

# 高圧キセノンガスTPCにおける高精細飛跡 再構成のためのキセノンイオン検出効率 向上にかかる研究

---

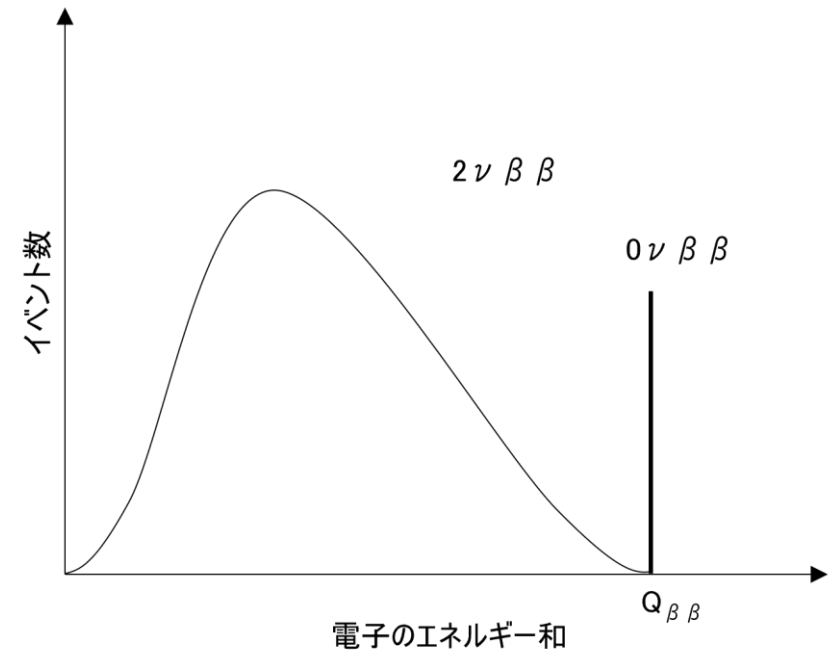
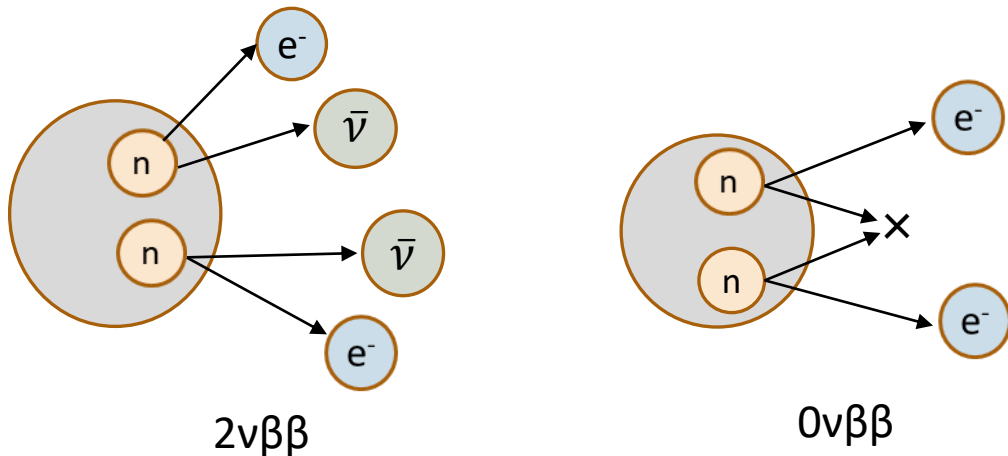
品川 響

東北大学 理学研究科 物理学専攻 素粒子実験加速器研究室

2022年1月31日

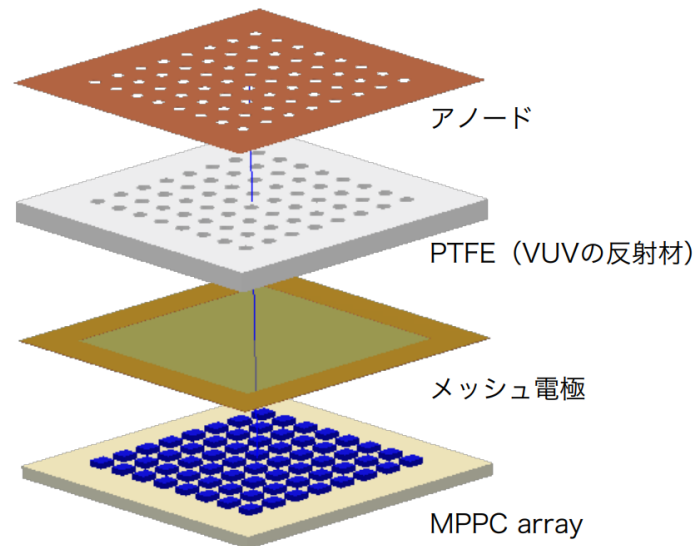
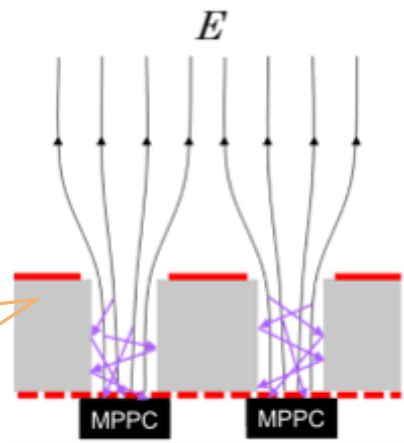
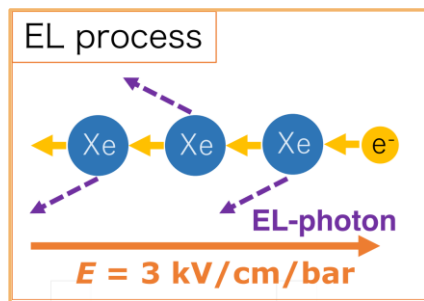
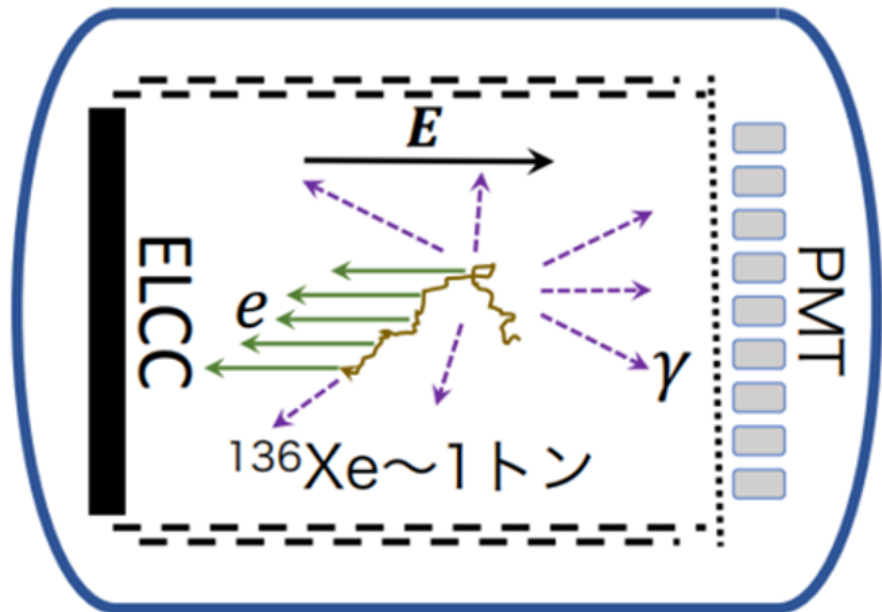
# ニュートリノを伴わない2重ベータ崩壊( $0\nu\beta\beta$ )

- ・ニュートリノはマヨラナ粒子(粒子=反粒子)か  
⇒標準理論を超えた物理への鍵
  - 宇宙の物質優勢:レプトジェネシス
  - ニュートリノの軽い質量:シーソー機構
- ・ニュートリノを伴わない2重ベータ崩壊( $0\nu\beta\beta$ )
  - ニュートリノがマヨラナ粒子であるときに起こり得る
  - 非常に稀な現象大質量崩壊核・高エネルギー分解能・低背景事象環境が必要



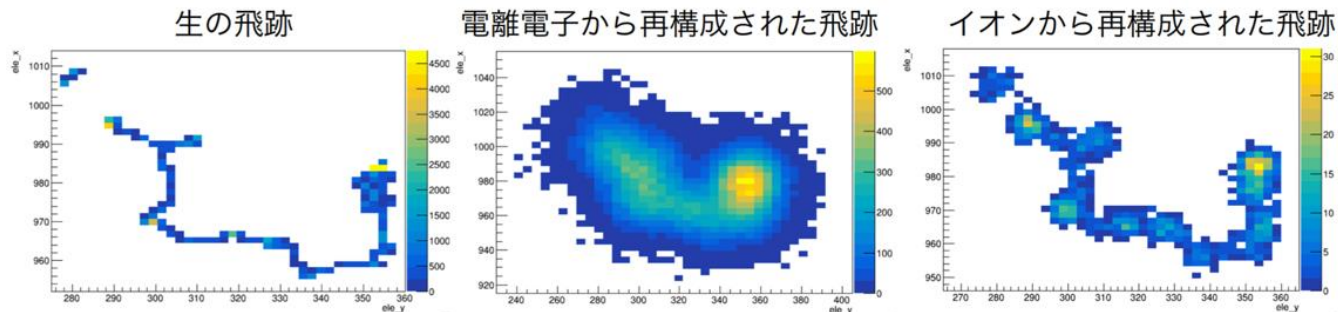
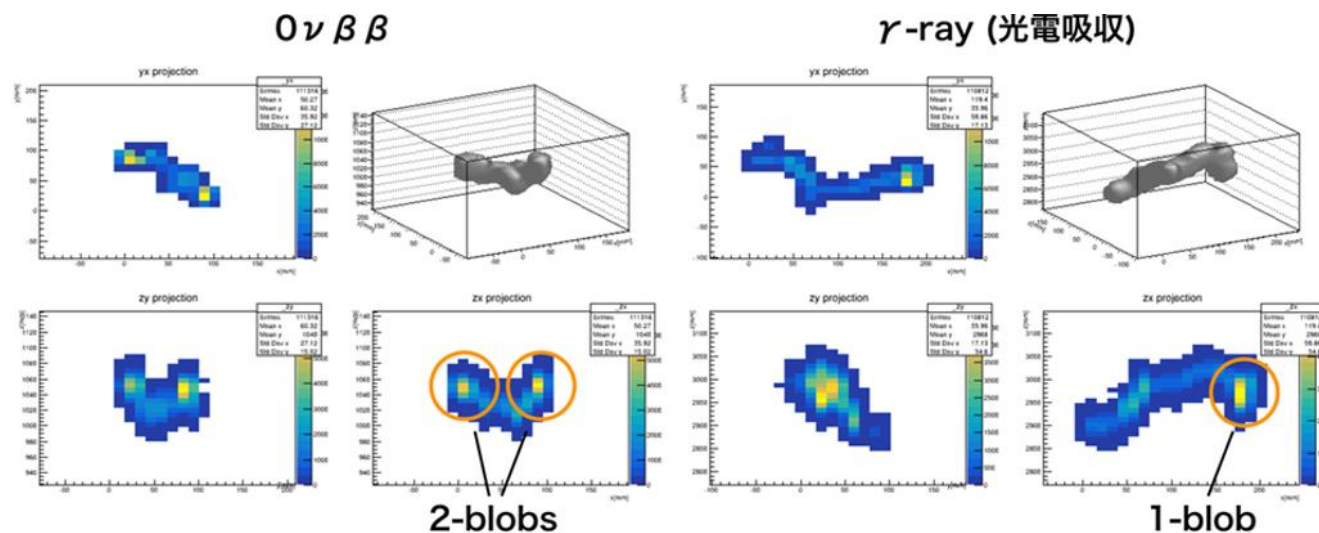
# AXEL実験

- 高圧キセノンガスTPCを用いた $0\nu\beta\beta$ 探索実験
  - $^{136}\text{Xe}$ 崩壊核@8atm
  - ELCCによるEL光読み出し
  - 飛跡再構成
    - ⇒ 大質量崩壊核・高エネルギー分解能・低背景事象環境を実現
- ELCC (Electroluminescence Light Collection Cells)
  - 電子読み出し機構
  - EL過程 = 電場で加速した電子の移動距離に対し線形な増幅過程
  - セル構造



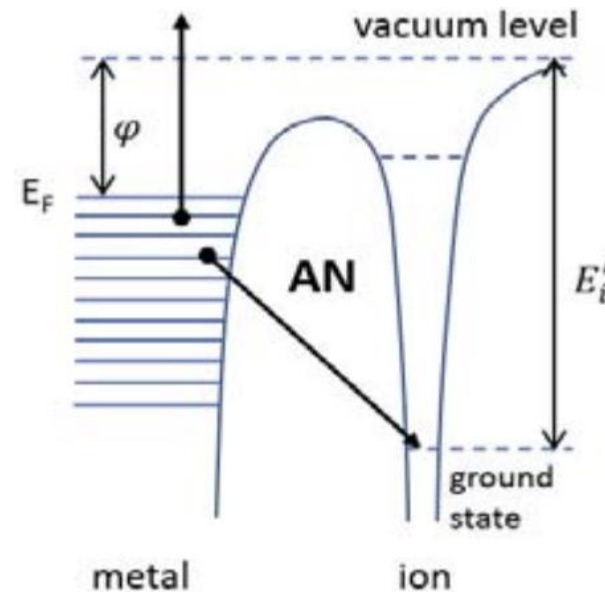
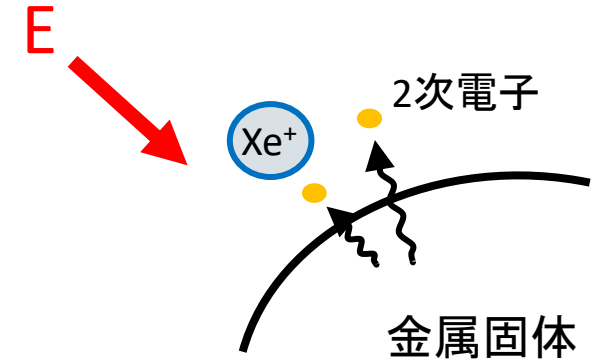
# 飛跡再構成

- ・電子ドリフトによる飛跡再構成
  - Xeシンチレーション光とEL光の検出時間差で縦位置、ELCCの検出チャンネルによって横位置を特定することで飛跡を再構成
- ・Xe<sup>+</sup>イオンによる飛跡再構成
  - 電子と同じ原理で飛跡再構成可能
  - 拡散係数  $D_{ion} \sim \frac{1}{100} D_e$   
⇒より精確な飛跡が得られる



# Xe<sup>+</sup>イオン検出原理

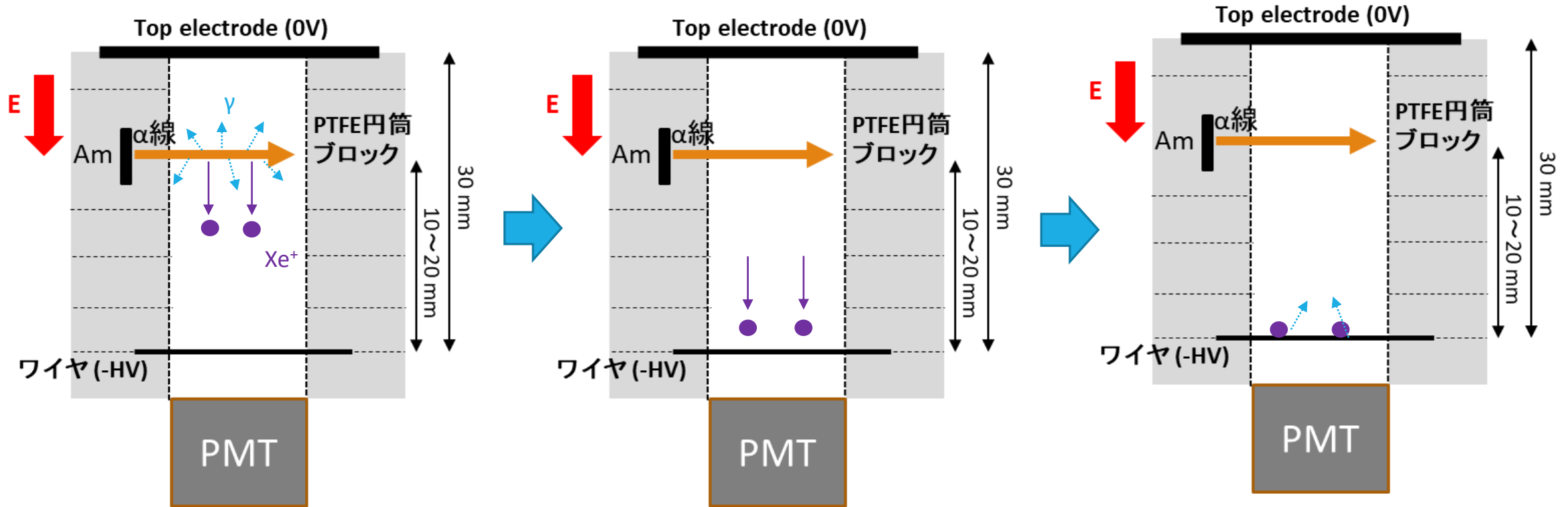
- Xe<sup>+</sup>イオンをXe原子を励起するまで加速することは難しい  
⇒イオンの衝突により金属から放出する2次電子によってEL過程を起こす
- オージェ中和(AN)  
⇒本実験で用いたタングステン(W)、モリブデン(Mo)で発生する2次電子放出過程
- 仕事関数 $\phi$ の小さい金属が必要: W、Moを用いた
- イオンの加速は難しく増幅しづらい + 2次電子放出過程を挟む  
⇒安定して検出できる技術確立が必要



※ L. Arazi, 2018  
J. Phys : Conf. Ser.  
1029 012004

# Xe<sup>+</sup>イオン検出のセットアップ

- ・容積約3Lの円筒型気密容器をXeガス@1atmで満たして運用
- ・<sup>241</sup>Am α線源によりXeシンチレーション光(イベントトリガー)とXe<sup>+</sup>イオンを生成
- ・上部電極とWないしMoワイヤにより形成した電場でXe<sup>+</sup>イオンをワイヤにドリフト
- ・Xe<sup>+</sup>イオンがワイヤに衝突し2次電子を放出
- ・ワイヤ近傍で集約した高電場により2次電子が発生したEL光をPMTで検出



α線によりXe<sup>+</sup>イオン、Xeシンチレーション光が生成

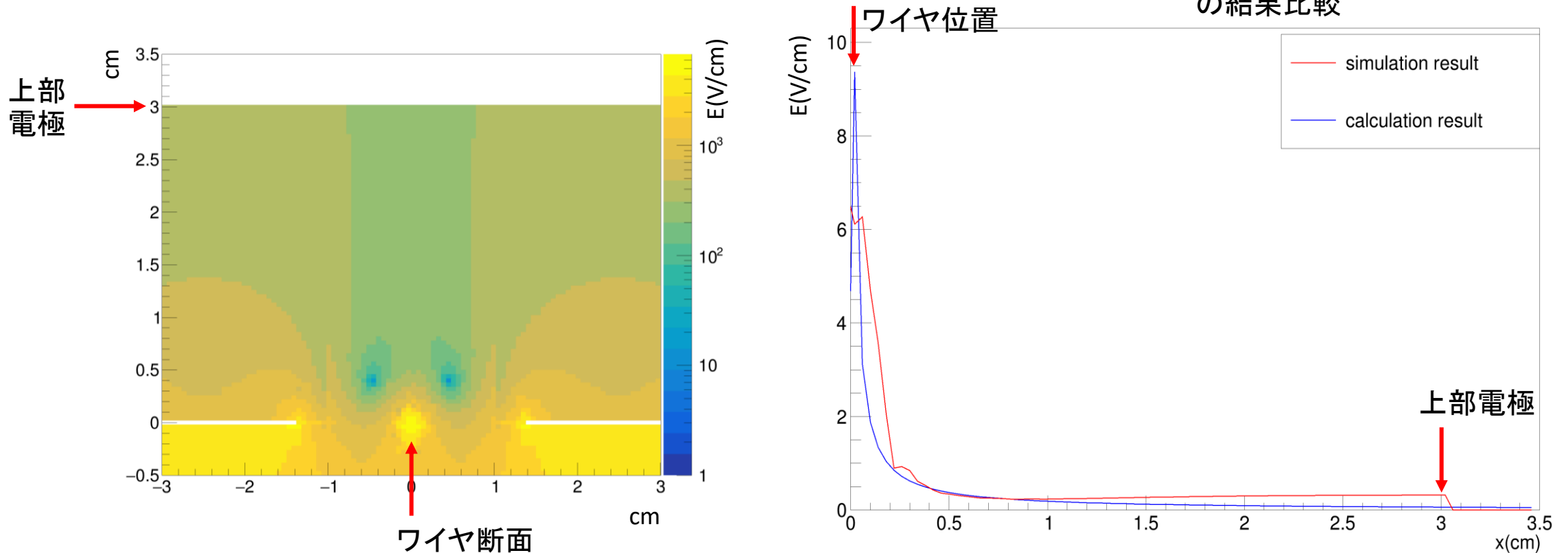
電場によりXe<sup>+</sup>イオンをワイヤにドリフト

ワイヤから2次電子が放出し、EL光が発生

# 本セットアップにおける電場強度の見積り

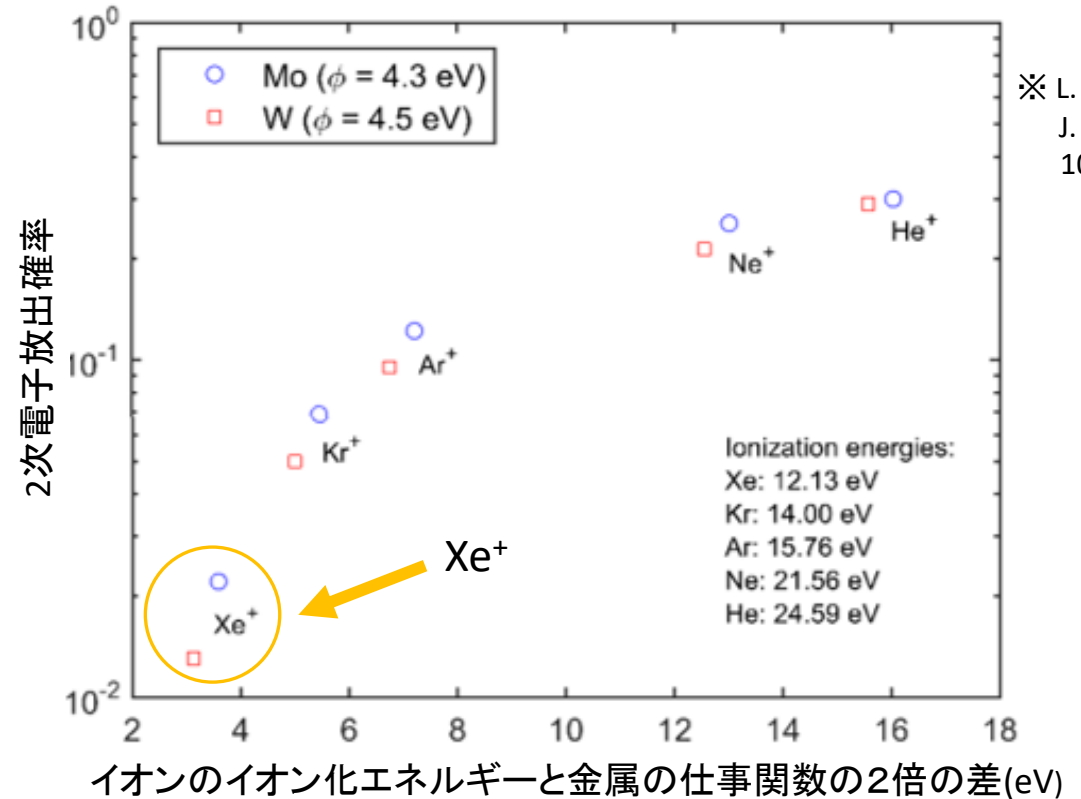
- Garfield++シミュレーションと円筒近似での手計算により求めた
  - ⇒ ワイヤ近傍ではシミュレーションが粗い、ドリフト領域では円筒近似できない
  - ワイヤ近傍: ワイヤ中心の円筒座標で近似  $\Rightarrow E(x) = \frac{V}{\ln \frac{R}{r}} \frac{1}{x}$  r: ワイヤ半径  
R: 電極間距離
  - ドリフト領域: GarField++シミュレーション  $\Rightarrow$  ドリフト電場 = 258 V/cm

↓ 電場の計算とシミュレーションの結果比較



# 検出Xe<sup>+</sup>イオン数の見積り

- α線照射による2次電子放出数
  - α線が有感領域で落とすエネルギー: 4.6MeV
  - キセノン電離過程のW値: 22.1eV
  - 2次電子放出確率: 1%(タングステン)  
 $4.6 \text{ MeV} / 22.1 \text{ eV} \times 0.01 = 2.1 \times 10^3 \text{ 個/event}$
- AXELグループの先行実験の検出数
  - 7.8 個/event
  - ⇒ 検出効率の向上が課題
  - 検出数が少ない原因の候補
    - ・測定や解析でのスレシールド設定
    - ・ワイヤの表面状態





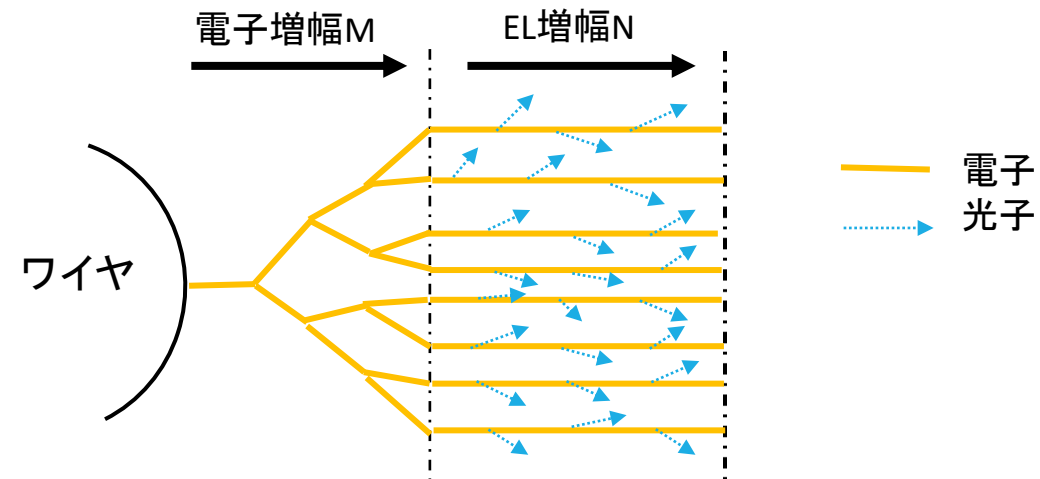
## 2次電子1個の発光光量の見積り

- ・電子増幅率(なだれ増幅)M、放出2次電子1個が生成するEL光光子数Nから、2次電子1個が生じる光子数の見積り(印加電圧:-1500 V)

| ワイヤ線径                 | 電子増幅率M | EL光子数N | 総光子数 |
|-----------------------|--------|--------|------|
| $\Phi 20 \mu\text{m}$ | 32     | 168    | 5376 |
| $\Phi 30 \mu\text{m}$ | 7      | 167    | 1169 |

⇒ワイヤ線径 $\Phi 20 \mu\text{m}$ から $\Phi 30 \mu\text{m}$ で約5倍の光量差

⇒EL光子数はほぼ変わらず

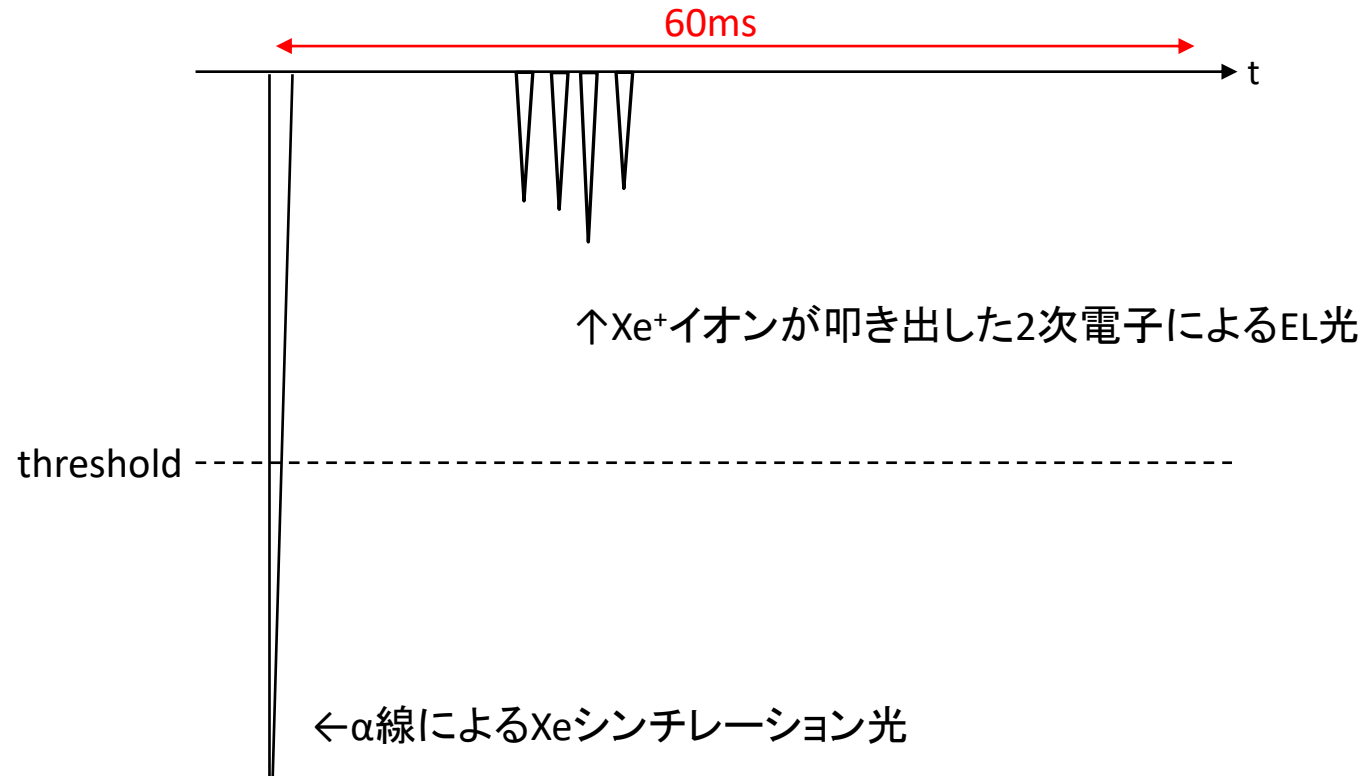


## 本研究で行ったこと

- 1: ワイヤ加熱によるワイヤ表面状態の改善の試み
- 2: ワイヤ種別のXe<sup>+</sup>イオン検出効率評価
- 3: Xe<sup>+</sup>イオン検出効率の電場依存性
- 4: ワイヤ表面へのMgO薄膜形成による改善の試み

# 典型的なイベント波形

- ・シンチレーション光のパルス(トリガーパルス)がイベントトリガー
- ・1イベント=60msの中に、数~数十個のパルスが含まれる
- ・Xe<sup>+</sup>イオン1個につき1パルスとみなせる

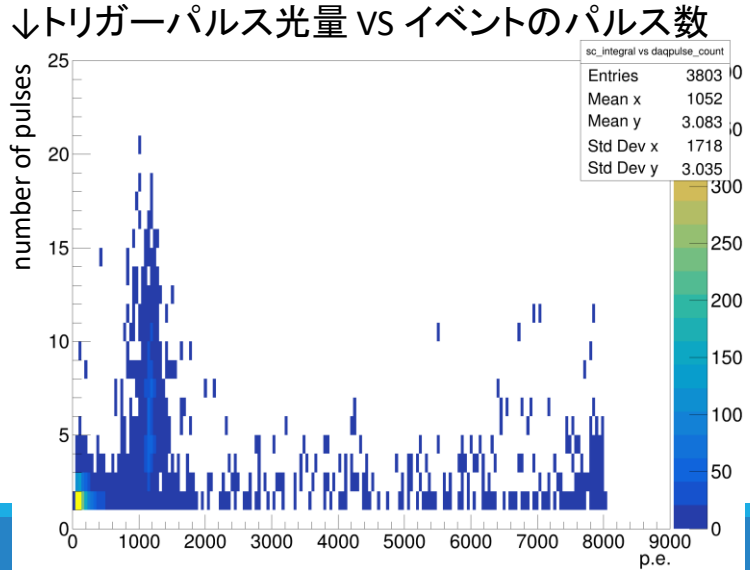
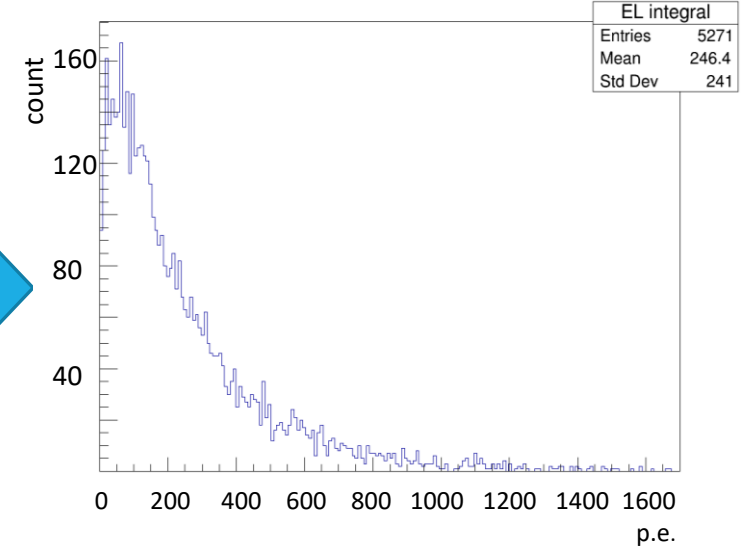
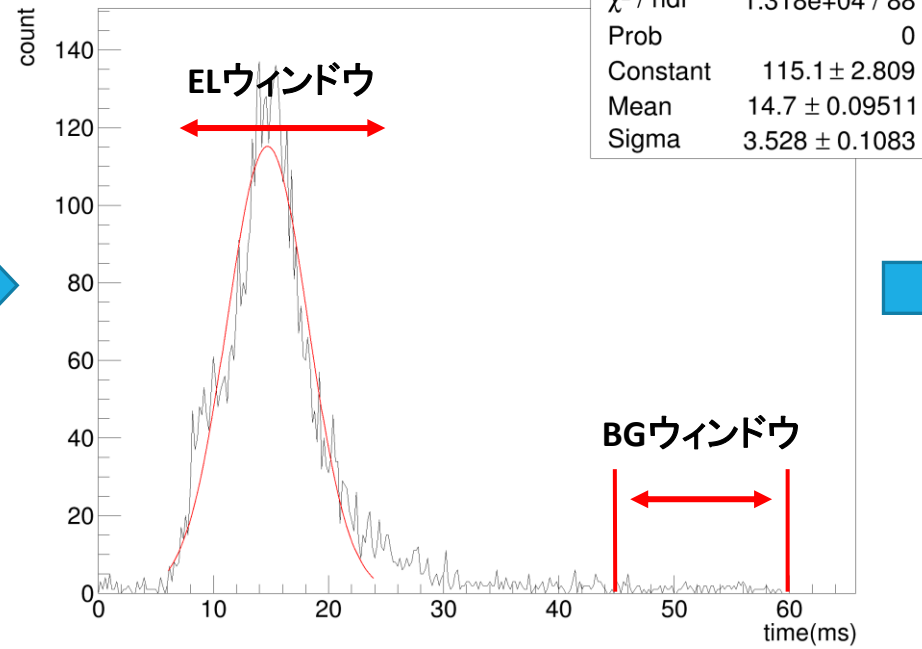
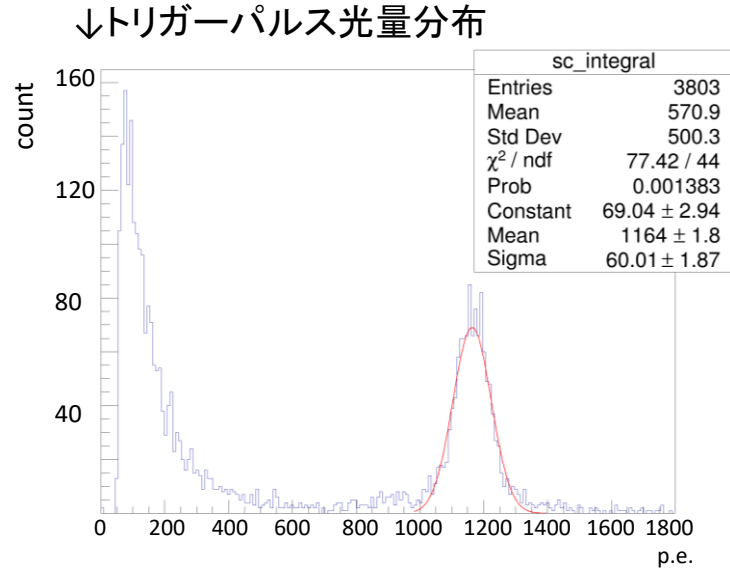


# 典型的な解析手法(先行実験再現セットアップ)

トリガーパルス光量での $\alpha$ 線イベント選定

検出タイミングによるXe<sup>+</sup>イオン信号検出

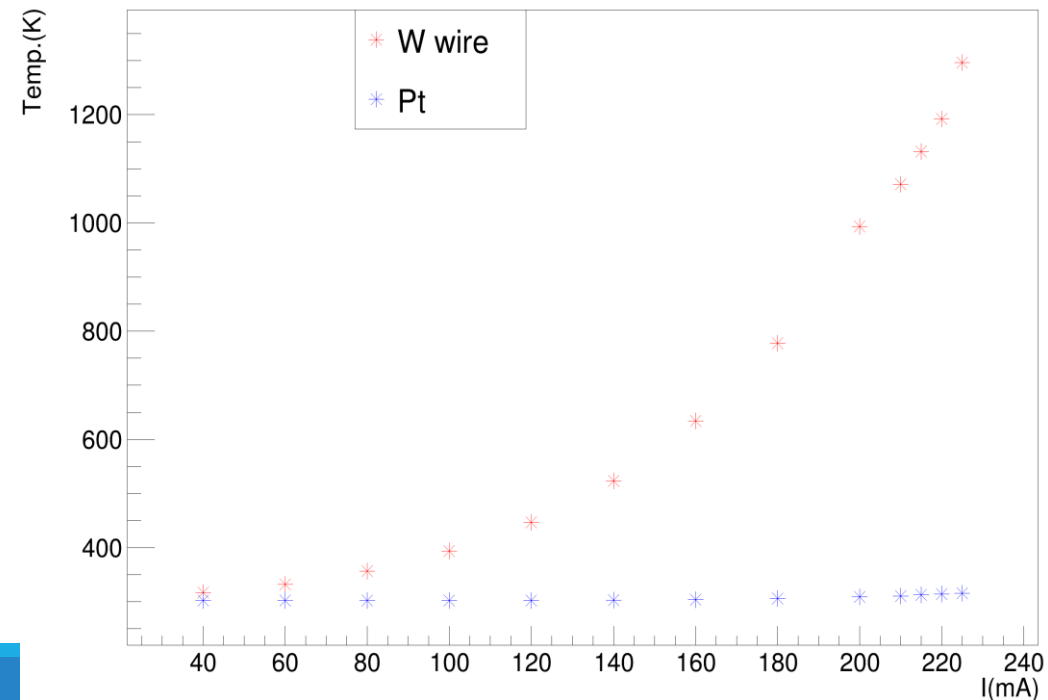
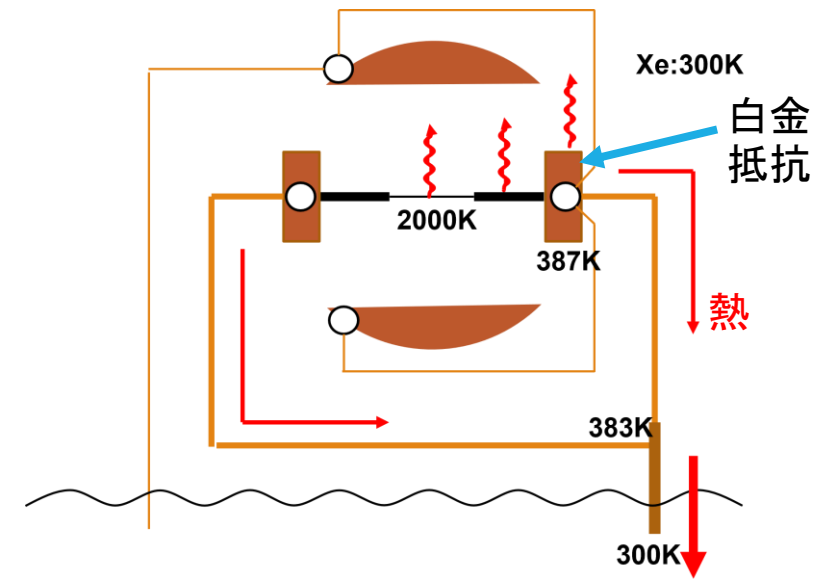
ELウィンドウ内のパルスの光量



- イベントレート = 取得した全イベント / 測定時間 : 0.0654 Hz
- 検出Xe<sup>+</sup>イオン数 : 4.25 個/event (先行実験: 7.8 個/event)
- Xe<sup>+</sup>イオンパルス光量 : 253 photon/pulse  
 ↑BGウィンドウ内の結果をELウィンドウの時間幅に換算し、BGの寄与を差し引いて計算
- BGパルス数 : 0.31 pulse/event

# 1: ワイヤ加熱のためのセットアップ変更

- ・測定前に電流印加によりワイヤを加熱したい
- ・セットアップ変更点
  - Cu電極保護ワイヤ(Moφ0.3mm)を溶接
  - PTFE→アルミナ
  - 加熱導線
  - ワイヤ抵抗測定→ワイヤ温度モニタ
  - 白金抵抗温度計→Cu電極温度モニタ
- ・耐熱の見積りと加熱試験
  - 右上図の放熱経路を考え平衡状態の温度を計算  
⇒問題なさそう
  - アルゴン@1atm中で加熱試験  
⇒ワイヤ温度1300Kでワイヤ切断  
⇒Cu電極温度は計算値を下回り、耐熱性能確認

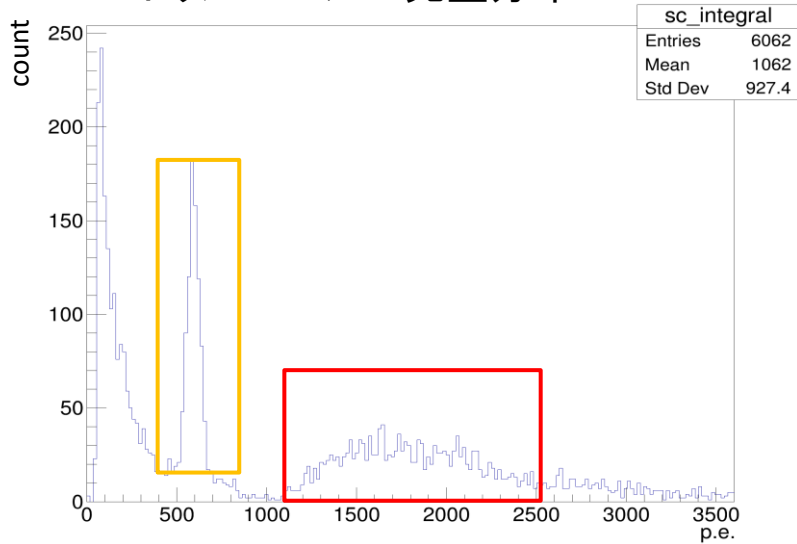


↑見積り計算の結果

←加熱試験の結果

# 加熱セットアップの結果

## トリガーパルス光量分布

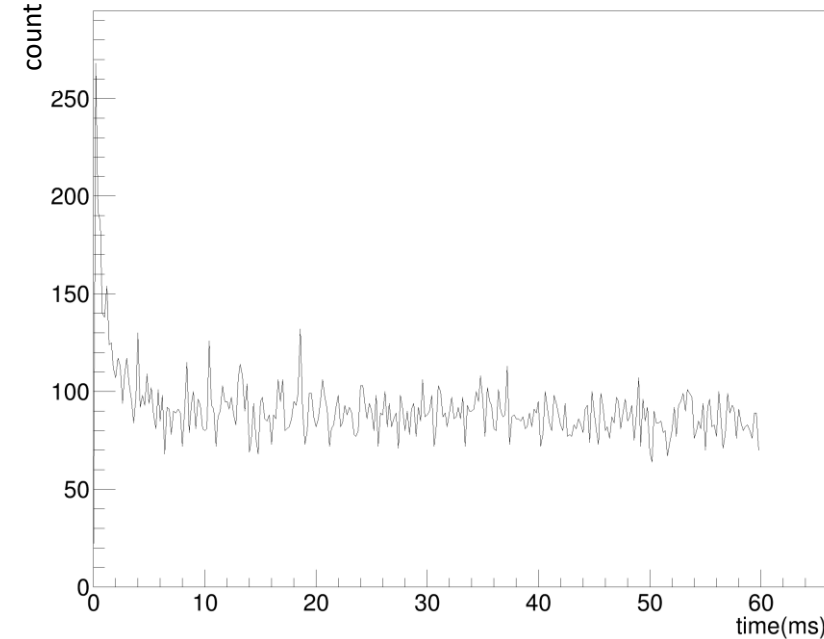
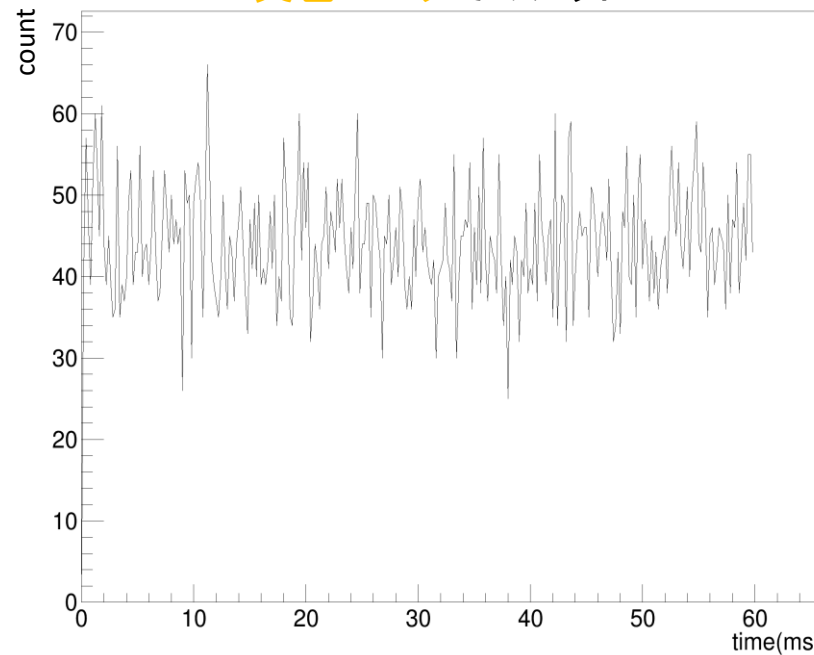


- ・トリガーパルスの光量、イベントに含まれるパルス数での判別が不可
- ・ $\alpha$ 線シンチレーション光の候補となるピークでカット
- ・いずれのカットでも信号ピークは見られず  
⇒加熱のランに至らず
- ・原因の候補
  - ワイヤ状態: 表面汚染
  - アルミナ

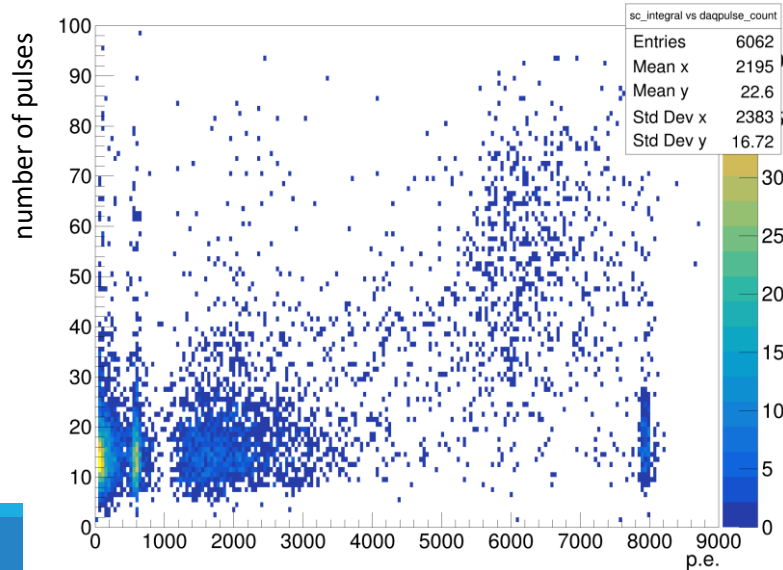
## パルスの検出タイミングのヒストグラム

### 黄色ピークでのカット

### 赤ピークでのカット



## トリガーパルス光量 VS イベントのパルス数



# 原因特定のための測定

- ・2つの追加測定を行い、原因を探った
- ・アルミナがBGを増加 / Xe<sup>+</sup>イオン信号を消す原因
  - アルミナを用いたランのみでBGイベント、BGパルスが増加
- ・アルミナ
  - 蛍光特性: BGイベント増加?
  - 高い2次電子放出係数: Xe<sup>+</sup>イオンを中和?
- ・ワイヤ表面汚染は、検出Xe<sup>+</sup>イオン数、Xe<sup>+</sup>イオンのパルス光量を減少させる
  - ワイヤの仕事関数の変化か

⇒アルミナを用いてはならない

|          | アルミナブロック枚数(枚) | ワイヤ | イベントレート(Hz) | 検出Xe <sup>+</sup> イオン数(pulse/ev) | Xe <sup>+</sup> イオンパルス光量(photon/pulse) | BGパルス数(pulse/ev) |
|----------|---------------|-----|-------------|----------------------------------|----------------------------------------|------------------|
| 先行実験再現   | -             | 非溶接 | 0.0654      | 4.25                             | 253                                    | 0.31             |
| 加熱セットアップ | 2             | 溶接  | 0.0971      | -                                | -                                      | 15               |
| 表面汚染ワイヤ  | -             | 溶接  | 0.0650      | 1.04                             | 143                                    | 0.25             |
| アルミナ     | 1             | 非溶接 | 0.0773      | -                                | -                                      | 1.1              |

## 2:ワイヤ種別のXe<sup>+</sup>イオン検出効率測定

- ・ワイヤ線径依存性
  - ⇒ワイヤ近傍の電場強度
  - EL増幅率
  - 電子増幅率
  - 2次電子放出確率:電場の大きさの違いによる後方散乱確率の変化
- ・ワイヤ素材による違い
  - ⇒仕事関数
  - W:4.5eV
  - Mo:4.3eV
  - ⇒どれほど影響するか



## 3つのラン結果比較

| ワイヤ      | 電場(kV/cm) | イベントレート(Hz) | シンチレーション光量(photon/pulse) | 検出Xe <sup>+</sup> イオン数(pulse/ev) | Xe <sup>+</sup> イオンパルス光量(photon/pulse) | BGパルス数(pulse/ev) |
|----------|-----------|-------------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------------|------------------|
| W-φ20μm  | 187       | 0.0654      | 1164                     | 4.25                             | 253                                    | 0.31             |
| W-φ30μm  | 131       | 0.0673      | 1572                     | 0.0854                           | 7.08                                   | 0.21             |
| Mo-φ30μm | 131       | 0.0636      | 1489                     | 0.396                            | 74                                     | 0.20             |

### W-φ20μm vs W-φ30μm

- ワイヤを太くすることにより、
- ・信号パルス数: 約1/50
    - ワイヤ近傍の電場強度の違い
  - ・信号パルス光量: 約1/36
    - 光量の違いは5倍のはず(p.9)
    - 5倍以上となる理由は不明

### W-φ30μm vs Mo-φ30μm

- W→Moにすることで、
- ・信号パルス数: 約4.6倍
    - 仕事関数の違い
  - ・信号パルス光量: 約10倍
    - 2次電子の運動エネルギーの違い?

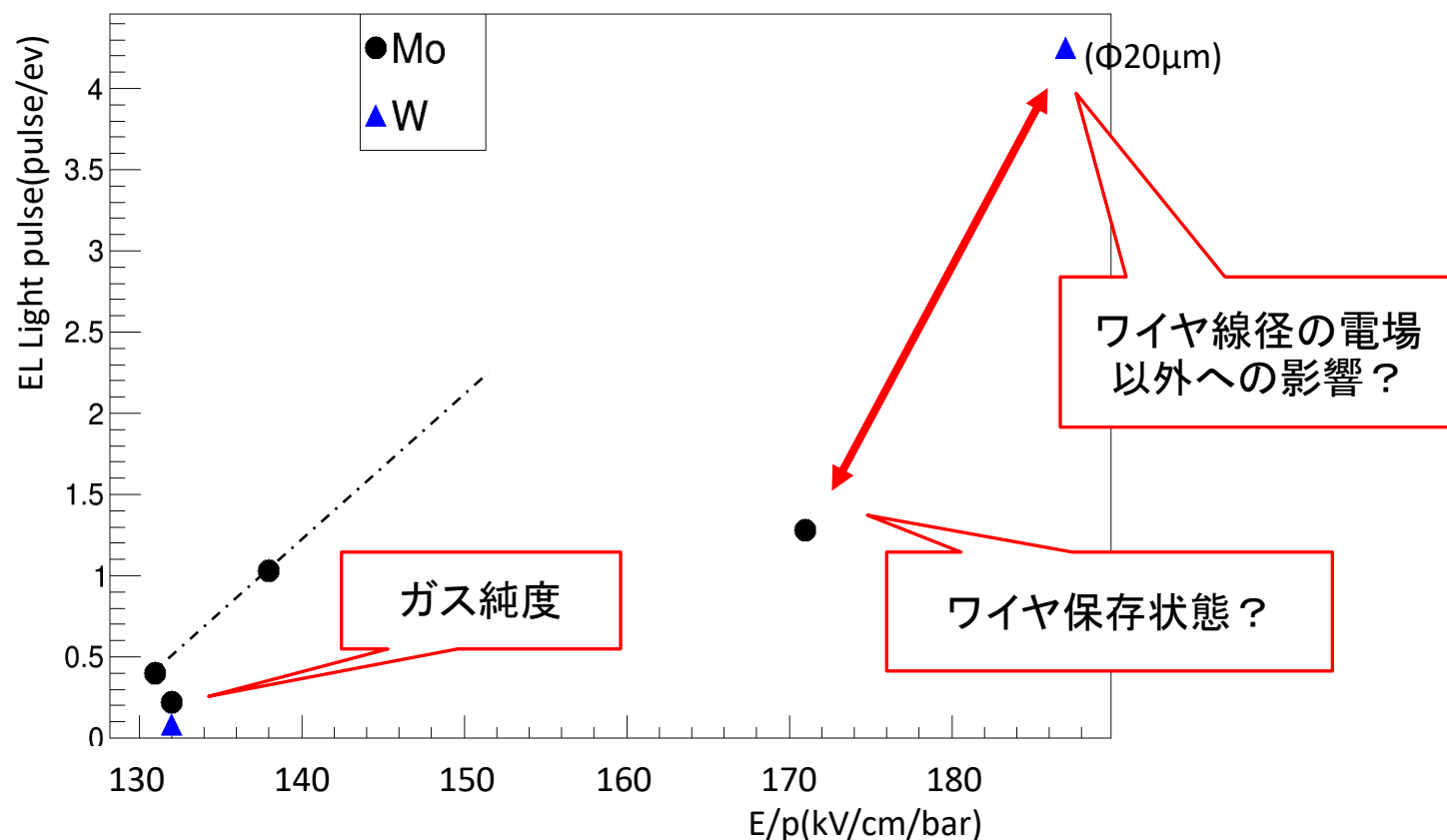
### 3: 電場依存性測定

- ・印加電圧を変化させ、電場依存性を測定
- ・ワイヤ: Mo- $\phi$ 30 $\mu$ m

| 電圧(V) | 圧力(bar) | 換算電場(kV/cm/bar) | 水分量(ppm) | イベントレート(Hz) | BGパルス数(pulse/event) |
|-------|---------|-----------------|----------|-------------|---------------------|
| -1500 | 1.00    | 131             | 0.69     | 0.0636      | 0.20                |
| -1650 | 1.04    | 138             | 1.07     | 0.0661      | 0.27                |
| -1800 | 1.19    | 132             | 2.48     | 0.0664      | 0.24                |
| -1950 | 1.00    | 171             | 1.16     | 0.0620      | 0.28                |

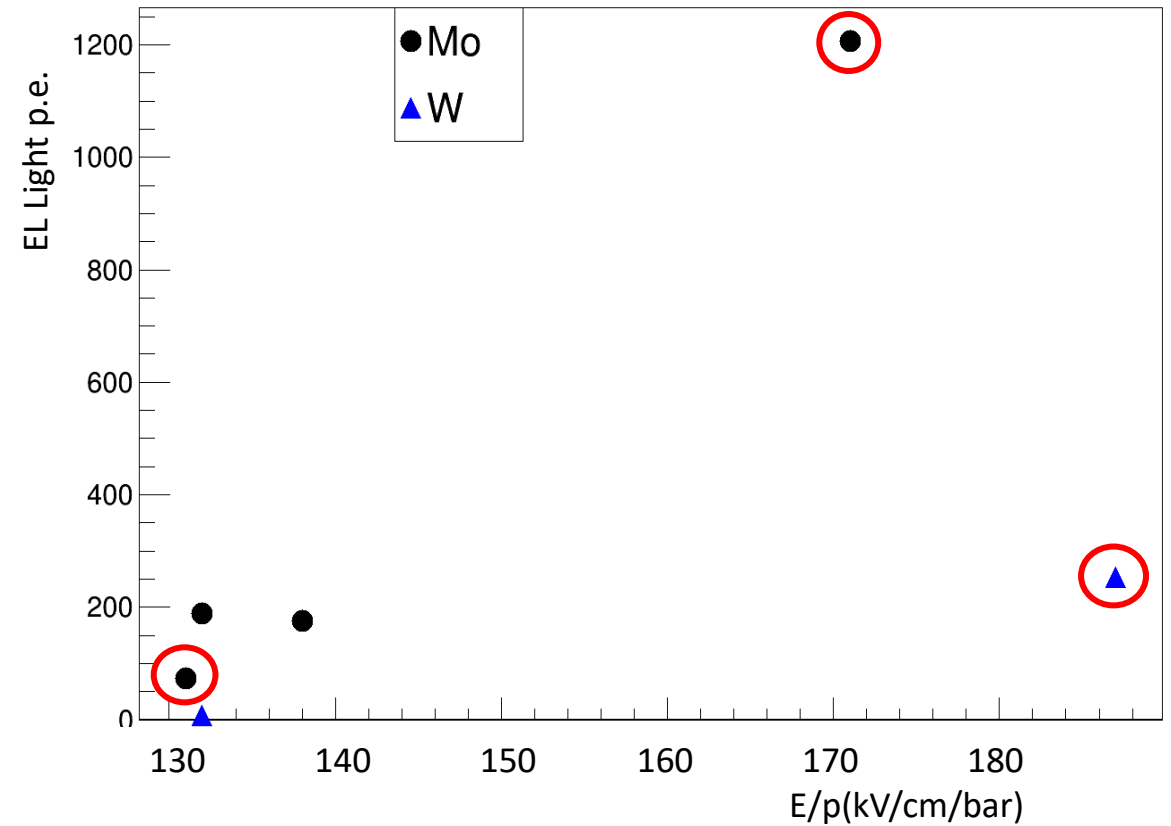
#### 検出Xe<sup>+</sup>イオン数(pulse/event)

- ・イベントあたりの検出Xe<sup>+</sup>イオン数は電場におよそ比例
- ・換算電場132(kV/cm/bar)の点は、ガス純度の悪化が検出イオン数を下げていそう
- ・換算電場171(kV/cm/bar)以上の2点はどちらが電場依存性をよく表すかは不明
  - ワイヤ保存状態による悪化?
  - ワイヤ線径の電場以外への影響により上昇?  
⇒測定コンディションを揃えたランが必要



## 電場依存性 – Xe<sup>+</sup>イオンパルス光量

- ・代表して**赤丸**の3つのランの電子増幅とEL増幅から見積った発生光子数と検出光子数を比較
  - 発生光子数と検出光子数の違いはPMTの立体角が主要因
  - ランの間の光子数の比率を見ると、予想と大体一致

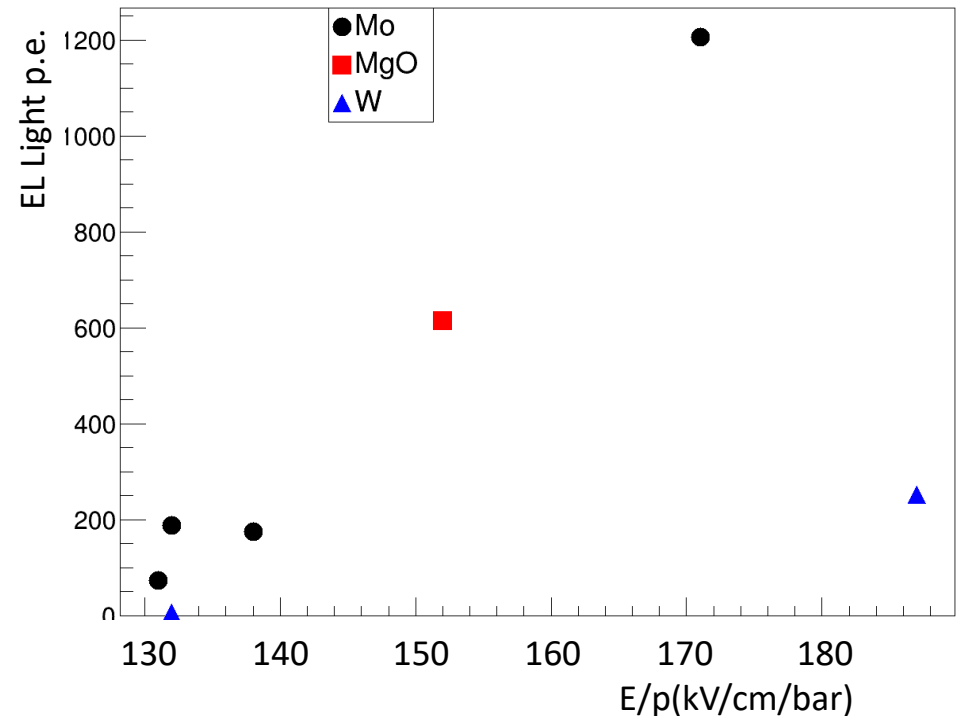
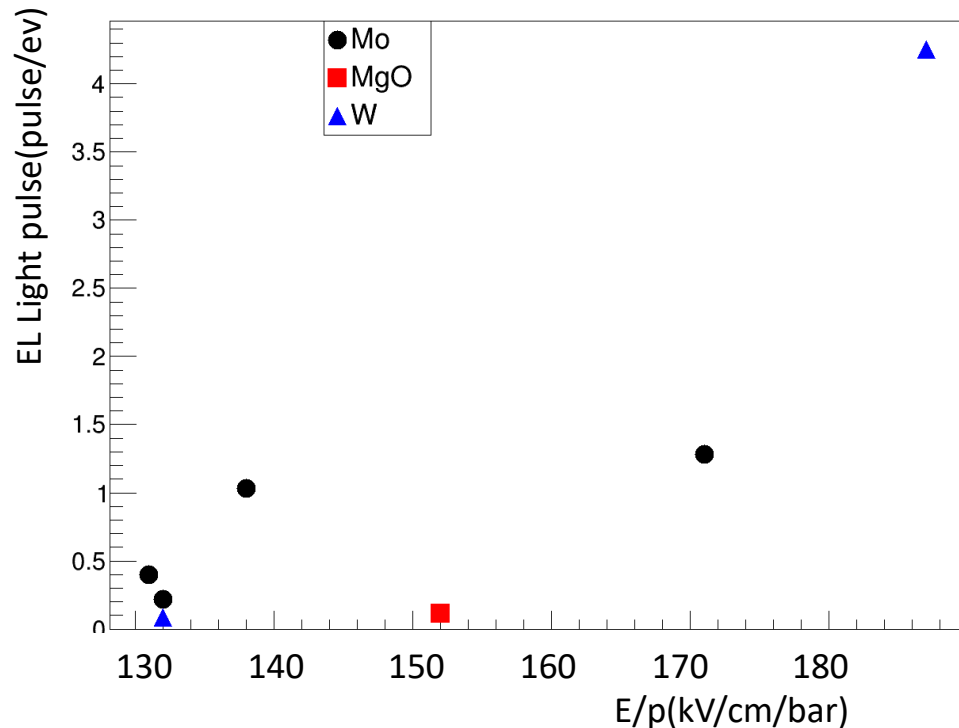


| ワイヤ線径( $\mu\text{m}$ ) | 電圧(V) | 電子増幅(個) | EL増幅(photon) | 発生光子数(個) | 検出光子数(個) |
|------------------------|-------|---------|--------------|----------|----------|
| $\Phi 20$              | -1500 | 32      | 168          | 5376     | 253      |
| $\Phi 30$              | -1500 | 7       | 167          | 1169     | 74       |
| $\Phi 30$              | -1950 | 56      | 227          | 12712    | 1207     |

## 4: MgO薄膜による影響

- Mo-φ30μmワイヤに15nmのMgO薄膜を形成  
⇒2次電子放出が上昇するという報告
- EL光パルス数(pulse/event)は大きく減少  
⇒原因は不明
- EL光子数(photon/pulse)は有意な影響は見られず  
⇒コンシステント
- 薄膜による2次電子放出上昇の効果は見られず

| コンディション         |       | 測定結果                                   |        |
|-----------------|-------|----------------------------------------|--------|
| 電圧(V)           | -1800 | イベントレート(Hz)                            | 0.0645 |
| 圧力(bar)         | 1.03  | BGパルス数(pulse/ev)                       | 0.24   |
| 換算電場(kV/cm/bar) | 152   | 検出Xe <sup>+</sup> イオン数(pulse/ev)       | 0.114  |
| 水分量(ppm)        | 1.02  | Xe <sup>+</sup> イオンパルス光量(photon/pulse) | 614    |



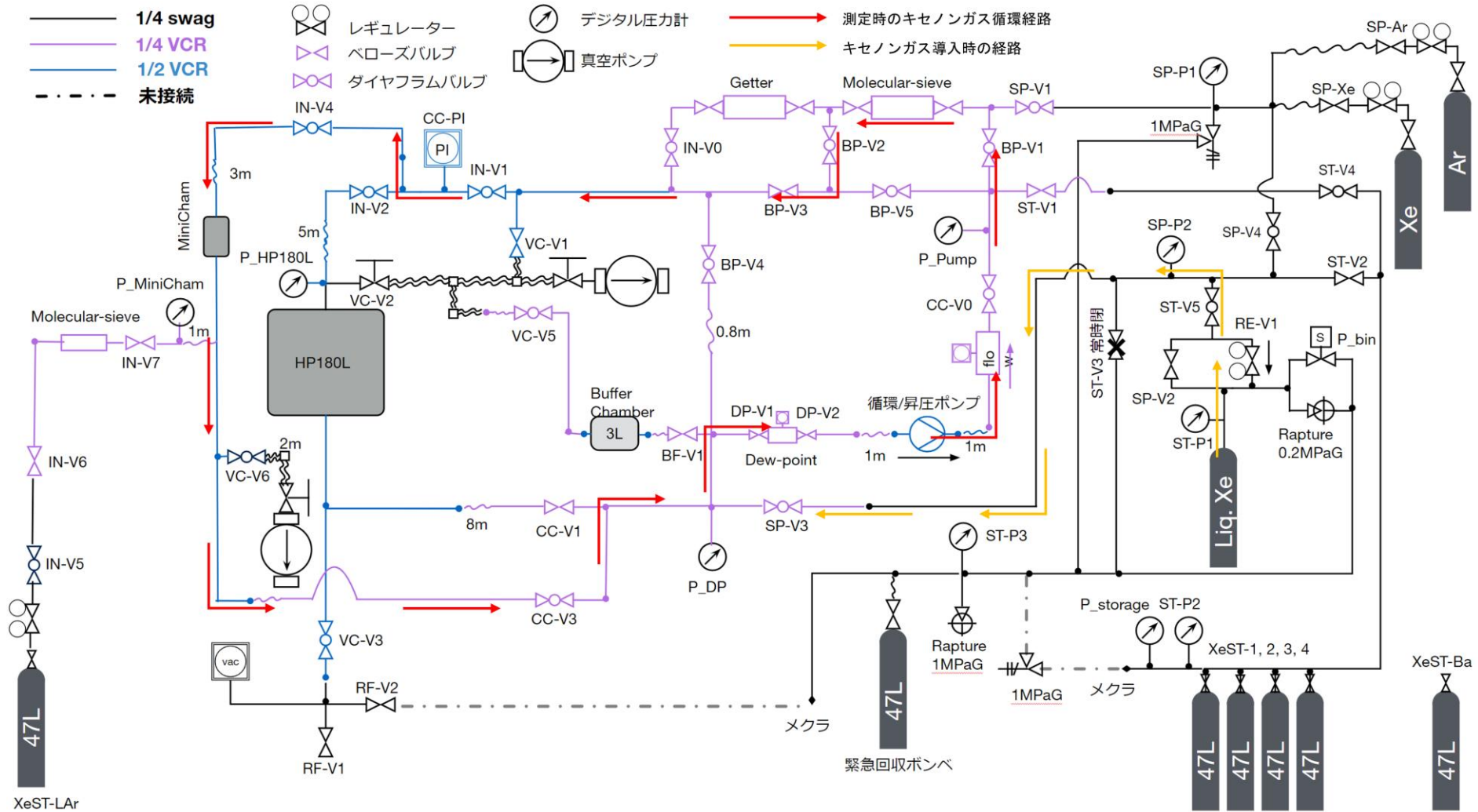
# まとめ

- ・AXEL実験:  $0\nu\beta\beta$ 探索
  - ⇒大質量崩壊核・高エネルギー分解能・低背景事象環境
- ・Xe<sup>+</sup>イオンによる飛跡再構成を目指す
- ・Xe<sup>+</sup>イオン検出効率の向上が課題
  
- ・ワイヤ加熱(ワイヤ表面汚染の除去)のセットアップ
  - ⇒耐熱のために用いたアルミナが原因でXe<sup>+</sup>イオン信号が見えず
  - ⇒加熱の影響は未測定
- ・ワイヤ線径依存性(ワイヤ近傍の電場強度)
  - ⇒太いワイヤ(W- $\phi 30\mu\text{m}$ )の方が検出効率が低い
- ・ワイヤ素材(仕事関数(W、Mo))
  - ⇒仕事関数の小さいワイヤ(Mo)の方が検出効率が高い
- ・電場依存性
  - ⇒電場強度が大きい方が検出効率が高い
- ・MgO薄膜ワイヤ(2次電子放出が高いとされる)
  - ⇒検出効率が下がった・さらなる測定が必要
- ・測定コンディションを整える技術確立が必要

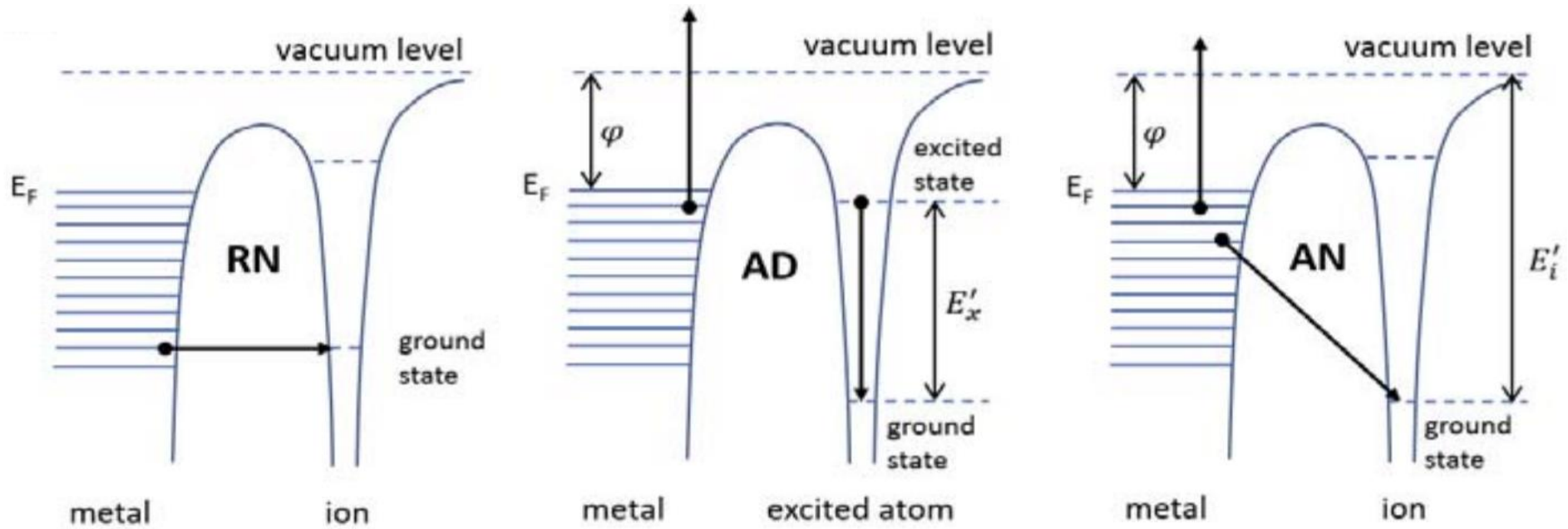
|                 |                                                     | 検出Xe <sup>+</sup> イオン数 |
|-----------------|-----------------------------------------------------|------------------------|
| ワイヤ線径           | $\Phi 20\mu\text{m} \rightarrow \Phi 30\mu\text{m}$ | 1/50                   |
| ワイヤ素材           | W $\rightarrow$ Mo                                  | 4.6倍                   |
| 換算電場(kV/cm/bar) | 131 $\rightarrow$ 171                               | 3.2倍                   |

# Back Up

# ガス系統



- ・陽イオン衝突による2次電子放出
  - キネティック放出
  - ポテンシャル放出
    - ・共鳴中和(RN) - オージェ脱励起(AD)
    - ・オージェ中和(AN) ⇒ W、Moで発生する過程





## 2次電子1個の発光光量の見積り

・電子増幅率(なだれ増幅)M

$$M = \exp \int_r^R p A e^{-\frac{Bp}{E}} dx$$
$$\frac{\alpha}{p} = A e^{-\frac{Bp}{E}}$$

・放出2次電子1個が生成するEL光光子数N

単位長さあたりのEL増幅率:  $\frac{dN}{dx} = (140 \frac{E}{p} - 116)p$

$$\Rightarrow N = \int_{x_t}^r 140 \frac{V}{\ln \frac{r}{R}} \frac{1}{x} - 116p dx = 140 \frac{V}{\ln \frac{r}{R}} \ln \frac{x_t}{r} - 116p(r - x_t)$$

$$x_t = \frac{V}{\ln \frac{r}{R}} \frac{140}{116p}$$

M: 電子増幅率

E: 電場(V/cm)

p: ガス圧力(bar)

r: ワイヤ半径(cm)

R: 電極間距離(cm)

$\alpha$ : 第一電離係数

A: 26 Torr/cm (Xe)

B: 350 V/cm $\cdot$ Torr (Xe)

N: 光子数(個)

$x_t$ :  $dN/dx > 1$ となる位置

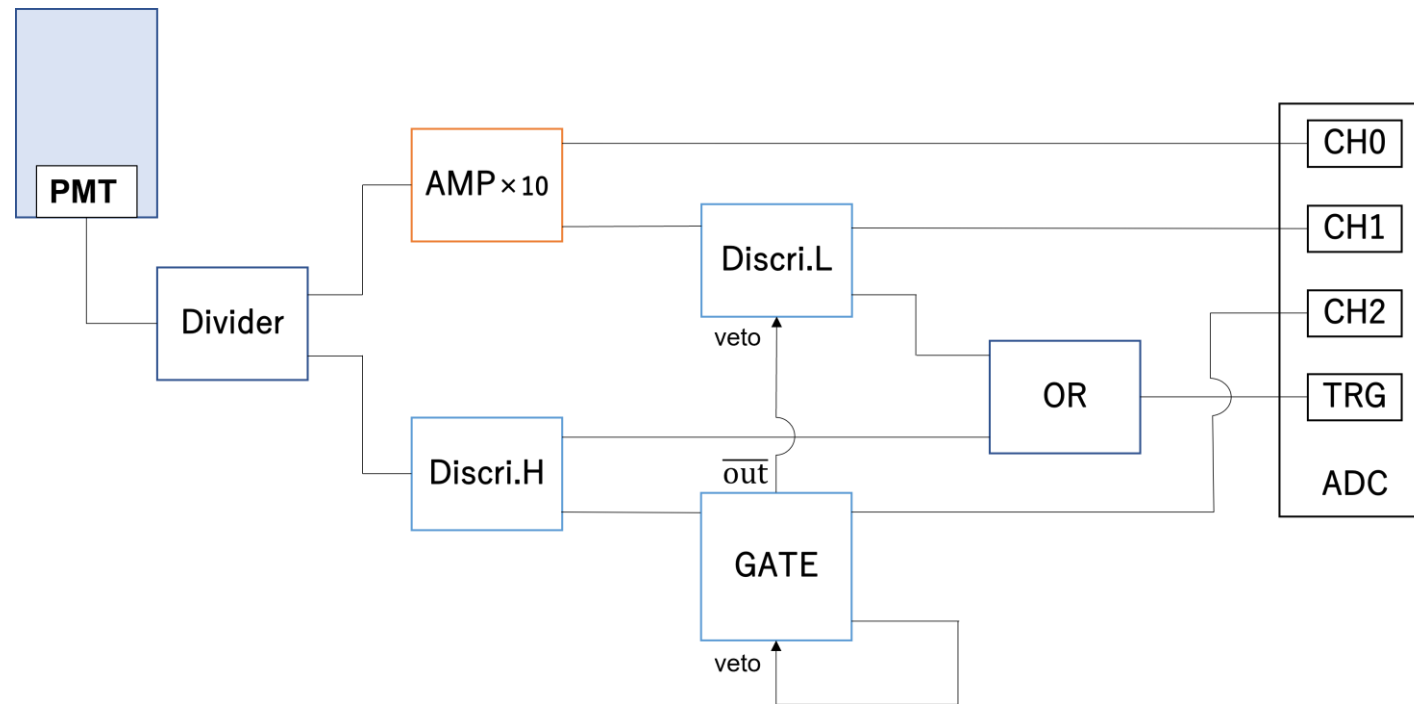
- Xe@1atm、ワイヤ $\phi$ 20 $\mu$ m、V=-1500V で M=32、N=168個

- Xe@1atm、ワイヤ $\phi$ 30 $\mu$ m、V=-1500V で M=7、N=167個

⇒ワイヤ線径 $\phi$ 20 $\mu$ mから $\phi$ 30 $\mu$ mで約5倍の光量差

# データ取得系

- ・ $\alpha$ 線シンチレーション光とXe<sup>+</sup>イオン信号の検出時間差  $\sim 10\text{msec}$   
⇒ イベントトリガーパルスと信号パルスをADCにおいては別々に取得
- ・解析でイベントを再構成



・耐熱の見積と加熱試験

- 右上図の放熱経路を考え平衡状態の温度を計算

$$\frac{Q}{A} = -k \frac{dT}{dx}$$

: 熱伝導方程式

$$\frac{Q}{A} = h(T_W - T_\infty)$$

: 熱伝達の式

Q: 熱量 (W)

x: ワイヤ長さ (m)

A: 断面積 (m<sup>2</sup>)

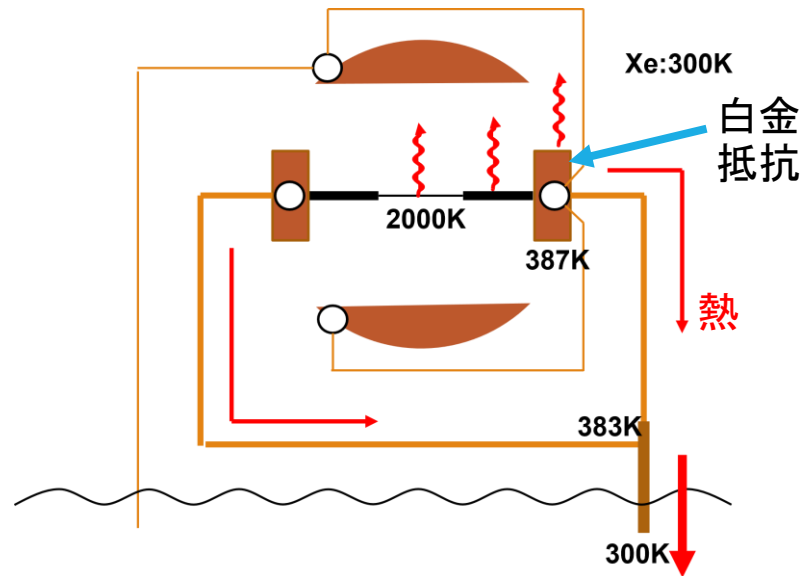
h: 熱伝達率 (W/m<sup>2</sup>K)

k: 熱伝導率 (W/mK)

T<sub>W</sub>: 物体表面温度 (K)

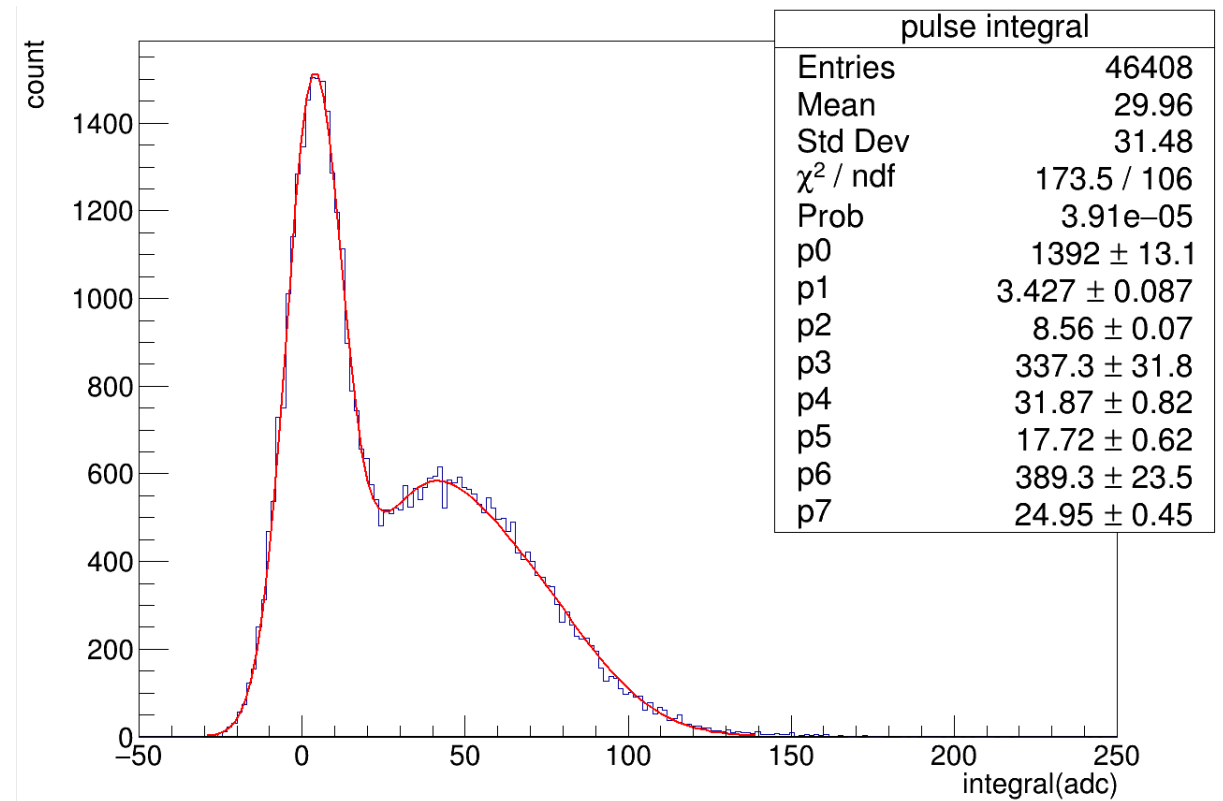
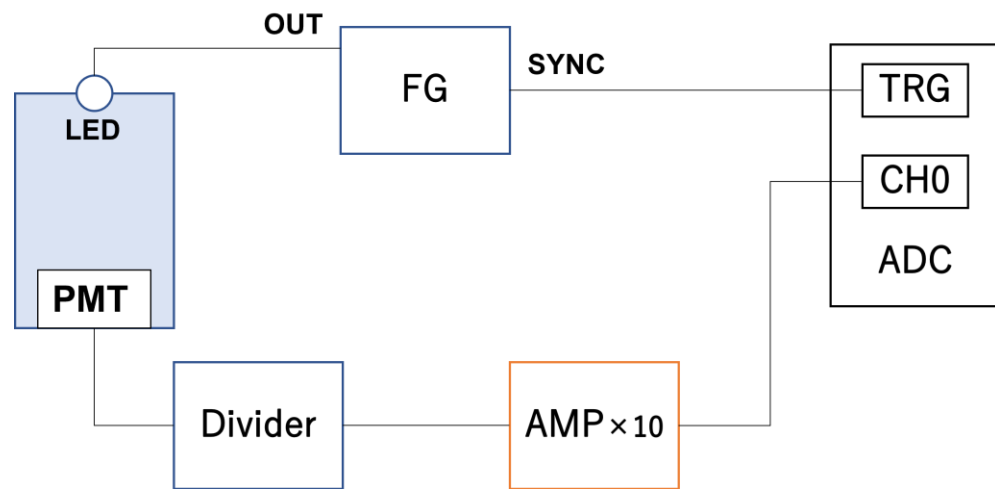
T: 温度 (K)

T<sub>∞</sub>: 流体温度 (K)



# 1光子あたりのゲイン

- ・LEDで1光子を出力して測定
- ・ポアソン分布を仮定してP(0)から計算



先行実験でのイオンEL光  
と思われる信号

