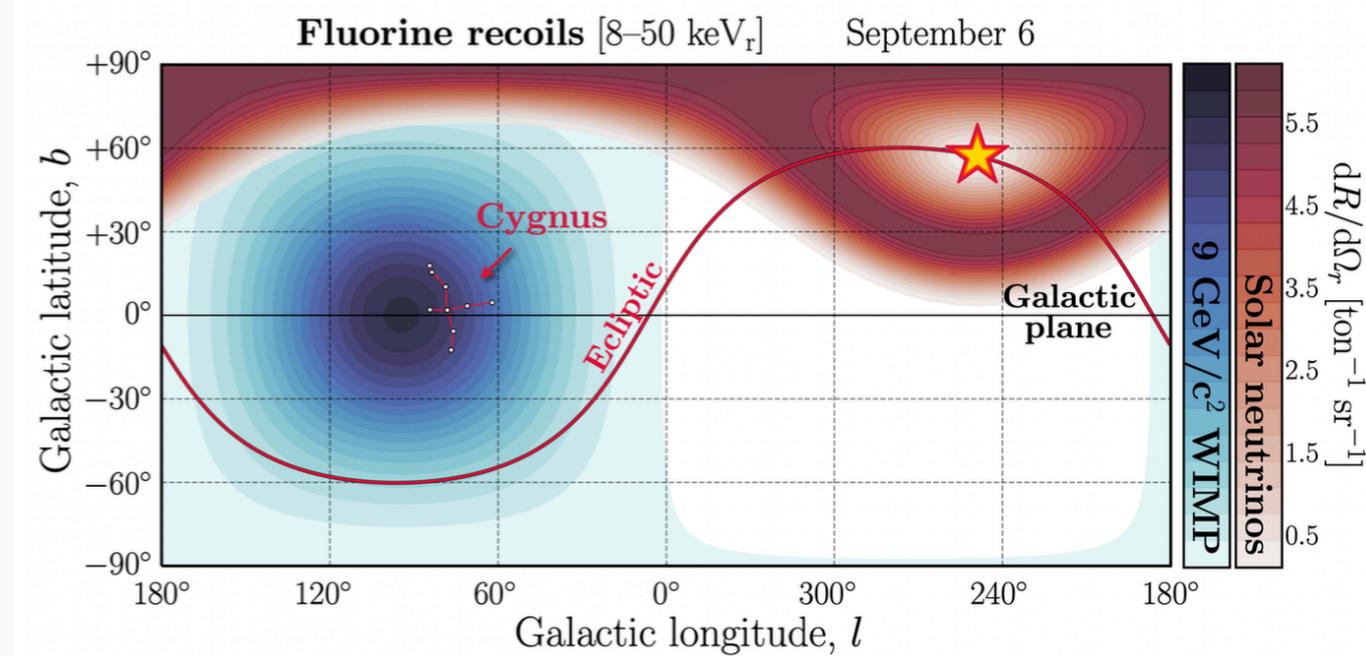
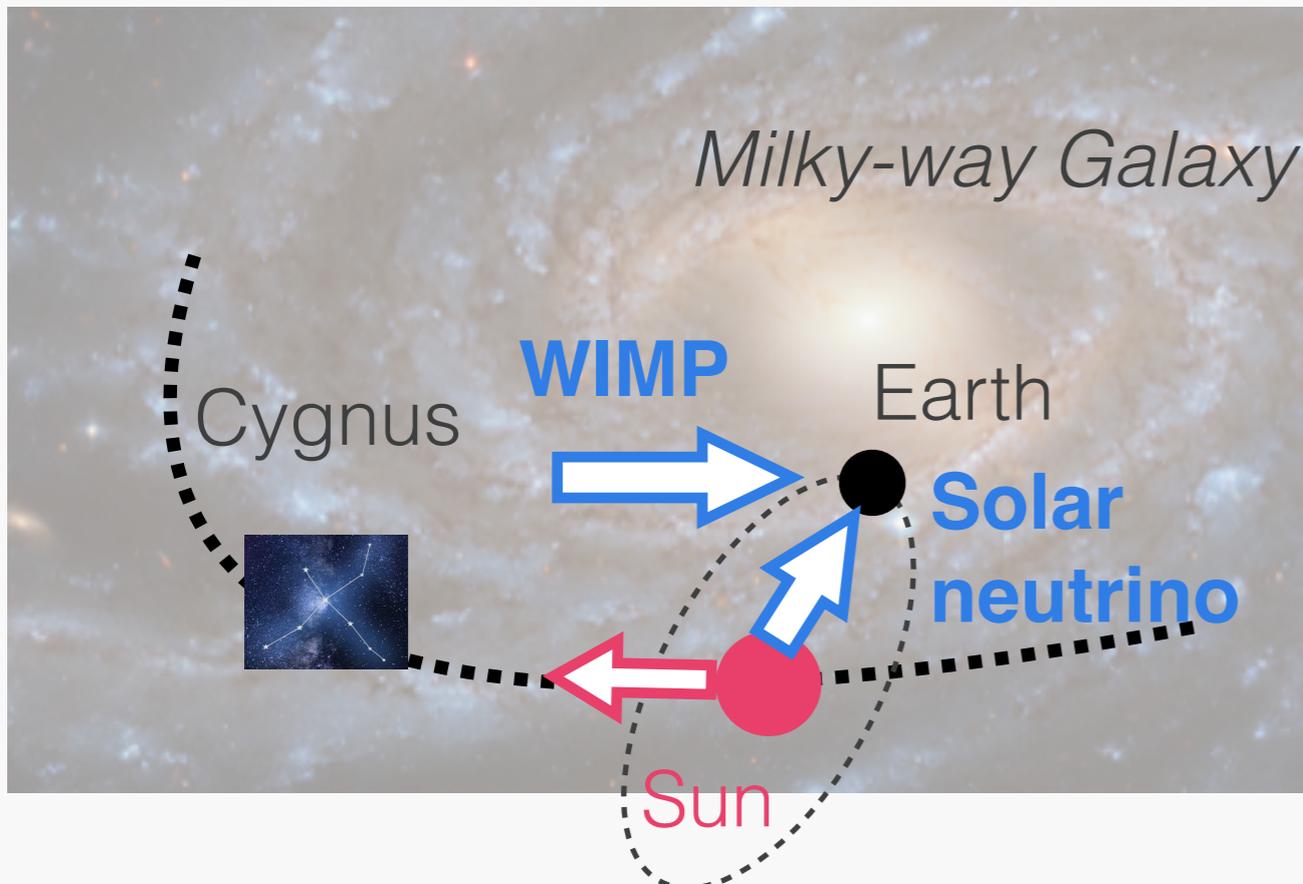
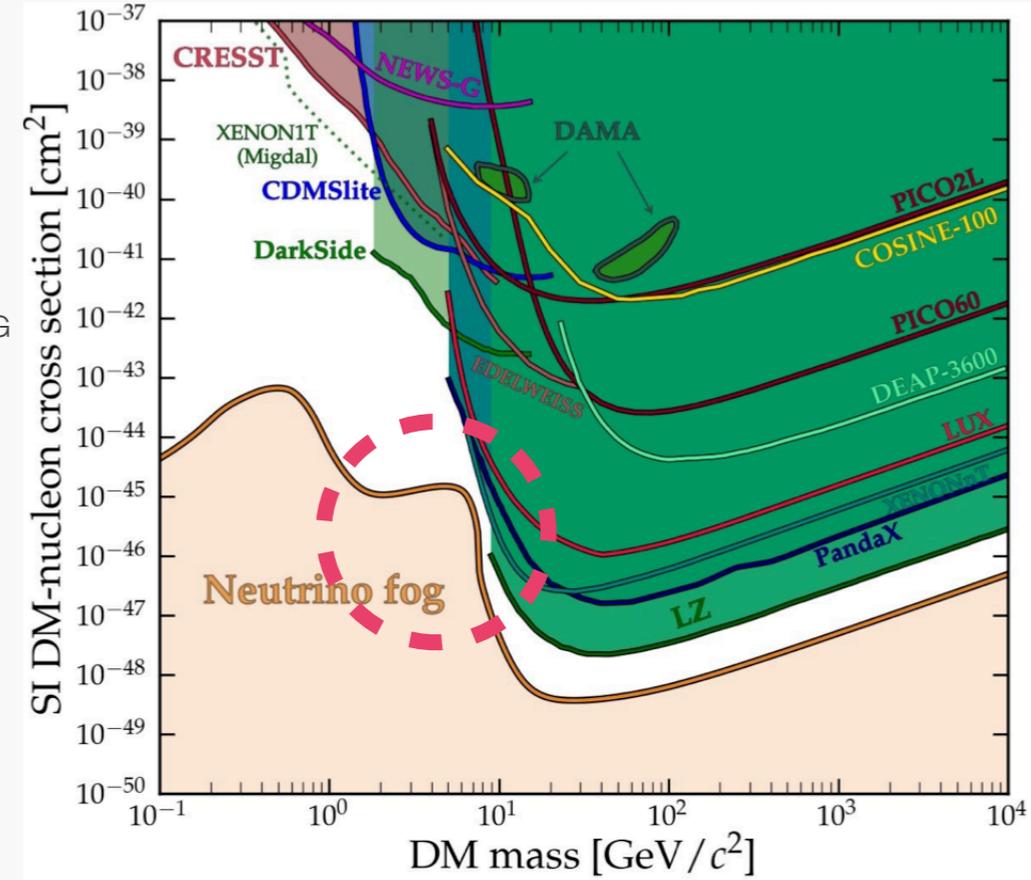
- ➔ 太陽ニュートリノによる原子核反跳検出

DM探索目線では削減できないBG

- ➔ 10 GeV付近でニュートリノフォグ到達

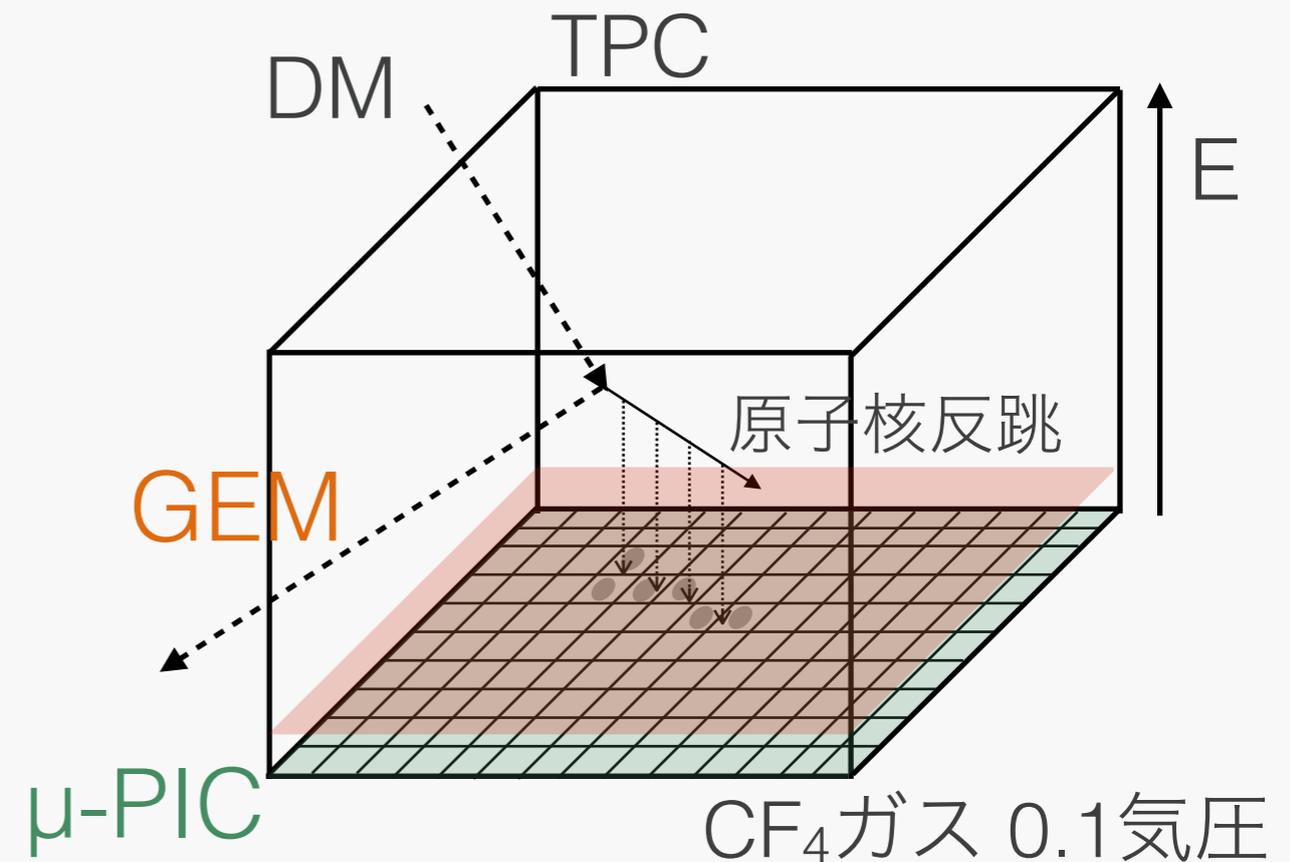
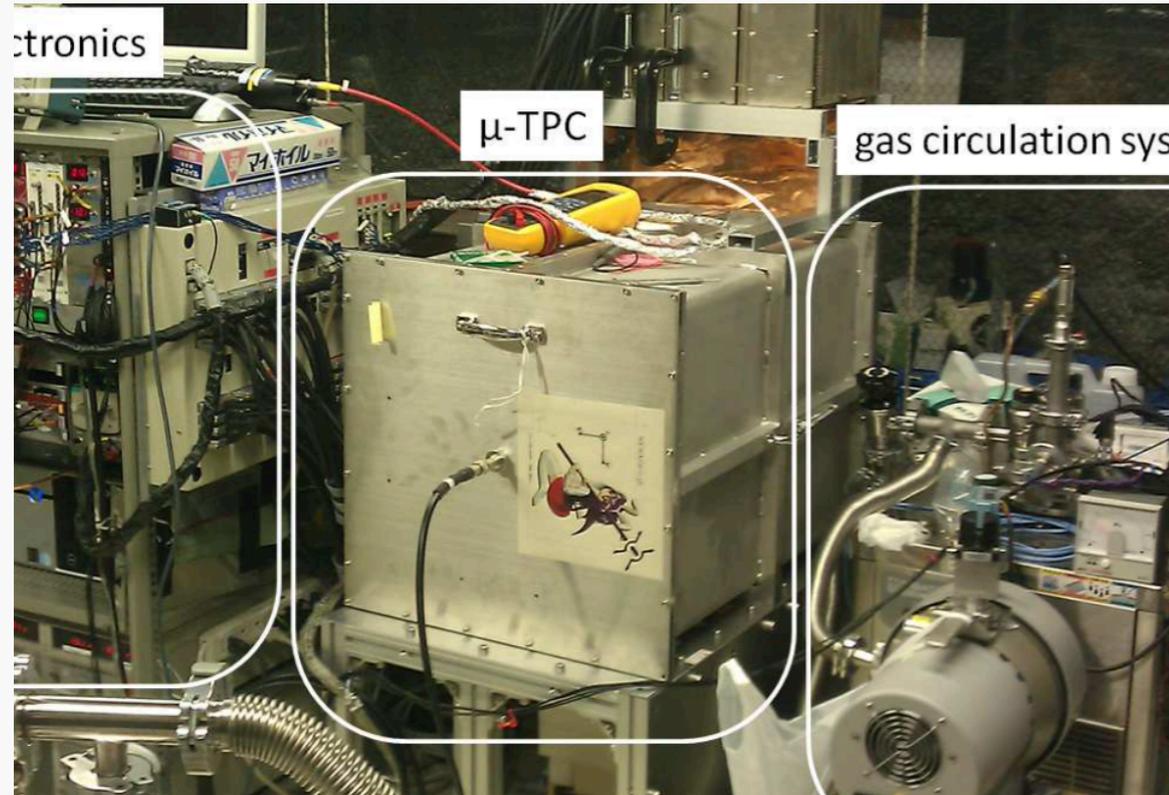
- 方向感度をもつ探索が開拓の解

➡ : 地球からみた相対的な運動方向



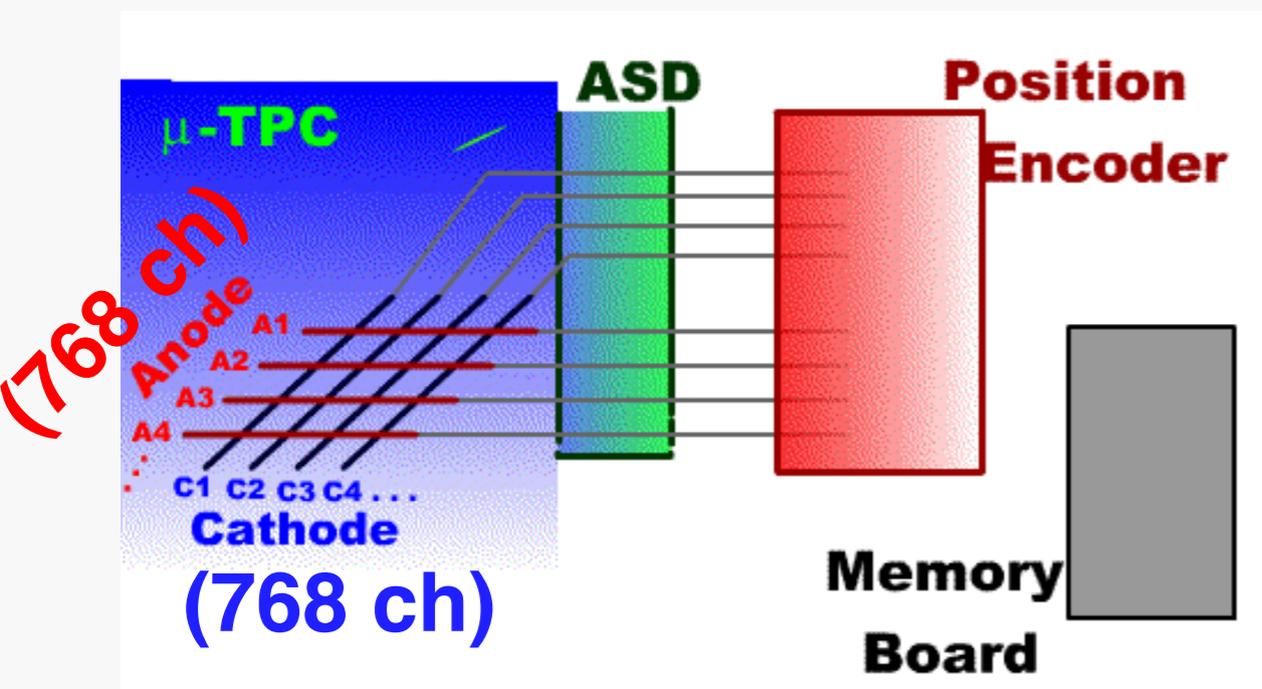
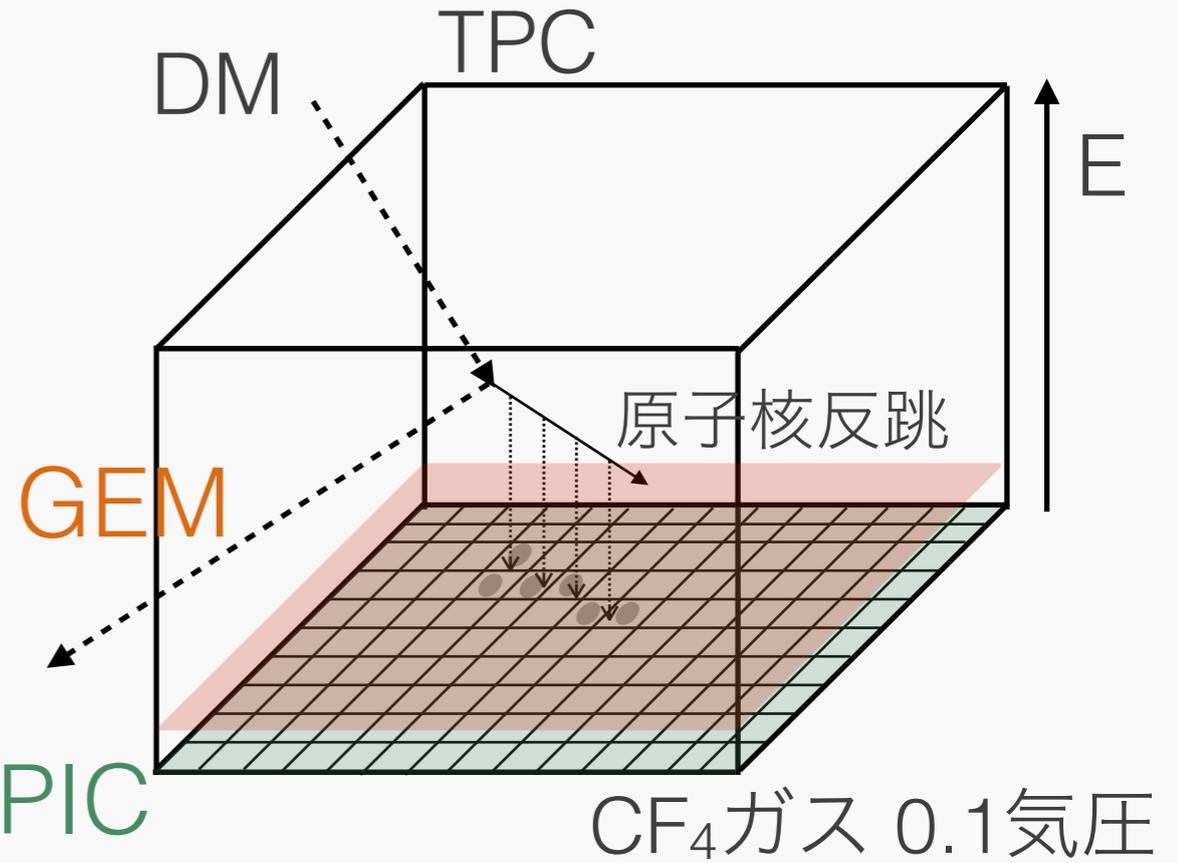
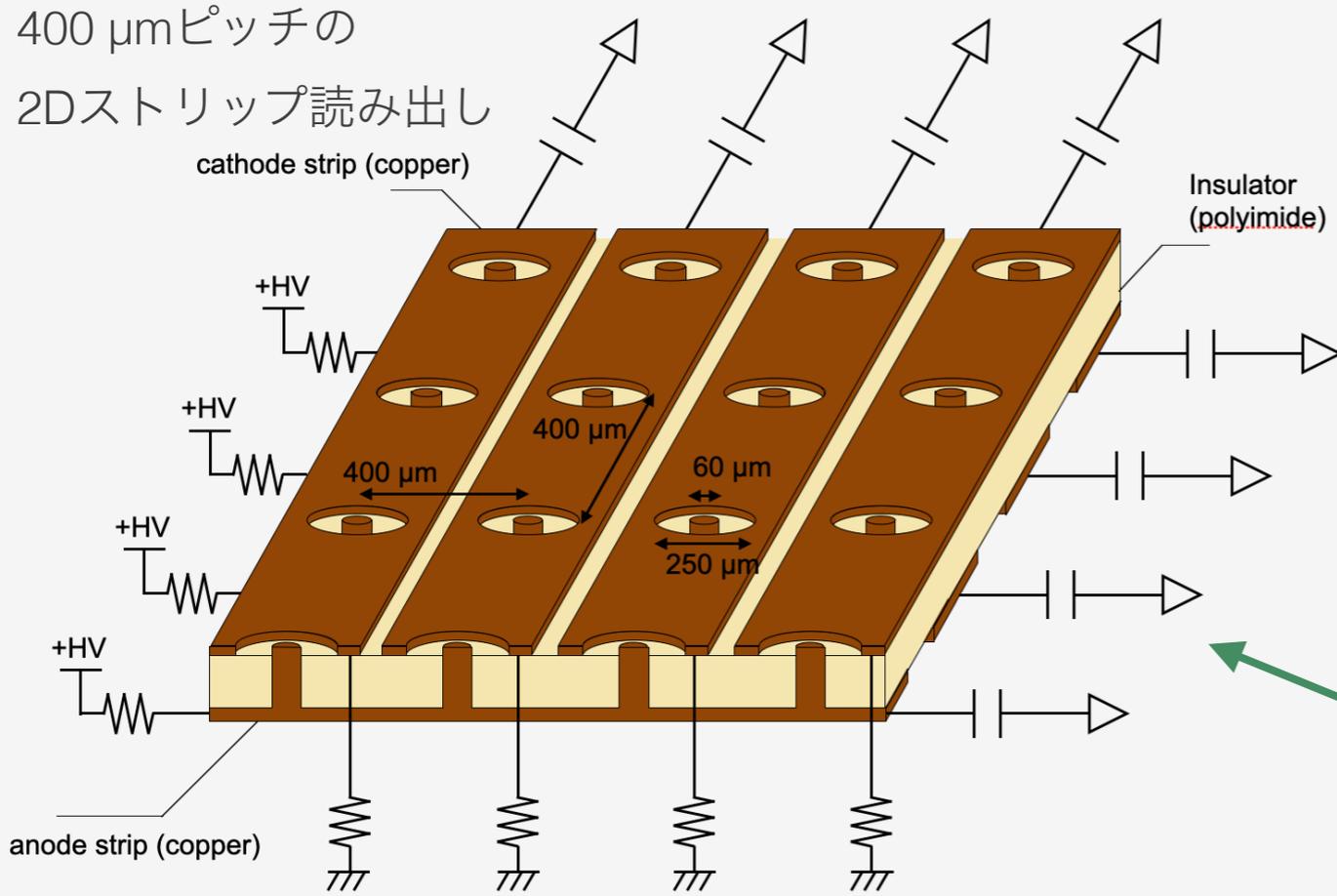
# NEWAGE: 低圧ガスTPC

神岡鉱山の坑内 (Lab-B: 8日に見学ツアーあります！)



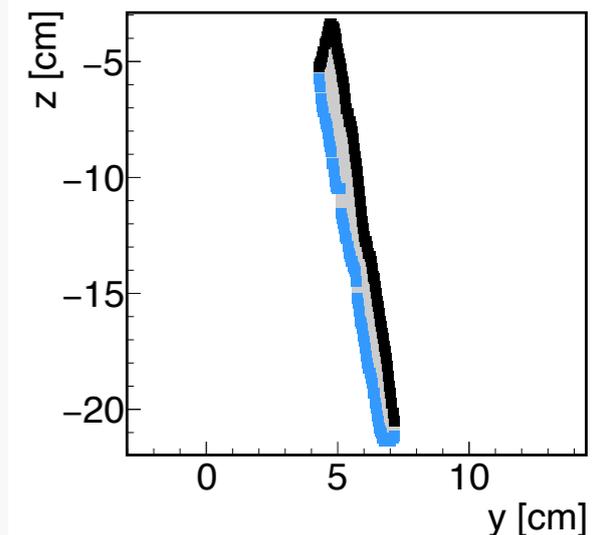
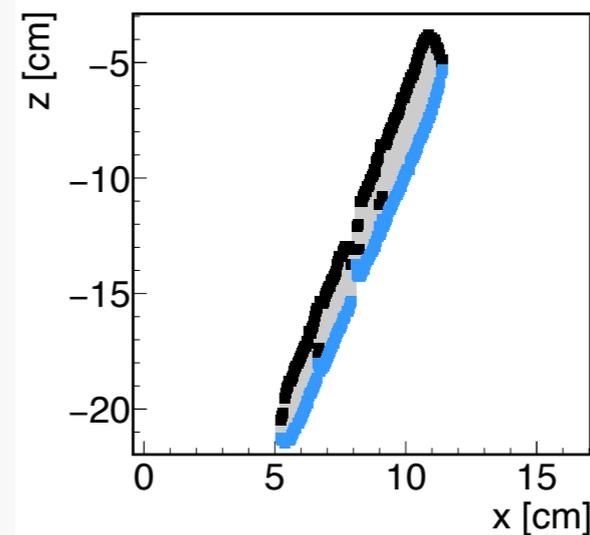
- 極稀事象観測に向け地下実験実施中
- 暗黒物質はゆっくり (非相対論的に) 運動すると考えられている
  - 原子核に  $O(1-100)$  keV のエネルギーを受け渡すので超短飛跡
- この飛跡を再構成して反跳角を測りたい → 低圧ガスを使おう

# μ-TPCでの3次元飛跡再構成



アノード側

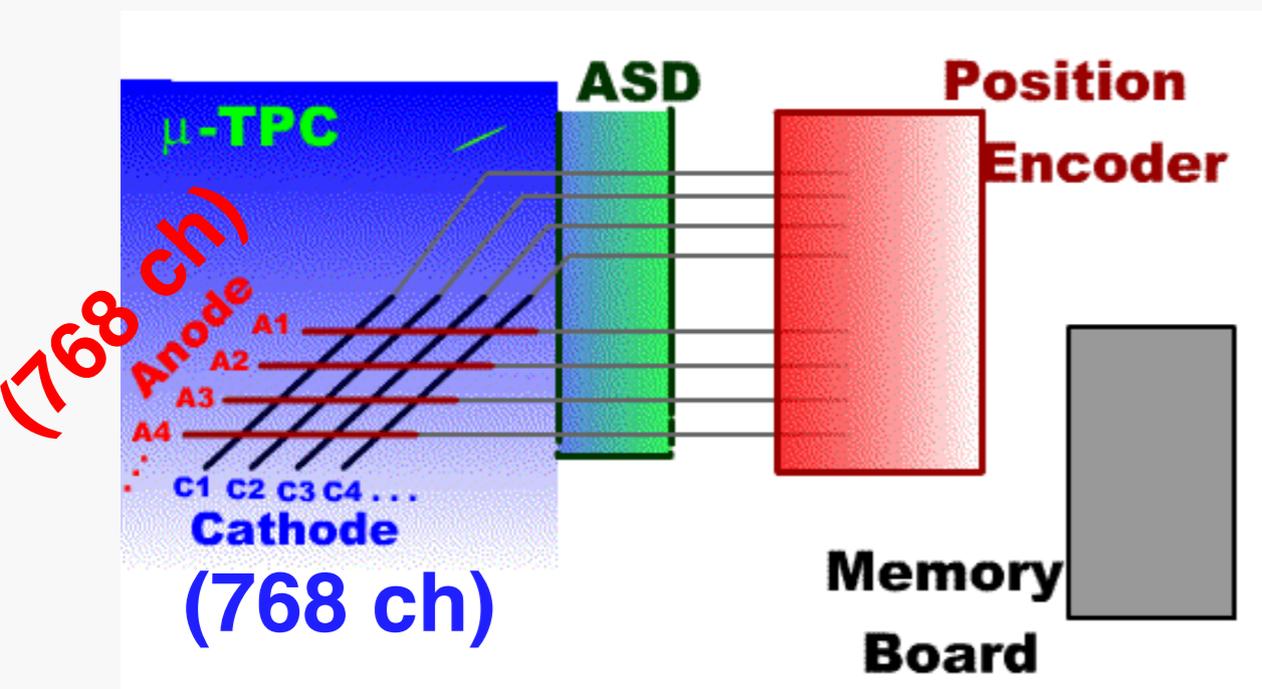
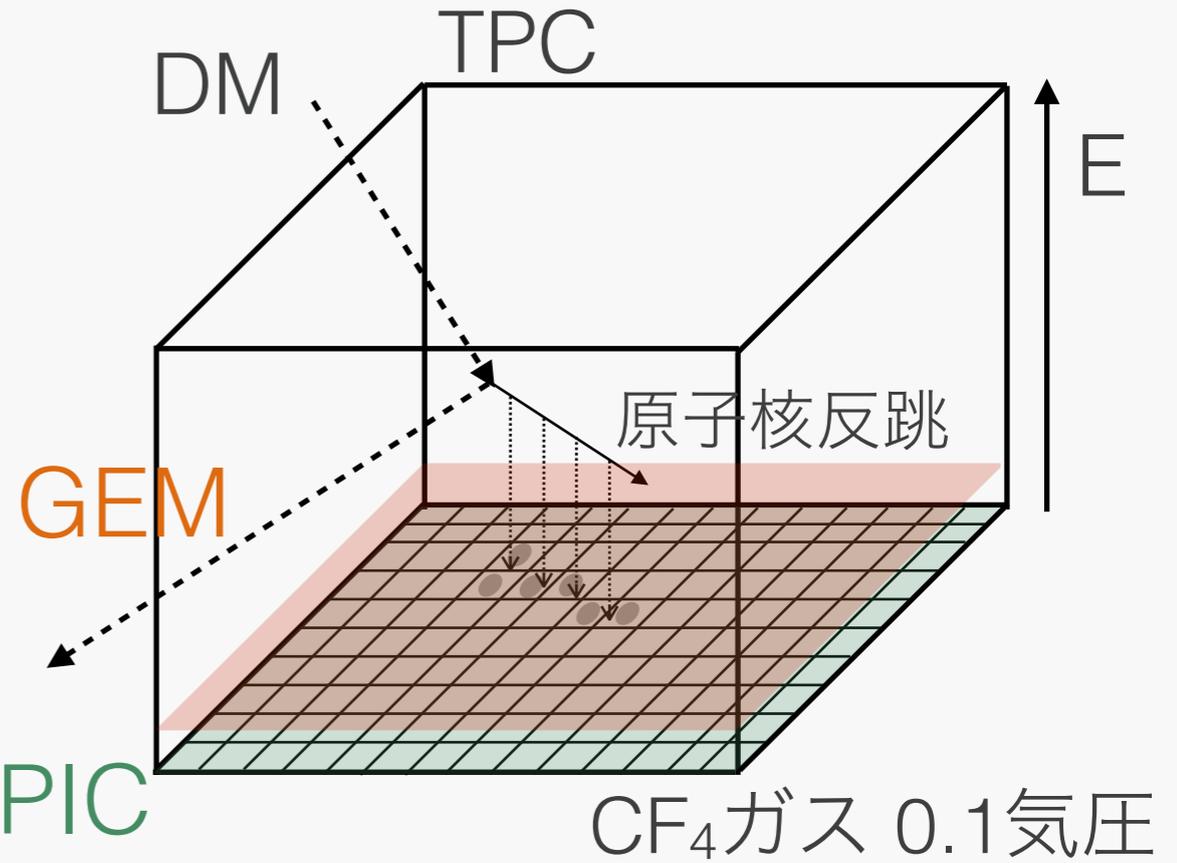
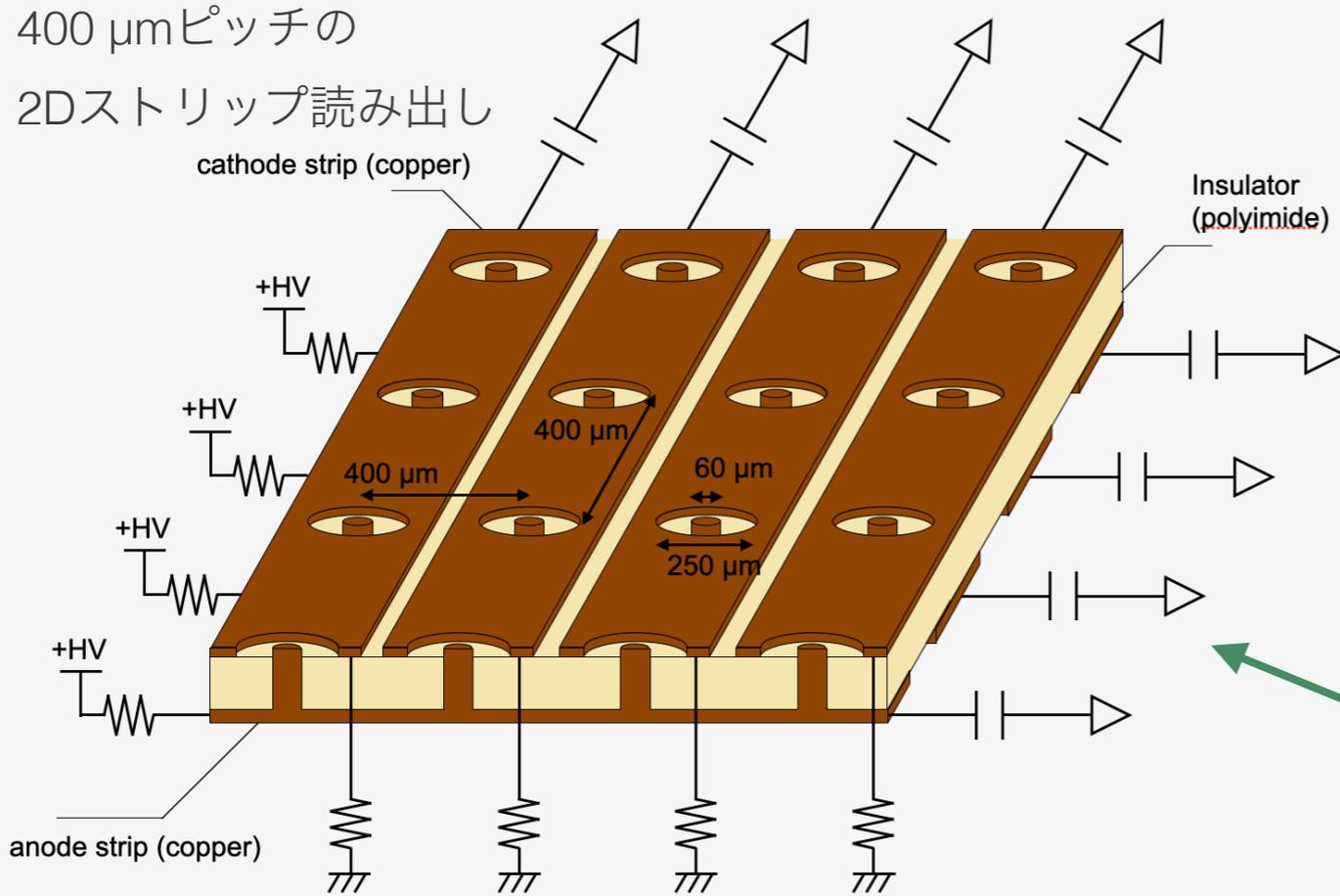
カソード側



組み合わせて (相対位置で) 3次元飛跡再構成!

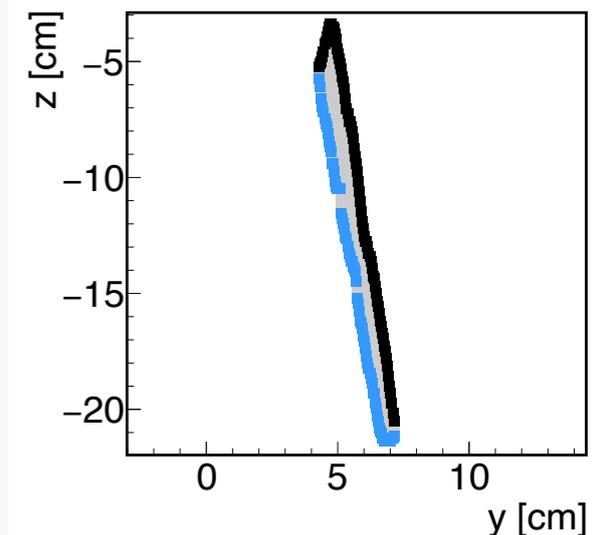
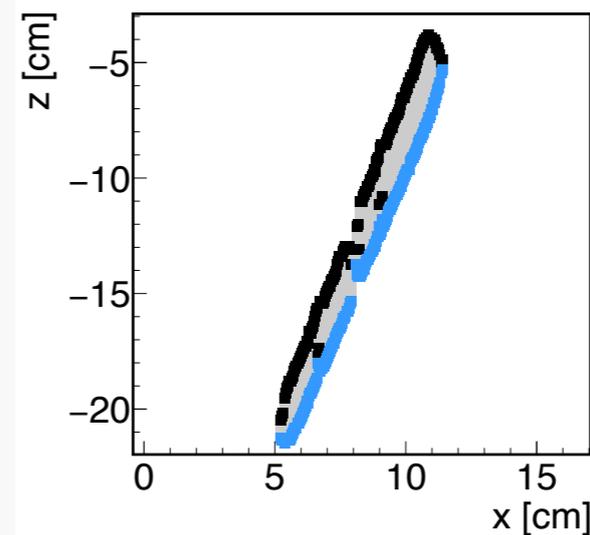
※これは原子核反跳じゃなくてalpha線

# μ-TPCでの3次元飛跡再構成



アノード側

カソード側

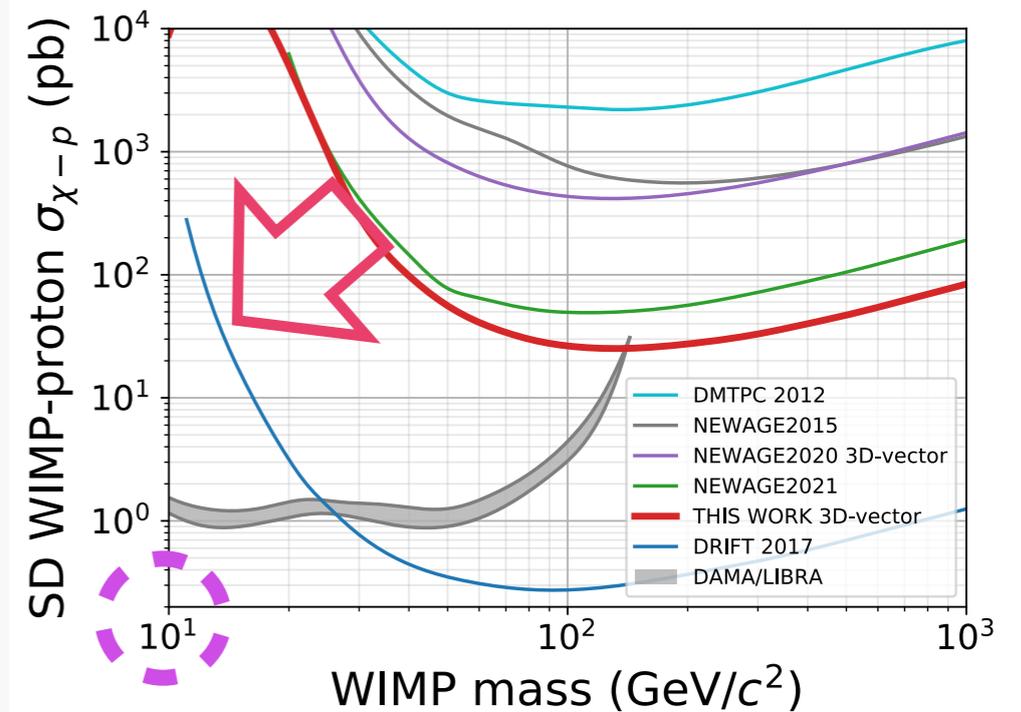
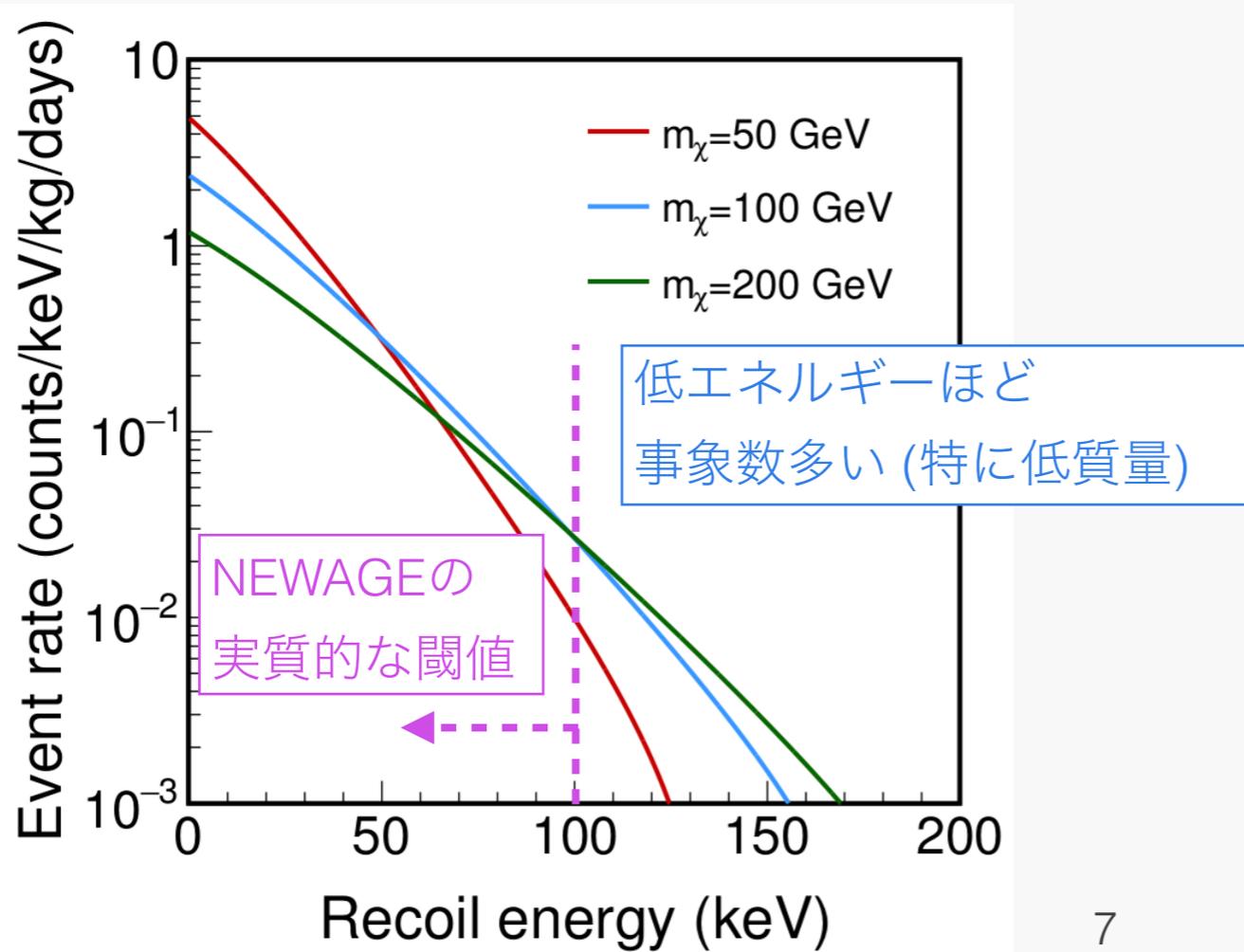
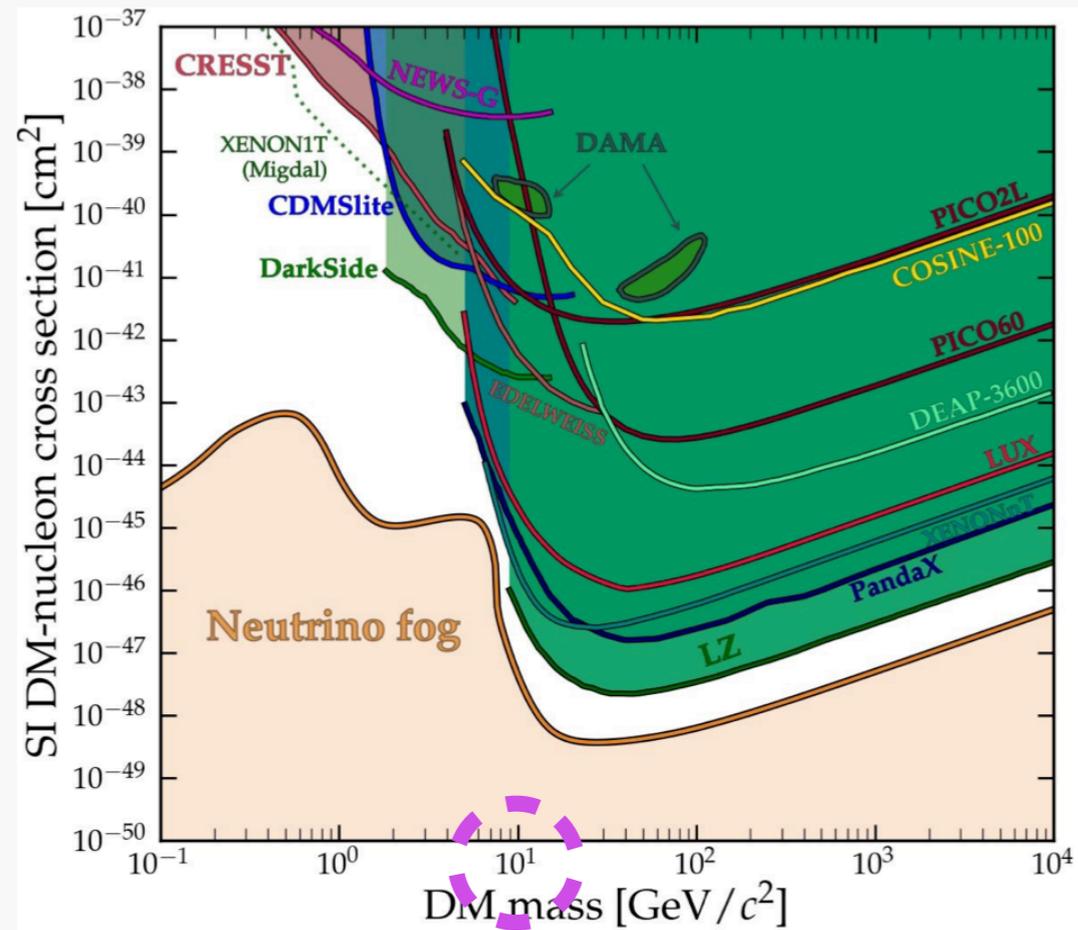


組み合わせて (相対位置で) 3次元飛跡再構成!

※これは原子核反跳じゃなくてalpha線

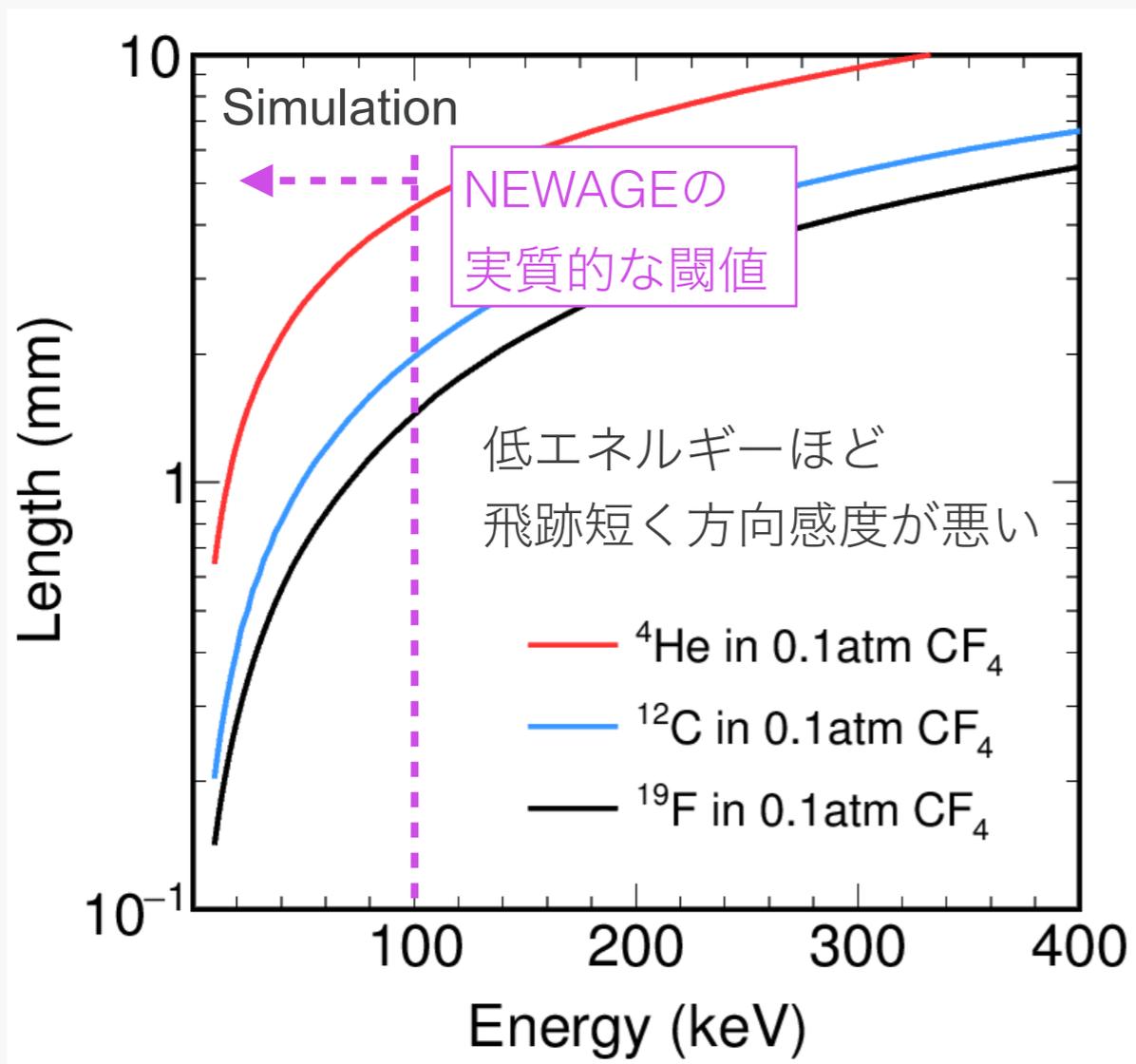
# 目指したいところ

- 10 GeV以下の暗黒物質 (WIMP) 探索
  - ➔ NEWAGEは現状 (WIMP的に) 低質量領域に弱い
- エネルギーの”低閾値化”が必要
  - ➔ 低質量暗黒物質ほど原子核に与えるエネルギー小さい



# 低エネルギー (= 短飛跡) 原子核反跳の飛跡再構成

- 要は短飛跡の原子核反跳の **“飛跡”** 再構成が難しい
  - 複数ストリップぶんの飛程を持っていないといけない
- 現状、400  $\mu\text{m}$ ピッチの読み出しがネックのひとつ
- さらに電子がドリフトする過程で拡散するので飛跡がぼやける→角度分解能低下

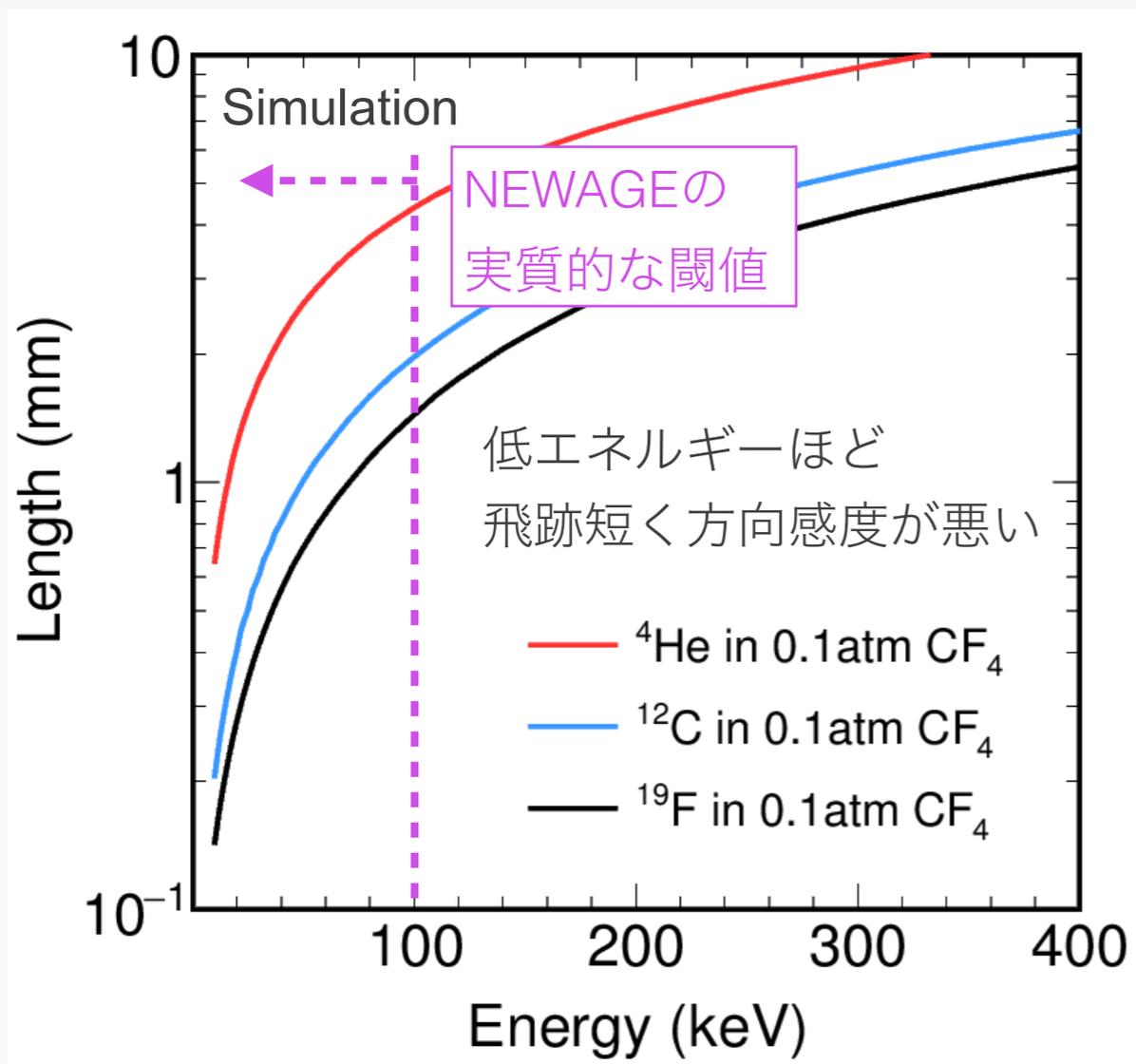


解決策としては...

- 読み出しピッチの微細化
- ガスをもっと薄くする
- 低ドリフト拡散な機構を利用

# 低エネルギー (= 短飛跡) 原子核反跳の飛跡再構成

- 要は短飛跡の原子核反跳の **“飛跡”** 再構成が難しい
  - 複数ストリップぶんの飛程を持っていないといけない
- 現状、400  $\mu\text{m}$ ピッチの読み出しがネックのひとつ
- さらに電子がドリフトする過程で拡散するので飛跡がぼやける→角度分解能低下



解決策としては...

地下宇宙の若手研究会では  
こっちの話をしていました。

- 読み出しピッチの微細化
- ガスをもっと薄くする
- 低ドリフト拡散な機構を利用

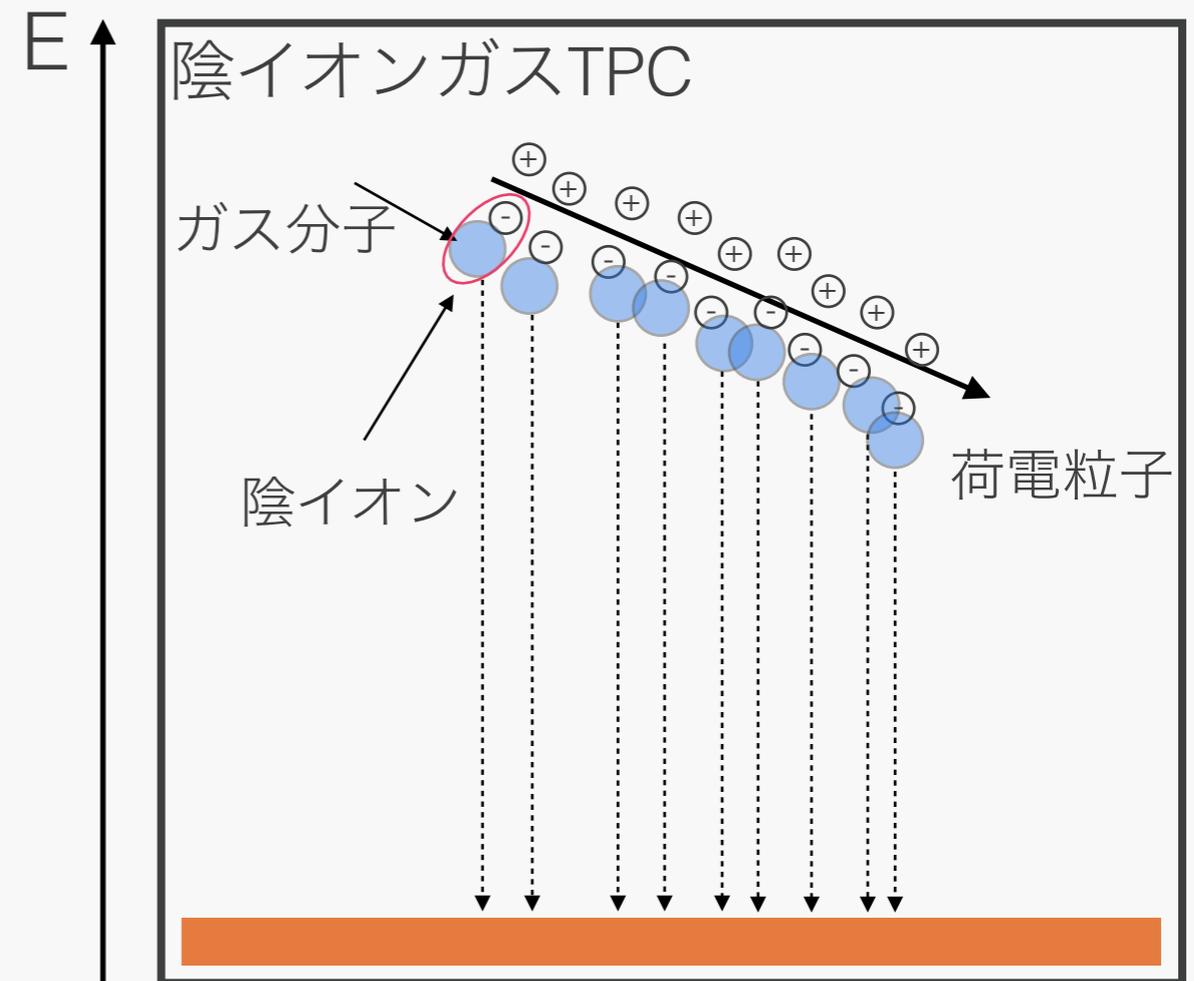
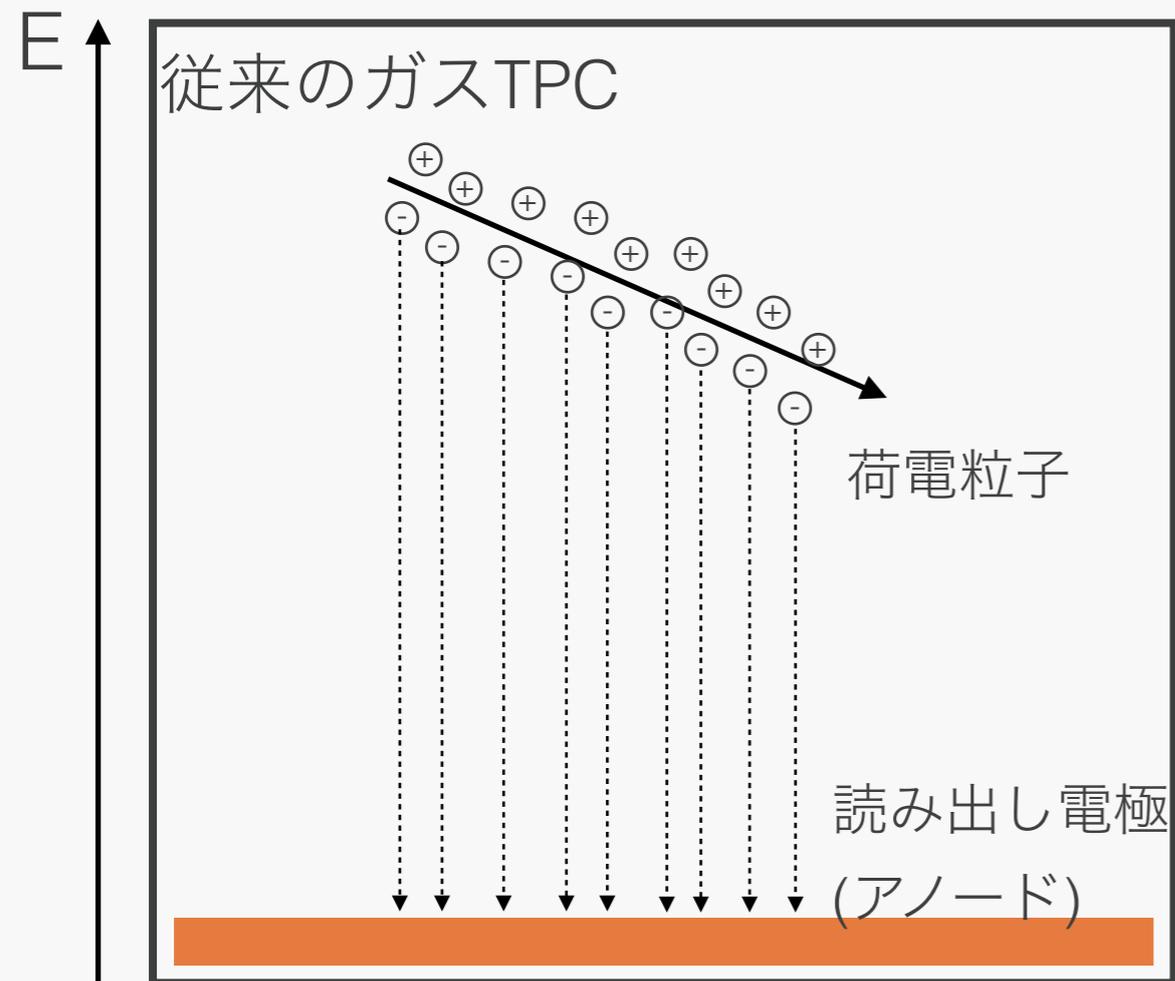
**SF<sub>6</sub>という“陰イオンガス”で解決目指す**

# 陰イオンガスTPC

# 陰イオンガスTPC

- 陰イオンガス：電離電子の代わりに陰イオンが形成されドリフトするガス

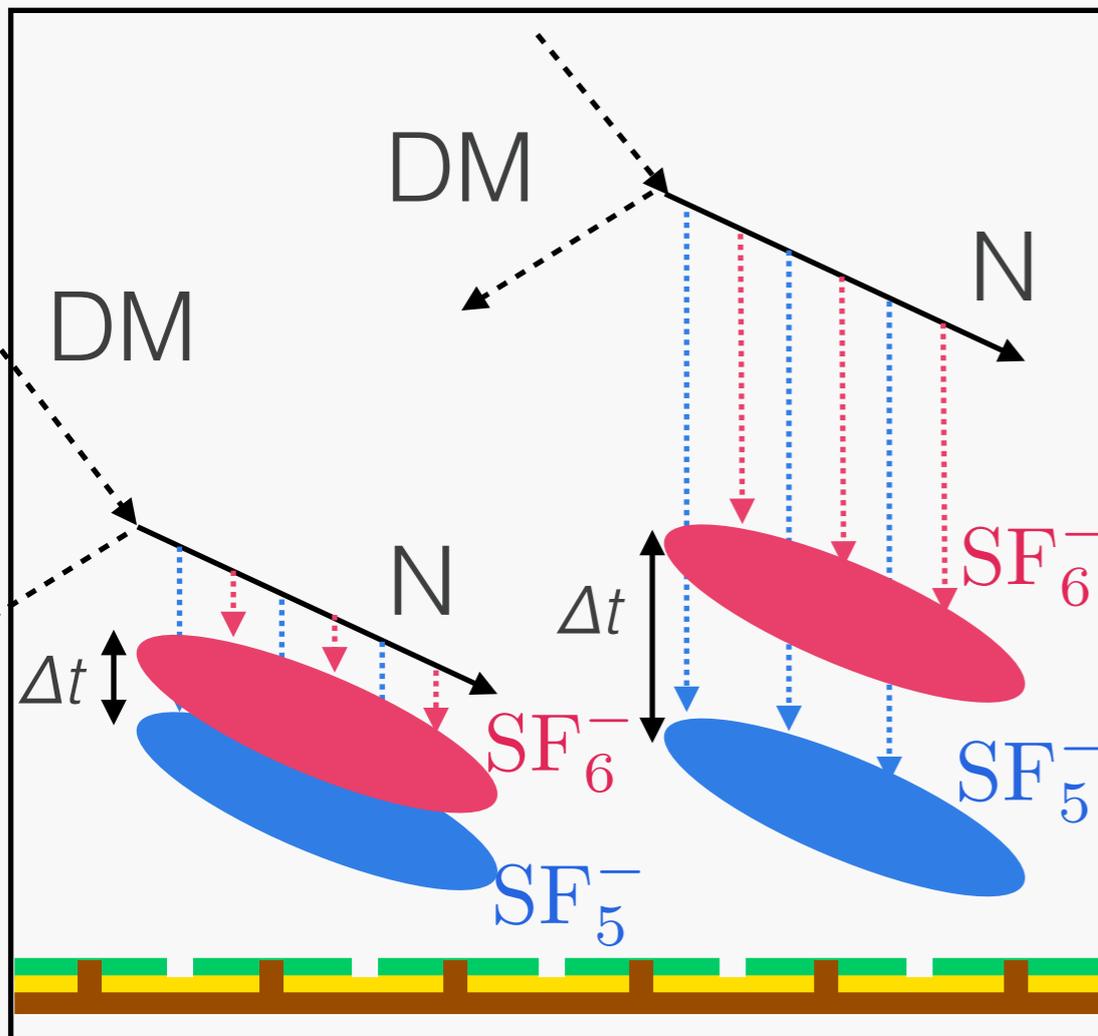
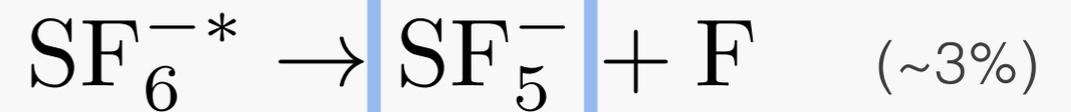
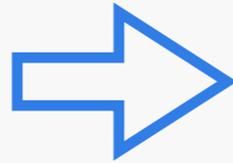
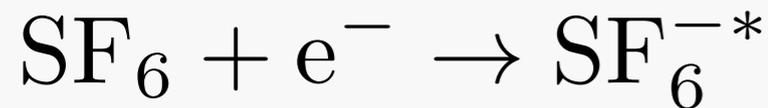
→ 電気陰性度が高いので電子をアタッチする断面積大きい



大きく重たいのでゆっくりドリフト、**低拡散**

# SF<sub>6</sub>ガス

- NEWAGEはCF<sub>4</sub>ガスでFの反跳で探索してきた→同じくFがガスに入ってほしい (詳細割愛)
- SF<sub>6</sub>というガスに注目、主に以下のようにして陰イオンを形成する



絶縁性に非常に強いガス

→低圧下でも耐放電性が高い

(ガスもっと薄くして飛跡伸ばせる！)

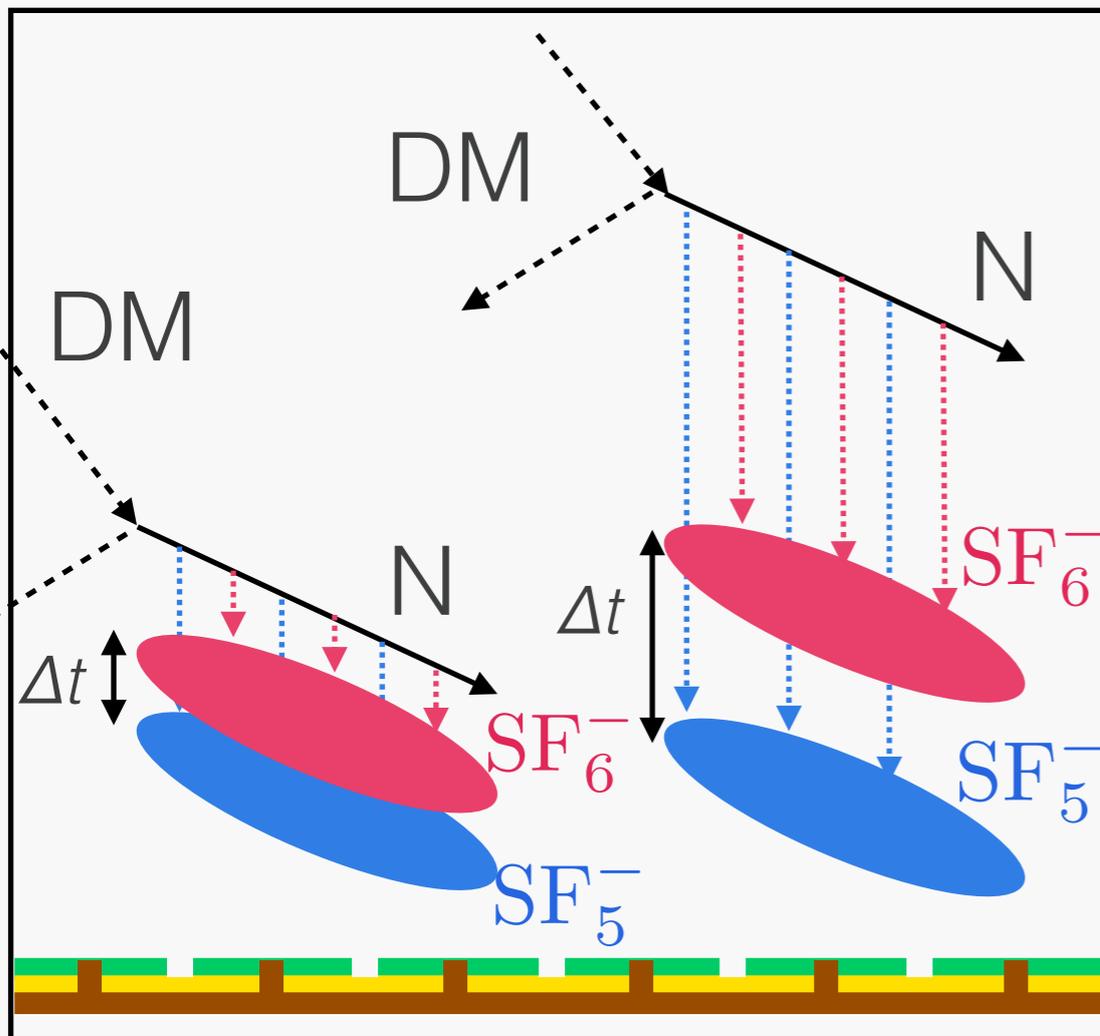
2種類の陰イオンがドリフト

→ドリフト方向絶対位置を再構成

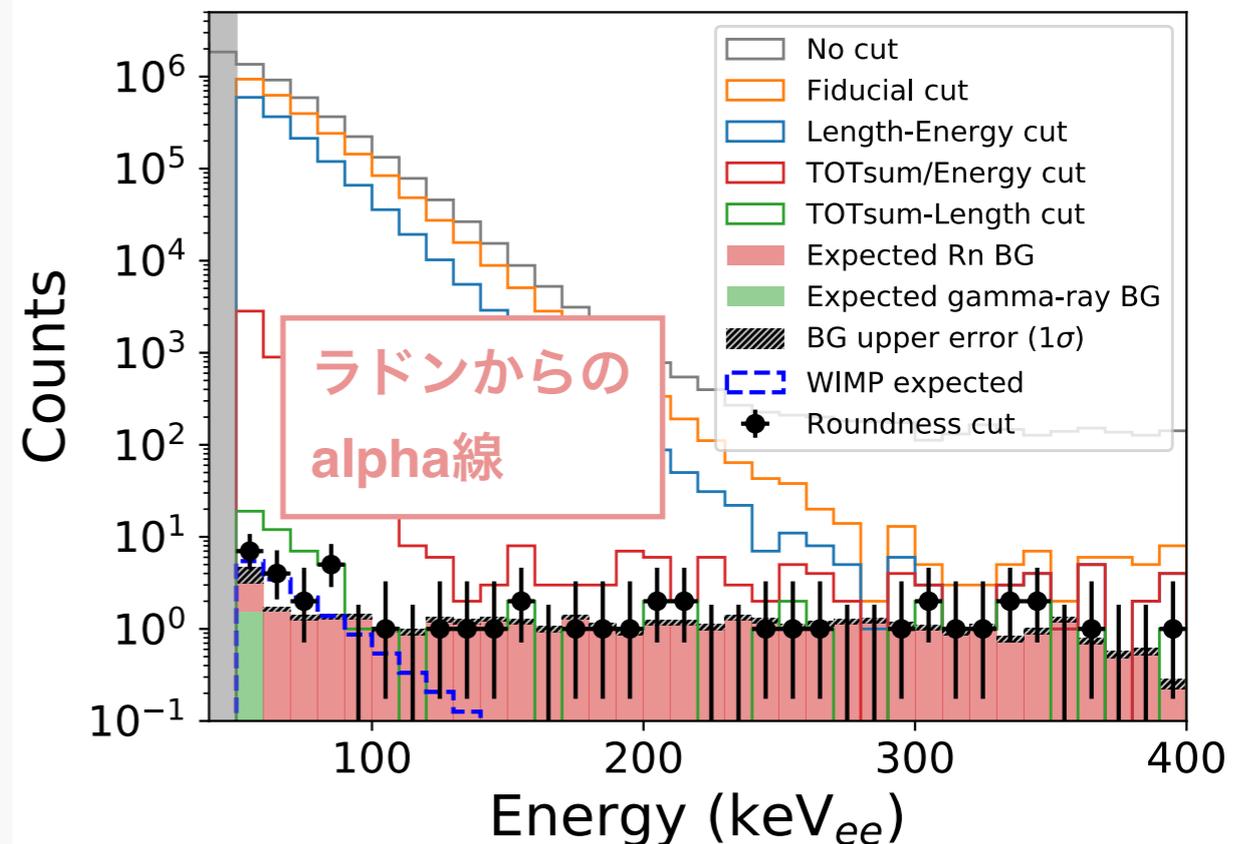
セルフトリガーだとこれができなかった

# NEWAGEのBG

- いま一番深刻なのはガス中のラドン (とその娘核) によるalpha崩壊
  - ➔ 崩壊してすぐ壁に追突すると短飛跡、低エネルギーの原子核反跳にfake
- 二種類のイオンの到達時間の差 ( $\Delta t$ ) が極端に大きい or 小さい事象を排除
  - ➔ 低エネルギー事象の再構成だけでなくBG削減も非常に重要！

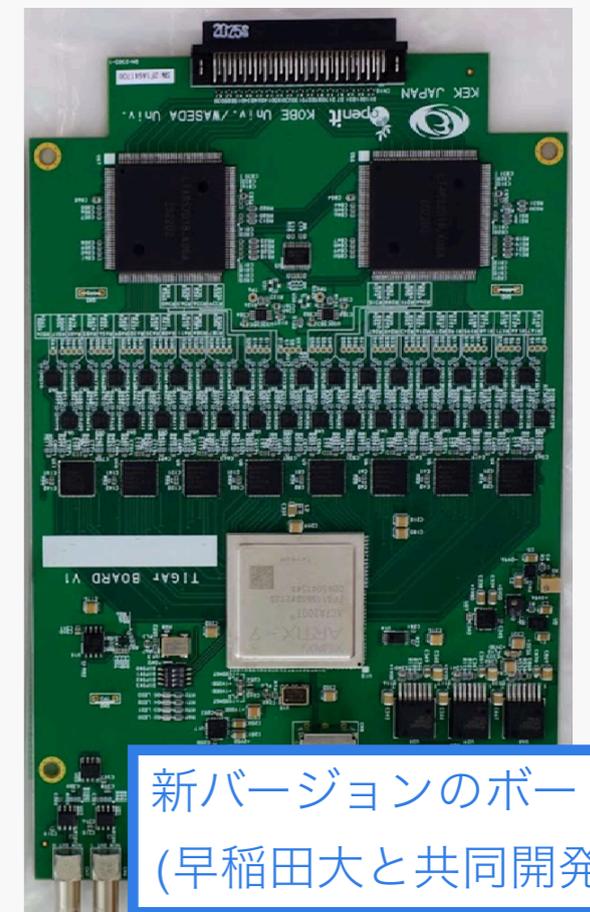
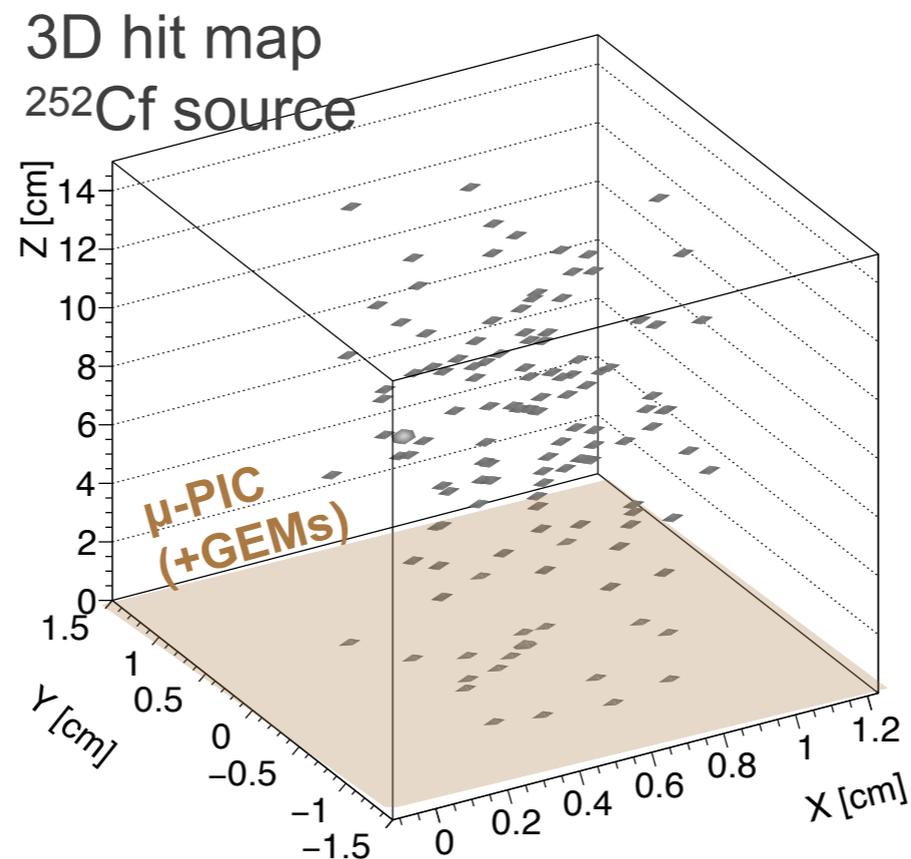
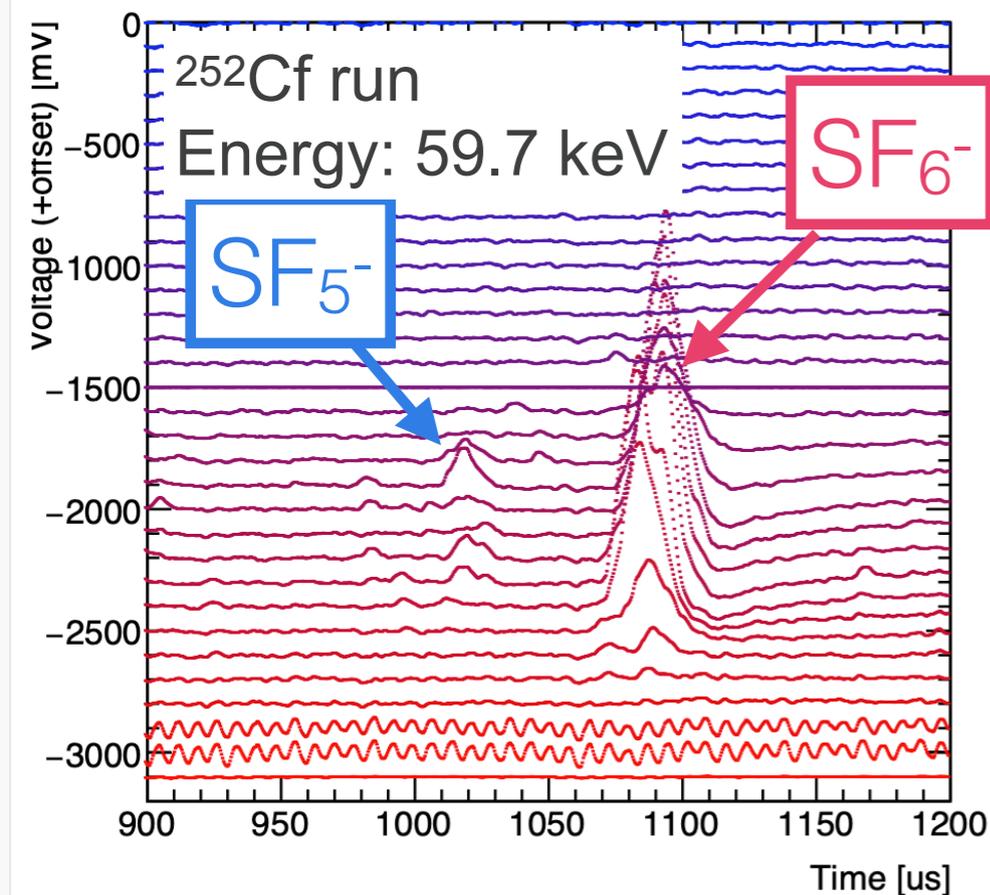
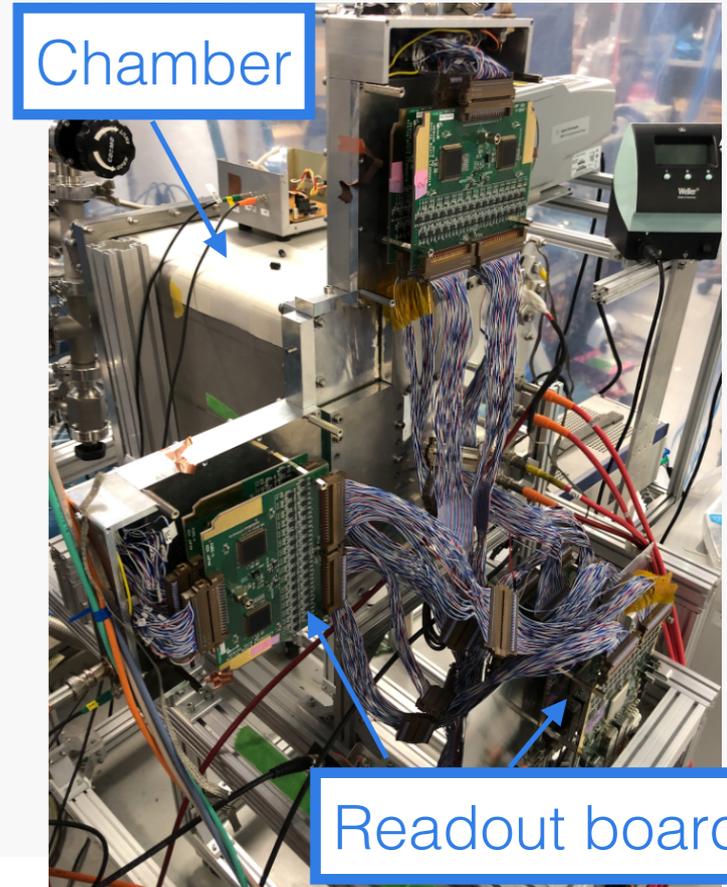


PTEP 2023 (2023) 10, 103F01



# SF<sub>6</sub>ガスのstudy

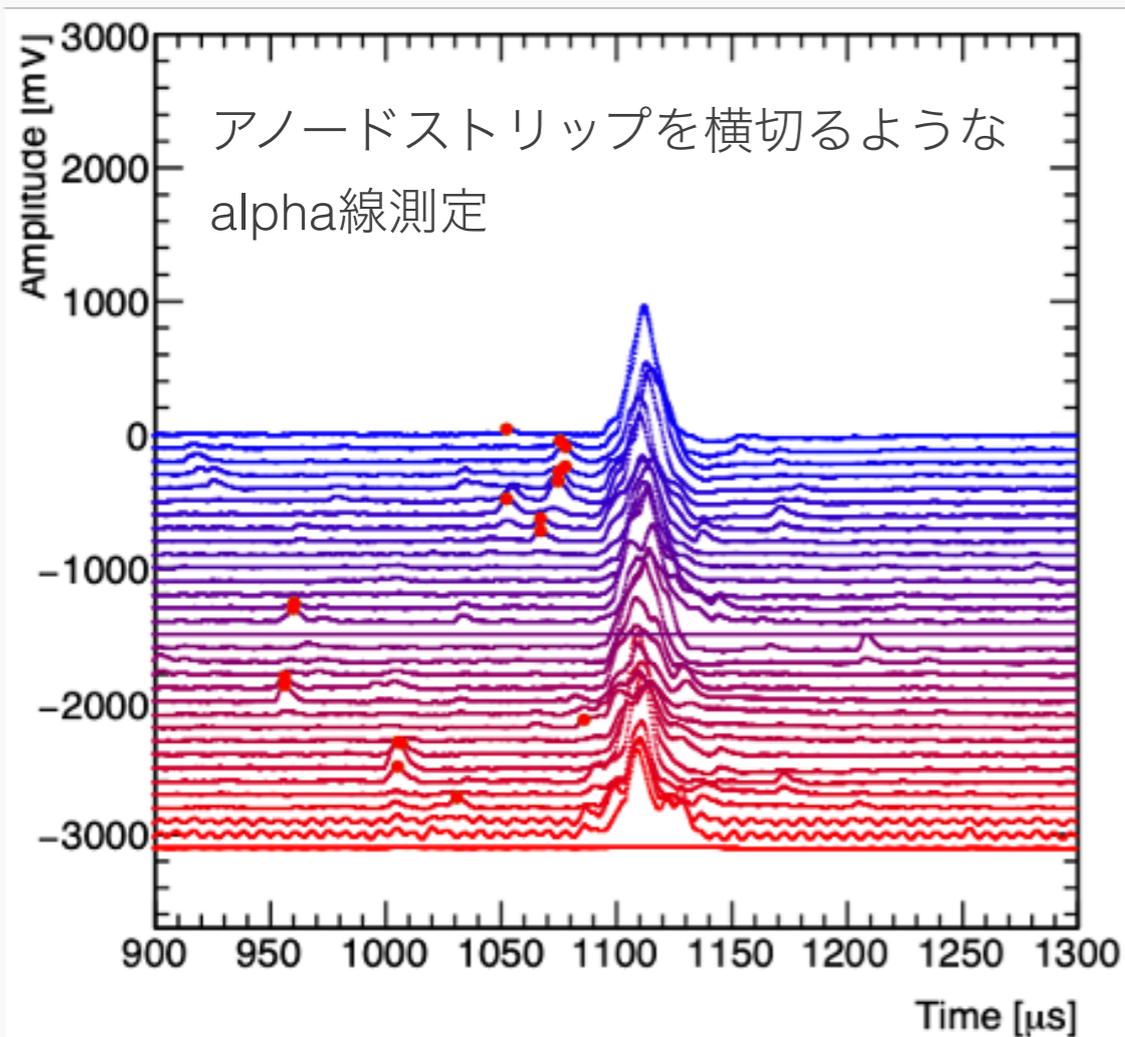
- 暗黒物質探索への適用はまだされていなかった
  - ▶ 専用のエレクトロニクスソフトウェア開発
    - ▶ 64 ch ADC波形読み出し(2.5MHz), SiTCP通信, セルフトリガー
  - ▶ 原子核反跳の絶対位置での3次元飛跡再構成を初実証
    - ▶ arXiv: 2302.10725 / 2023 JINST 18 C06012



アノードストリップごとの波形を並べてプロット

# 問題点

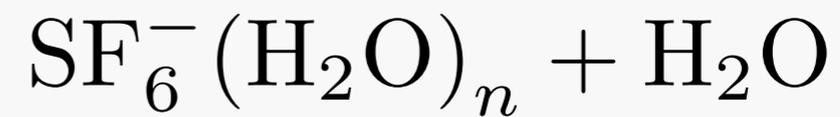
- 2パルスというのは実はそんなにきれいじゃない
  - SF<sub>6</sub>-の大きいパルスの前後に小さいパルスがいっぱい
- 単なるノイズだけではなく **不純物によってできた陰イオンの可能性**



アノードストリップごとの波形を並べてプロット

e.g. 水の混入で以下の反応が起きる

n = 1~3の安定なクラスター



おそらくSF<sub>5</sub>-と同程度の速度



おそらくSF<sub>5</sub>-より速い

- できるだけピュアなガス環境を作る
- **ドリフト電場を強くする**

# 検出器改良...?

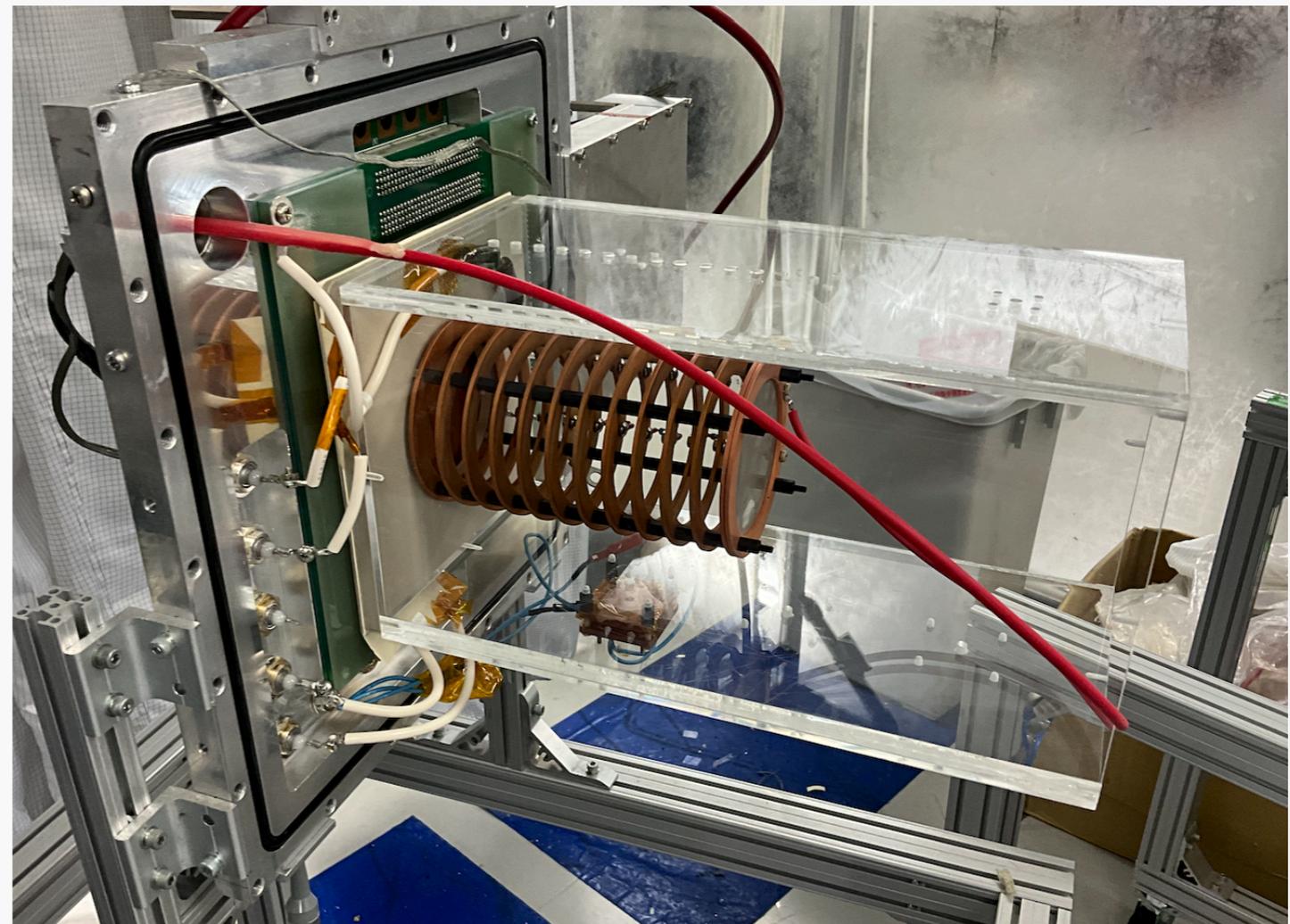
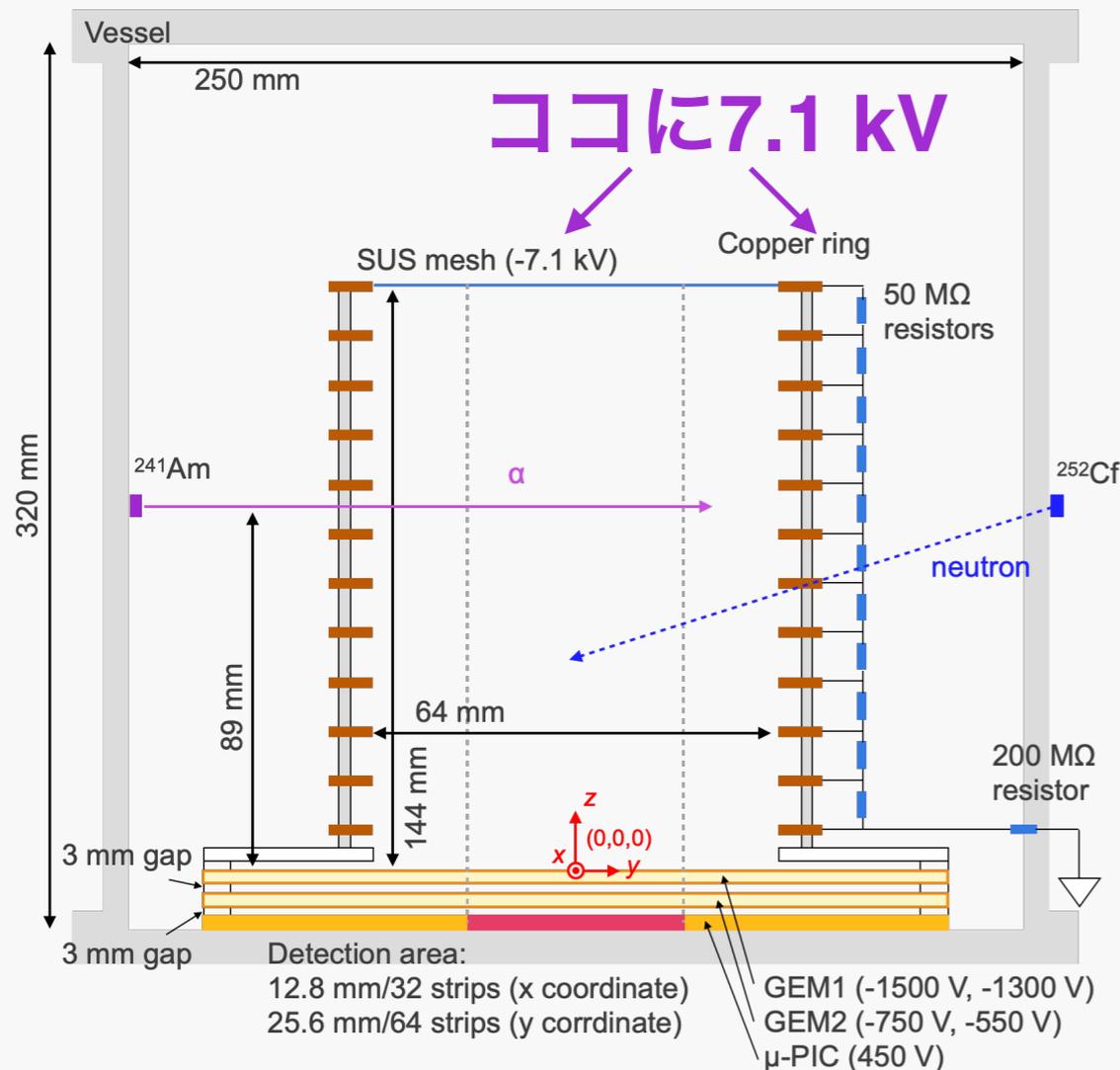
ここから恥ずかしいこと話します

# 検出器概観

- 電場形成用の銅リングを抵抗で繋ぐ

→ SF<sub>6</sub>ガス **20 Torr (約0.03気圧)** を充填したチェンバーに入れる (ほぼ真空)

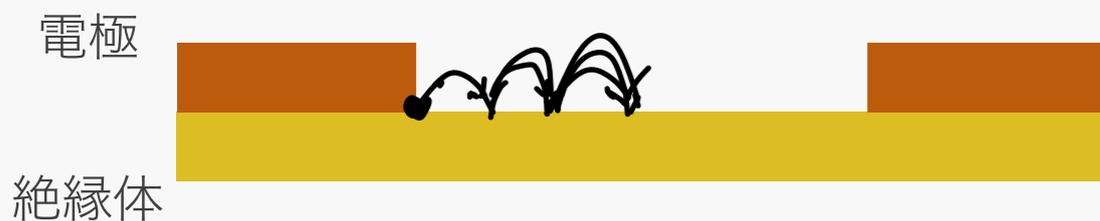
- そのこの上面に今まで7.1 kVかけてた (それ以上は放電) → **15 kV**かけたい  
~300 V/cm ~1000 V/cm



# 放電対策：どこでどんな放電する？

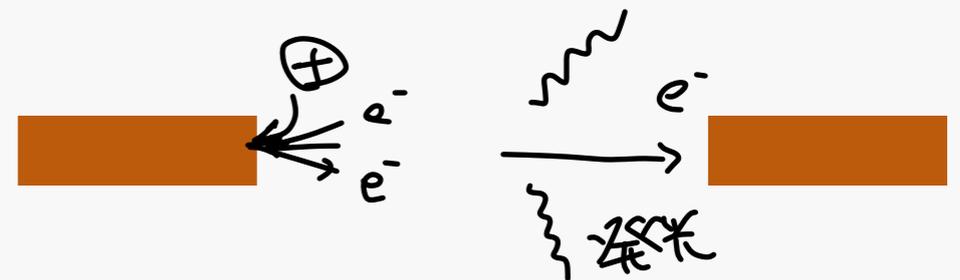
- じつはこれが全くわからなかった
  - ドリフト電極とGNDの間に**定常電流**
- 低圧ガス下で起こりそうな放電:
  - 沿面放電？であればもっと瞬間的なsparkがありそうな気はする
  - グロー放電？でもどこも光っていない(その前段階の暗放電？)

## 沿面放電



Triple junctionから電子放出  
→ 絶縁体にぶつかって電子が増幅

## グロー放電 (暗放電)



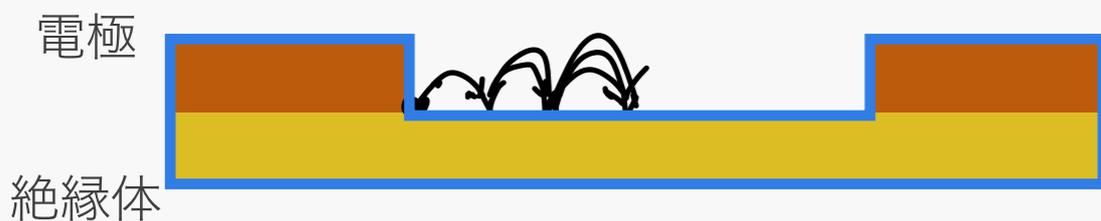
正イオンが電極に当たって2次電子放出

# 放電対策：どこでどんな放電する？

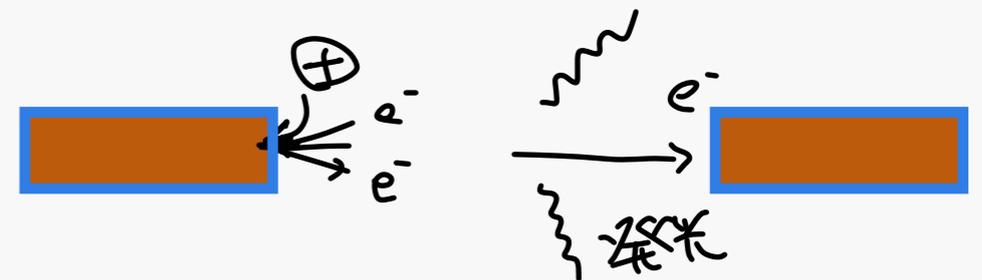
- じつはこれが全くわからなかった
  - ドリフト電極とGNDの間に**定常電流**
- 低圧ガス下で起こりそうな放電:
  - 沿面放電？であればもっと瞬間的なsparkがありそうな気はする
  - グロー放電？でもどこも光っていない(その前段階の暗放電？)

沿面放電

どちらも絶縁体で覆えばいける？(電)



Triple junctionから電子放出  
→ 絶縁体にぶつかって電子が増幅



正イオンが電極に当たって2次電子放出

# 試行錯誤

- 絶縁コーティングを試してみる

ホーム > ハヤコート Mark2 (スプレータイプ/クリアー) (AY-302)

## ハヤコート Mark2 (スプレータイプ/クリアー) (AY-302)

¥1,408 (税込価格)

数量 1

在庫数 680

耐湿、耐腐食性ガスに優れた基板用絶縁コーティングスプレー

エアゾール・化学製品 防湿防錆用コーティング剤 RoHS対応

2023年7月1日より価格改定いたしました。

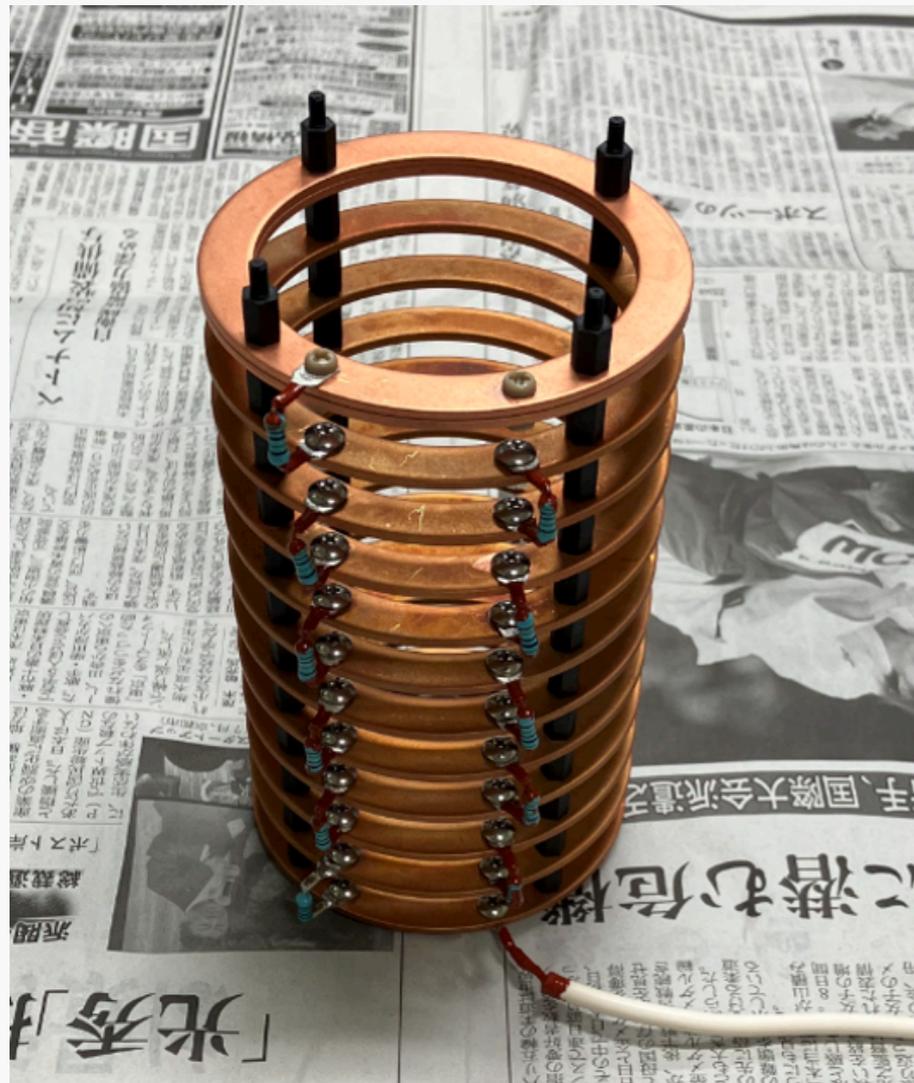
ガスバリア性に優れ、湿気や腐食性ガスにも効果的な防湿防錆コーティング剤です。絶縁性に優れ、プリント基板の狭いパターンなどの絶縁信頼性を向上します。温泉地などの腐食性ガス雰囲気下や、沿岸部などにおける塩害から基板を守ります。有機溶剤中毒予防規則に非該当です。色違いで4種類のバリエーションがあります。

[色違いのバリエーションを見る](#)

[ハヤコート Mark2 \(スプレータイプ/クリアー\) \(AY-302\) の使用例を見る](#)

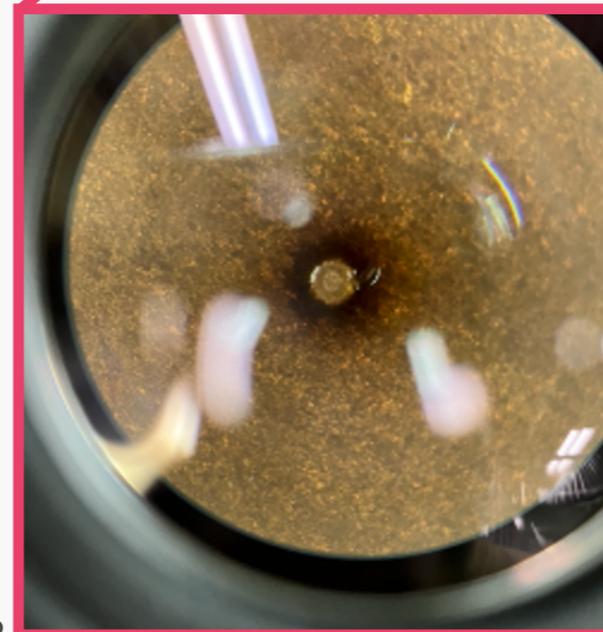
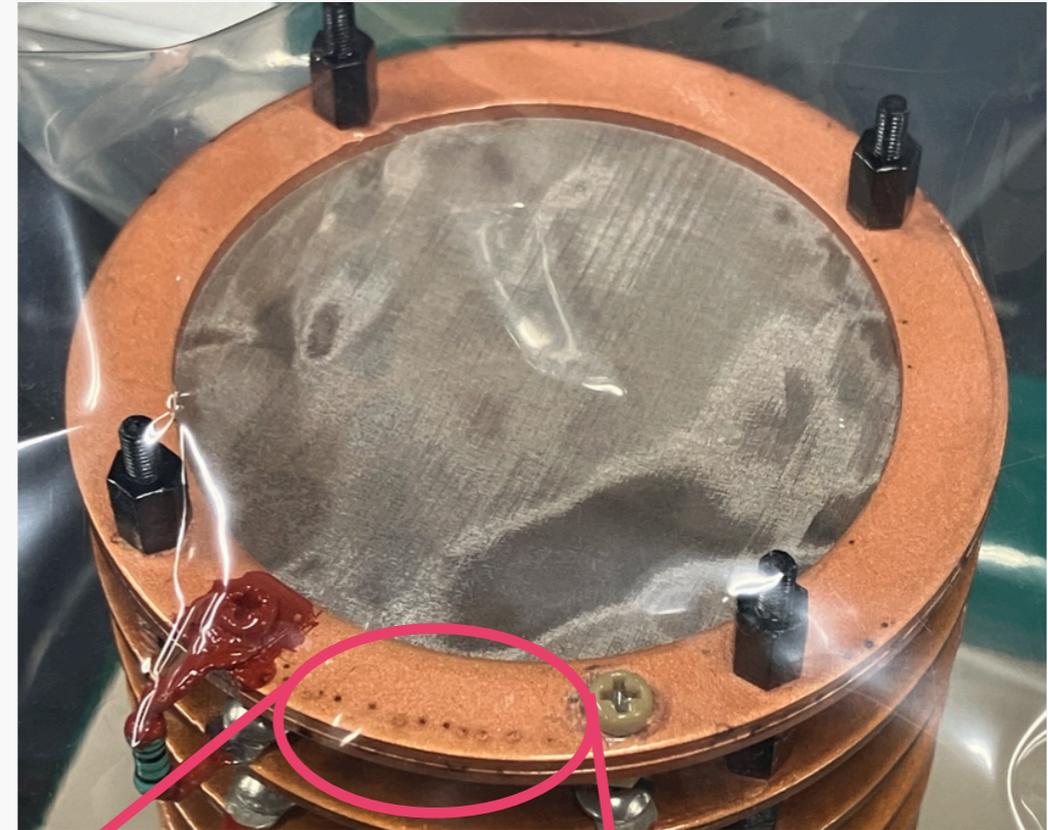


写真：ハヤコート Mark2 (スプレータイプ/クリアー) (AY-302)：本体外観



# 試行錯誤

- 絶縁コーティングを試してみる



無事放電した

顕微鏡で見ると  
コーティングを  
破って穴空いてる

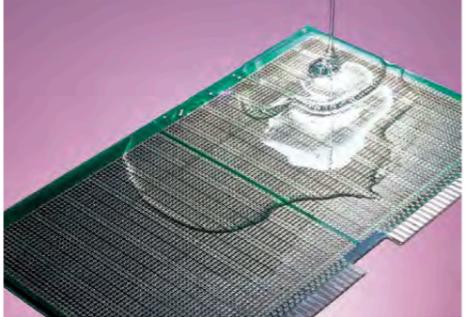
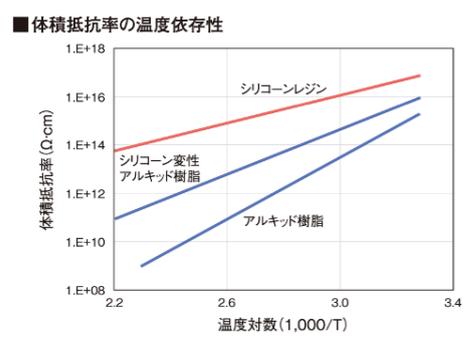
# 試行錯誤

- 別のコーティング剤を用意 (ハヤコートは除去)

→ 信越のシリコーンレジンを (KR-251)、AXEL実験で実績あり

主剤として使用

**電気絶縁用コーティング剤**  
 シリコーンレジンは、室温～200℃の幅広い温度領域で $1 \times 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上の高い水準の体積抵抗率を保持し、温度依存性の少ない優れた電気絶縁性を示します。また、被膜表面のメチル基の配向に起因し、優れた低吸水性を持っています。これらの特長から、各種エレクトロニクス部品の保護に幅広く使用されています。



プリント基板のコーティングイメージ

■被膜の電気特性

項目	製品名	KR-251
体積抵抗率*1	常態	$2.1 \times 10^{15}$
	吸湿*2	$4.4 \times 10^{12}$
比誘電率*1	50Hz	3.07
	1,000Hz	3.06
	100,000Hz	3.05
誘電正接*1	50Hz	0.0010
	1,000Hz	0.0010
	100,000Hz	0.0016

\*1 膜厚: 100μm~200μm  
 \*2 吸湿: 85℃/85%RH×4days放置後測定



隙間ないように  
 重ね塗りで  
 塗りまくり作戦

あとからわかったが重ね塗り意味なさげ  
 (溶媒のせいで溶けてしまう)

# 試行錯誤

- 別のコーティング剤を用意 (ハヤコートは除去)

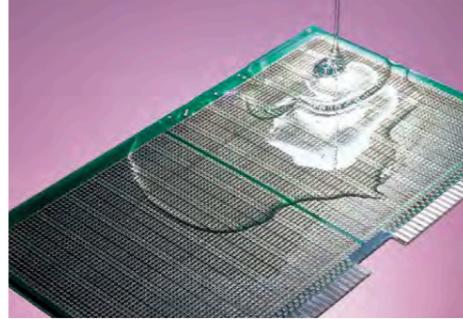
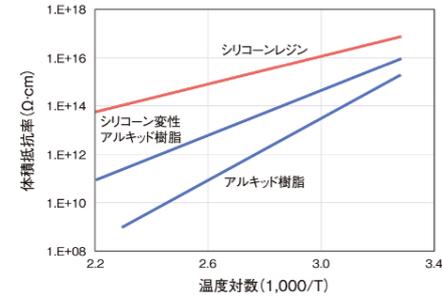
→ 信越のシリコーンレジンを (KR-251)、AXEL実験で実績あり

主剤として使用

電気絶縁用  
コーティング剤

シリコーンレジンは、室温～200℃の幅広い温度領域で $1 \times 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上の高い水準の体積抵抗率を保持し、温度依存性の少ない優れた電気絶縁性を示します。また、被膜表面のメチル基の配向に起因し、優れた低吸水性を持っています。これらの特長から、各種エレクトロニクス部品の保護に幅広く使用されています。

■ 体積抵抗率の温度依存性



プリント基板のコーティングイメージ

■ 被膜の電気特性

項目	製品名	KR-251
体積抵抗率*1	常態	$2.1 \times 10^{15}$
	吸湿*2	$4.4 \times 10^{12}$
比誘電率*1	50Hz	3.07
	1,000Hz	3.06
	100,000Hz	3.05
誘電正接*1	50Hz	0.0010
	1,000Hz	0.0010
	100,000Hz	0.0016

\*1 膜厚: 100μm~200μm  
\*2 吸湿: 85℃/85%RH×4days放置後測定

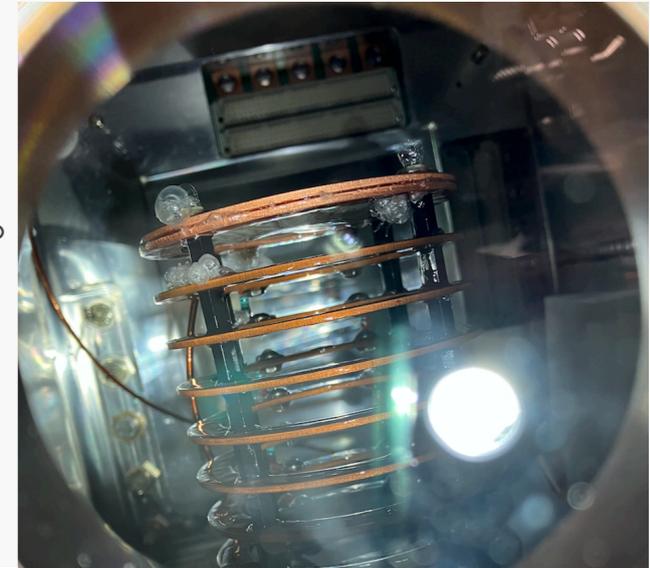
隙間ないように  
重ね塗りで  
塗りまくり作戦

あとからわかったが重ね塗り意味なさげ  
(溶媒のせいで溶けてしまう)



チェンバーで真空引き中に脱泡始まった。  
しっかり乾かしたのに。。

結果、カマキリの卵  
みたいなのができた。  
んで放電した。



# 試行錯誤

**4228A - Red Insulating Varnish**

4228A is an easy-to-use, HAPs-free, 1-part, low-viscosity insulating varnish that cures at room temperature and adheres well to many substrates including metals, glass and most plastics. This varnish insulates high-voltage parts such as motor windings and transformer coils against arcing and discharge as well as protects metals from corrosion.

The coating's distinct red color helps operators easily inspect coating coverage; however, for a clearcoat option, consider the 4226A. For insulation class H protection, consider our 4228B.

**Features & Benefits**

- Excellent dielectric properties
- Fast dry time
- HAPs-free
- Adheres well to metals, glass and many plastics
- Provides excellent protection against moisture

Part #	Net Vol.	Net Wt.	Packaging	Unboxing
4228A-55ML	55 mL	57.2 g	Bottle	
4228A-225ML	225 mL	234 g	Can	
4228A-1L	850 mL	884 g	Can	
4228A-4L	3.60 L	3.74 kg	Can	

**Technical Documents**

- [Technical Datasheet \(TDS\)](#)
- [Insulation Coatings Catalogue](#)
- [Conformal Coating Catalogue](#)

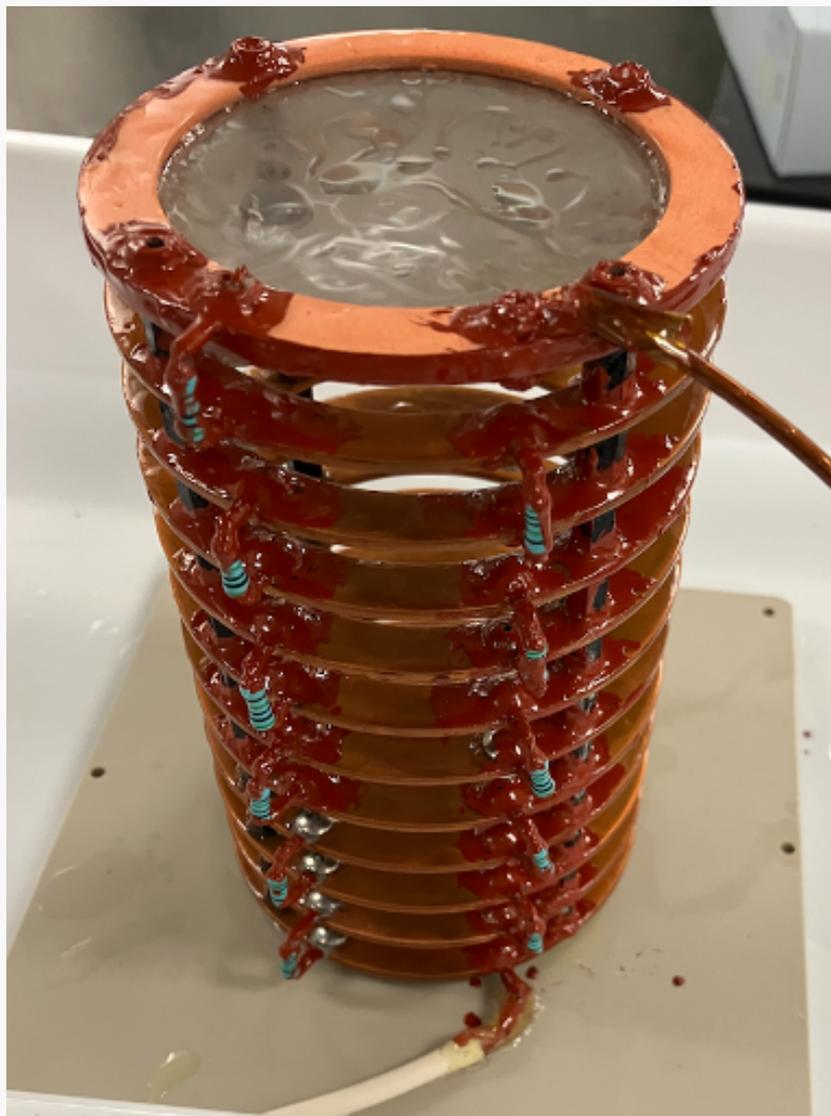


## ● 名前通り赤ワニス、NEWAGE御用達

➡ が、最近輸入制限がかかり購入できなくなった

➡ というのを知りながら潤沢に塗りまくった

▶ こんなことしてるとガス界限がざわつき始めそうでこわい



# 試行錯誤

- 名前通り赤ワニス、NEWAGE御用達

➡ が、最近輸入制限がかかり購入できなくなった

➡ というのを知りながら潤沢に塗りまくった

▶ こんなことしてるとガス界限がざわつき始めそうでこわい

**4228A - Red Insulating Varnish**

4228A is an easy-to-use, HAPs-free, 1-part, low-viscosity insulating varnish that cures at room temperature and adheres well to many substrates including metals, glass and most plastics. This varnish insulates high-voltage parts such as motor windings and transformer coils against arcing and discharge as well as protects metals from corrosion.

The coating's distinct red color helps operators easily inspect coating coverage; however, for a clearcoat option, consider the 4226A. For insulation class H protection, consider our 4228.

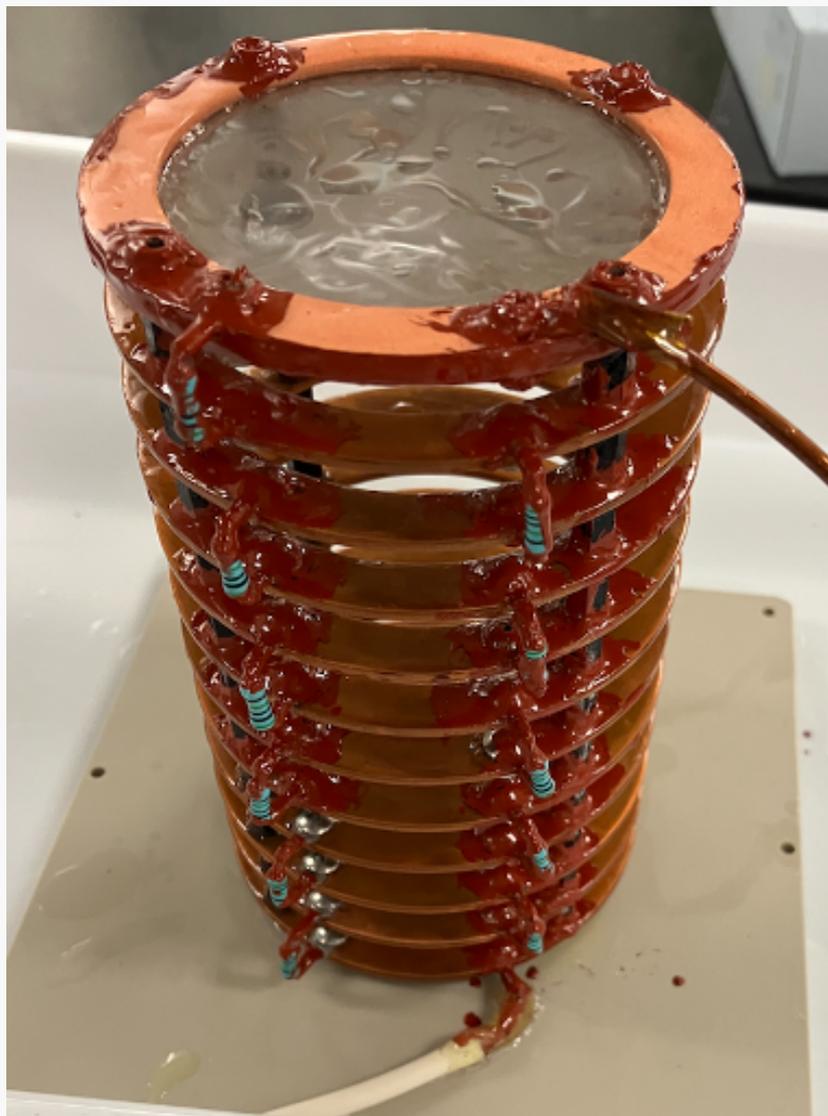
**Features & Benefits**

- Excellent dielectric properties
- Fast dry time
- HAPs-free
- Adheres well to metals, glass and many plastics
- Provides excellent protection against moisture

Part #	Net Vol.	Net Wt.	Packaging	Unboxing
4228A-55ML	55 mL	57.2 g	Bottle	
4228A-225ML	225 mL	234 g	Can	
4228A-1L	650 mL	664 g	Can	
4228A-4L	3.6 L	3.74 kg	Can	

**Technical Documents**

- [Technical Datasheet \(TDS\)](#)
- [Insulation Coatings Catalogue](#)
- [Conformal Coating Catalogue](#)



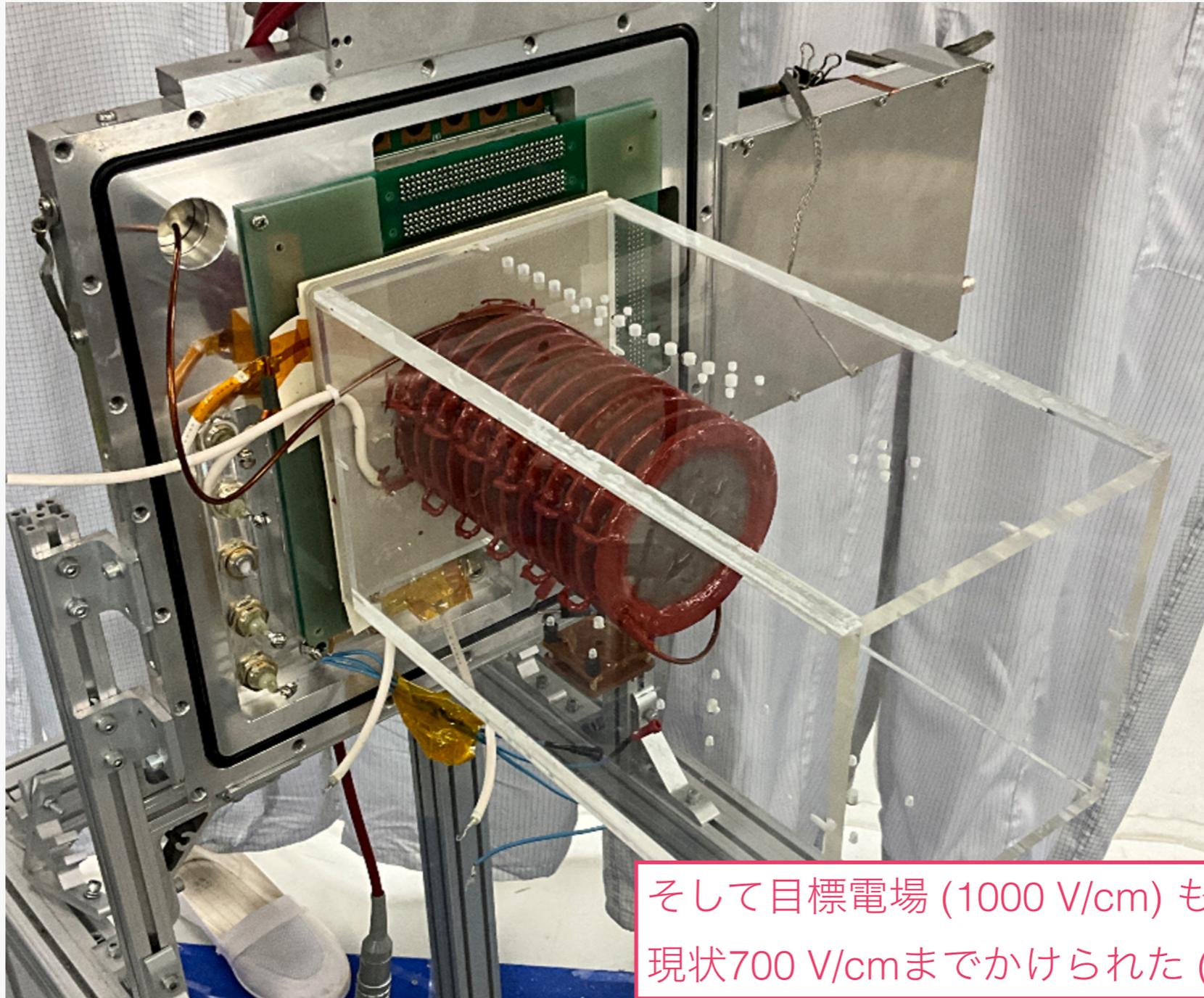
放電した。いつものように定常電流が流れて意識が飛びかけた。

が、よく見ると光ってる！銅のエッジ部分でコロナ放電が起きているのかも。

やっと放電箇所明らかに。ここをつぶせばOK

# 完成形...？

- 極めて毒々しい検出器が完成してしまった

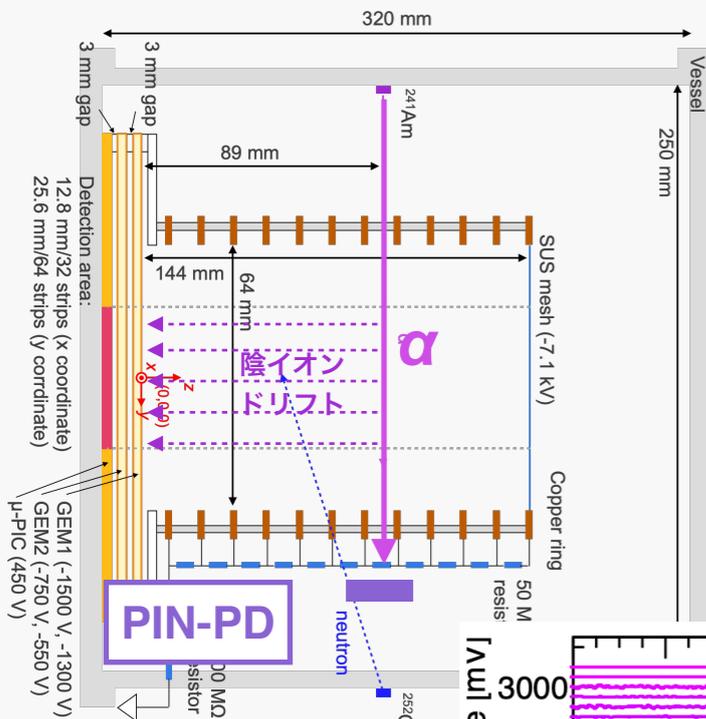


そして目標電場 (1000 V/cm) もしれっと妥協  
現状700 V/cmまでかけられた (カソード面で12 kV)

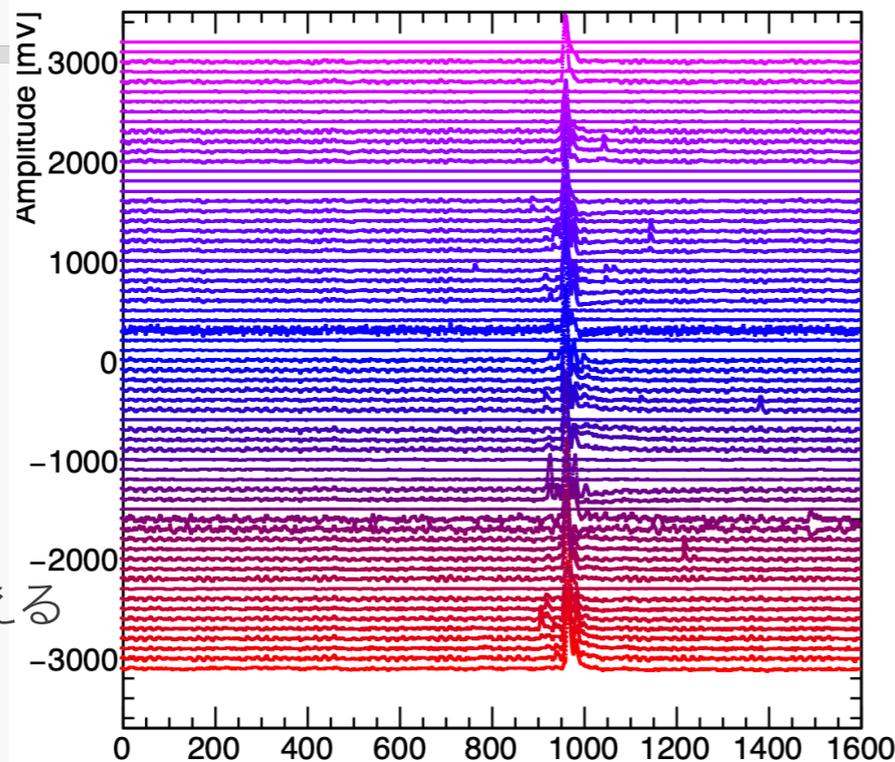
# 電場形成は大丈夫？

- 電極周りを絶縁体で覆ってよい？

➔ ナイーブには非常に弱く影響するだけなので問題なく思える



241Amからの5.4 MeV alphaを  
PIN-PDでトリガーして  
ドリフト速度測定

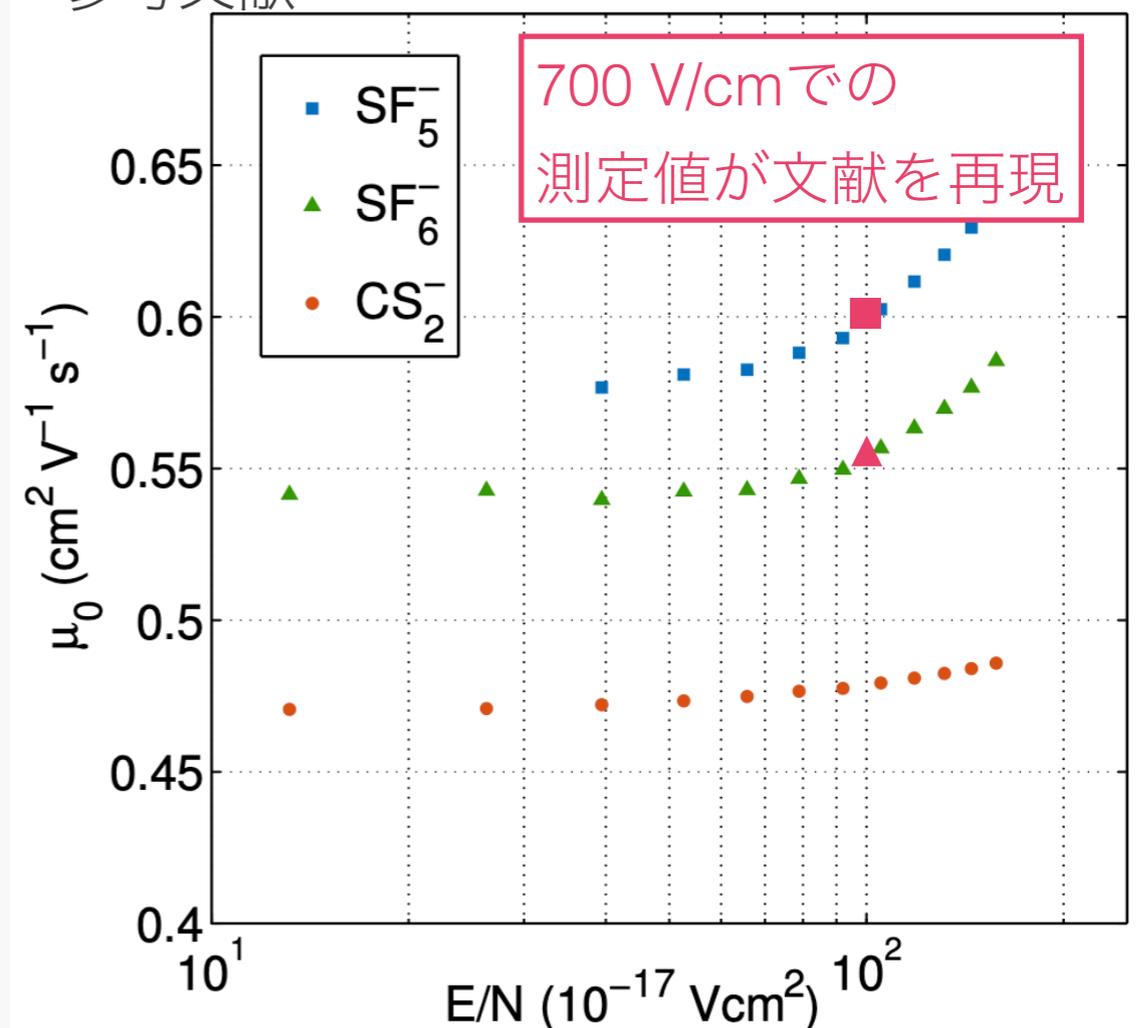


SF<sub>6</sub><sup>-</sup>とSF<sub>5</sub><sup>-</sup>を  
両方検出できた  
(新しいことでないが  
検出器が無事再起動)

まだちょこちょこ見える  
他の成分は要study

参考文献

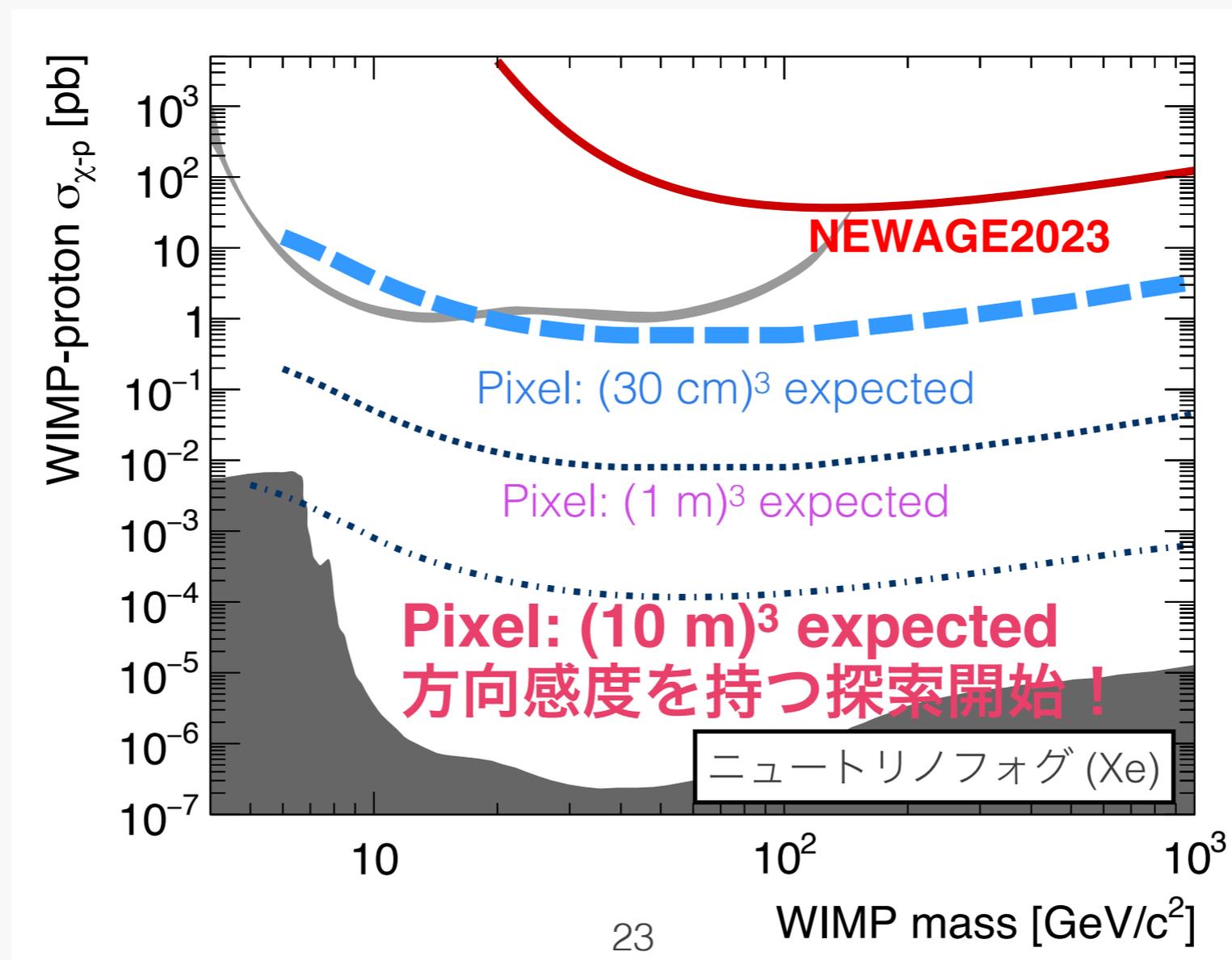
N.S. Phan et al 2017 JINST 12 P02012



一様性評価としては甘いが大勢に問題なさそう

# 将来展望

- 電場改善までできたが肝心のgas studyは実はこれから
- 陰イオンガス導入に加えて検出器の微細化もしたい
  - ➔ ピクセルガスTPC (以前までの若手研究会での発表)



# 結論

- 方向感度をもつ暗黒物質探索実験推進中
  - ➔ ガスTPCで短飛跡の3次元再構成手法確立
- 陰イオンガスTPCはニュートリノフォグ開拓へのキーデバイス
  - ➔ ただし挙動を理解しきれてないのでうまく手懐けたい
- 低圧ガスに高電圧をかけることがいかに難しいか思い知った
  - ➔ 現状は絶縁コーティングで凌いでいる➔いくらか改善できた
- この検出器で暗黒物質探索に向けた基礎研究をする予定
  - ➔ ピクセル読み出しで  $(10\text{ m})^3$  検出器を作ってXeニュートリノフォグ開拓！

# Backup