

宇宙線ミューオンの測定実験のための
スパークチェンバーの作成及び性能評価

山中研究室

小野 啓太

本研究のモチベーション

- 宇宙線ミュオンはふつうは目で見えない



他の方法で観測する方法はないか？



スパークチェンバーで可視化させてみよう！

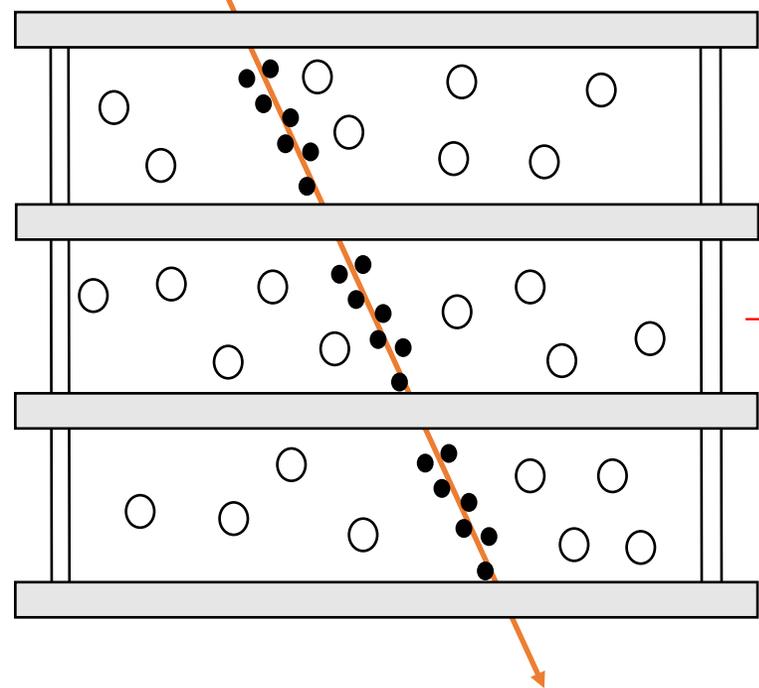
- ミューオンの物理量（角度分布やフラックス）測定

スパークチェンバーについて

ガス検出器の一種

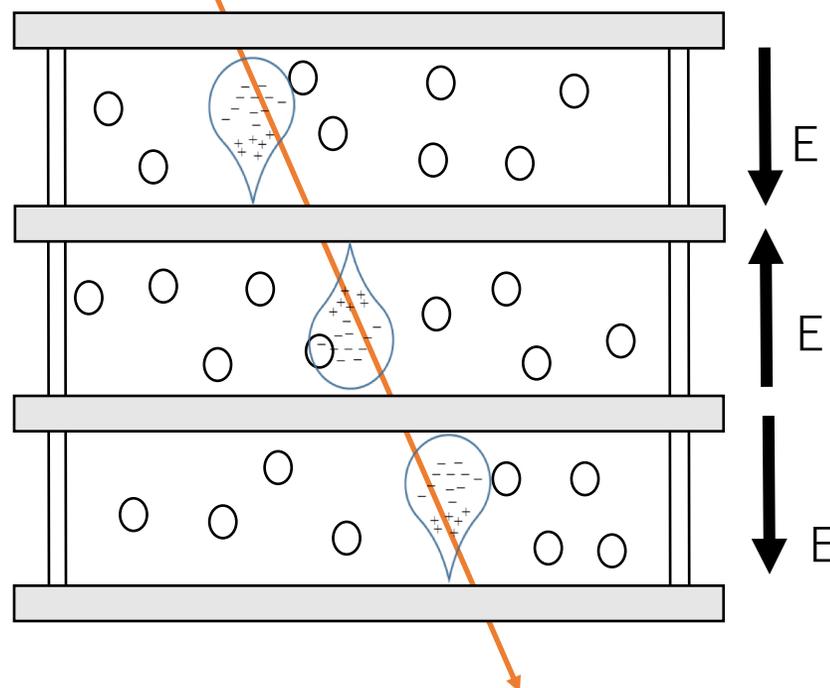
① ガスがイオン化

荷電粒子



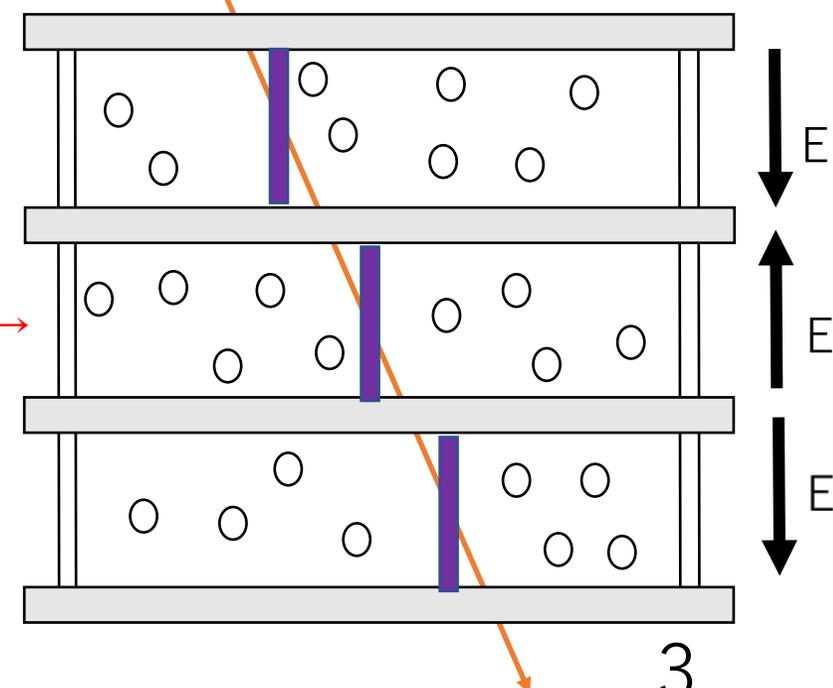
② 高電場印加

荷電粒子



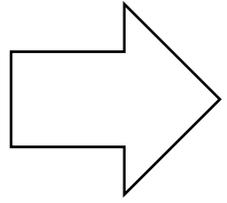
③ 放電により飛跡が可視化

荷電粒子



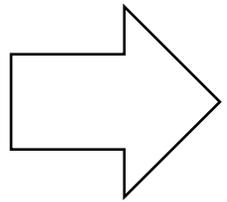
研究テーマ

そもそも測定に使うスパークチェンバーがない...



- スパークチェンバー本体のデザイン
- 本体の接着手法の研究

どうやって飛跡を記録しよう？ →カメラを使おう！

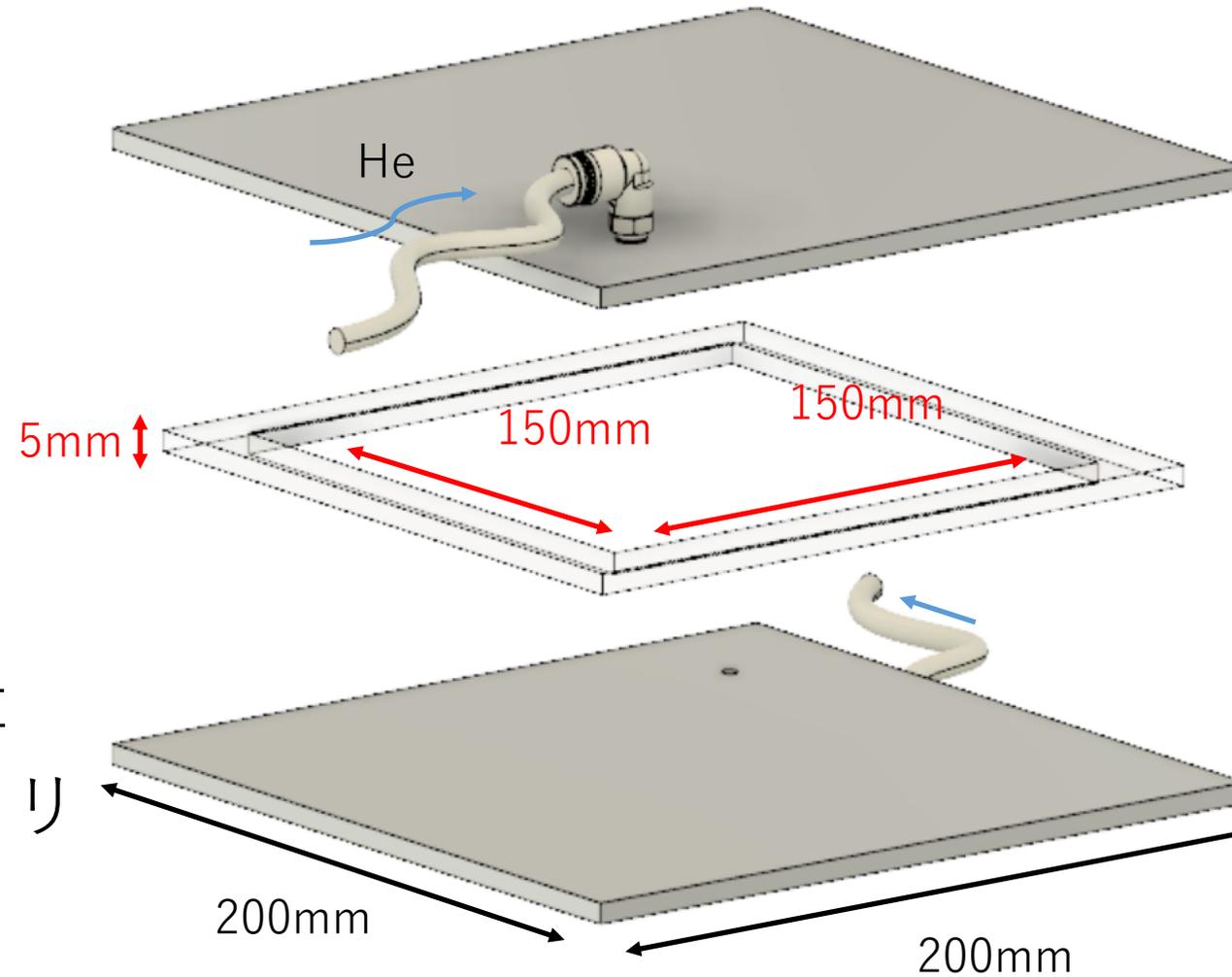


- 画像解析ソフトウェアの開発

本体のデザイン

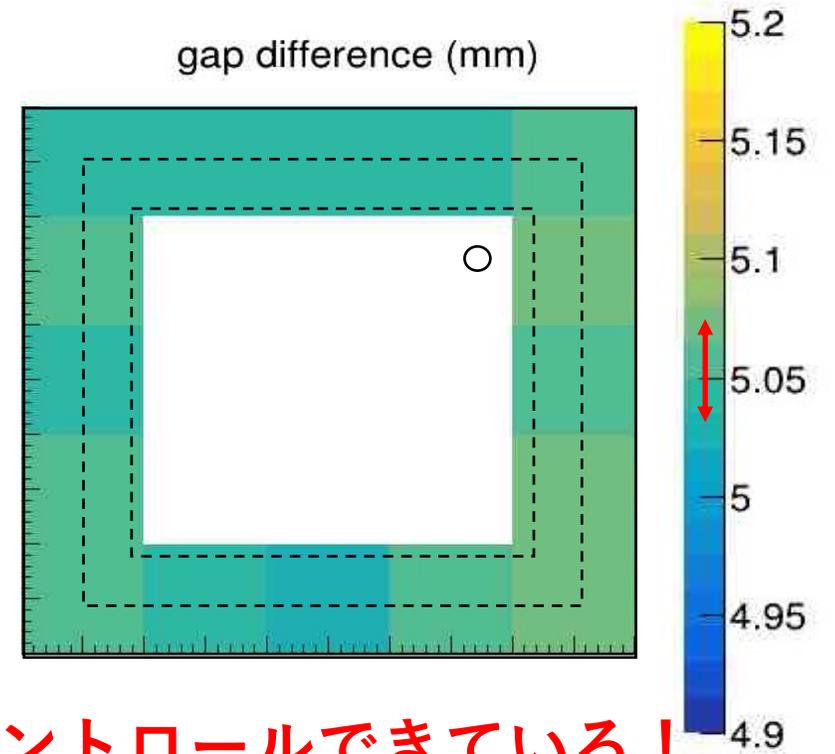
要求

- 数Hzのミュオンレートを確保
→検出領域 $150 \times 150 \text{ mm}^2$
- 数 k V/cm の高電場を印加
→極板間の距離 5mm
- 極板間にガスを閉じ込める枠が必要
→レーザー加工機でくりぬいたアクリル板を採用

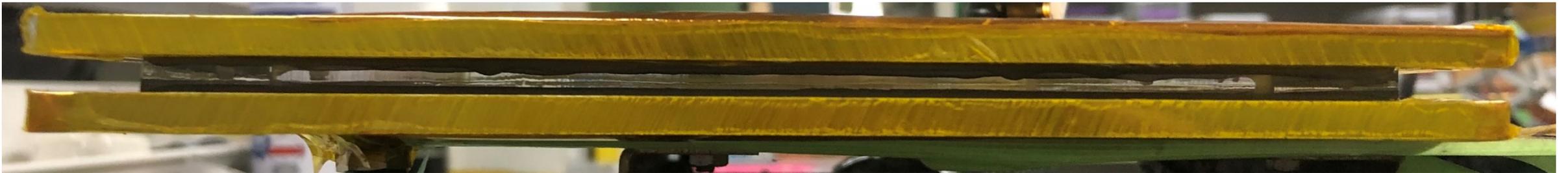


接着手法

- 1 厚さをコントロールしたい
→8か所をクランプで止める
- 2 アクリルとアルミの相対位置
→角の2点をジグで固定
- 3 Heガスのリーク、枠側面の汚れの防止
→マスキングテープで接着剤をコントロール

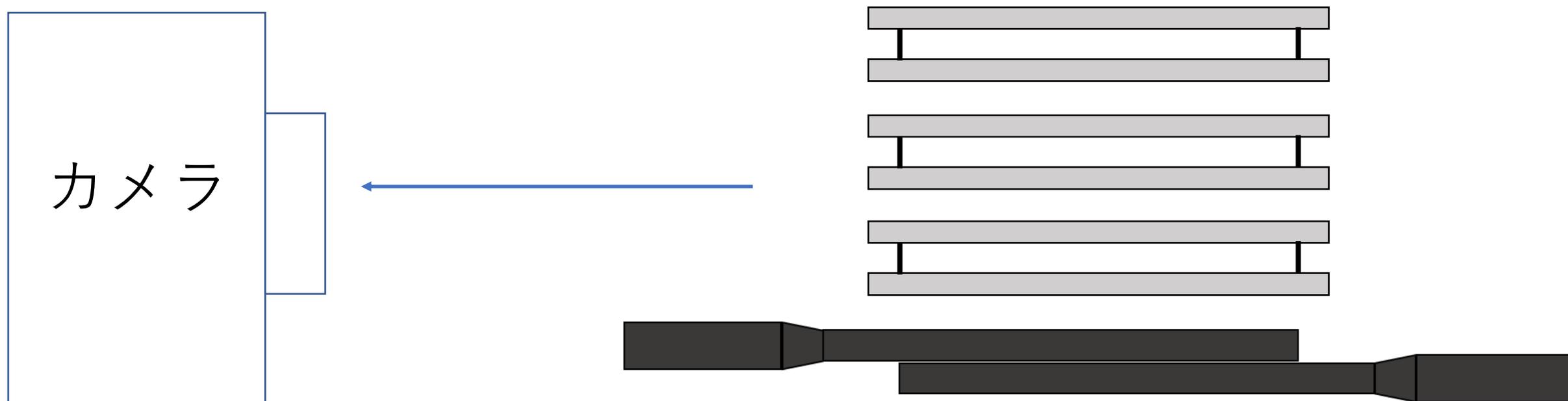


コントロールできている！



セットアップ

- 1層×3で3層のスパークチェンバーを製作
- チェンバーの各層が見えるようにカメラをセット



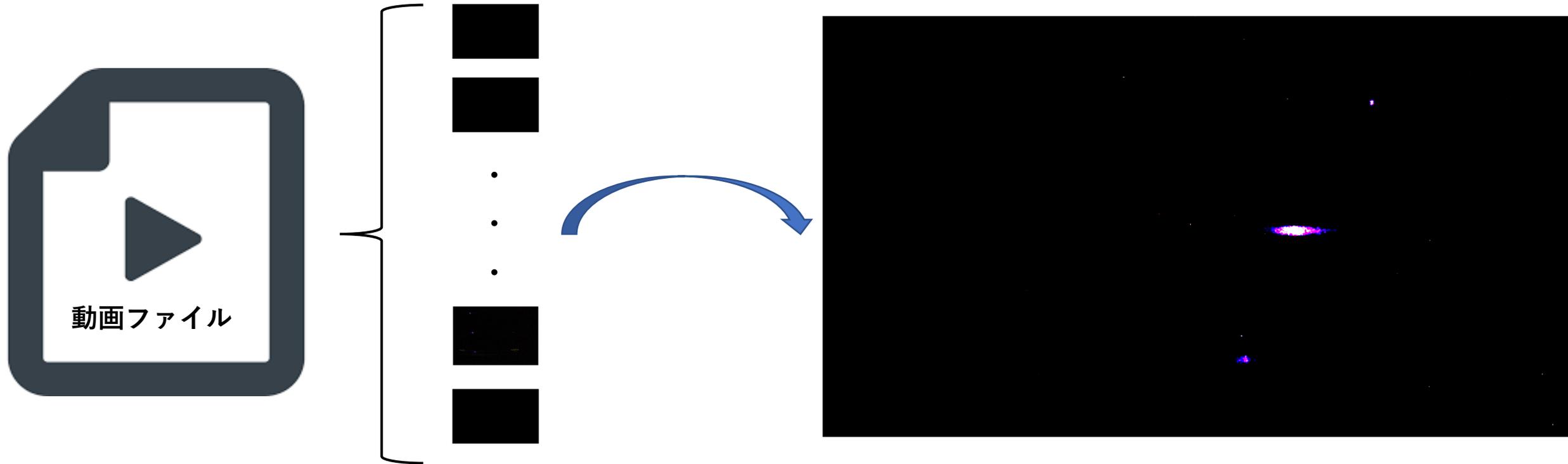
動画を撮影→OpenCVを用いた画像解析



放電位置の座標を抽出

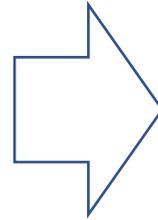
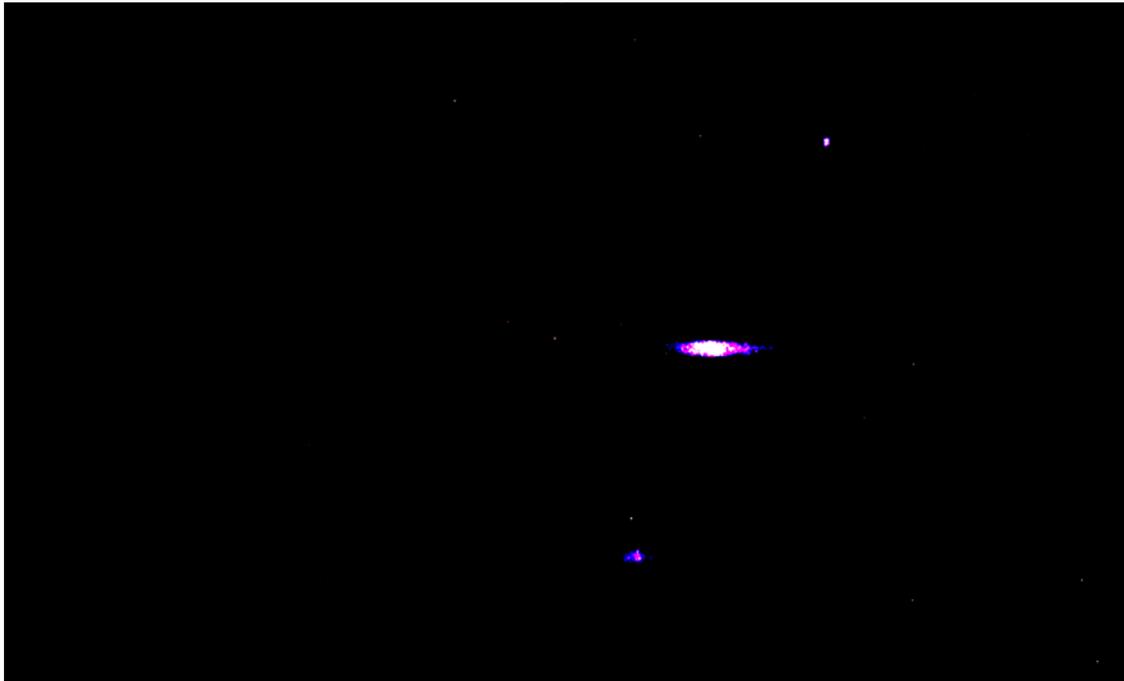
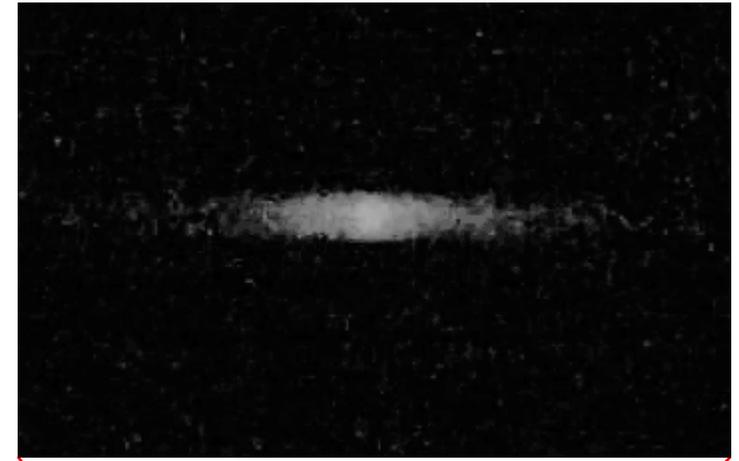
画像解析の流れ

① フレームの抽出



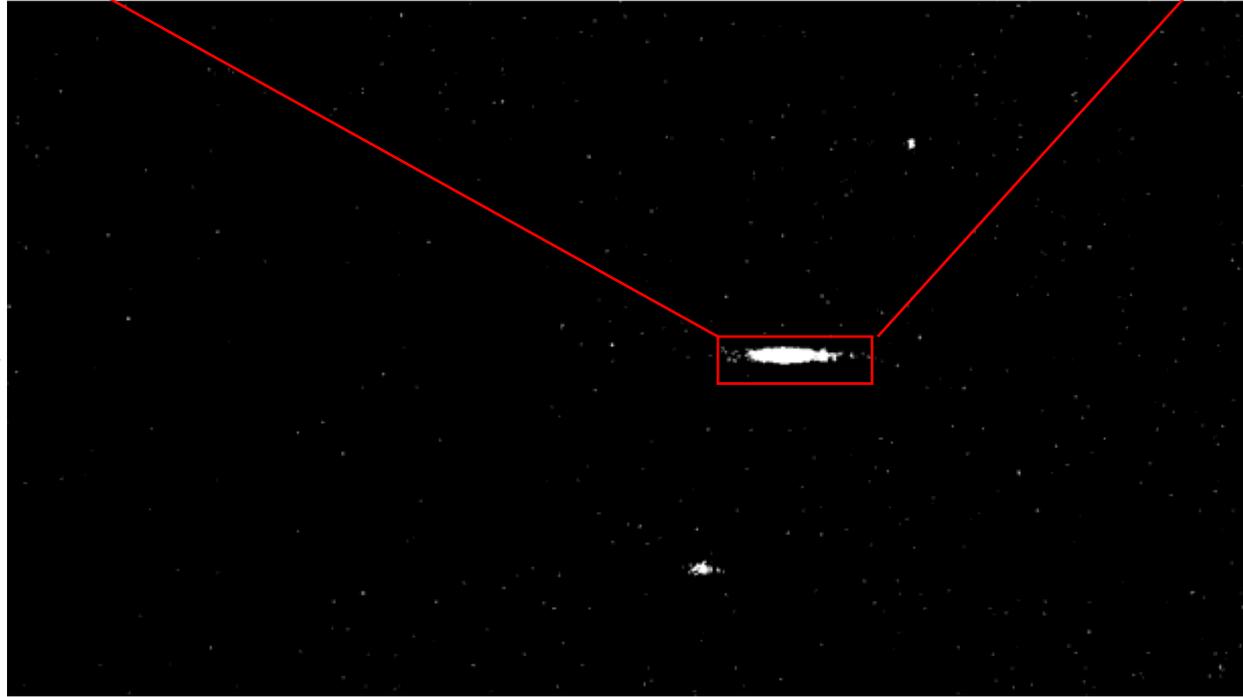
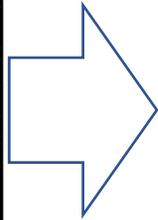
画像解析の流れ

② グレースケール化



画像解析の流れ

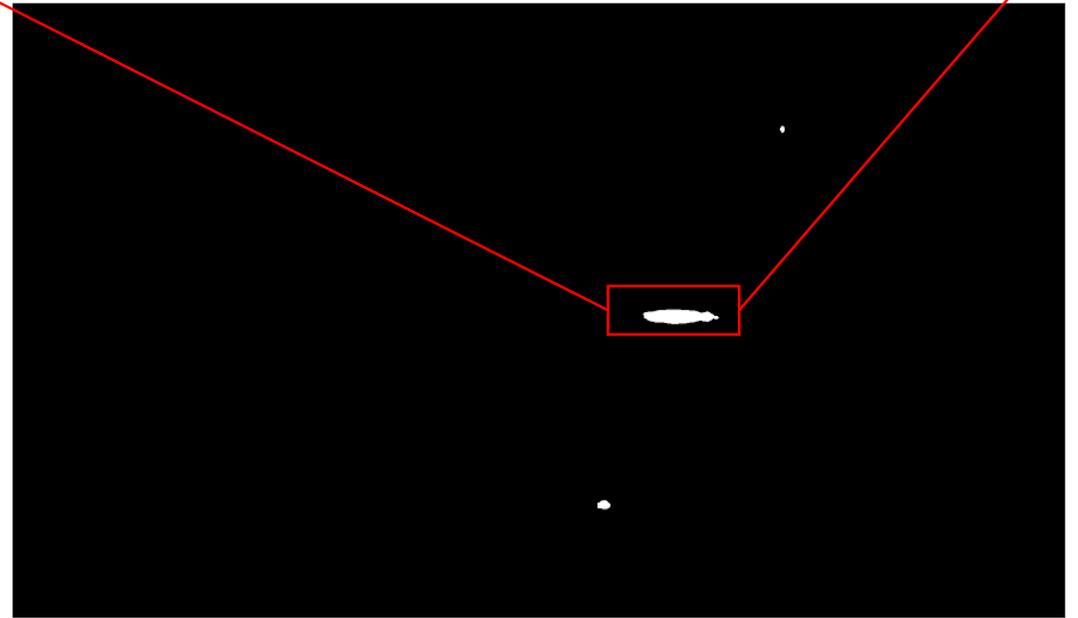
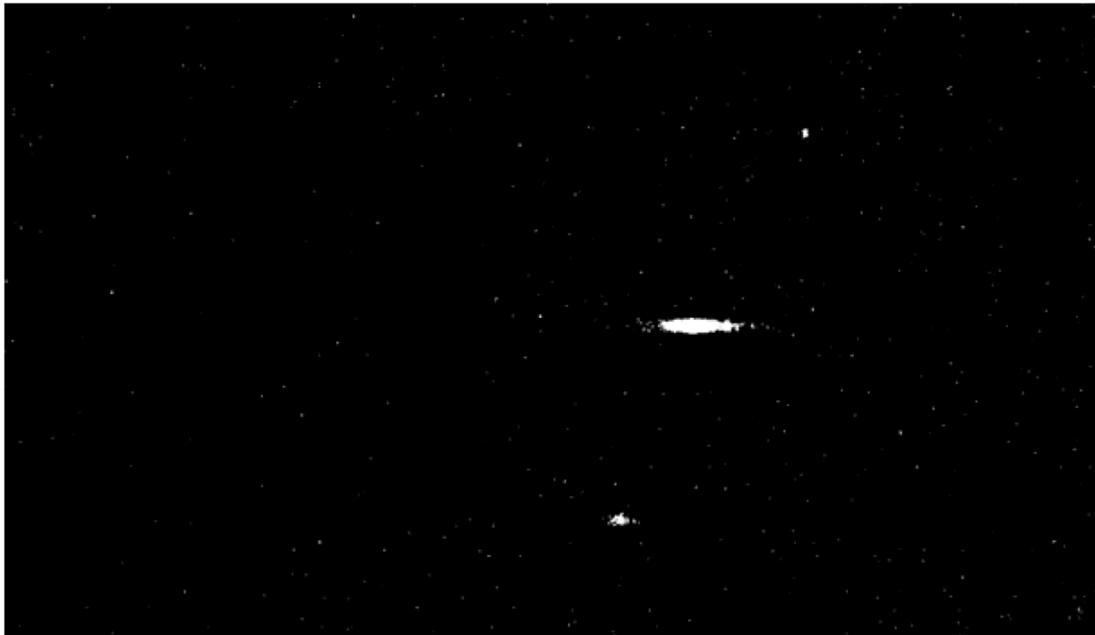
③ 二値化



ノイズが出ている... 10

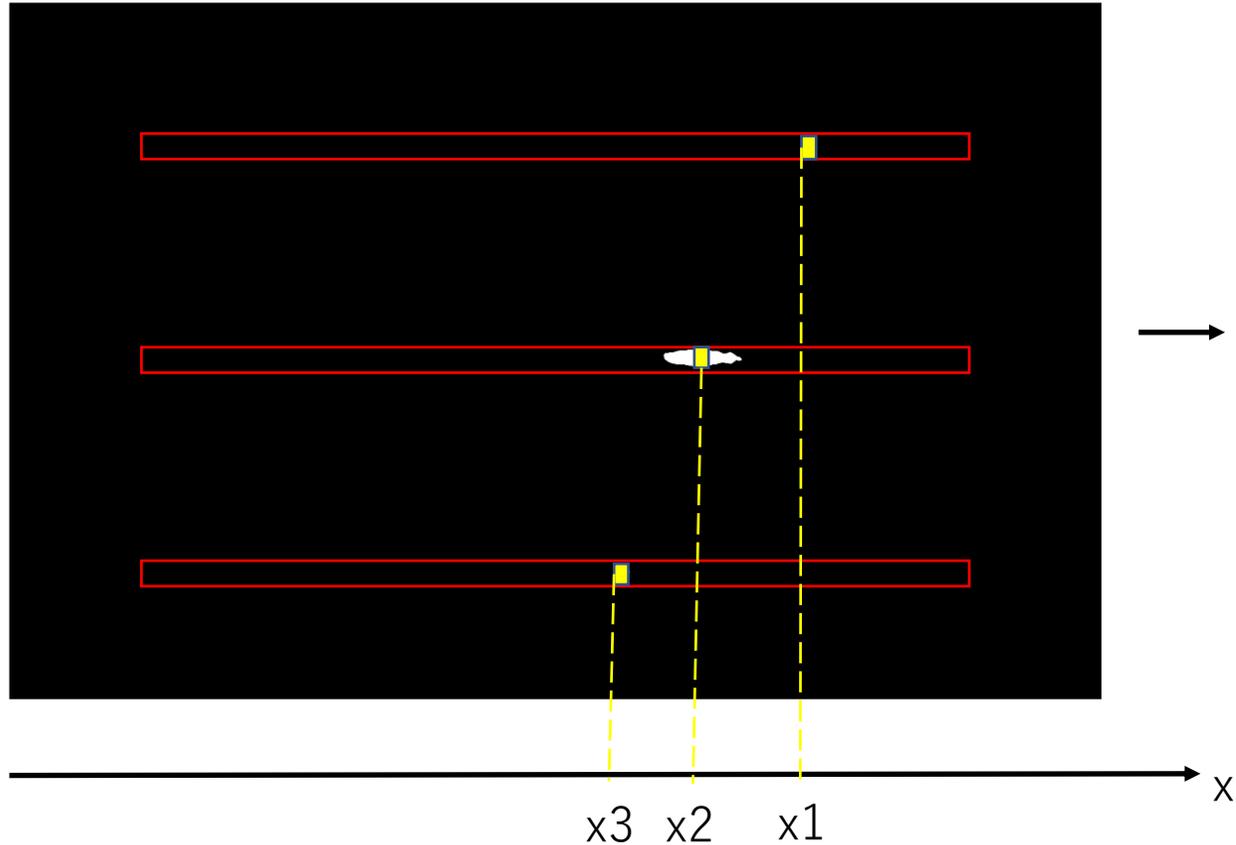
画像解析の流れ

③ ノイズ除去



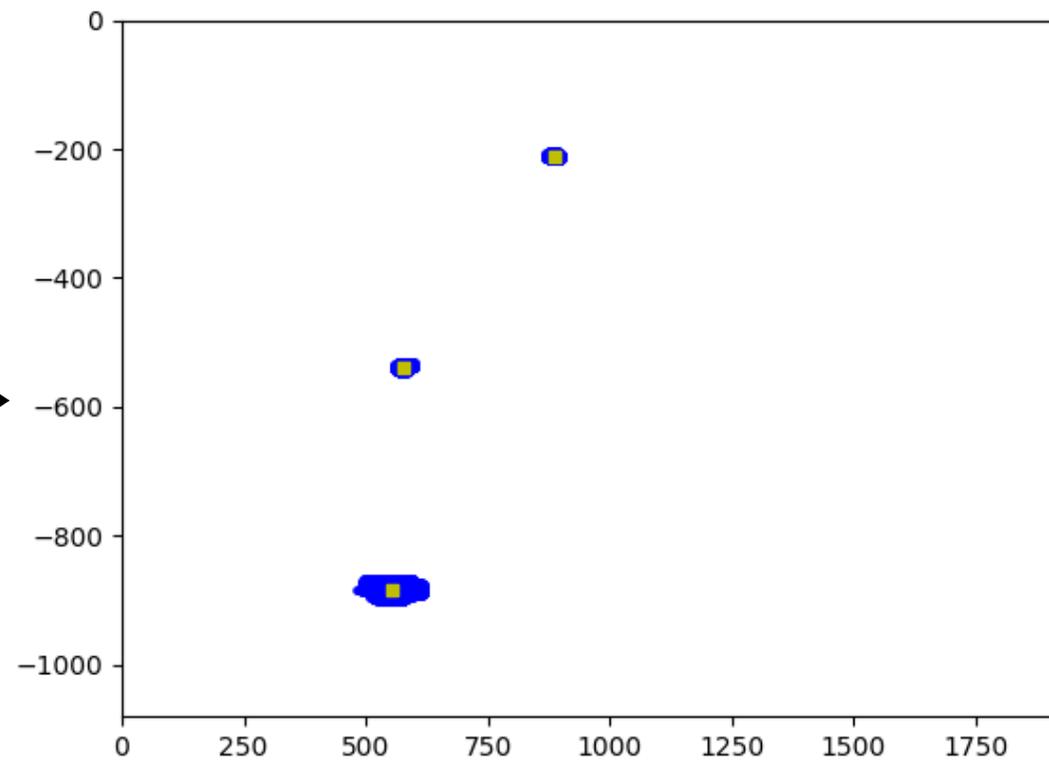
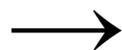
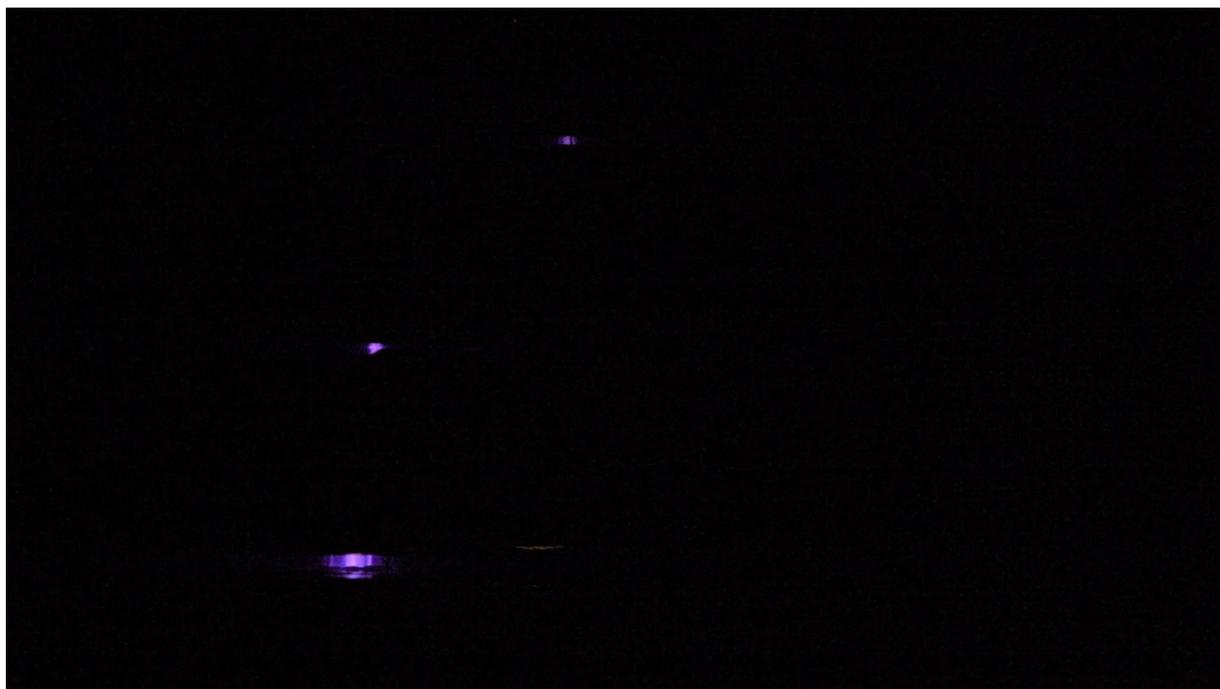
画像解析の流れ

⑤ 重心を計算

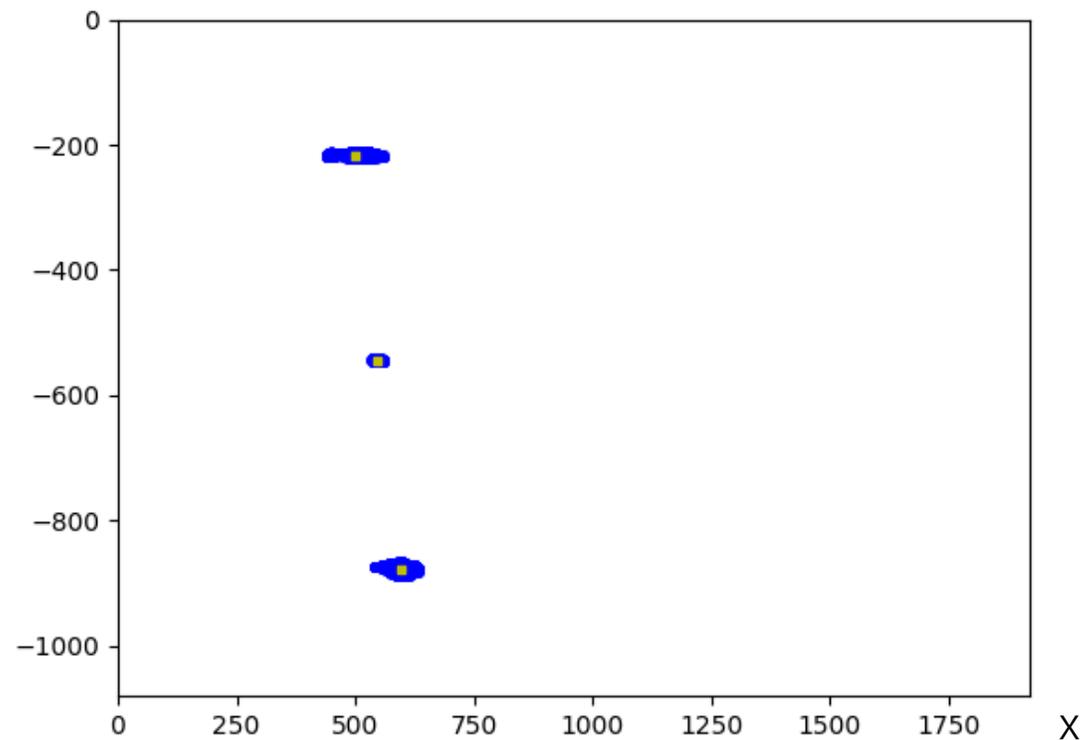
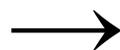
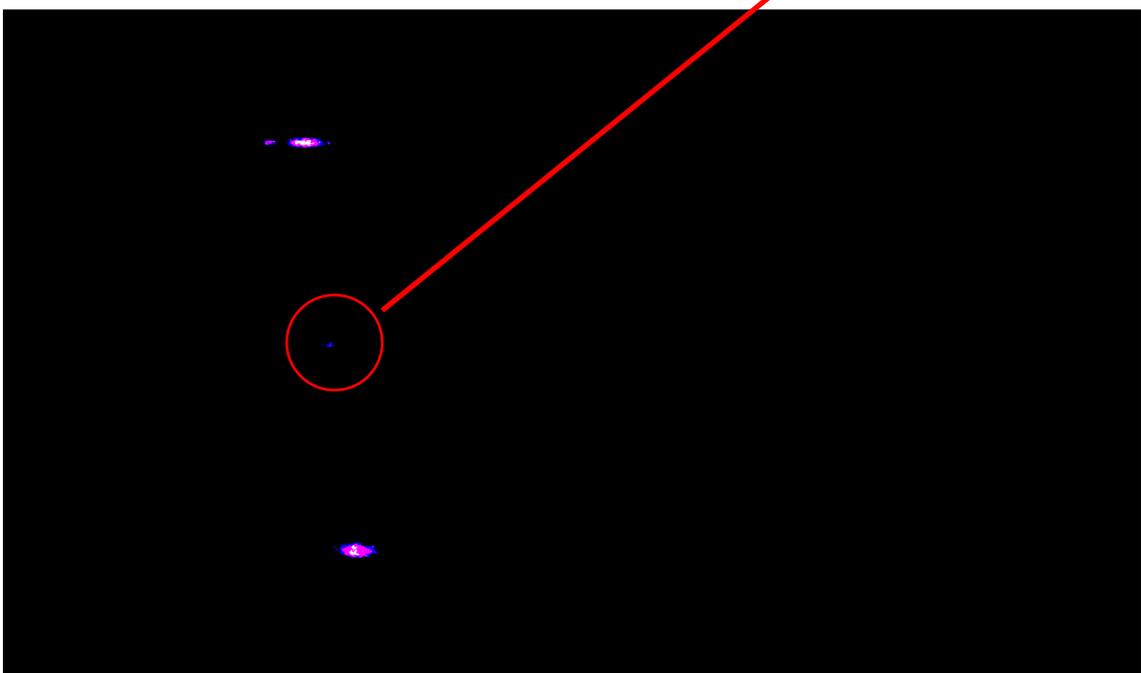
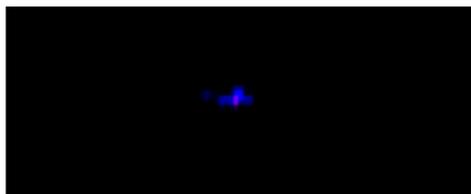


→ (X_1, X_2, X_3) として
ファイルに出力

画像処理の例(1)



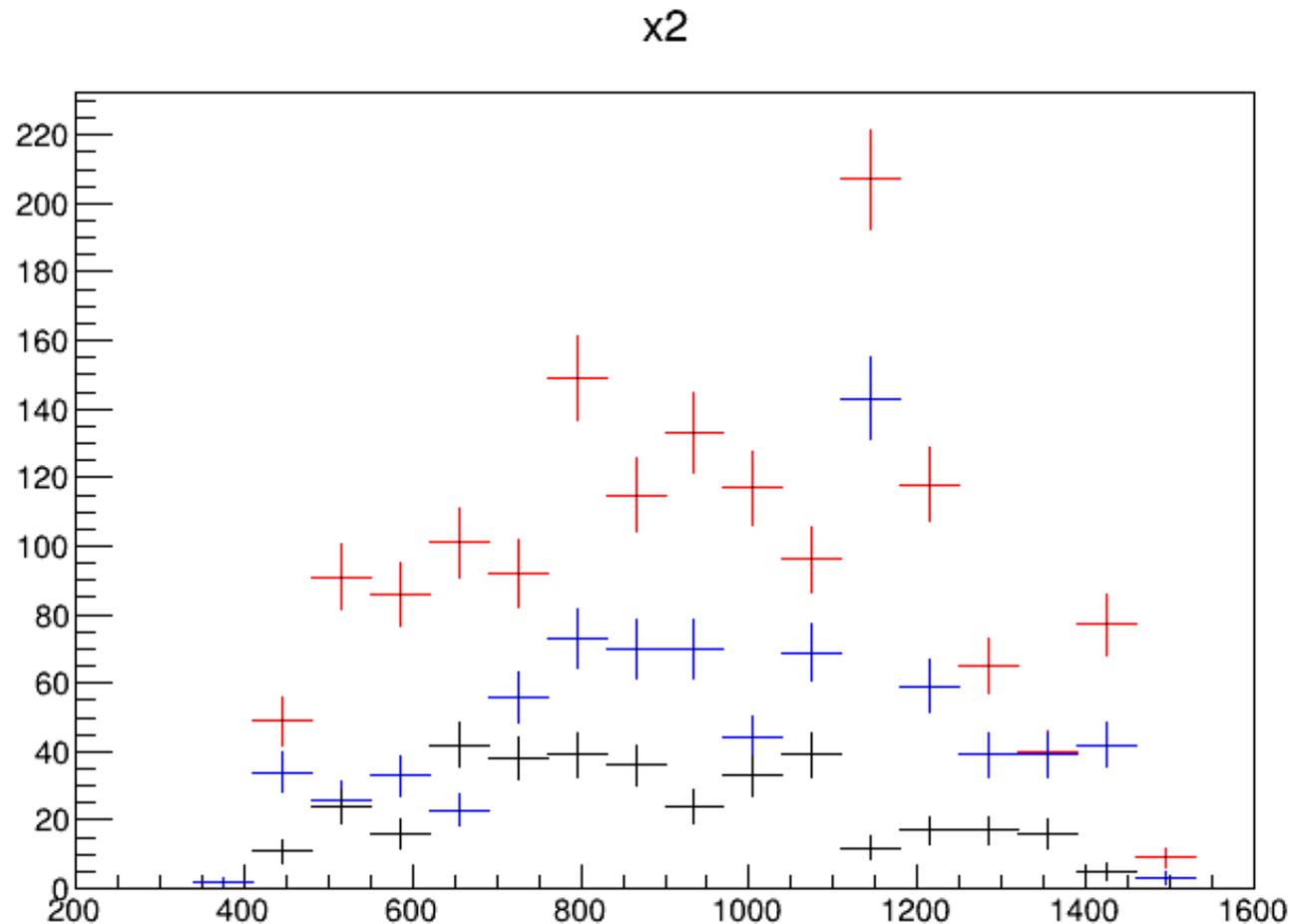
画像処理の例(2)



座標抽出できている

各層の放電のx分布

- 一層目(上)
- 二層目(中)
- 三層目(下)



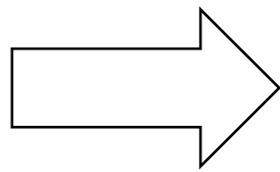
よく光るところがある…

↓しかし

全体的には
一様分布

結論

- ミューオン測定実験のためのスパークチェンバーの設計および製作を行った
- スパークチェンバー接着の研究を行い、さまざまな要求を満たす接着手法を確立した
- それぞれの放電位置の座標を抽出するソフトウェアを開発した
- 実際に放電の位置分布が期待通りの分布だった (?)



測定に用いる
スパークチェンバの製作に成功した

Back Up

リークチェック

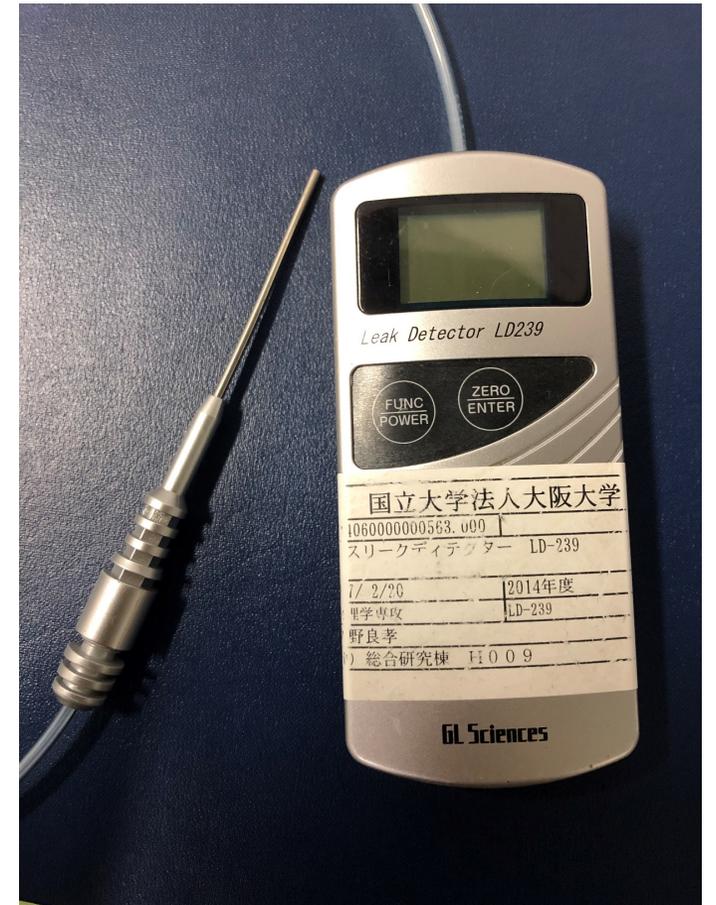
リーク検出器を用いてガスが漏れていないかチェック

感度

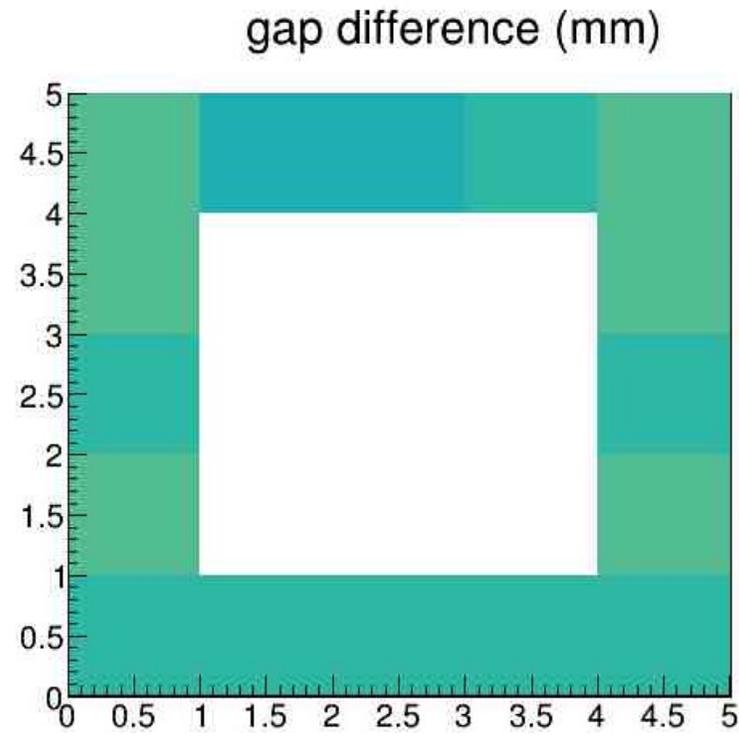
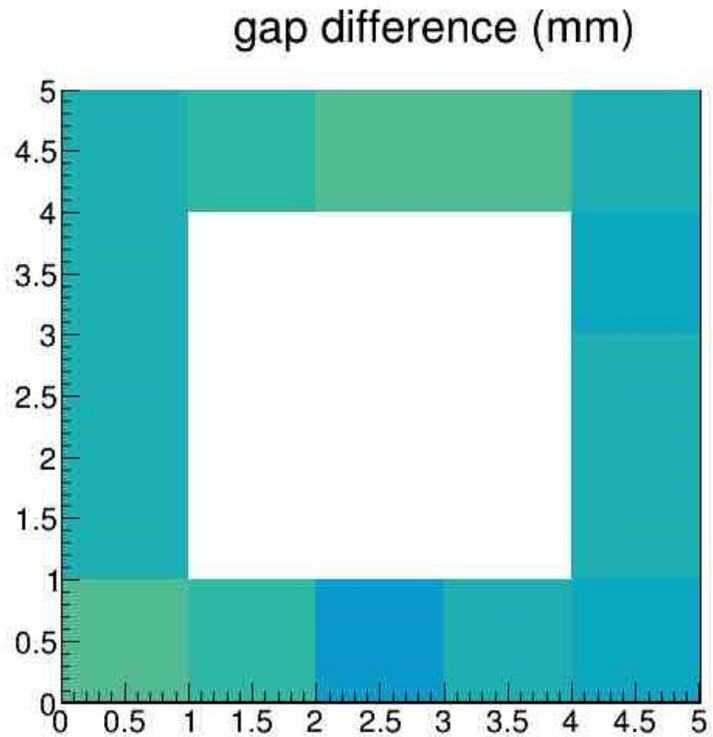
[Stdレンジ] 最小0.005mL/min
のHeを検出

[Hiレンジ] 最小0.0005mL/min
のHeを検出

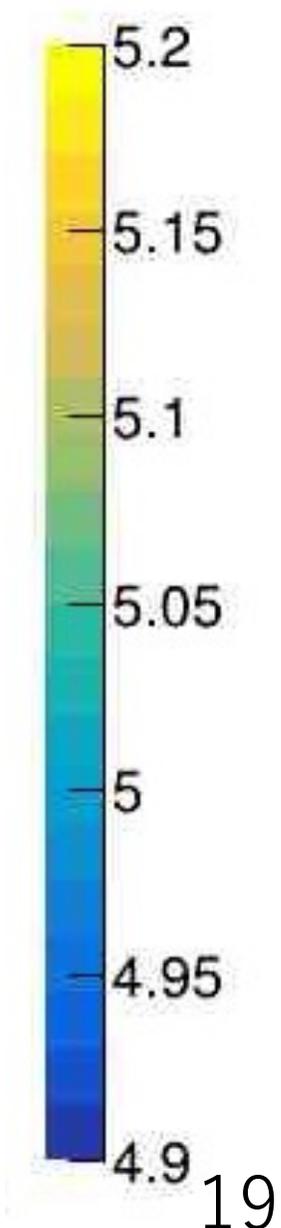
佐藤さんありがとうございました！



他の2つチェンバーの厚さコントロール

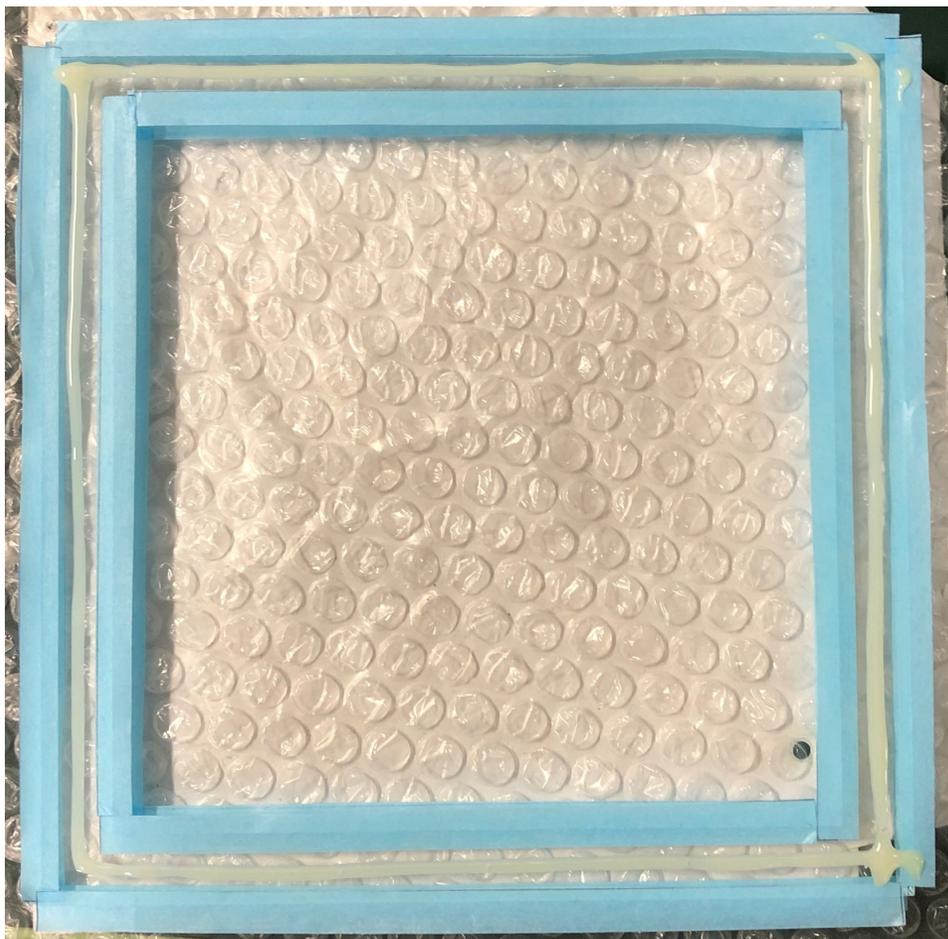
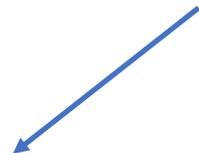


→それぞれコントロールできている

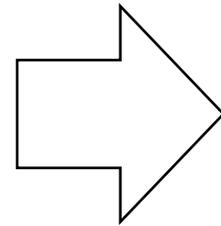
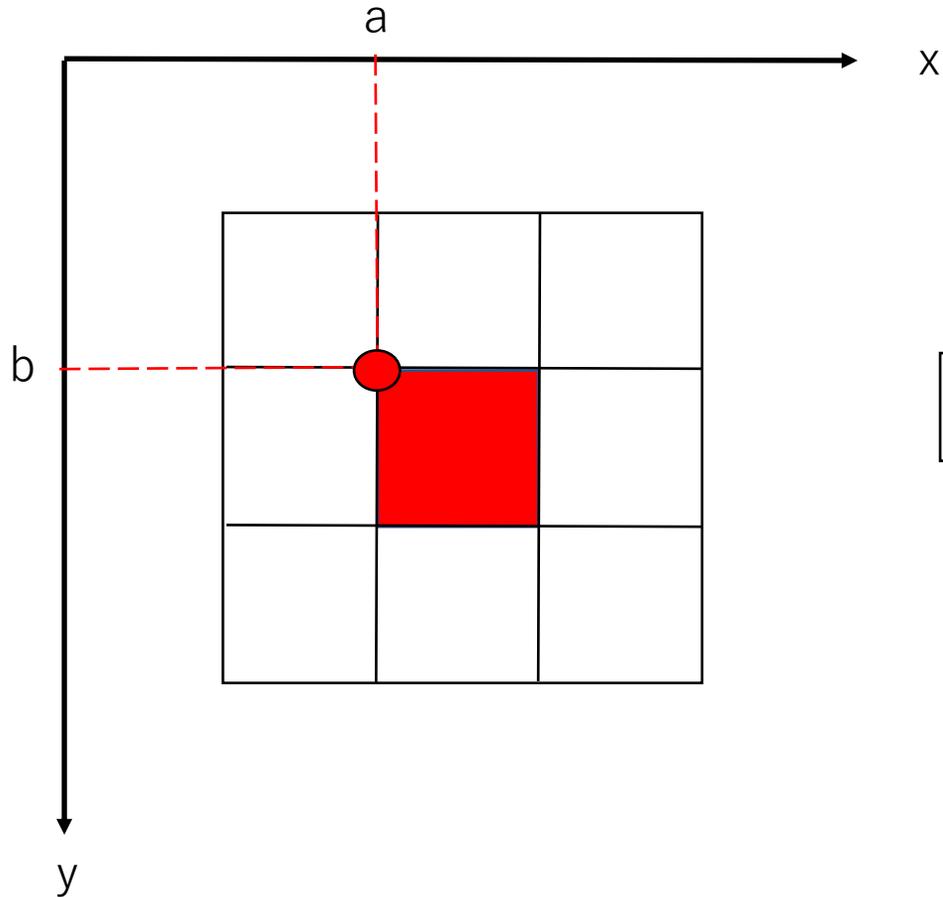


接着

マスキングテープ



OpenCV上での座標の取り方



$$Y1 = b + 0.5$$

$$X1 = a + 0.5$$

中央値フィルタ(メディアンフィルタ)

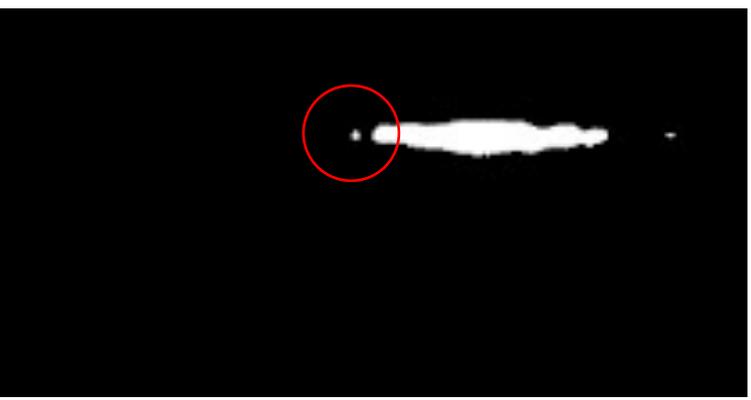
カーネルサイズ = 3 の時

- ①注目画素の近傍の8個の画素を取得する。
- ②9つ（注目画素 + 8個）の画素値を小さい順に並べる。
- ③②のリストのうち中央値を注目画素の新たな画素値とする。

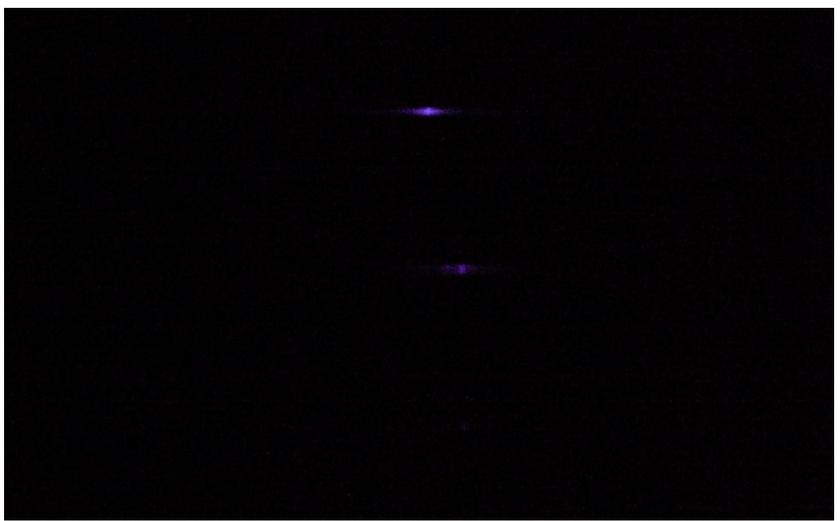
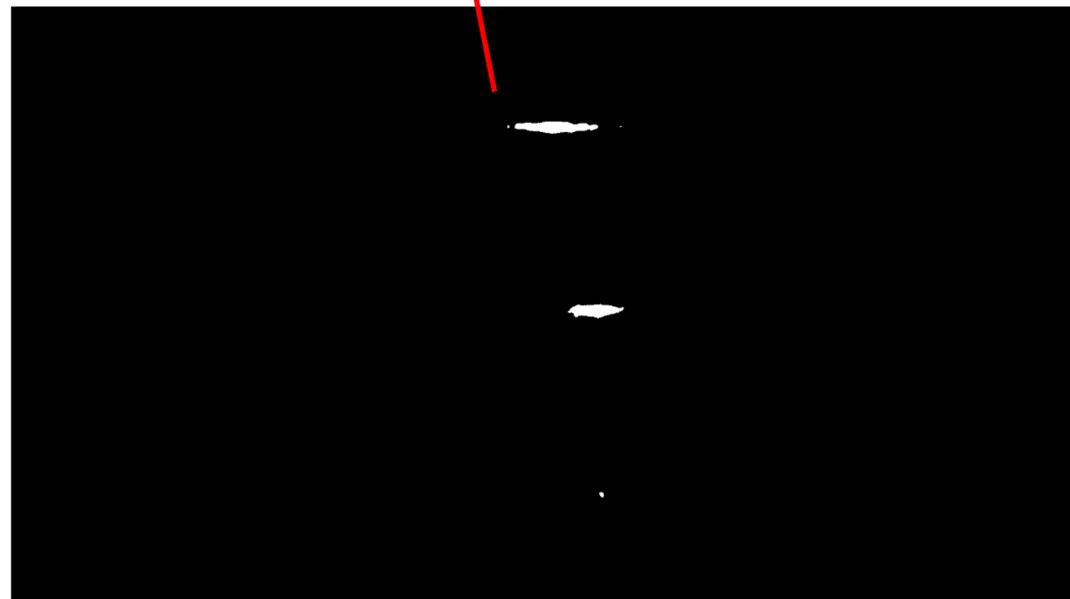


ゴマ塩サイズのノイズ除去に最適！

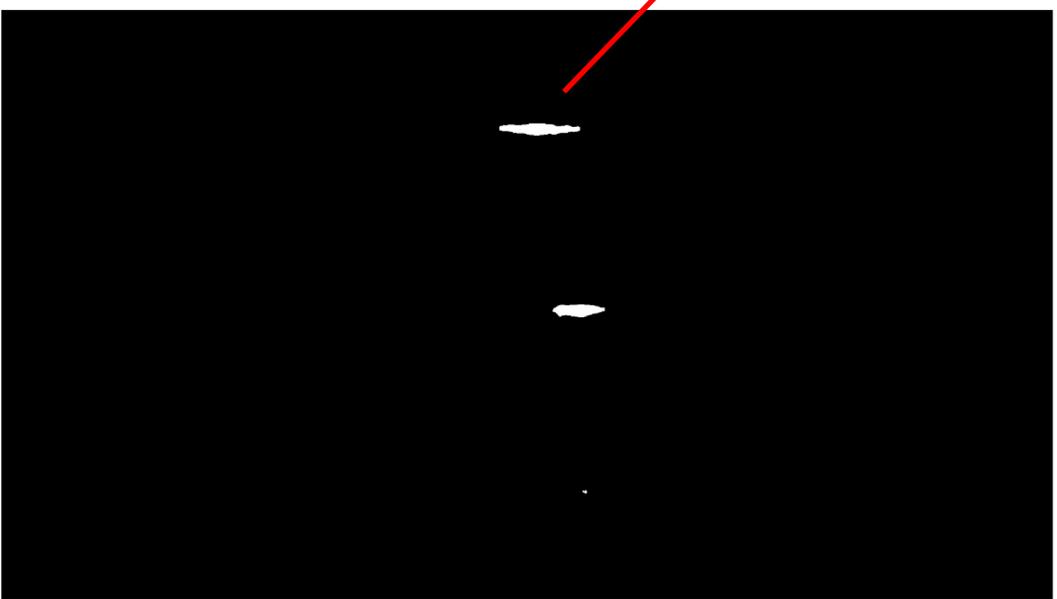
ノイズ除去のパラメーターでの違い



ksize = 9



ksize = 11



ノイズ除去のパラメーター(カーネルサイズ)での違い

ksize = 9

```
上で光った数 78  
中で光った数 152  
下で光った数 721  
1層 833  
2層 104  
3層 18  
event 955
```

ksize = 11

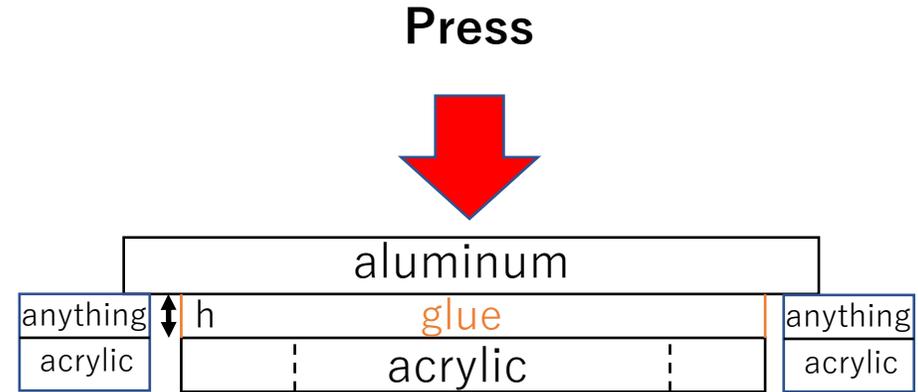
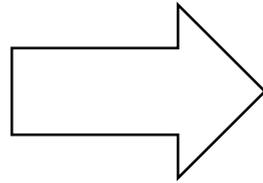
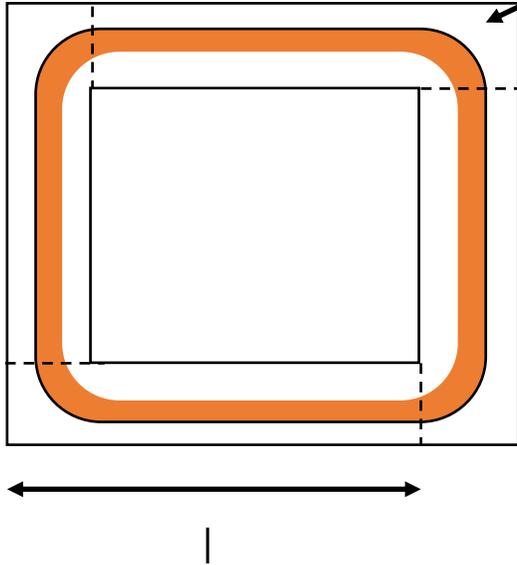
```
上で光った数 78  
中で光った数 156  
下で光った数 740  
1層 834  
2層 104  
3層 17  
event 955
```

出力した数 9

13

過去の研究

Control of thickness



The volume of glue $V = h \times 15 \times 4l \text{ mm}^3$
The density of glue $\rho = 1.05 \text{ g/cm}^3$

Need to keep $16h \times 10^{-3} \text{ g/mm}$

l control $(1.7 \pm 0.2) \times 10^{-3} \text{ g/mm}$



Need to $h \sim 100 \mu\text{m}$

カメラ



パラメーター

- 30fps
- f値 5.6
- ISO感度 3200

領域の定義



glue

ARALDITE® 2011



Density : 1.05g/cm³

Fixture time : 420 minutes

接着手法の研究

- ① 実際の極板間距離(接着剤の厚み + アクリルの厚さ) のコントロール
→ efficiencyの場所依存性を防ぐ
- ② 枠と極板の相対位置の固定
→ 複数層使用時のacceptanceの減少を防ぐ
- ③ 接着界面におけるガスリークを防ぐ
- ④ 枠の側面の汚れを防ぐ

接着結果

2 アクリルとアルミの相対位置

静電容量が大きく変化するようはずれはなし

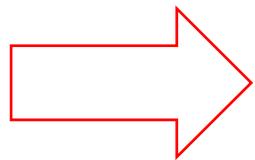
3 Heガスのリーク

リーク検出器を用いたリークチェックでは検出されなかったため、ガスの抜け道はなし

写真

4 アクリル側面の汚れ

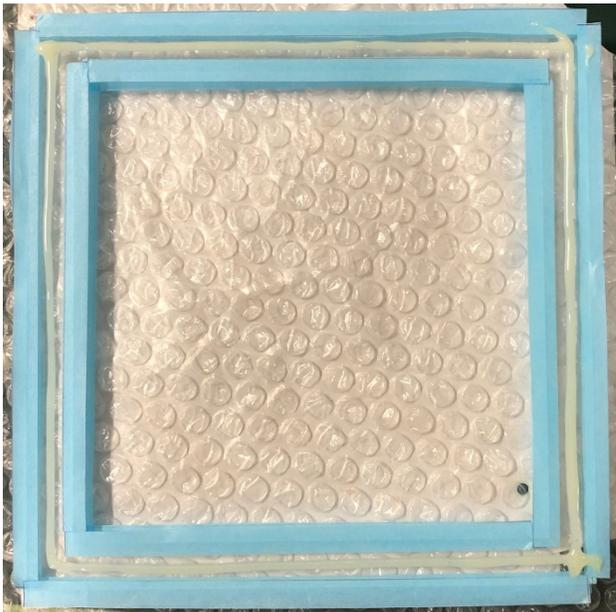
漏れた接着剤により少しの汚れがみられるが観測に問題はなし



要求をほぼ満たす

接着手法(いらない使用もな)接着剤 アラルダイト2011

- ①アクリルの辺の端にマスキングテープを貼り、垂らした接着剤をへらを用いて伸ばす
→ 接着剤の量をマスキングテープの厚さ分の量にコントロール
- ②貼り付けるアルミの他に別のアルミも一緒に挟んでクランプで固定する
→ 接着面に均等に力がかかるようにするため

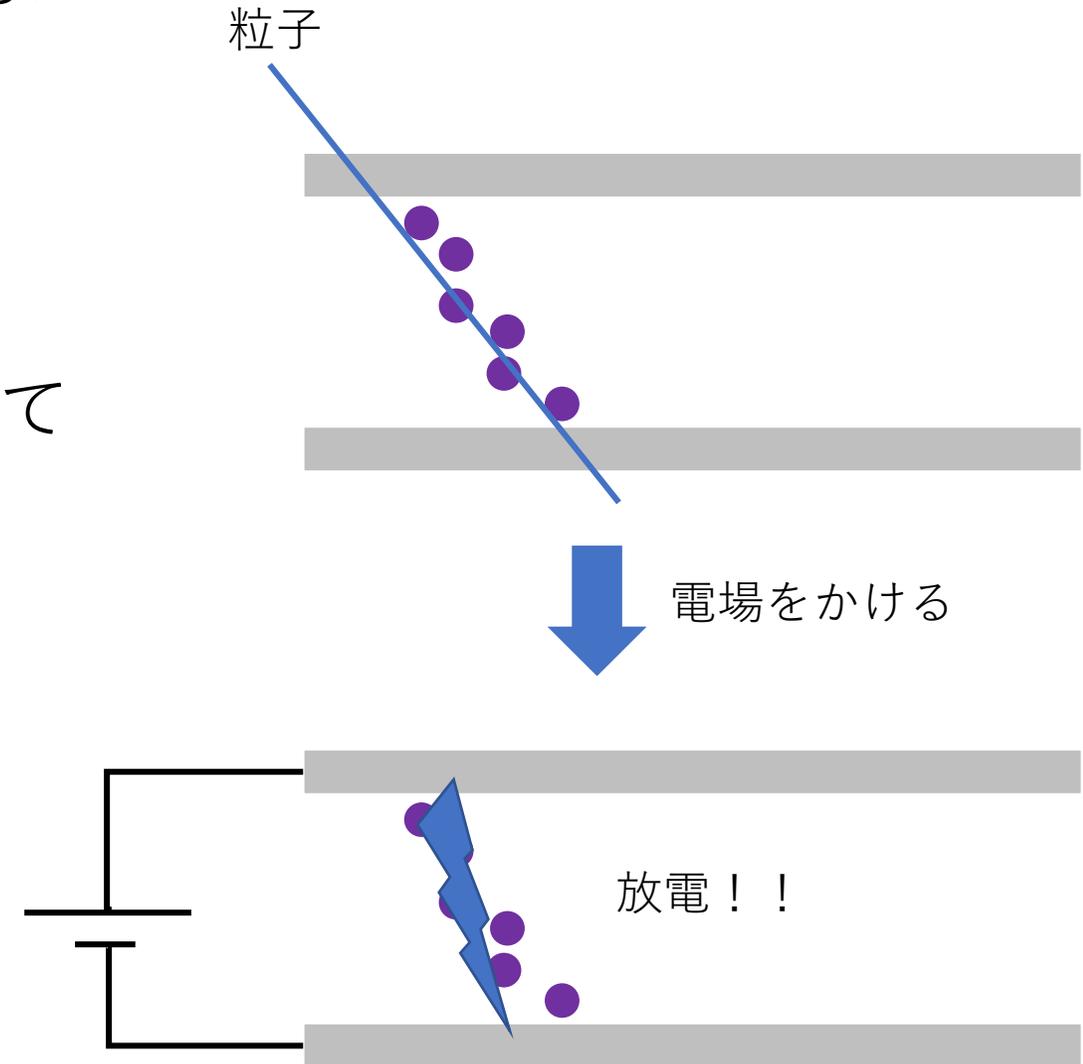


スパークチェンバーによる実験の ための回路設計とその動作試験

山中研究室 荒久田 周作

スパークチェンバーとは

- ガス検出器の一種
- 複数準備することで
極板間の粒子が通った場所で放電して
直接目で飛跡を見ることができる
- 放電する際にパルス型高電場が必要

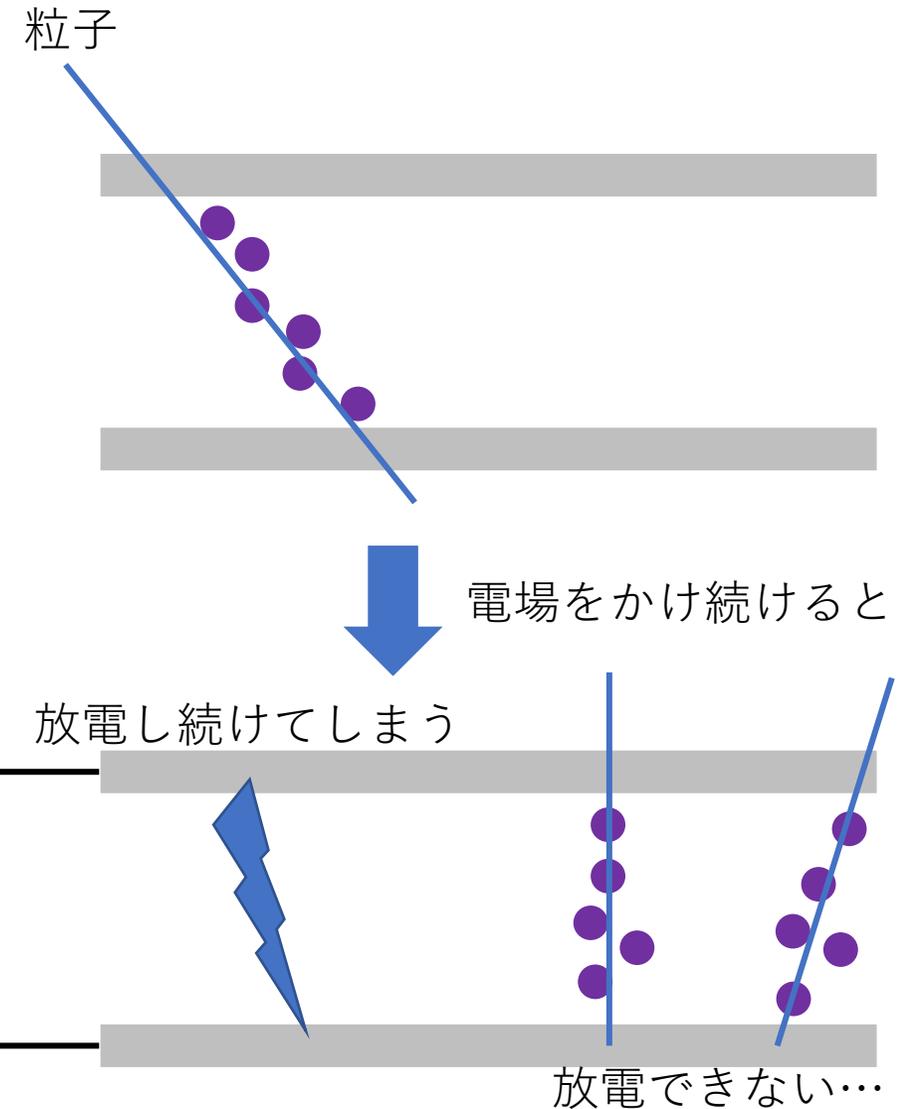


スパークチェンバーとは

- ガス検出器の一種
- 複数準備することで
極板間の粒子が通った場所で放電して
直接目で飛跡を見ることができる

• 放電する際にパルス型高電場が必要

↓
専用の回路が必要



回路の要請

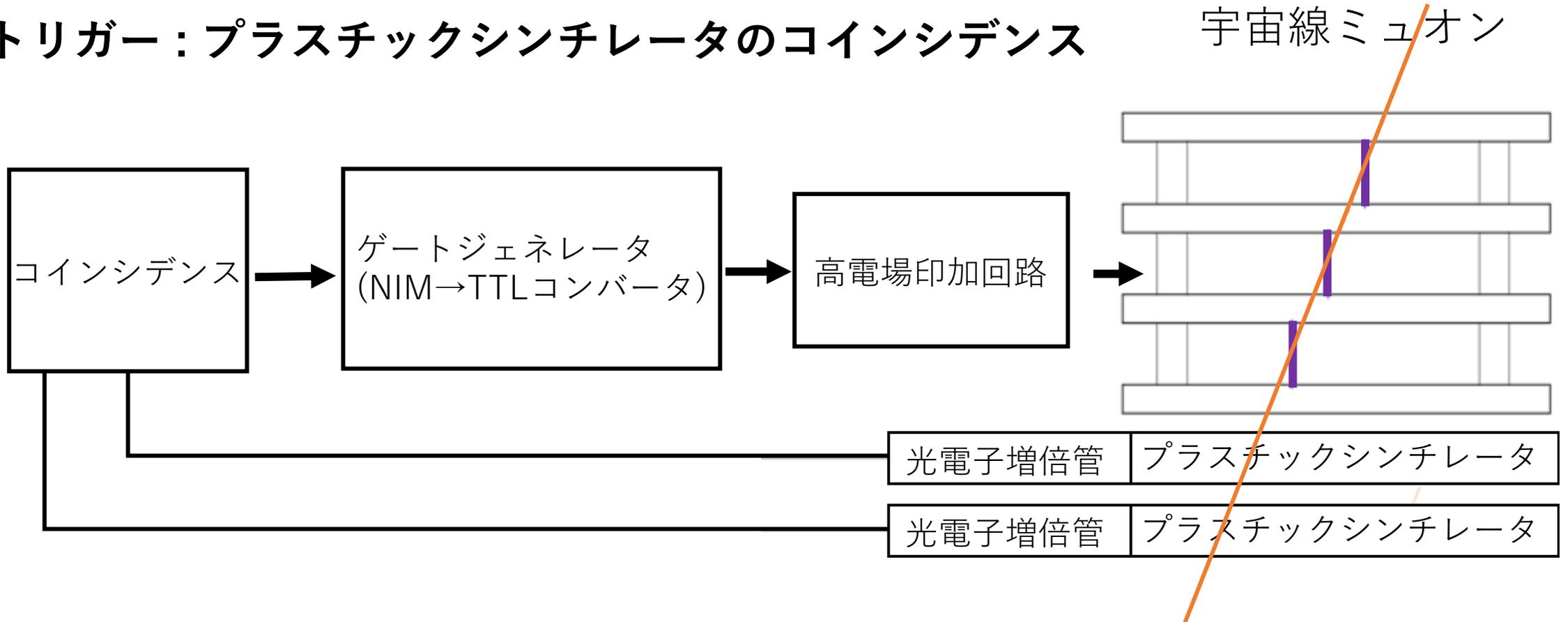
- 1.宇宙線ミュオンをトリガーできる
- 2.電場がかかるまでの時間 $< 1 \mu s$:
イオン化ガスの再結合時間 $\sim 1 \mu s$
- 3.最高電場 $> 3 \text{ kV/cm}$:
Heガスは $3 \sim 5 \text{ kV/cm}$ でよく放電
- 4.短い不感時間



上記を満たす回路の作成
回路にかける電圧（電場）の最適化

トリガー出力回路

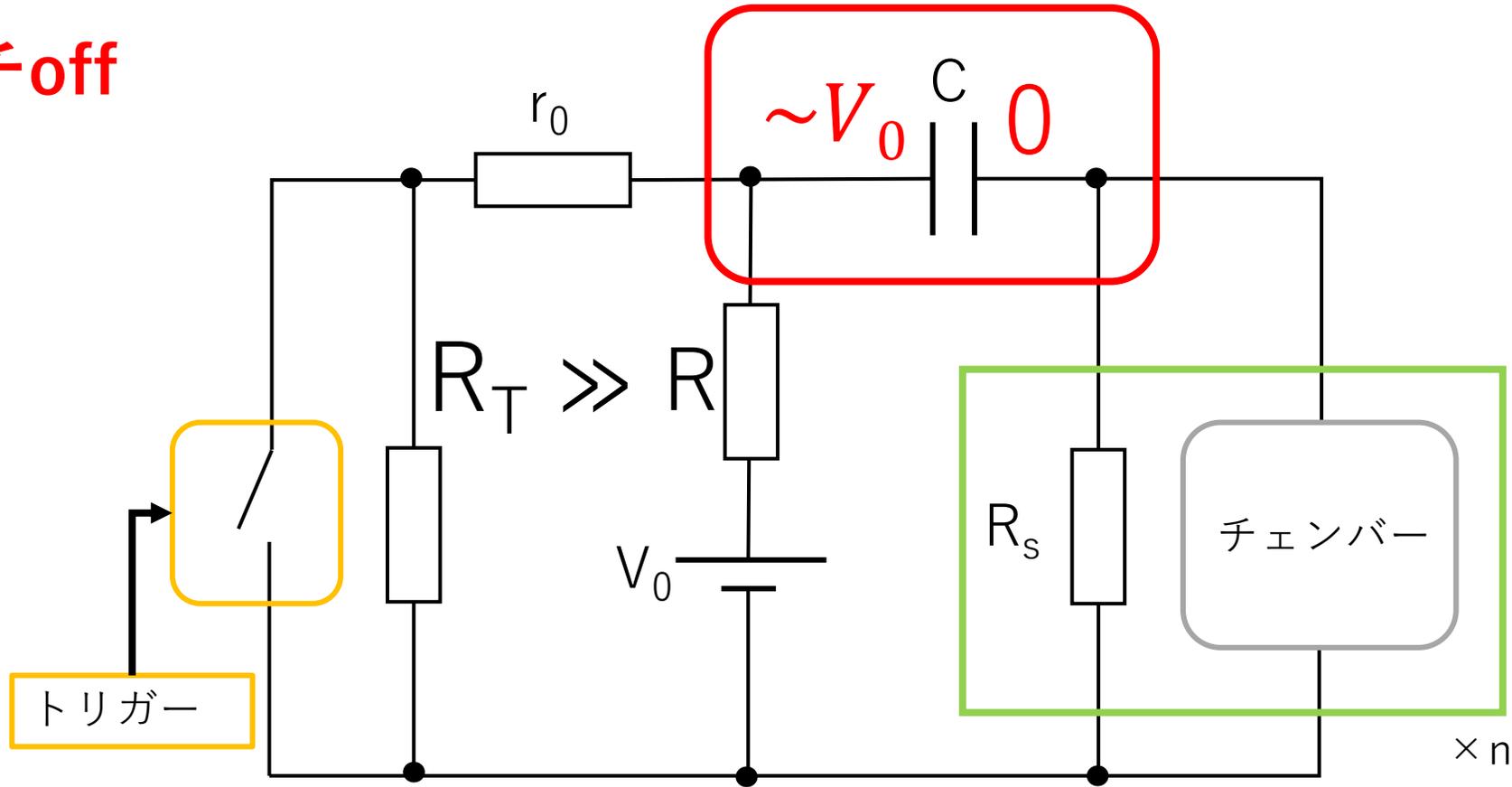
トリガー：プラスチックシンチレータのコインシデンス



高電場印加回路(1)

$$r_0 \ll R \ll R_T$$

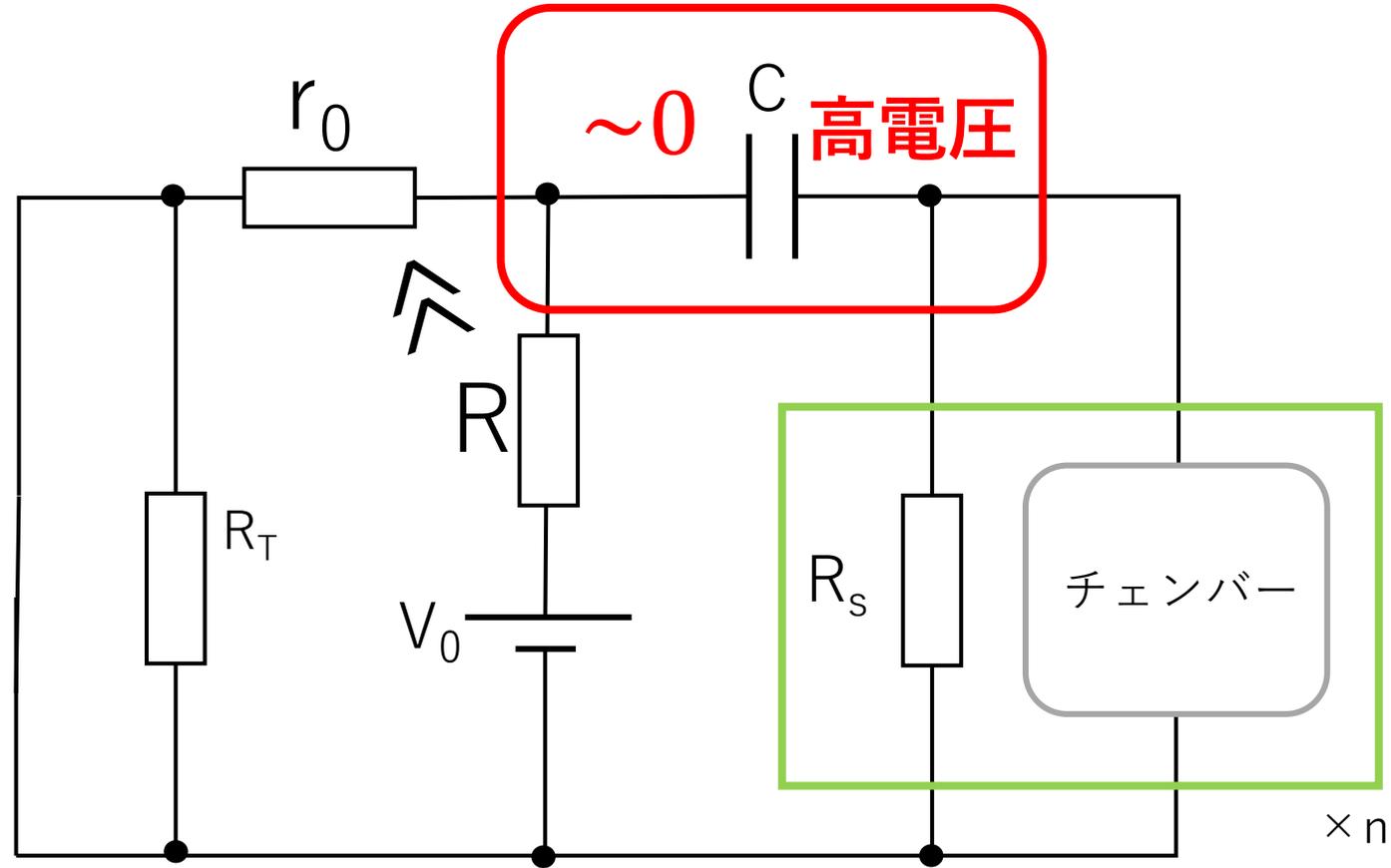
スイッチoff



高電場印加回路(2)

$$r_0 \ll R \ll R_T$$

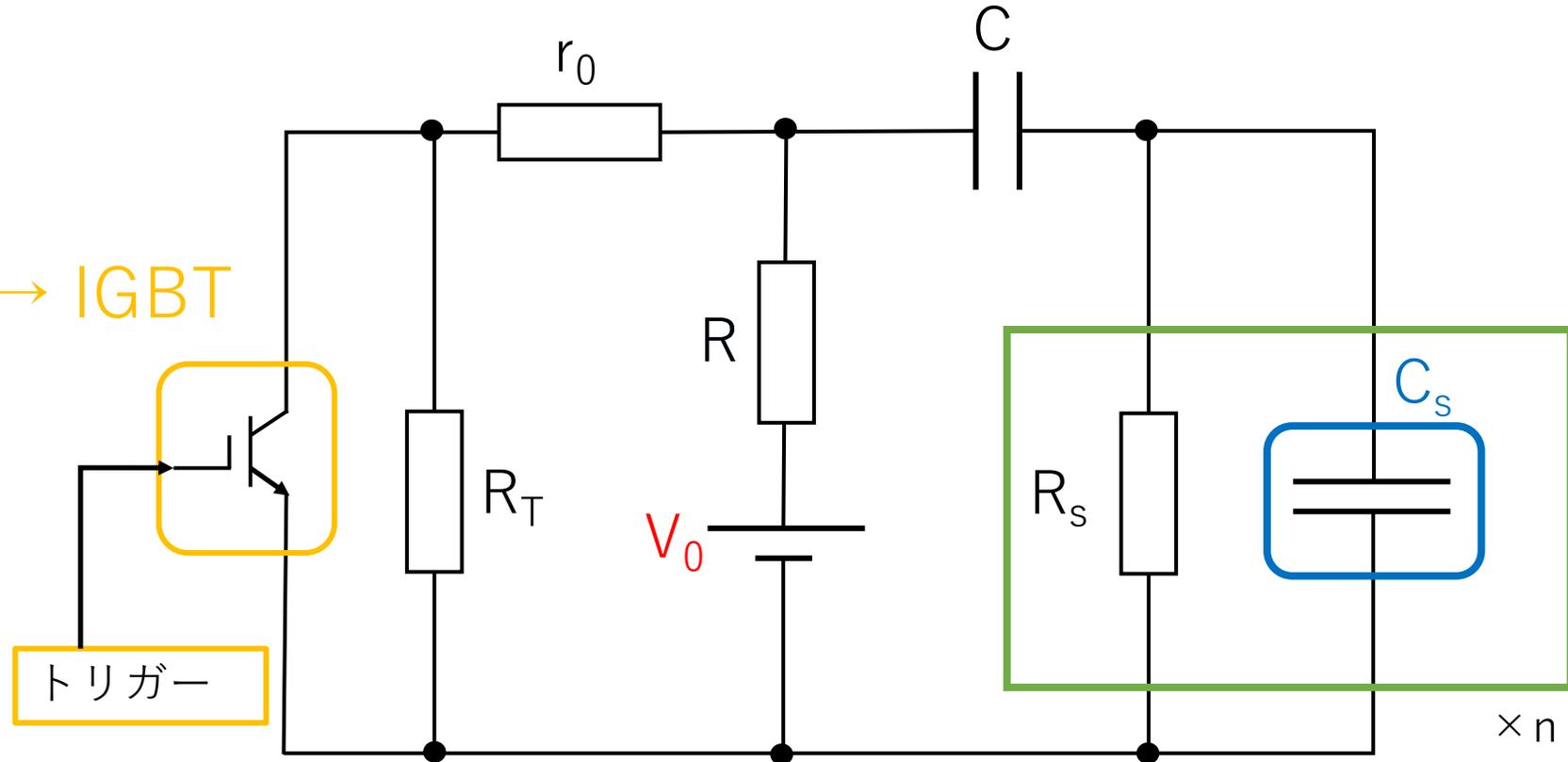
スイッチon



高電場印加回路(3)

IGBT
トランジスタの一種
耐圧：4.5kV
スイッチ速度
立ち上がり：~300ns

スイッチ → IGBT



チェンバー → コンデンサー

回路の方程式

$$V_0 - V_1 = R(I_0 - I_1)$$

$$V_1 = r_0 I_0$$

$$V_2 = -R_s \left(\frac{I_1}{n} - I_2 \right)$$

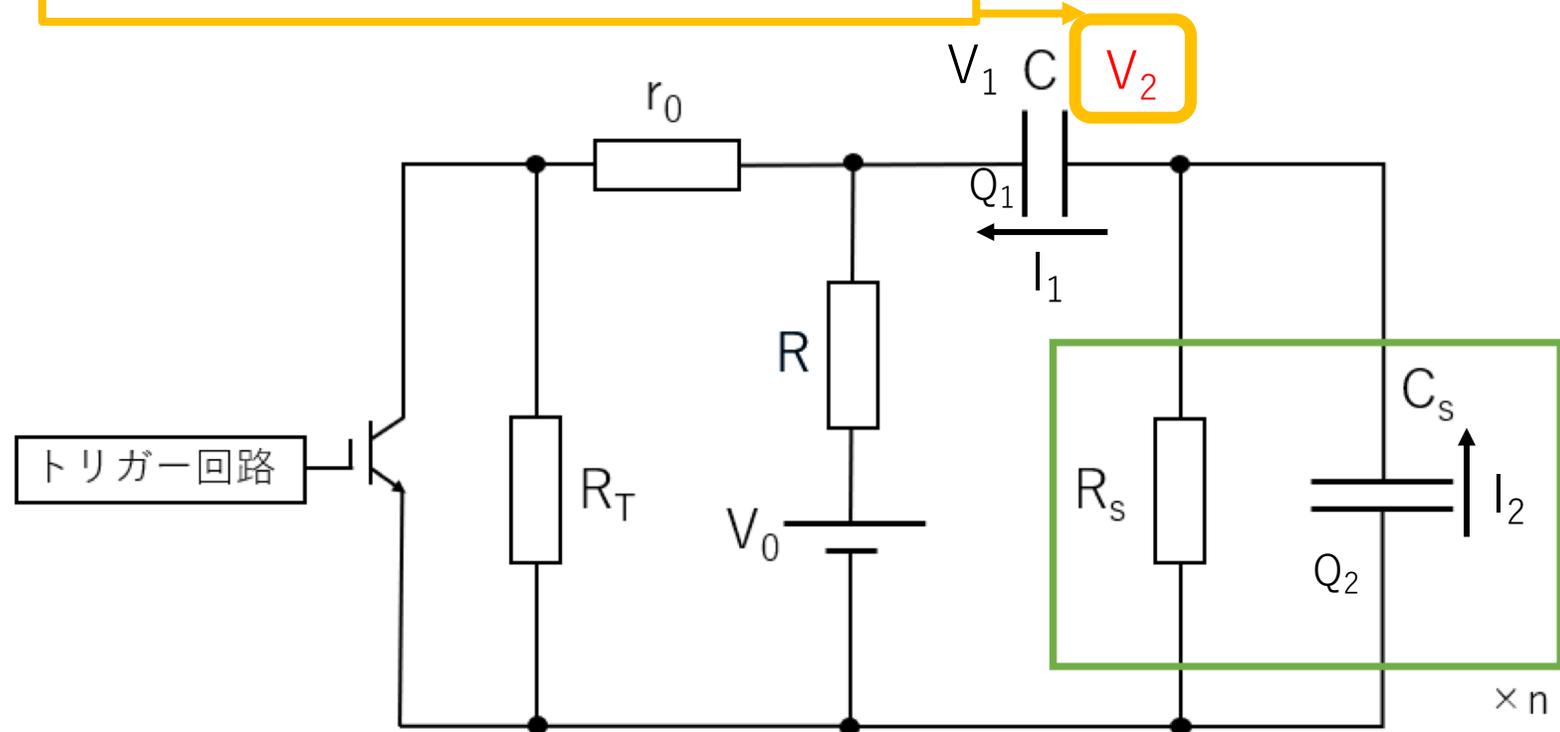
$$Q_1 = C(V_1 - V_2)$$

$$Q_2 = C_s V_2$$

$$\frac{dQ_1}{dt} = -I_1$$

$$\frac{dQ_2}{dt} = -I_2$$

放電時の電場やその時間に関係

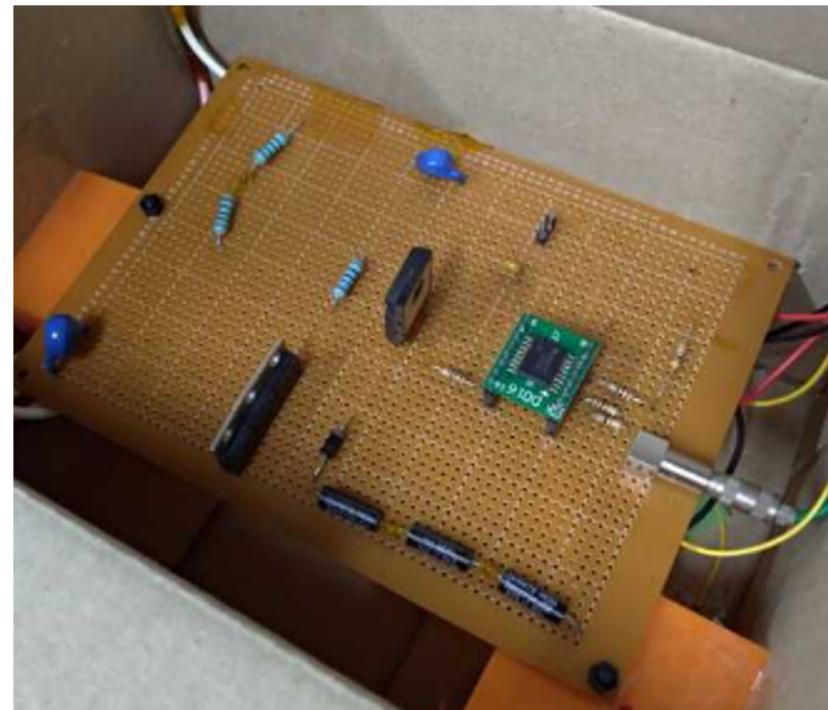
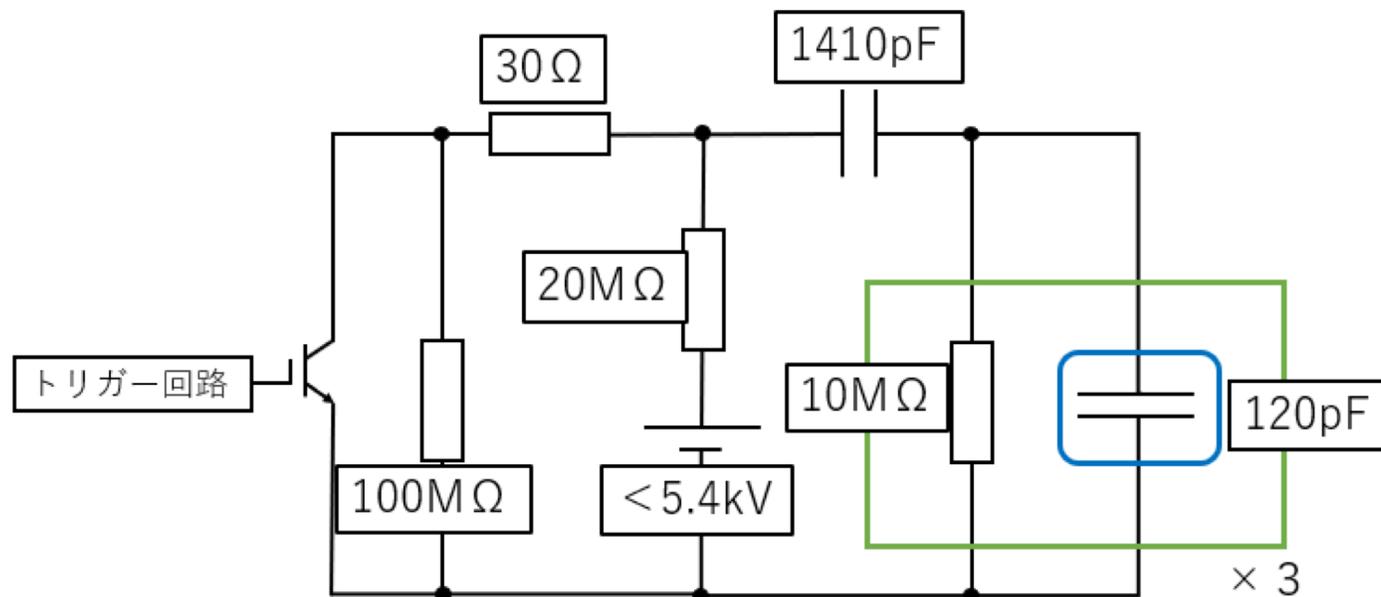


ラプラス変換を用いると解ける！

$$V_2(t) = - \left[\left(\frac{1}{n} + \frac{C_s}{C} + \frac{Rr_0C_s}{R+r_0} \alpha \right) \frac{\alpha + \gamma}{\alpha - \beta} e^{\alpha t} - \left(\frac{1}{n} + \frac{C_s}{C} + \frac{Rr_0C_s}{R+r_0} \beta \right) \frac{\beta + \gamma}{\alpha - \beta} e^{\beta t} \right] \frac{R_I R_s}{(R + R_0) r_0} V_0$$

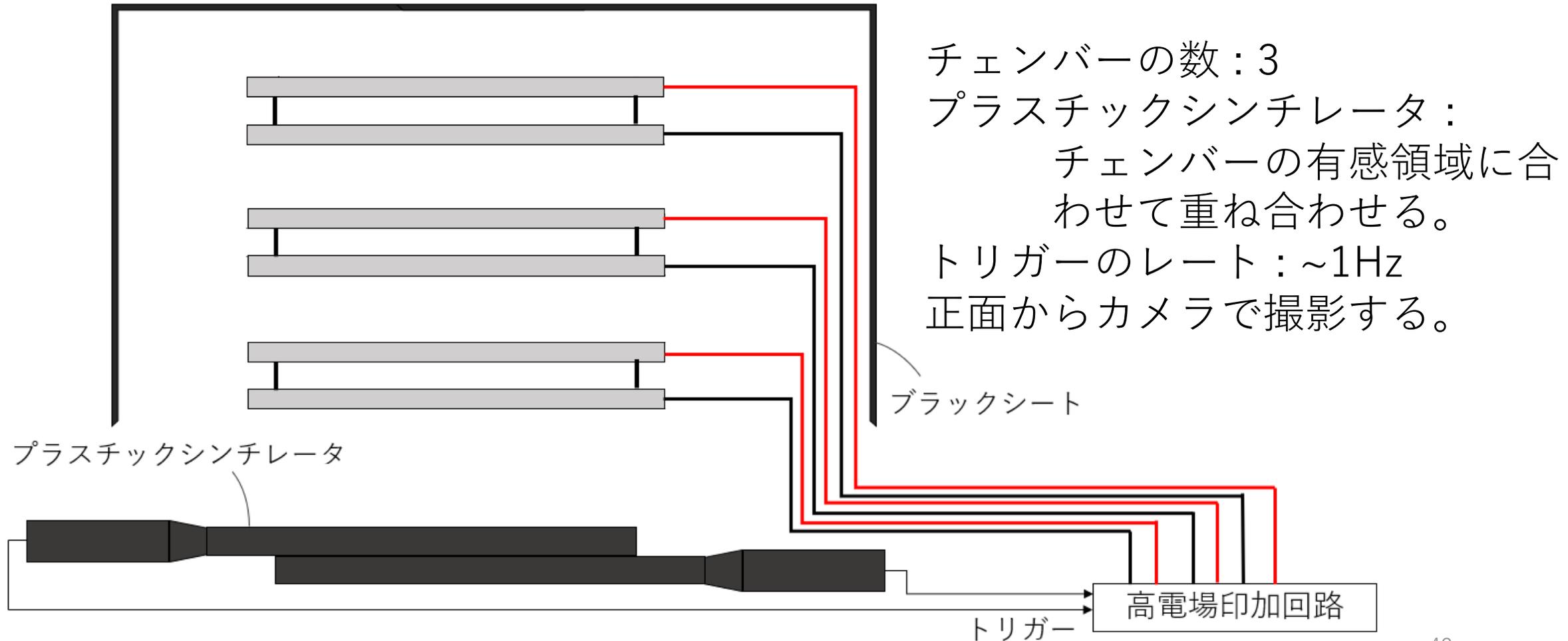
回路の具体的な値

パラメータのスキャンを行い、値を決定



電場がかかるまでの時間 $\sim 100\text{ns} \ll 1\mu\text{s}$ (ガスの再結合時間)
放電と充電にかかる総時間 $< 200\text{ms}$

放電を見るための配置



放電の様子

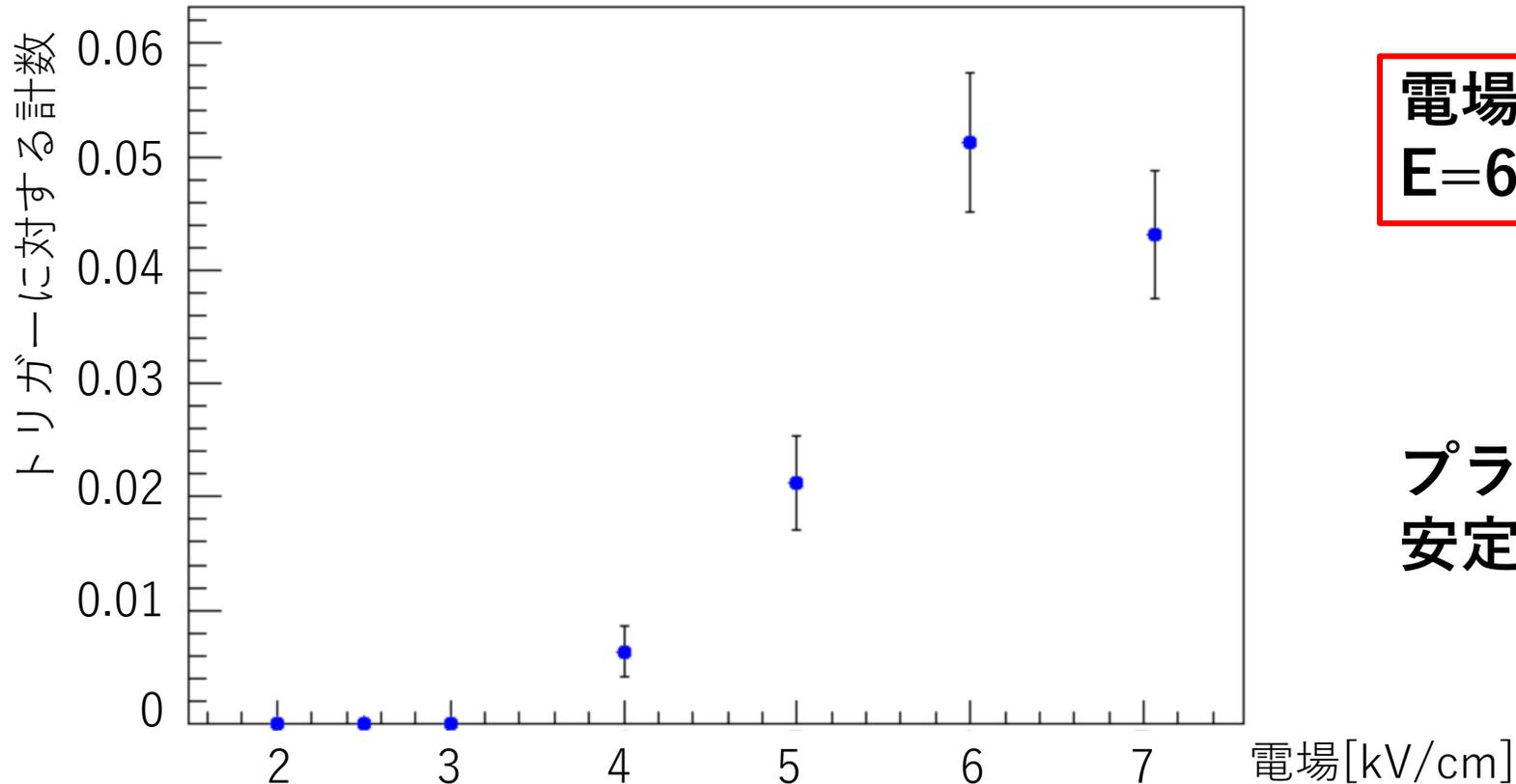


宇宙線ミュオンとみられる飛跡が観測できた！

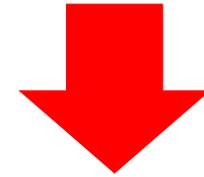
放電回数 of 電場依存

小野君の画像解析法を利用

3層で同時に放電する



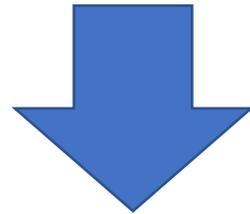
電場大 → 観測数増
E=6kV/cm付近でプラトー？



プラトーだとするなら、
安定しているはずの7kV/cmを採用

結論

- 放電の要件を満たす回路の設計と開発を行った。
- 最適な電圧は $E > 6\text{kV/cm}$ となる領域
- 実際に宇宙線ミュオンと思われる放電を確認できた。



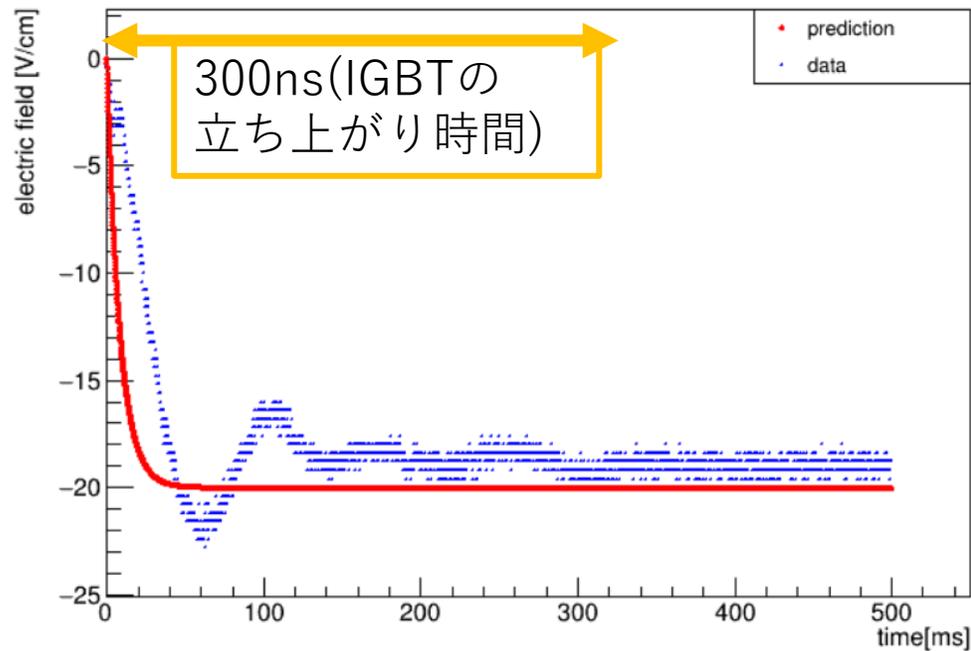
宇宙線ミュオンの測定実験を行う準備ができた！

Back Up

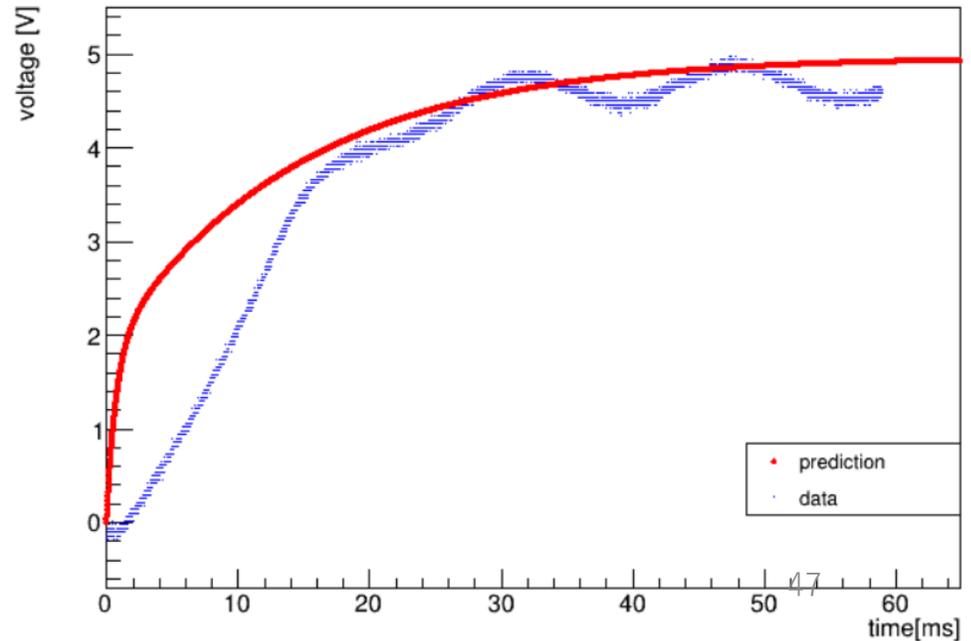
低電圧でのテスト

高電圧をかけるとオシロスコープが壊れる！
→低電圧で挙動を確かめる。

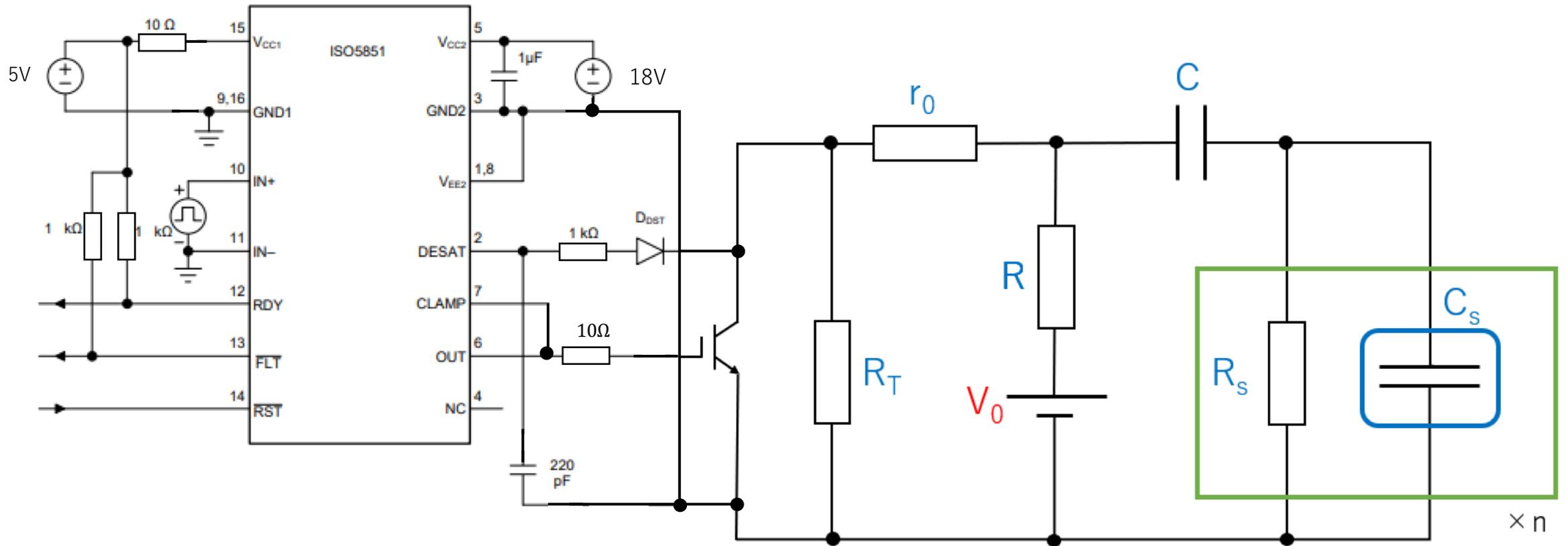
チェンバーにかかる電場



充電の様子



トリガー回路



トリガーとの時間関係

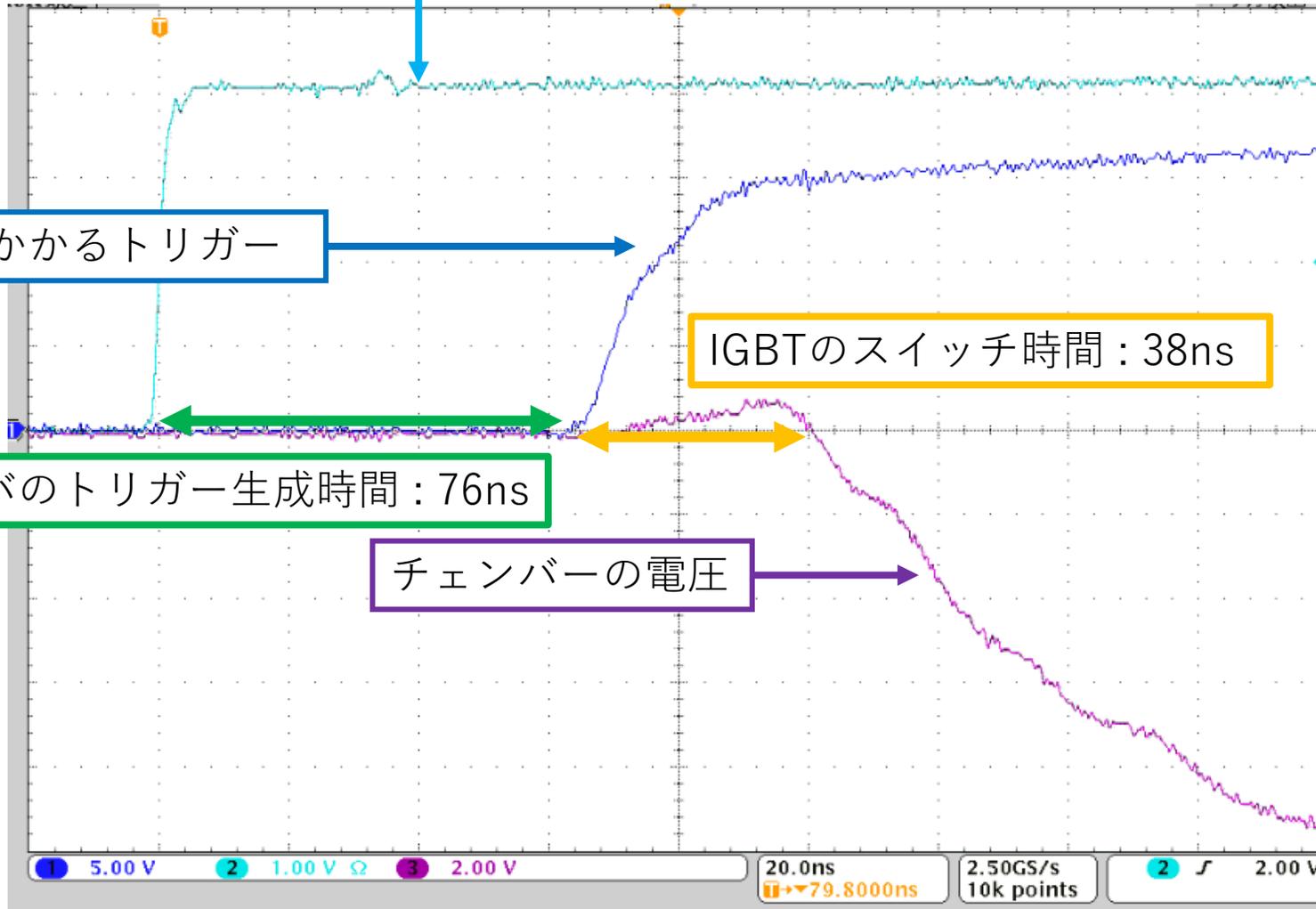
トリガー回路からやってくる信号

IGBTにかかるトリガー

IGBTのスイッチ時間 : 38ns

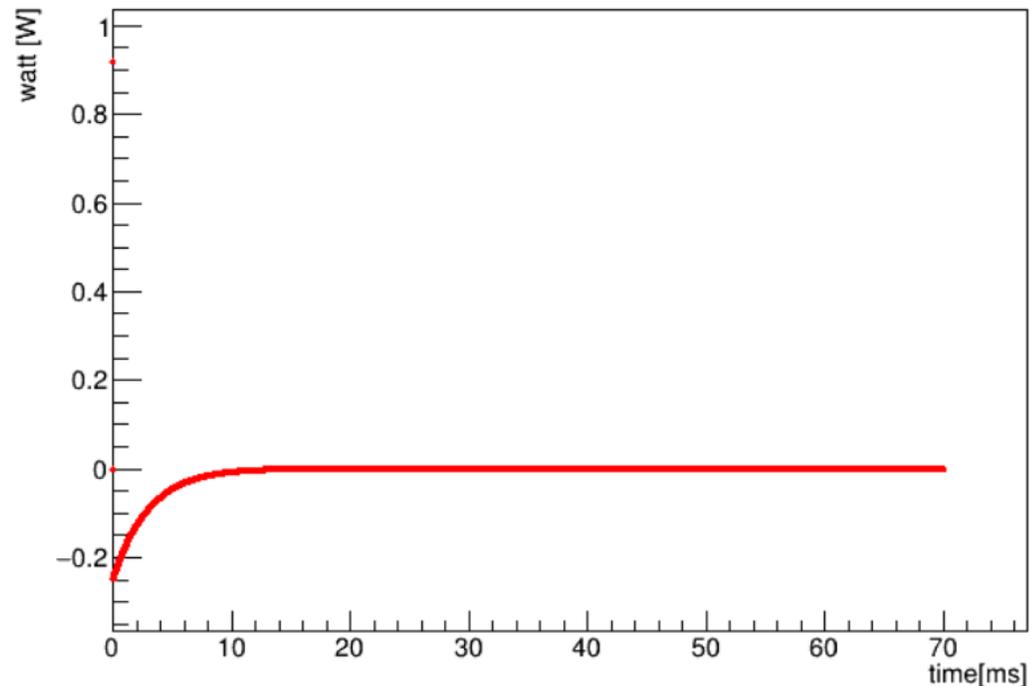
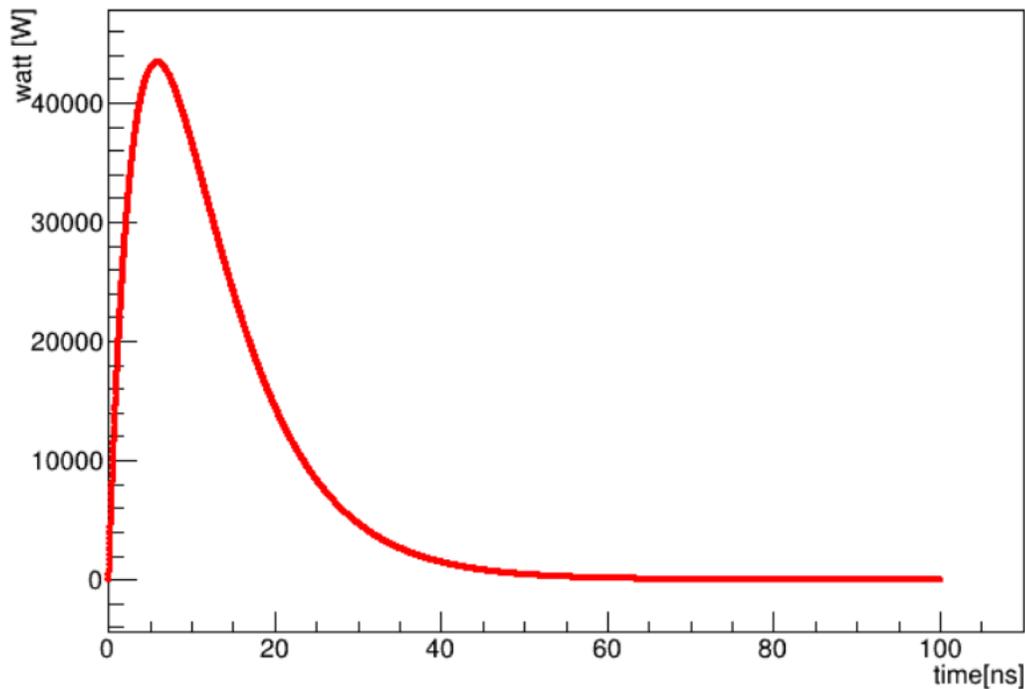
ゲートドライバのトリガー生成時間 : 76ns

チェンバーの電圧



発生する電気エネルギー

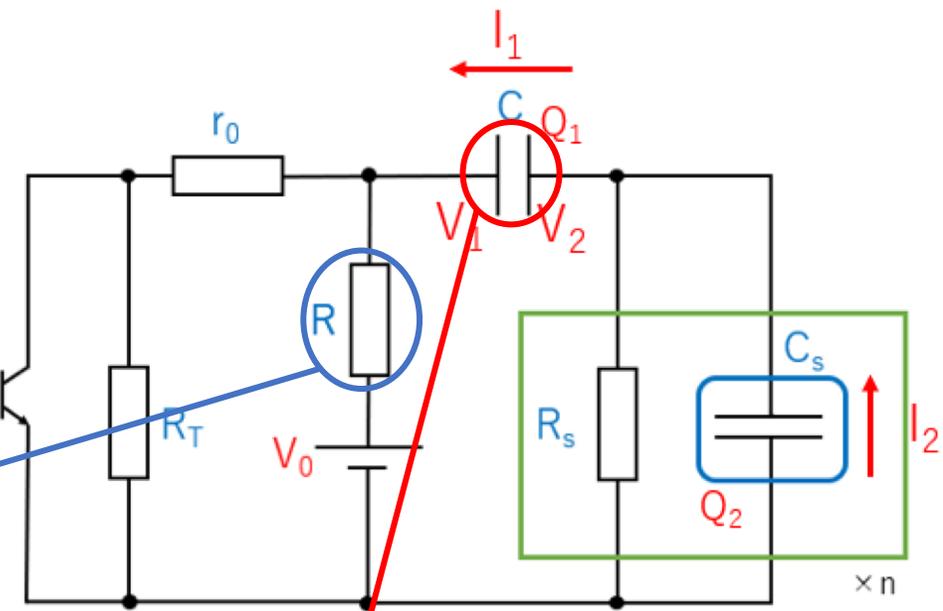
- コンデンサの消費エネルギー : $1.45e-3$ [J]
 - セラミックコンデンサの比熱 ~ 0.5
 - コンデンサの質量 ~ 1 g
- } コンデンサで上昇する
温度 : $2.9e-3$ [K]



パラメータのスキャン

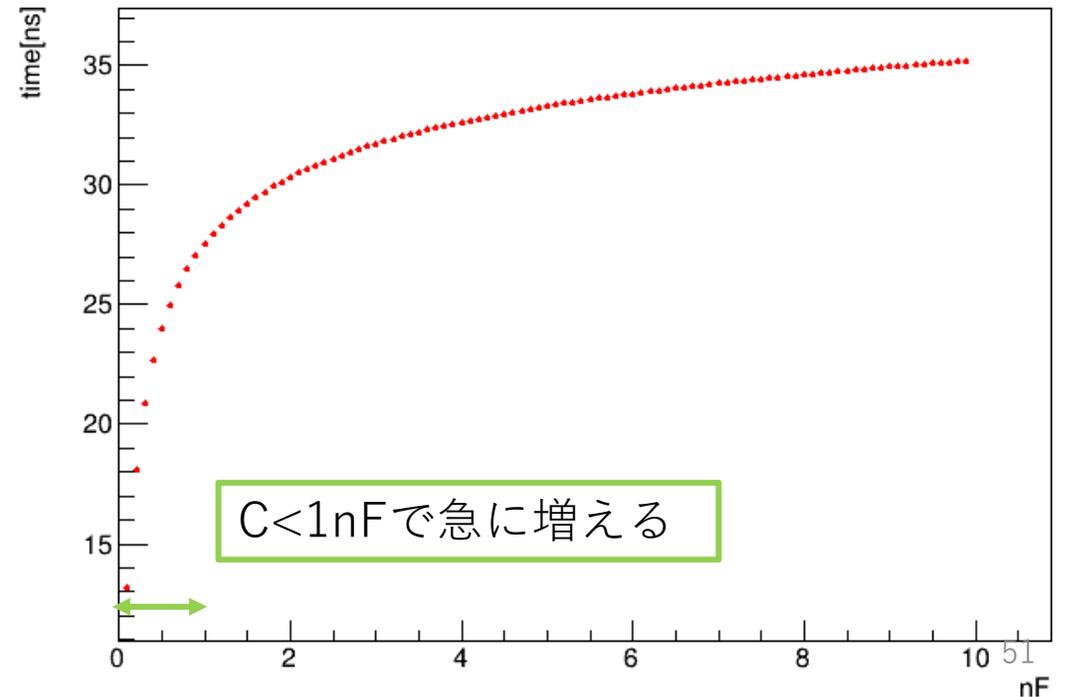
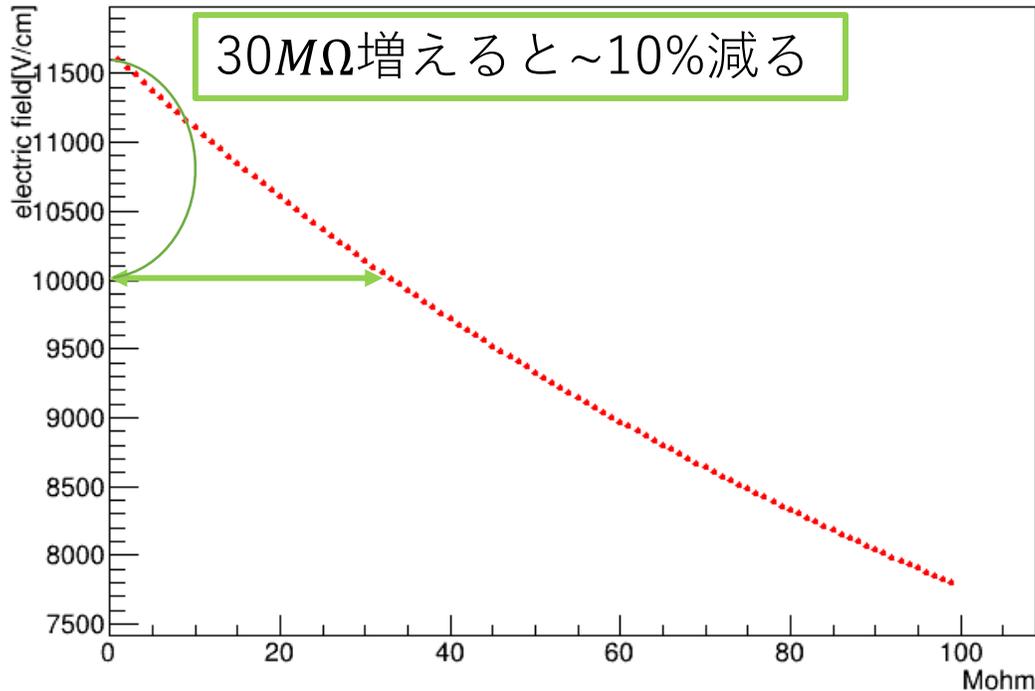
部品の値に V_1, V_2 が依存→スキャン

トリガー回路



最大電場

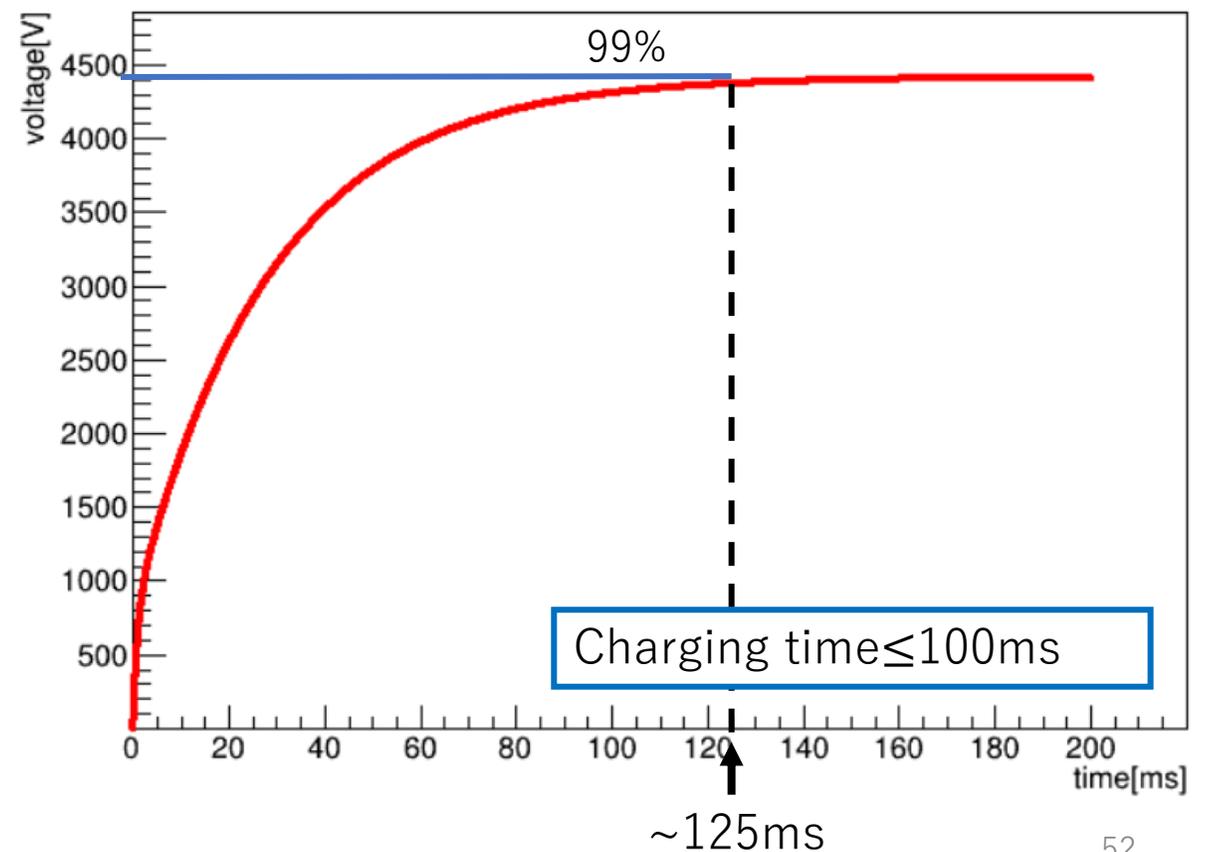
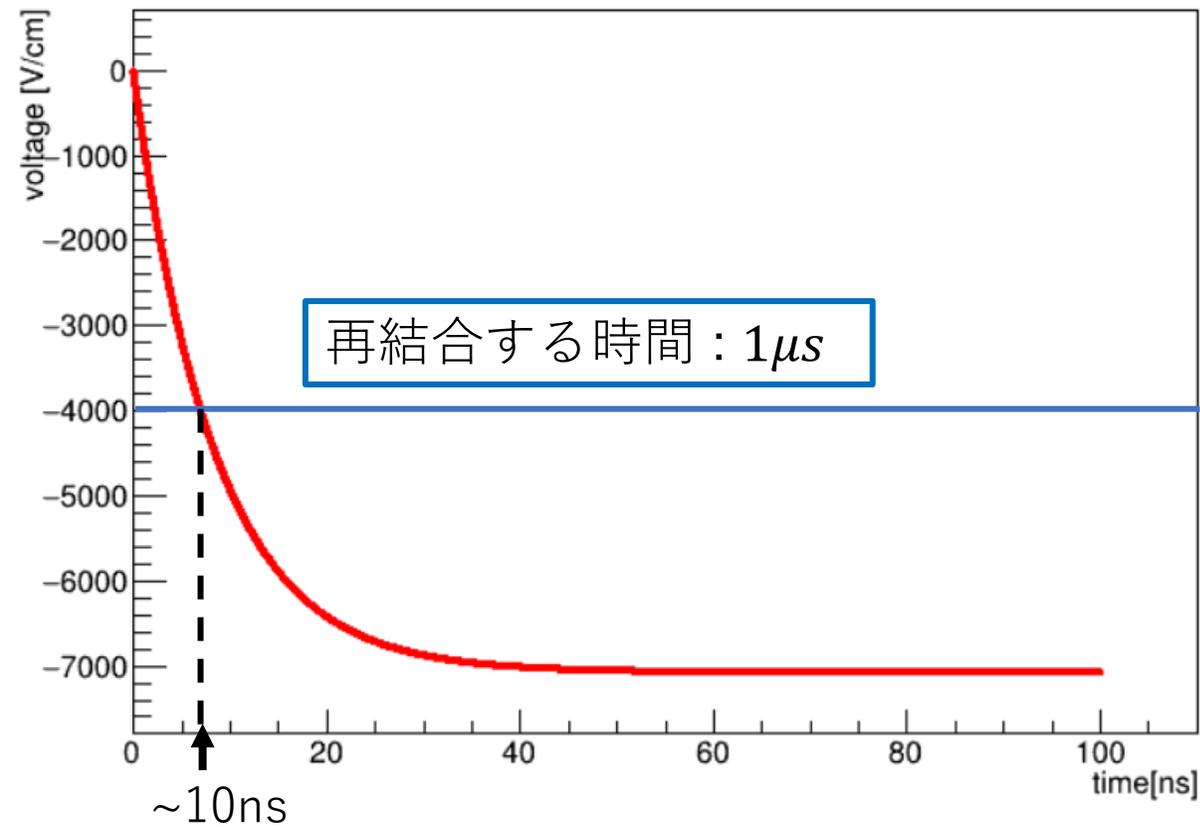
最大電場に至るまでの時間



放電と充電の様子計算

チェンバーにかかる電場（放電時）

コンデンサにかかる電圧（充電時）



極板にたどり着くまでの時間

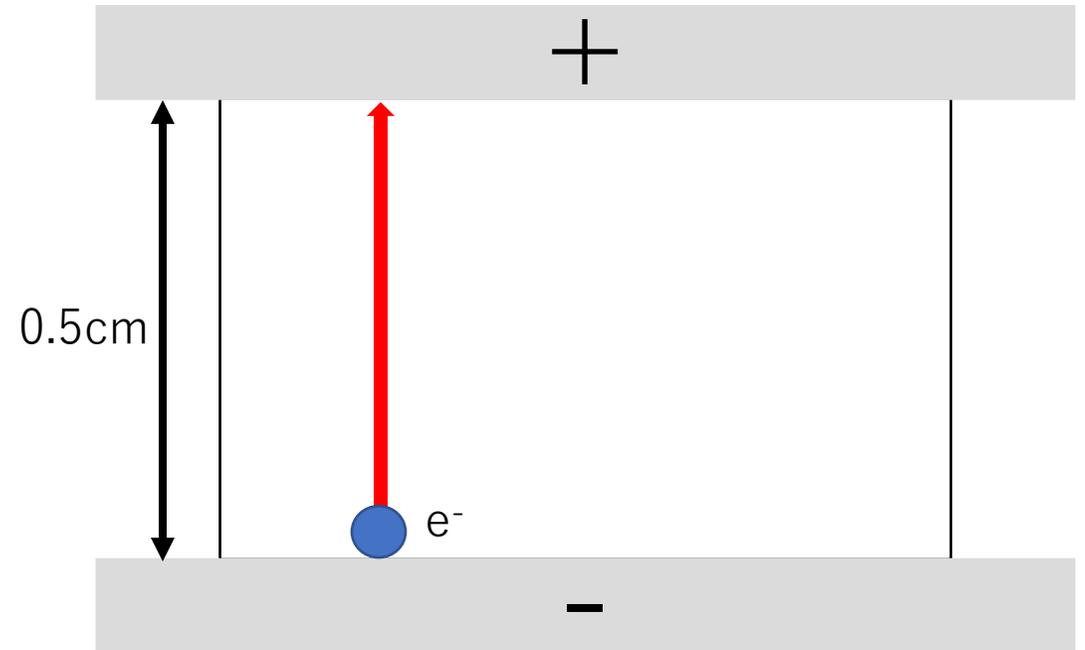
3kV/cm が印加されると、
t=t'のときの電子の速度は

$$v = \int_0^{t'} \frac{eE}{m} dt = \frac{eE}{m} t'$$

t=0~t''のときに通った距離は

$$l = \int_0^{t''} \frac{eE}{m} t' dt' = \frac{eEt^2}{2m}$$

今回 l=0.5cmなのでt''<50ns



IGBT

IXYH30N450HV

耐圧：4.5kV

定格最大電流：60A

パルス型最大電流：200A

最大消費電力：430W

スイッチにかかる時間：on 300ns
off 1300ns



高電圧電源

出力 : 50V~6kV
最大電流: 10~300 μ s
 $\rightarrow r_0 \geq 30\Omega, R \geq 20M\Omega$

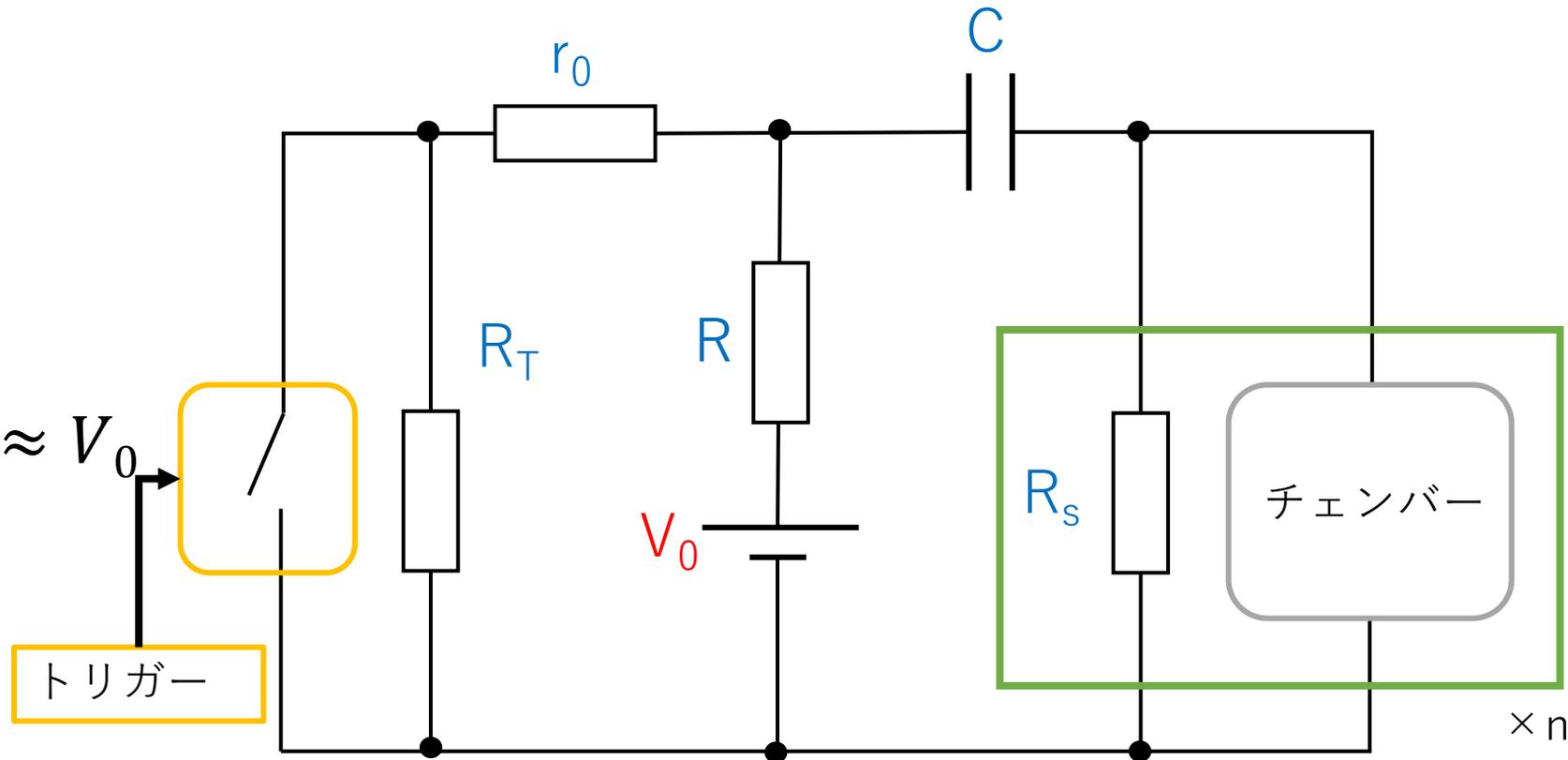


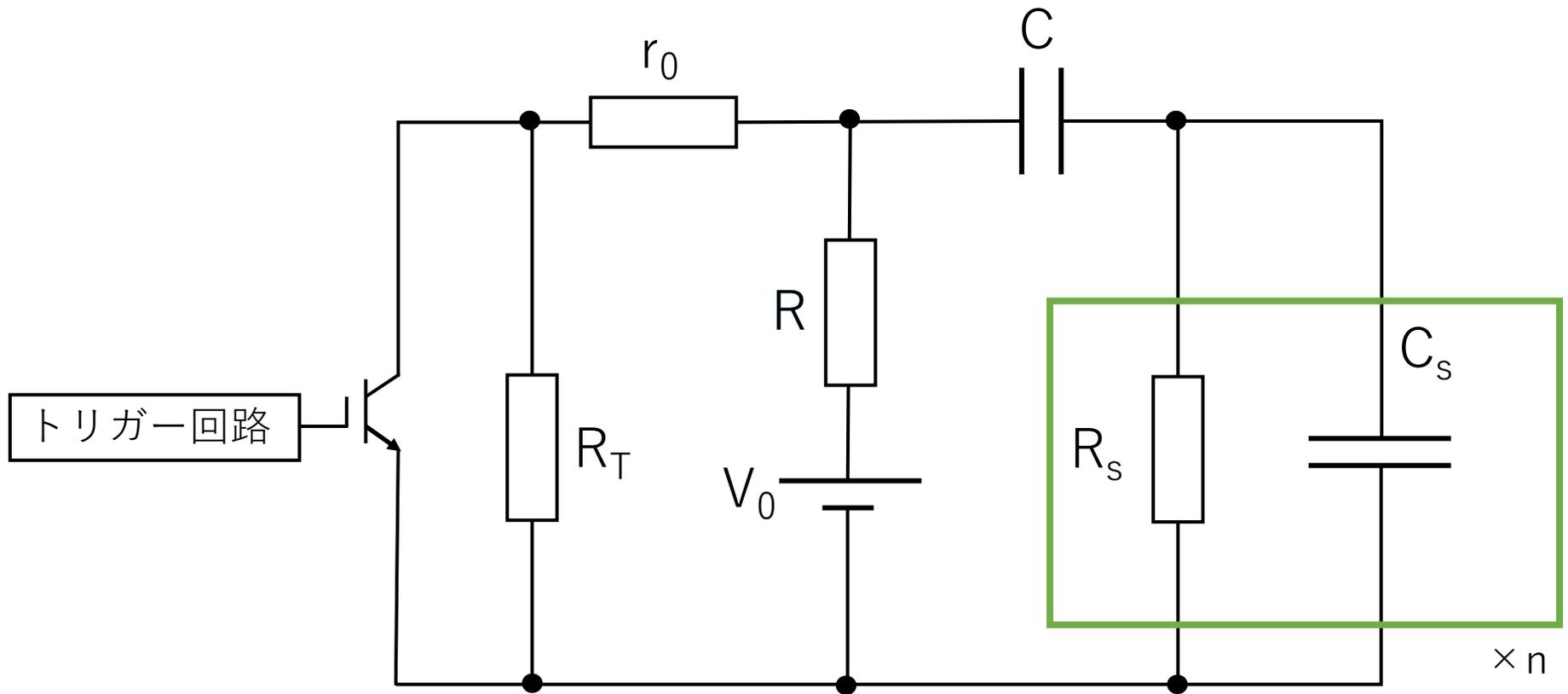
$$r_0 \ll R \ll R_T$$

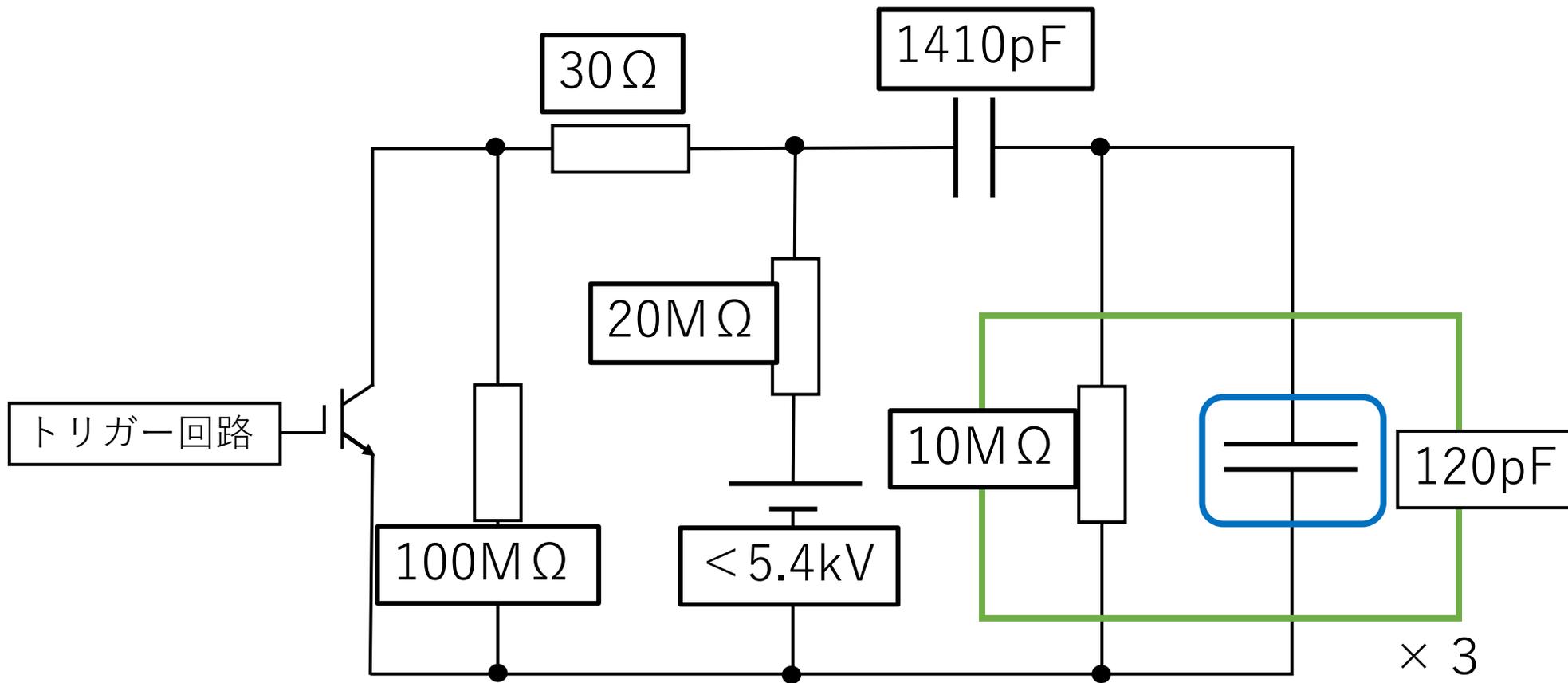
Cにかかる電圧

スイッチ off : $\frac{R_T}{R+R_T+r_0} V_0 \approx V_0$

スイッチ on : $\frac{r_0}{R+r_0} V_0 \approx 0$







スパークチェンバーの 性能評価と実験の解析

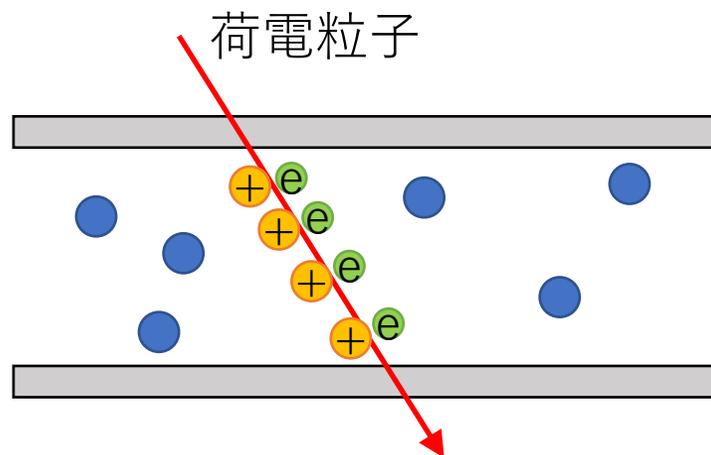
山中研究室 藤田侑葵子

スパークチェンバーとは

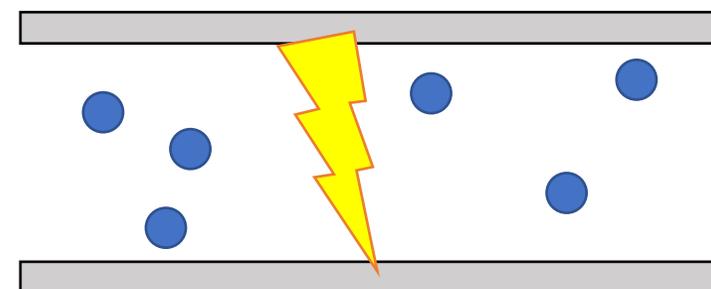
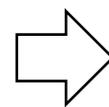
ガス検出器の一種
粒子の飛跡を直接目でとらえられる



➡ 宇宙線ミュオンの天頂角分布を調べることができる



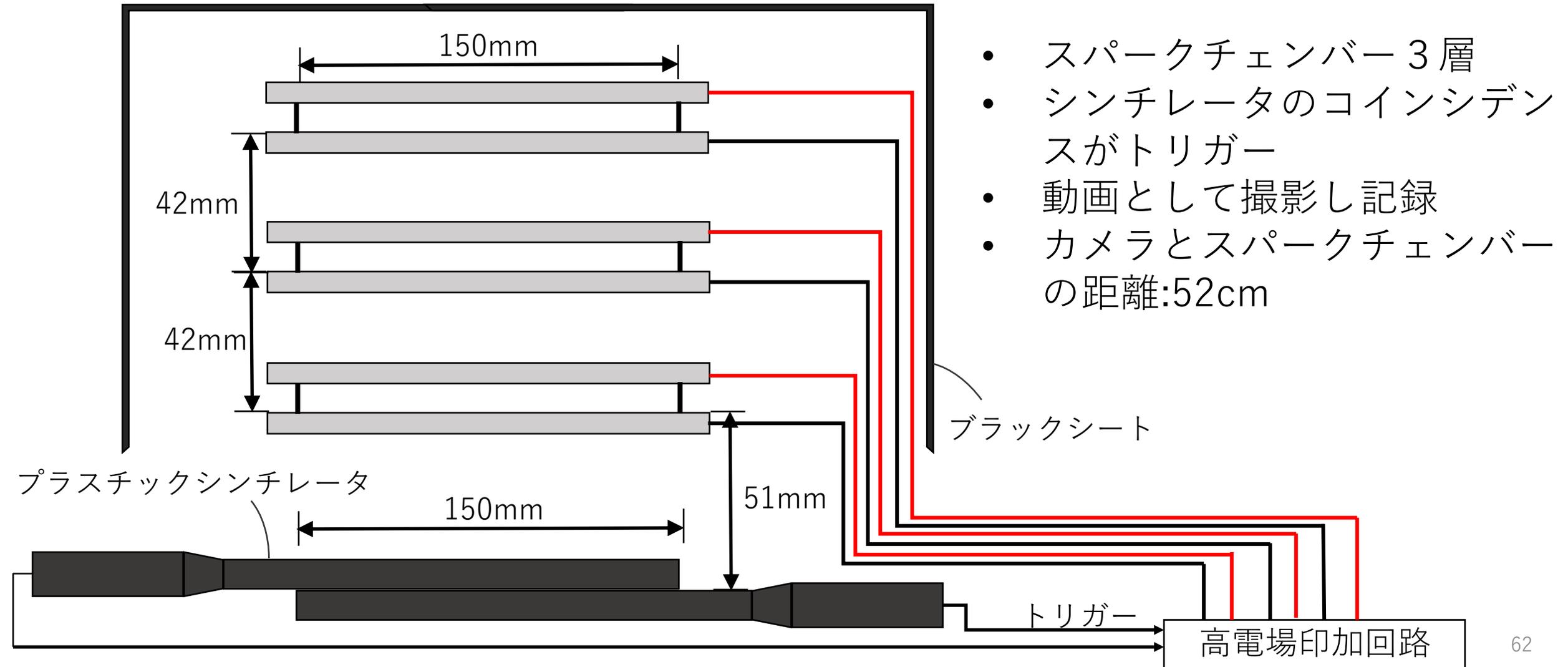
高電圧印加



目的

- 作成したスパークチェンバーの性能評価
位置分解能
検出効率
- 宇宙線ミューオンの天頂角分布測定

実験のセットアップ



位置分解能

$$\sigma_{\Delta x_2} = \sqrt{\sigma_2'^2 + \sigma^2} \quad \leftarrow \text{求めたい}$$

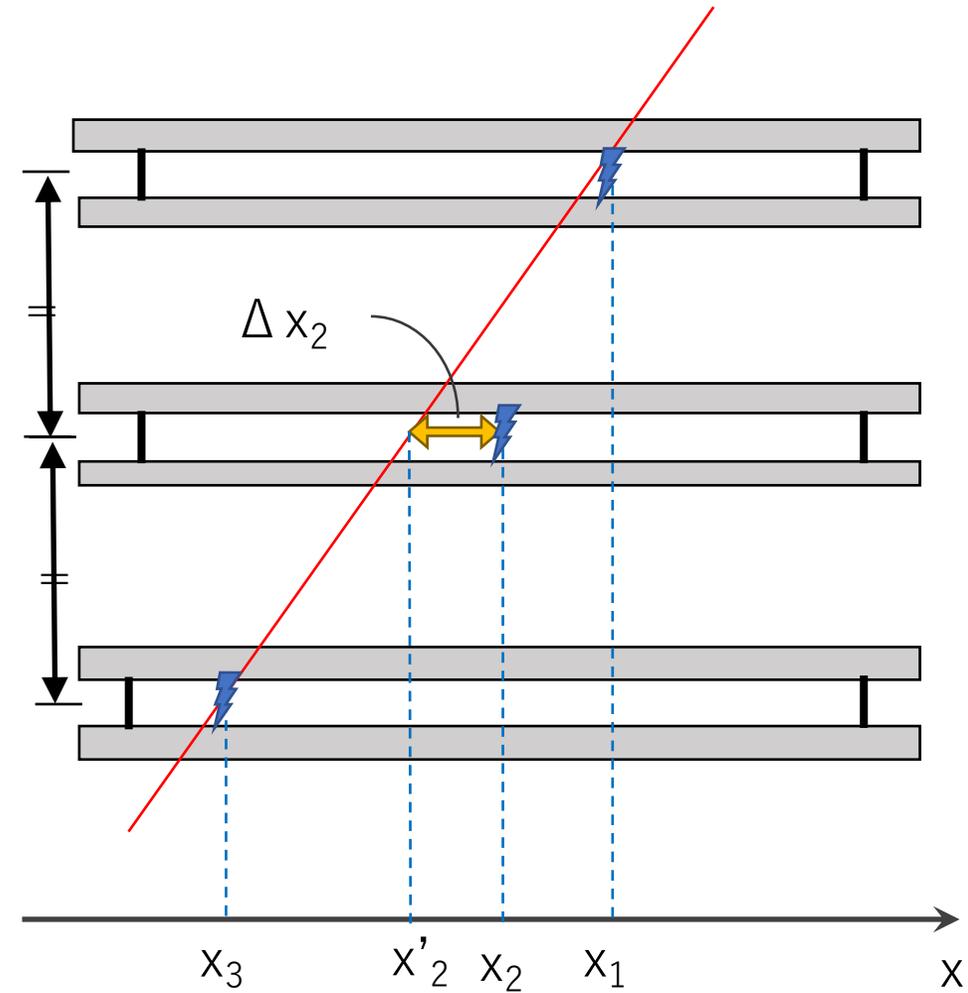
σ : チェンバー自身の位置分解能

$\sigma_2'^2$: x_2' のばらつき

各層で σ が同じ値だとすると、 $\sigma_2'^2$ は

$$x_2' = \frac{x_1 + x_3}{2} \Rightarrow \sigma_2'^2 = \frac{\sigma^2}{2}$$

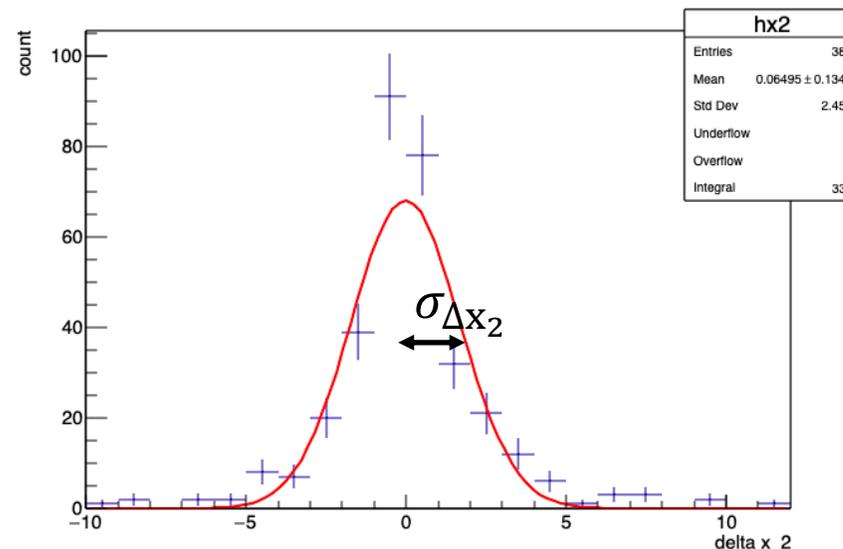
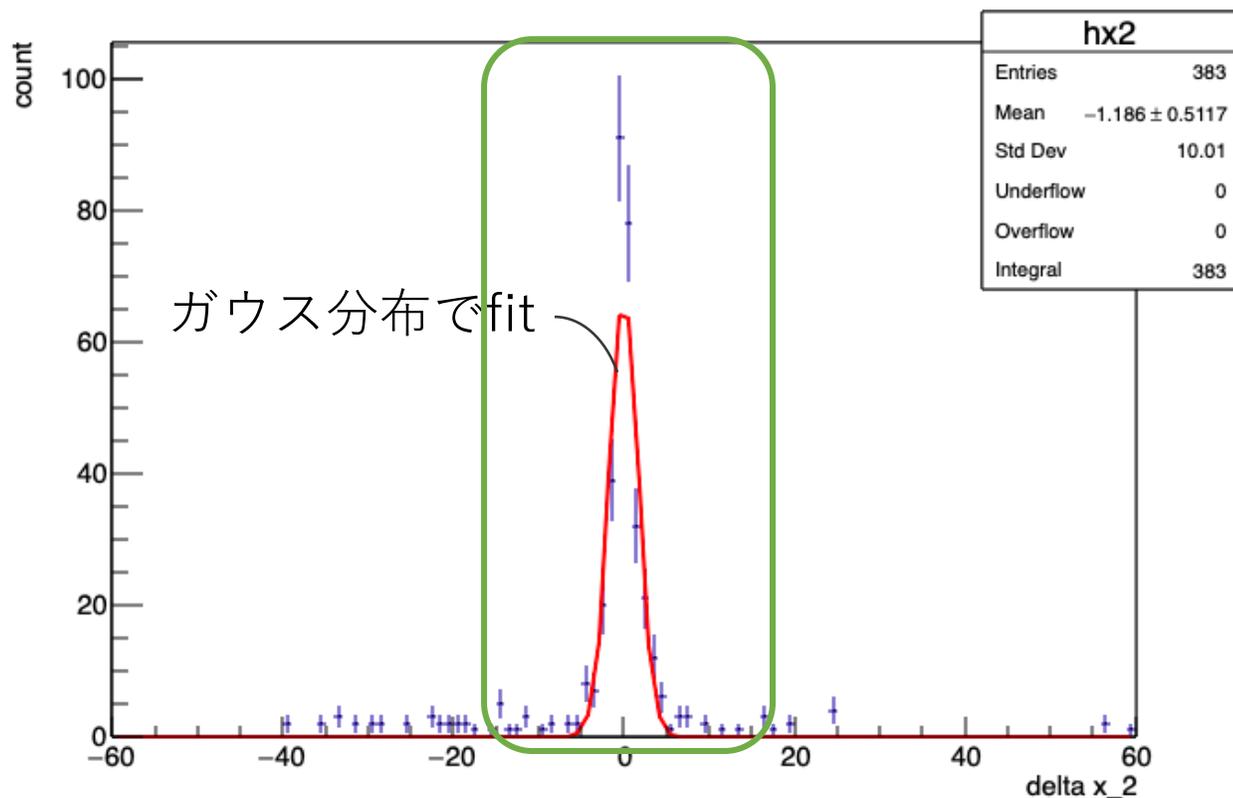
$$\sigma_{\Delta x_2} = \sqrt{\frac{\sigma^2}{2} + \sigma^2} = \sqrt{\frac{3}{2}} \sigma \quad \therefore \sigma = \sqrt{\frac{2}{3}} \sigma_{\Delta x_2}$$



位置分解能

拡大

Δx_2 の分布



$$\sigma = 1.39 \pm 0.11 \text{ (mm)}$$

meanは0から2.3 σ 離れている
左に偏るようなバイアスがかかってしまっている

検出効率

x_0 がシンチレータの領域に入った事象使う
チェンバー1層の検出効率 ε

$$\varepsilon = \frac{N_{three}}{N_{two}}$$

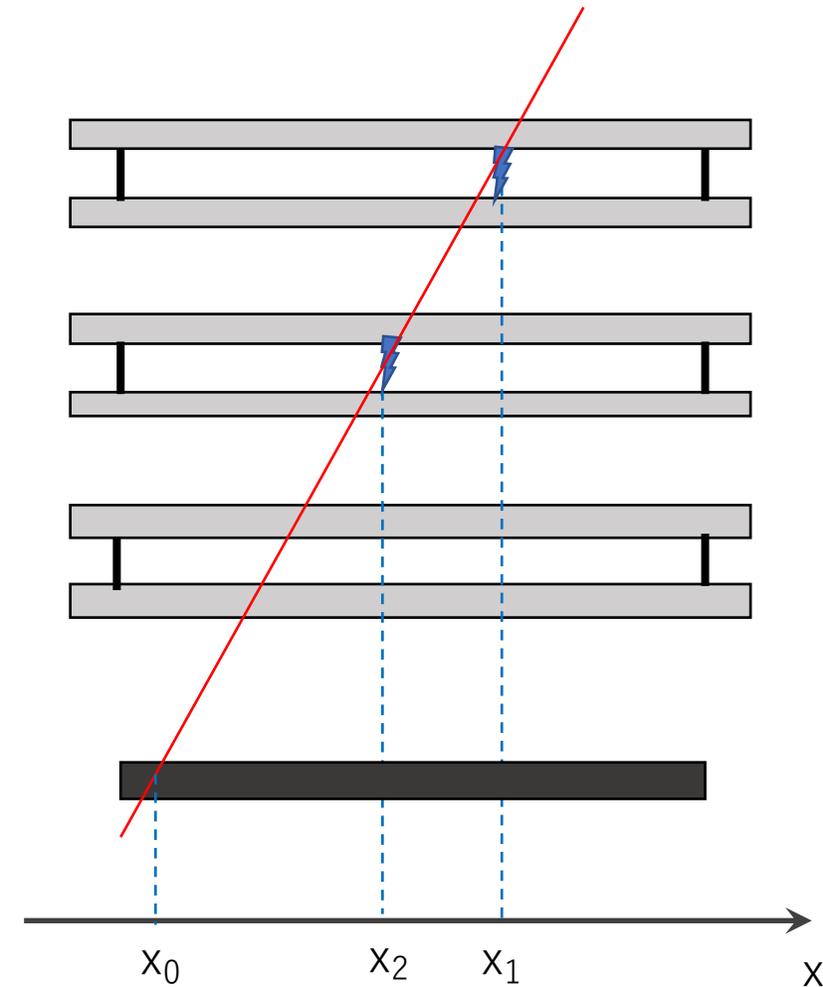
N_{two} : 2層が光った事象数

N_{three} : 3層が光った事象数

下のチェンバーについて計算すると

$$\varepsilon = 0.723 \pm 0.10$$

3層で0.378



ミューオンの天頂角分布

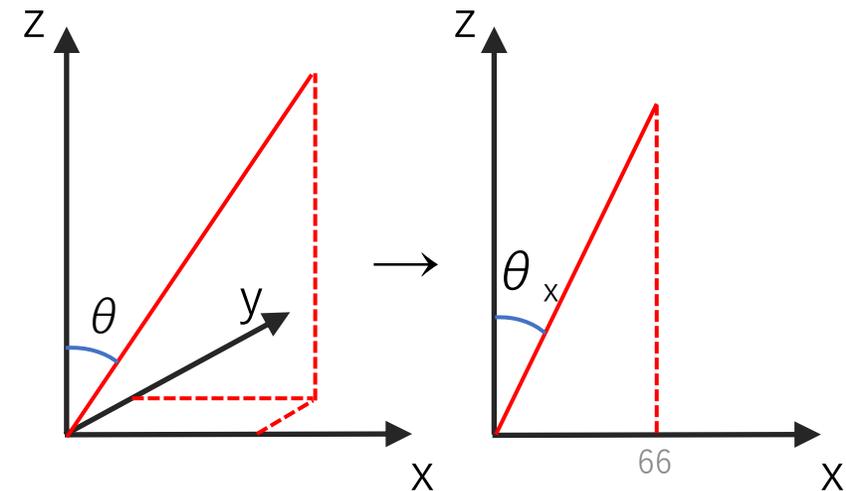
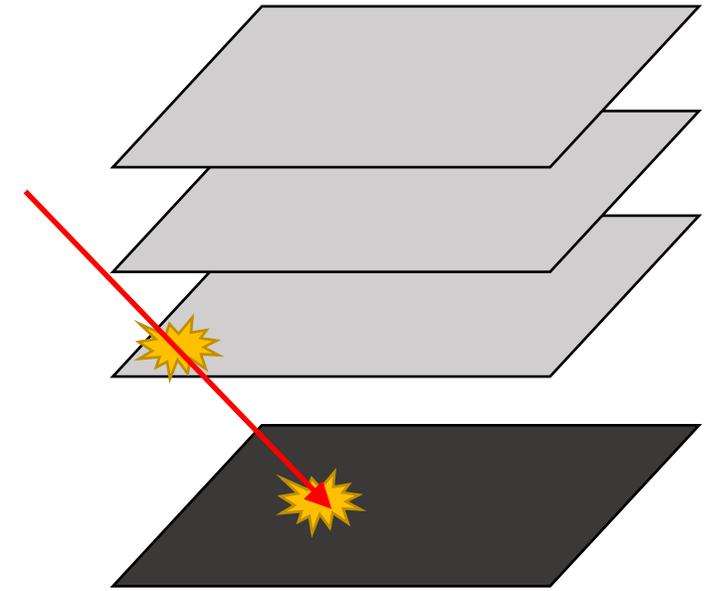
宇宙線ミューオンの天頂角分布

$$J(\theta) = J_0 \cos^n \theta$$

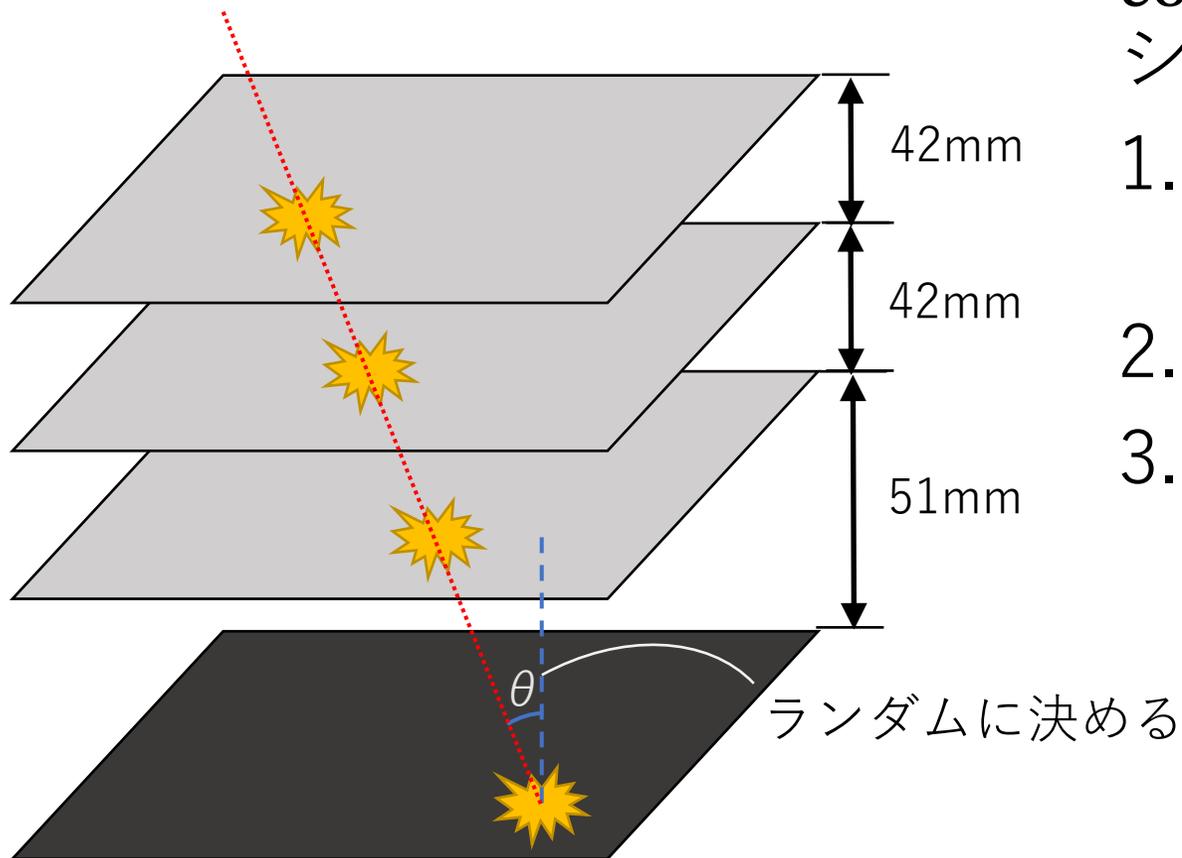
$$J_0 = 0.82 \times 10^{-2} [\text{/cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr}], \quad n=2$$

- 大角度のミューオンは観測できない
- y方向の情報は失われるため、実際の天頂角 θ を再構成するのが難しい

→ シミュレーションで3層通る場合のx-z平面への射影を求める



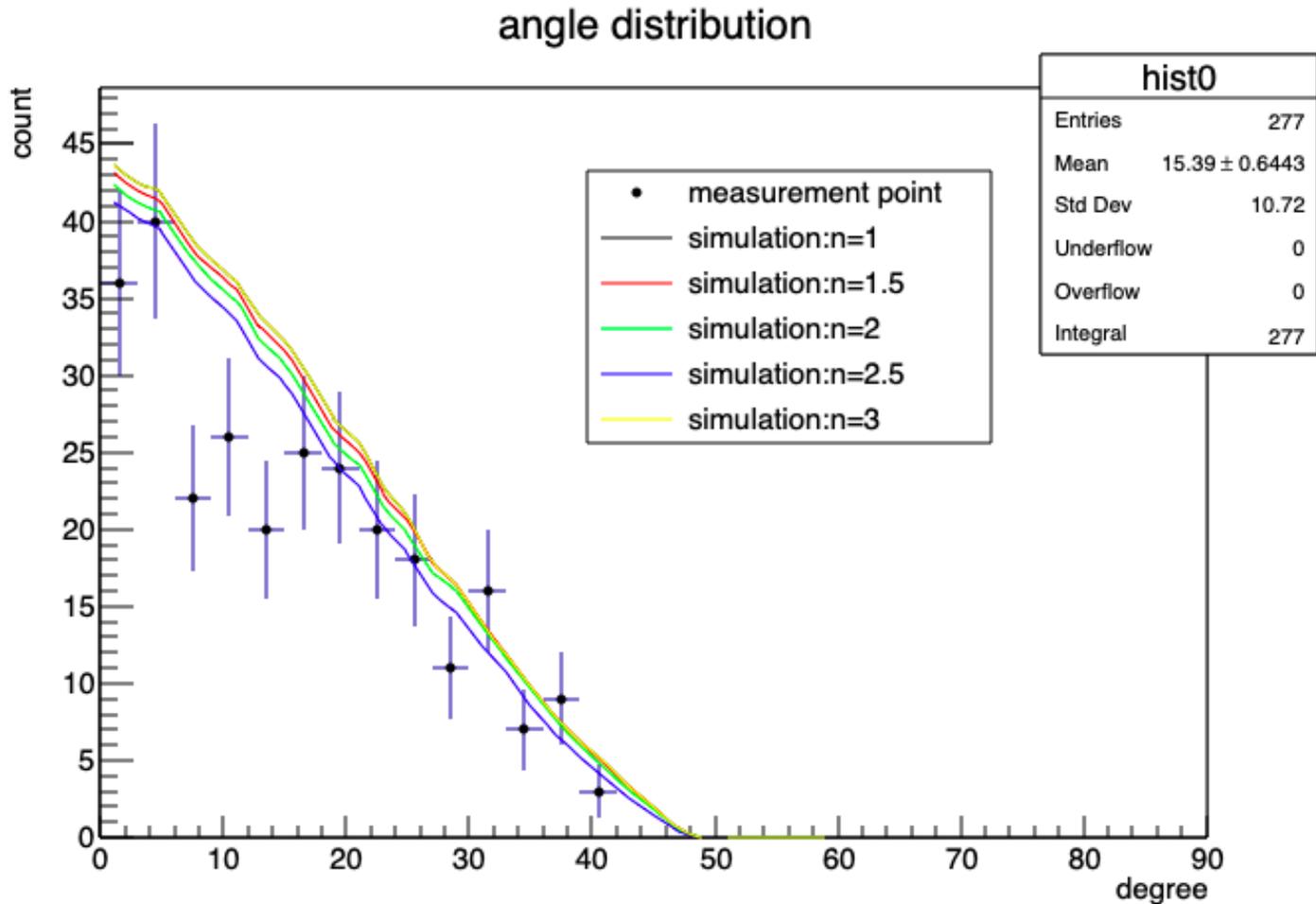
シミュレーション



$\cos^n \theta$ で分布するとしてシミュレーションを行う

1. シンチレータに当たる位置を決める
2. 天頂角を決める
3. それぞれのチェンバーに当たる位置を求め、x方向の角度計算

ミューオンの天頂角分布



測定値の傾向は見えるが、ばらつきが大きい

➡ 統計量を増やしたい

シミュレーションでnの値による差が小さい

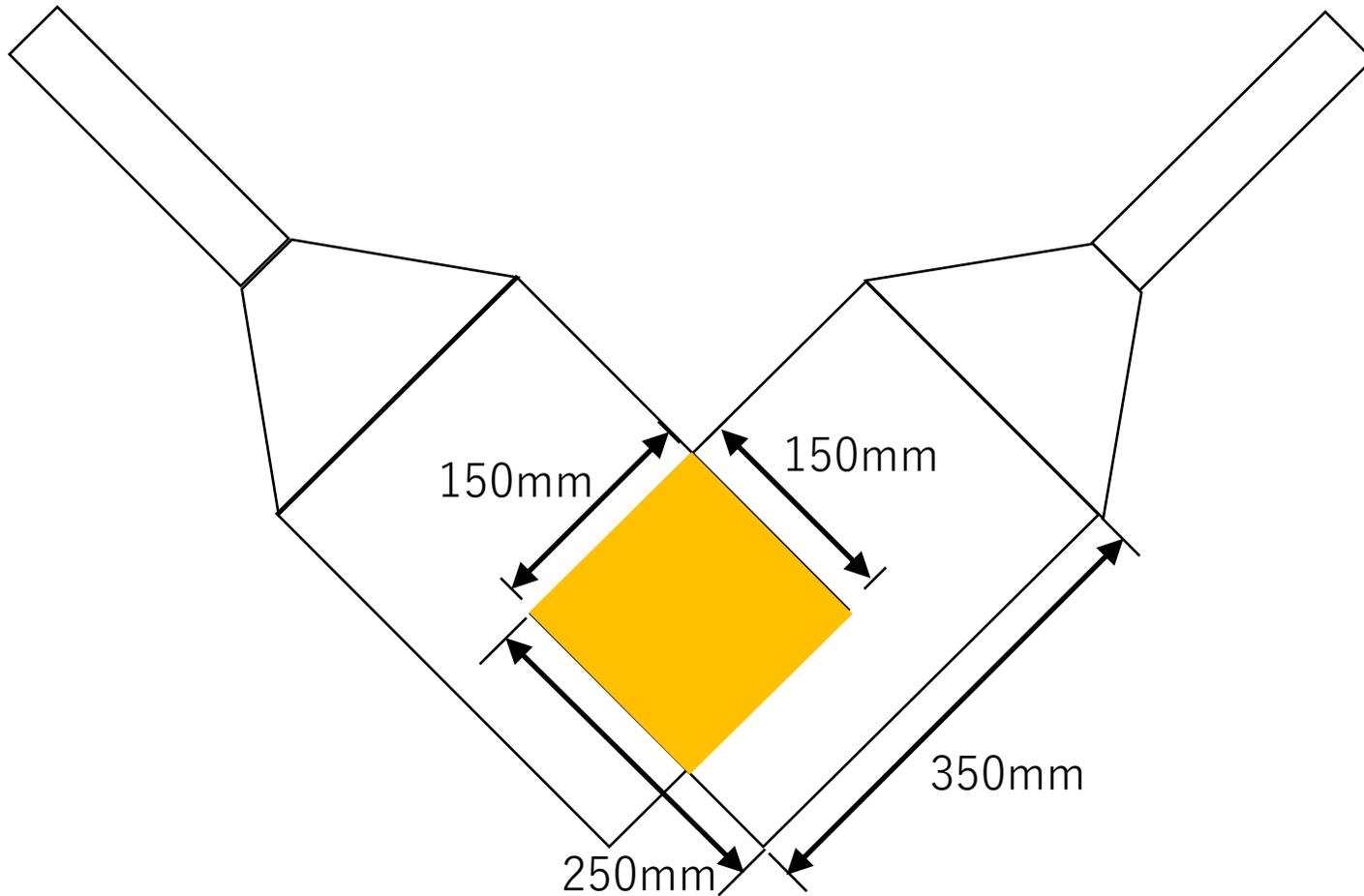
➡ 一方向からのみの測定の限界

結論

- スパークチェンバーの本体と回路を設計し、作成して実際に粒子を観測することができた
- 製作したスパークチェンバーの位置分解能は 1.39 ± 0.11 (mm)、検出効率 0.723 ± 0.10 と求められた
- ミューオンの天頂角分布は、 $\cos^n \theta$ を決定するには統計が足りない結果となった。決定には更なる統計やy方向のデータなどが必要

バックアップ

トリガーに使用したシンチレータ



検出効率

$$\varepsilon = 0.55$$

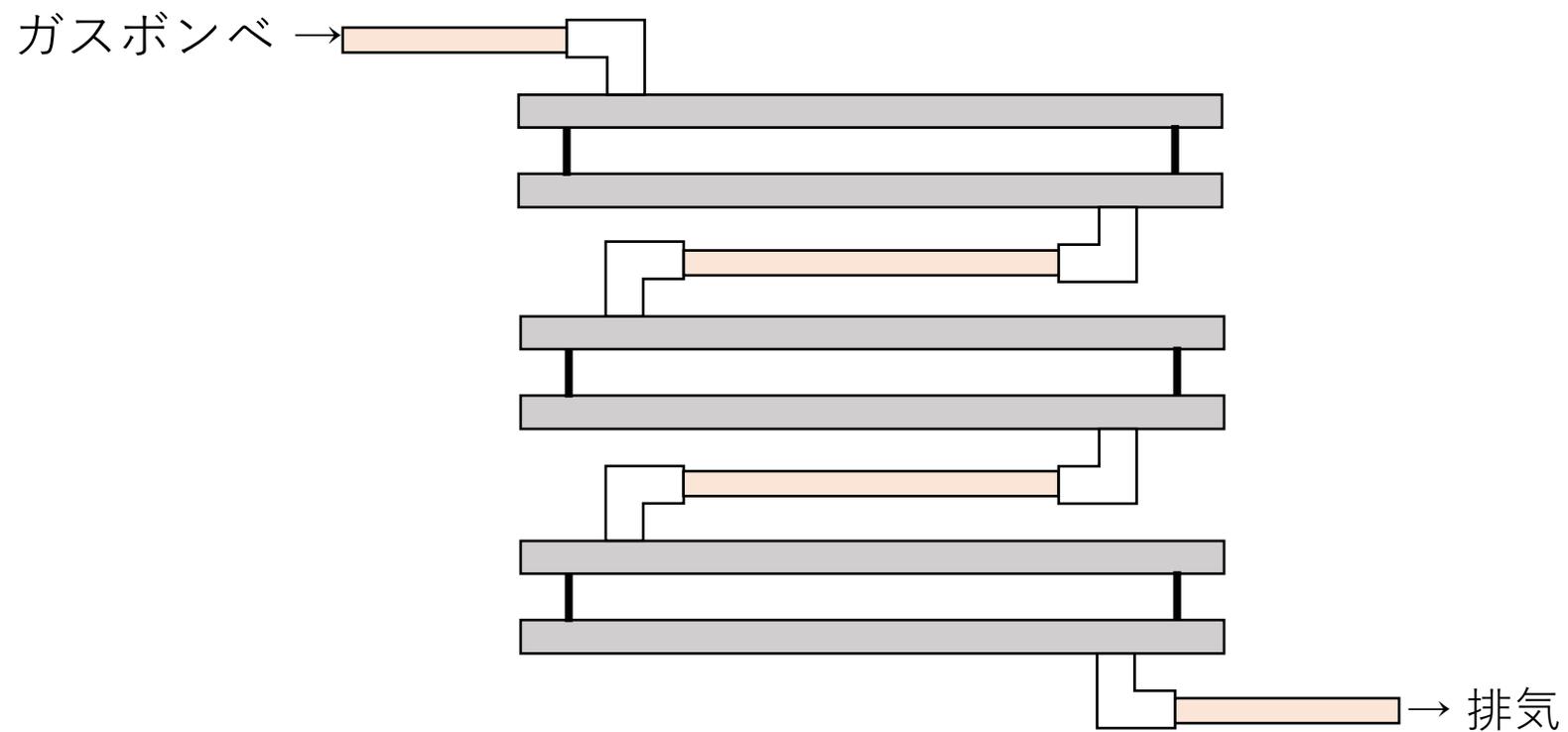
acceptance

1層目 0.308

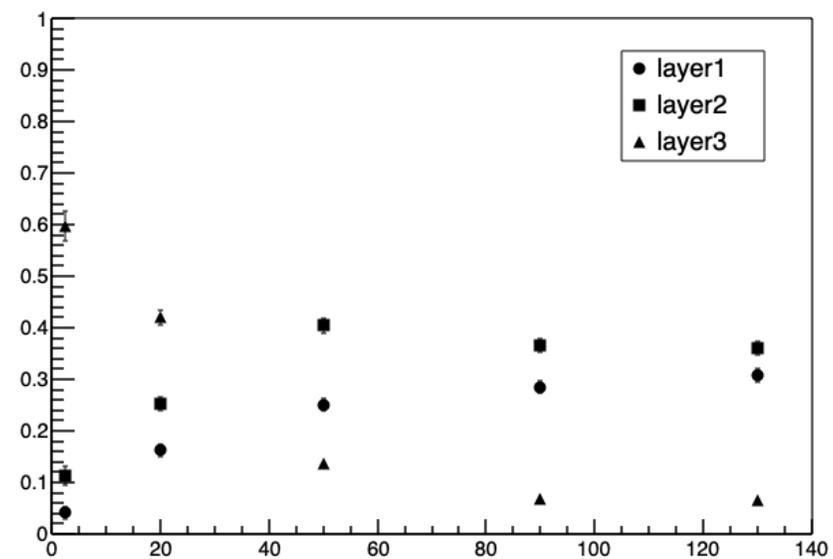
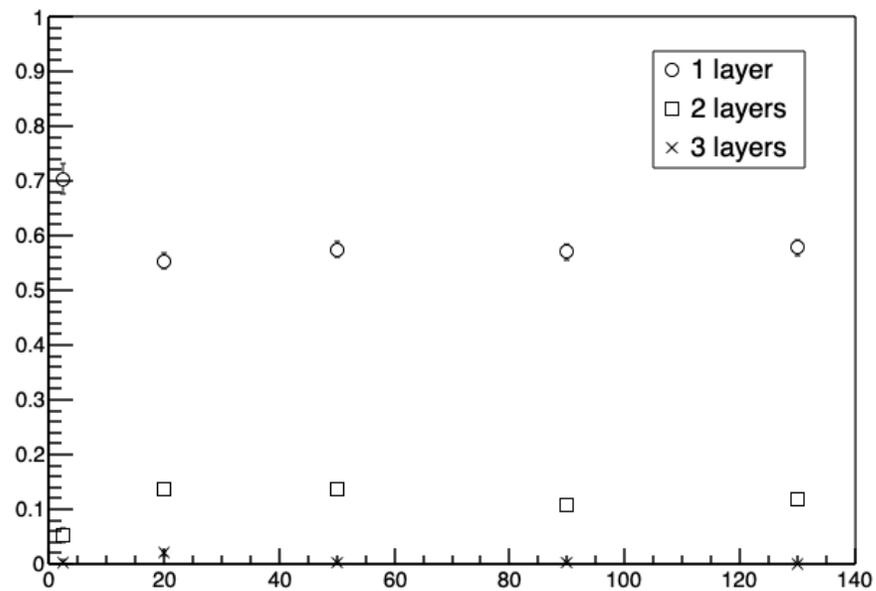
2層目 0.435

3層目 0.640

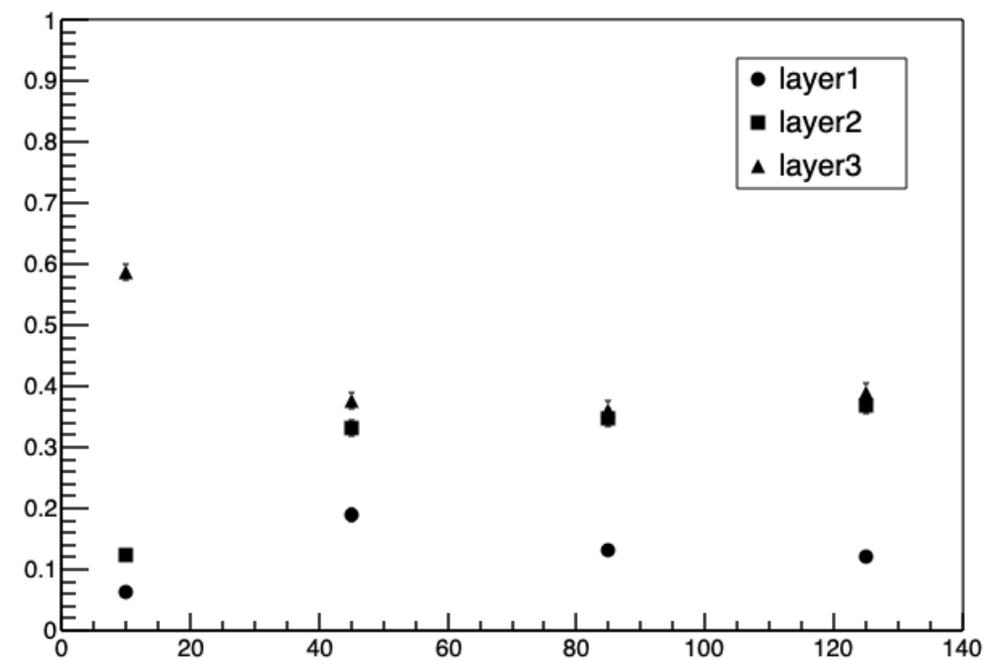
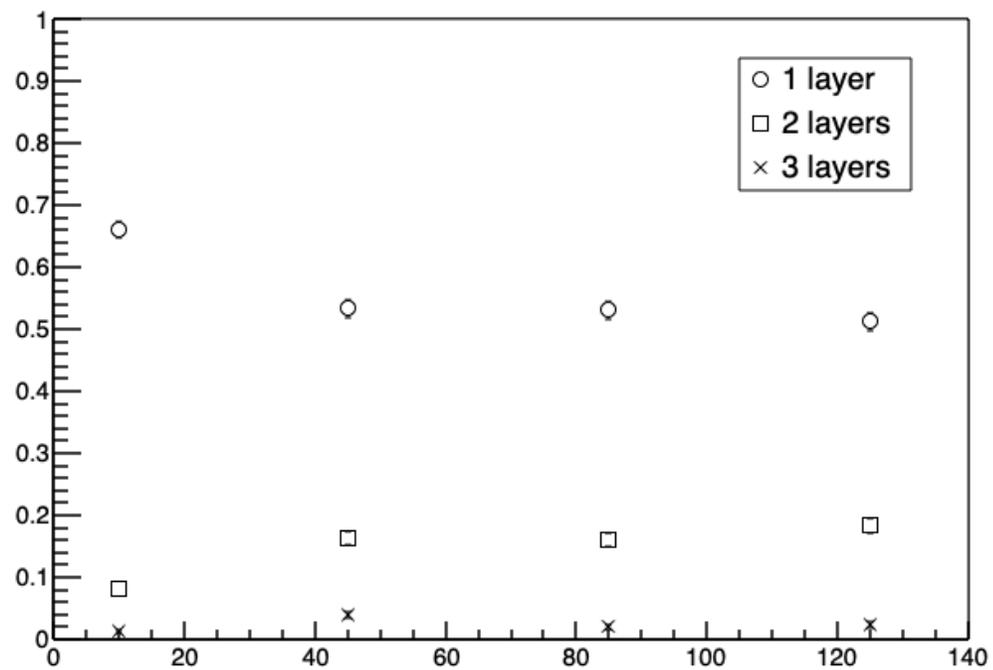
気体の配管



流量 5cc/min



流量 15cc/min



流量 28cc/min

