

陰イオンガス中におけるMPGDの シミュレーションを用いた特性理解

石浦 宏尚

神戸大学 粒子物理学研究室 修士2年

2019/02/18 25th ICEPP Symposium@白馬

発表Outline

- 暗黒物質探索
- NEWAGE
- 陰イオン μ TPC (NI μ TPC)
- 陰イオンガス中MPGD
 - GEM基礎測定
 - 陰イオンガス中MPGDシミュレーション
- 結論

➤ 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

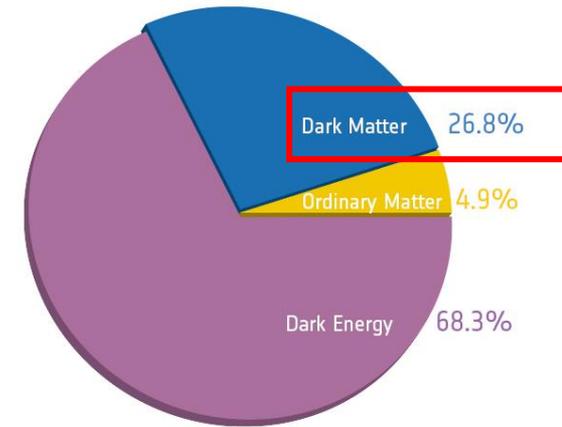
- 銀河の回転曲線問題、宇宙マイクロ波背景放射
重力レンズ効果

➤ 直接探索実験

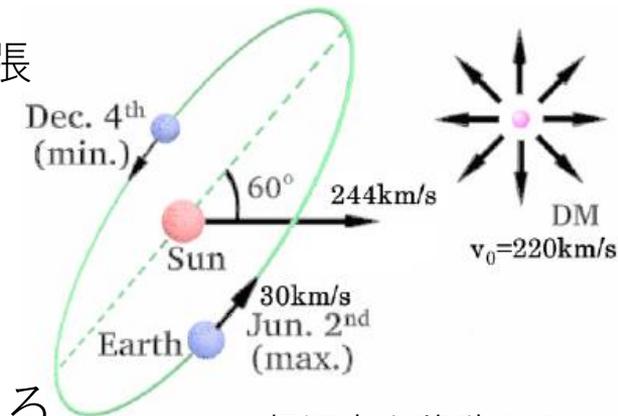
- DAMA実験が季節変動検出により暗黒物質発見を主張
- XENON1T、LUXなど他実験により否定
- より確実な手法による探索必要

➤ 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)

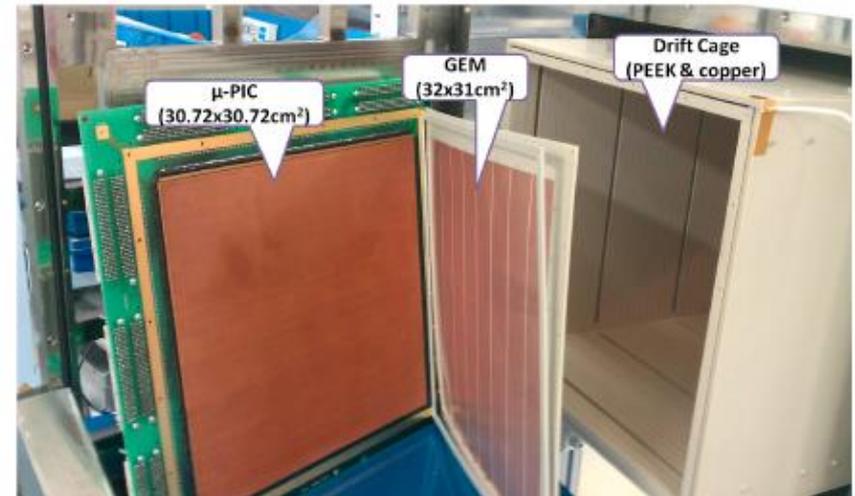
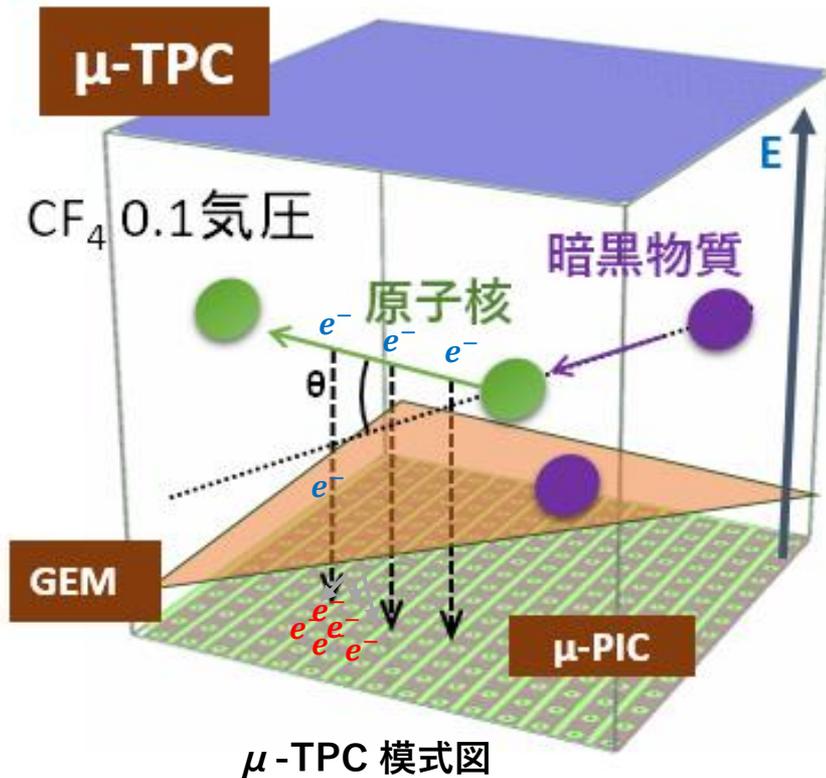


銀河中を移動する太陽系のモデル

➤ **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

➤ 暗黒物質によって原子核反跳されたフッ素原子核の飛跡をとらえる

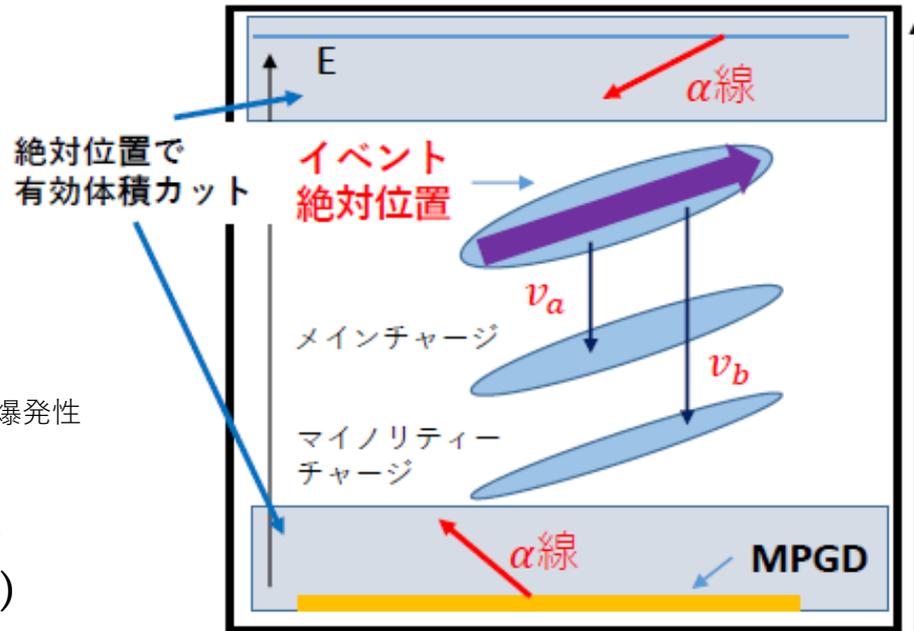


NEWAGE-0.3b' 内部 μ -TPC 写真

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

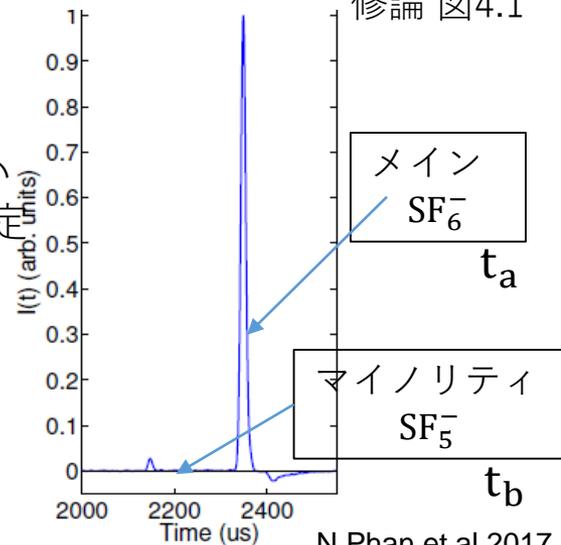
陰イオン μ -TPC模式図



修論 図4.1

$$z = (t_a - t_b) \frac{v_a v_b}{v_b - v_a}$$

ドリフト速度の違い
→z方向絶対位置決定



➤ NEWAGE 現状の課題

- **バックグラウンド(BG)**で感度制限 (検出器由来 α 線)

➤ 陰イオン μ TPC

➤ 利点

- **拡散小** (電子拡散に比べて)
→DRIFT(英)が利用(CS_2) 有毒・爆発性
- **絶対位置決定**
複数種陰イオンのドリフト速度差から
→**有効体積カット**による**BG削減**(右図)
 CS_2 (DRIFT(英))、その後 SF_6 で実証(N.Phanら)

➤ 陰イオン μ TPCの開発へ

- **エレクトロニクス開発**(中村Talk)
- **MPGDでの増幅描像:**

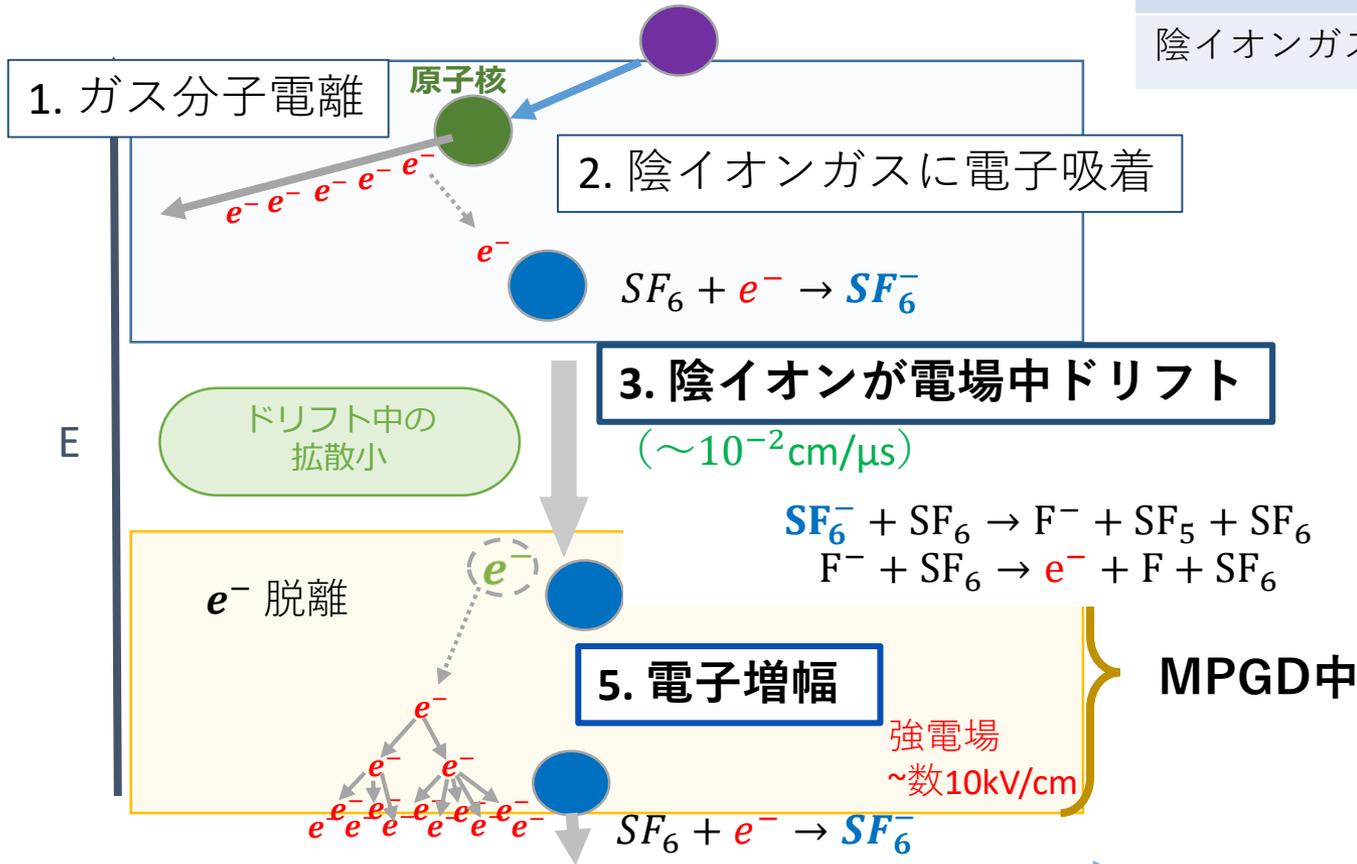
ただし 完全な理解まだ
→**シミュレーション手法**
確立されておらず

理解 & 確立
の**必要**(石浦Talk)

陰イオンガス中でのMPGD描像

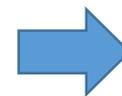
MPGD: Micro Patter Gaseous Detector

	移動電荷	増幅
電子ドリフトTPC	電子	電子
陰イオンガスTPC	陰イオン	電子



本研究モチベーション

- GEM (MPGDの一つ) 基礎測定
- シミュレーションによる実験再現

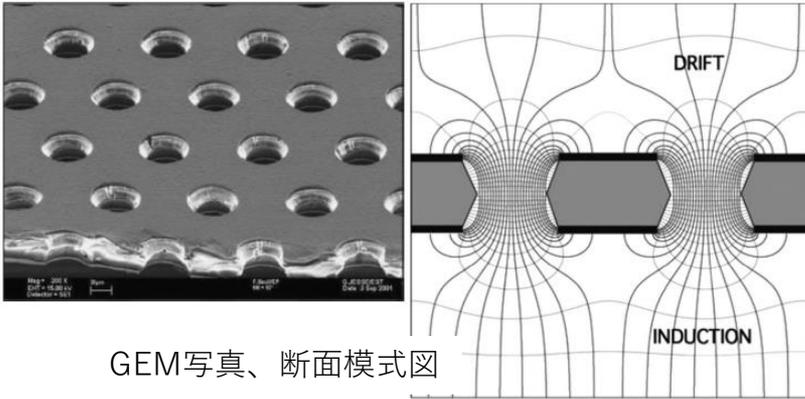


MPGD中(3,4,5)描像
 詳しく理解したい

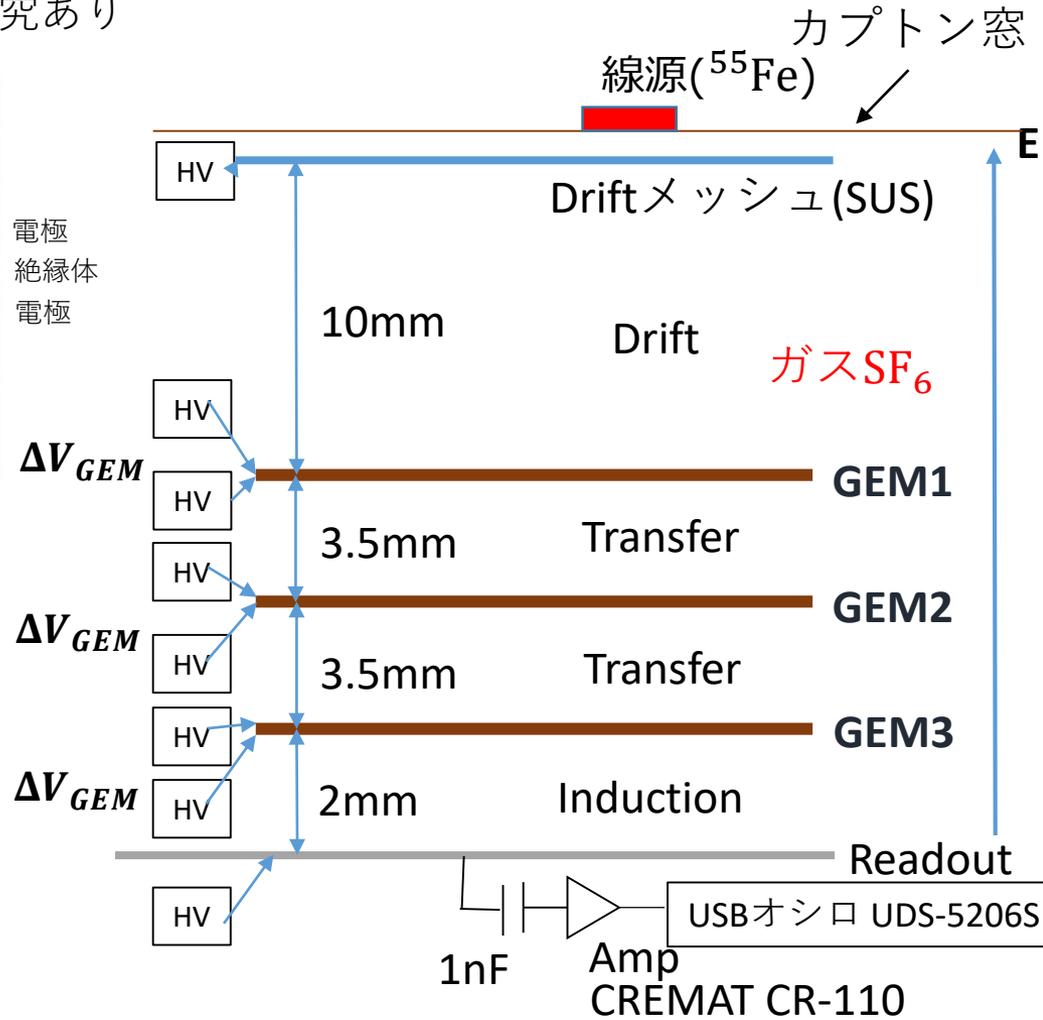
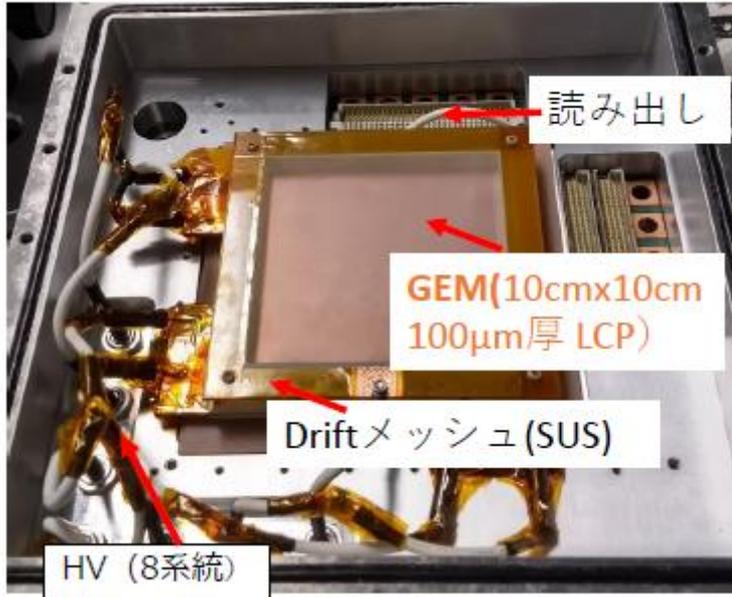
GEM基礎測定セットアップ

- SF₆ガス(陰イオンガス)中でのGEMのガスゲインを測定
- 100 μm GEM 2 or 3段を用いてガス圧、印加電圧を変えて測定

GEM厚 50 μm 3段、400 μm 1段の先行研究あり



GEM写真、断面模式図

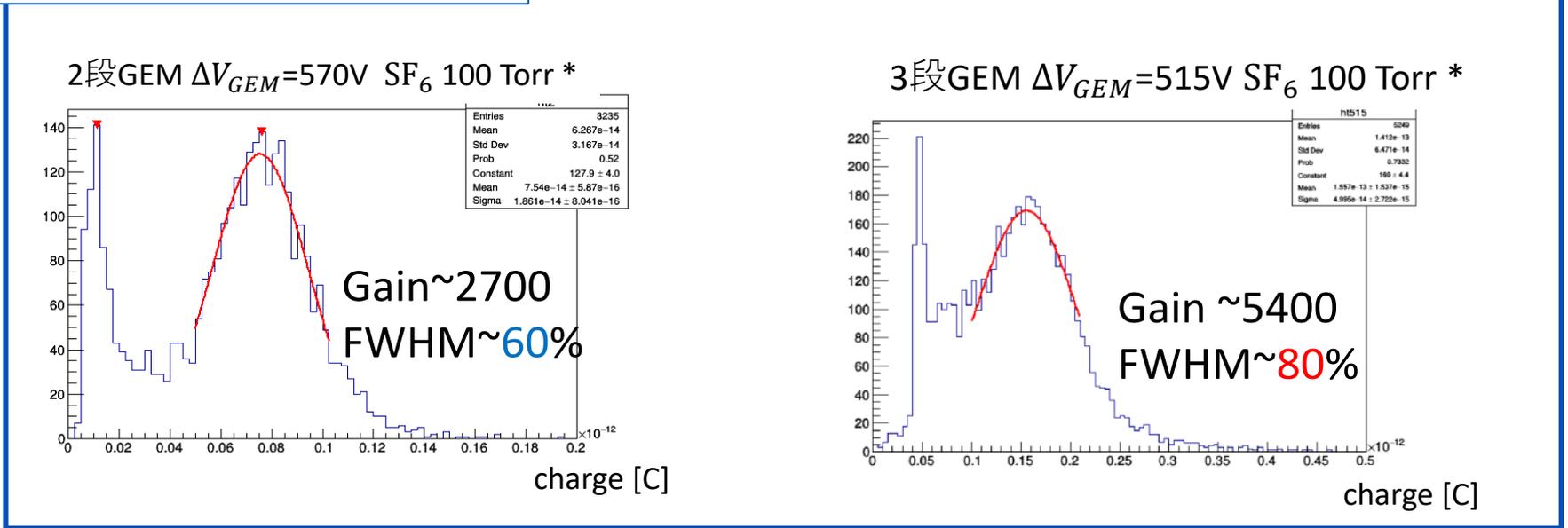


GEM基礎測定

➤ GEMのガス圧や印加電圧といったパラメータを変え、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



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枚数でのエネルギー分解能違い



- 陰イオンガス中MPGD特有の過程
- 電子吸着/脱離プロセスの影響と考えられる

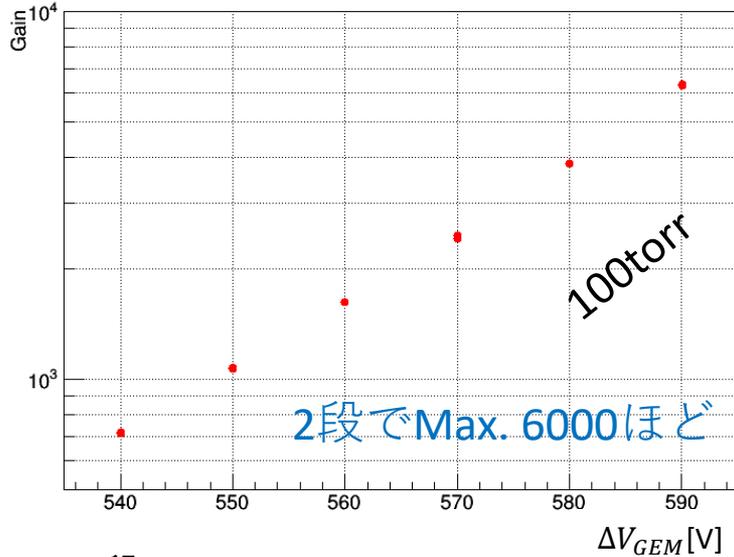
FWHMはMeanに対して

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

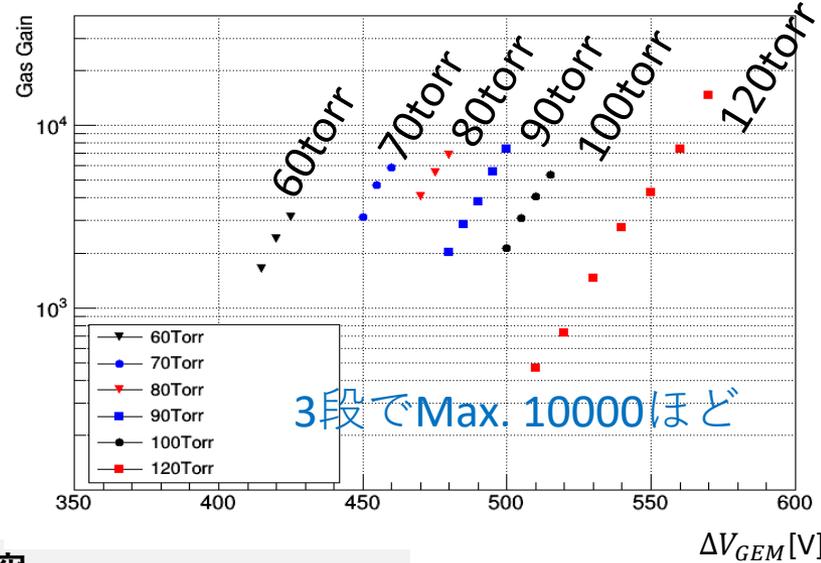
• 2段GEM

Gain @ 100 Torr SF6 Double-GEM



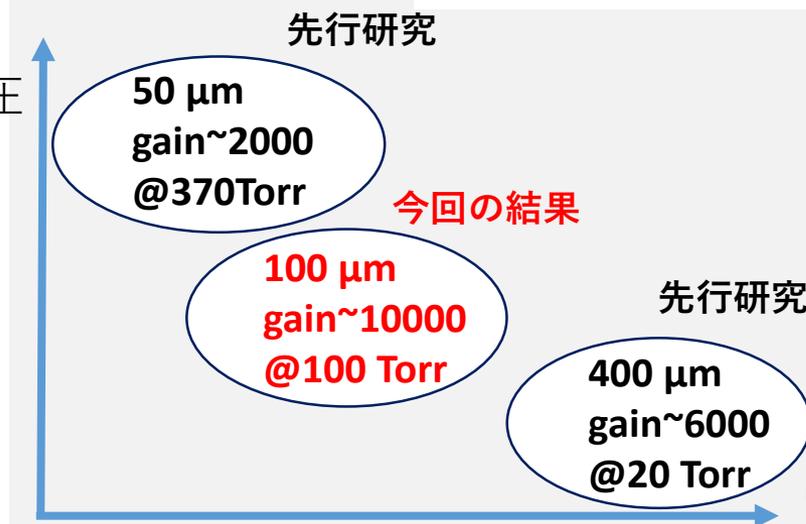
• 3段GEM

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



- 2段GEM
- SF₆ 100 Torr

動作
ガス圧



動作パラメータ
最大ガスゲイン図

測定ガス圧

- 3段GEM SF₆ 60~120 Torr

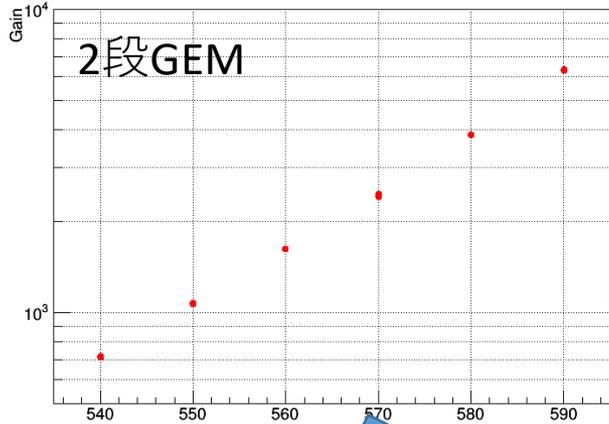
おおよそ中間の動作

GEM厚さ

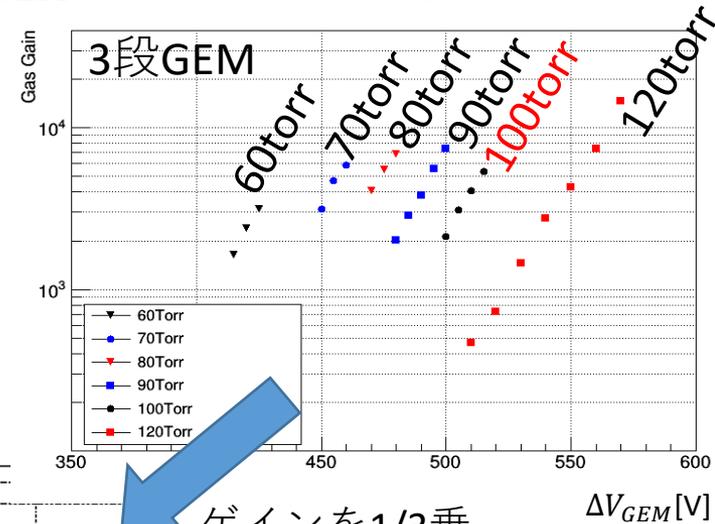
2段/3段GEM 測定結果

2段/3段GEMの結果から1段当たりのゲイン計算 (100 Torr)

Gain @ 100 Torr SF6 Double-GEM



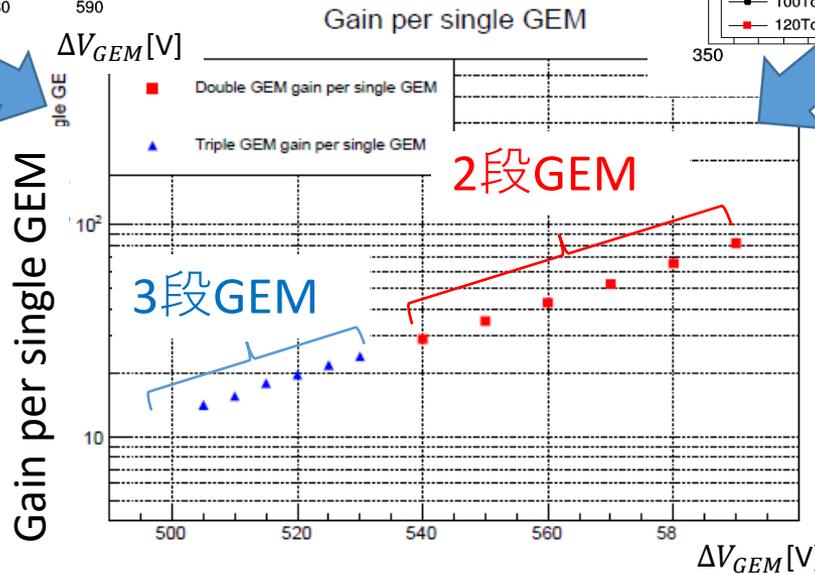
ΔV_{GEM} and Gas Gain (SF₆ 60~120torr)



ゲインを1/2乗

ゲインを1/3乗

1段あたりガスゲイン
→ 同一直線上にプロット
→ GEM間電荷損失無し



2段、3段GEMでは
• 脱離・増幅・吸着過程が
N(=2,3)回繰り返している

1段GEM(N=1)について
まず考える

目標

- 1段GEMのシミュレーションからこのゲインカーブを再現

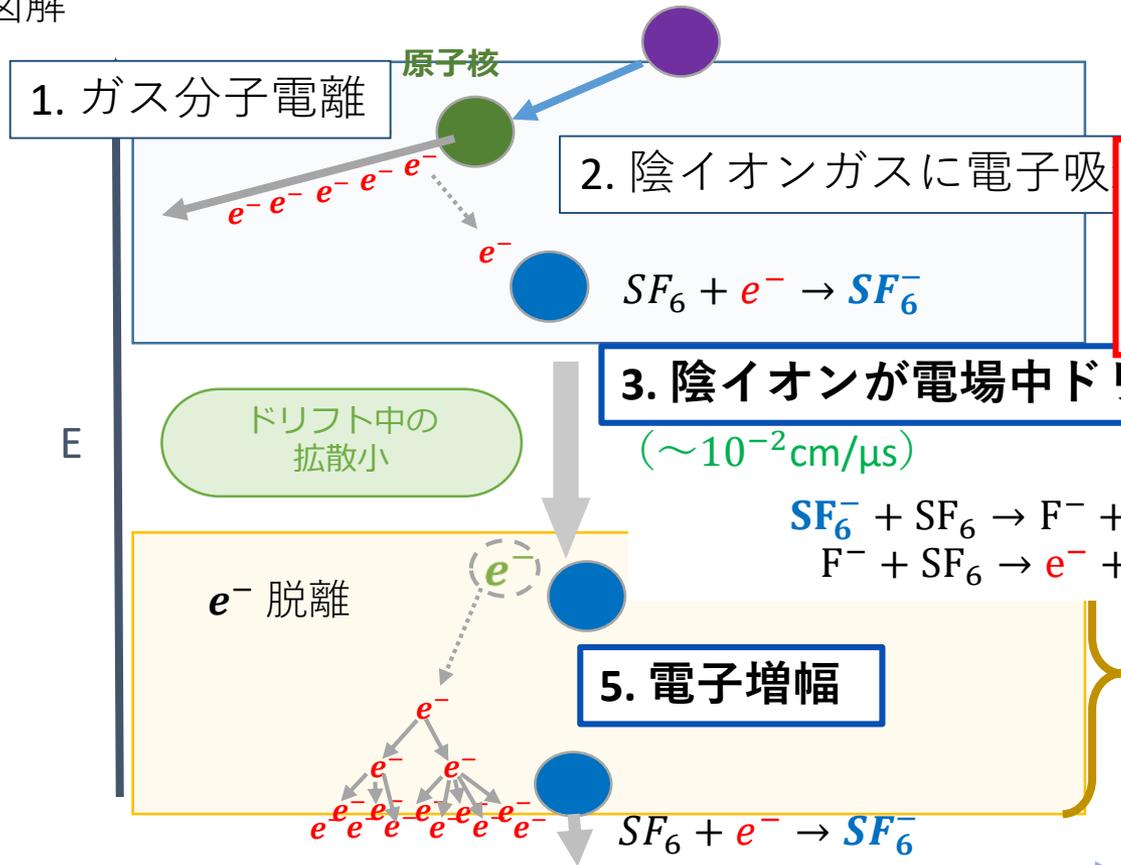
陰イオンガス中MPGD

陰イオンガス中でのMPGD画像 (Updated)

図解

	移動電荷	増幅
電子ドリフトTPC	電子	電子
陰イオンガスTPC	陰イオン	電子

Update



- 2/3段GEMでは脱離/増幅/吸着プロセスを段毎に繰り返し
- GEM間では電荷損失無し

ガス検出器シミュレーション

▶ 用いたシミュレーションツールキット

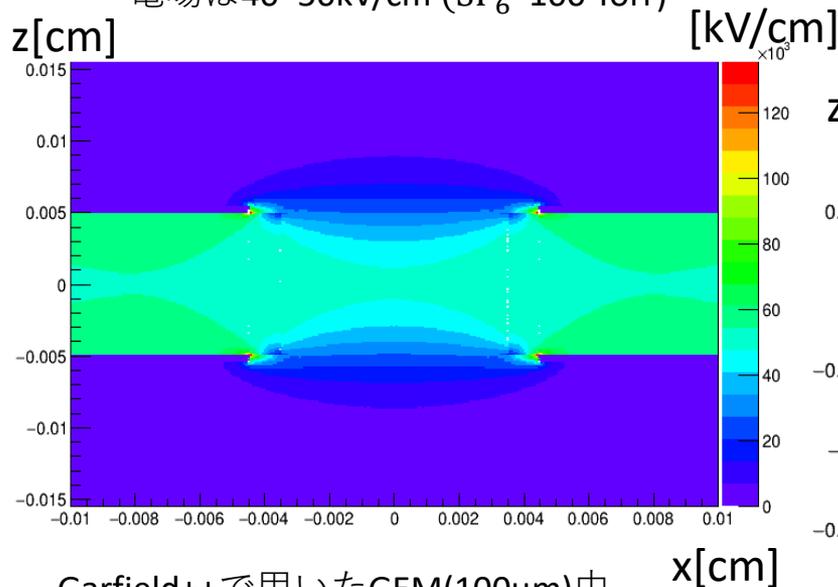
▪ Magboltz

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++

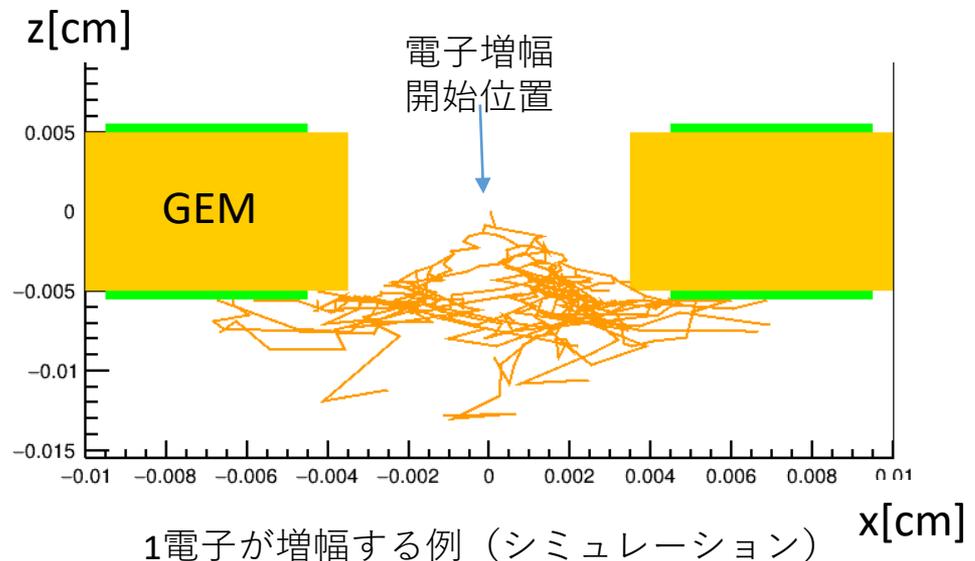
ガスの媒質データ、電極や絶縁体の形状、電場データを外部、電子増幅率をMagboltzから取り込み、電荷の輸送 & 電子増幅を計算・可視化

GEM中で増幅が始まる典型的な電場は40~50kV/cm (SF₆ 100 Torr)



Garfield++で用いたGEM(100 μ 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)

ガス検出器シミュレーション

▶ 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++

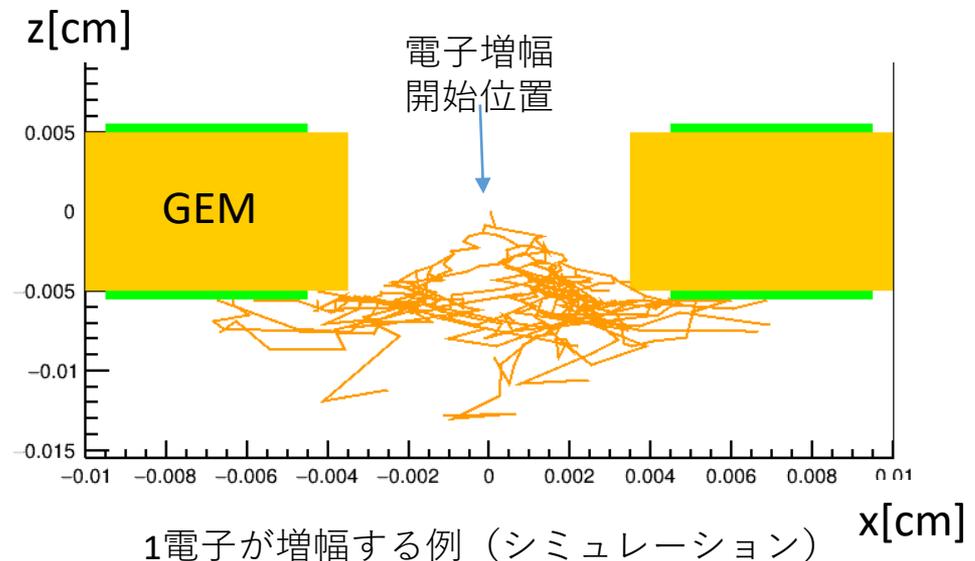
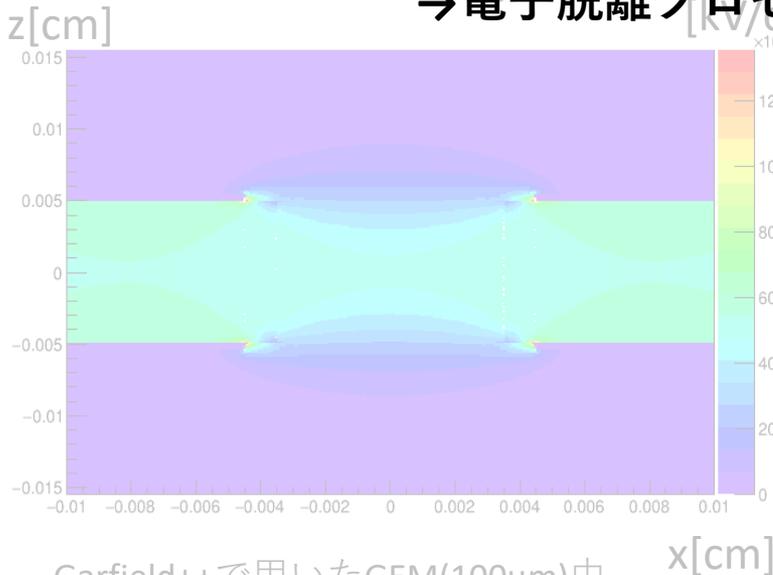
ガスの媒質データ、電極や絶縁体の形状、電場データを外部、電子増幅率をMagboltzから取り込み、電荷の輸送 & 電子増幅を計算・可視化

2018年6月 CERNにてGarfield++の開発者Rob Veenhof氏と
SF₆ガス増幅についてはシミュレーションできるが

GEM中で増幅が始まる典型的な
電場は40~50kV/cm (Garfield++)

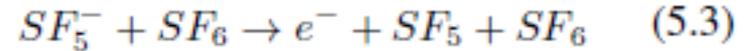
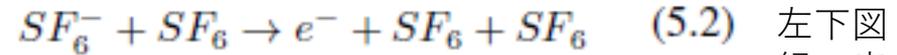
SF₆陰イオンの移動・電子脱離については実装なし

→電子脱離プロセスをシミュレートするには改造の必要



電子脱離プロセス反応の候補

- a) 式(5.2)の SF_6^- 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



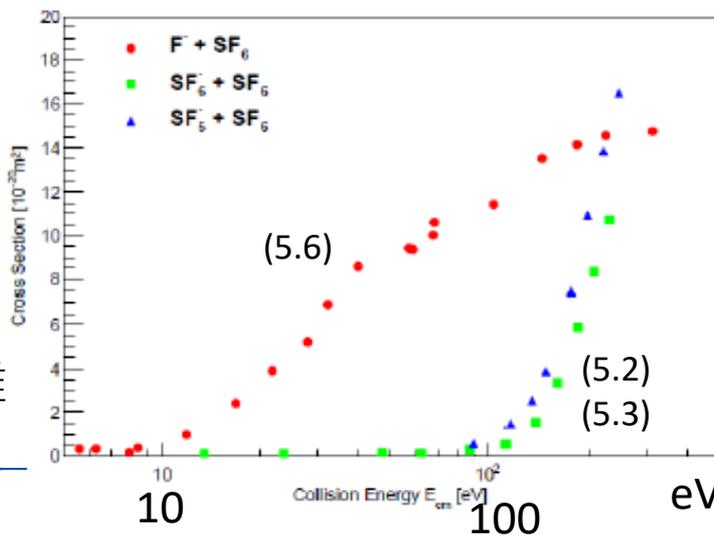
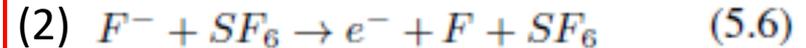
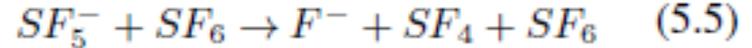
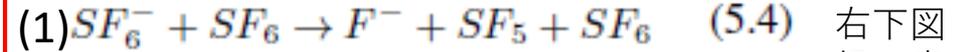
100 eV必要だが

➤ 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

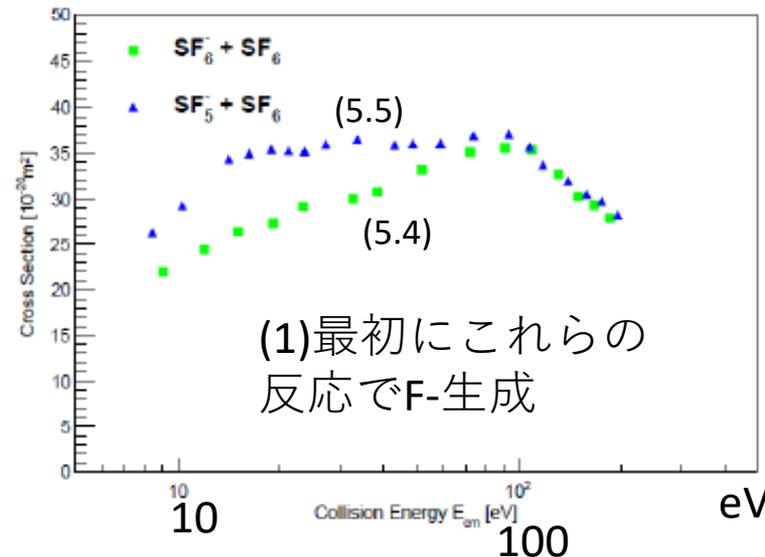
(40~50kV/cm @100Torr)

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



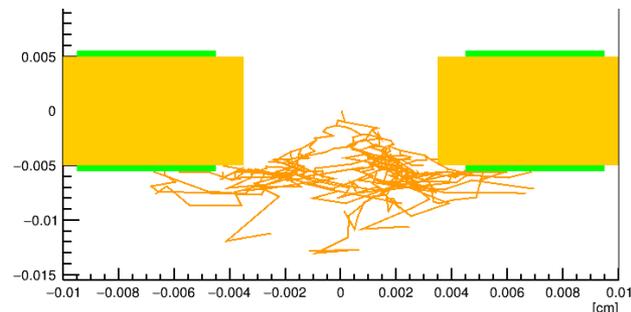
(1)最初にこれらの
反応で F^- 生成

本研究： F^- を介した電子脱離反応=メインの反応 と考える

電子脱離モデル

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のために
プログラムの改良の**必要**



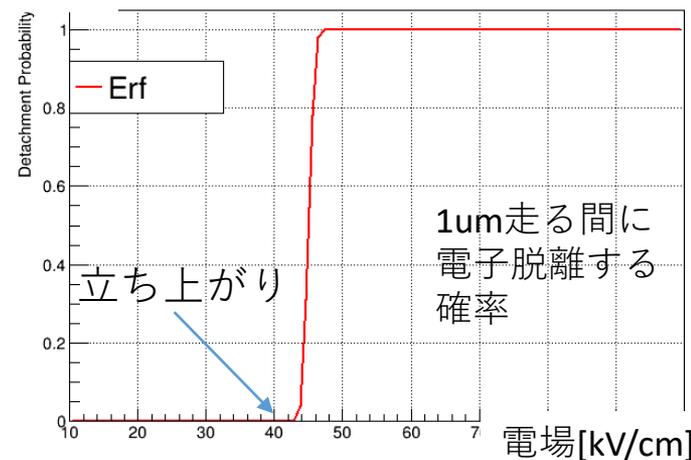
➤ 電子脱離のモデル

1) 実験結果から推定した簡単なトイモデル

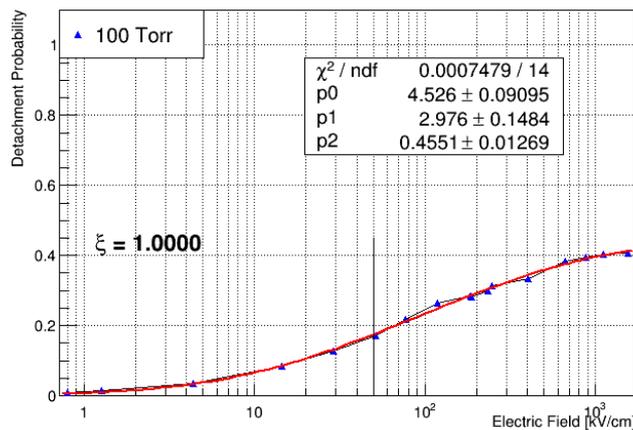
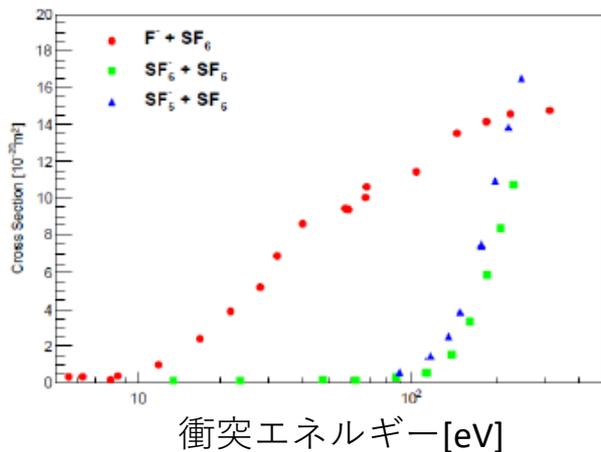
実験結果からGEM中電場 40~50kV/cmで電子脱離が
起きていると考えられる

40~50kV/cmの電場付近で電子脱離確率が立ち上がる
モデル (右図)

電子脱離確率



2) 電子脱離の反応断面積 (右下図) を考慮したモデル

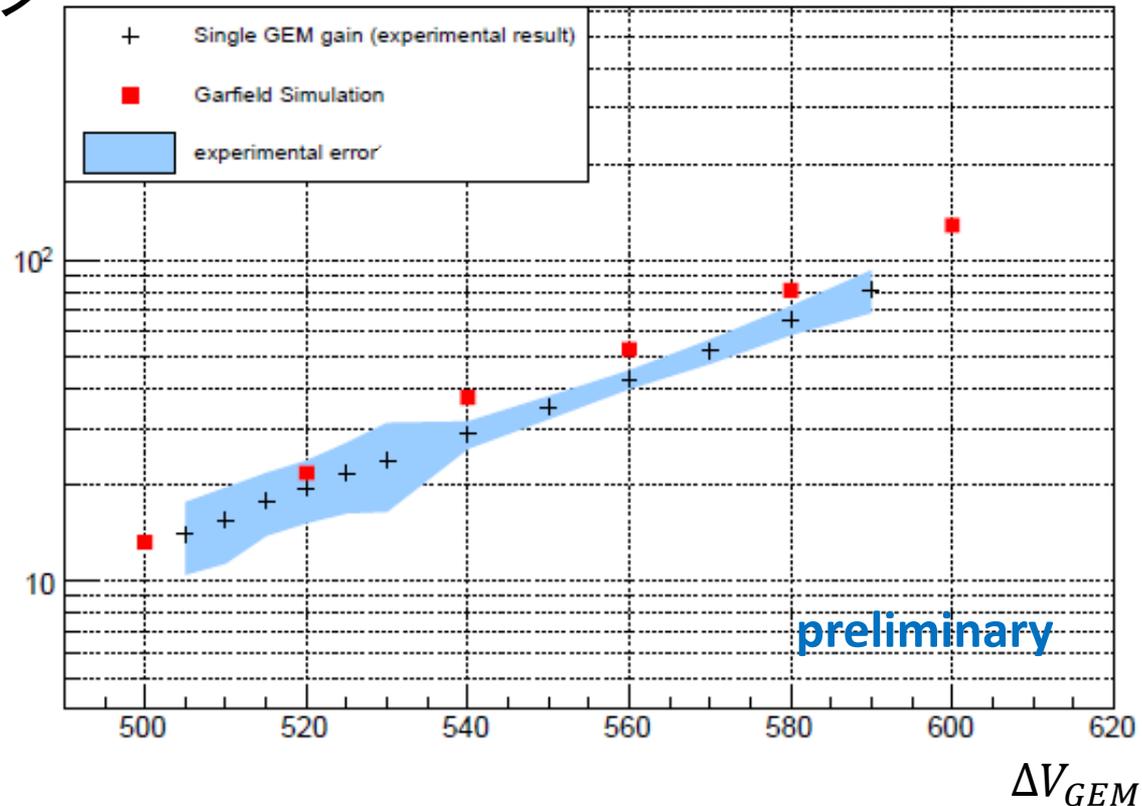


トイモデルによるシミュレーション結果

(1) 40~50kV/cmの電場付近で電子脱離確率が立ち上がるトイモデル

➤ 実験で得られたゲインカーブとGarfield++を用いた再現

ガスゲイン

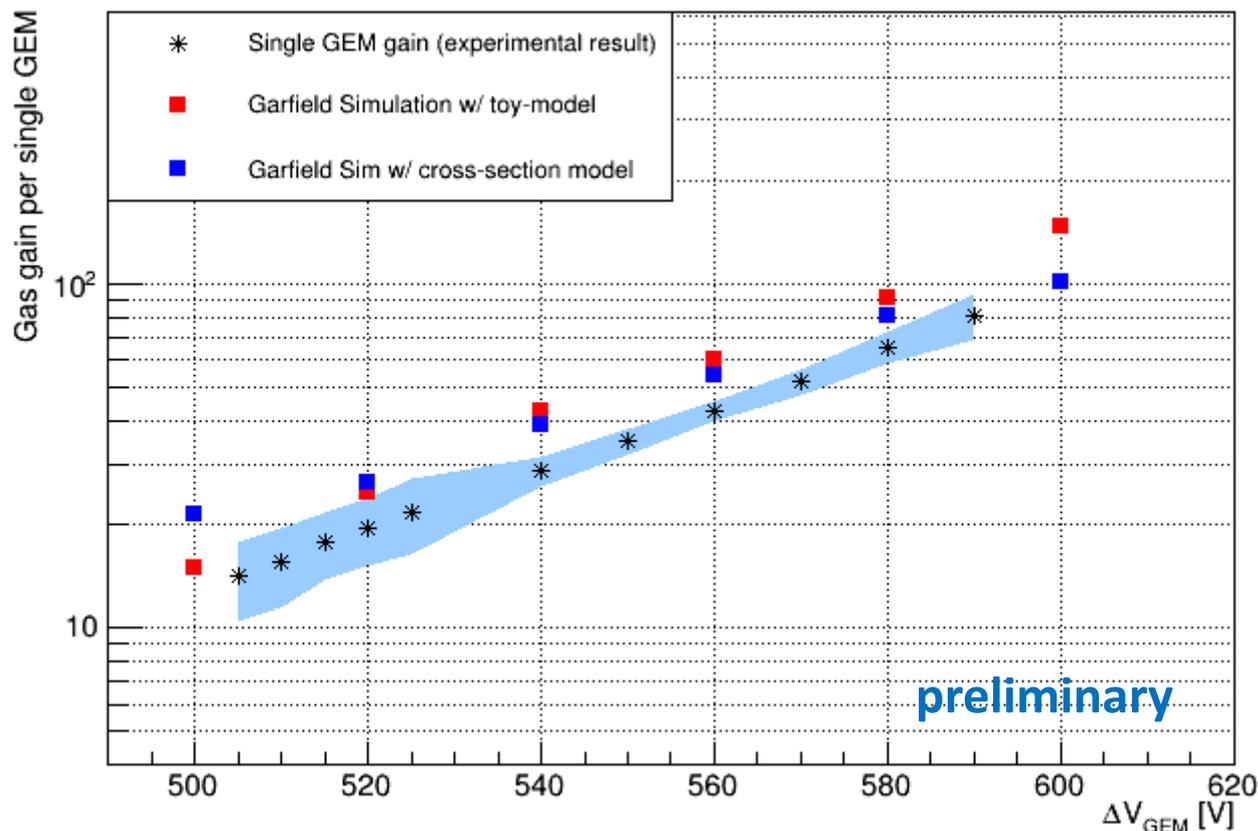


実験結果のゲインカーブを概ね再現

電子離脱の反応断面積モデルsim結果

➤ (2) 電子離脱の反応断面積を考慮したモデル

- トイモデル(赤)と実験値に比べ傾きが小さく



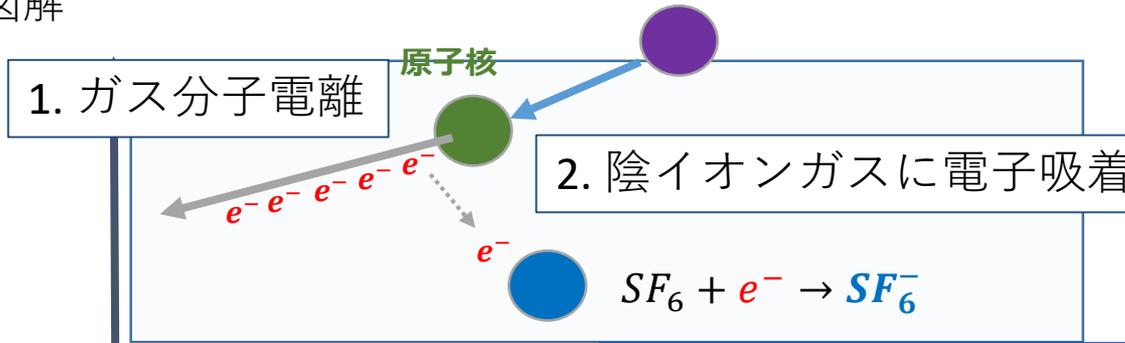
電子脱離確率が電場依存する
モデルのパラメータ再考の必要性

陰イオンガス中MPGD

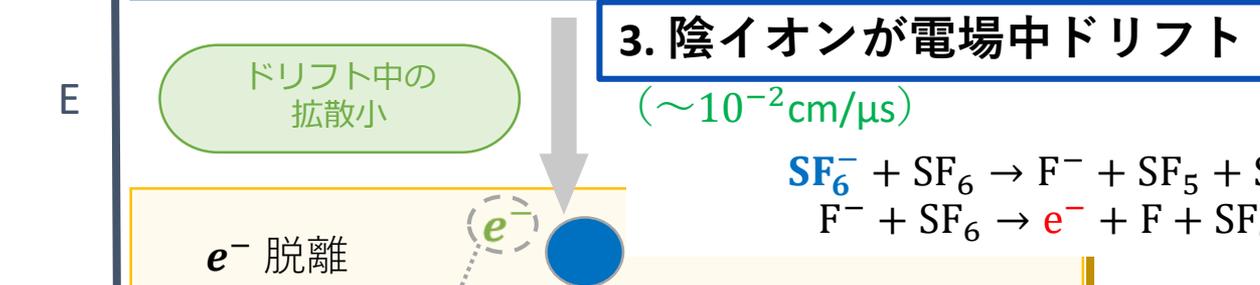
陰イオンガス中のMPGD画像 (Updated)

図解

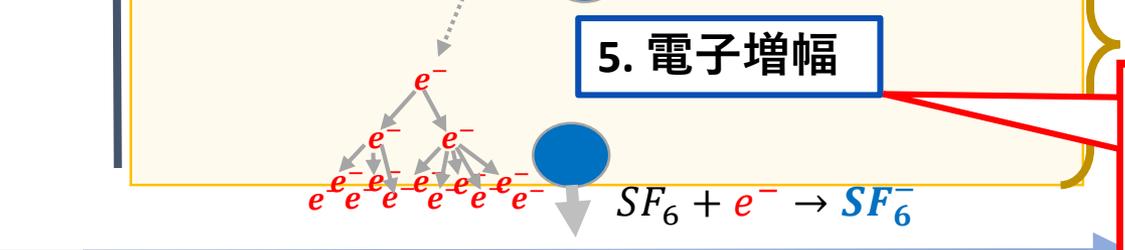
	移動電荷	増幅
電子ドリフトTPC	電子	電子
陰イオンガスTPC	陰イオン	電子



- 2/3段GEMでは脱離/増幅/吸着プロセスを段毎に繰り返す
- GEM間では電荷損失無し

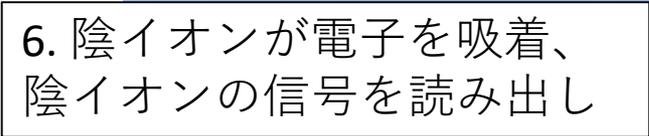


4. 高電場中で電子が陰イオンから脱離



Update

電子脱離確率電場依存モデルでゲインカーブを概ね再現
モデル改善の余地あり



➤ 今後

- 電子脱離モデルの検証、改良
- 他MPGDシミュレーション、実験結果との比較
- 開発したシミュレーション手法を用いたMPGDの選定および改良

➤ まとめ

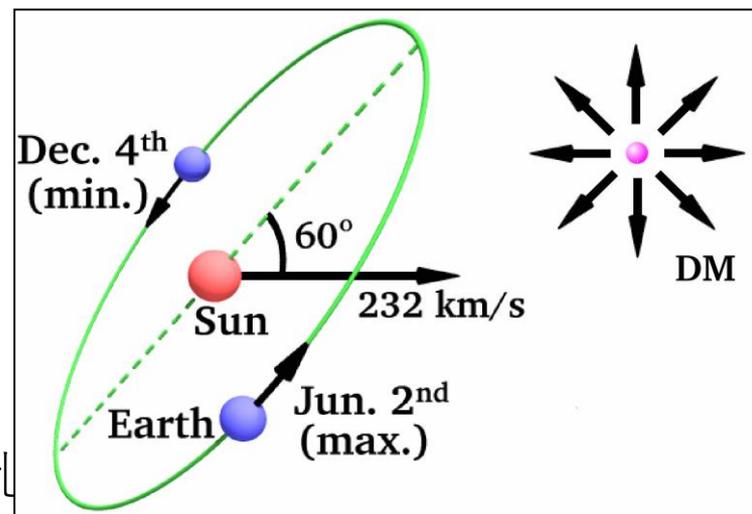
- NEWAGE : 方向感度を持つ暗黒物質探索
 - 検出器由来 α 線によるバックグラウンドで感度が制限→削減必要
 - バックグラウンド削減のため陰イオンガスTPC開発中
- 陰イオンガスTPC開発のためMPGD基礎特性を研究
 - GEMの基礎測定
 - シミュレーション手法を開発、ゲインカーブを概ね再現

陰イオンガス中
MPGD描像理解
を進めた

季節変動/方向感度

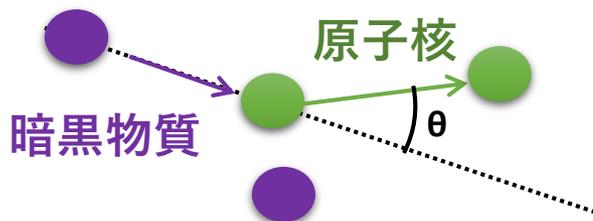
➤ 季節変動

- DM haloに対する地球の相対速度が季節で変動
(haloに対する太陽系の速度+公転速度)
- 速度：夏最大、冬最小 ($\pm 15\text{km/sec}$ ほど)
→ 計数率が季節変動



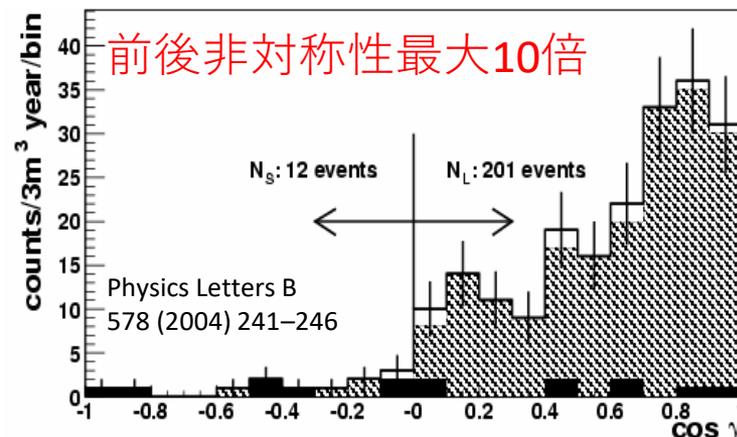
➤ 方向感度

- 太陽系：銀河系内を移動
→ 銀河に付随するDMに対して動く
→ 暗黒物質の風を受ける、原子核が前方散乱
- 散乱角度を捉え、到来方向を同定



FT ($\cos \gamma_0 = 0$)

$M_{\text{WIMP}} = 80\text{GeV}, \sigma_{\text{p-WIMP}} = 0.1\text{pb}$



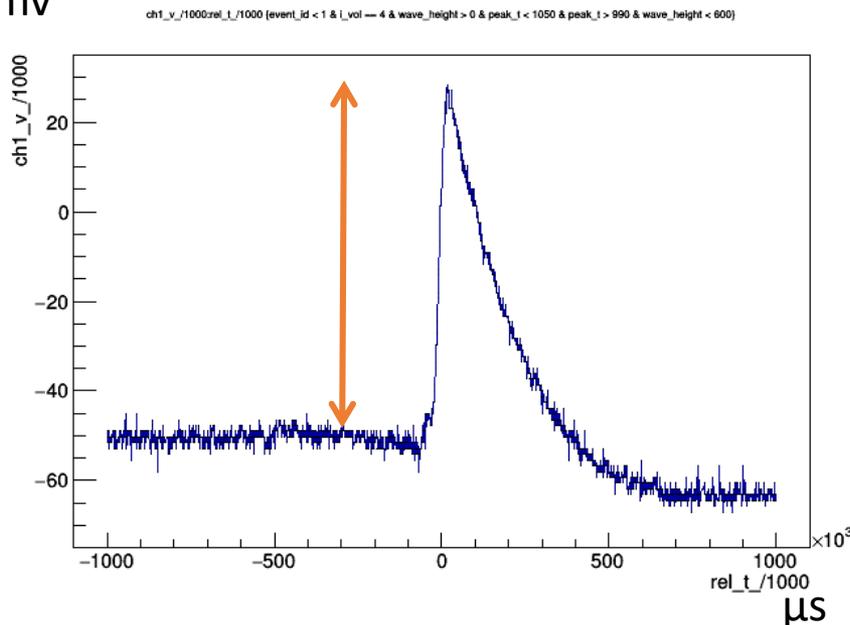
ガスゲイン算出方法

$$\frac{E_d}{W} \times e \times G_{gas} \times G_{amp} = Q \quad \text{修論式(5.1)}$$

E_d はガス中損失エネルギー、 W は電子イオン対生成に必要なエネルギー（SF₆では34eV）
 G_{gas} はガスゲイン、 G_{amp} はアンプゲイン、 Q は検出電荷量

波高→電荷

mv



cremat



Cremat Inc, 950 Watertown St., Suite 3
 West Newton, MA 02465 USA
 +1(617) 527-6590
<http://cremat.com>

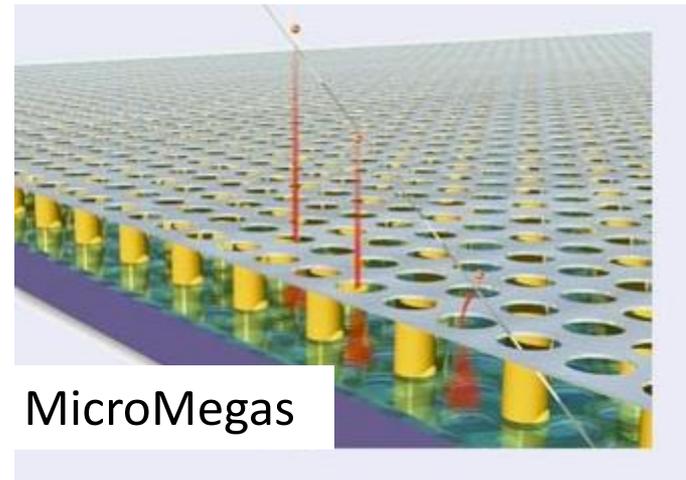
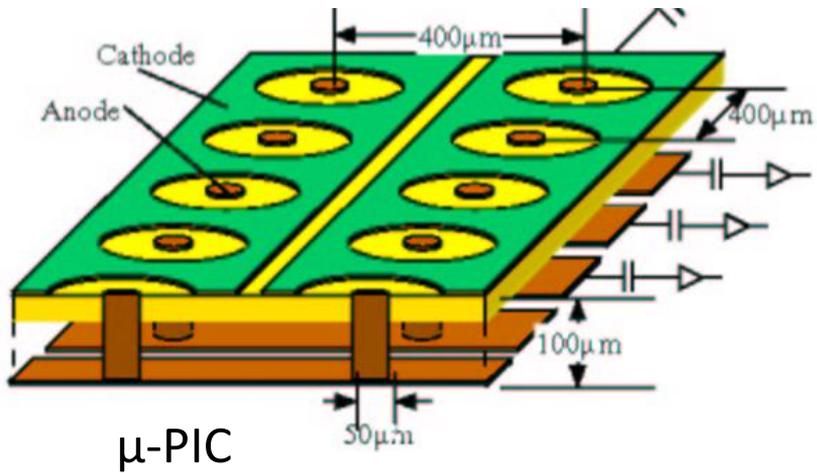
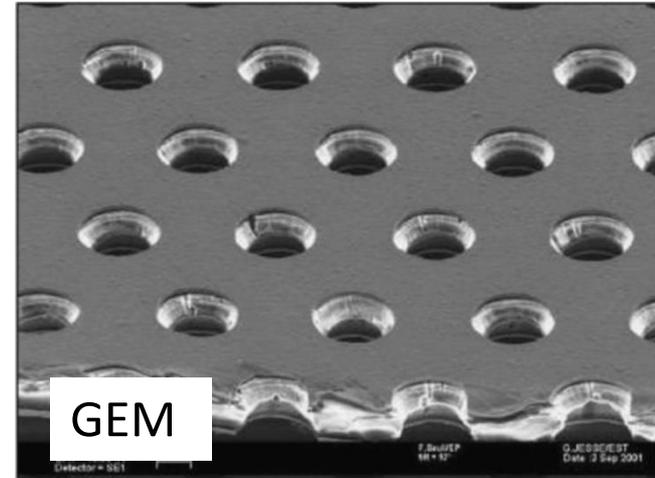
Specifications

Assume temp = 20 °C, V_s = ±6.1V, unloaded output

	CR-110-R2	units
Preamplification channels	1	
Equivalent noise charge (ENC)*		
ENC RMS	200	electrons
Equivalent noise in silicon	0.03	femtoCoul.
Equivalent noise in CdZnTe	1.7	keV (FWHM)
ENC slope	2.4	keV (FWHM)
Gain	4	elect. RMS / pF
Rise time **	1.4	volts / pC
Decay time constant	62	mV / MeV(Si)
Unsaturated output swing	7	ns
Maximum charge detectable per event	140	μs
Power supply voltage (V _s)	-3 to +3	volts
maximum	1.3 x 10 ⁷	electrons
minimum	2.1	pC
Power supply current (pos)	V _s = ±13	volts
(neg)	V _s = ±6	volts
Power supply current (pos)	7.5	mA
(neg)	3.5	mA
Power dissipation	70	mW
Operating temperature	-40 to +85	°C
Output offset	+0.2 to -0.2	volts
Output impedance	50	ohms

* Measured with input unconnected, using Gaussian shaping amplifier with time constant = 1 μs.
 With a detector attached to the input, noise from the detector capacitance, leakage current, and dielectric losses will add to this figure.

- Micro Pattern Gaseous Detector
- 微細加工技術を用いたガス検出器



ガス検出器シミュレーション

▶ 用いたシミュレーションツールキット

▪ Magboltz

電子-ガス分子
反応断面積データ

ボルツマン輸送方程式
or モンテカルロ法

電場・磁場中での
Drift速度や拡散
Townsend係数出力

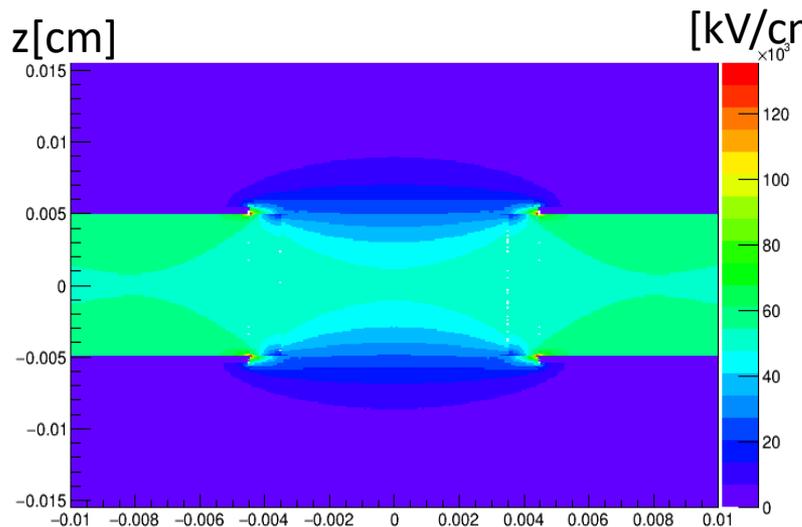
▪ Garfield++

ガスや半導体の
媒質データ

+

ジオメトリや電場情報
(内部もしくは外部から)

電荷の輸送
電子増幅を計算
& 可視化



material properties

- gas → Magboltz
- silicon

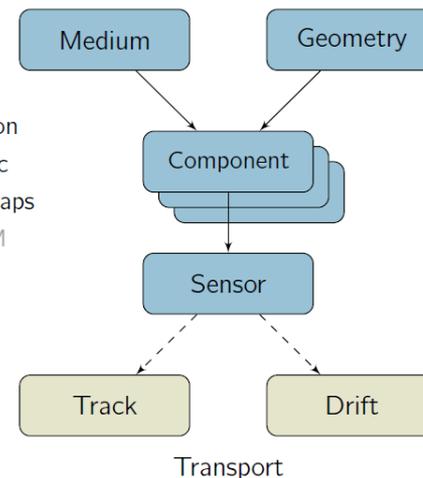
field calculation

- analytic
- field maps
- neBEM

primary ionization

- Heed
- SRIM

Detector Description



Garfield++
User's manual
より

charge transport

- microscopic
- MC
- RKF

Garfield++で用いたGEM(100μm)中 電場マップの例 修論 図5.1

Figure 1.1. Overview of the main classes in Garfield++ and their interplay.

➤ 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

