

陰イオンガス中のMPGDにおける ガス増幅率の検証

神戸大理

窪田諒 身内賢太郎 東野聡 石浦宏尚 島田拓弥 中山郁香

講演番号 : 14pT 4-7 15:25~

2021年 9月 14日 日本物理学会

方向に感度を持つ暗黒物質(DM)直接探索

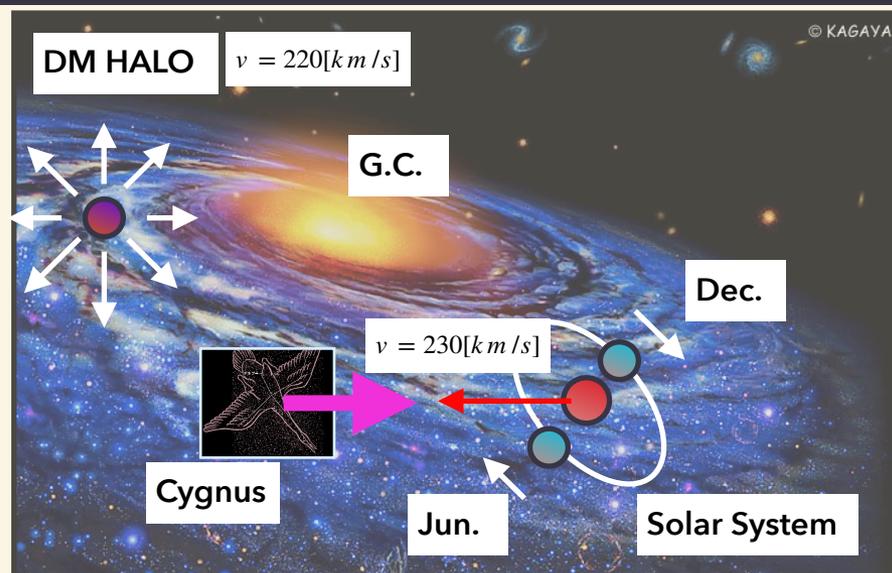
- 原子核反跳からDMの到来方向を見る
 - ▶ 異方性がDMの強い証拠となる



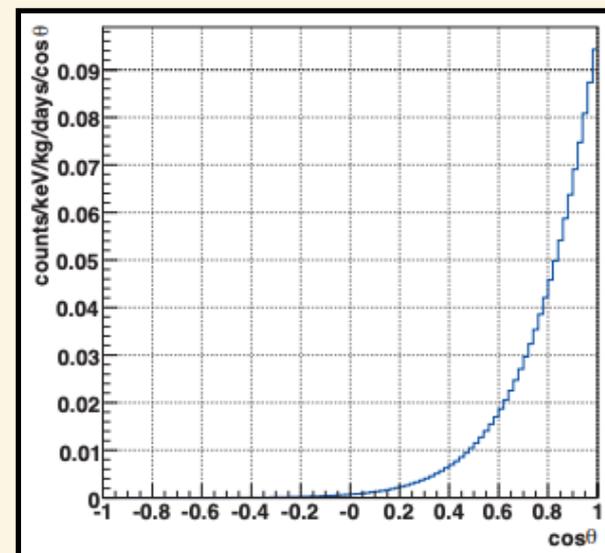
飛跡を捉える

- ガス検出器による3次元飛跡検出

$\cos\theta=1$ にピークを持つ分布
(θ :cygnusに対する散乱角)



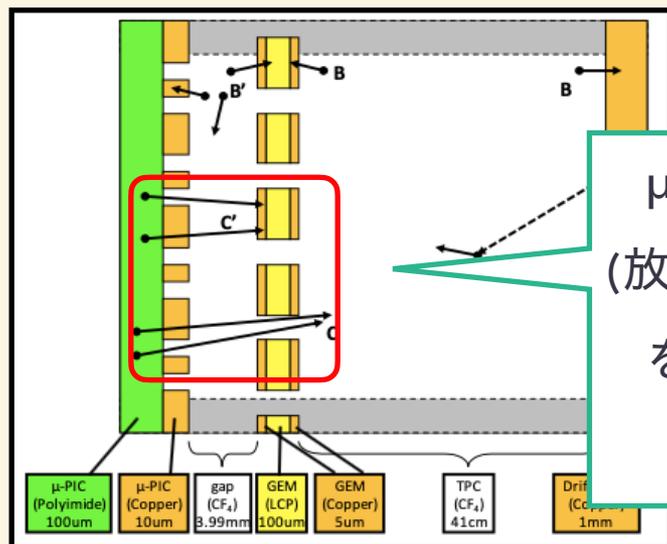
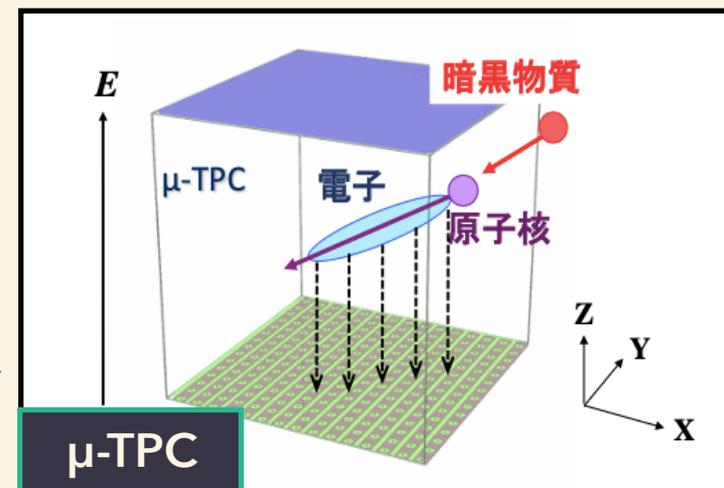
WIMPの風を捉える！



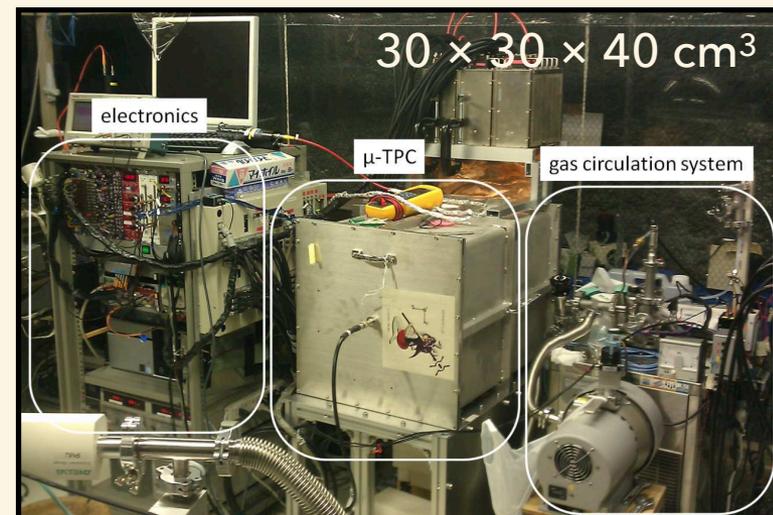
NEWAGE (NEw generation WIMP search with an Advanced Gaseous tracker Experiment)

◎NEWAGE

- μ -TPCを用いた3次元飛跡検出
- 神岡にて暗黒物質探索実験(CF_4 0.1気圧)を行っている
- 現行器(セルフトリガー電子ドリフトTPC)の問題点
 - ▶ 測定できるのは各ヒットの相対時間
 - ▶ μ -PICからのBGと区別がつかない
 - ▶ ドリフト電子の拡散により位置分解能が悪い



μ -PICからの α 線
(放射性不純物由来)
をfiducial cutで
減らしたい

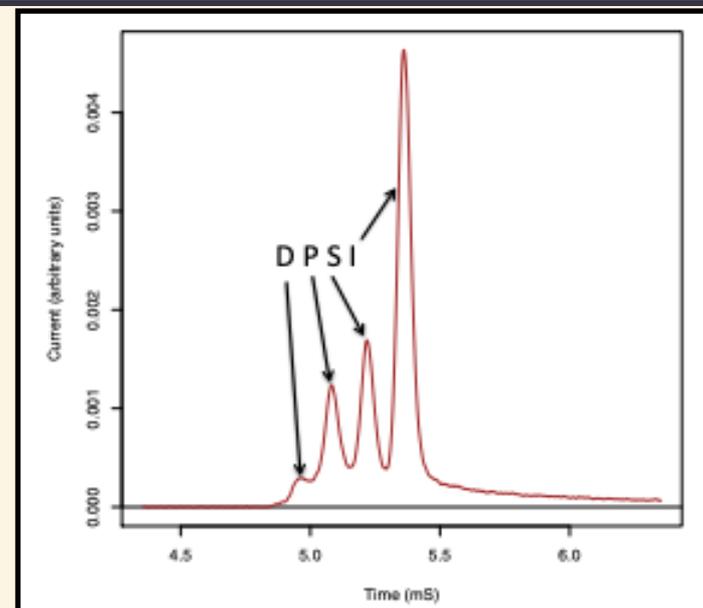


陰イオンガスTPC (NITPC)

◎ 陰イオンガス

- DRIFT実験によって先鞭(右図)
- NEWAGEで3次元飛跡取得による実証化
- 複数種の陰イオンの生成、ドリフトを確認
- メインキャリアとマイノリティーキャリアのドリフト速度の差からZの絶対位置を解析

▶ Fiducial Cutが可能



<https://doi.org/10.1016/j.dark.2015.06.001>

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

◎ 陰イオンと電子の違い

- 電子に比べて拡散が小さい
- ▶ 位置分解能向上が見込める

	陰イオン	電子
拡散	小	大

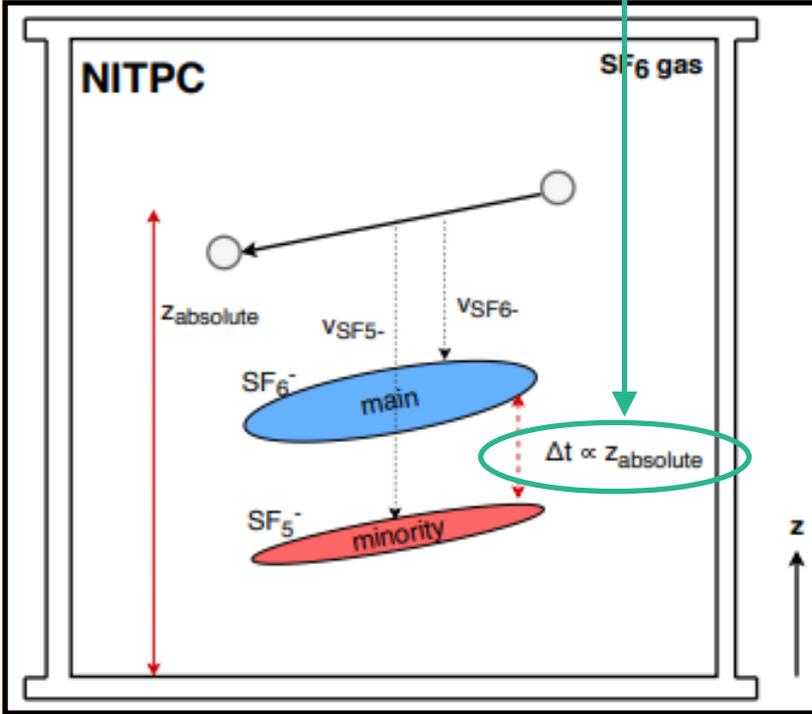
陰イオンガスTPC (NITPC)

◎SF₆ガス



2種類の陰イオンが生成

Z絶対位置の決定



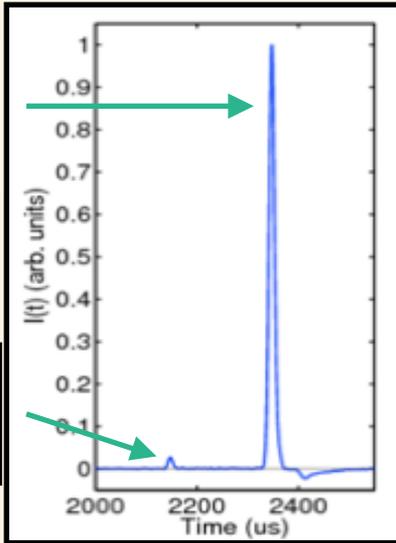
- 特徴的な波形(信号強度の比が100:3)
 - ▶ ダイナミックレンジ大の読み出しが必要



14pT-7 神戸大学 東野聡

メイン
SF₆⁻

マイノリティー
SF₅⁻



[N. Phan et al., Journal of Instrumentation 12, P02012 (2017).]

NITPCのシミュレーション

◎NITPCの課題

- カソードの信号が小さい
 - ▶ イオンフィードバックが原因か

ドリフトする陰イオン雲が幅を持つので、カソードの読み出しに影響する可能性がある。

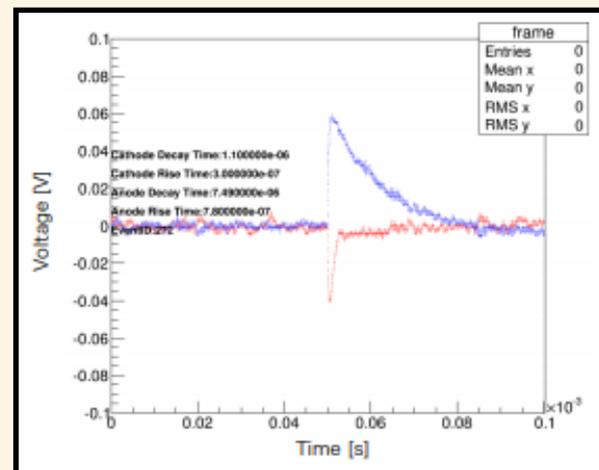
- 増幅機構を増やすにつれエネルギー分解能の低下

- ▶ 電子捕獲、電子脱離の過程が原因か

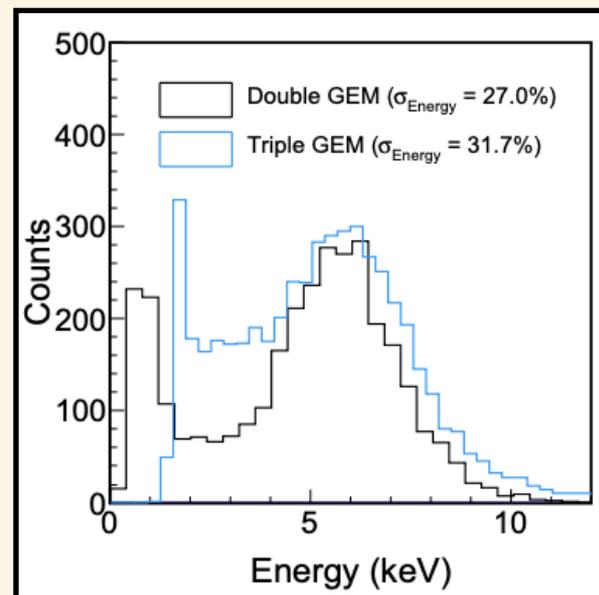


- NITPCの実装に向けて原因の究明、適切な対策が必要

- ▶ シミュレーションによる原因究明を目指す



2017年池田智法 修士論文



2020年島田拓弥 修士論文

NITPCのためのGarfield++(シミュレーション)

◎NITPCのために必要な追加点

- 1. 電子捕獲後の陰イオンの生成
- 2. 電場中での陰イオンのドリフト
- 3. 陰イオンからの電子脱離

2020年 神戸大学 島田拓弥 修士論文
にて実装済み

3.高電場領域で陰イオンから電子脱離している

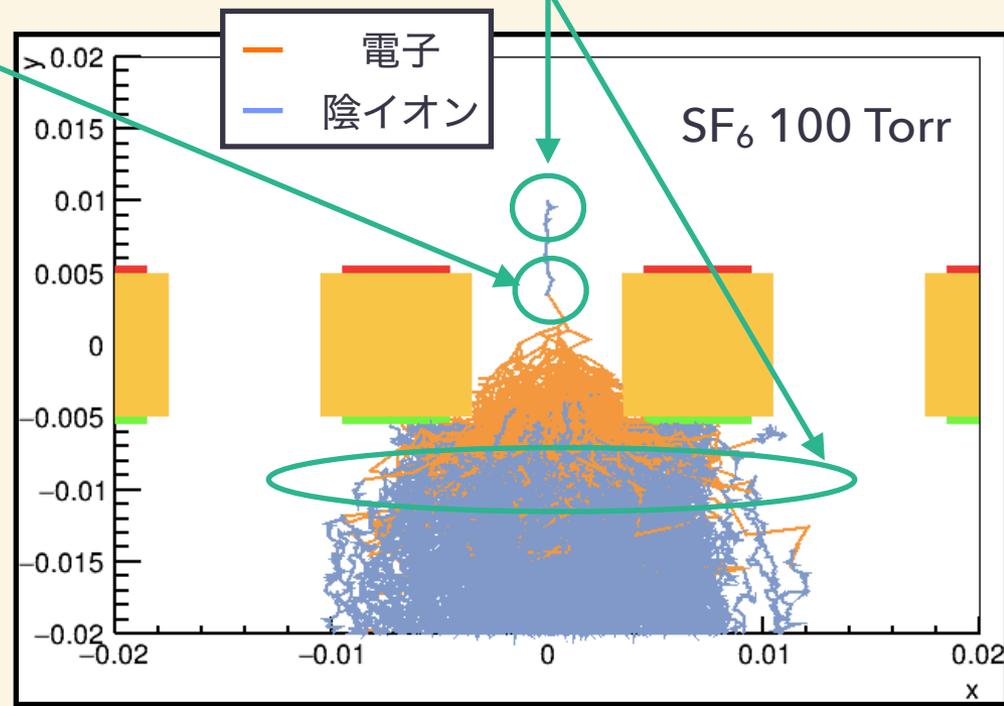
1.2.初期電子が電子捕獲された後、陰イオンが生成され、ドリフトしている。

- 電子に加え、陰イオンの挙動も計算可能となった。

▶ NITPCの理解につながる。

◎本研究

大枠の作られたシミュレーションツールを試用、検出器の動作理解および、シミュレーションの問題点の洗い出しをする。



シミュレートする検出器の概要

◎GEM

- GEMの厚さ : 0.1mm
- GEMのHole/Pitch : $\Phi 70 \mu\text{m} / 140\mu\text{m}$

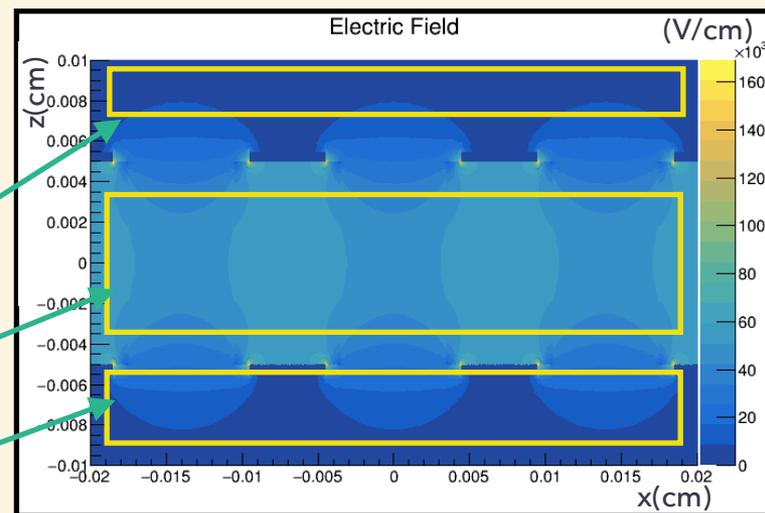
◎初期電子(E_i :各イベント1個)

- $(0, 0, 0.01)\text{cm}$ に配置

◎電場

- 以下の2つ(赤字)のパラメータ変更で電場を形成
- 右図は以下のパラメータ

	パラメータ
Drift Field	1500 V/cm
$V_{\Delta\text{GEM}}$	540 V
Transfer Field (Induction Field)	2500 V/cm



◎評価内容

- $V_{\Delta\text{GEM}}$ を変更し、ゲインカーブを評価する
- Induction電場を変更し、ガス増幅率のInduction電場依存性を評価

シングルGEMでのゲインカーブ

◎ゲイン

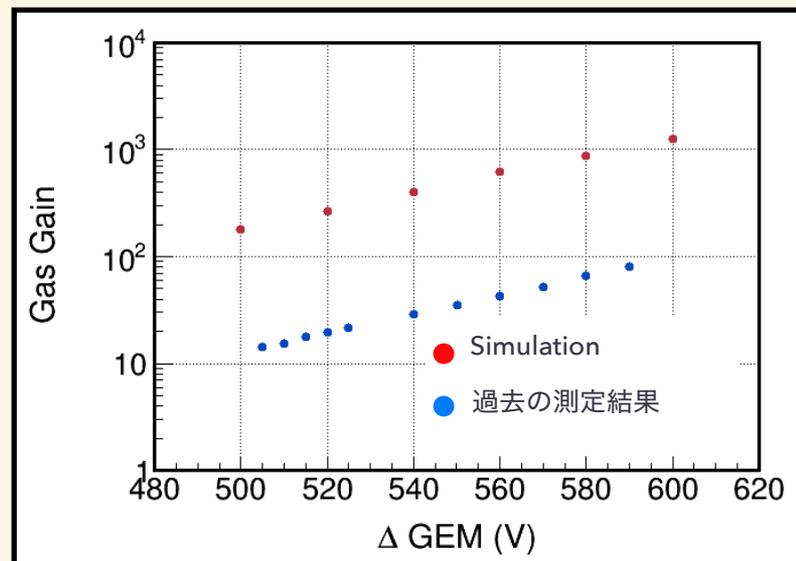
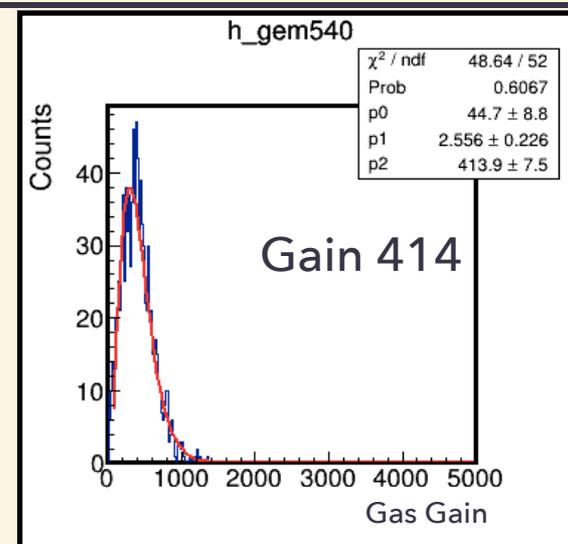
- Readout面まで到達した電子、陰イオン数をカウント(E_e)
- E_e/E_i をガス増幅率(ゲイン)と定義。

◎増幅率分布

- $V_{\Delta GEM}=540\text{ V}$ の時の増幅率の分布
- 1000イベント分シミュレーション
- ポリヤ分布でFitしてゲインを算出

◎ゲインカーブ

- 過去の測定データと比較
- 傾きは合うが、1桁ずれている
 - ▶ シミュレーションでの増幅機構の実装の確認、調整を行う。



Induction電場依存性

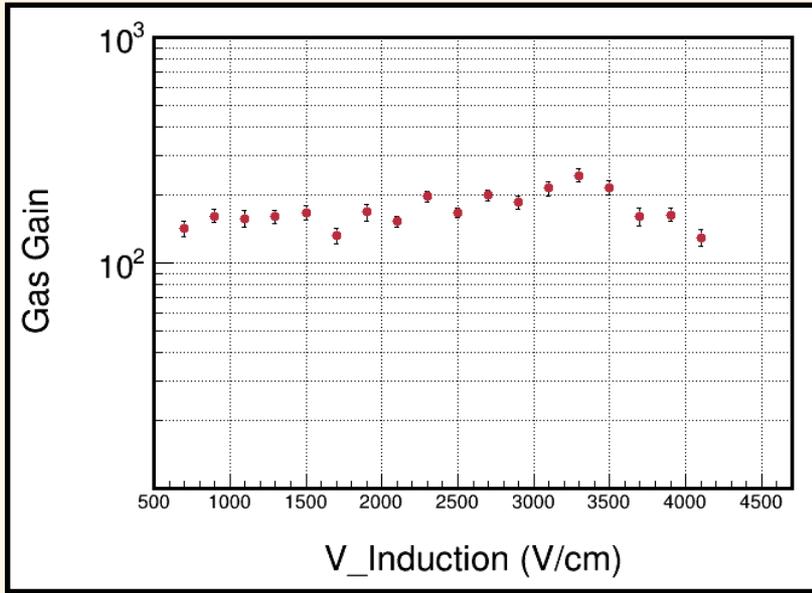
◎電場、電圧条件

- 右の表のようなパラメータでシミュレート
- Induction電場の大きさによるゲインへの影響を調べる。

	パラメータ
Drift Field	1500 V/cm(固定)
$V_{\Delta GEM}$	500 V(固定)
Transfer Field (Induction Field)	可変

◎シミュレーション結果

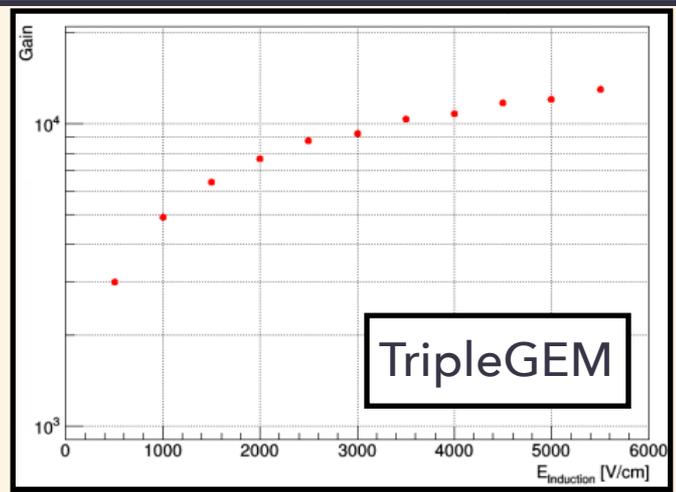
- Induction電場を(700 V/cm ~ 4100 V/cm)の間で変更し、ゲインをシミュレート
- 今回シミュレートした範囲内でゲインのInduction電場依存性は有意に見られない



Induction電場依存性

◎測定とシミュレーションの電圧値、電場

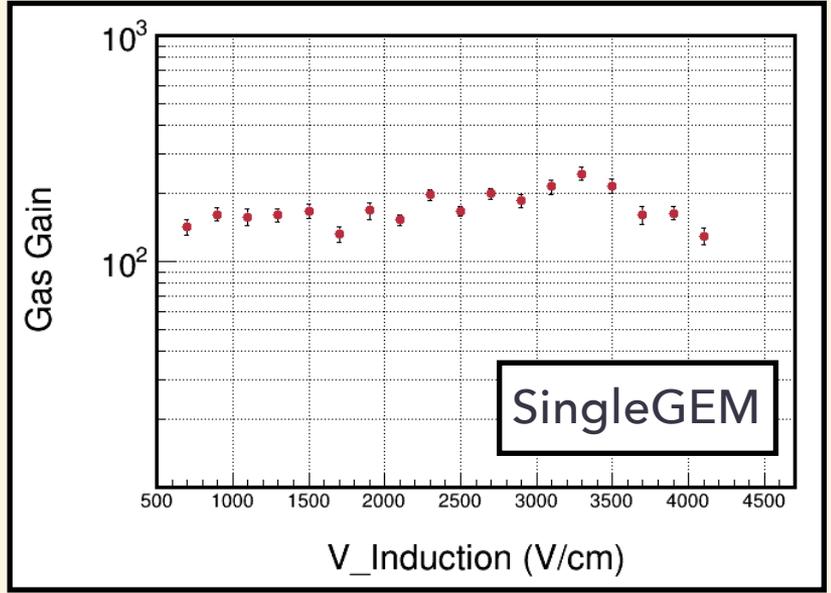
	測定	シミュレーション
Drift Field	1000 V/cm(固定)	1500 V/cm(固定)
$V_{\Delta GEM}$	520 V(固定)	500V (固定)
Transfer Field (Induction Field)	可変	可変



2019年石浦宏尚 修士論文

◎過去の測定との比較

- Induction電場を大きくするとゲインが上昇する傾向が確認されている。
 - ▶ $V_{\Delta GEM}$ の大きさが結果が変わる可能性
 - ▶ GEMの枚数による影響のあり得る。



今後の展望

◎複数GEMでの検出器動作の確認

- GEMを複数枚用いてガス増幅率を測定。
- GEMを複数枚用いたときの、ガス増幅率をGarfield++にてシミュレートする。



- GEMの枚数によるゲインや分解能への影響を評価する。

◎ μ -PIC周辺での陰イオンガスの動作確認

- 陰イオンのドリフトの様子をシミュレート
- あまり理解されておらず未知数



- カソード信号が減衰する原因を解明する。

まとめ

- NEWAGE実験では検出器由来のBG削減のため、陰イオンTPCの開発を進めている。
 - ▶ 検出面からのBG削減、位置分解能向上が期待されるSF₆ガスを使用。
- 従来のGarfield++シミュレーションではNITPCの動作を評価できなかった。
- NITPCのためのGarfield++が開発され、本研究で試用。
- ガス増幅率はシミュレーションと測定で桁がずれるため、タウンゼント係数の調整が必要。測定にて検証する必要あり。
- ガス増幅率のInduction電場依存性が、過去の測定と不一致。あらゆる条件でのシミュレーションを実行する必要がある。

Back up

電子拡散と陰イオン拡散の違い

◎電子拡散

- 電場中での電子の拡散

$$\sigma(x) = \sqrt{2D_e t}$$

(D_e はガス中での電子の拡散係数)

熱拡散

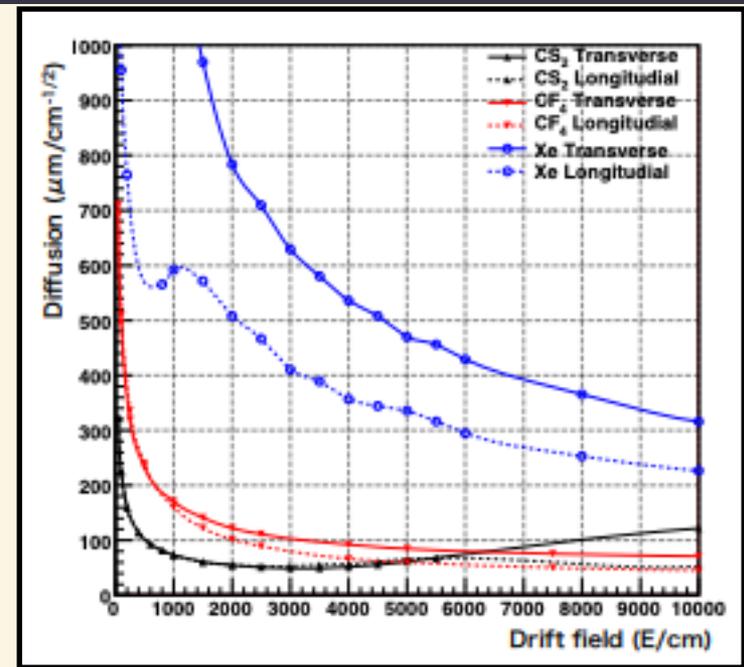
+

$$\sigma(L) = \sqrt{\frac{2kTL}{eE}} = 0.7 \text{ mm} \left(\frac{T}{300 \text{ K}} \right)^{1/2} \left(\frac{580 \text{ V/cm}}{E} \right)^{1/2} \left(\frac{L}{50 \text{ cm}} \right)^{1/2}$$

◎陰イオン拡散

熱拡散のみ

$$\sigma(L) = \sqrt{\frac{2kTL}{eE}} = 0.7 \text{ mm} \left(\frac{T}{300 \text{ K}} \right)^{1/2} \left(\frac{580 \text{ V/cm}}{E} \right)^{1/2} \left(\frac{L}{50 \text{ cm}} \right)^{1/2}$$



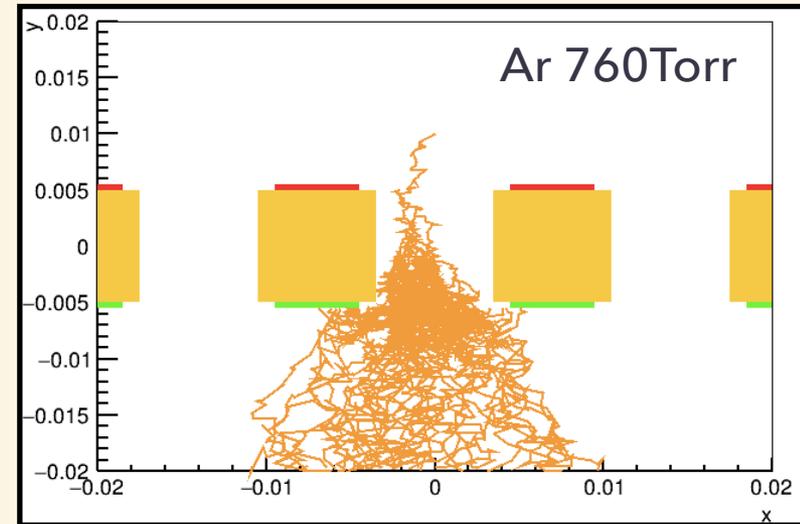
2017 神戸大学 池田智法 修士論文

電子の拡散と陰イオンの拡散の
電場依存性

従来のGarfield ++(シミュレーション)

◎Garfield++

- ガス中での電子、イオンの挙動をシミュレートするソフト
- Macroscopic(数cmオーダー)な計算
 - ▶ 電場中のドリフトや拡散をシミュレート
- Microscopic(数 μm オーダー)な計算
 - ▶ 衝突確率やアバランシェ増幅をシミュレート
- 電子のドリフト、増幅、拡散については従来のGarfield++を使用することで計算できる。



Ar 760Torr 中でのGEMによる
ガス増幅のシミュレーション

従来のGarfield ++(シミュレーション)

◎計算過程の問題

- 各ステップごとに情報を取得
 - ▶ 弾性衝突、イオン化、電子捕獲の情報を取得し、次のステップへ
 - ▶ 電子捕獲後は、電子の情報は計算されなくなる。
- 陰イオンガス中での電子の動作の計算には使用できない

即座に電子が捕獲され、計算が終了する

