

ワイヤー電極を用いた 比例蛍光読み出しによる XMASS実験感度向上のための研究2

菅澤佳世、伊藤好孝、増田公明、関谷洋之^A
名大ISEE、東大宇宙線研^A、他XMASS collaboration

2017/3/20
日本物理学会 第72回年次大会
大阪大学

研究目的

TPCを用いてXMASS実験の感度向上を目指す

1 相式LXeTPCのメリット

- S1、S2信号を使うことで反応位置をより正確に再構成、BG識別
- 液体のみのため検出器の形状が自由、球形のTPCの実現が可能

S1 : 直接蛍光

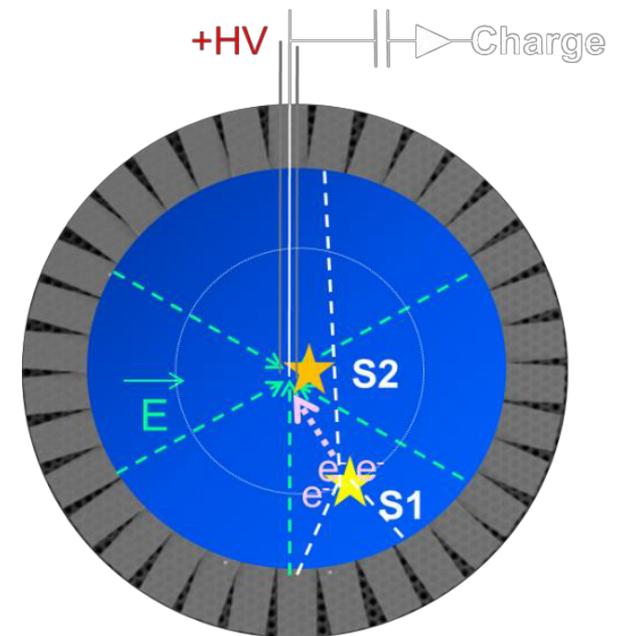
S2 : S1発生時に生じた電子をドリフトし、
高電場領域で発生する比例蛍光

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



研究目的

先行研究: 以下のような線源を用いてLXe中のS2が観測されている。

- Bi-207 (0.55, 1.05MeV γ , 0.98MeV β)
K. Masuda et al., Nucl. Instrum. Meth. 160 (1979) 247
- Cd-109 (22keV γ)
鈴木聡、日本物理学会誌 Vol.53, No.3, 1998
- Po-210 (5.4MeV α)
E. Aprile et al., 2014 JINST 9 P11012

LXe中でのS2発生の閾値
~ 400kV/cm

暗黒物質探索では、<100keV のイベントに対する感度が必要になる。

ワイヤーを電極に用いて、
1相式TPCのテストベンチでLXe中のS2について検証した。

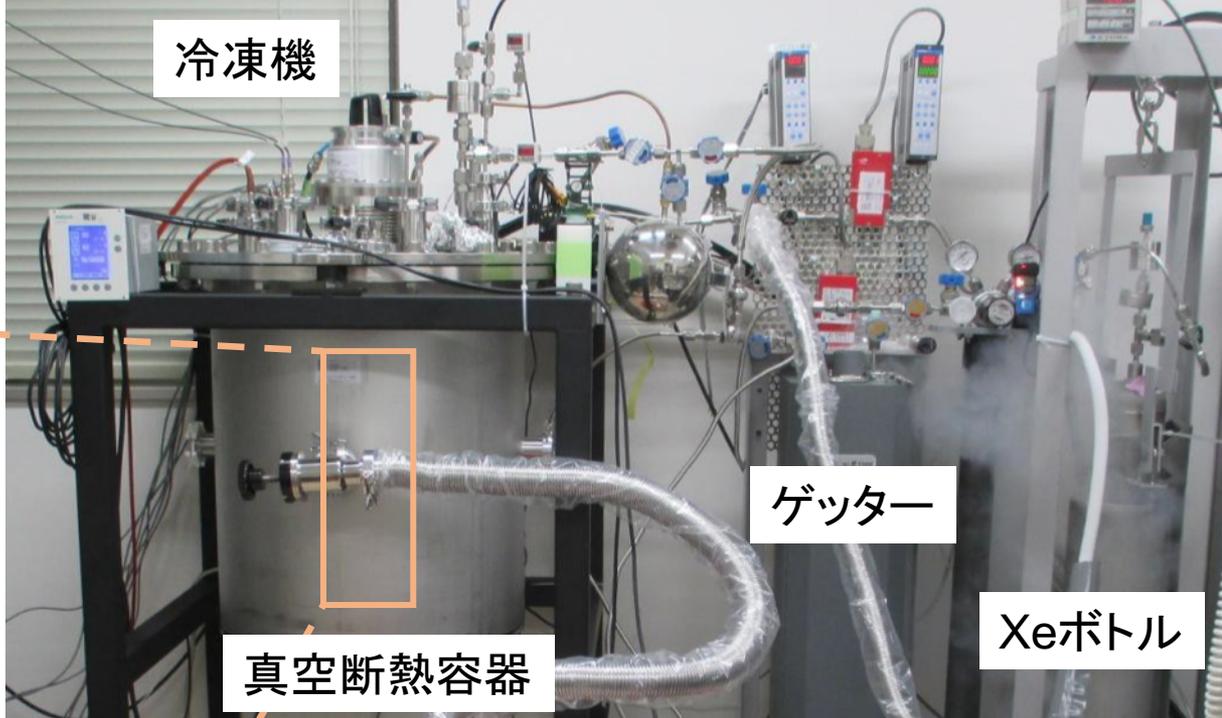
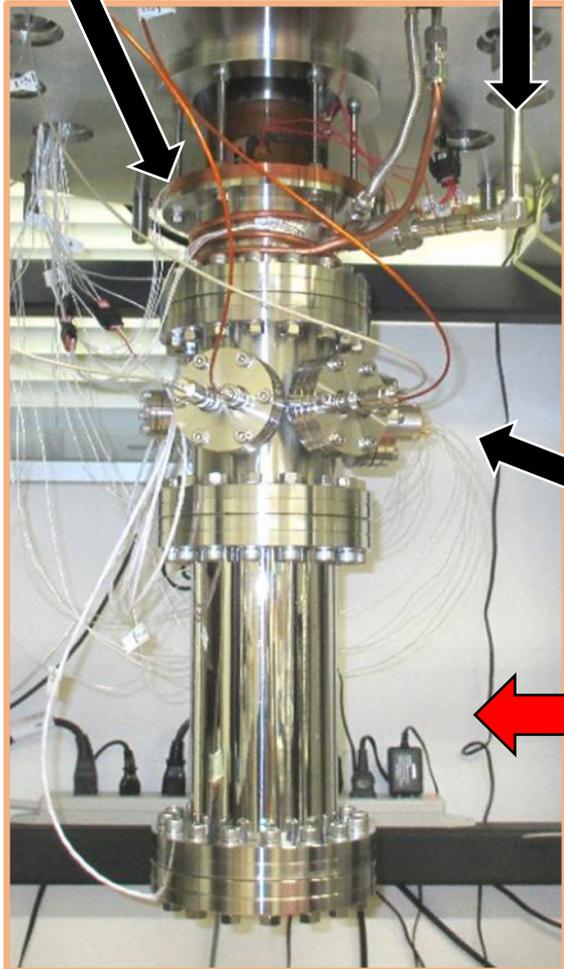
S2観測に使用した線源:

- Am-241 (5.5MeV α 、59.5keV γ)
- Cs-137 (662keV γ)

実験装置

熱交換円盤

Xeライン



フィードスルー
PMT、電極へのケーブル接続

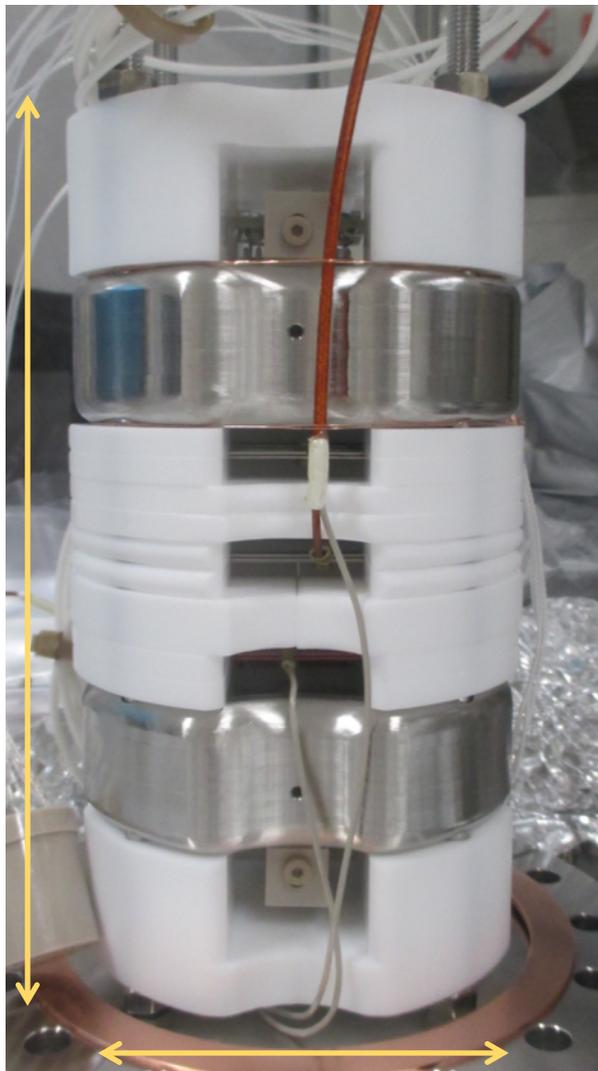
検出器部分

ゲッターを通してXeを純化しつつ
上部の冷凍機で冷却・液化し、
検出器部分にLXeを満たす。

Xe 1.2kg使用
= 400cc(liq), 200L(gas)

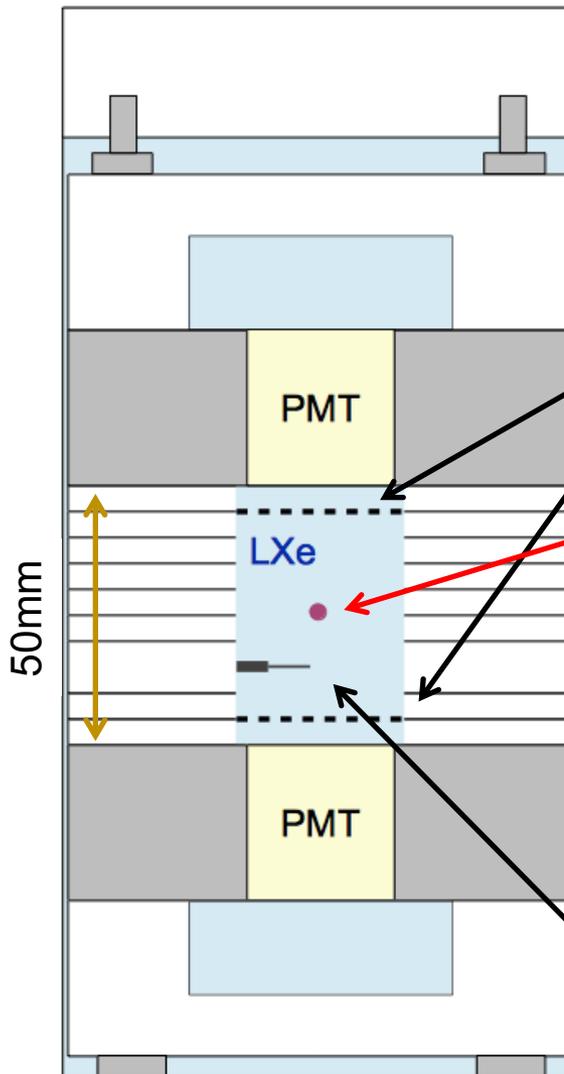
検出器内部

PMT
浜松ホトニクス
R8520-409
+HV



170mm

Φ95mm

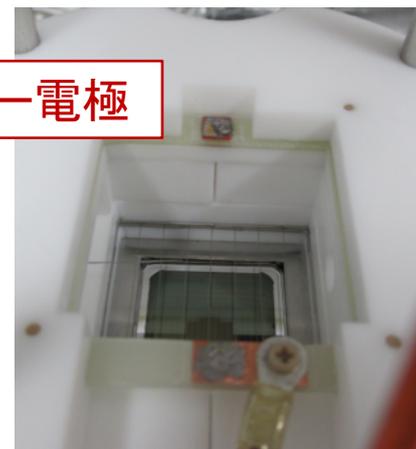


白:テフロンスペーサー

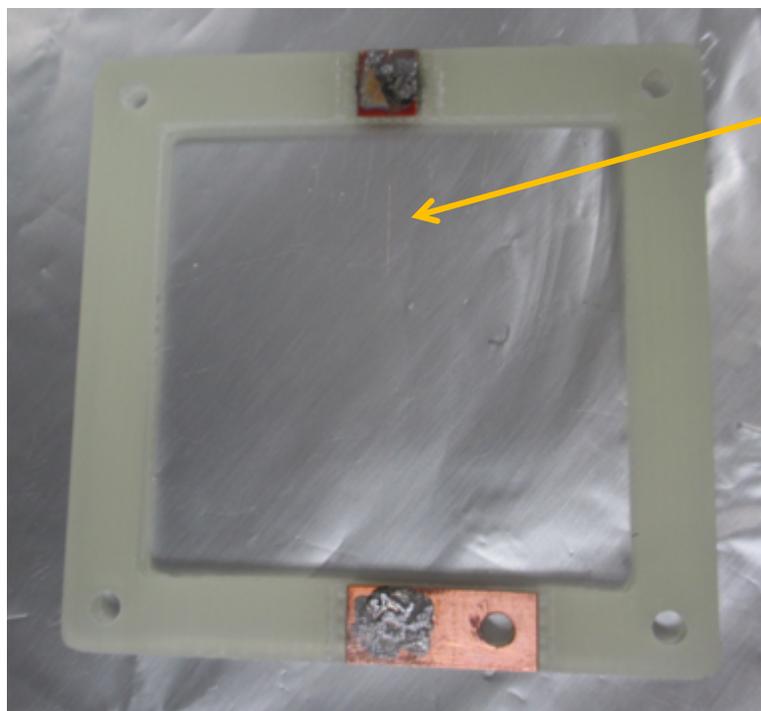
GNDワイヤー

ワイヤー電極

Am-241線源



ワイヤー電極



42mm

フレームの厚み1.6mm

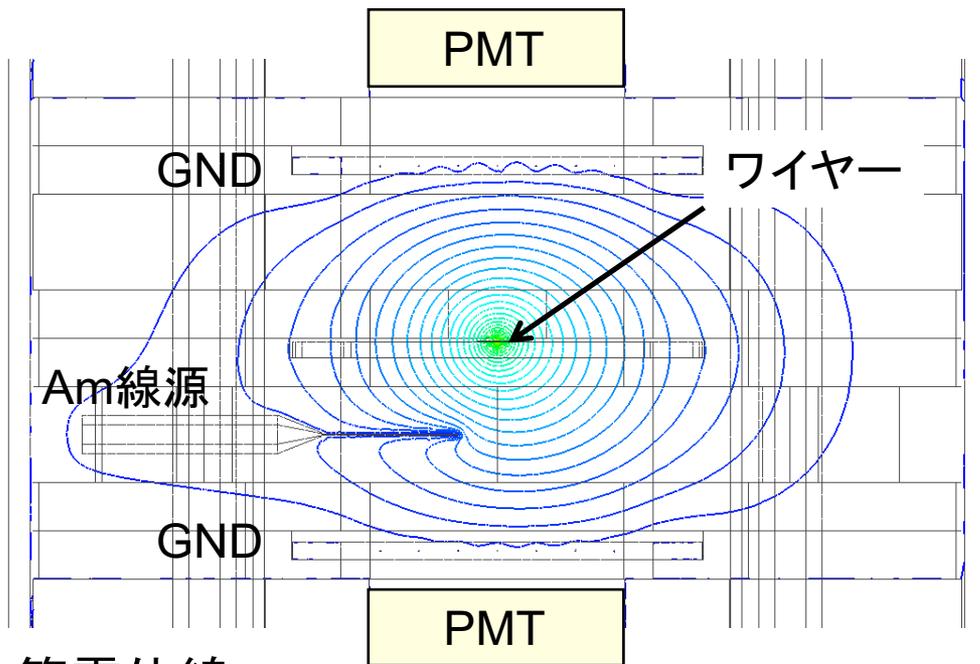
ワイヤー：
直径10 μ mの金メッキタングステン線

フレーム：
ガラスエポキシ、一部に銅箔あり

銅箔部分にワイヤーを
1本はんだ付けしている
(高真空対応はんだと超音波式こてを使用)

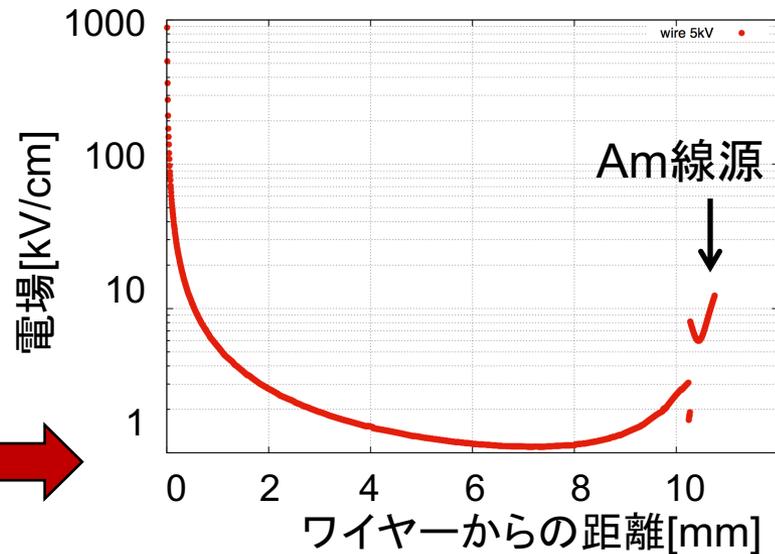
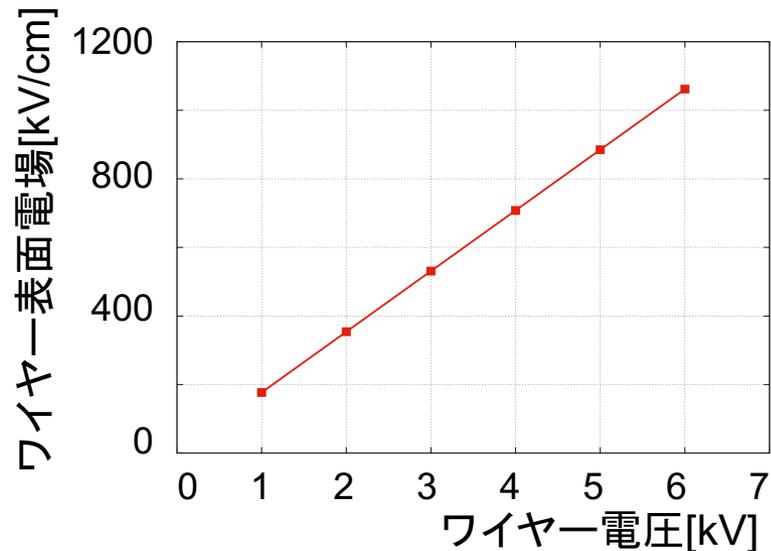
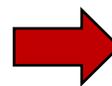
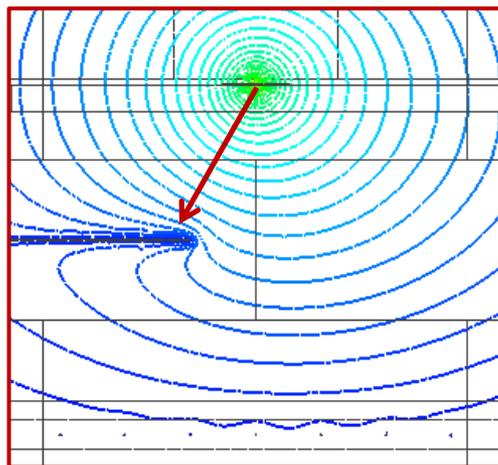
電場シミュレーション

有限要素法解析ソフト
Femtetを使用

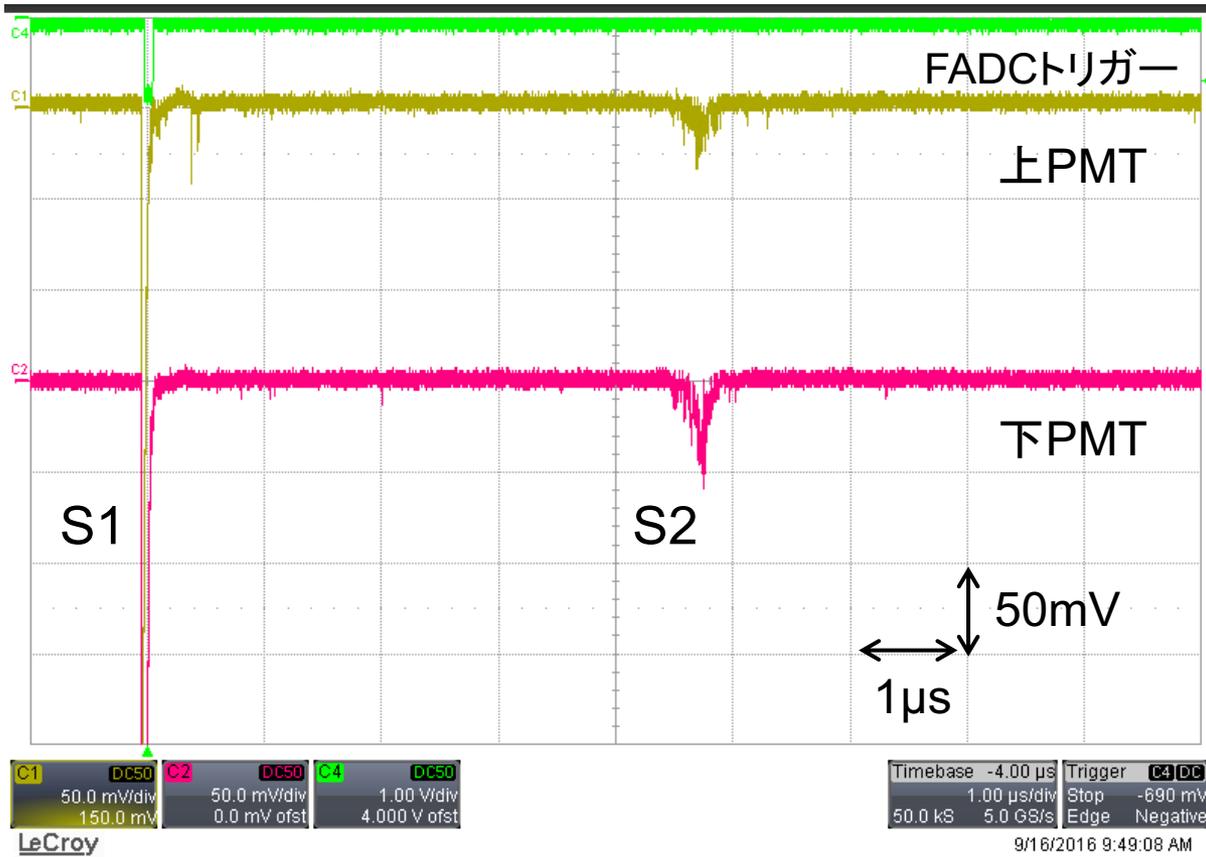


等電位線

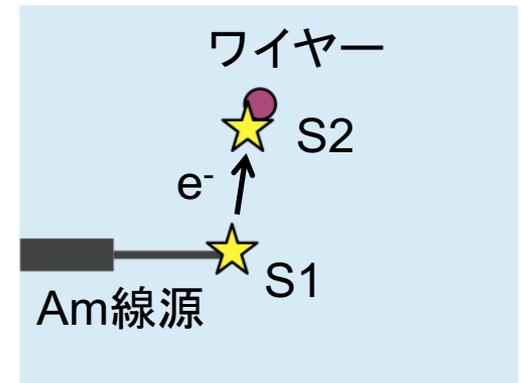
ワイヤーに5kV印加
表面で880kV/cm



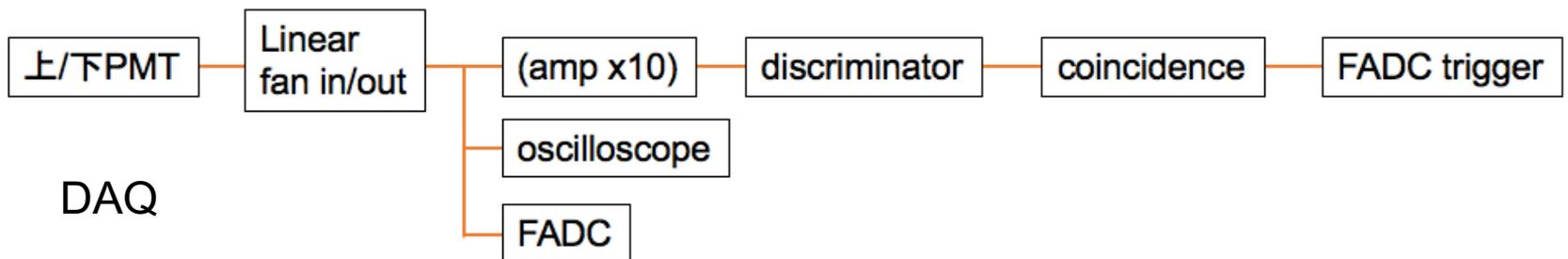
LXe中でのS2を観測



オシロスコープで観測されたS2の波形 (ワイヤー電極4.9kV)



Am線源由来のイベント
→ ドリフト時間 約4.8us



S1とS2の解析方法

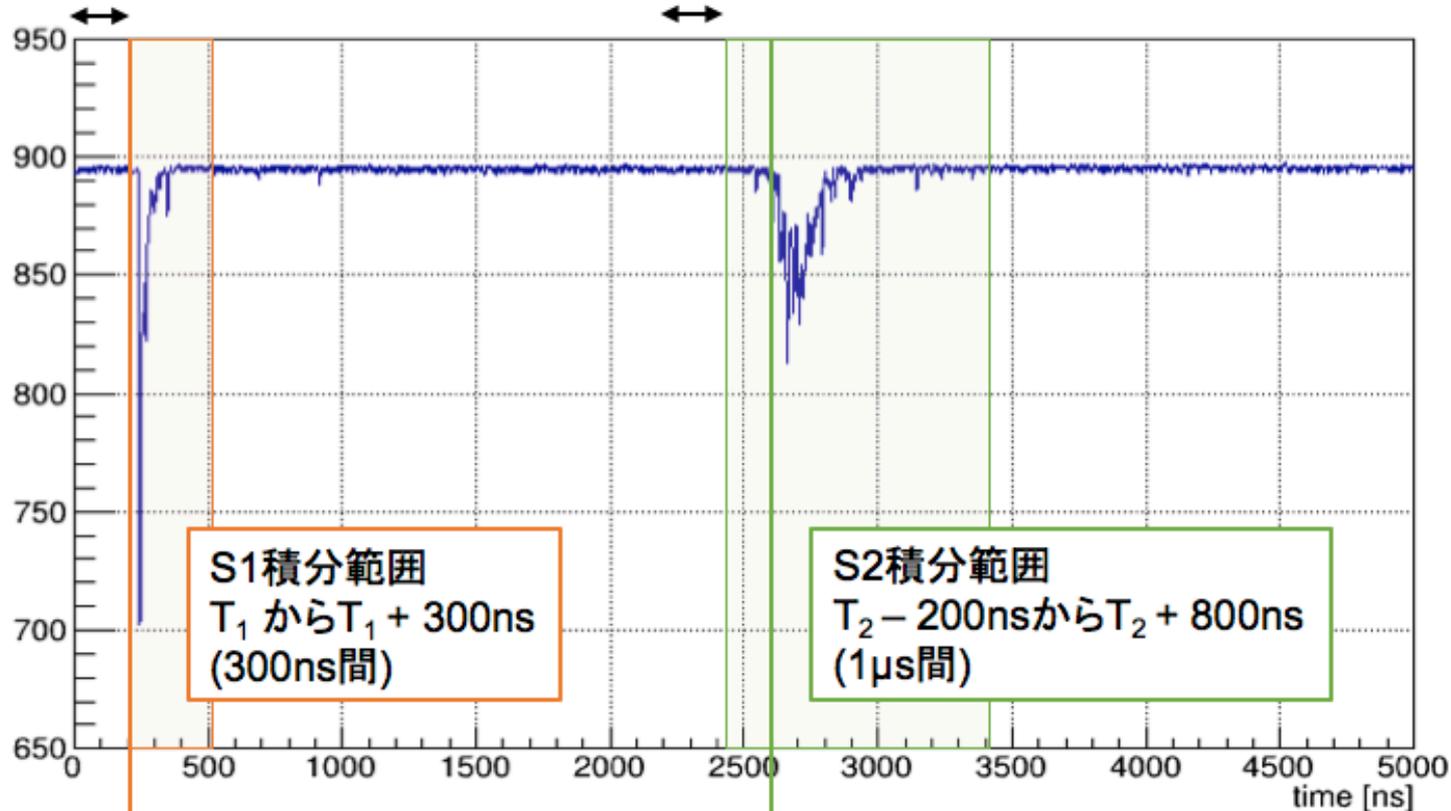
S1の2 μ sから8 μ s後に発生したS2について、波形面積とドリフト時間を求める

S1のペDESTAL:

T_1 - 200nsから T_1 の平均

S2のペDESTAL:

T_2 - 400nsから T_2 - 200nsの平均



S1積分範囲
 T_1 から $T_1 + 300$ ns
(300ns間)

S2積分範囲
 $T_2 - 200$ nsから $T_2 + 800$ ns
(1 μ s間)

ドリフト時間

T_1

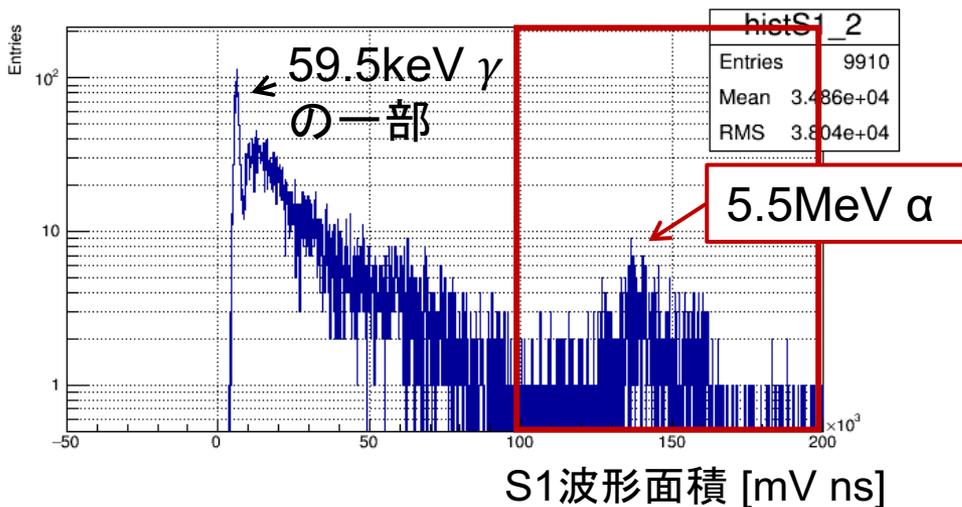
T_2

S2のトリガー条件:

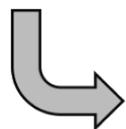
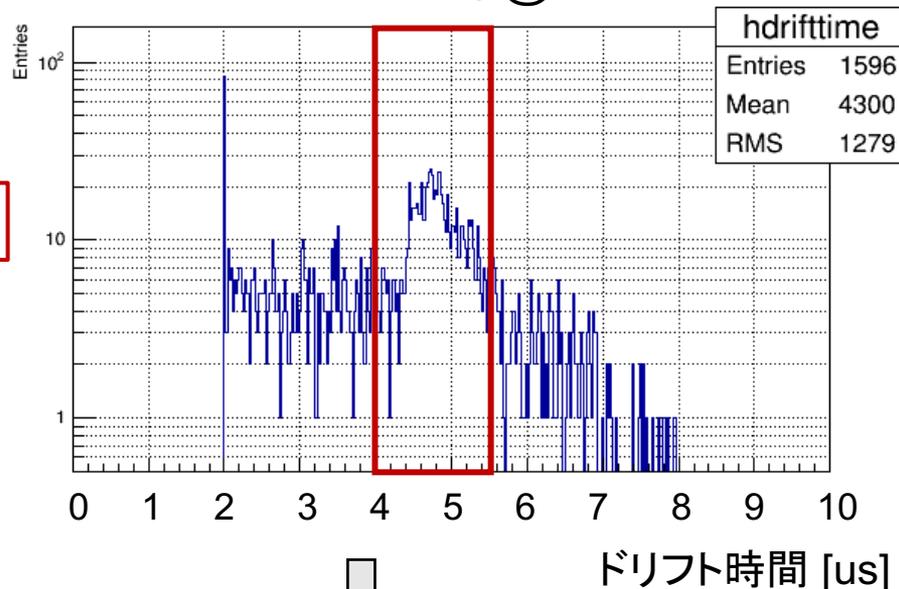
上下PMT両方の電圧が
S1のペDESTALに対して
10mV下回ったとき

^{241}Am 5.5MeV α 線由来のS2探索

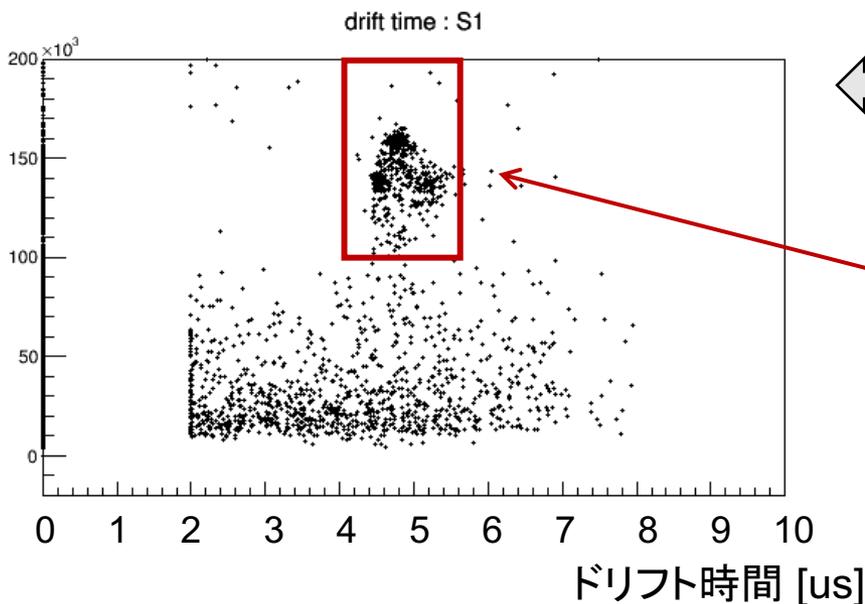
S1スペクトル@4.7kV



ドリフト時間分布@4.7kV



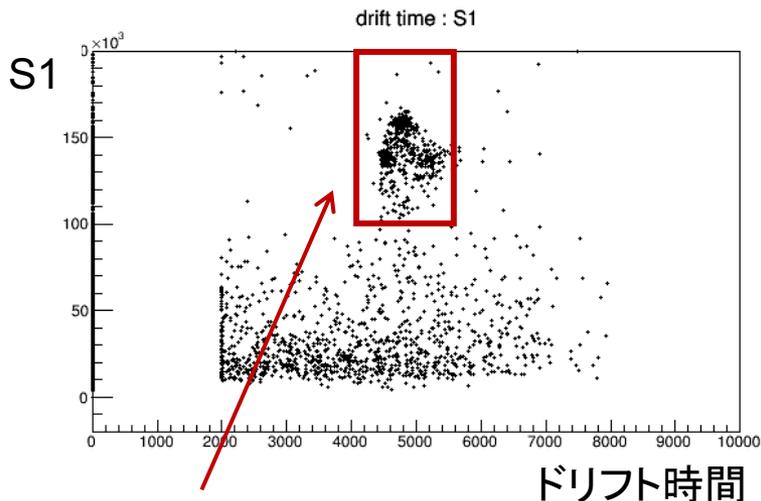
S1波形面積 [mV ns]



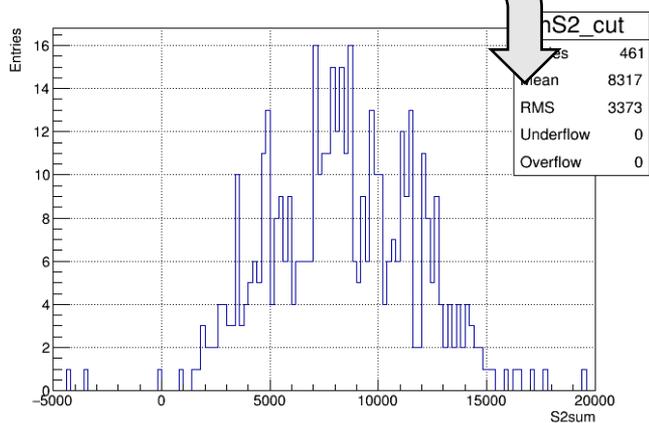
ドリフト時間4.8 μs に
集中したイベント
→ Am線源表面からの
5.5MeV α 線に対応

FADC trigger
threshold: -200mV
S1の光量が大い
イベントを取得

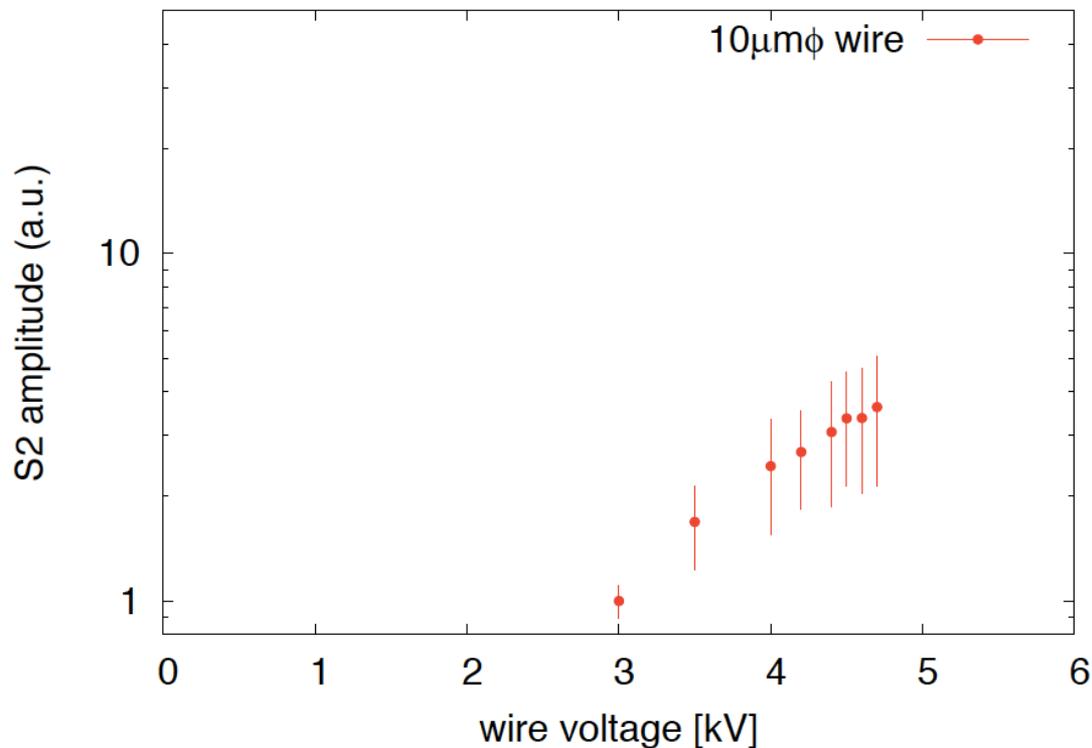
^{241}Am 5.5MeV α 線由来のS2探索



Am 5.5MeV α 線由来の
イベントが含まれる範囲を
選んだS2スペクトル



S2スペクトル@4.7kV



2~3kVでS2発生

このときワイヤー表面で約400kV/cm

→ 先行研究のS2発生に必要な閾値と一致

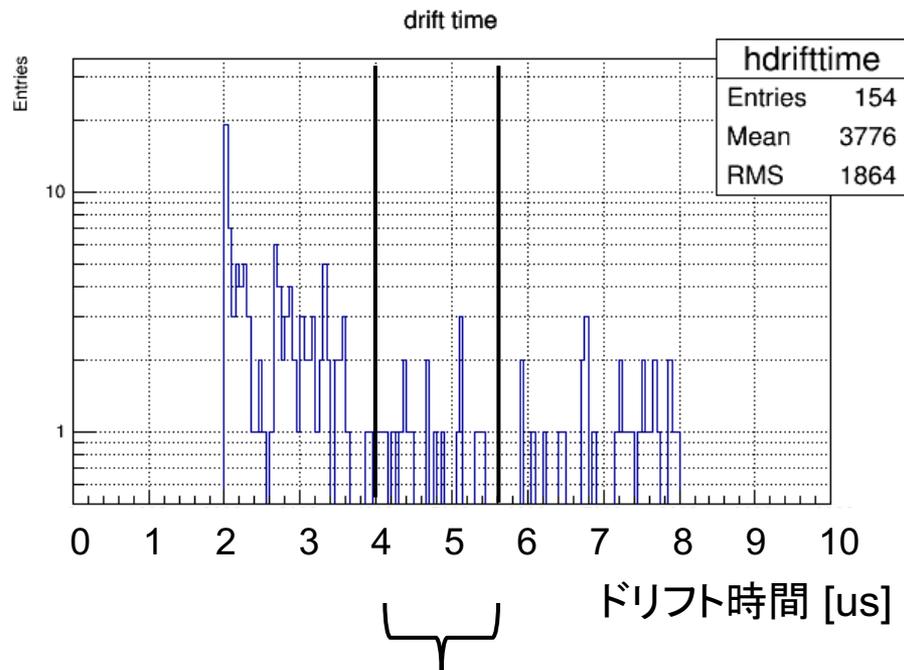
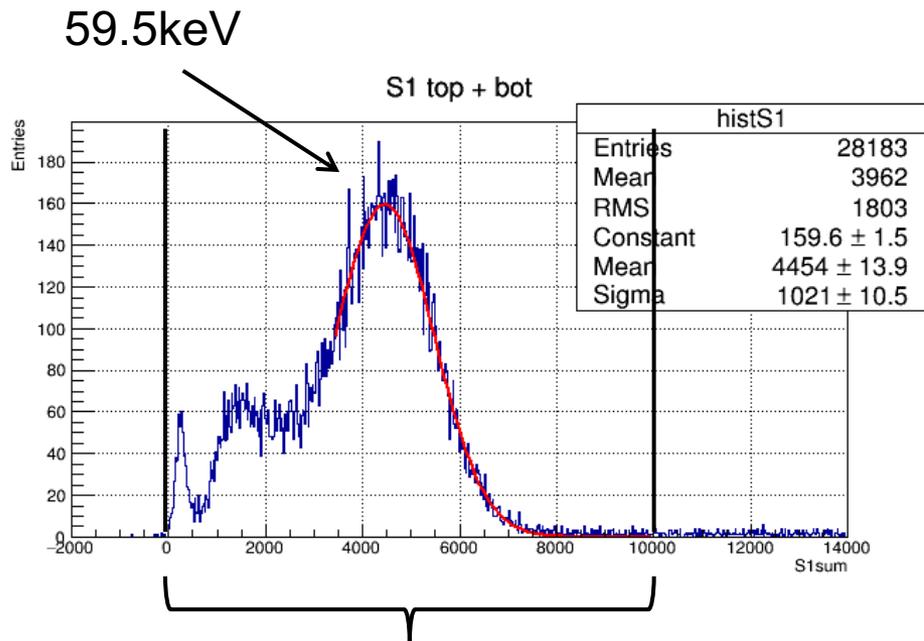
今回の測定では、放電のため

5kV以上印加することができなかった

^{241}Am 59.5keV γ 線由来のS2探索

S1スペクトル@4.5kV

ドリフト時間分布@4.5kV



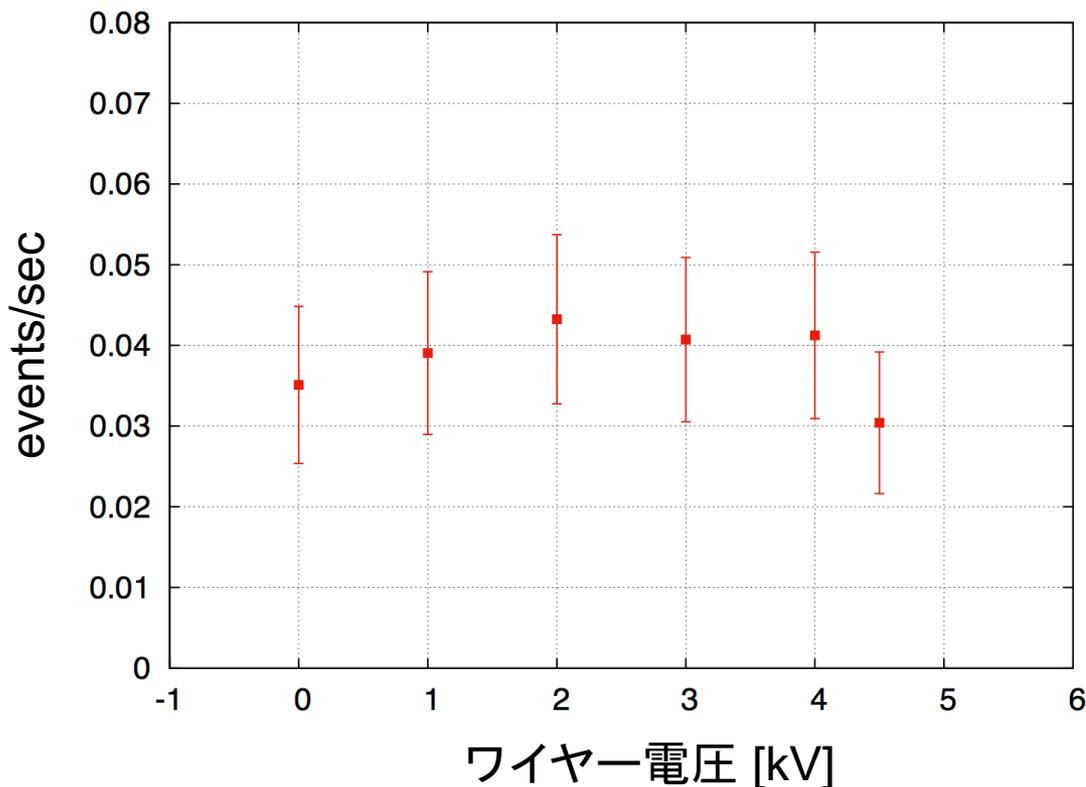
S1光量でカット
59.5keV由来のイベントを
含む範囲を選ぶ

ドリフト時間でカット
4.0~5.5 μs の範囲を選ぶ
(Am線源由来の場合約4.8 μs)

FADC trigger threshold: -30mV

^{241}Am 59.5keV γ 線由来のS2探索

S1光量とドリフト時間によるカット後



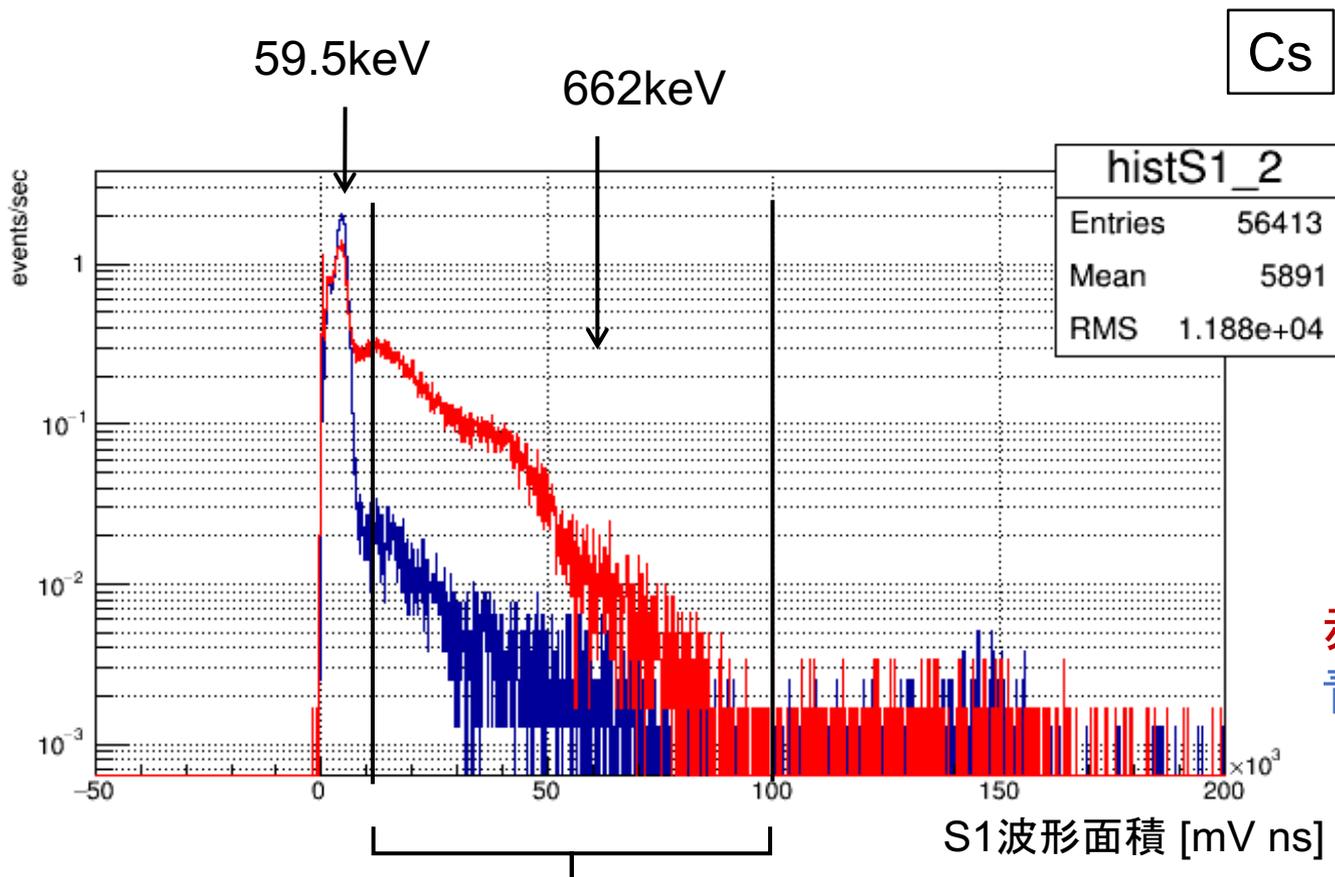
電圧を上げてても
レートは増加せず
→ 59.5keV γ 線由来のS2は
確認されなかった

4.5kVまでの電圧では
S2の増幅率が足りない
と考えられる

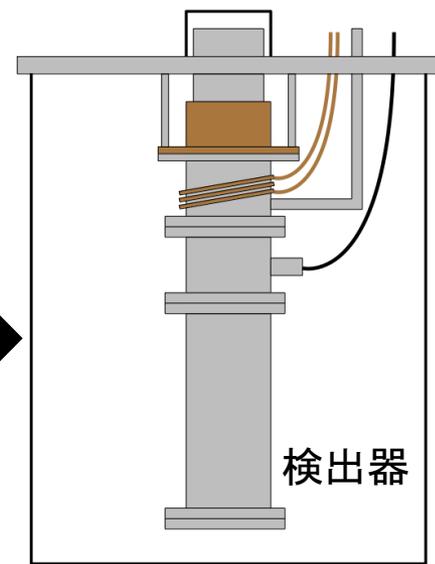
バックグラウンド:
2つのS1が組になったイベント

^{137}Cs 線源由来のS2探索

S1スペクトル@4.2kV



Cs



断熱容器の外側からCsを照射
(662keV γ)

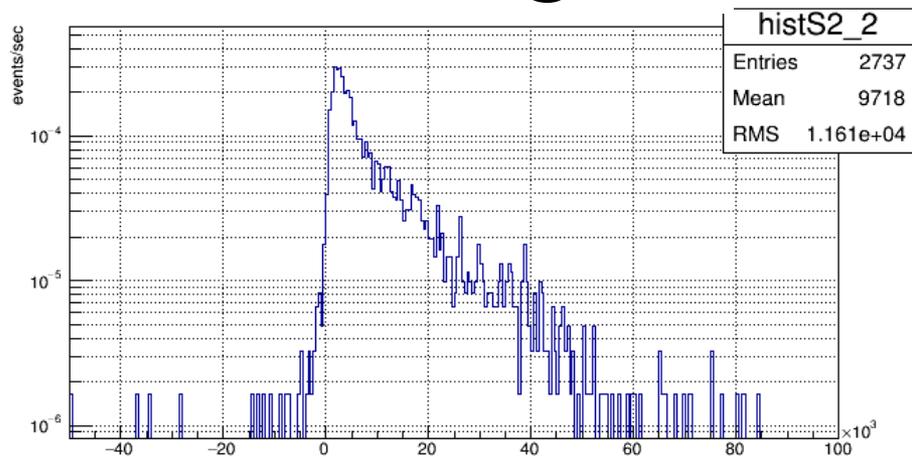
赤: Cs+Am
青: Amのみ

S1光量でカット
Cs由来のイベントを含む範囲を選ぶ

FADC trigger
threshold: -30mV

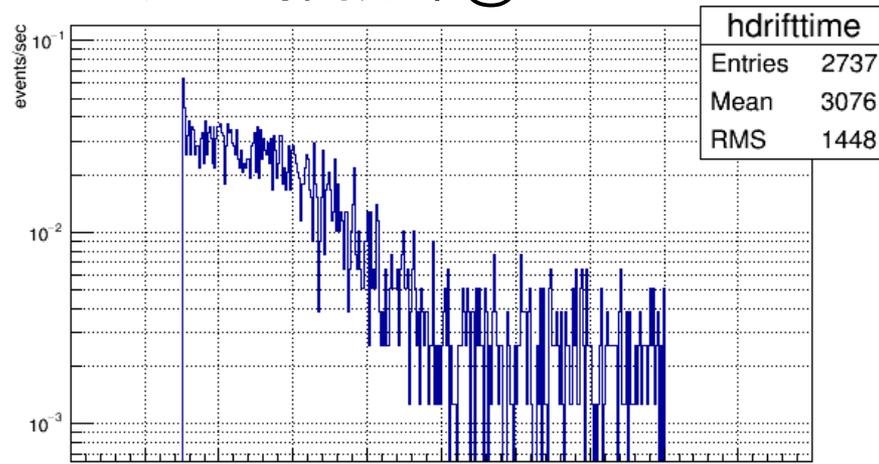
^{137}Cs 線源由来のS2探索

S2スペクトル@4.2kV

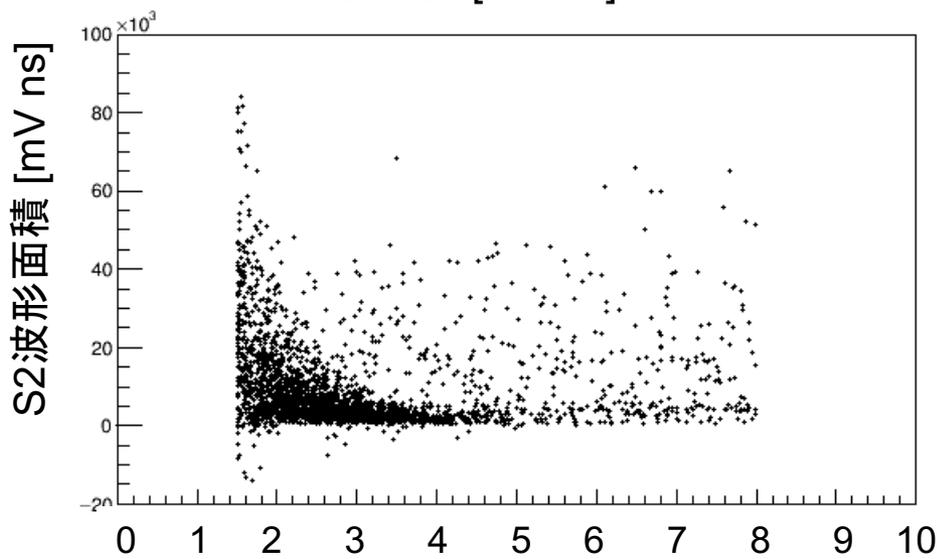
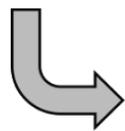


S2波形面積 [mV ns]

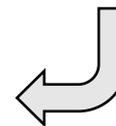
ドリフト時間分布@4.2kV



ドリフト時間 [us]



ドリフト時間 [us]



ワイヤー4.2kVで
 ^{137}Cs 662keV γ 由来の
S2を観測

まとめ

- ワイヤー電極を用いてLXe中でのS2について検証した
- Am線源表面からの5.5MeV α 線由来のS2を観測
S2 threshold $\sim 400\text{kV/cm}$ (先行研究と一致)
- ワイヤー電圧4.5kVでは、59.5keV γ 線由来のS2は確認できず
- Cs線源を断熱容器の外から照射し、
ワイヤー4.2kVにおいてこれ由来のS2を観測
- 今後はワイヤーに5kV以上印加してS2の発光量を上げ、
低エネルギーイベント由来のS2の観測が可能か検証する。

backup

ワイヤーへの電圧印加

- ガスXe中で放電し、5kV以上の電圧をワイヤーに印加することができなかった
- S2の発光量を上げるにはより高電圧が必要
- 放電を防ぐため、フィードスルーをLXe中に浸けるように改造する予定



焦げたMHVコネクタ

S2 gain

$$g = \frac{1}{\frac{E_\alpha}{W} f_{\text{ion}} \epsilon_{LC} \epsilon_Q f_{LXe} \epsilon_{dy}},$$

g: conversion factor

S2 size in p.e. \rightarrow S2 gain (photon / drift e⁻)

E_α [eV]	5.41×10^6
W [eV]	15.6 ± 0.3 [21]
f_{ion}	$(4.15 \pm 0.65) \times 10^{-2}$ [22]
ϵ_{LC}	$0.212^{+0.048}_{-0.015}$
ϵ_Q	0.323 ± 0.040 [14]
f_{LXe}	1.07 ± 0.02 [14]
ϵ_{dy}	0.750 ± 0.025

conversion factor [(ph/e ⁻)/PE]	$(1.26^{+0.38}_{-0.27}) \times 10^{-3}$
---	---

gの値を用いると

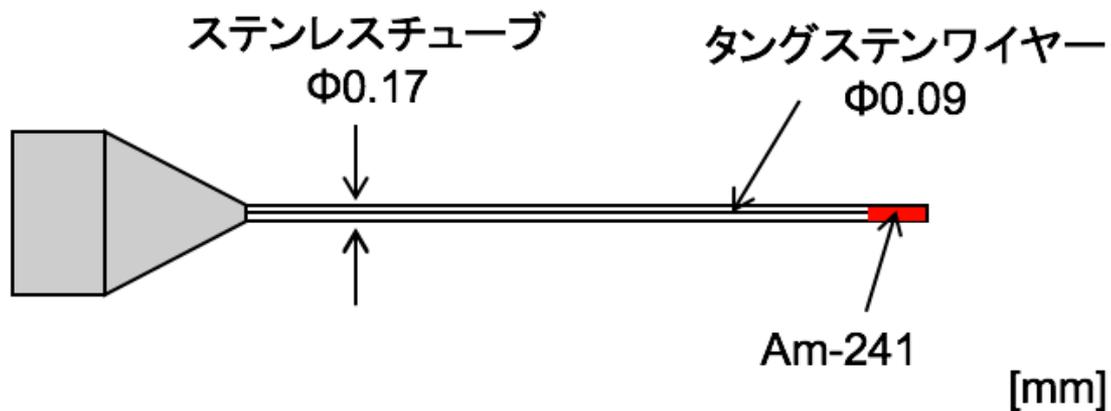
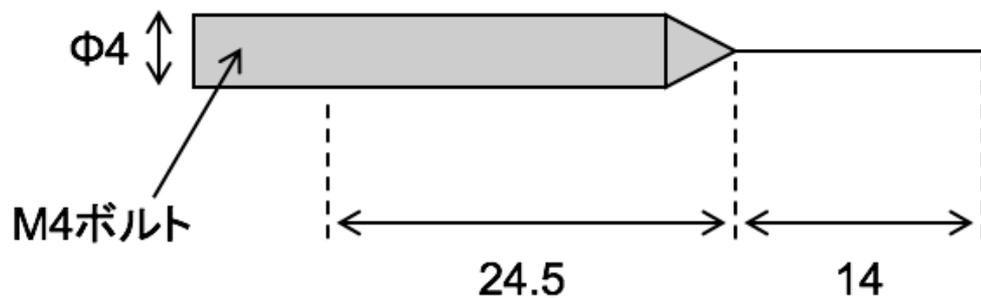
ワイヤー4.7kVでは

Am 5.5MeVのS2スペクトルより

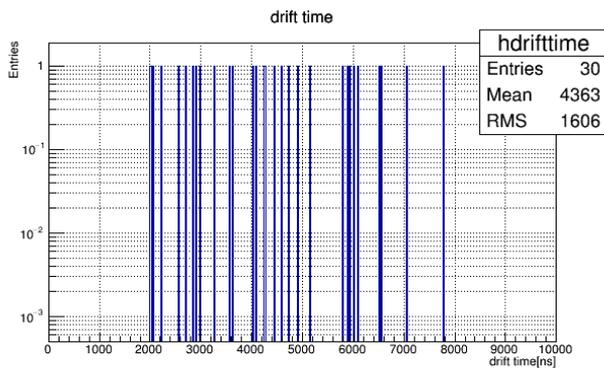
S2 gain = 1.3 [photon / drift e⁻]

E. Aprile et al., 2014 JINST 9 P11012

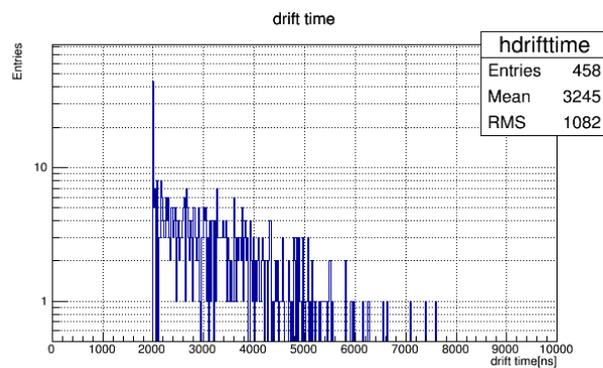
^{241}Am 線源の構造



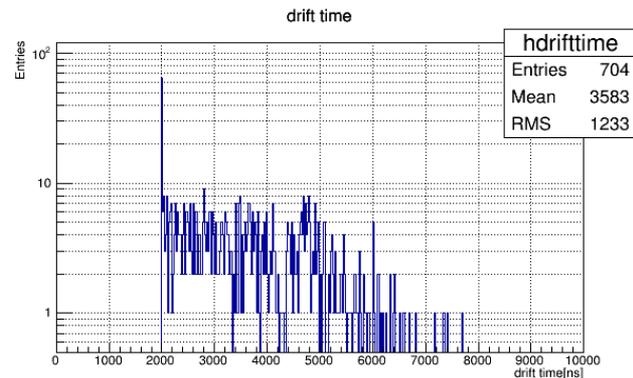
^{241}Am 5.5MeV α 由来のS2のドリフト時間分布



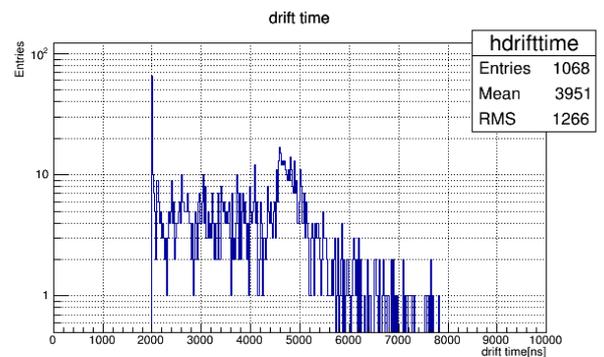
2.0kV



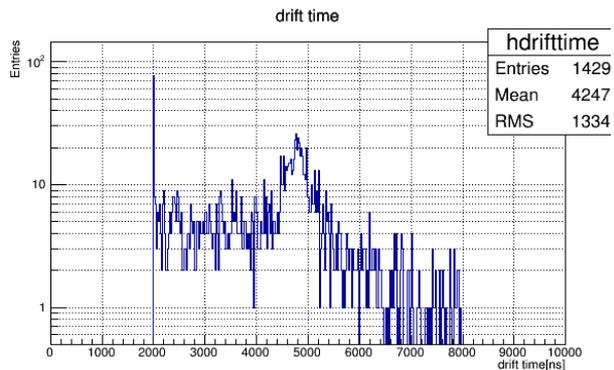
3.0kV



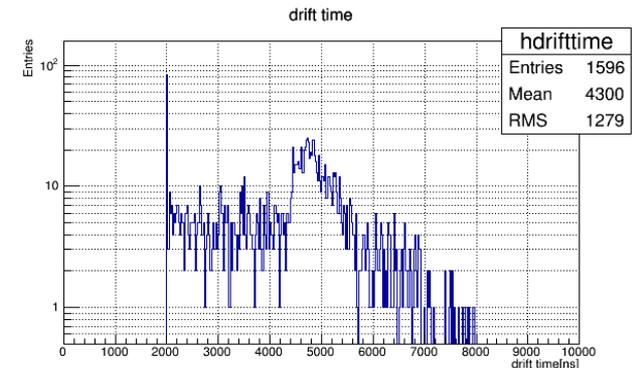
3.5kV



4.0kV

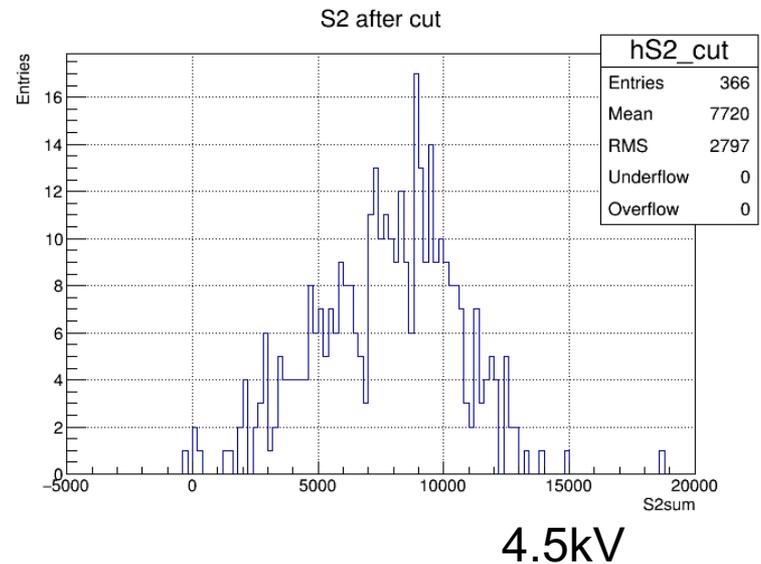
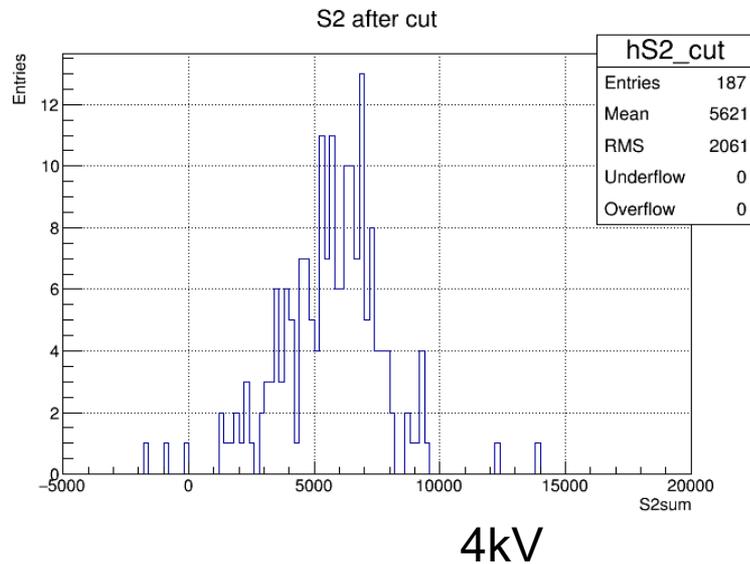
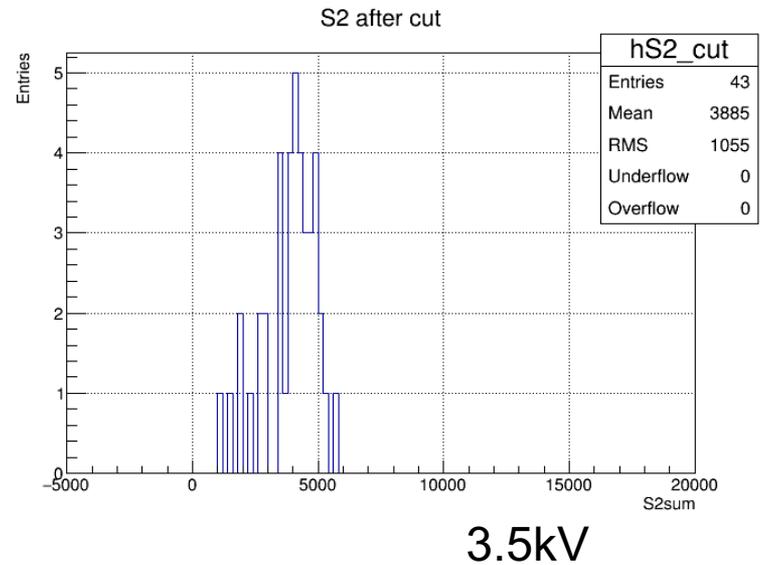
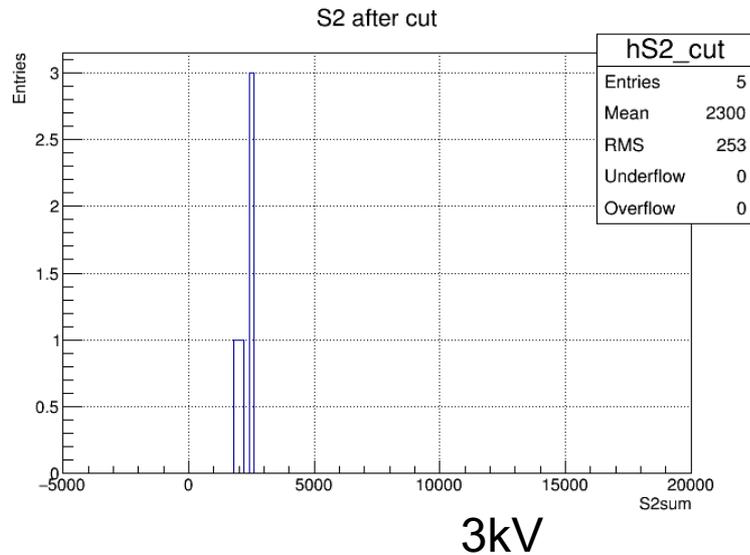


4.5kV

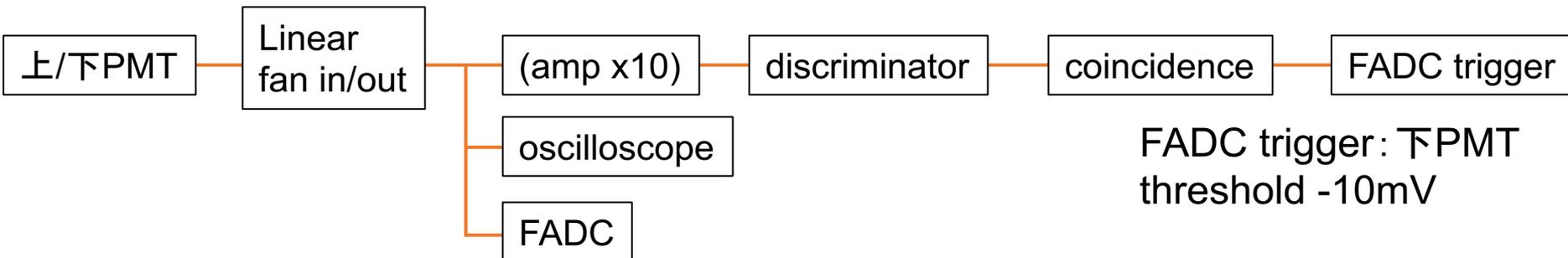


4.7kV

^{241}Am 5.5MeV α を含む範囲のS2スペクトル

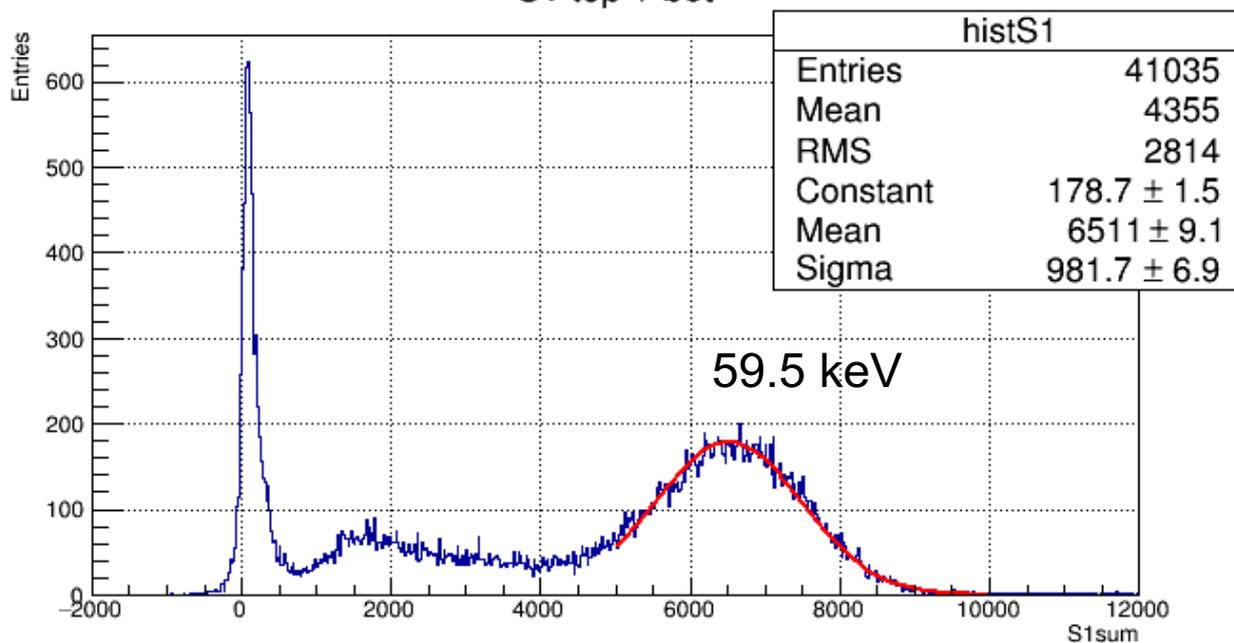


^{241}Am 59.5keV γ 線のS1測定



S1スペクトル
(ワイヤー0V)

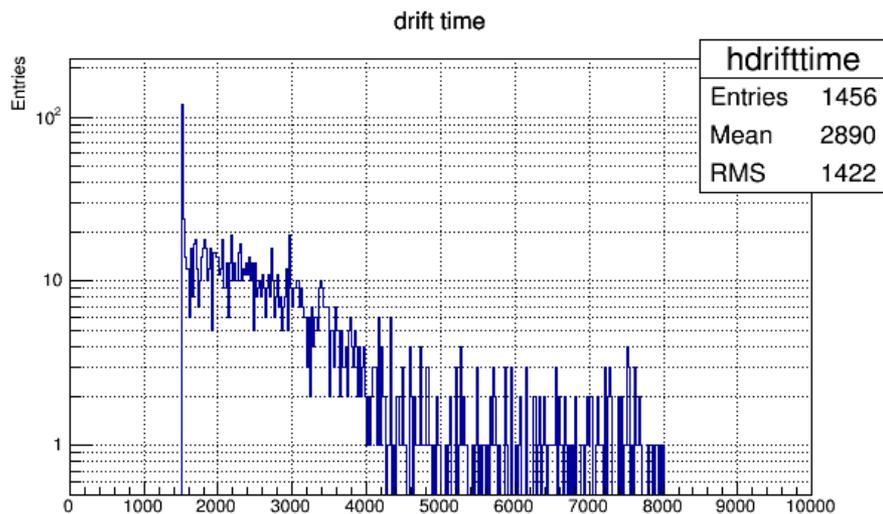
S1 top + bot



S1光量
 13.69 p.e./keV

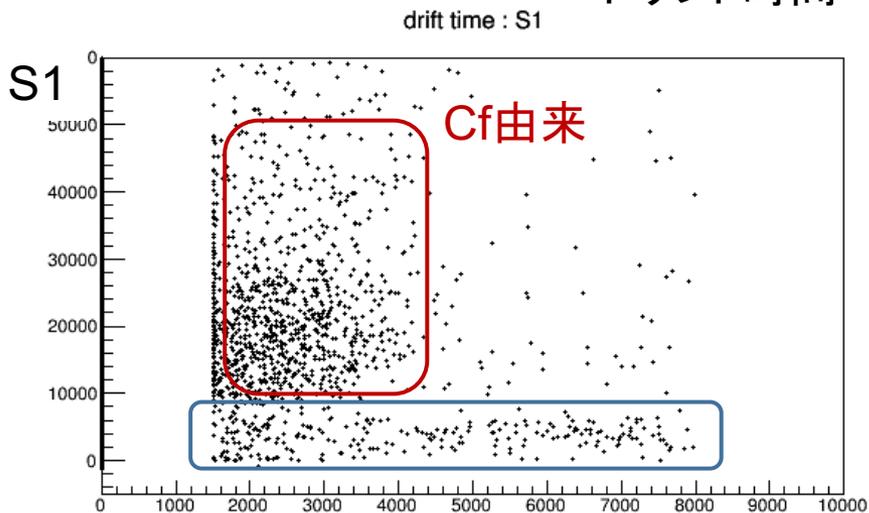
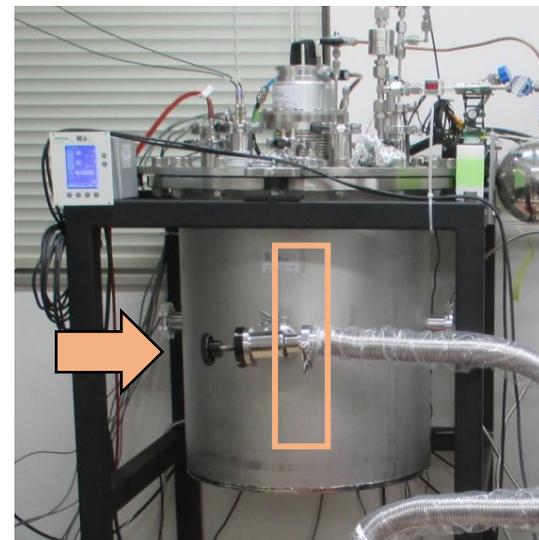
Am-241の放射線
 γ : 59.5, 26.4 keV
X : 13.9, 17.8, 20.8 keV
 α : 5.49, 5.44 MeV

252Cf線源を用いたS2測定



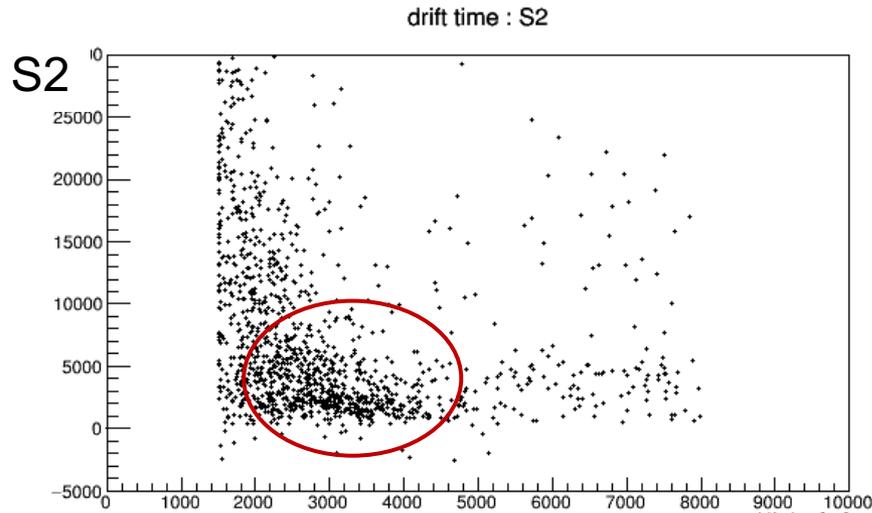
ドリフト時間

断熱容器の外側から²⁵²Cfを照射
(中性子、γ線)



Amによる
バックグラウンド

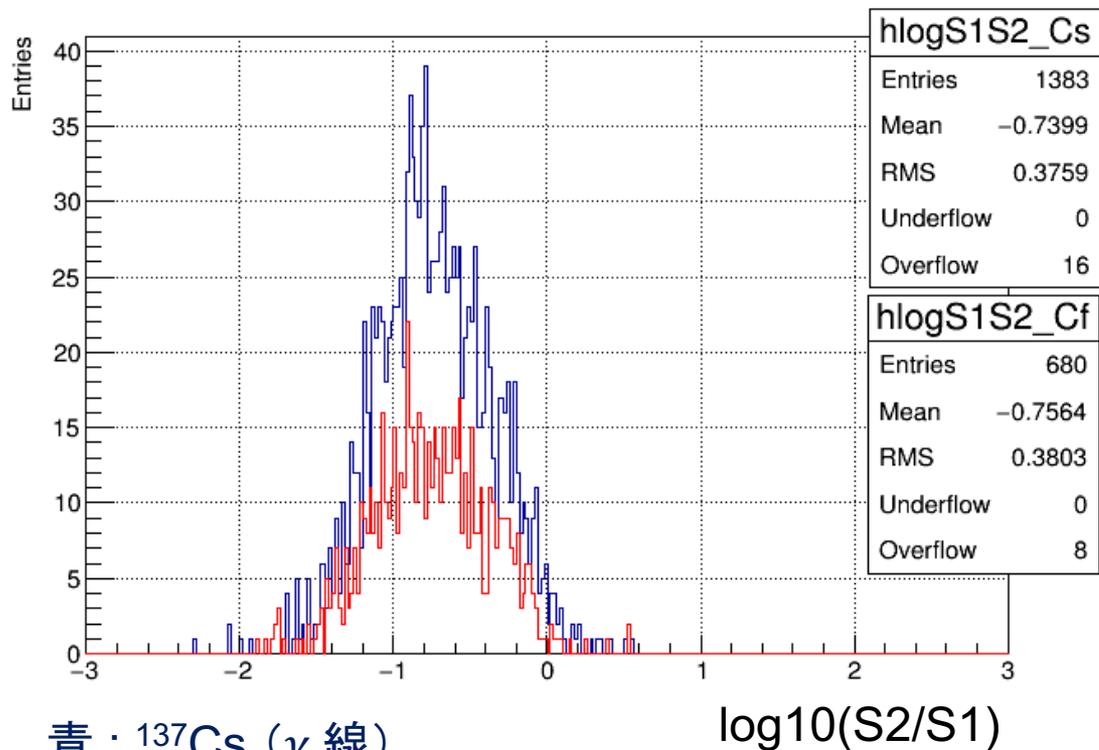
ドリフト時間



ワイヤー4.2kVで
²⁵²Cf由来のS2を観測

ドリフト時間

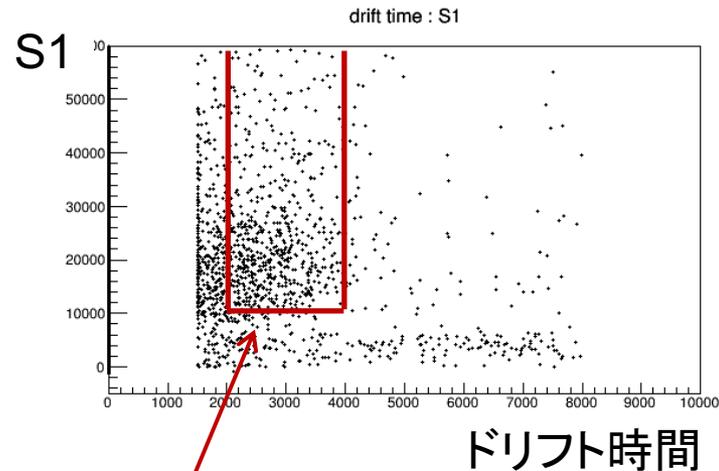
S2/S1比による粒子識別



青 : ^{137}Cs (γ 線)

赤 : ^{252}Cf (中性子、 γ 線)

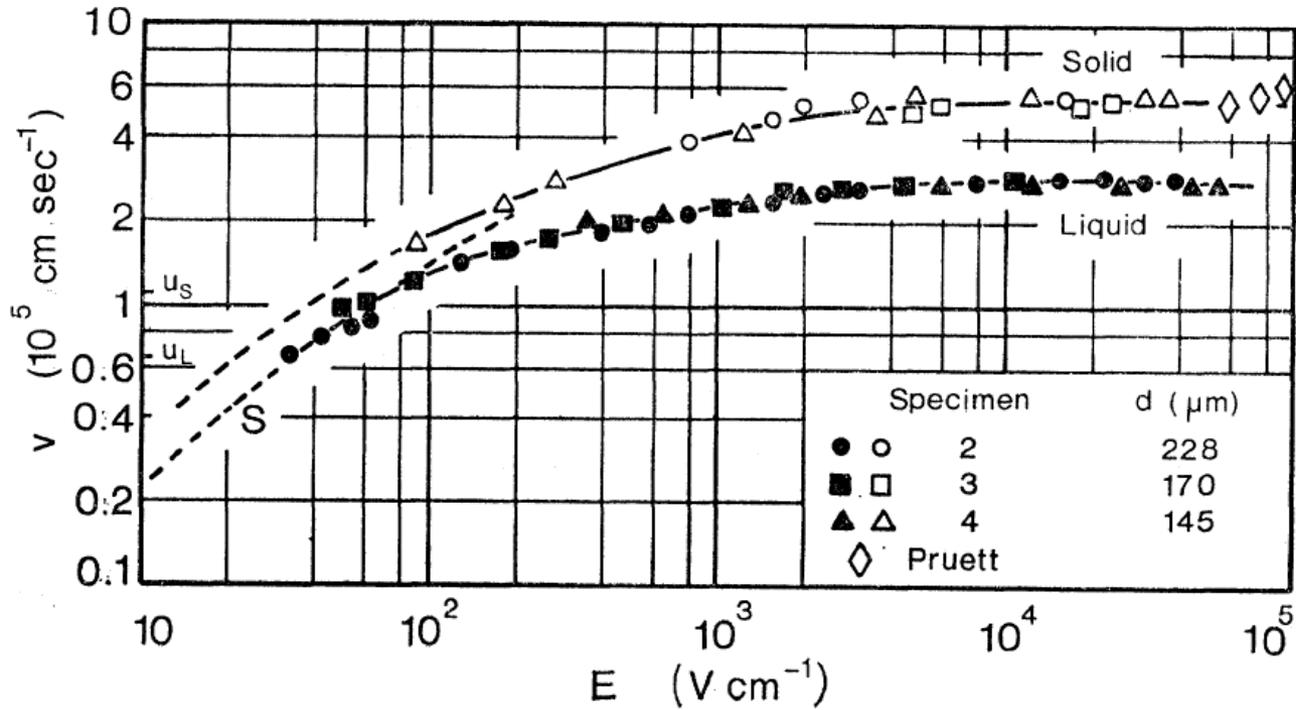
中性子: 原子核反跳 \rightarrow S2/S1 小
 γ 線: 電子反跳 \rightarrow S2/S1 大
と予想される



Cs、Cf線源由来の
イベントについて
S2/S1比を調べる

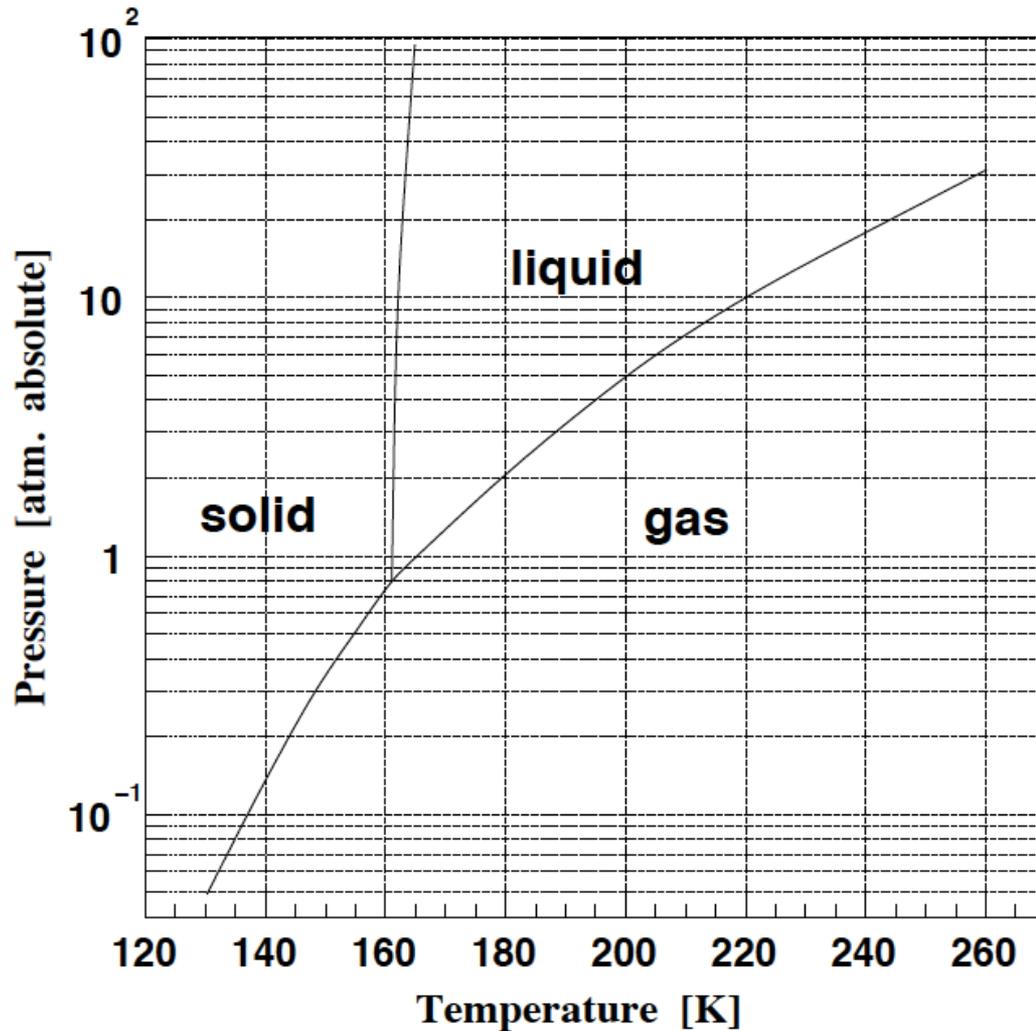
原子核反跳と電子反跳とで
差は見られなかった
 \rightarrow S2の増幅率が
足りないと考えられる

LXe中の電子のドリフト速度

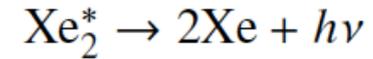
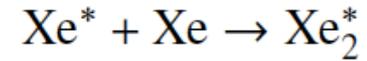


L.S.Miller et al., Phys.Rev.166,3 (1968)

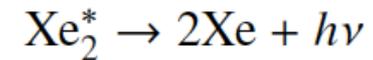
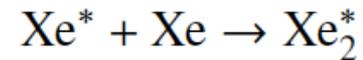
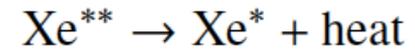
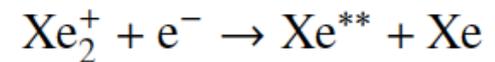
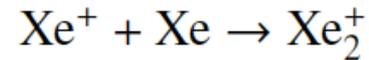
Xeの相図



励起のみの発光過程



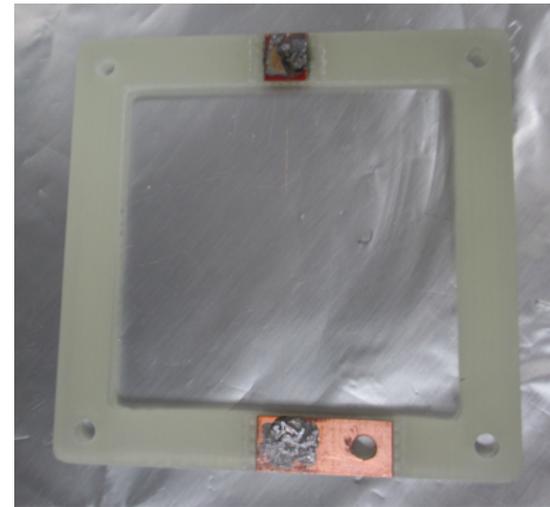
再結合を経る発光過程



ワイヤー電極

- 2種類のワイヤー電極を作製
- 直径10 μ mの金メッキタングステン線をワイヤーに使用し、フレームの中心に1本ワイヤーを張った構造

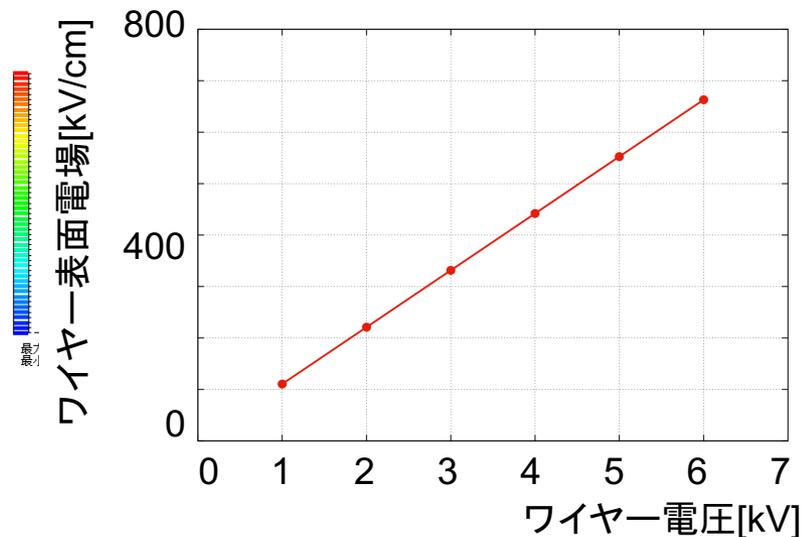
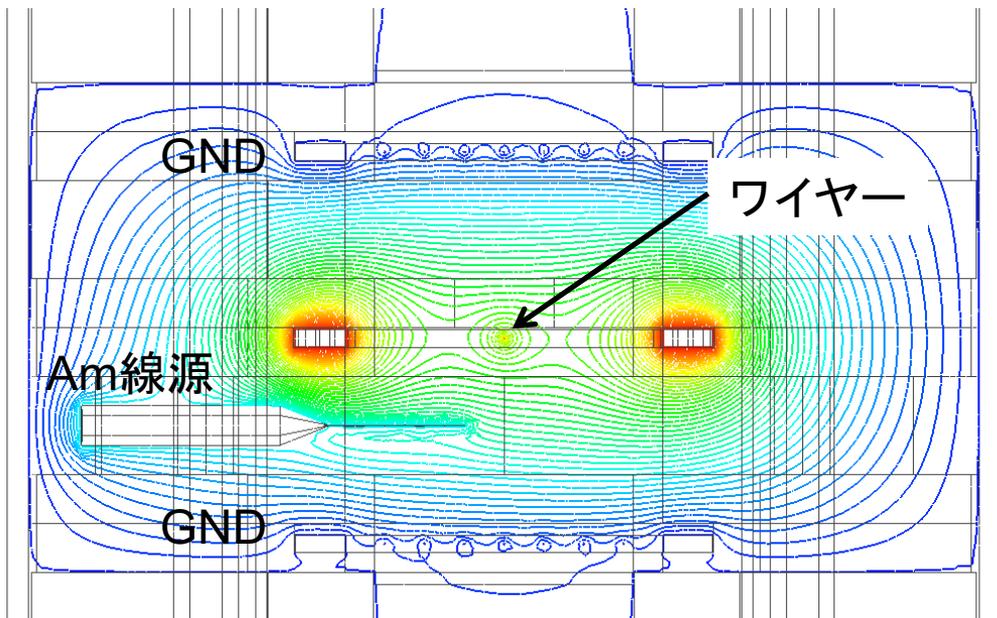
フレーム
42mmx42mm



- SUSフレーム
ワイヤーは2枚のフレームに挟まれる形で溶接されている
- ガラスエポキシフレーム
高真空対応のはんだで銅箔部分にワイヤーをはんだ付け

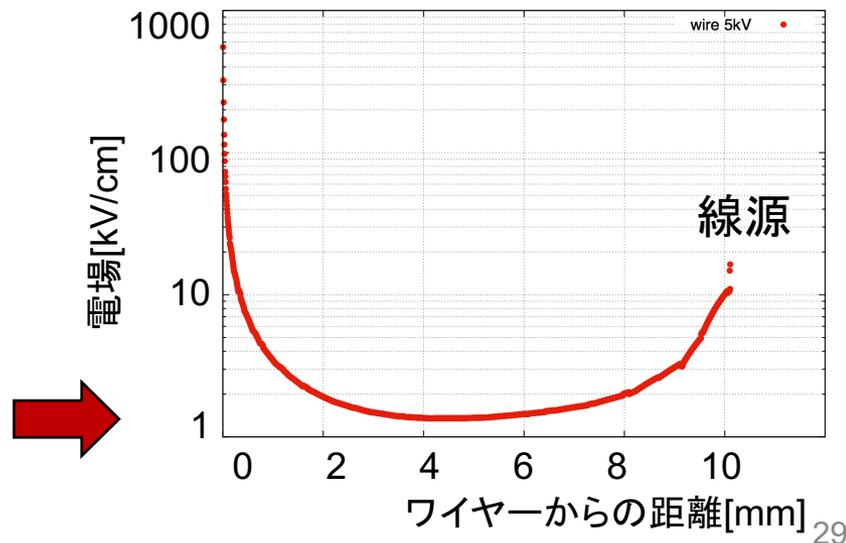
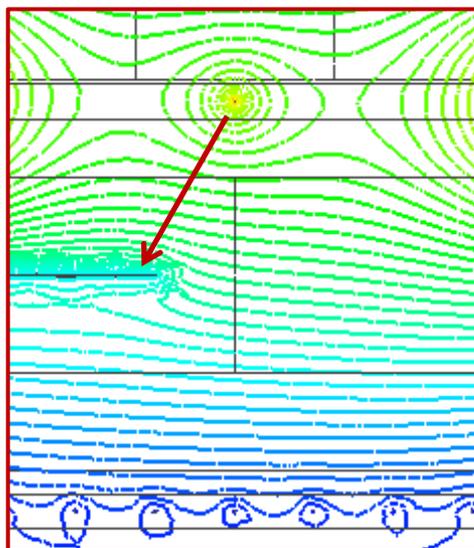
電場シミュレーション(SUS)

有限要素法解析ソフト
Femtetを使用



等電位線
ワイヤー +5kV
表面で550kV/cm

ドリフト電場が
一様になる



S1光量とドリフト電場の関係

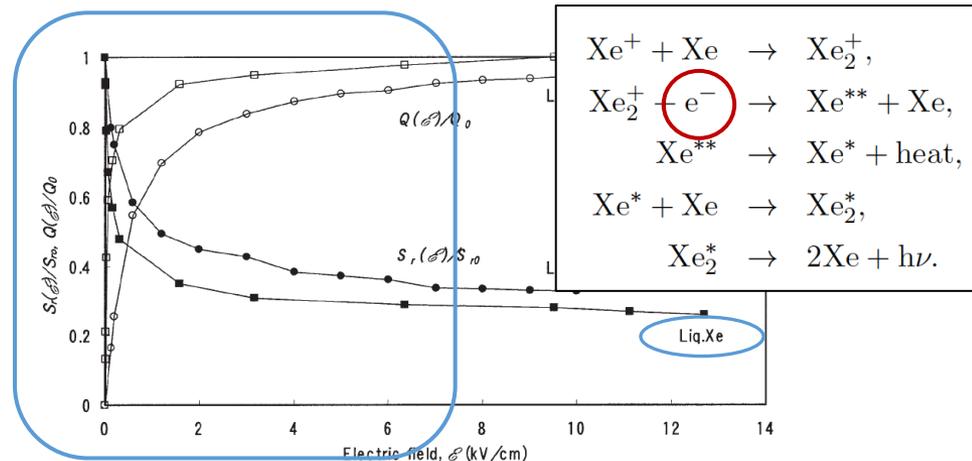
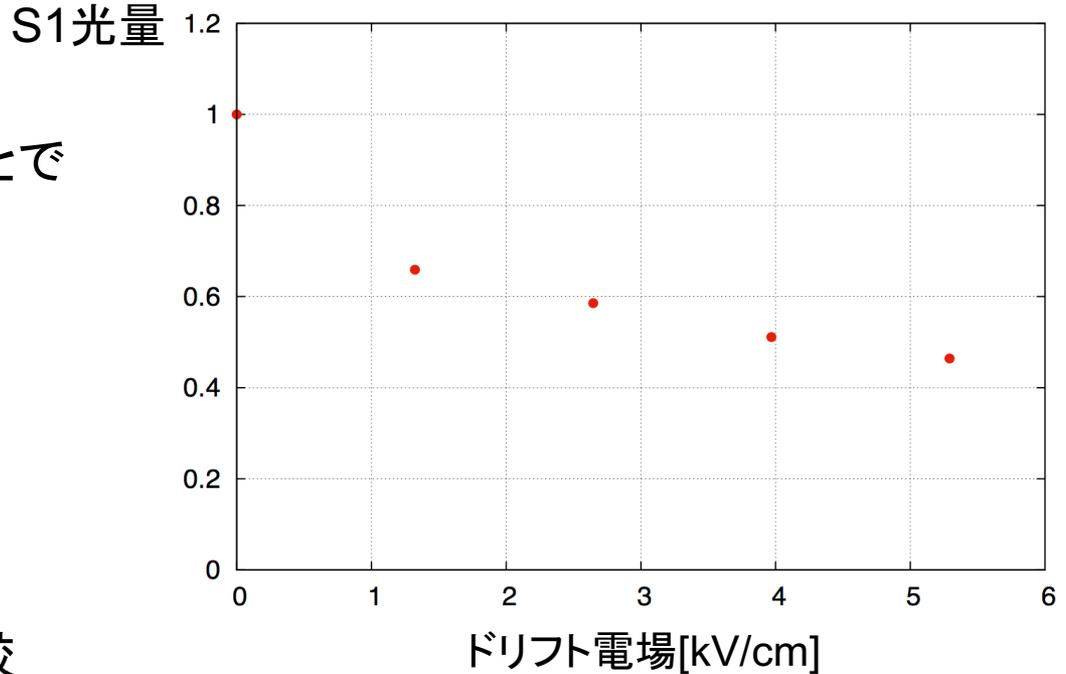
電極に電圧を印加することで
電子がドリフトされ、
再結合が妨げられるため
S1発光量が減少する

SUS電極で実験し、
電圧を変えた時の
59.5keVピークの値を比較

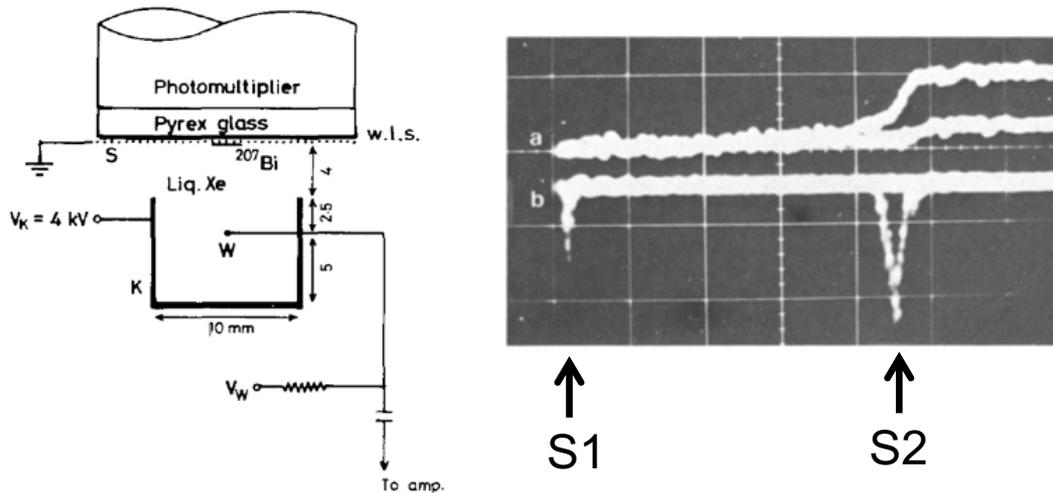


4kV/cmでS1光量50%減少

59.5keV γ 線のLXe中での
平均自由行程 = 0.43mm

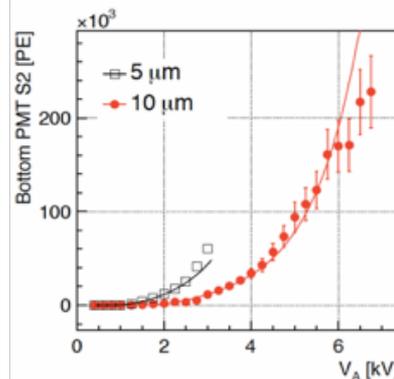
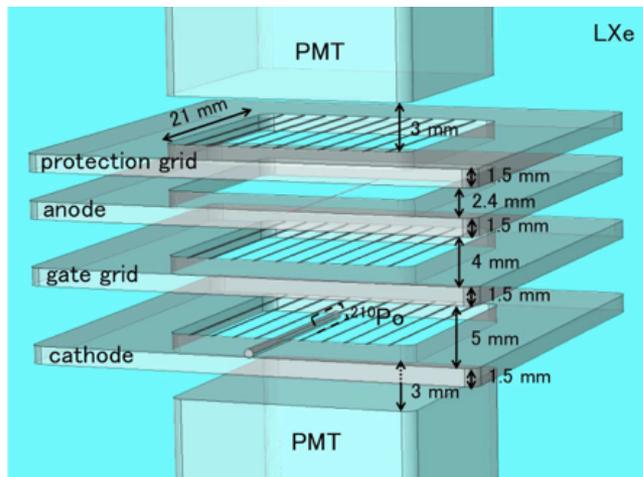


LXe中のS2の先行研究



- 先行研究1 (1979年)
Wワイヤー $\Phi 4\text{-}20\mu\text{m}$
Bi-207
(0.55, 1.05 MeV γ , 0.98 MeV β)
S2 threshold: 410 kV/cm @ $\Phi 20\mu\text{m}$

K. Masuda et al.,
Nucl. Instrum. Meth. 160 (1979) 247



- 先行研究2 (2014年)
金メッキWワイヤー $\Phi 5, 10\mu\text{m}$
Po-210 (5.4 MeV α)
S2 threshold: 412 kV/cm

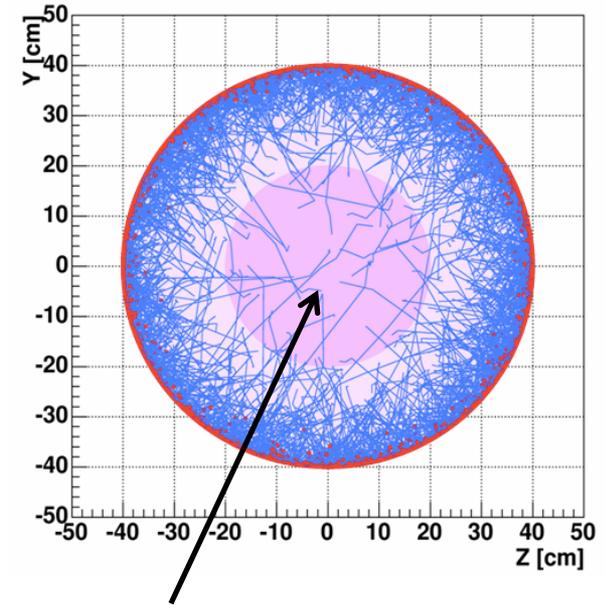
E. Aprile et al., 2014 JINST 9 P11012

ワイヤーを電極に用いてS2を観測
S2 threshold $\sim 400 \text{ kV/cm}$

XMASSにおける問題点

- 検出器中心部は、Xeの自己遮蔽によってバックグラウンドの少ないクリーンな領域となっている
- PMTの光量分布・時間情報から反応位置を再構成して有効体積中で起こったイベントを選び出す
- 問題点：検出器内壁で起こったバックグラウンドイベントが有効体積中に誤って位置再構成される

より正確な反応位置再構成のためには
Time Projection Chamber (TPC)
機能をつけることが有効



有効体積
(中心部直径40cm)

