

# 方向に感度を持つ暗黒物質直接探索実験 のための陰イオンTPCシミュレーション

神戸大理

石浦宏尚, 身内賢太郎, 橋本隆, 池田智法,  
中村拓馬, 越智敦彦, 中村輝石, 伊藤博士

2019/03/22 アクティブ媒質TPC開発座談会@神戸大学

# 方向に感度を持つ暗黒物質直接探索実験 のための陰イオンTPCシミュレーション

のためのMPGD

神戸大理

石浦宏尚, 身内賢太郎, 橋本隆, 池田智法,  
中村拓馬, 越智敦彦, 中村輝石, 伊藤博士

2019/03/22 アクティブ媒質TPC開発座談会@神戸大学

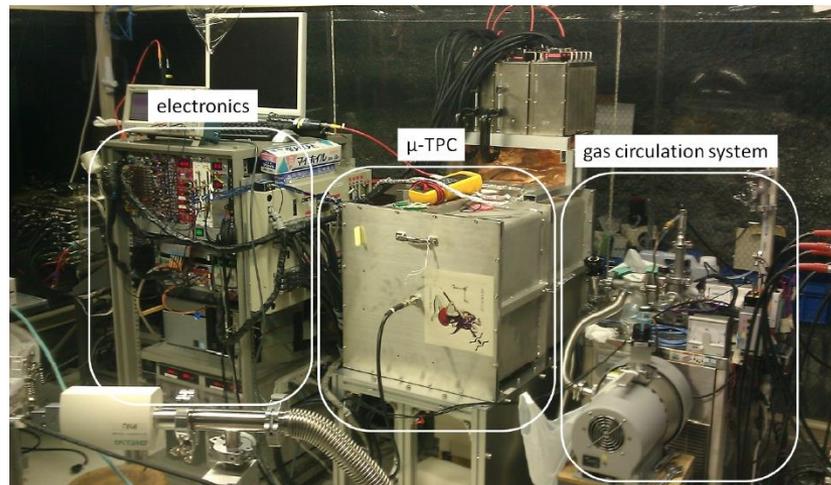
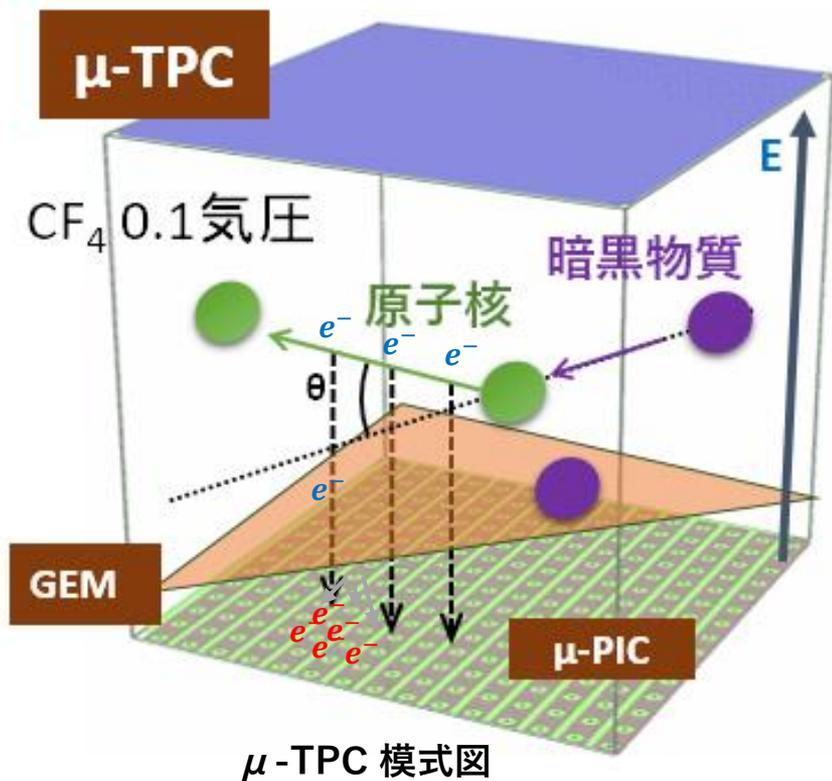
# 発表Outline

- NEWAGE
- 陰イオン $\mu$ -TPC (NI $\mu$ -TPC)
- 陰イオンガス中MPGD特性
  - GEM基礎測定
  - 陰イオンガス中MPGDシミュレーション ←メイン
- 結論

➤ **NEWAGE** (NEw general WIMP search with an Advanced Gaseous tracker Experiment)

3次元ガス飛跡検出器( $\mu$ -TPC)を用いた**方向に感度を持つ**暗黒物質直接探索実験

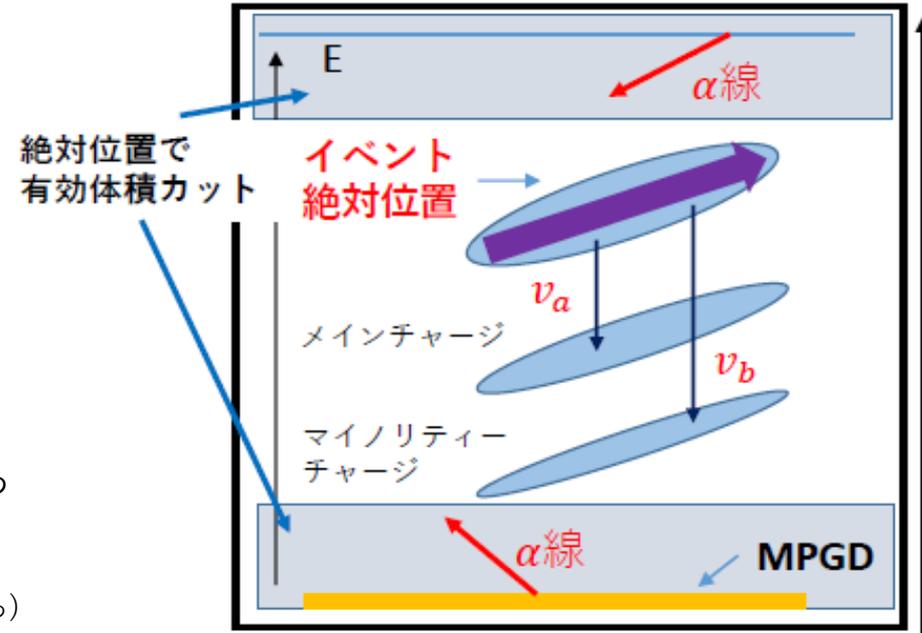
➤ 暗黒物質により原子核反跳されたフッ素原子核の飛跡をとらえる



NEWAGE検出器 NEWAGE -0.3b' @神岡

東京大学宇宙線研究所  
 神岡宇宙素粒子研究施設地下実験室で観測中

GEM,  $\mu$ -PIC : MPGD(Micro Pattern Gaseous Detector)の一種

陰イオン $\mu$ -TPC模式図

Hashimoto et al.  
arXiv:1707.09744

## NEWAGE 現状の課題

- **バックグラウンド(BG)** → 感度制限  
(検出器由来  $\alpha$  線)

## ➤ 陰イオン $\mu$ -TPC

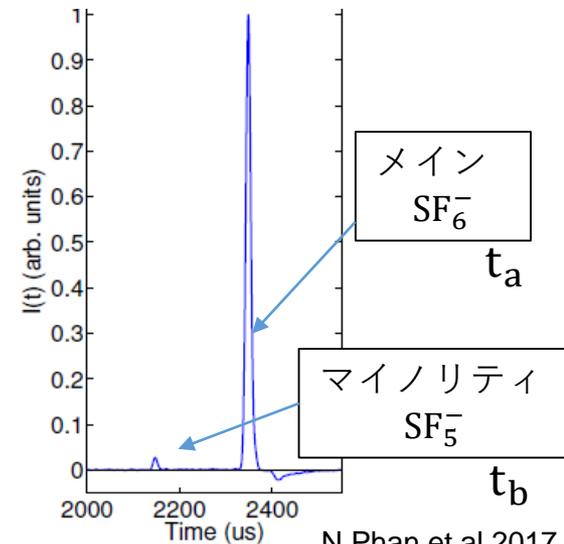
- 拡散小 (電子に比べ)
- **絶対位置決定**で有効体積カット  
複数種陰イオンのドリフト速度差から  
→ **BG削減**(右図)  
CS<sub>2</sub>(DRIFT(英))、その後SF<sub>6</sub>で実証(N.Phanら)

## → 陰イオン $\mu$ -TPCの開発・改良

- エレクトロニクス開発
- **MPGDでの陰イオン描像理解:**
  - 完全な理解まだ
  - シミュレーション手法  
確立されていない

$$\text{絶対位置 } z = (t_a - t_b) \frac{v_a v_b}{v_b - v_a}$$

理解 & 確立の必要  
(本発表)

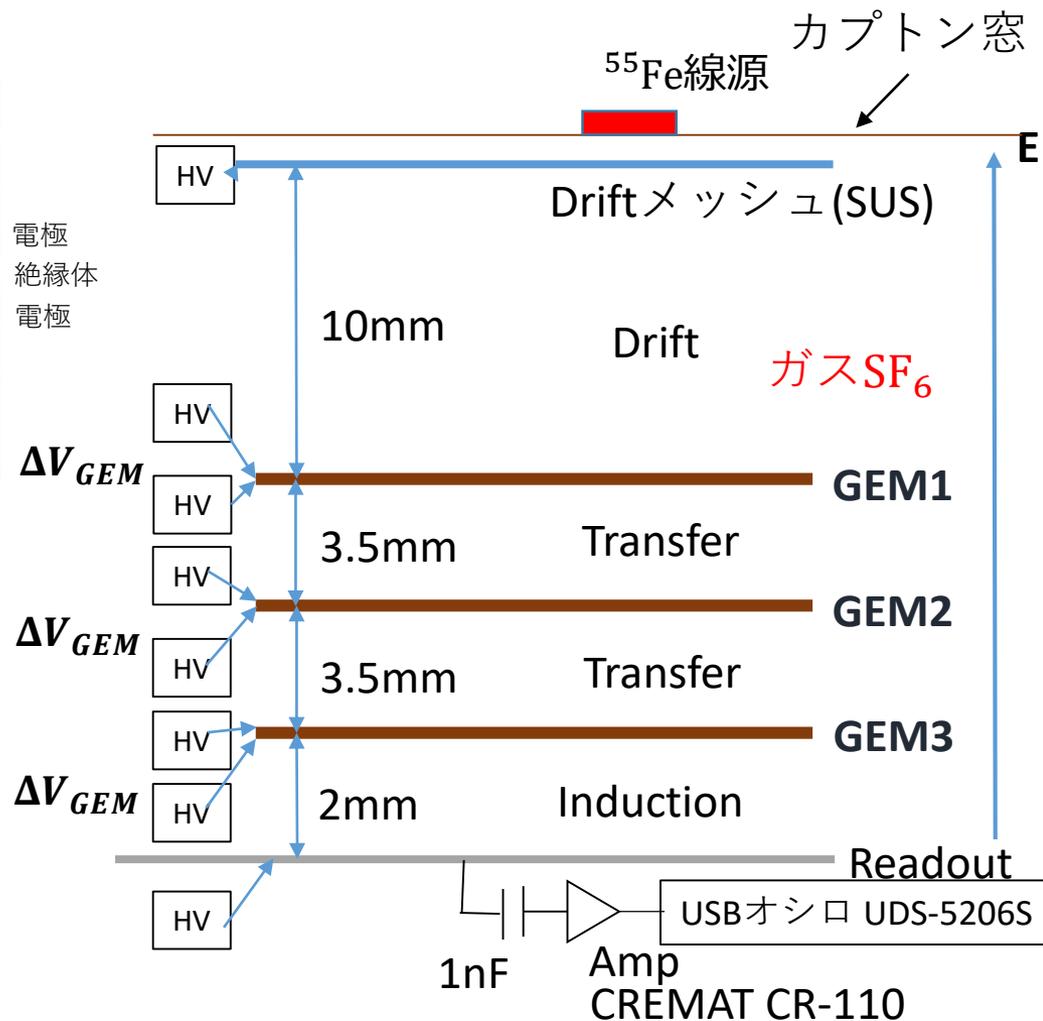
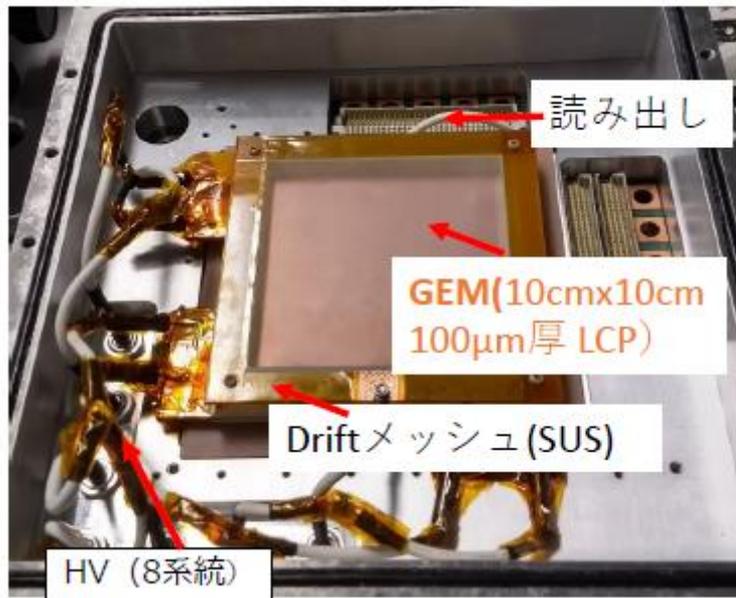
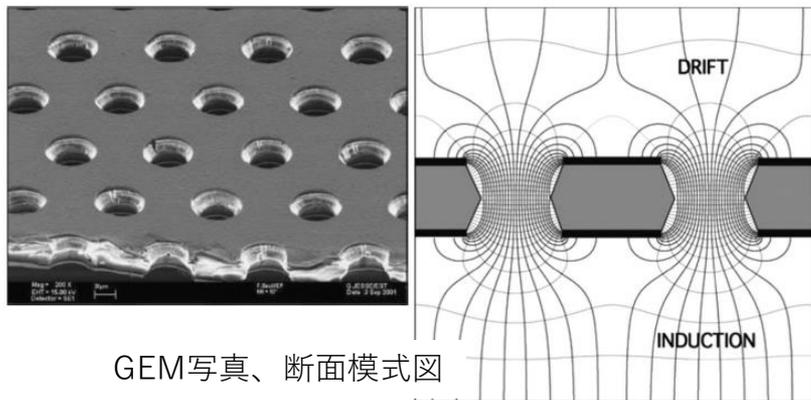


# 陰イオンガス中MPGD特性

基礎測定としてSF<sub>6</sub>ガス(陰イオンガス)中GEMガスゲインを測定

➢ 100 μm GEM 2 or 3段を用いてガス圧、印加電圧を変え測定

GEM厚 50 μm 3段、400 μm 1段の先行研究あり

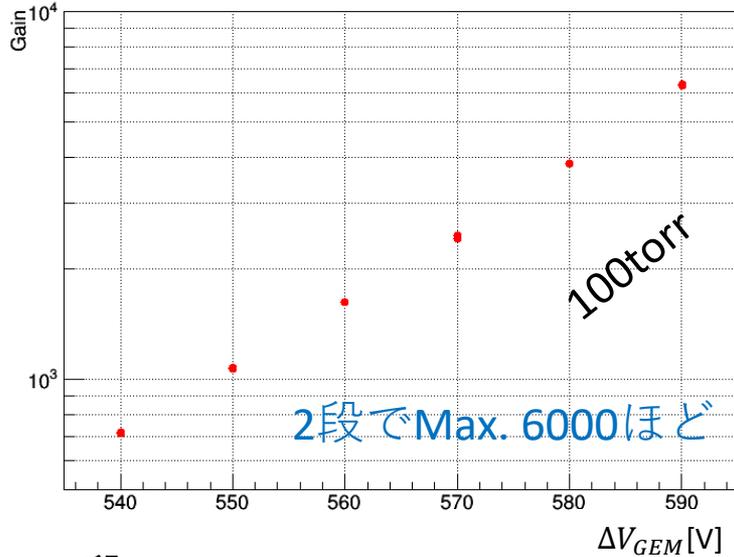


# 2段/3段GEM ゲインカーブ

GEMへの印加電圧とガスゲインの関係性=ゲインカーブ

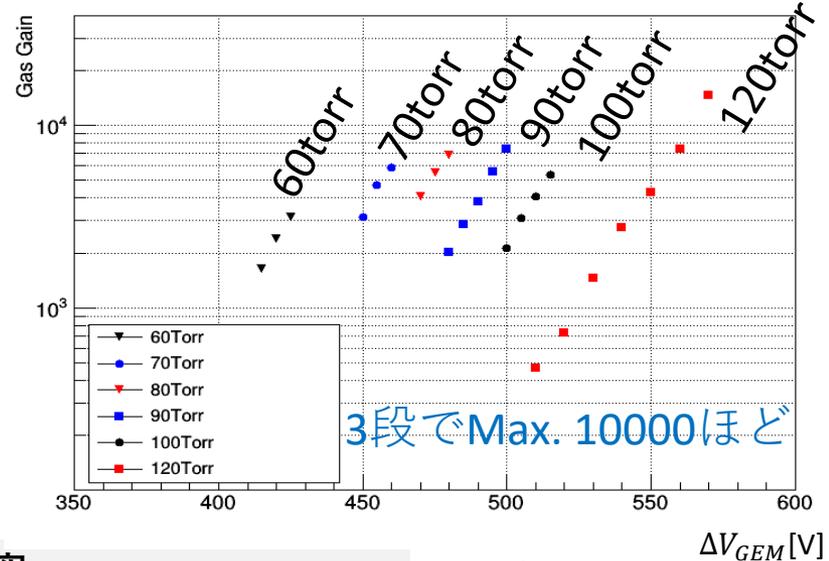
• 2段GEM

Gain @ 100 Torr SF6 Double-GEM



• 3段GEM

$\Delta V_{GEM}$  and Gas Gain (SF<sub>6</sub> 60~120torr)

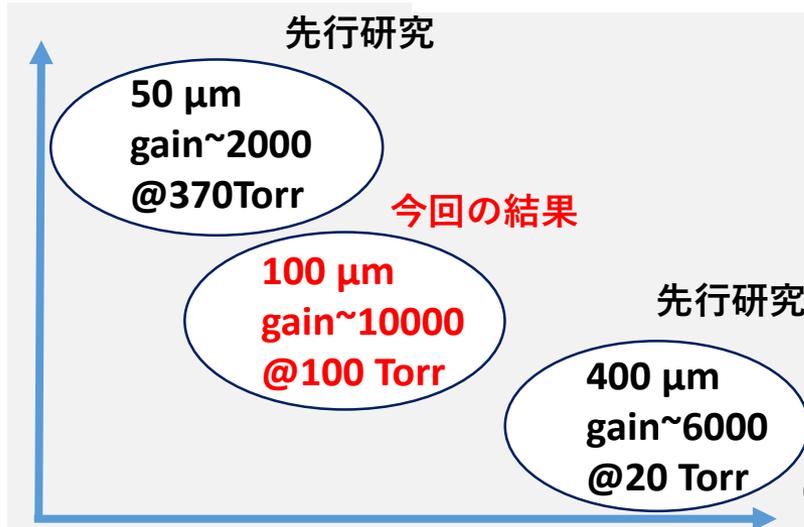


2段GEM  
SF<sub>6</sub> 100 Torr

動作  
ガス圧

3段GEM  
SF<sub>6</sub> 60~120 Torr

動作パラメータ  
最大ガスゲイン図

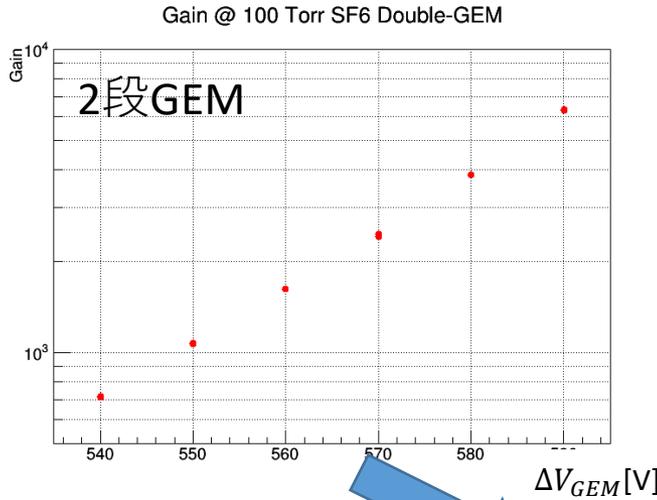


先行研究の結果の  
中間条件での動作確認

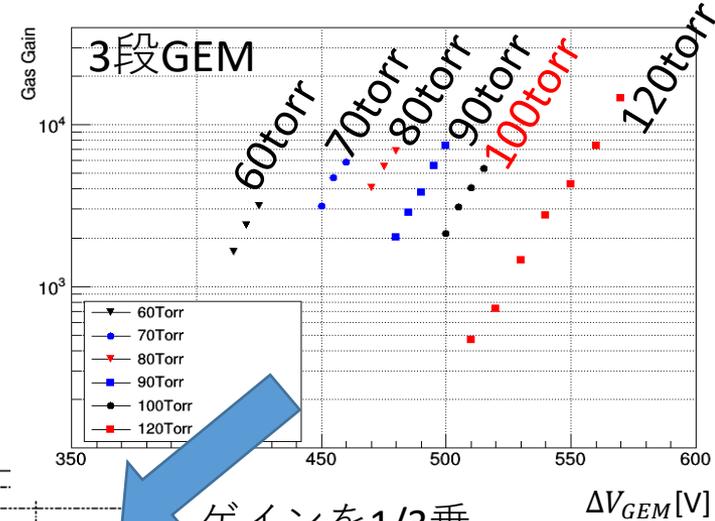
GEM厚さ

# 2段/3段GEM 測定結果

## 2段/3段GEMの結果から1段当たりのゲイン計算 (100 Torr)



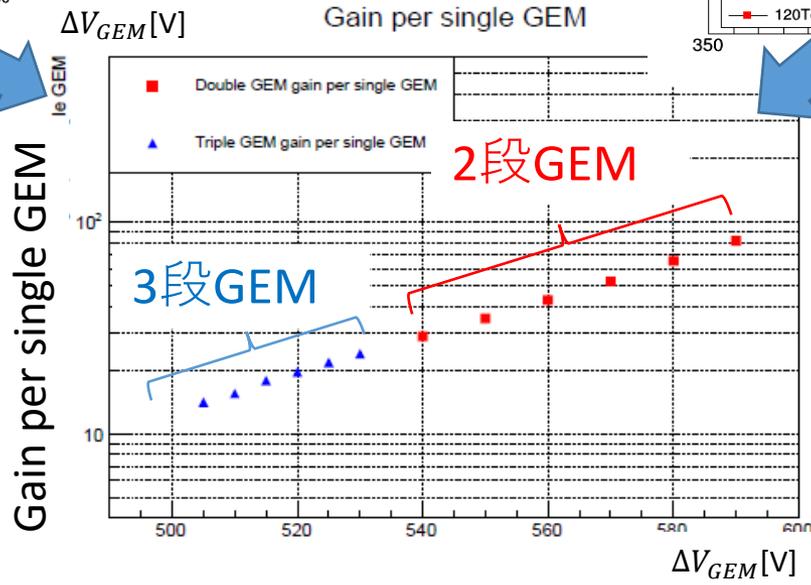
## $\Delta V_{GEM}$ and Gas Gain (SF<sub>6</sub> 60~120torr)



ゲインを1/2乗

ゲインを1/3乗

1段当たりガスゲイン  
→ 一直線上  
→ GEM間電荷損失  
ほぼ無し



2段、3段GEM  
• 脱離・増幅・吸着過程が  
N(=2,3)回繰り返し  
→ 段ごとのプロセスに着目

1段GEM(N=1)  
について考えればよい

### 目標

➤ 1段GEMシミュレーションを行いゲインカーブを再現

## ▶ 用いたシミュレーションツールキット

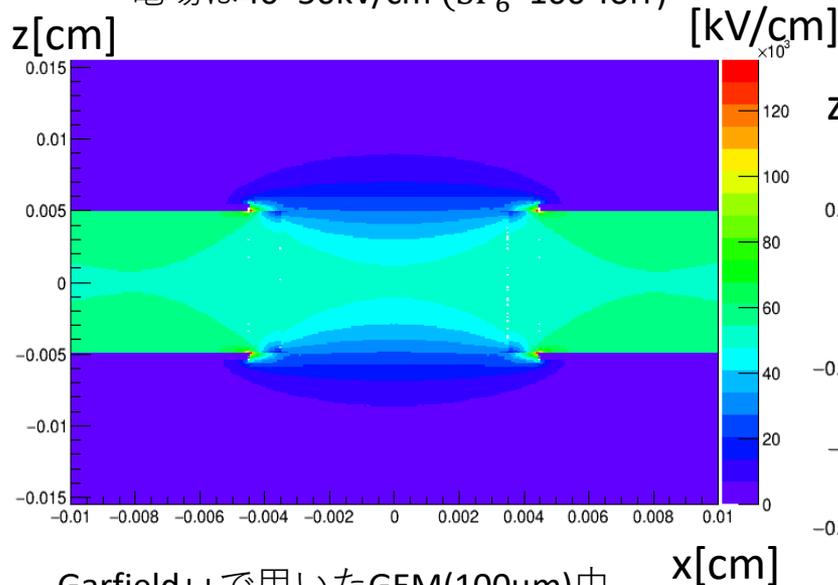
### ▪ Magboltz

電子-ガス分子の反応断面積から電子の移動、増幅率などを計算

### ▪ Garfield++

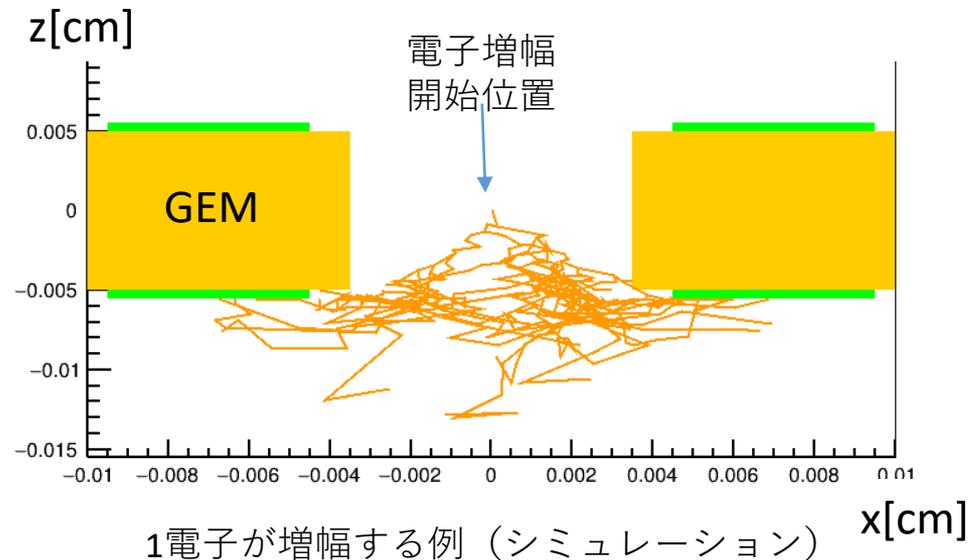
ガスの媒質データ、電極や絶縁体の形状、電場データを外部、電子増幅率をMagboltzから取り込み、電荷の輸送&電子増幅を計算・可視化

GEM中で増幅が始まる典型的な電場は40~50kV/cm (SF<sub>6</sub> 100 Torr)



Garfield++で用いたGEM(100 $\mu$ m)中電場マップの例

2018年6月 CERNにてGarfield++の開発者Rob Veenhof氏と陰イオンガス中MPGDシミュレーションの共同研究



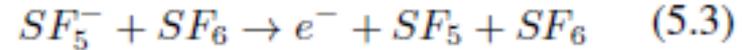
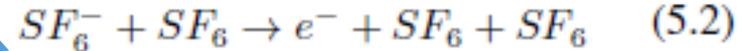
1電子が増幅する例 (シミュレーション)

# 電子脱離プロセス

## 電子脱離プロセス反応の候補

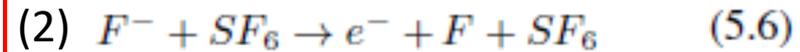
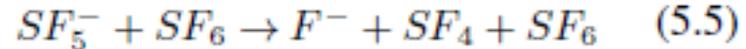
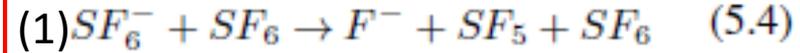
増幅するには電子脱離が必要

- a) 式(5.2)のSF<sub>6</sub><sup>-</sup>から直接脱離する反応
- b) 式(5.4)~(5.6)のF<sup>-</sup>を介した脱離反応



100 eV必要だが

左下図  
緑、青



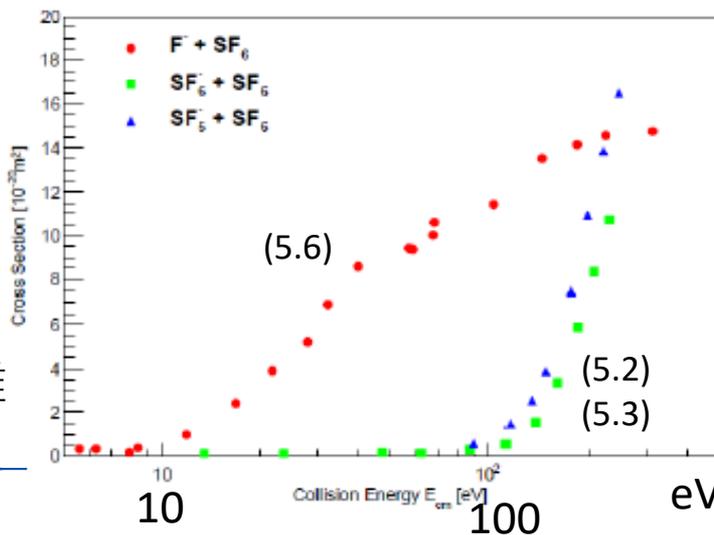
右下図  
緑、青

➤ 測定された反応断面積の大小

➤ 増幅の始まる電場の大きさ

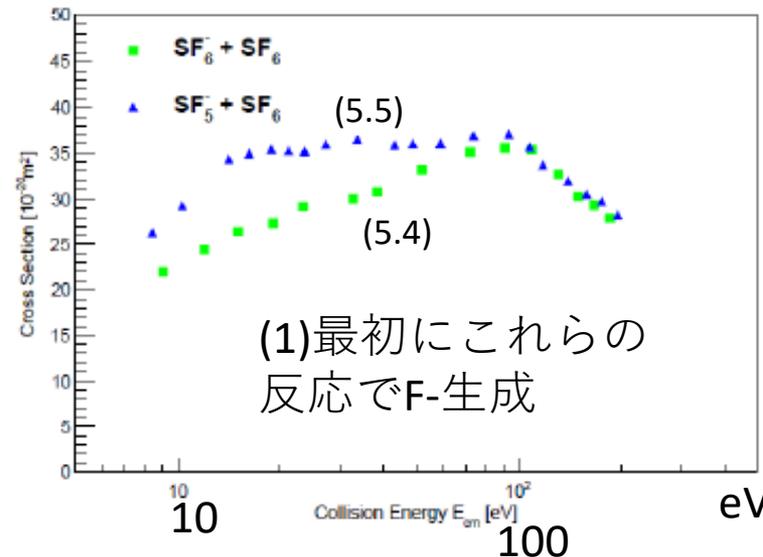
(40~50kV/cm @100Torr)

から b)の反応が最有力と考えられる



(2)次にF<sup>-</sup>からの  
反応(5,6)でe<sup>-</sup>脱離

10eVと低いエネルギー  
から立ち上がり



(1)最初にこれらの  
反応でF<sup>-</sup>生成

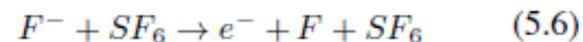
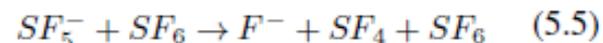
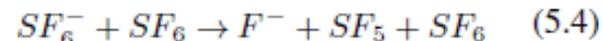
本研究：F<sup>-</sup>を介した電子脱離反応=メインの反応とする

# 陰イオンガス中MPGDシミュレーション

Garfield++: 陰イオンからの電子脱離プロセス含まれず

→陰イオンからの電子脱離プロセスを組み込む必要

## 電子脱離の反応



➤ 電子脱離のモデルとして

### 1) 実験結果から推定したトイモデル

GEM中電場 40~50kV/cm @100Torr で脱離 (実験より)

40~50kV/cm付近で電子脱離確率が立ち上がるモデル (右下図 赤線)

### 2) 電子脱離電場依存モデル(右下図)

電子脱離反応断面積から構築した

( $\xi=1$  青 or  $\xi=10$  マゼンダ)

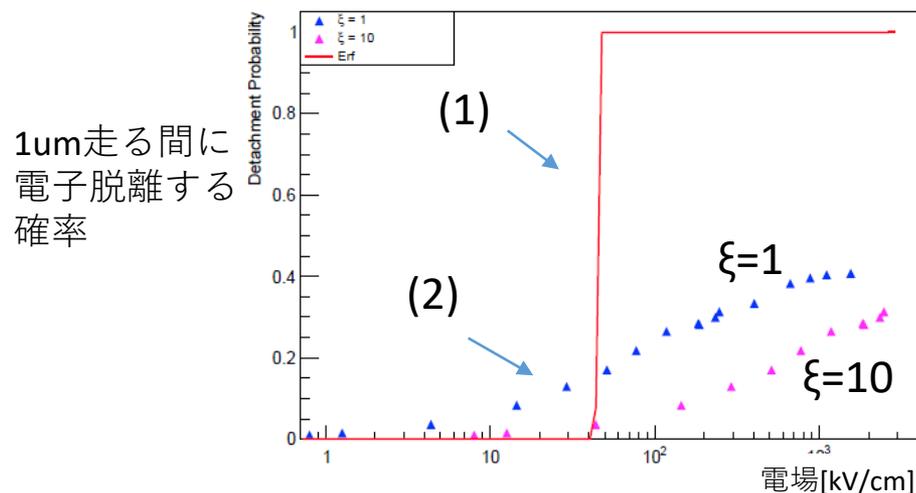
を用いてシミュレーション

反応に必要なエネルギー $\epsilon$   
平均自由行程 $\lambda$ から反応の起こる電場 $E$   
 $\xi$ は自由パラメータとして

$$E = \xi \epsilon / \lambda$$

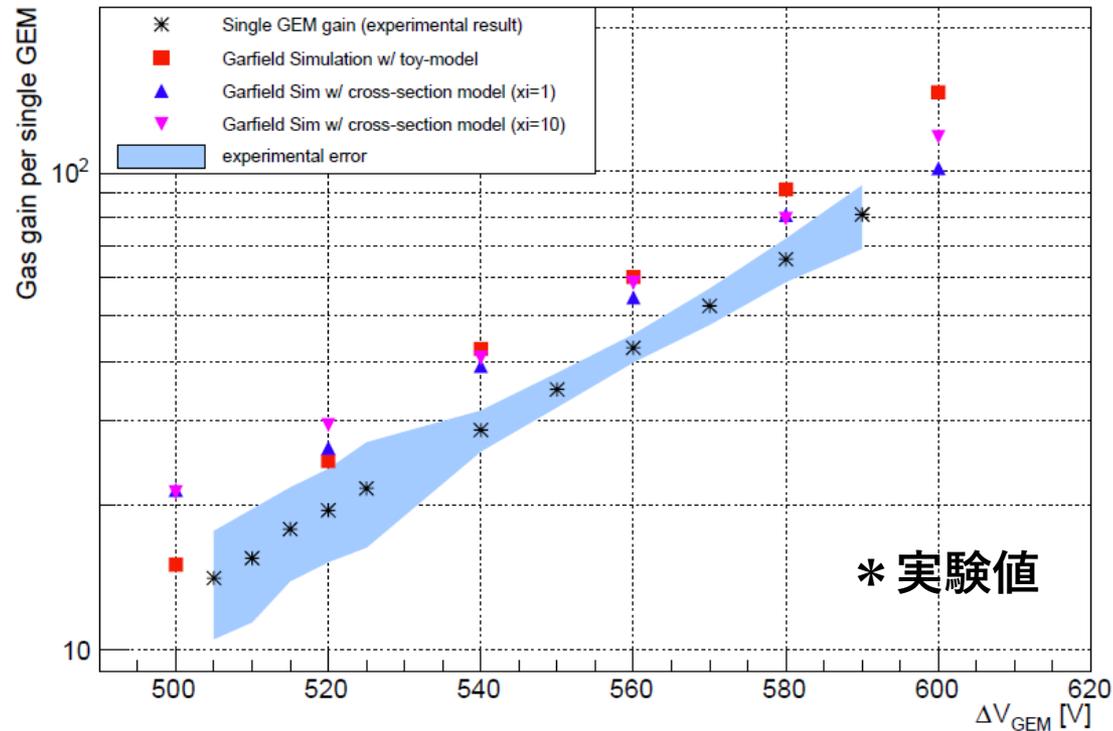
電子脱離確率

Detachment Probability



# シミュレーション結果

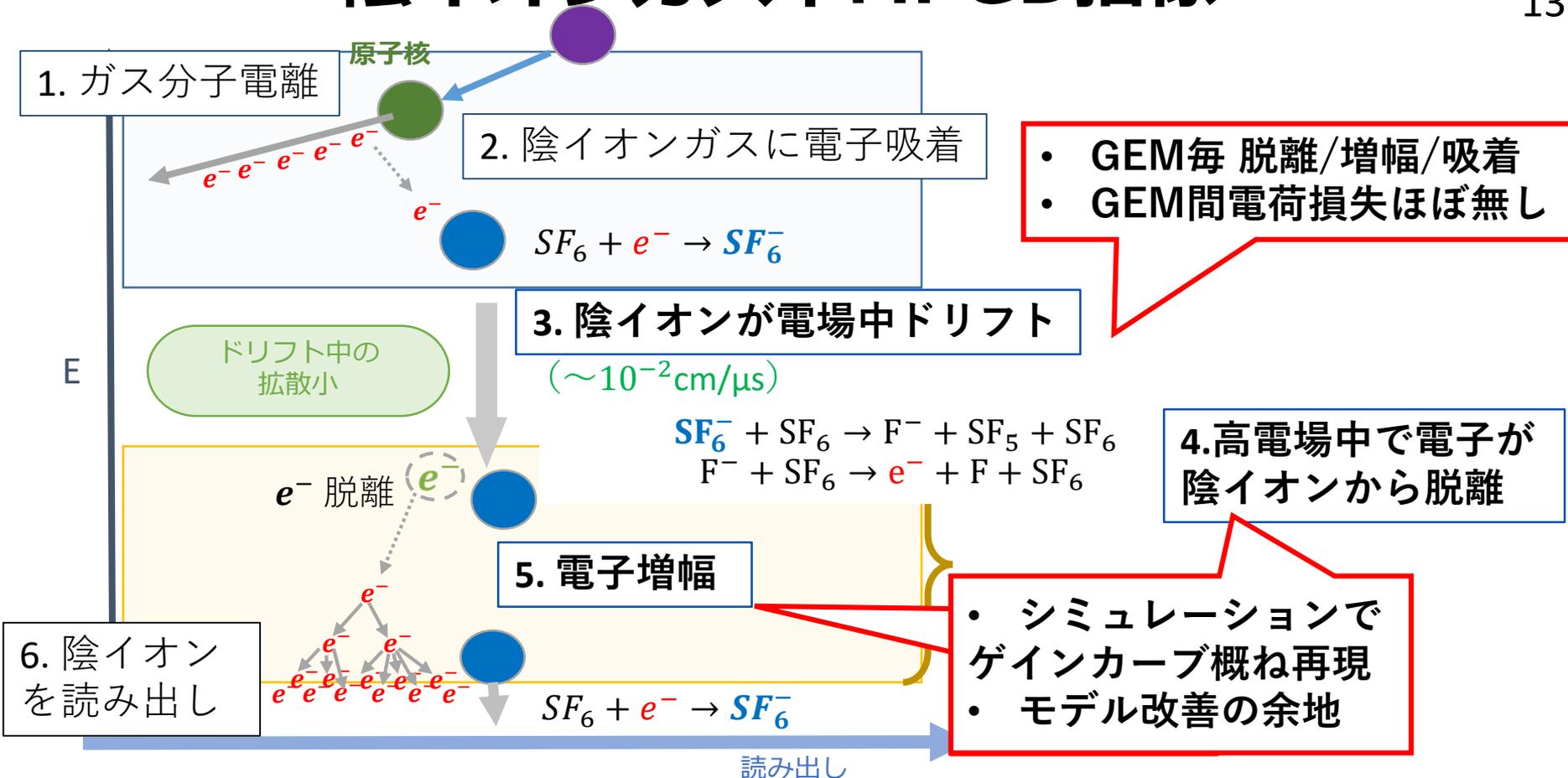
- 1) 40~50kV/cmの電場付近で電子脱離確率が立ち上がる Toy Model (赤 ■)
  - 実験で得られたゲインカーブと Garfield++ を用いた再現
- 2) 電子脱離の反応断面積を考慮したモデル (青 ▲、マゼンダ ▼)
  - 反応断面積モデルでは Toy Model と実験値に比べ、傾き小



反応断面積モデルは低電場でも電子脱離が起き、増幅長が Toy Model より長く  
→ 傾きに違い

電子脱離確率電場依存モデルのパラメータ再考の必要性

# 陰イオンガス中MPGD描像



## MPGD描像&シミュレーションから

- ガスゲイン/エネルギー分解能の理解→エネルギー閾値へ
- メイン&マイノリティチャージ検出向上→有効体積カットなど運用条件最適化

大型NI $\mu$ -TPC実現&最適化へ

- 今後
  - 理解した特性+シミュレーションを用いてMPGD/TPCの選定&改良
    - 陰イオンガス $\mu$ -TPC開発、暗黒物質探索感度向上へ
- まとめ
  - NEWAGE : 方向感度を持つ暗黒物質探索
    - 検出器由来 $\alpha$ 線バックグラウンドで感度制限→低減必要
    - バックグラウンド低減のため陰イオンガスTPC開発中
  - 陰イオンガスTPC開発・改良のためMPGD基礎特性を研究
    - GEMの基礎測定
    - シミュレーション手法を開発、ゲインカーブを概ね再現
      - 陰イオンガス中MPGD描像理解を進めた

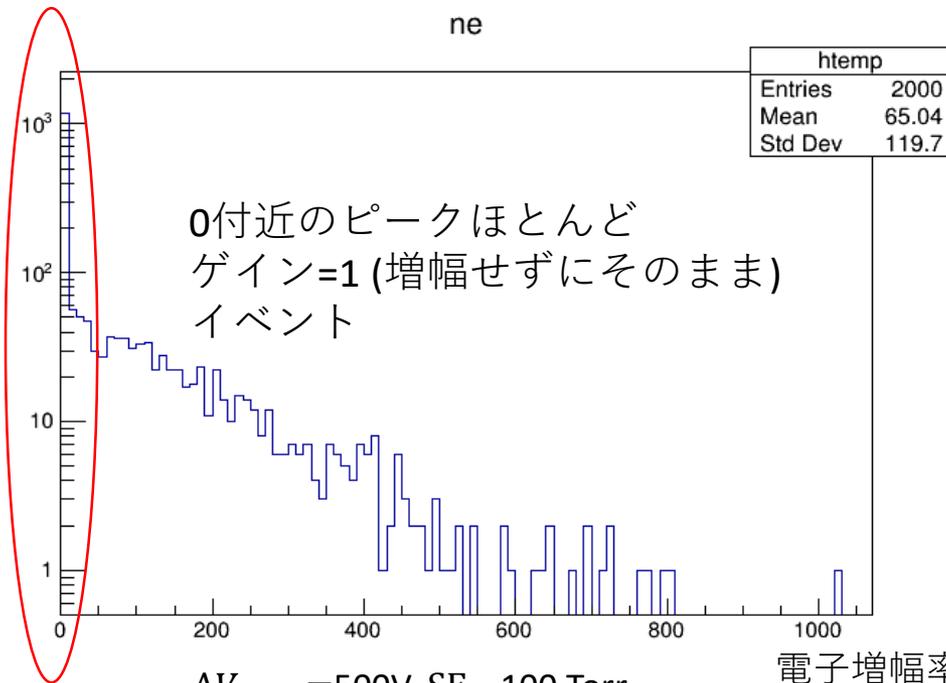


# Garfield++による電子増幅シミュレーション 16

➤ Garfield++を用いたSF<sub>6</sub> 中 1電子増幅率

➤ 反応断面積 (右図)

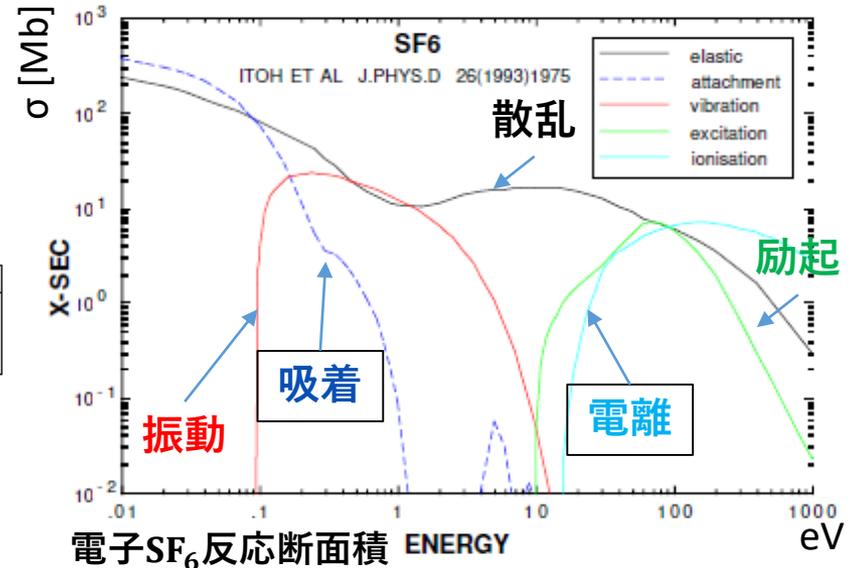
低いエネルギー側で電離以外反応 (特に吸着)



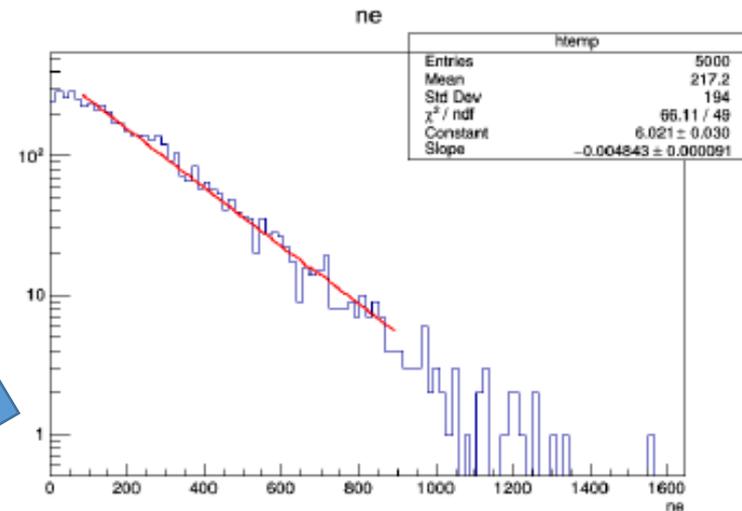
0付近のピークほとんど  
ゲイン=1 (増幅せずにそのまま)  
イベント

$\Delta V_{GEM} = 500V$ , SF<sub>6</sub> 100 Torr  
(後のゲインカーブ導出に利用)

電子増幅率



電子SF<sub>6</sub>反応断面積 ENERGY eV



参考Ar + C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 9: 1 1atm 中での  
1電子ガス増幅率

増幅が十分行われない  
→ エネルギー分解能が悪く  
定量的な説明まだ

# GEM測定結果

MPGDを陰イオンガス中基礎測定し、特性理解へ

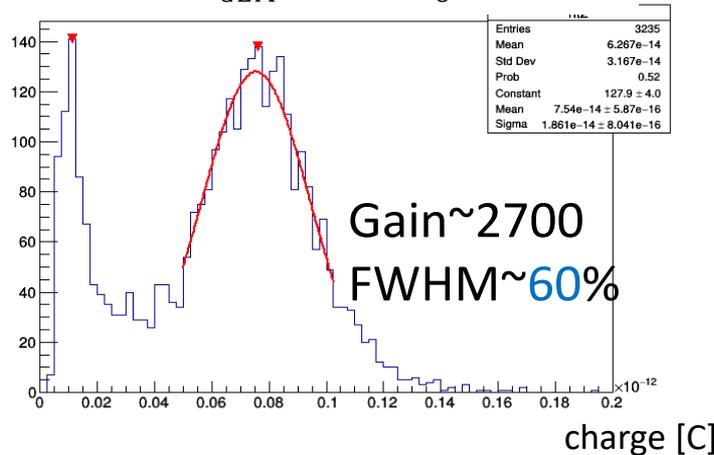
➤ GEMのガス圧や印加電圧等パラメータを変え、ガスゲインを測定

\*760 Torr = 1気圧 = 1013hPa

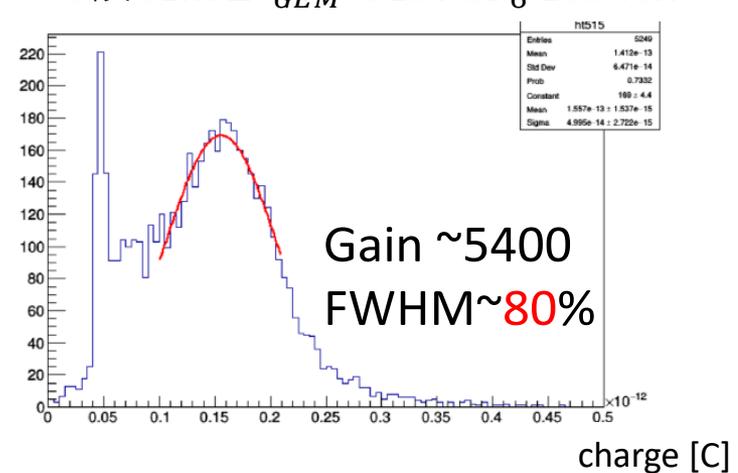
## 測定エネルギースペクトル例

FWHMはMean比

2段GEM  $\Delta V_{GEM}=570V$  SF<sub>6</sub> 100 Torr \*



3段GEM  $\Delta V_{GEM}=515V$  SF<sub>6</sub> 100 Torr \*



比較：Ar + C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 90:10 760 Torr(1気圧) 3段GEM ではFWHM 20~30%

エネルギー分解能の

- Ar + C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> ガスとの違い
- GEM枚数での違い



• 電子吸着/脱離過程

(陰イオンガス中MPGD特有の過程)  
を1段毎に繰り返す影響と考えられる

## ➤ 暗黒物質

- 宇宙の組成の約27%、未発見の粒子

## ➤ 暗黒物質の存在の示唆

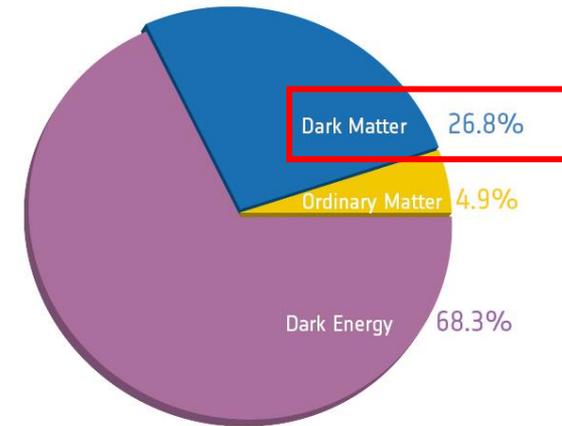
- 銀河の回転曲線問題、宇宙マイクロ波背景放射  
重力レンズ効果 など

## ➤ 直接探索実験

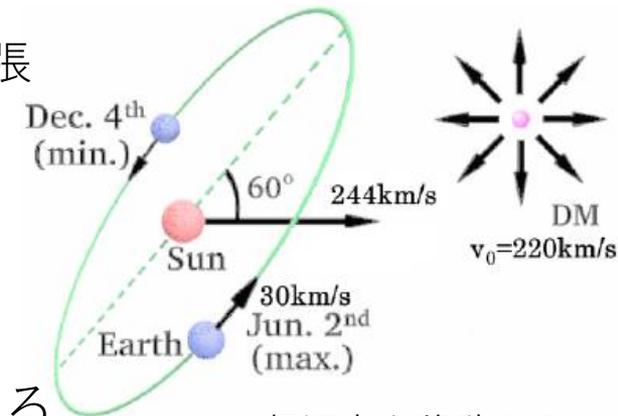
- DAMA実験が季節変動検出により暗黒物質発見を主張
- XENON1T、LUXなど他実験により否定  
→より確実な手法による探索必要

## ➤ 方向感度を用いた手法

- 太陽系の運動に依る暗黒物質の「風」をとらえる  
→暗黒物質**到来方向異方性**が期待  
→**確実な証拠**として期待



宇宙組成(Planck衛星 観測結果より)

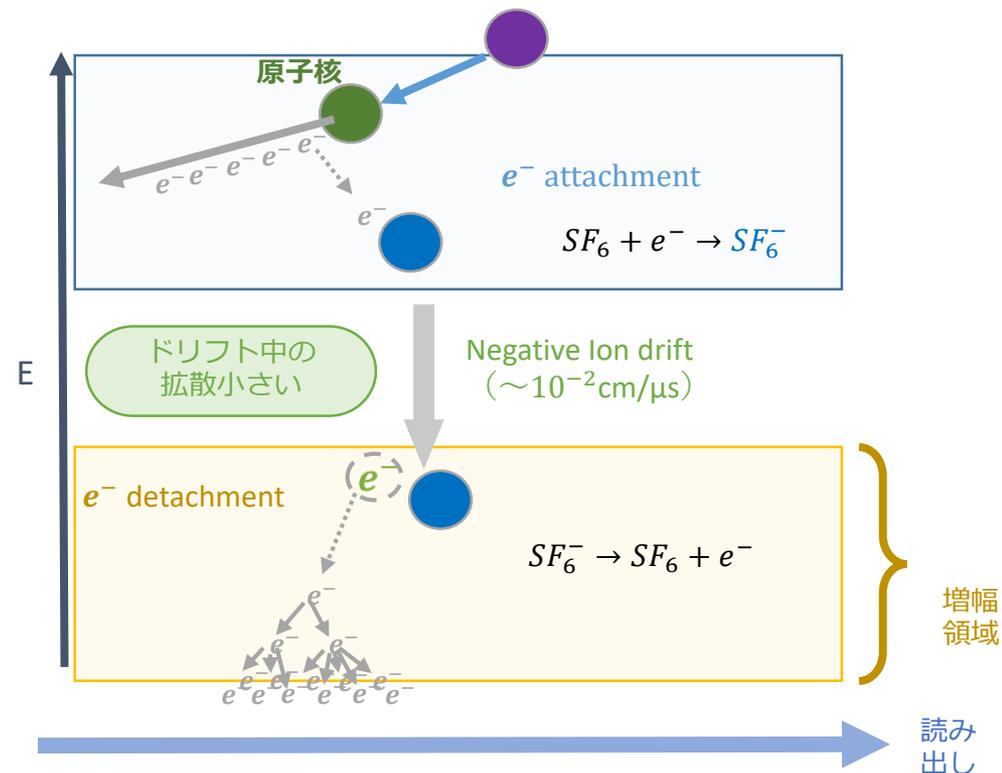


銀河中を移動する太陽系のモデル

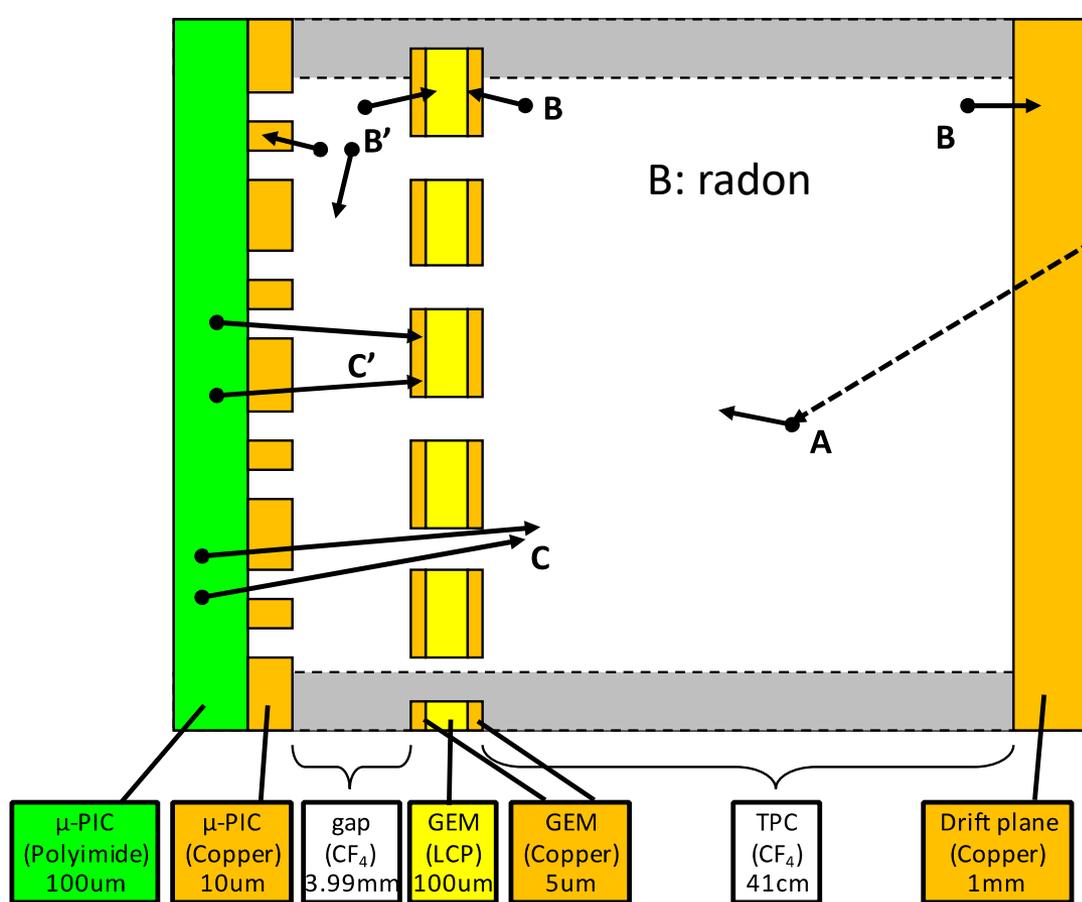
## ➤ SF6 – 陰イオンガス

- 電子親和力が高い。不活性。毒性なし
- 絶縁ガス、眼科医療用ガスとして用いられる

- 2015年 生成された複数種陰イオンの到達時間差から絶対位置決定に New Mexico大のグループが成功



$\mu$ -PIC表面BG



copper electronodes

