

NEWAGE実験47: 陰イオン μ TPCにおけるマイノリティキャ リアの性質解明

池田 智法

身内賢太郎、矢ヶ部遼太、橋本隆、中澤美季、石浦宏尚、中村輝石

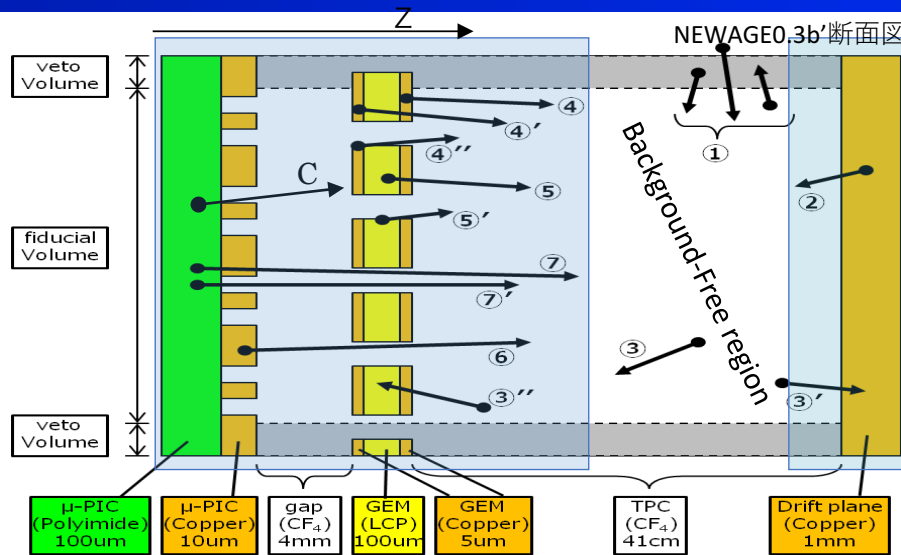
神戸大学

2017年9月15日

2017年日本物理学会秋季大会

- 陰イオン μ TPC開発のモチベーション
- セットアップ
- マイノリティキャリアにおける H_2O の影響
- 新しいマイノリティキャリア
- まとめ

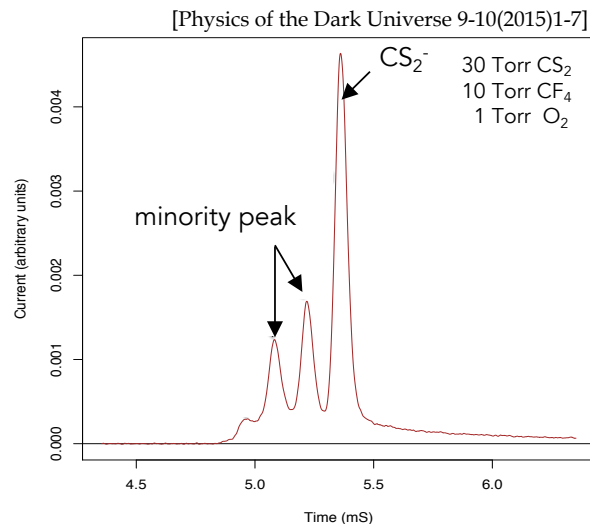
モチベーション1



□ バックグラウンド

RUN14で検出器感度を制限していたBG

--> μ -PICのガラス繊維由来の α 線



□ 陰イオンガスを用いたZの位置決定

DRIFTグループ(英・米)が陰イオンガス CS_2 を用いてMWPC-TPCでZの絶対位置決定に成功した

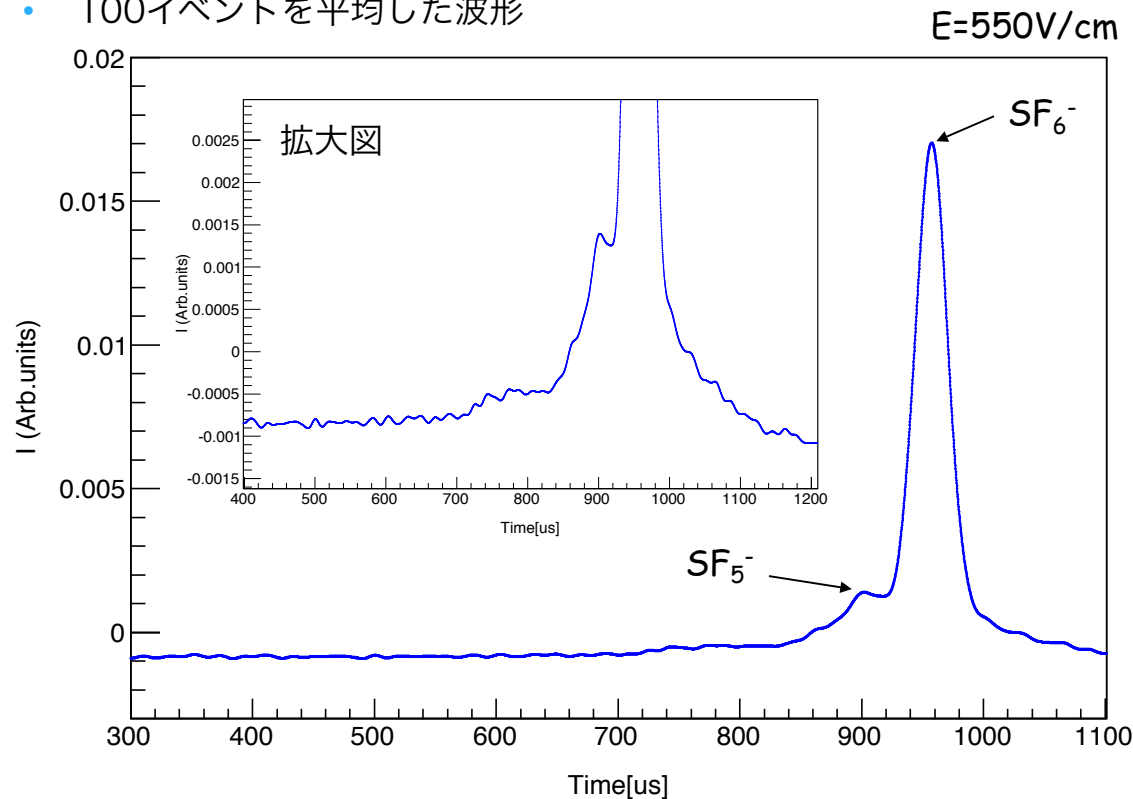
→陰イオンガスを μ TPCに導入し、高位置分解能飛跡検出と同時にZの有効体積カットをしたい

➤ NI μ TPC(陰イオン μ TPC)の開発

モチベーション2

- 陰イオンガス SF_6 を用いた μTPC の研究を行ってきた
- マイノリティキャリアである SF_5^- の検出とZの絶対位置決定には成功している(第72回JPS)
- Zの決定精度を向上を目的に、マイノリティキャリアの性質を調べ

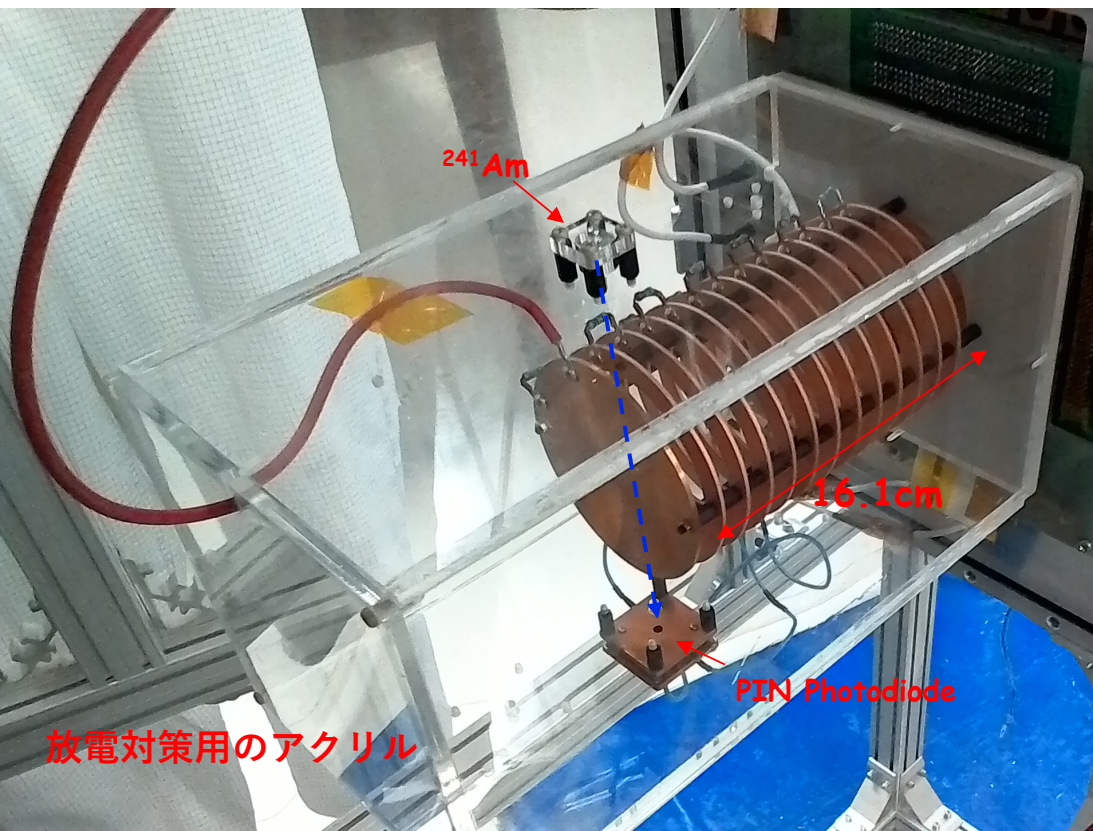
- 100イベントを平均した波形



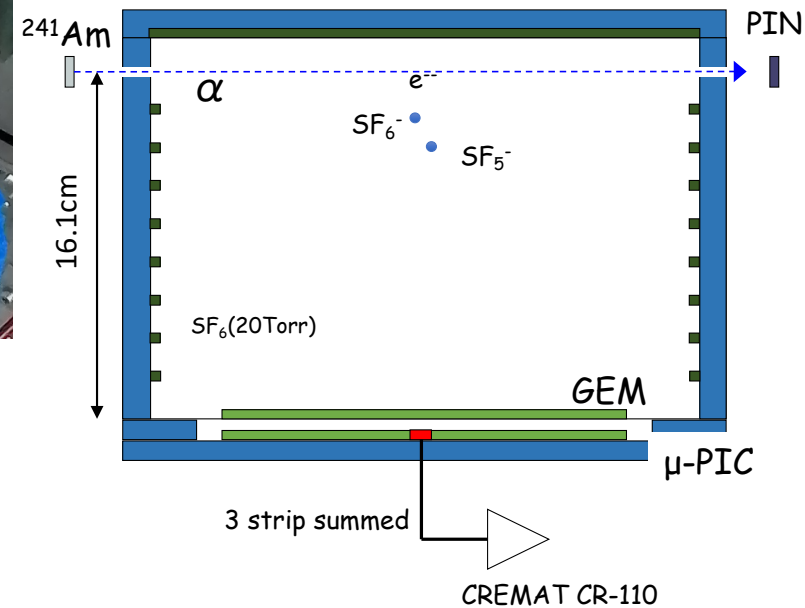
$$\sigma_z = 6.8\text{cm}$$

第72回JPSのスライドから

セットアップ

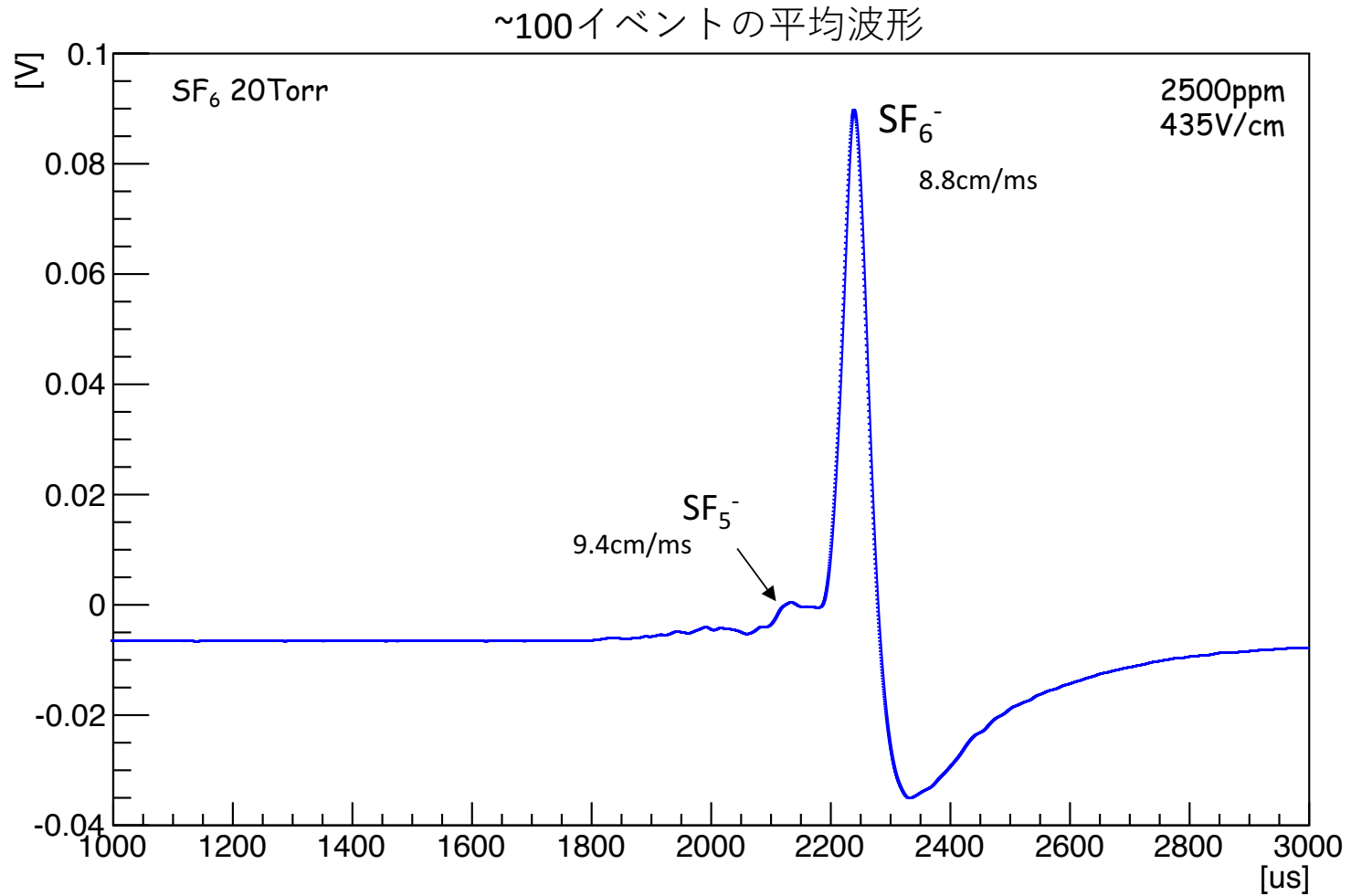


露点計(Vaisala DMT152)

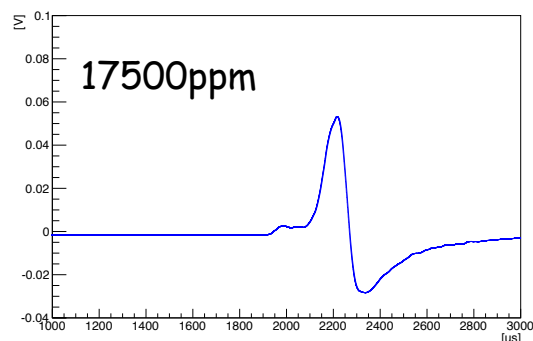
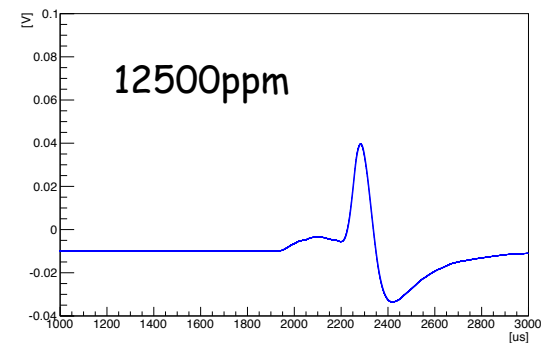
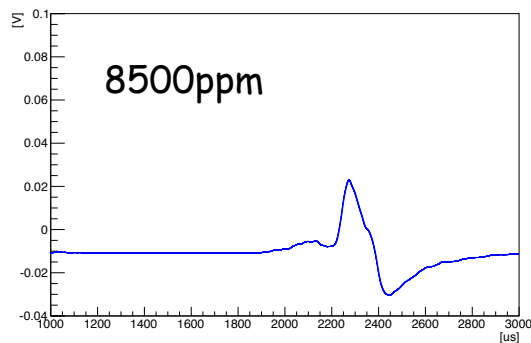
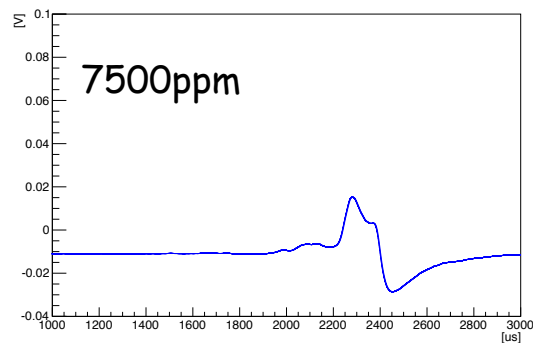
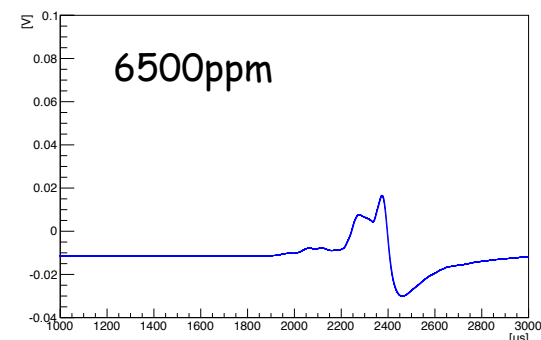
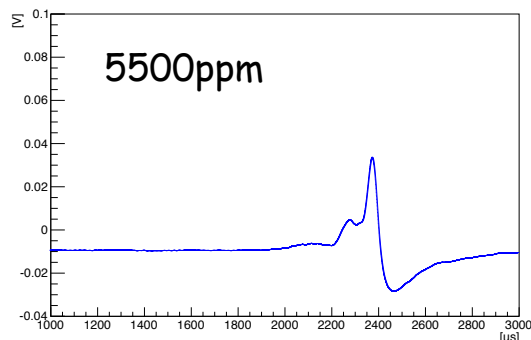
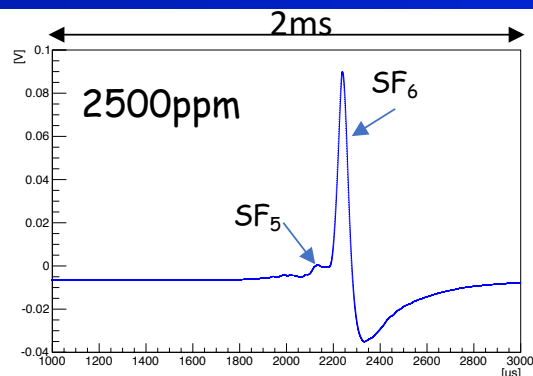


- ガス気圧 : SF_6 (20Torr)
- ドリフト距離 : 16.1cm
- 電場: $E=300\sim500\text{V/cm}$
- 線源 : ^{241}Am
- 信号読み出し : μ -PICアノード3ストリップ
- ガスゲイン : ~ 2000

波形



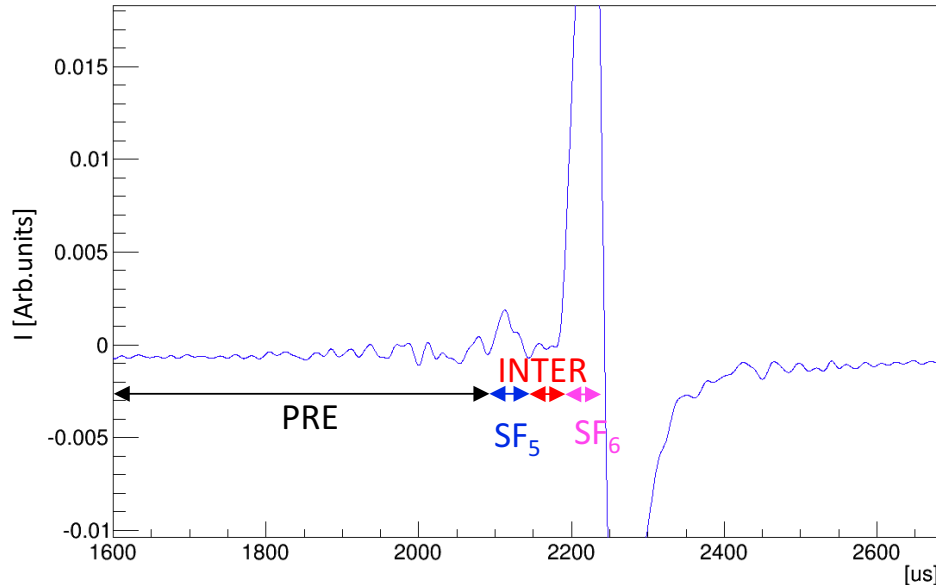
アウトガスH₂Oによる波形の変化



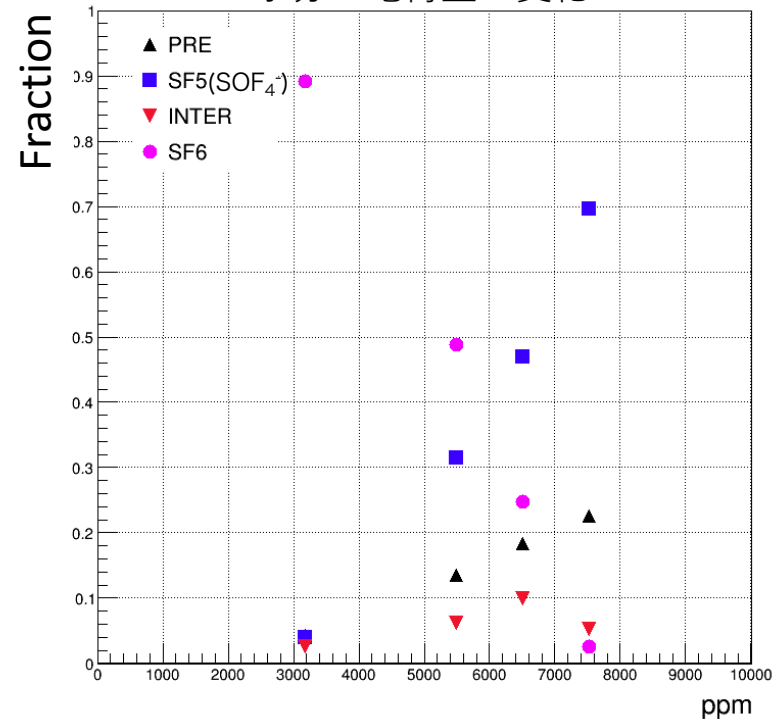
- H₂Oの混入量が増加すると
 - SF₅のピークが大きくなるように見える
 - SF₅よりドリフト速度の速い電荷が増える

H₂Oによる電荷量の変化

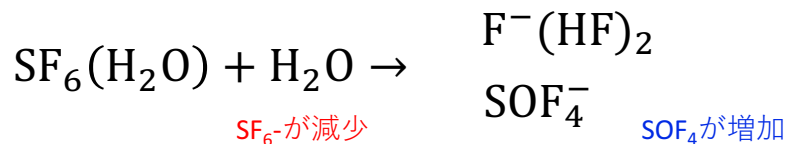
電荷の定義図



水分と電荷量の変化



- SF₆⁻(H₂O)とH₂Oの反応

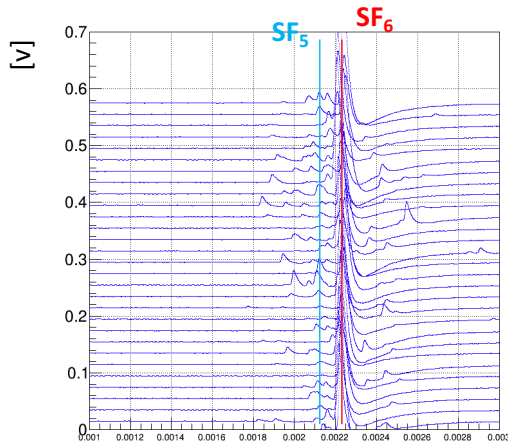


- 電荷量の変化はSF₆とH₂Oの反応で説明できる
- SF₅⁻領域の電荷の増加はSOF₄⁻が寄与している
- F⁻(HF)₂⁻とSF₄O⁻の生成比は1:4(*J. Phys. Chem. A* **2001**, 105, 3527-3531)、PREチャージはF⁻(HF)₂⁻で説明可能

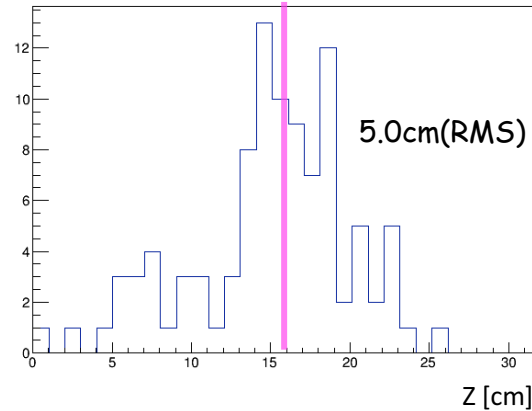
SF₅の質量 : 127.05g/mol
SOF₄の質量 : 124.05g/mol
F⁻(HF)₂⁻の質量 : 59.00g/mol

位置分解能

2500ppm



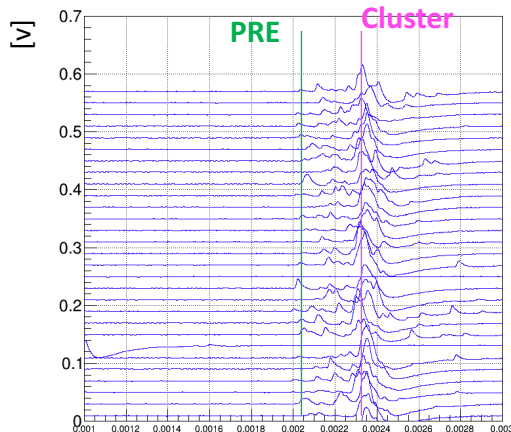
SF5とSF6によるZの再構成



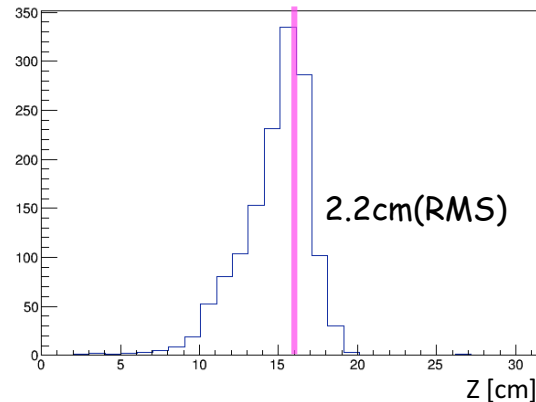
$$Z = \frac{v_s \cdot v_p}{v_s - v_p} \Delta T,$$

- SF₅⁻とSF₆⁻を用いたZの位置決定
- 少量のH₂OによってPREチャージが生成されるため決定精度が悪い

12500ppm



PREチャージとClusterによるZの再構成



- メインピークはSO_F₄⁻+SO_F₄⁻(H₂O)_n+SF₆⁻+SF₆(H₂O)_nのクラスター
- PREチャージとクラスターを用いたZの位置決定
- PREチャージより速い電荷がないため決定精度が良くなる
- トラッキングの精度が落ちる

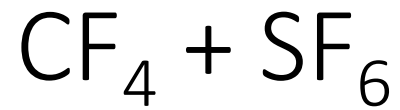
SF₆とH₂Oのまとめ

□ SF₆⁻とアウトガスからのH₂Oとの反応で波形が変化することが確認された

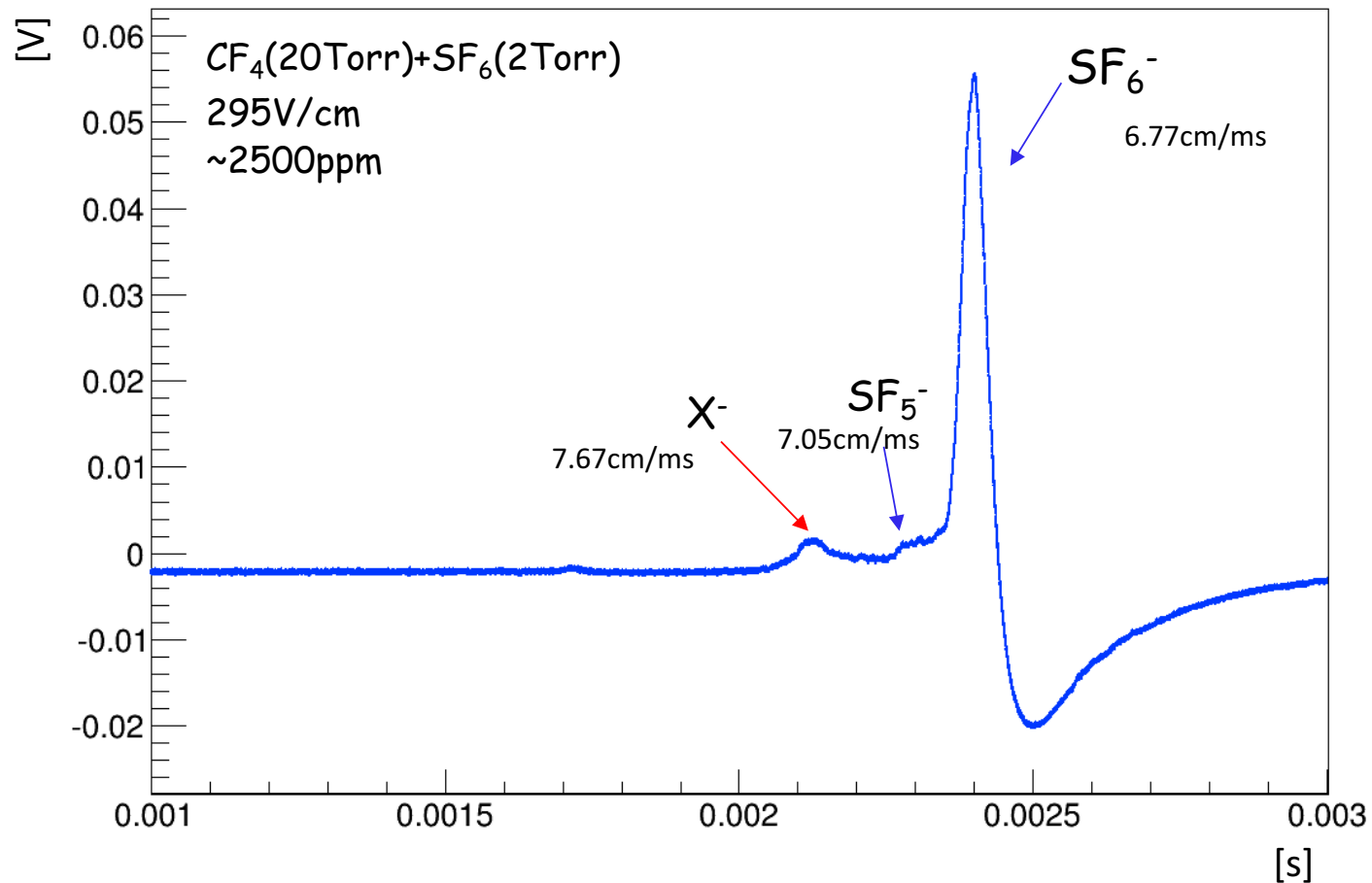
- 現状の最もクリーンなデータはH₂Oの混入量0.5%以下
 - SF₅とSF₆が検出された
 - H₂Oの混入によってF⁻(HF)₂⁻が生成されるため決定精度が悪い
- H₂Oの混入量0.5%以上
 - 他の陰イオン(F⁻(HF)₂⁻、SOF₄⁻(H₂O)_nなど)の生成が活発になる

➤ SF₆を用いた陰イオンμTPCではH₂Oの混入を防ぐことが非常に重要!!

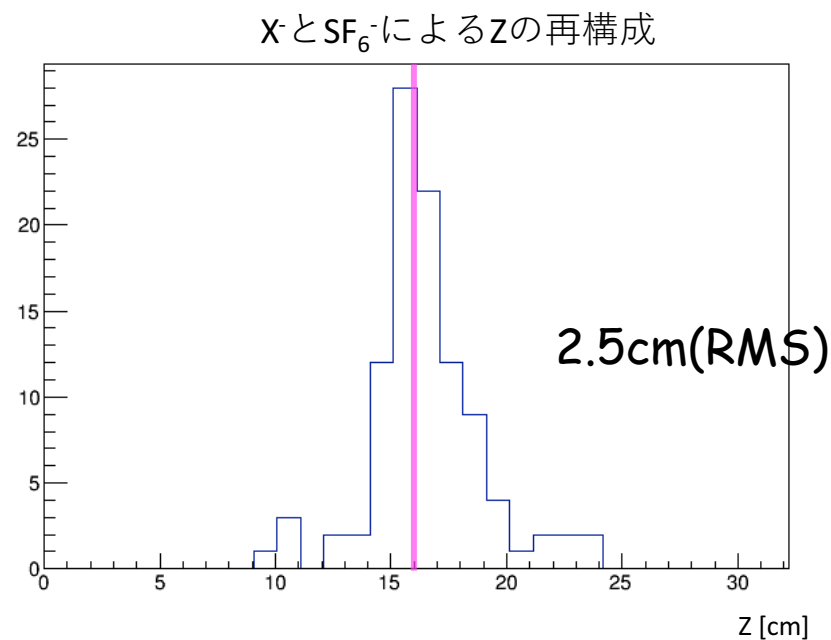
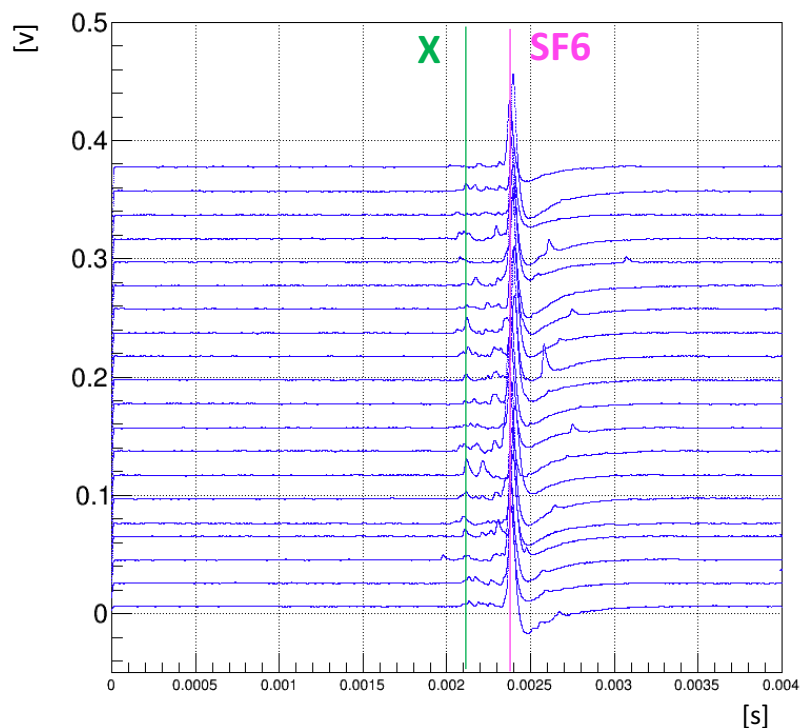
➤ 今後、ガス循環システムを導入して純度の向上を目指す



- DRIFTグループ(英・米)による新しいマイノリティキャリア X^- の発見
- NEWAGEグループでも同様のキャリアが観測された



X⁻を用いた位置分解能



- 電荷X⁻とSF₆を用いてZの絶対位置を再構成が可能
- 多少のH₂Oが混入しても電荷XはF-(HF)₂⁻のドリフト速度より速いため、決定精度が悪くならない

SF₆とH₂Oの対策

- SF₆を用いた陰イオンμTPCではH₂Oの混入を防ぐことが非常に重要!!
- 今後、ガス循環システムを導入して純度の向上を目指す
- F-(HF)₂⁻よりもドリフト速度の速いマイノリティキャリアを利用することで、H₂O混入による位置決定精度の悪化を防ぐことができる

予想されるので（黒部）、暗黒物質検出の非常に強い信号となる。従来手法のわずか数%の計数率の変動に対して、最大10倍以上ともなる。非対称性は、これまでの暗黒物質探索手法に対する大きな解決策である。反跳原子核の飛跡を捉える実験としては、英国DRIFTグループが1990年代より開発を行っているが、開発開始時の技術を用いている為、角度分解能を定義できずこれまでに方向に感度を持った暗黒物質探索実験を行えていない[3]。

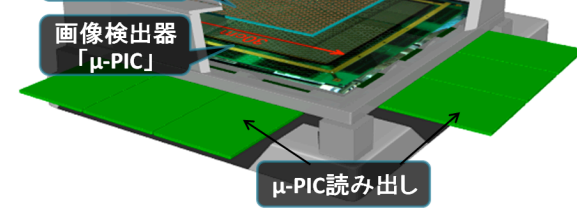
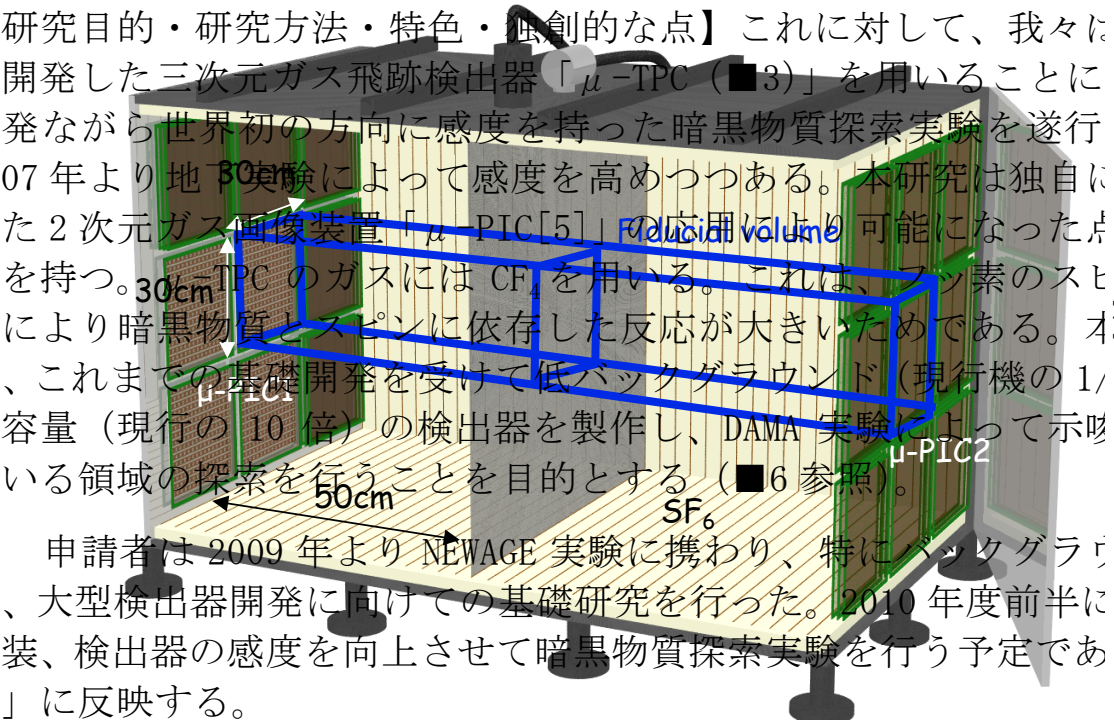
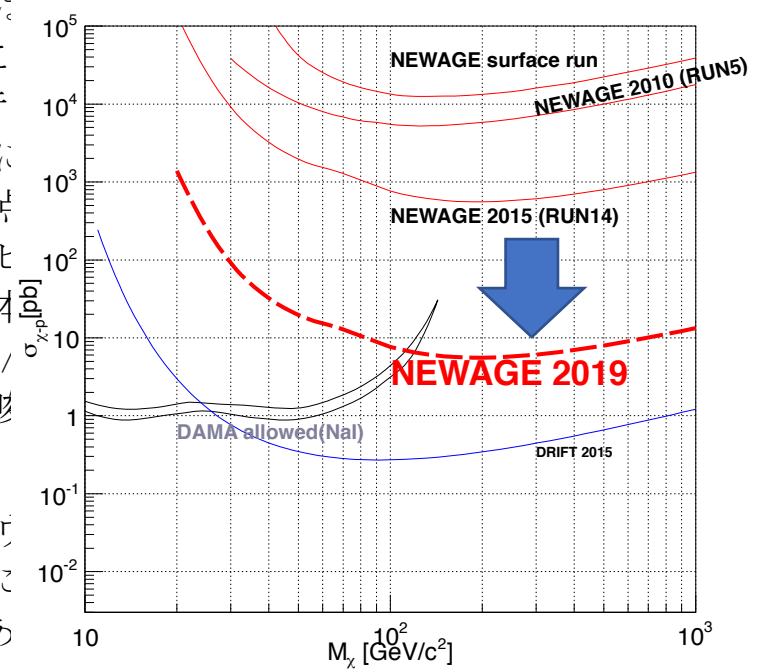


図3: μ-TPCの検出器構造図

研究目的・研究方法・特色・独創的な点】これに対して、我々が開発した三次元ガス飛跡検出器「μ-TPC (■3)」を用いることに発ながら世界初の方向に感度を持った暗黒物質探索実験を遂行。07年より地下実験によって感度を高めつつある。本研究は独自に2次元ガス画像装置「μ-PIC[5]」の応用により可能になった点を持つ。μ-TPCのガスにはCF₄を用いる。これは、フッ素のスピにより暗黒物質とスピに依存した反応が大きいためである。また、これまでの基礎開発を受けて低バックグラウンド（現行機の1/10容量（現行の10倍）の検出器を製作し、DAMA実験によって示唆している領域の探索を行うことを目的とする（■6参照）。

SD 90% C.L. upper limits and allowed region



バックグラウンド低減の為にガス循環システムの構築[7 ペー]、Zの位置決定でμPICから7cm程度(3σ)上をカットし、μPICバックグを分離した段階で、主なバックグラウンド源は、検出器内部の放射性不純物である。特に希ガスのラドンは検出器構成物質から除去としみ出し、ガス中でα崩壊を起こす為、問題となる。通常、ラドンの崩壊

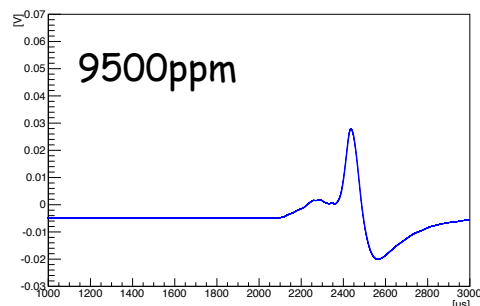
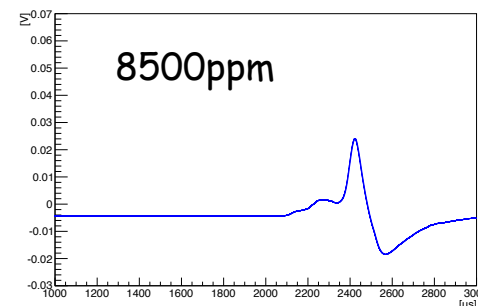
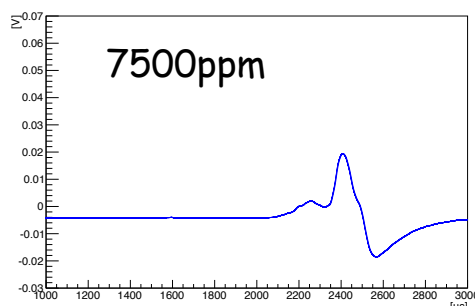
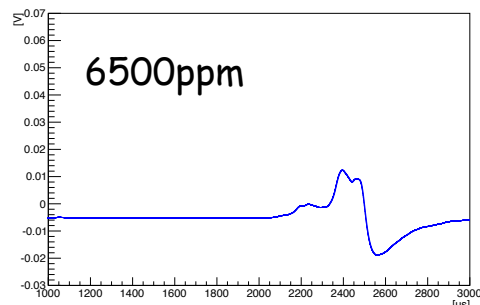
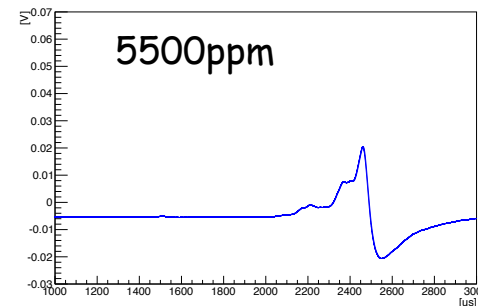
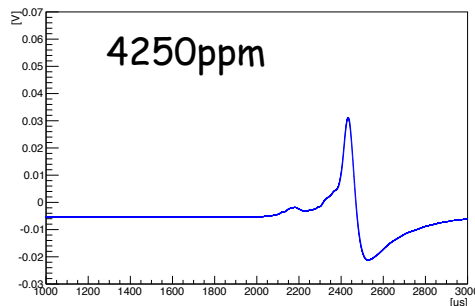
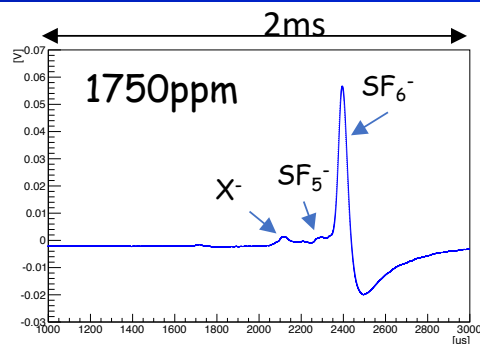
図4: 暗黒物質の反応断面積の制限

➤ 方向感度でDAMA領域の探索を目指す

申請者氏名 中村 輝石

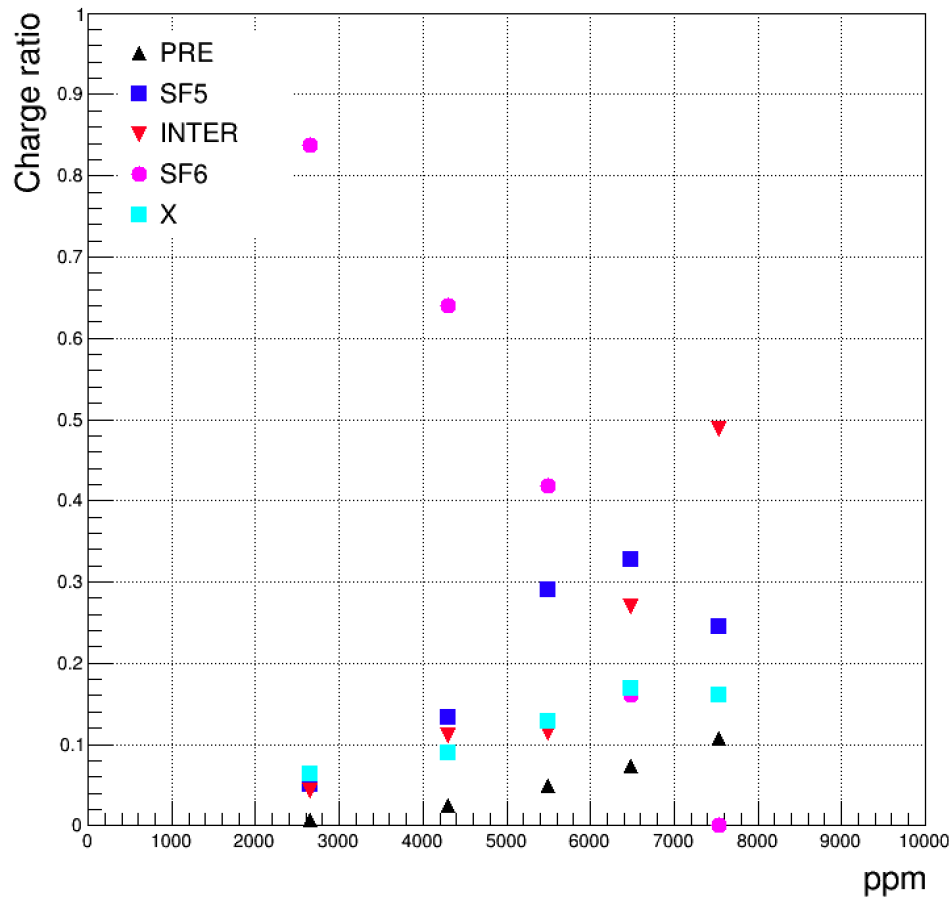
Back up

H₂OによるX⁻の波形の変化

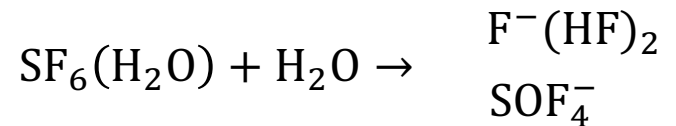


- H₂Oの混入量が増加すると
 - SF₅のピークが大きくなるように見える
 - SF₅よりドリフト速度の速い電荷が増える
- CF₄+SF₆でも同傾向が観測された

X-の電荷量変化

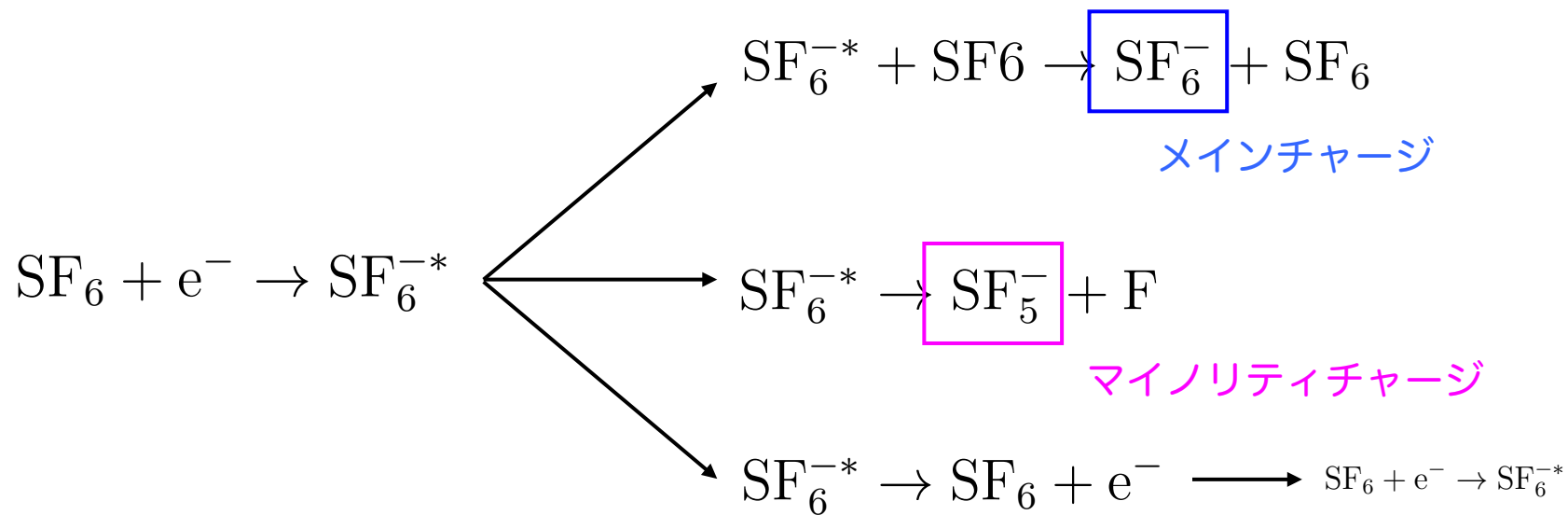


- H_2O の量が小さいところでは X^- と SF_5^- は同程度の電荷量
- INTERチャージも同程度存在するがドリフト速度が速いので区別できる
- SF_6^- と H_2O の反応



- SF_6^- の減少とINTER・ SF_5^- の増加は上の反応式で説明できる
- X^- がこういった陰イオンであるかは調査中

陰イオンの生成過程



波形解析

- 取得した波形は電流に変換して解析を行なった

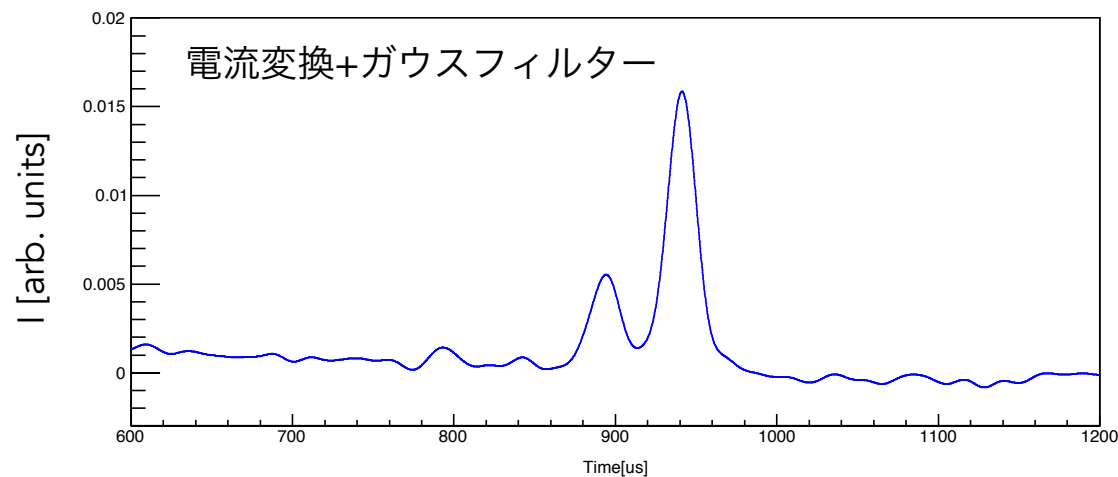
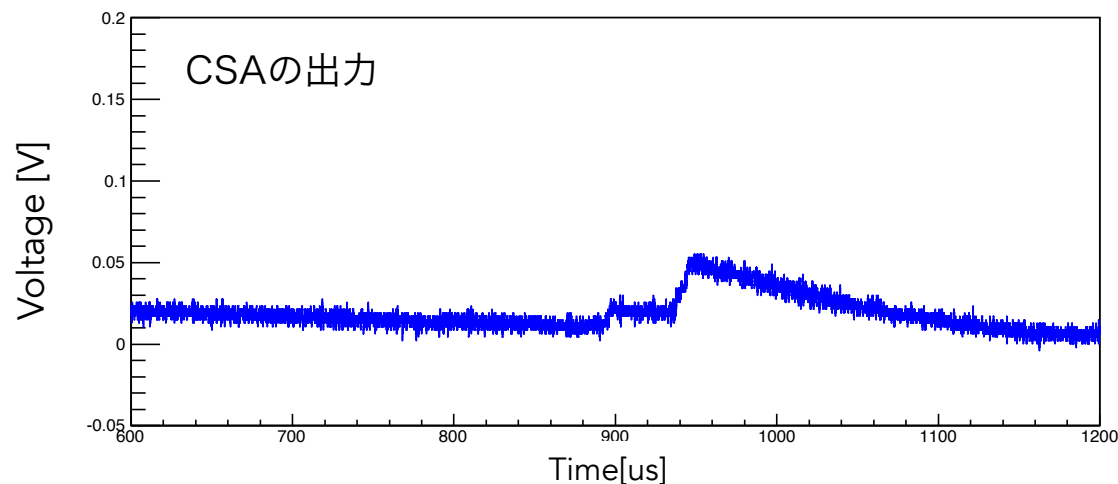
変換式

$$I(t) \propto \frac{dV}{dt} - \left(-\frac{V}{\tau} \right)$$

CREMATの時定数 $\tau = 140\mu\text{s}$

+

ガウスフィルター



マイノリティチャージの電場依存性 N.Phan(DRIFTグループ)の論文から

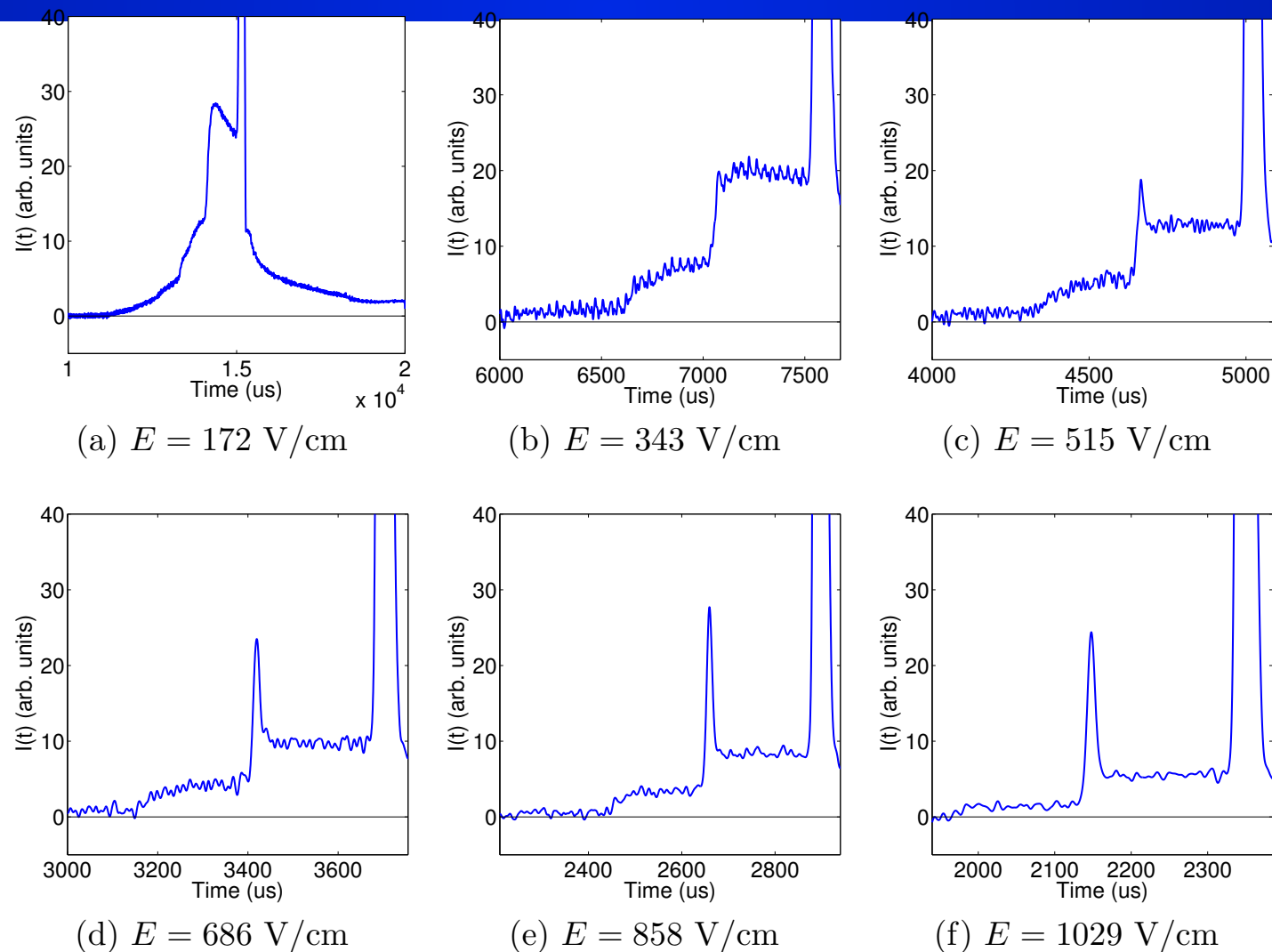


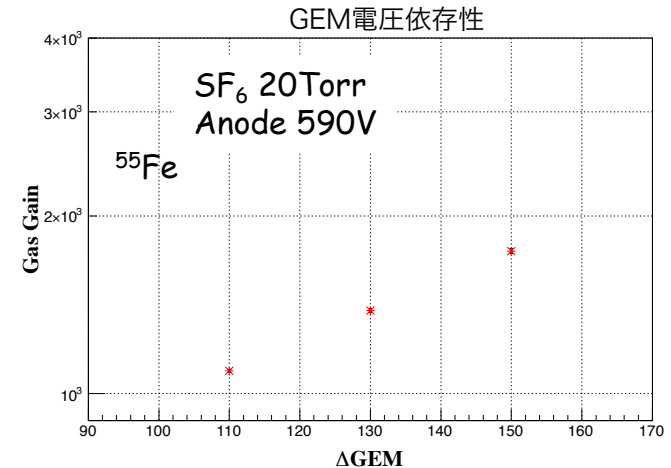
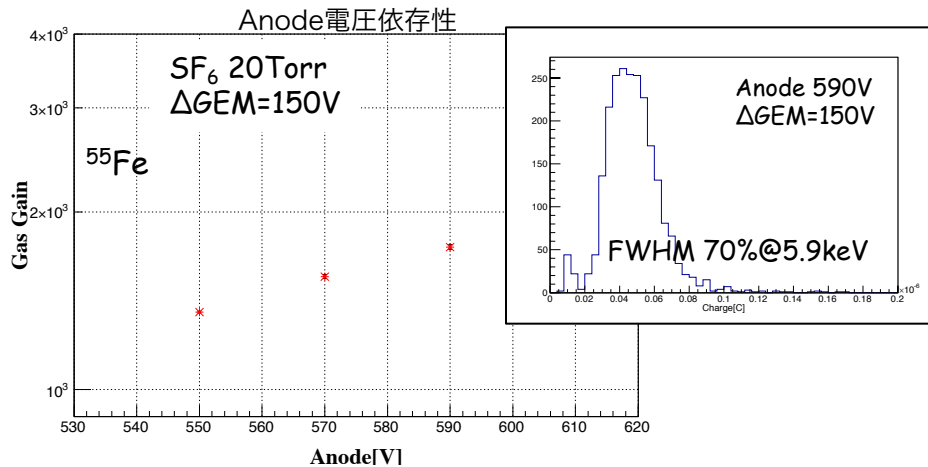
Figure 3: 20 Torr SF_6 , close up view of pre-primary peak ionization.

arXiv1609.05249

ガスゲイン

- 先行研究ではSF₆ガスを用いたときの μ -PIC+GEMシステムのガスゲインを調べた

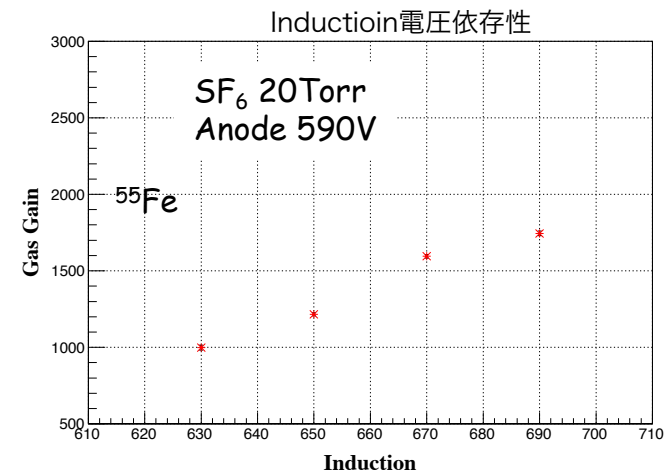
JPS2016春季大会発表スライド



SF₆ 20Torrで最大ガスゲイン~2000

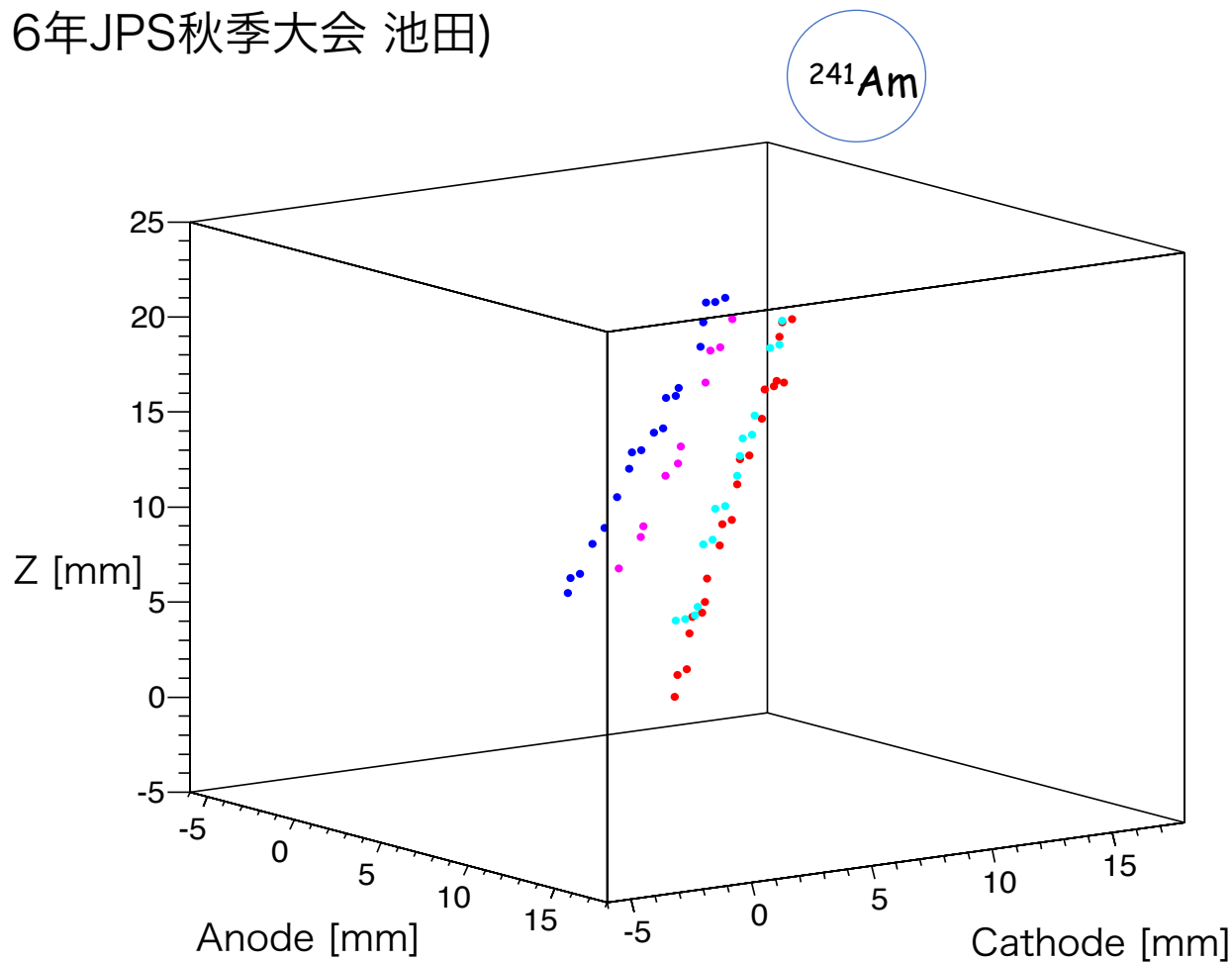
μ PIC+GEMシステムは陰イオンSF₆中でも十分なガスゲインが得られることを示した

→ 二次元飛跡検出



飛跡検出

- 先行研究では μ -PIC+GEMシステムを用いて、3次元の飛跡検出に成功した。
(2016年JPS秋季大会 池田)



H₂Oの除去

