

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3

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

2017/9/15
日本物理学会 2017年秋季大会
宇都宮大学

研究目的

- TPC機能を果たせることでXMASSの感度向上を目指す
 - S1とS2を観測し、反応位置再構成精度を向上させる
 - S1の光量・時間情報のみだと再構成を誤ることあり
 - S2/S1比を利用してダークマター信号とバックグラウンドを区別する
- 球形の1相式液体キセノンTPCの実現
 - キセノンの特性である自己遮蔽を最大限活用する
 - 液面管理の必要なし

S1 : 直接蛍光

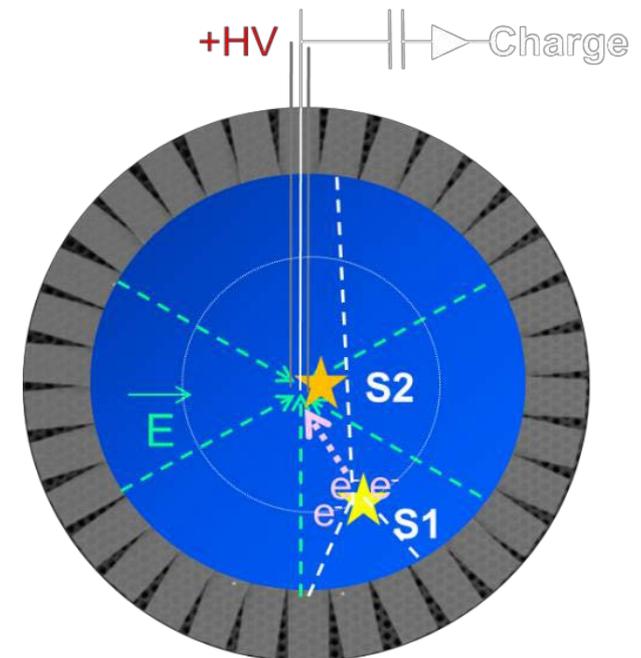
S2 : S1発生時に生じた電子をドリフトし、
高電場領域で発生させる比例蛍光

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



研究目的

ダークマター探索では $<100\text{keV}$ の信号に対する感度が必要になる。

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

R&Dのステップ: まずはワイヤーを用いてLXe中のS2について調べる。

これまでの成果

- Am-241 $5.5\text{MeV } \alpha$, Cs-137 $662\text{keV } \gamma$, Cf-252 線源由来のS2を観測
- S2発生の閾値 400kV/cm を確認

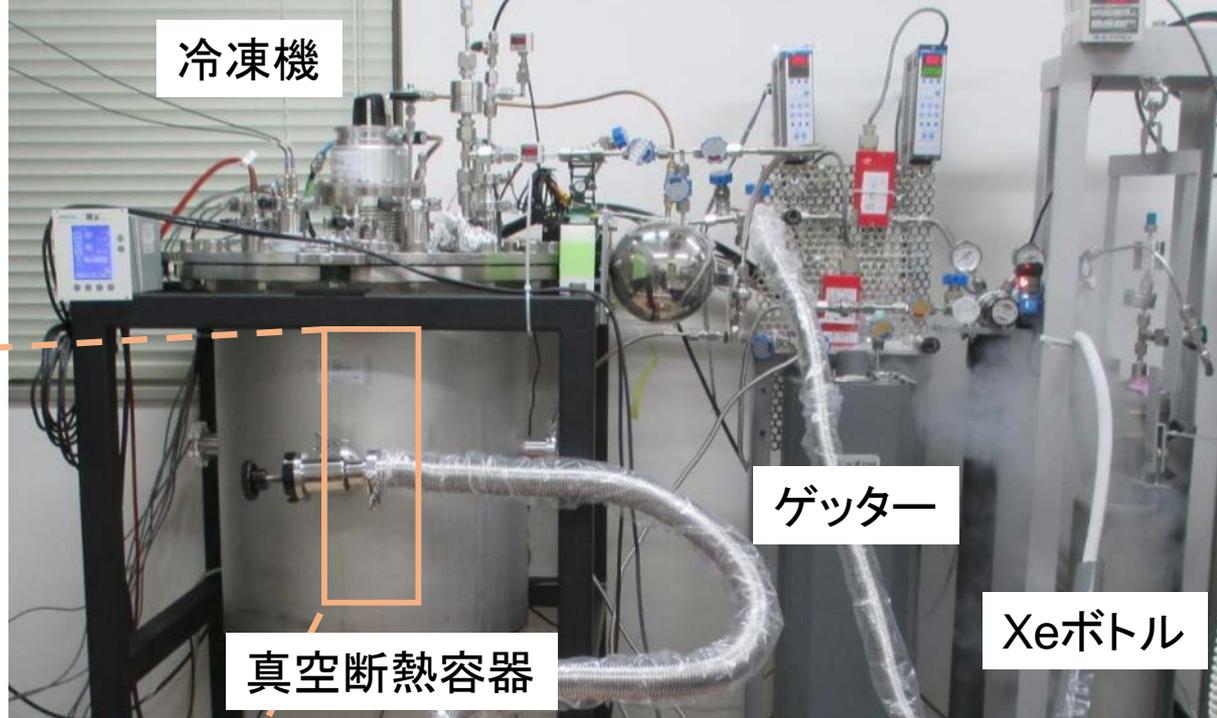
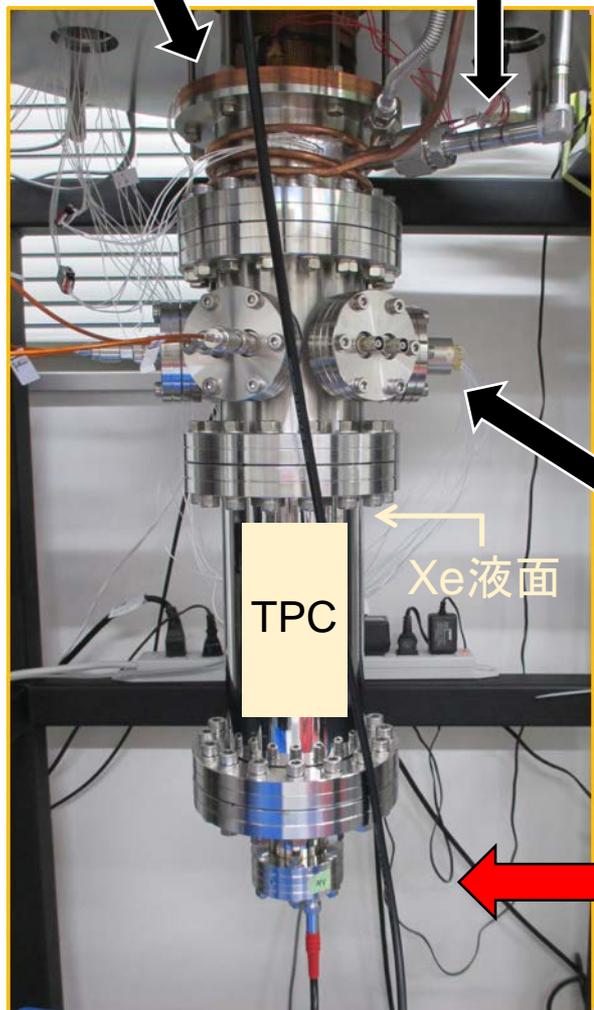
今回やったこと

- フィードスルーを耐圧 10kV のものに変更し、LXe中に浸けて放電を防ぐよう改良
- ワイヤー電極で定量的S2測定を目指して実験

実験装置

熱交換円盤

Xeライン



フィードスルー(ガスXe中)
PMTのsignal線、HV線と
温度計を接続

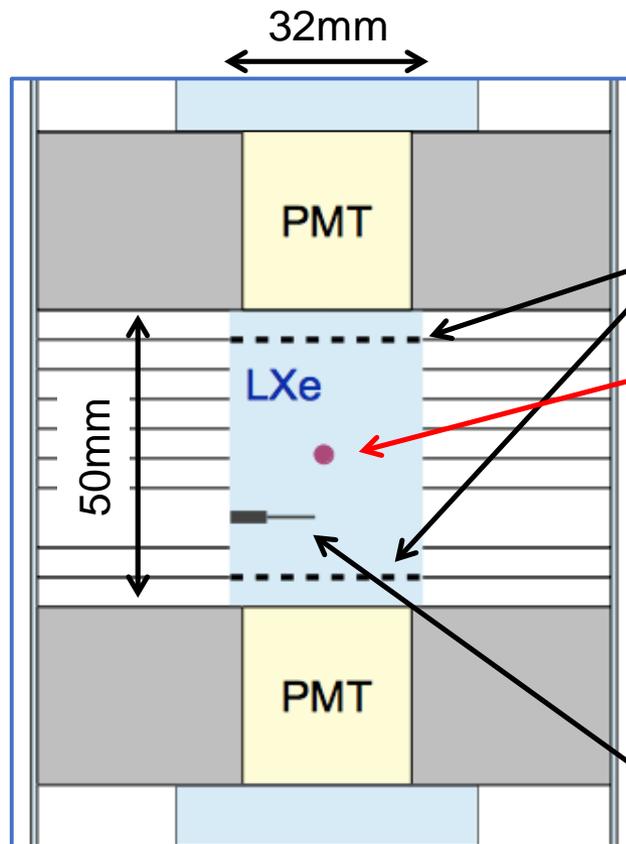
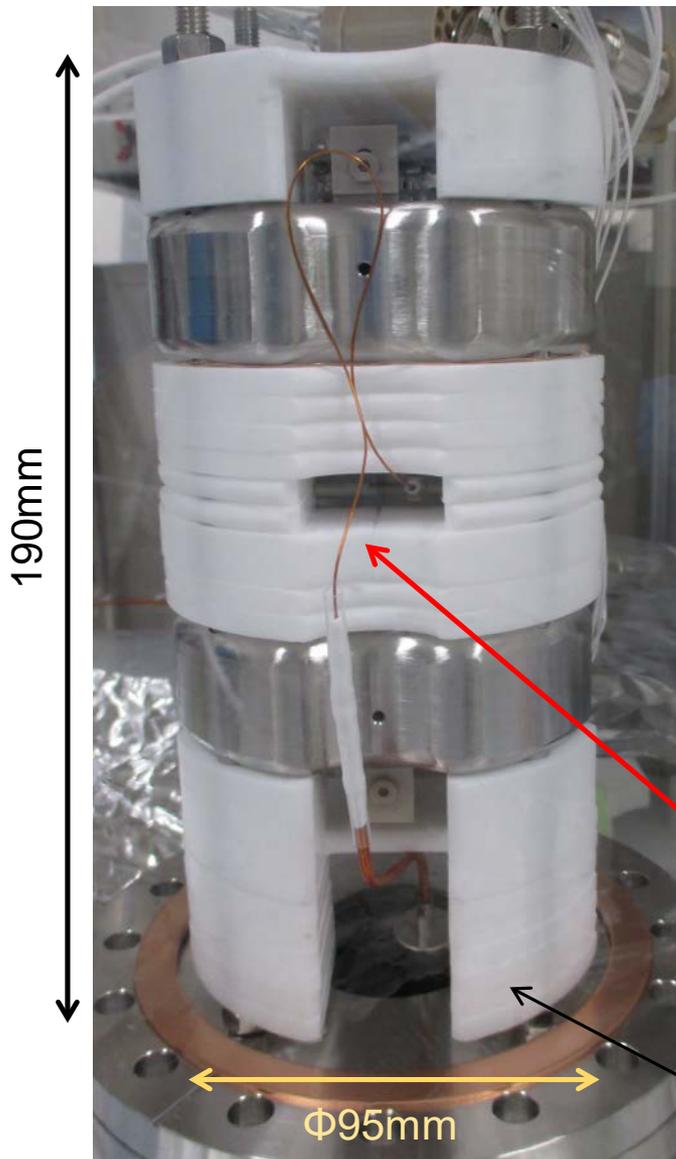
Xeは検出器へ導入する
際にゲッターを通して
純化する。

使用したXe:1.5kg
~ 500cc(liq),250L(gas)

フィードスルー(LXe中に移動)
ワイヤー電極へのHV印加

LXe -101°C, 0.06MPa(G)で実験

TPCセットアップ



GNDワイヤー

ワイヤー電極

Am-241線源

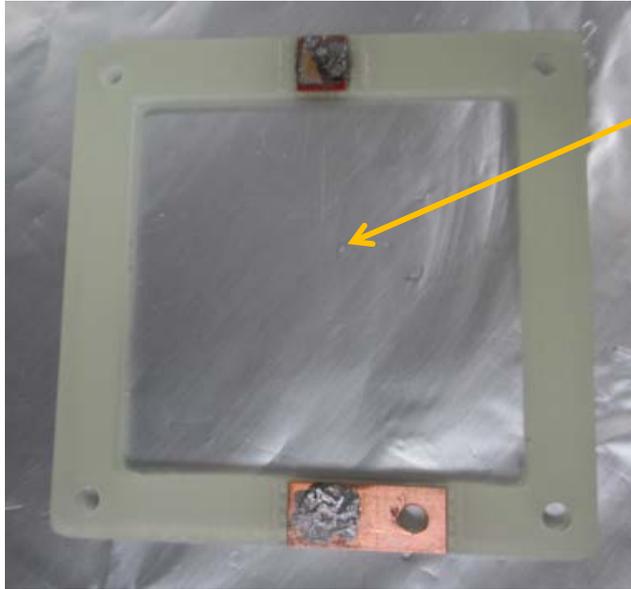
ワイヤー電極へのHV印加ケーブル。コネクタがLXe中に浸かるよう底からケーブルを伸ばす。
ワイヤーに7kVまで印加に成功！

テフロンスペーサー

PMT
浜松ホトニクス
R8520-409
+HV式



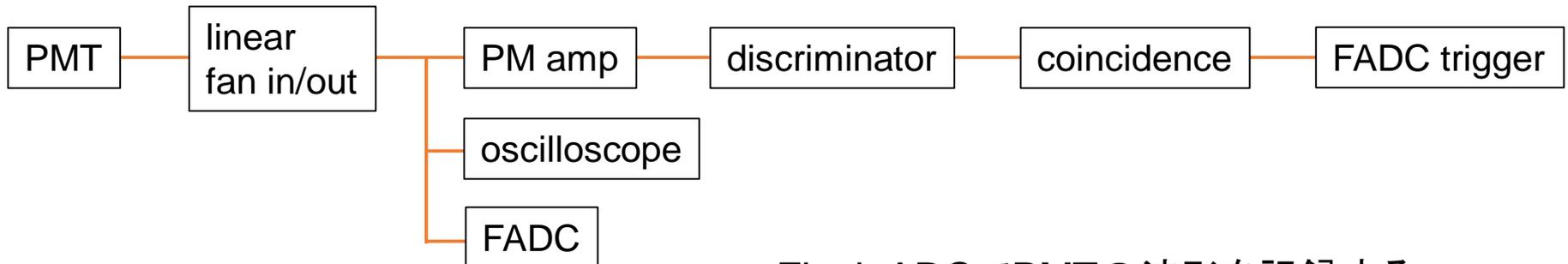
ワイヤー電極 / DAQ



ワイヤー(陽極):
直径10 μ mの金メッキタンゲステン線1本

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)



Flash ADCでPMTの波形を記録する

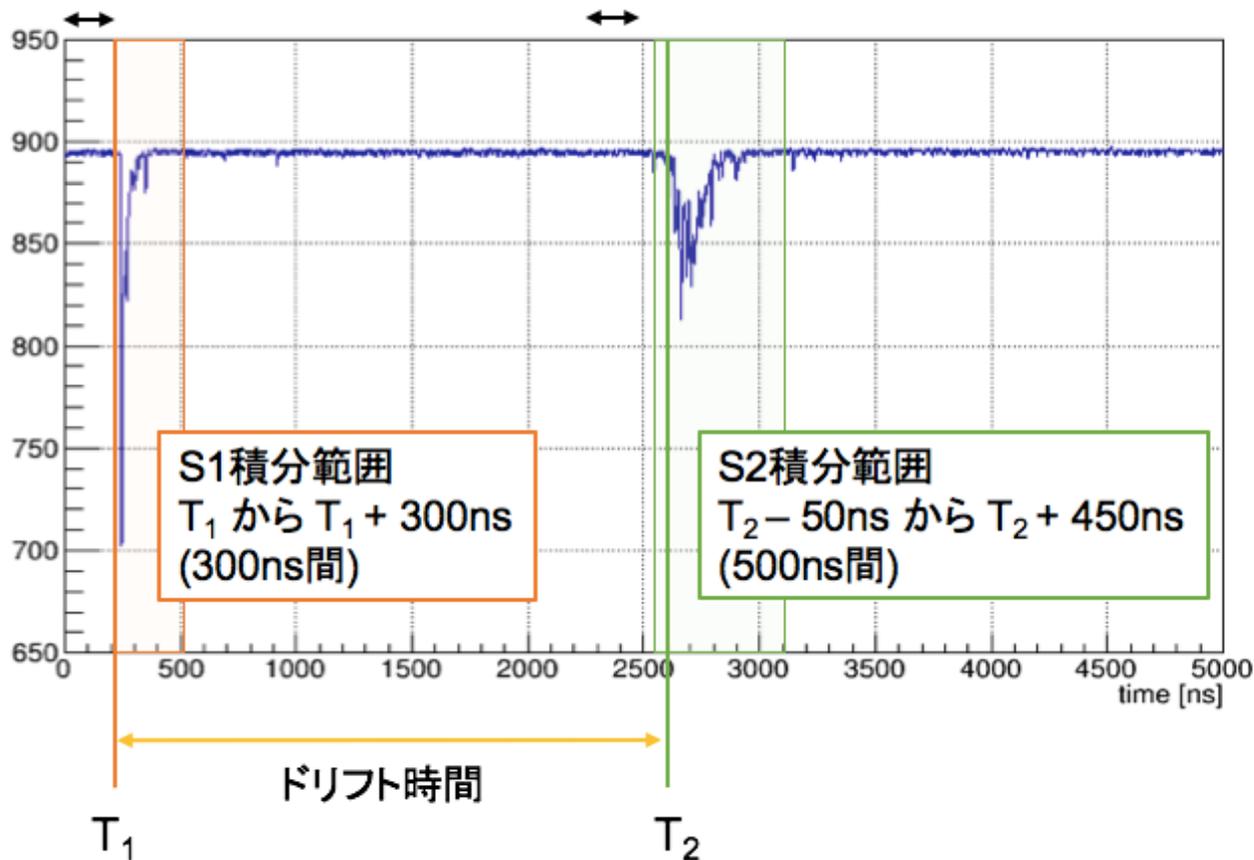
解析方法

S1のペDESTAL:

$T_1 - 320\text{ns}$ から $T_1 - 20\text{ns}$ の平均

S2のペDESTAL:

$T_2 - 150\text{ns}$ から $T_2 - 50\text{ns}$ の平均



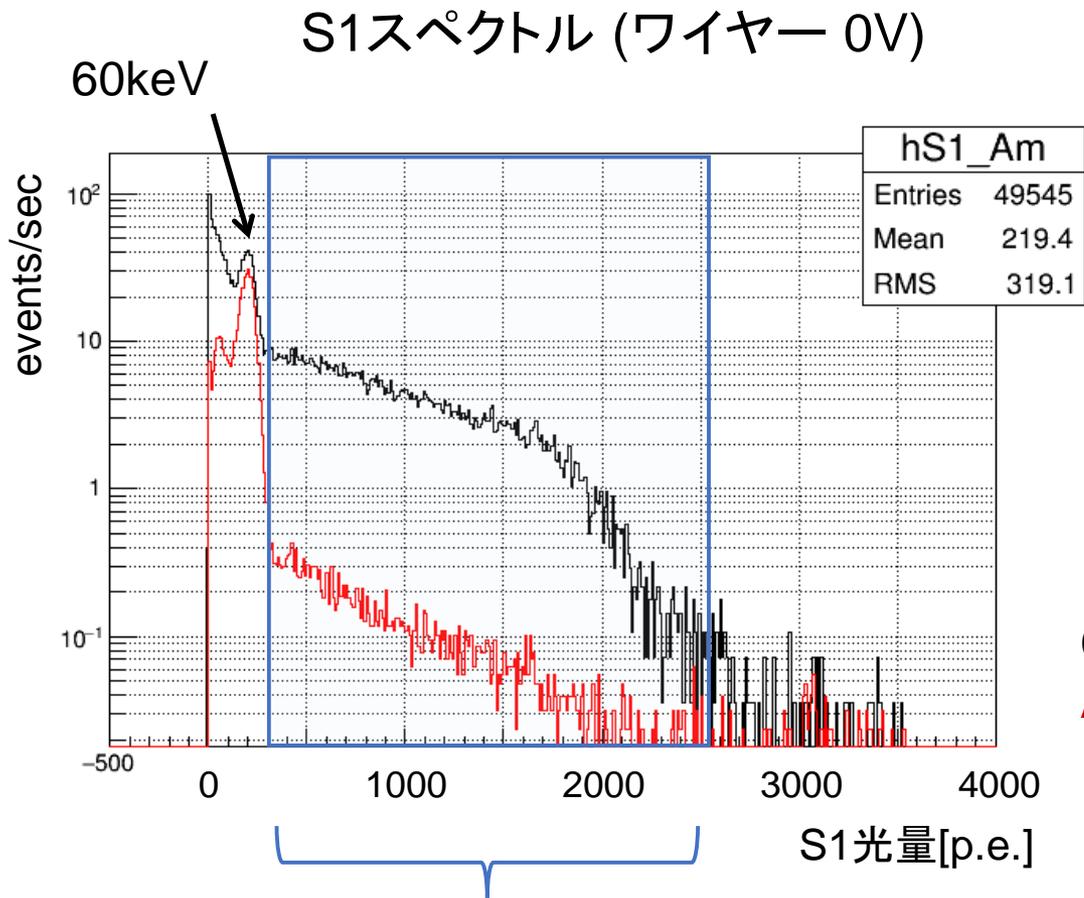
S1とS2の例

S1の1.5 μs から8 μs 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。

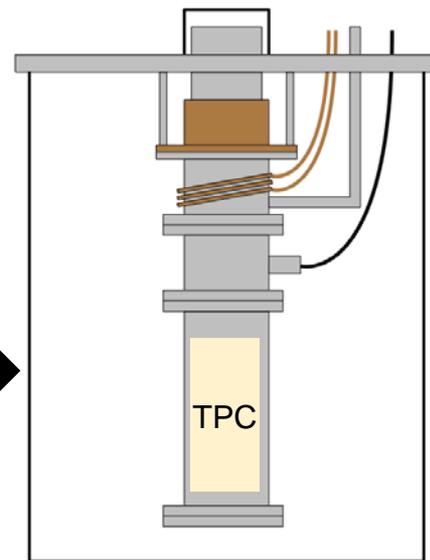
S2のトリガー条件:

上下PMT両方の電圧がS1のペDESTALに対して10mV下回ったとき

^{137}Cs 線源由来のS2探索



^{137}Cs

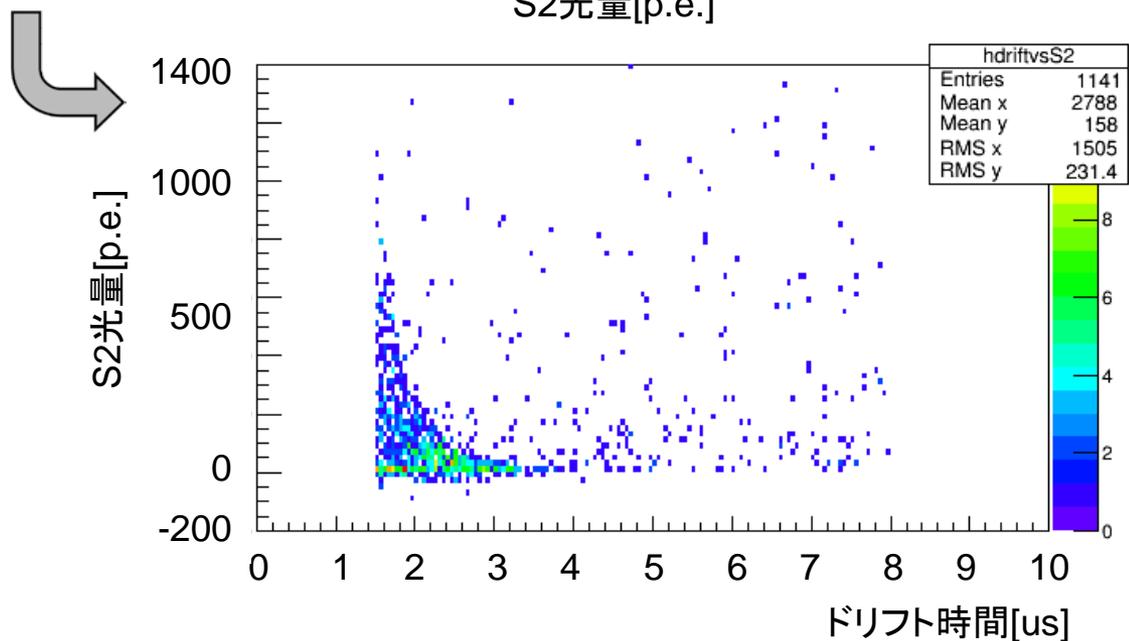
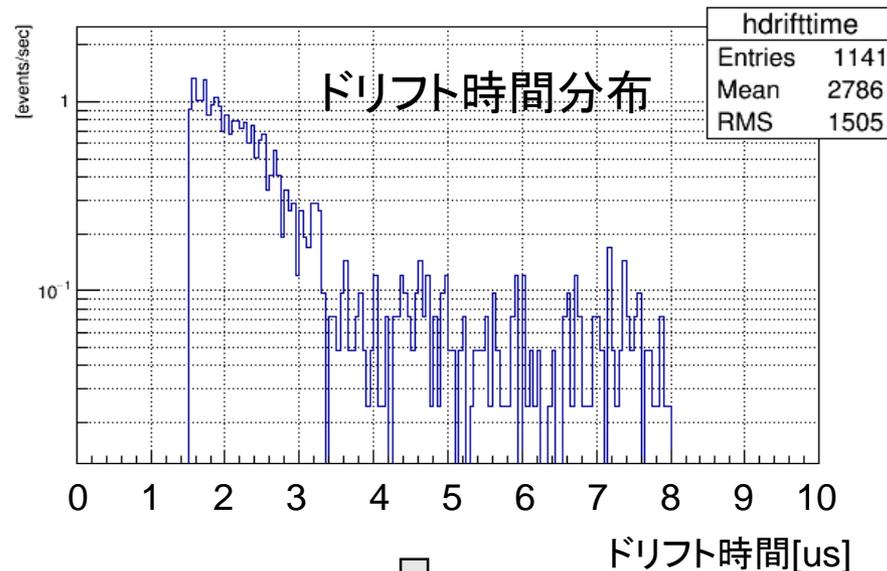
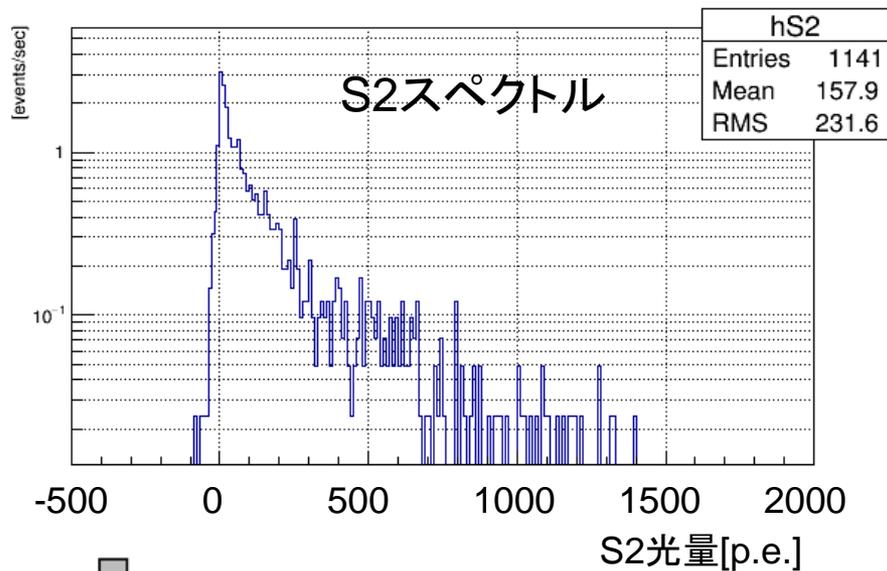


真空断熱容器の外側
からCs137を照射
(662keV γ)

Cs137+Am241
Am241のみ

S1光量でカットし
Cs137由来のイベントについて調べる

^{137}Cs 線源由来のS2を観測

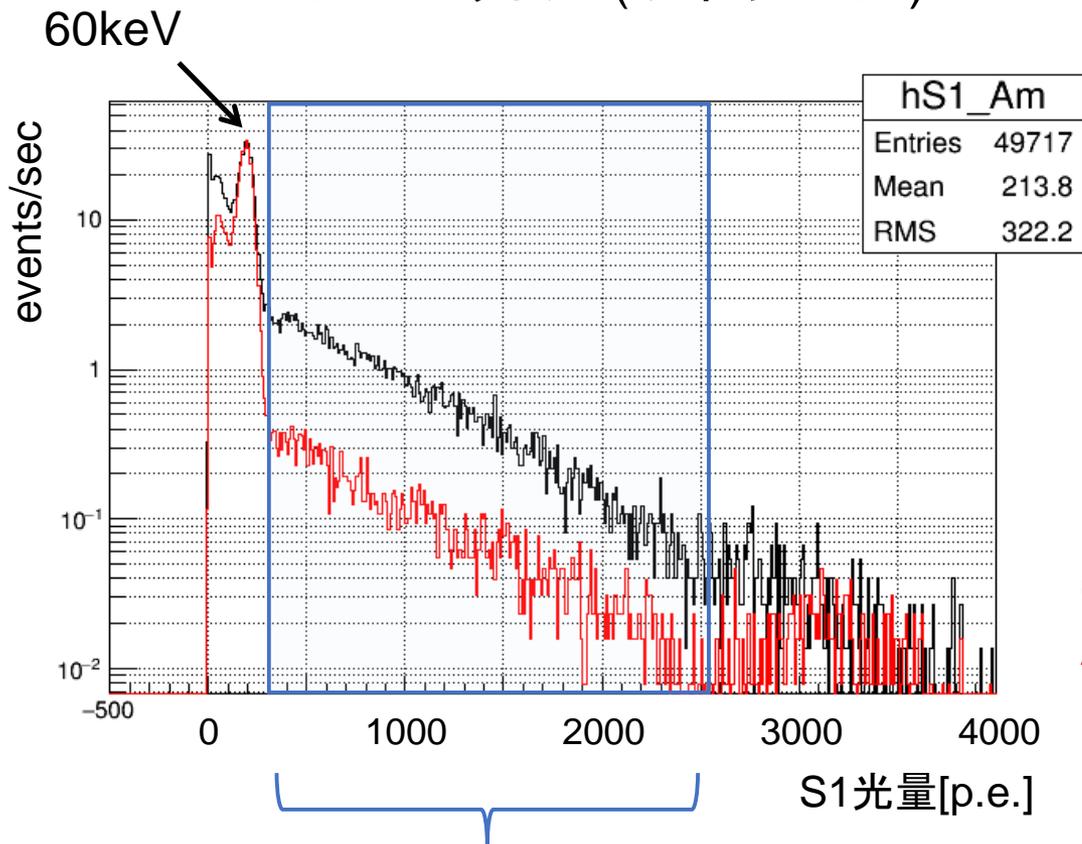


ワイヤー5.5kV

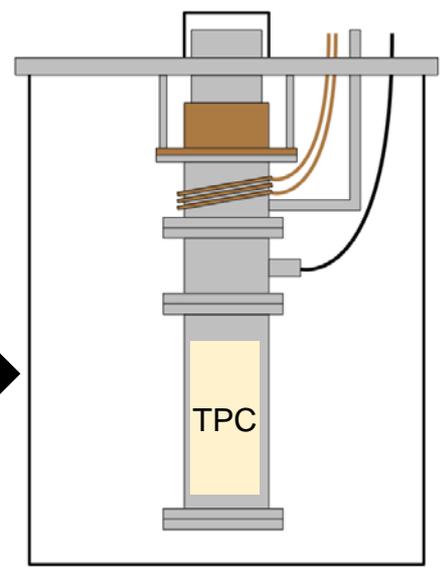
S2のトリガーにかかった
イベントの分布
(S1光量でカット後)

252Cf線源由来のS2探索

S1スペクトル (ワイヤー 0V)



252Cf

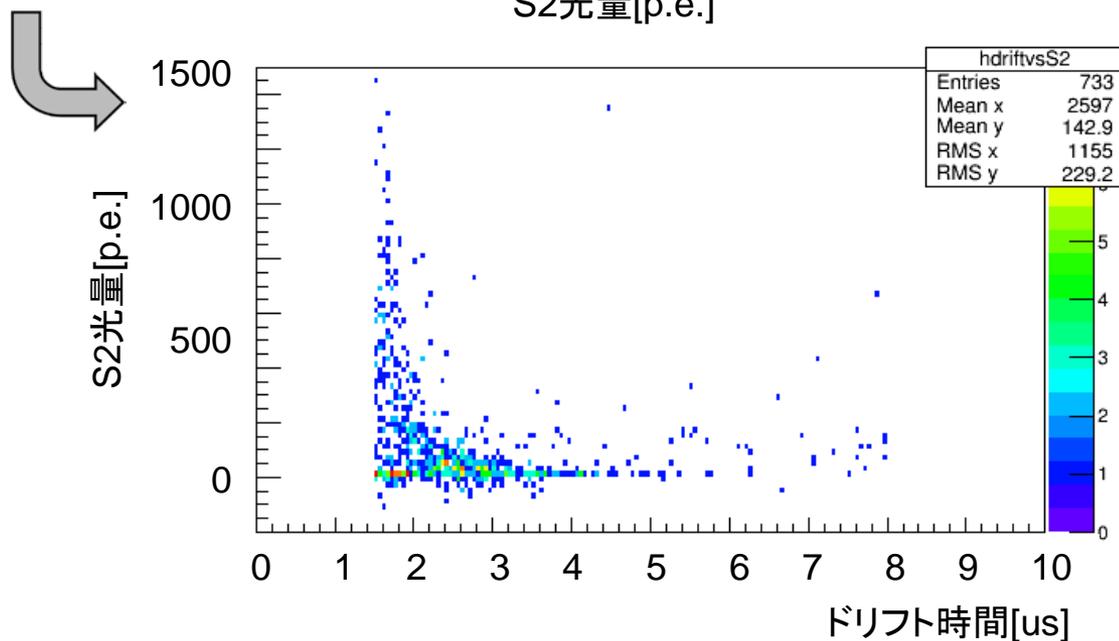
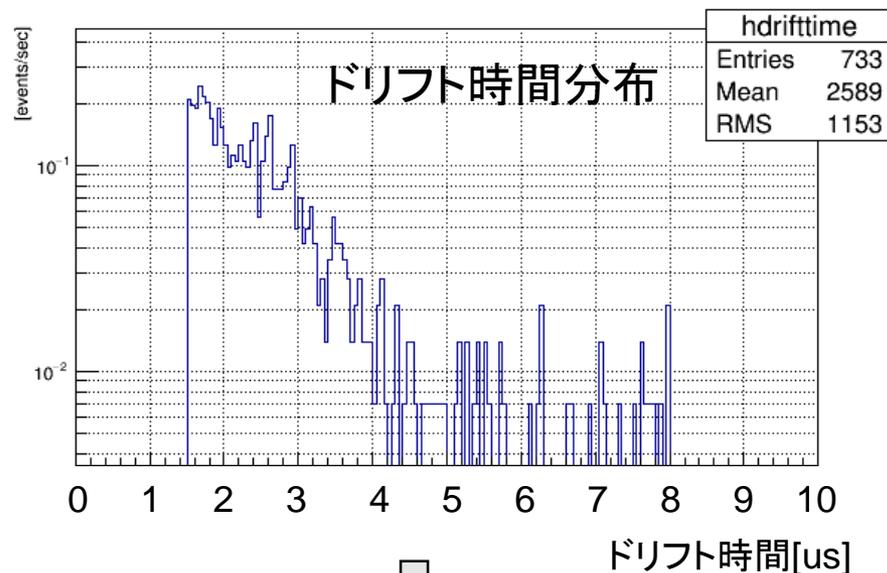
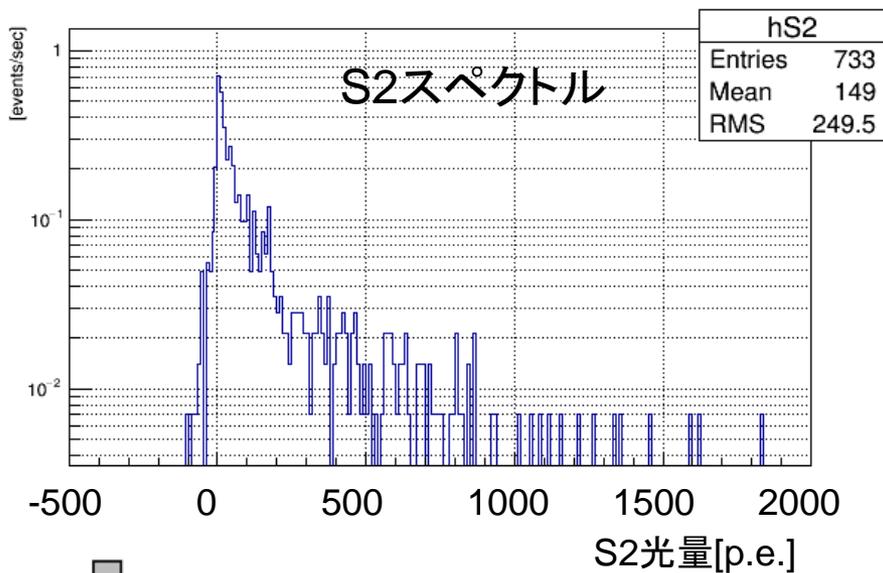


真空断熱容器の外側からCf252を照射

Cf252+Am241
Am241のみ

S1光量でカットし
Cf252由来のイベントについて調べる

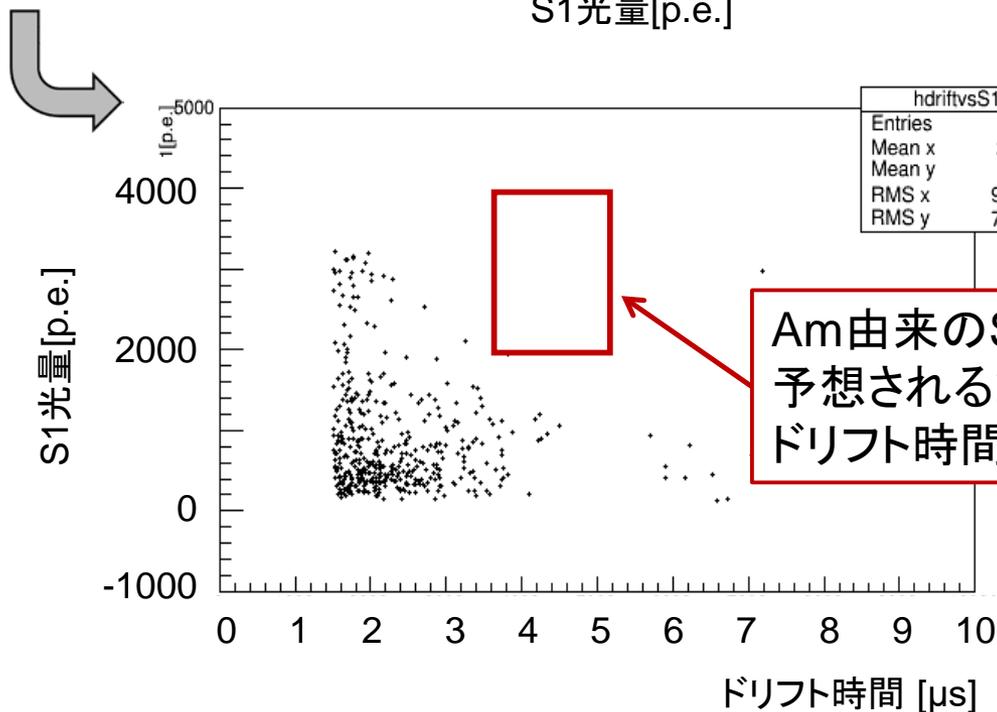
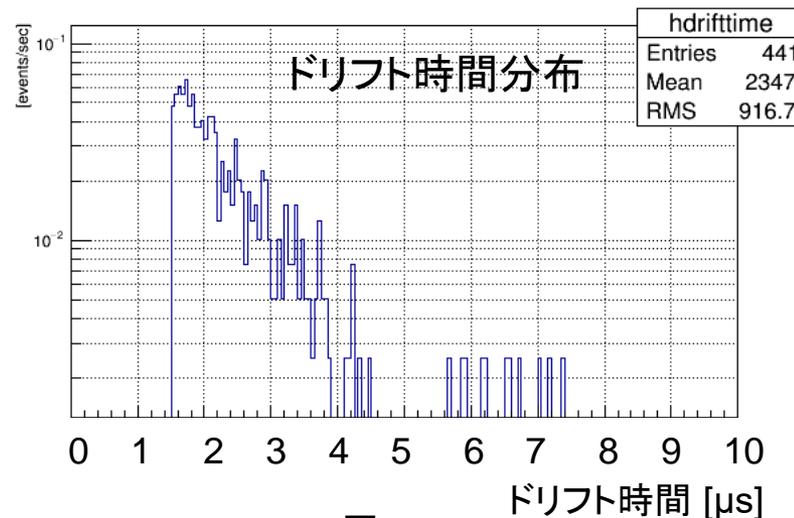
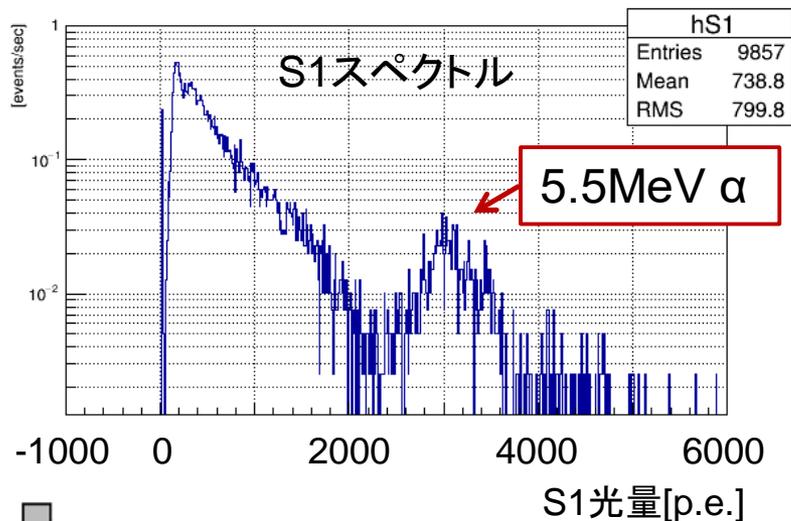
^{252}Cf 線源由来のS2を観測



ワイヤー6.0kV

S2のトリガーにかかった
イベントの分布
(S1光量でカット後)

^{241}Am 5.5MeV α 由来のS2は確認されず



S2のトリガーにかかった
イベントの分布
(ワイヤー6.6kV)

Am由来のS2の場合
予想される範囲。
ドリフト時間4 - 5 us

6.6kV印加に成功したが
 ^{241}Am 由来のS2は見えず

α 由来のS2が観測されなかった原因

1. LXeの純度

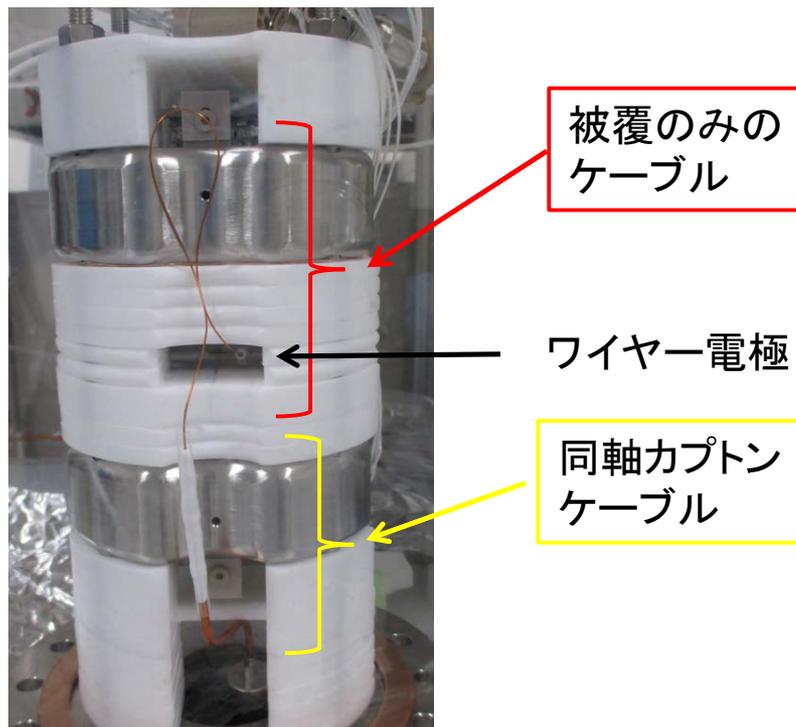
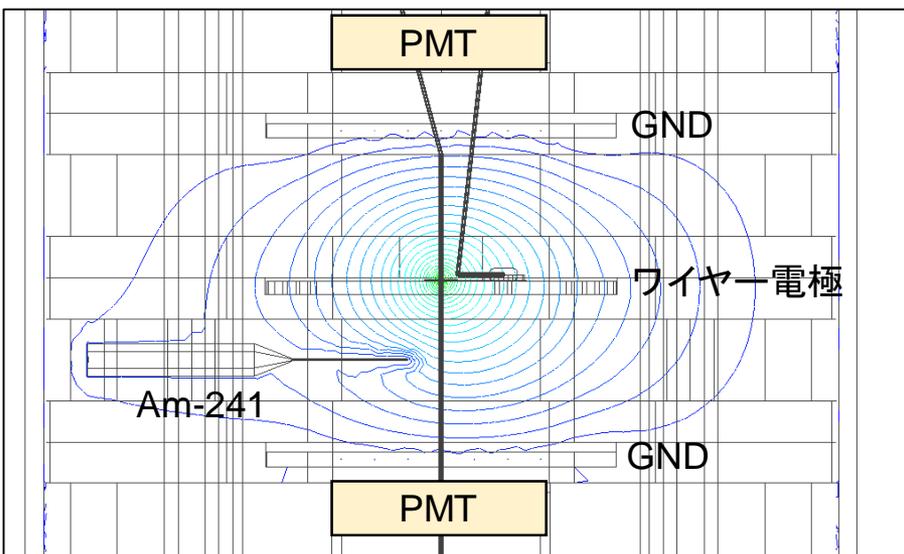
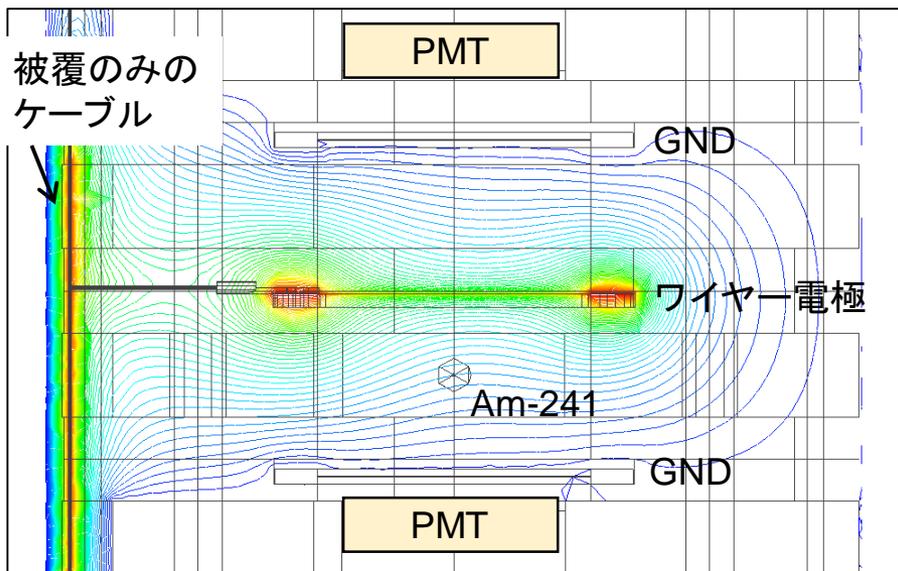
各PMTのS1光量 [p.e./keV]

実験日	上PMT	下PMT	上PMT+下PMT
2016年9月 (S2観測)	1.55 ± 0.35	2.44 ± 0.43	4.01 ± 0.58
2017年8月 (S2なし)	0.77 ± 0.23	2.53 ± 0.52	3.34 ± 0.54

- 前回に比べて上PMTのS1光量が低い
昨年のS2の測定結果から得られた電子のワイヤーへの収集効率は ~0.75%と低く、LXe中の不純物によって電子がワイヤーまでたどり着いていない可能性がある。
- Xe導入時の真空度が悪かった (1.4×10^{-3} Pa)
→ 今後はXe導入前に $< 10^{-4}$ Paまで真空引きする

α 由来のS2が観測されなかった原因

2. ドリフト電場の乱れ



- 2016年9月の実験 (S2を観測)
ワイヤー電極の直前まで
同軸カプトンケーブルを使用
- 2017年8月の実験 (S2観測されず)
途中から被覆のみのケーブルを使用

→ケーブルによってドリフト電場が乱れた可能性を疑ったが、問題はなさそうである

まとめ

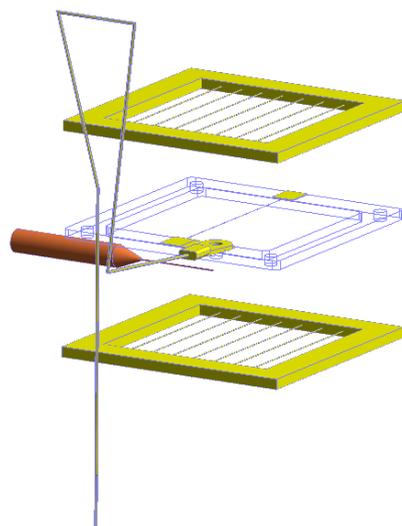
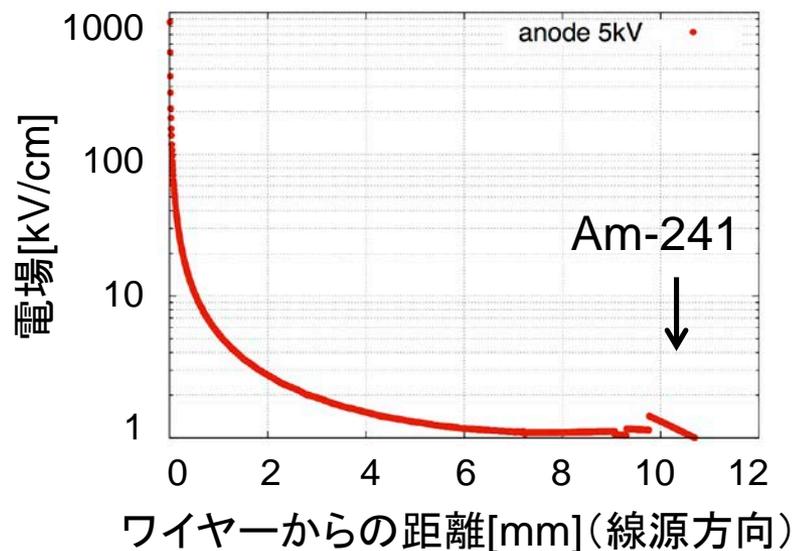
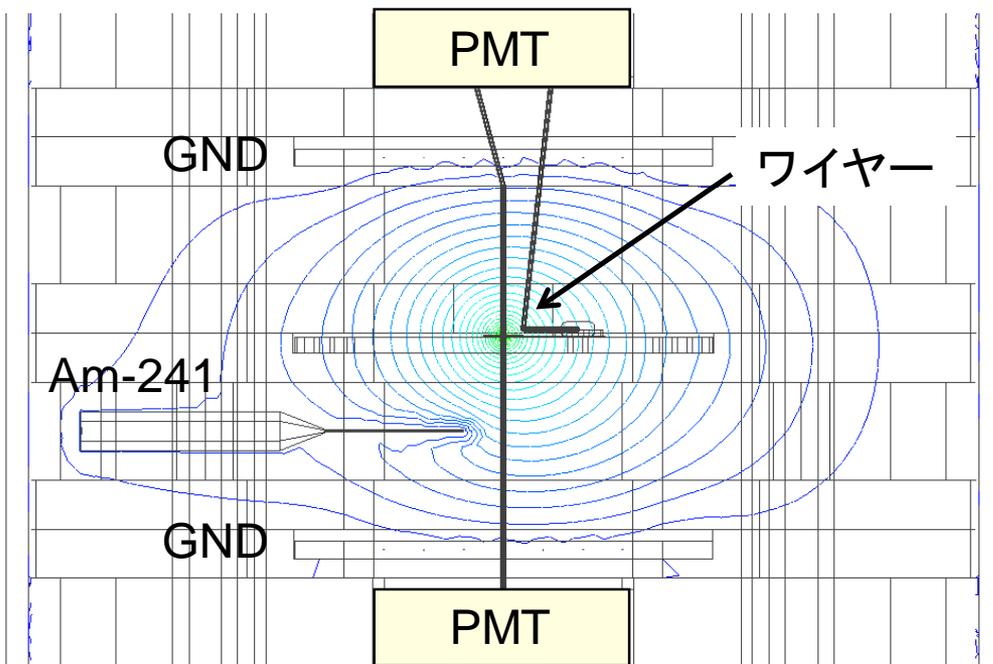
- ワイヤーへのHV印加のフィードスルーをLXe中に移動し、耐圧10kVのものに変更。最大7kVまで印加に成功した。
- ワイヤー電極を用いてCs-137とCf-252線源由来のS2を確認。
- Am-241 5.5MeV α 線由来のS2は観測されなかった。
電子の収集効率が低いため、LXe純度の低下により電子がワイヤーにたどり着けていないと予想される。

今後

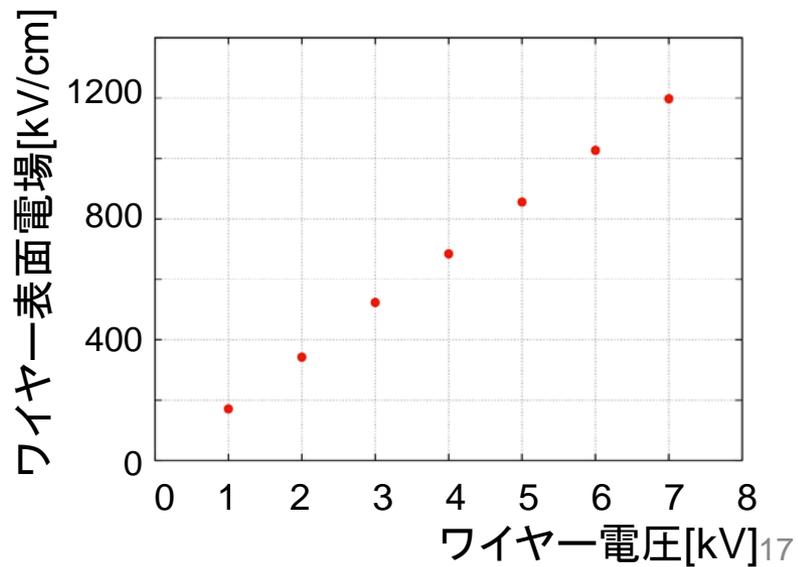
- LXe導入前の真空引きの徹底
- セットアップの改造
 - ワイヤー電極の直前まで同軸カプトンケーブルを使用するよう改良。
 - フィールドケージを導入し、ドリフト電場とS2増幅電場を独立に変えられるようにする。
 - 陽極をマルチワイヤーに改良
- 7kVまで印加できることを確認したので、改良したセットアップでS2の定量的測定を行う。<100keV由来のS2の観測を目指す。

backup

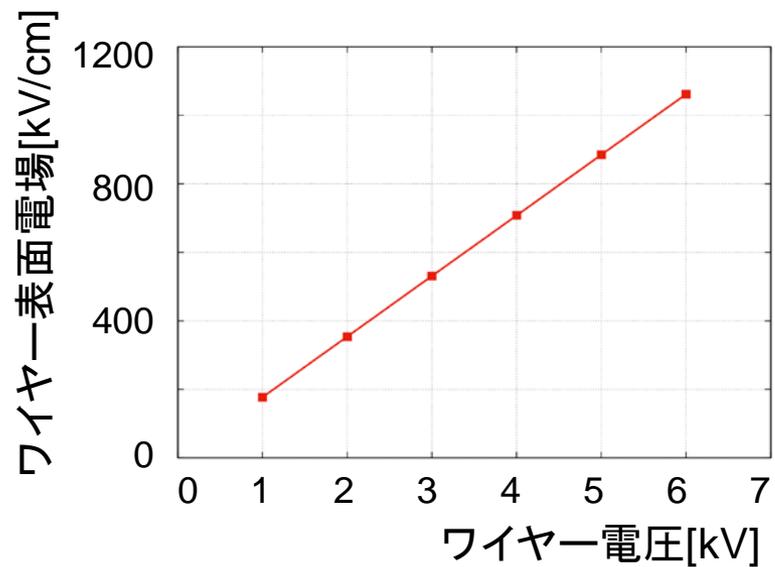
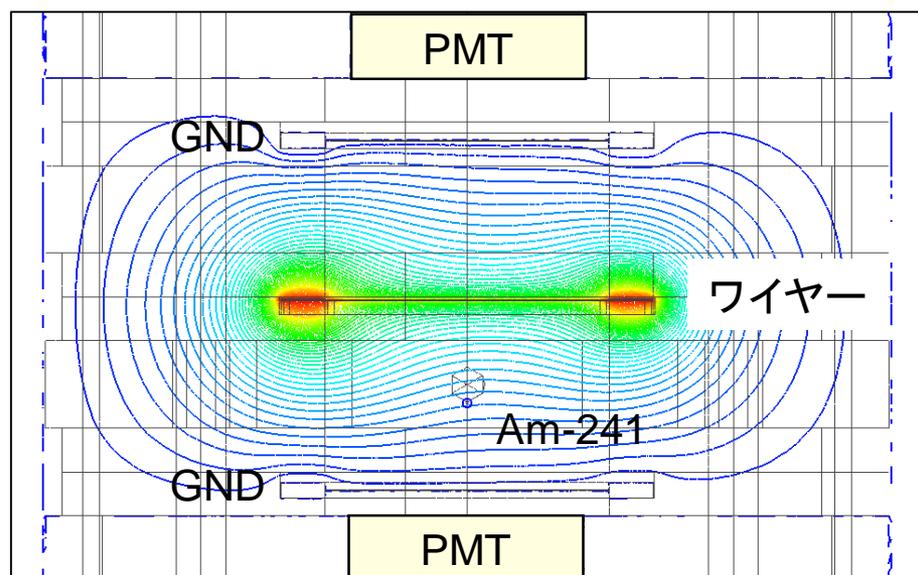
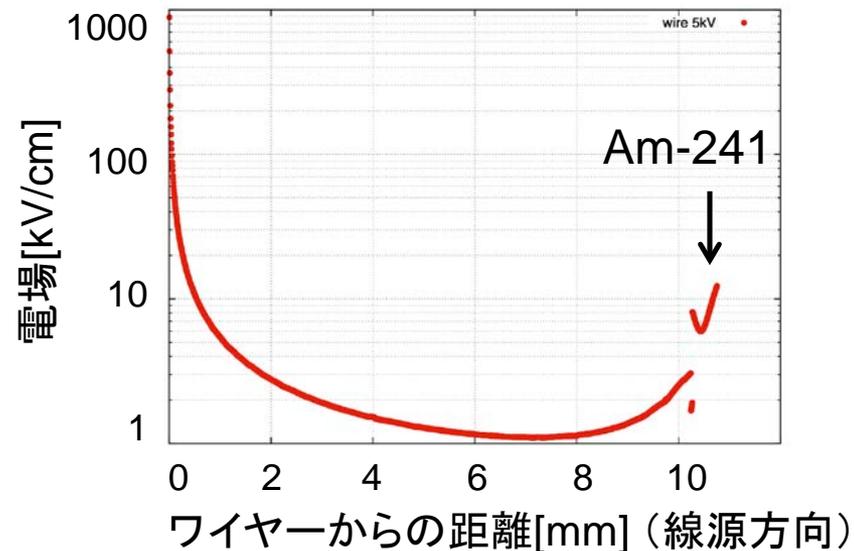
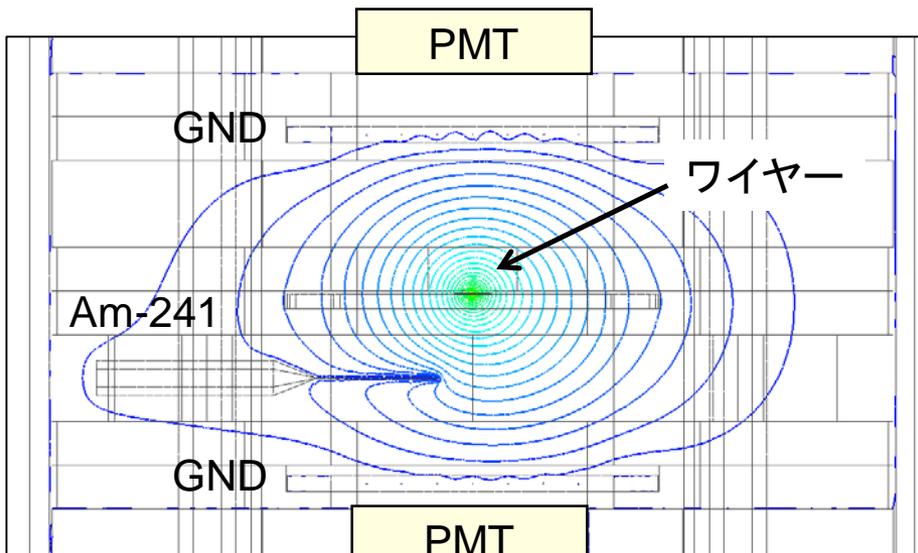
電場シミュレーション (2017年8月のセットアップ)



LXeのメッシュサイズが2mmと粗いため、電場の値が正確でない可能性あり



電場シミュレーション(2016年9月のセットアップ)



ドリフト電子の収集効率の見積もり

昨年観測された5.5MeV α 由来のS2から
電子の収集効率を見積もる。

S2光量からS2ゲインの変換には
 $g = 1.26 \times 10^3$ [(photon/drift e⁻)/p.e.] を用いる
(E. Aprile et al., 2014 JINST 9 P11012)

PMTのゲインが0.5pC/p.e.とする
(今回の測定結果で校正)

S2スペクトルのピーク 333 ± 135 p.e.

S2 gain $(333 \pm 135 \text{ p.e.}) \times g = 0.42 \pm 0.17$

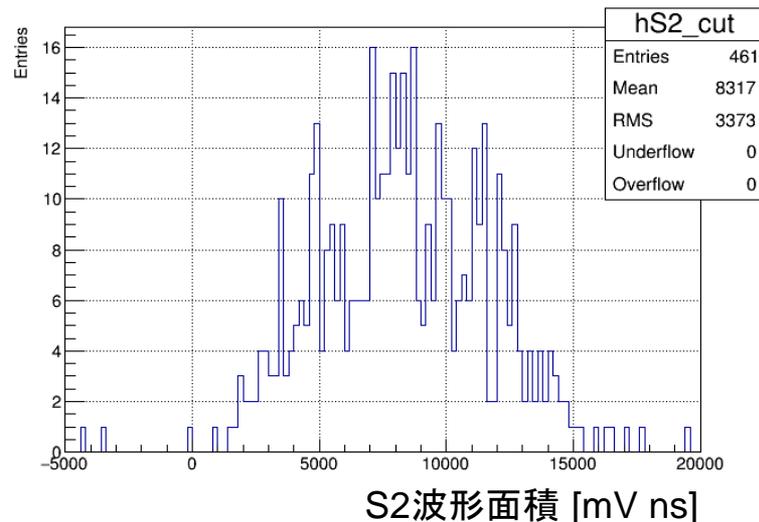
S2の光子数 $(333 \pm 135 \text{ p.e.}) / 0.3(\text{QE}) = 1109 \pm 450 \text{ photon}$

ドリフト電子数 $(1109 \pm 450) / \text{S2 gain} = 2646 \pm 1073$

5.5MeVのenergy depositで発生する電子数 $(3.526 \pm 0.006) \times 10^5$
(LXeのW値 15.6eV)

ワイヤーまでたどり着く電子の割合 0.75%

5.5MeV α 由来のS2スペクトル@4.7kV



Conversion factor

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

g : conversion factor
S2 size in p.e. → 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]	$(1.26^{+0.38}_{-0.27}) \times 10^{-3}$

E_α is the energy of α -particles emitted by the ²¹⁰Po source,

W is the ionization energy of xenon,

f_{ion} is the fraction of electrons which escape recombination,

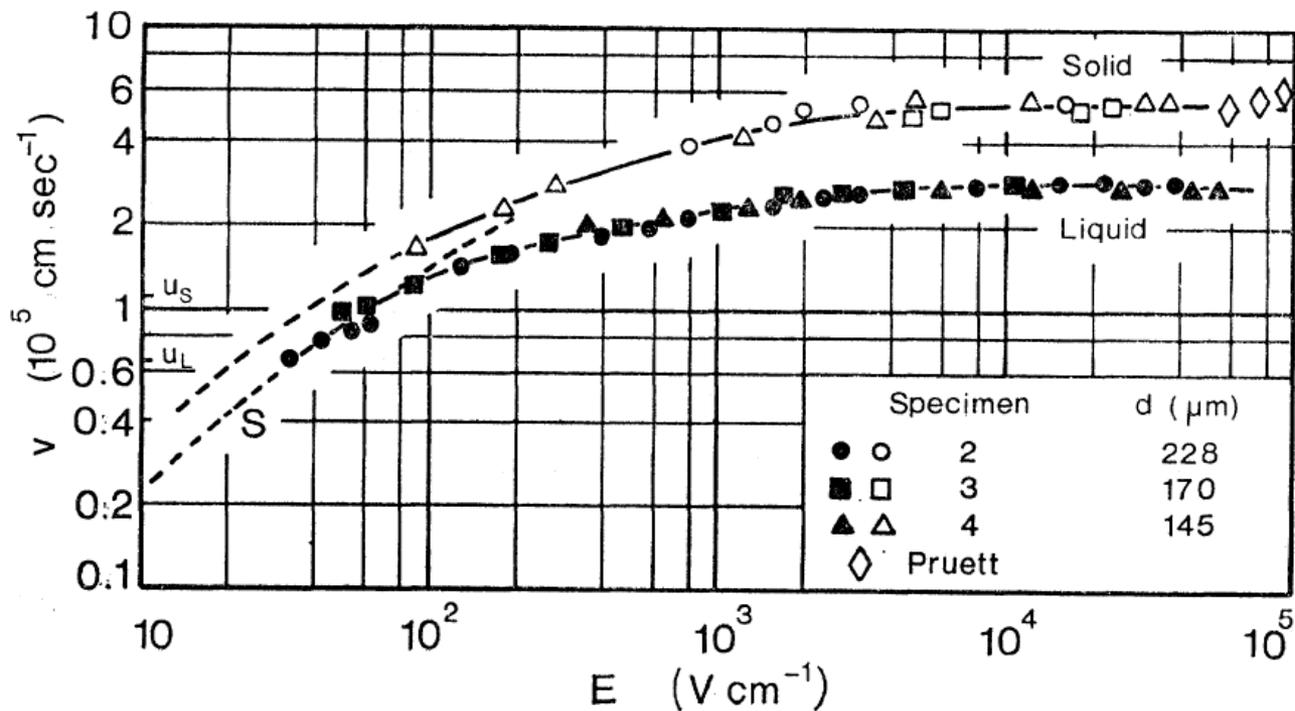
ϵ_{LC} is the bottom PMT S2 LCE,

ϵ_Q is the QE of the PMTs at ambient temperature,

f_{LXe} is a correction factor for the QE to account for the difference between ambient and LXe temperature,

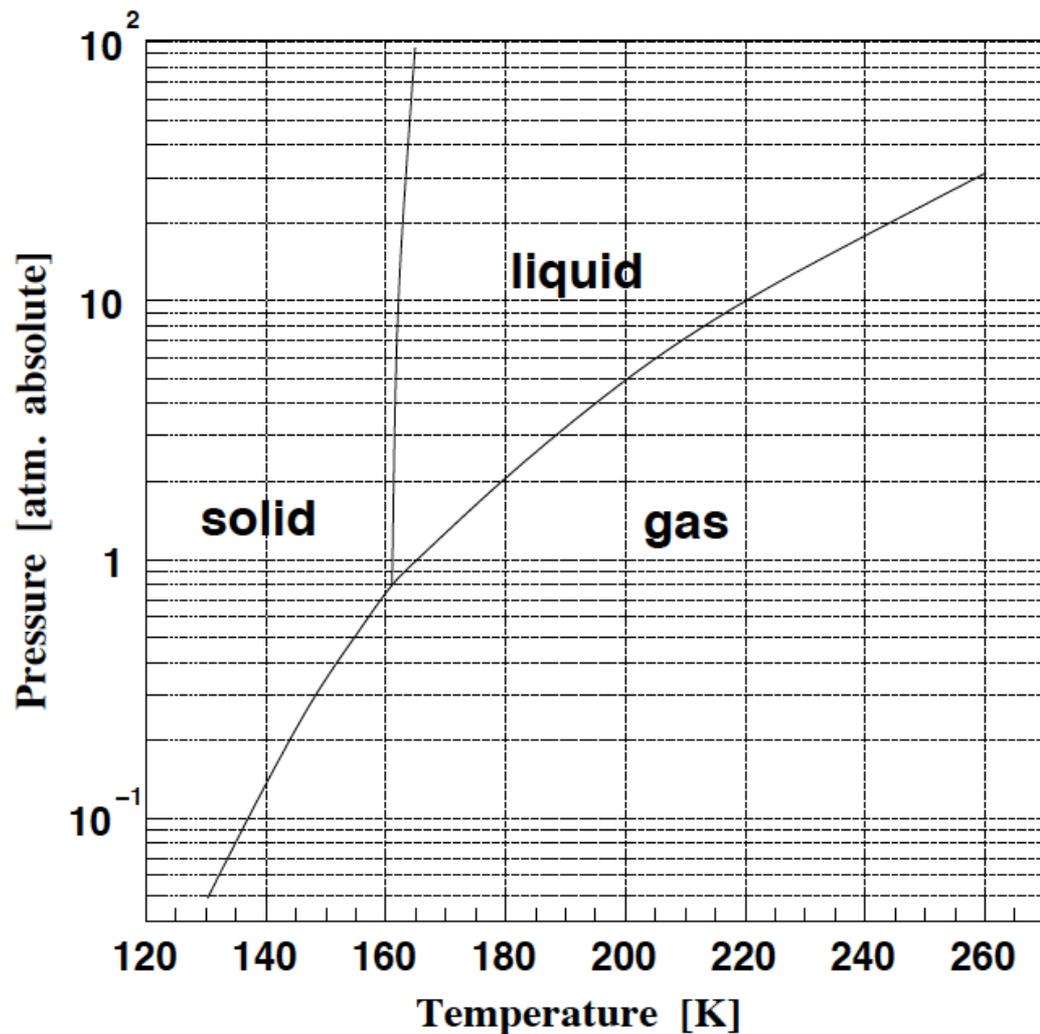
and ϵ_{dy} is the photo-electron collection efficiency at the first dynode

LXe中の電子のドリフト速度

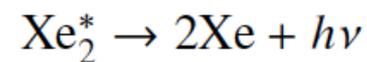
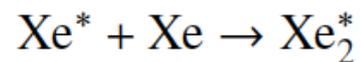


L.S.Miller et al., Phys.Rev.166,3 (1968)

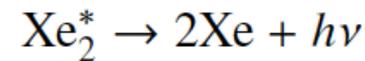
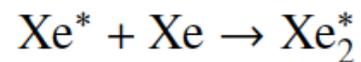
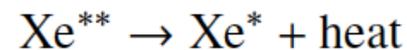
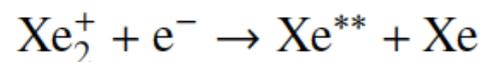
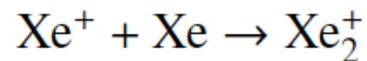
Xeの相図



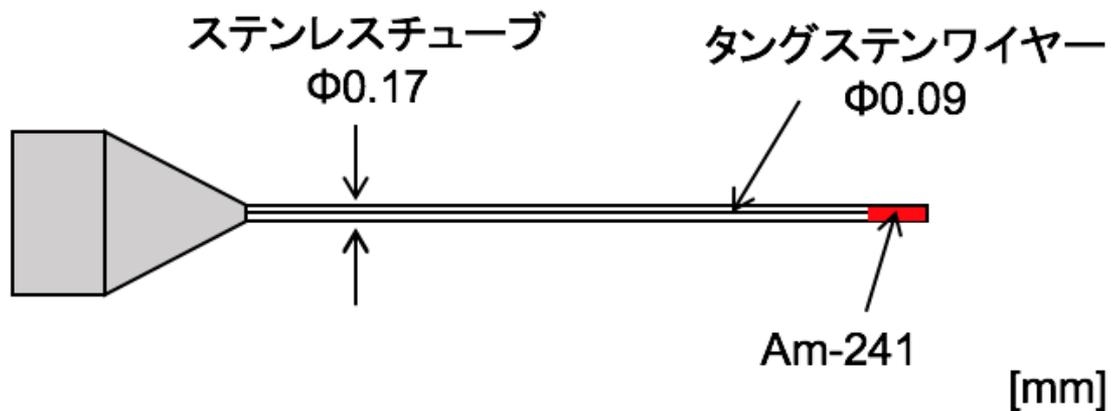
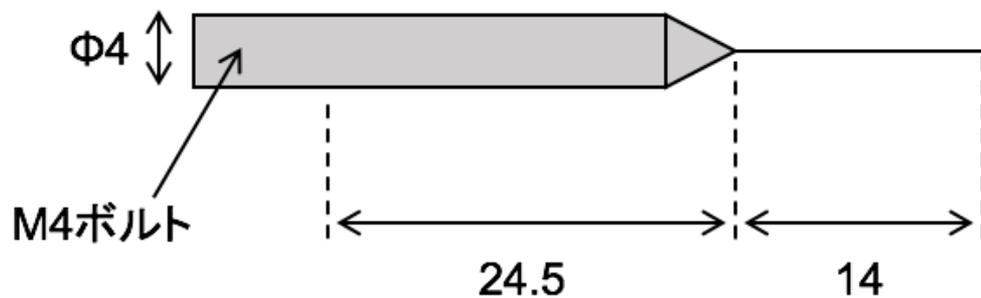
励起のみの発光過程



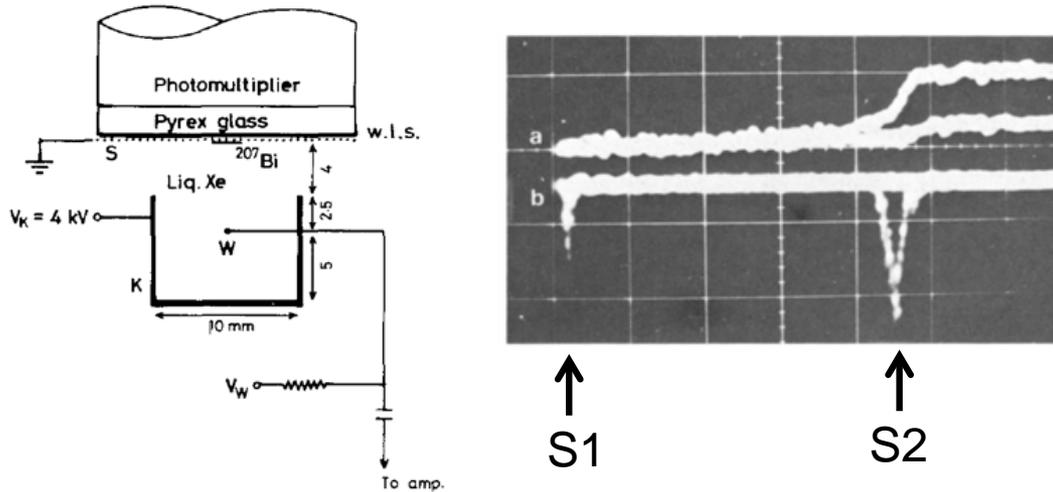
再結合を経る発光過程



^{241}Am 線源の構造

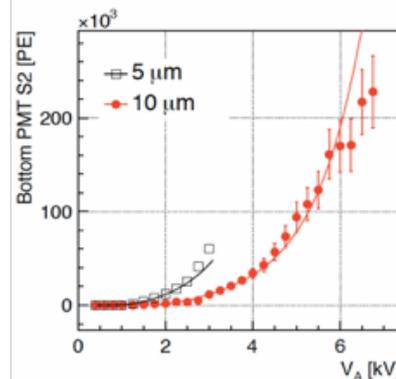
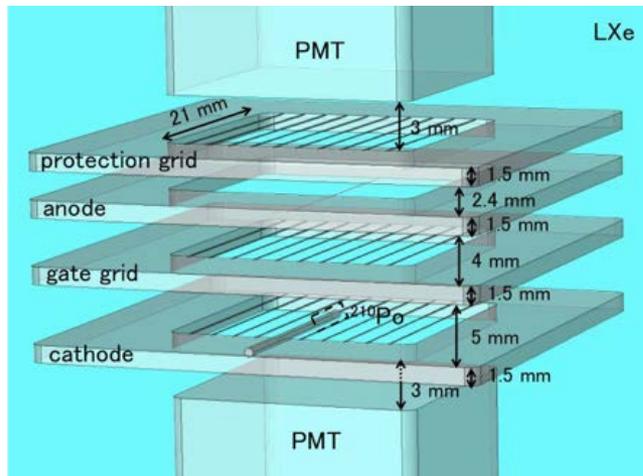


LXe中のS2の先行研究



- 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

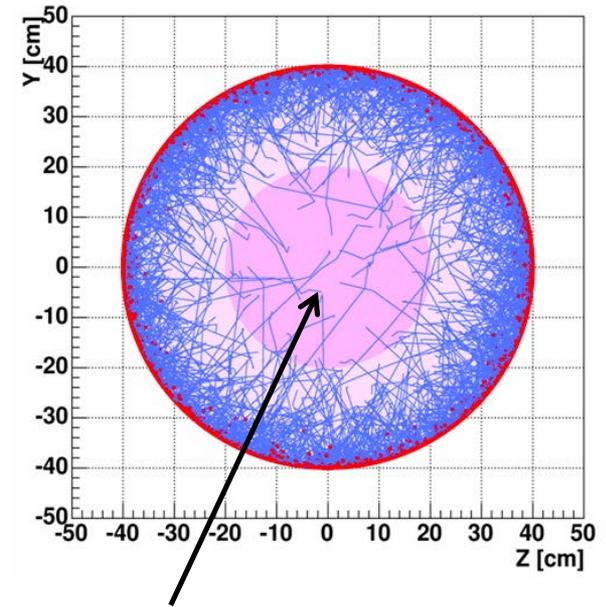
E. Aprile et al., 2014 JINST 9 P11012

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)

