

2018/12/15
～MPGD @京都大学～

暗黒物質直接検出に向けた1相式液体キセノンTPCによる 低エネルギー比例蛍光の観測

所属: 名大ISEE
氏名: 石井 瞽

話の流れ

①TPCについて

②研究目的、実験内容

③実験結果

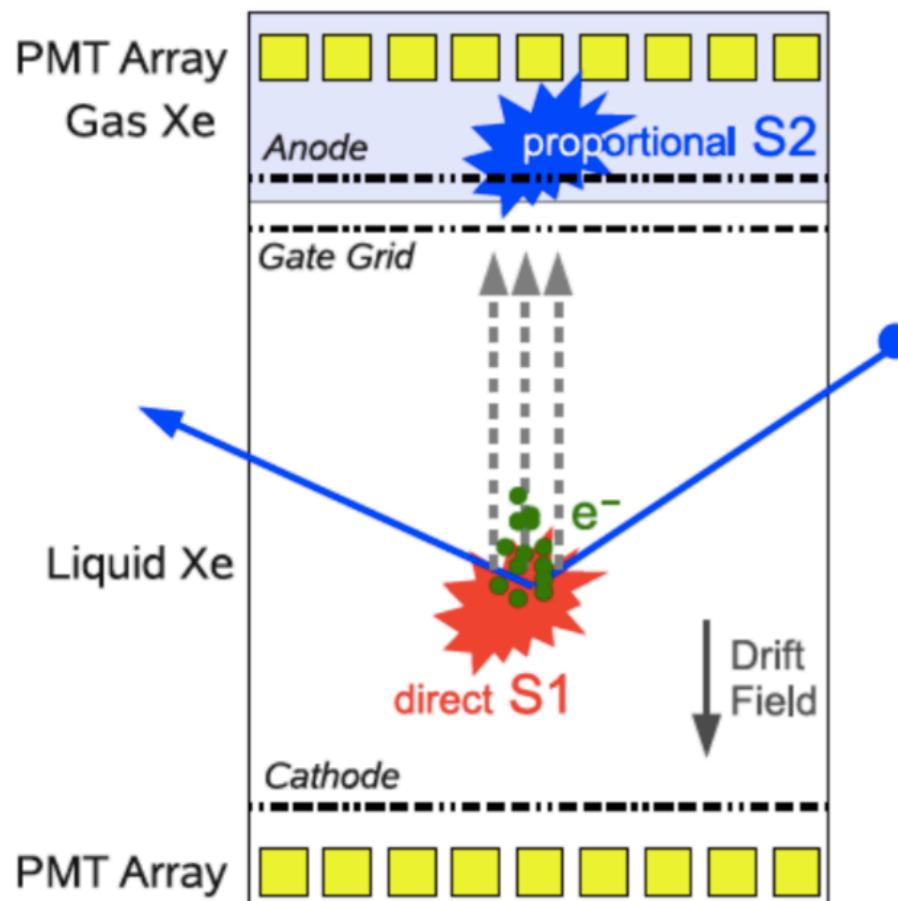
- ・ エネルギー校正
- ・ 電場依存性
- ・ 粒子識別

1相式 / 2相式 液体キセノン TPC

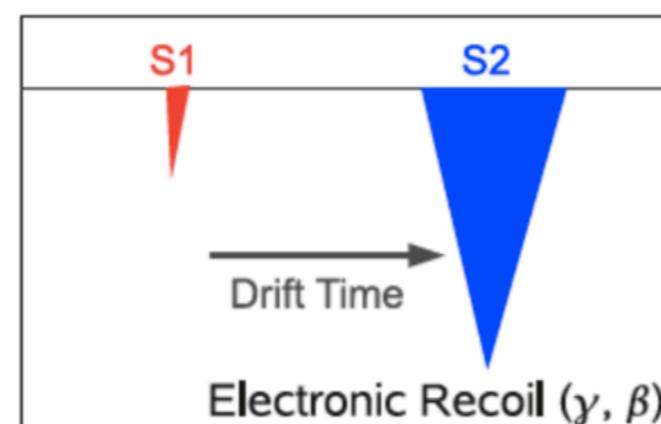
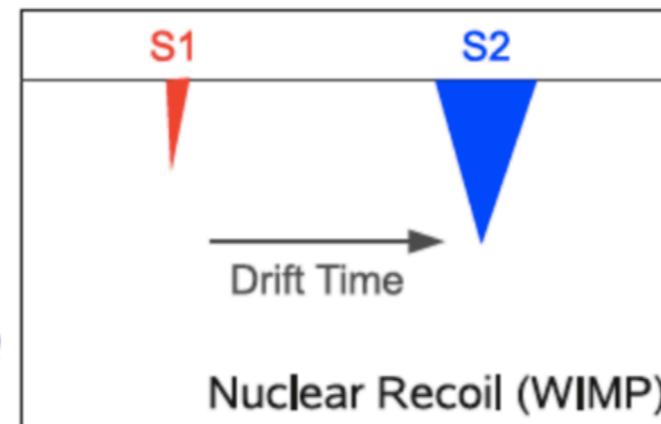
3次元的な位置が再構成できる！

XENON実験, LUX実験

液体キセノン相と気体キセノンの2相式TPCを導入した暗黒物質直接探索実験が行われている



2相式TPCの原理



2相式TPCの原理

- ・液体キセノン中に入った粒子によって、シンチレーション光(S1)が発生する。
- ・それに伴って発生した電子が、電場によってドリフトされる。
- ・そして、気相までドリフトされた電子は電荷増幅をし比例蛍光(S2)が発生する

S1/S2信号の比を計算することで、入射粒子によって生じる Xeの再結合密度の違いから WIMP由来の信号とバックグラウンド由来の信号を区別することができる

2相式検出器で問題になっているのが、

- ・液面とanode wireの管理

液面は Anode と gate grid の間の距離を一定に保たなければならない

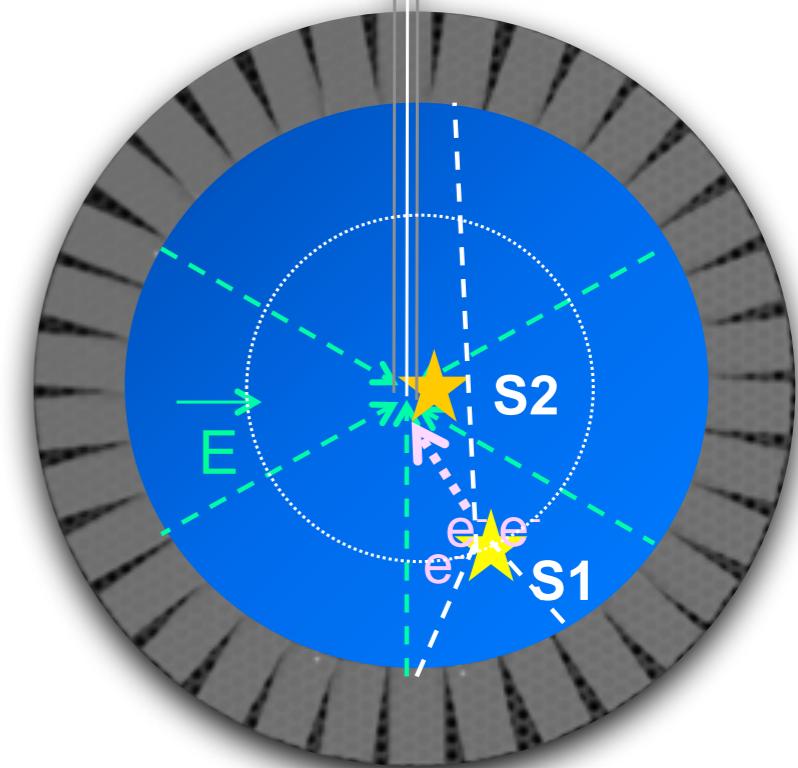
→大型化が難しい

$$S2/S1: \alpha < n < \gamma$$

研究目的

暗黒物質直接探索のため
液相1相式液体キセノンTPCを開発している

暗黒物質直接探索用TPCのイメージ



～液相1相式TPCの特徴～

長所

- ・液面管理がいらない
- ・大型化が容易

短所

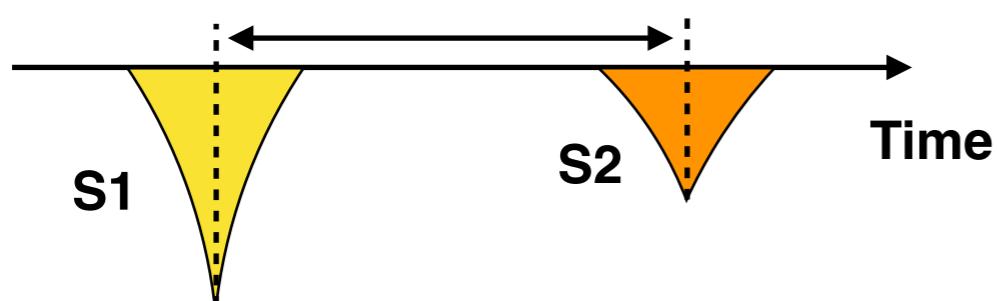
- ・比例蛍光を得るため、
高電場勾配が必要

→ **S2 threshold 412 kV/cm**

E. Aprile et al. physics.ins-det(2014)

S1 : 直接蛍光

S2 : S1発生時に生じた電子をドリフトし、
高電場領域で発生させる比例蛍光



- ・S1とS2の時間差
→ ドリフト方向の反応位置を特定
- ・S1/S2比
→ 原子核反跳と電子反跳を区別

→ 小型のワイヤーAnode($\phi 10\mu m$)テストベンチを用いて、
内部線源 ^{241}Am を導入し、 $\alpha 5.5MeV$ 、 $\gamma 59.5keV$ に対する応答を調べる

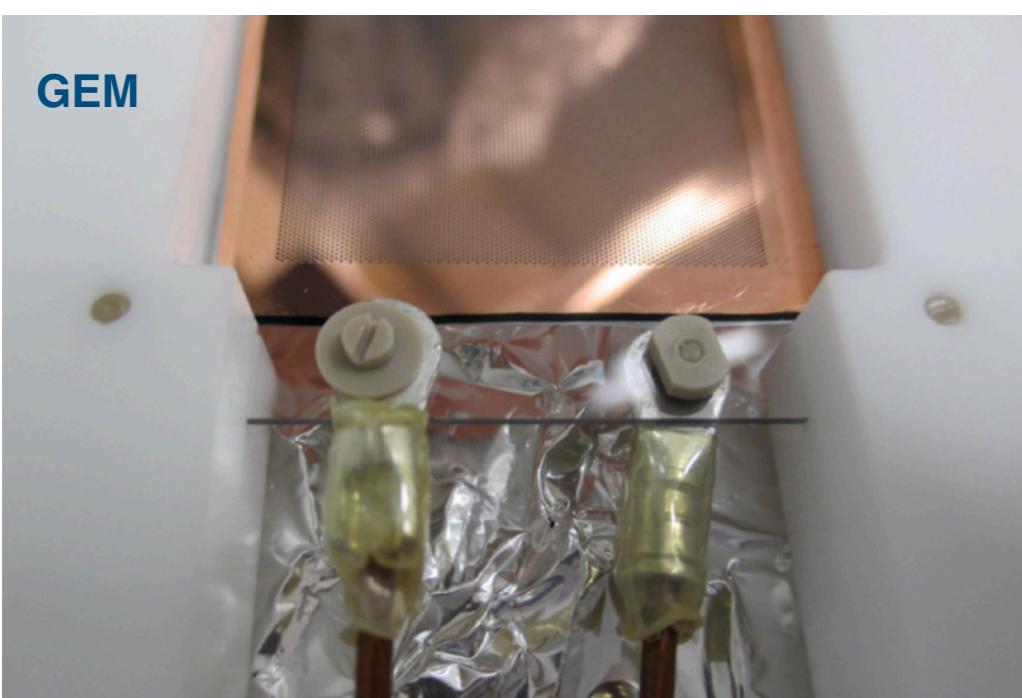
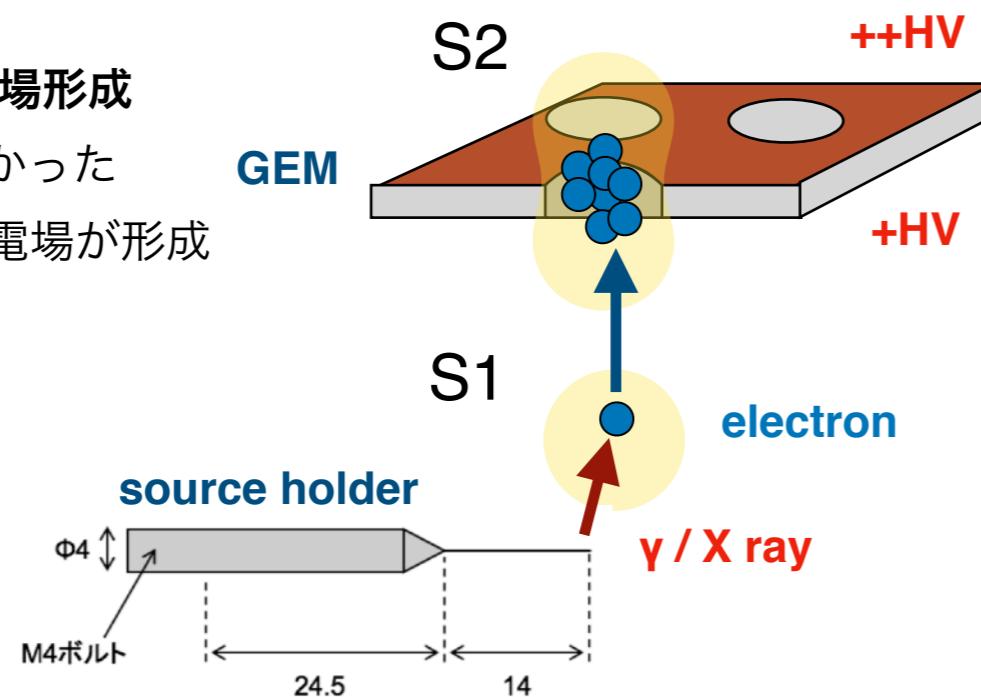
本装置のこれまでの試み

GEMとワイヤーの2種類のSetup

~2016年 Setup~

① GEMによる電場形成

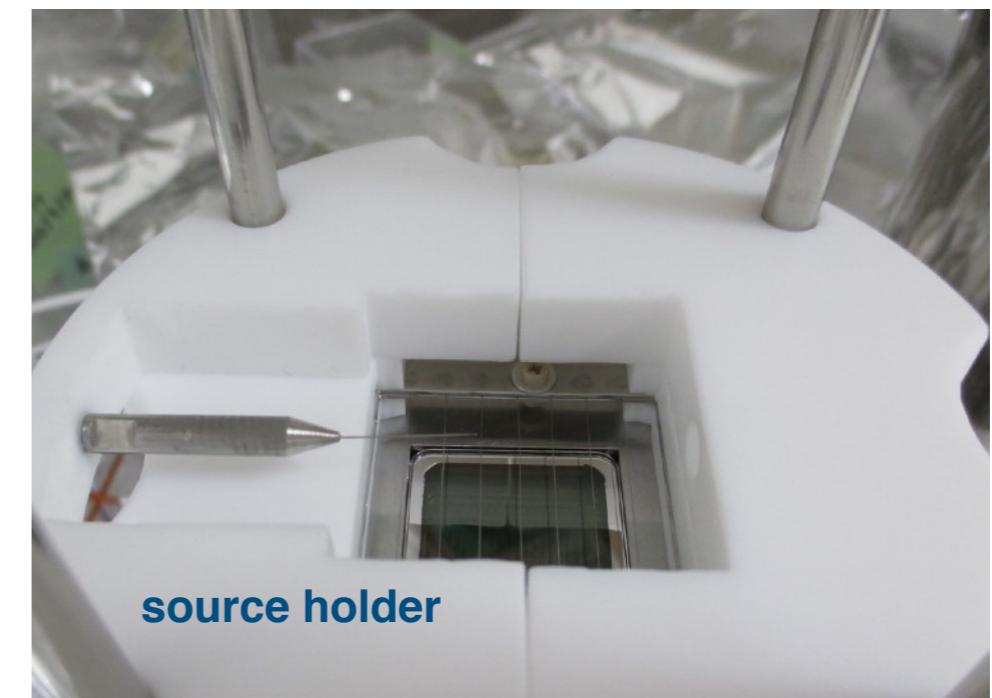
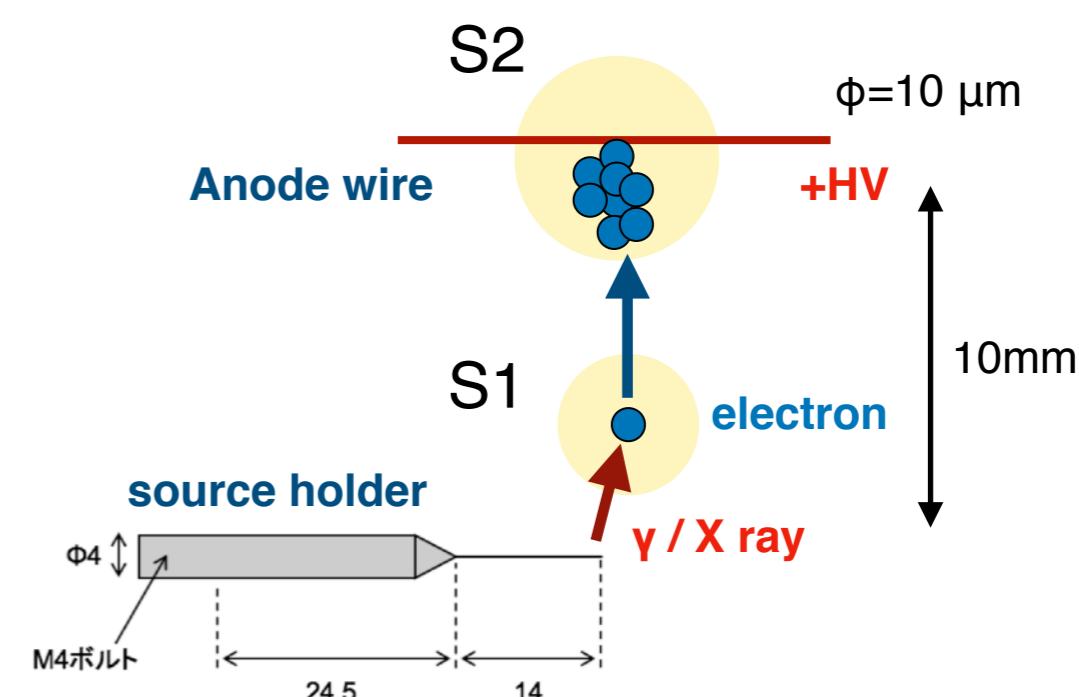
- ・S2は観測できなかった
→GEMでは十分な電場が形成されていない



~2017年 Setup~

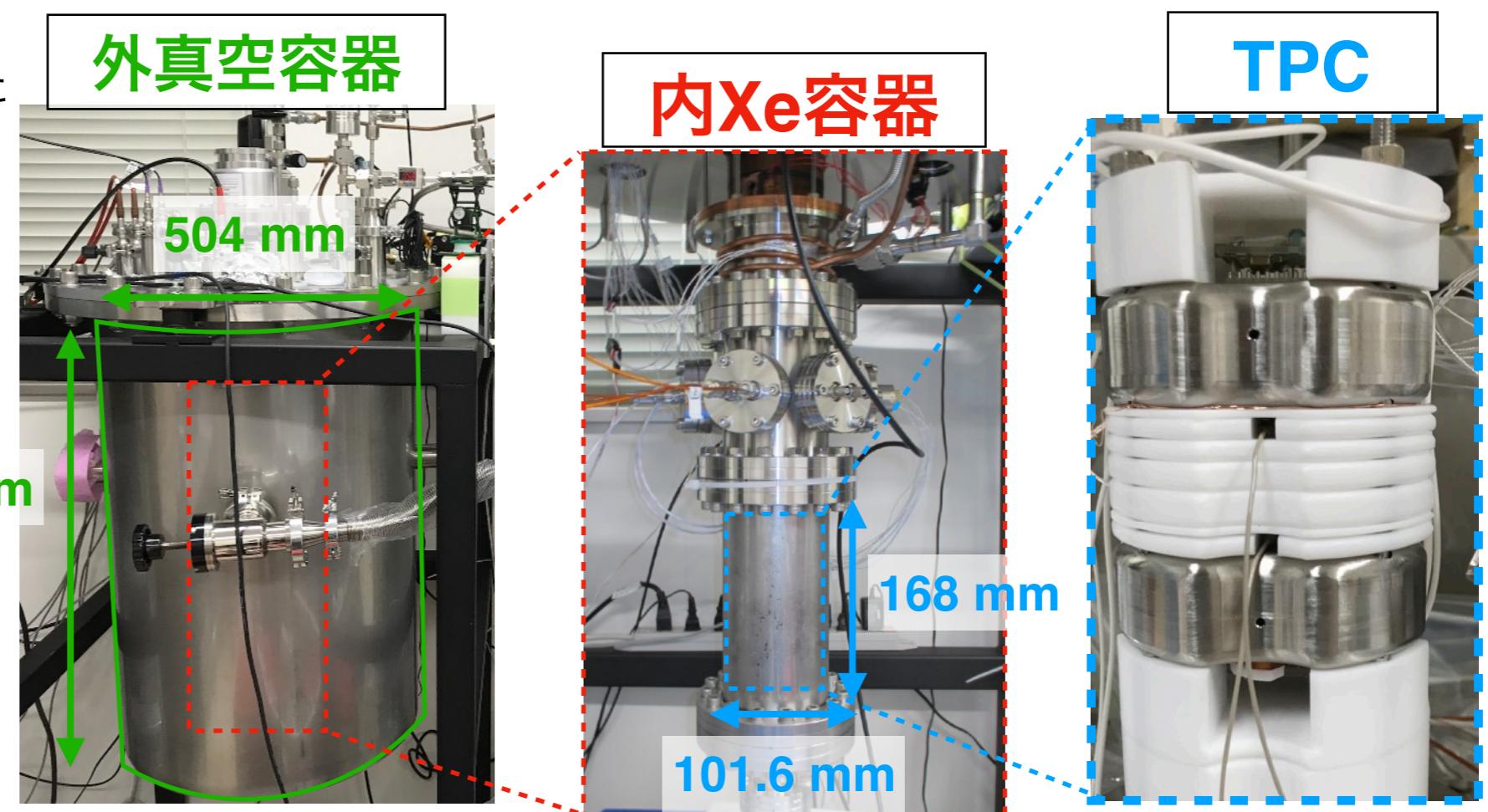
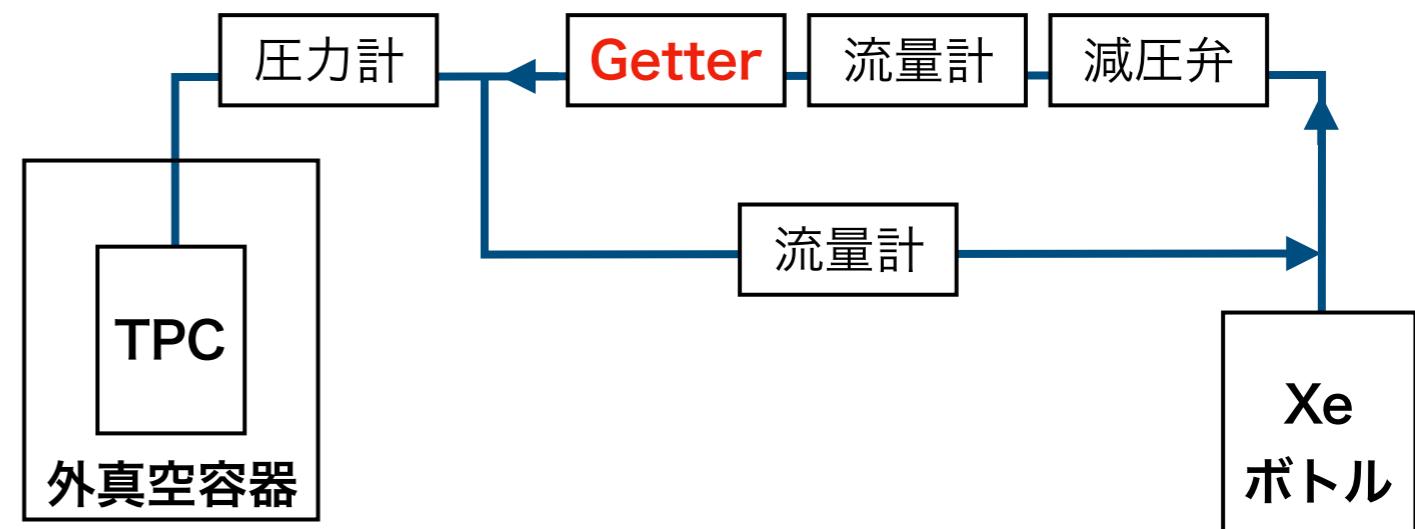
② ワイヤー電極による電場形成

- ・5.5 MeV由来のS2は観測されたが、
59.5 keV以下は観測されていない
→低エネルギーS2を発生させるのに十分な電場ではない



実験装置

- ・OVCとIVCの間を
真空にして断熱している
- ・IVC内は液体キセノンで満たされている
- ・テフロンのスペーサー
使用キセノンの量を減らすため
光るActiveな領域を減らすため
- ・スペーサーには配線用の穴も
液体キセノンが満たされている
- ・-102.4°C、0.049MPaの
液体キセノンの状態で実験をした
- ・ 10^{-5} Pa台まで真空に引いた後、
281.6LのガスXeを導入

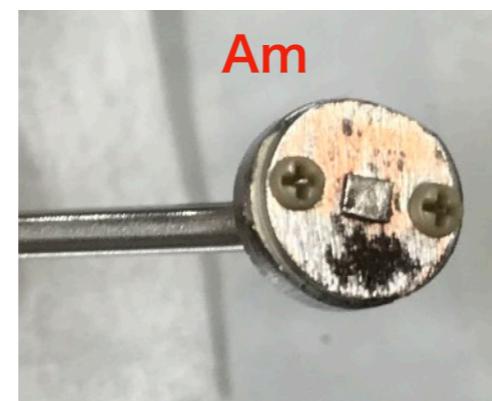


IVC内のsetup

- 本実験のIVCは配線用の穴を従来のIVCより小さくした
→ 有効体積外で光る部分を減らした
- Am内部線源を表面線源にした
→ α のS1,S2が上下のPMTで観測できるように
ジオメトリーを改善した

線源とAnode間の距離
8.13mm

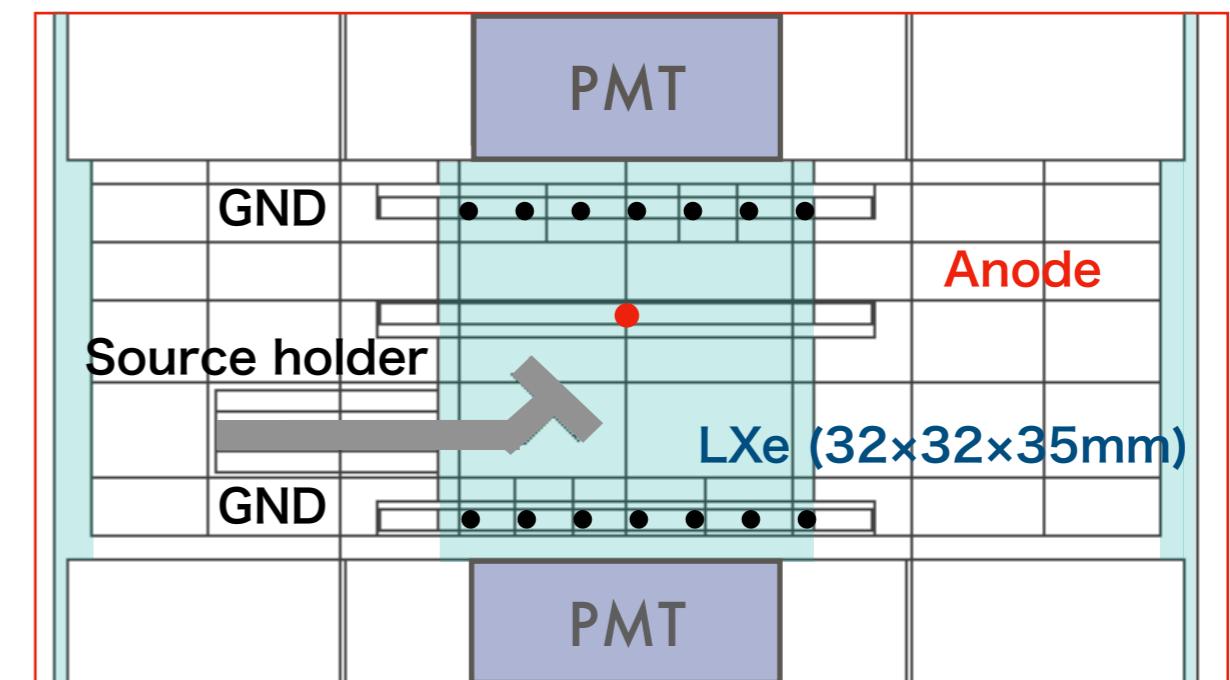
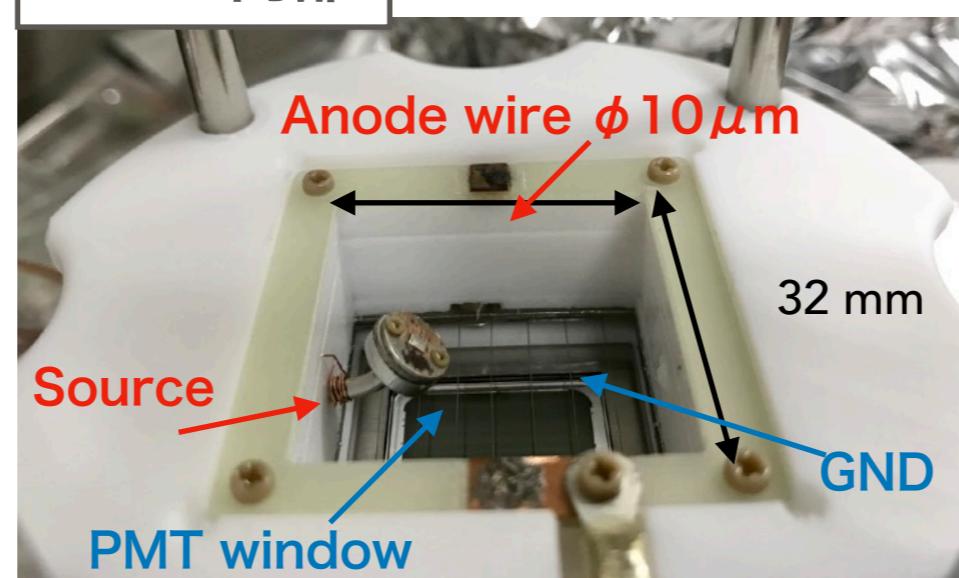
内部線源



IVCの側面



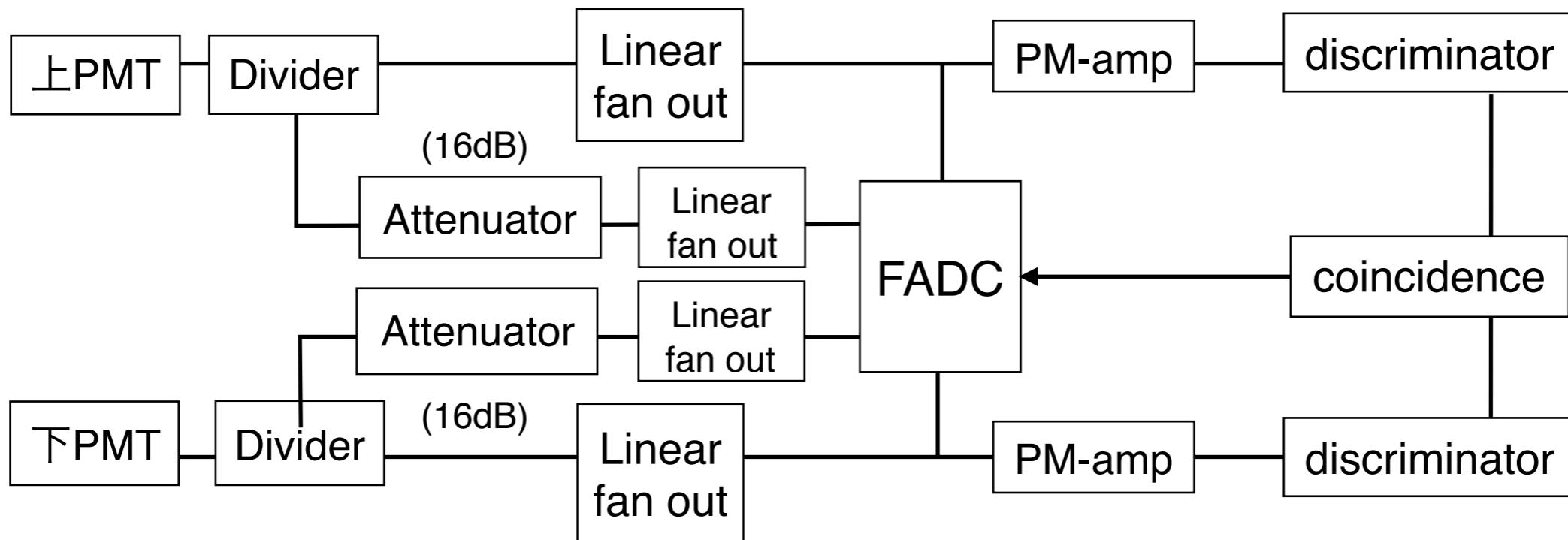
IVCの内部



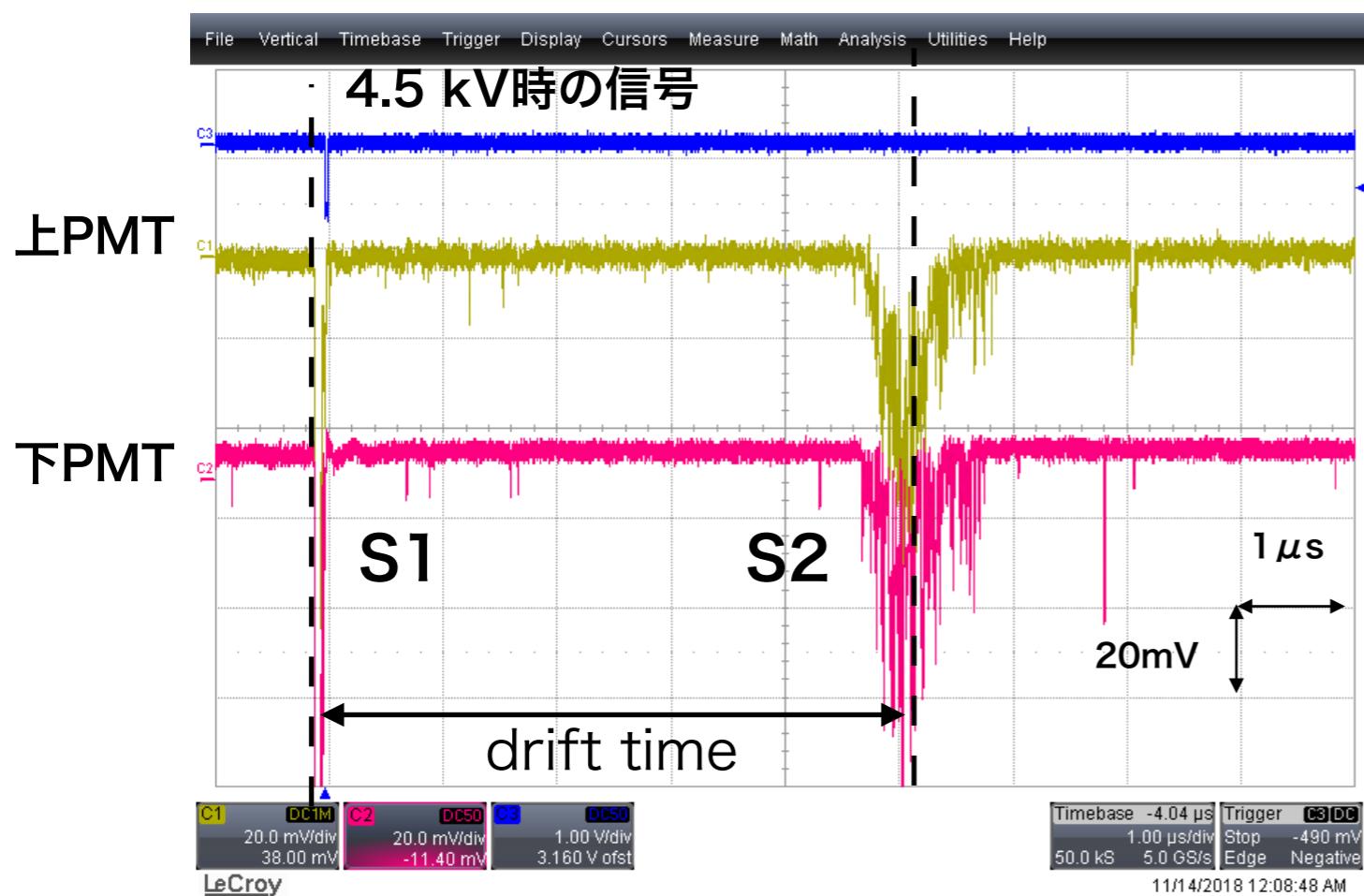
PMT



DAQと解析方法



FADC trigger: 上下PMT
threshold -40~100 mV



波形面積を計算し、
1p.e.の面積の比からp.e.を計算している

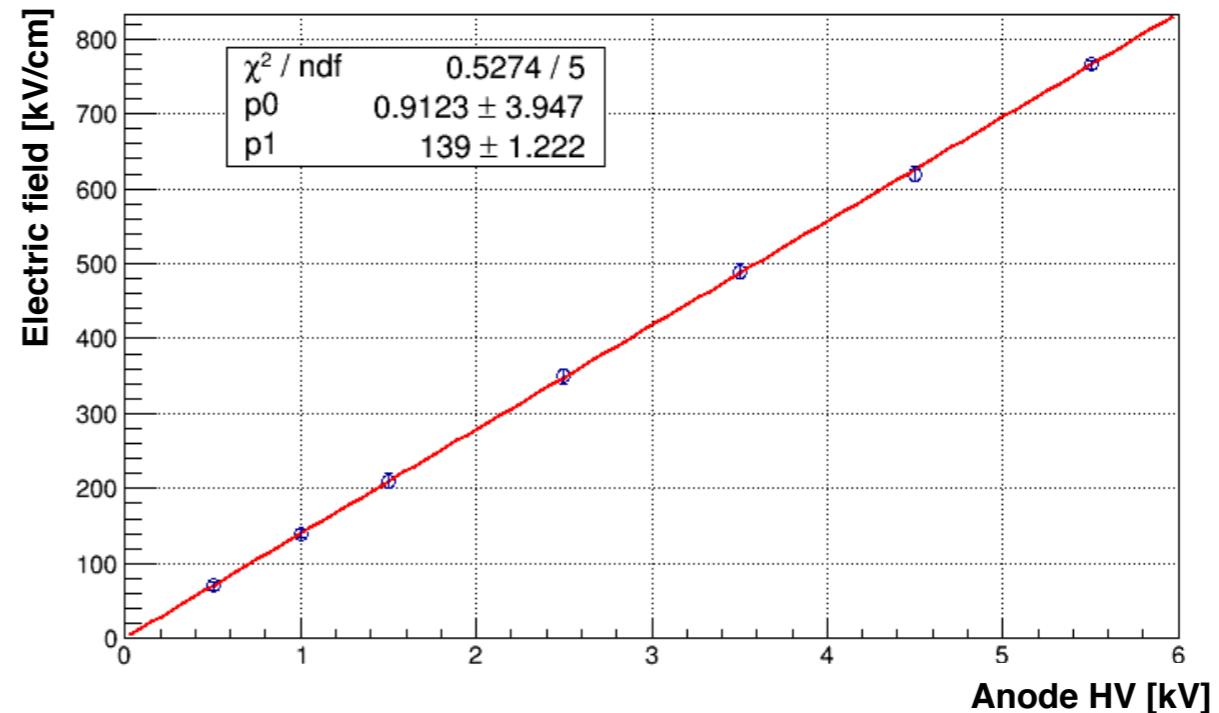
電場のシミュレーション

- 有限要素法解析ソフト(Femtet)による電場シミュレーション

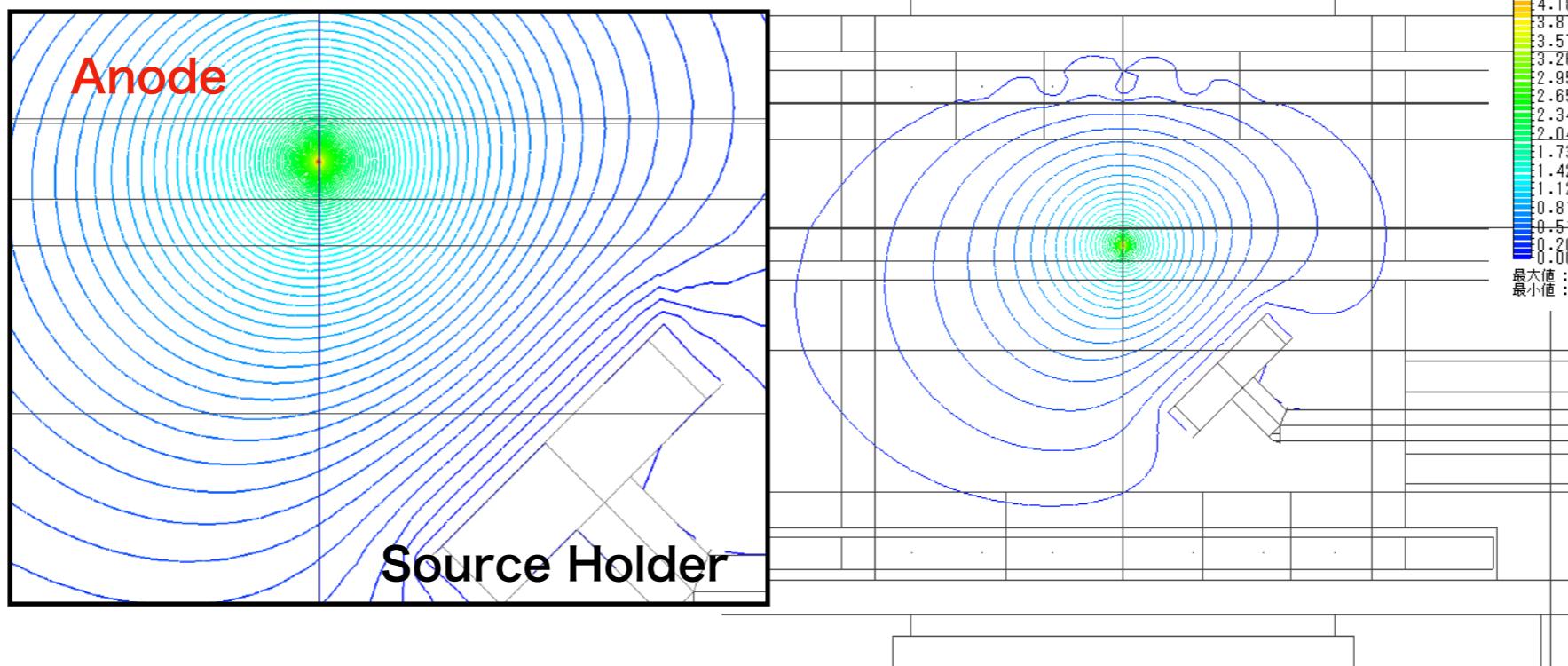
- ドリフト時間が一様になるよう線源からAnodeまで平行電場が形成されるように設計した

1kV(Anode)印加で140kV/cm@wire

Anode HVとワイヤー表面の電場シミュレーション結果



Anode 5kV時の電場シミュレーション結果



TPC内の圧力,気温,S1光量の変化

予冷と導入 … 1 day
 測定 … 13 days
 電圧 … 0~5.5kV
 (max: 751kV/cm@wire表面)

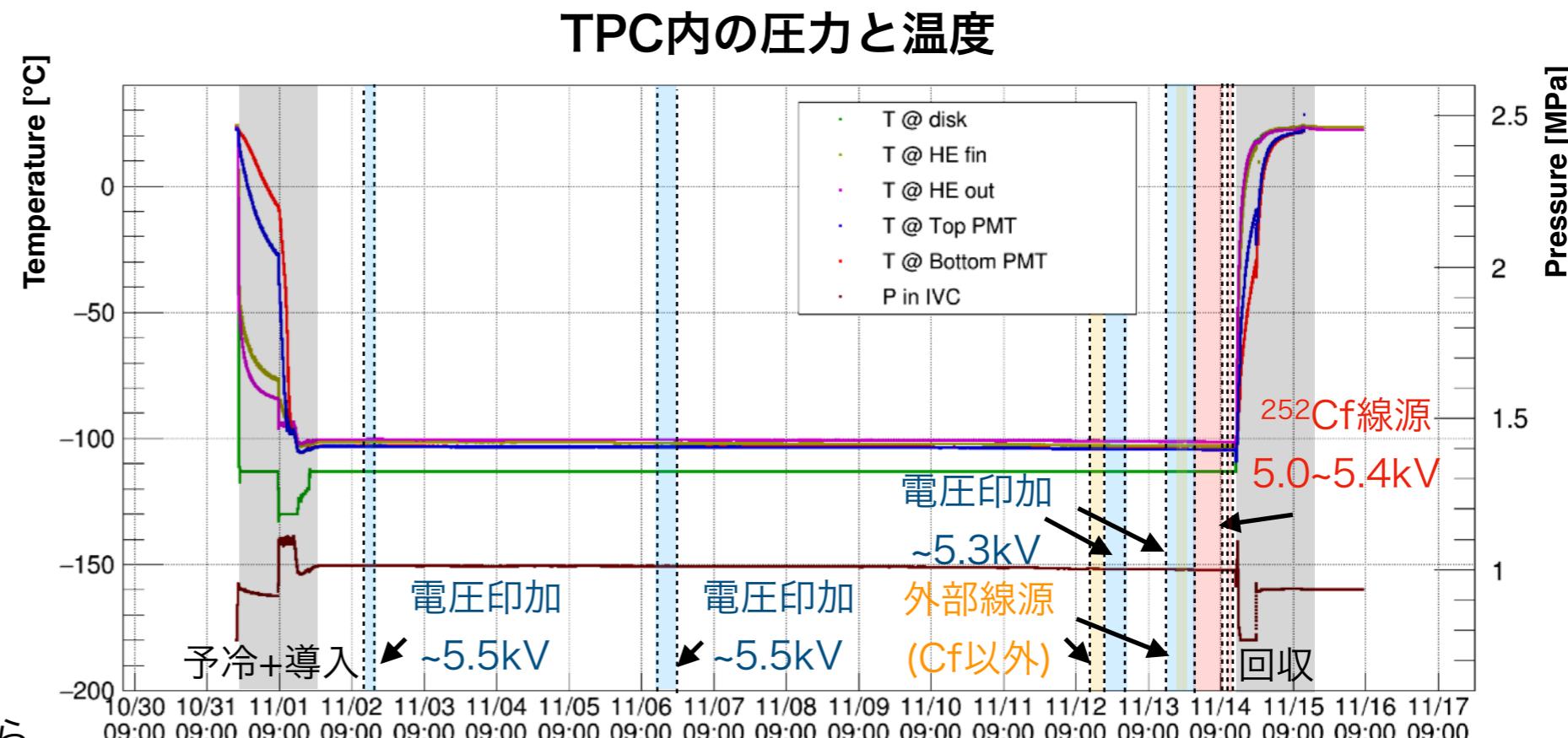
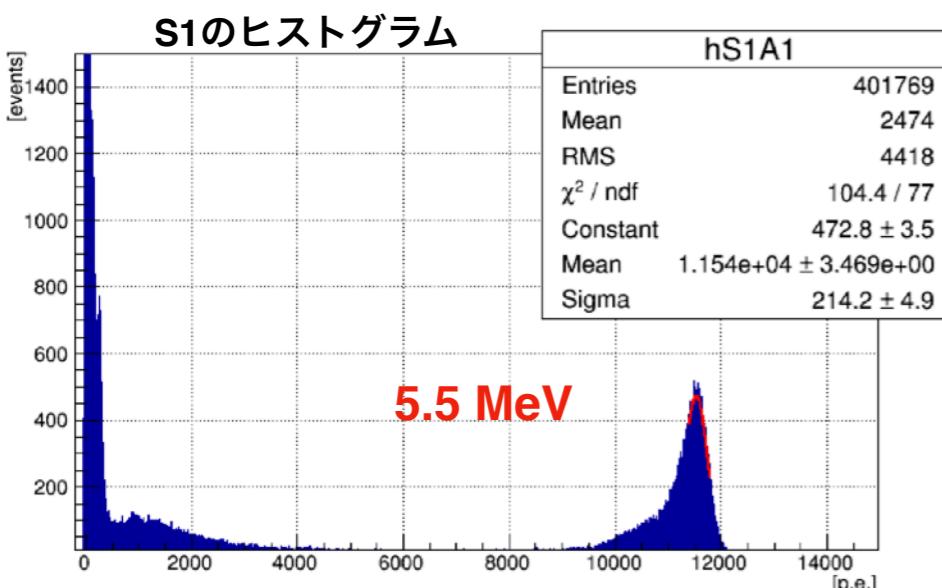
～光量の減少の原因～

- ・液体キセノン中に混在した水
- ・放電による不純物の発生

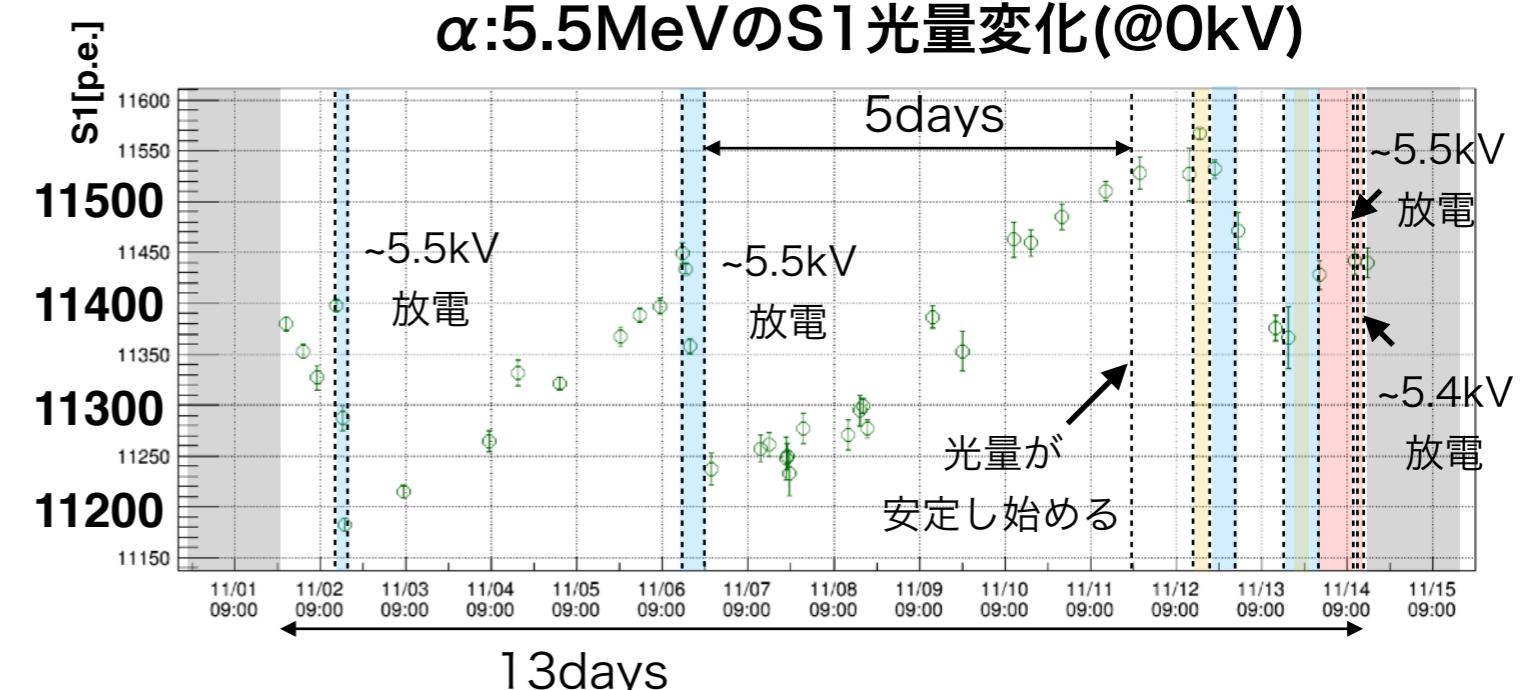
～光量の増加～

- ・不純物とXeの融点と密度の違いから
不純物はコールドヘッドに集まる
- ・放電から光量が回復し安定するまで

5days

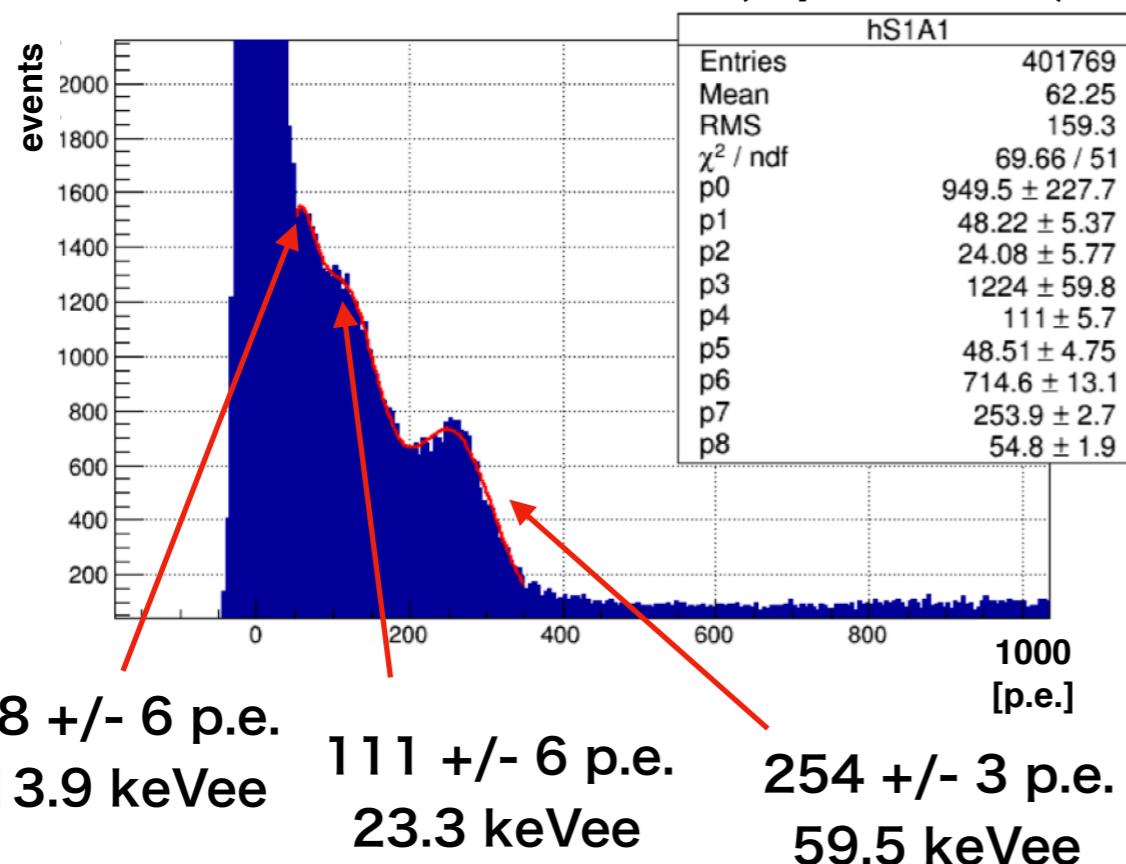


$\alpha:5.5\text{MeV}$ のS1光量変化(@0kV)

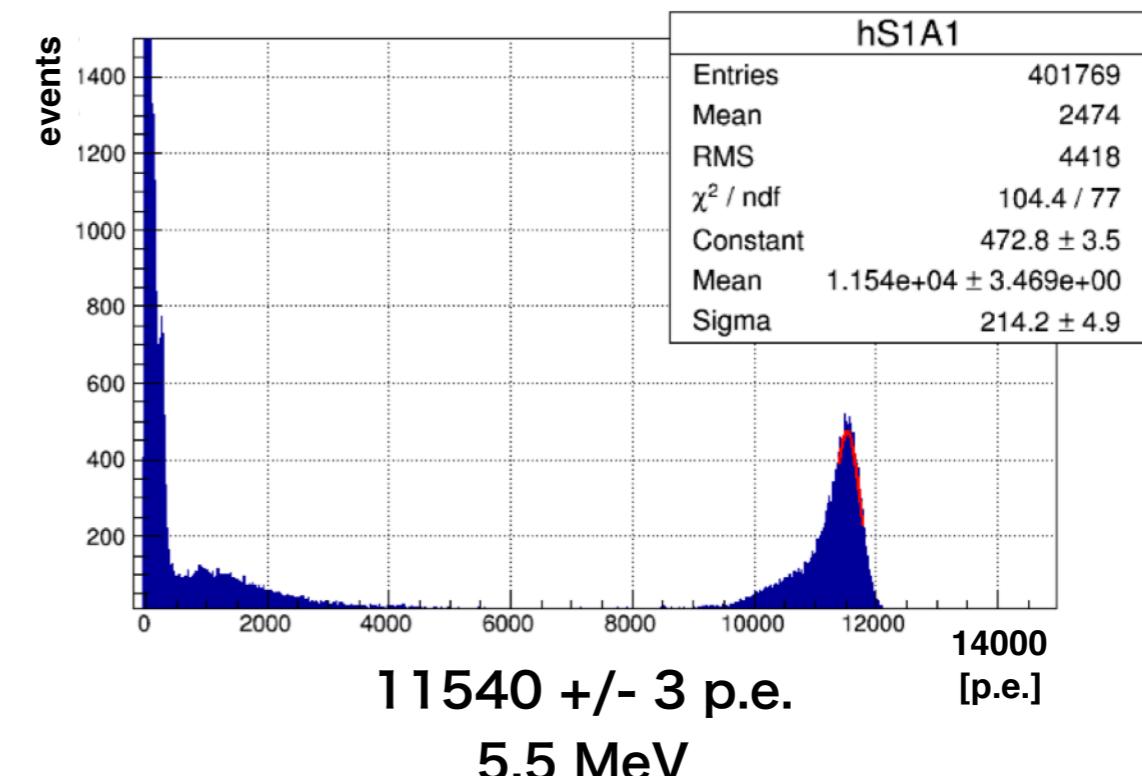


^{241}Am のS1観測 (@0kV)

① S1@0kV ヒストグラム($X/\gamma \sim \text{keV}$)



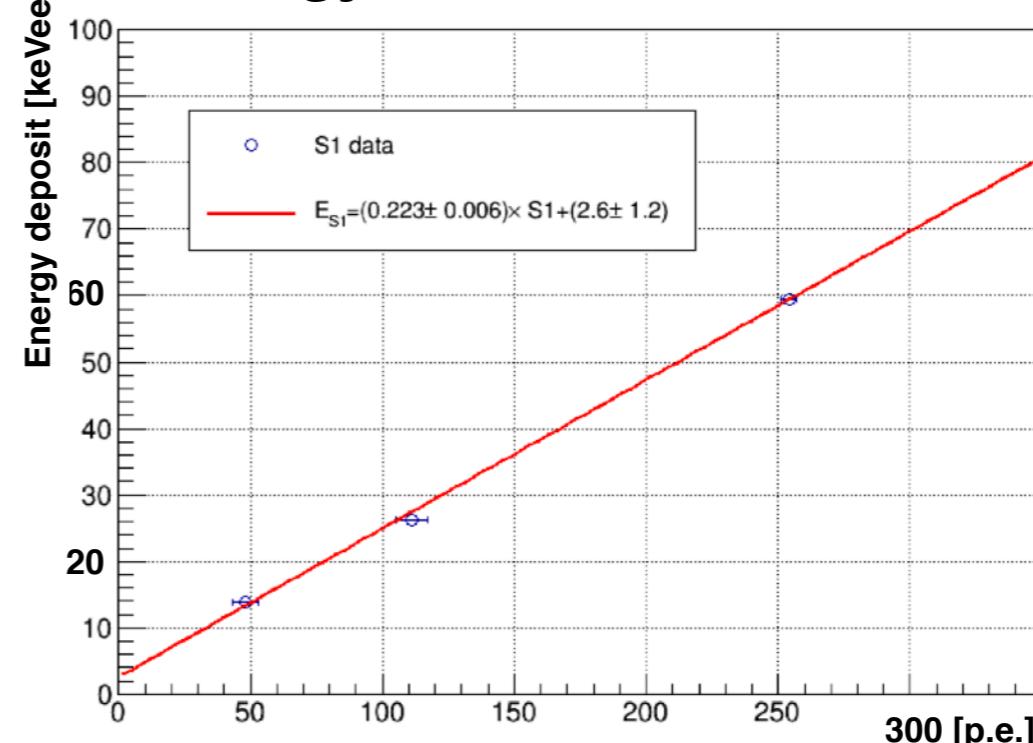
② S1@0kV ヒストグラム($\alpha:5.5\text{MeV}$)



核種	半減期	衰変形式	おもな β 線(または α 線)のエネルギーと放出割合	おもな光子のエネルギーと放出割合
^{241}Am	432.2y 娘 ^{237}Np	α	5.388- 1.4% 5.443- 13.0% 5.486- 84.5% 他	0.0263- 2.4% 0.0332- 0.13% 0.0595-35.9% 他 0.0139-42.0% Np-L

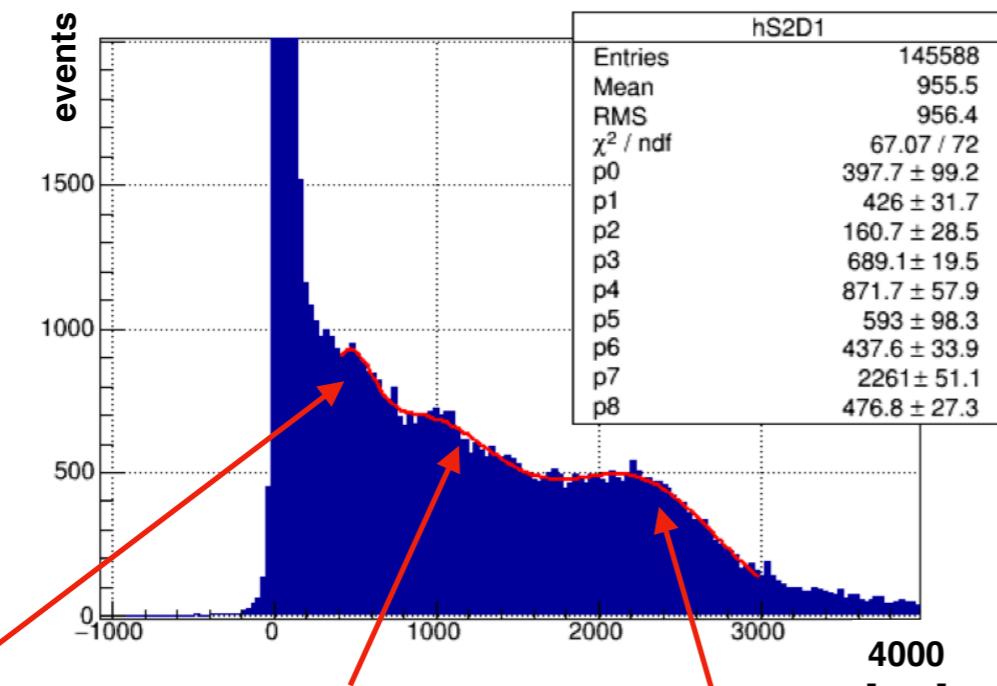
S1(@0kV): 4.2 p.e/keVee

③ Energy calibration (S1 keVee)



^{241}Am @5kV でのS2観測

① S2@5.0kV ヒストグラム($X/\gamma \sim \text{keV}$)

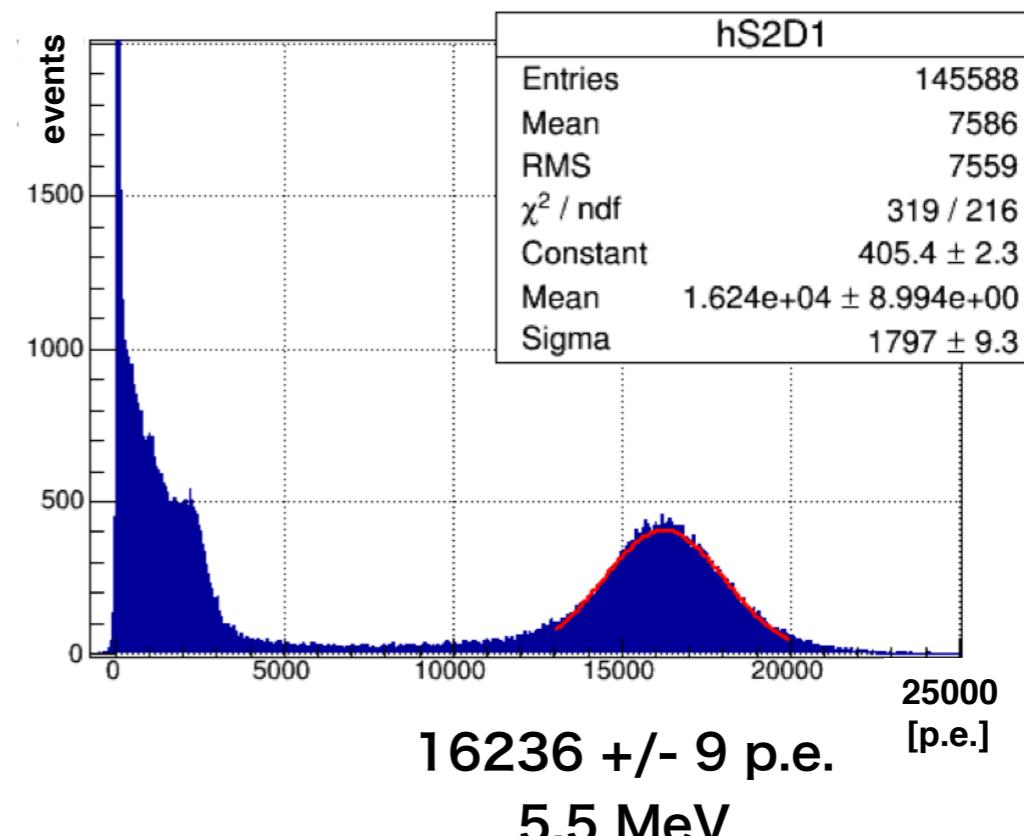


$426 \pm 31 \text{ p.e.}$
 13.9 keVee

$872 \pm 58 \text{ p.e.}$
 26.3 keVee

$2261 \pm 51 \text{ p.e.}$
 59.5 keVee

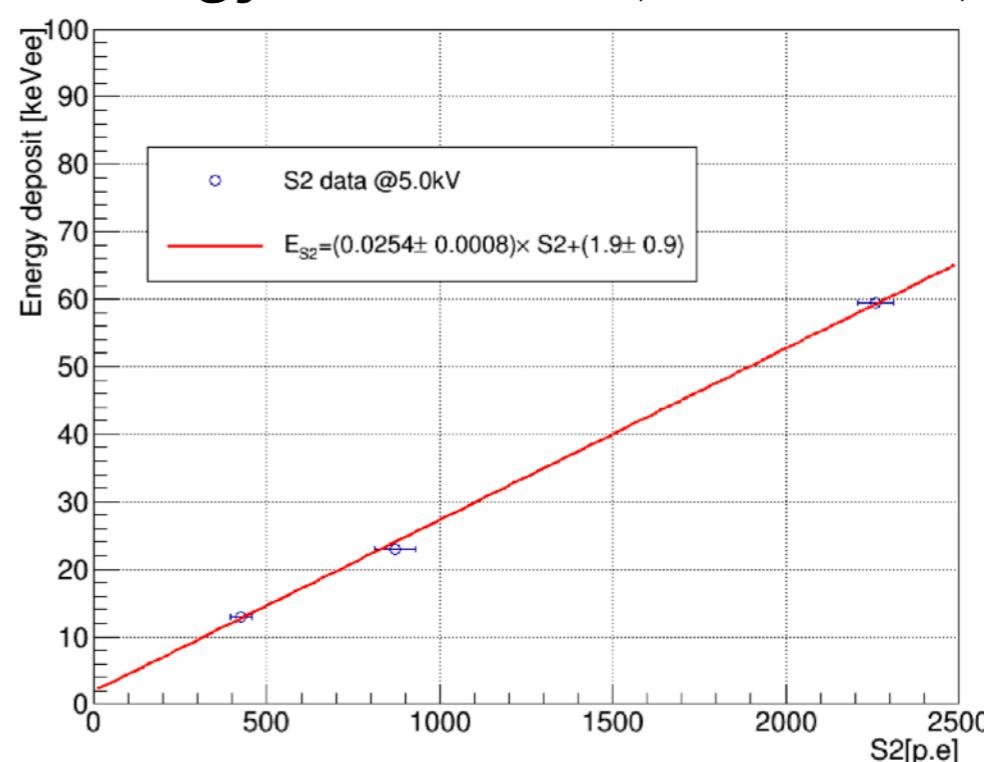
② S2@5.0kV ヒストグラム($\alpha:5.5\text{MeV}$)



③ Energy calibration (S2@5.0kV)

核種	半減期	衰変形式	おもな β 線(または α 線)のエネルギーと放出割合	おもな光子のエネルギーと放出割合
^{241}Am	432.2y	α	5.388- 1.4% 5.443- 13.0% 5.486- 84.5% 他	0.0263- 2.4% 0.0332- 0.13% 0.0595- 35.9% 他 0.0139- 42.0% Np-L
娘 ^{237}Np				

S2(@5.0kV): 39 p.e./keVee



ドリフト速度の電場依存性

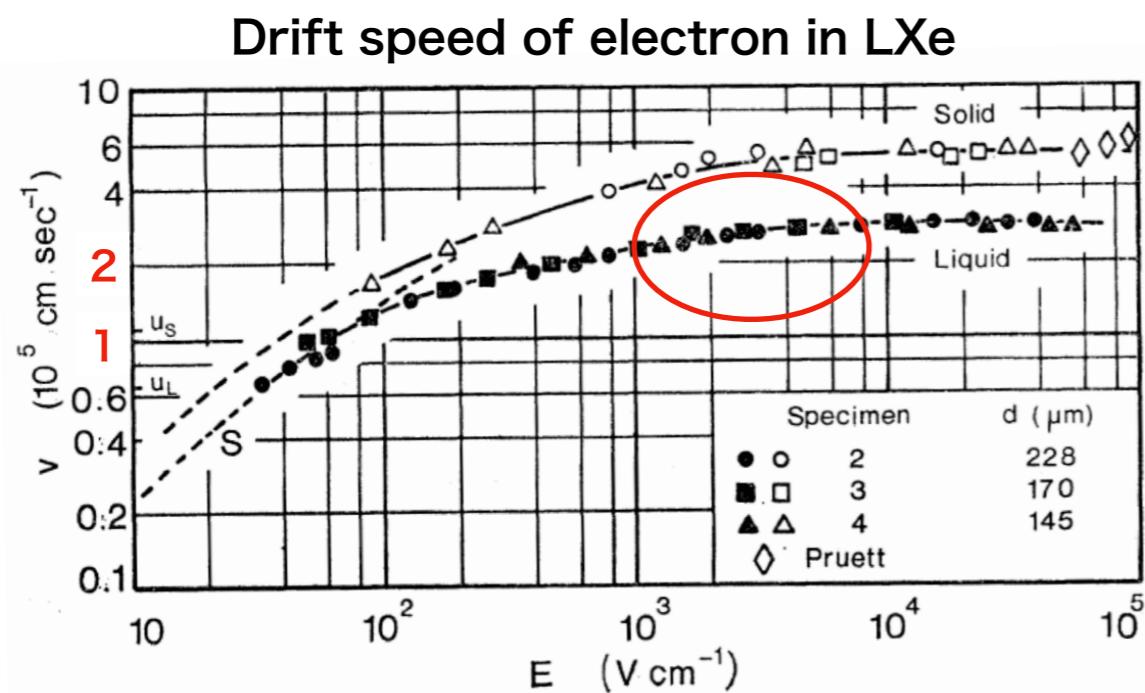
5kVの時のドリフト時間

$$3528.1 \pm 0.2 \text{ [ns]}$$

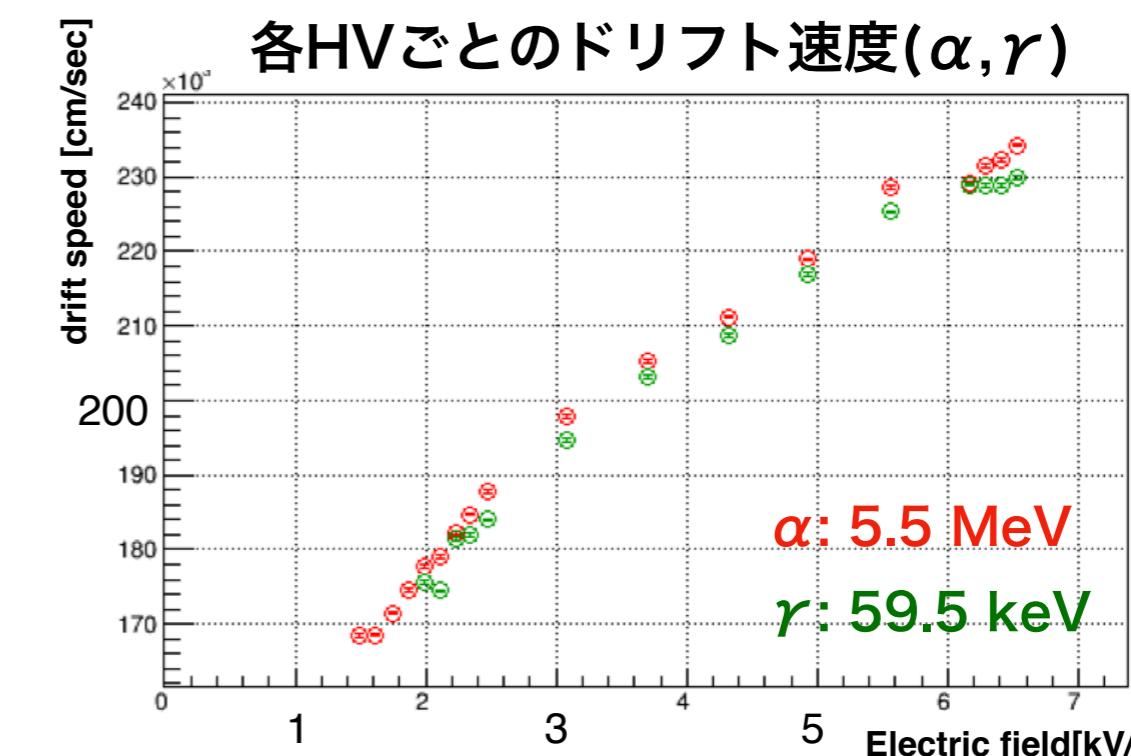
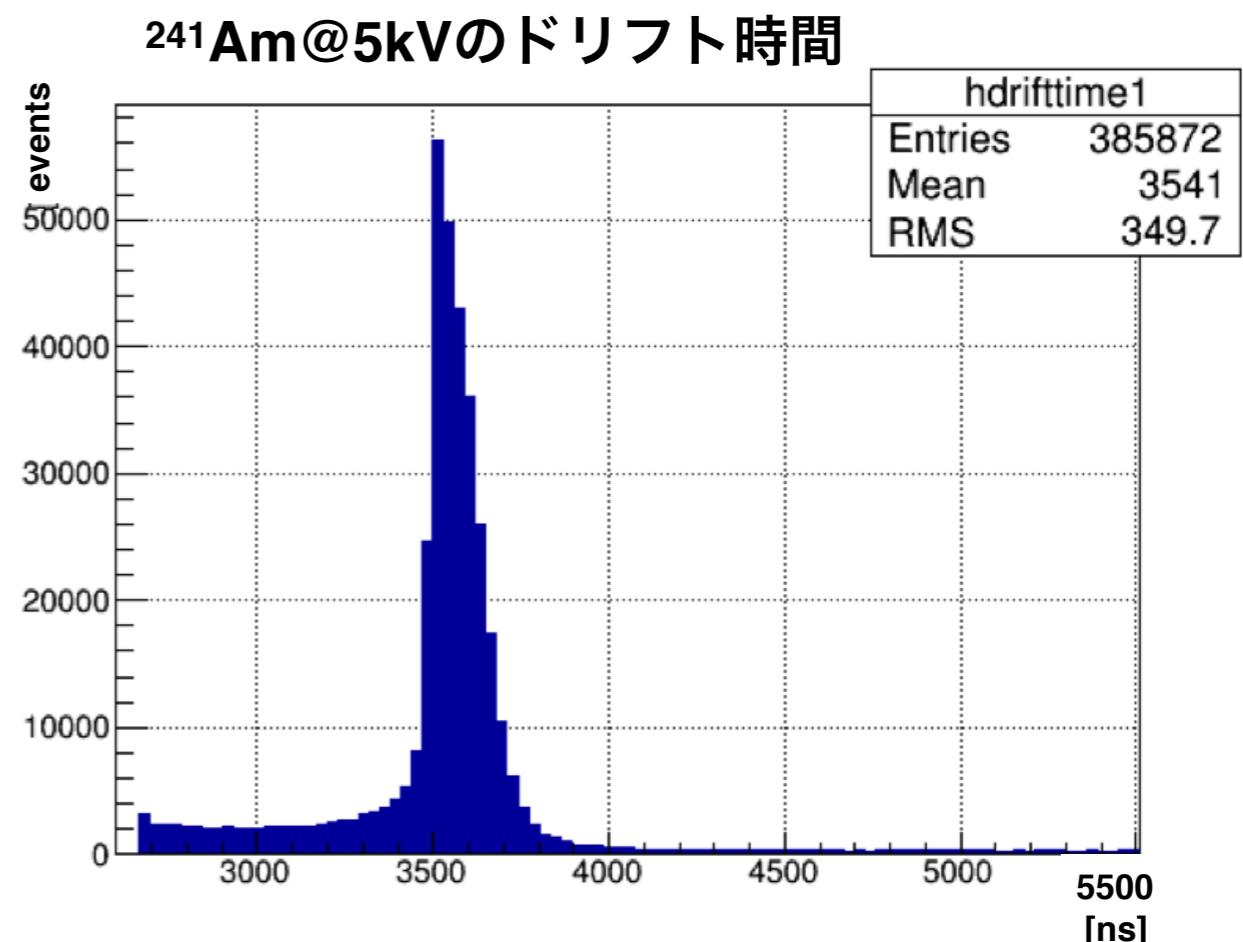
線源からAnodeワイヤーまでの距離は8.13 mm

→ Drift speed $v = (2.27 \pm 0.01) \times 10^5 \text{ [cm/sec]}$

→ ドリフト電場は~kV/cm相当



L.S.Miller et al., Phys.Rev.166,3 (1968)

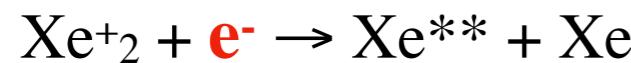


S1の電場依存性

～励起による発光過程～



～再結合による発光過程～



- 電場によって再結合による発光過程に必要な
電子がドリフトされるため光量が減少する
- 高電場になるほどS1が小さくなる

各電場(@ワイヤー表面)ごとのS1光量

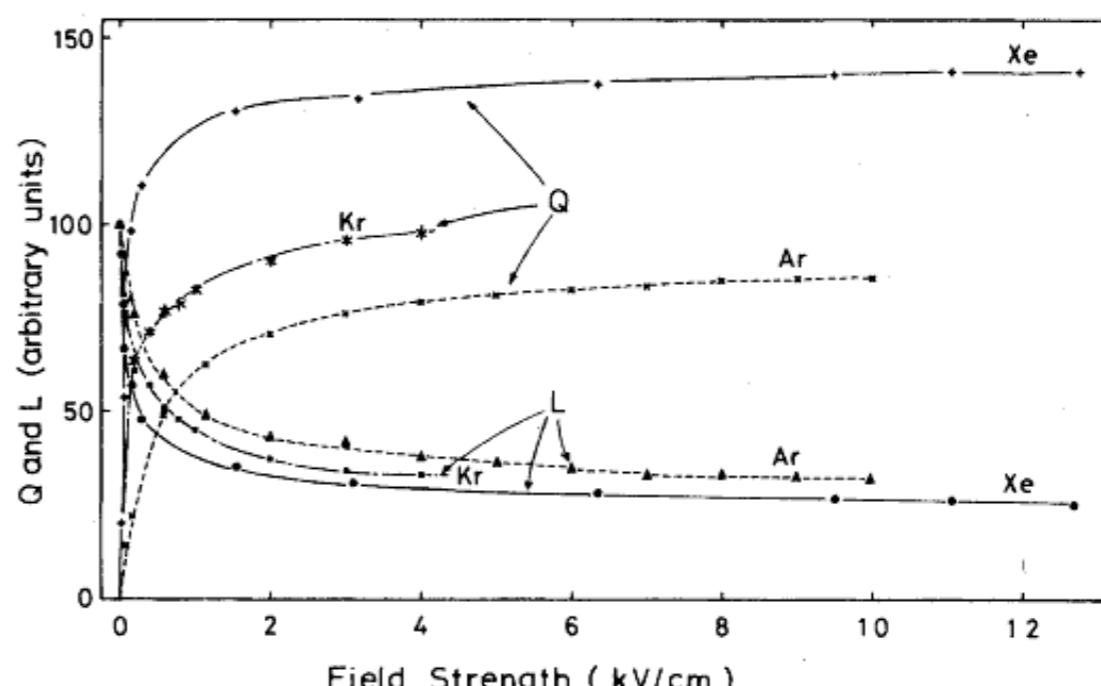
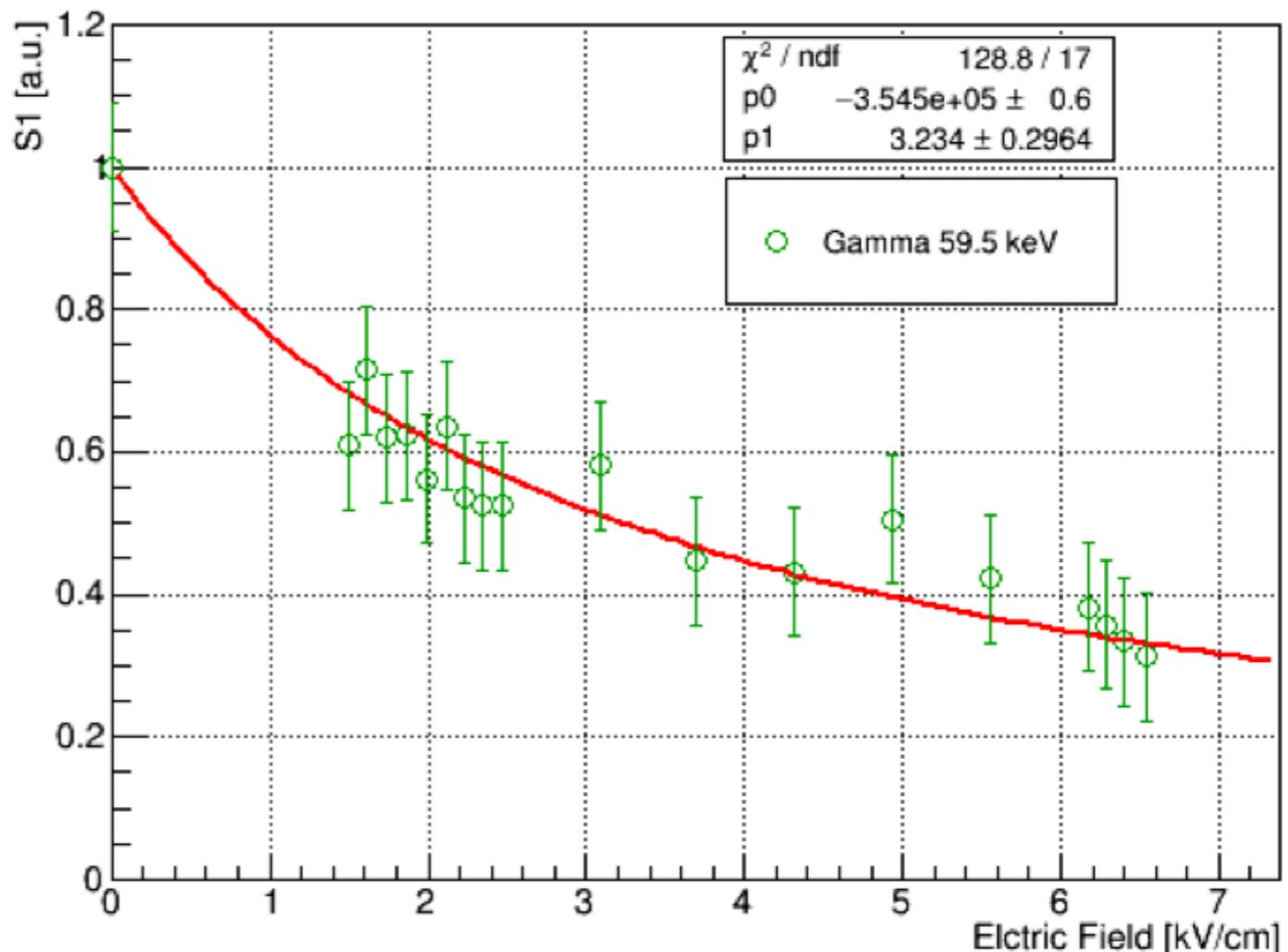
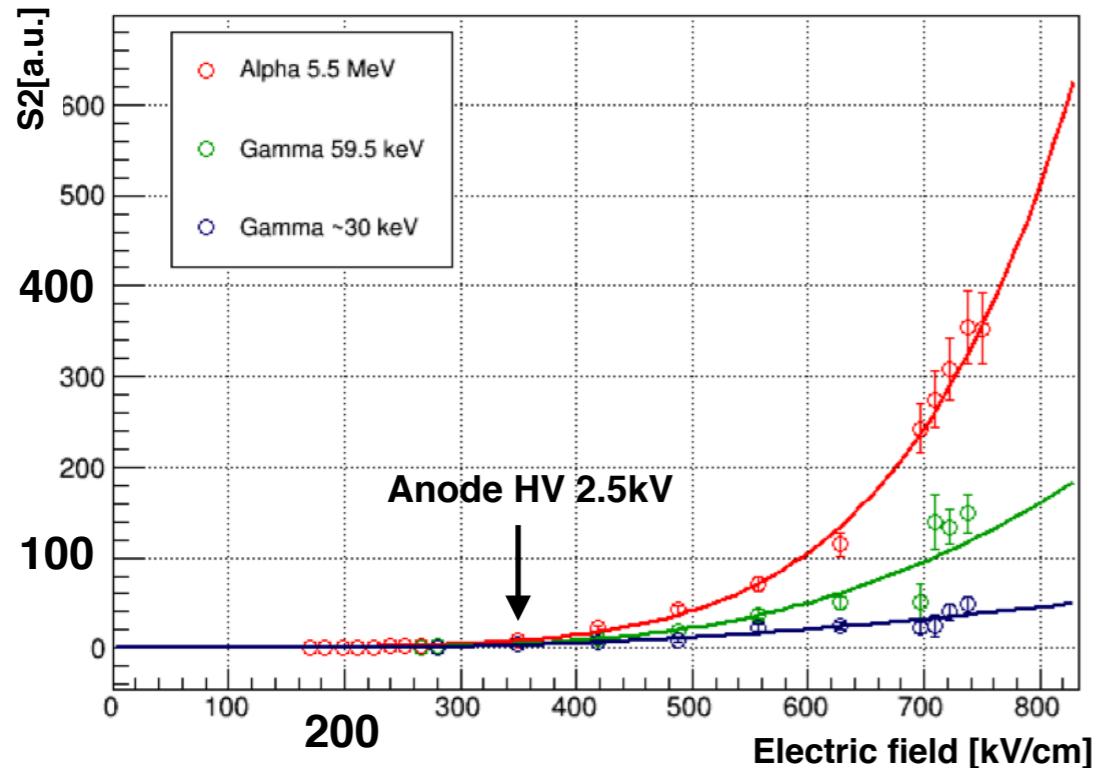


FIG. 2. Variation of relative luminescence intensity L and collected charge Q in liquid argon, krypton, and xenon vs applied-electric-field strength for 0.976- and 1.05-MeV electrons.

S2の電場依存性

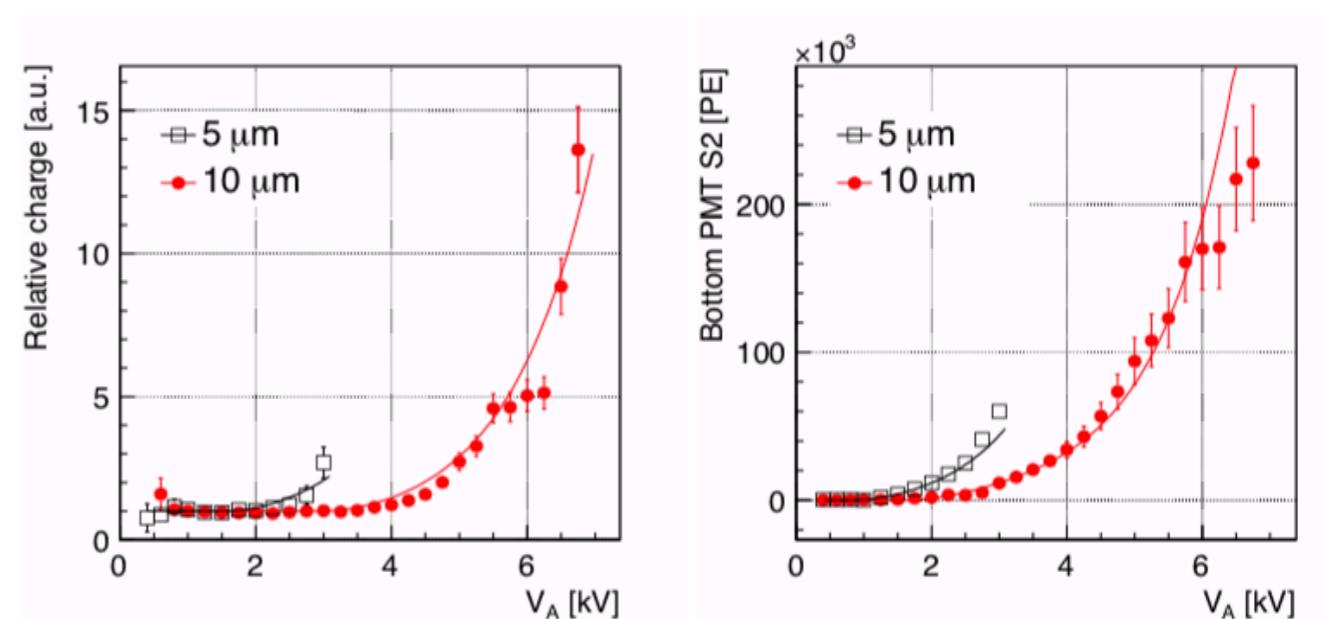
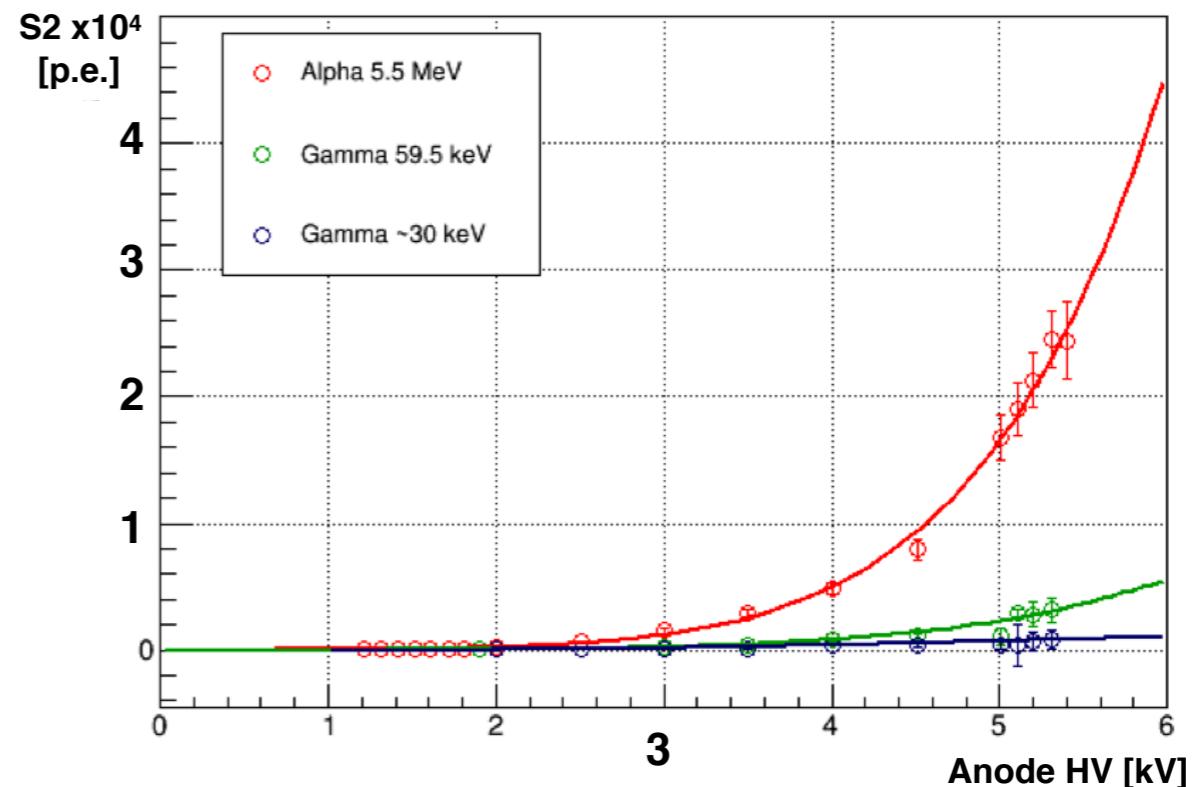
各電場ごとの相対S2光量



S2 threshold 320 kV/cm

- ・高電場になるほどドリフト電子数が増え
S2が大きくなる
- ・先行研究を再現している

各電場ごとのS2光量

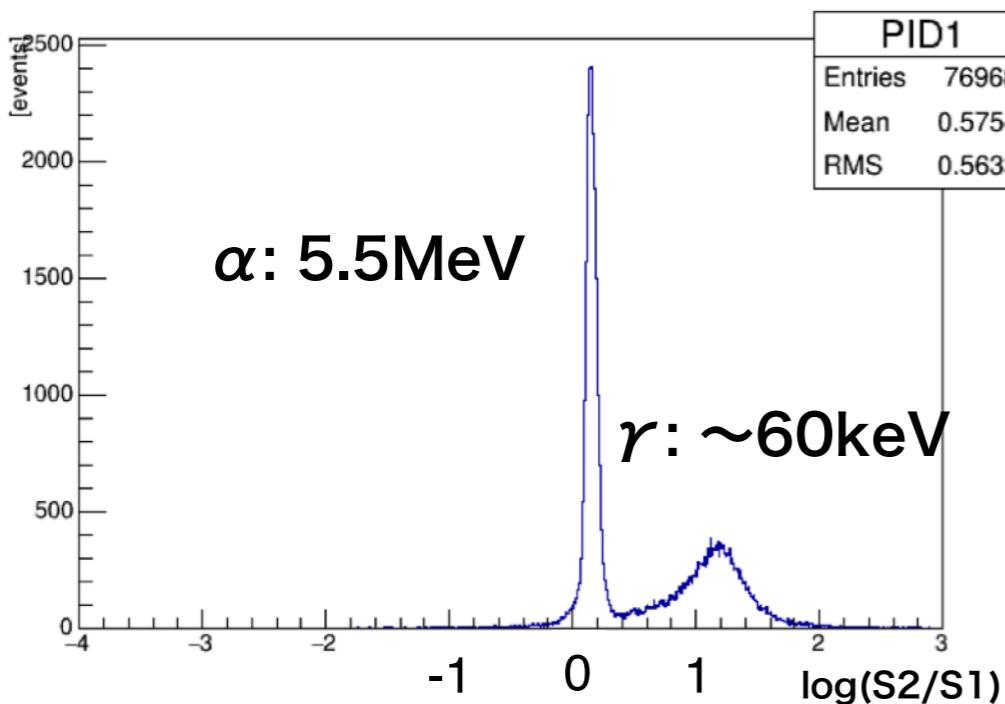


E. Aprile et al. physics.ins-det(2014)

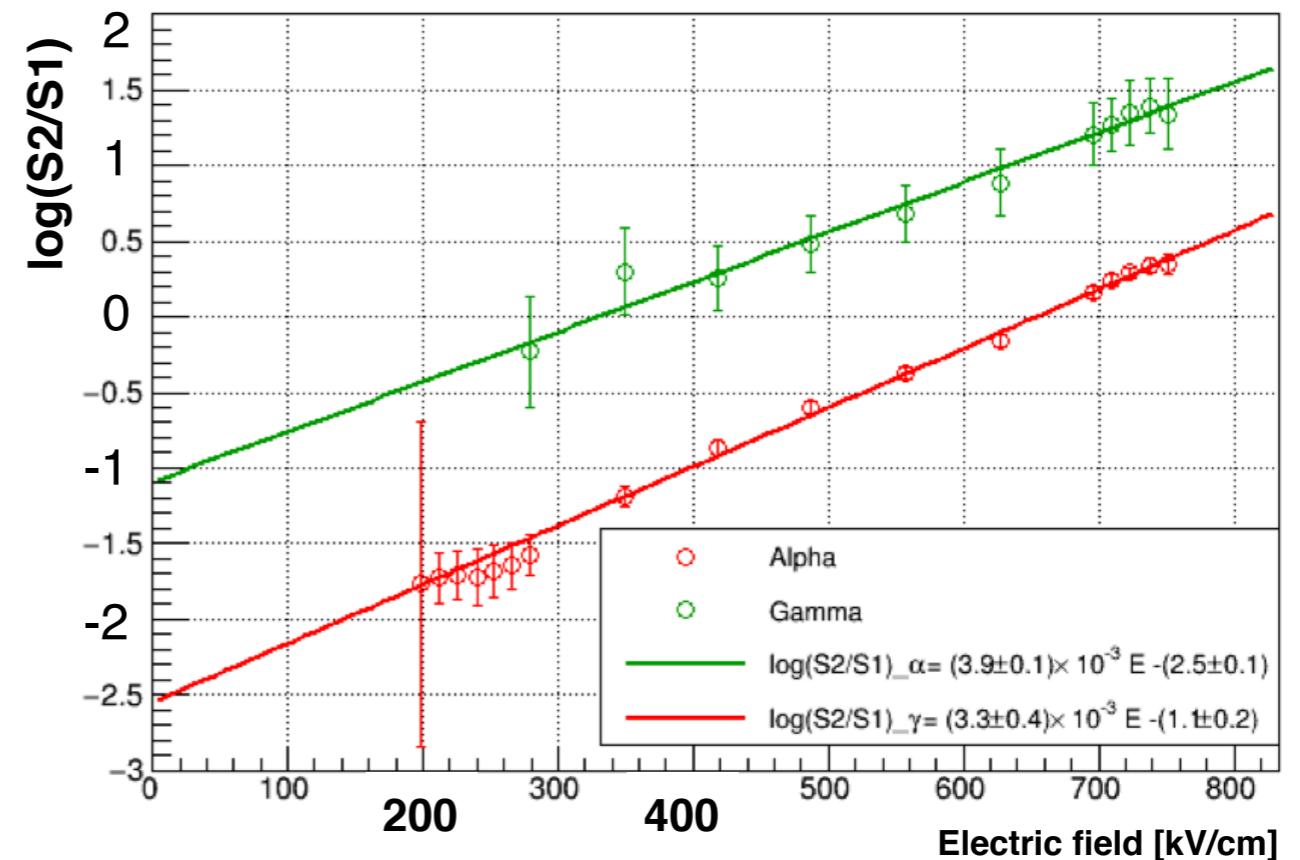
→ S2 threshold 412 kV/cm

S2/S1 の電場依存性

5kVでの $\log(S2/S1)$ のヒストグラム

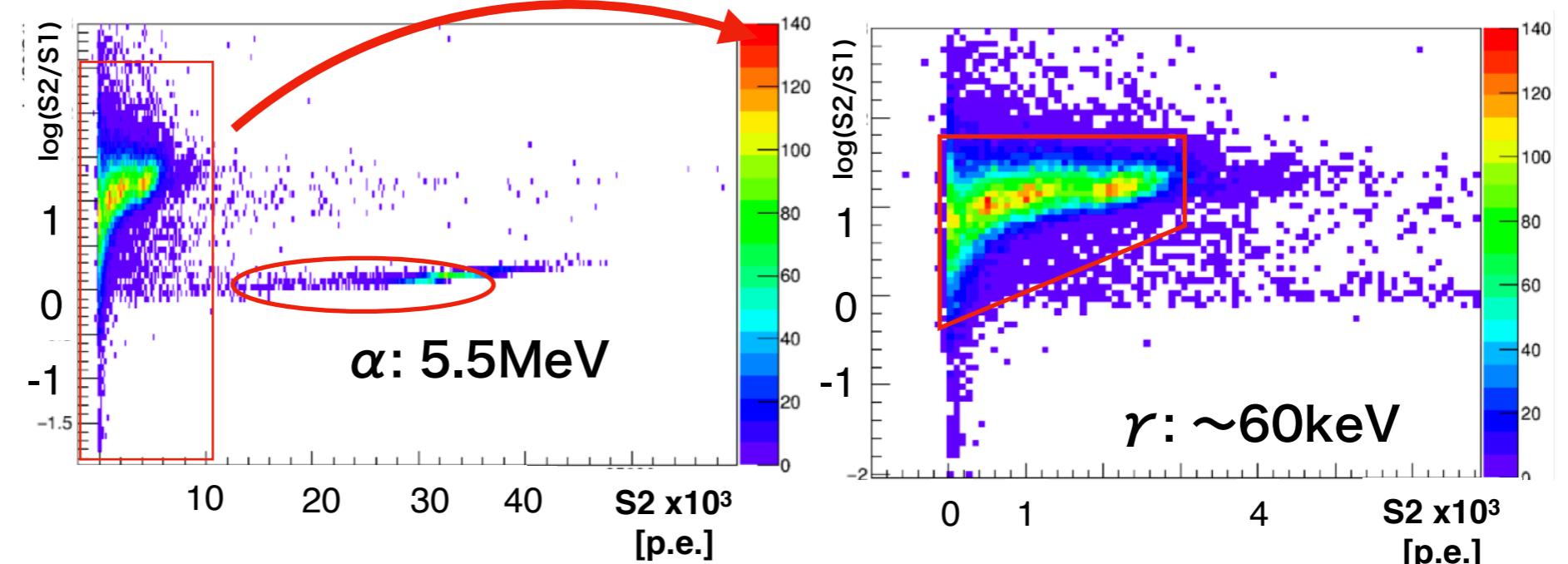


各電場ごとの $\log(S2/S1)$



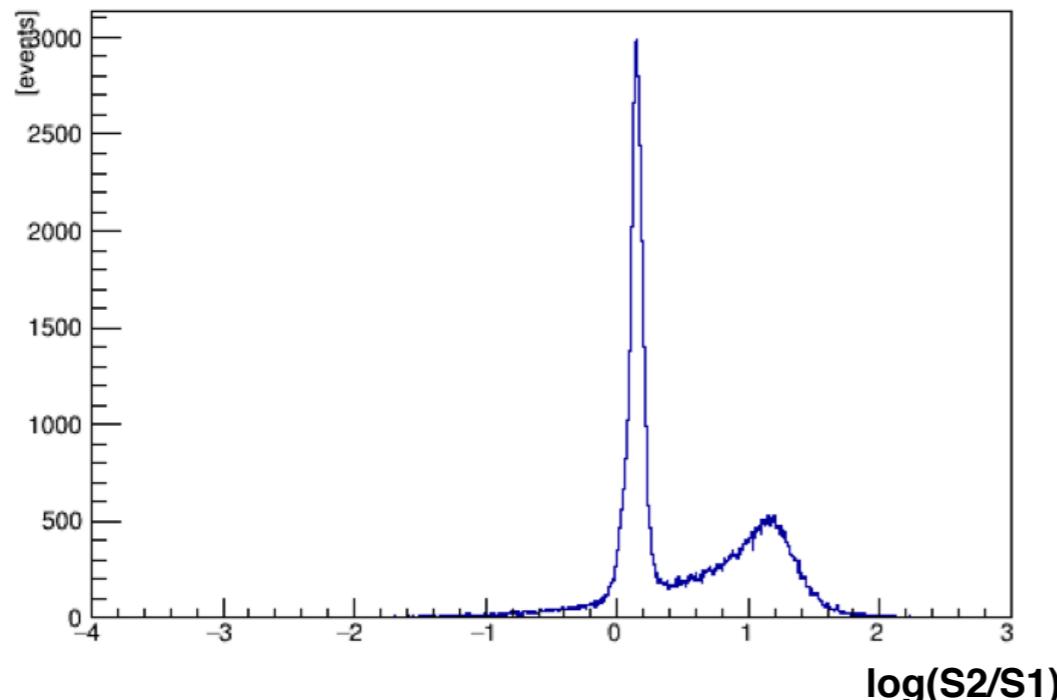
- α 5.5 MeVと γ 60 keV以下を S2/S1で識別することができた

5kVでのS2と $\log(S2/S1)$ の関係

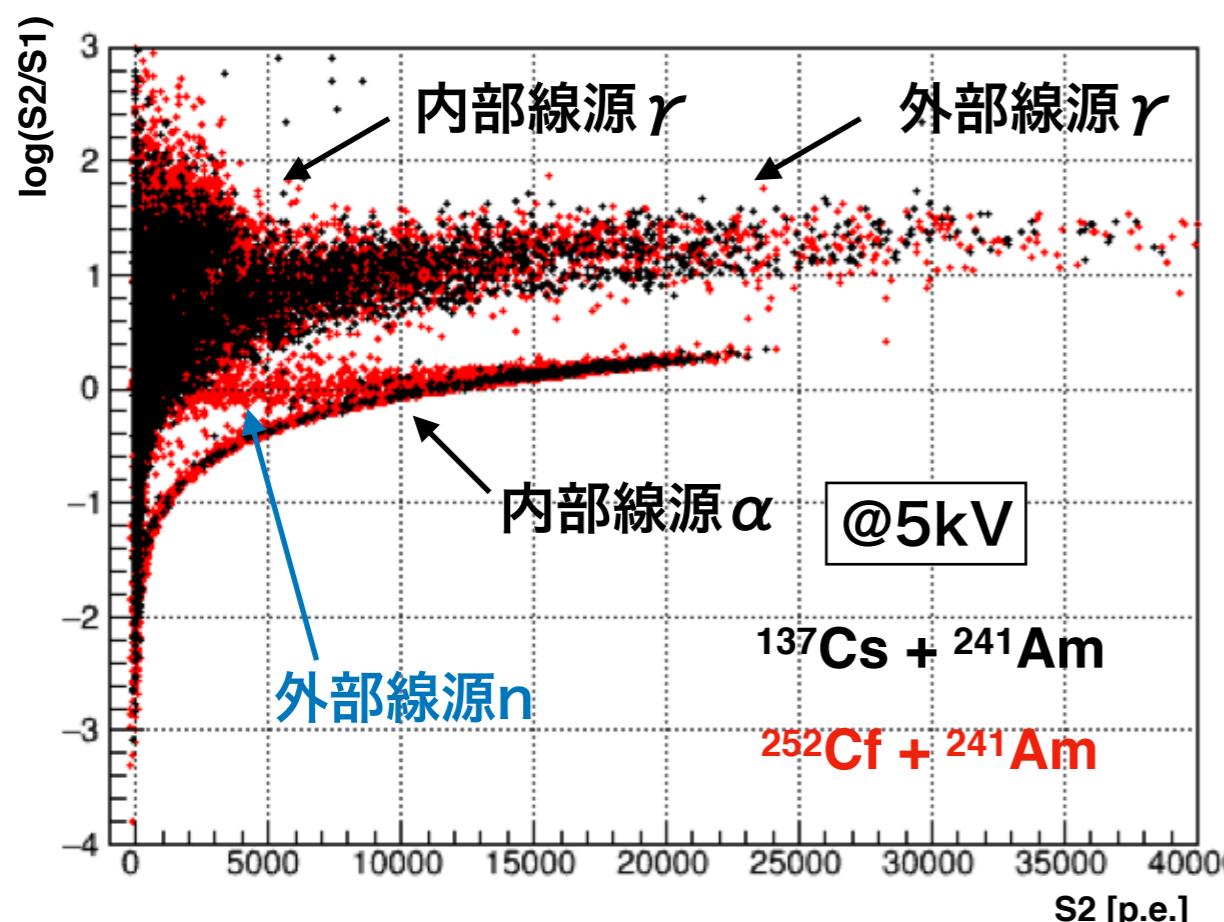
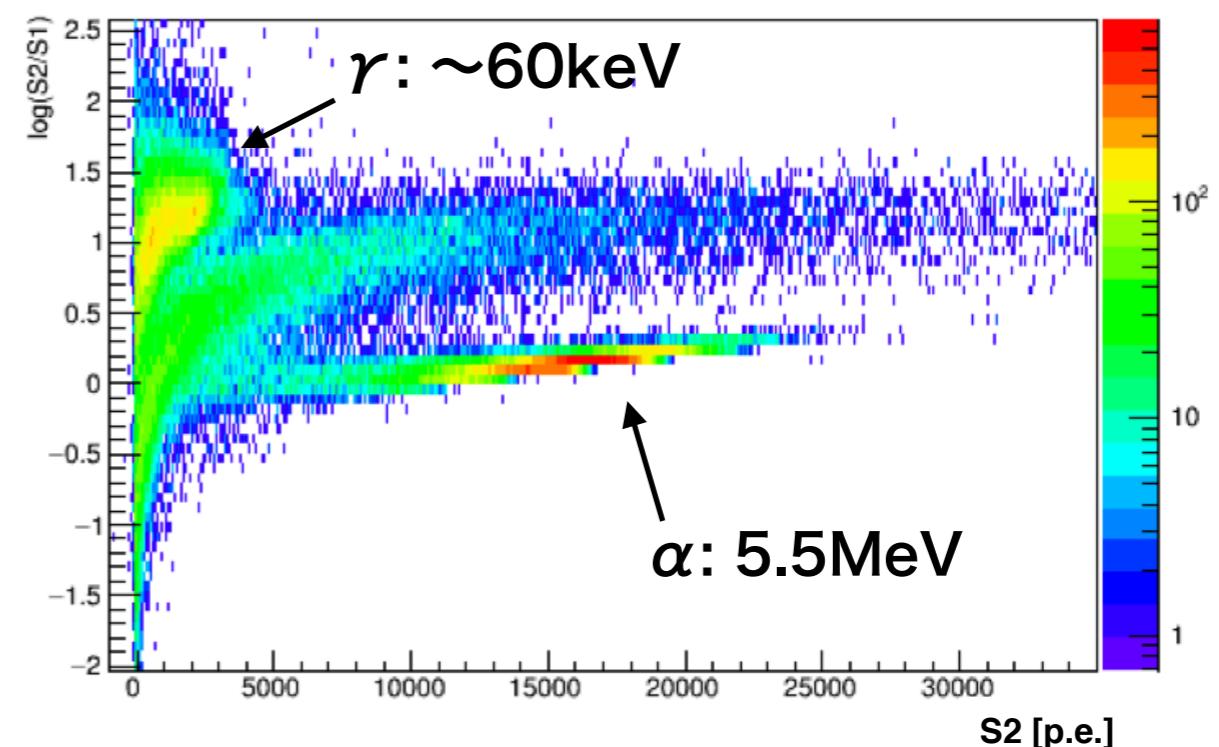


252Cf外部線源@5kV でのS1とS2

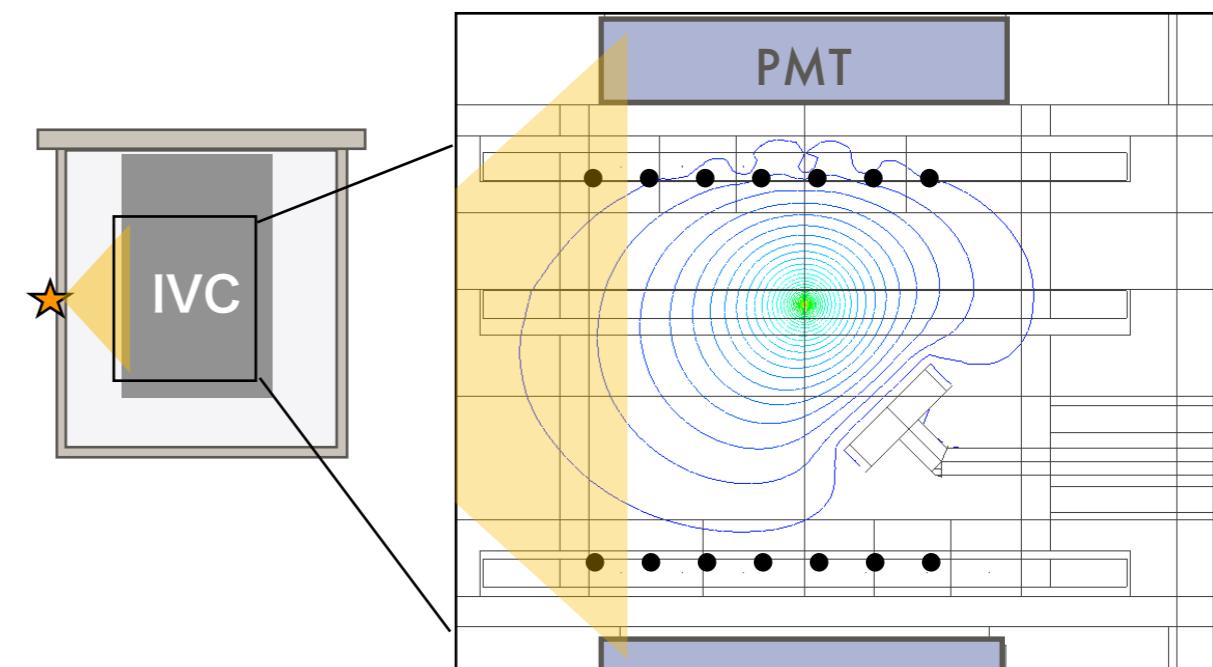
5kVでの $\log(S2/S1)$ のヒストグラム



5kVでのS2と $\log(S2/S1)$ のヒストグラム



IVC全体で電場が整っているわけではないため

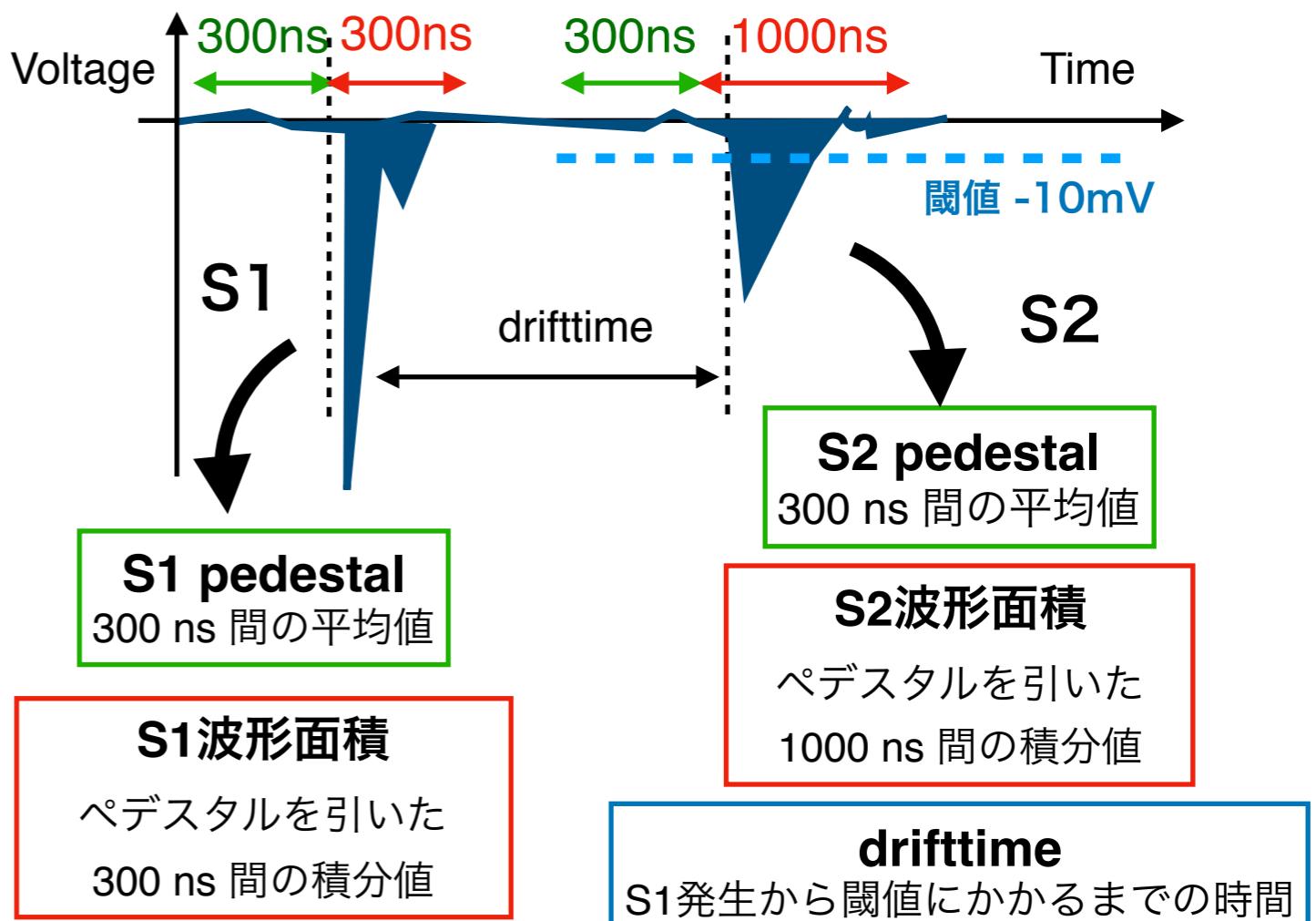
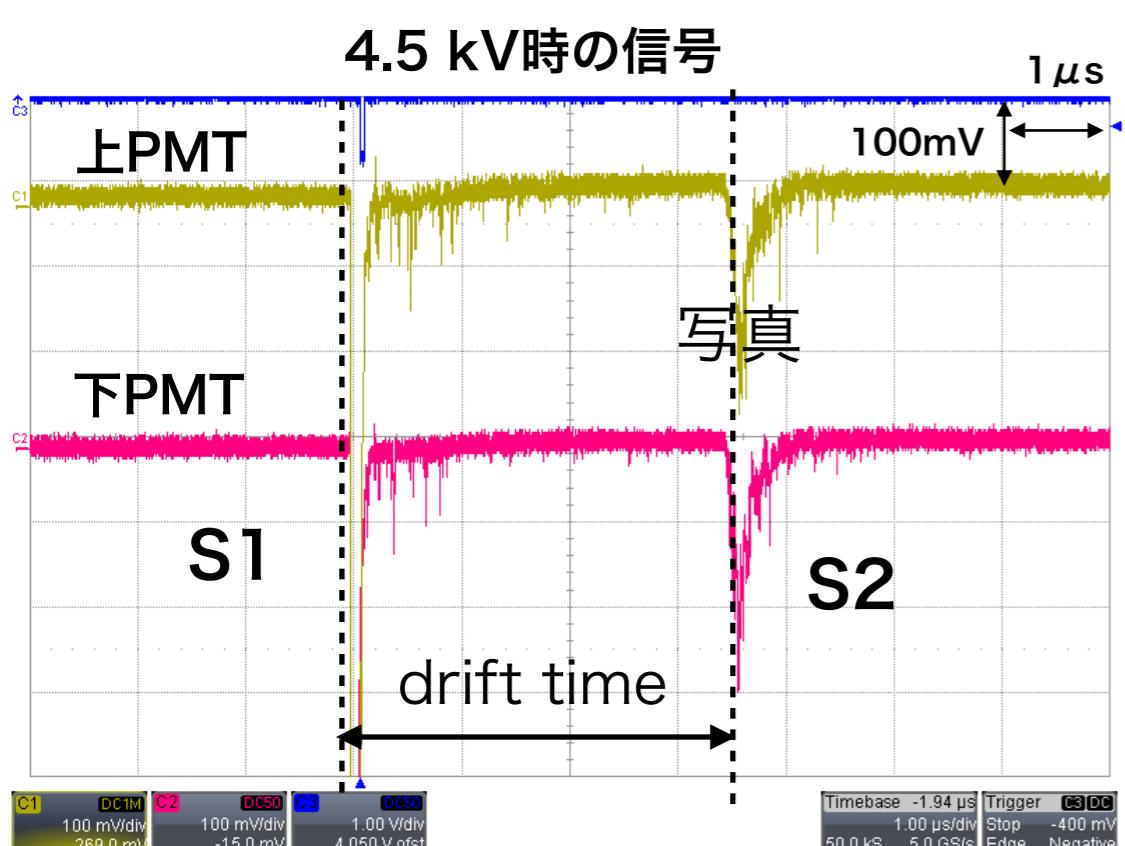
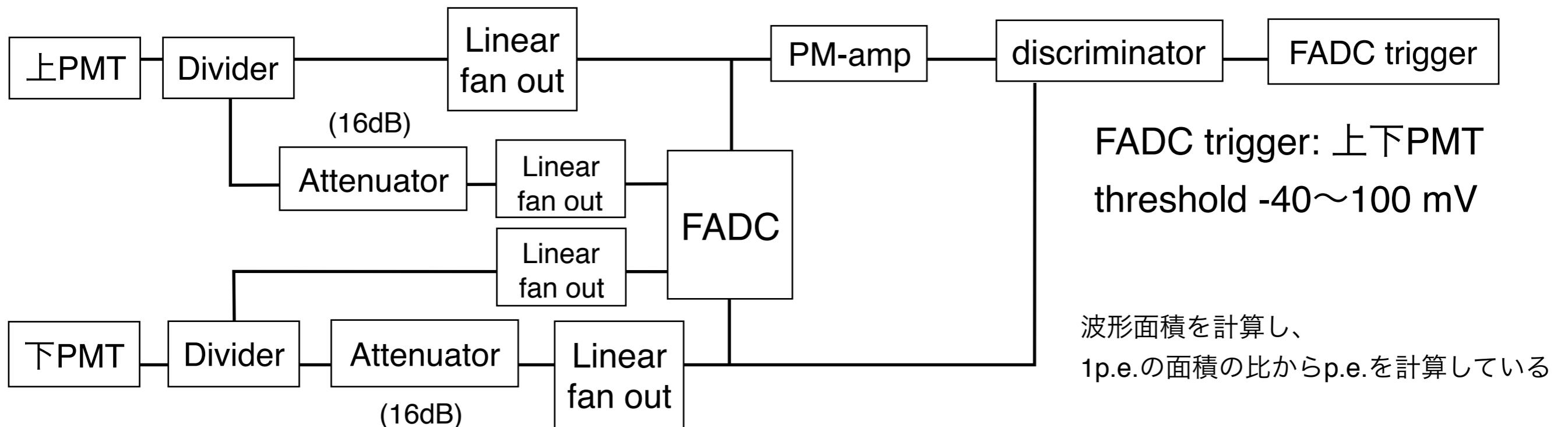


まとめ

- ・表面線源を用いてとワイヤー(距離を8.1mm)のセットアップで実験したところ先行研究を再現する電場変化に伴ったS1,S2の観測ができた
- ・13.9 keV, 26.3 keV, 59.5 keVの低エネルギー γ 線のS2観測ができた
世界初！
- ・ α :5.5 MeVと γ :~60keVをS2/S1で識別することができた
- ・さらなる解析を進めると ^{252}Cf による γ と中性子の識別はできそう

Back up

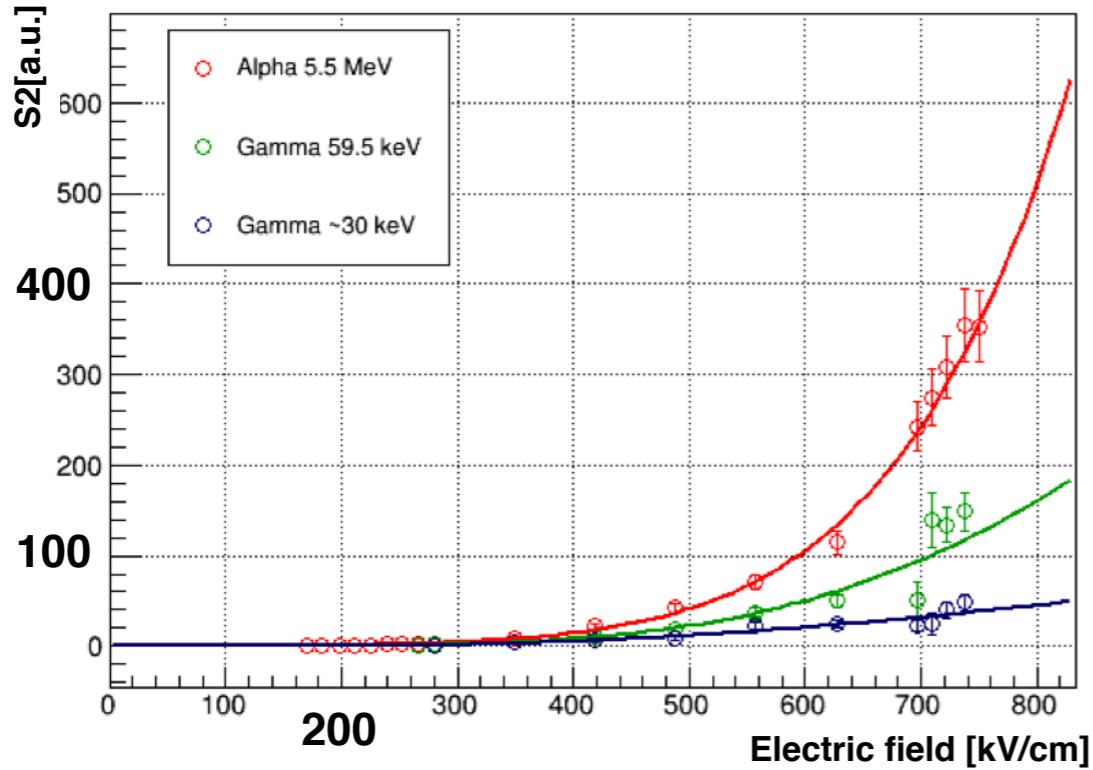
DAQと解析方法



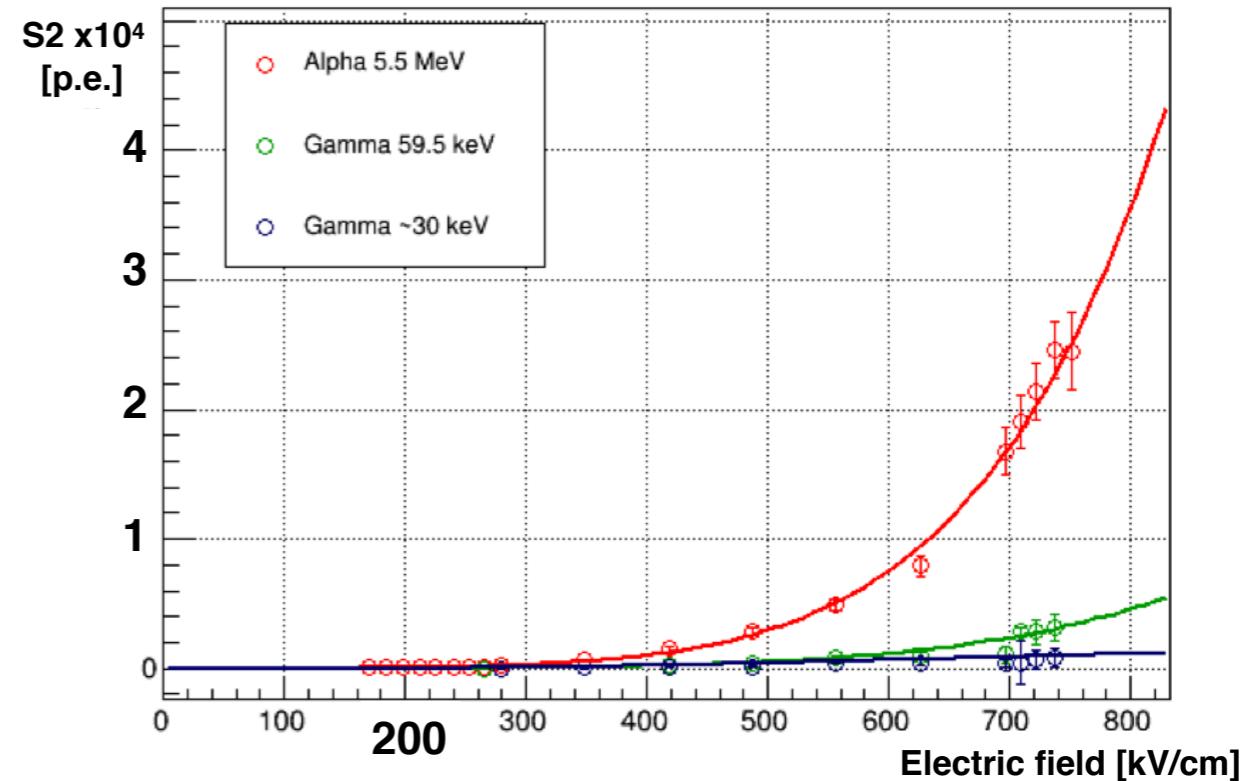
S2の電場依存性

S2 threshold 212 kV/cm

各電場ごとの相対S2光量



各電場ごとのS2光量



～ Fitting function ～

$$\textcircled{1} \quad S_2 = p_0 \times \exp\{-p_1 / (E_{\text{wire}} - p_2)\}$$

5.5 MeV

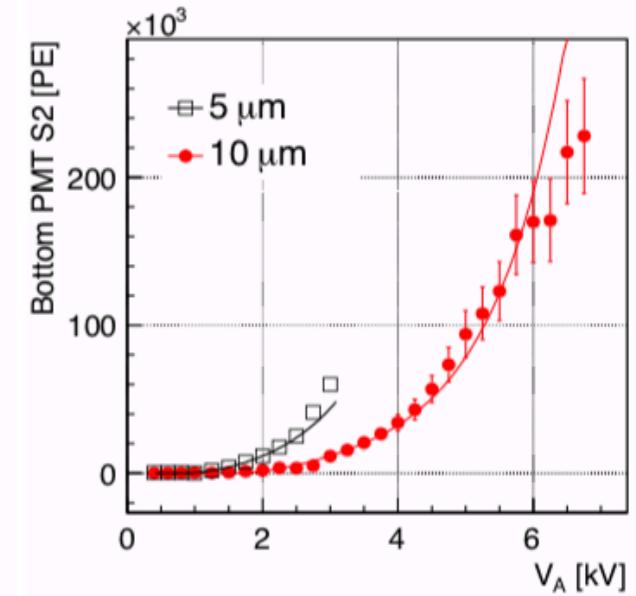
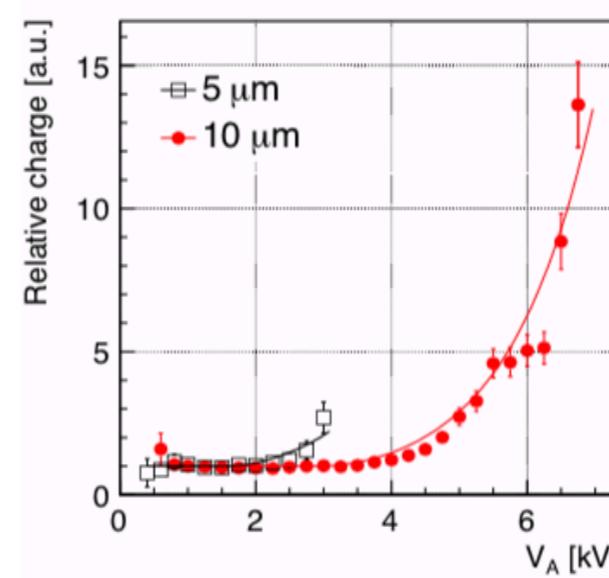
$$S_2 = (-1.0 \pm 0.3) \times 10^{10} \times \exp\left(-\frac{(2.2 \pm 0.1) \times 10^4}{E_{\text{wire}} + (1.02 \pm 0.04) \times 10^3}\right)$$

59.5 keV

$$S_2 = (-2.0 \pm 2.2) \times 10^8 \times \exp\left(-\frac{(1.8 \pm 0.3) \times 10^4}{E_{\text{wire}} + (9.6 \pm 1.2) \times 10^2}\right)$$

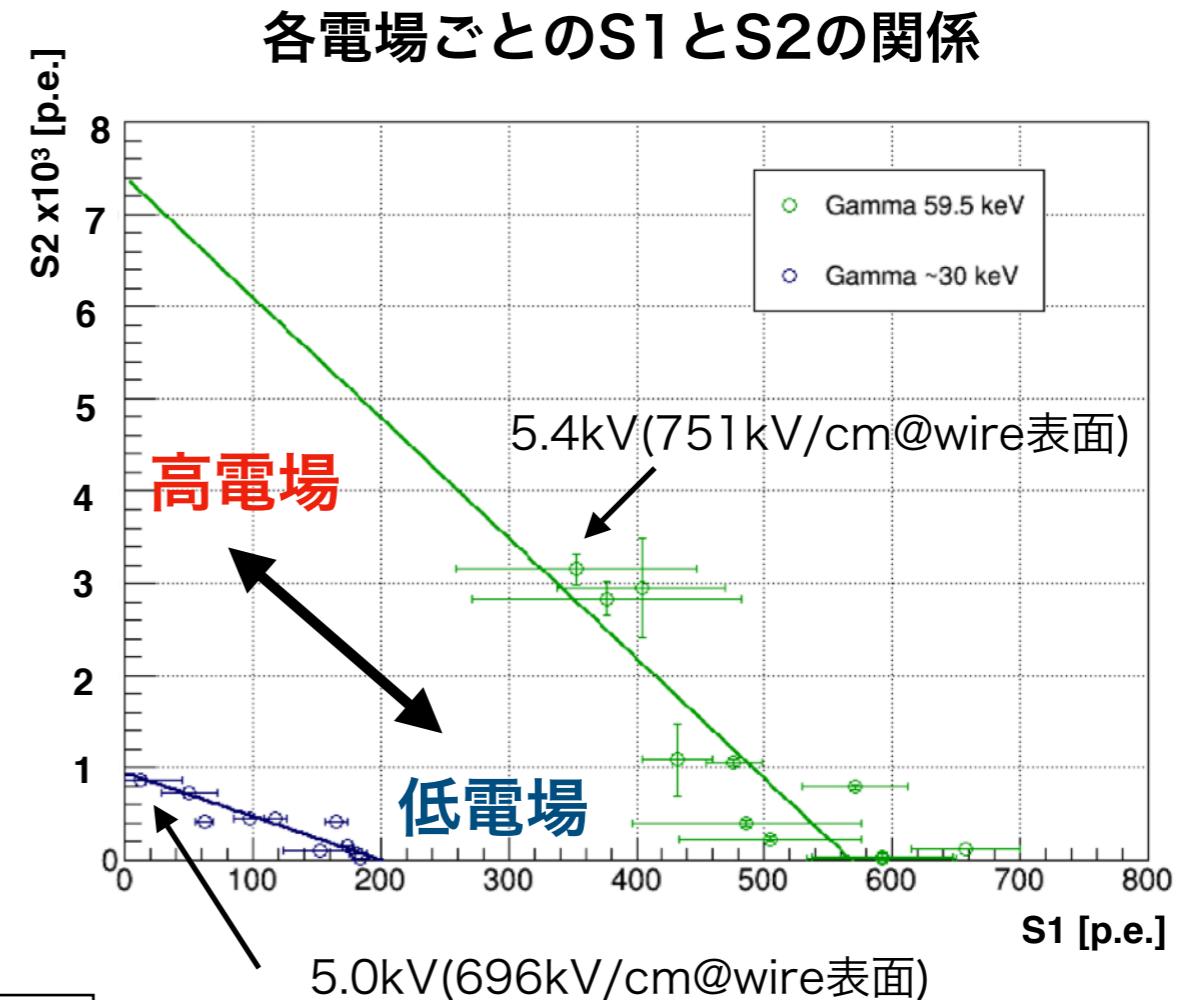
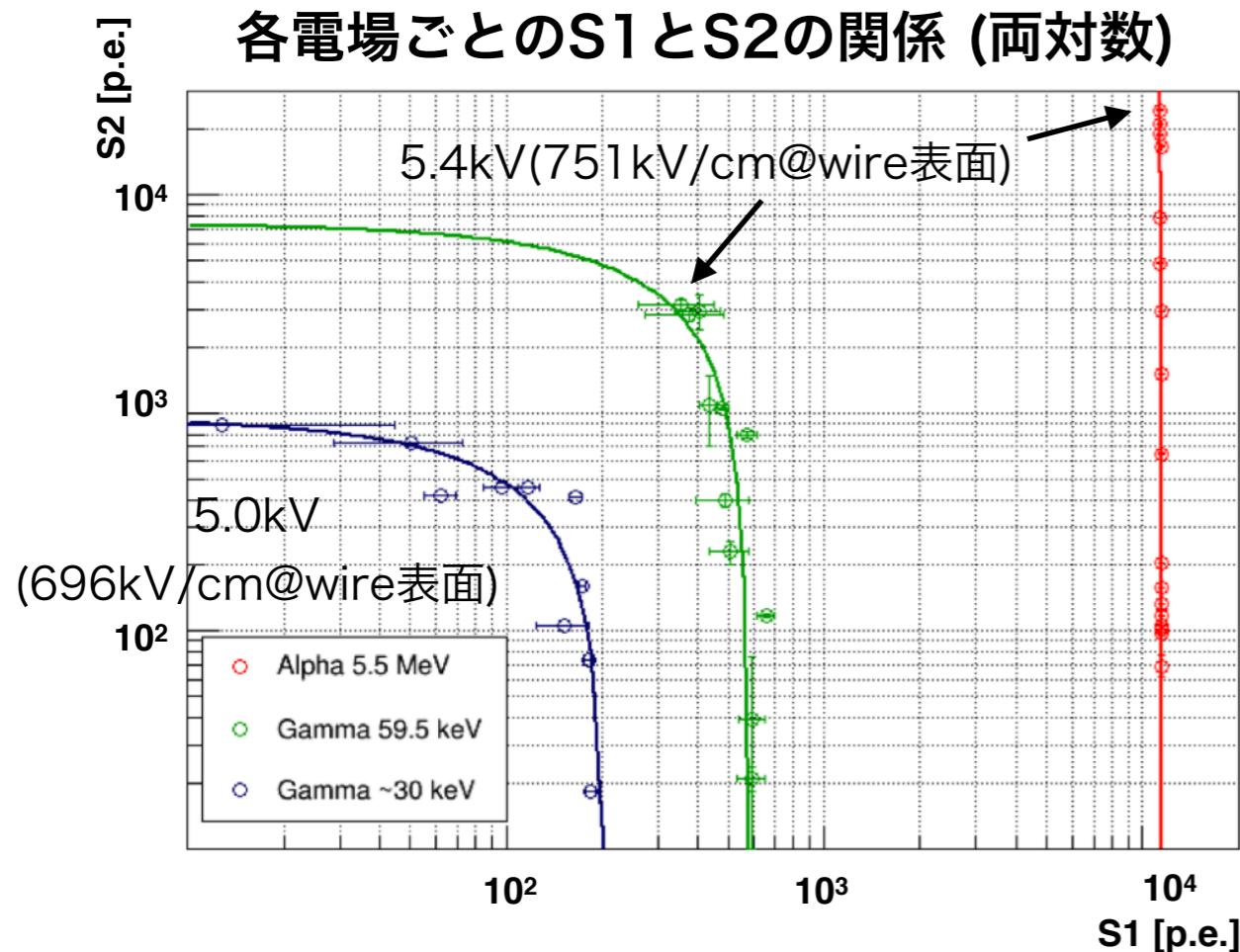
~30 keV

$$S_2 = (-6.4 \pm 8.4) \times 10^3 \times \exp\left(-\frac{(1.4 \pm 1.0) \times 10^3}{E_{\text{wire}} + (0.36 \pm 14.1) \times 10^2}\right)$$



E. Aprilea et al. physics.ins-det(2014)
→ S2 threshold 412 kV/cm

各電場での ^{241}Am のS1とS2の関係



~ Fitting function ~

① pol1

5.5 MeV

$$S_2 = (-350.9 \pm 7.7) \times S_1 + (4.013 \pm 0.089) \times 10^6$$

59.5 keV

$$S_2 = (-13.0 \pm 3.6) \times S_1 + (7.4 \pm 1.8) \times 10^3$$

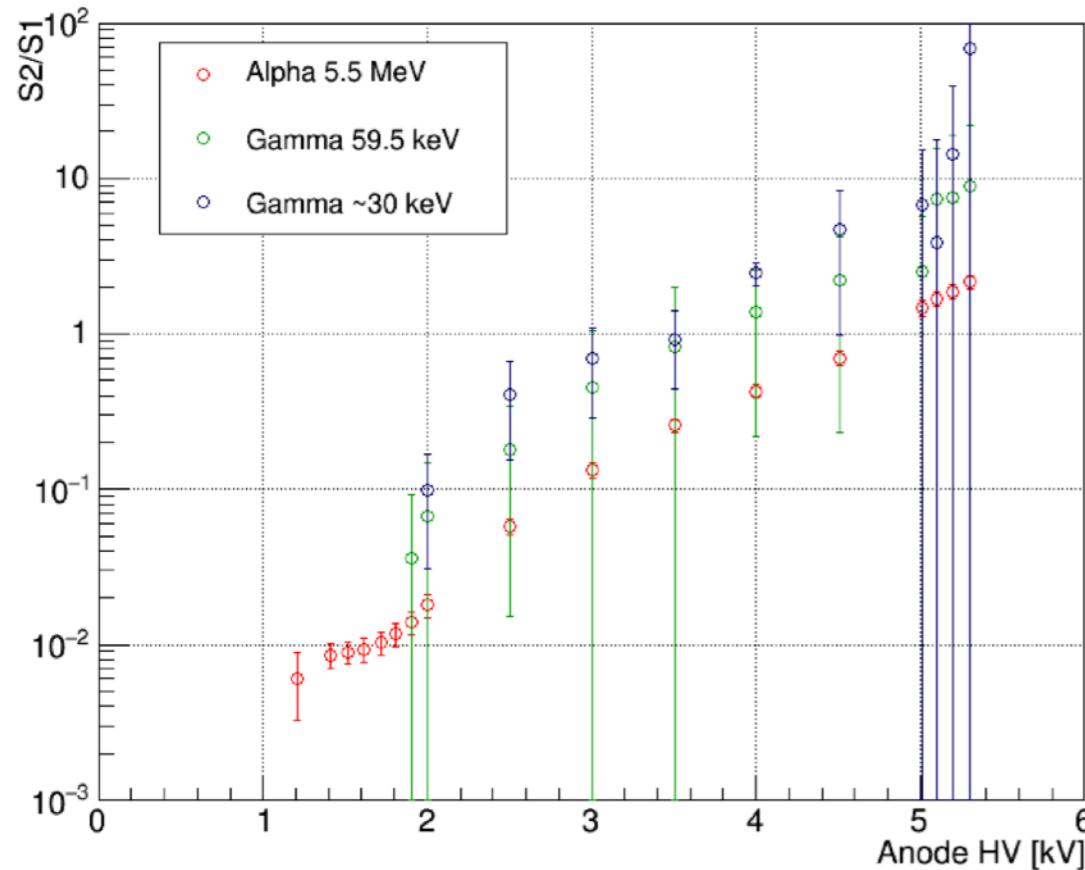
-30 keV

$$S_2 = (-4.72 \pm 0.31) \times S_1 + (9.46 \pm 0.49) \times 10^2$$

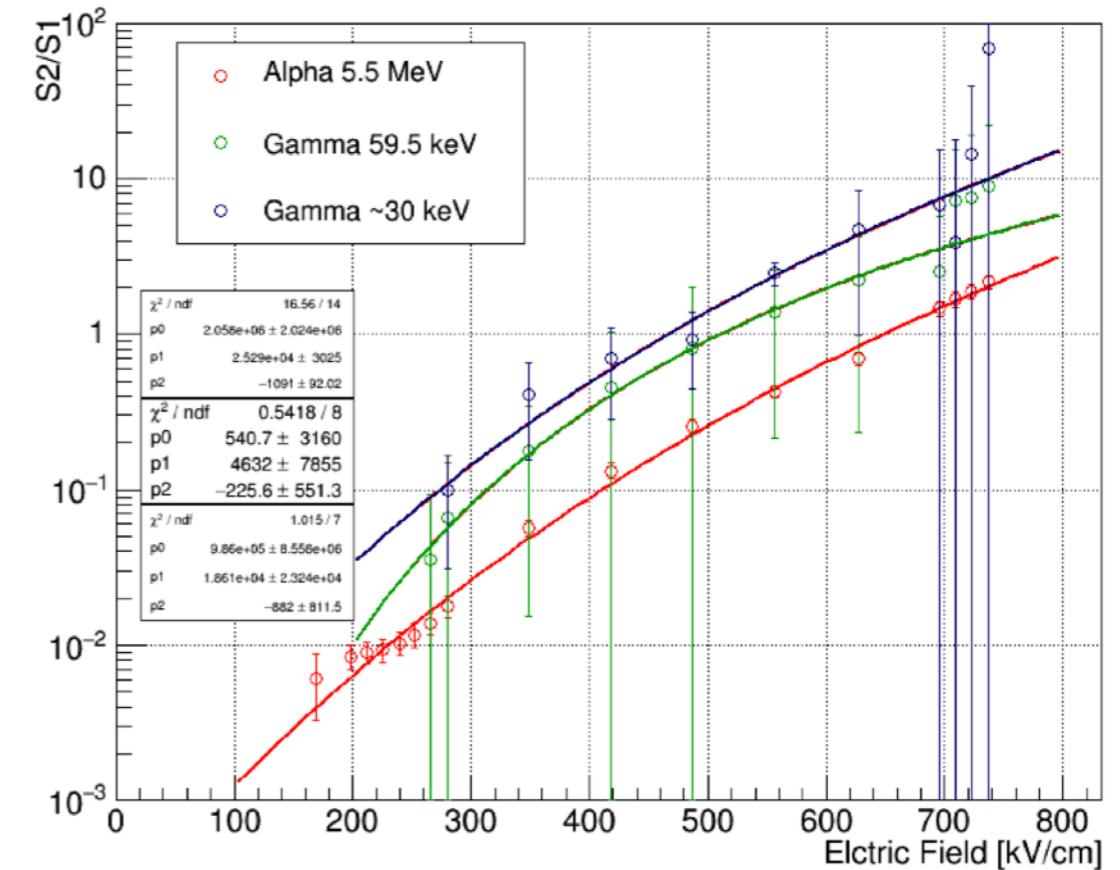
- ・高電場になるほどS2が大きくなり
S1は小さくなる

S2/S1 の電場依存性

各HVごとのS2/S1



各電場ごとのS2/S1



~ Fitting function ~

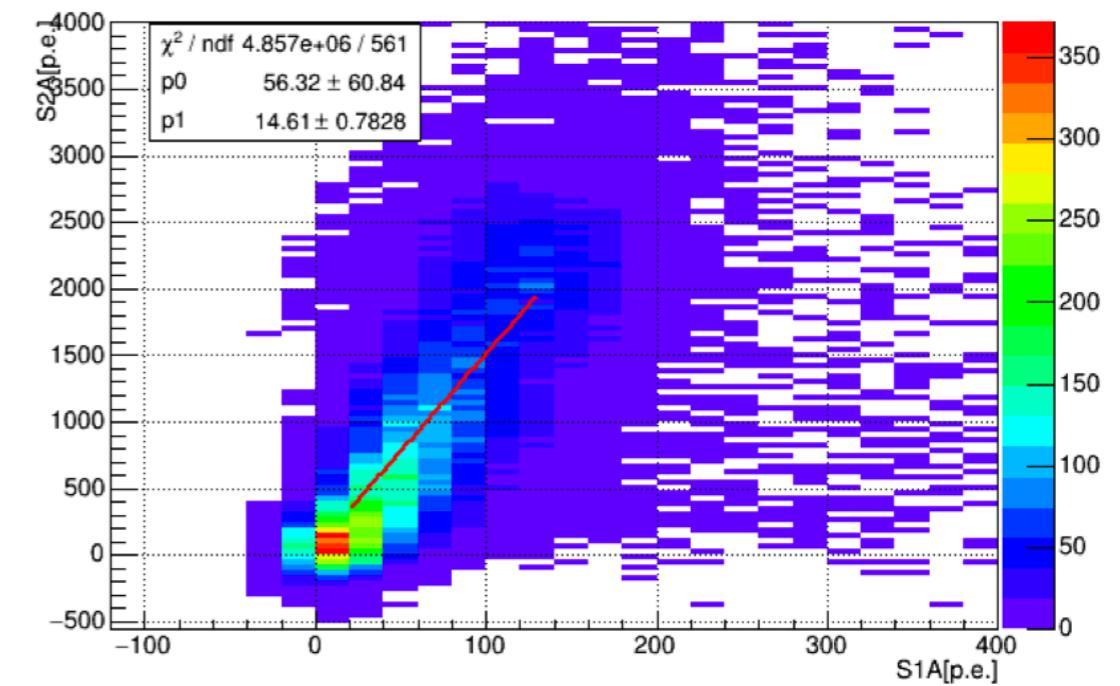
① pol1

Fitting function: exp

5.5 MeV

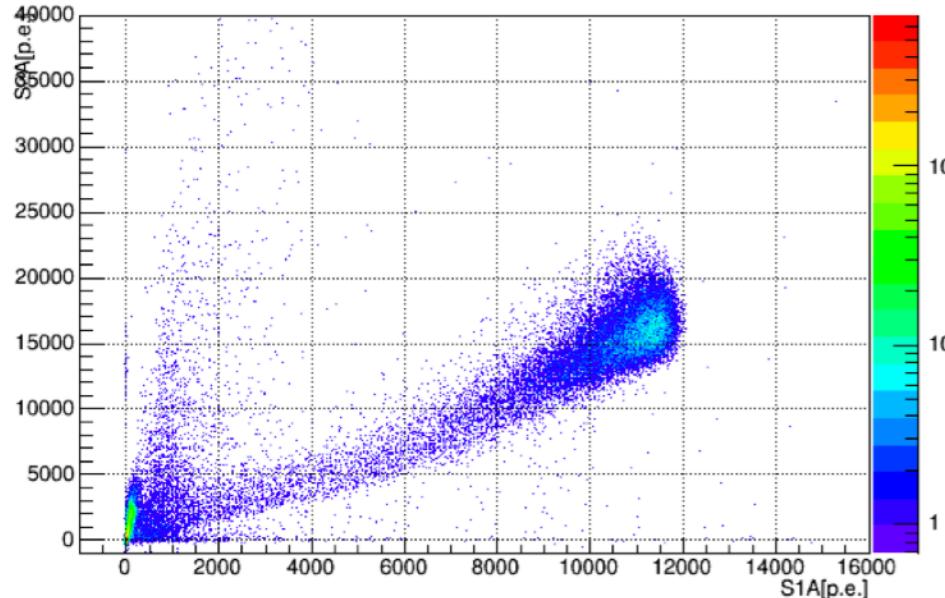
59.5 keV

~30 keV

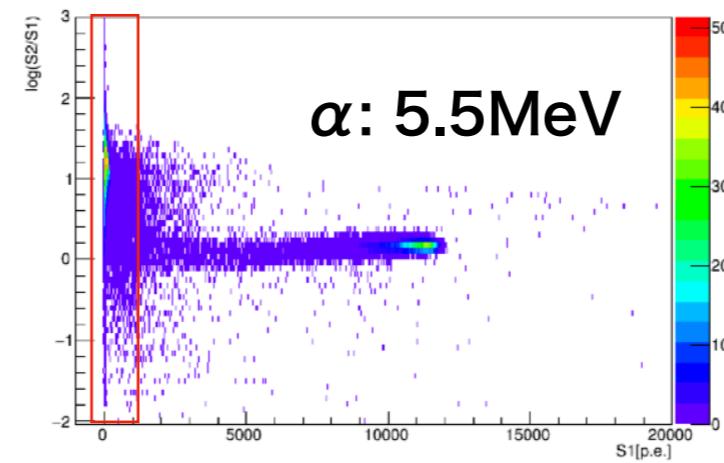


^{241}Am @5kV での S1 と S2

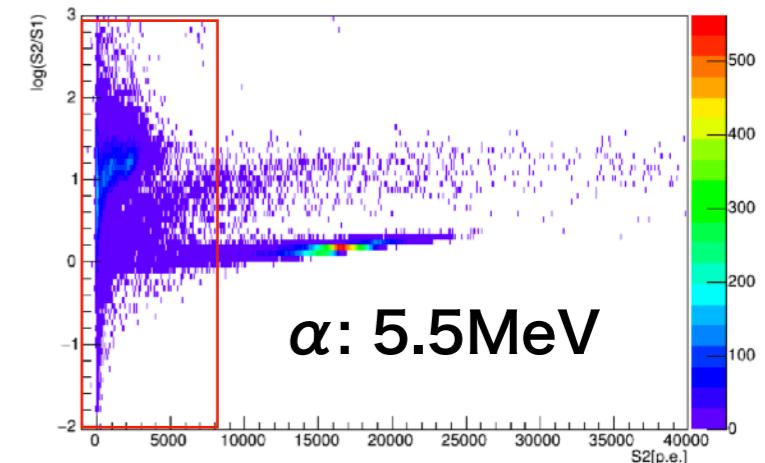
5kVでのS1とS2の関係



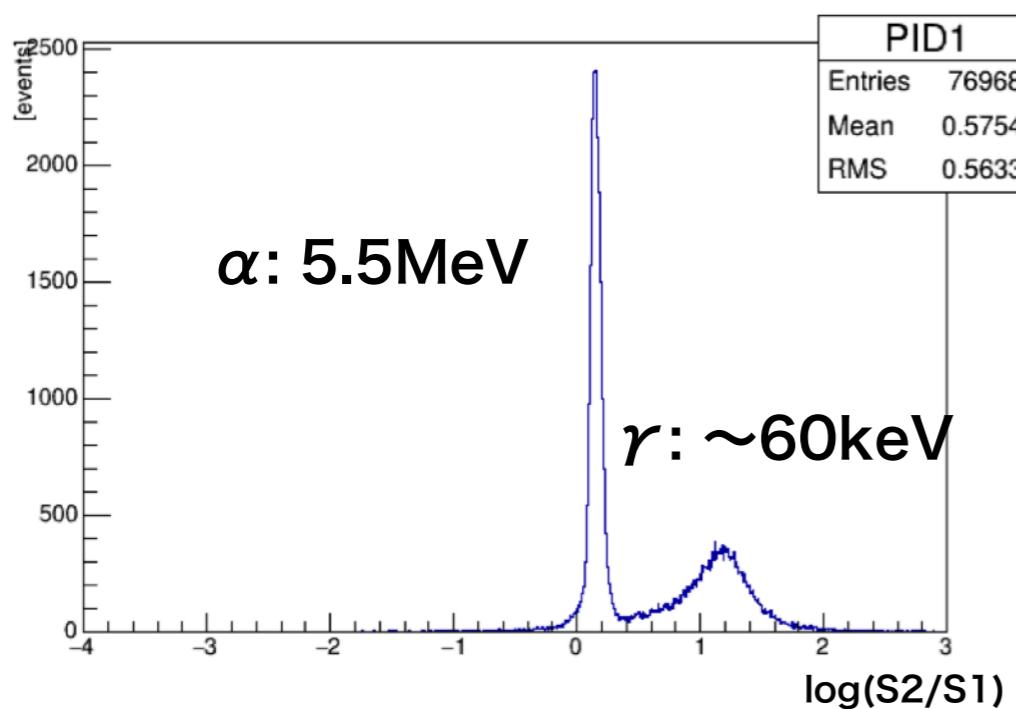
5kVでのS1と $\log(S2/S1)$ の関係



5kVでのS2と $\log(S2/S1)$ の関係



5kVでの $\log(S2/S1)$ のヒストグラム

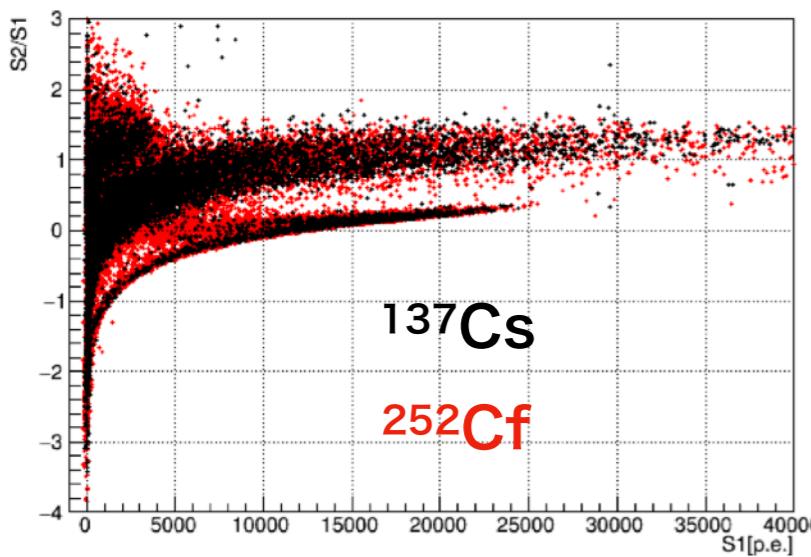
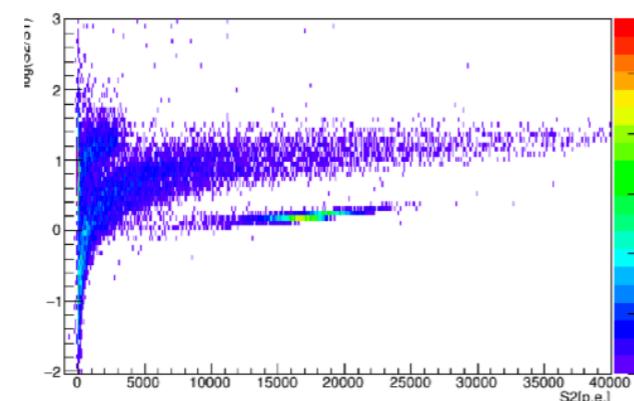
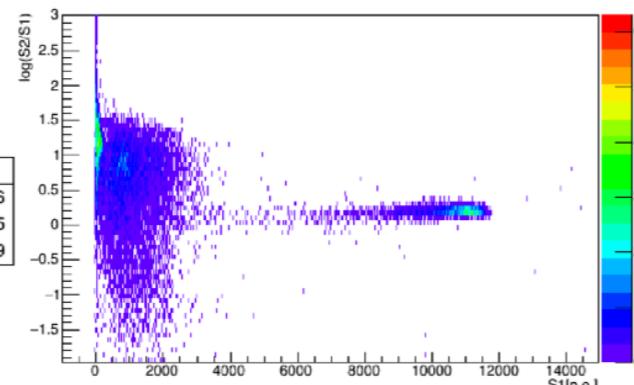
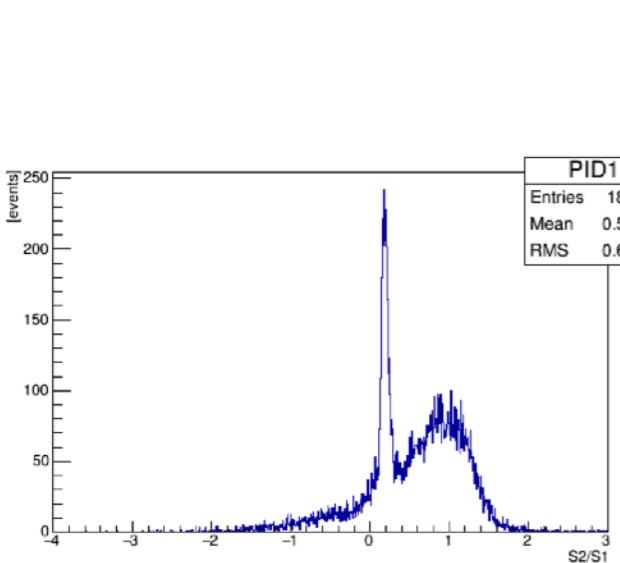


$0.1467 \pm 0.0005, 0.0413 \pm 0.0007$

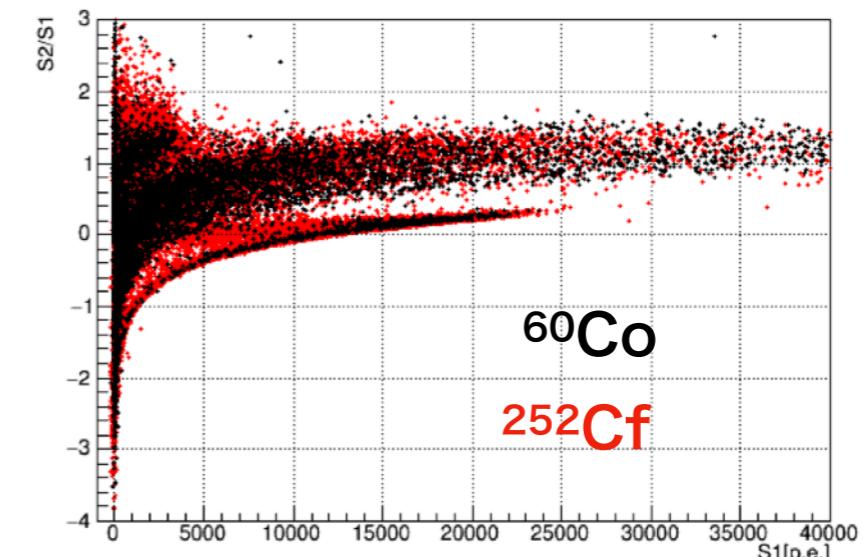
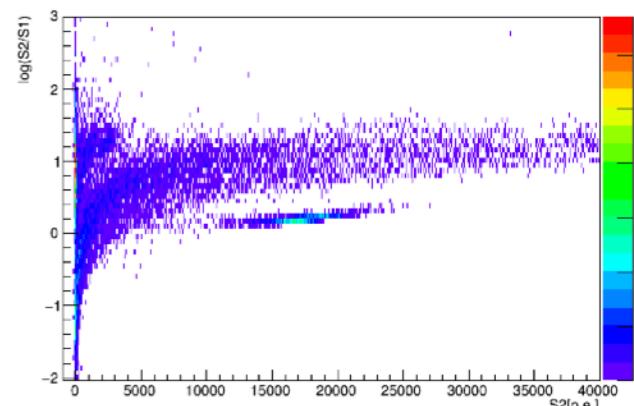
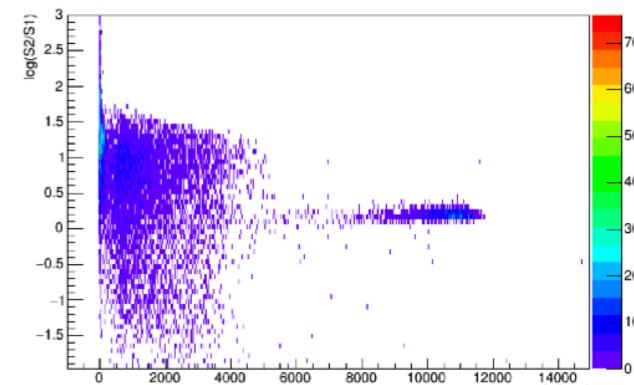
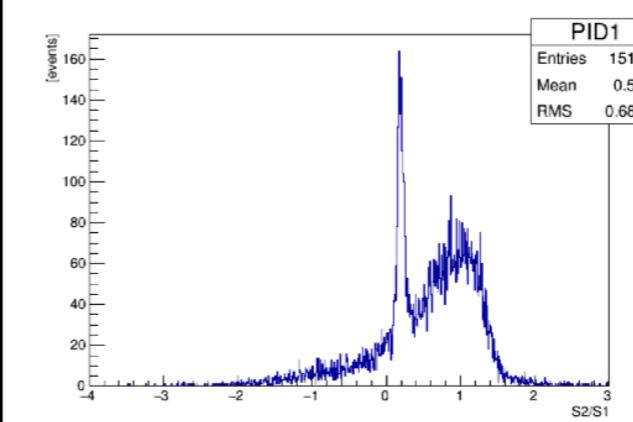
$1.172 \pm 0.001, 0.217 \pm 0.001$

^{137}Cs , ^{60}Co 外部線源@5kV でのS1とS2

^{137}Cs @5kV

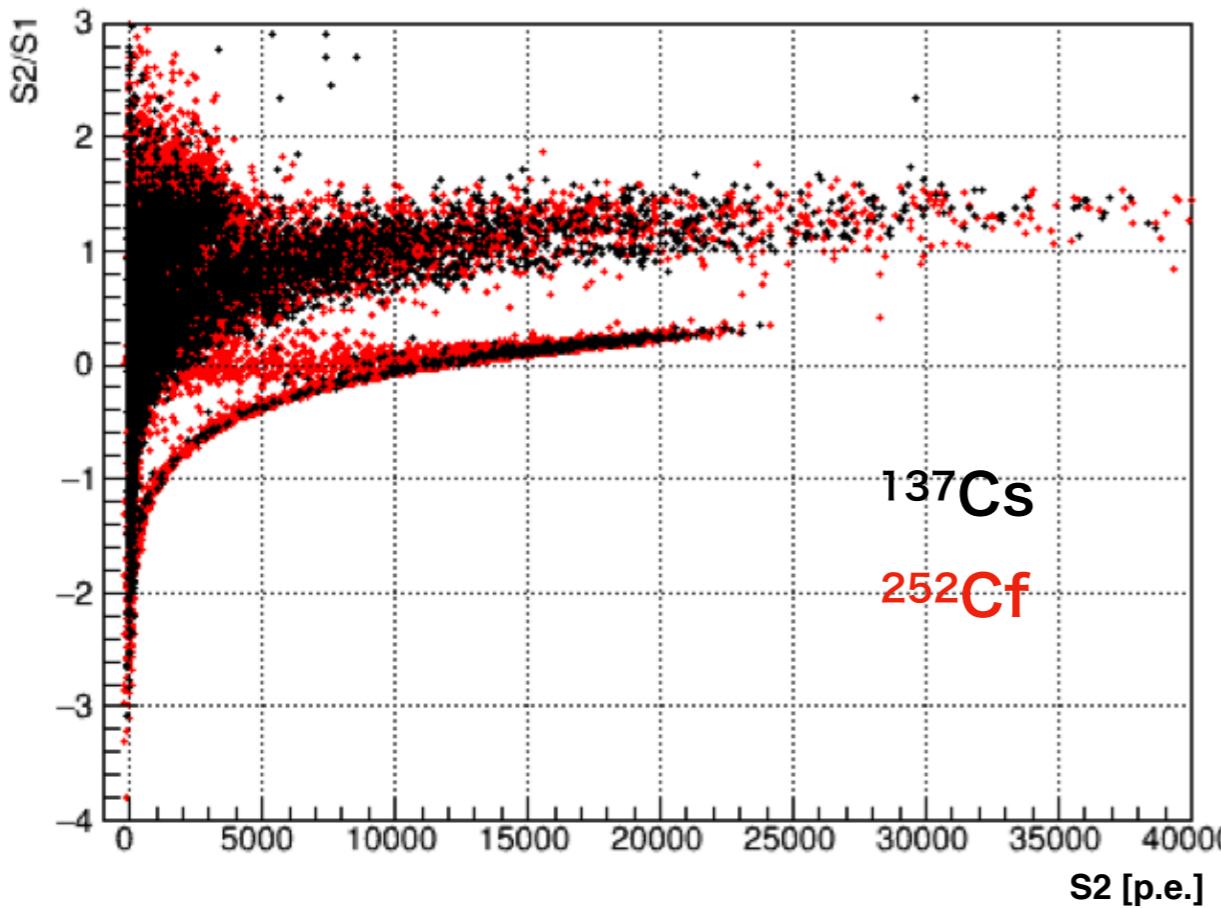


^{60}Co @5kV

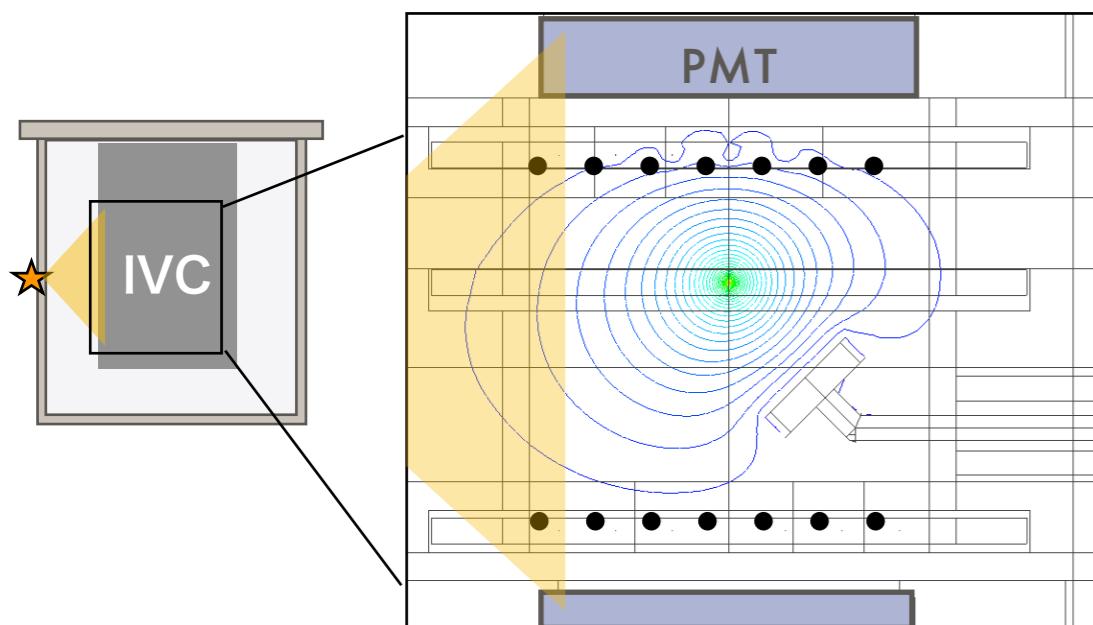
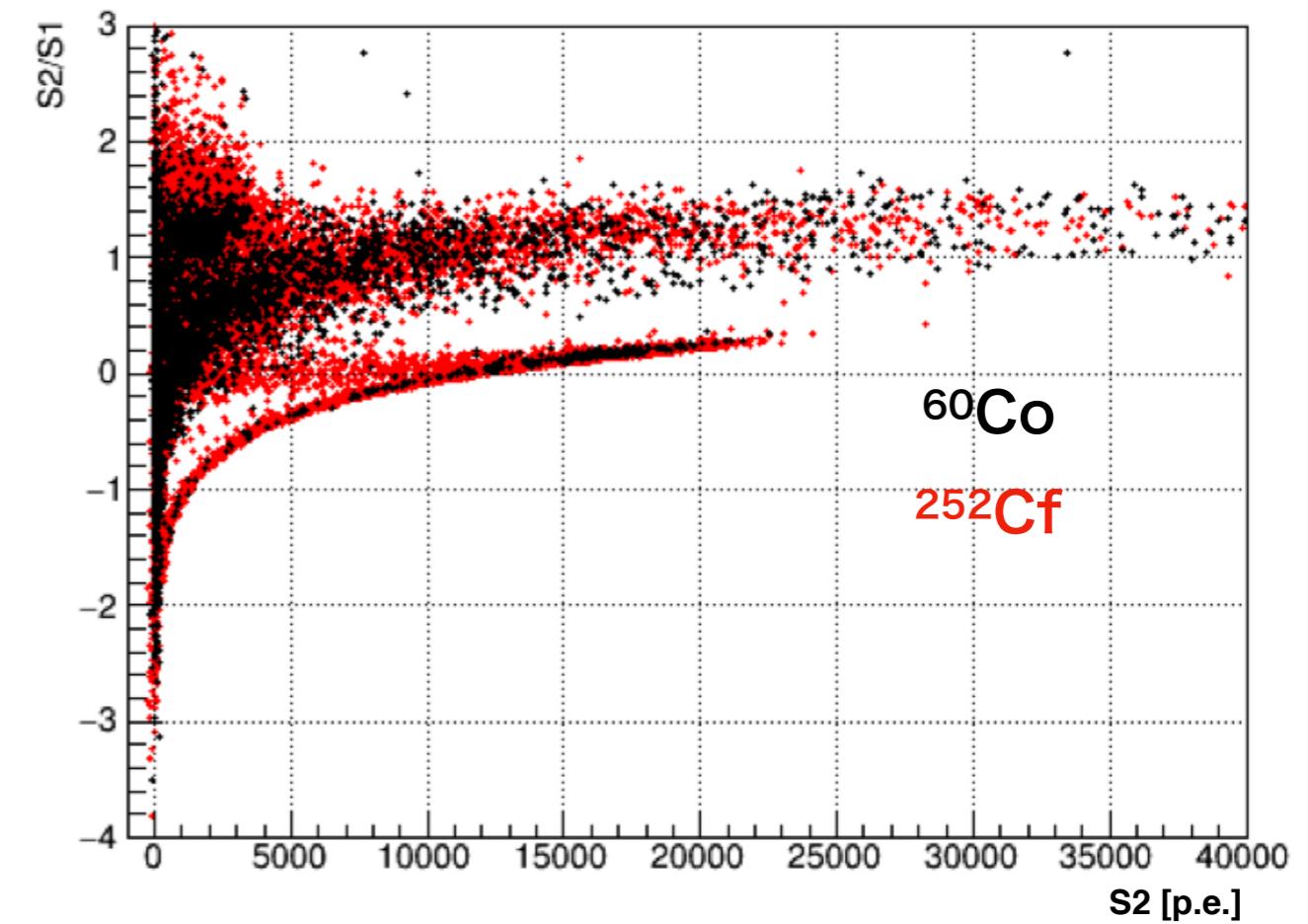


$^{137}\text{Cs}, ^{60}\text{Co}$ 外部線源@5kV でのS1とS2

$^{137}\text{Cs}@5\text{kV}$



$^{60}\text{Co}@5\text{kV}$



- Cf線源から照射される中性子と γ 線の識別は十分ではない
→ IVC全体で電場が整っているわけではないため

一個