

# ガスアルゴン中の電子比例蛍光の 波形構造と発光機構

---

早稲田大学 修士1年 武田 知将

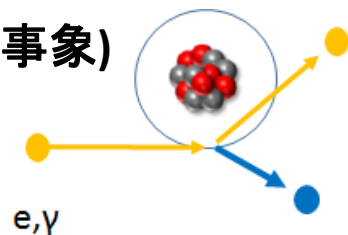
## 気液二相型Ar光TPC検出器を用いた低質量暗黒物質直接探索実験

### □ 気液二相型Ar光検出器

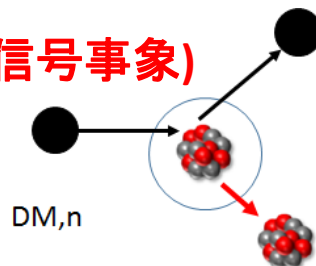
- 2つのAr蛍光を検出  
S1 : LArで発光  
S2 : GArで発光

- 信号事象と背景事象

ER(背景事象)

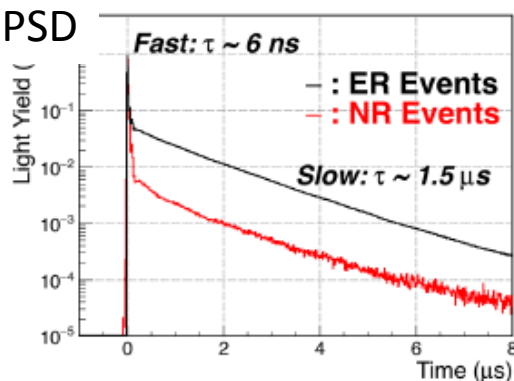


NR(信号事象)

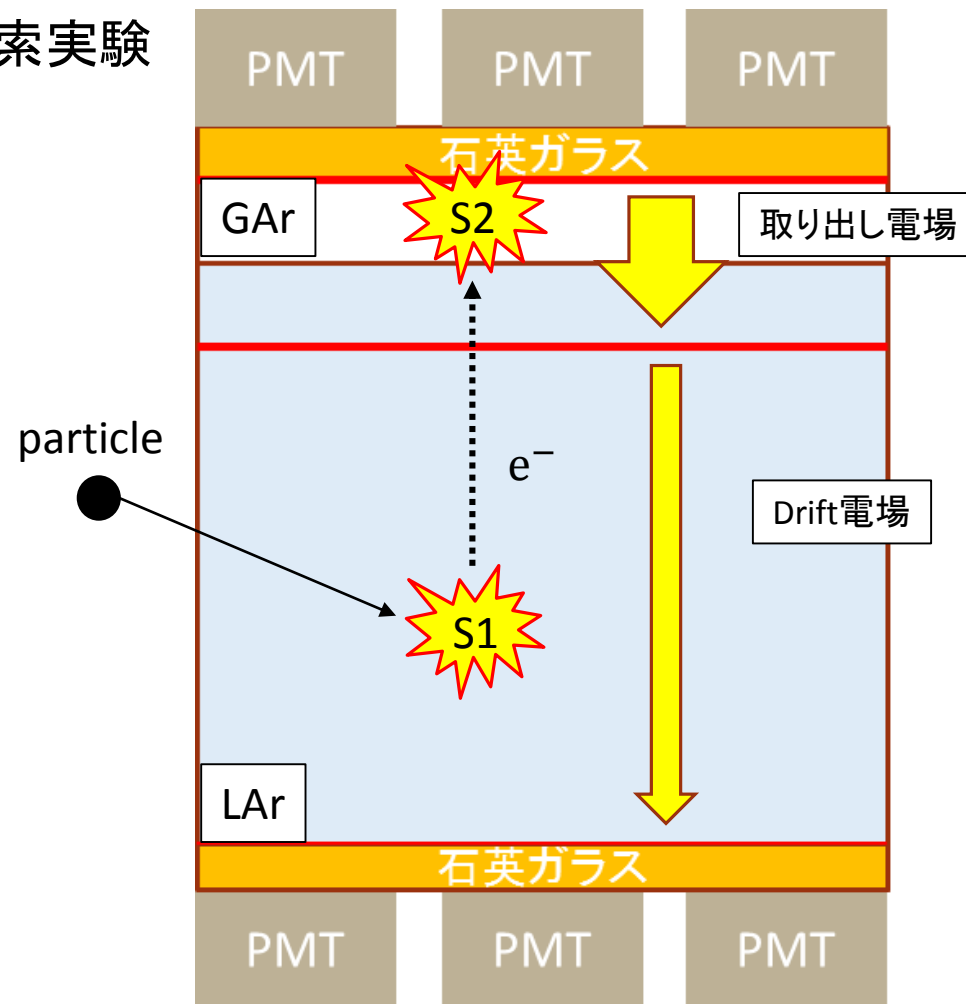
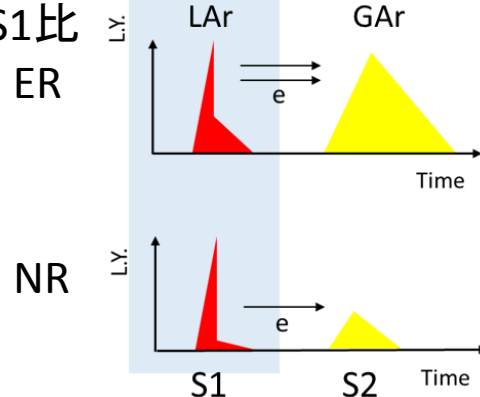


- 粒子識別

S1 PSD



S2/S1比



### □ S2の利用

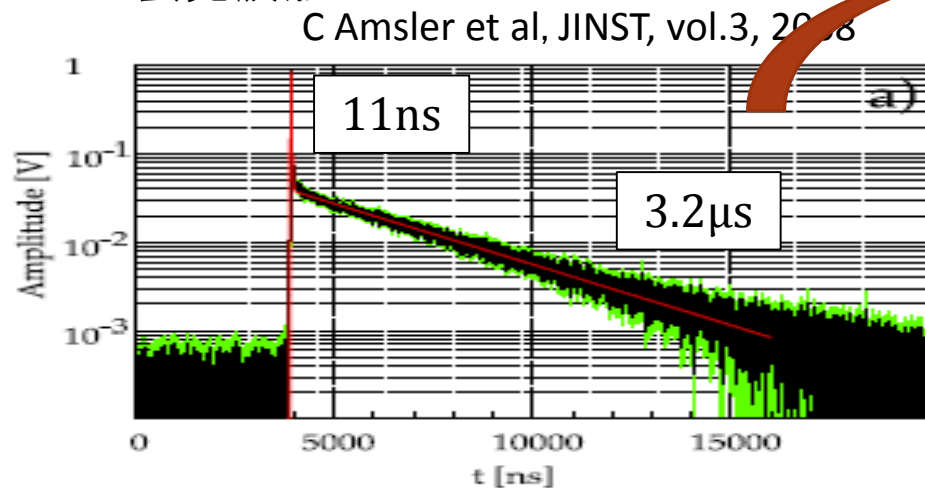
事象の位置再構成 → 検出器のfiducialsation

# 研究内容

## □ S2波形

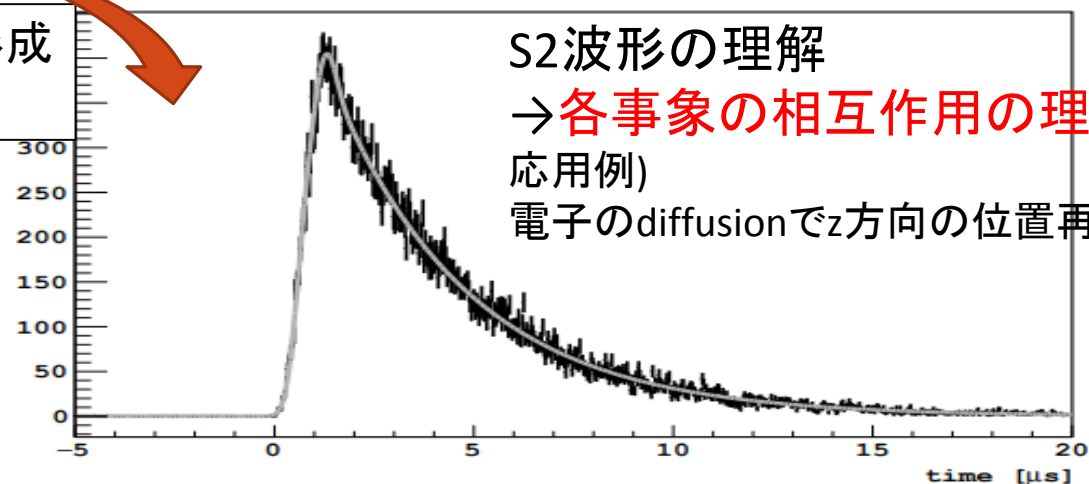
S2 : 入射粒子がLArと相互作用して発生した電離電子がGArに取り出されて発光

GArの蛍光波形



電子雲の形成  
拡散等々

S2波形



S2波形の理解

→各事象の相互作用の理解  
応用例)

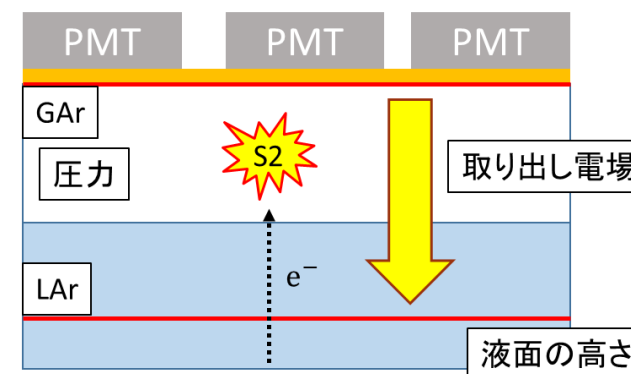
電子のdiffusionでz方向の位置再構成

## □ 低取り出し電場でのS2発光機構

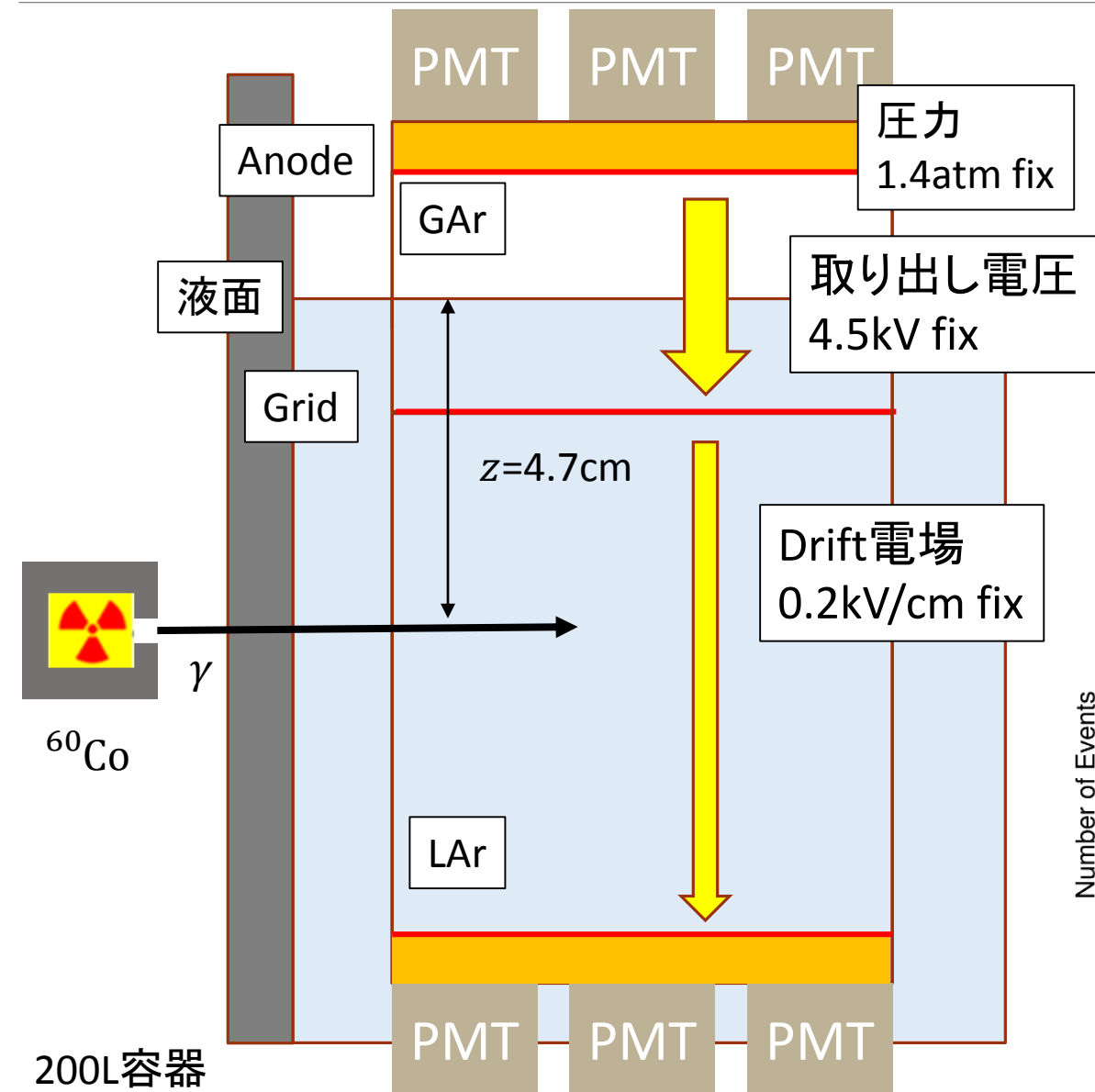
2018/6の論文(@ロシア)

低取り出し電場(高圧力)下において

VUV成分(128nm)+UV・NIR(Bremsstrahlung)成分?



# 実験セットアップ & event selection



## TPC

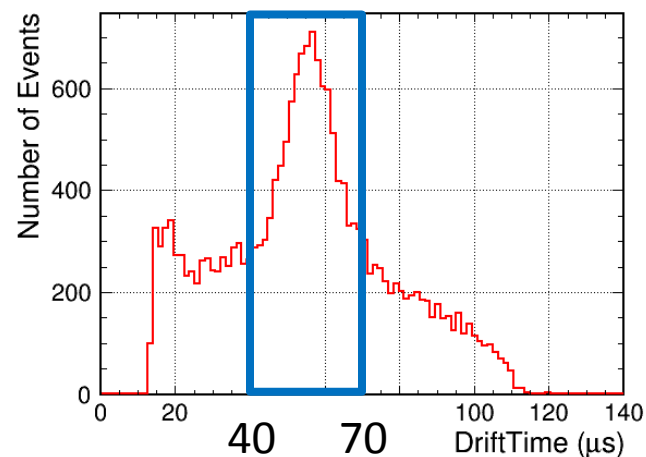
$\Phi 200\text{mm}$ 、 $H 100\text{mm}$ 、 $5.3\text{kg}$   
上下に7本ずつPMTを装填

## Event Selection

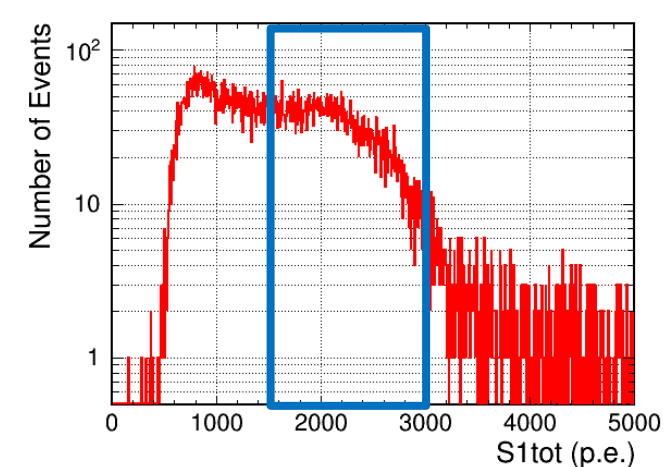
高エネルギー &  $\text{Co}60\gamma$ 線事象を選択し、解析  
主なselection cut

- Drift Time cut
- Energy cut ( $1500 \sim 3000\text{p.e.} \rightarrow \sim 1\text{MeV}$ )

Drift Time分布@ $z=4.7\text{cm}$



S1光量分布

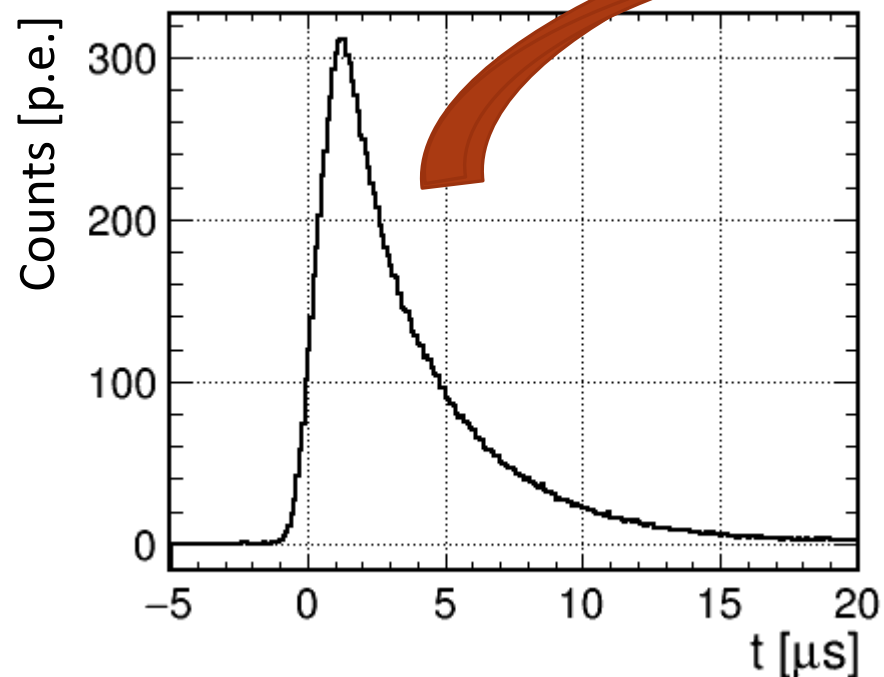


# S2波形解析

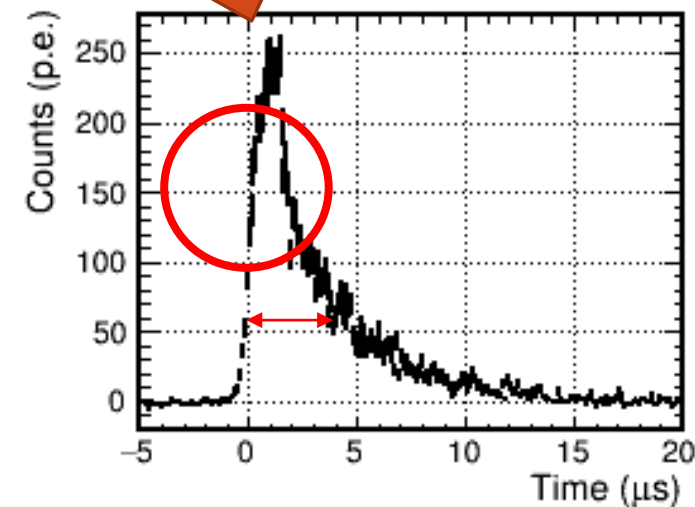
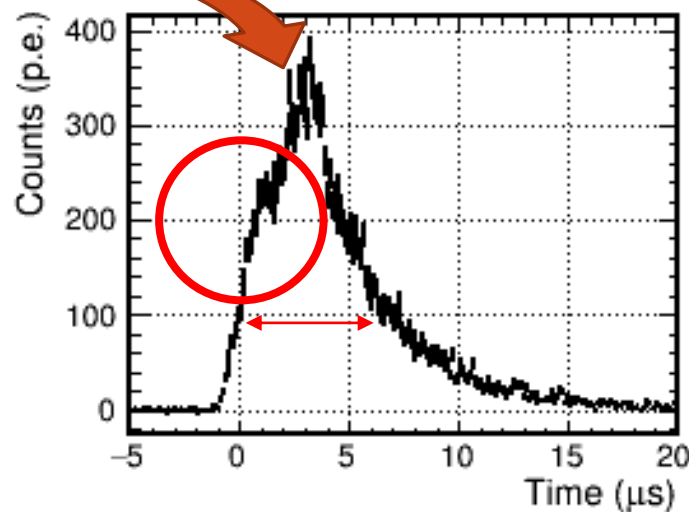
---

# 観測されたS2波形

- S2平均波形@z=4.7cm  
(~50event, 全PMTの和)



- 個々のS2波形



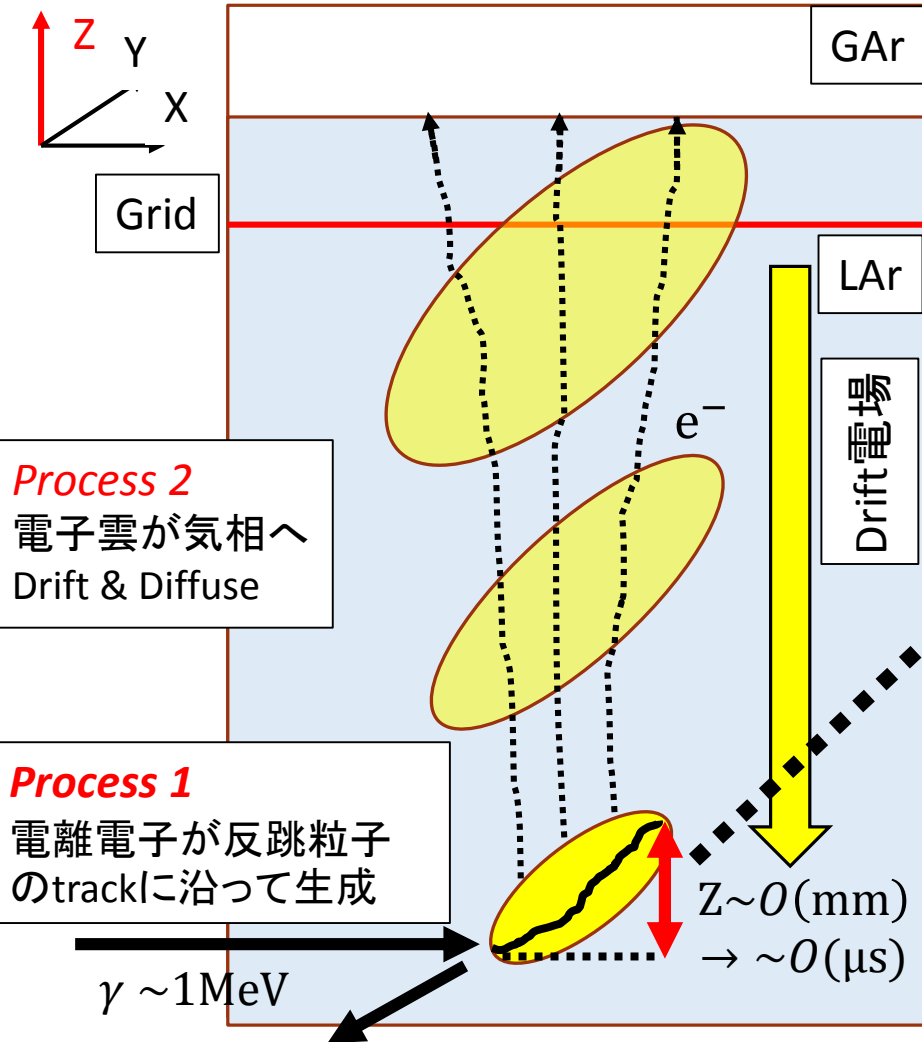
S2波形はevent by eventに異なる

波形の違いを理解するには...

**S2発光過程(1. 液相、2. 気相)**

# S2発光過程@液相

## □液相過程

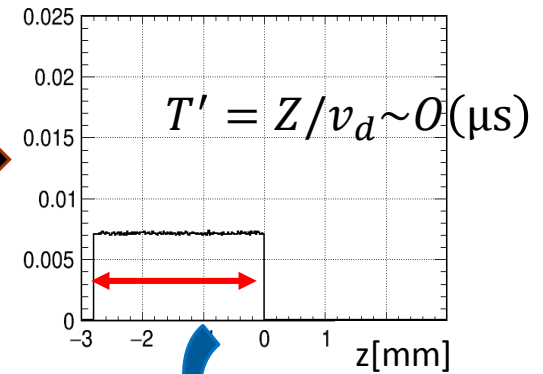
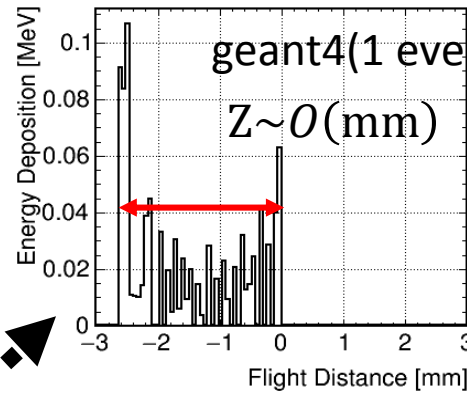


### Process1

電子雲のdrift方向の初期サイズ

- 反跳粒子の反跳方向
- 反跳エネルギー : fix( $\sim 1\text{MeV}$ )

Center of the step



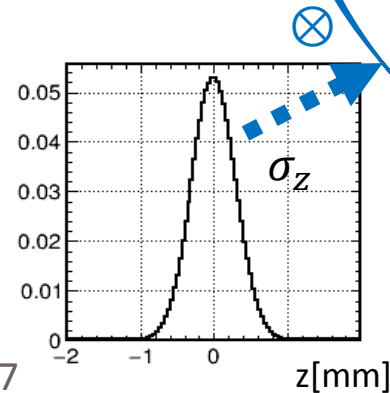
### Process2

電子雲のdrift方向の拡散

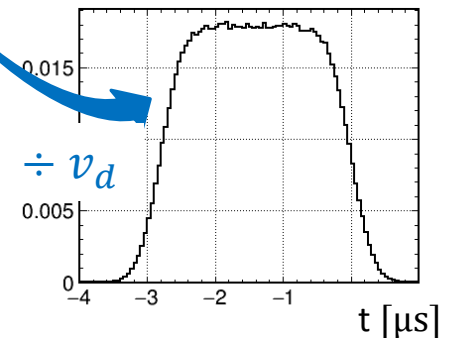
- Drift電場 : fix( $0.2 \text{ kV/cm}$ )
- Drift Time : fix( $t_d \sim 50\mu\text{s}$ )

$$\sigma_z \sim 0.24[\text{mm}] \rightarrow \sim 0.26[\mu\text{s}]$$

P.Agnes, et al, arxiv:1802.01427



電子雲の  
気相到達時間分布

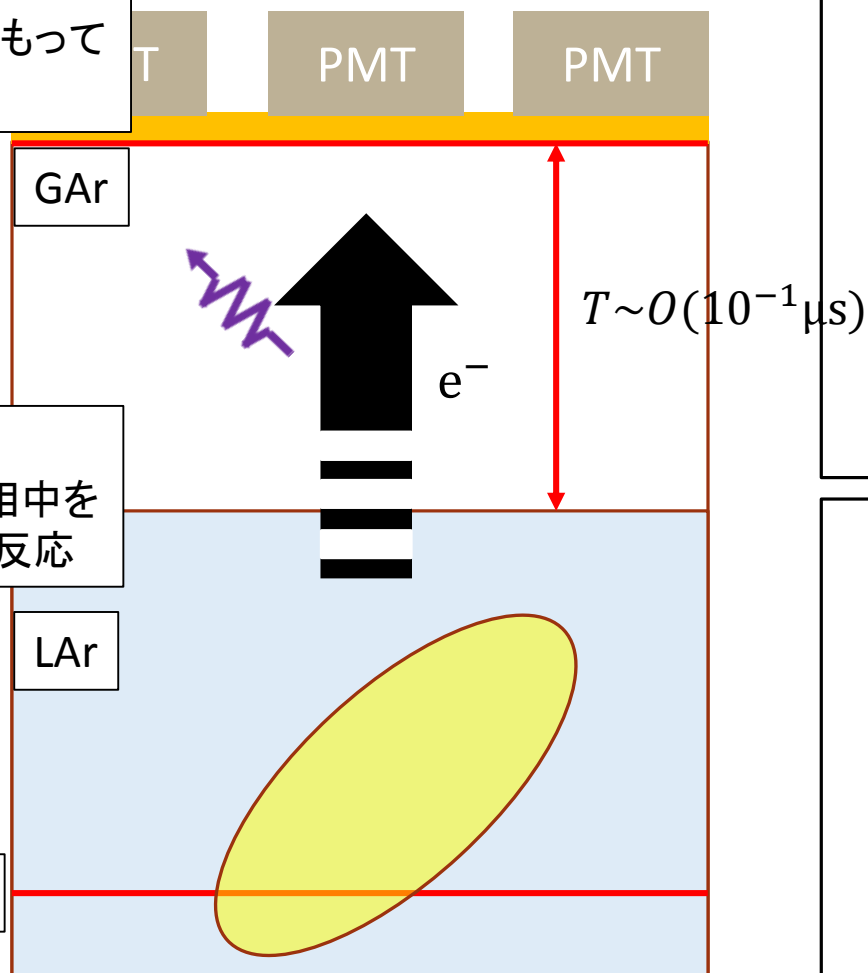


# S2発光過程@気相

## □ 気相過程

### Process 4

ある時定数をもって  
S2が発光



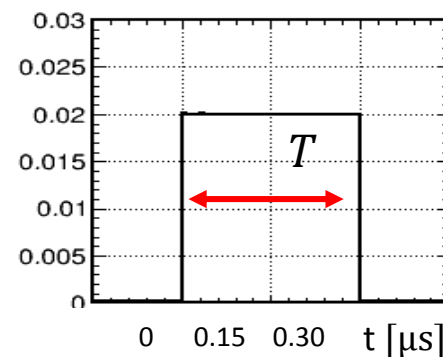
### Process 3

電子雲が気相中を  
Drift & GArと反応

### Process 3

電子雲が気相中をDriftする時間

- 液面の高さ : fix
- 取り出し電場 : fix



$T \sim O(10^{-1} \mu\text{s})$  : 一定

一方で...

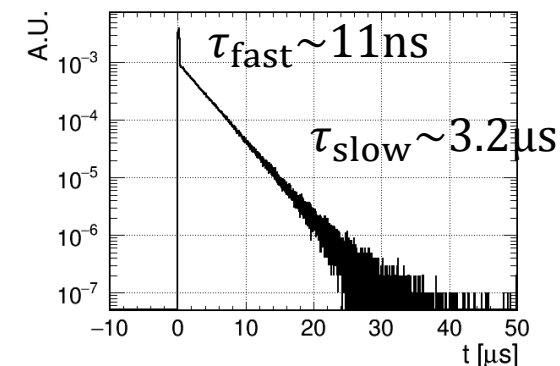
$T' \sim O(\mu\text{s})$  @ process 1

➤ process 3の影響は無視  
(process 1に含める)

### Process 4

シンチレーション光の時定数

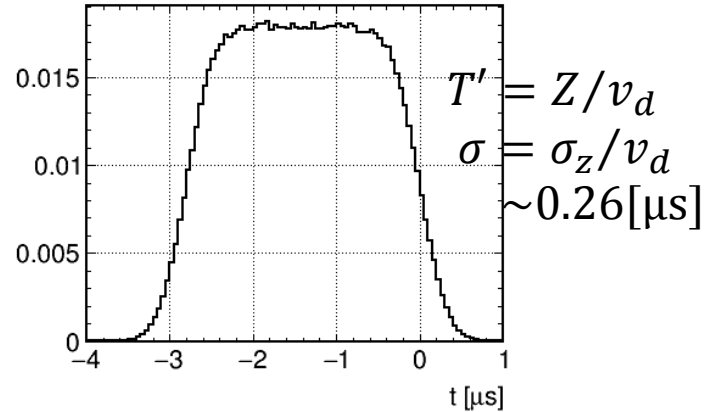
- 一定
- $\tau_{\text{fast}} \sim 11\text{ns}$
- $\tau_{\text{slow}} \sim 3.2\mu\text{s}$



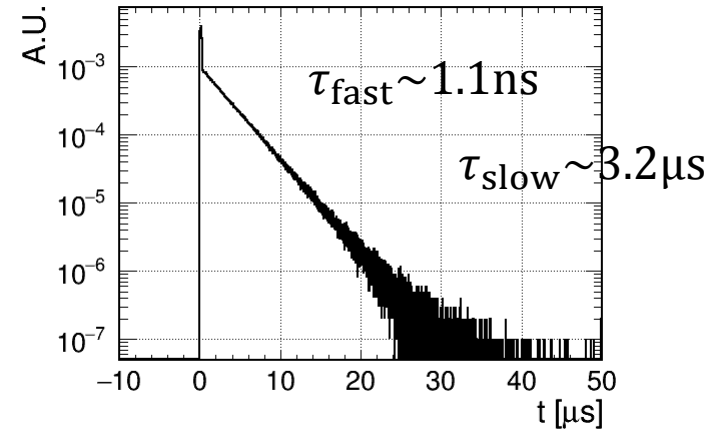


# S2波形関数

電子雲の気相到達時間分布



シンチレーション光の時間分布



$\text{Process1(+Process3)} \otimes \text{Process2}/v_d$

$\text{Process4}$

## □ S2波形関数

$$y(t; \tau_1, \tau_2, \sigma, T', A, t_0, y_0) = y_0 + A \cdot [p y'(t; \tau_1, \sigma, T') + (1-p) y'(t; \tau_2, \sigma, T')]$$

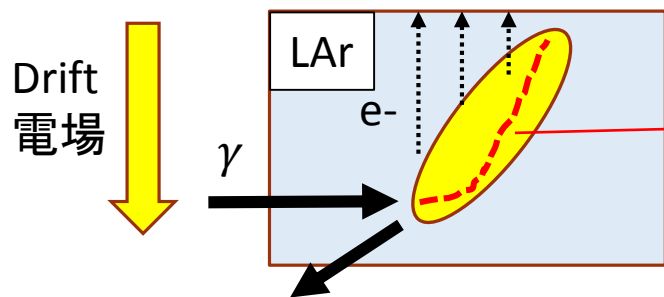
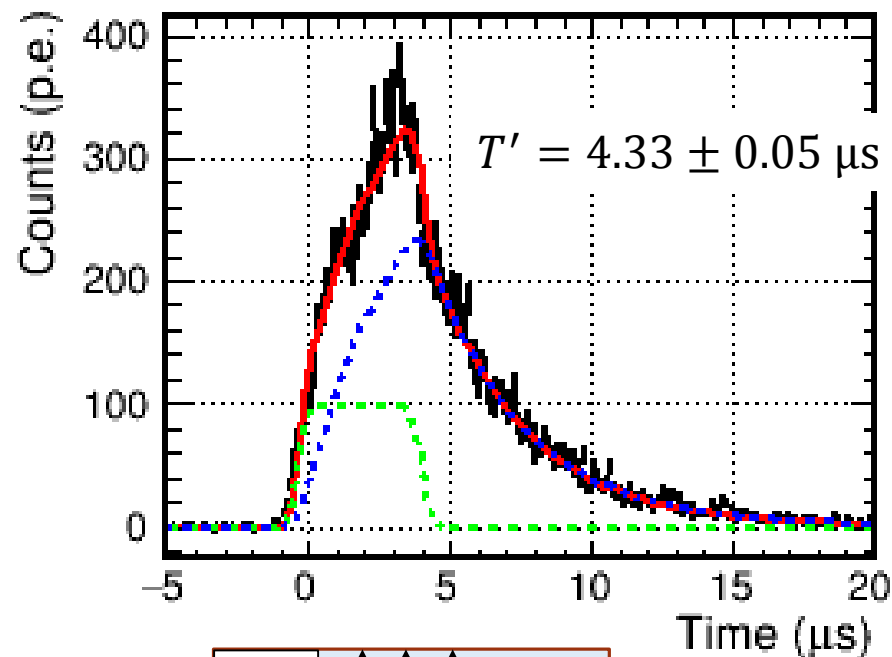
Fast成分 Slow成分

$$y'(t; \tau, \sigma, T') = \frac{1}{2T'} [y''(t; \tau, \sigma) - y''(t - T'; \tau, \sigma)]$$

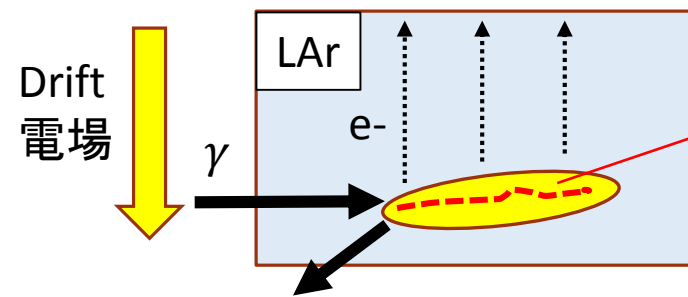
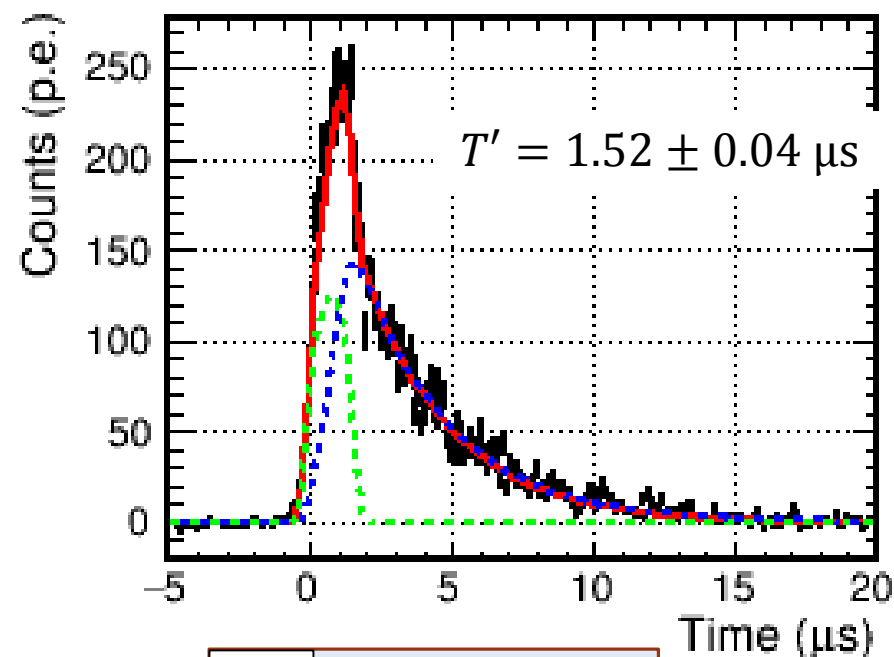
$$y''(t; \tau, \sigma) = \text{erf}\left(\frac{t}{\sqrt{2}\sigma}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau} + \frac{\sigma^2}{2\tau^2}\right) \cdot \text{erfc}\left(\frac{\sigma^2 - t\tau}{\sqrt{2}\sigma\tau}\right)$$

# S2波形fitの結果

## Fit結果



反跳粒子の軌跡が  
Drift方向に水平



反跳粒子の軌跡が  
Drift方向に垂直

高エネルギー反跳事象(@~1MeV)において...  
S2波形の違いは反跳粒子の反跳方向によるものと考えられる

# まとめ1

---

## □まとめ

- S2は検出器のfiducialisationをする上で重要な役割を果たす
- S2波形は電子雲の情報を保存
  - S2波形の理解→各事象の相互作用の詳細理解
  
- 高エネルギーER事象のS2波形fitにより  
反跳粒子の反跳方向が波形に現れていることを示した
  - 高エネルギーER事象について方向感度あることを示唆

## □今後の展望

- S2波形fitのより定量的な評価
  
- 低エネルギーER事象を使ったLArの拡散定数測定(→Drift方向の位置再構成)  
例) DarkSide-50  
140keVのER事象(rms $\sim$ 0(30 $\mu$ m))を使って、LArの拡散定数の算出

# 低取り出し電場下での S2発光機構

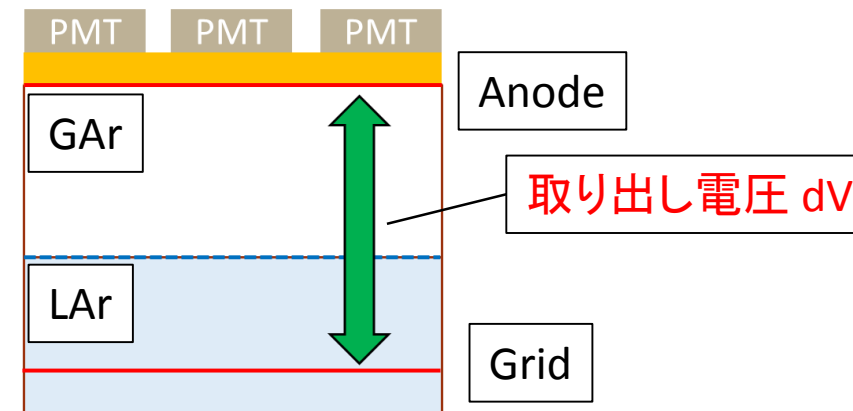
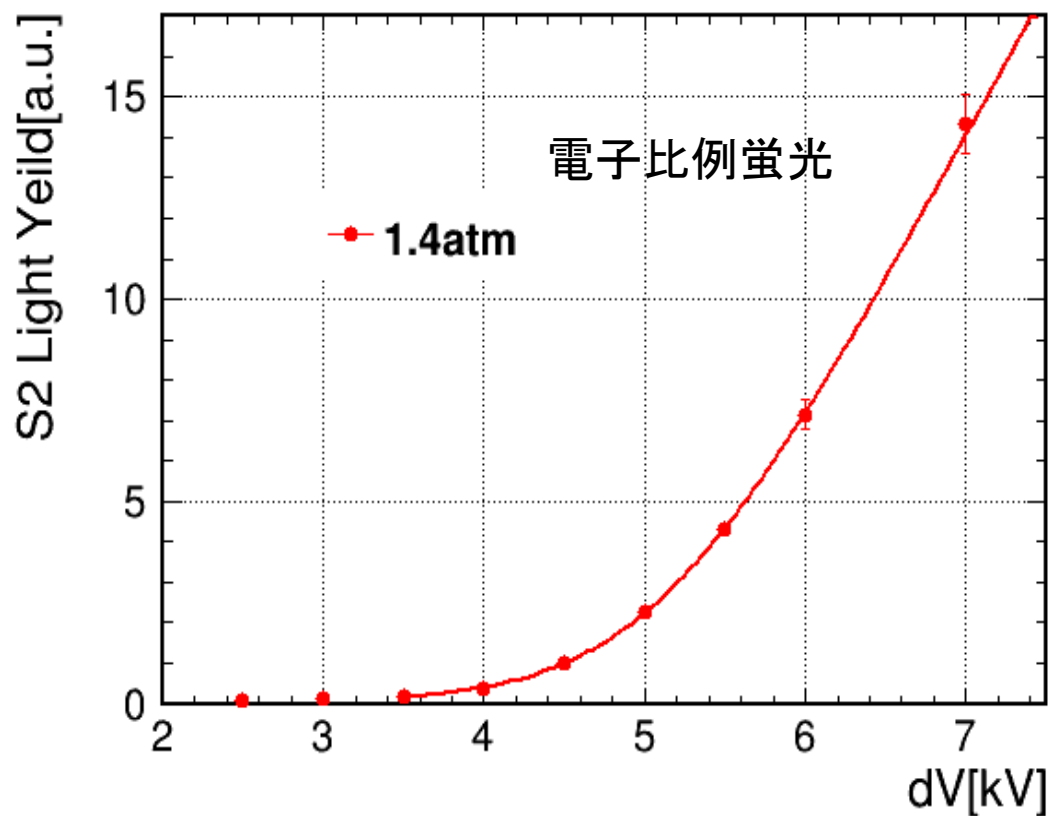
---

# S2光量の取り出し電場依存性

取り出し電圧(Anode-Grid間電圧)を変えてデータを取得

## □ S2光量の取り出し電場

S2 vs Extraction Voltage (scaled@4.5kV, 1.4atm)



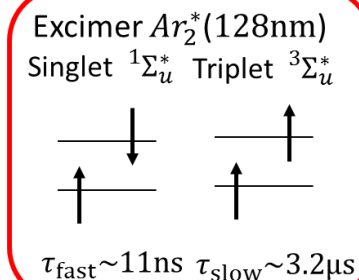
電子比例蛍光

Ar二量体の脱励起による発光(128nm)

取り出し電場に対して光量が**線形**に変化

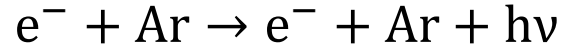
しかし、  
低電場領域でもS2は発光している

➤ 異なる発光成分が見えている可能性がある



# 低取り出し電場下でのS2

## □ Neutral Bremsstrahlung(NBrS)

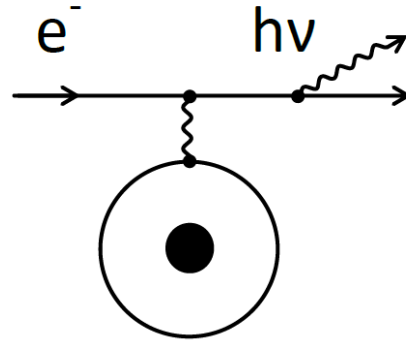


低速電子(~10eV)が中性原子に(非)弾性散乱されるときに放出

1970年にXeのEL発光機構として提唱

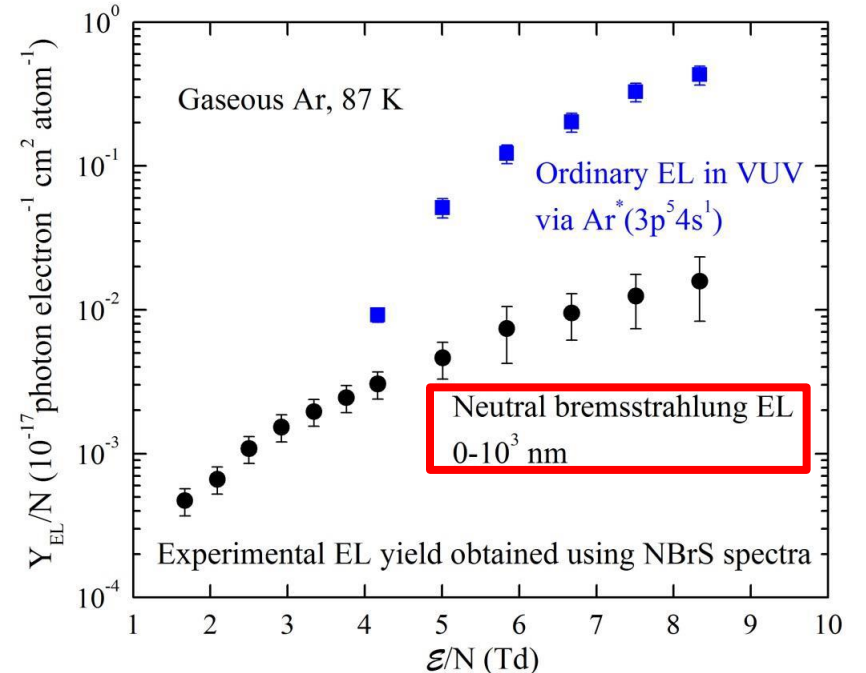
制動放射としての特徴を持つ

- 発光時定数がない
- 光子の放出方向に偏り
- 連続波長スペクトル UV~NIR



XeSAT 2018 slide

E. Shemyakina



電子比例蛍光

Threshold :  $\epsilon/N \sim 4.0 \text{ Td}$  (Arの励起)

(A. Buzulutskov et al., *Astropart. Phys.*, 103, (2018), 29-40.)

S2取り出し電場依存性から検証

- S2波形
- S2光量のTop Bottomの偏り
- S2光量のTop Channelの偏り

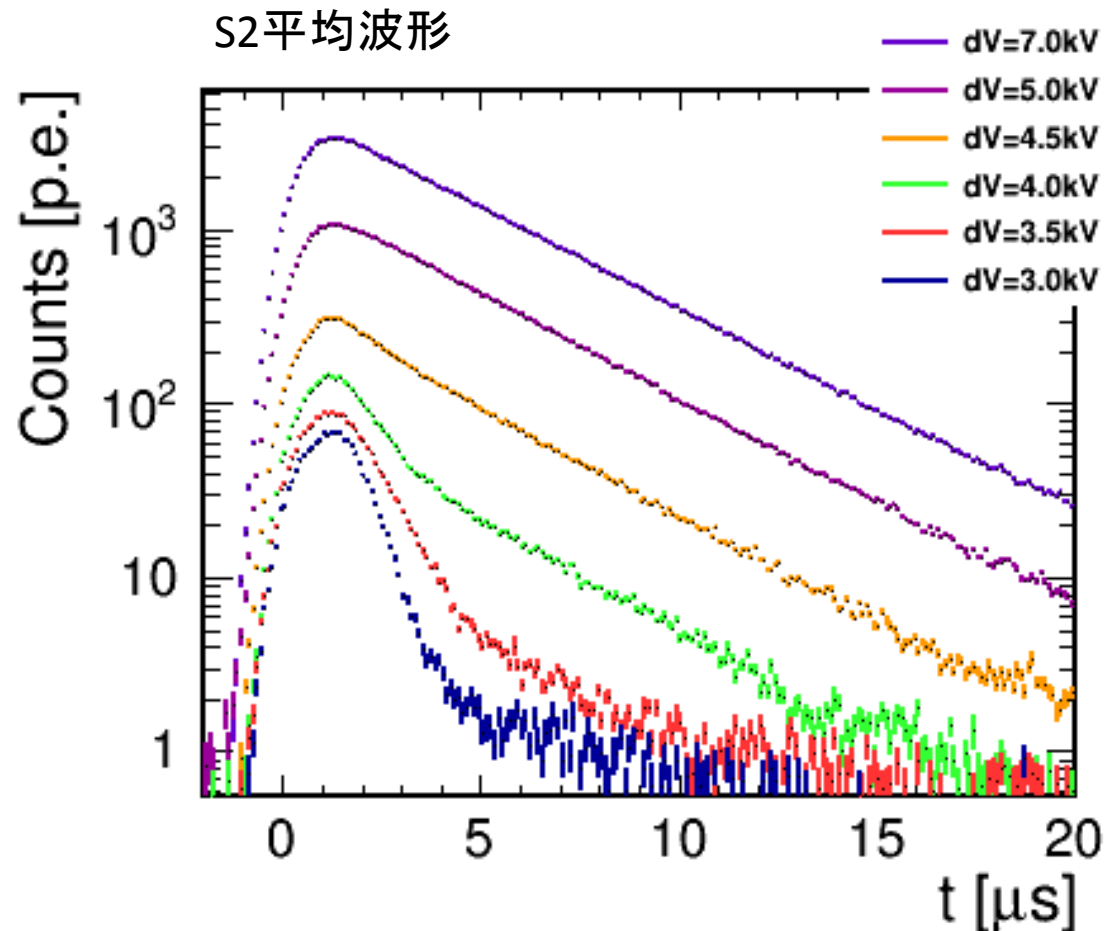
$\epsilon/N$  : 換算電界

$\text{Td} = 10^{-17} \text{ V/cm}^2$

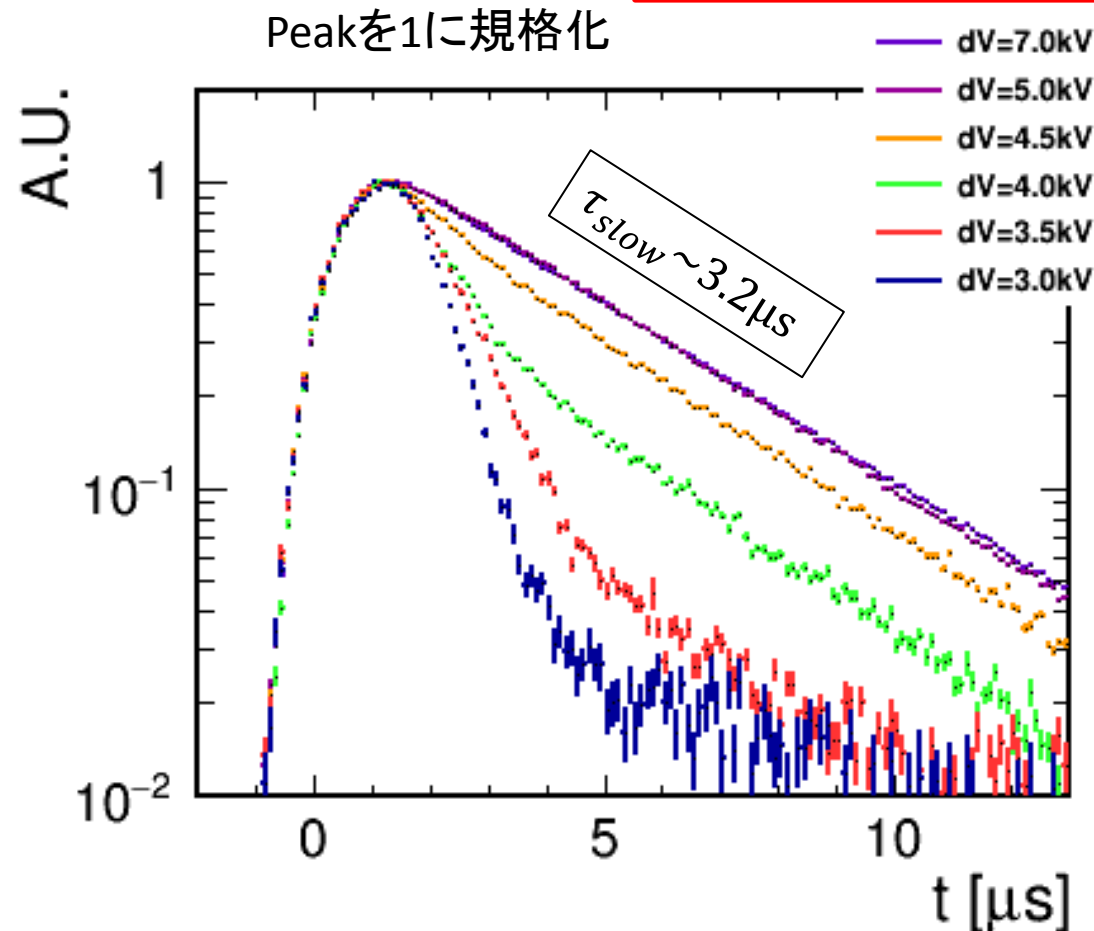
# S2波形の取り出し電場依存性

圧力 : 1.4atm

$\epsilon/N = 4.0\text{Td} \rightarrow dV \sim 3.5\text{kV}$



低電場になるほど、Slow成分の割合が小さくなっている



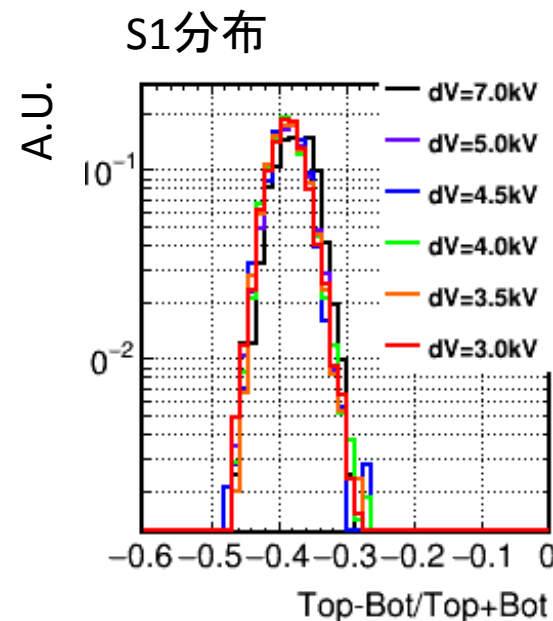
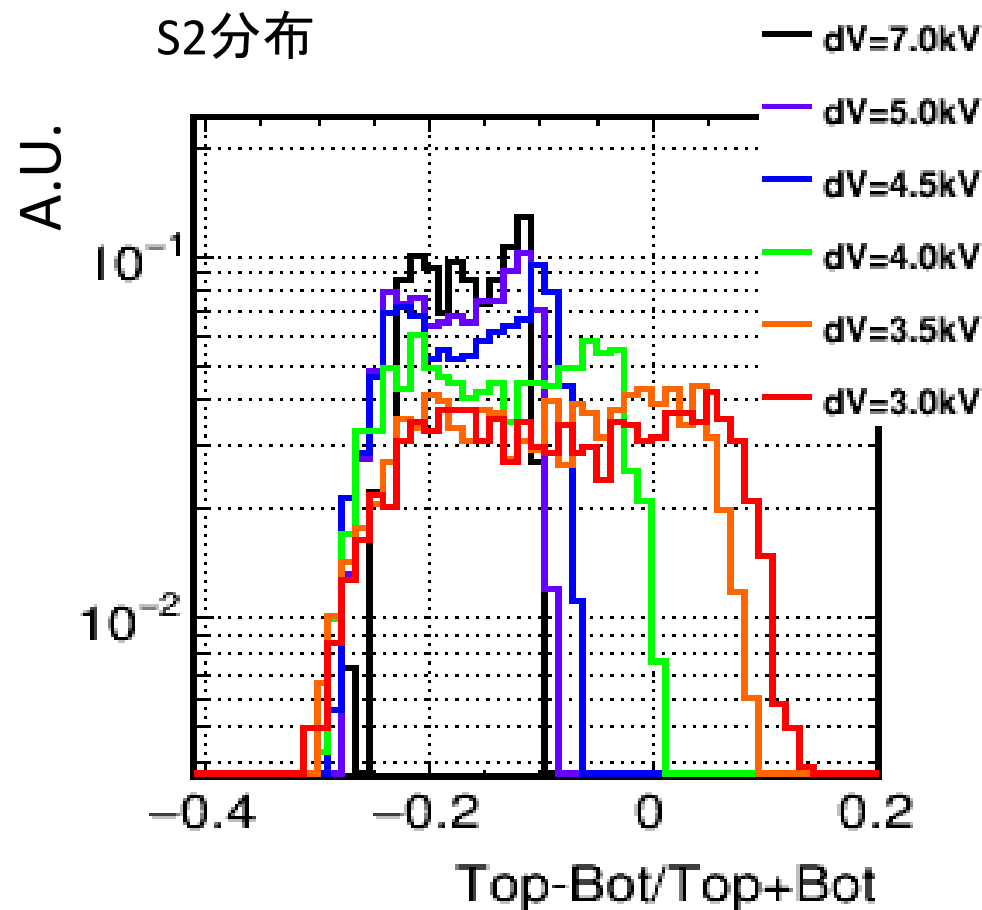
低電場領域

発光時定数が短いorない

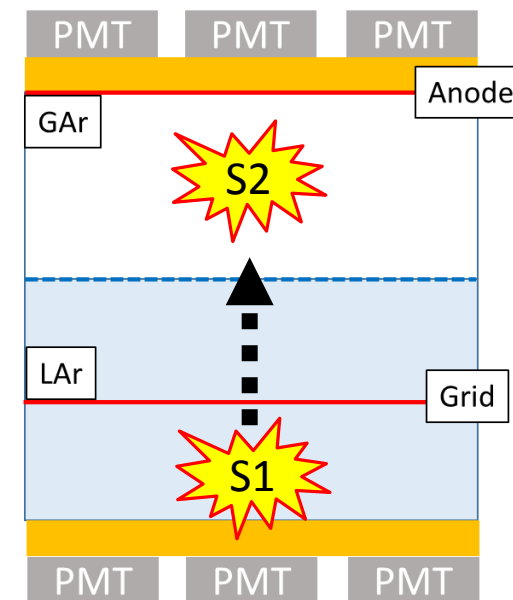
# S2光量のTop Bottom Asymmetry

## Top Bottom Asymmetry

$$(LY_{Top} - LY_{Bottom}) / (LY_{Top} + LY_{Bottom})$$



Top



Ar二量体による発光 (S1、電子比例蛍光)

- 等方的に発光
- 電場に依存しない

低電場 (4.5kV以下)

Topに光量が集中 → 光子放出方向に偏りがある



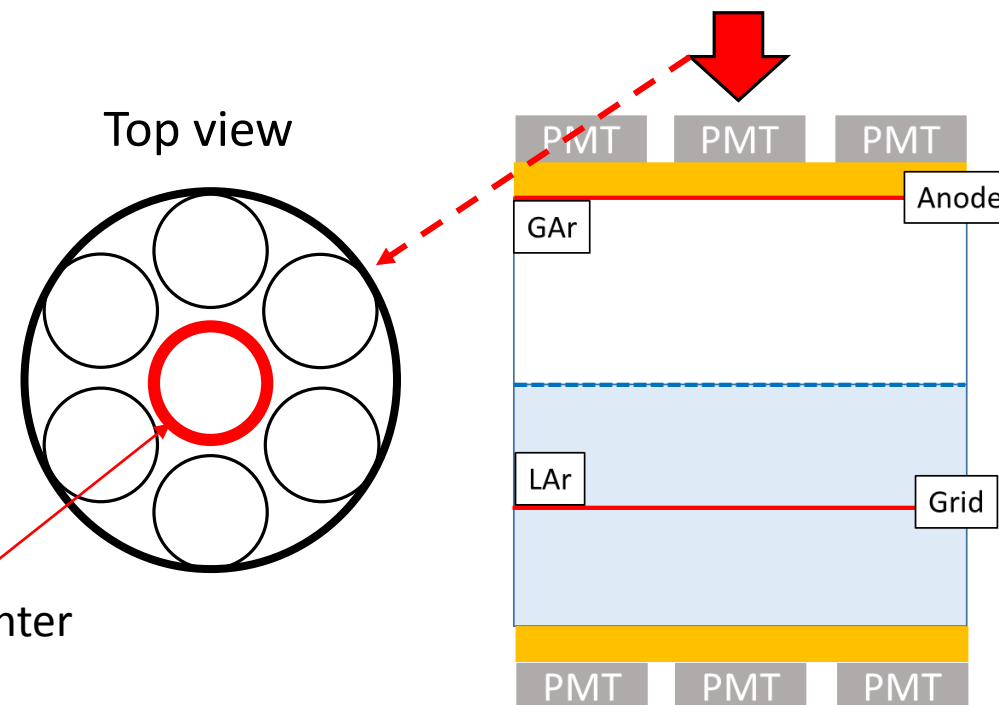
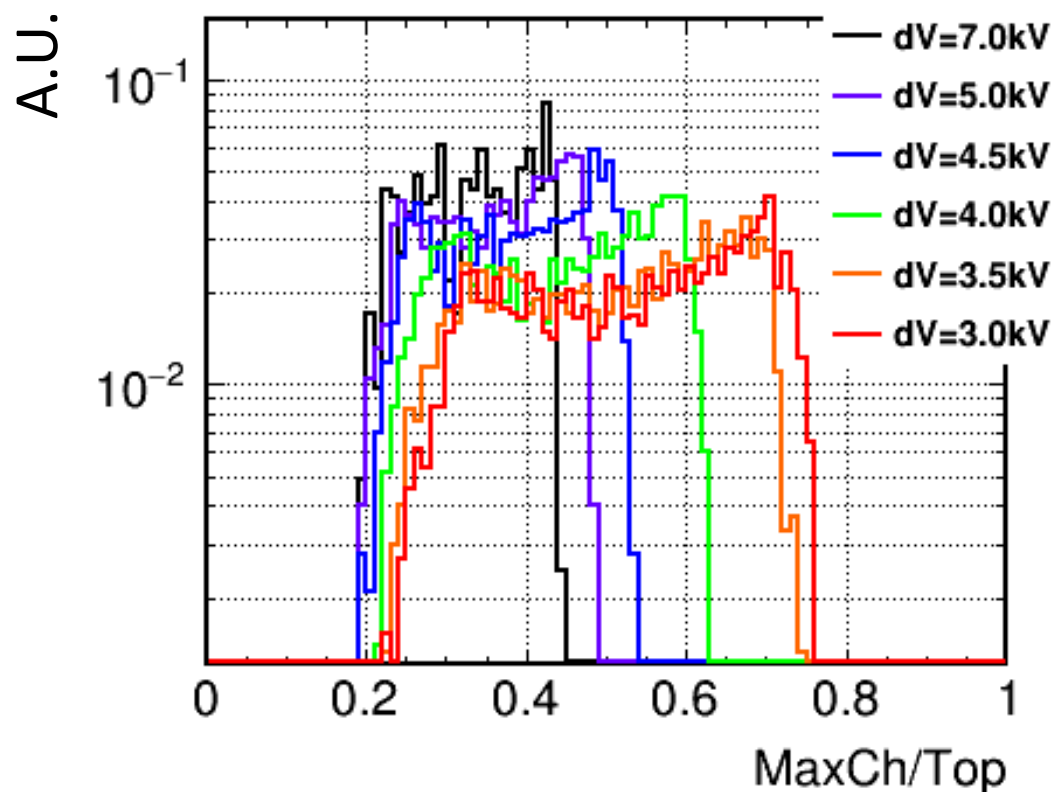
# S2光量のTop Channel Ratio

## Top Channel Ratio

$$LY_{Top\_center} / LY_{Top}$$

Top PMTの真ん中のchannelのS2光量が大いeventを選択

### S2分布



低電場になるほど  
Top centerに光量が集中→コーン上に光子が放出

低電場領域でのS2発光→NBrSであることを示唆

## □ まとめ

- 低取り出し電場下において電子比例蛍光とは異なる発光成分が存在する可能性
  - Neutral Bremsstrahlung(NBrS)
- S2波形、S2 Top Bottom Asymmetry、S2 Top Channel Ratioから低取り出し電場下でNBrS成分が存在することを示唆

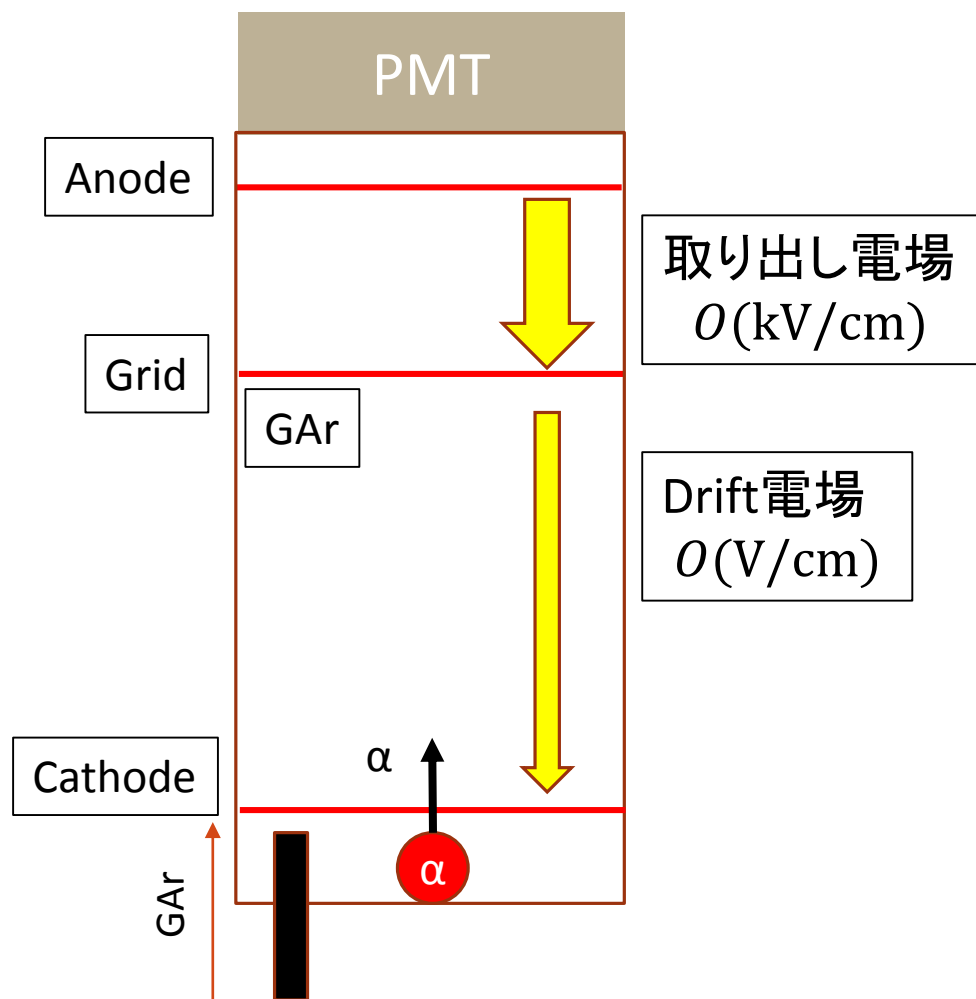
## □ 今後の展望

- S2詳細Study
  - ✓ 波長スペクトル測定
  - ✓ 放出角度分解能測定
- 現在、GAr setupでのS2 studyを進行中

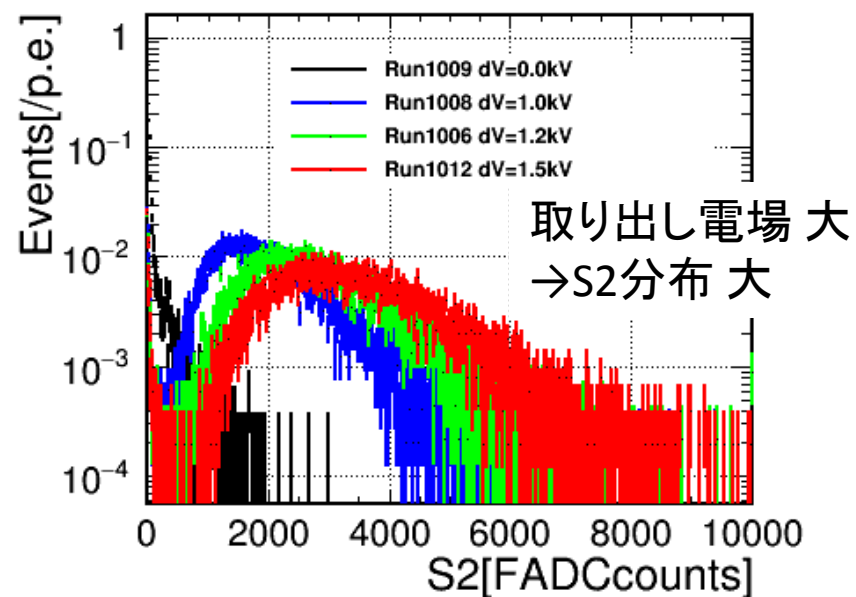
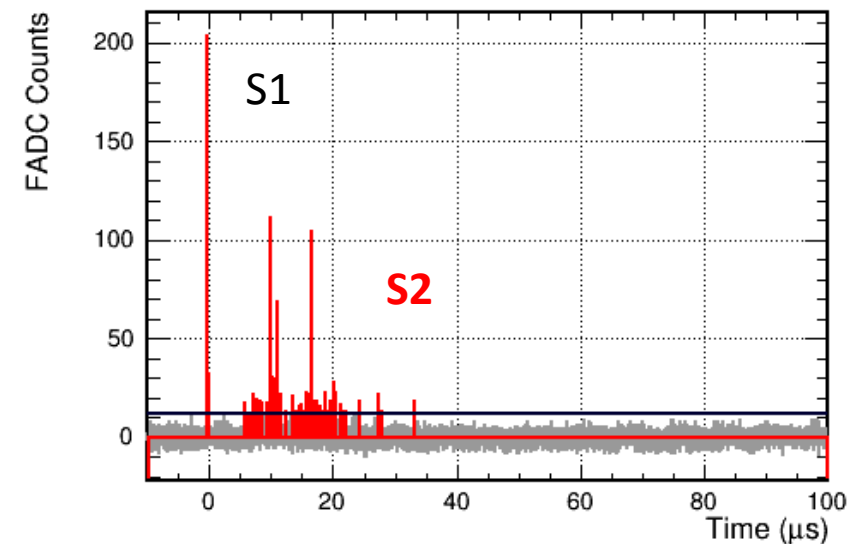
# S2 Gas Setup

GArを使ったS2 Study

小型検出器で2相式検出器を**疑似的に再現**



EventHist\_CH16



S2信号を確認  
→S2詳細Studyへ

# Back up

---

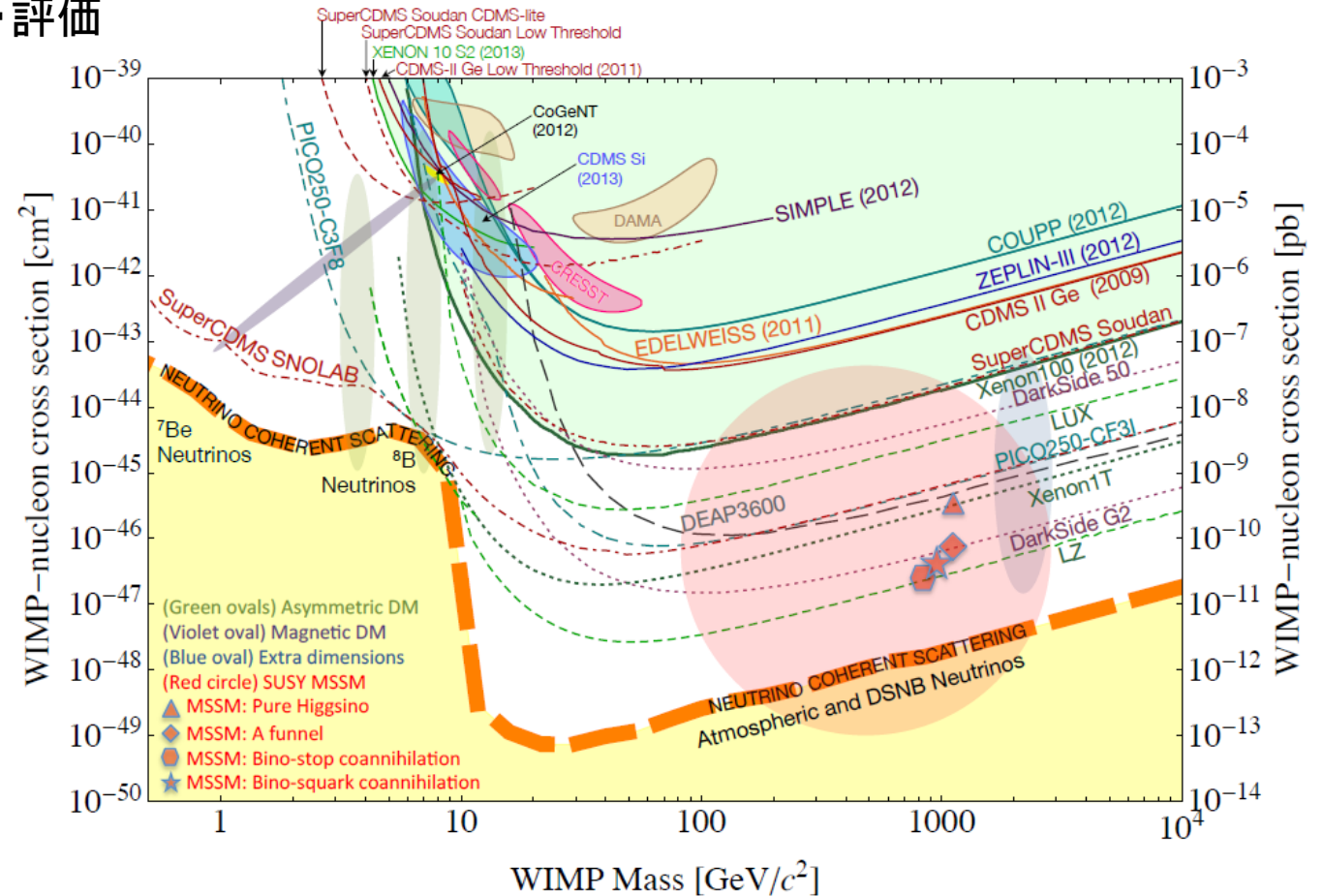
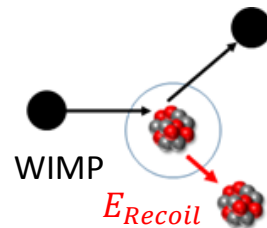
# 暗黒物質直接探索実験

世界中で暗黒物質直接探索実験が行われている  
→稀事象探索であるため高感度, 背景事象の低減・評価

WIMP直接探索→target原子核との**弾性散乱**

target原子核の $E_{Recoil}$ を検出(光, 電離, 熱)

- NaI(DAMA) : 光
- Ge(CoGeNT) : 電離
- CxFy(COUPP) : 熱
- Xe(Xenon) : 光+電離



WIMP直接探索実験の世界情勢(2013年時点)

# アルゴン(Ar)

## Arと他の希ガスの比較

	He	Ne	Ar	Kr	Xe
原子量	4	20	40	84	131
蛍光波長(nm)	80	78	128	150	175
大気中の割合(%)	$5 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-3}$	0.93	$1 \times 10^{-4}$	$9 \times 10^{-6}$

# S2波形fit

$$y(t; \tau_1, \tau_2, \sigma, T', A, t_0, y_0) \\ = y_0 + A \cdot [p y'(t; \tau_1, \sigma, T') + (1 - p) y'(t; \tau_2, \sigma, T')]$$

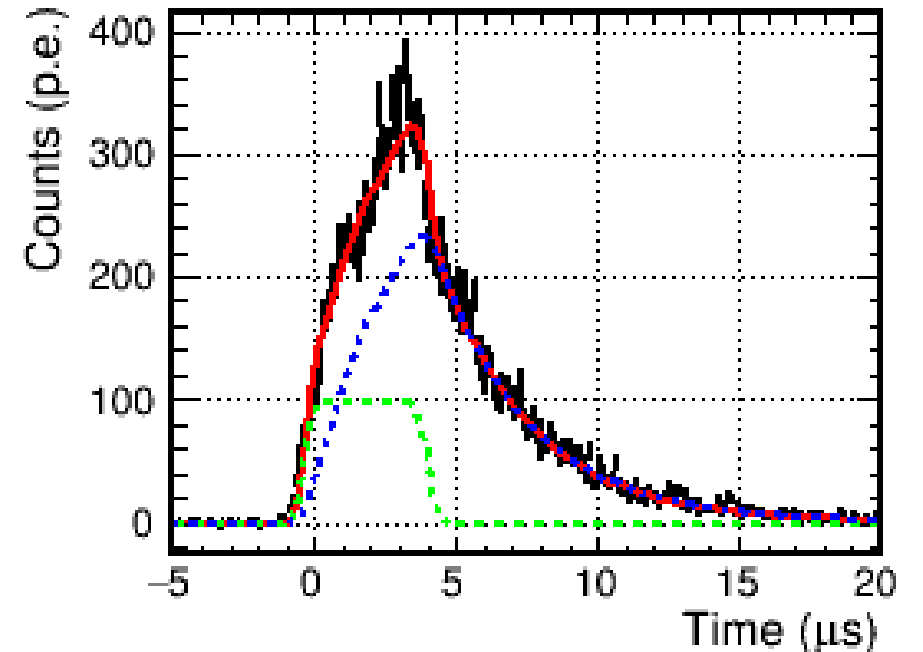
$$y'(t; \tau, \sigma, T') = \frac{1}{2T'} [y''(t; \tau, \sigma) - y''(t - T'; \tau, \sigma)]$$

$$y''(t; \tau, \sigma) = \operatorname{erf}\left(\frac{t}{\sqrt{2}\sigma}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau} + \frac{\sigma^2}{2\tau^2}\right) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{\sigma^2 - t\tau}{\sqrt{2}\sigma\tau}\right)$$

$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$  : 誤差関数

$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x)$  : 相補誤差関数

parameter	name	Fit status
$\tau_1$	Fast成分	0.011 $\mu$ s(fix)
$\tau_2$	Slow成分	free
$\sigma$	Electron cloud diffusion	0.26 $\mu$ s(fix)
$T'$	電子雲のDrift方向の初期サイズ	free
$p$	Fast/(Fast+Slow)	0.23(fix)
$A$	波高	Light yield(fix)
$t_0$	S2の立ち上がり時間	free
$y_0$	Baseline offset	free



# LArの拡散定数

$$\sigma_L^2 = 2D_L t_d + \sigma_0^2$$

$\sigma_L$ [mm]: drift方向の電子分布

$D_L$ [ $mm^2 \mu s$ ]: LArの拡散係数

$t_d$ [ $\mu s$ ]: LAr中の電子のdrift時間

$\sigma_0$ [mm]: 初期電子空間分布(電場方向)のRMS

ここで、DSのGean4(G4DS)によるシミュレーション結果より、

$\sigma_0 \sim 30$ [ $\mu s$ ]

論文によると、 $\sigma_L^2 \sim 0.06$ [ $mm^2$ ] @  $t_d = 50$ [ $\mu s$ ]

よって、

$$2D_L t_d \sim 0.06$$

drift方向の電子分布:  $\sigma_L$  (論文中のplotからの読み取り)

$$\sigma_L^2 = (0.06 \pm 0.02) mm^2 @ t_d = 50 \mu s$$

電子のdrift速度:  $v_d$  (論文より)

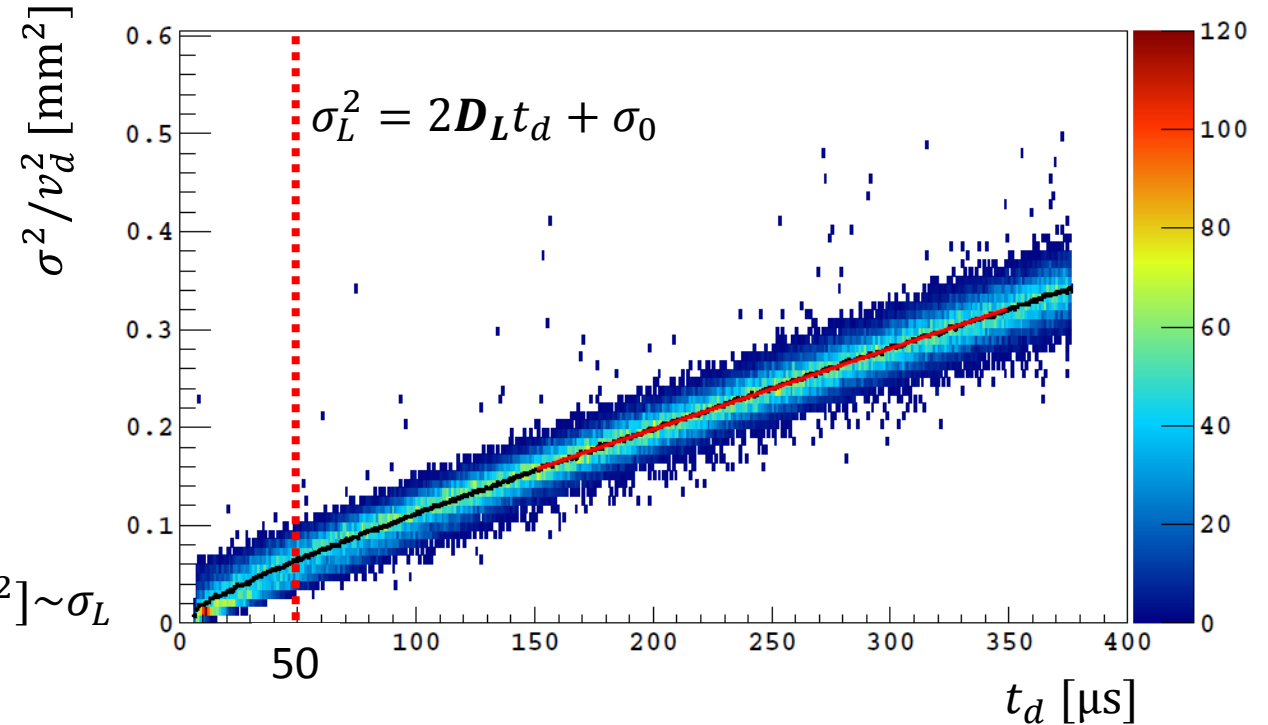
$$v_d = (0.930 \pm 0.007) mm/\mu s @ 200V/cm$$

電子のdrift時間:  $t_d$  (ANKOKでのCo60のコリメート位置より算出)

$$t_d \sim 50 \mu s, t_d = z/v_d, z = 47 mm, v_d = 0.90 mm/\mu s$$

$$\sigma = \sigma_L/v_d = (0.26 \pm 0.04) \mu s$$

P.Agnes, et al, arxiv:1802.01427





# GAr中の電子Drift速度

$$N = \frac{1}{k_B T_{gas}} p = 7.243 \times 10^{22} \frac{p}{T_{gas}}$$

Arを理想気体と仮定すると

$p=1.4[\text{atm}]$ 、 $T_{gas}=90[\text{K}]$ のとき  
 $N = 1.1 \times 10^{26}[\text{m}^{-3}]$

また、 $dV = 4.5\text{kV} \rightarrow E_{Gas} = 5.4\text{kV/cm}(z = 0.1\text{mm})$

$E/N=4.9\text{e-}21[\text{V m}^2]=4.9[\text{Td}]$

上の左下のplotから

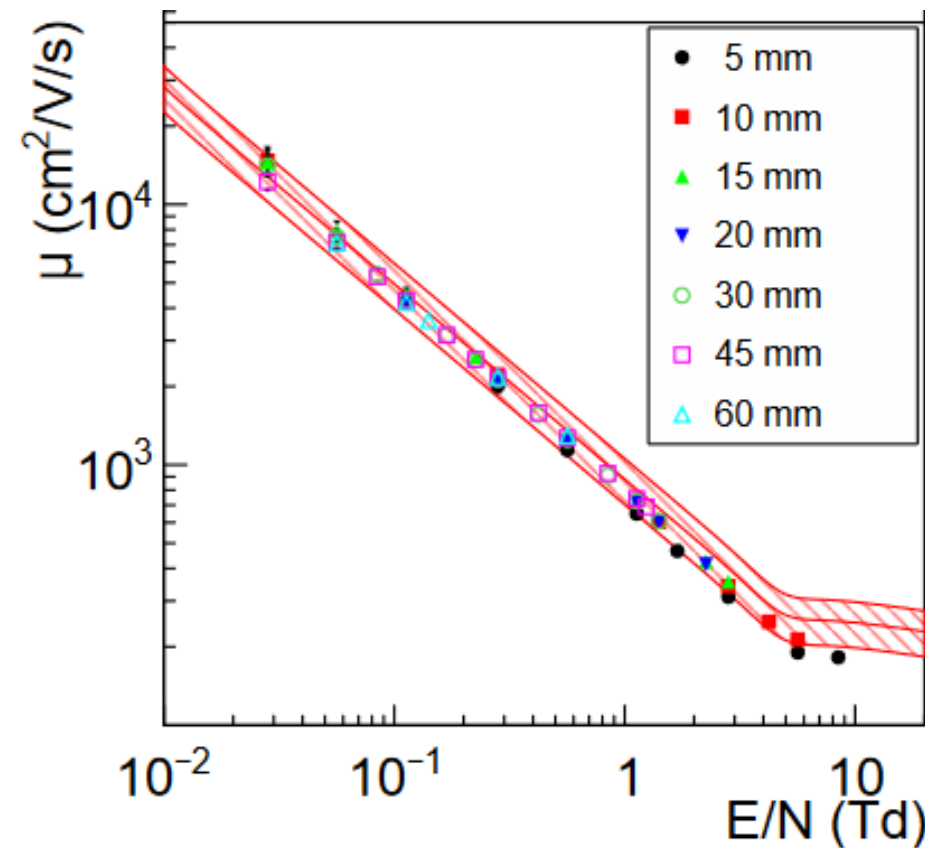
$\mu=(2\sim3)\text{e}+2[\text{cm}^2/\text{V/s}]$

$\mathbf{v}=\mu E=(1.1\sim1.6)\text{e}+6[\text{cm/s}]=\mathbf{1.1\sim1.6}[\text{cm}/\mu\text{s}]$

$d=0.5[\text{cm}]$ より、

$\mathbf{T=d/v=0.31\sim0.45}[\mu\text{s}]$

GArの移動度： $\mu(\text{cm}^2/\text{V}/\text{s})$



# S2波形fitによるLArの拡散定数の算出

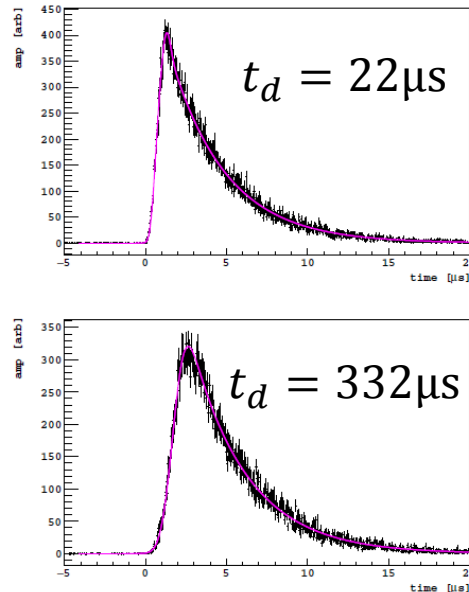
P.Agnes, et al, arxiv:1802.01427

$$y_{\text{fit}}(t; \tau_1, \tau_2, p, T, \sigma, A, t_0, y_0) = y_0 + A \cdot y(t - t_0; \tau_1, \tau_2, p, T, \sigma)$$

$$y'(t; \tau, T, \sigma) = \frac{1}{2T} (y''(t; \tau, \sigma) - y''(t - T; \tau, \sigma))$$

$$y''(t; \tau, \sigma) = \text{erf}\left(\frac{t}{\sqrt{2}\sigma}\right) - e^{-t/\tau} e^{\sigma^2/2\tau^2} \text{erfc}\left(\frac{\sigma^2 - t\tau}{\sqrt{2}\sigma\tau}\right)$$

$E \sim 140 \text{keV} (^{39}\text{Ar})$



$$\sigma_L^2 = 2D_L t_d + \sigma_0$$

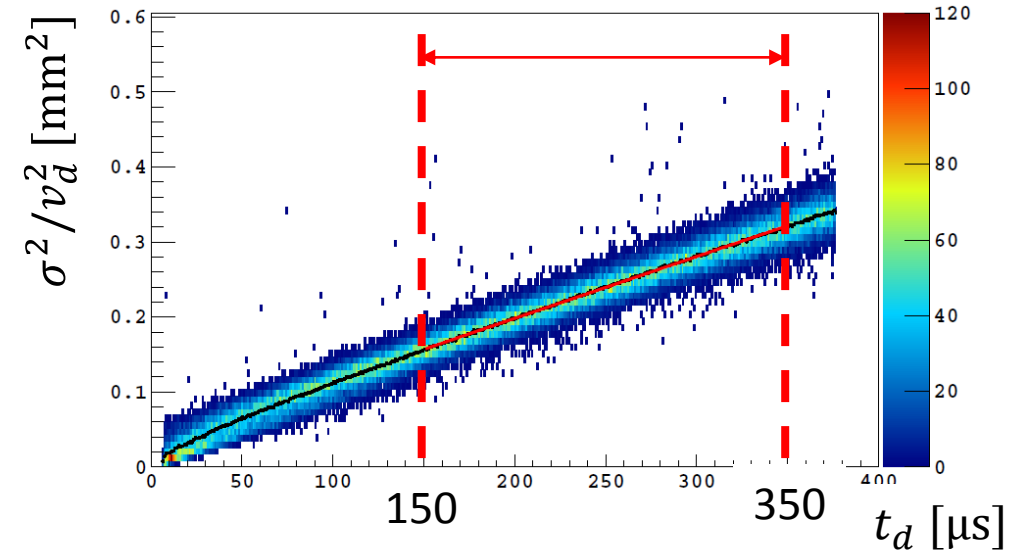


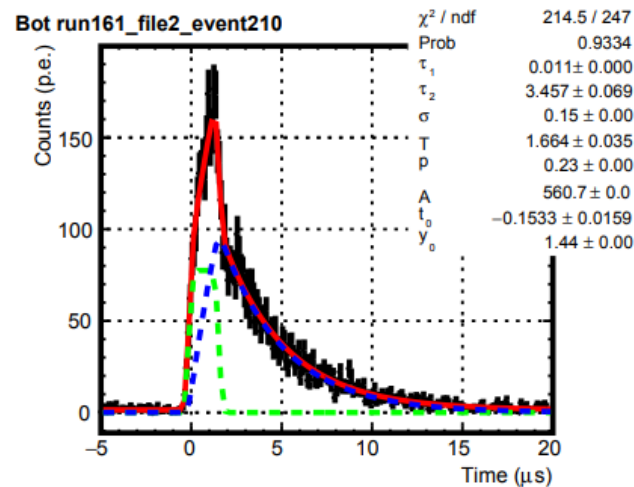
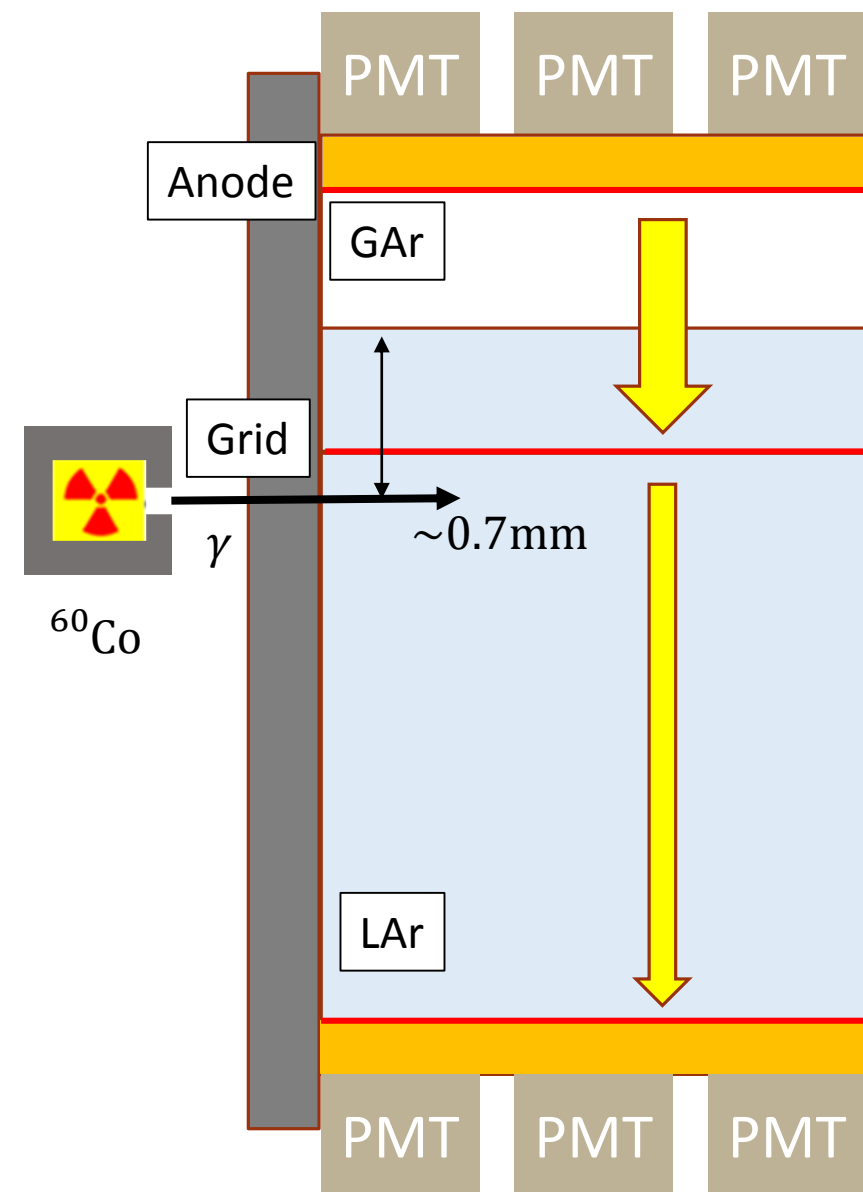
TABLE IV: A summary of the diffusion constant values  $D_L$  measured from different data sets and different extraction fields.

Drift [V/cm]	Extr. [kV/cm]	R [cm]	S2 [ $10^3$ PE]	$D_L$ [ $\text{cm}^2/\text{s}$ ]	$\sigma_0^2$ [ $\times 10^{-2} \text{mm}^2$ ]
200	2.8	[0, 3]	[40, 50]	$4.09 \pm 0.05$	$2.94 \pm 0.10$
200	2.8	[3, 6]	[40, 50]	$4.10 \pm 0.04$	$2.98 \pm 0.07$
200	2.8	[6, 9]	[40, 50]	$4.10 \pm 0.04$	$3.07 \pm 0.06$
200	2.8	[9, 12]	[40, 50]	$4.12 \pm 0.04$	$3.34 \pm 0.06$
200	2.8	[12, 15]	[40, 50]	$4.19 \pm 0.04$	$3.45 \pm 0.06$
200	2.8	[9, 12]	[30, 40]	$4.09 \pm 0.04$	$3.00 \pm 0.05$
200	2.8	[9, 12]	[20, 30]	$4.00 \pm 0.04$	$2.81 \pm 0.05$
200	2.8	[9, 12]	[10, 20]	$3.92 \pm 0.04$	$2.37 \pm 0.05$
200	2.3	[0, 15]	[10, 50]	$4.16 \pm 0.04$	$3.76 \pm 0.07$

TABLE V: Diffusion constant  $D_L$  measured under different drift fields.

Drift [V/cm]	Extr. [kV/cm]	R [cm]	S2 [ $10^3$ PE]	$D_L$ [ $\text{cm}^2/\text{s}$ ]	$\sigma_0^2$ [ $\times 10^{-2} \text{mm}^2$ ]
100	2.8	[0, 15]	[10, 50]	$4.35 \pm 0.05$	$2.67 \pm 0.09$
150	2.8	[0, 15]	[10, 50]	$4.21 \pm 0.04$	$2.99 \pm 0.05$
200	2.8	[0, 15]	[10, 50]	$4.05 \pm 0.04$	$2.76 \pm 0.04$

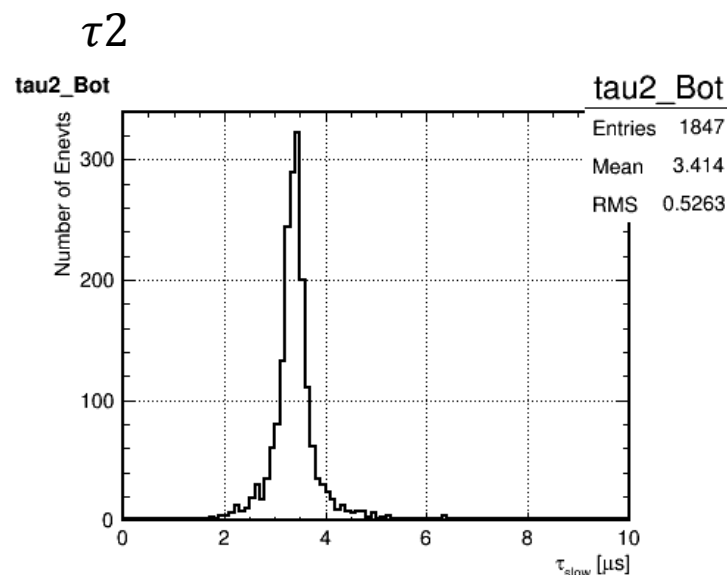
# S2 pulse shape fit (preliminary)



$$y(t; \tau_1, \tau_2, \sigma, T, A, t_0, y_0) = y_0 + A \cdot [p y'(t; \tau_1, \sigma, T) + (1 - p) y'(t; \tau_2, \sigma, T)]$$

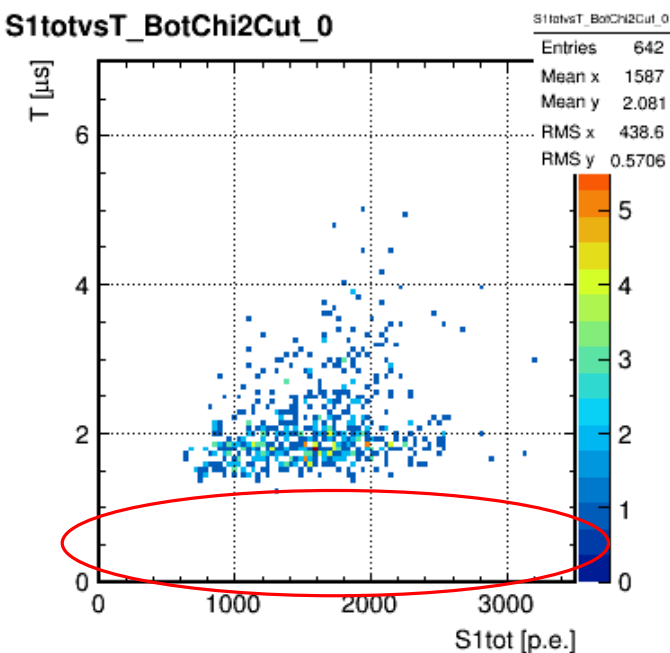
$$\sigma = 0.15 [\mu\text{s}]$$

$$T, \tau_2, t_0, y_0: \text{free}$$



T vs S1tot

S1totvsT\_BotChi2Cut\_0



# 換算電界

## 気相の取り出し電場

$$E_{gas}(z) = \frac{\phi_G - \phi(z)}{D/2 - z}, \quad \phi(z) = \frac{(D + 2z)\epsilon_G\phi_G + (D - 2z)\epsilon_L\phi_L}{(D + 2z)\epsilon_G + (D - 2z)\epsilon_L}$$

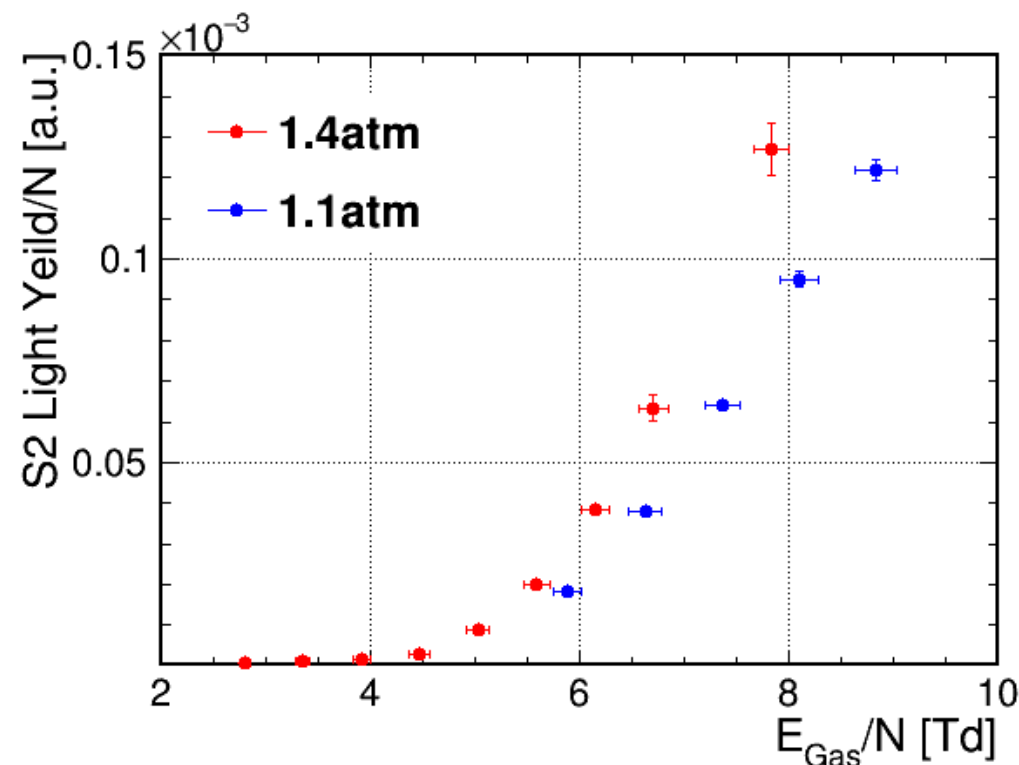
$$pV = nRT \rightarrow N = p/k_B T$$

$$\epsilon/N = E_{Gas}[kV/cm]/N [cm^{-3}]$$

$$= E_{Gas}/p * k_B T$$

$$p = 1.4atm, z = 0.10mm, T = 91K$$

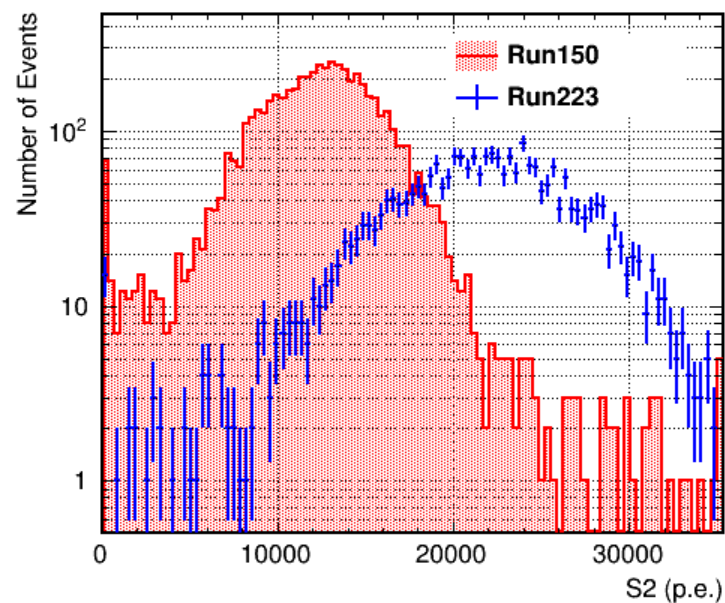
$$p = 1.1atm, z = 0.25mm, T = 88K$$



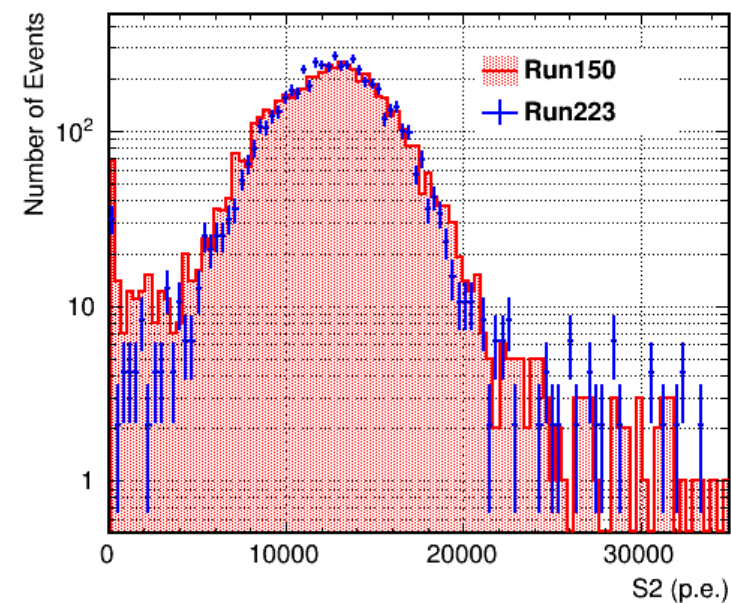
# S2光量の評価

- S2光量は光量分布の形に注目
- 光量分布が基準の分布に合うようにscale
- scale値の逆数をS2光量と定義

S2 Ex) 1.1atm,4.0kV



S2



## 実験セットアップ

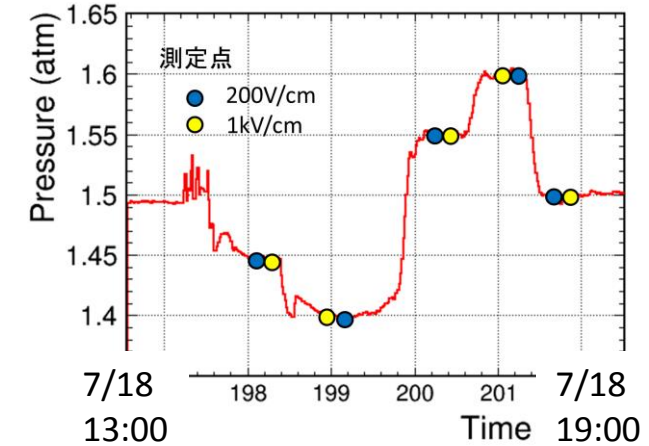
- $\gamma$ 線源( $^{60}\text{Co}$ )を液面よりも下に固定
- コリメートした $\gamma$ 線を検出器内に照射 (Drift電場:0.2kV/cm)

圧力、取り出し電場の測定点

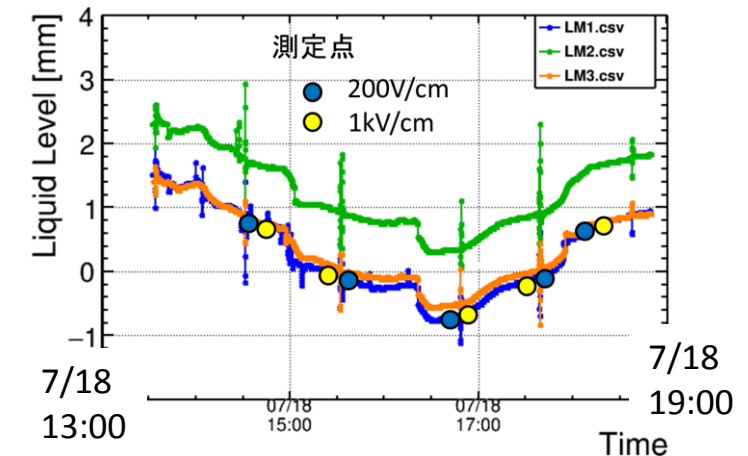
圧力 (atm)	Anode-Offset間電圧(kV)					
	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	7.0
1.10	○	○	○	○	○	
1.40	○	○	○	○	○	○
1.45		○				
1.50		○				
1.55		○				
1.60		○				

圧力と液面の高さが同時に変化

圧力



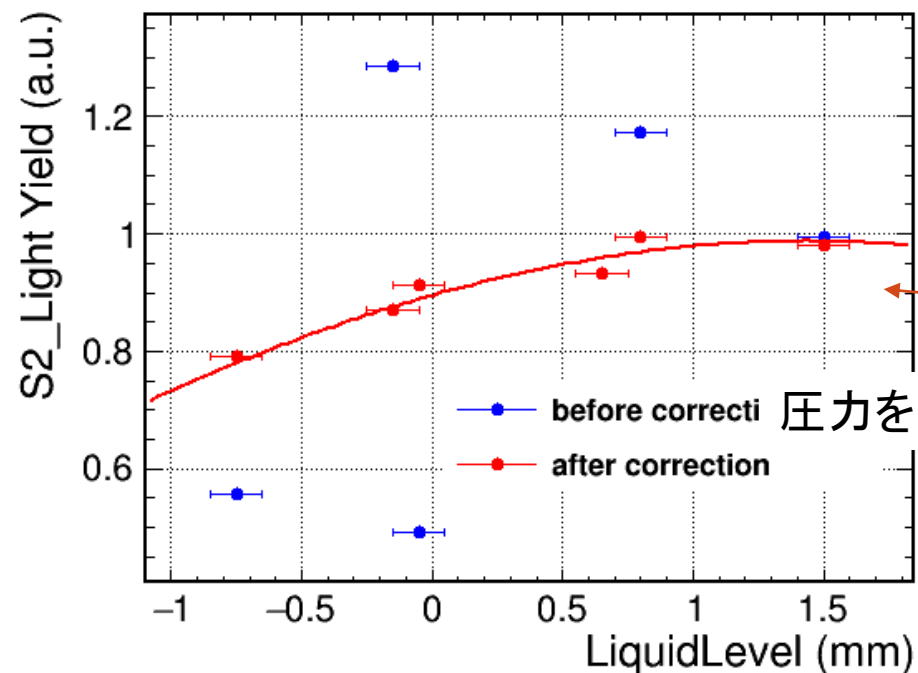
液面の高さ



# S2光量の補正

## 液面の高さ依存性

S2\_LY vs LiquidLevel



電子比例蛍光モデル

S2光量:  $LY = LY(p, z_l, E(z_l))$

## 補正方法

S2光量vs圧力vs液面の高さの3Dplotに対して  
S2光量関数をfit

S2光量関数

$$LY = (AE(z_l + z_{l0}) + Bp)(D/2 - (z_l + z_{l0}))$$

free parameter:  $A, B, z_{l0}$

以下、液面・圧力・電場依存性を見ていくが  
他2つのparameterは変化なしor一定になるよう補正

# S2光量の補正

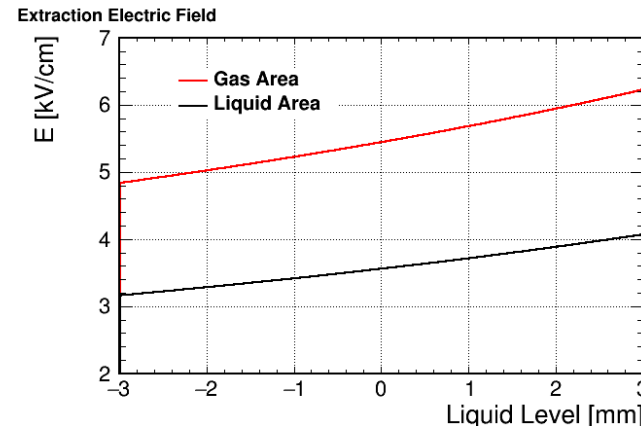
S2光量の各種環境依存性を見るため、  
圧力、液面の高さを変数に持つ関数で補正を行う

## 電子比例蛍光モデル

S2光量:  $LY = LY(p, z_l, E(z_l))$

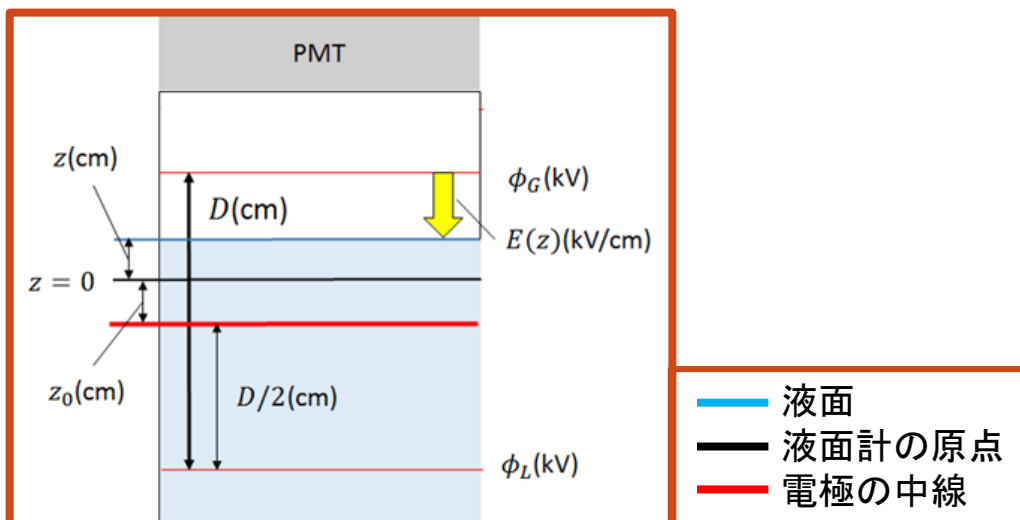
$$LY = (AE(z_l + z_{l0}) + Bp)(D/2 - (z_l + z_{l0}))$$

free parameter:  $A, B, z_{l0}$



## 補正方法

1. S2光量の関数を3Dplot(S2光量vs圧力vs液面)にfitし free parameterを決定
2. S2光量の関数を用いて各点における補正係数を決定
3. 補正係数を各点にかける



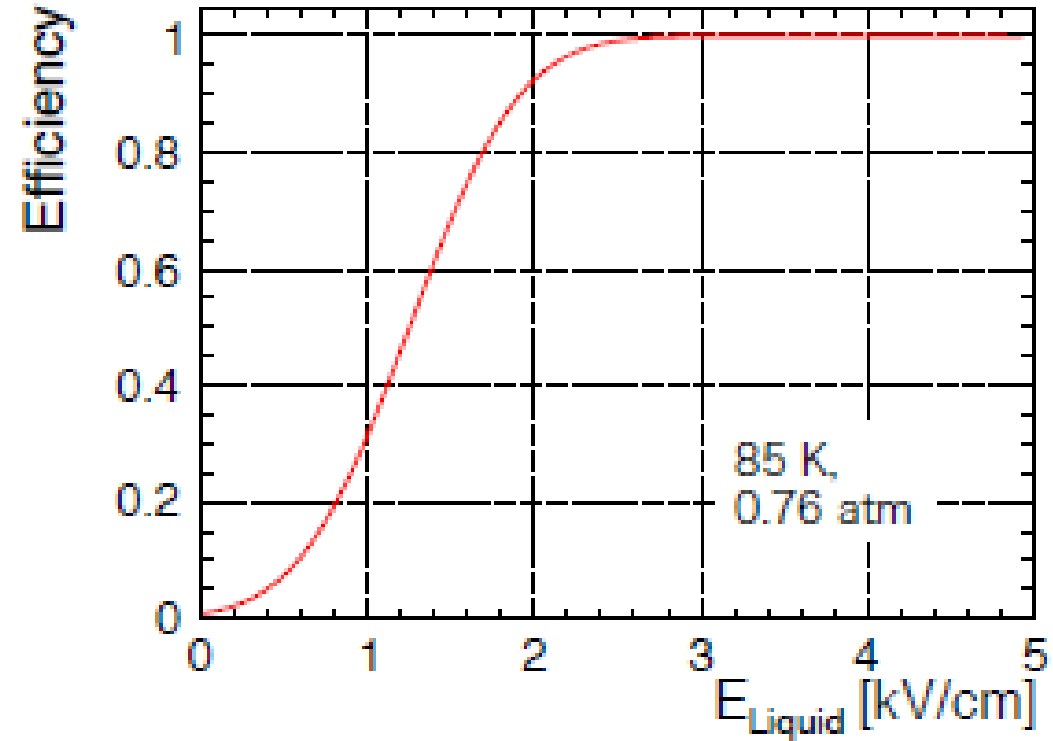
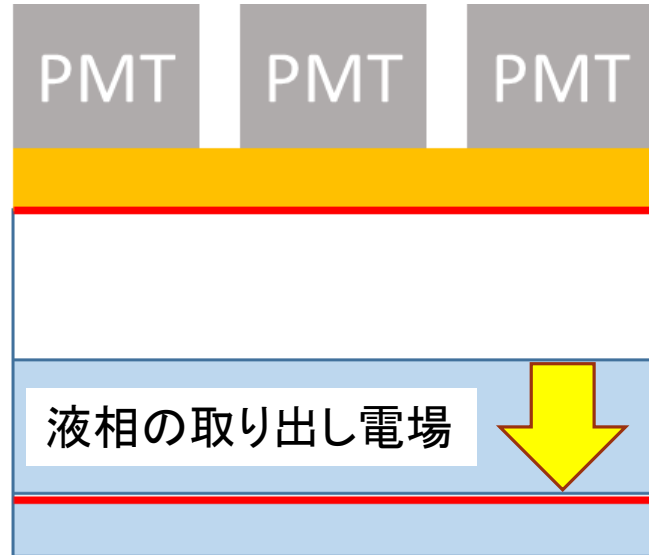
- 液面
- 液面計の原点
- 電極の中線

free parameter	値
$A$ ( $\text{kV}^{-1}$ )	$2.37 \pm 0.21$
$B$ ( $\text{bar}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	$-2.54 \pm 0.28$
$z_{l0}$ (cm)	$-(5.5 \pm 4.6) \times 10^{-2}$

液面計が0(mm)の精度で取り出し電極の中線に取り付けられていることを示唆



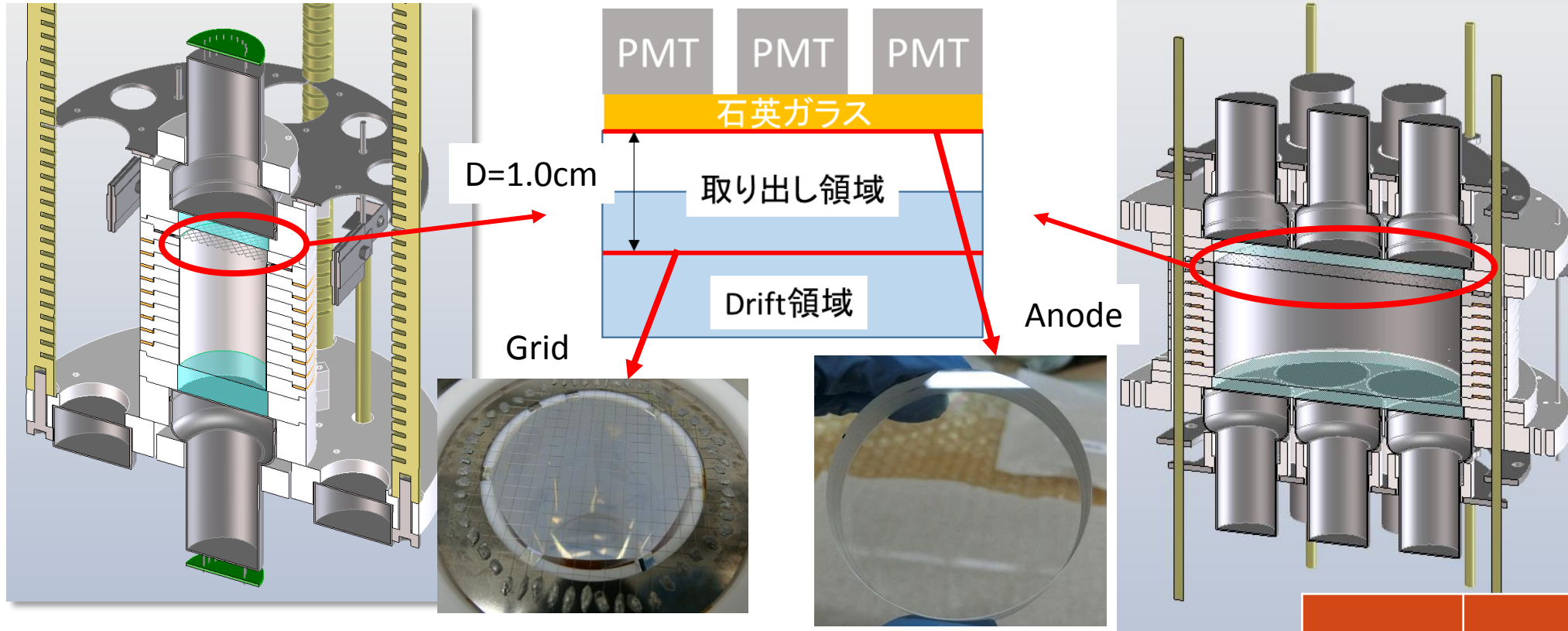
# 気相への取り出し効率



A.Bonder et al., "Two-phase argon and xenon avalanche detectors based on Gas Electron Multipliers", 2005.

小型検出器(Φ64mm,H100mm)

大型検出器(Φ220mm,H100mm)



4mm pitch  
100μm width

ITO透明電極

S2/S1: ~2%の差異

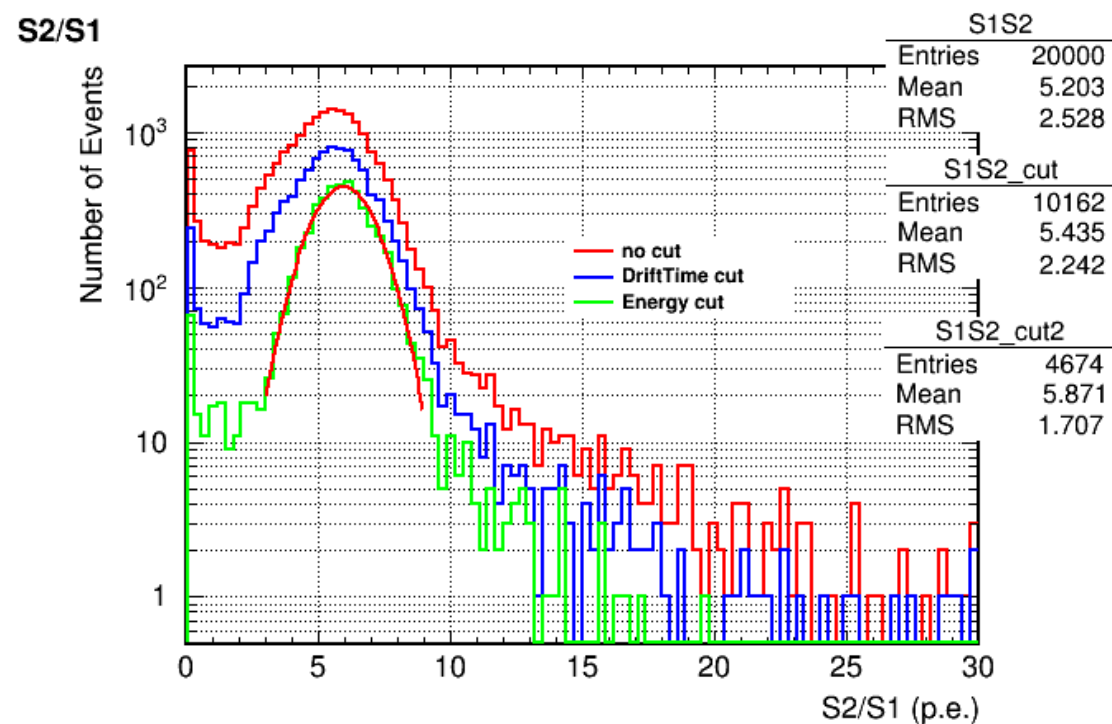
	S2/S1 <sup>60</sup> Co@Compton Edge
小型	5.94 ± 0.02
大型	5.80 ± 0.02

# Run17.1 Run17.3

run150(Run17.3)

DriftTimecut:40~70us

Energycut:1500~3000(p.e.)



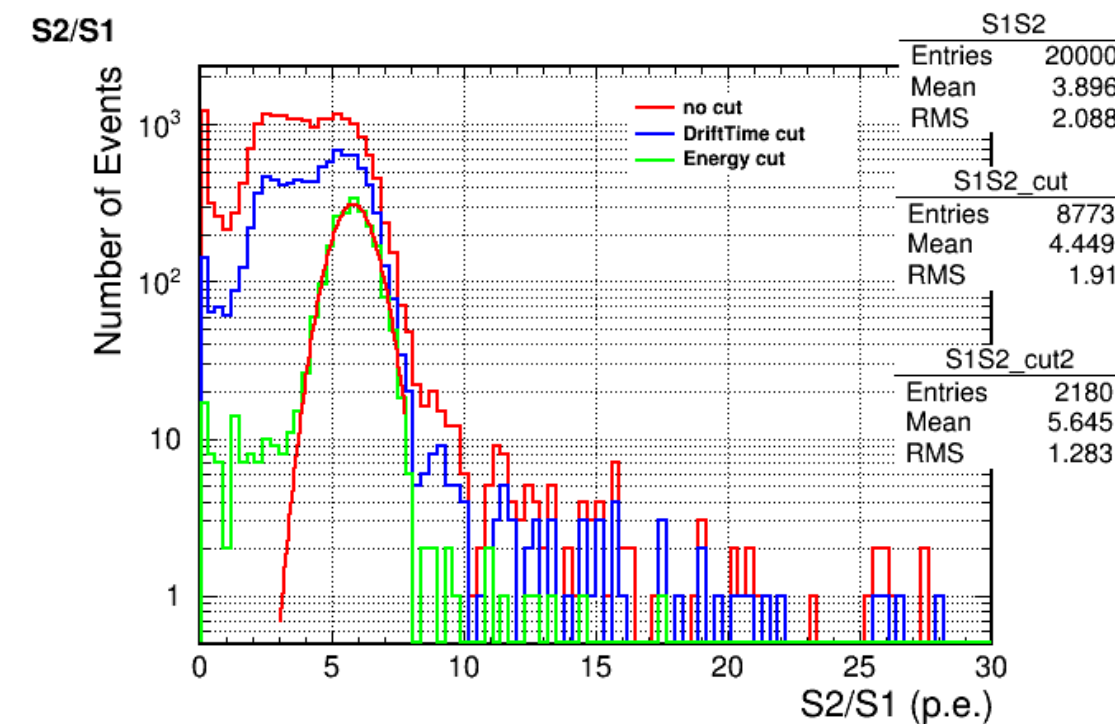
run150(Run17.3)

run530(Run17.1)

run530(Run17.1)

DriftTimecut:75~105us

Energycut:2500~5000(p.e.)



S2/S1(mean+meanerror)

5.94462e+-1.86072e-02

5.80494e+-1.79967e-02

$$\left(\frac{Y_{EL}}{N}\right)_{excimer} = \int_{E_{exc}}^{\infty} \frac{v_e}{v_d} \sigma_{exc}(E) f(E) dE$$

$f(E)$ : 電子のエネルギー分布

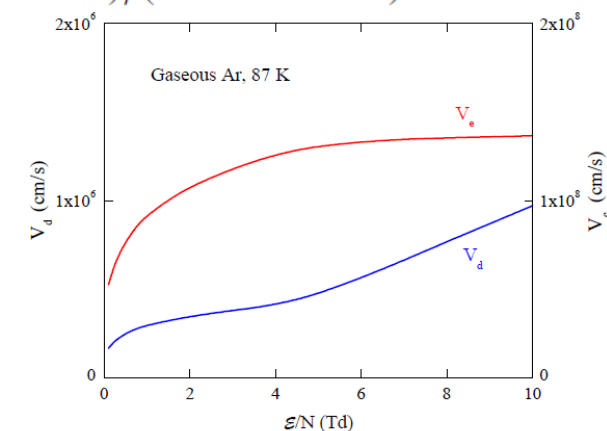
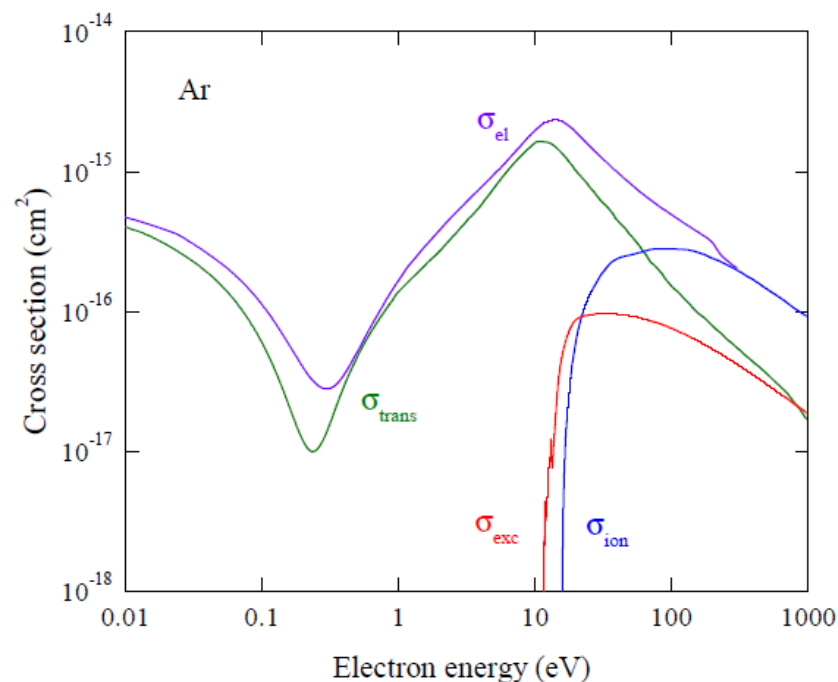
$$\left(\frac{d\sigma}{dv}\right)_{NBrS,el} = \frac{8 r_e}{3 c} \frac{1}{h\nu} \left(\frac{E - h\nu}{E}\right)^{1/2} \times$$

$$[(E - h\nu) \sigma_{el}(E) + E \sigma_{el}(E - h\nu)]$$

$$\left(\frac{Y_{EL}}{N}\right)_{NBrS} = \frac{dN_{ph}}{dx N N_e dV} = \frac{1}{v_d N} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{dI_{ph}(\lambda)}{d\lambda} d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{h\nu}^{\infty} \frac{v_e}{v_d} \frac{d\sigma}{dv} \frac{dv}{d\lambda} f(E) dE d\lambda \quad \text{in (photon cm}^2\text{)/(electron atom)}$$

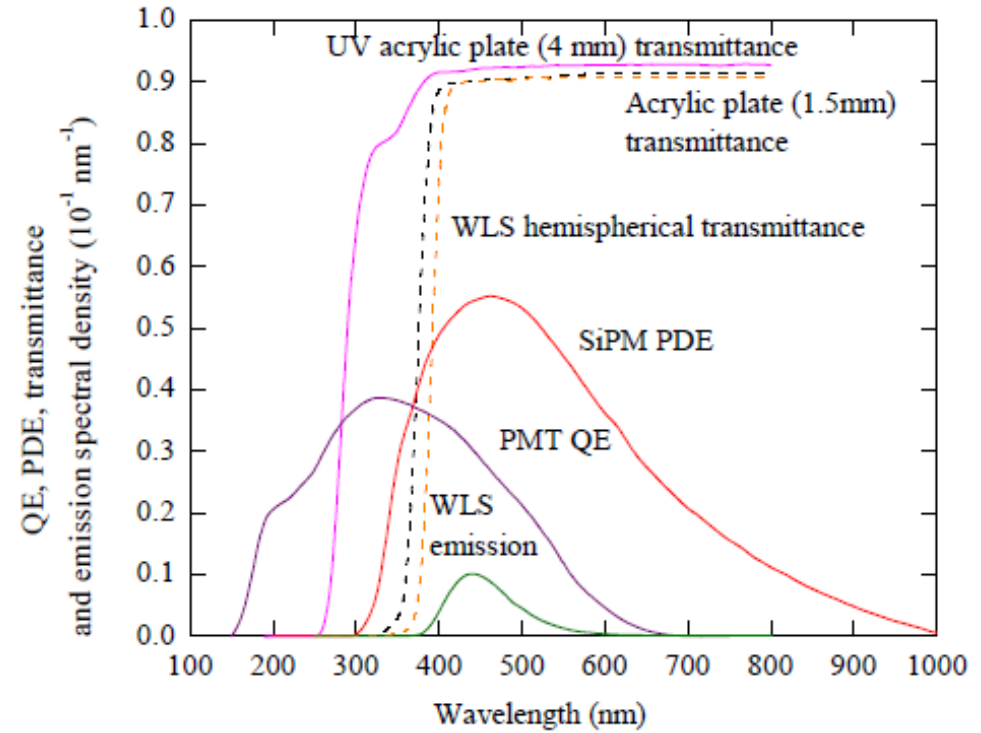
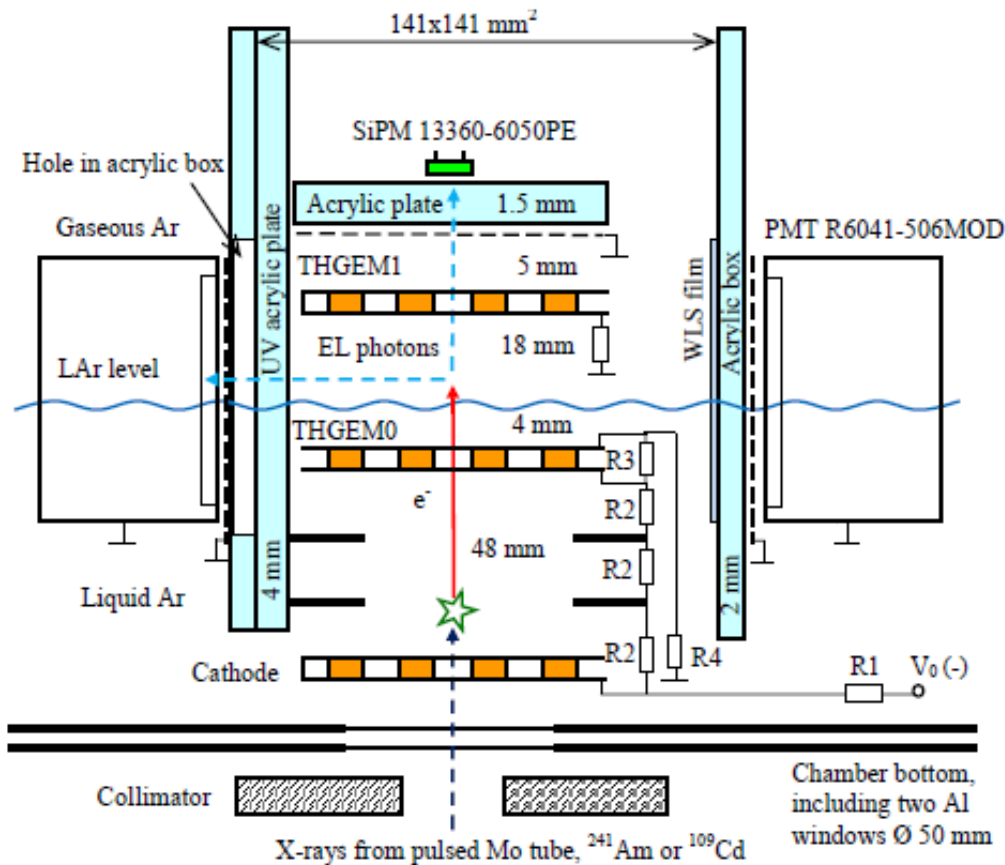
$$\frac{d(Y_{EL}/N)_{NBrS}}{d\lambda} = \int_{h\nu}^{\infty} \frac{v_e}{v_d} \frac{d\sigma}{dv} \frac{dv}{d\lambda} f(E) dE$$

in (photon cm<sup>2</sup>)/(electron atom nm),



$$p = 1.000 \pm 0.005 \text{ atm}, T = 87.3 \text{ K}$$

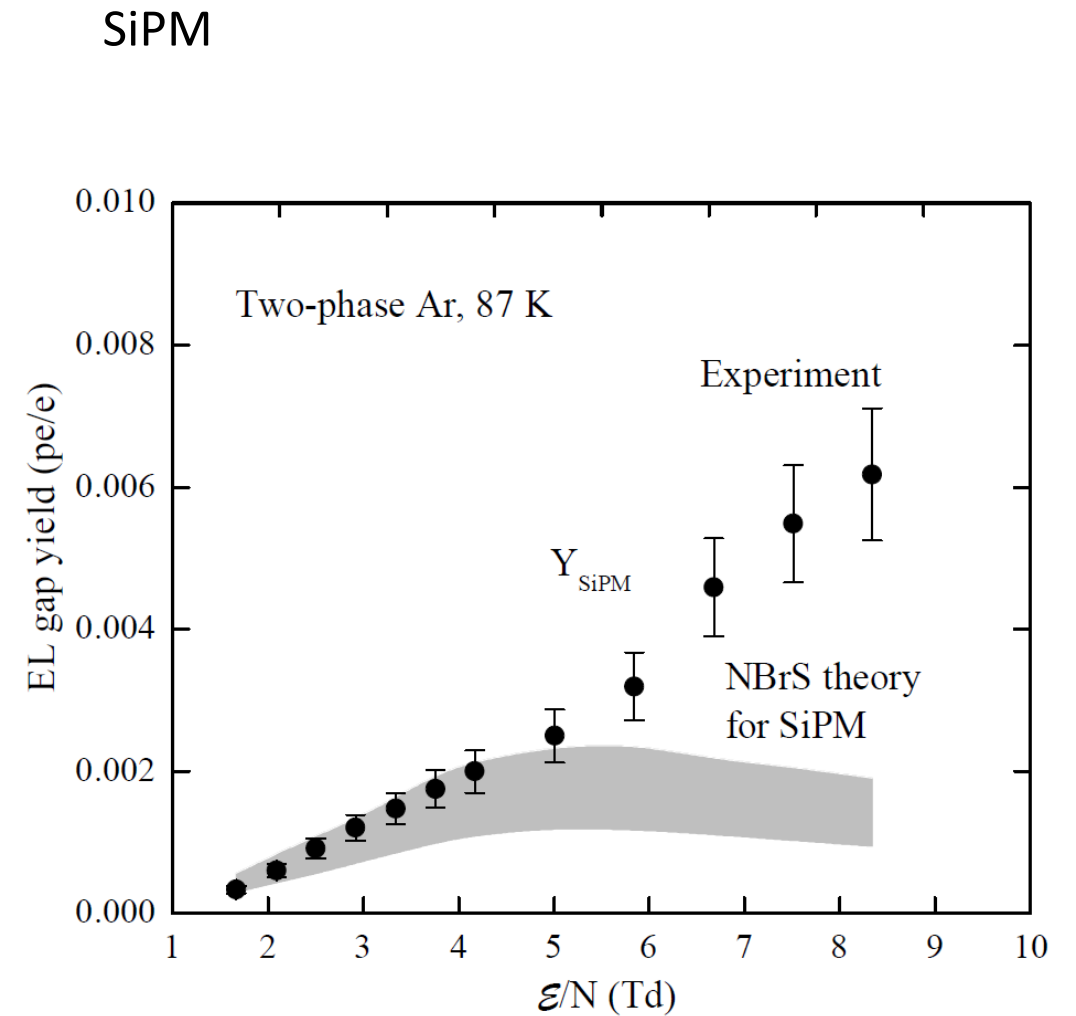
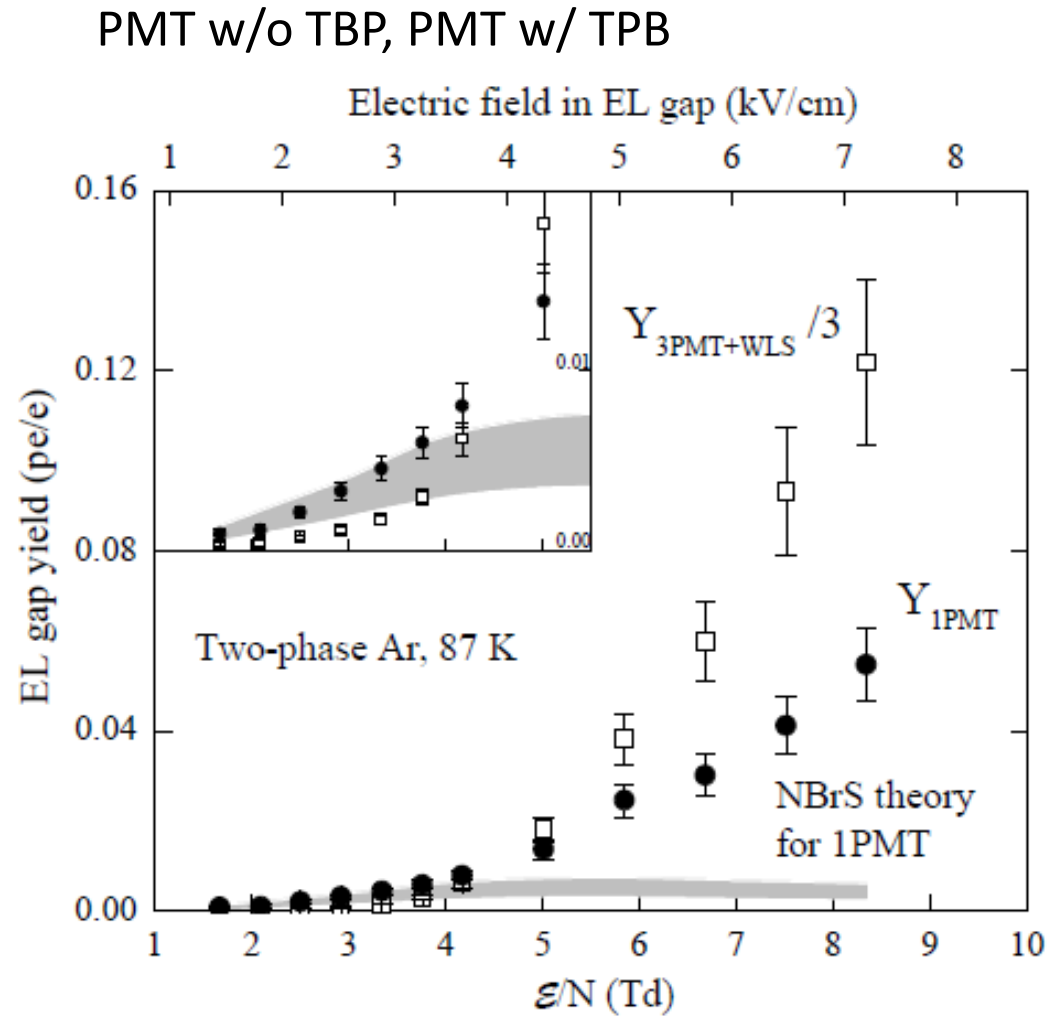
PMT w/ TPB : 3, PMT w/o TPB : 1, SiPM : 1



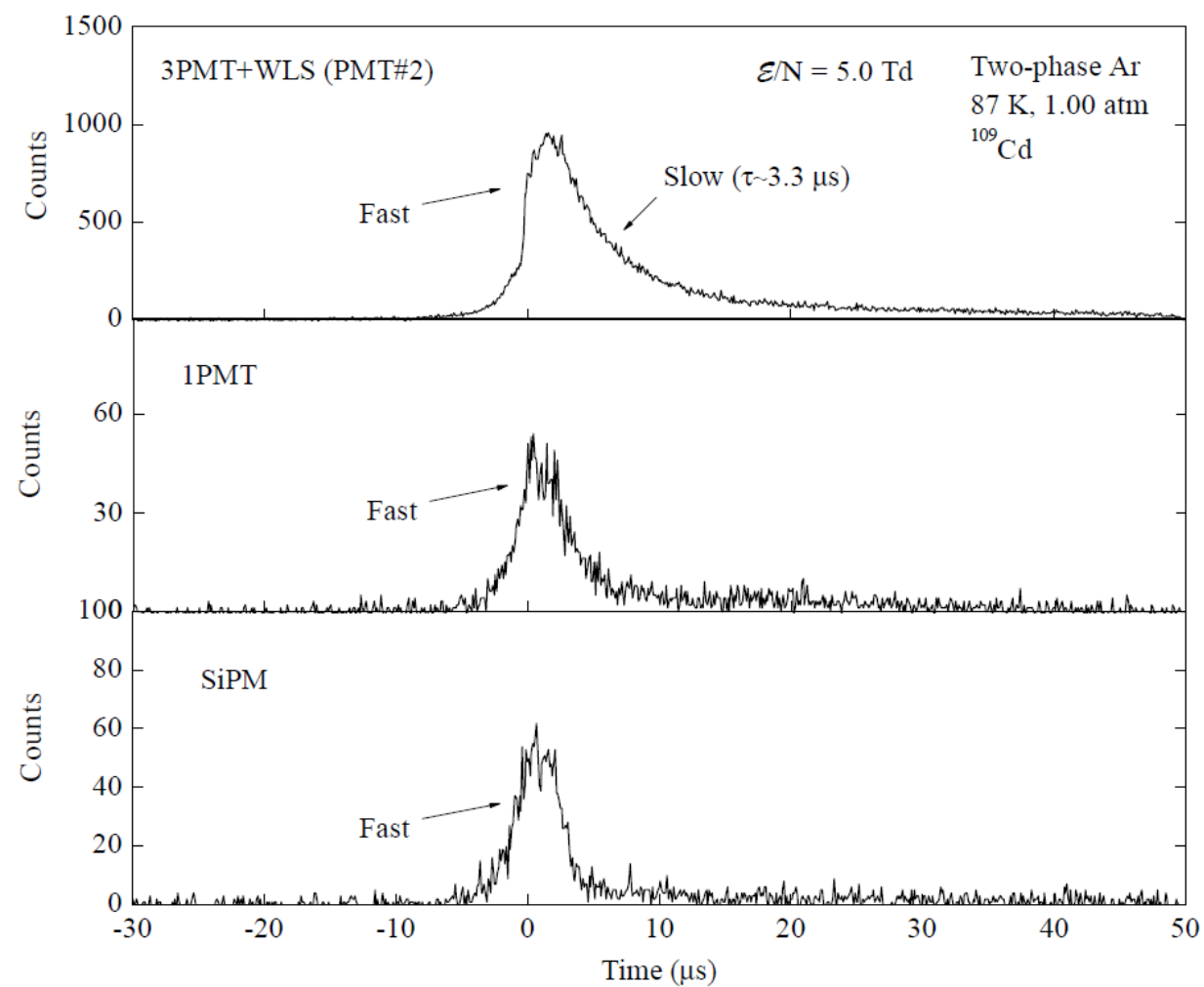
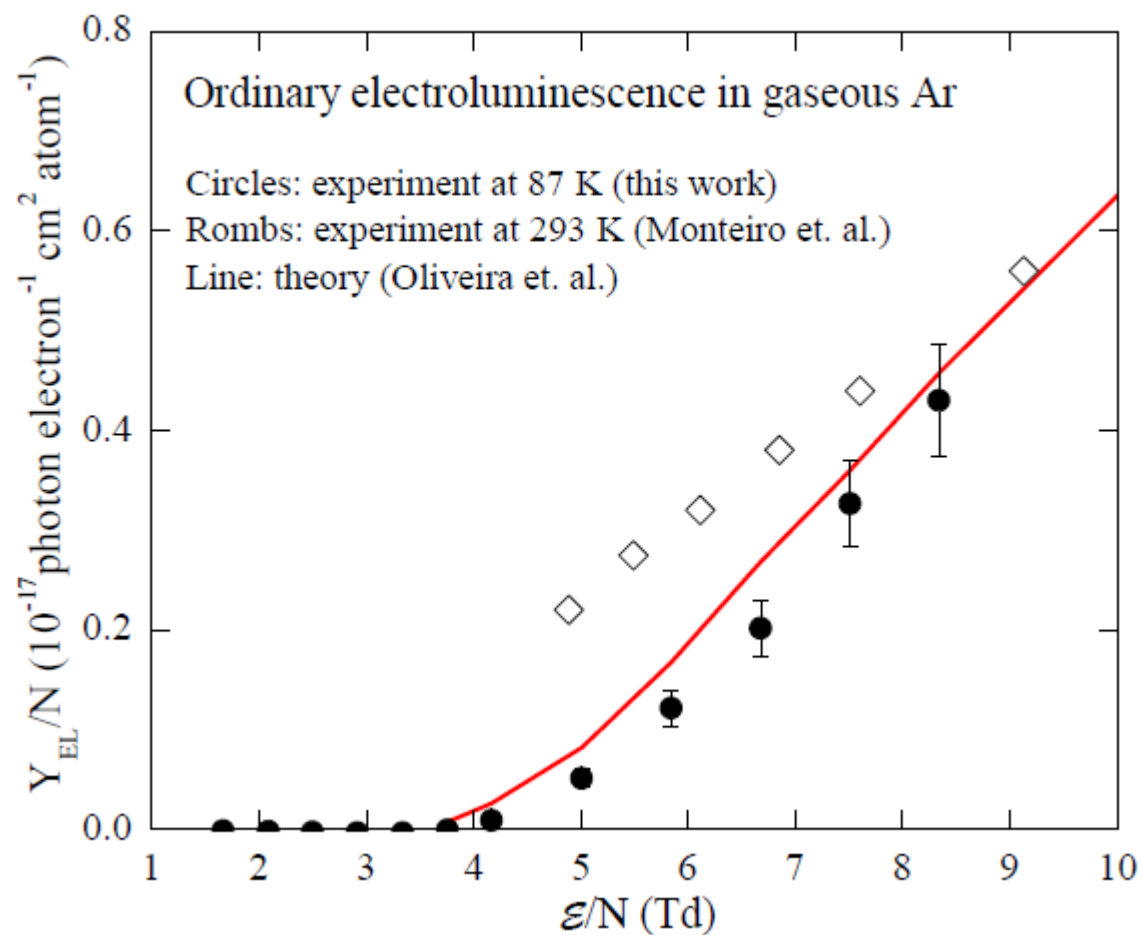
PMT w/o TPB : 300-650nm

PMT w/ TPB : 100-650nm

SiPM : 400-1000nm



PMT w/ TPB – PMT w/o TPB



# Cut parameter

pedestal RMS cut :  $\text{pedr}[\text{ich}] \leq 5.0[\text{us}]$  (for all channel)

negative charge cut :  $N \leq 100.0[\text{p.e.}]$

detected time cut :  $-0.5 \leq \text{Min}(\text{detected\_time}[\text{ich}])[\text{us}] \leq -0.1$

S2dtr cut : run dependent

DriftTime cut :  $40 < \text{S2dtv}[\text{us}] < 70$  (Top+BottomのS2dtvの光量重心をとったもの)

Energy cut :  $1500 < \text{S1tot}[\text{p.e.}] < 3000$  (Compton edge)

S2 Center cut :  $\text{S2}(\text{Ch1})[\text{p.e.}] = \text{S2}(\text{TopMax})[\text{p.e.}]$

run	cut name	cut(#)	cut(%)	cut step(%)	thiscut(#)	thiscut(%)	N-1cut(#)	N-1cut(%)
run150	2.0<=S2dtr<=9.0							
	No Cut	80000	-	-	-	-	-	-
run188	2.0<=S2dtr<=10.0							
	pedr cut	78643	98.304	1.6962	78643	98.304	0	0
run189	2.0<=S2dtr<=14.0							
	n-charge cut	78080	97.6	0.70375	78218	97.772	0	0
run190	2.0<=S2dtr<=15.0							
	detected_time cut	76719	95.899	1.7012	77464	96.83	0	0
run191	2.0<=S2dtr<=18.0							
	S2 RMS cut	42618	53.273	42.626	43573	54.466	0	0
	DriftTime cut	25801	32.251	21.021	42598	53.248	0	0
	S1tot cut	14796	18.495	13.756	36623	45.779	0	0
	S2 Center cut	1924	2.405	16.09	10686	13.357	0	0

run198 2.0<=S2dtr<=9.0

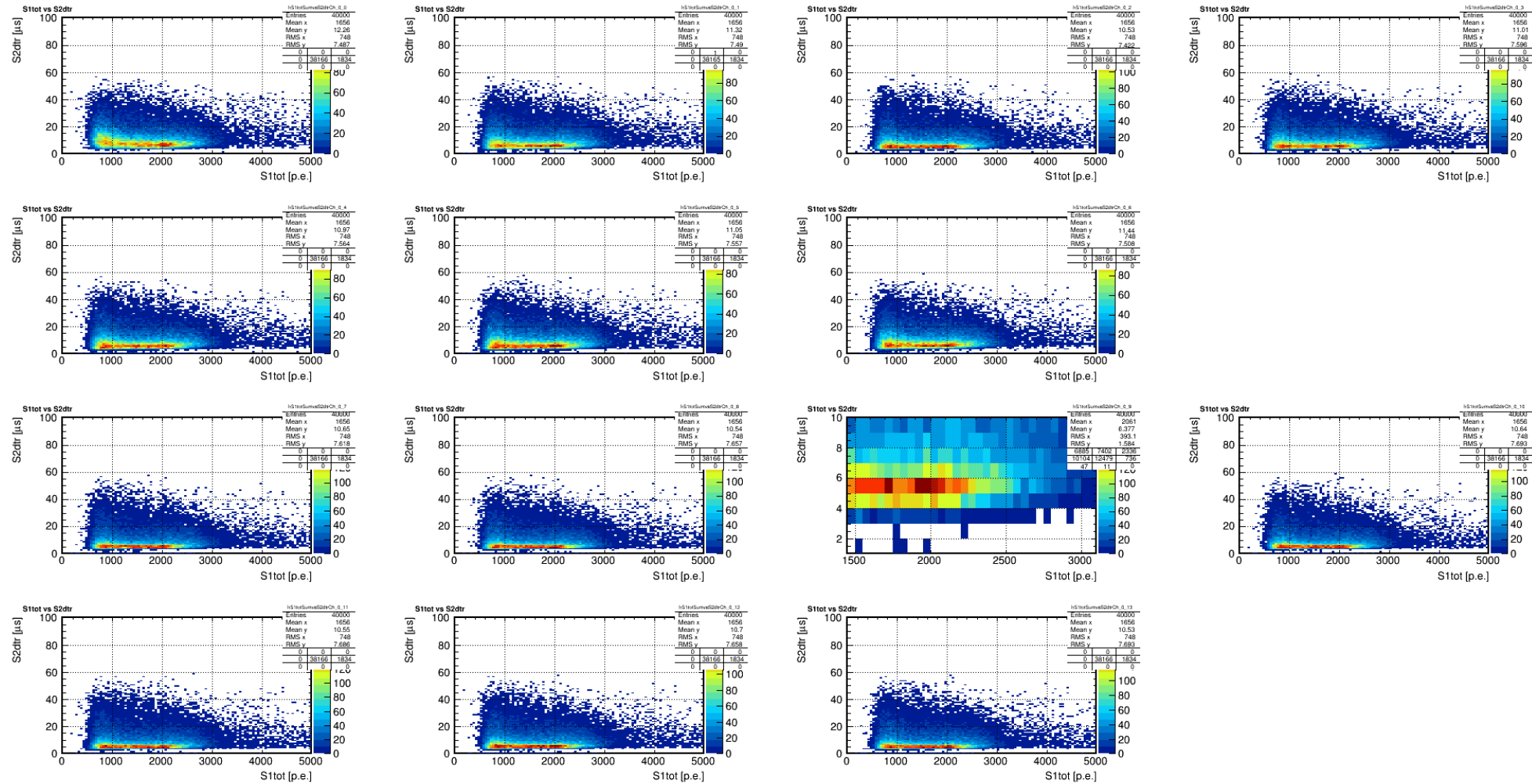
run197 2.0<=S2dtr<=9.0

run193 2.0<=S2dtr<=9.0

run192 2.0<=S2dtr<=9.0

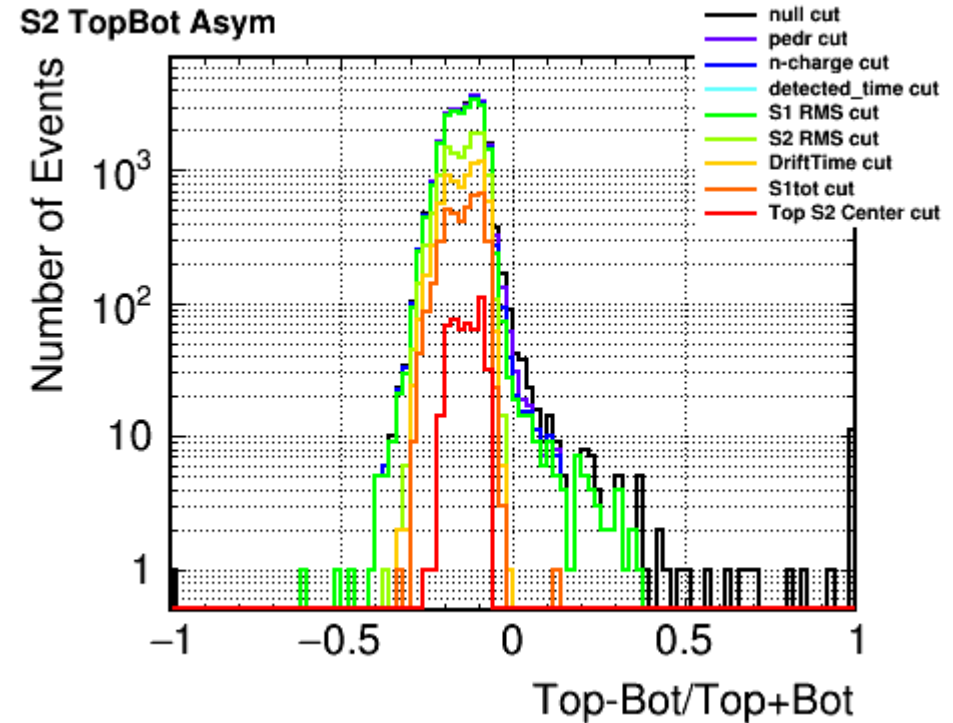
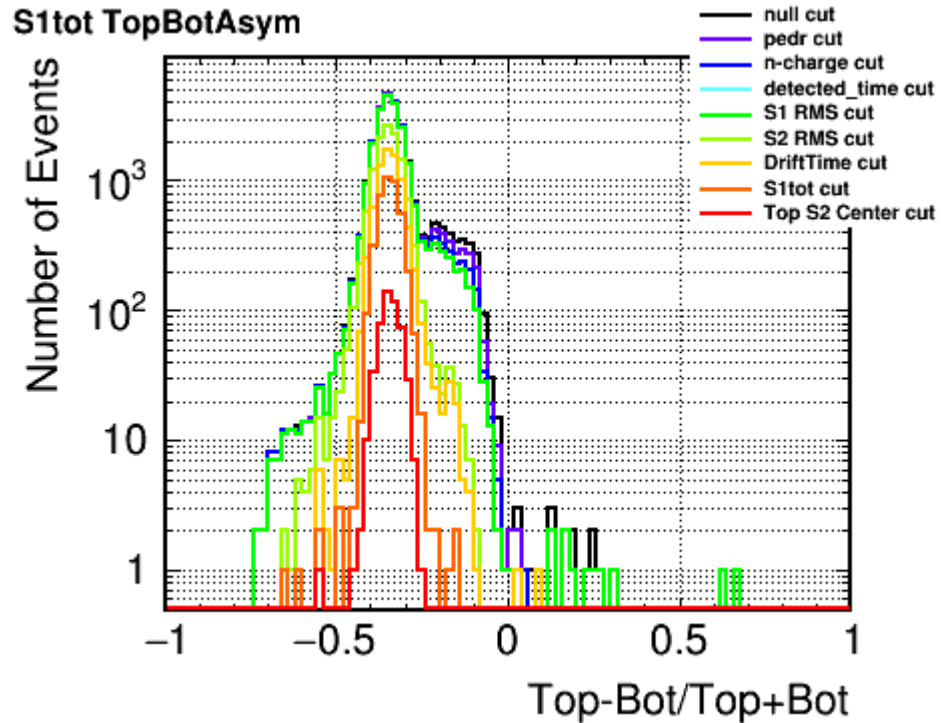


## run150



## Cut

run197

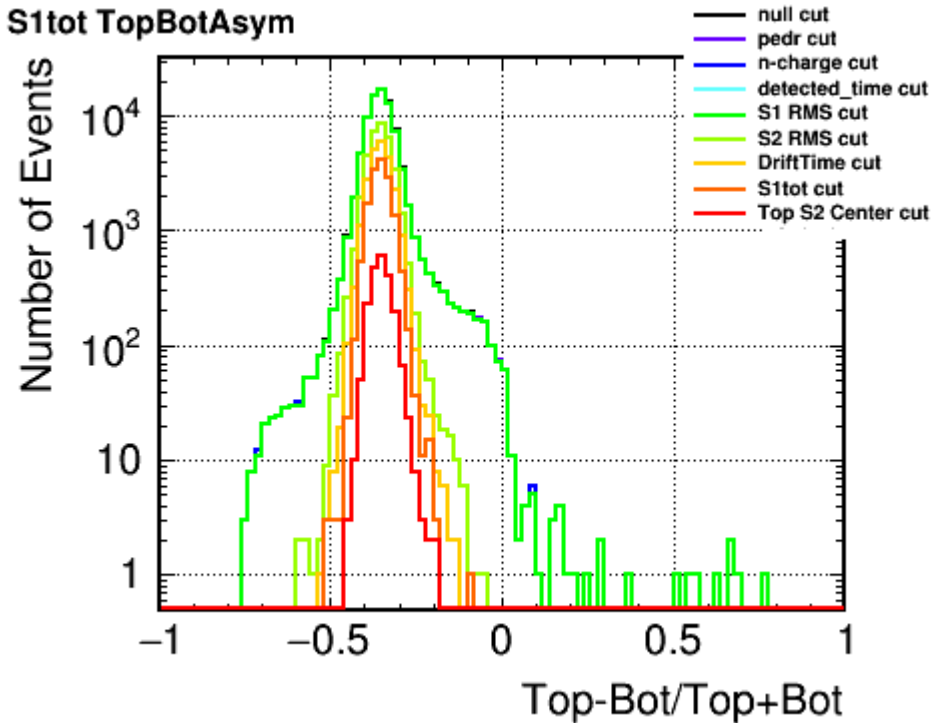


cut name	cut(#)	cut(%)	cut step(%)	thiscut(#)	thiscut(%)	N-1cut(#)	N-1cut(%)
No Cut	24400	-	-	-	-	-	-
pedr cut	23706	97.156	2.8443	23706	97.156	0	0
n-charge cut	23131	94.799	2.3566	23237	95.234	0	0
detected_time cut	22500	92.213	2.5861	22775	93.34	0	0
S2 RMS cut	12159	49.832	42.381	12510	51.27	0	0
DriftTime cut	7464	30.59	19.242	12442	50.992	0	0
S1tot cut	4080	16.721	13.869	10259	42.045	0	0
S2 Center cut	496	2.0328	14.689	3211	13.16	0	0

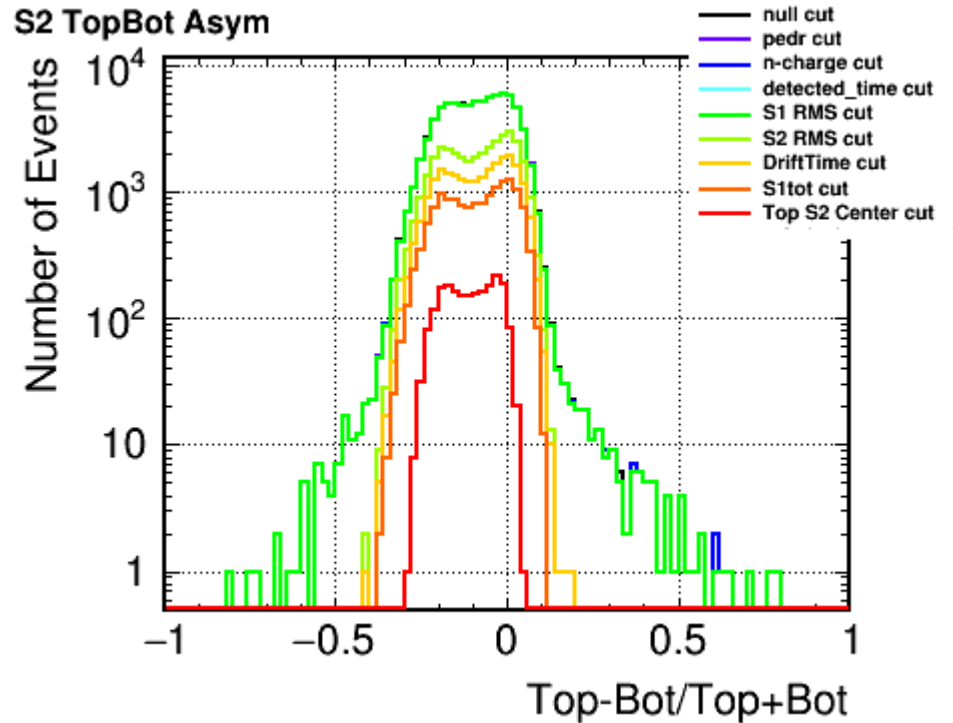
## Cut

run188

S1tot TopBotAsym



S2 TopBot Asym

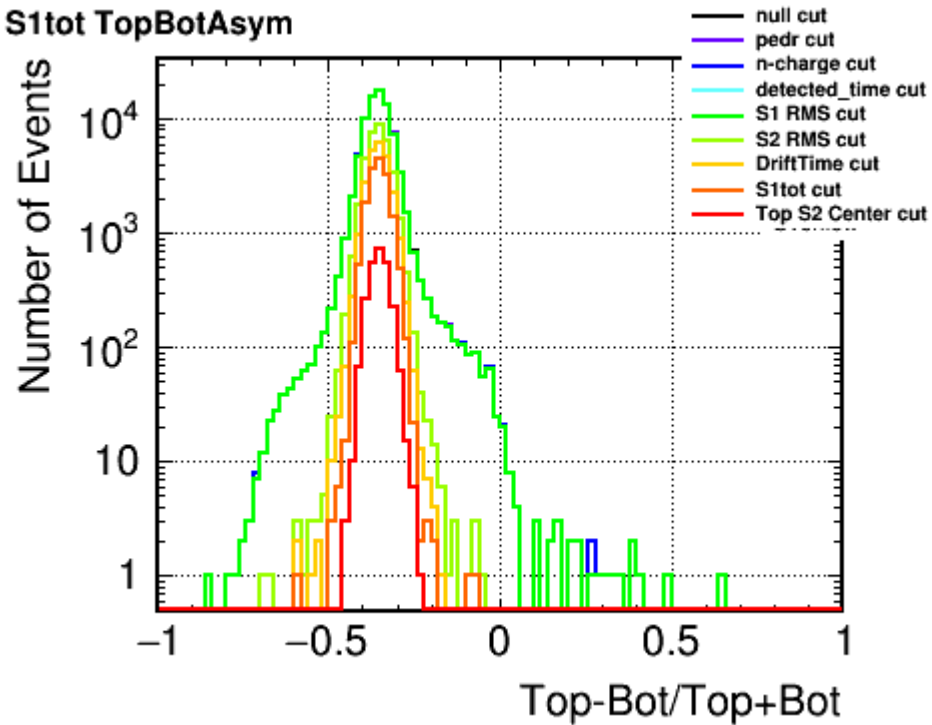


cut name	cut(#)	cut(%)	cut step(%)	thiscut(#)	thiscut(%)	N-1cut(#)	N-1cut(%)
No Cut	80000	-	-	-	-	-	-
pedr cut	79673	99.591	0.40875	79673	99.591	0	0
n-charge cut	79270	99.087	0.50375	79325	99.156	0	0
detected_time cut	78941	98.676	0.41125	79564	99.455	0	0
S2 RMS cut	35566	44.458	54.219	35933	44.916	0	0
DriftTime cut	23393	29.241	15.216	42934	53.668	0	0
S1tot cut	14737	18.421	10.82	40068	50.085	0	0
S2 Center cut	2070	2.5875	15.834	11516	14.395	0	0

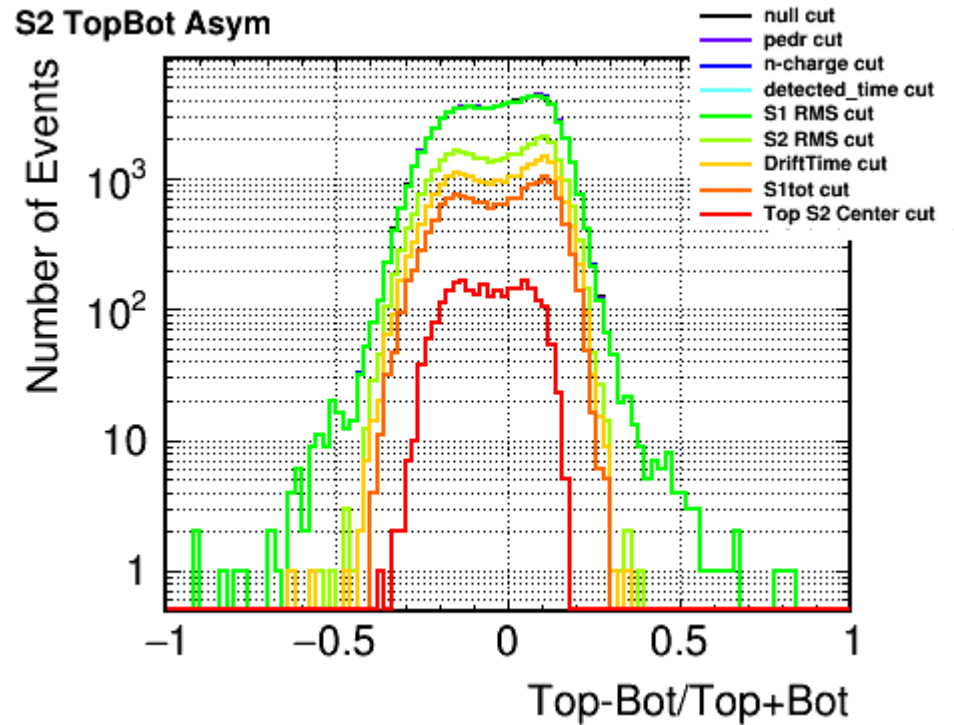
## Cut

run191

S1tot TopBotAsym

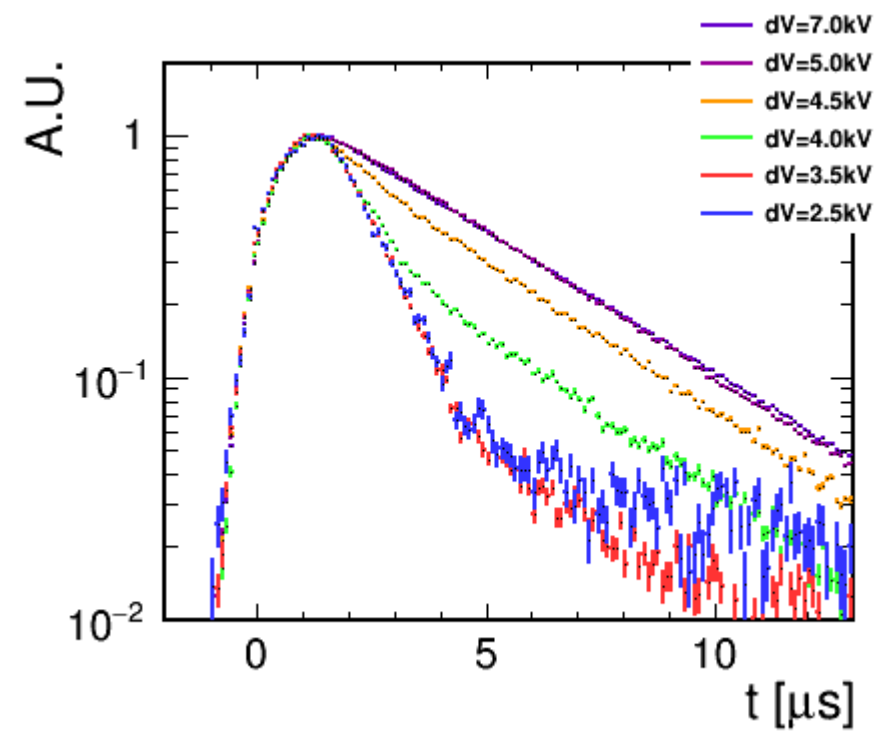
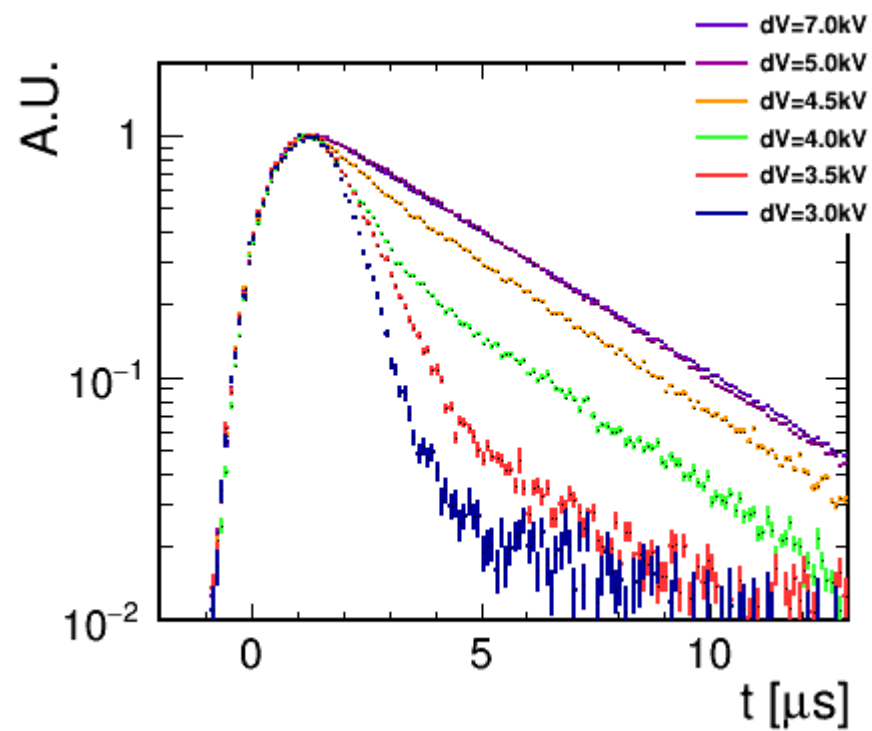


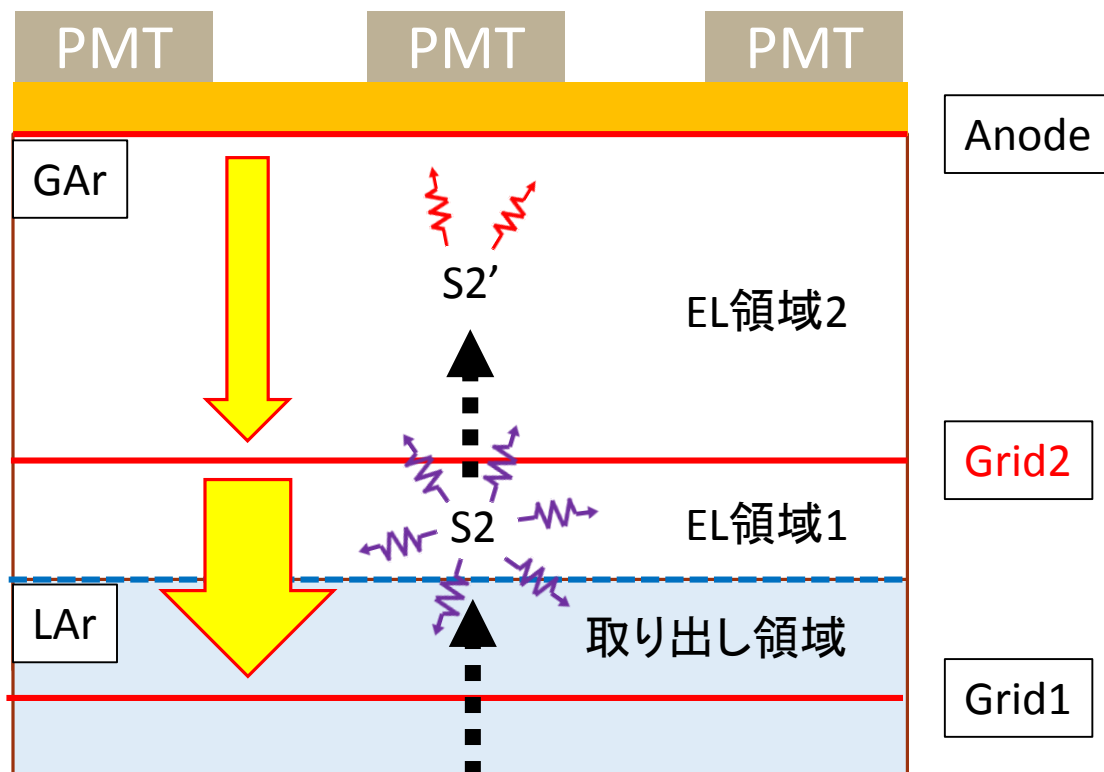
S2 TopBot Asym



cut name	cut(#)	cut(%)	cut step(%)	thiscut(#)	thiscut(%)	N-1cut(#)	N-1cut(%)
No Cut	80000	-	-	-	-	-	-
pedr cut	79792	99.74	0.26	79792	99.74	0	0
n-charge cut	79457	99.321	0.41875	79525	99.406	0	0
detected_time cut	79177	98.971	0.35	79682	99.603	0	0
S2 RMS cut	35061	43.826	55.145	35347	44.184	0	0
DriftTime cut	23730	29.663	14.164	42979	53.724	0	0
S1tot cut	15990	19.988	9.675	41104	51.38	0	0
S2 Center cut	2464	3.08	16.907	11931	14.914	0	0

# S2平均波形





## 問題点

- S2の発光領域が拡大→S2によるxy位置分解能の悪化
  - 壁面にMPPCを並べる
- S2波形によるz方向位置分解能の悪化
  - 液相領域を電場方向に伸ばす
- Grid2で電離電子が吸収されてしまう

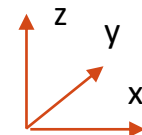
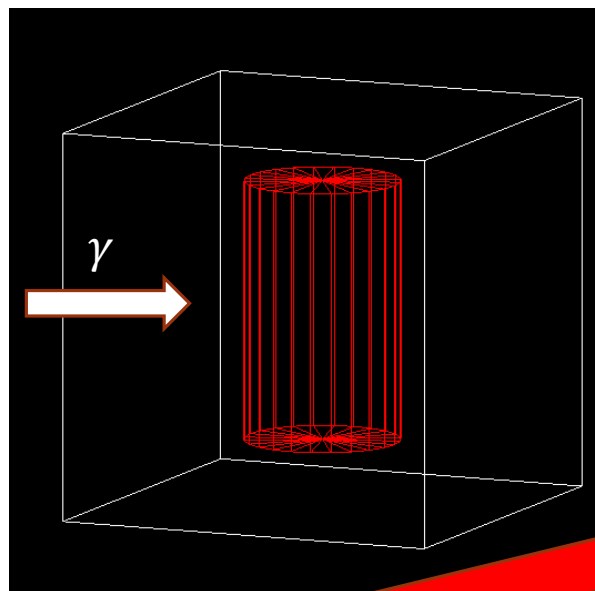
# 反跳電子のtrack長(by Geant4 simulation)

- Geometry

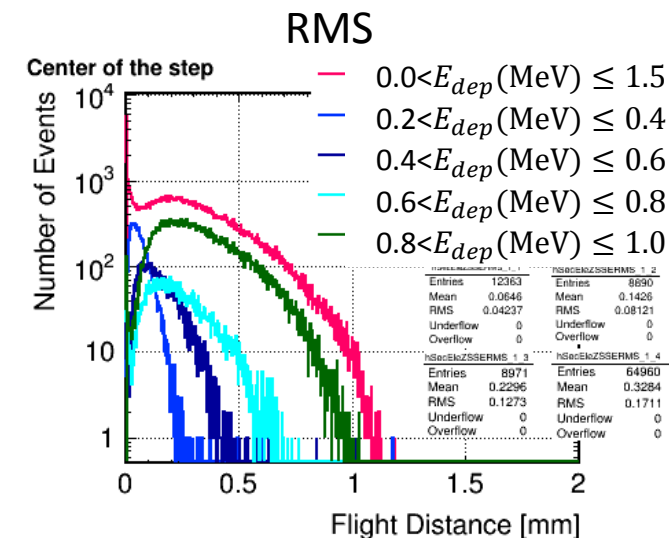
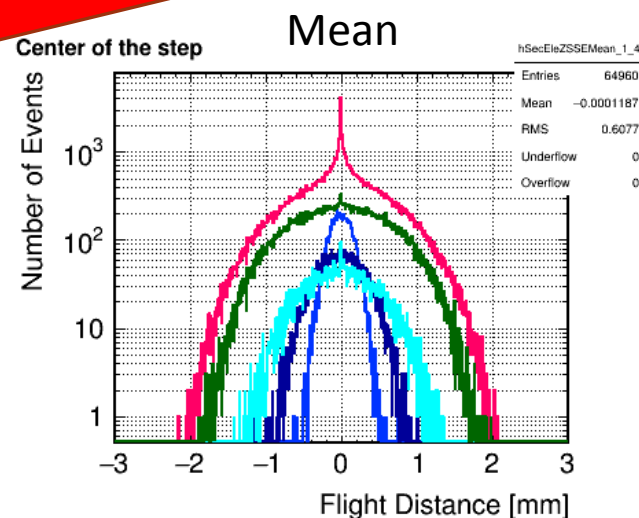
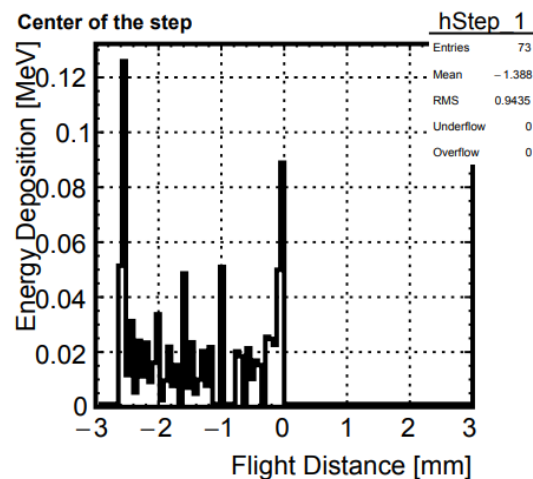
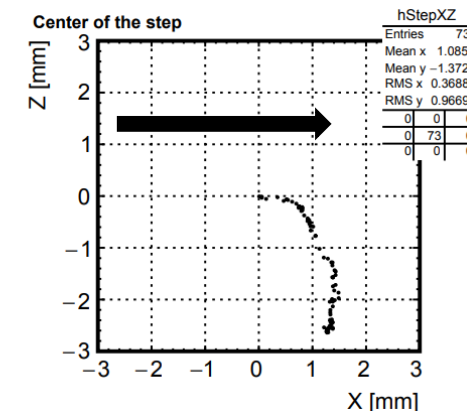
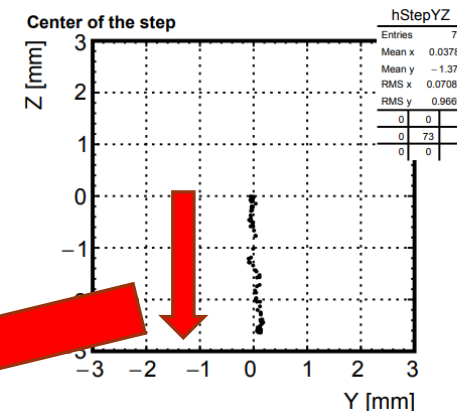
World :  $1.5 \times 1.5 \times 1.5$  m, air  
Chamber :  $\phi 0.3$  m,  $H 1.0$  m, LAr

- Set up of Geant4

- ✓ Physics list : FTFP\_BERT
- ✓ setCut : 1.0um
- ✓  $\sim 1.1, 1.3$  MeV  $\gamma$  ray

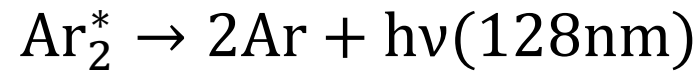


The trajectory of recoiled electron



# Ar VUV Scintillation 128nm

## Excitation



## Ionization

