



# 大型ガスTPCのための モジュール型検出器の動作実験

---

2023/2/20 ICEPPシンポジウム

神戸大学 M1大藤瑞乃



# 大型ガスTPCのための モジュール型検出器の動作実験 など, 大型ガスTPCのための研究

---

2023/2/20 ICEPPシンポジウム

神戸大学 M1大藤瑞乃

# 目次

---

- 概要
- イン트로ダクション
  - 暗黒物質の直接探索
  - NEWAGE実験
  - 開発中の大型検出器
- ガス不純物フィルターについての研究
- 電場の一様性についての研究
- モジュール型検出器の動作実験
- まとめ

# 目次

---

- **概要**
- インTRODクシヨン
  - 暗黒物質の直接探索
  - NEWAGE実験
  - 開発中の大型検出器
- ガス不純物フィルターについての研究
- 電場の一様性についての研究
- モジュール型検出器の動作実験
- まとめ

# 概要

## ➤ NEWAGE実験

- 方向に感度を持つ暗黒物質の直接探索
- 大型TPCを開発中

## ➤ 大型TPCのための研究

- ガス不純物フィルター
- 電場の一様性
- モジュールの動作確認



▲開発中の大型検出器

# 目次

---

- 概要
- **イントロダクション**
  - 暗黒物質の直接探索
  - NEWAGE実験
  - 開発中の大型検出器
- ガス不純物フィルターについての研究
- 電場の一様性についての研究
- モジュール型検出器の動作実験
- まとめ

# イントロダクション

## ➤ 暗黒物質(DM)

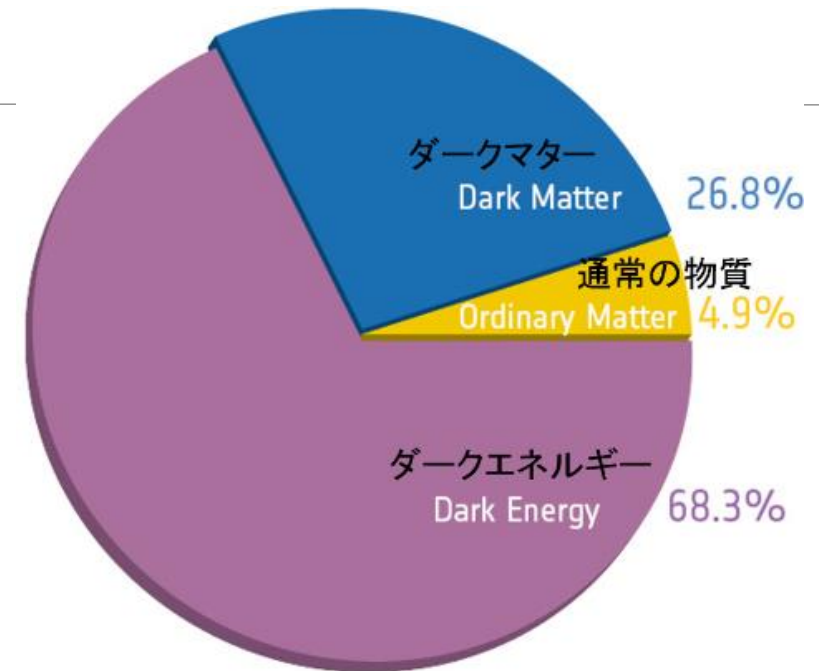
➤ 光で観測することができない物質

## ➤ WIMPs : Weakly Interacting Massive Particles

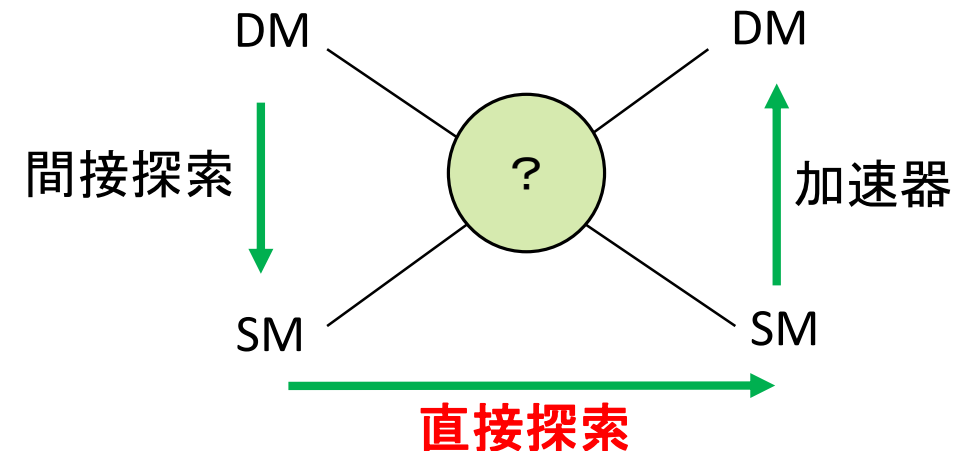
➤ DMの候補

## ➤ 暗黒物質の直接探索

➤ 標準理論(SM)粒子とDMが直接相互作用する事象を探索

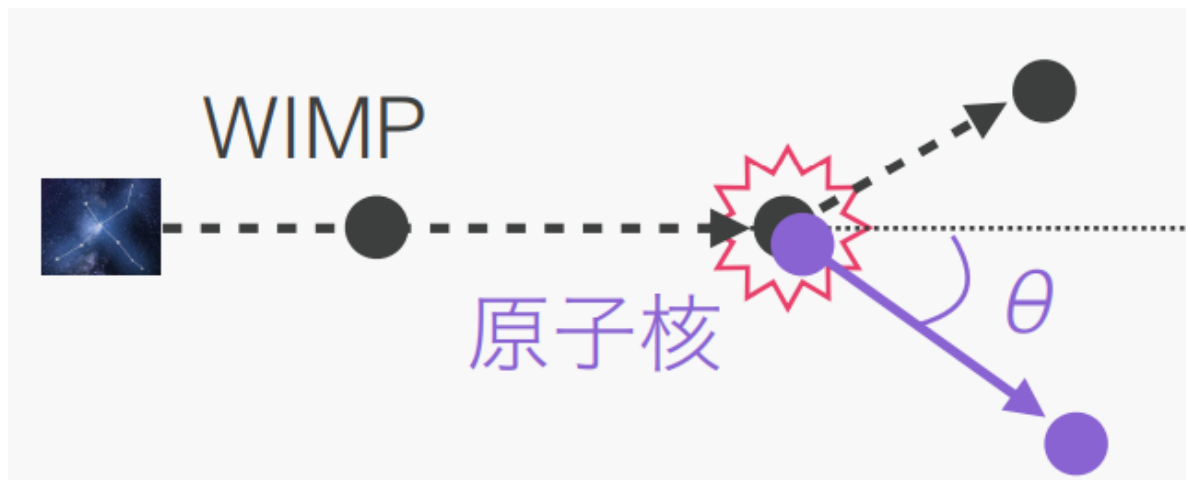
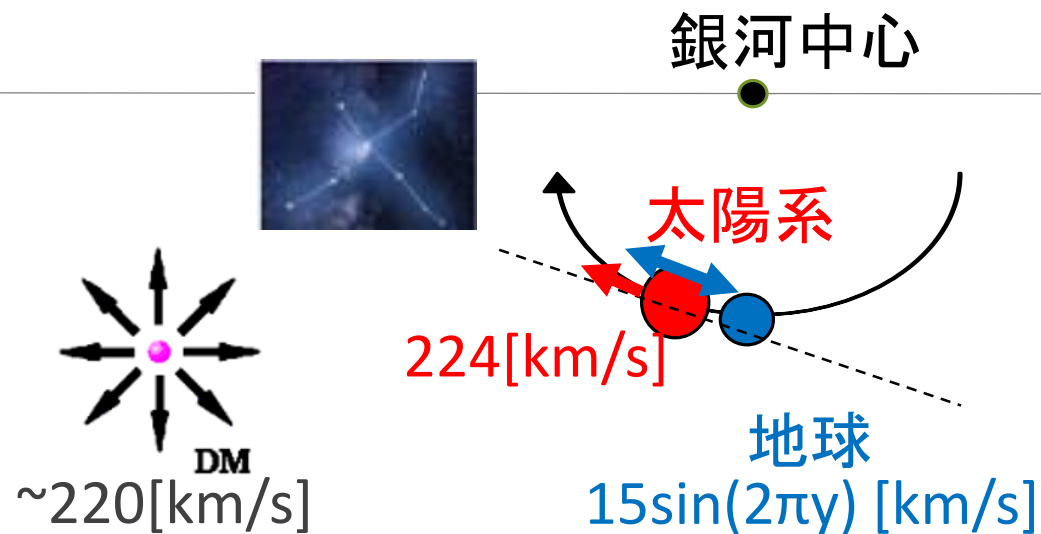


▲ 宇宙全体のエネルギー密度

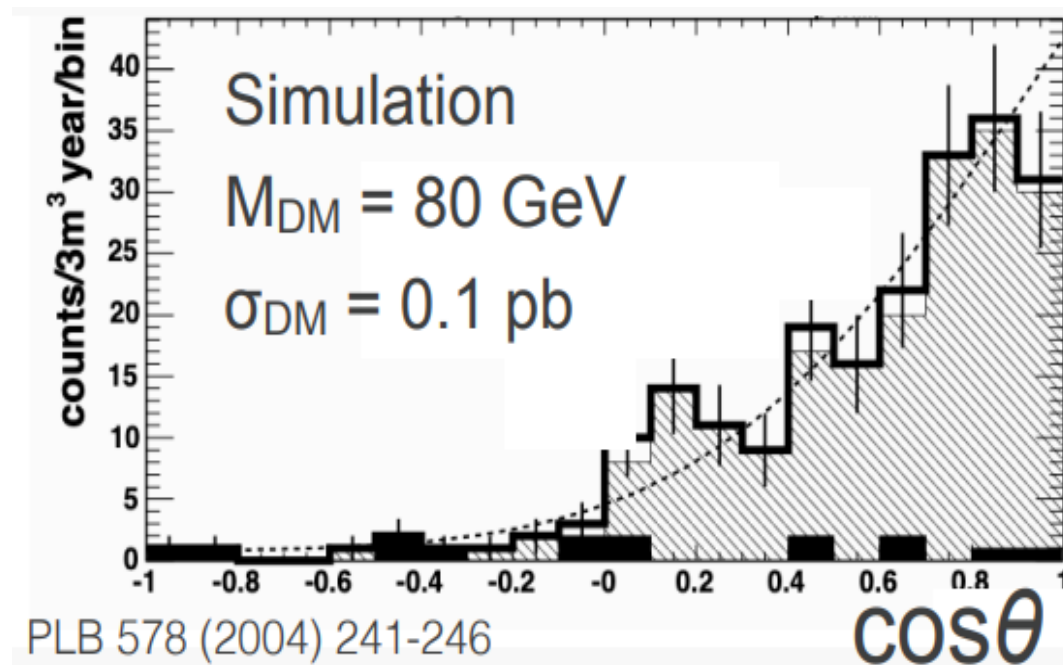


# イントロダクション

- 方向に感度を持つ暗黒物質の直接探索
  - 太陽系: 運動方向にはくちょう座が見える
    - DMの運動が銀河に対して等方的であると仮定
    - 到来方向は, はくちょう座の方向に偏りが生じる
  - DM発見の確実な証拠となる



▲ WIMPと原子核の反跳の様子



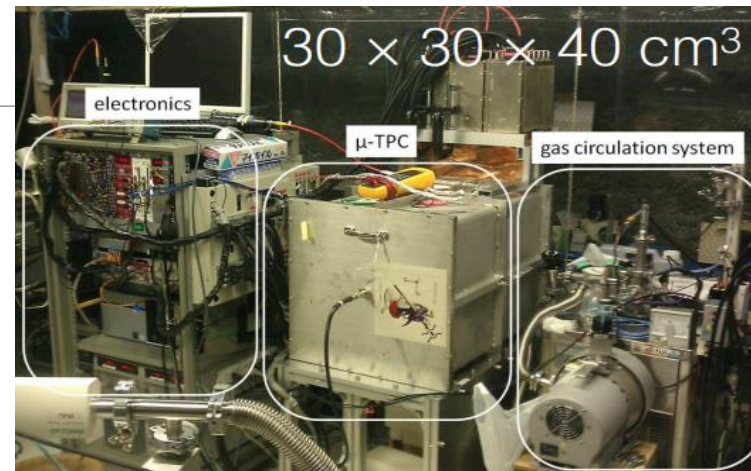
▲ 反跳角の分布



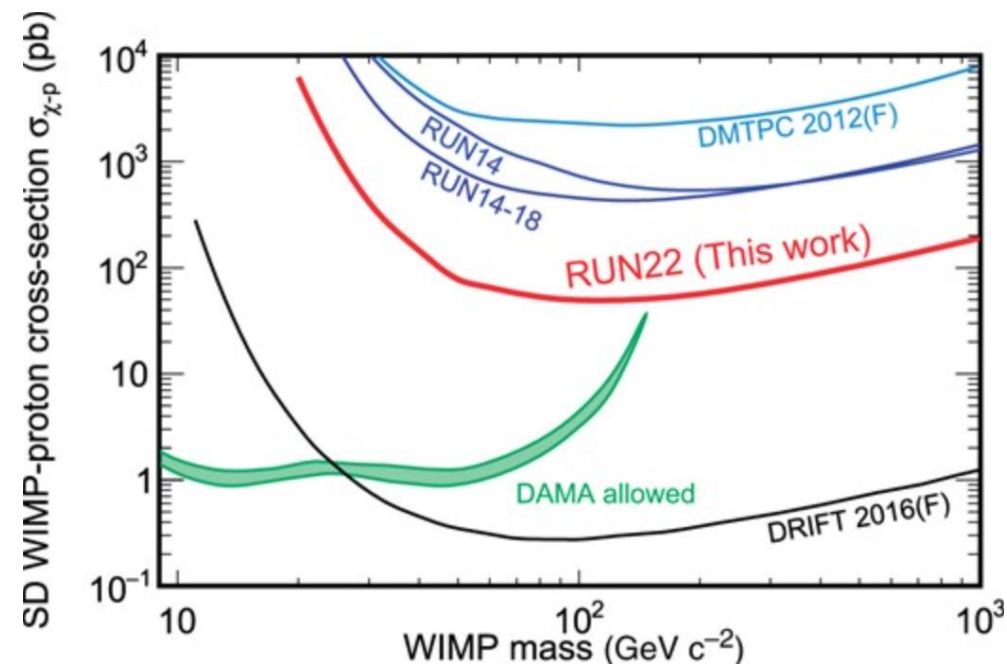
# イントロダクション

## ➤ NEWAGE実験

- 方向に感度を持つ暗黒物質の直接探索
- 30 cm × 30 cm × 40 cmの検出器が稼働中@神岡
- 1m<sup>3</sup>の大型検出器を開発中



▲ 運転中の検出器



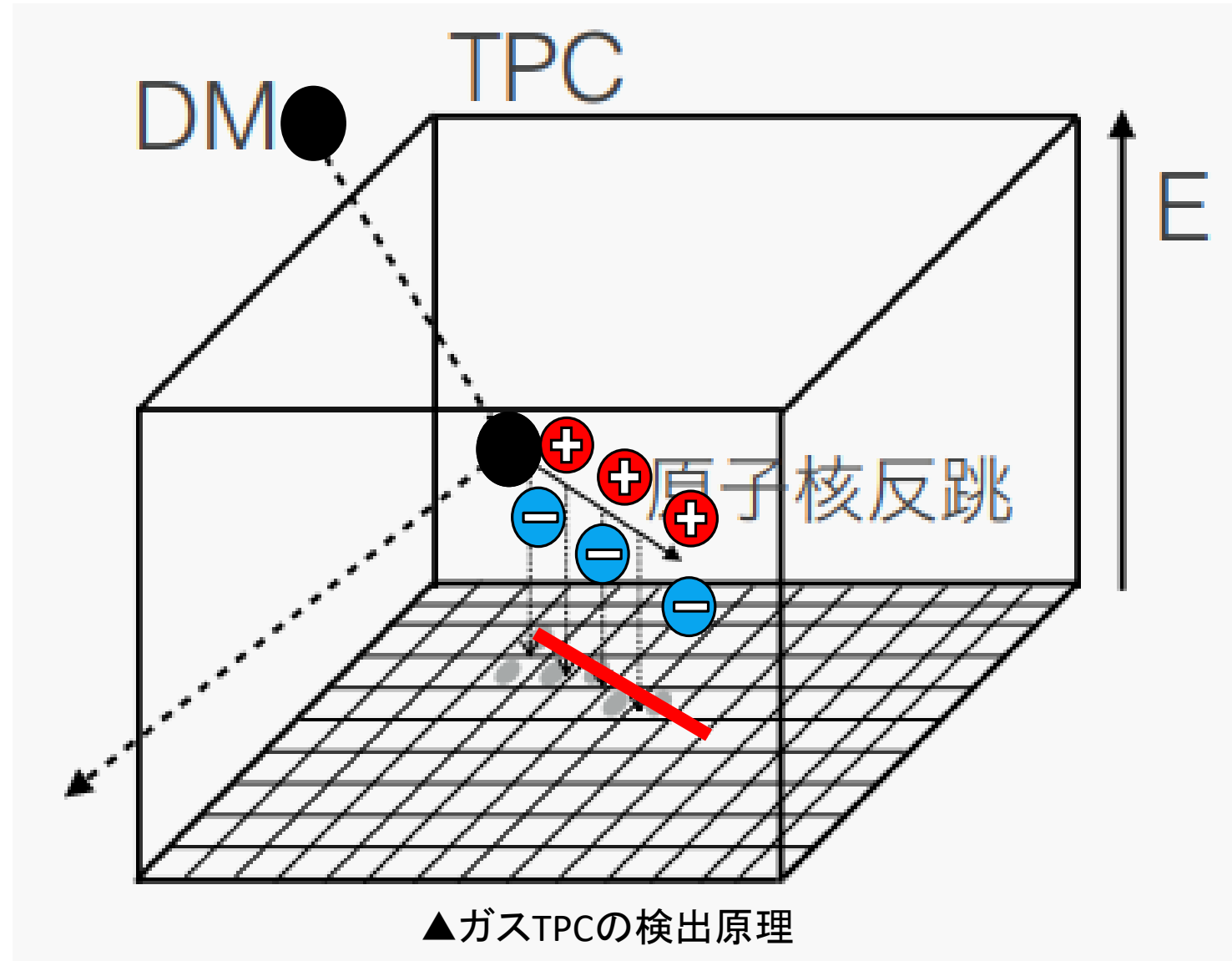
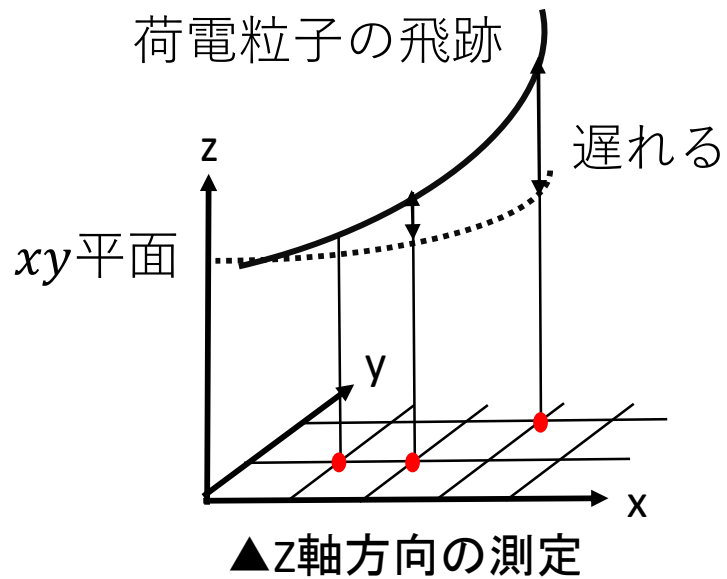
▲ NEWAGE実験による制限曲線\*

\*PTEP 2021 (2021) 6, 063F01

# ガスTPC

## ➤ ガスTPCの検出原理

- DMとガス中の原子核が反跳
- 原子核の飛跡にそってガスが電離される
- 電場に従い電子/陰イオンがドリフトされる



# NEWAGE実験での検出器

## ➤ ガスTPC

➤ GEM +  $\mu$ -PICで増幅

➤ GEM

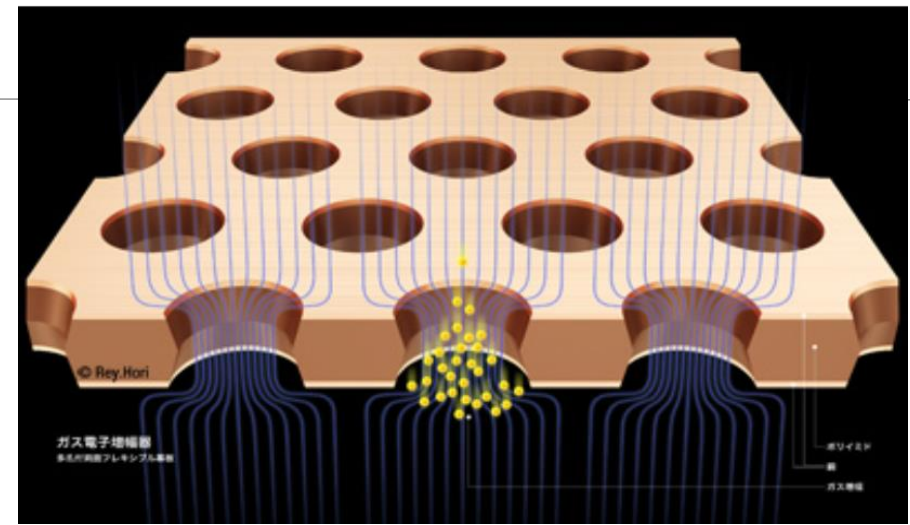
➤ 厚さ100  $\mu\text{m}$ , 140  $\mu\text{m}$ 間隔で直径70  $\mu\text{m}$ の穴

➤ 両側の電極に異なる電圧を印加することで強い電場を生成, 雪崩増幅を起こす

➤  $\mu$ -PIC

➤ アノード近傍の強い電場によりさらに増幅

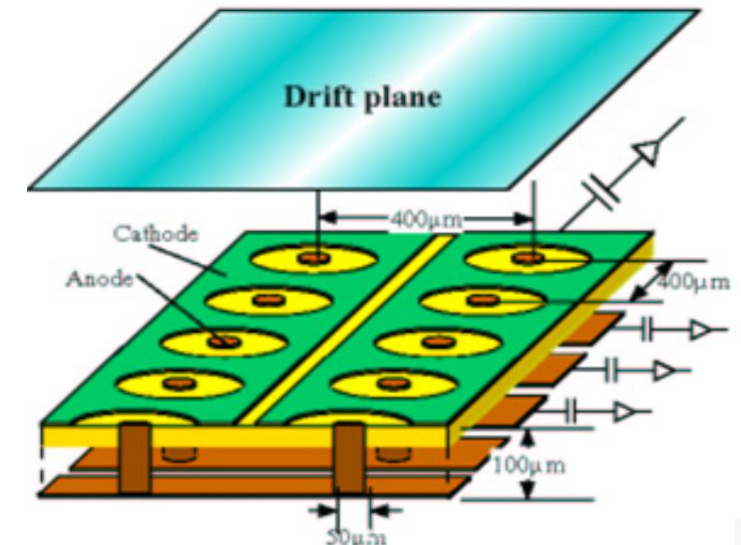
➤ 400  $\mu\text{m}$ ピッチのストリップで2次元読み出し



▲ GEM

▼  $\mu$ -PIC

Micro Pixel Chamber

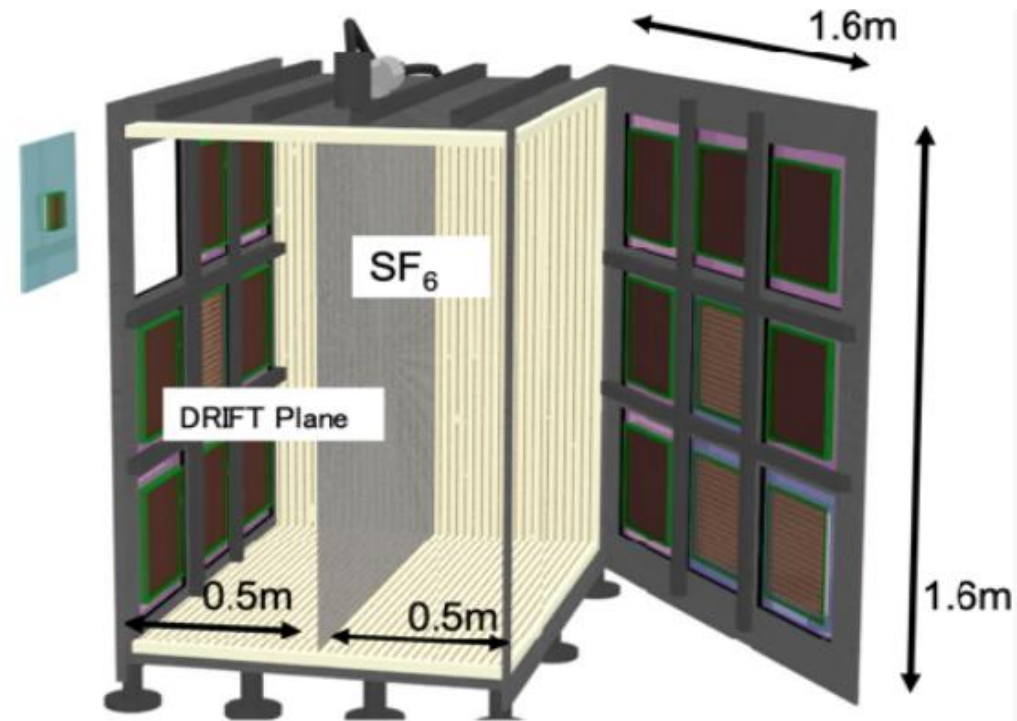




# 開発中の大型検出器

## ➤ 検出器詳細

- 検出領域  $\sim 1 \text{ m}^3$
- 低圧SF<sub>6</sub>ガス
- 電極枠にアクリルを使用
- 18ヶのモジュール検出器



▲大型検出器のサイズ



▲電極枠のアクリル

# 目次

---

- 概要
- インTRODクシヨン
  - 暗黒物質の直接探索
  - NEWAGE実験
  - 開発中の大型検出器
- **ガス不純物フィルターについての研究**
- 電場の一様性についての研究
- モジュール型検出器の動作実験
- まとめ

# ガス不純物フィルター

## ➤ 予想される不純物

➤ H<sub>2</sub>O: 2500 ppm以下を要請

➤ SF<sub>6</sub>ガスの挙動に影響

➤ 大気中の水分がアクリル表面に付着, 時間経過で放出される

➤ 露点計で測定

➤ 20 Torrでは19000 ppmまで測定可能

➤ <sup>222</sup>Rn: ~0.1 mBq/m<sup>3</sup>以下を要請

➤ 検出器内部表面などに付着

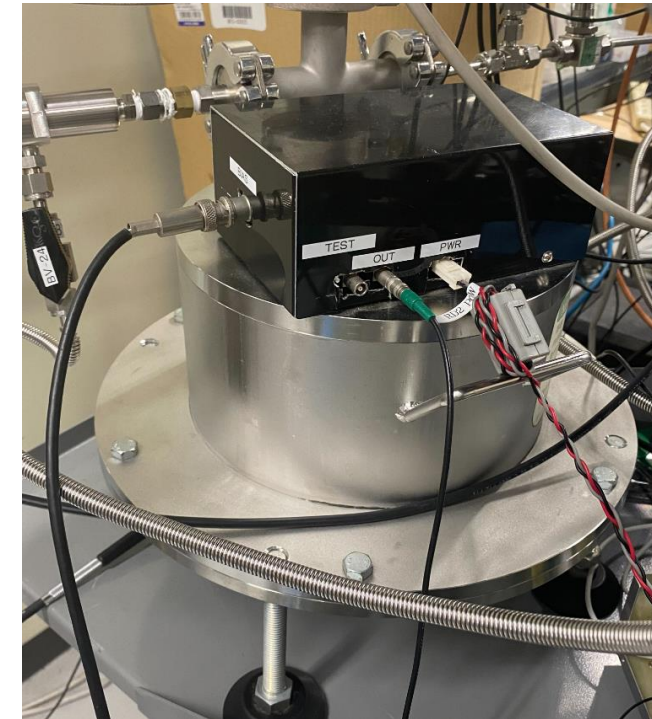
➤ 娘核の<sup>218</sup>Po, <sup>214</sup>Poが崩壊, α線を放出する

➤ 静電捕集型Rn計で測定

➤ 3.8 L



▲ 露点計

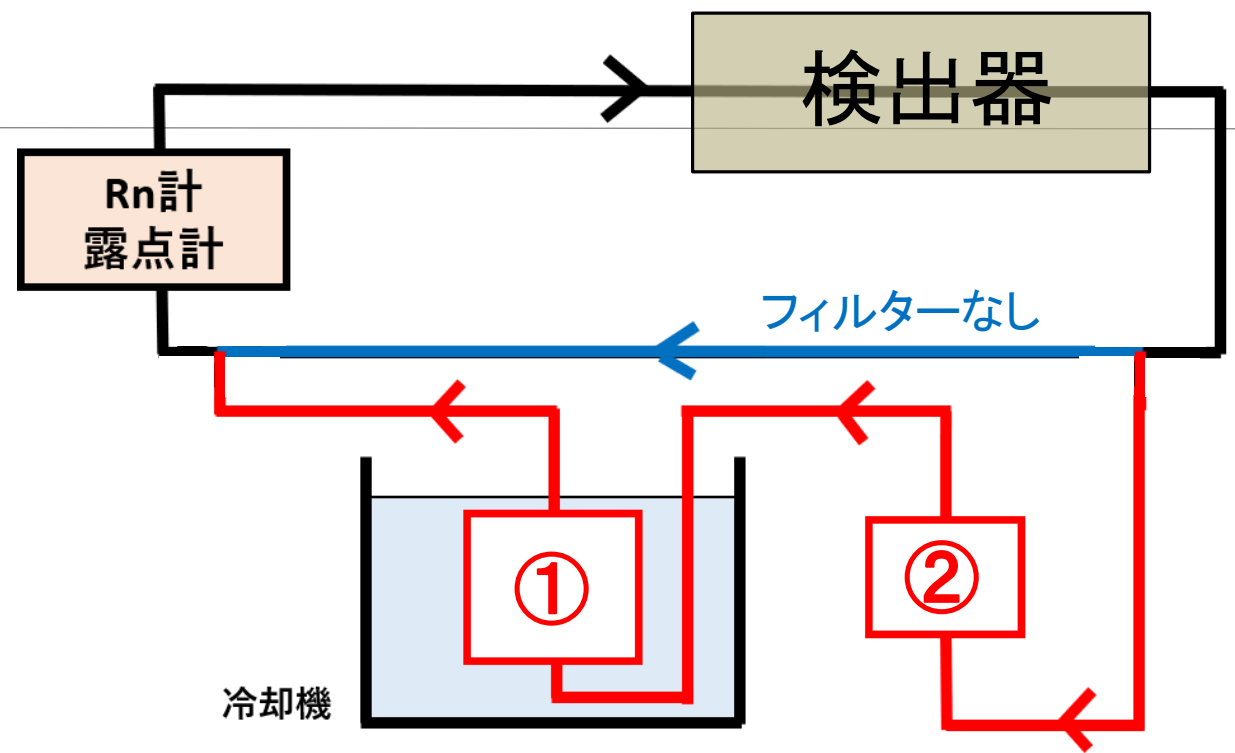


▲ 静電捕集型Rn計

# ガス不純物フィルター

- 低BGゼオライト – 100 g : ①
  - 日本大学・小川さんが開発 2021年製造
  - Arガスに関しては冷却時<sup>222</sup>Rnを90%以上除去
  - 5Å(H<sub>2</sub>O, Rnともに吸着)の格子構造

- ゼオラム – 0(10<sup>2</sup>) g : ②
  - 3Å(H<sub>2</sub>Oのみ吸着)の格子構造
  - 1.40~2.36 mmの粒



▲ 低BGゼオライト: ①



▲ ゼオラム: ②

# ガス不純物フィルター

➤ H<sub>2</sub>O : 2500 ppm以下を要請

➤ 循環系のみ

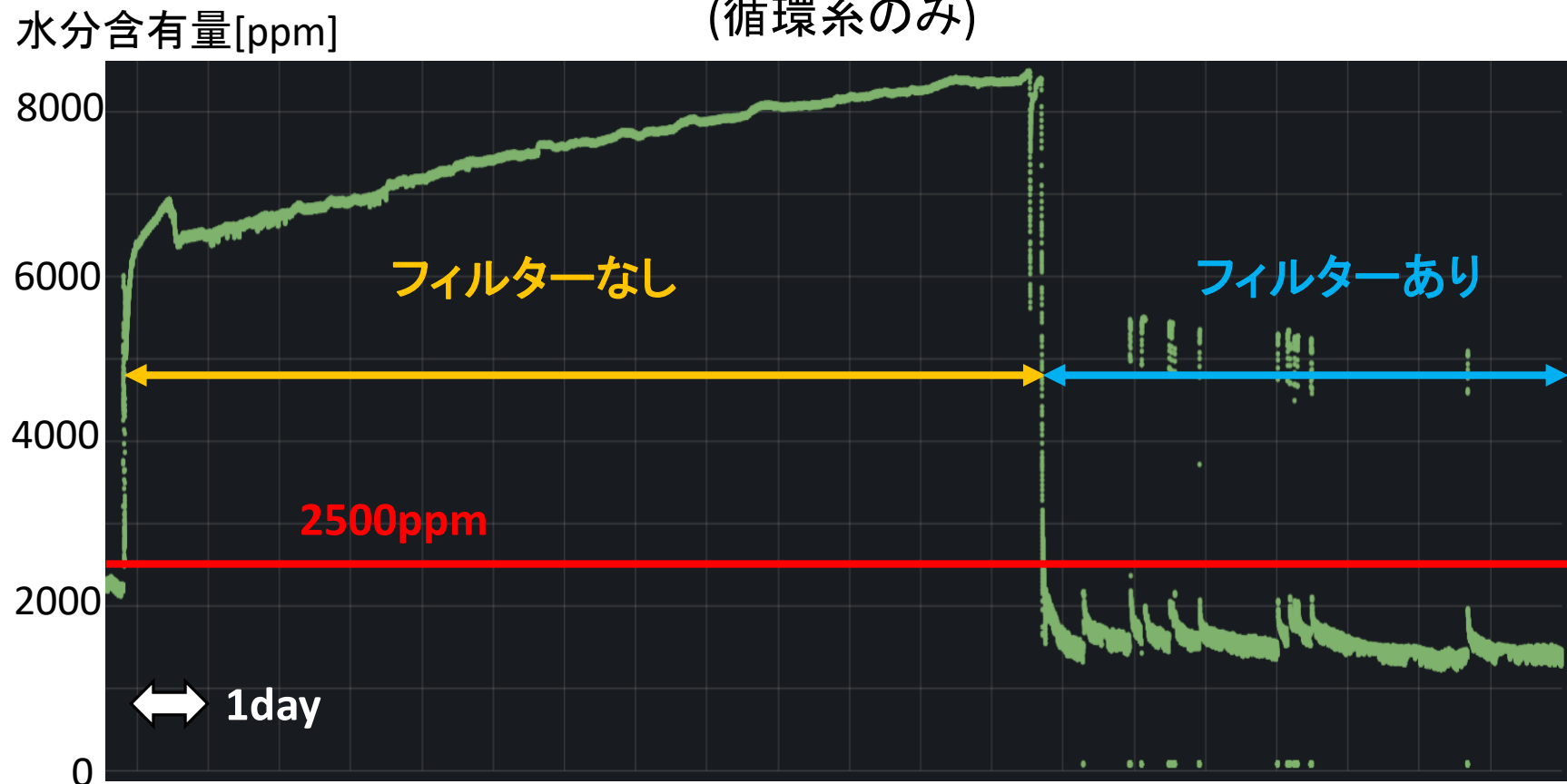
➤ 要請達成

➤ 検出器込み

➤ 要請達成

➤ 循環系のみと同程度

フィルターによる水分含有量の変化  
(循環系のみ)





# ガス不純物フィルター

➤  $^{222}\text{Rn}$  :  $\sim 0.1 \text{ mBq/m}^3$ 以下を要請

➤ 循環系のみ

➤ フィルター不使用時の**60%削減**

➤ 検出器込み

➤  $^{214}\text{Po}$  :  $< 0.94 \text{ counts/day}$  (95%CL)

➤  $^{218}\text{Po}$  :  $0.75^{+0.73}_{-0.41} \text{ counts/day}$  ( $1\sigma$ )

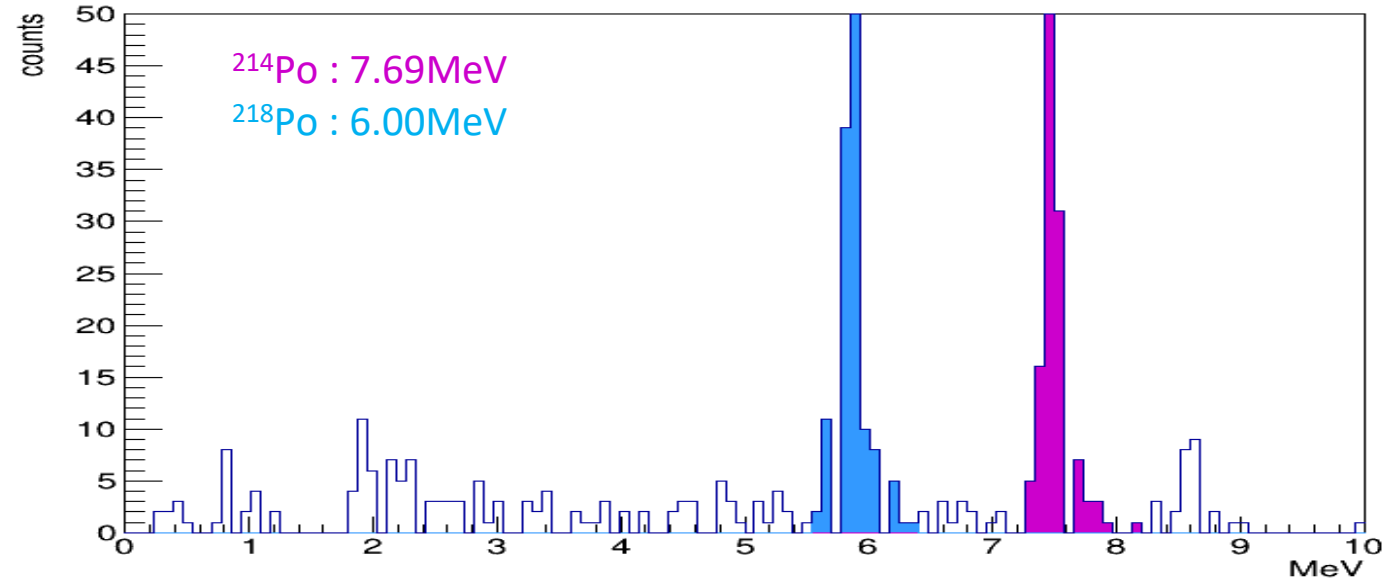
➤ 展望

➤  $^{222}\text{Rn}$ 検出量の絶対評価

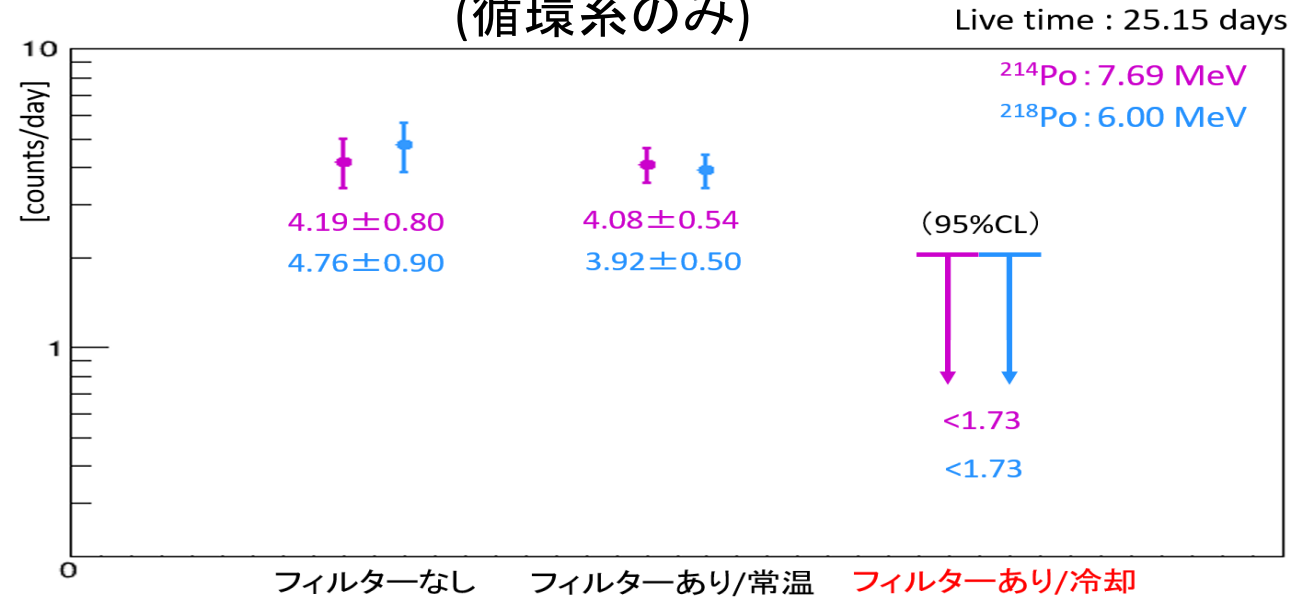
➤ 適切なフィルター量の決定

➤ 他のガス分子の絶対含有量

## Poのエネルギースペクトル



## フィルターによる $^{222}\text{Rn}$ 検出量の変化 (循環系のみ)

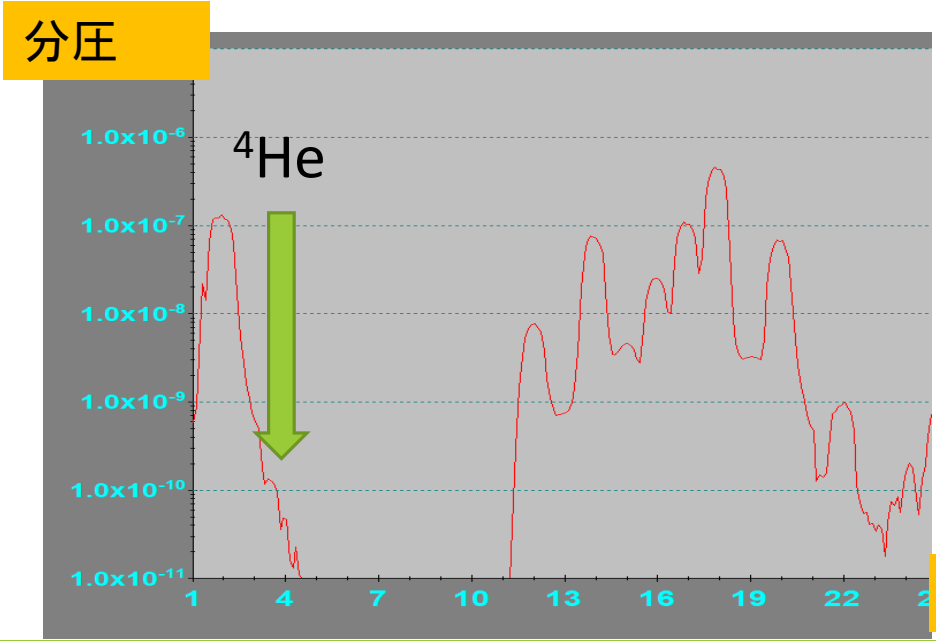


# RGA

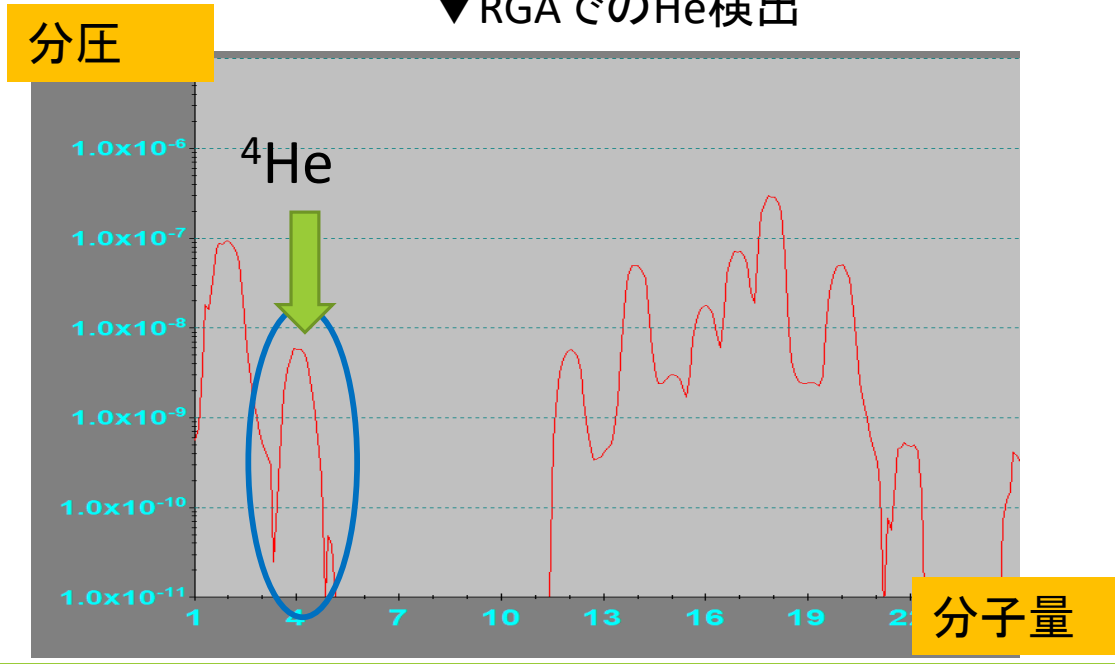
- RGA: 循環系内のガス不純物を調べる
  - RGA – Residual Gas Analyzer
  - 真空状態に含まれる残留ガスを分圧で測定
    - 真空引きしつつ少しだけ流入させて測定する
  - 時間変化を確認できる



▲ RGA



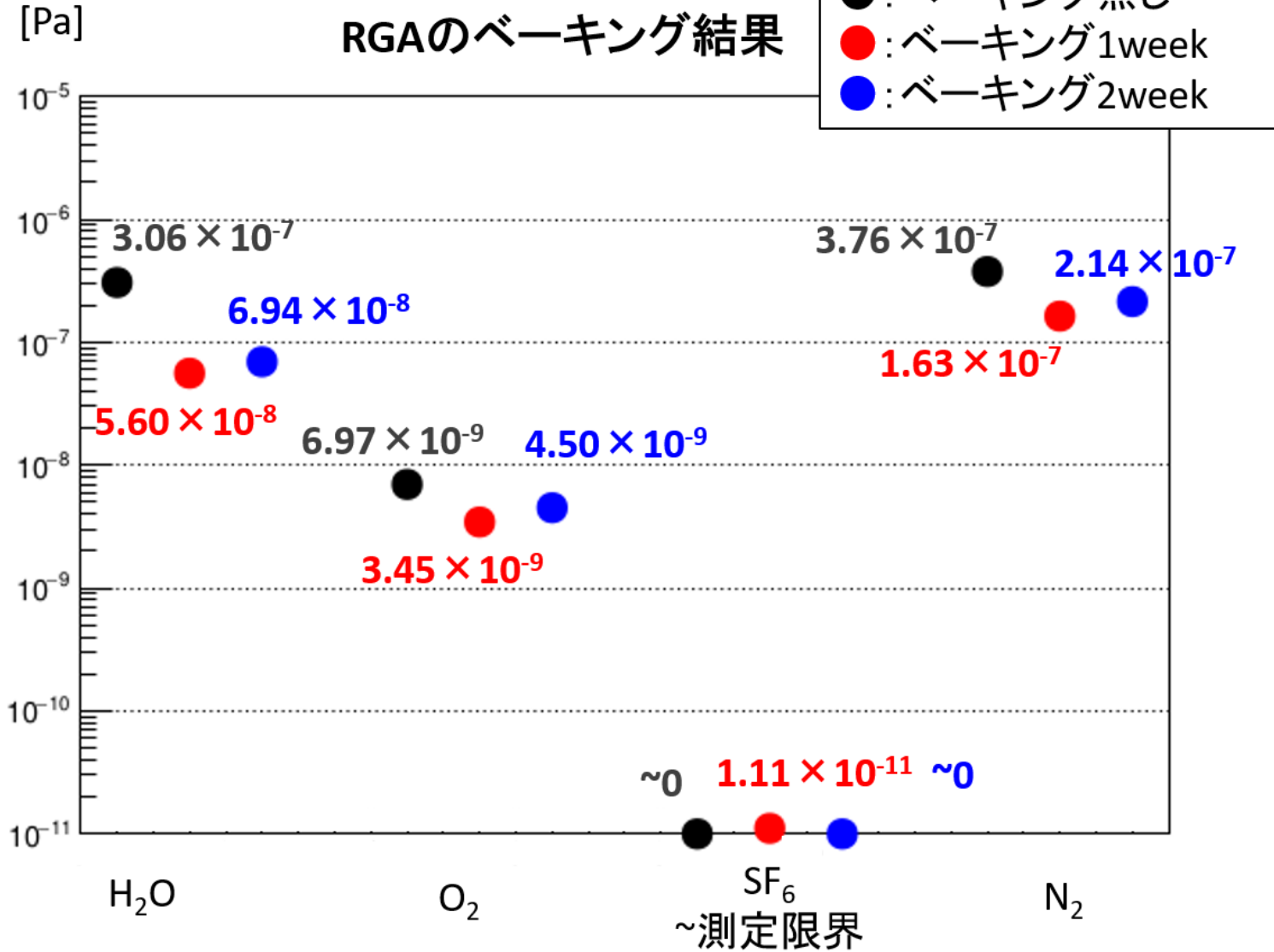
Heを噴射  
→



▼ RGAでのHe検出

# RGA

- RGA自体がバックグラウンドを含む
- ベーキングにより減少
- 実際に運用して十分か確認



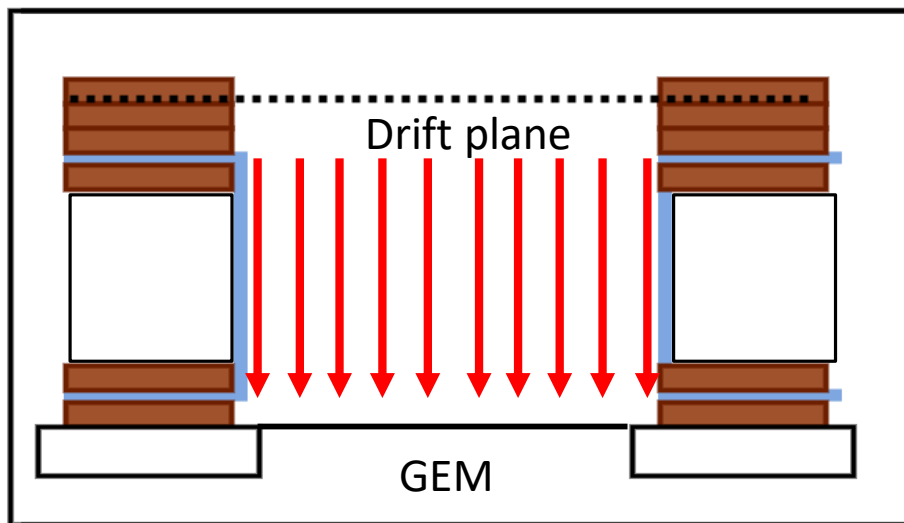
# 目次

---

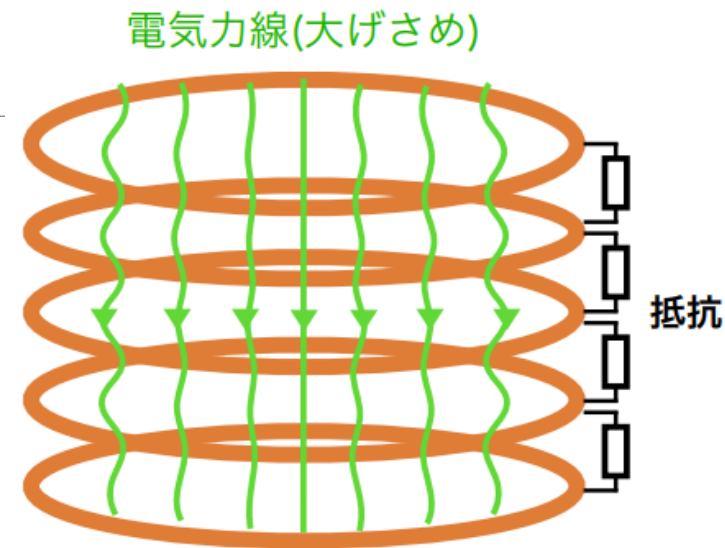
- 概要
- イントロダクション
  - 暗黒物質の直接探索
  - NEWAGE実験
  - 開発中の大型検出器
- ガス不純物フィルターについての研究
- **電場の一様性についての研究**
- モジュール型検出器の動作実験
- まとめ

# 高抵抗シートを用いたTPC

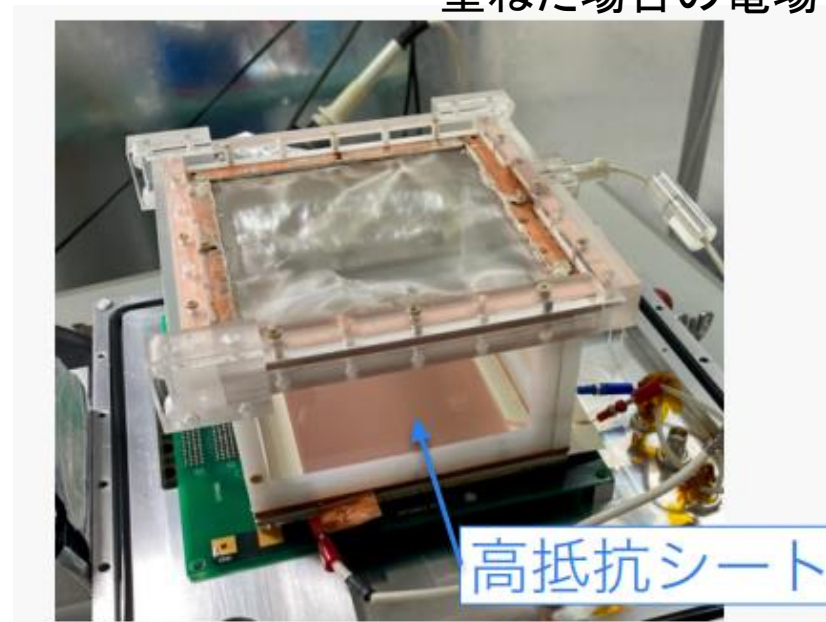
- 高抵抗シート: アキレス社製ビニラス
  - 厚さ0.2 mm
  - 体積抵抗率 $10^{10} \Omega\text{cm}$ の一樣抵抗
- 一樣電場を形成可能
  - 複数リングを連ねるのに比べむらがなく, 電場一樣性が高い



▲高抵抗シートを用いたTPC

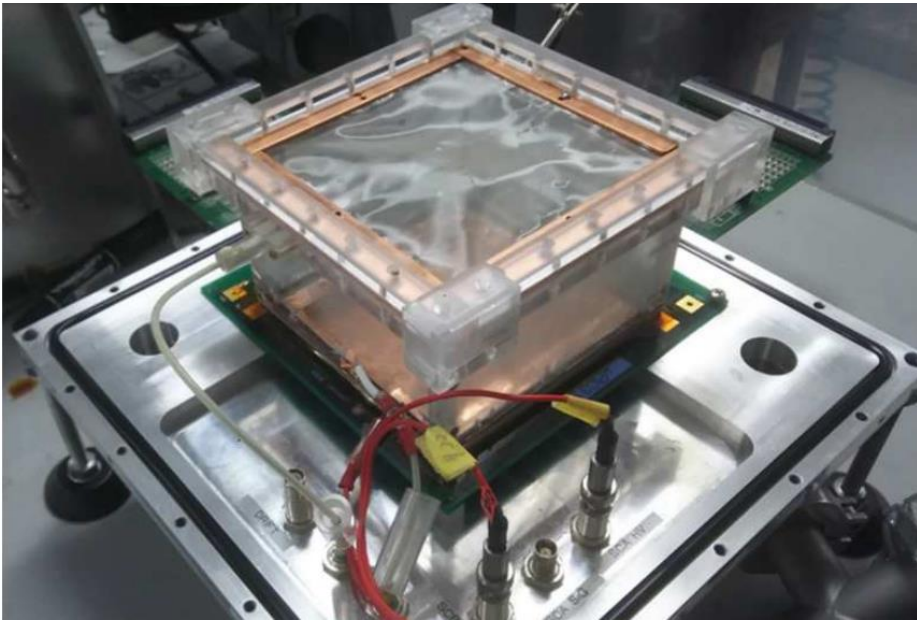


▲金属のリングを重ねた場合の電場

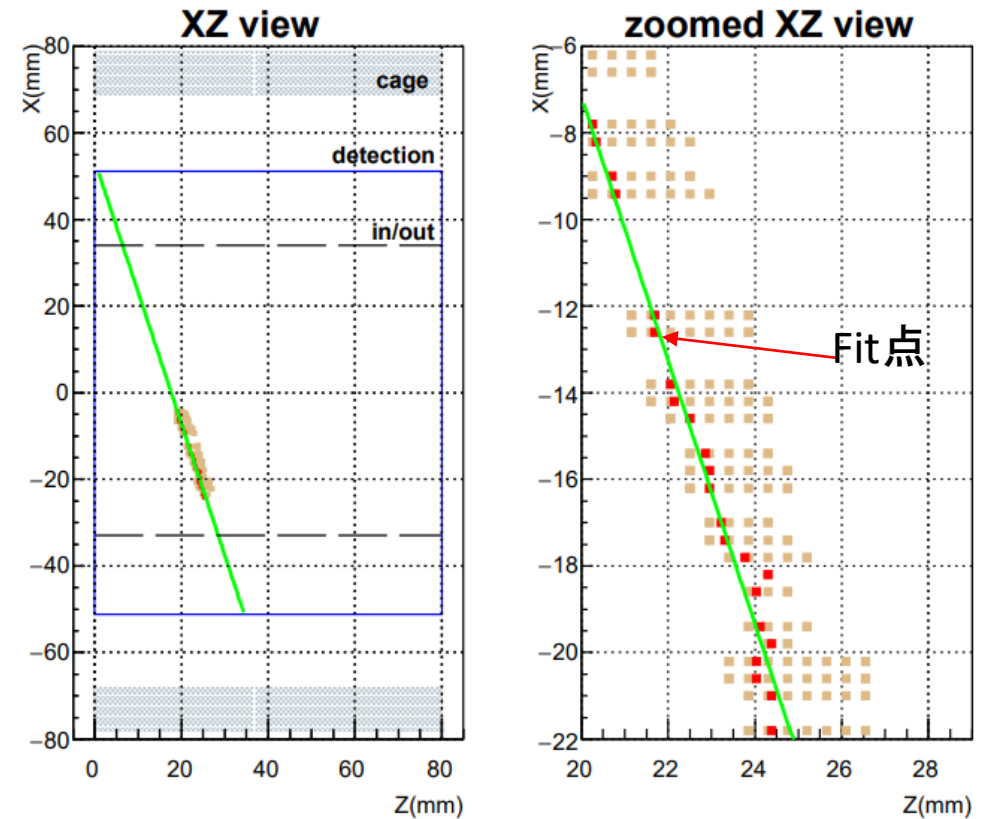


# 高抵抗シートを用いたTPC

- 短期的な性能は確認されている
  - (PTEP 2019 (2019) 6, 063H01) 1903.01663
  - フィールドケージはアクリル
- 10cm角 $\mu$ -PICと組み合わせて $\mu$ の飛跡を取得



▲実験を行ったTPC

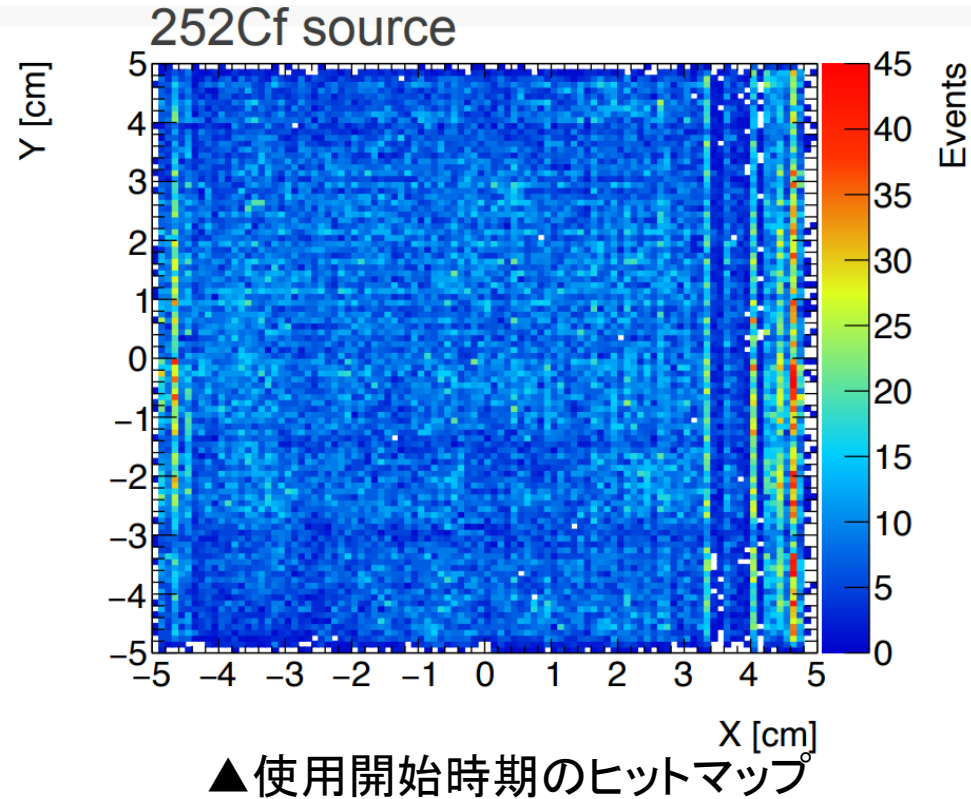


▲ $\mu$ の飛跡解析



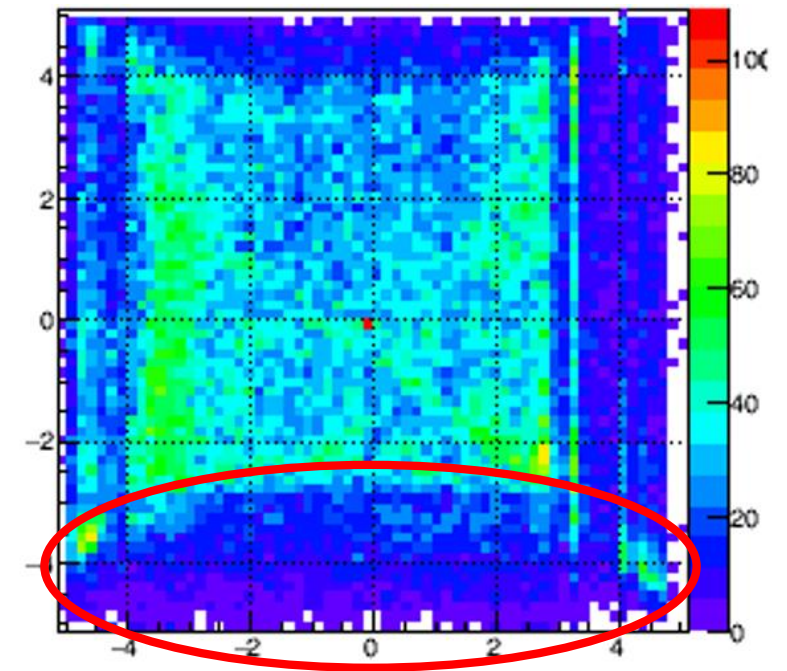
# 高抵抗シートを用いたTPC

- 電場の長期安定性に問題がある
  - チェンバーの壁に近い部分のヒット分布が欠ける
  - 安定的に使用できるのは長くととも10か月以下



約10か月

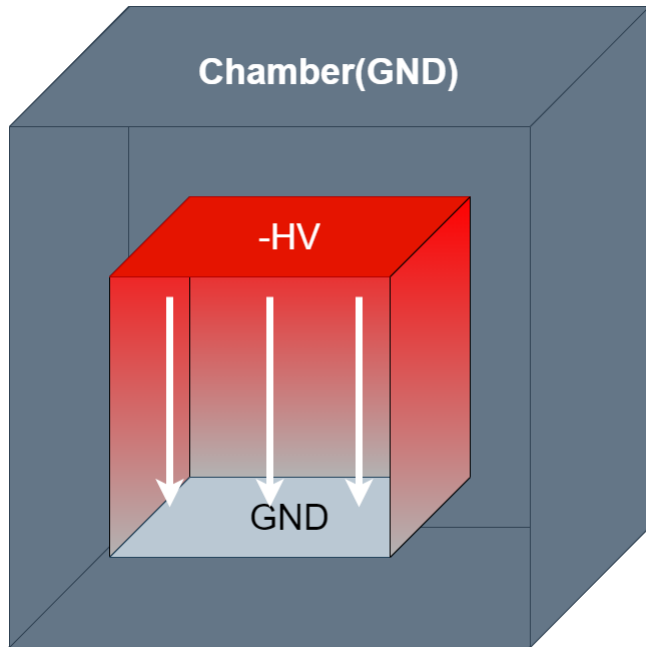
すべての辺でイベントが減少



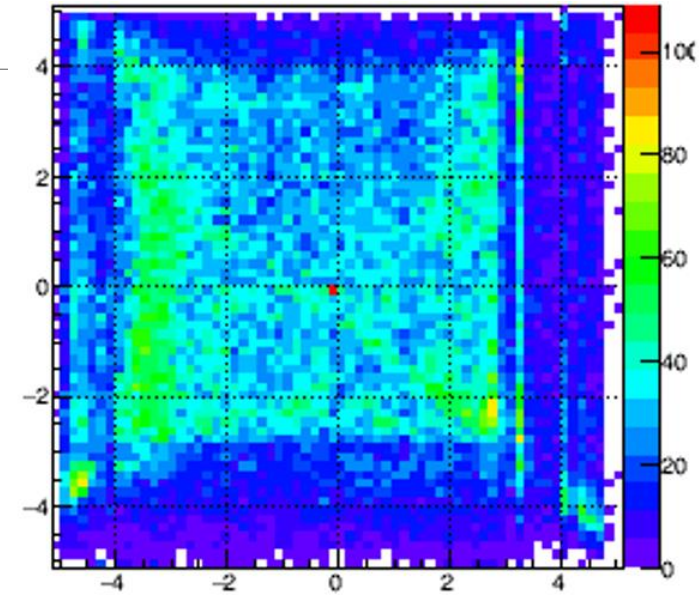
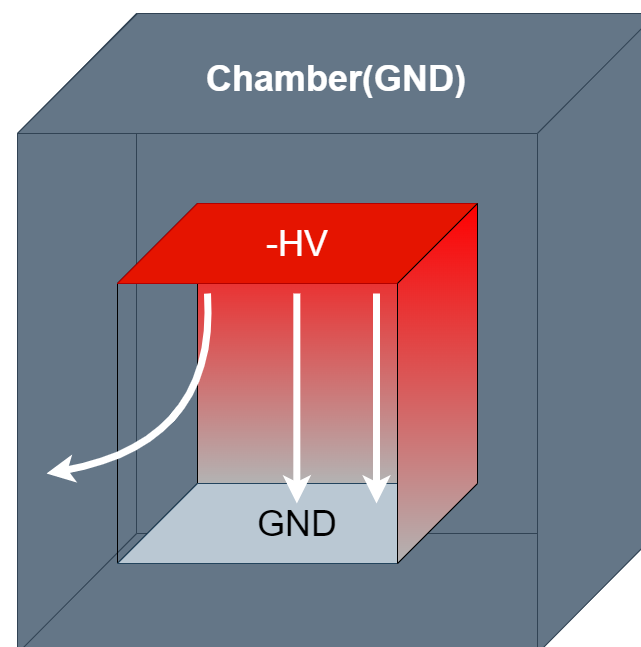
# 問題が起きた原因

- 高抵抗シートに電圧がかかっていない
- 電気力線が外に向かうために電子が外向きにドリフトされる
- チェンバーの壁に近い部分の飛跡が検出できなくなっている

理想的な状態



接続できていない場合



▲使用開始10か月程度での  
ヒットマップ



# 高抵抗シートを用いたTPCの改良

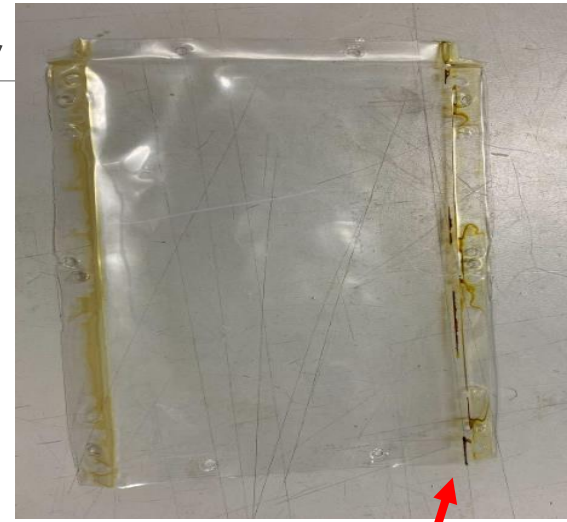
## 原因

- シートの劣化？
- 高抵抗シートと銅極の接触が十分でない？
- 絶縁性の化合物が生成されている？

シートの銅との接触部分(高抵抗シート谷折り)に黄色い物質が付着

## 改良: 導電性のゴム棒を挟む

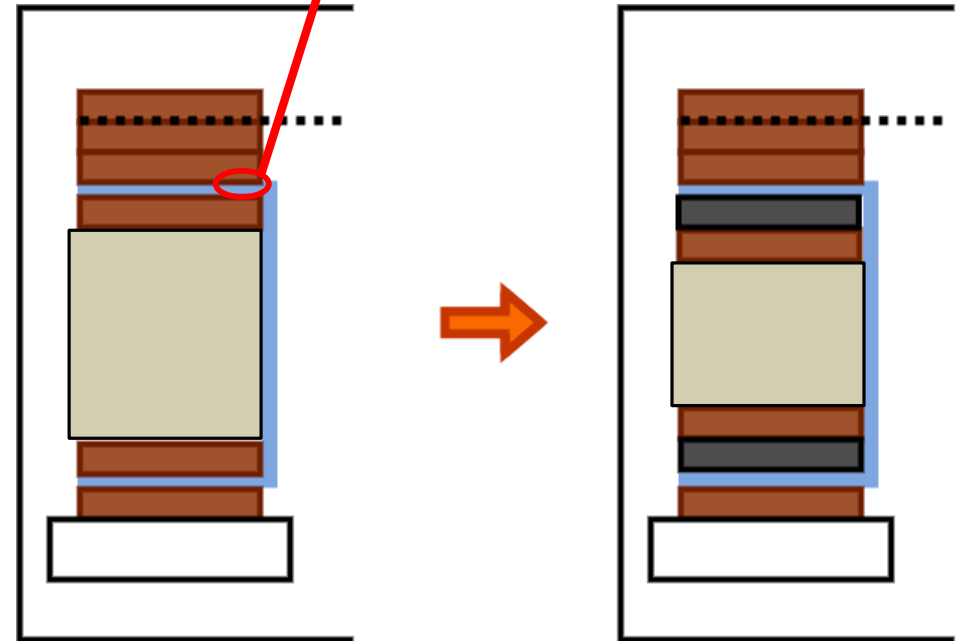
- 十川ゴム製 体積固有抵抗値:  $1.0 \times 10^2 \text{ } \Omega/\text{cm}^2$
- 接触度が向上
- 高抵抗シート谷折り部分での直接接触がなくなる



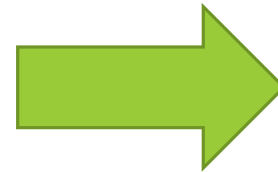
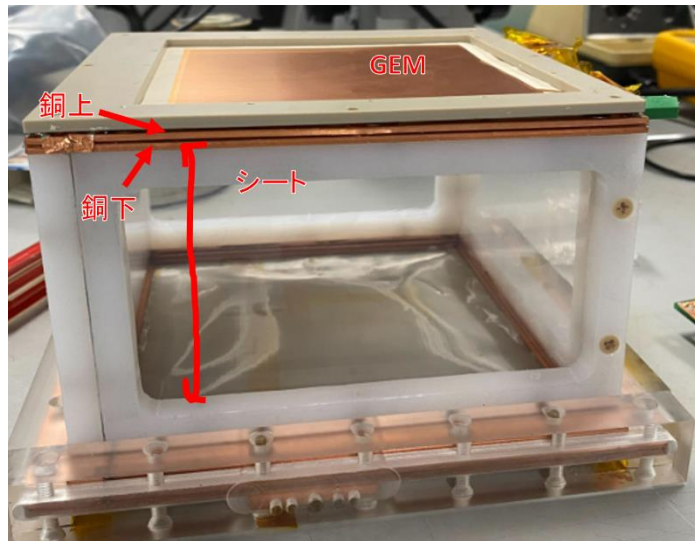
▲取り外した高抵抗シート



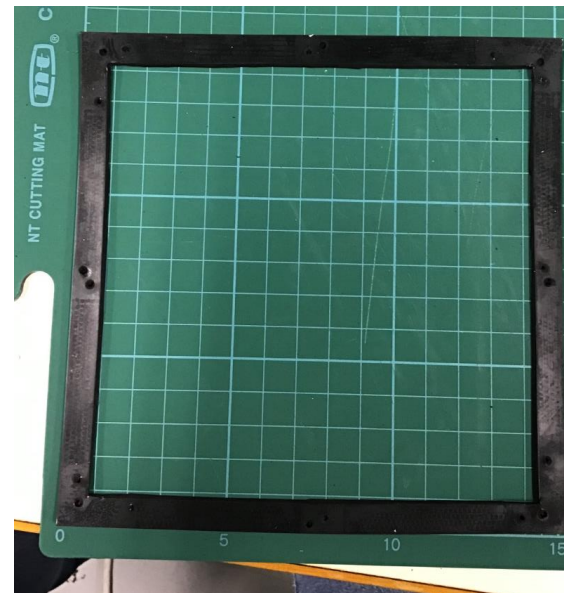
▲導電性のゴム



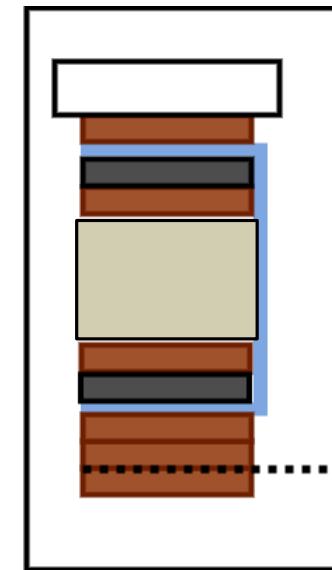
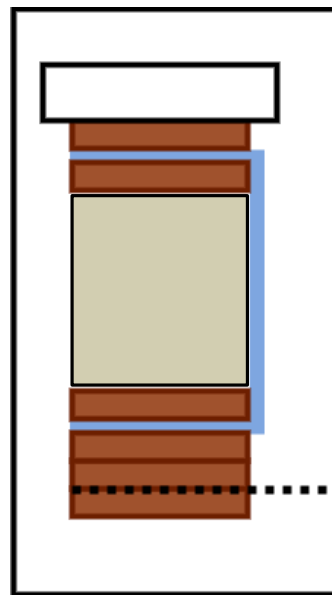
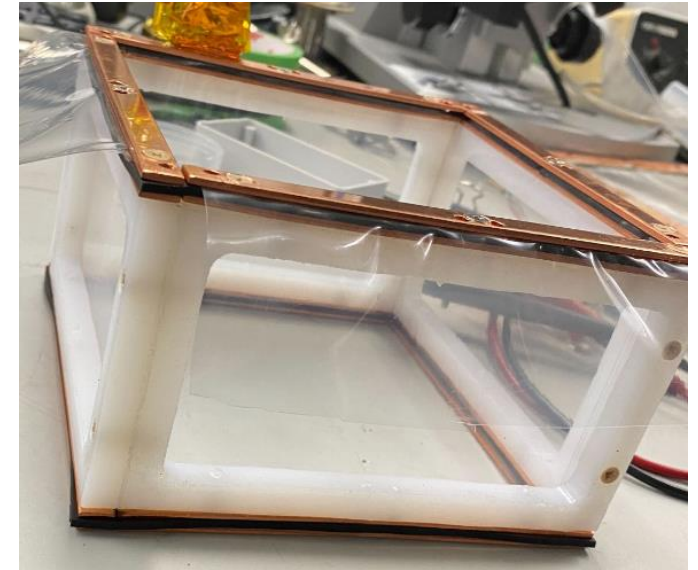
# 高抵抗シートを用いたTPCの改良



▼使用したゴム枠

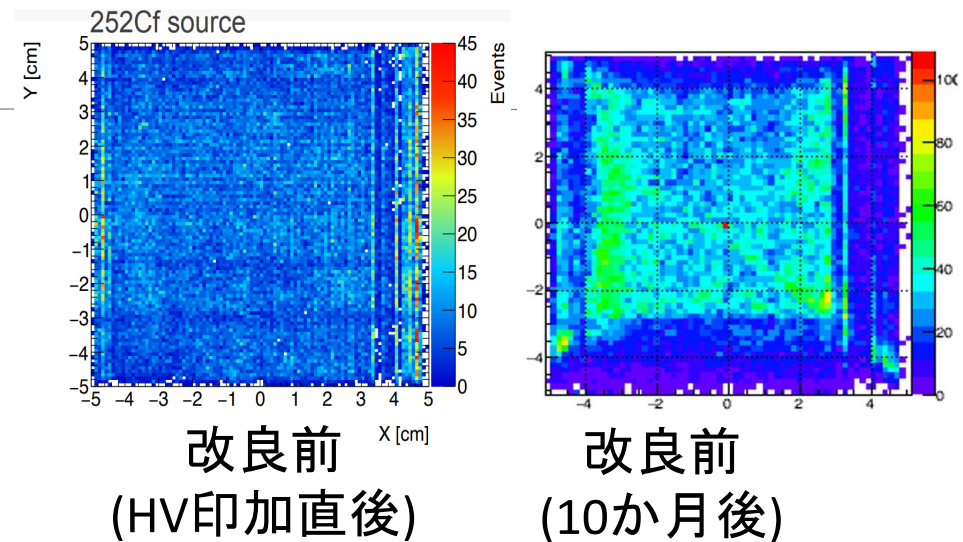


厚さ2mm  
辺の幅8mm程度

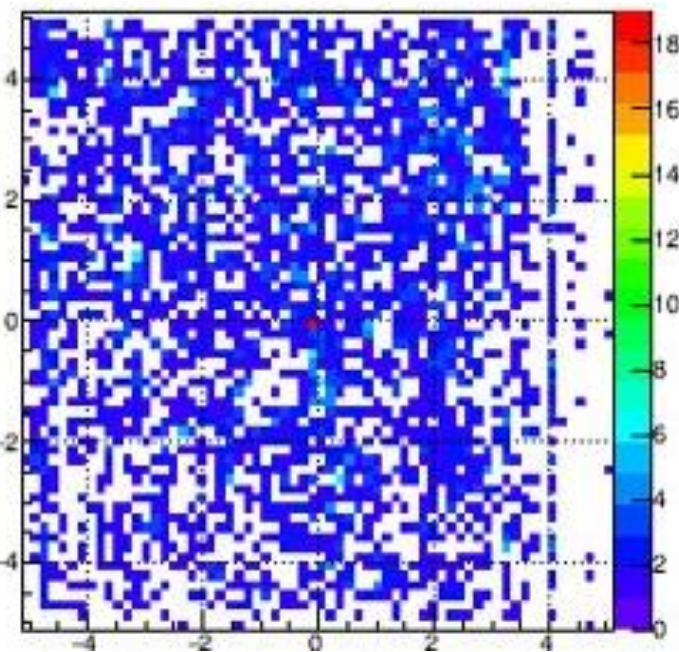


# 高抵抗シートを用いたTPCの改良

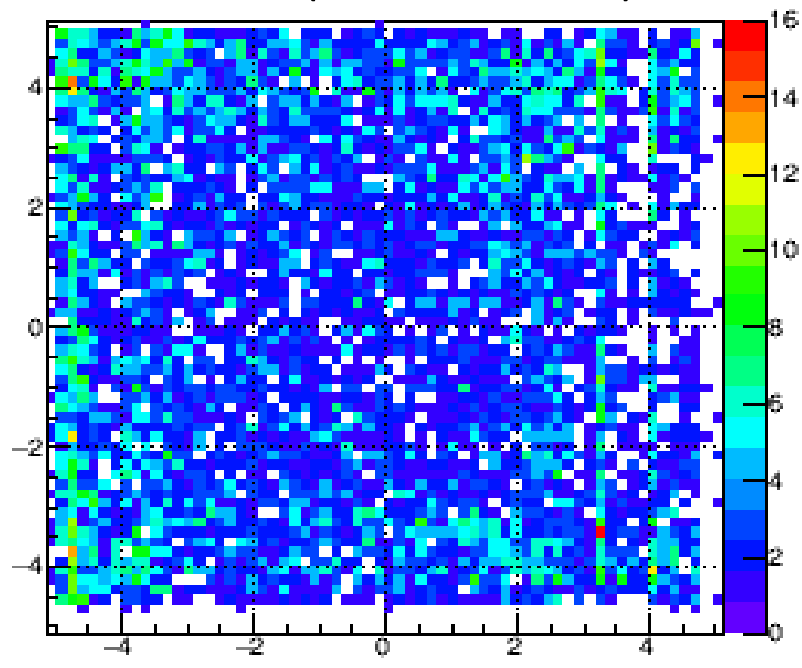
- HV印加 : 2022/10/26-
- 長期運用におけるヒットマップの変化を調査 – 252Cf
  - 顕著な変化は見られない



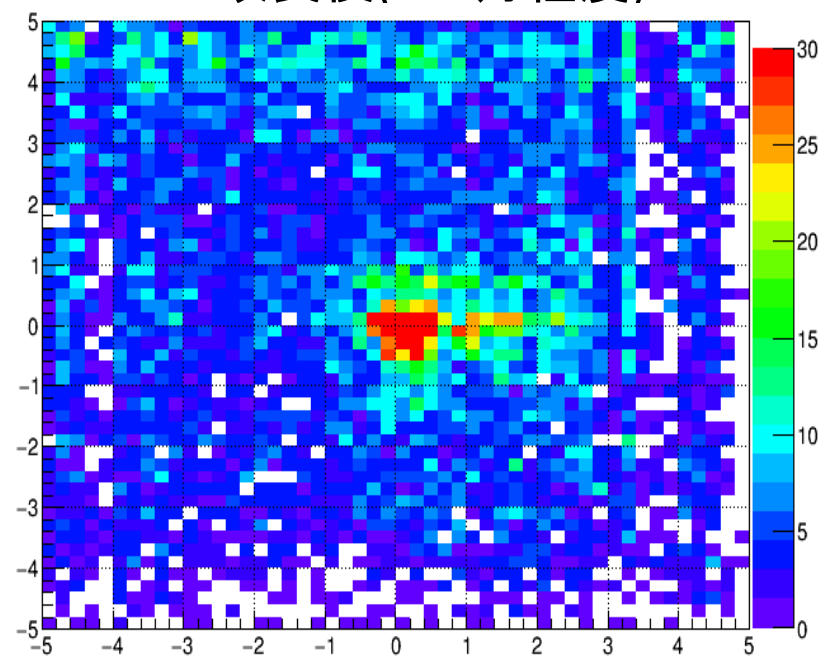
改良後(3週間程度)



改良後(1か月半程度)



改良後(4か月程度)



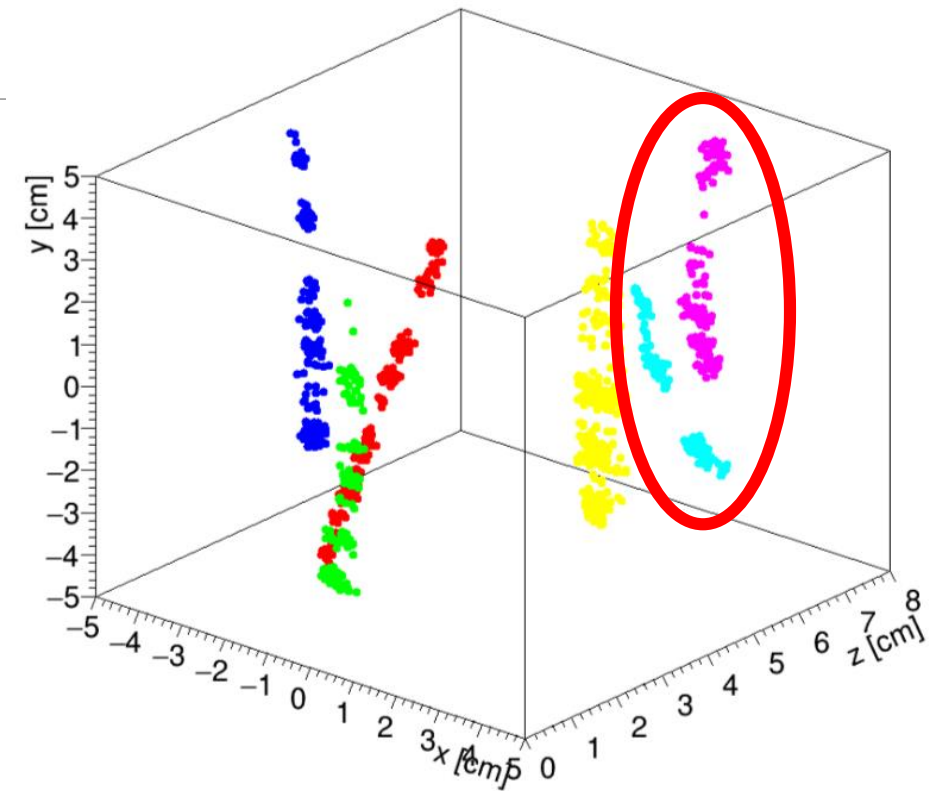
# 高抵抗シートを用いたTPCの改良

## ➤ 実験

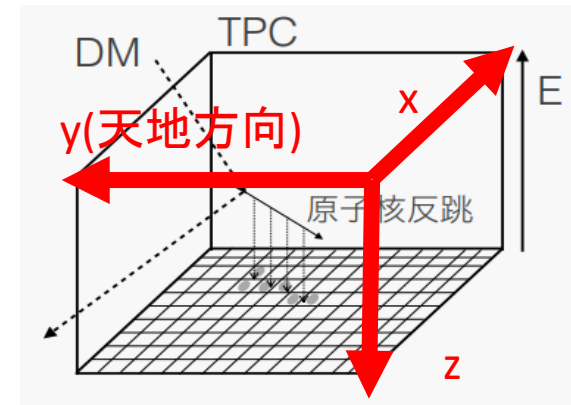
- 10 cm角検出器で宇宙線 $\mu$ の飛跡を測定
- 端付近で飛跡が曲がってしまっている

## ➤ 展望

- 銅と高抵抗シートの直接的な接触を防ぐため、銅以外の素材を挟むことを検討
- 現在実験中
- 詳細な調査を行い、維持可能期間等を測定する



▲ $\mu$ の飛跡





# 目次

---

- 概要
- イン트로ダクション
  - 暗黒物質の直接探索
  - NEWAGE実験
  - 開発中の大型検出器
- ガス不純物フィルターについての研究
- 電場の一様性についての研究
- **モジュール型検出器の動作実験**
- まとめ

# モジュール型検出器の動作実験

## ➤ 動作確認を行うモジュール

➤ GEMを三枚用いたモジュール

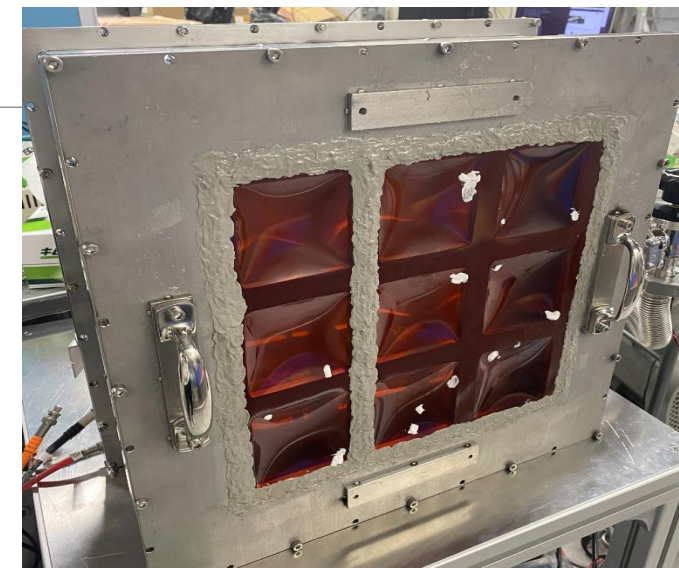
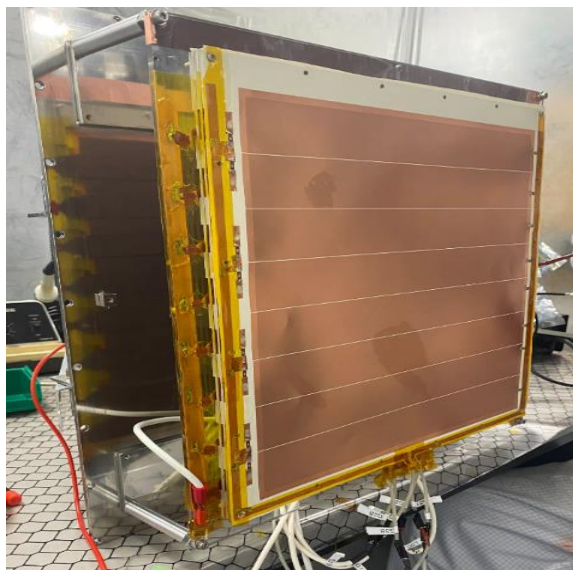
➤ 30 cm角 ( 8 ch )

➤  $\text{CF}_4$  0.2 atm

▼ Anode Pad

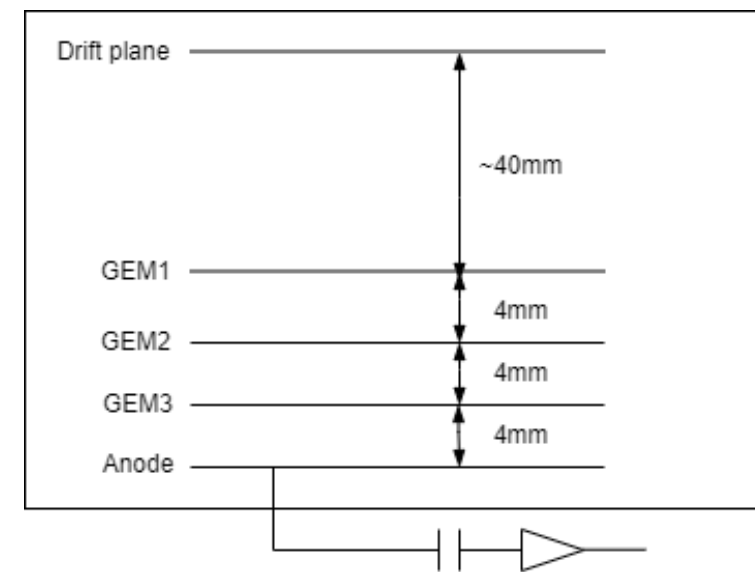


▼ GEM表面



▲ 試験用のチェンバー

▼ チェンバーの断面図

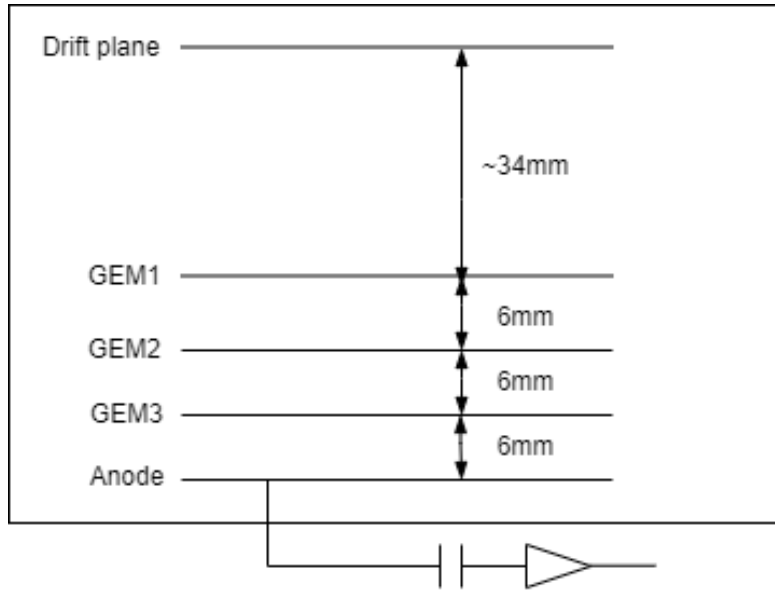


# モジュール型検出器の動作実験

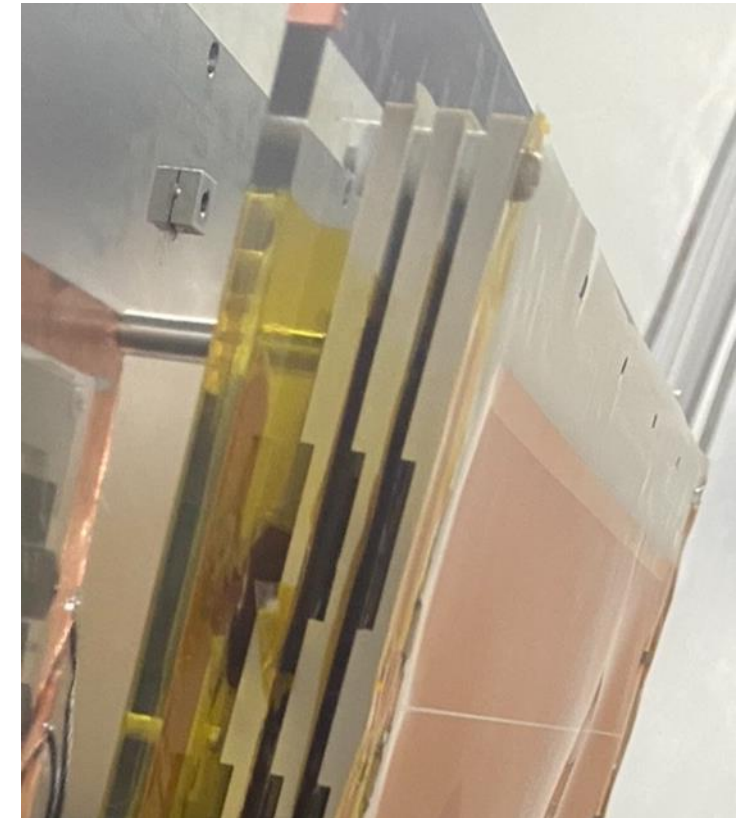
- テンションが弱く中央付近がたるんでしまい、GEM間の距離が一定でない
  - 距離が近い部分で高ゲイン・放電しやすい
- GEM間に2 mmスペーサーを導入
  - GEM間のインダクション電場は大きくする必要がある



▲スペーサー



▲スペーサーを含めた場合の  
チェンバー断面図

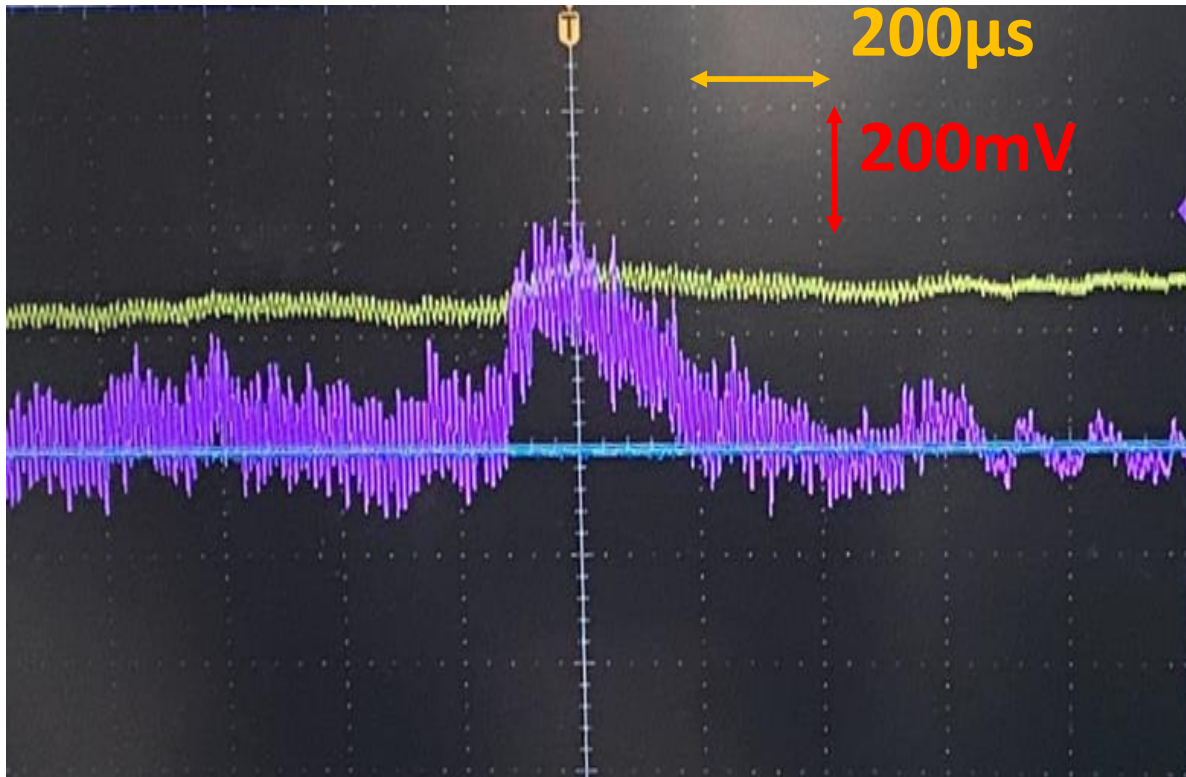


▲実際に挟んでいる様子

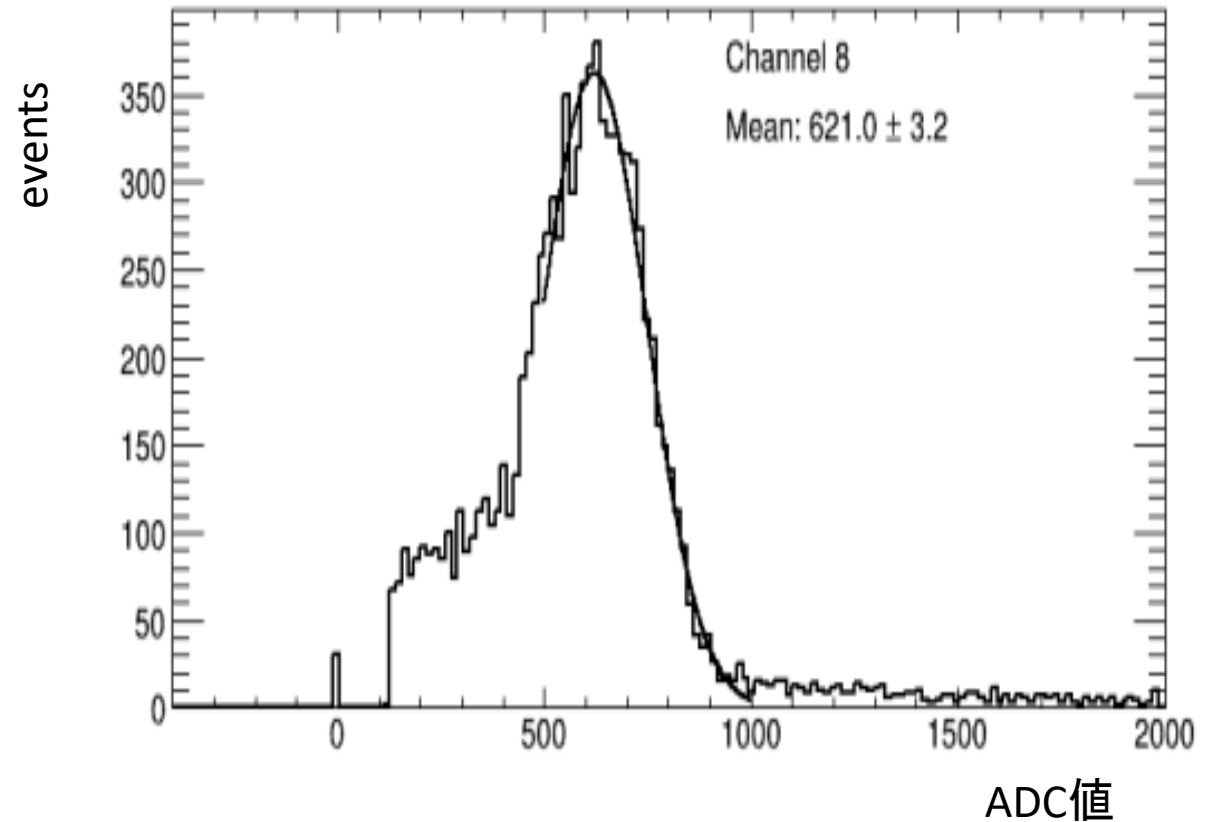
# モジュール型検出器の動作実験

## ➤ 結果

### ➤ $^{90}\text{Sr}$ の信号



### ➤ $^{55}\text{Fe}$ スペクトル





# モジュール型検出器の動作実験

➤  $^{55}\text{Fe}$ でのチャンネルごとのゲイン測定

➤ Ch6は故障

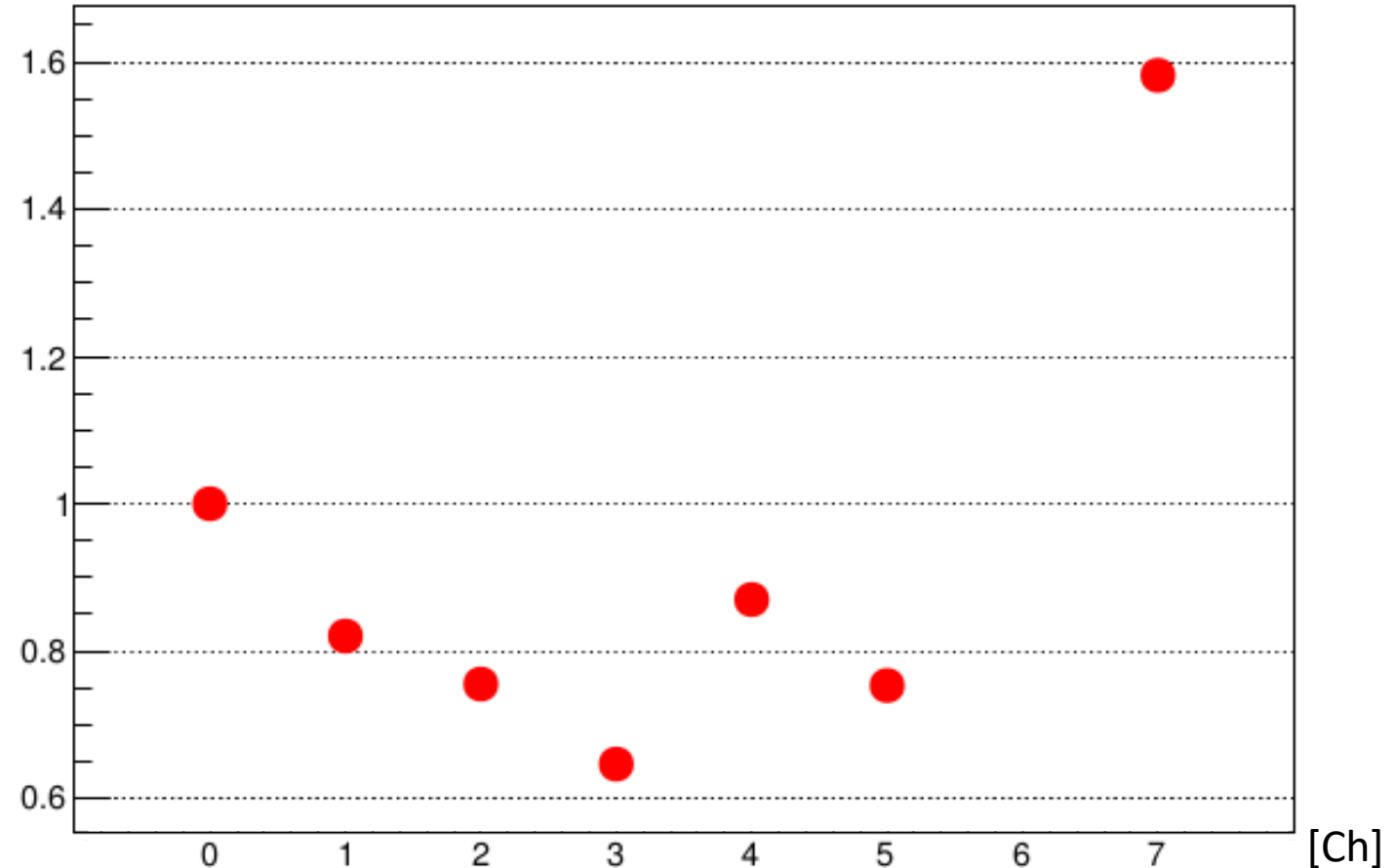
➤ 展望

➤  $\text{SF}_6$ を使用している実験

➤ 大型検出器に設置している実験

Ch0に対するゲイン

チャンネルごとのゲインの違い



# 目次

---

- 概要
- イントロダクション
  - 暗黒物質の直接探索
  - NEWAGE実験
  - 開発中の大型検出器
- ガス不純物フィルターについての研究
- 電場の一様性についての研究
- モジュール型検出器の動作実験
- **まとめ**

# まとめ

---

- ガス不純物フィルターの評価を行った
  - H<sub>2</sub>Oを十分に減らすことができることがわかった
  - <sup>222</sup>Rn検出量も減少することが分かった
    - 絶対量の評価を行う
  - H<sub>2</sub>O, <sup>222</sup>Rn以外のガス不純物についても測定を行う
- 高抵抗シートの長期運用における電場の一様性について調査した
  - 今回の改良では大きな改善は見られず
  - 解析を進める
- 開発中の大型検出器に導入予定のモジュールの動作確認を行っている
  - 実際に大型検出器に導入しての動作確認を行う