



# 暗黒物質探索実験における電離による エネルギー損失測定のための 低速イオンビーム試験

神戸大学 遠山和佳子

2025年 12月5日

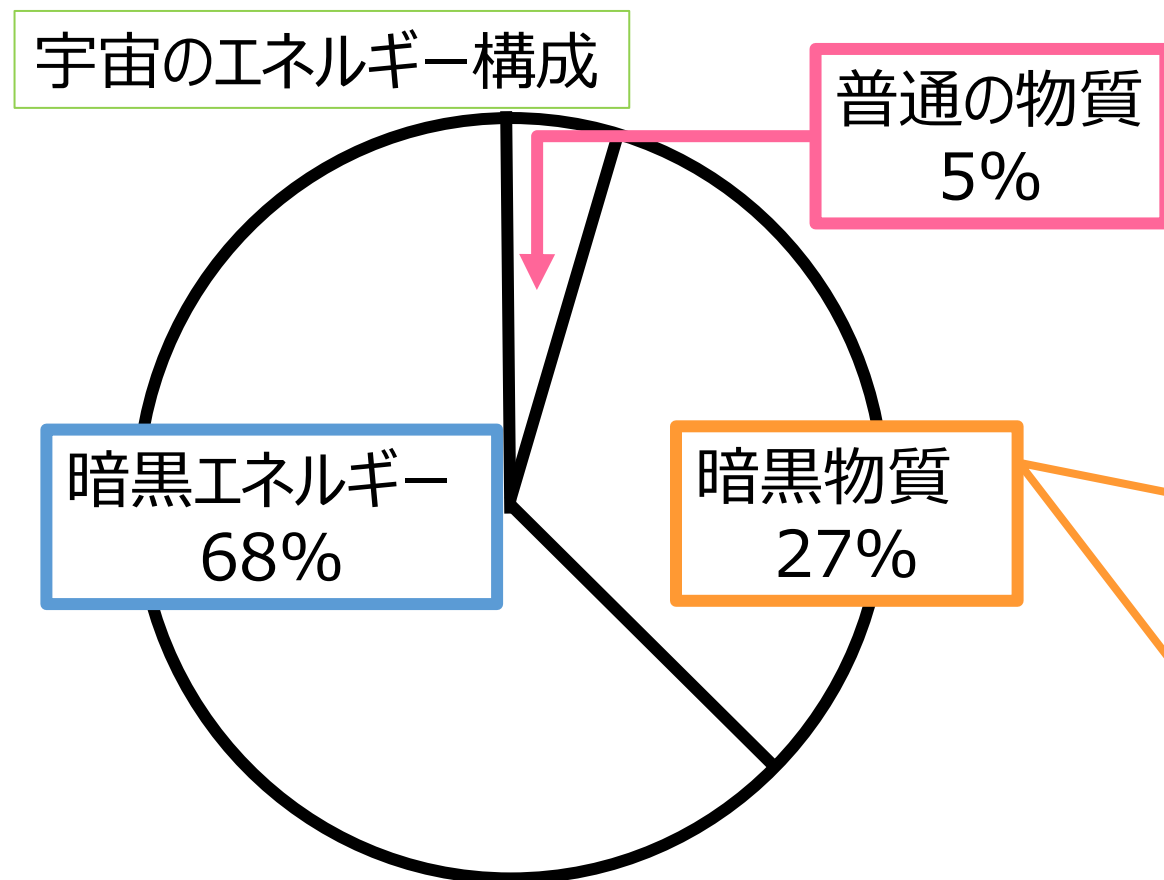
第10回 宇宙素粒子若手の会 秋の研究会

@東京大学 柏キャンパス 宇宙線研究所 2025年12月5-6日

# 暗黒物質探索

## ●暗黒物質とは…

宇宙の全エネルギー組成の約27%を占める、目に見えない**正体不明**の物質



### ● 暗黒物質の候補

**WIMP(Weakly Interacting Massive Particles)**

**WIMP**をターゲットとした方向感度を持った直接探索を行っている！



**NEWAGE実験**

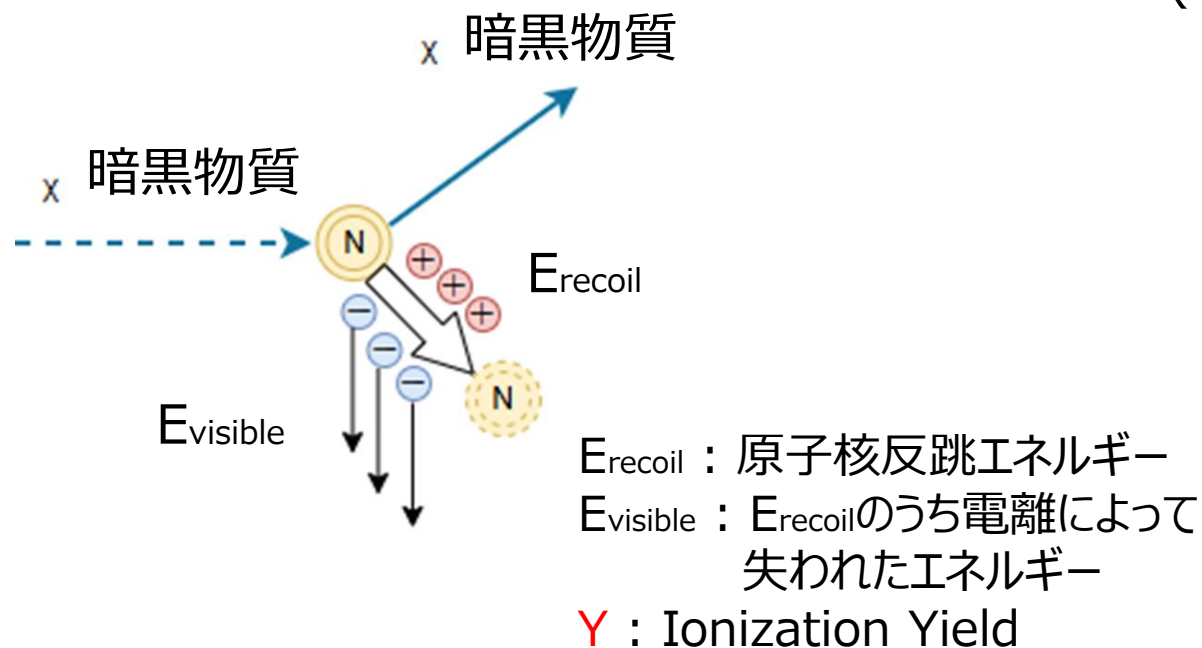
(ガス検出器を用いた探索)



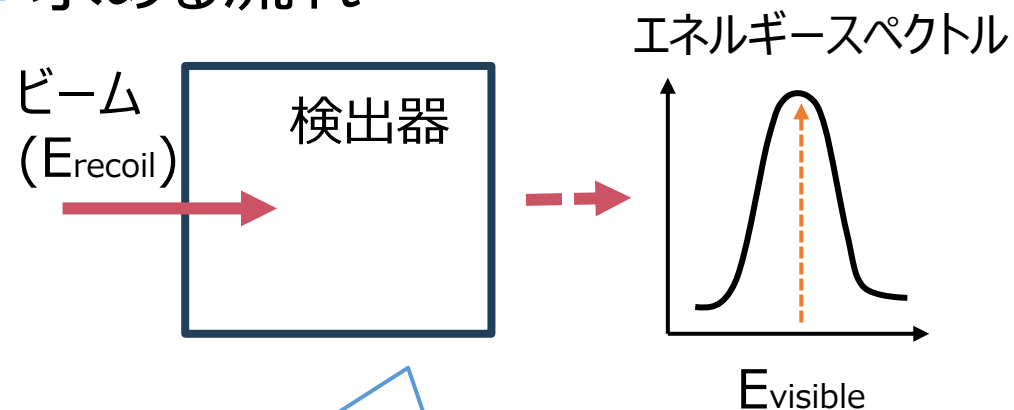
# Ionization Yield測定

## ●暗黒物質直接探索

- ▶反跳原子核が電離によって失うエネルギーを観測



## ●求める流れ

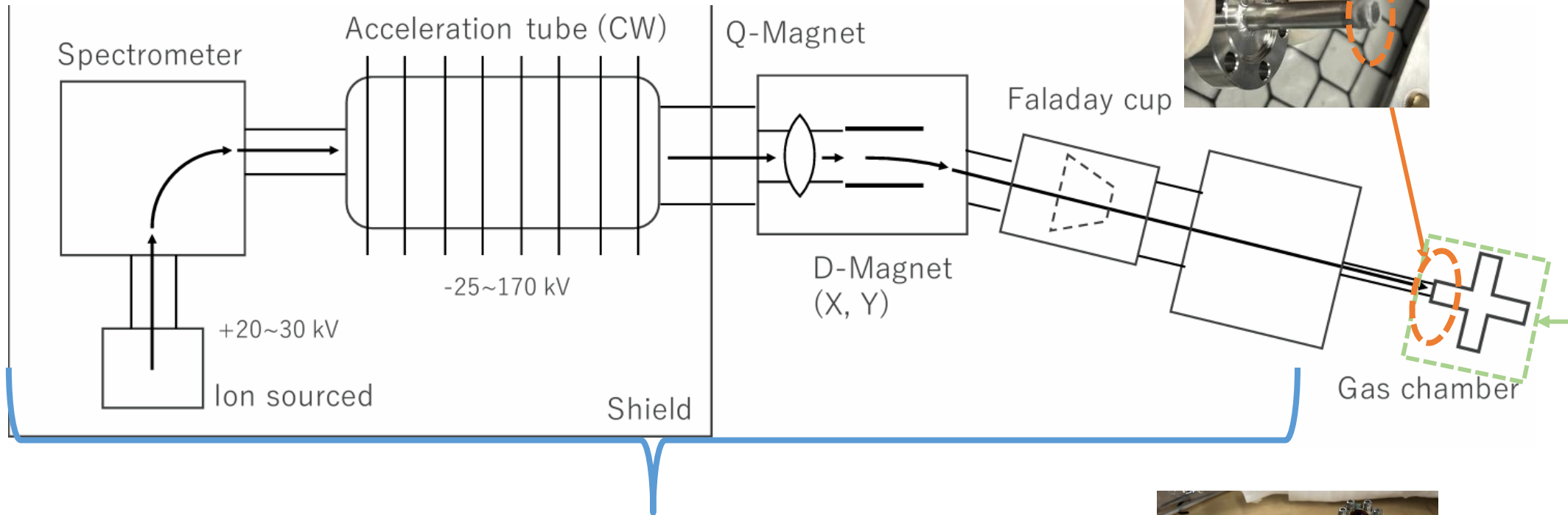


Ionization Yieldを実験的に  
求めることが必要

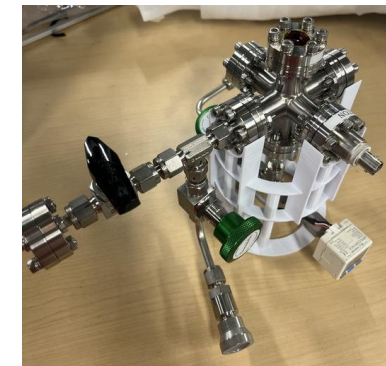
イオンビームをガスチェンバーに入射  
させてエネルギーを測定する機構が  
必要！

$$E_{\text{visible}} = Y \times E_{\text{recoil}}$$

# ビーム実験全体像

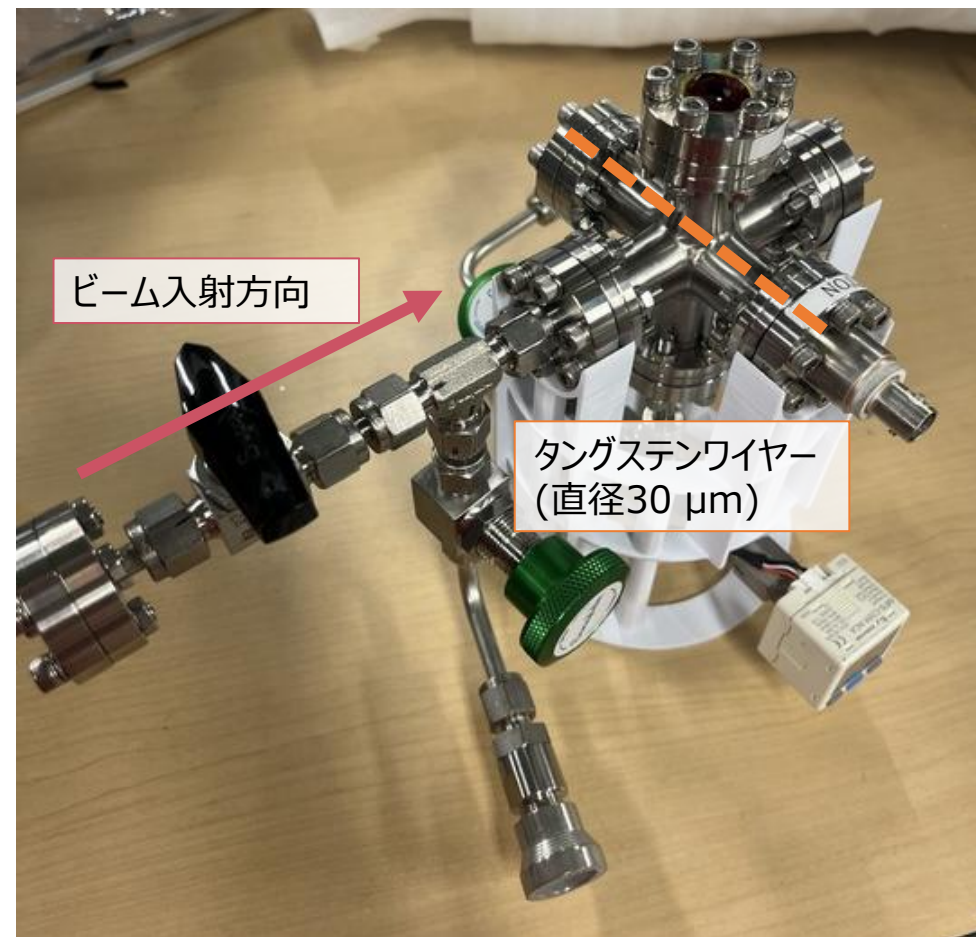
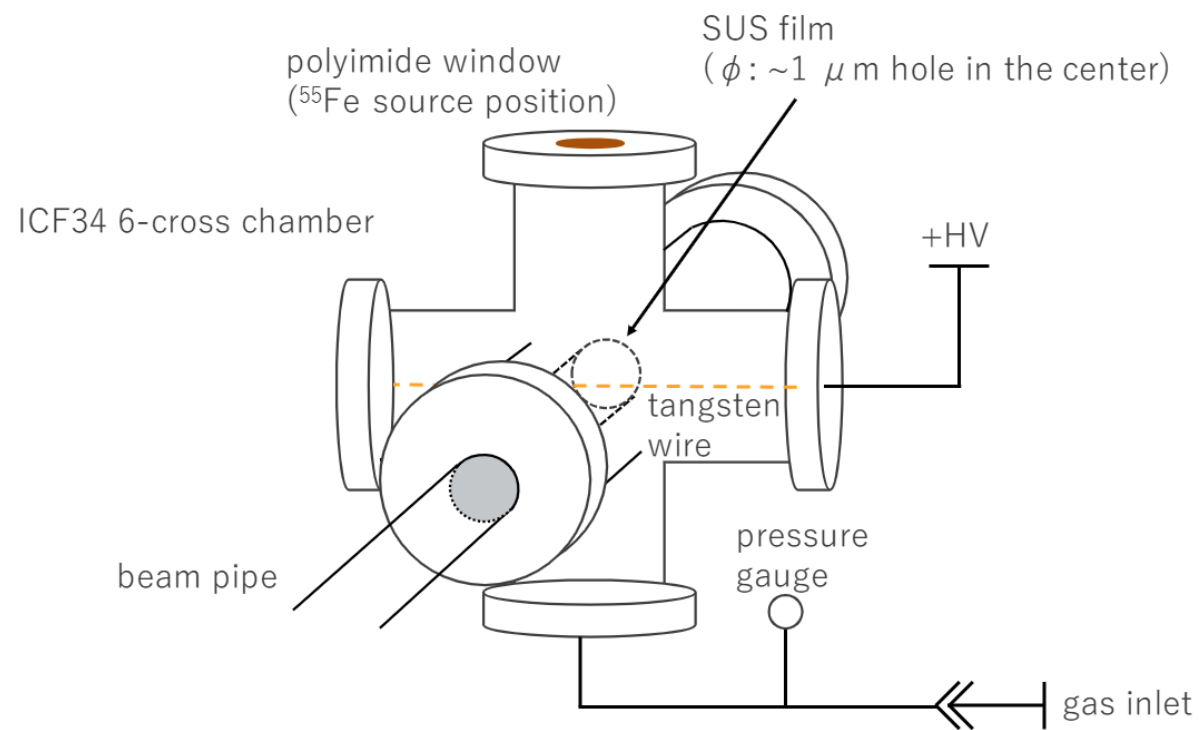


- 低エネルギー試料照射装置
- 加速電圧： $5\sim200\text{ kV}$
- イオン種：H, He, C, F, Si, Ar など



# 検出器

## ●ワイヤーチェンバー(単線,6方クロス型)



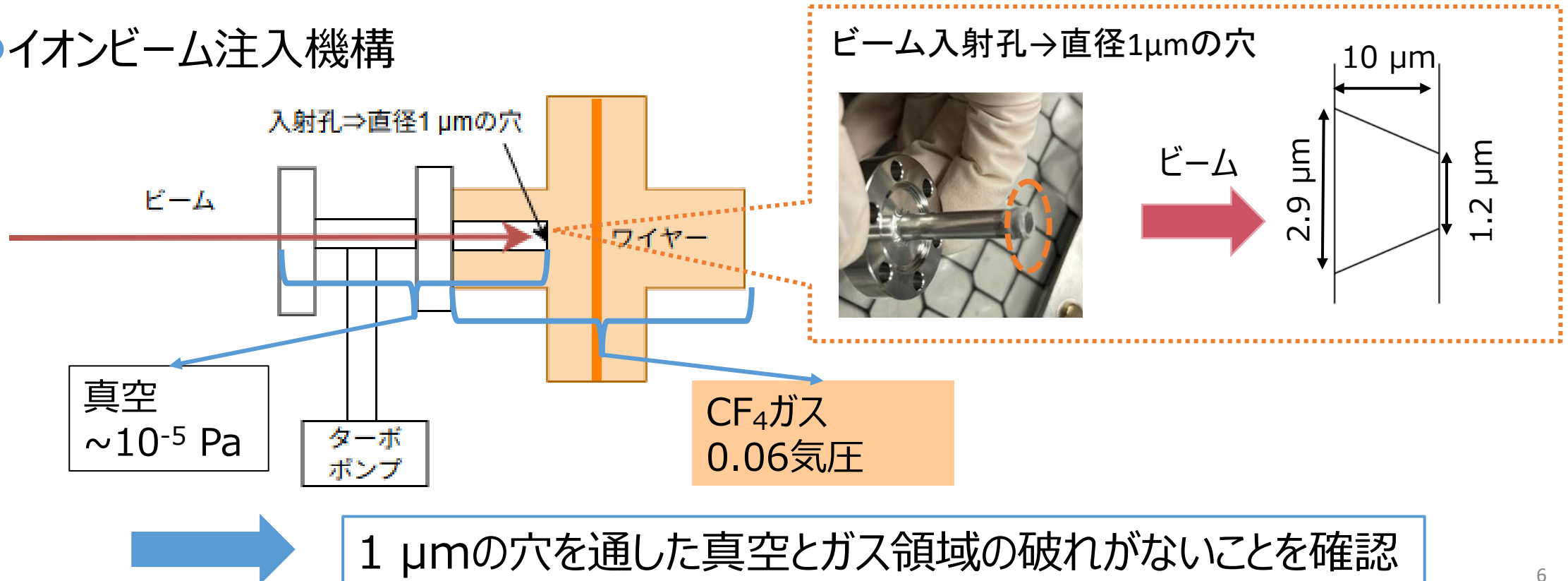
# ビーム入射孔

- 先行研究

グルノーブルのLPSCはCOMIMAC加速器、ビームの入射孔として $1\mu\text{m}$ の穴を用いて実験

➡ Ionization Yieldを測定し、**ガス検出器への低エネルギーイオンビーム注入機構の確立を目指す！**

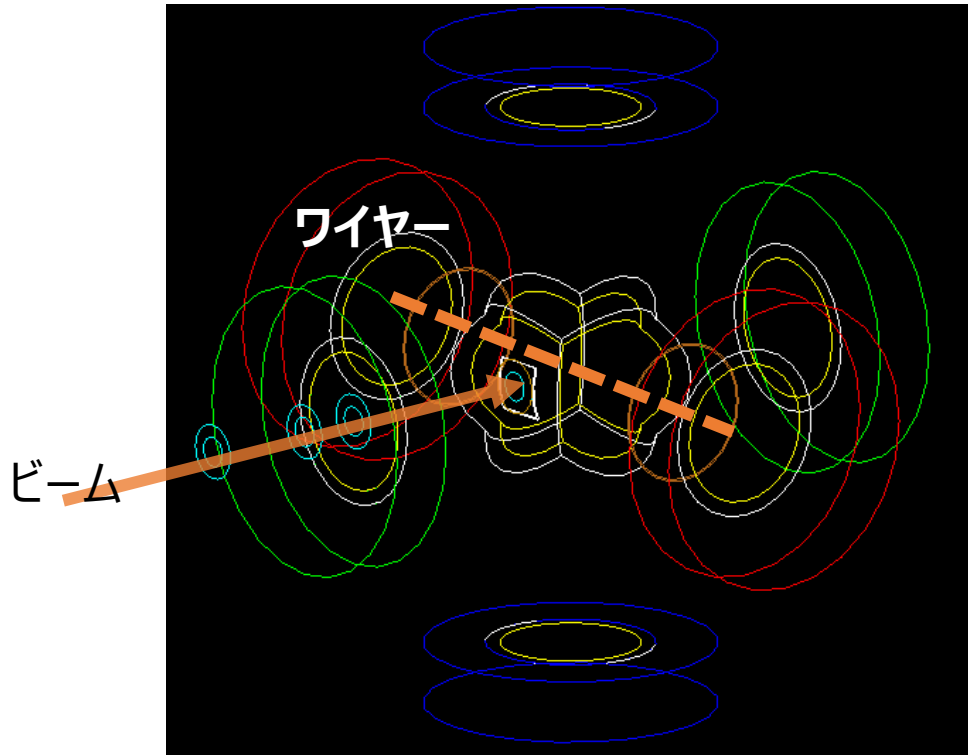
- イオンビーム注入機構



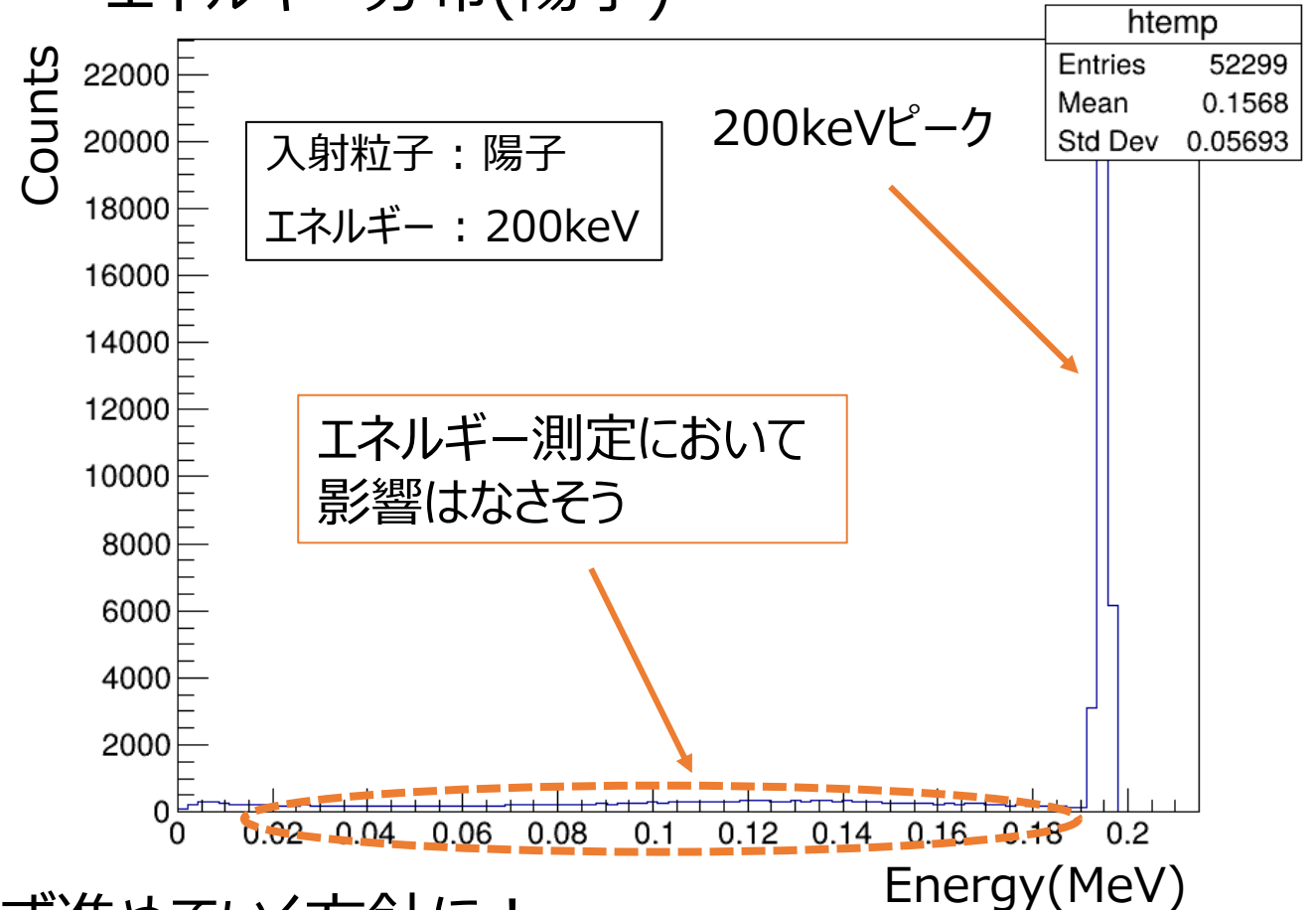
# 入射孔形状による影響の調査

➤ Geant4シミュレーションによるテーパーの影響の調査を実施

ジオメトリ



エネルギー分布(陽子)



➡ テーパー構造の影響は考慮せず進めていく方針に！

# 内部の電場構造はどうなっているの？

## ●電場構造

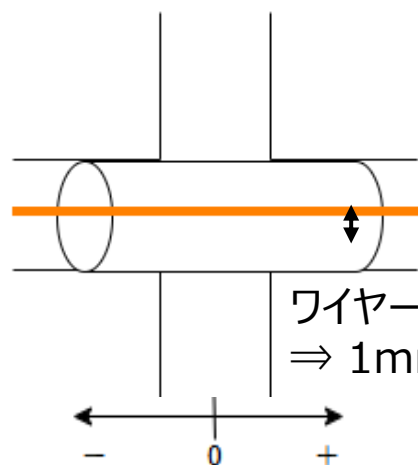
チェンバー断面図

電場構造が歪んでいる可能性あり

シミュレーション実施

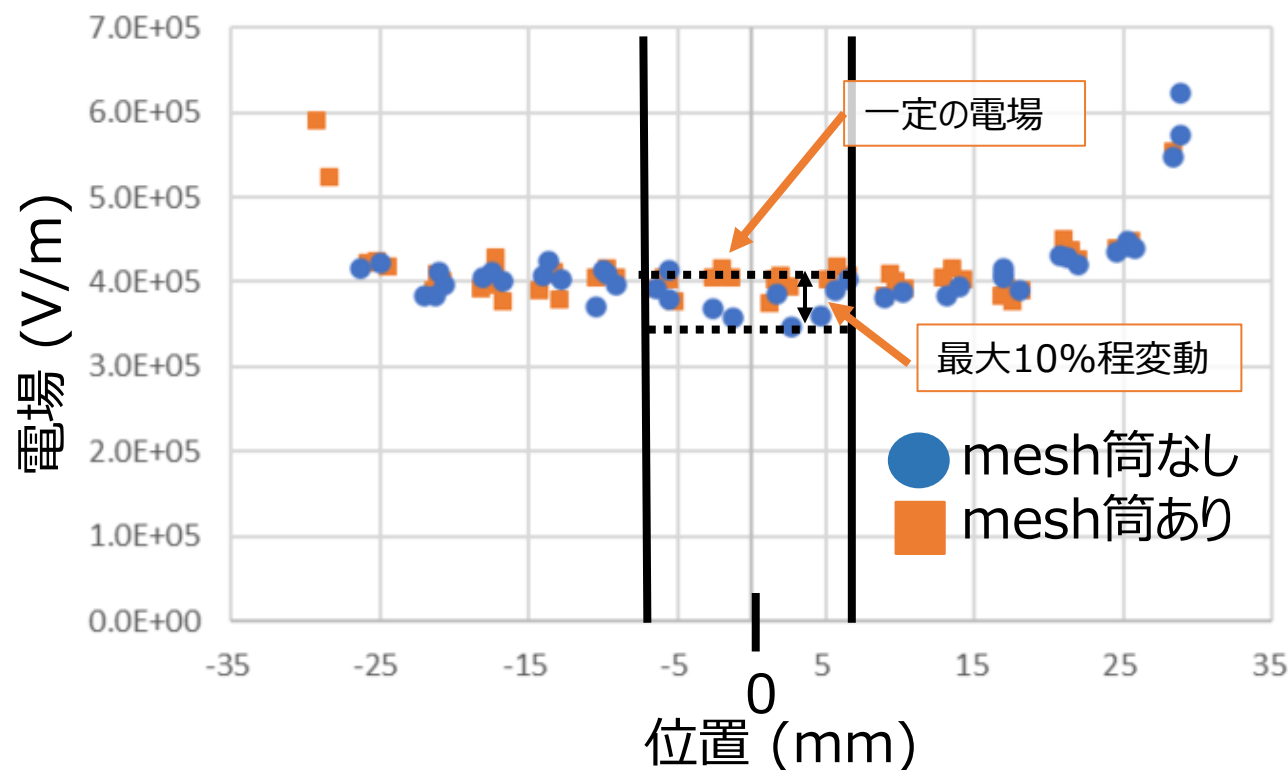
対策として…

銅meshを丸めて挿入



ワイヤーからの距離  
⇒ 1mm

## ●電場の位置依存(シミュレーションソフト:Femtet)



meshをつけることにした

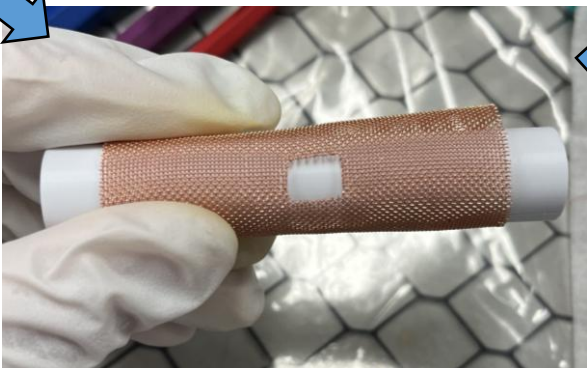
# 内部改良

## ➤ チェンバー内部の改良を実施

- 銅meshにビームが通る穴をあける



- 型をつける



- チェンバーに入れている様子



- 最後ワイヤーを張って完成！



ぴったりとくっつけた

動作確認・性能評価を実施

試験で使える性能であることを確認

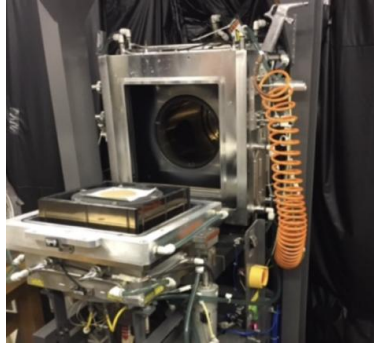
# 神奈川大ビーム試験

# 神奈川大ビーム試験

2025年9月3～5日 @神奈川大学

## ◆ 神奈川大ビーム情報

- 低エネルギー試料照射装置
- 加速電圧：5～200kV
- イオン種：H, He, C, F, Si, Ar など



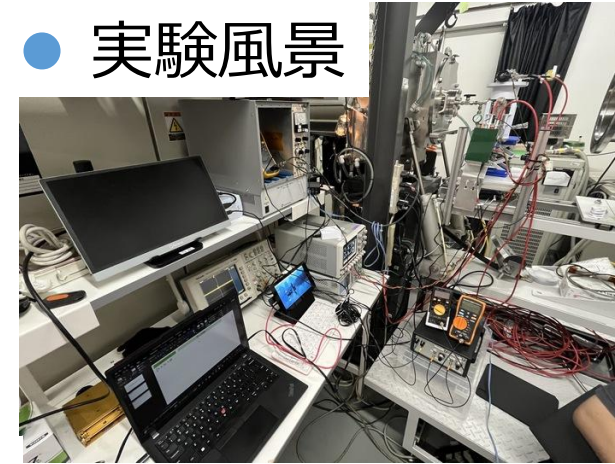
## ● 測定リスト

照射イオン	Energy (keV)
F	5～50
He	5～25
p	10～25

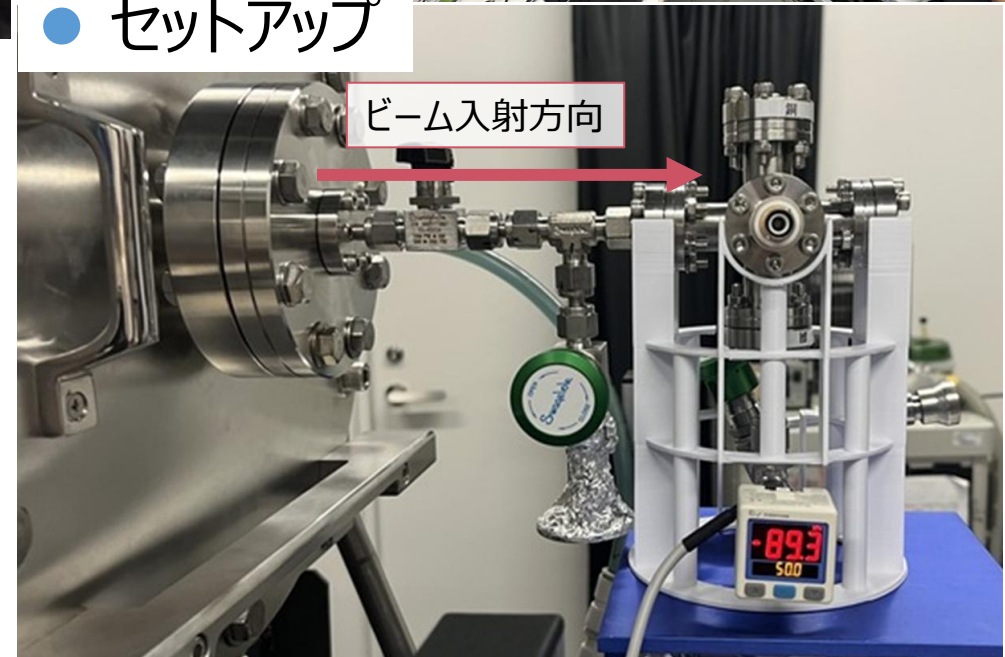
ガス：CF<sub>4</sub>  
ガス圧：0.1気圧

本講演ではFに注目

## ● 実験風景

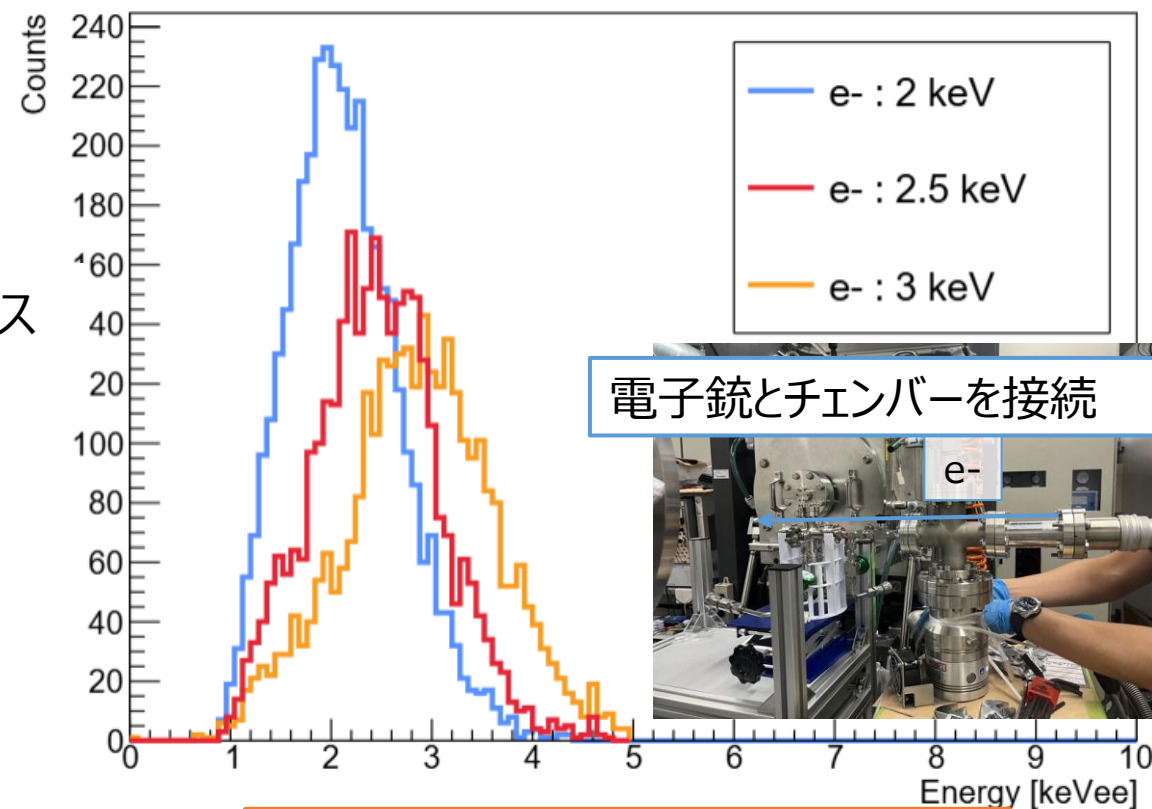
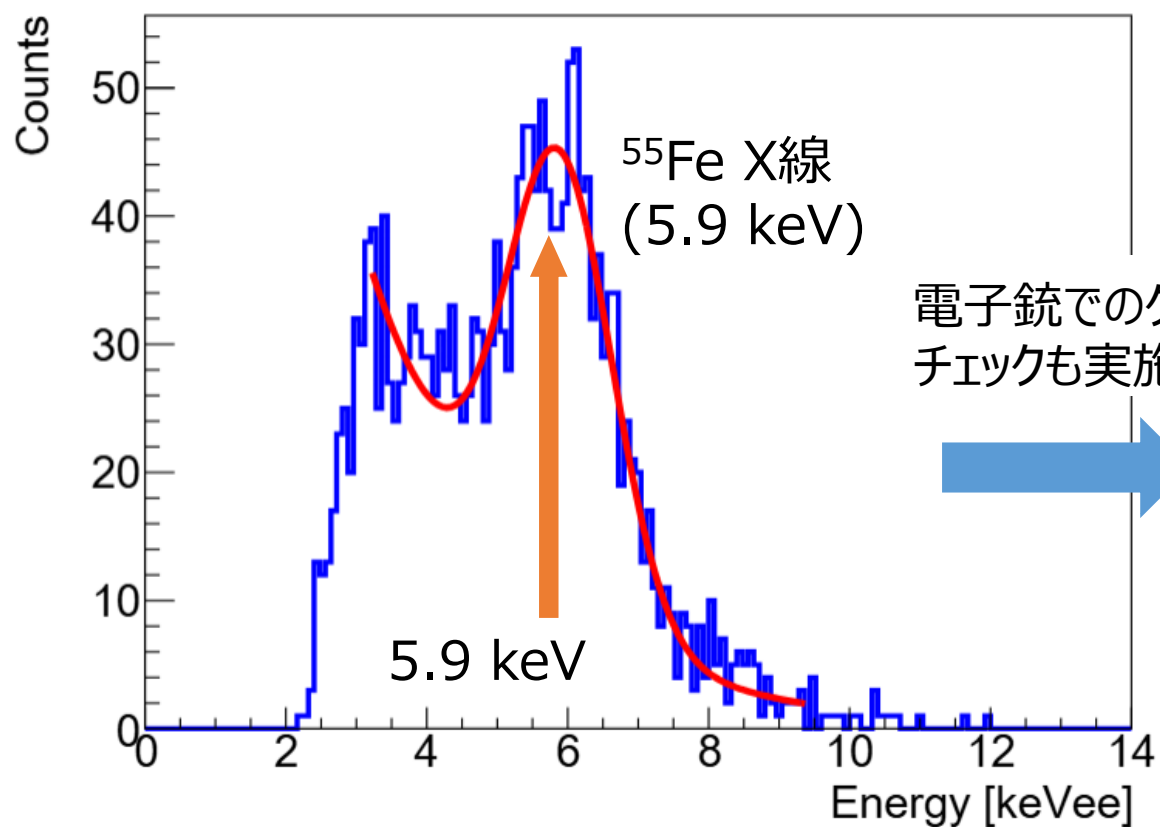


## ● セットアップ



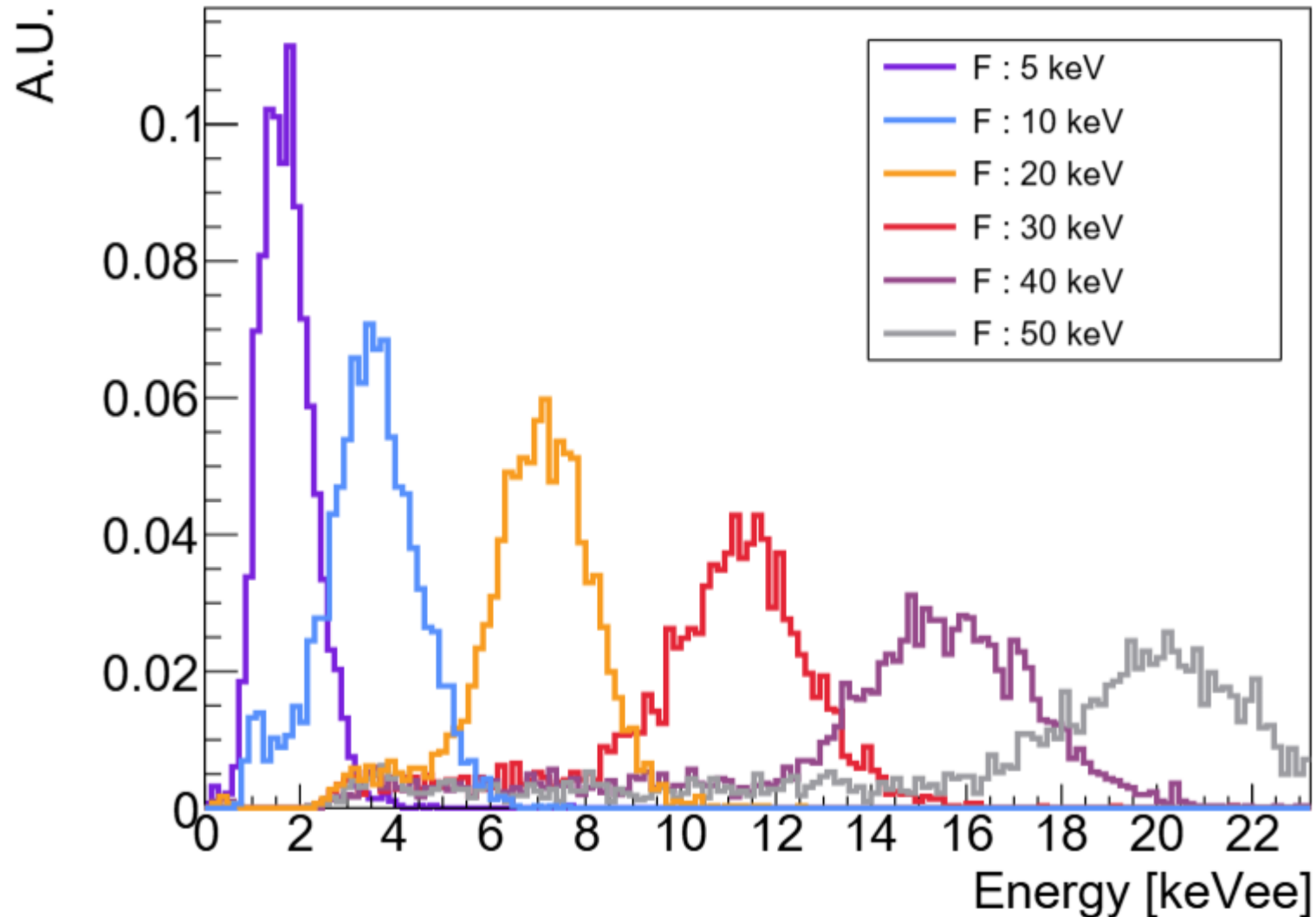
# エネルギーキャリブレーション

ビームによるデータ測定毎にキャリブレーションを行うことで  
正確なエネルギーを測定



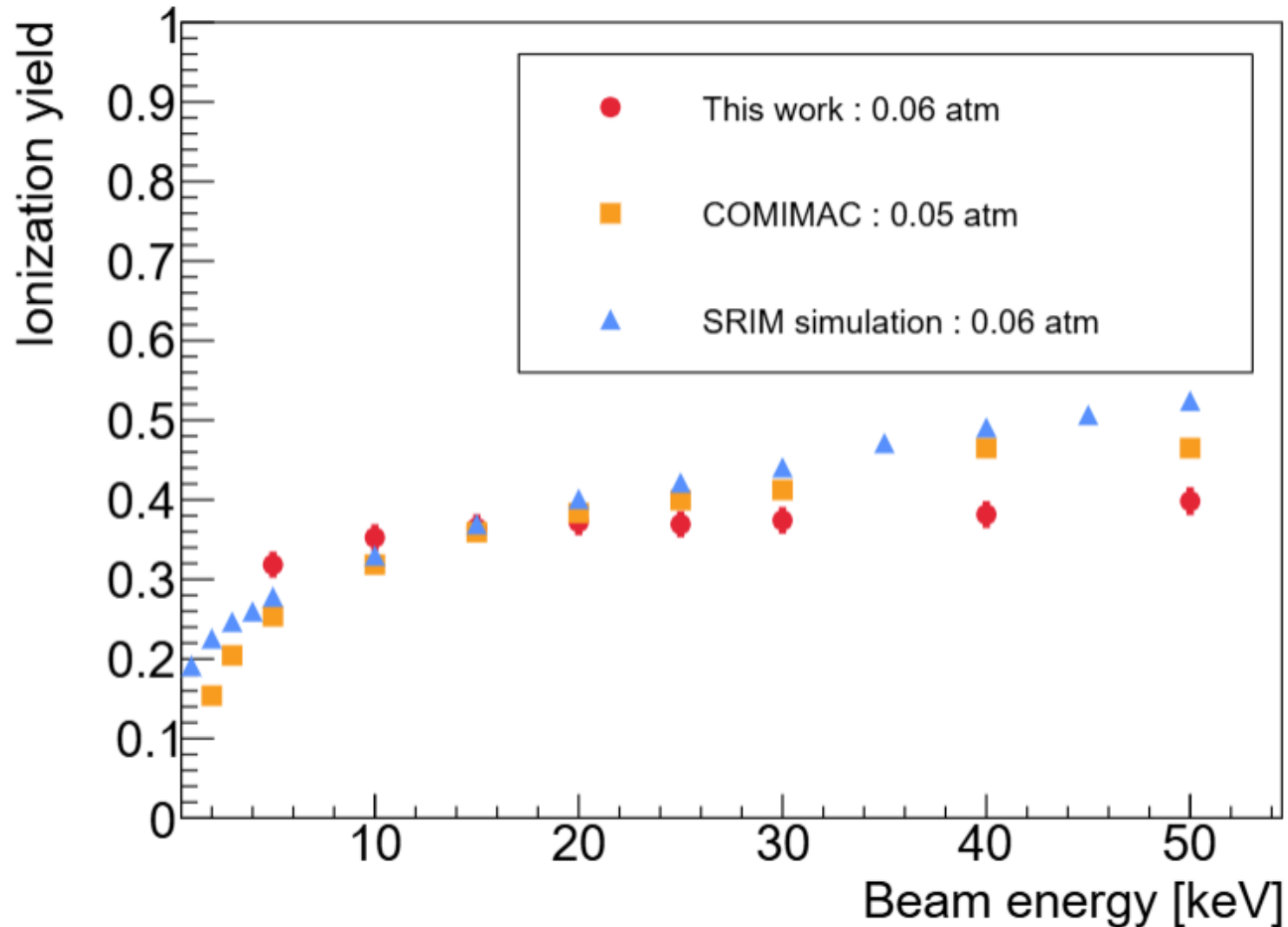
ピークエネルギーの差±2.6%以内

# Fビームエネルギースペクトル



- ビームエネルギー毎のピーク位置の相関を確認
- 電離以外でエネルギーを落としていることを確認
- Ionization Yieldは約30~40%

# Ionization Yield



- CF<sub>4</sub> 0.06気圧中でのFの Ionization Yieldを求めることができた
- 先行研究、シミュレーションとの違いも生じた  
⇒その解釈が課題
- 日本で低速イオンビームをガス検出器に注入する機構を確立できた
- 検出器・ビーム条件を変えてクロスチェックを実施していく

# 結論

- Ionization Yield測定のためのビーム試験を実施  
⇒そのための検出器の開発・試験
- Fイオンのエネルギースペクトルを取得
- CF<sub>4</sub> 0.06気圧でのFのIonization Yieldを測定
- 日本で低速イオンビームをガス検出器に注入する機構を確立できた  
⇒検出器・ビーム条件を変えてクロスチェックを実施していく

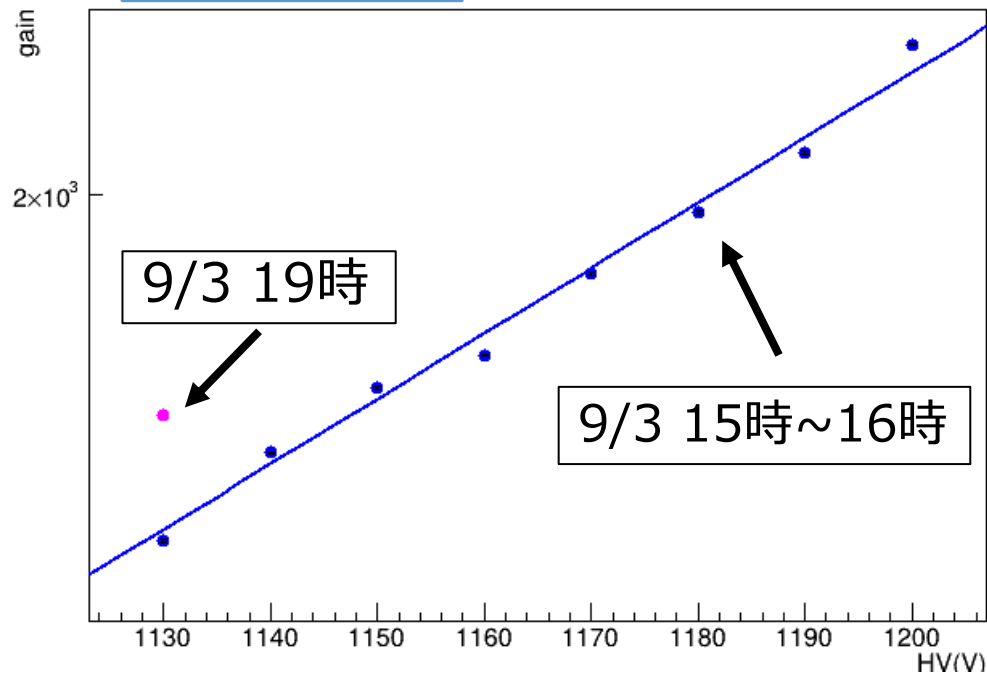
# Back up

# ゲインの時間変動

## ●ゲイン上昇

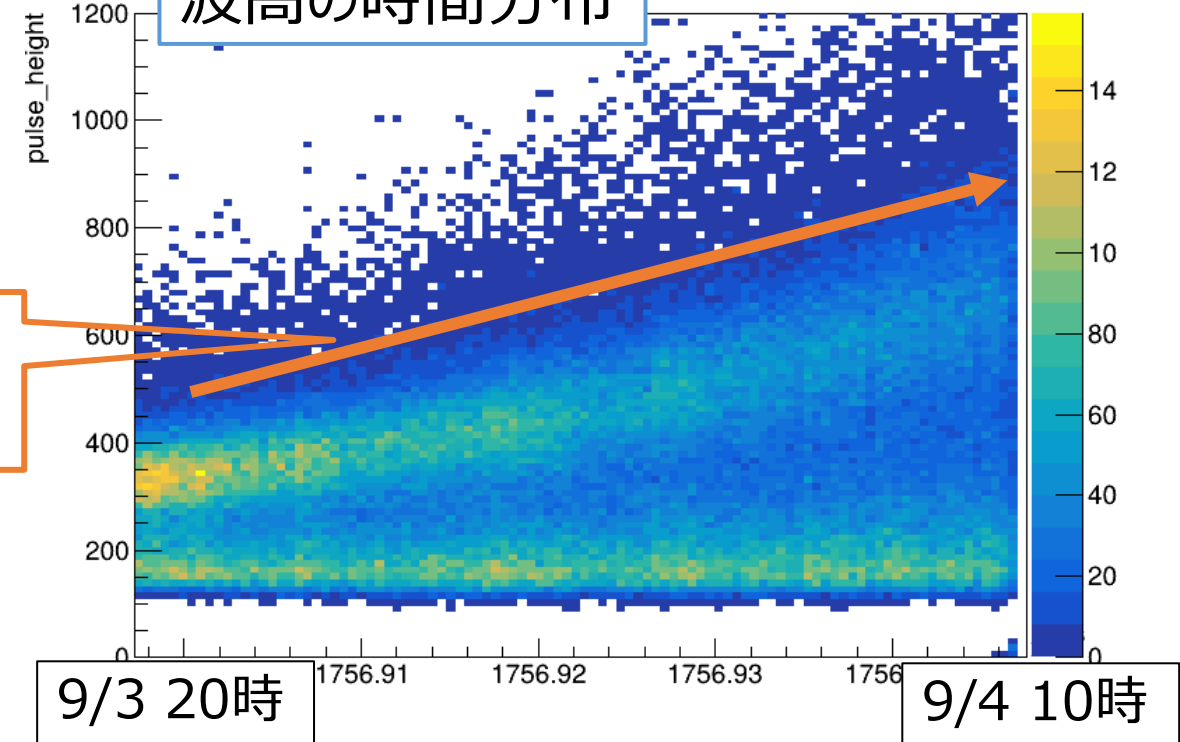
- $^{55}\text{Fe}$ のゲインカーブから時間が経つとゲインが上昇していることが発覚

ゲインカーブ



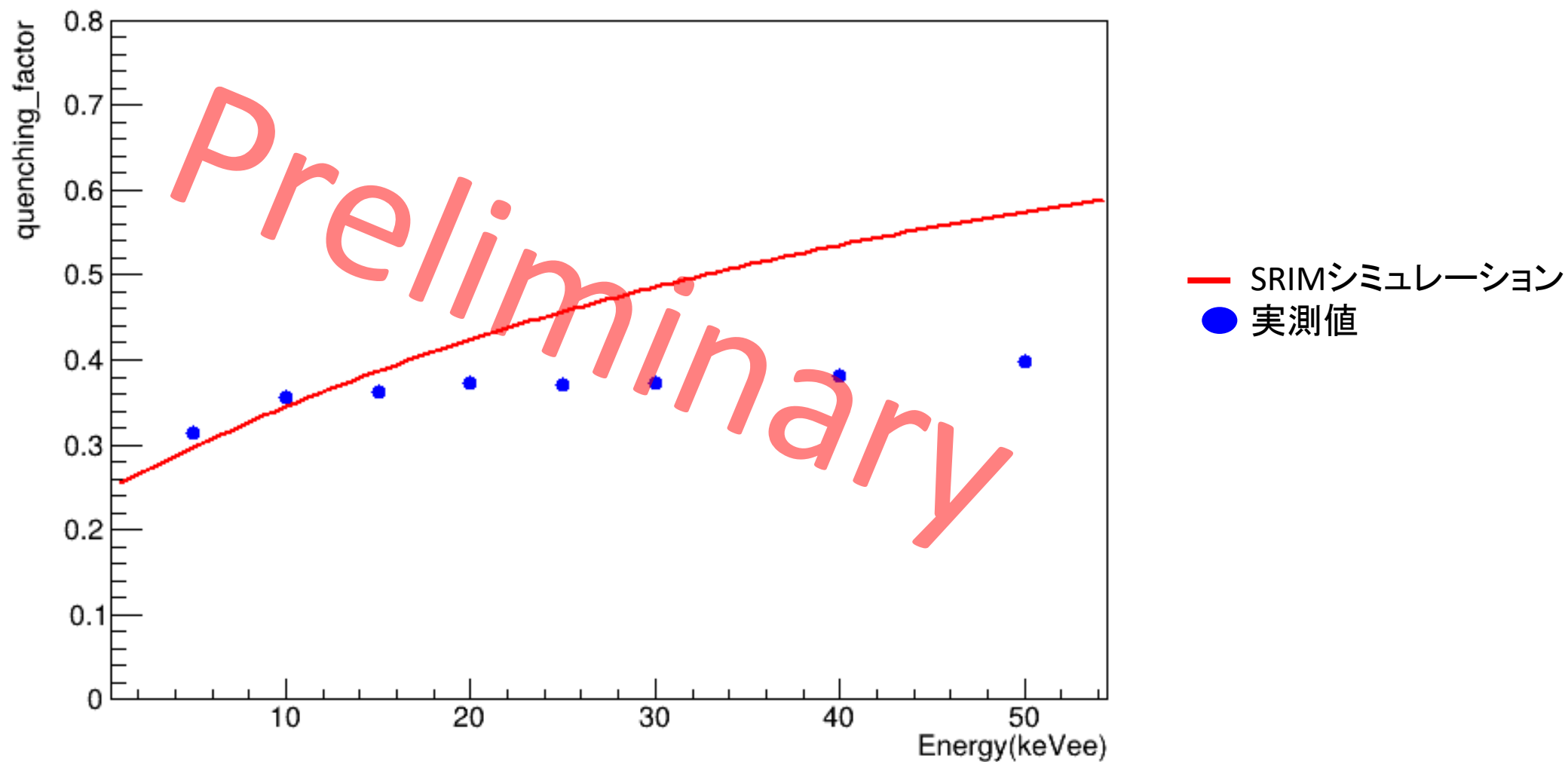
- 一晩 $^{55}\text{Fe}$ でデータをとってみると…

波高の時間分布



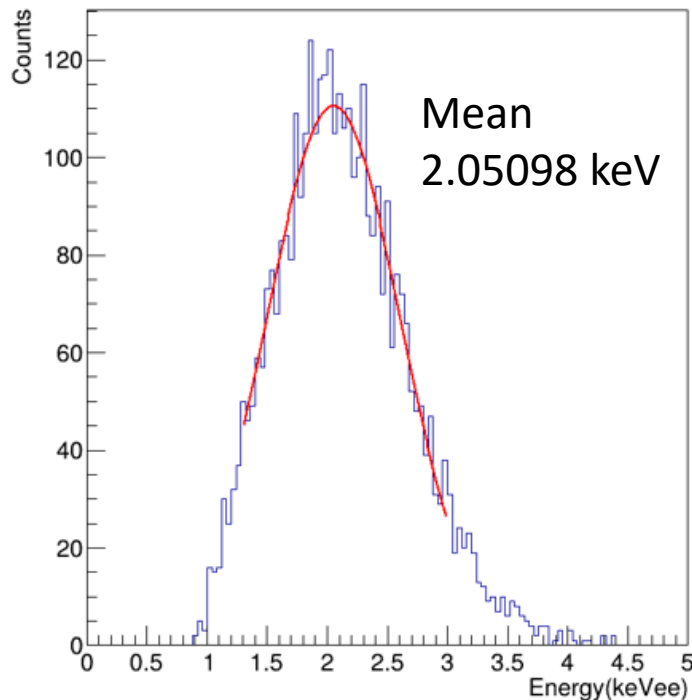
➡ ビームによるデータ測定毎にキャリブレーションを行うことでQuenching factorを測定

# FのQuenching factor(実測値とSRIM)



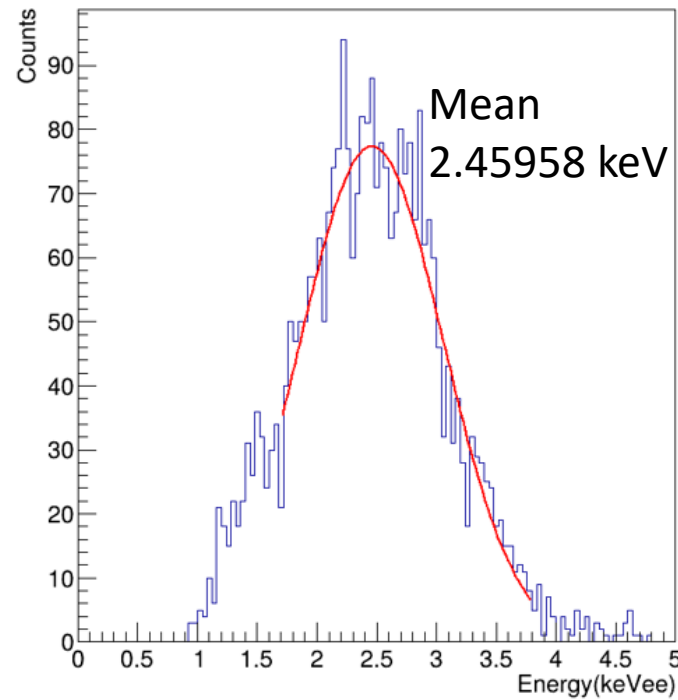
# 電子のエネルギースペクトル

● 電子2 keV



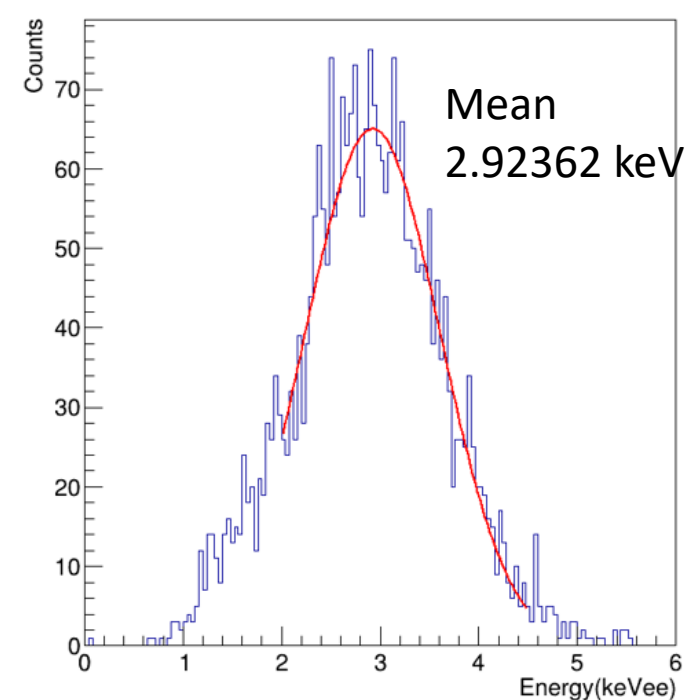
➤ ピークエネルギーの差  
→ +2.45 %

● 電子2.5 keV



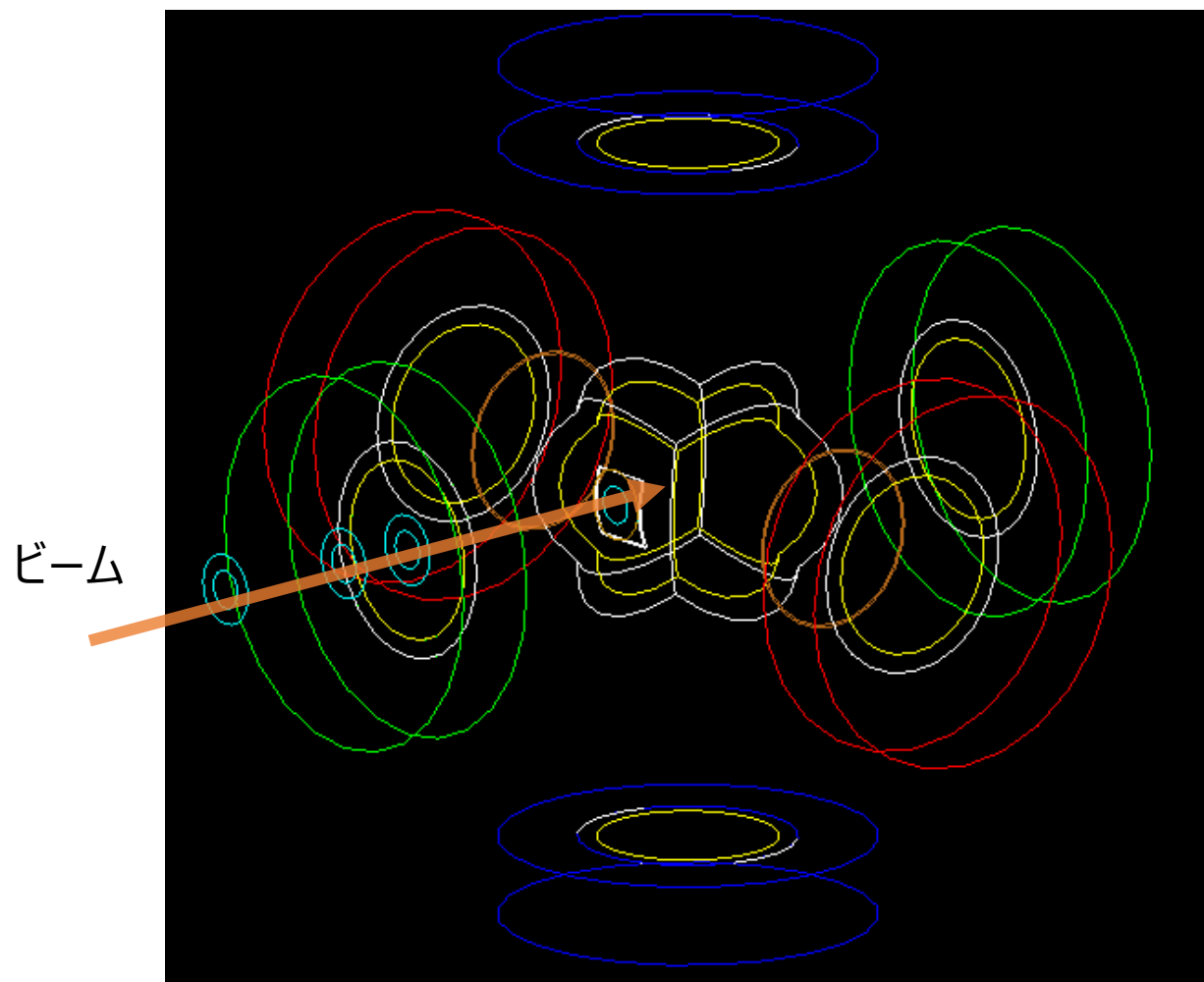
➤ ピークエネルギーの差  
→ -1.61 %

● 電子3 keV

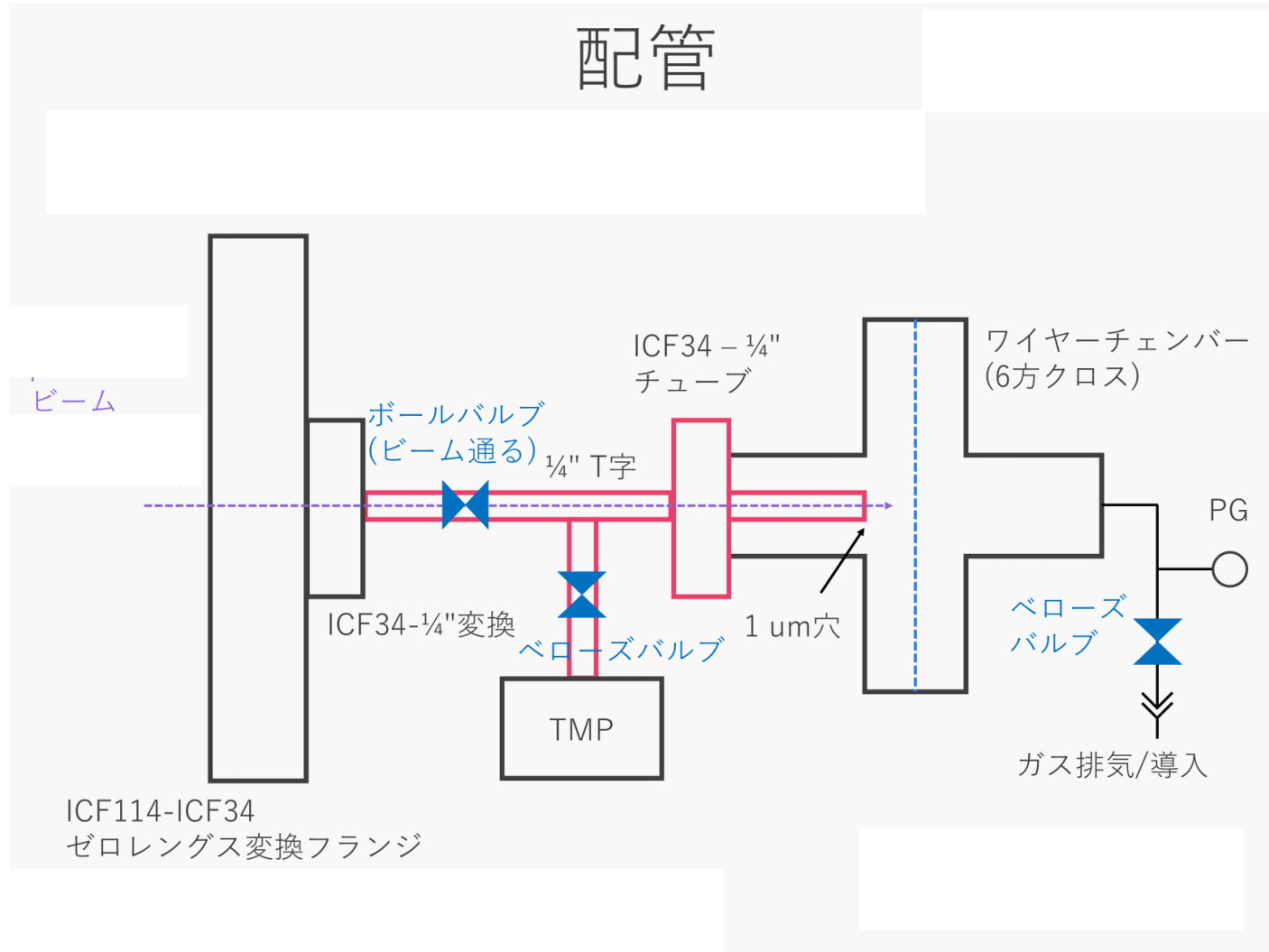


➤ ピークエネルギーの差  
→ -2.55 %

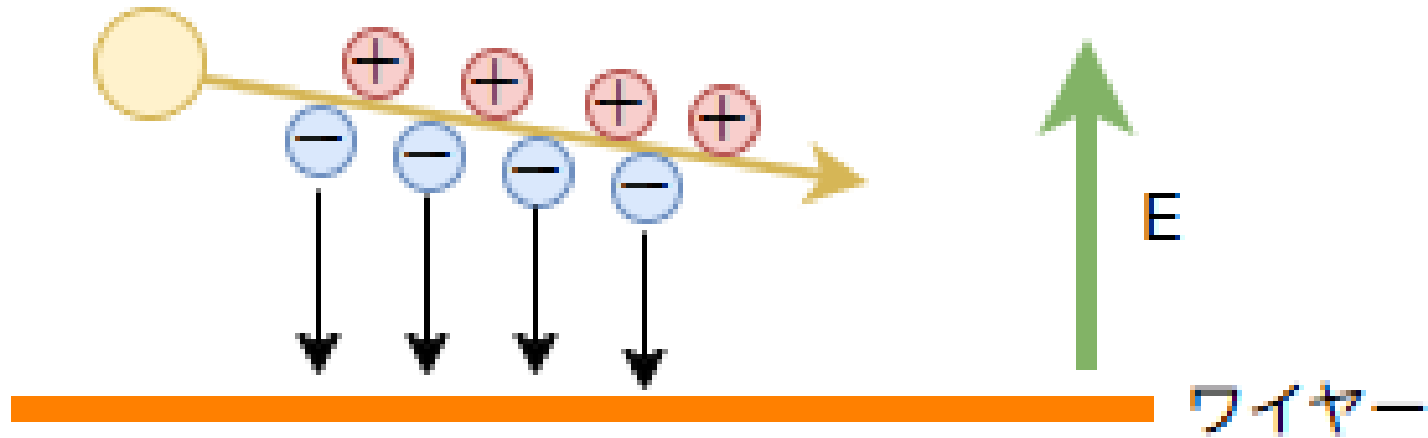
# Geant4 シミュレーション ジオメトリ



# 配管



# 検出原理



1. 荷電粒子がガスを電離
  2. Drift電場により電子が移動
  3. ワイヤー付近の強電場部分で雪崩増幅
- ⇒ 電荷信号検出

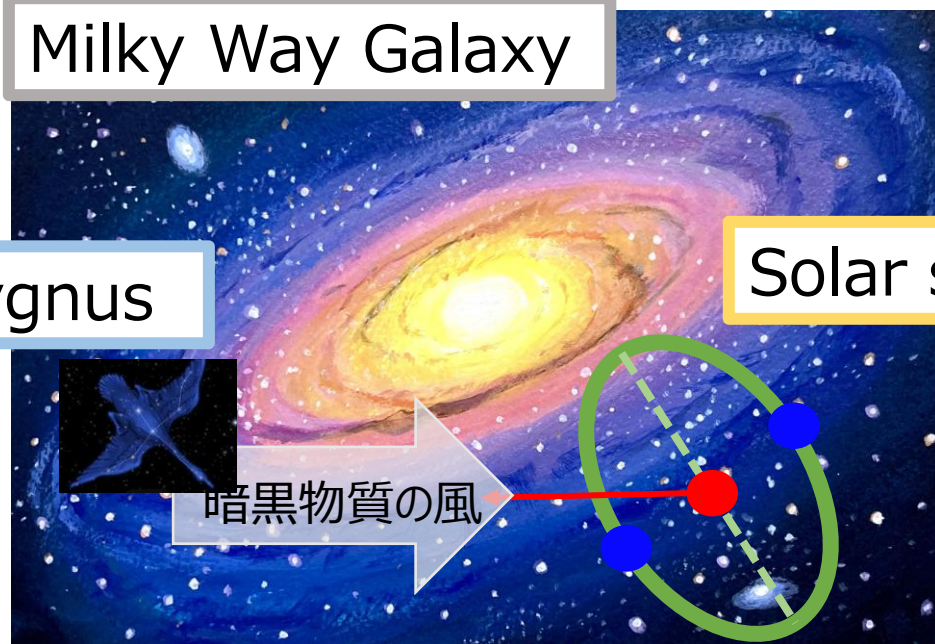
# 方向感度をもつ暗黒物質直接探索実験

## ●方向感度を持ったWIMP直接探索

Milky Way Galaxy

Cygnus

Solar system



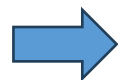
$V=230 \text{ km/s}$

## ●暗黒物質をWIMPと仮定して探索

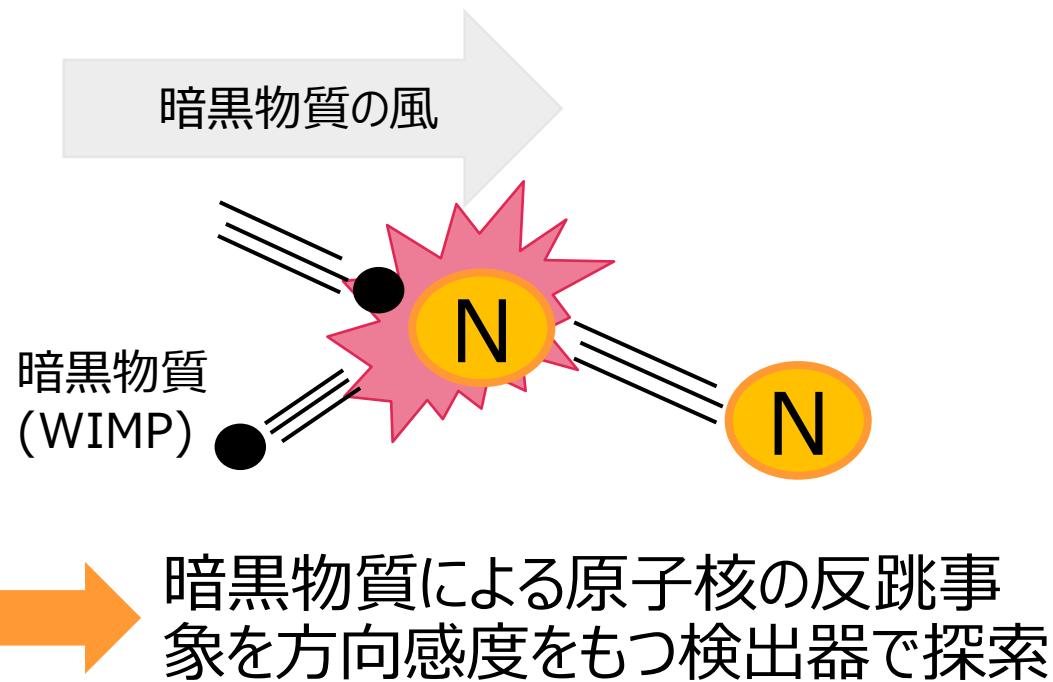
暗黒物質が天の川銀河全体を覆っている



太陽系が230km/sの速さで銀河を周回



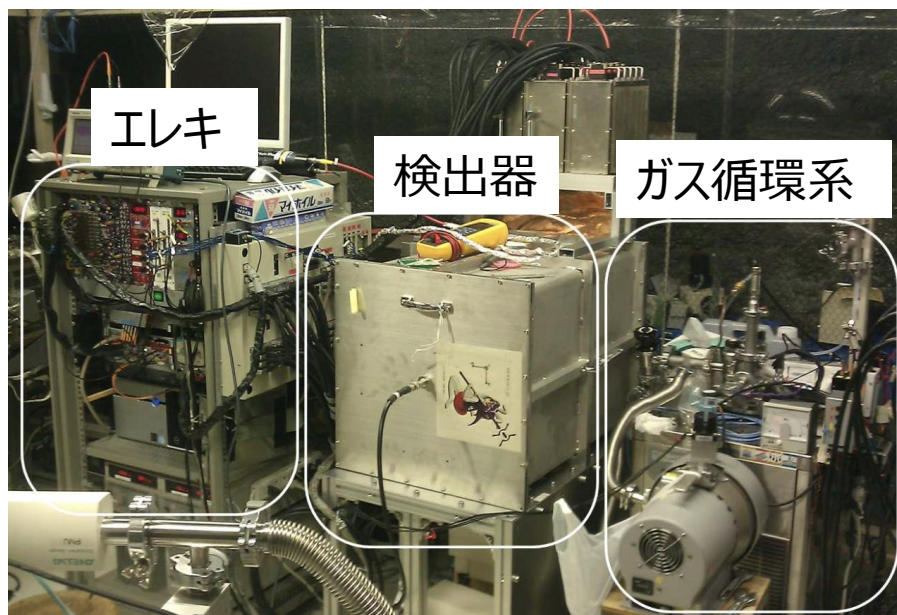
## ●検出したい事象



はくちょう座の方向から暗黒物質がやってくるように見える。反跳核分布が指向性をもつため暗黒物質の特定につながる

# NEWAGE実験

- 神岡鉱山地下実験室(LabB)にガス検出器保有  
⇒ $\mu$ -TPC



現在も絶賛稼働中！

