

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

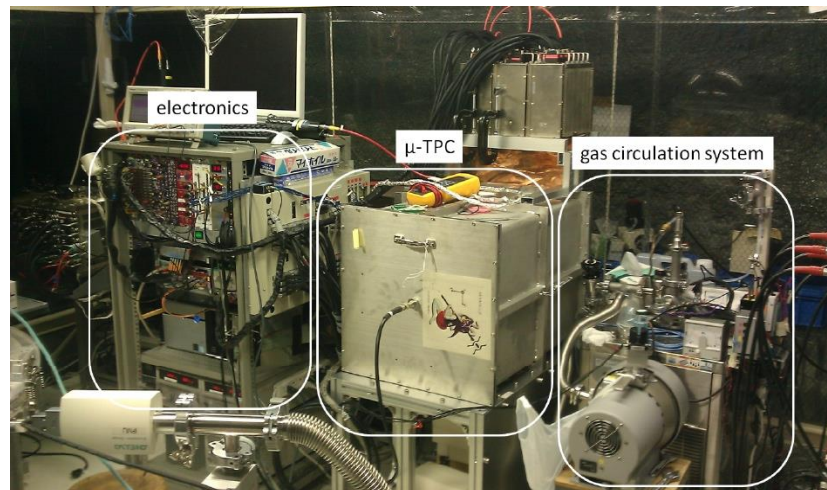
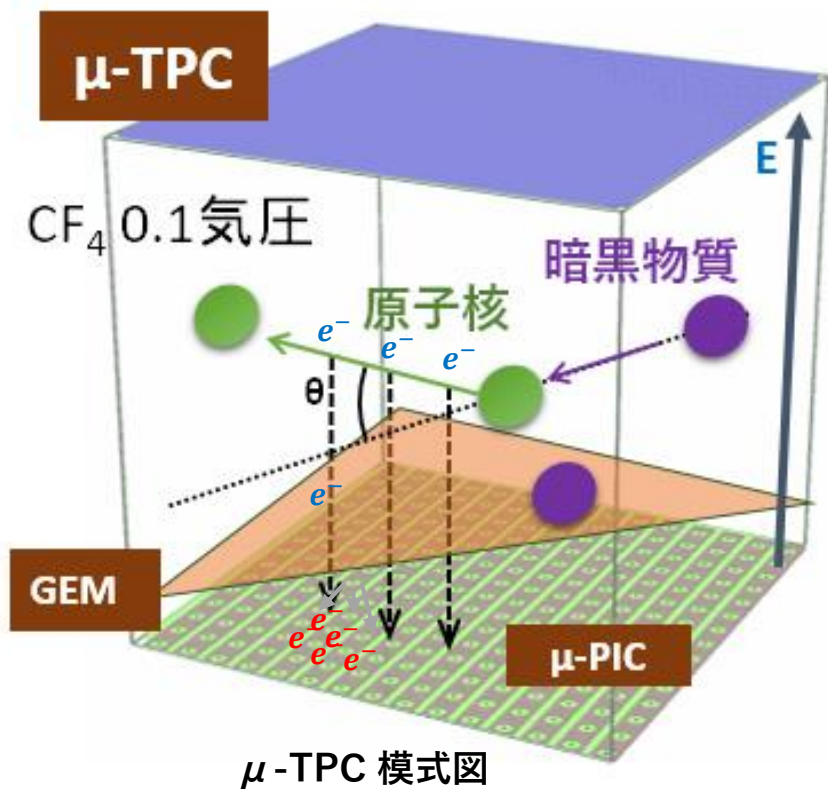
発表Outline

- NEWAGE
- 陰イオン μ -TPC (NI μ -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(μ -TPC)を用いた**方向に感度を持つ**暗黒物質直接探索実験

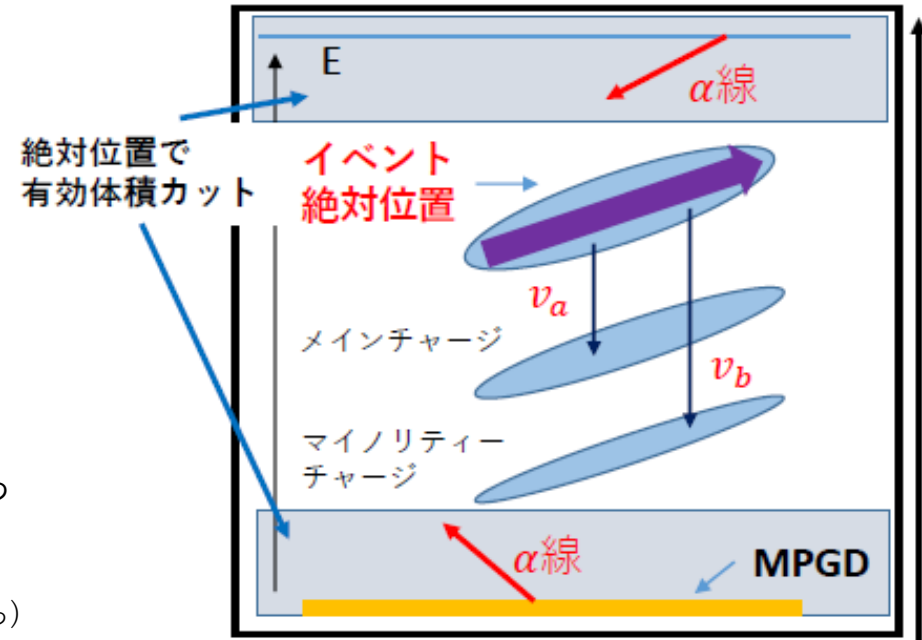
➤ 暗黒物質により原子核反跳されたフッ素原子核の飛跡をとらえる



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, μ -PIC : MPGD(Micro Pattern Gaseous Detector)の一種

陰イオン μ -TPC模式図

NEWAGE 現状の課題

- **バックグラウンド(BG)** → 感度制限
(検出器由来 α 線)

Hashimoto et al.
arXiv:1707.09744

➤ 陰イオン μ -TPC

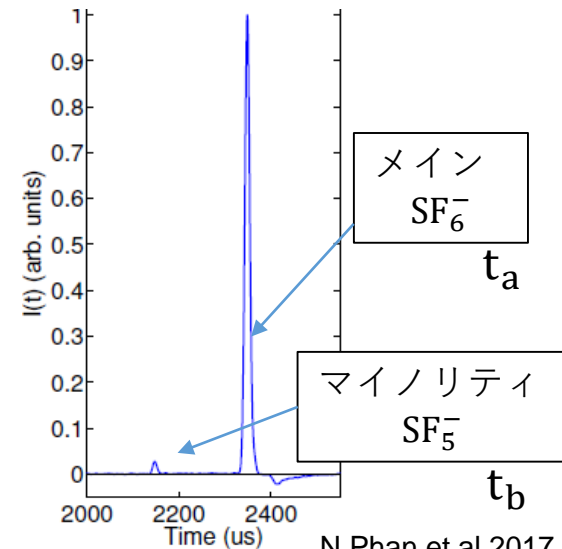
- 拡散小 (電子に比べ)
- **絶対位置決定**で有効体積カット
複数種陰イオンのドリフト速度差から
→ **BG削減**(右図)
CS₂(DRIFT(英))、その後SF₆で実証(N.Phanら)

→ 陰イオン μ -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)

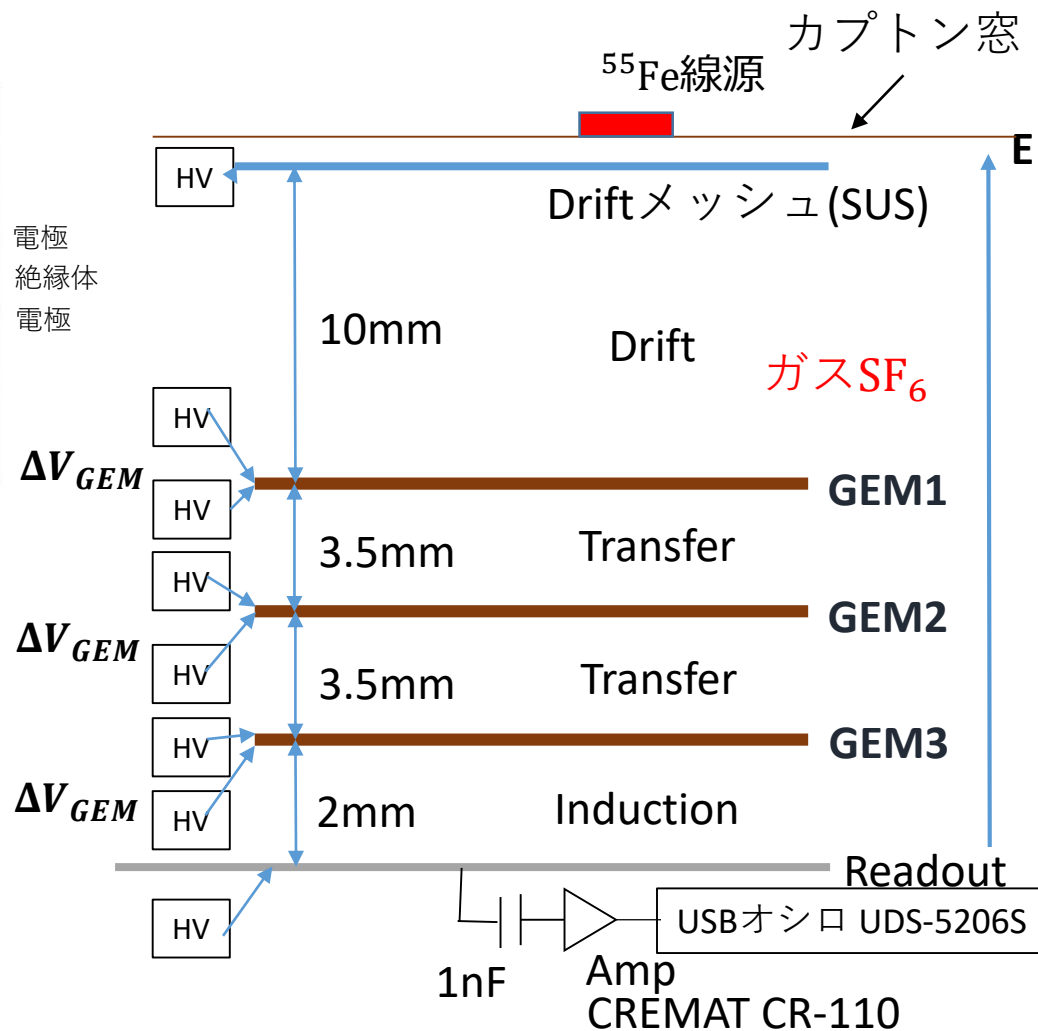
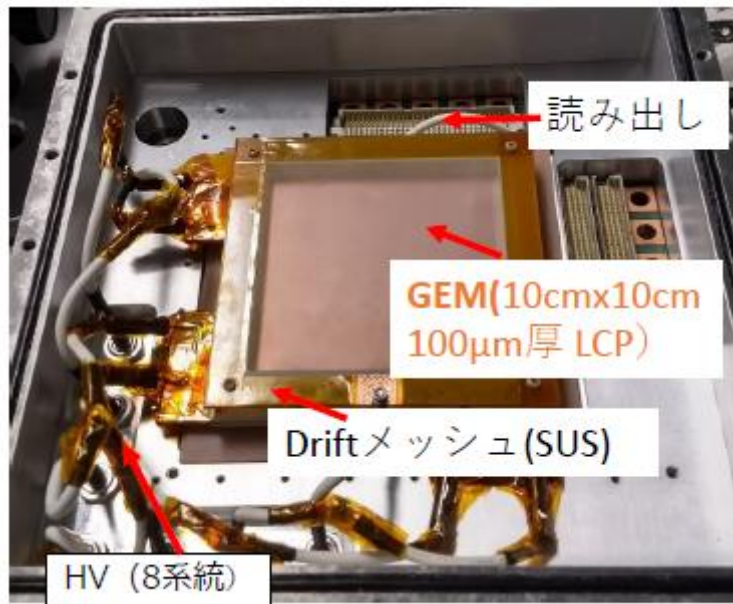
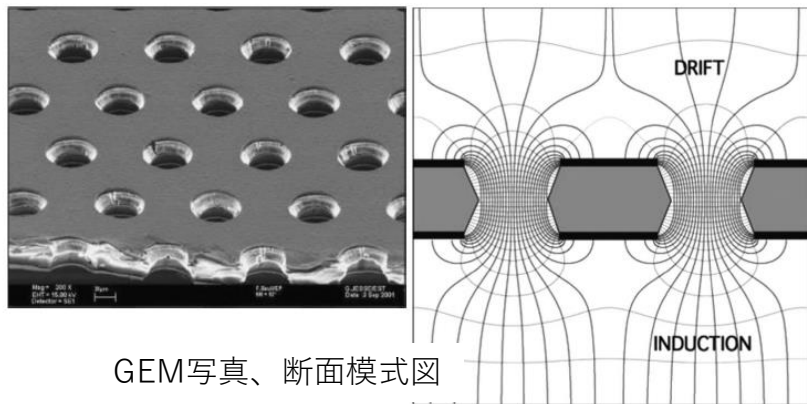


陰イオンガス中MPGD特性

基礎測定としてSF₆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

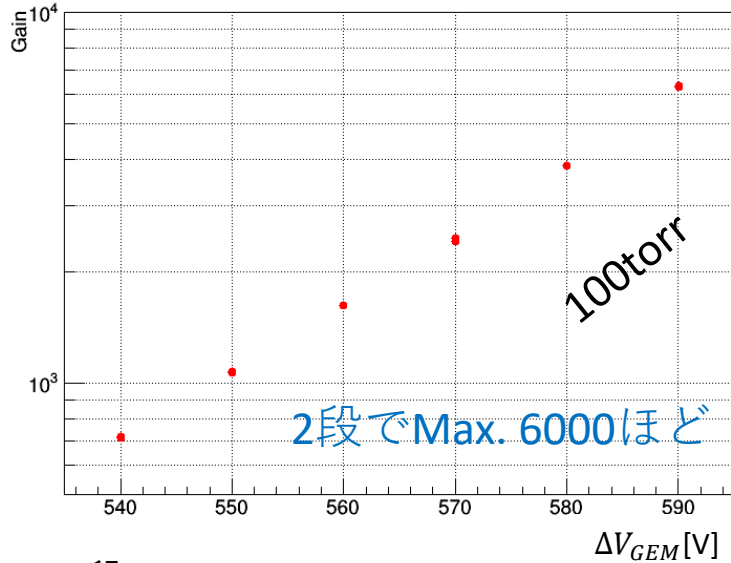


2段/3段GEM ゲインカーブ

GEMへの印加電圧とガスゲインの関係性=ゲインカーブ

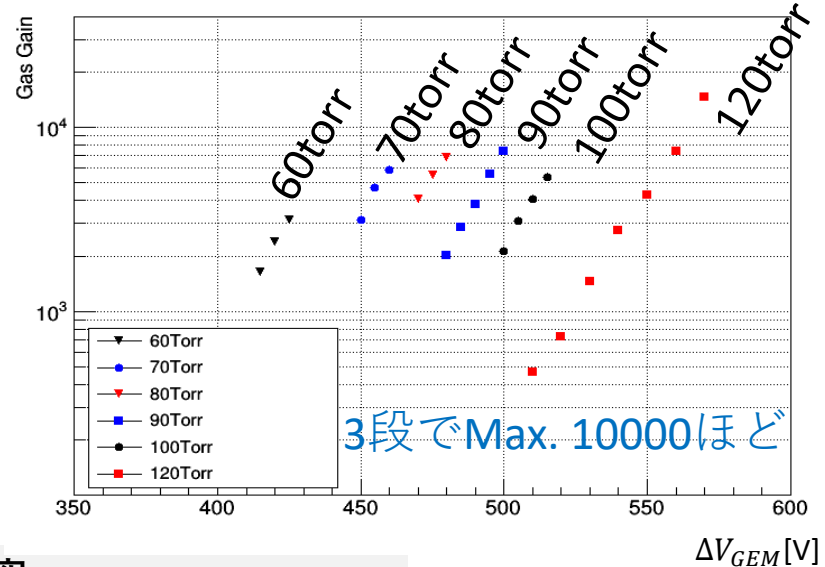
• 2段GEM

Gain @ 100 Torr SF6 Double-GEM



• 3段GEM

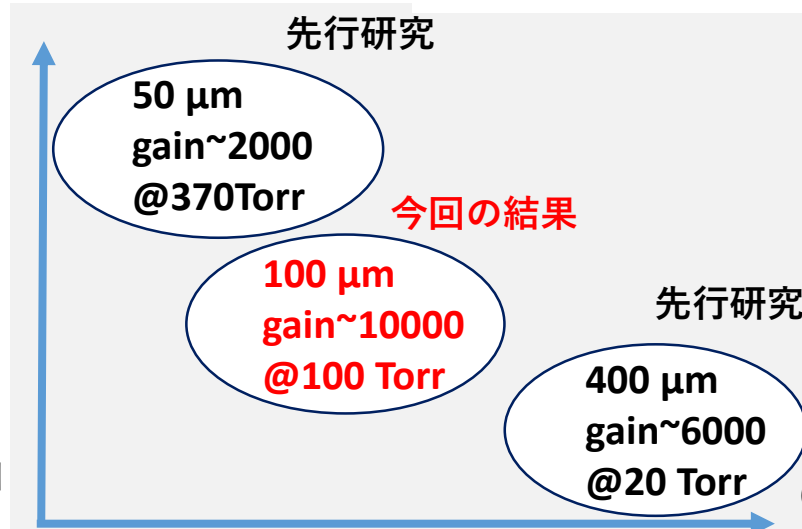
ΔV_{GEM} and Gas Gain (SF₆ 60~120torr)



2段GEM
SF₆ 100 Torr

動作
ガス圧

3段GEM
SF₆ 60~120 Torr

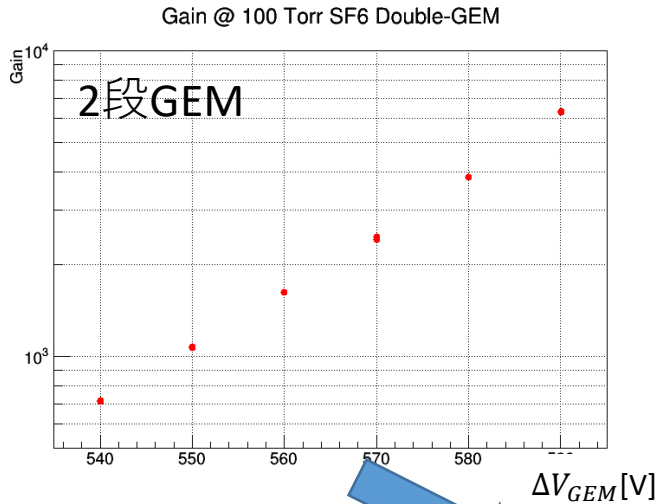


動作パラメータ
最大ガスゲイン図

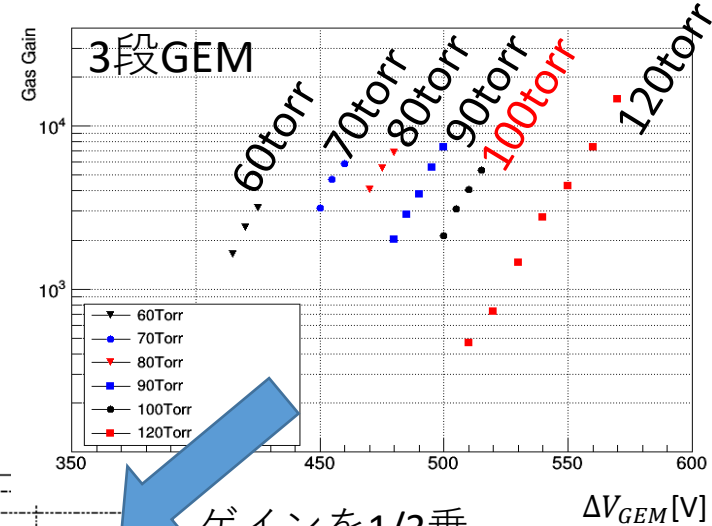
先行研究の結果の
中間条件での動作確認

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)



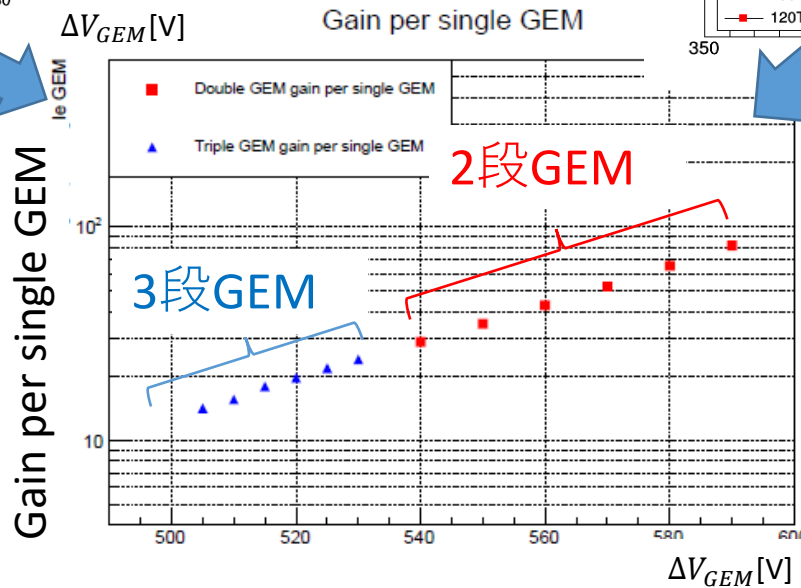
ΔV_{GEM} and Gas Gain (SF₆ 60~120torr)



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)回繰り返す
- 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

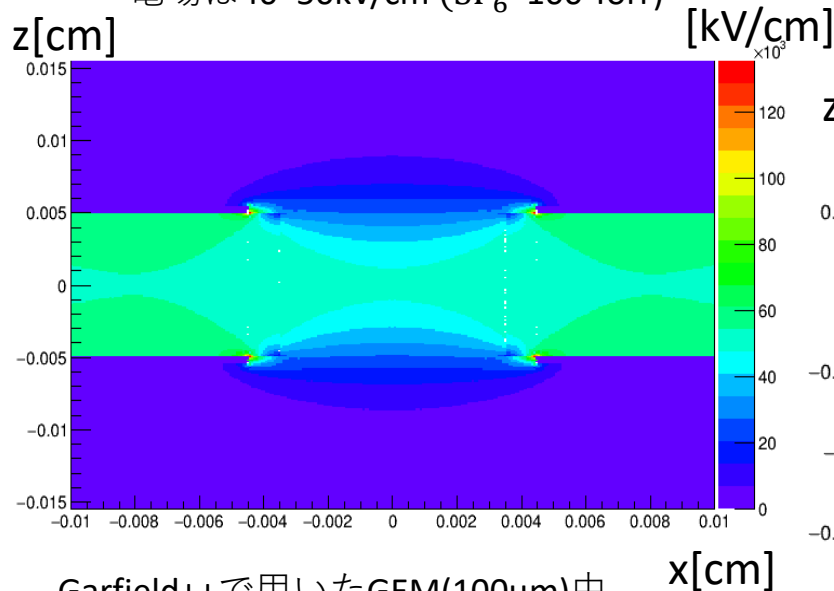
▪ Magboltz

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

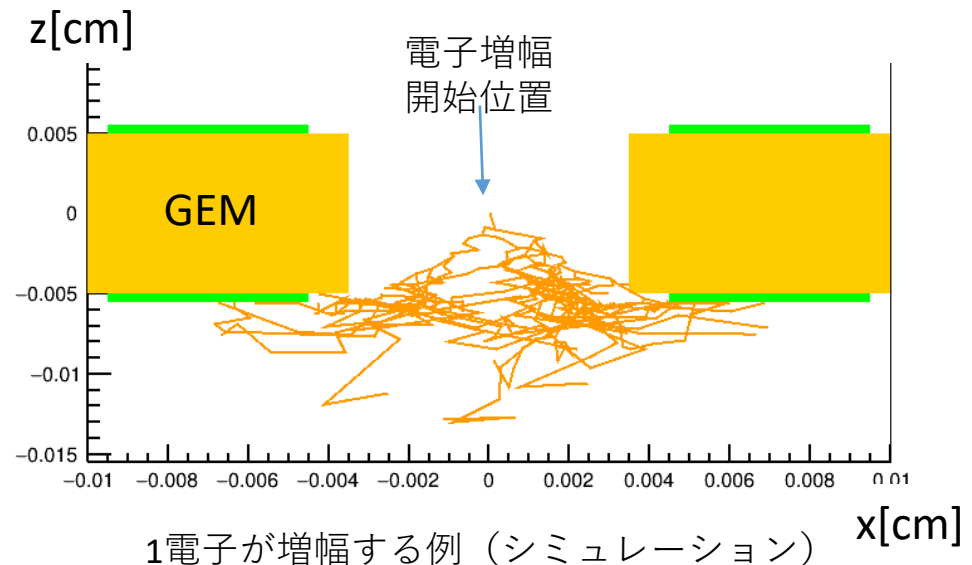
▪ Garfield++

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 (SF₆ 100 Torr)



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

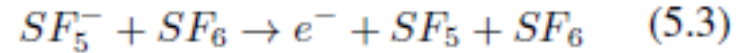
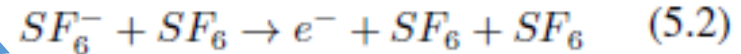


電子脱離プロセス

電子脱離プロセス反応の候補

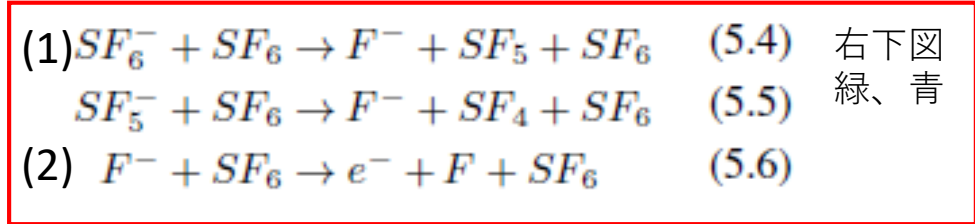
増幅するには電子脱離が必要

- a) 式(5.2)のSF₆⁻から直接脱離する反応
- b) 式(5.4)~(5.6)のF⁻を介した脱離反応



100 eV必要だが

左下図
緑、青



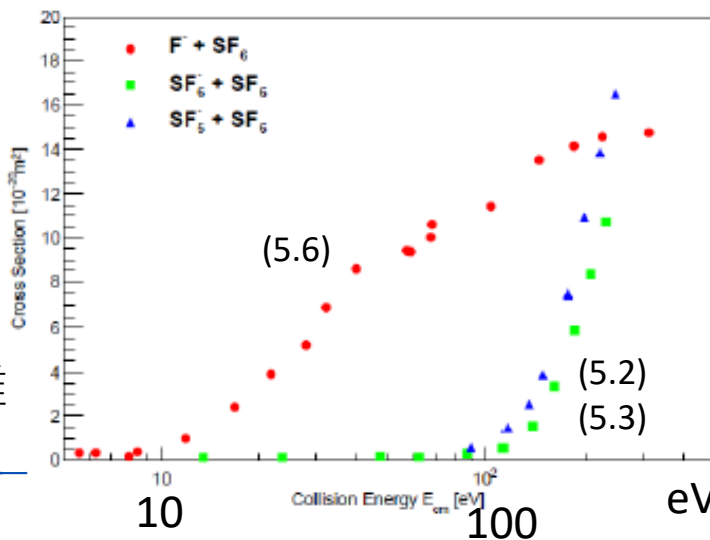
右下図
緑、青

➤ 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

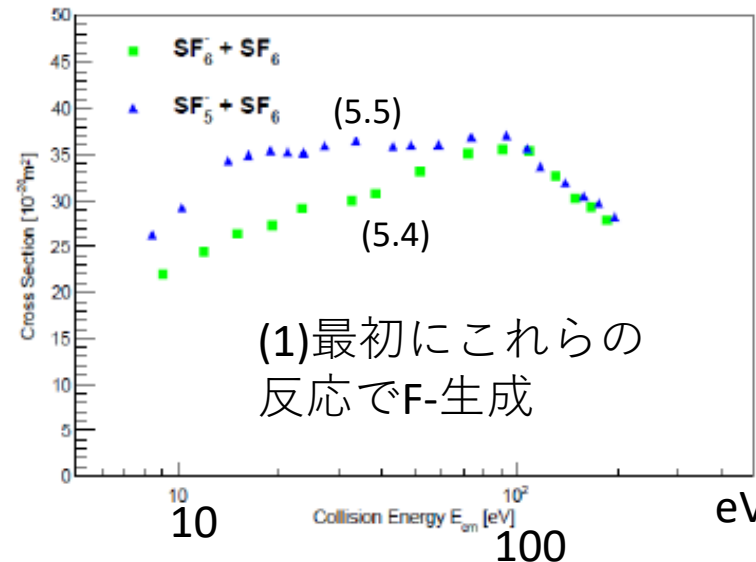
(40~50kV/cm @100Torr)

から b)の反応が最有力と考えられる



(2)次にF⁻からの
反応(5,6)でe⁻脱離

10eVと低いエネルギー
から立ち上がり



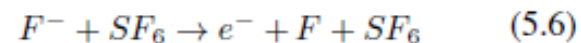
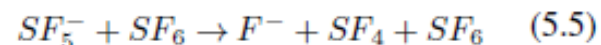
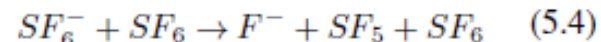
(1)最初にこれらの
反応でF⁻生成

本研究：F⁻を介した電子脱離反応=メインの反応とする

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)

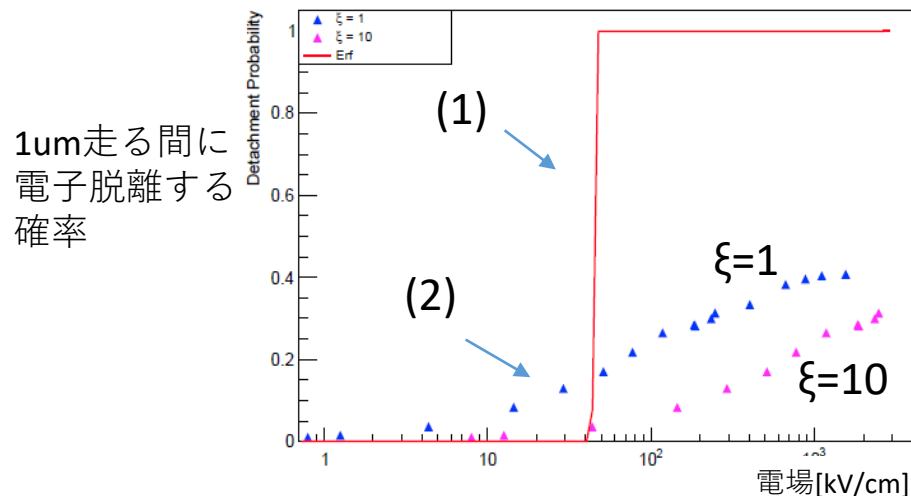
を用いてシミュレーション

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

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

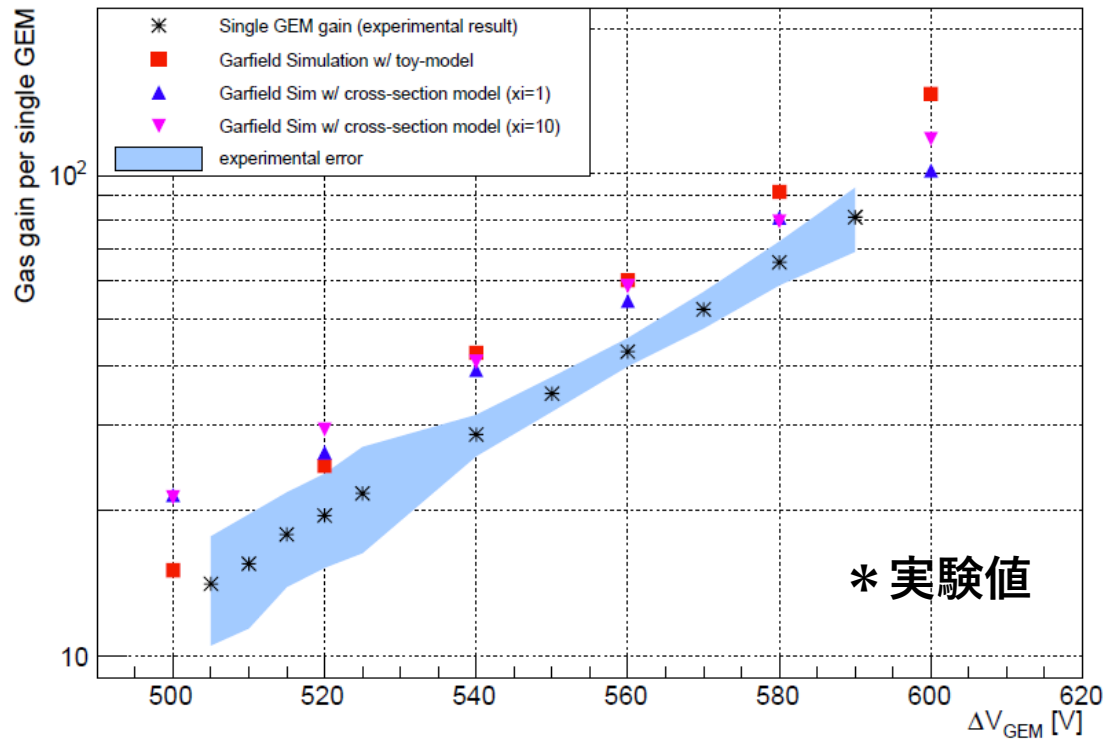
電子脱離確率

Detachment Probability



シミュレーション結果

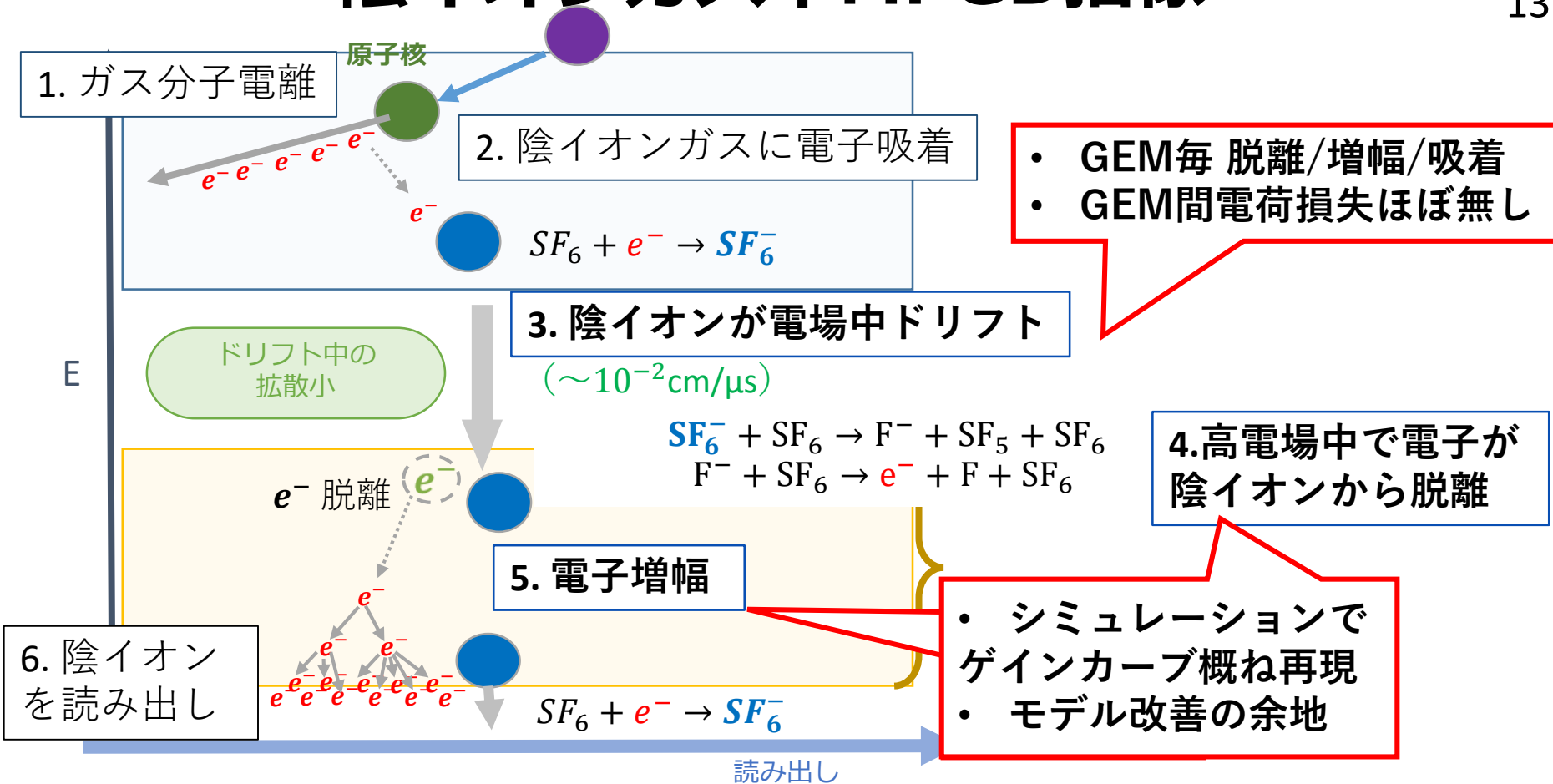
- 1) 40~50kV/cmの電場付近で電子脱離確率が立ち上がる Toy Model (赤 ■)
 - 実験で得られたゲインカーブと Garfield++ を用いた再現
- 2) 電子脱離の反応断面積を考慮したモデル (青 ▲、マゼンダ ▼)
 - 反応断面積モデルでは Toy Model と実験値に比べ、傾き小



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 μ -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 μ -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 α 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

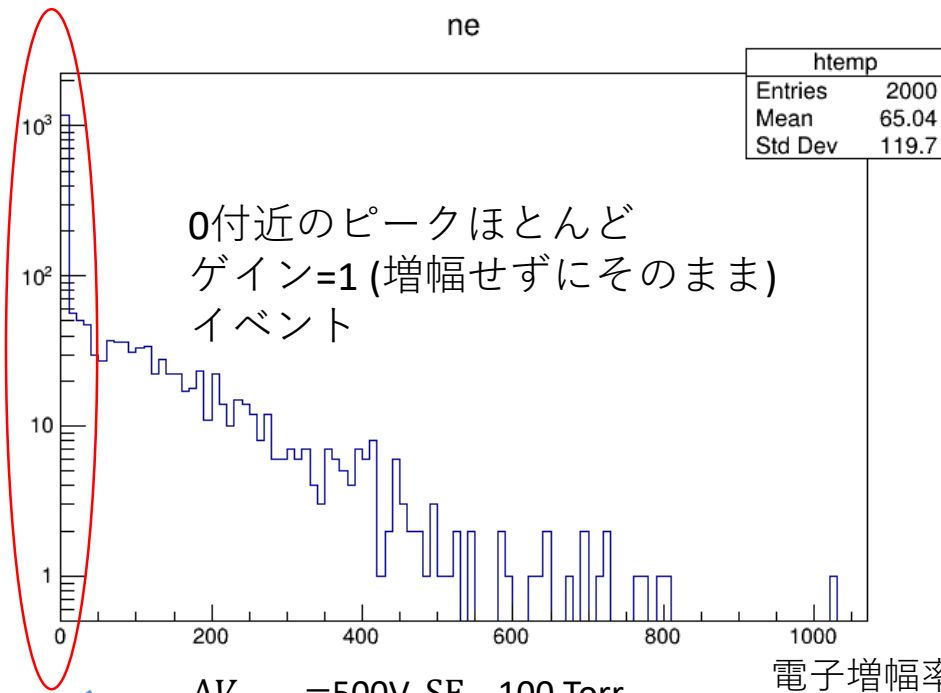
 - 陰イオンガスTPC開発・改良のためMPGD基礎特性を研究
 - GEMの基礎測定
 - シミュレーション手法を開発、ゲインカーブを概ね再現
→陰イオンガス中MPGD描像理解を進めた

Garfield++による電子増幅シミュレーション 16

➤ Garfield++を用いたSF₆ 中 1電子増幅率

➤ 反応断面積 (右図)

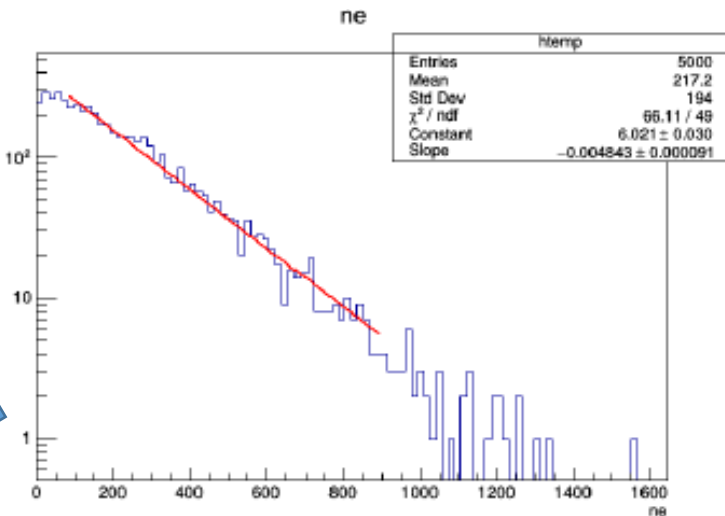
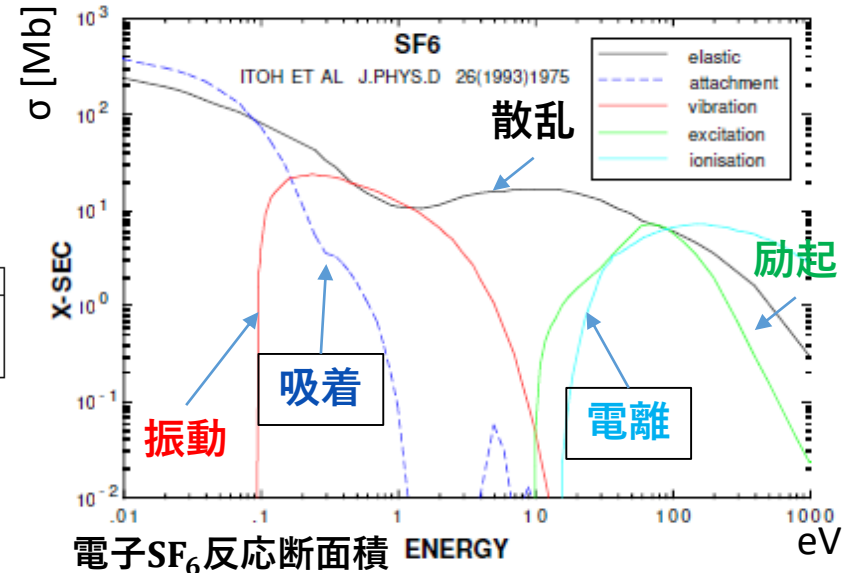
低いエネルギー側で電離以外反応 (特に吸着)



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

$\Delta V_{GEM} = 500V$, SF₆ 100 Torr
(後のゲインカーブ導出に利用)

電子増幅率



参考Ar + C₂H₆ 9:1 1atm 中での
1電子ガス増幅率

増幅が十分行われ
→ 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

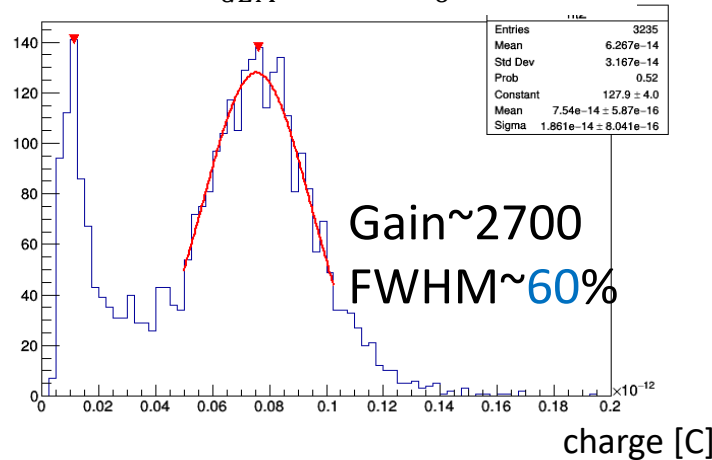
➤ GEMのガス圧や印加電圧等パラメータを変え、ガスゲインを測定

*760 Torr = 1気圧 = 1013hPa

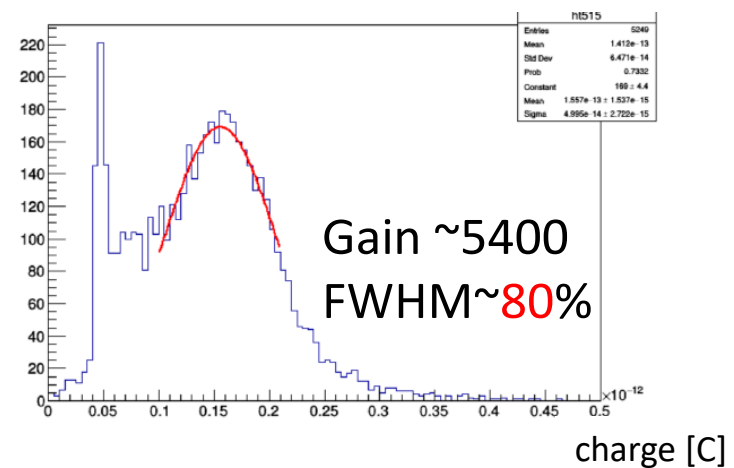
測定エネルギースペクトル例

FWHMはMean比

2段GEM $\Delta V_{GEM}=570V$ SF₆ 100 Torr *



3段GEM $\Delta V_{GEM}=515V$ SF₆ 100 Torr *



比較：Ar + C₂H₆ 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 + C₂H₆ 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

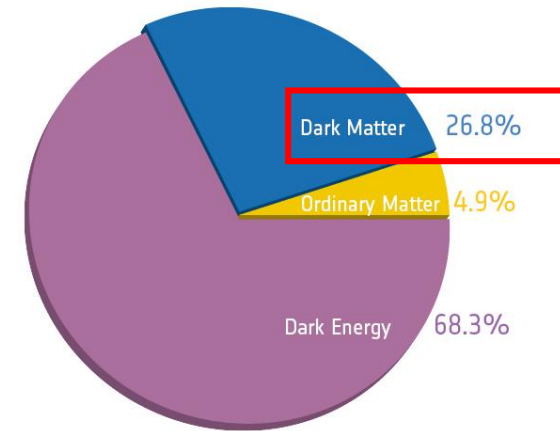
- 銀河の回転曲線問題、宇宙マイクロ波背景放射
重力レンズ効果 など

➤ 直接探索実験

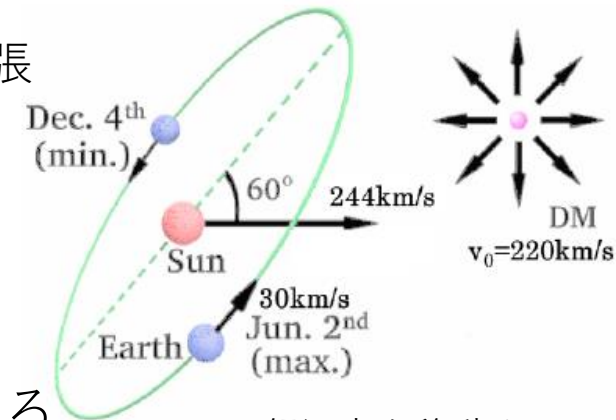
- DAMA実験が季節変動検出により暗黒物質発見を主張
- XENON1T、LUXなど他実験により否定
→より確実な手法による探索必要

➤ 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)

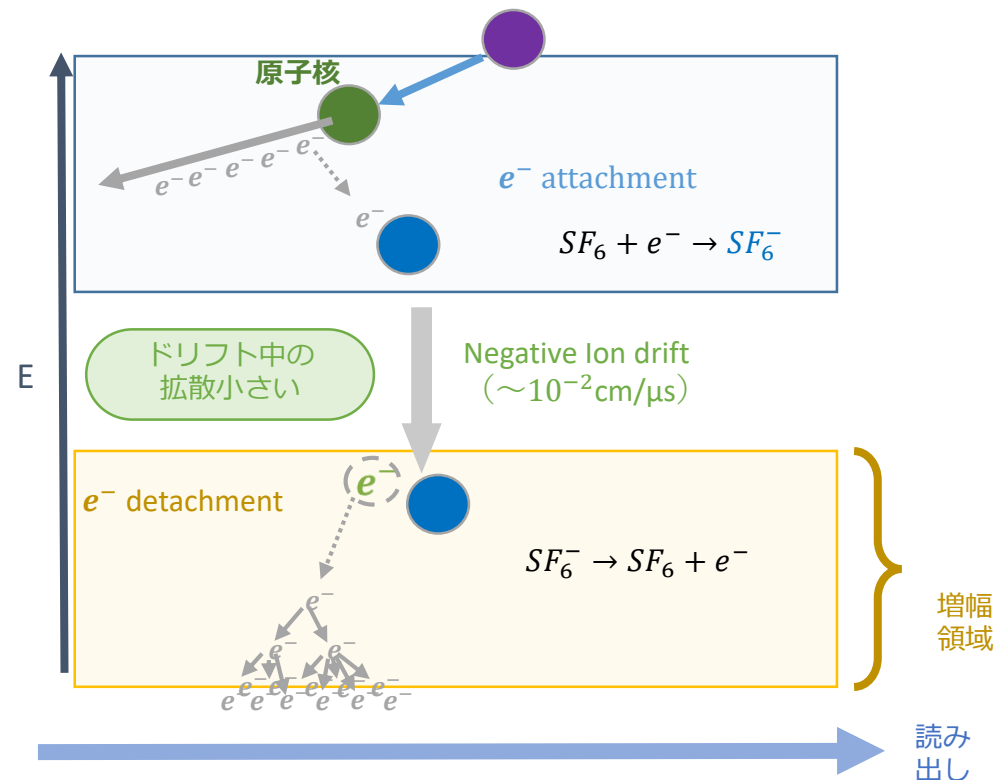


銀河中を移動する太陽系のモデル

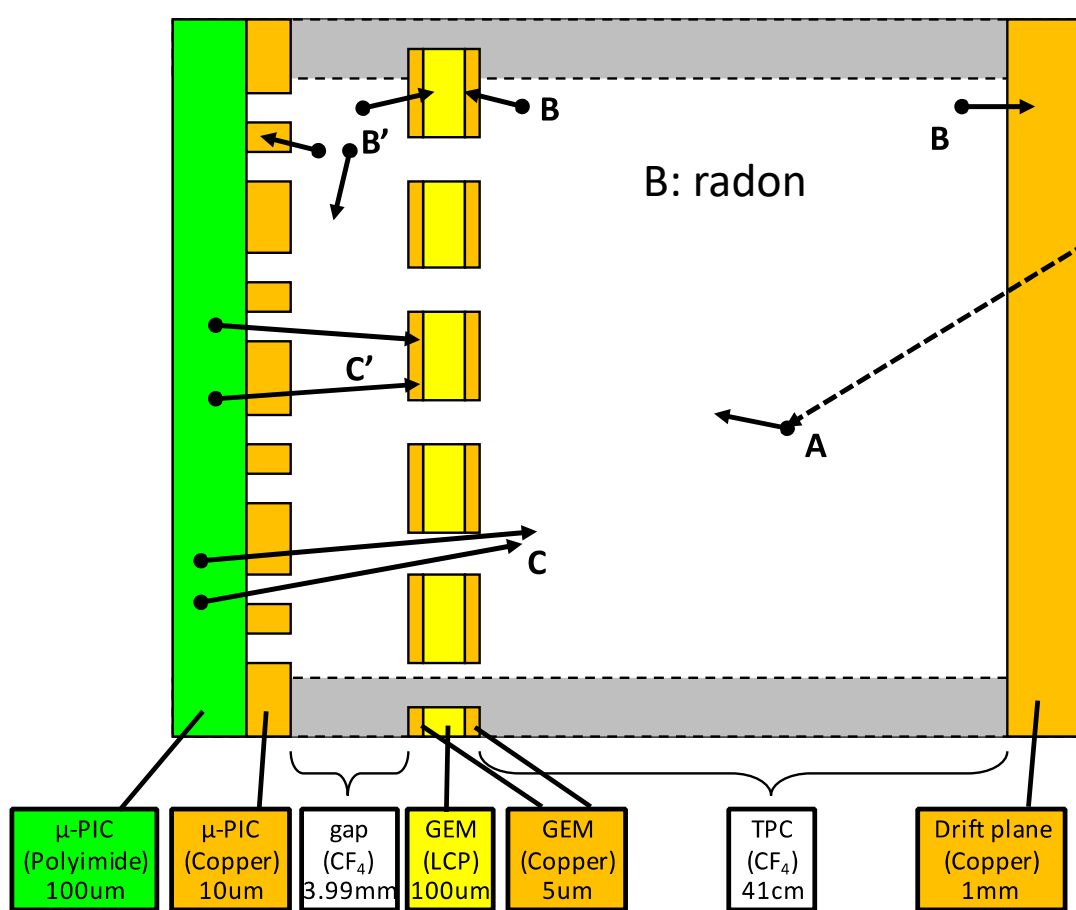
➤ SF6 – 陰イオンガス

- 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



μ -PIC表面BG



copper electronodes

