

# ガスアルゴン中の中性制動放射による 新たな発光機構とその利用可能性

---

早稲田大学 修士2年

武田 知将

# 気液2相型Ar検出器

## □ 検出信号

- 1次蛍光(S1) 入射粒子と液体Arの相互作用
- 2次蛍光(S2) 液相で生成した電離電子とガスArの相互作用

## □ S2信号

ドリフト時間&光量重心

位置情報

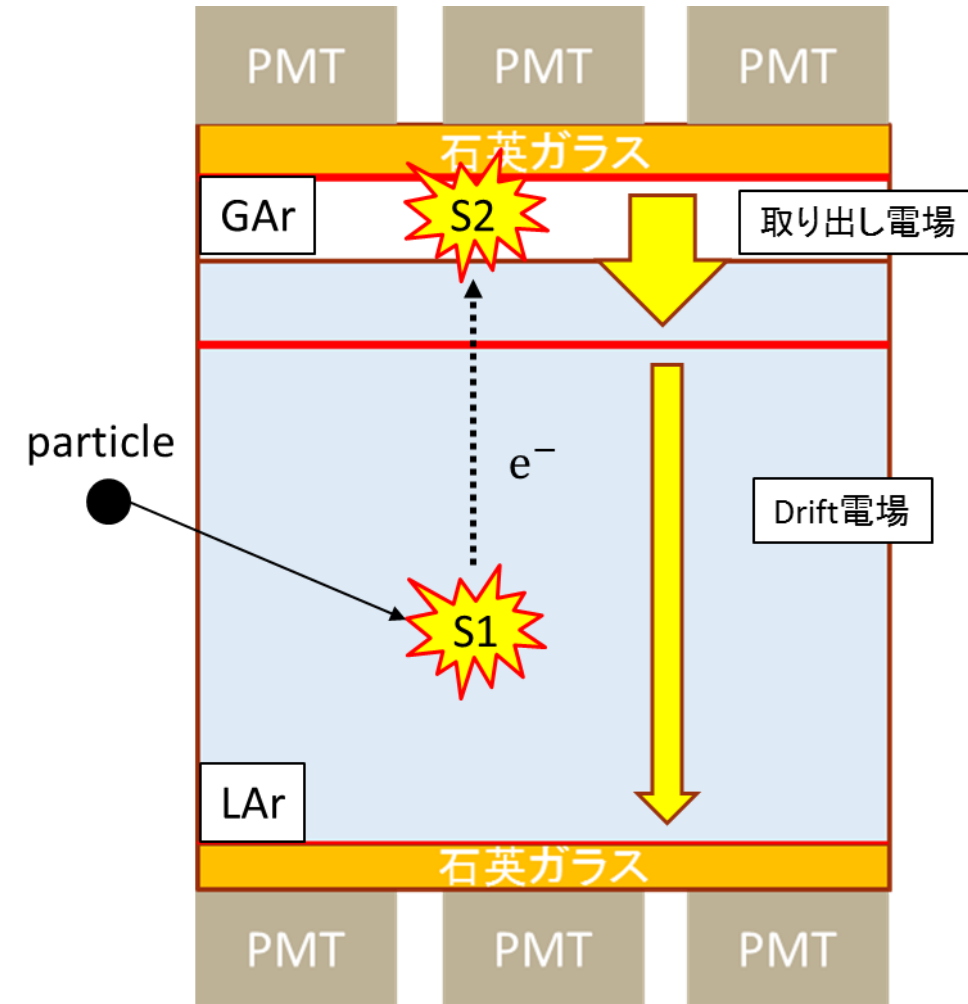
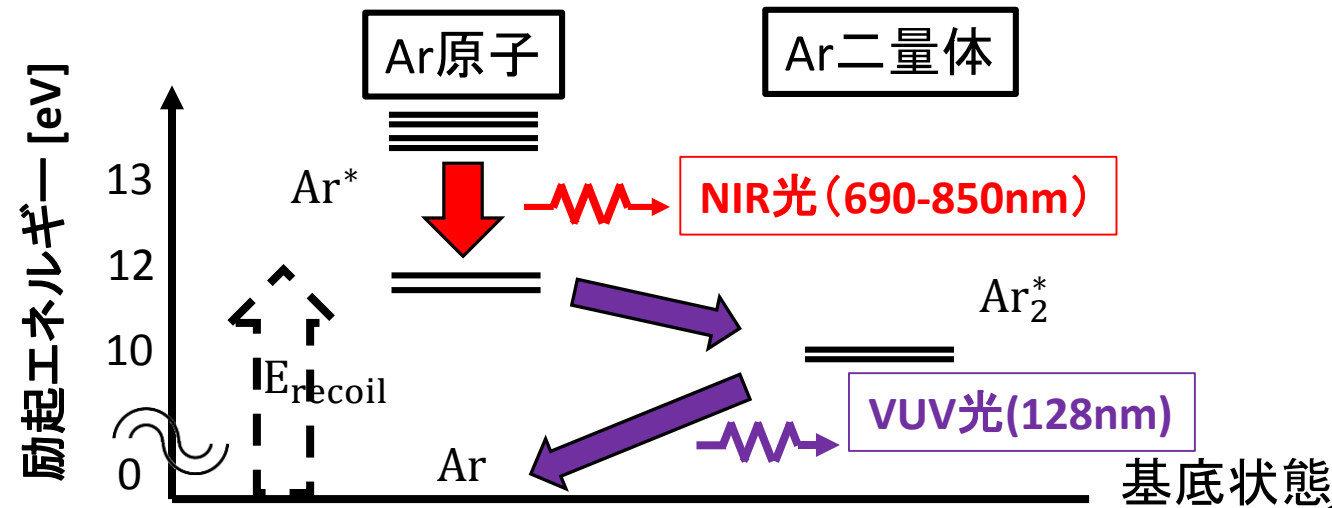
S2光量(電離電子数に比例)

エネルギー情報

発光機構: 電子比例蛍光

ガスAr蛍光 真空紫外光(VUV)、紫外光(UV)、近赤外光(NIR)

Arのエネルギー準位図



近年、新たな発光機構が示唆されている

# ガスAr中の中性制動放射 (NBrS)

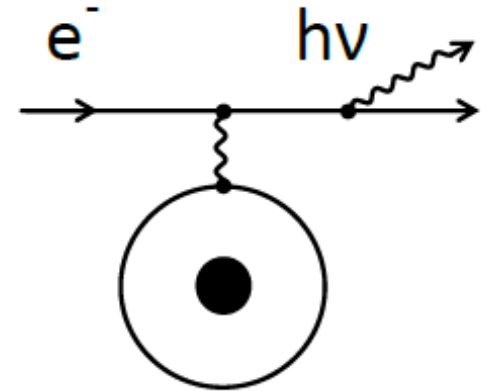
## □ 中性制動放射 (Neutral Bremsstrahlung : NBrS)

低速電子(1~10eV)が中性原子に(非)弾性散乱されることで発光

1970年代にS2発光機構として提唱されるが棄却

- 近年、理論が発展し、存在を示唆する測定結果が報告されている
- **ただし、直接観測した事例はない**

**目標: NBrS成分の直接観測**



NBrSの発光過程

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

## ● モチベーション: **希ガス検出器への応用**

### ✓ 特徴

- 連続波長スペクトル (VUV~IR) →
- 低電場下で発光 →
- 光子放出方向に偏り →

### ✓ 利用

- 多くの光デバイスで直接検出可能
- 高電場印加による弊害(放電等)を抑制
- 事象位置再構成の向上、入射粒子の到来方向の推測

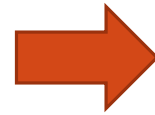
# NBrS成分の測定

## □ 直接観測

発光波長に着目

NBrS成分→連続波長スペクトル

電子比例蛍光→VUV光、UV光、NIR光

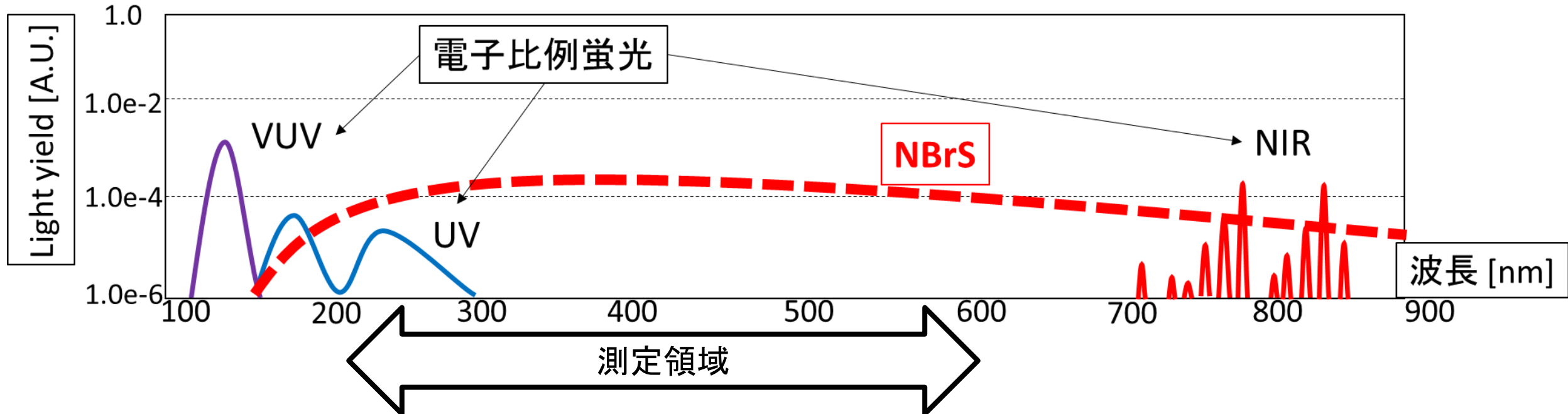


可視光領域ではNBrS成分のみ発光

**本研究**

**200~600nmのS2波長スペクトルを測定**

波長スペクトル



# 常温ガスArセットアップ

波長変換剤は使用していない

換算電界を考慮することで、常温下でも低温下と等価な測定が可能

換算電界  $E/N$ ,  $E$ :電場,  $N$ :気体数密度

( $1\text{Td} \Leftrightarrow 0.245\text{kV/cm}@300\text{K} \Leftrightarrow 0.815\text{kV/cm}@90\text{K}$ )

## 測定原理

各波長帯ごとにS2信号を測定

- VUV PMT: VUV成分

S1信号トリガー

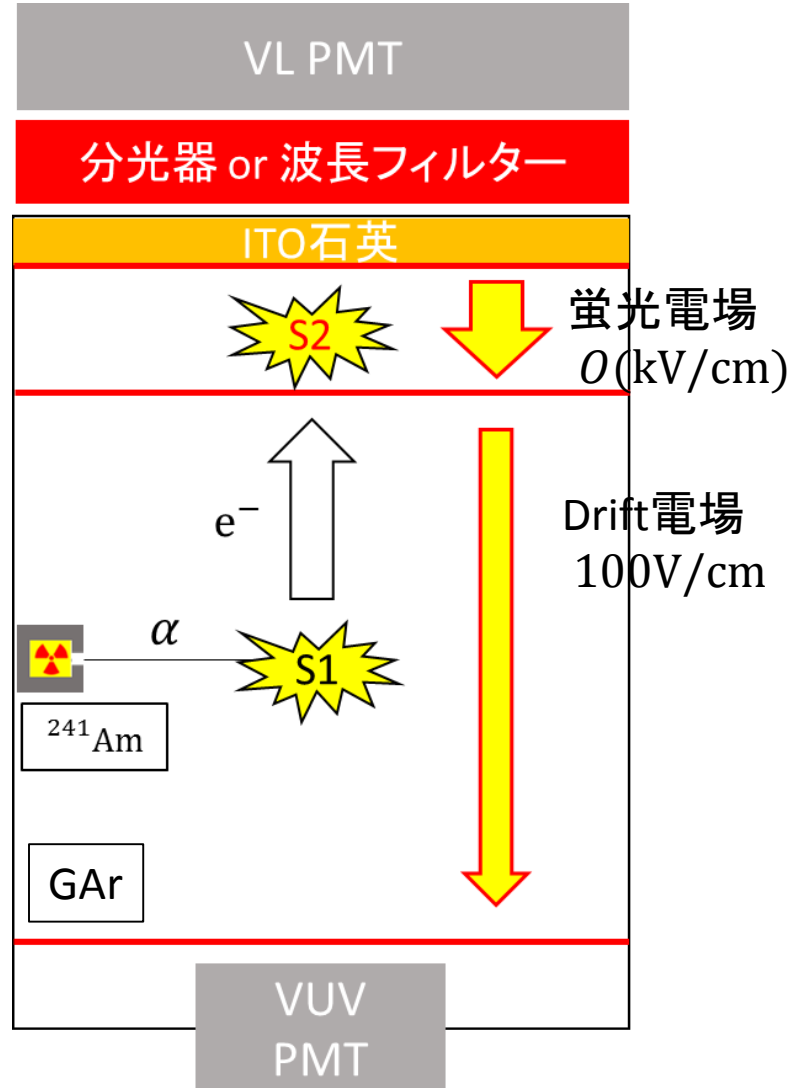
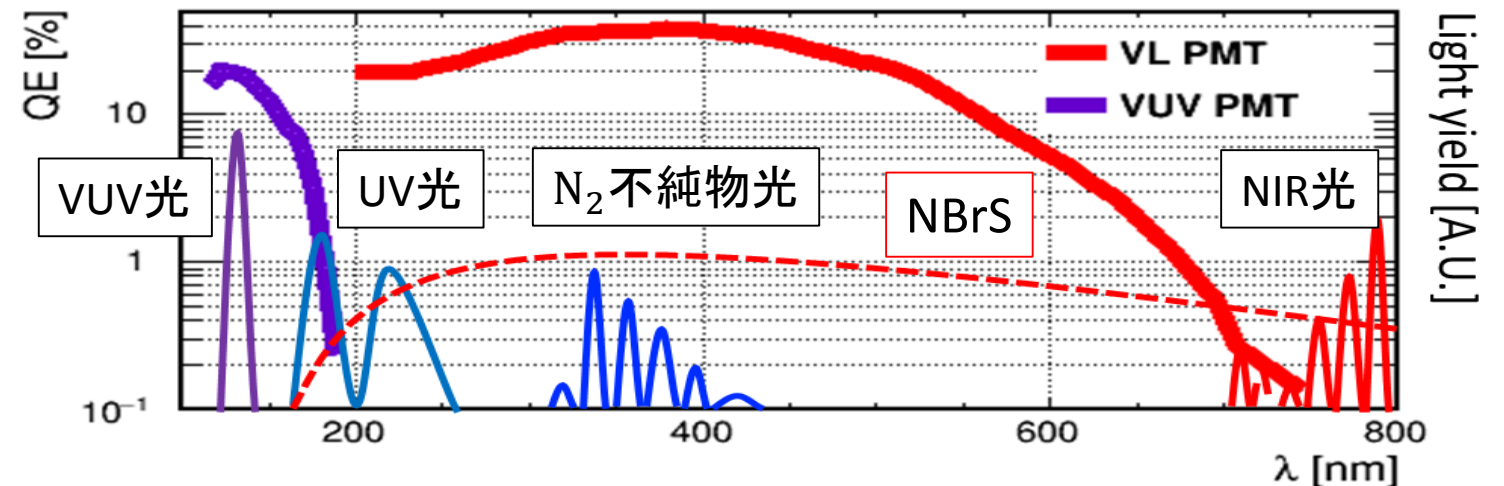
- VL PMT: UV成分、可視光(VL)成分

S2波長スペクトル測定

波長フィルター測定: 電場依存

分光器測定: 波長スペクトル概形

## PMTのQEとガスAr発光成分



# 常温ガスArセットアップ

波長変換剤は使用していない

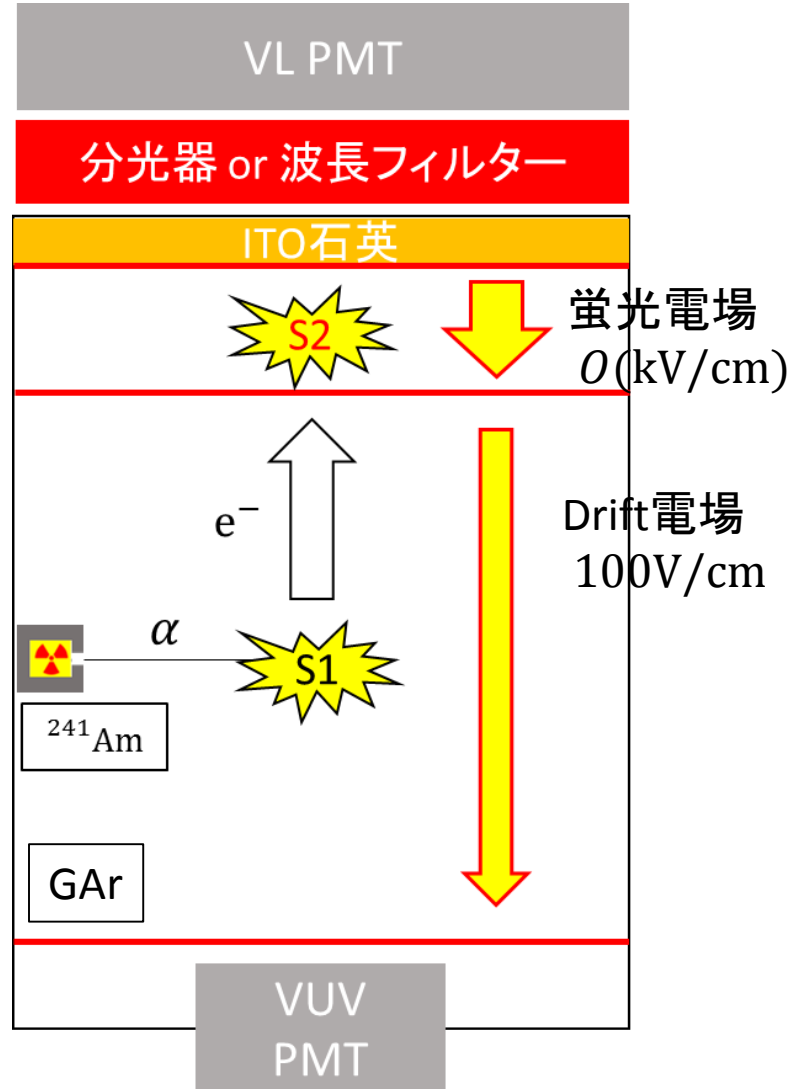
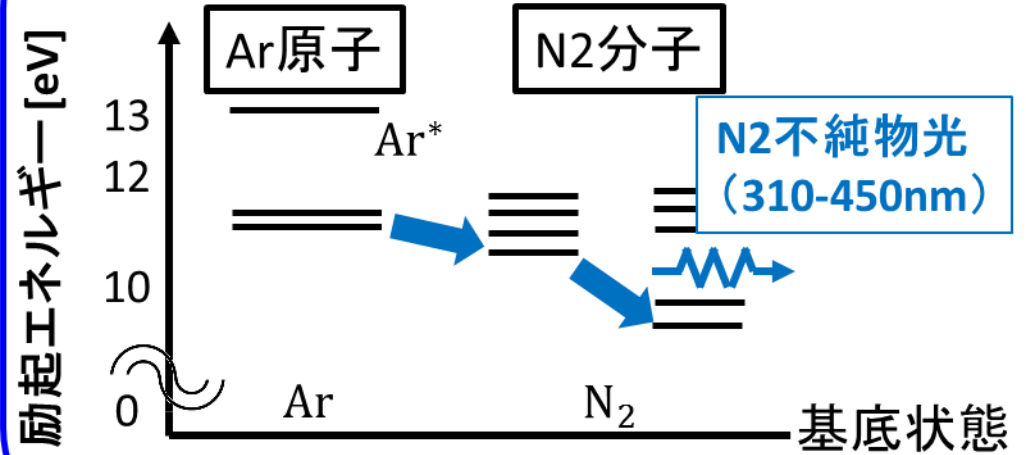
換算電界を考慮するこ  
換算電界  $E/N$ ,  $E$ :電場  
(1Td  $\Leftrightarrow$  0.245kV/cm@

## 測定原理

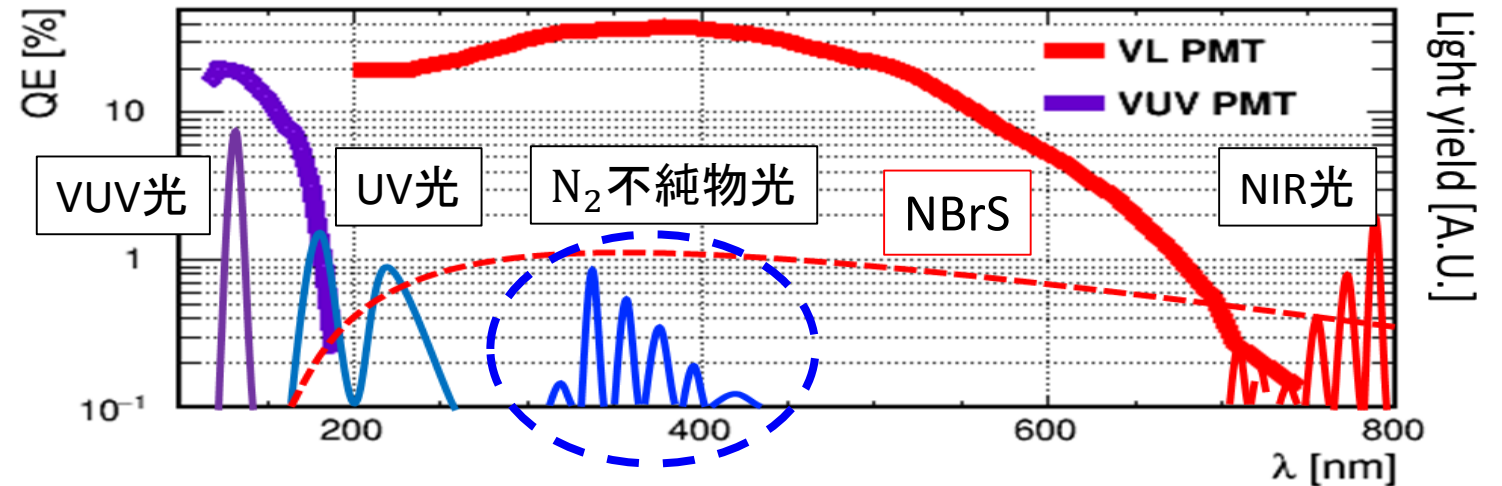
各波長帯ごとに

- VUV PMT: VUV光 S1信号トリガ
- VL PMT: UV光 S2波長スペ

ArにN<sub>2</sub>が混入したときのエネルギー準位図



PMTのQEとガスAr発光成分



カルシウム測定・波長スペクトル概観

# 常温ガスArセットアップ

波長変換剤は使用していない

換算電界を考慮することで、常温下でも低温下と等価な測定が可能

換算電界  $E/N$ ,  $E$ :電場,  $N$ :気体数密度

( $1\text{Td} \Leftrightarrow 0.245\text{kV/cm}@300\text{K} \Leftrightarrow 0.815\text{kV/cm}@90\text{K}$ )

## 測定原理

各波長帯ごとにS2信号を測定

- VUV PMT: VUV成分

S1信号トリガー

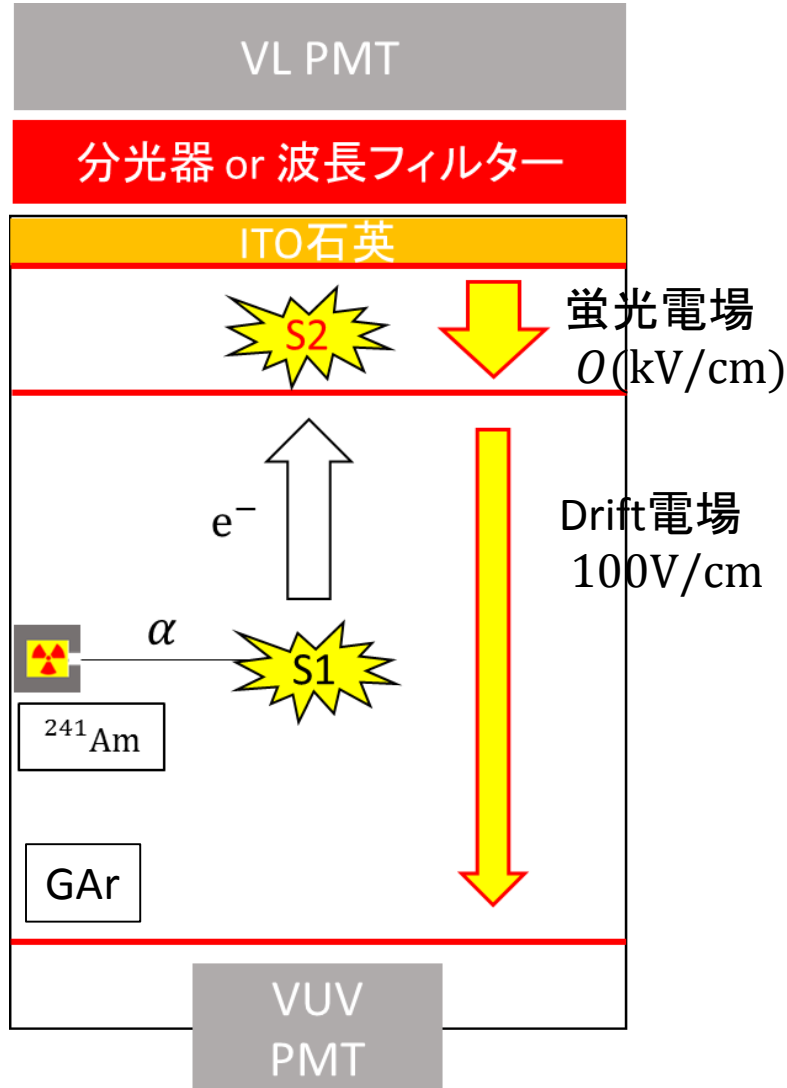
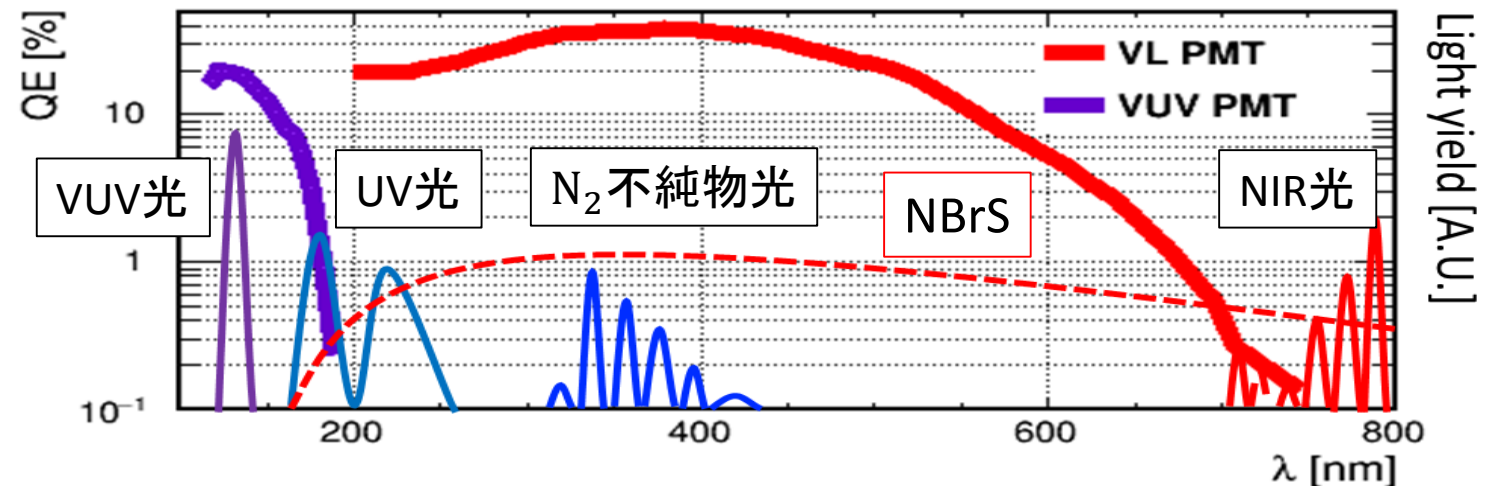
- VL PMT: UV成分、可視光(VL)成分

S2波長スペクトル測定

波長フィルター測定: 電場依存

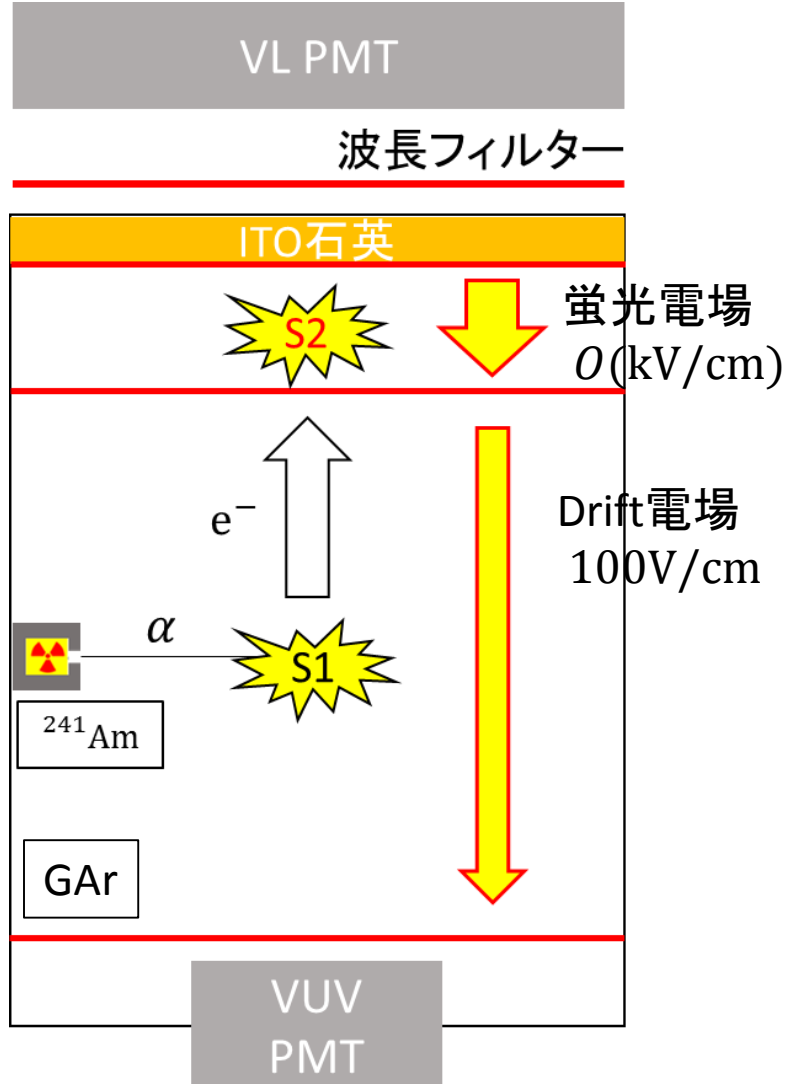
分光器測定: 波長スペクトル概形

## PMTのQEとガスAr発光成分



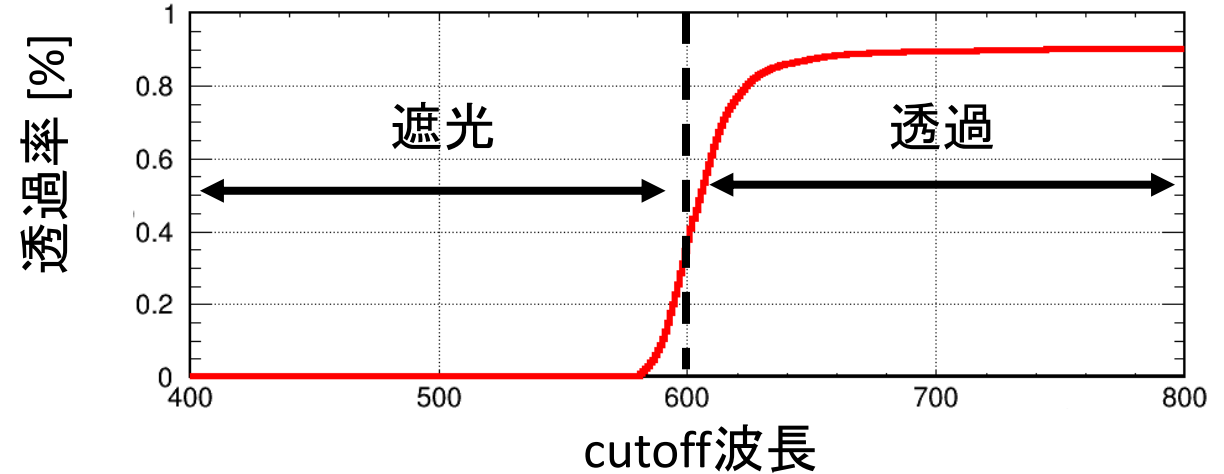
# 波長フィルター測定

## □ セットアップ



## □ 波長フィルター

波長フィルターの透過率：短波長側を遮光



## □ 測定条件

VL PMTの前に波長フィルターを設置

Cutoff波長：なし、380、460、500、540、600nm

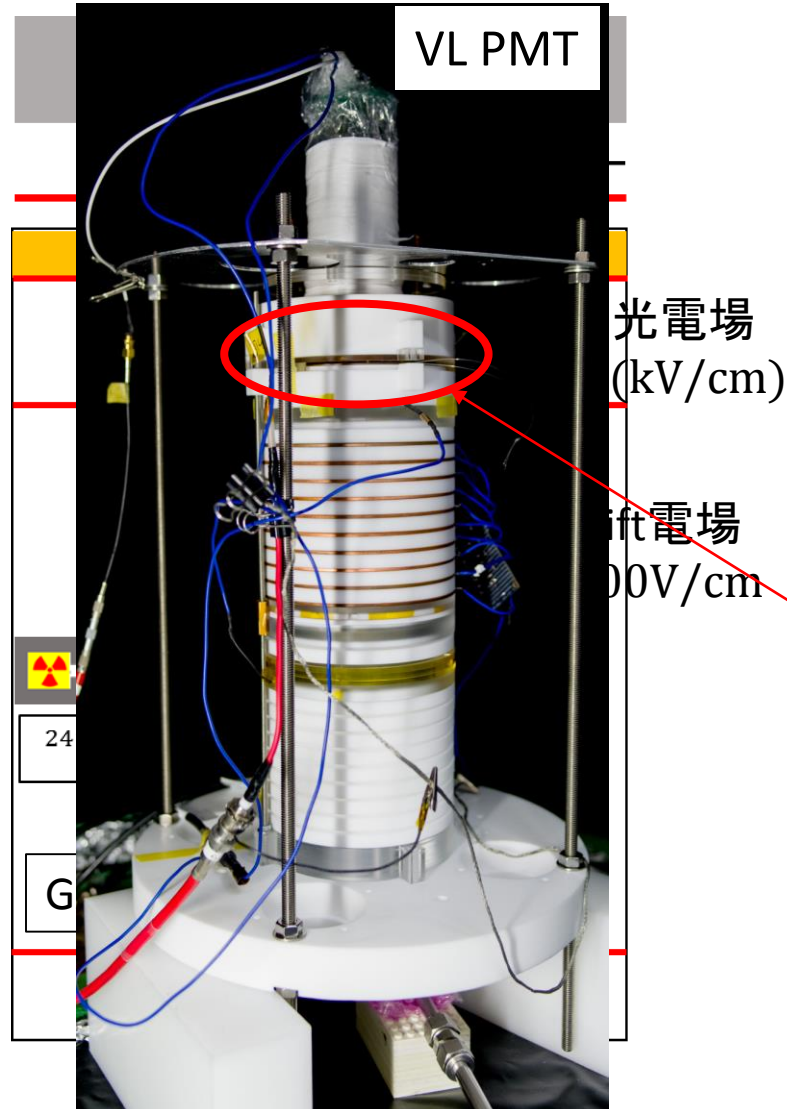
蛍光電場：0.415~2.03kV/cm (1.7~8.3Td)

- 各波長帯のS2光量の電場依存性
- 200~600nmのS2波長スペクトル



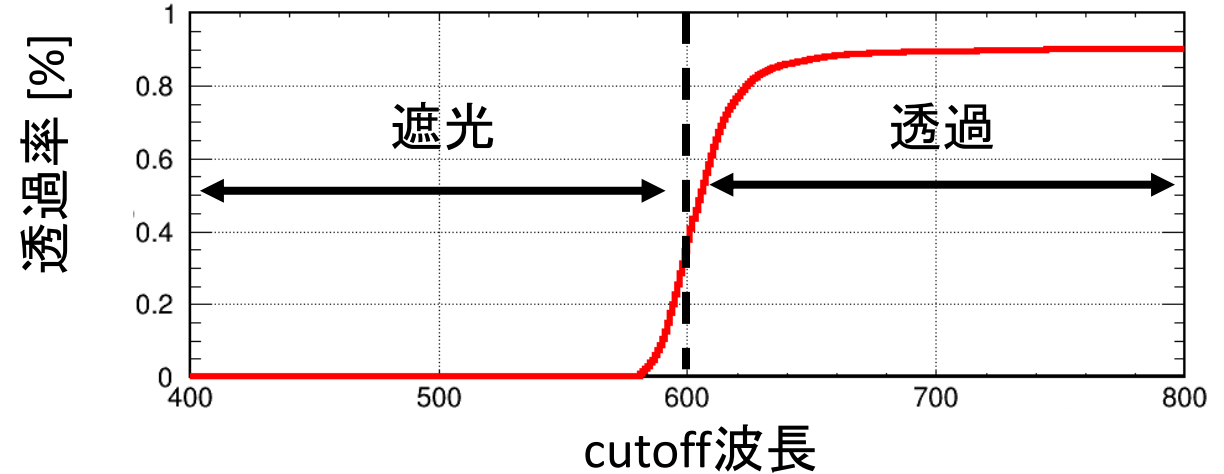
# 波長フィルター測定

## □ セットアップ



## □ 波長フィルター

波長フィルターの透過率：短波長側を遮光



## □ 測定条件

VL PMTの前に波長フィルターを設置

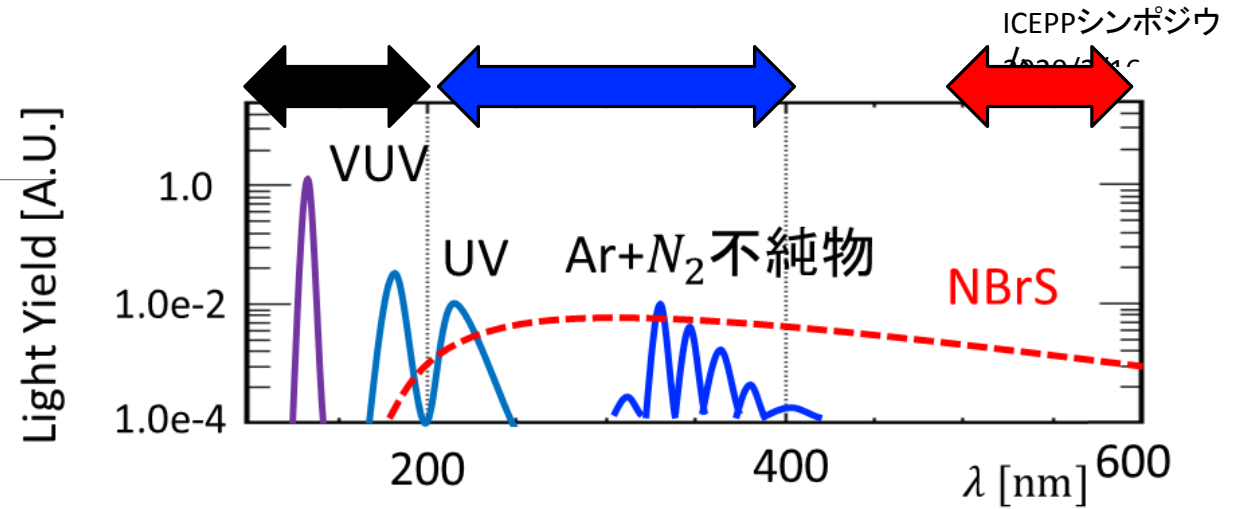
Cutoff波長：なし、380、460、500、540、600nm

蛍光電場：0.415~2.03kV/cm (1.7~8.3Td)

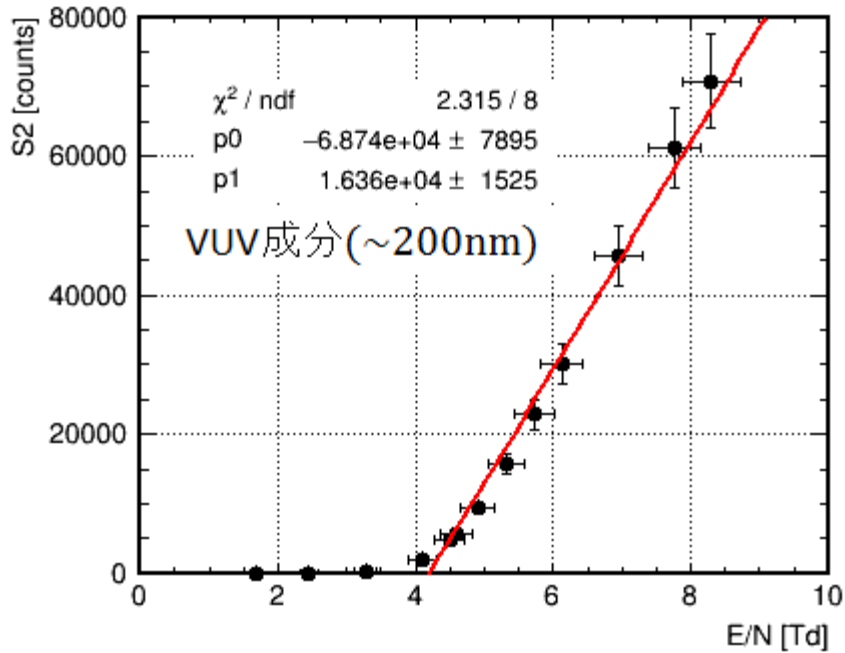
- 各波長帯のS2光量の電場依存性
- 200~600nmのS2波長スペクトル

# 光量の電場依存性

各波長帯ごとのS2光量の電場依存性を測定

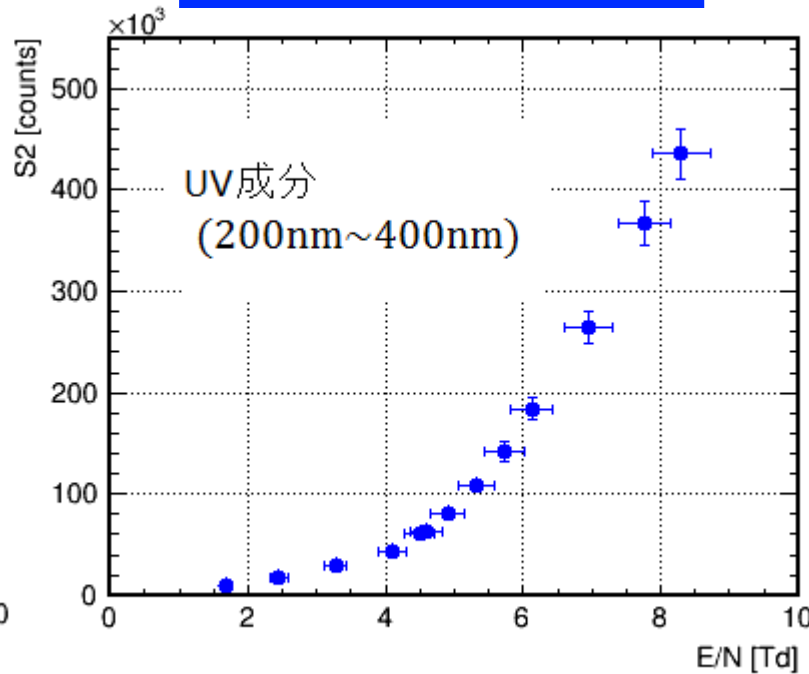


**VUV領域 : ~200nm**



VUV PMTで測定

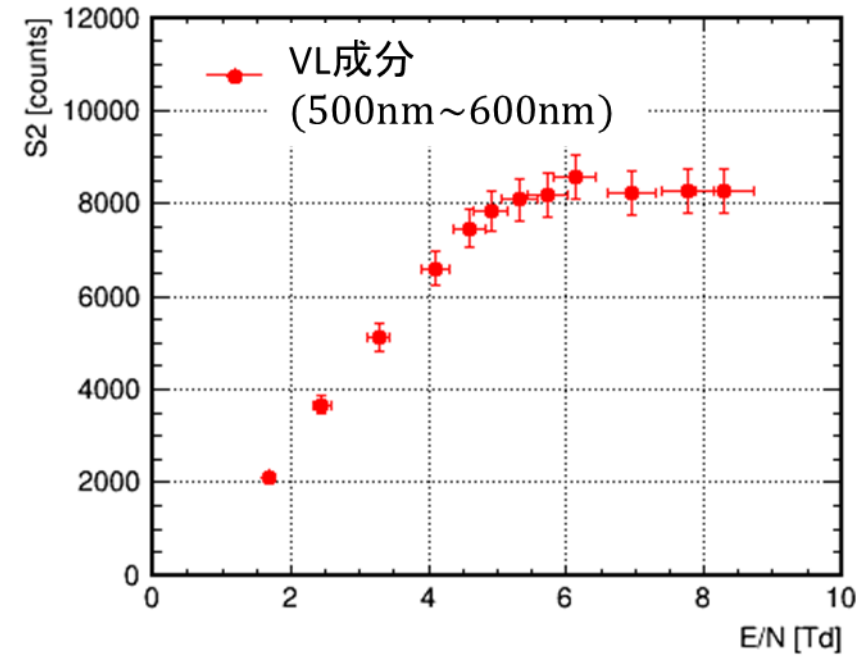
**UV領域 : 200~400nm**



VL PMTで測定した光量の差分で算出

cutoff波長 : なし - 400nm

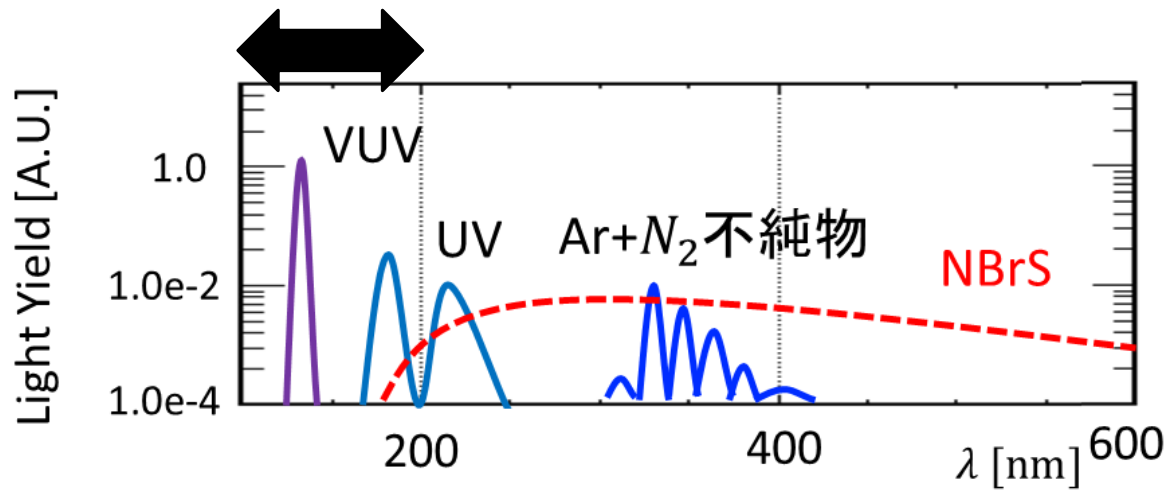
**VL領域 : 500~600nm**



cutoff波長 : 500 - 600nm

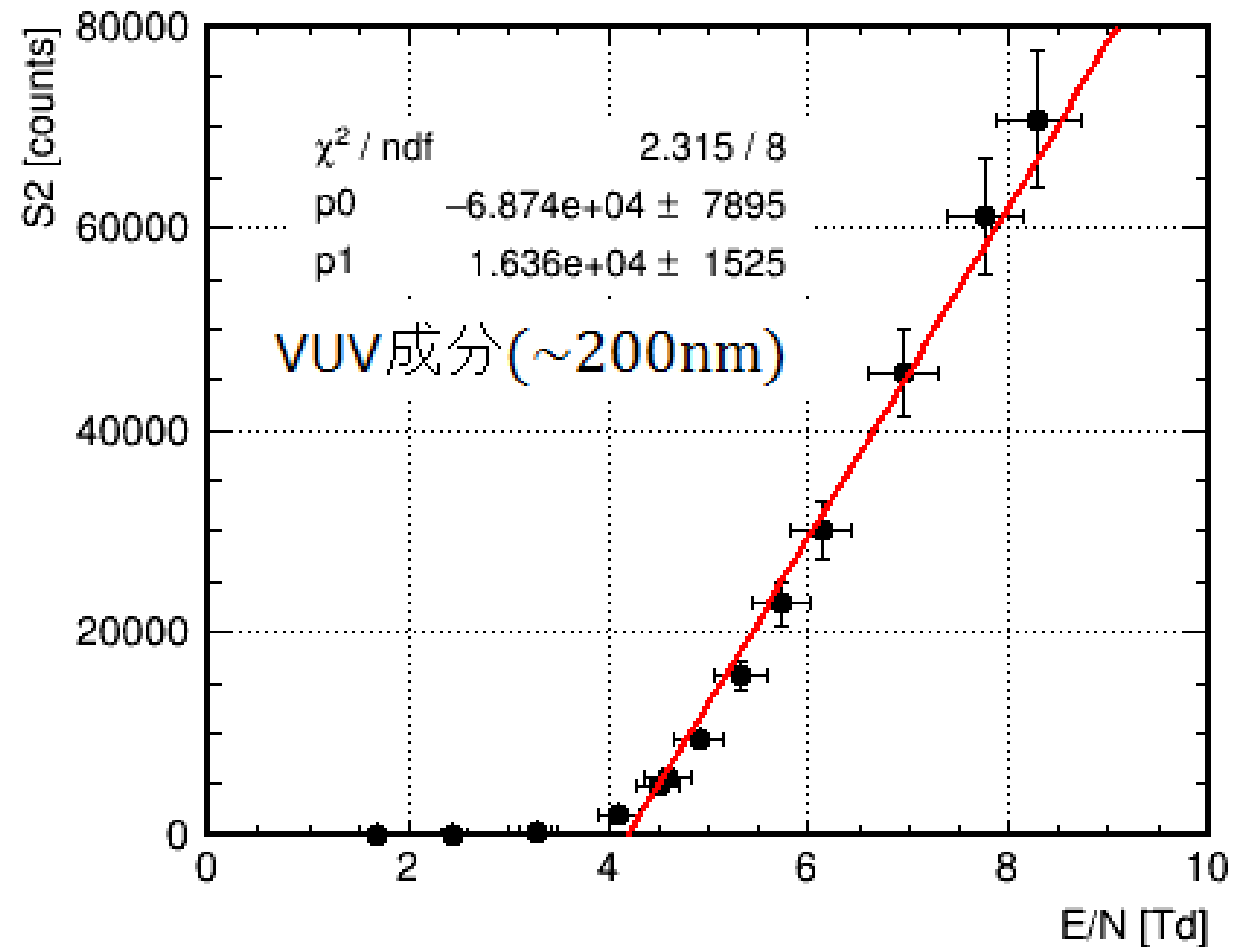
# 光量の電場依存性

## VUV領域：ガスAr蛍光



- 電場に比例して光量が増加
- ある電場点以下では発光しない

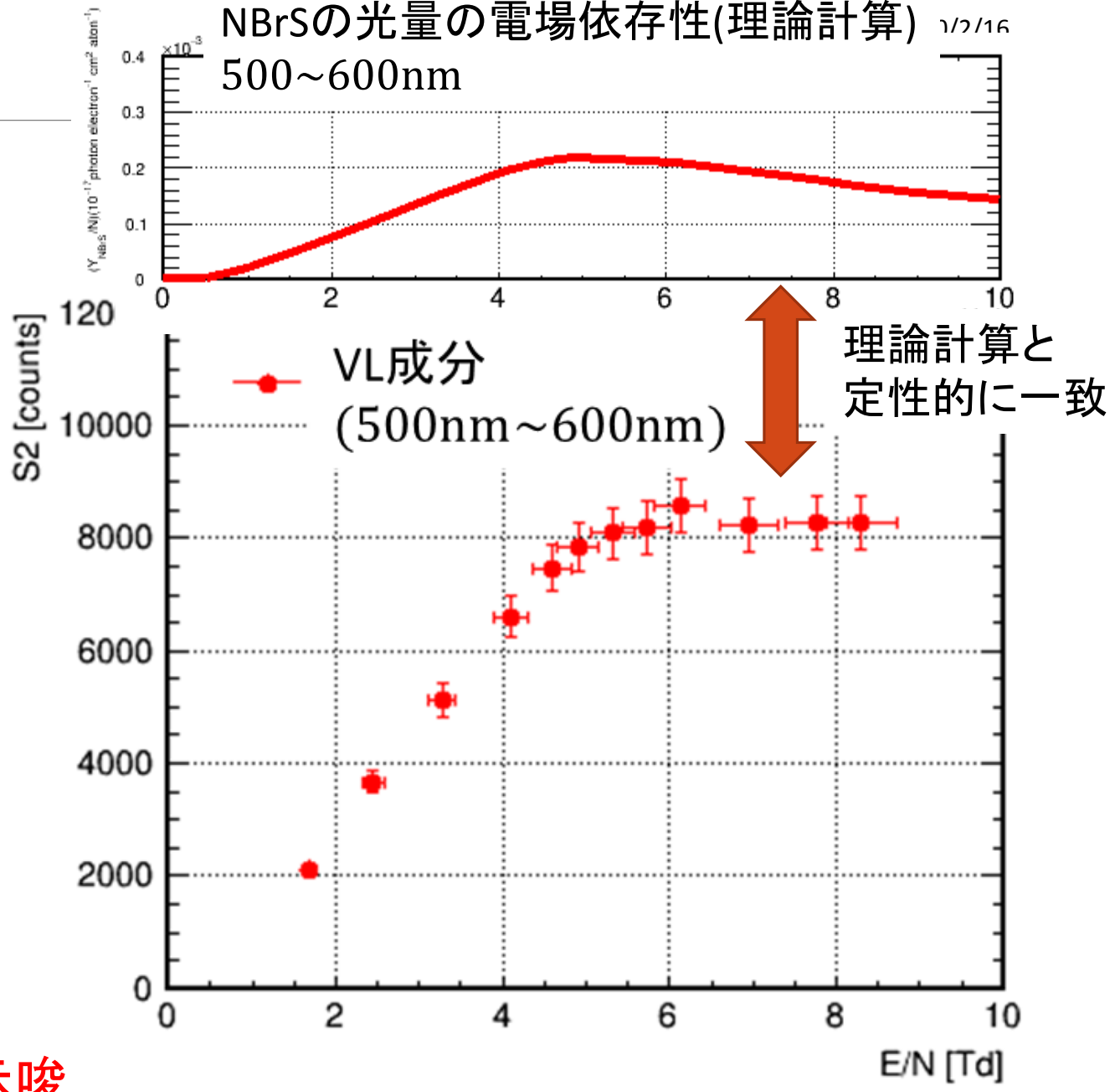
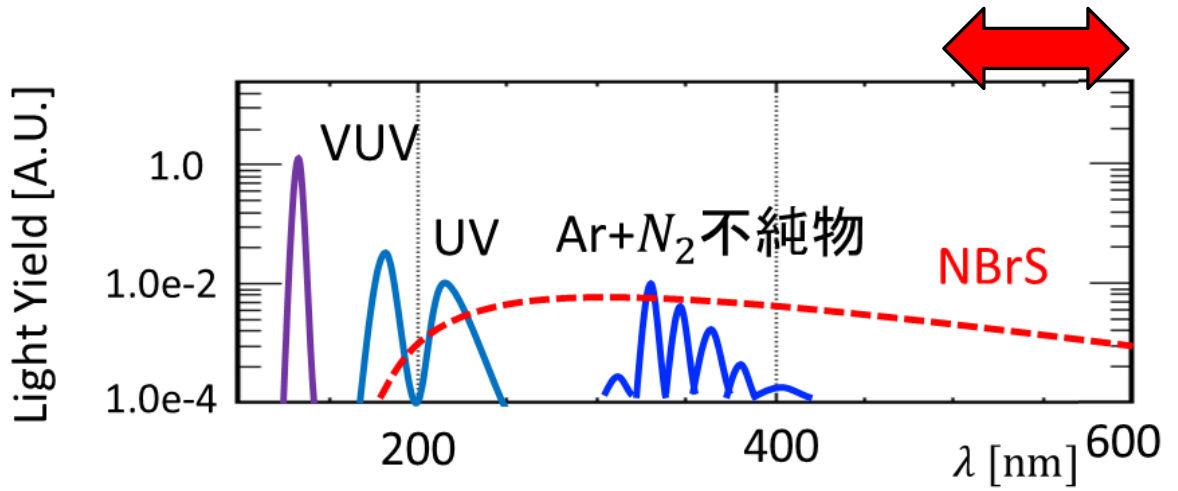
電子比例蛍光



# 光量の電場依存性

NBrSの光量の電場依存性(理論計算) 500~600nm

## VL領域 : NBrS



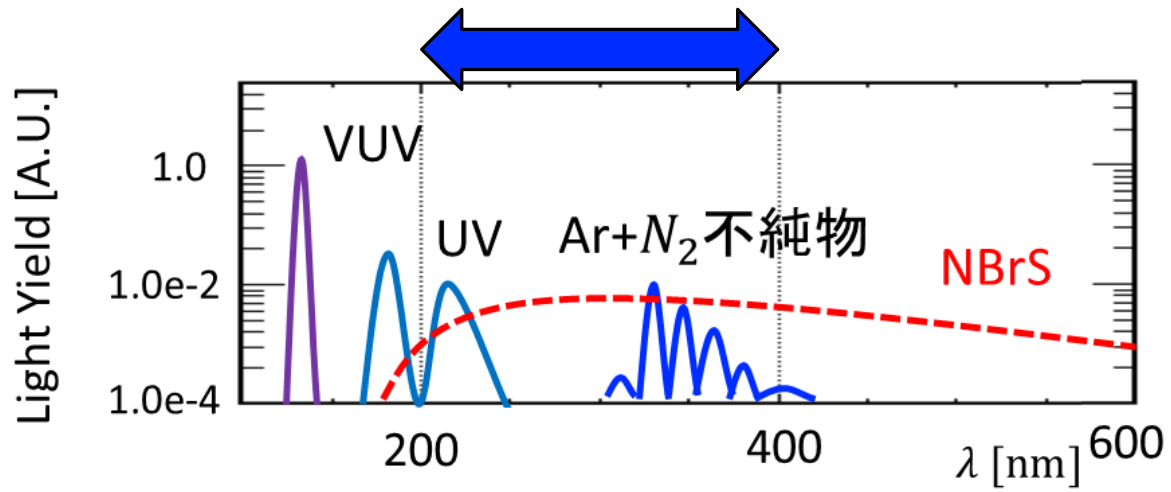
ガスAr蛍光, N<sub>2</sub>不純物が存在しない波長帯での発光を確認

- 高電場領域で光量は増加しない
- 低電場でも発光

➡ NBrS成分の存在を強く示唆

# 光量の電場依存性

## UV領域：ガスAr蛍光+N<sub>2</sub>不純物+NBrS



### 高電場領域

- 光量が電場に比例



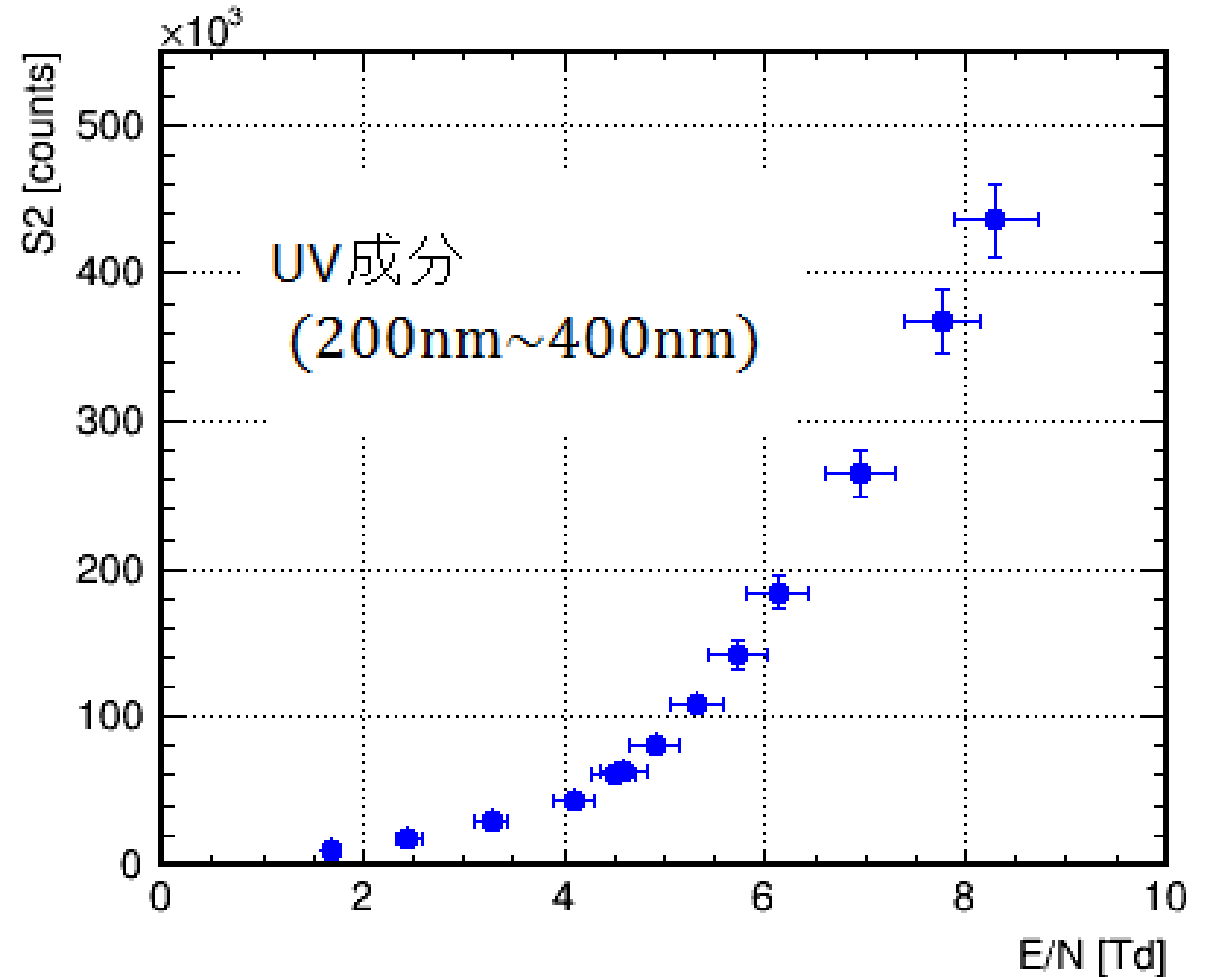
電子比例蛍光

### 低電場領域

- 低電場でも発光



NBrS成分



# S2波長スペクトル

200~600nmを5分割してS2光量を算出、蛍光電場：0.415~2.03kV/cm (1.7~8.3Td)

## □ 波長スペクトルfit

NBrS成分、ガスAr蛍光成分、 $N_2$ 不純物成分でS2波長スペクトルをfit

## Fit方法

### 1. 波長スペクトルのテンプレートを作成

NBrS成分：理論計算値

ガスAr蛍光成分、 $N_2$ 不純物発光成分：文献値

(*G Klein et al, J. Phys. B: At. Mol. Phys. 14 1283. 1981*)

(*TAKAHASHI, T, et. al, NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS IN PHYSICS RESEARCH, 205, 3, 591-596, 1983.*)

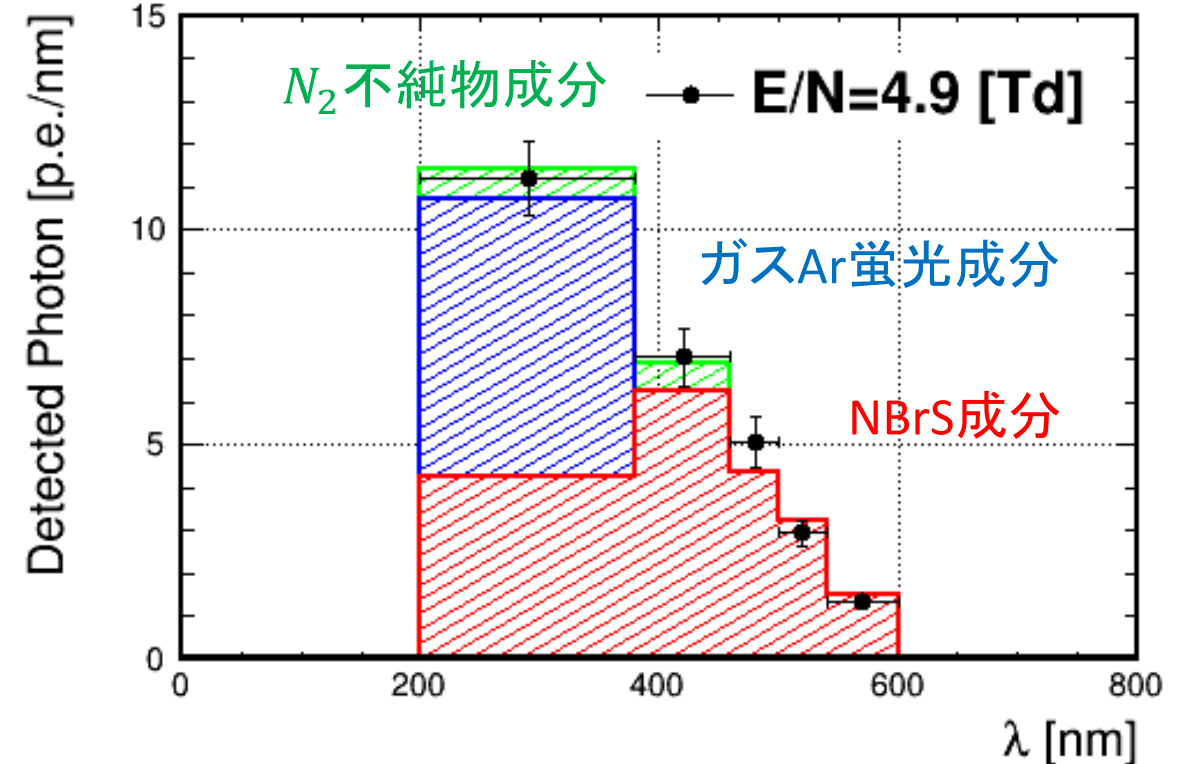
### 2. 各発光成分の光量scale値をfit parameterとして、全10電場点に対して同時にfit

➤ 電場依存性はテンプレートに入れ込み

(ガスAr蛍光、 $N_2$ 不純物成分→電子比例蛍光)

→ **3つのfit parameterで全50binをfit**

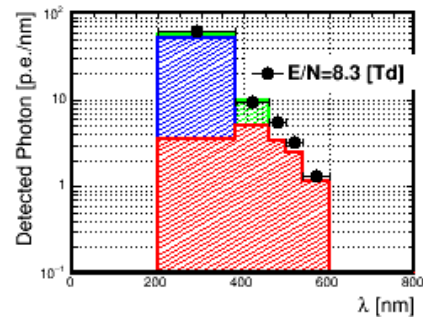
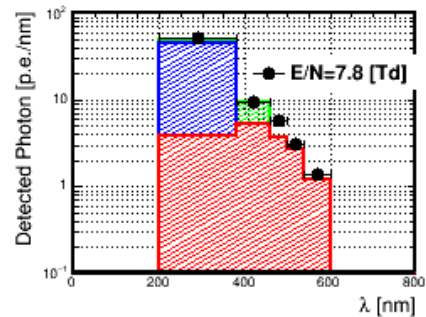
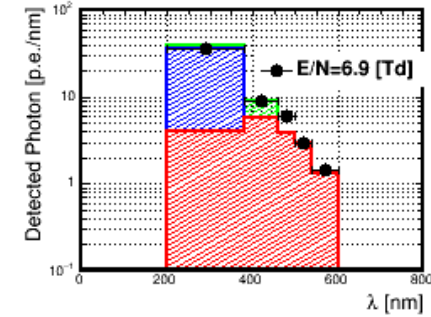
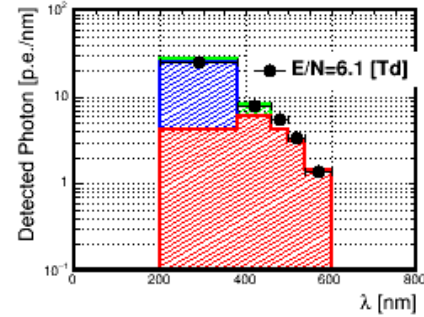
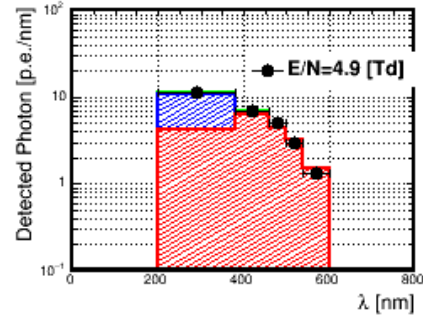
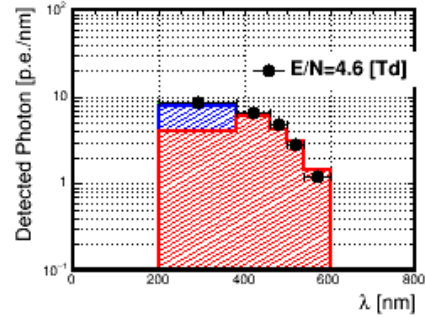
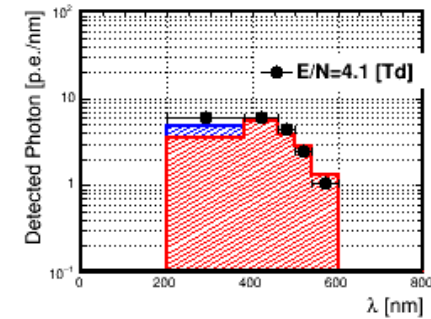
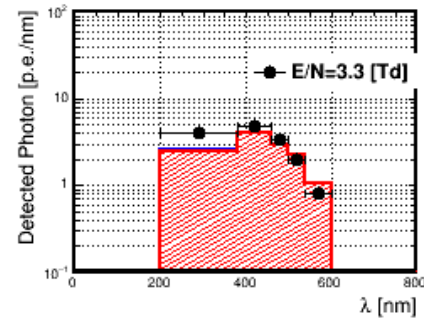
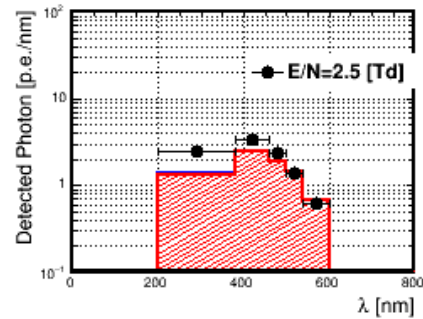
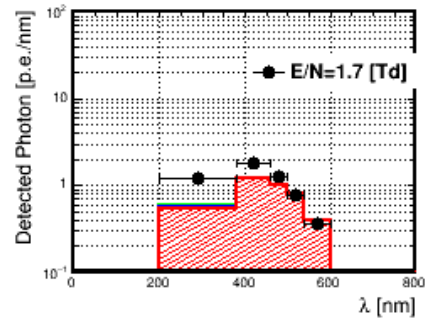
## Fit結果



500nm以上の領域：**NBrS成分のみ説明→NBrS成分が存在することと無矛盾**

# S2波長スペクトルfit

## □ fit結果(全電場点)



- S2 Data
- ▨ NBrS成分
- ▨ ガスAr蛍光成分
- ▨  $N_2$ 不純物発光成分

3つの発光成分で測定データを再現

• 低電場領域 (< 4.0Td)

理論計算の不定性

VL PMTのQEのcutoff

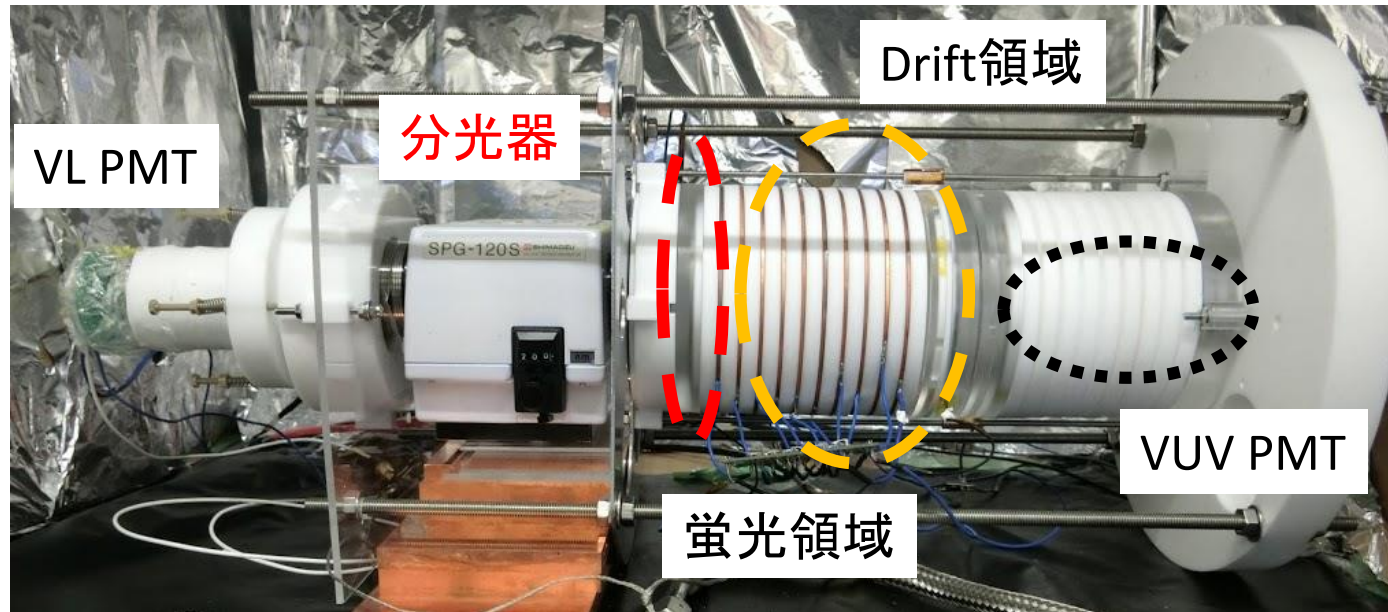
→ 今後、精査が必要

# 分光器測定 (preliminary)

2020/2/13~14にデータ取得

## □ セットアップ

VL PMTの前に分光器を設置  
(分光器の設置の都合上、検出器は横置き)



## □ 分光器

回折格子型分光器

測定可能波長領域: 200~900nm

波長分解能: ~30nm(3.3nm~30nmで可変)

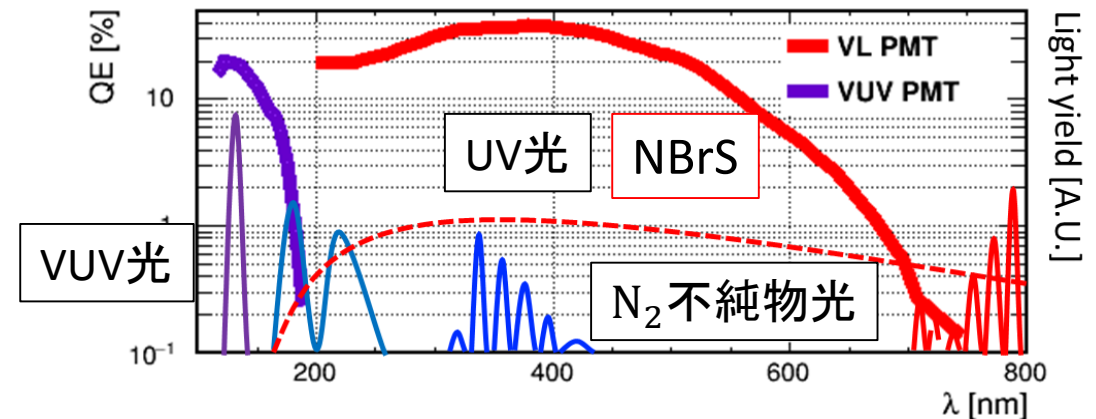
## □ 測定条件

測定波長領域: 50~900nm

蛍光電場: 2030V

波長フィルター: なし、390nm

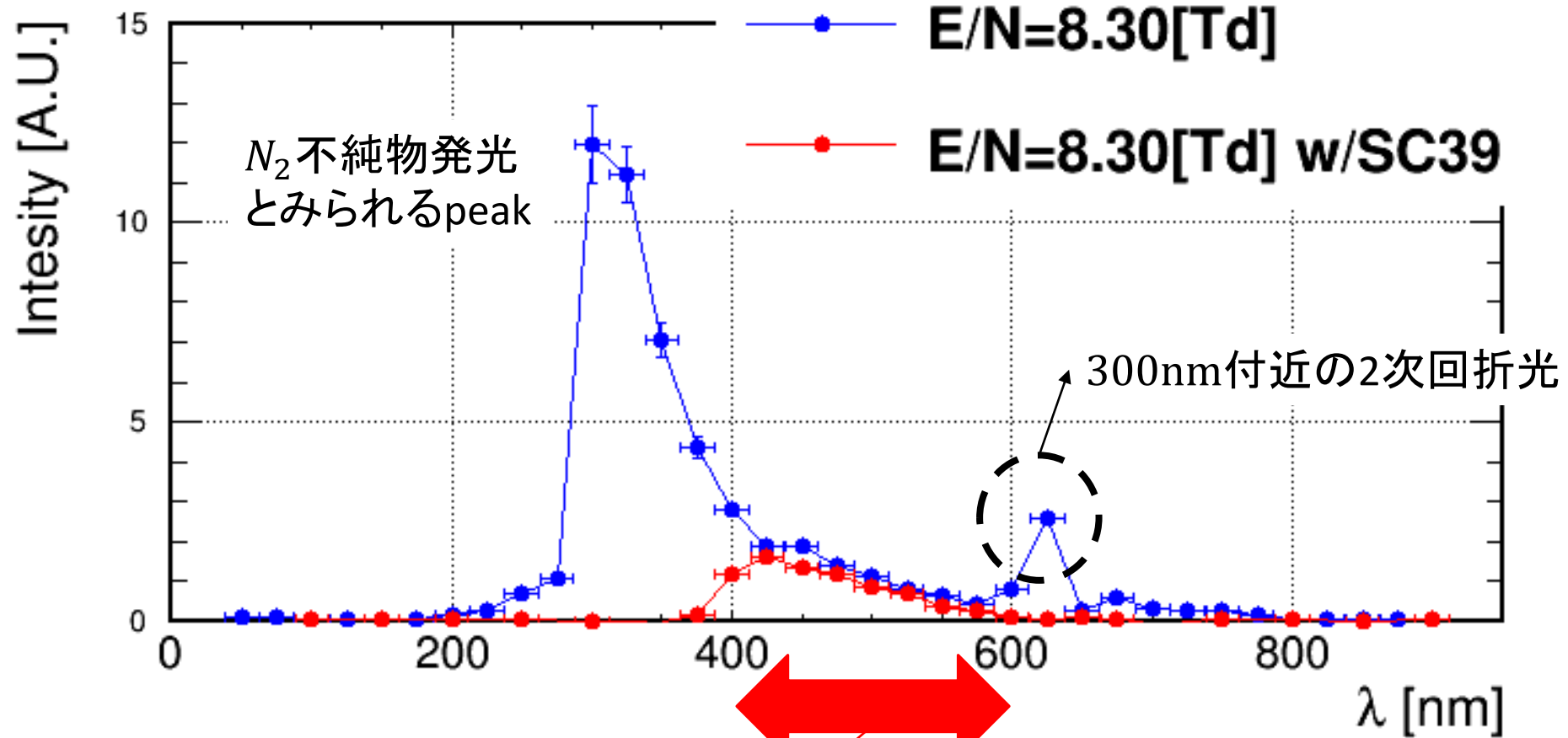
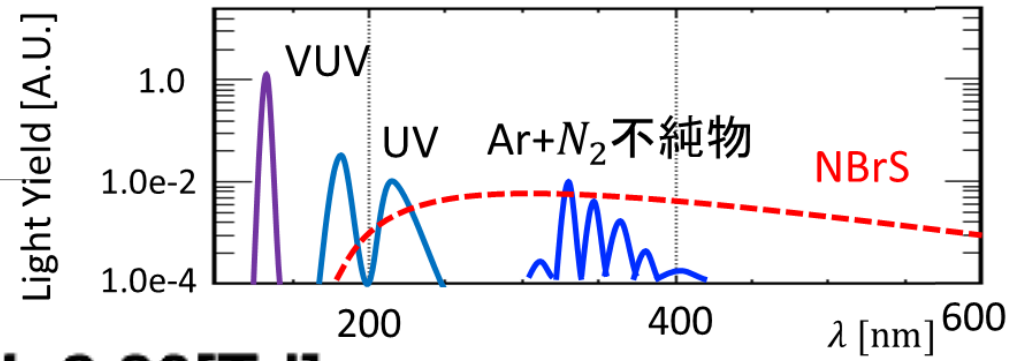
➤ 2次回折光の影響を考慮





# 測定結果 (preliminary)

## □ S2波長スペクトル



可視光領域にNBrS成分とみられる連続スペクトルを観測か

# まとめ・今後の展望

## □ まとめ

中性制動放射 (NBrS) : S2発光成分の新たな発光成分

希ガス検出器への応用が期待される

(直接光読み出し、位置再構成の向上、入射粒子の到来方向の推測など)

常温ガスArセットアップを作成し、S2波長スペクトルを測定

→NBrS成分の存在を強く示唆する結果が得られた

## □ 今後の展望

### • S2波長スペクトル

測定の不定性 (PMT QE)、理論計算値の不定性の精査

分光器測定の結果の精査

- 波長フィルター測定との比較
- GAr発光成分fit

### • S2光子放出方向測定

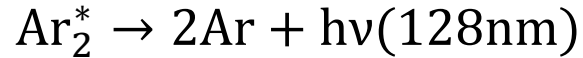
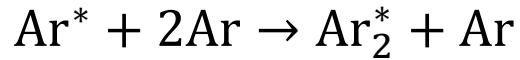
NBrS成分に光子放出方向の偏りがあるか検証

# Back up

---

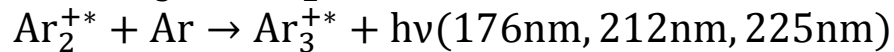
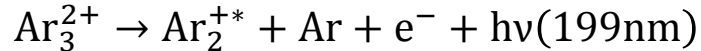
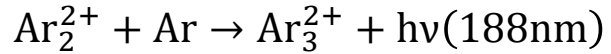
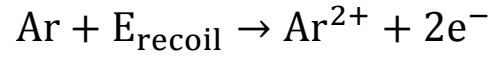
# ガスAr蛍光発光機構

## VUV成分

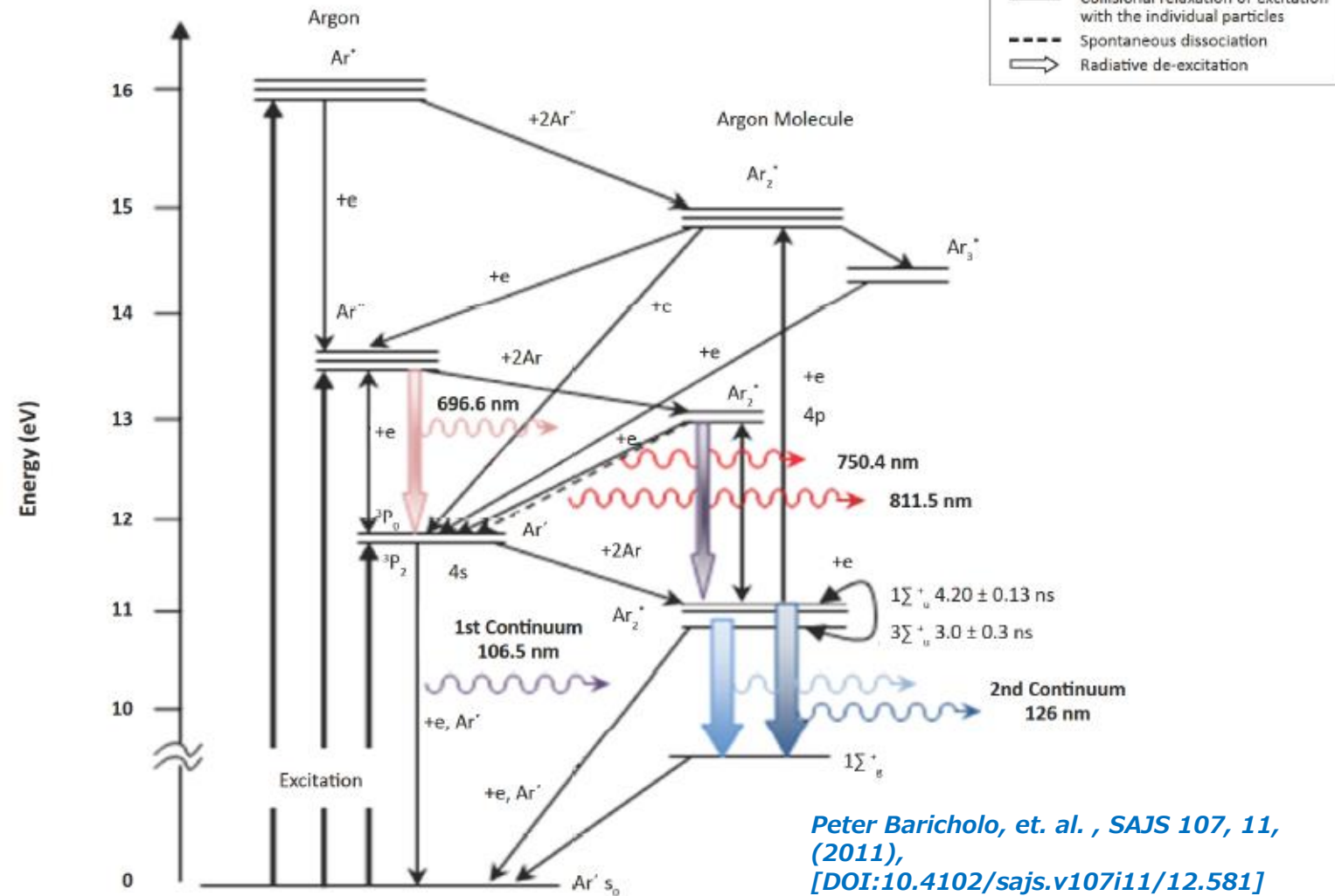
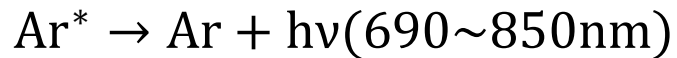


## UV成分 (発光機構には諸説ある)

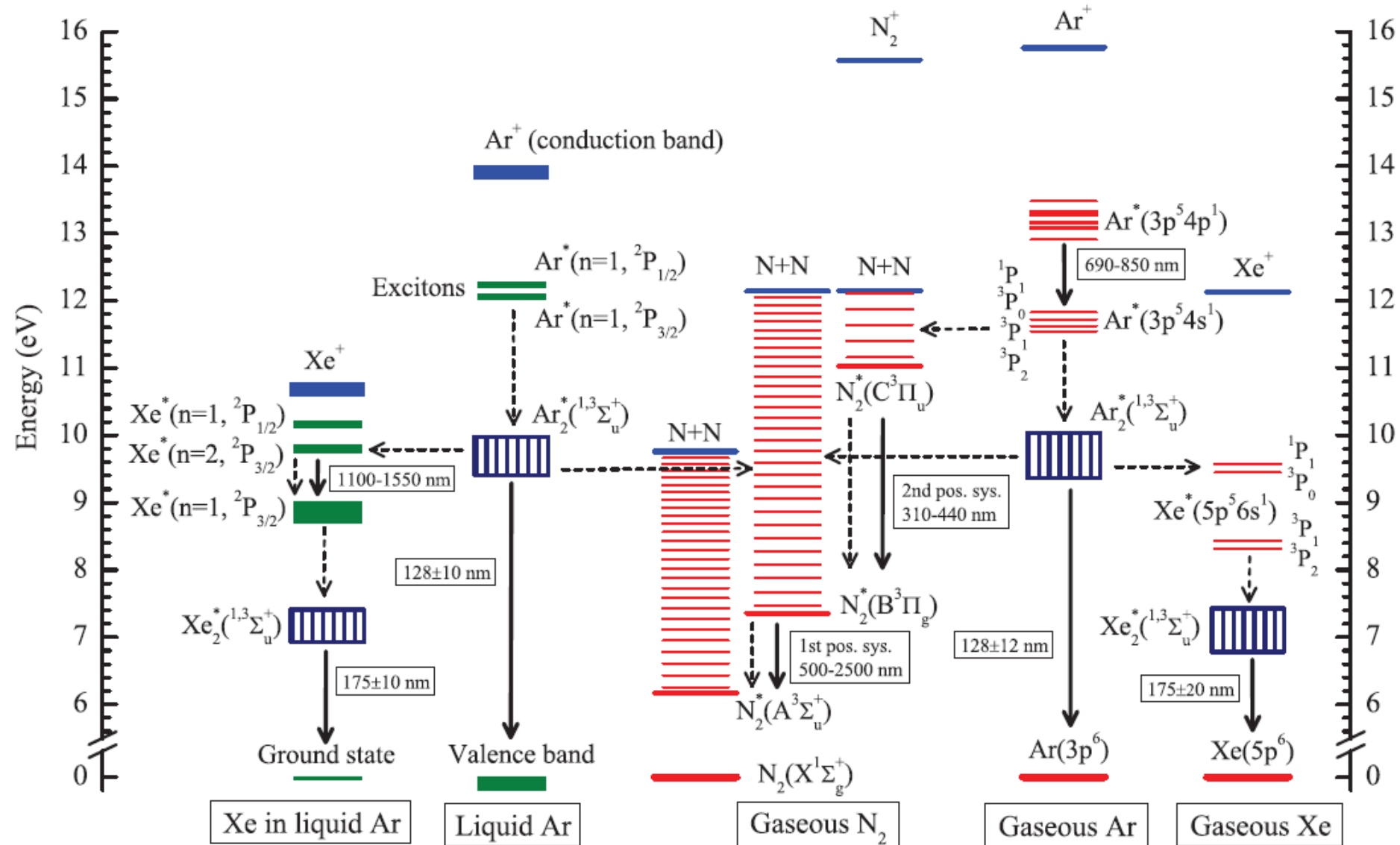
光量はVUV成分の1/10程度



## NIR成分

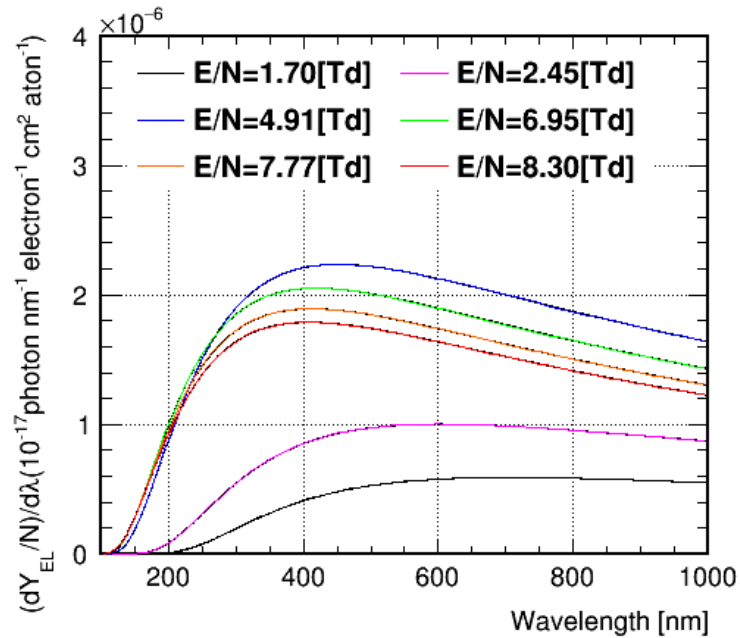


# 不純物発光

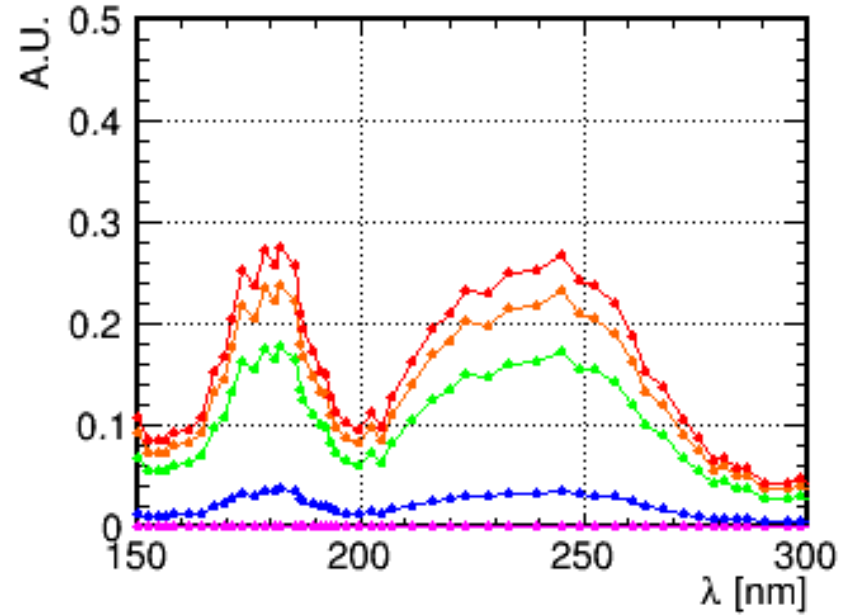


# 波長スペクトルのテンプレート

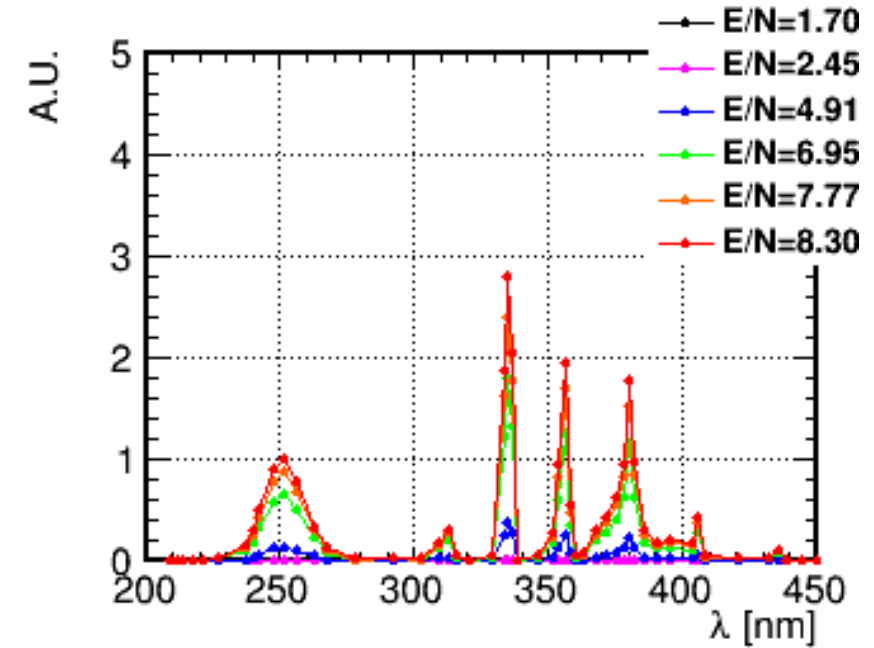
## 中性制動放射



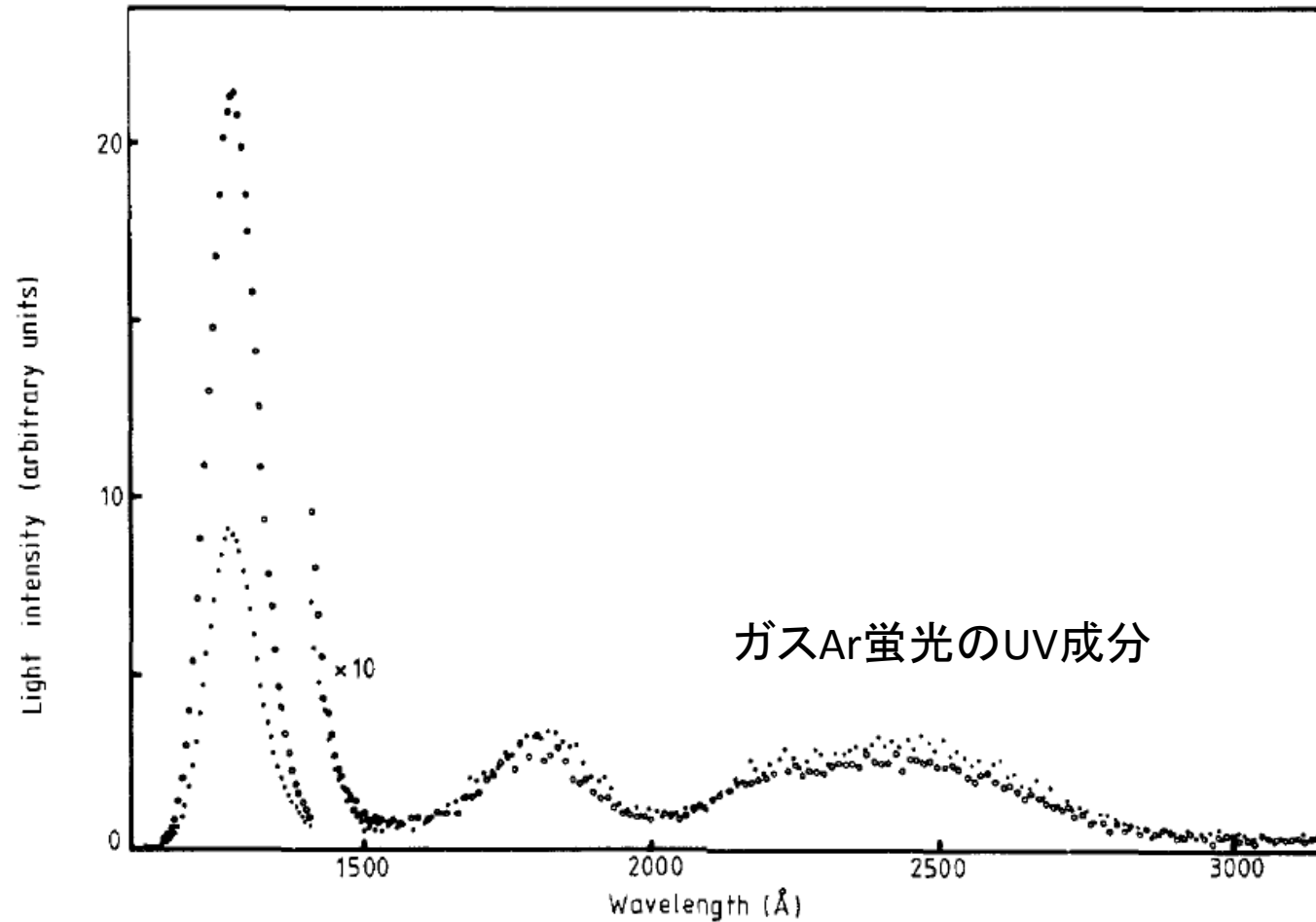
## ガスAr発光のUV成分



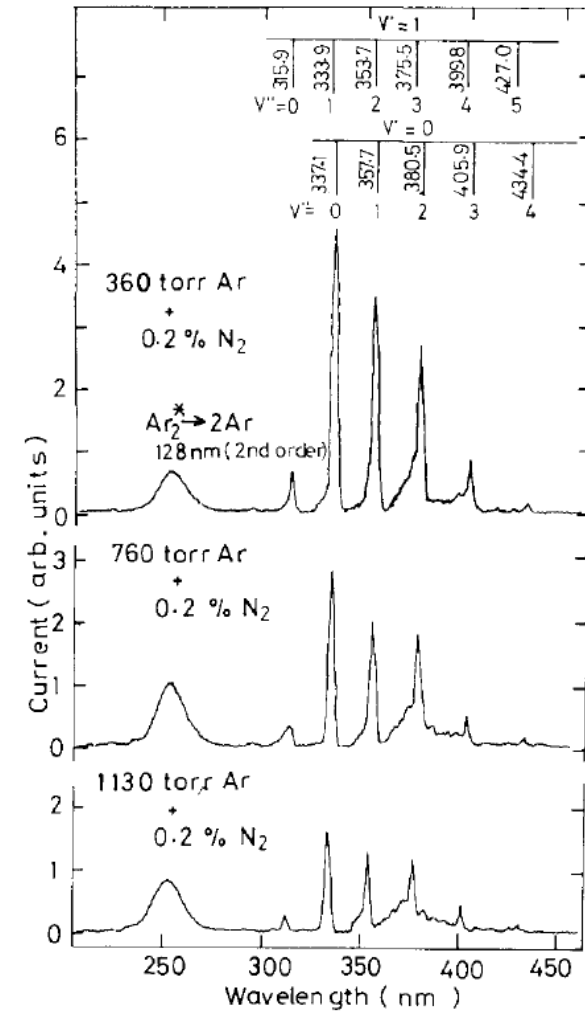
## $N_2$ 不純物発光成分



# 波長スペクトル(文献値)

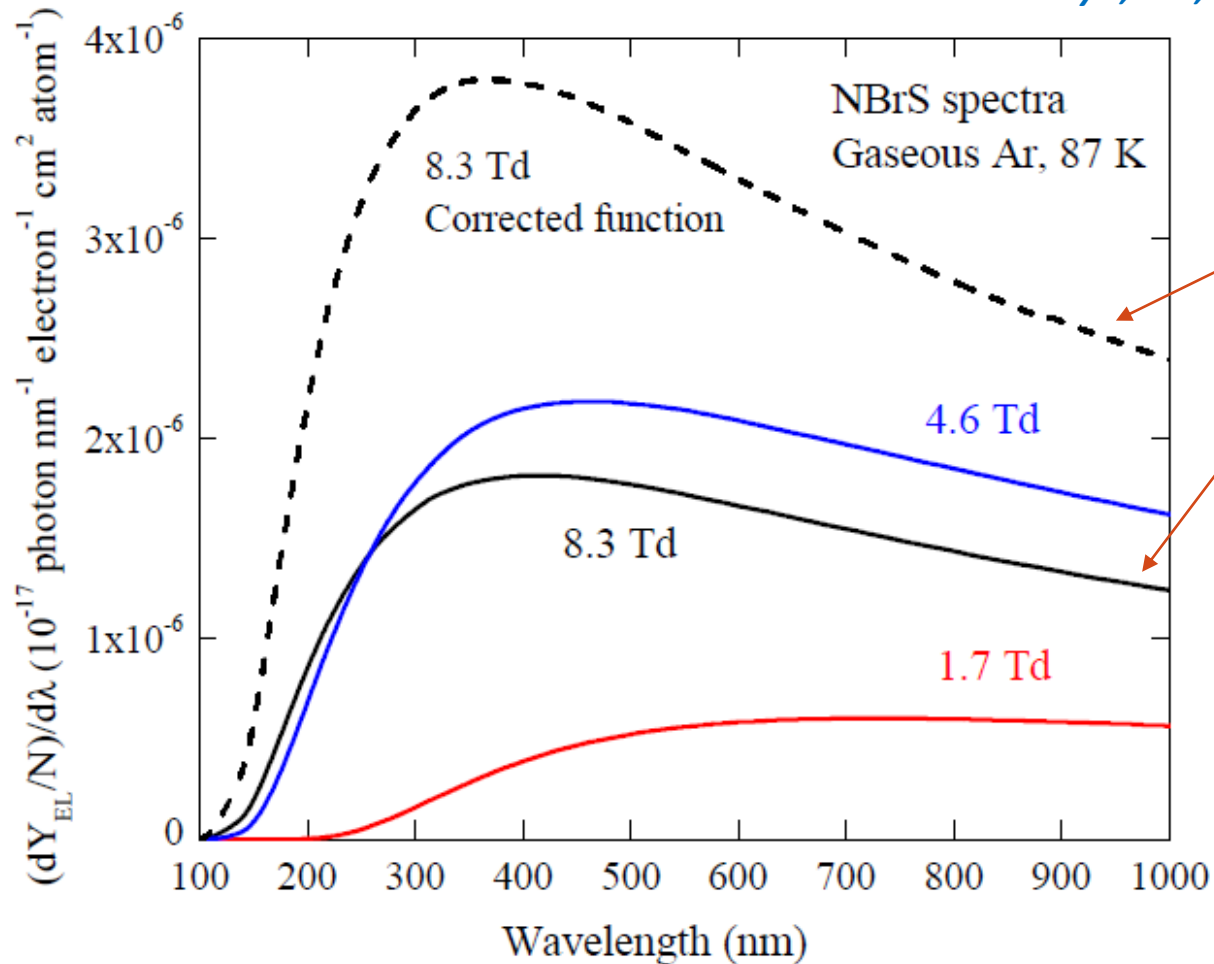


## $N_2$ 不純物発光成分



# 中性制動放射の理論計算値

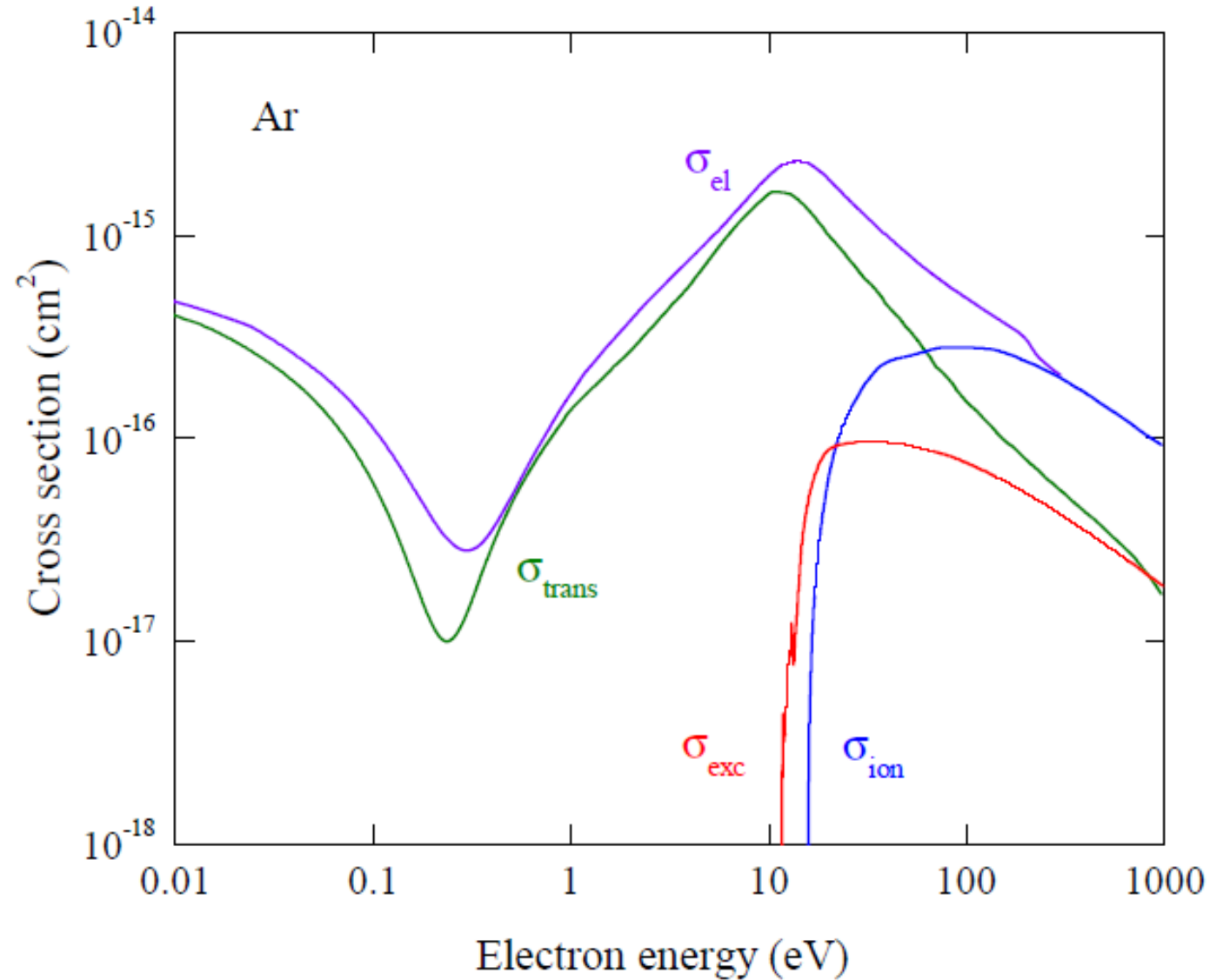
A. Buzulutskov et al., *Astropart. Phys.*, 103, (2018), 29-40.



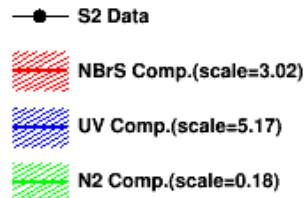
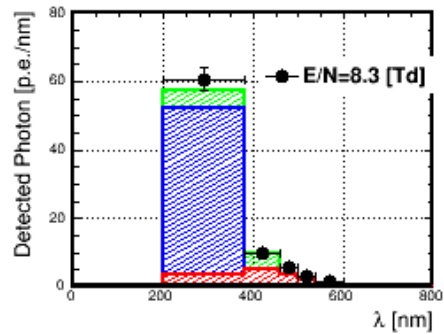
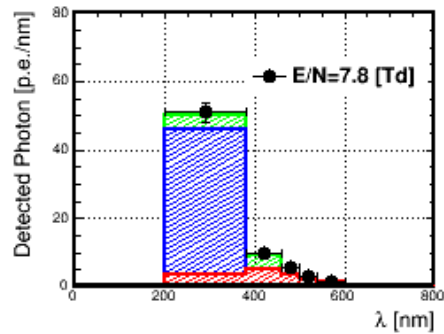
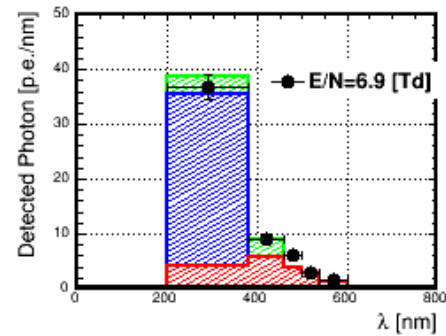
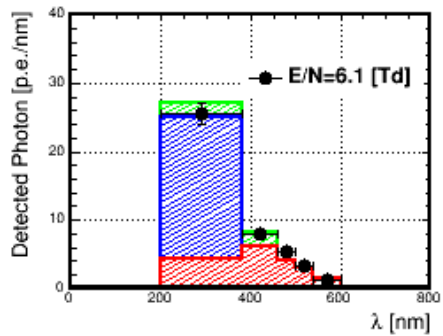
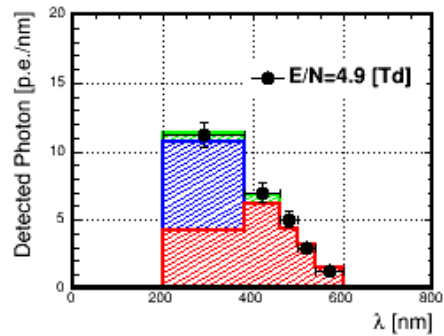
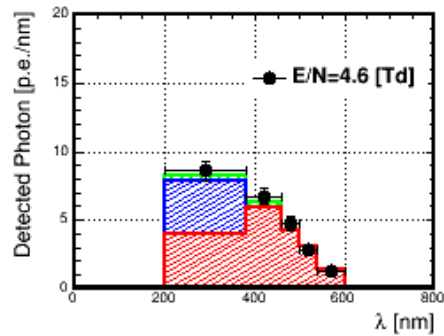
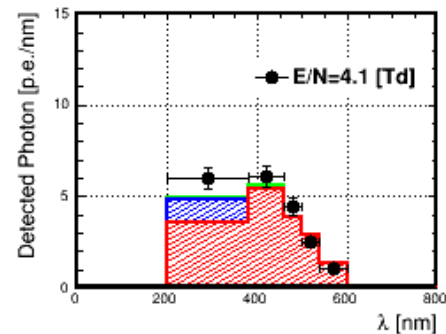
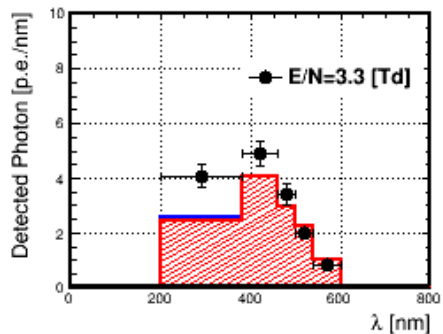
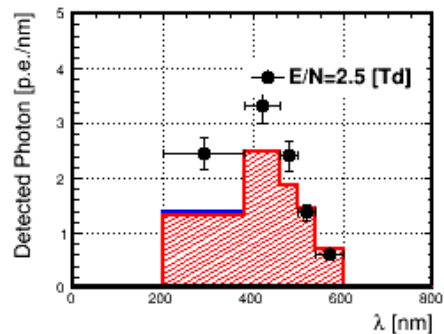
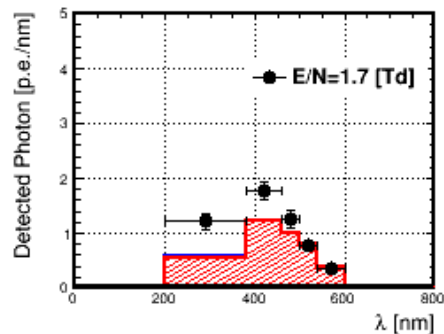
電離電子のエネルギー分布のモデルの違い  
光量: 最大200%の差異



# Arと電子の反応断面積



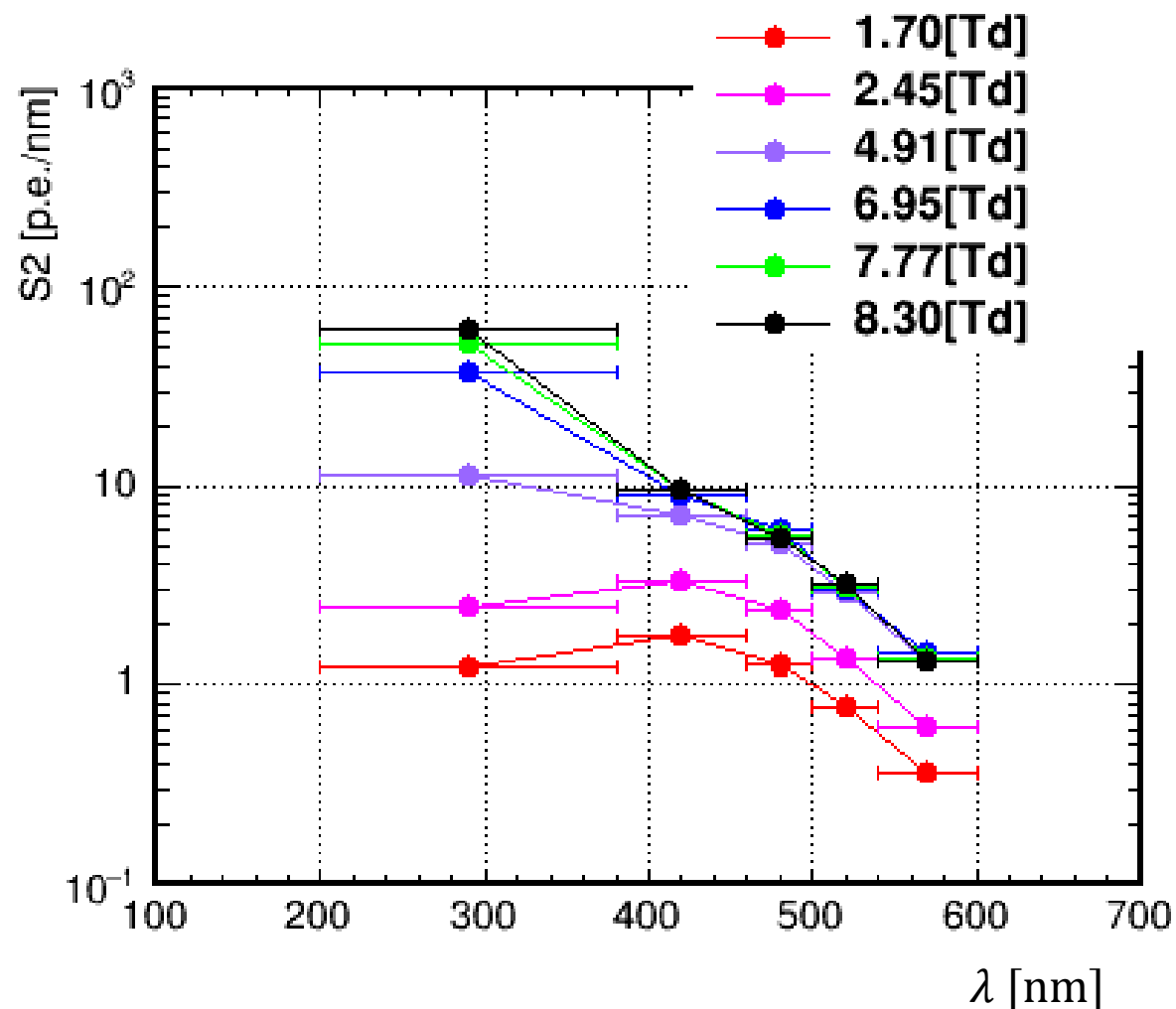
# Fit結果



# S2波長スペクトル測定結果

蛍光電場: 0.415~2.03kV/cm(1.7~8.3Td)

各cutoff波長のS2光量の差分をとり、波長スペクトルを算出



# S2波長スペクトル

## □ 波長スペクトルfit

各発光成分の光量scale値をfitパラメータとして、全電場点を同時にfit

Fit関数

$$LY_i(dV) = \int \epsilon(\lambda) S(\lambda, dV) QE(\lambda) F_i(\lambda) d\lambda$$

$$S(\lambda, dV) = p_1 S_{NBrS} + p_2 S_{ArUV} + p_3 S_{ArN_2}$$

$\epsilon(\lambda)$  : 光子到達効率

$QE(\lambda)$  : VL PMTのQE

$F_i(\lambda)$  : 波長フィルターの透過率

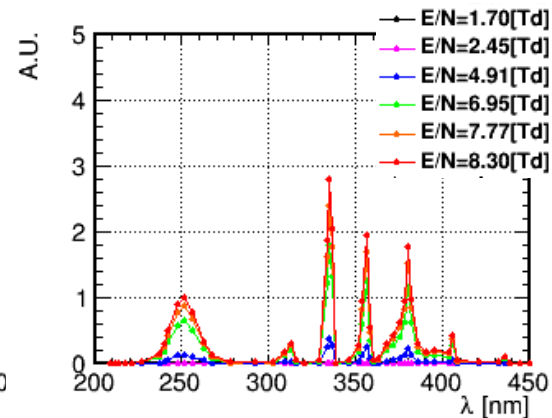
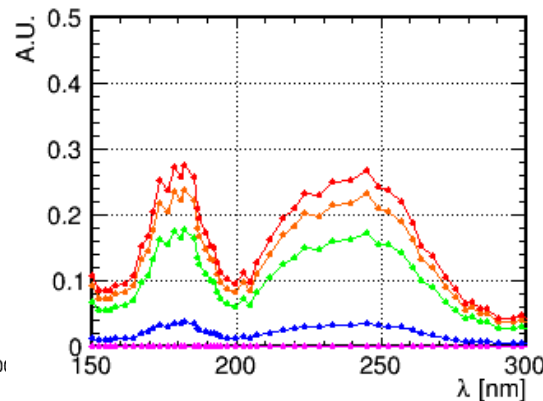
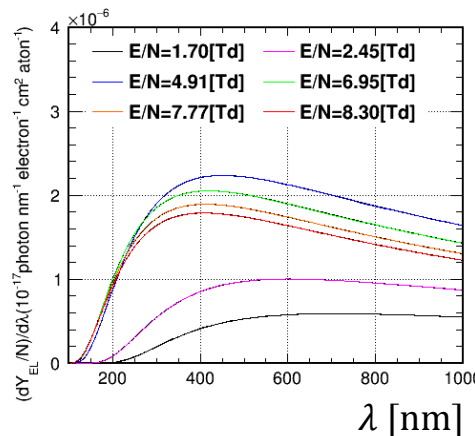
$S(\lambda, dV)$  : 波長スペクトルの和

$p_{j=1,2,3}$  : fit parameter

中性制動放射

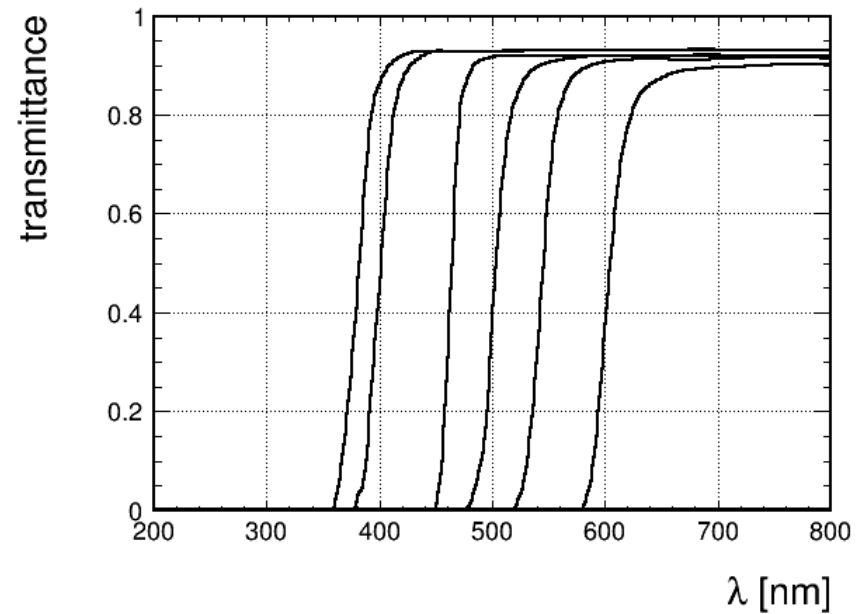
ガスAr発光のUV成分

$N_2$ 不純物発光成分

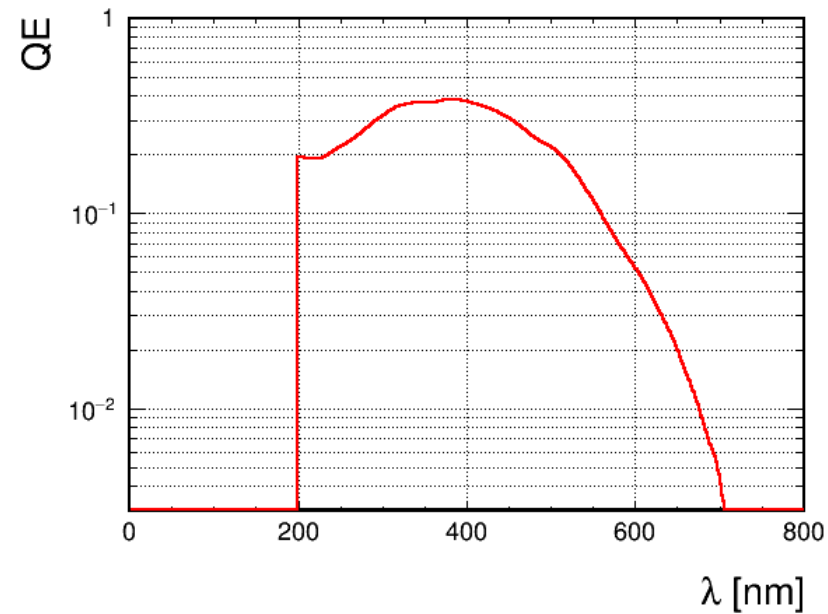


# fit関数

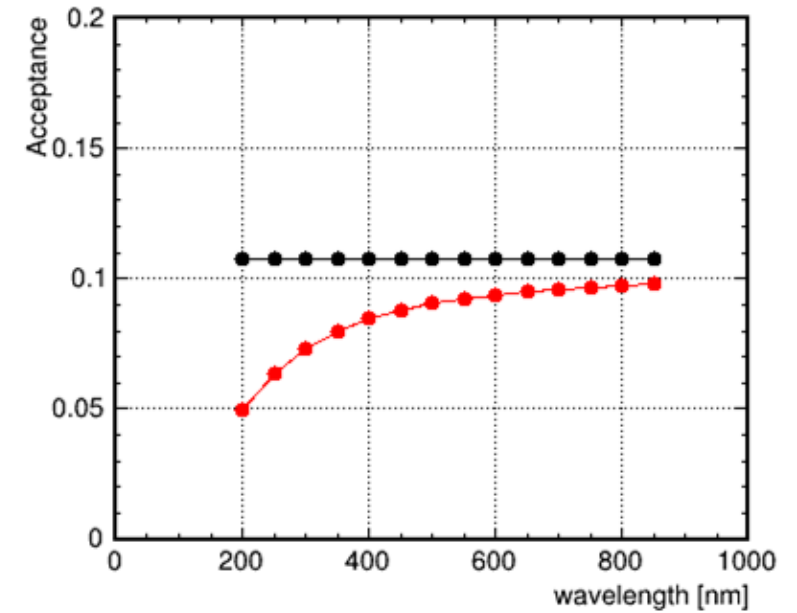
波長フィルターの透過率:  $F_i(\lambda)$



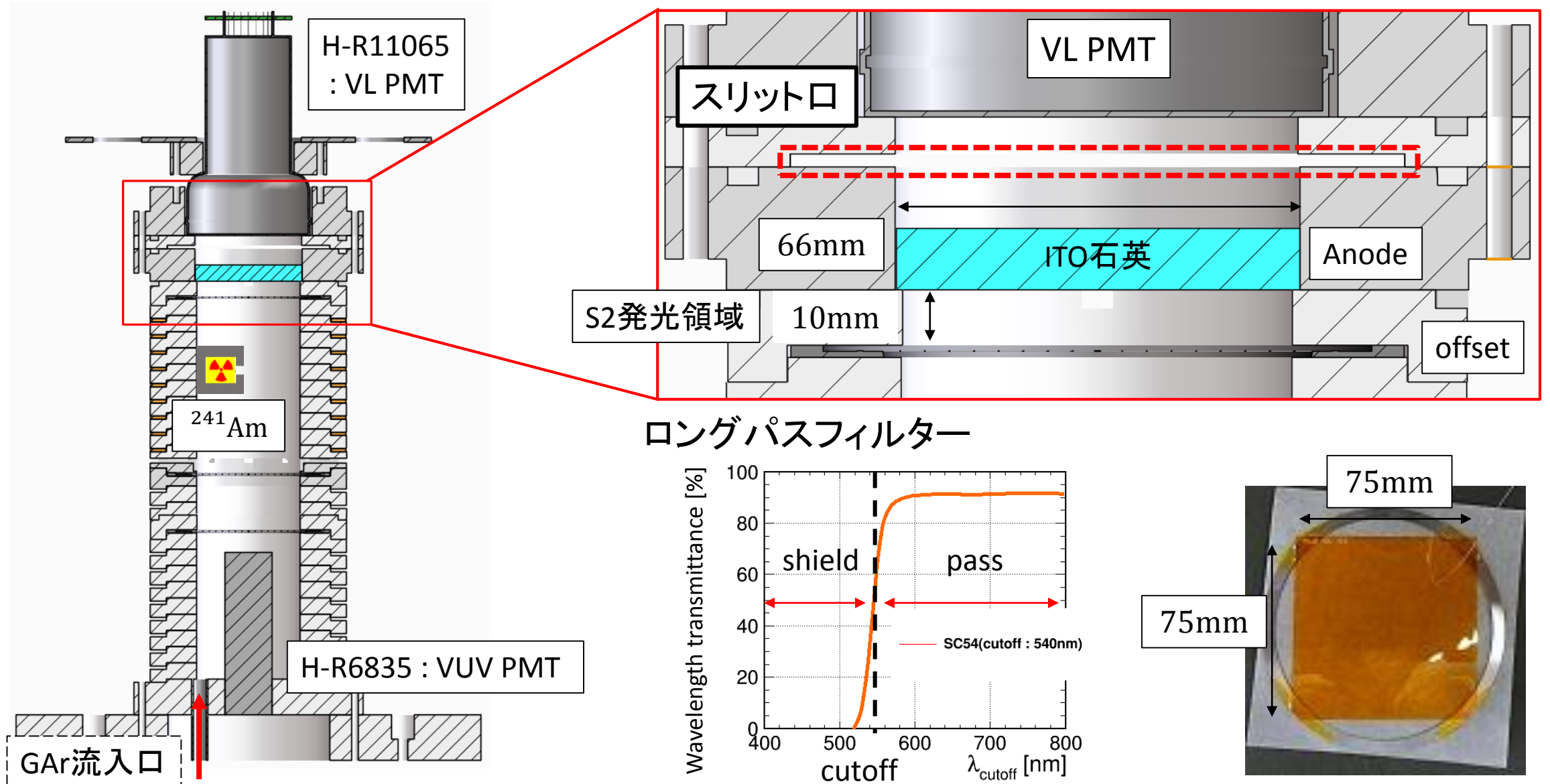
PMTのQE:  $QE(\lambda)$



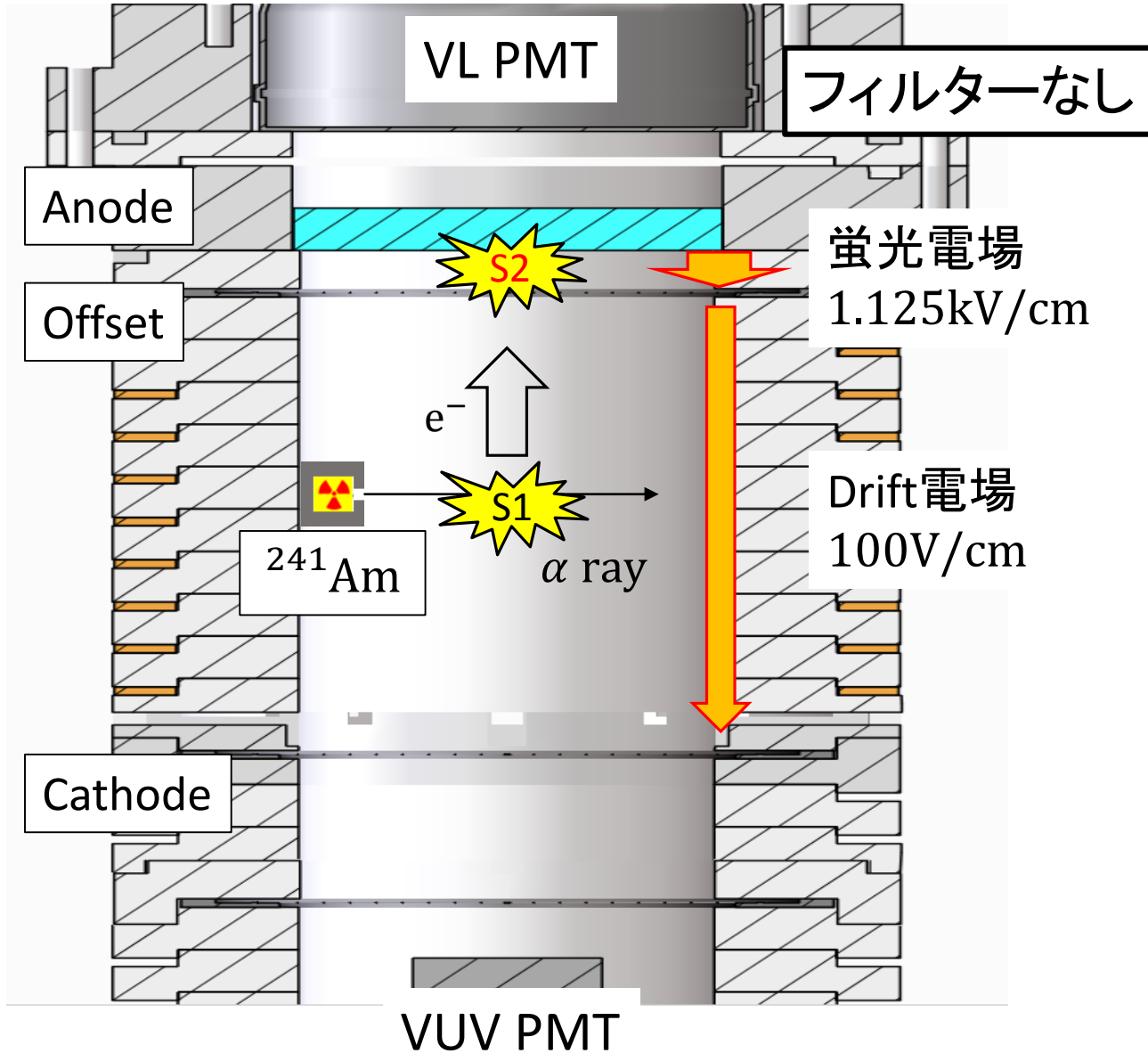
光子到達効率:  $\epsilon(\lambda)$



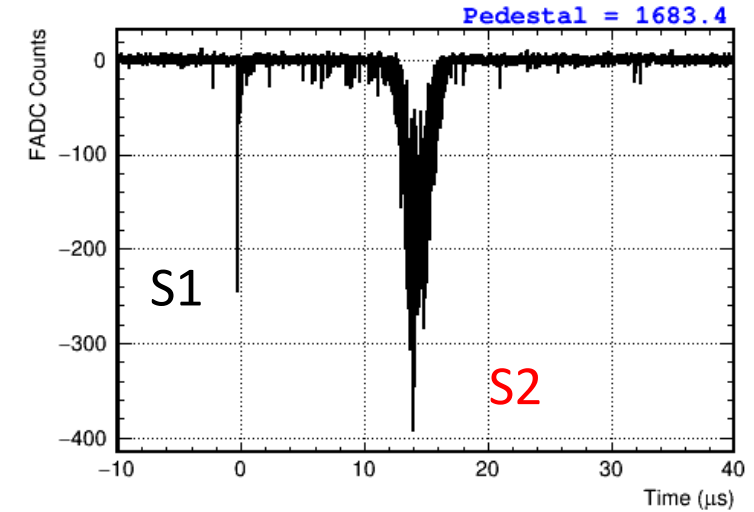
# セットアップ(ロングパスフィルター)



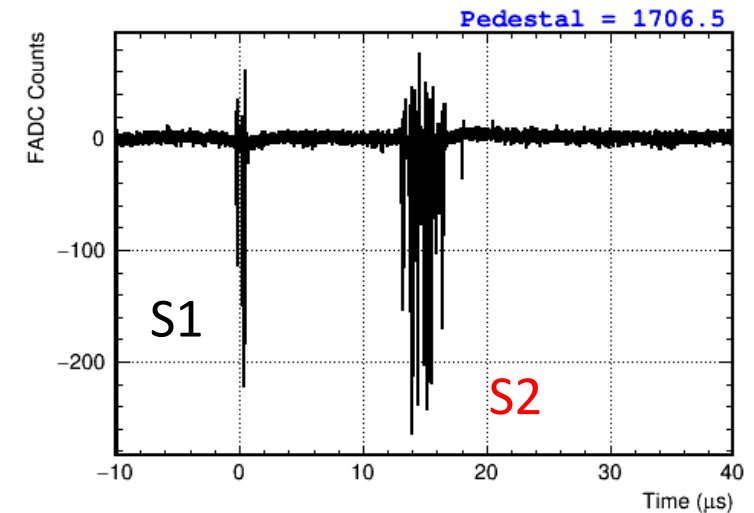
# Event Display(wo/ロングパスフィルター)



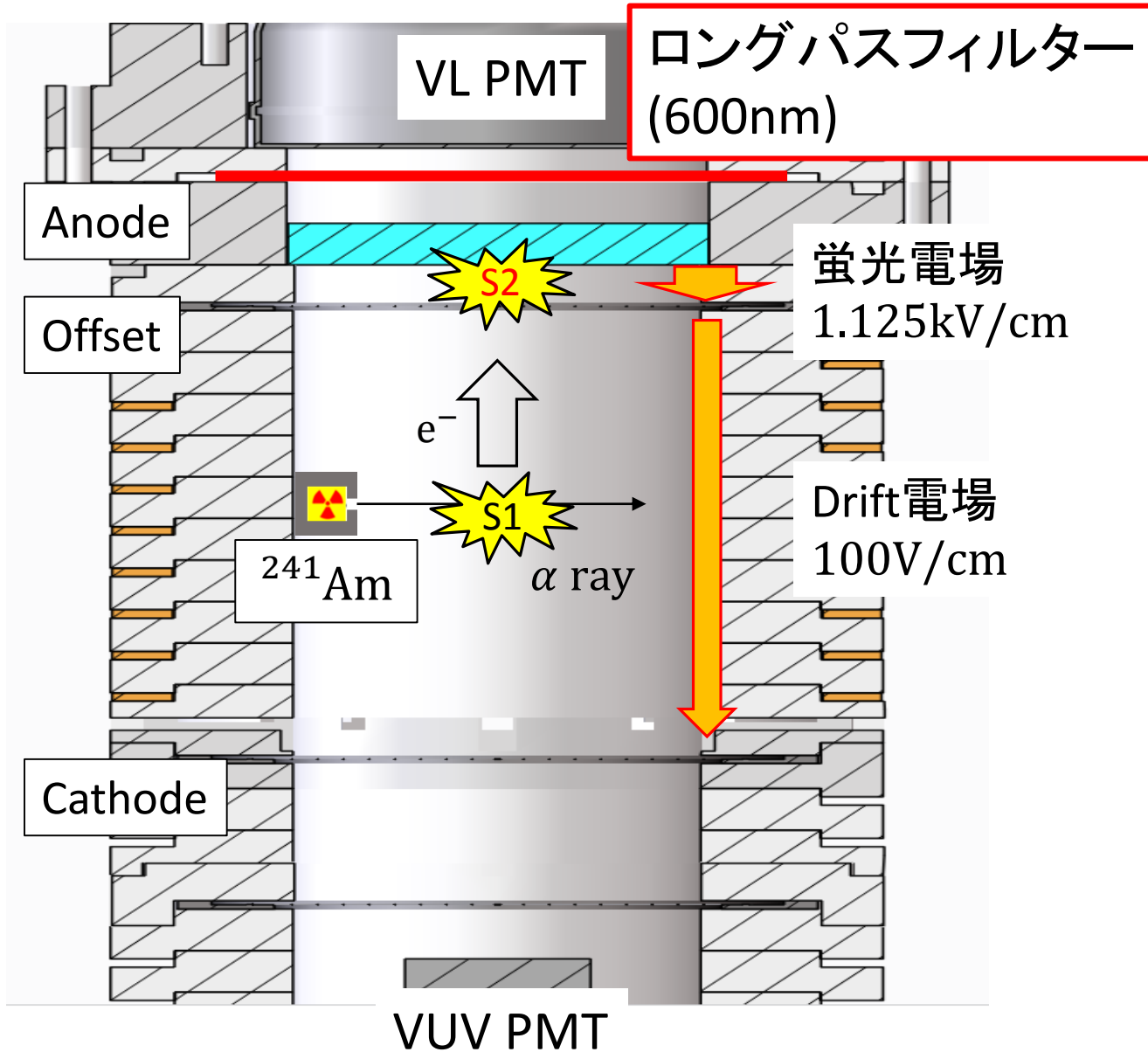
VL PMT



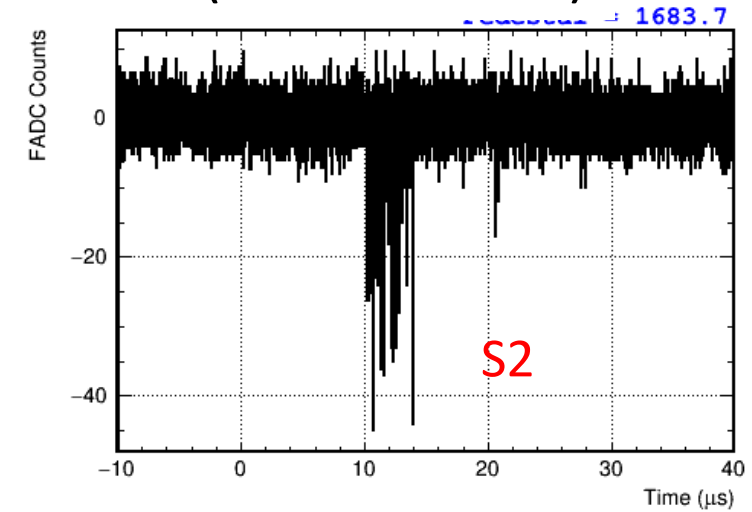
VUV PMT



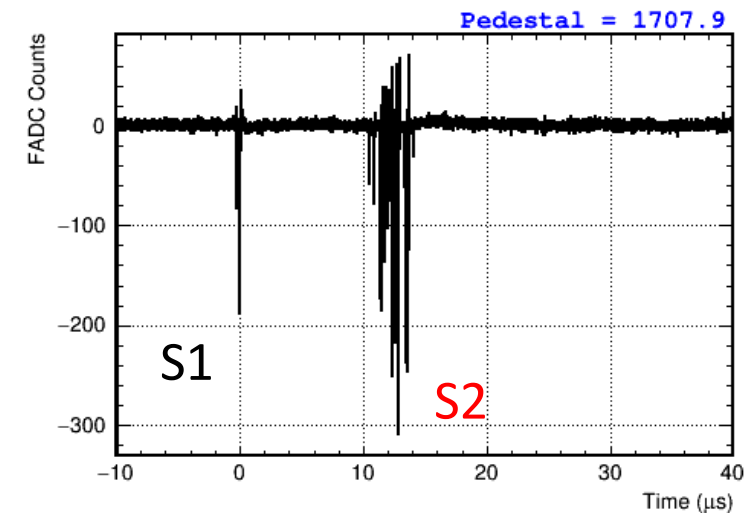
# Event Display(w/ロングパスフィルター)



## VL PMT(600~750nm)



## VUV PMT



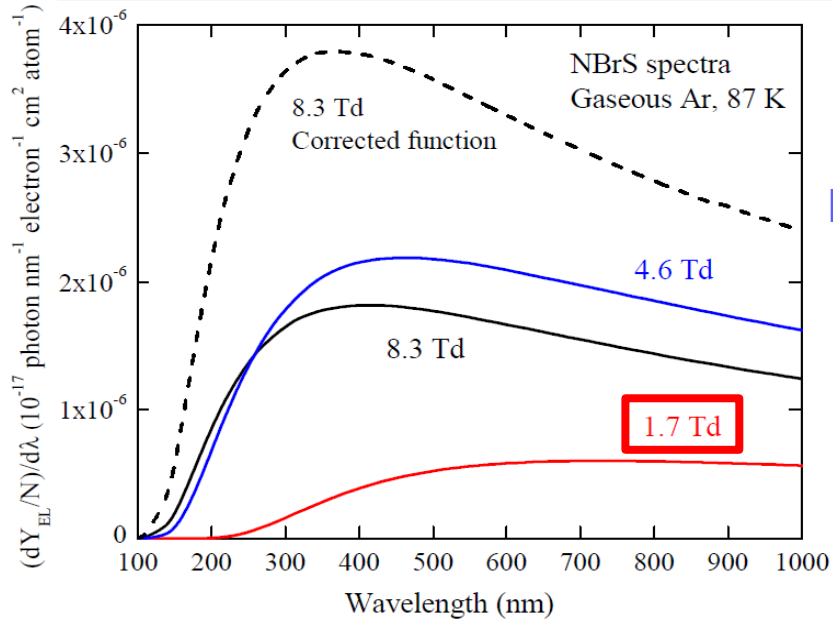


# 理論との比較

## NBrSの観測波長スペクトルの算出

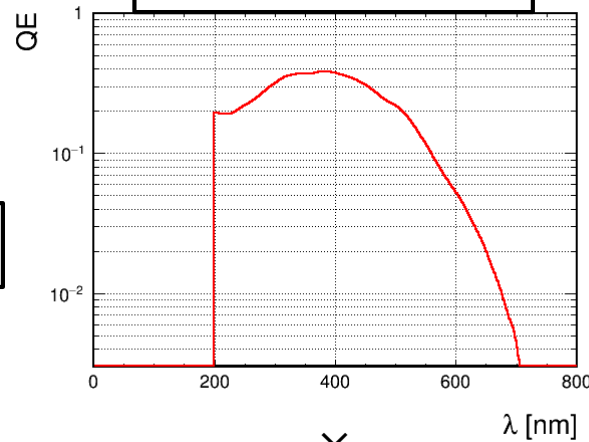
$$LY_i = \int S(\lambda)QE(\lambda)F_i(\lambda)d\lambda$$

## NBrSの理論波長スペクトル: $S(\lambda)$

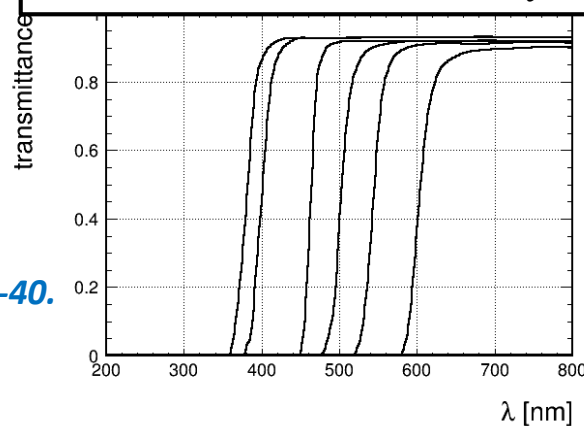


A. Buzulutskov et al., *Astropart. Phys.*, 103, (2018), 29-40.

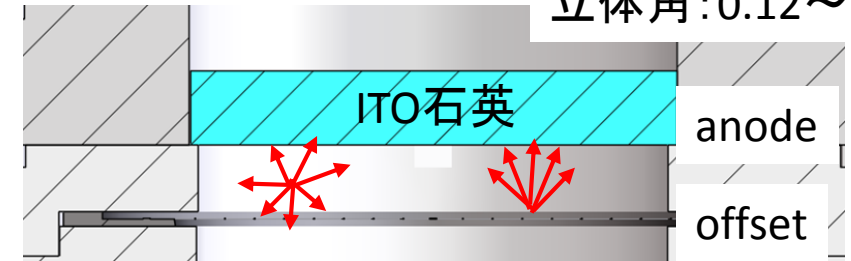
PMT QE :  $QE(\lambda)$



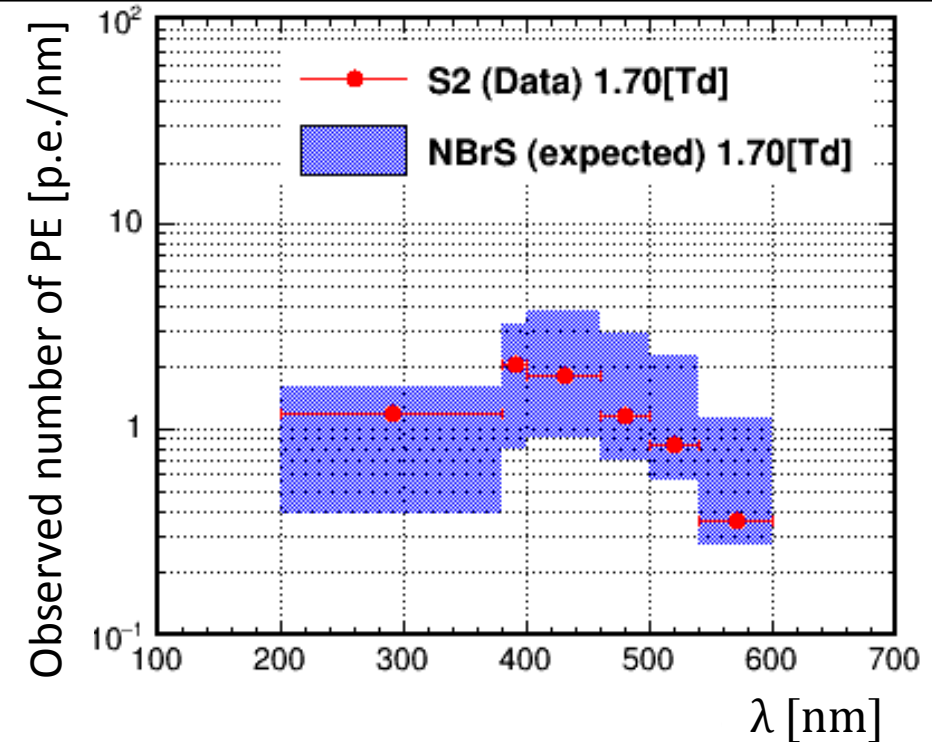
filter transmittance :  $F_i(\lambda)$



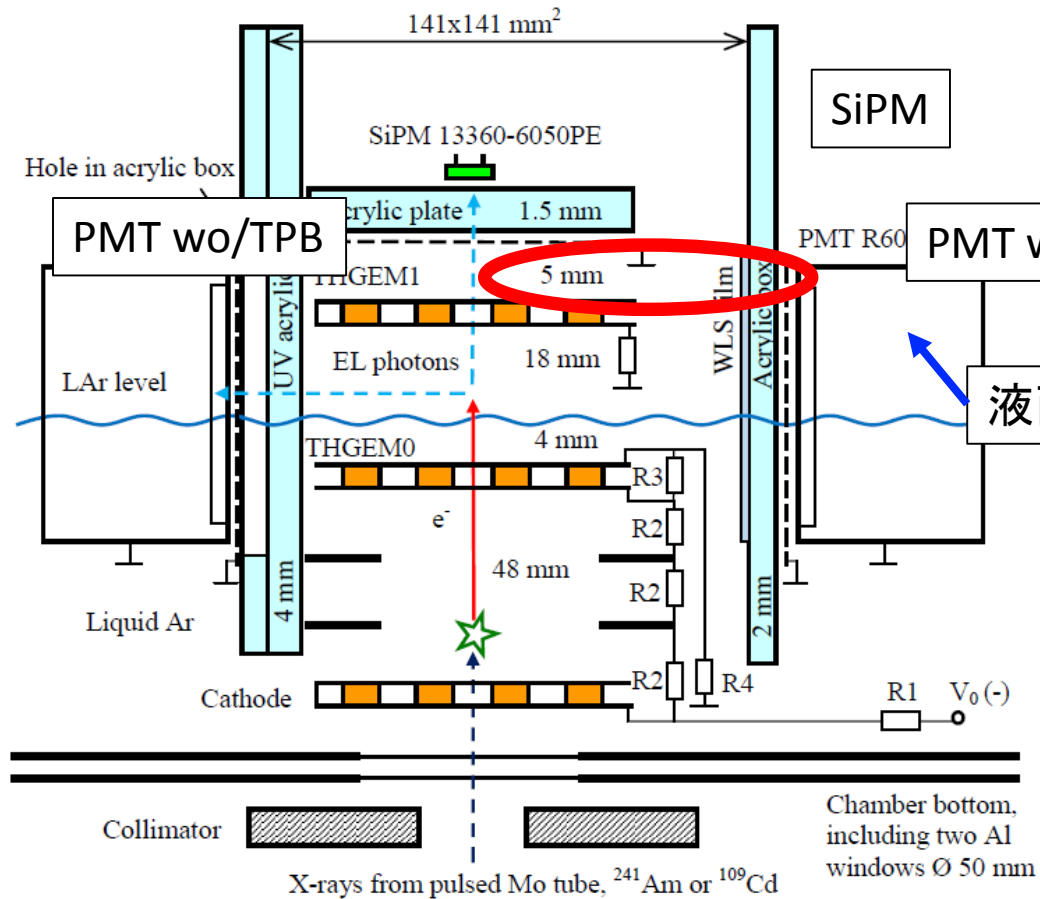
絶対光量 :  $10^{-17}$  photon  $\text{nm}^{-1}$  electron  $^{-1}$   $\text{cm}^2$  atom  $^{-1}$   
 観測光量 : pe  $\text{nm}^{-1}$



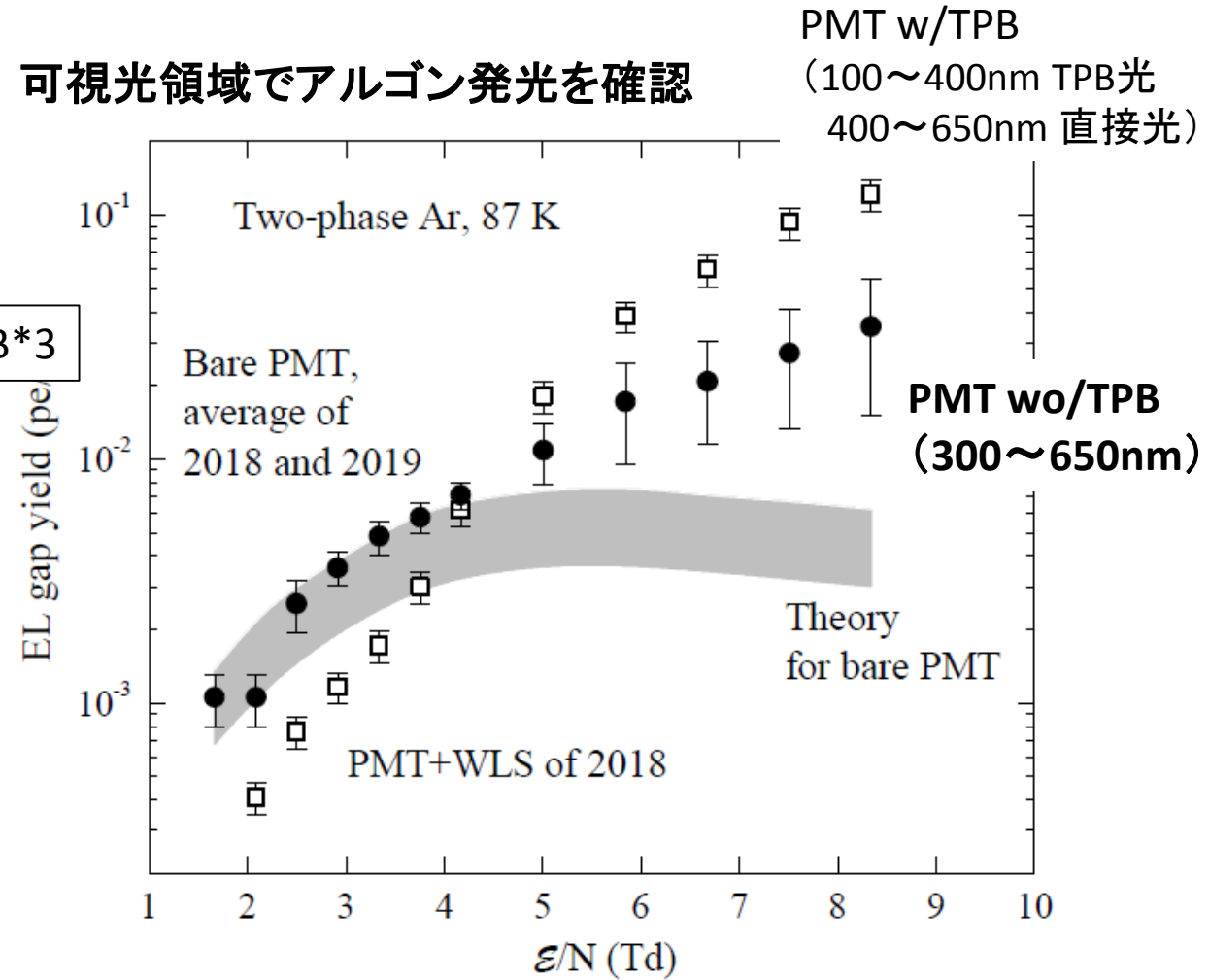
エラーバンド  
 立体角: 0.12 ~ 0.5



# 先行研究

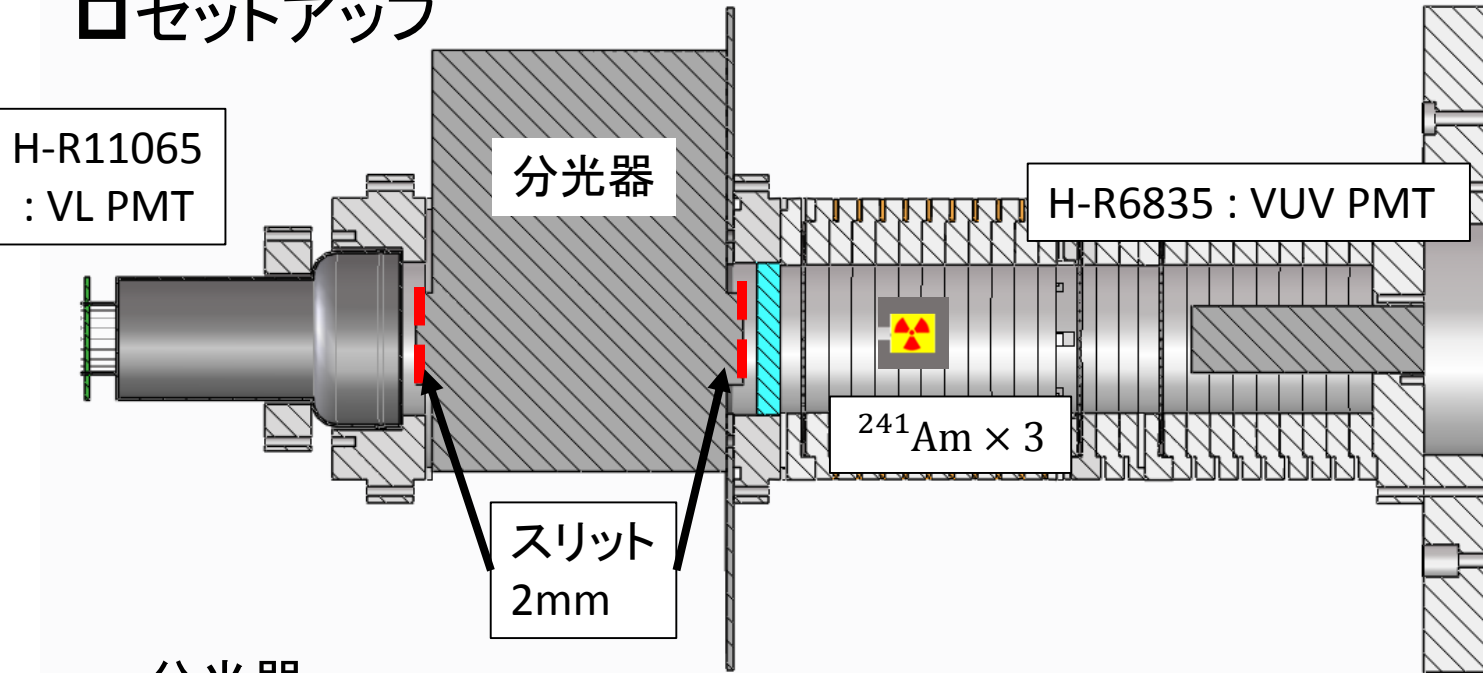


## 可視光領域でアルゴン発光を確認



# 実験セットアップ(分光器)

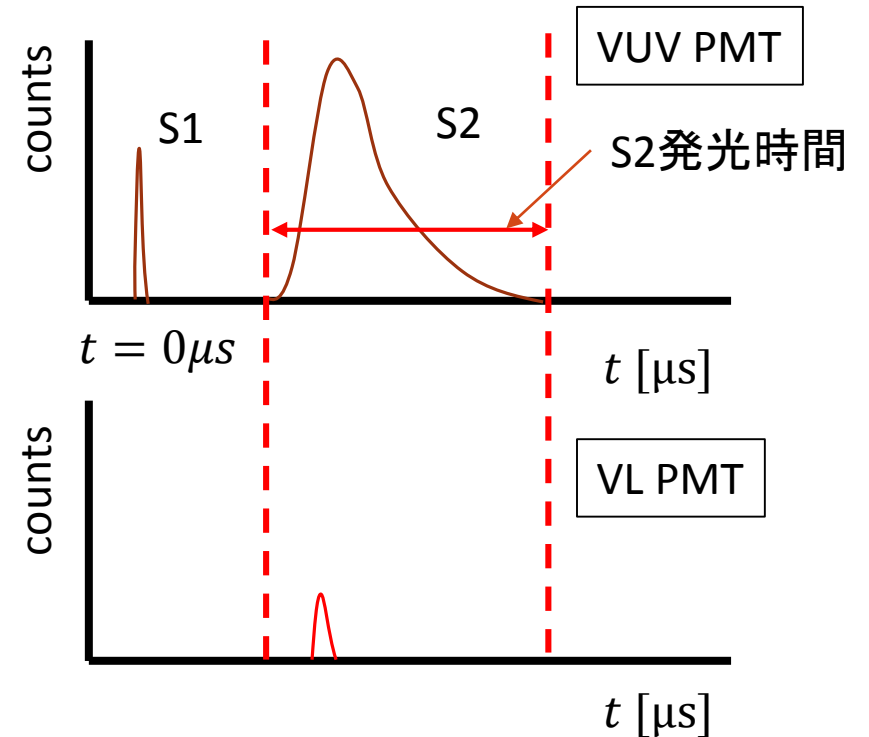
## □ セットアップ



## □ 解析手法

VUV PMTをトリガーとし、  
S2発光時間内にVL PMTで  
1p.e.が検出されるevent rate  
を各波長で測定

### Good event例



## 分光器



型番 : SPG-120S

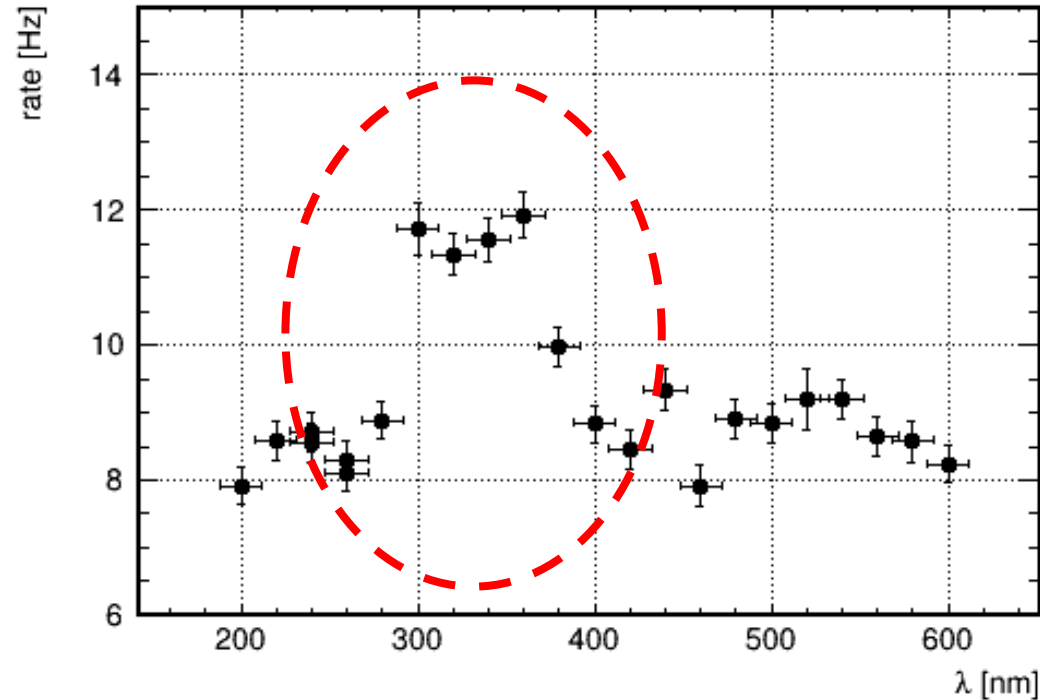
回折格子型の分光器

測定可能波長領域 : 200~900nm

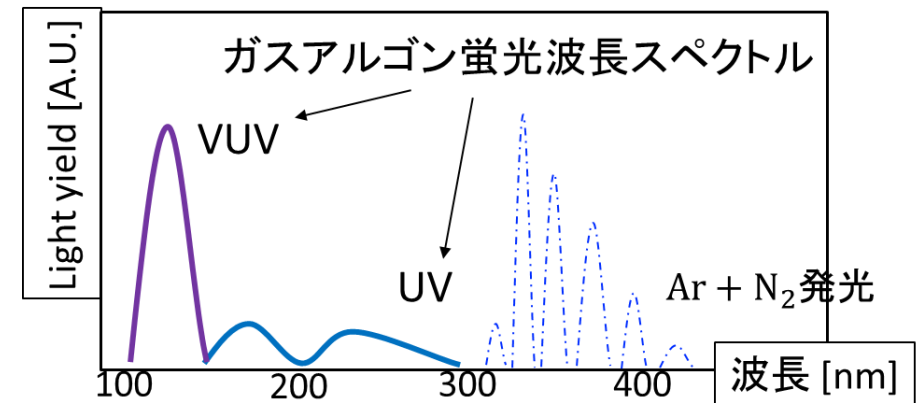
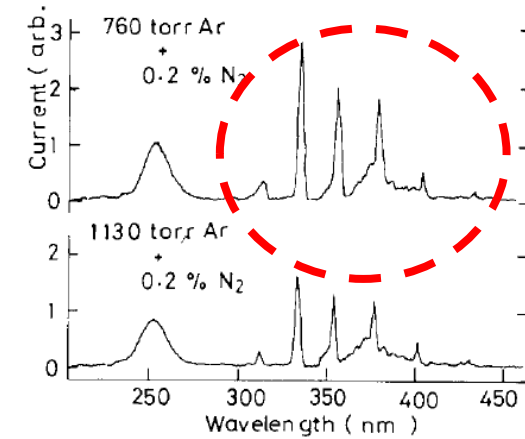
スリット幅	波長分解能[nm]@400nm
500um	3.3
1mm	6.2
2mm	12.0

# 測定結果

200nm~600nmの領域を20nm間隔で測定



Ar + N<sub>2</sub>の発光スペクトル(文献値)

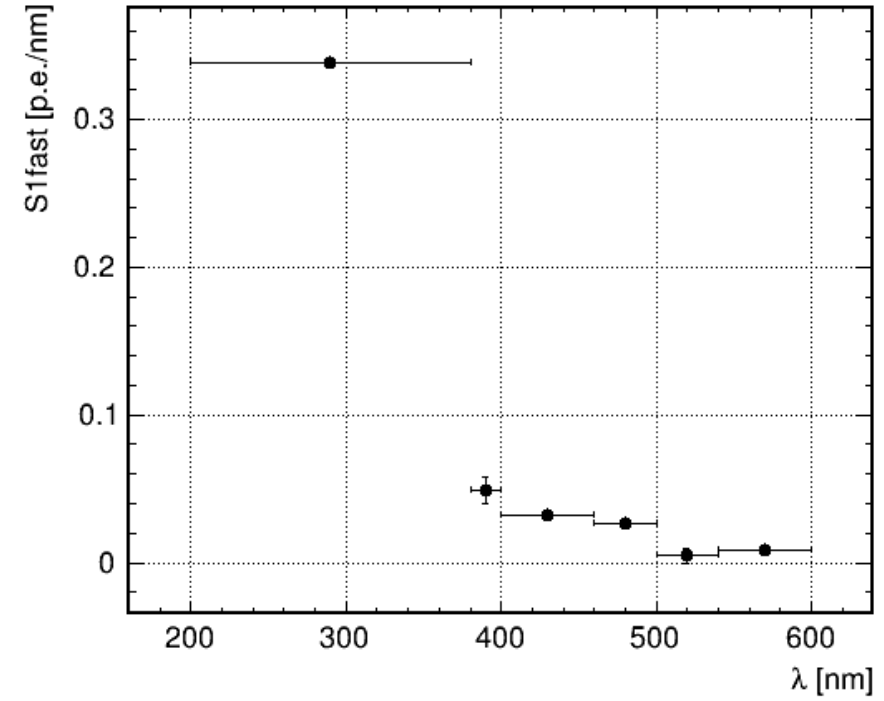
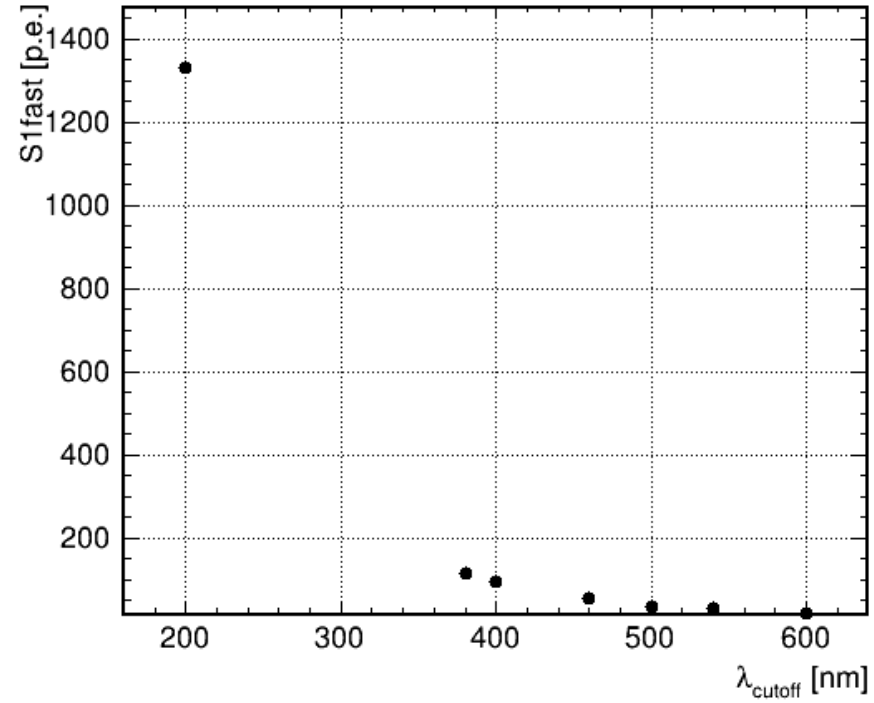


300~400nmの領域に発光成分が存在

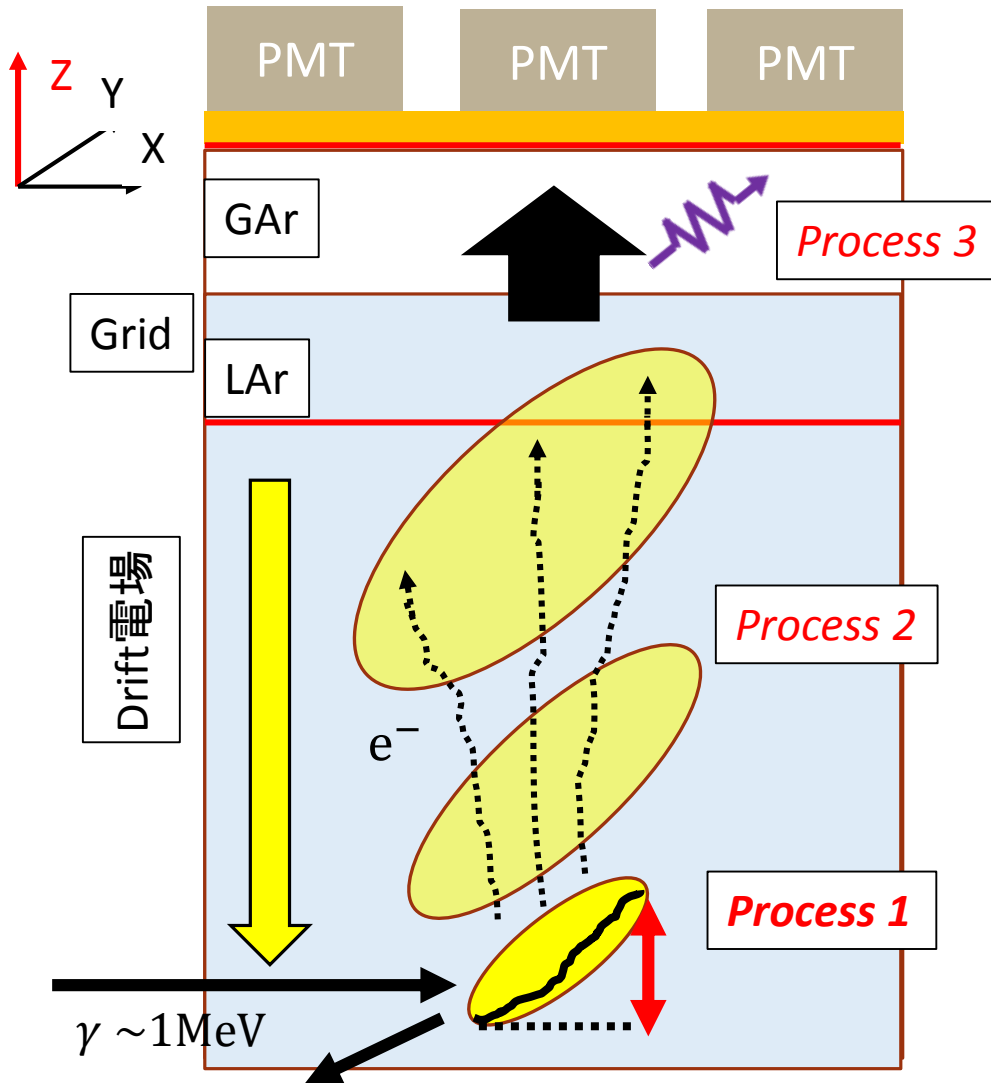
N<sub>2</sub>不純物発光は450nm付近まで発光成分が存在する

→高純度のガスAr下でのS2波長スペクトル測定または、N<sub>2</sub>不純物発光の可視光領域の染み出し効果の評価

# S1波長スペクトル



# S2波形のモデル化

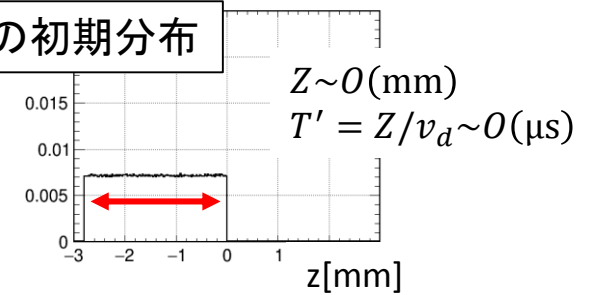


## Process1

電子雲のdrift方向の大きさ

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

## 電子雲の初期分布

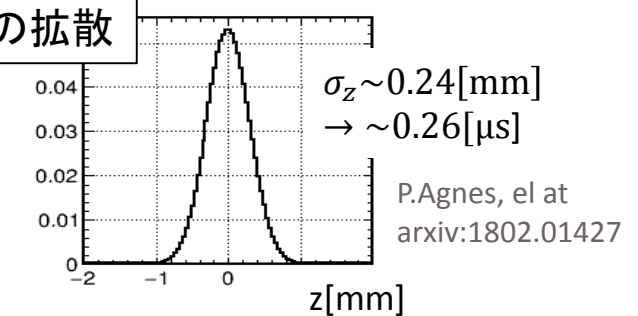


## Process2

電子雲のdrift方向の拡散

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

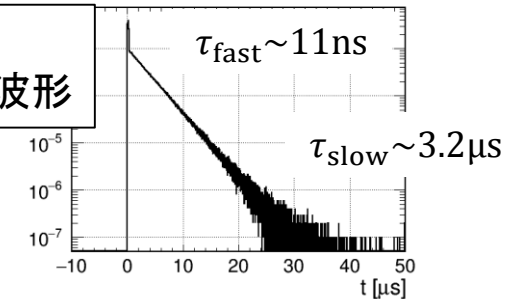
## 電子雲の拡散



## Process3

シンチレーション光時定数

## GAr 蛍光波形



Process 1  $\otimes$  Process 2  $\otimes$  Process 3



## S2波形関数

$$y(t; \tau_{\text{fast}}, \tau_{\text{slow}}, \sigma, T', A, t_0, y_0) = y_0 + A \cdot [p y'(t; \tau_{\text{fast}}, \sigma, T') + (1 - p) y'(t; \tau_{\text{slow}}, \sigma, T')]$$

# S2波形fit

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

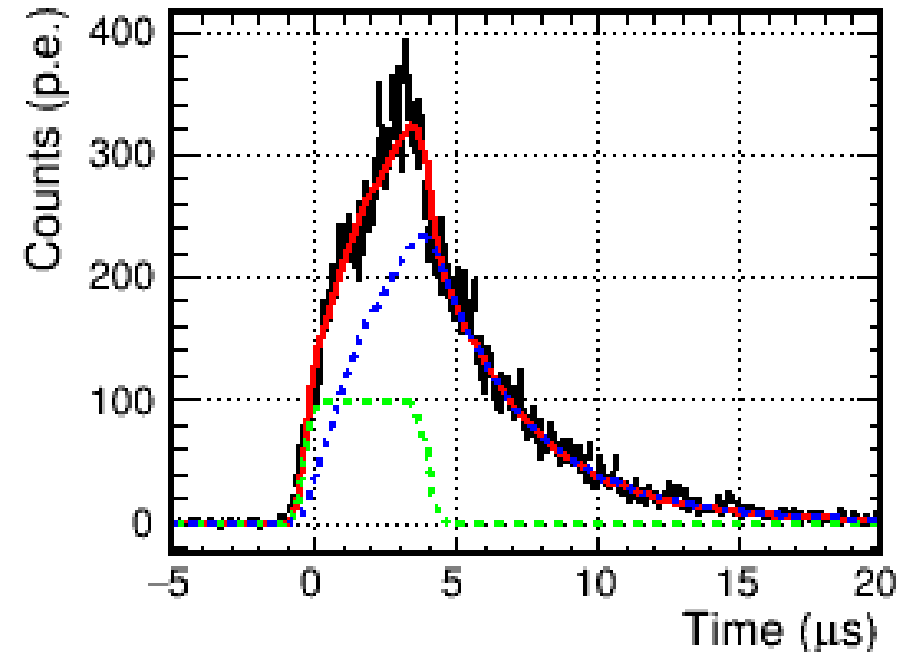
$$y'(t; \tau, \sigma, T') = \frac{1}{2T'} [y''(t; \tau, \sigma) - y''(t - T'; \tau, \sigma)]$$

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

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



# 反跳電子のtrack長(by Geant4 simulation)

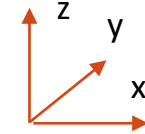
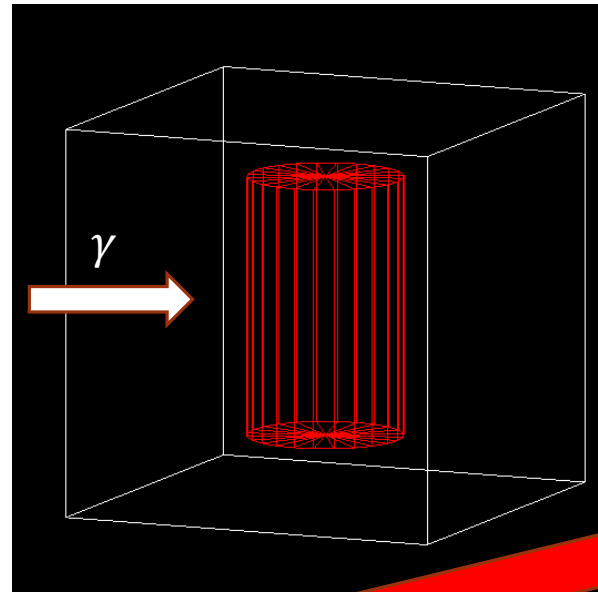
40/15

- Geometry

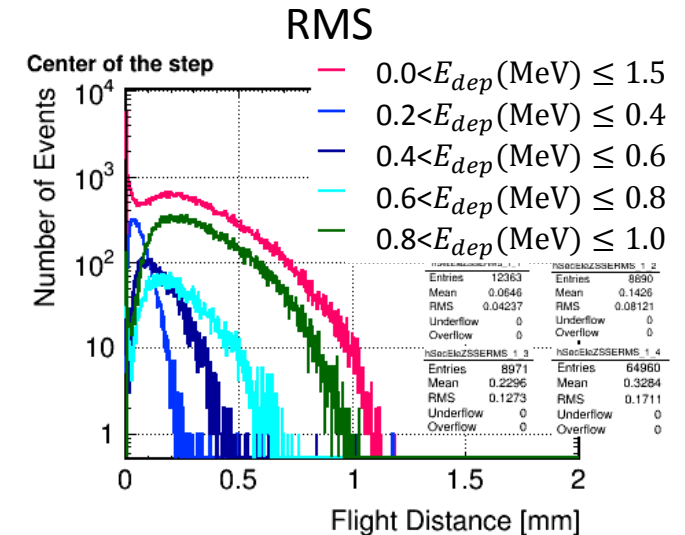
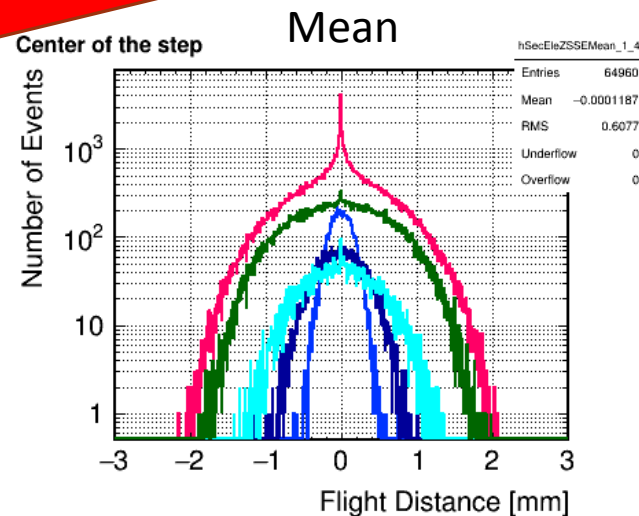
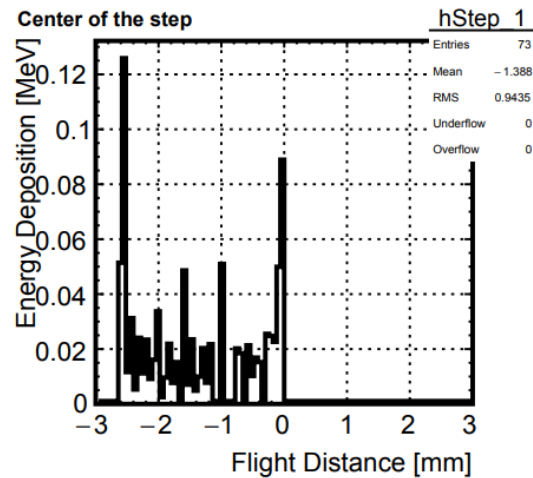
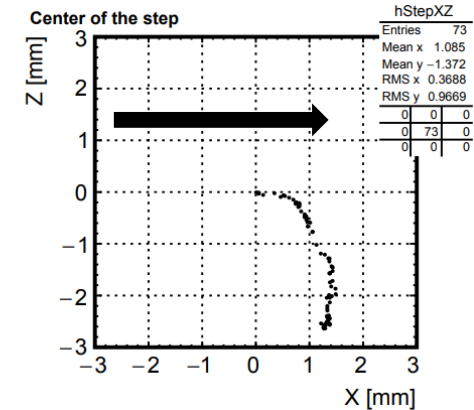
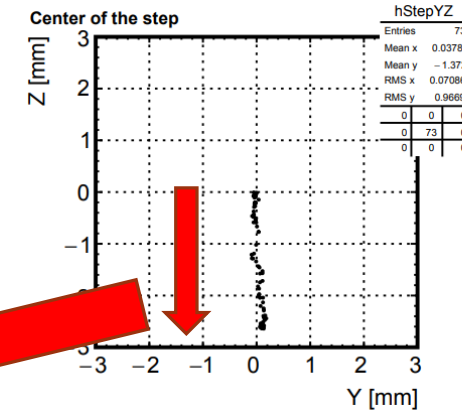
World :  $1.5 \times 1.5 \times 1.5$  m, air  
 Chamber :  $\phi 0.3$  m,  $H 1.0$  m, LAr

- Set up of Geant4

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



The trajectory of recoiled electron



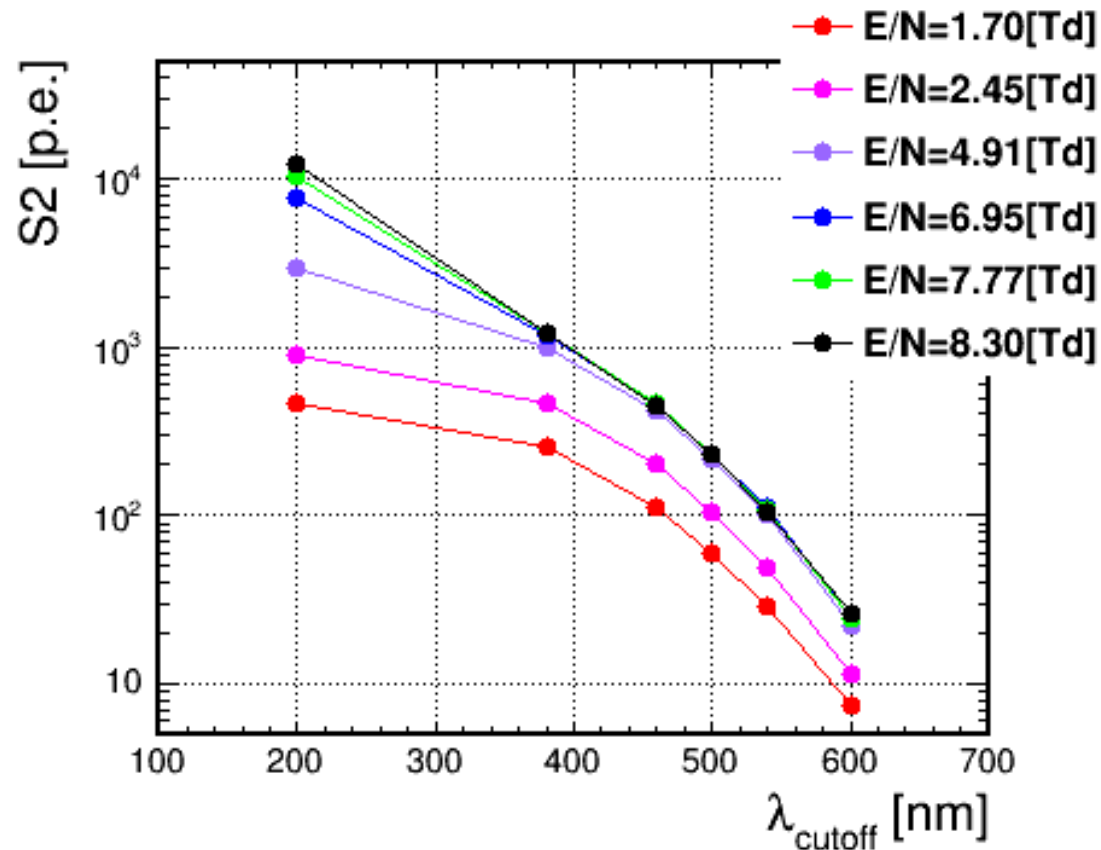


# S2波長スペクトル

## □ 波長スペクトル測定結果

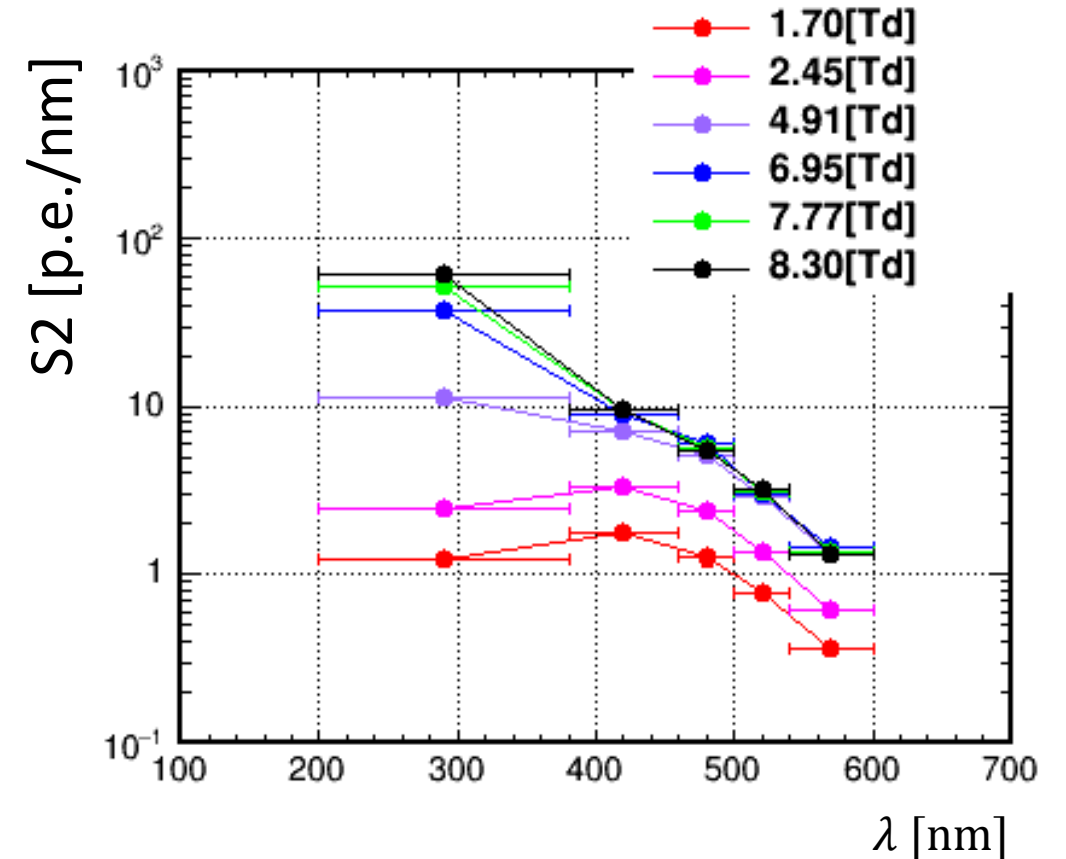
Cutoff波長 : なし, 380, 460, 500, 540, 600nm

各波長フィルターを挟んだ時のS2光量



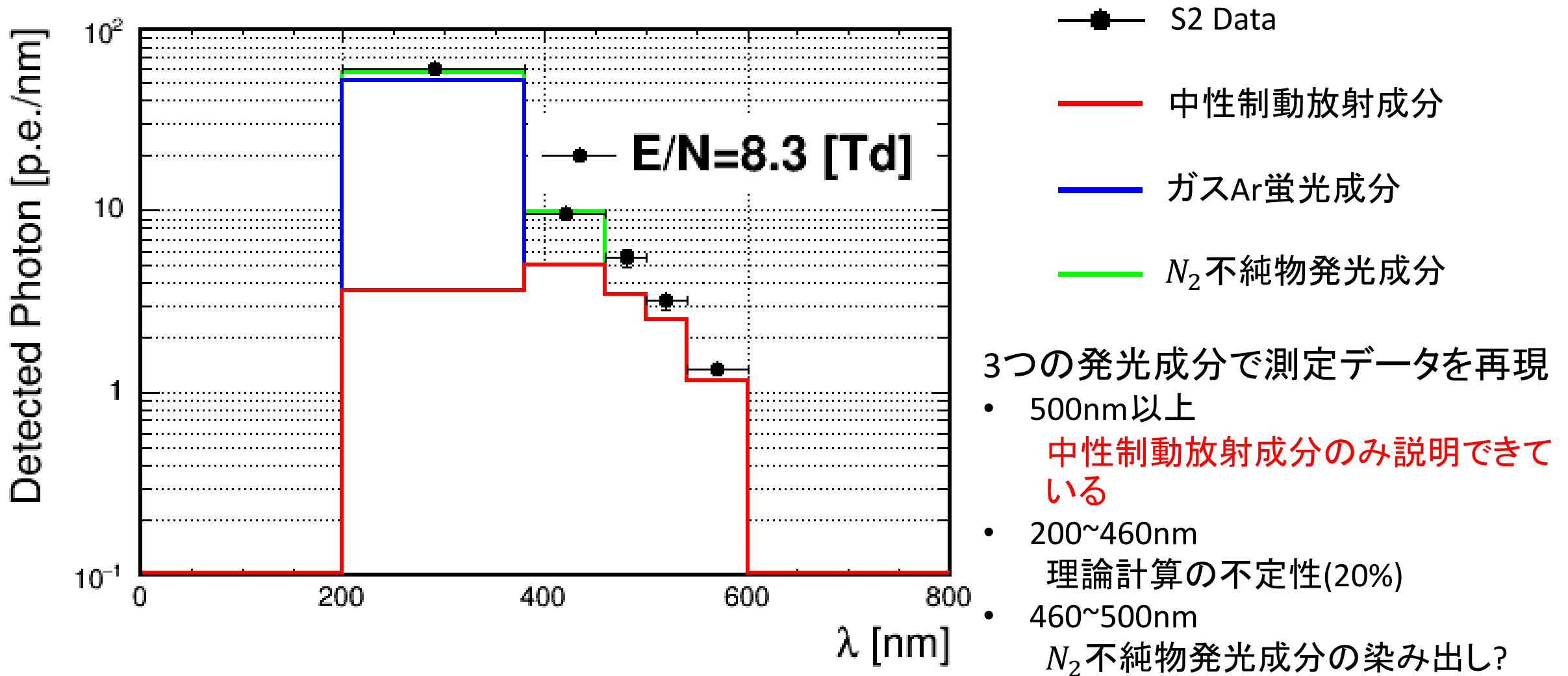
各cutoff波長のS2光量の差分  
 $(S2LY_i - S2LY_{i+1})/(\lambda_{i+1} - \lambda_i)$

S2波長スペクトル



# S2波長スペクトルfit

## □ S2波長スペクトルのfit結果

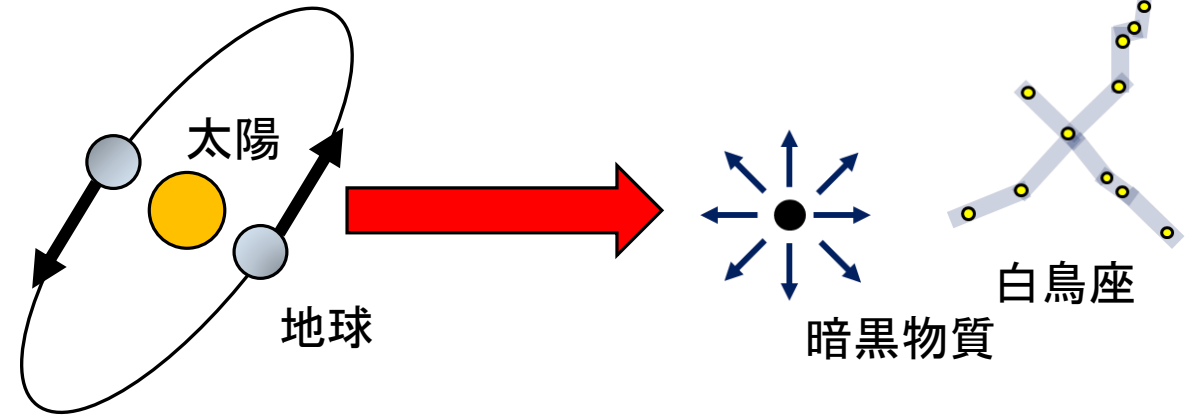


# 今後の展望：方向感度

S2波形解析や中性制動放射成分により、入射粒子の到来方向の見積もりが可能であることが示唆  
→方向感度を持つ希ガス検出器

## □暗黒物質の風

地球の静止系で見ると、  
暗黒物質は白鳥座方向から多く飛来する  
→方向感度を持つ検出器ならば、  
到来方向の異方性を検出可能



## □MeV領域の宇宙 $\gamma$ 線(MeV- $\gamma$ )観測

MeV- $\gamma$ 線観測

- 元素合成の解明、超新星爆発過程の解明などに期待
- コンプトン散乱が支配的、BG(検出器-宇宙線より生成)などの理由から観測困難

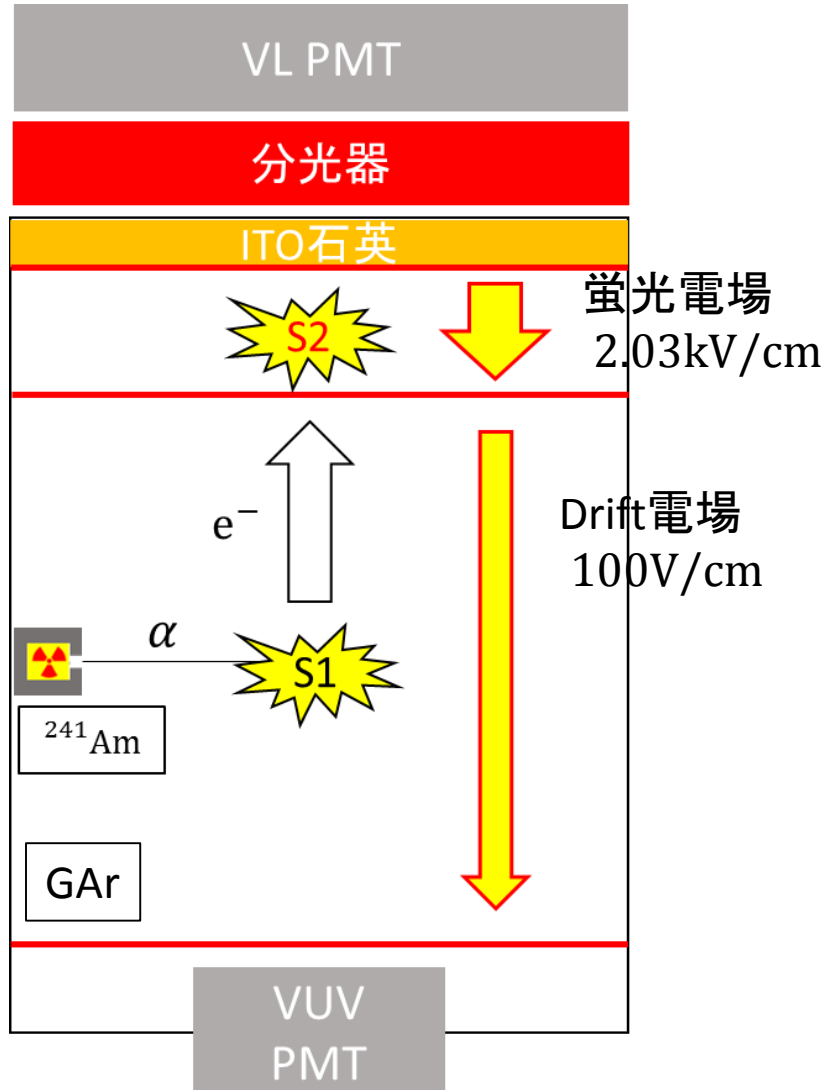
→LAr-TPCでの観測が期待されている(GRAMS)

粒子到来方向検出にS2波形解析、中性制動放射成分が有益な可能性がある

今後、S2信号の方向感度への利用が期待される

# 分光器測定

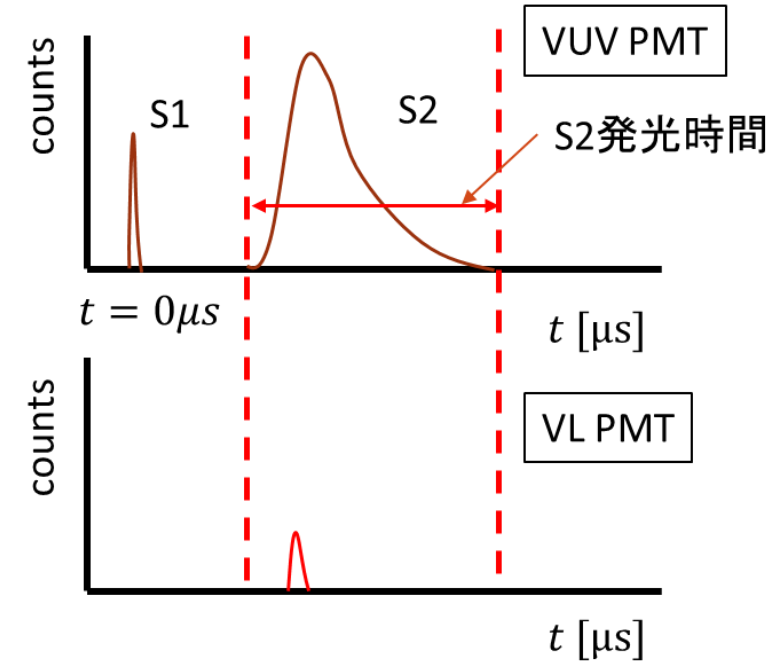
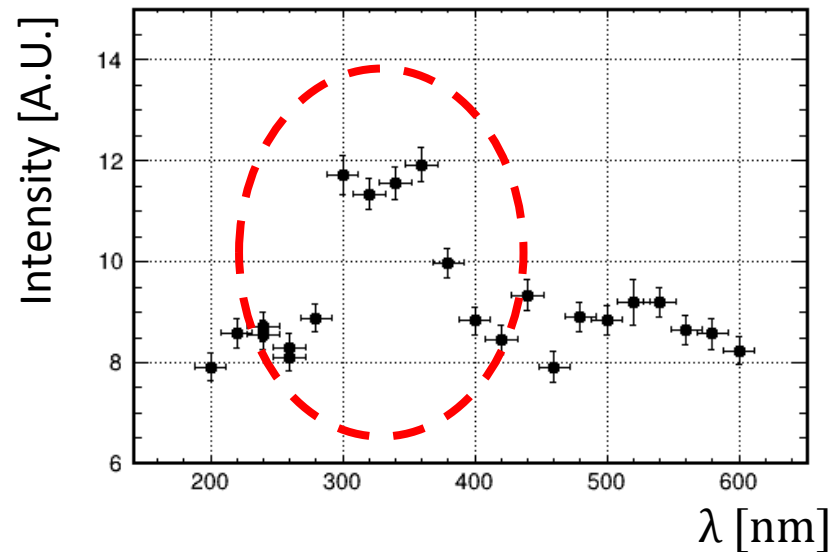
## □ セットアップ



## □ 分光器 回折格子型の分光器 波長領域: 200~900nm 波長分解能: ~12nm



## □ 測定結果

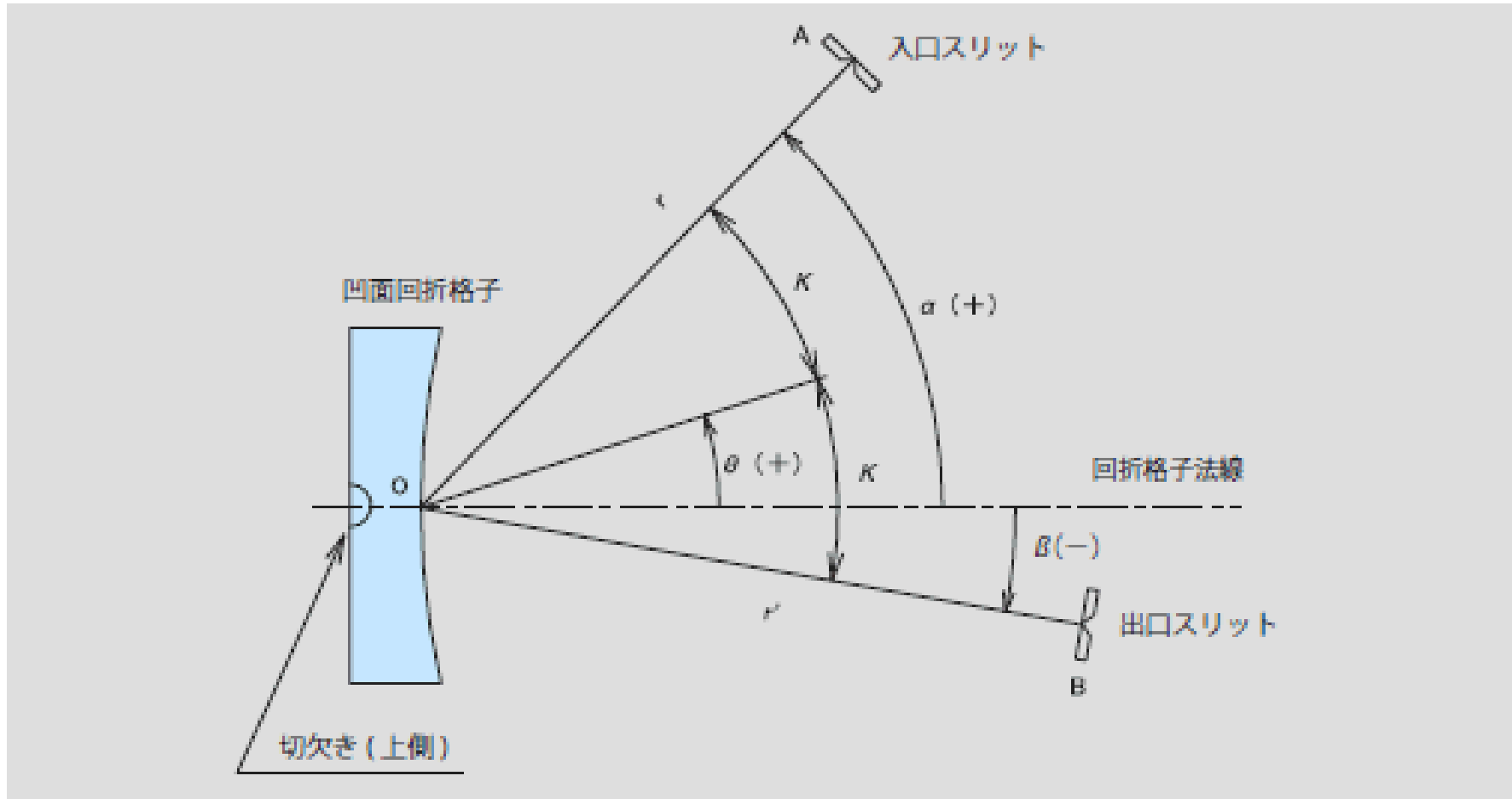


300~400nmの領域にピーク



$N_2$ 不純物発光成分が存在

# 分光器の原理



$$2\sin\theta\cos\alpha = Nm\lambda$$

$\lambda$ : 波長

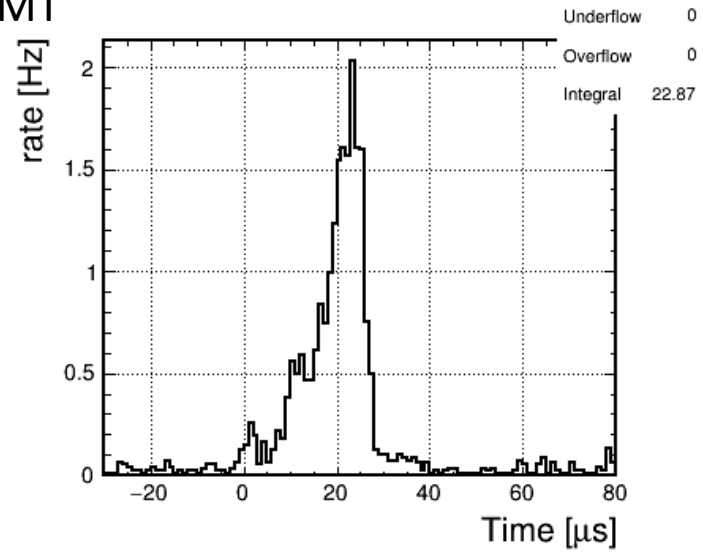
$\theta$ : 回折格子の回転角

$N$ : 回折格子の溝数

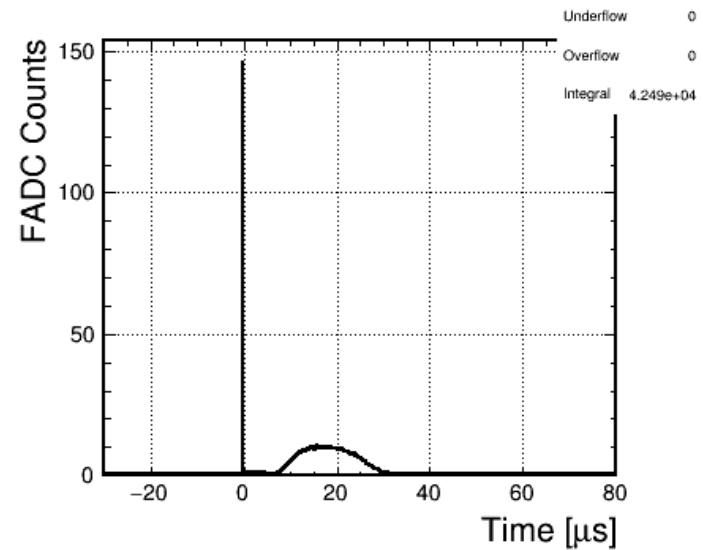
$m$ : 回折次数

# 分光器測定解析法

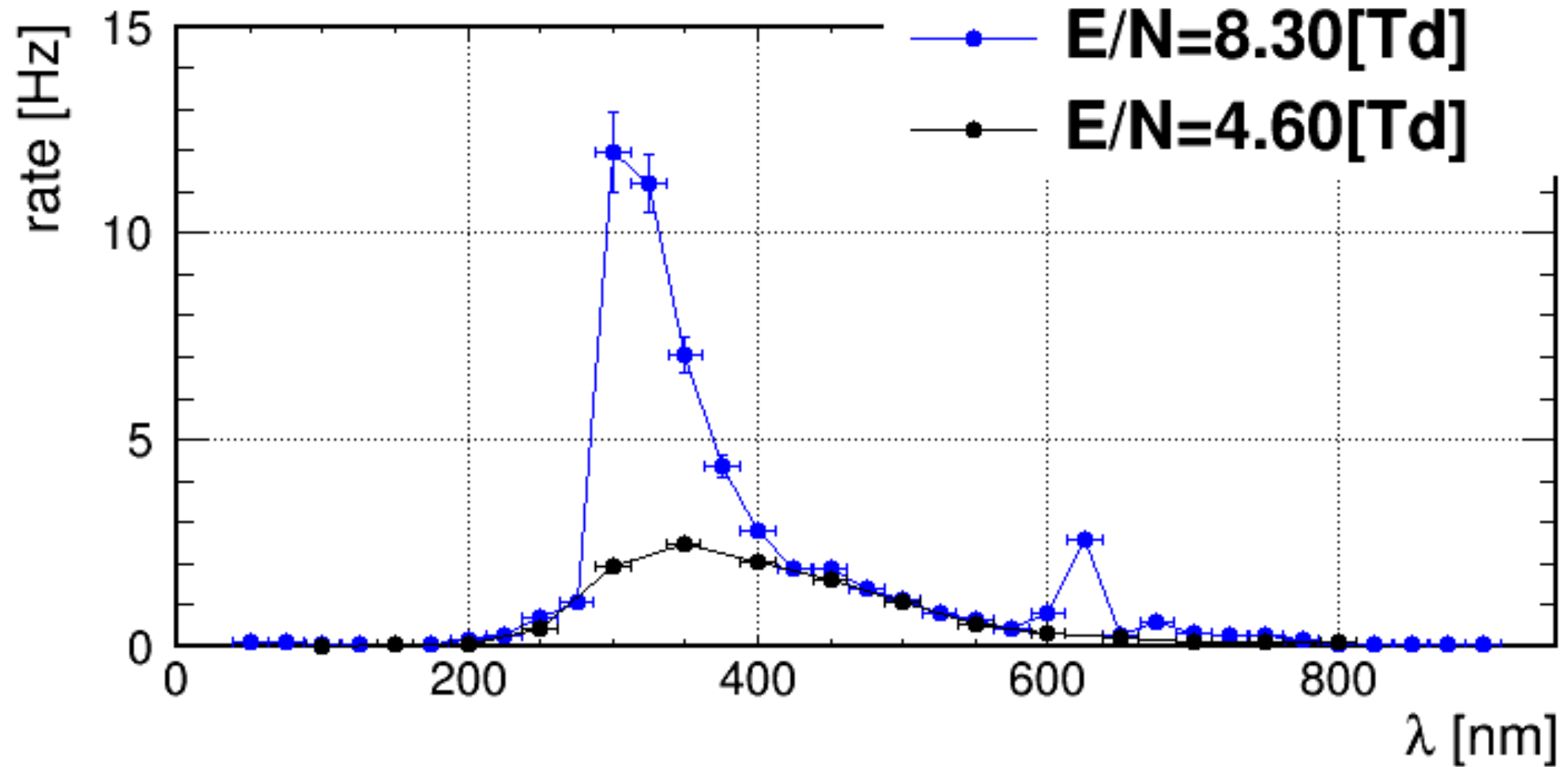
VL PMT



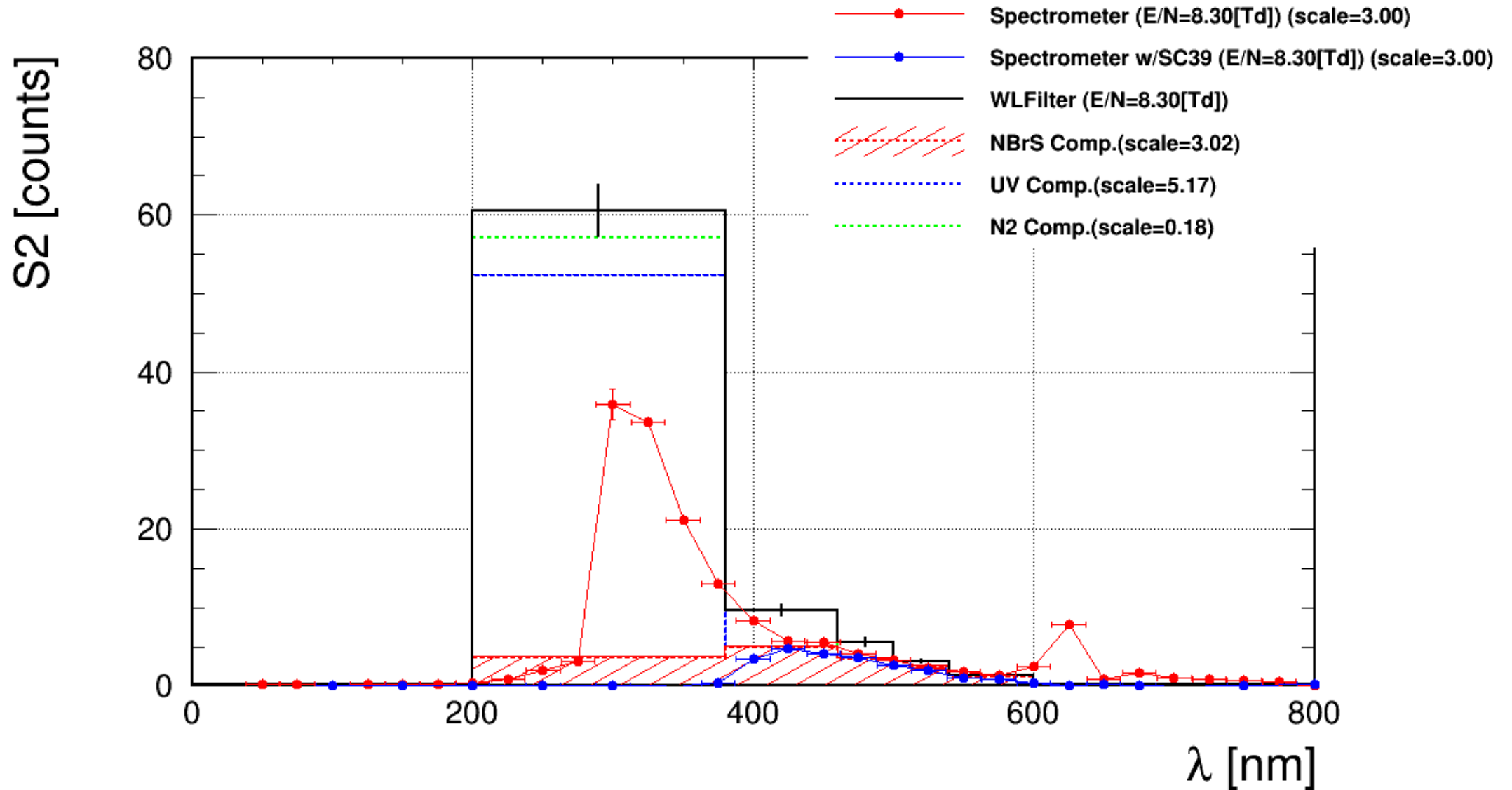
VUV PMT



# 分光器測定の結果



# 分光器測定と波長フィルター測定と比較





# 分光器測定と波長フィルター測定と比較

