

低質量WIMP探索のための 大光量液体アルゴン検出器開発

ICEPPシンポジウム 2020/02/16

早稲田大学 寄田研究室

青山 一天

15ページ(実質13ページ)

WIMP直接探索実験

- Sig : WIMP-核子弾性散乱
- BG : ER event, 中性子, ...etc

➡ NR/ERの分離がWIMP探索のカギ

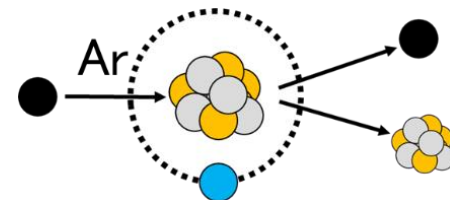
液体Ar光検出器

- 標的物質 : 液体Ar (LAr, 87K)
- 波形弁別(PSD)によるER/NR分離
 - 検出光量向上により分離能力向上

世界最大光量 = 9.1 p.e./keVee (DarkSide-10, 2012年)

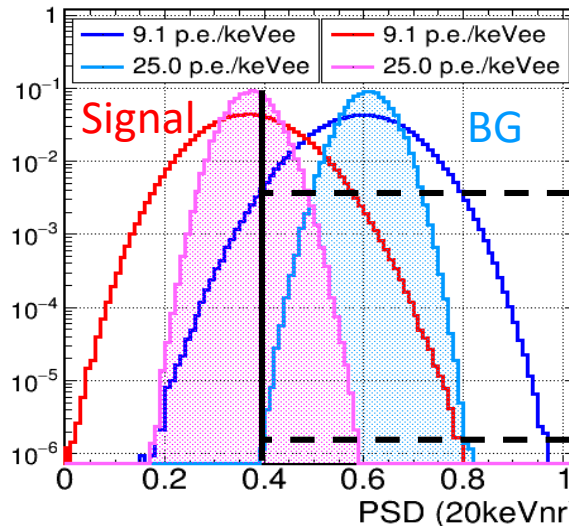
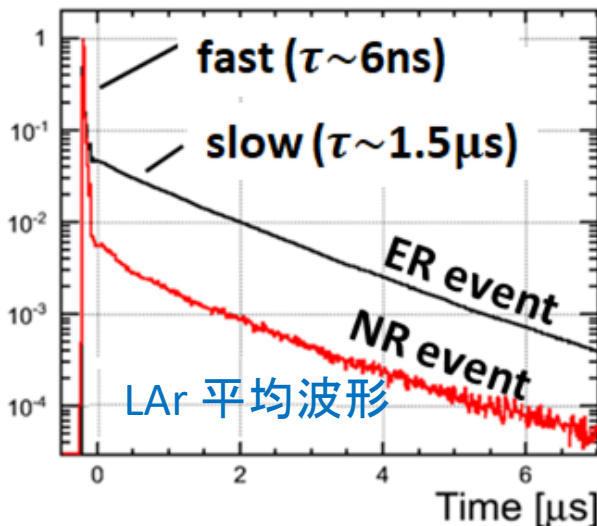
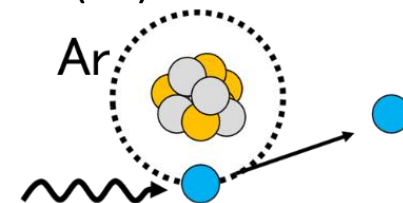
- Nuclear Recoil (NR)

- WIMP
- 中性子



- Electron Recoil (ER)

- γ 線
- (電子)



PSD ER eventの染み出し
光量比較(toyMC)

9.1 p.e./keVee : $O(10^{-3})$

25 p.e./keVee : $O(< 10^{-6})$

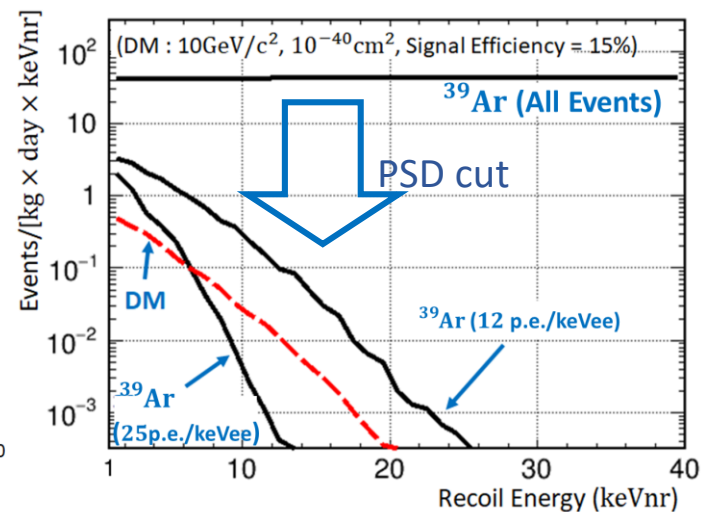
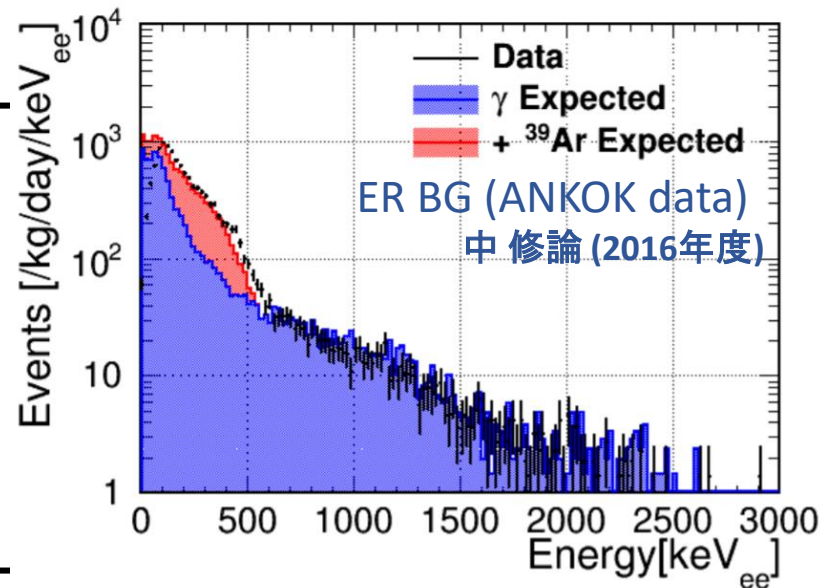
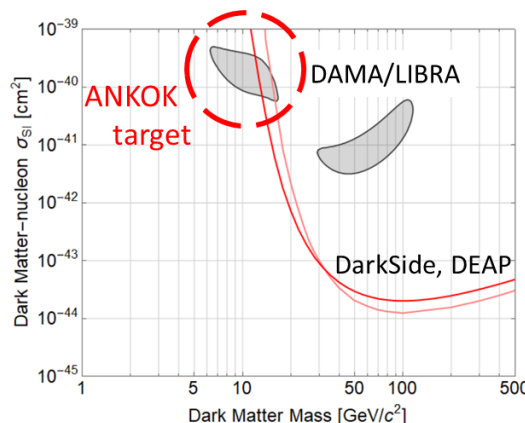
□ 主な背景事象

- ^{39}Ar (β 線源, 1Bq/kg)
 - LAr中に含まれる、内部ERバックグラウンド

➡ PSDにより解析的に分離、除去

□ 必要な分離能力

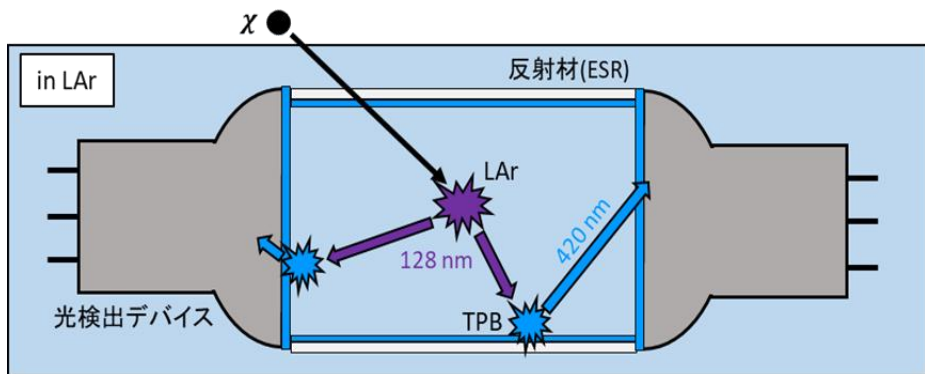
- $M_{\text{WIMP}} \sim 10 \text{ GeV}/c^2$, $\sigma_{\text{WIMP}} \sim 10^{-40} \text{ cm}^2$
 - 必要なPSD分離能力
 - $> 1 \times 10^3$ @10keVnr
 - $> 1 \times 10^5$ @20keVnr
- 検出光量とPSD能力
 - 25 p.e./keVee で WIMP event以下に



➡ 光量増加により0 ER BGを実現可能

^{39}Ar event数 (toyMC)

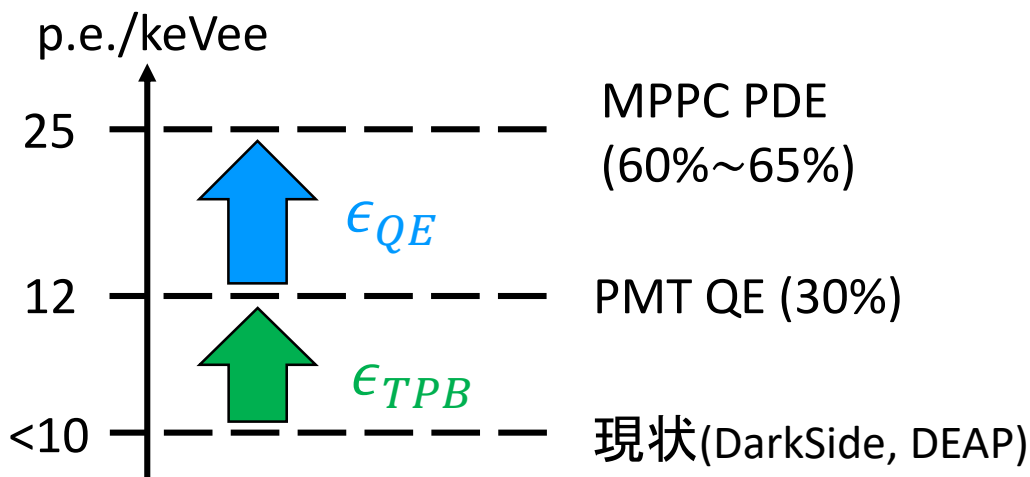
□ LAr光収集効率



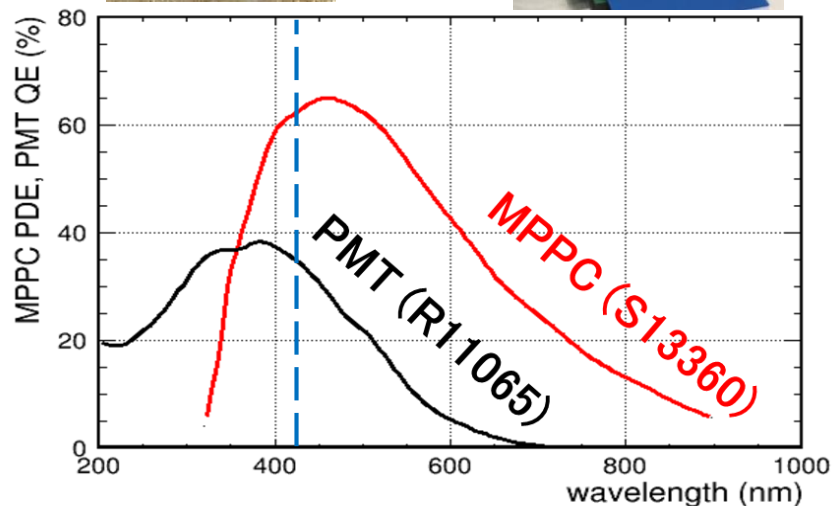
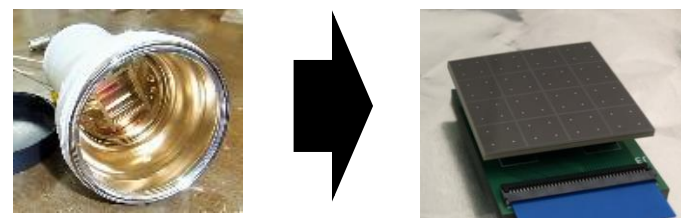
$$LY = N_{LAr} \times A_{VUV} \epsilon_{TPB} \times A_{VL} \epsilon_{QE}$$

- N_{LAr} : LAr発光量 = 40 photon/keVee
- A_{**} : アクセプタンス (~100%)
- ϵ_{TPB} : TPBの波長変換効率
- $\epsilon_{ph.dev}$: 光検出デバイス感度

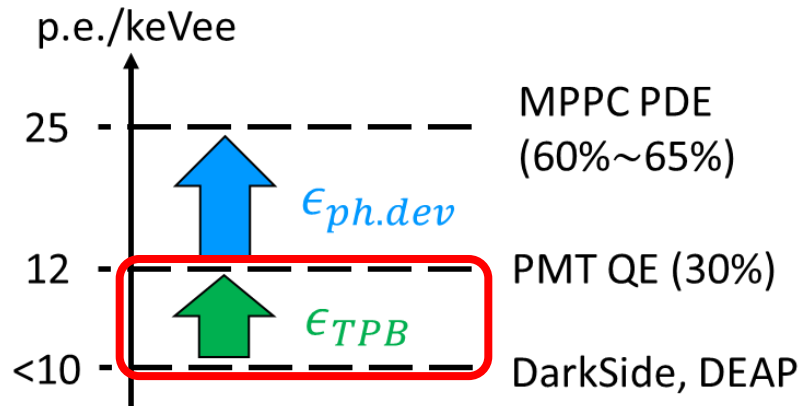
□ LAr検出器の光量限界



➡ 25 p.e./keVeeでER BG free
MPPC PDE限界の到達で25 p.e./keVee



Topic1. TPB蒸着技術の最適化

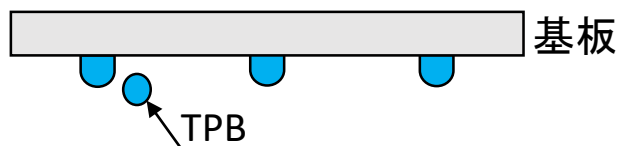


□ 真空蒸着法

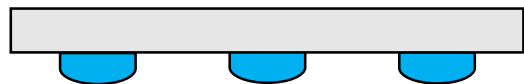
- 薄膜形成手法の一種
- 真空中で蒸着物を加熱/昇華させて基板に付着させる

□ 一般的な薄膜形成過程

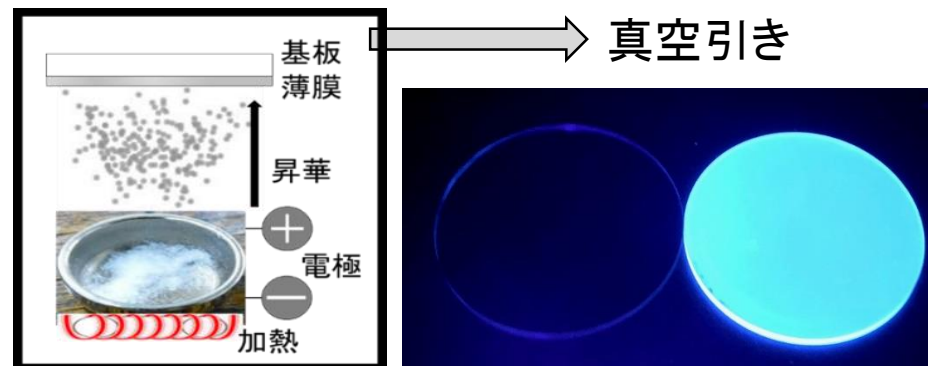
1. 材料が基板面に入射し、反射or吸着凝集することで核を形成



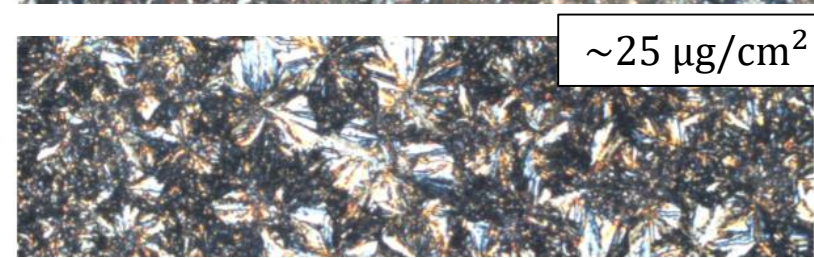
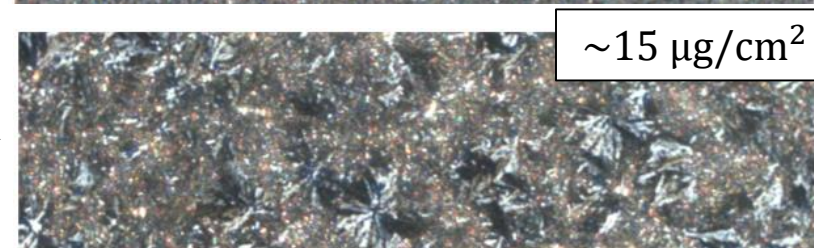
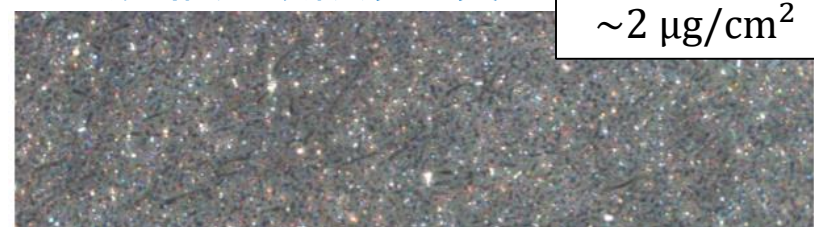
2. その後入射した分子は段差部分で止まり、核が成長していく



3. 次第に核同士が合体して、連続膜になる



TPB膜 偏光顕微鏡写真

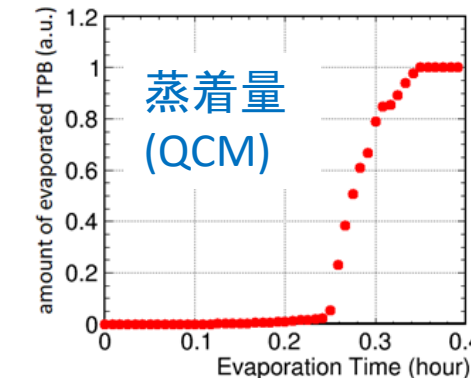
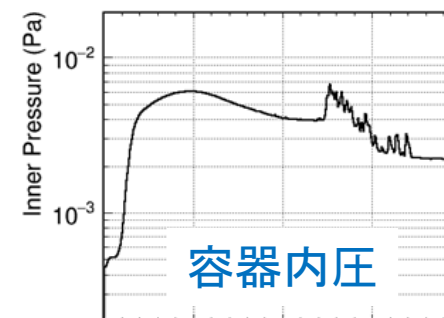
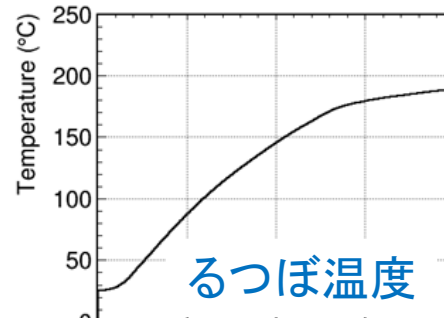
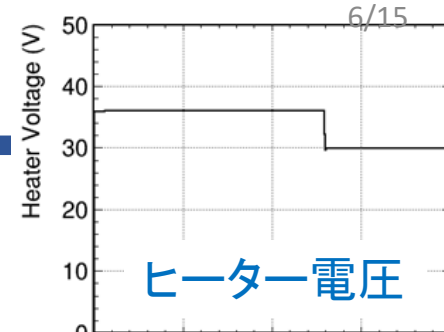
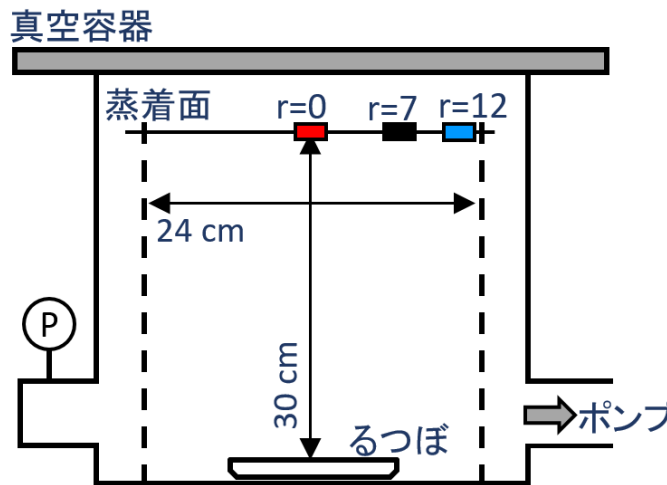
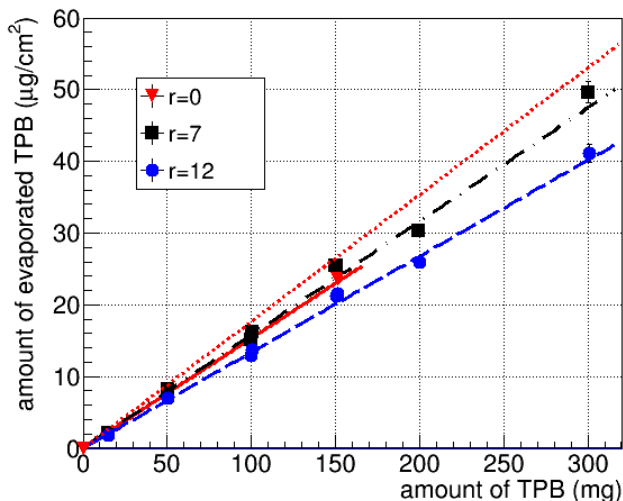
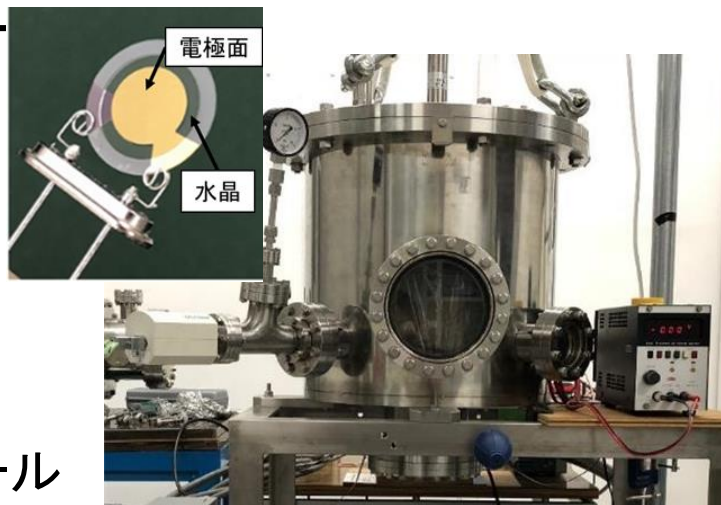


300 μm

TPB蒸着システム

真空蒸着装置

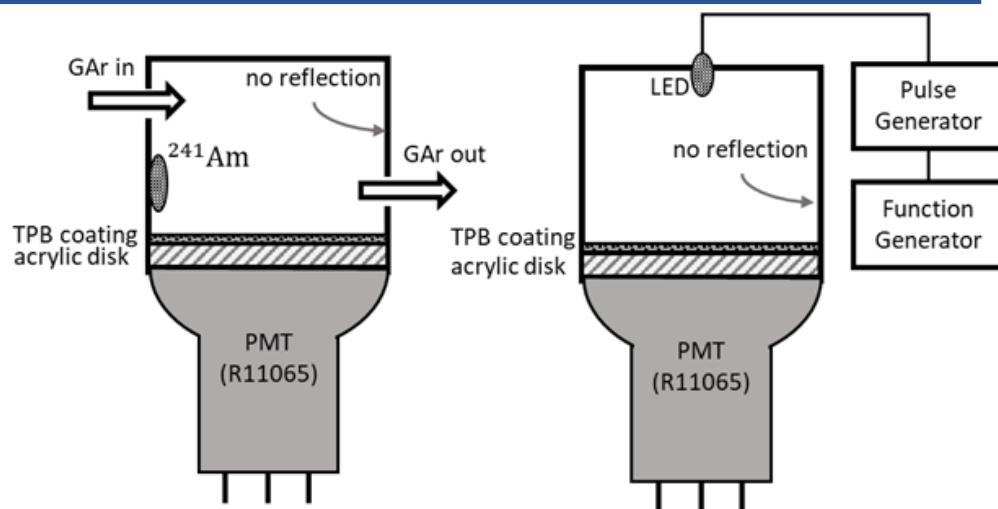
- $\phi 420$ mm, $h 400$ mm
- 蒸着面の高さ ~ 30 cm
- QCMによる蒸着量測定
- 真空度: $\sim 5 \times 10^{-3}$ Pa
→ 平均自由行程 ~ 1 m
- ヒーター電圧のみによる蒸着プロセスのコントロール



➡ TPB蒸着量の定量化と、再現性の保証

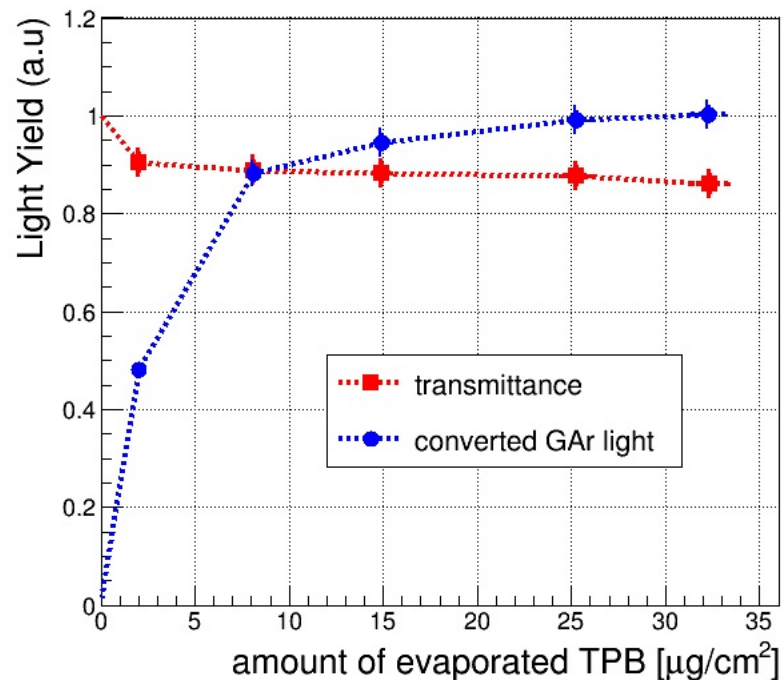
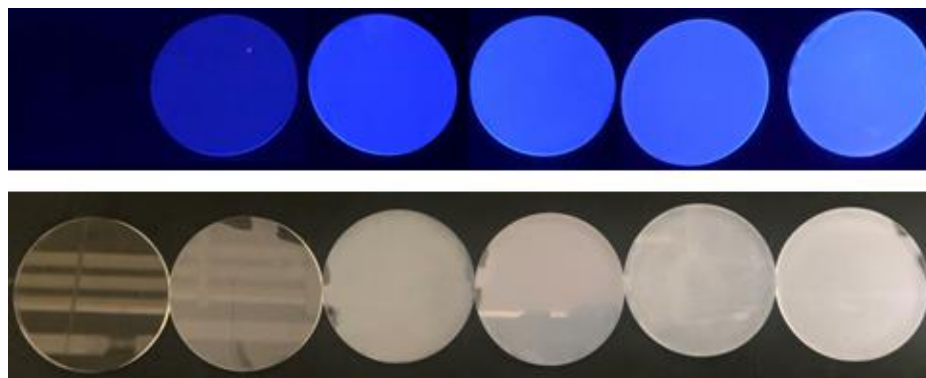
測定セットアップ

- 光源
 - 波長変換効率 : GAr + ^{241}Am
 - 可視光透過率 : blue LED
- 光検出 : PMT



測定結果

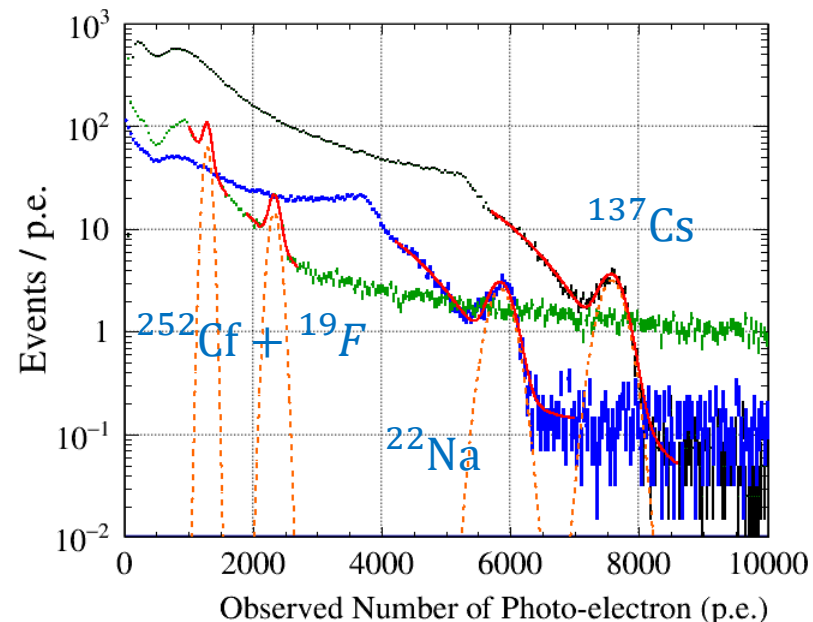
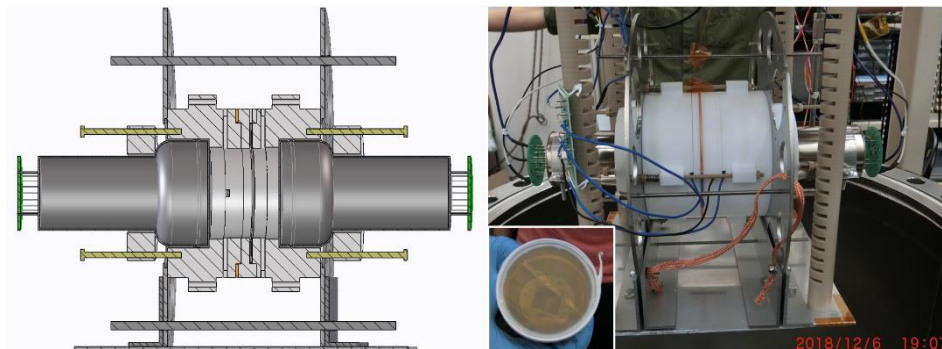
- 波長変換効率 : $25 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 以上で飽和
- 可視光透過率 : TPB増加 \rightarrow 低下



\rightarrow $30 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 付近で蒸着することを決定

□ LAr検出器

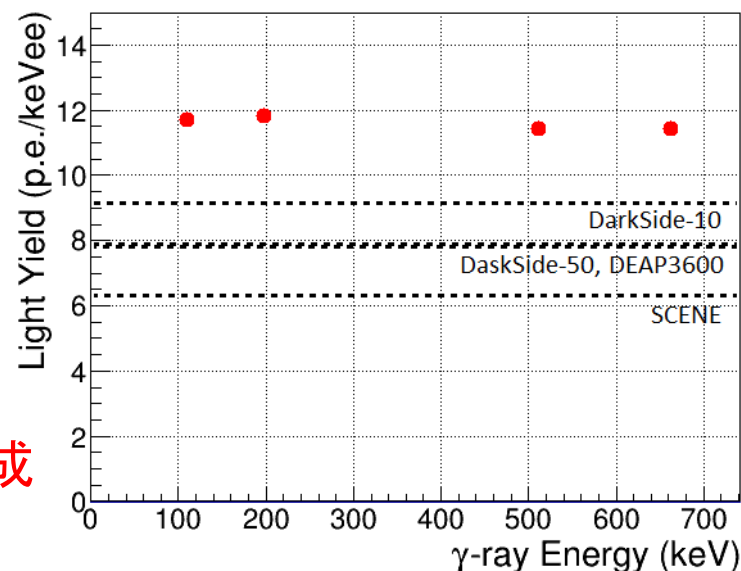
- 有感領域 : $\phi 6.4$ cm , $h 5$ cm (PTFE筐体)
- 光検出デバイス : PMT \rightarrow QE $\sim 30\%$
(HAMAMATSU, R11065)
- TPB薄膜 : PMT ~ 30 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$
ESR ~ 40 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$



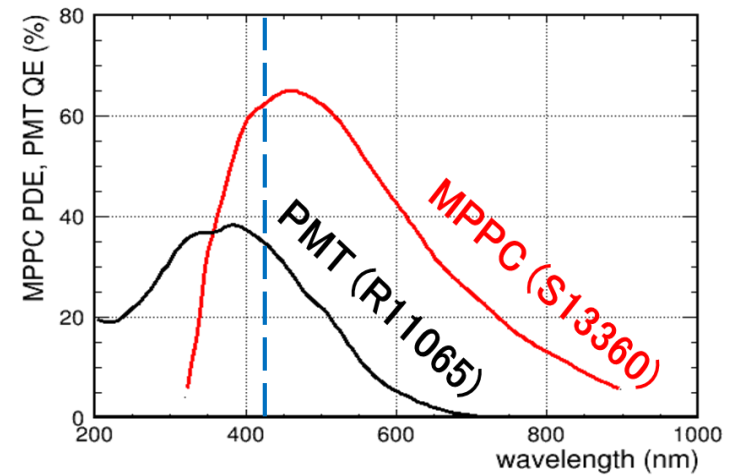
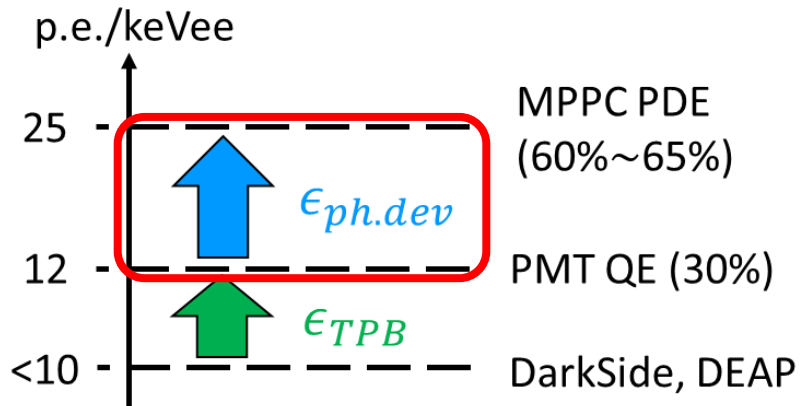
□ γ 線源による光量測定

- γ 線源 : ^{137}Cs (662keV), ^{22}Na (511keV)
 $^{252}\text{Cf} + ^{19}\text{F}$ ($n, n' \gamma$) (110, 197 keV)

約11.5 p.e./keVeeの世界最大光量を達成
PMT QEによる収集光量限界

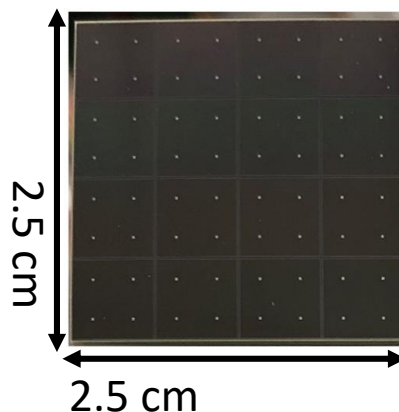


Topic2. TSV-MPPC Arrayの導入



□ TSV-MPPC Array (S13361-60**AE-4) ※ **にはピクセルサイズ(50Uと75U)

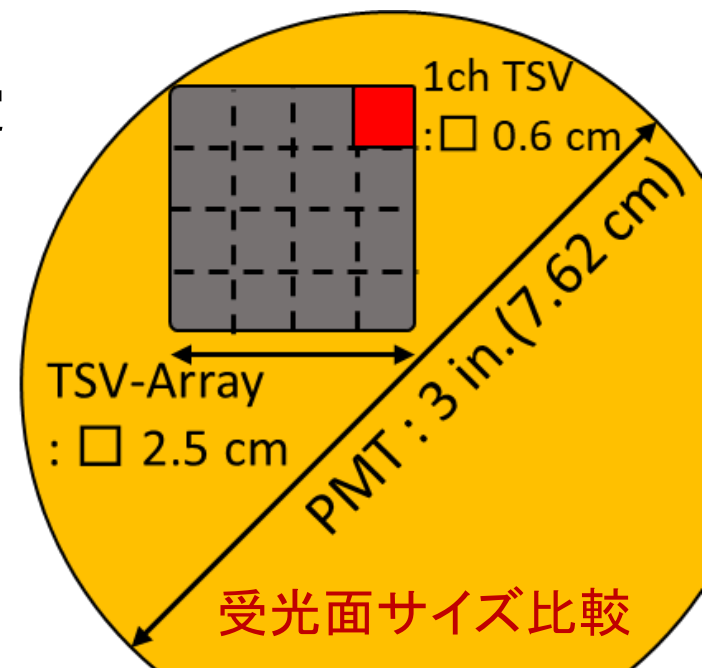
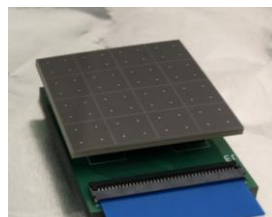
- Si 貫通電極
→ 小デットスペース
@筐体部分
- 4 × 4chのArrayタイプ



	PMT	TSV MPPC	
		50U	75U
V_{bias}	>1000 V	~50 V	~50 V
物質質量	大	小	小
時定数	数ns	~50 ns	~100 ns
検出効率	~30%	~55%	~65%

□ MPPC導入への課題

- MPPC接続による信号まとめ読み出し手法の決定
- PSDのための波形情報取得
- 低温耐性 (浜ホト未保証)

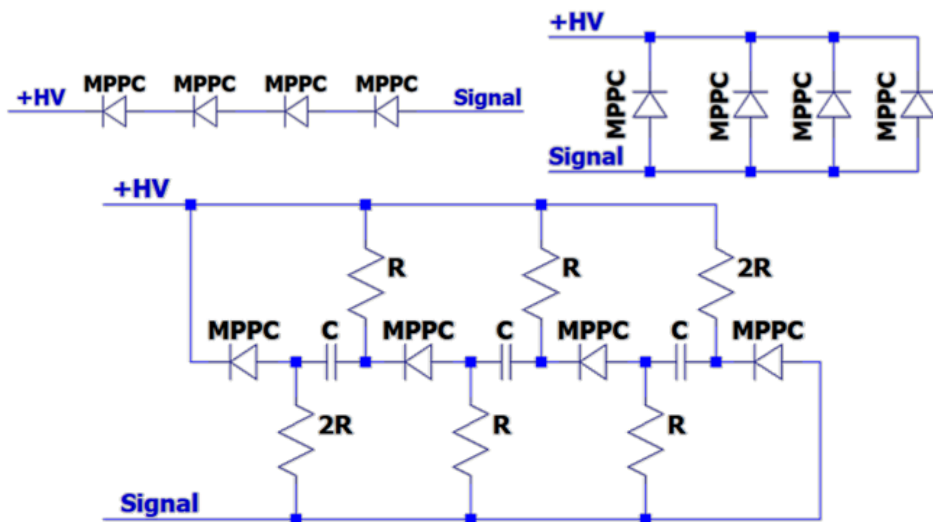


➡ 接続回路を実装した読み出し基板を製作

□ MPPC接続回路

	V_{OP}	時定数	Gain
直列	×	○	×
並列	○	×	○
ハイブリット	○	○	×

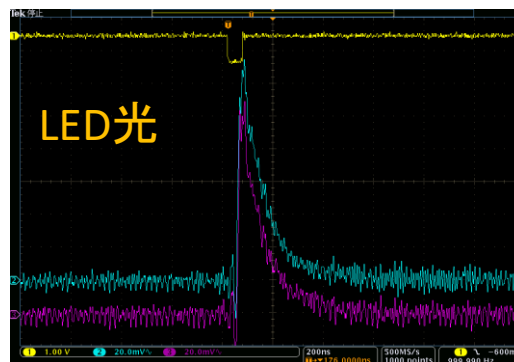
➡ LAr光のPSDを悪化させないように、ハイブリット接続を採用



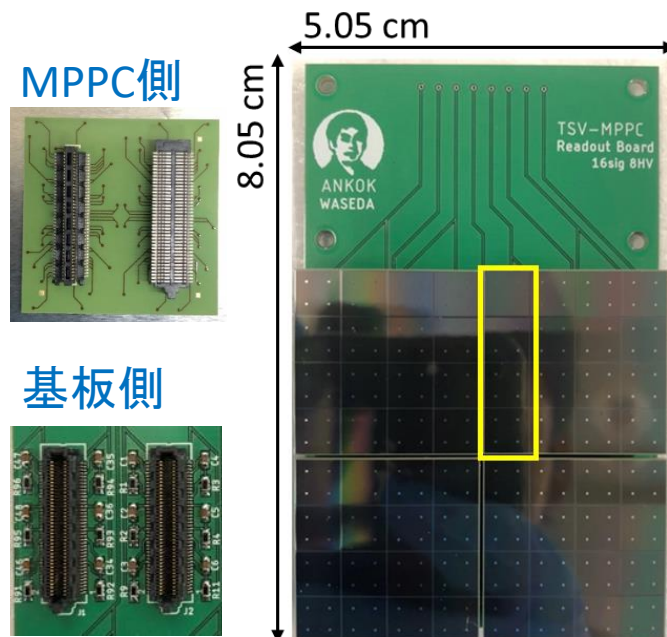
K. Ieki, et al., Nucl. Instrum. Methods A 925 (2019) pp148-155

□ TSV-MPPC Array 読出し基板

- 4 Array / 1 board
 - 4MPPC / 1signal線
 - 8MPPC / 1HV線
- 64ch MPPC
 - ➔ 16signal, 8HV



➡ ハイブリット接続回路の駆動を確認

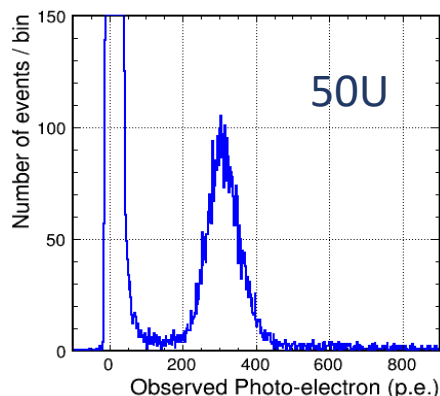
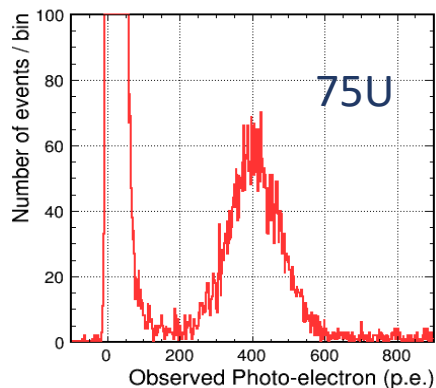


□ MPPC LAr検出器

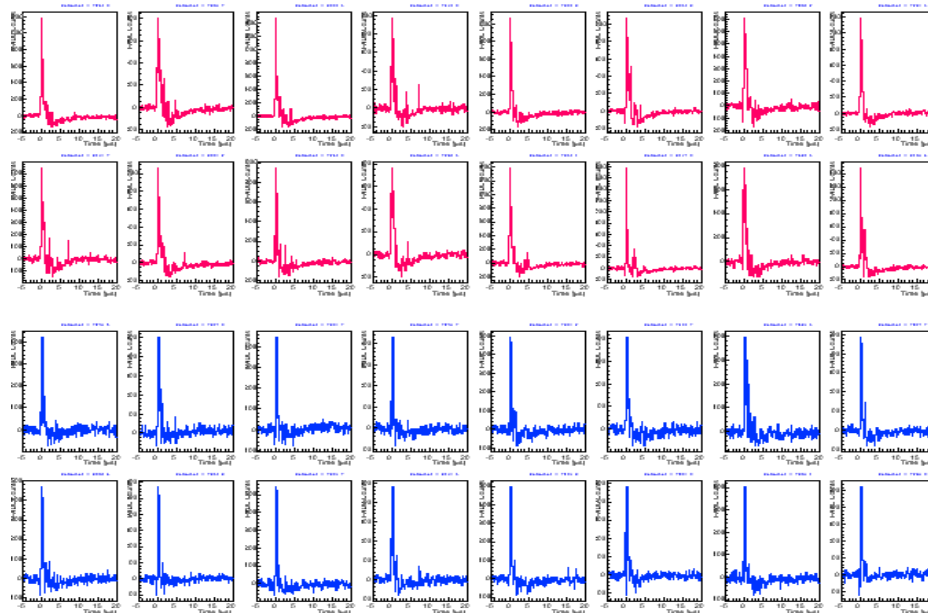
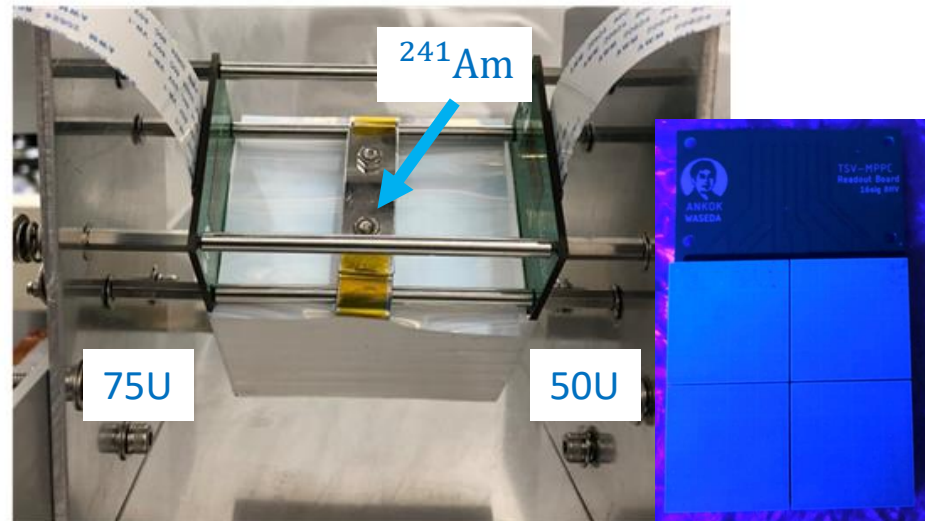
- 有感領域 : $\square 5.05 \text{ cm}$, $h 5.4 \text{ cm}$
- 光検出デバイス : TSV-MPPC Array
(75U and 50U for R&D)
- TPB薄膜 : MPPC $\sim 30 \mu\text{g}/\text{cm}^2$
ESR $\sim 40 \mu\text{g}/\text{cm}^2$
- ^{241}Am を設置 (59.5 keV γ 線)

□ ^{241}Am イベント (1月 Run)

- 全32チャンネルでLAr光を検出
- ^{241}Am 59.5 keV γ 線ピークを確認



MPPC LAr検出器



□ 現状のMPPC基板の課題

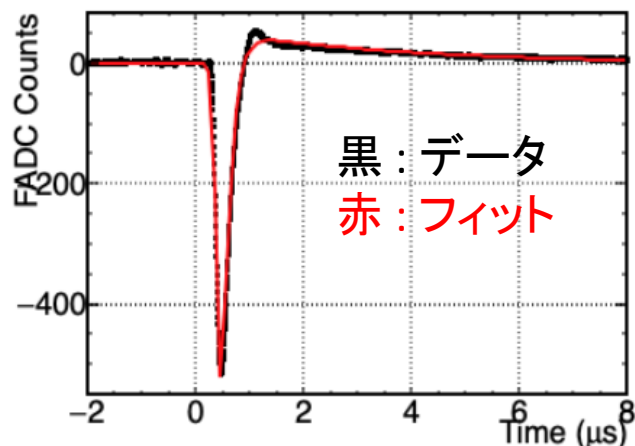
- アンダーシュートが存在 = 全範囲積分すると0
- Gainが小さく、ピーク分離せず = 数p.e.ピークからGain較正不可

➡ LAr波形の最初の $1\mu\text{s}$ から真の光量を推定し、暫定的に算出

□ MPPC出力のアンダーシュート補正 (C_{MPPC})

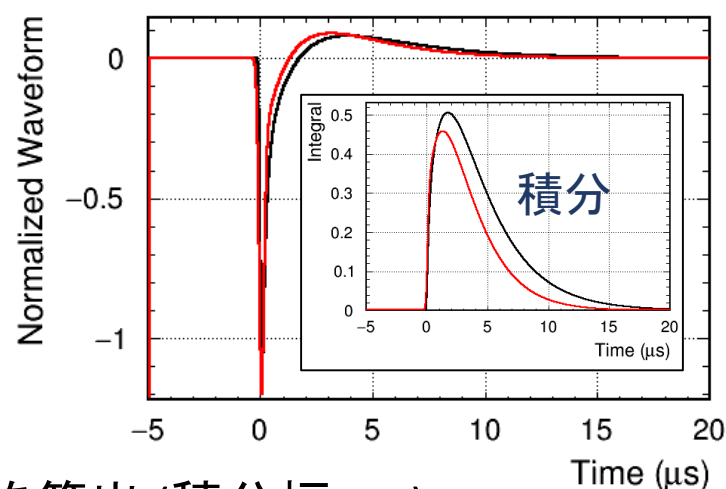
- nsパルスレーザーをLAr中で照射
- MPPC+読出し回路の応答特性を関数化
- MPPC波形 ⊗ LAr発光分布

MPPC波形 (75U)



⊗ LAr
➡

LAr波形 (75U)

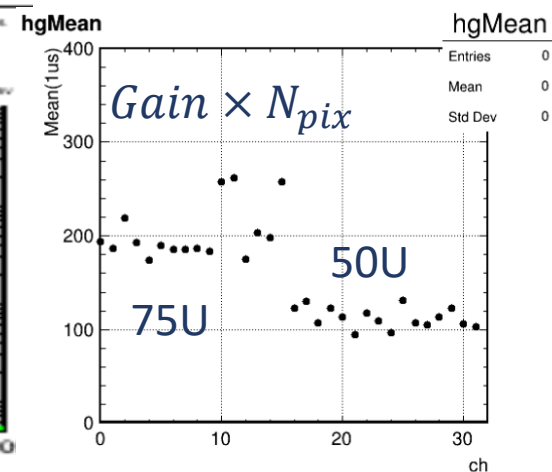
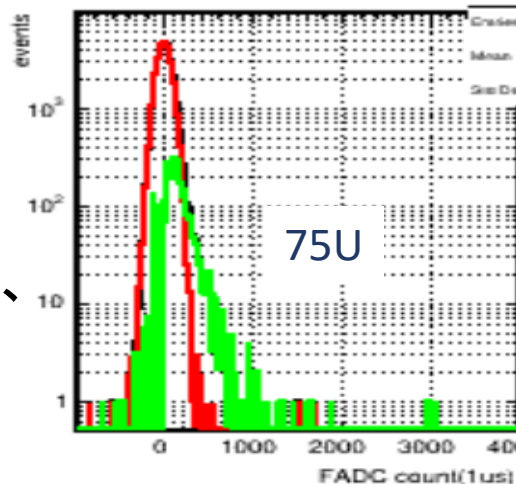


➡ 積分幅に対応するスケールファクターを算出 (積分幅 $1\mu\text{s}$)

□ $Gain \times N_{pix}$ の算出

(N_{pix} : 1光子に対して何pixel分の出力があるか)

- レーザー run で算出
- 小光量に設定
-> 2p.e.以上はクロストーク
- ペDESTAL(laser off)を差っ引き、
その平均値 = $Gain_{1\mu s} \times N_{pix}$

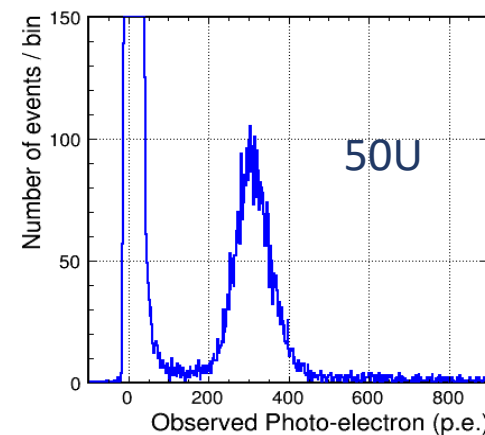
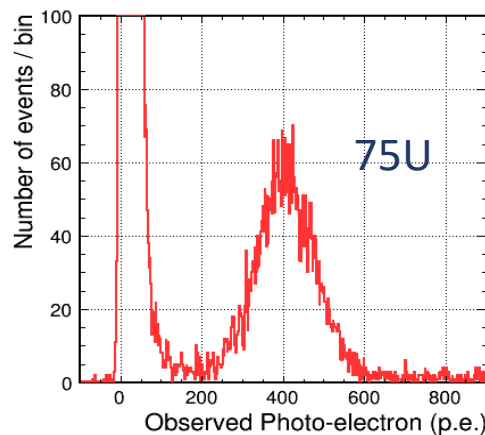


□ 光量の算出

- 光量を以下のように算出

$$LY = \frac{Q_{Am}}{Gain_{1\mu s} \times N_{pix}} \times \frac{1}{C_{MPPC}}$$

➡ 26.1 ± 5.2 p.e./keVee
(期待光量 ~ 23 p.e./keVee)

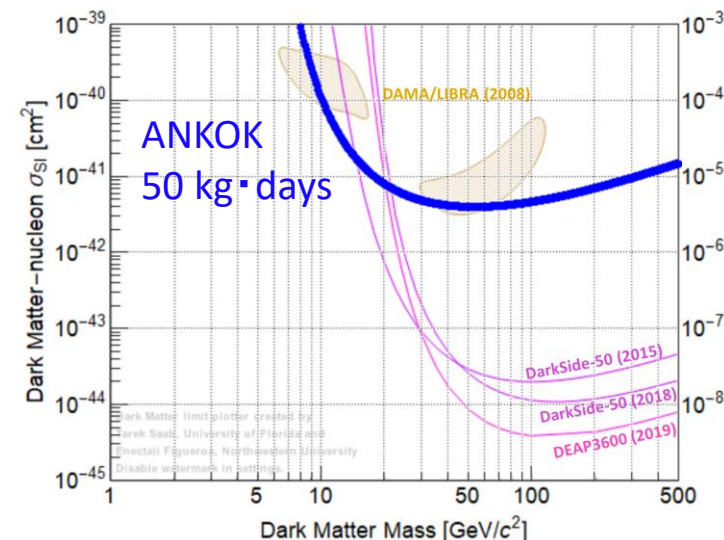


□ まとめ

- ANKOK実験はLARを用いたWIMP直接探索実験
- 検出光量向上による高感度化に主眼を置き、以下を行った
 - TPB蒸着技術の最適化
 - TSV-MPPC Arrayの導入
- TPB蒸着の最適化により11.5 p.e./keVeeの世界最大光量を達成
- TSV-MPPC ArrayのLAR環境下での駆動を確認
→ 26.1 ± 5.2 p.e./keVee

□ 今後の展望

- TSV-MPPC Arrayを用いたWIMP探索用の検出器を構築し、1 kg*50 days以上の実験を行う。



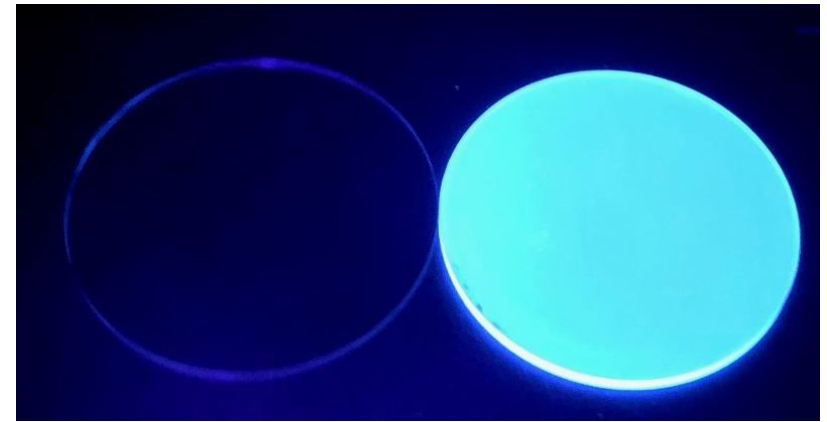
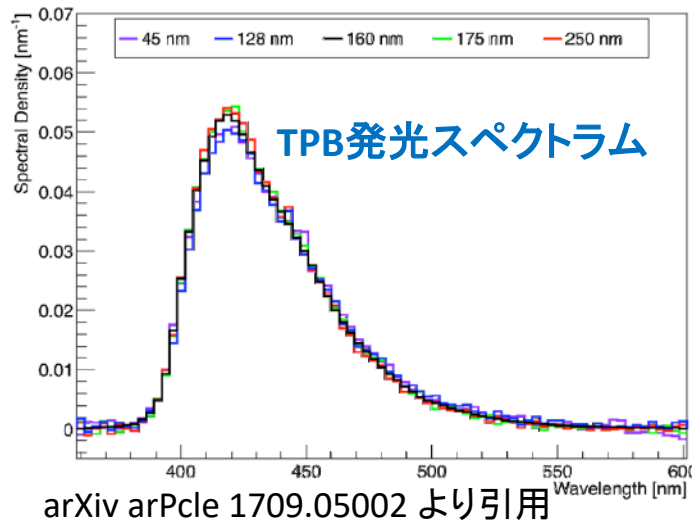
Tetra Phenyl Butadiene (TPB)

□ 波長変換材

- 真空紫外光を吸収し、可視光(420 nm)で発光
- 発光時定数がLAr蛍光に対して十分短い
- 極低温下でもその性質を変えない



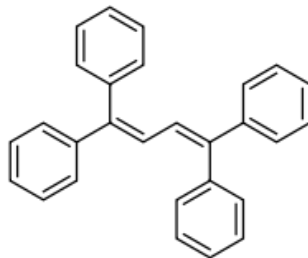
LAr蛍光の波長変換材に適している



TPBあり/なし比較 (withブラックライト)

□ 諸性質

- 白色粉状の物質



分子式	$C_{28}H_{22}$
分子直径	~1nm
密度	1.079 g/cm^3
融点(@1 atm)	$207 \sim 209 \text{ }^\circ\text{C}$
沸点(@1 atm)	$556.1 \text{ }^\circ\text{C}$

TPB 波長變換效率 測定

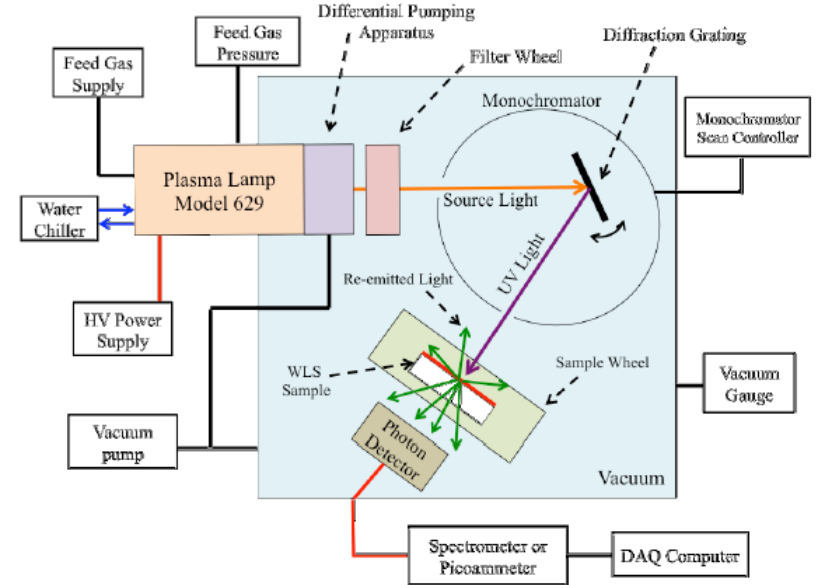


Measurements of the Intrinsic Quantum Efficiency and Visible Reemission Spectrum of Tetraphenyl Butadiene Thin Films for Incident Vacuum Ultraviolet Light

Christopher Benson
Dr. Gabriel Orebi Gann, Dr. Victor Gehman

September 23rd, 2017
LIDINE 2017, SLAC National Accelerator Laboratory

ICEPP Symposium



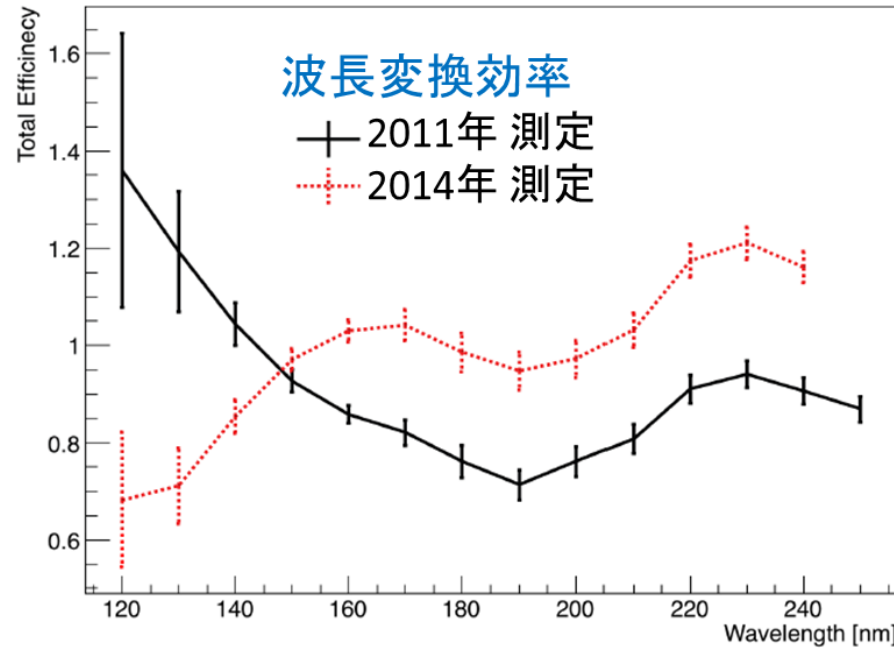
Photon Ratio

$$\beta_{i,exp}(\lambda) = \frac{I_{TPB}(\lambda) - I_{corr}(\lambda)}{I_{light}(\lambda) - I_{corr}(\lambda)} \times \frac{\int d\lambda' \frac{hc}{\lambda'} R(\lambda') M(\lambda - \lambda')}{\int d\lambda'' \frac{hc}{\lambda''} R(\lambda'') P(\lambda'')}$$
Reemitted Light Photocurrent, Dark and Background photocurrent corrections, Photodiode Response, Incident light Spectrum, TPB Reemission Spectrum

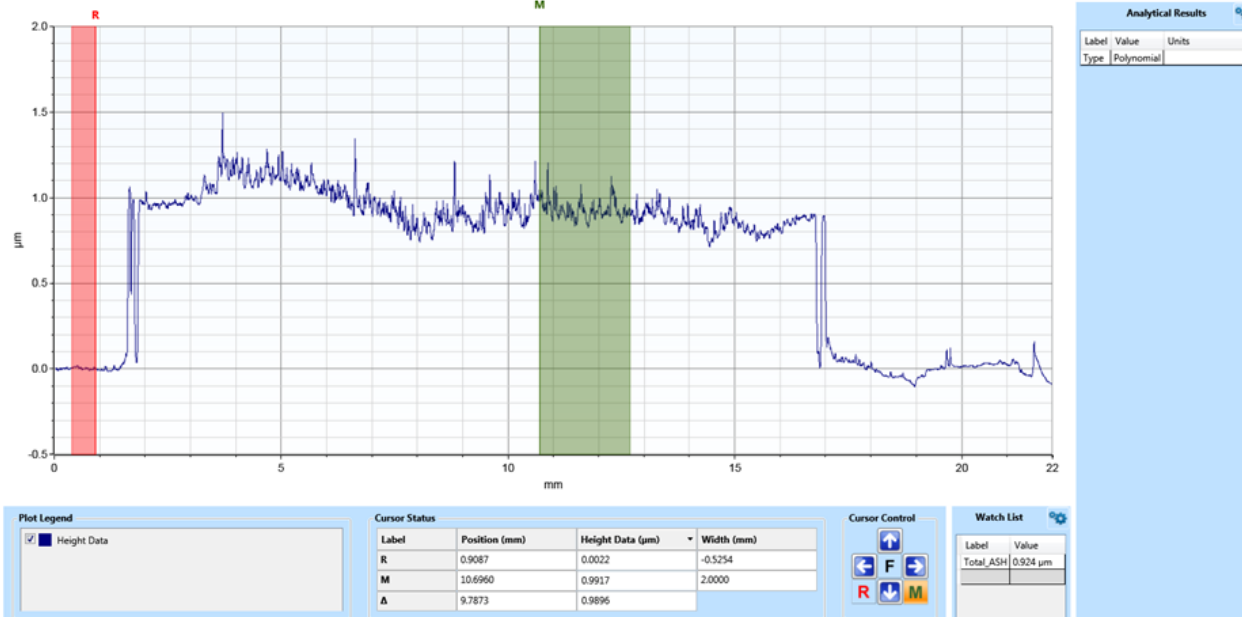
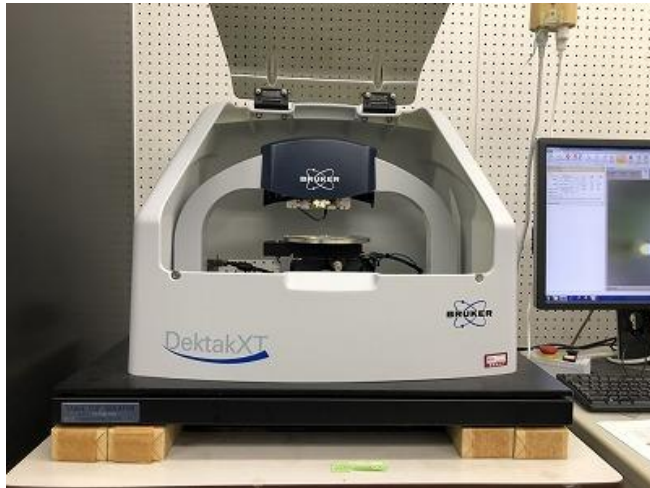
Absolute WLSE

$$\epsilon_i(\lambda) = \beta_{i,exp}(\lambda) \times \frac{1}{A_i}$$

Geometric Acceptance Fraction Determined from simulation



測定装置 : Dektak 6M



充填率 ~30%

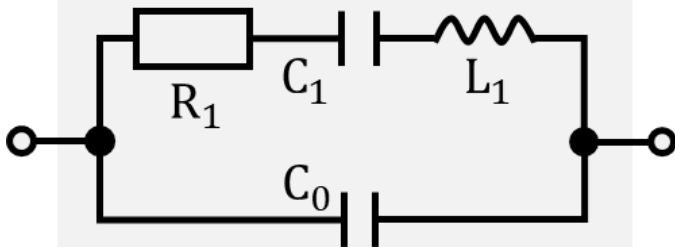
蒸着量測定 : Quartz Crystal Microbalance

□ 水晶発振子マイクロバランス (Quartz Crystal Microbalance, QCM)

- ~100 ng オーダーの質量測定ができるデバイス
- 水晶円板を電極で挟んだ発振子

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 \times C_1}}$$

等価回路



C_0 : 電極容量 + 浮遊容量

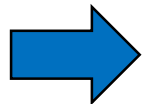
C_1 : 水晶の伸縮/可塑性

L_1 : 振動部分の質量に相当

R_1 : 内部摩擦、音響損失など



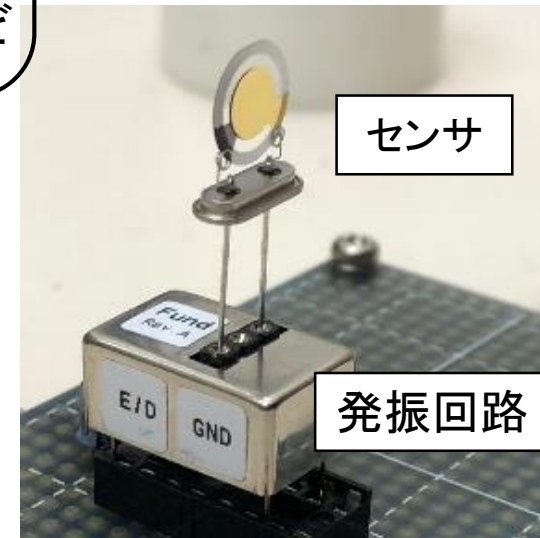
- 電極面に物質が固着すると、発振周波数が減少する



周波数変化量から、付着量を測定できる

$$\Delta m \propto \frac{\Delta F}{A}$$

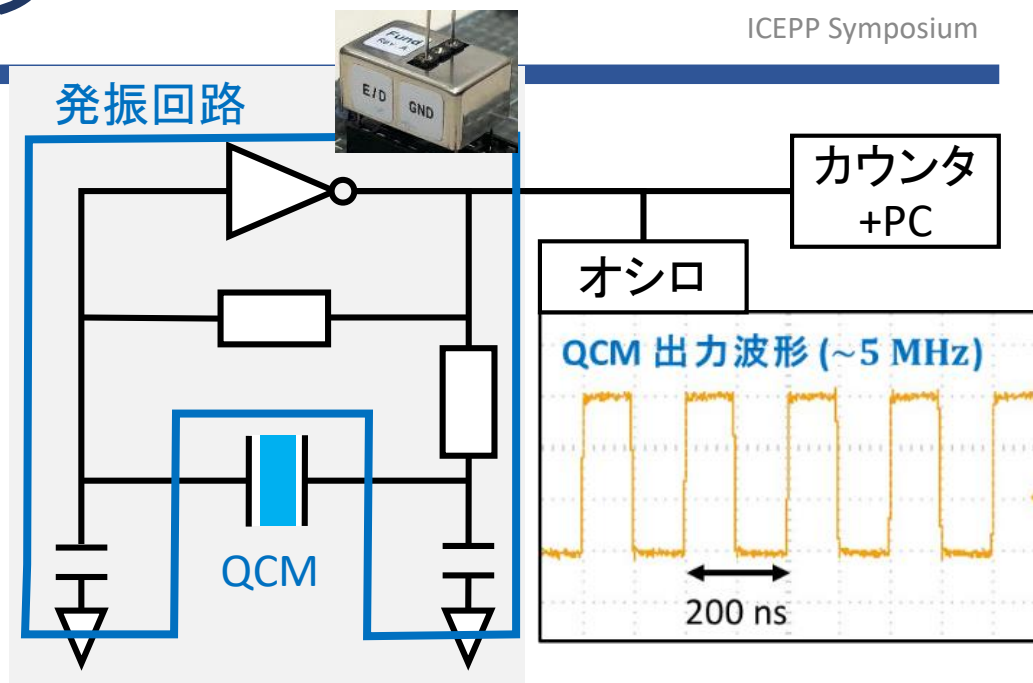
Δm : 固着量
 ΔF : 発振周波数変化
 A : 電極面積



QCM 測定セットアップ

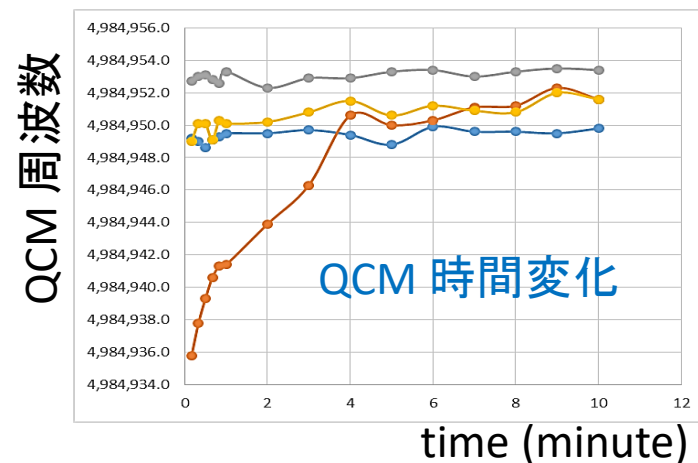
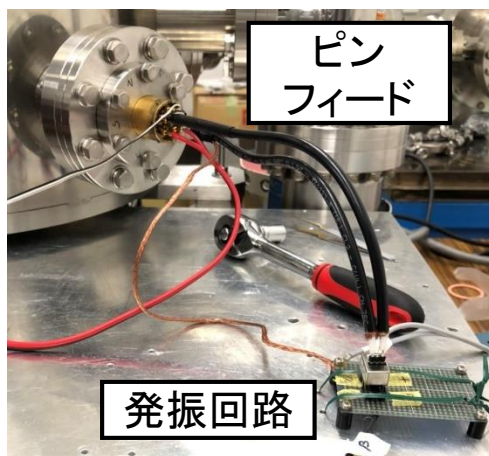
□ QCMセンサ

メーカー	多摩デバイス
基準振動数	5 MHz
電極サイズ	φ5.0 mm
測定感度	3.47 ng/Hz
測定レンジ	300 ng ~ 100μg



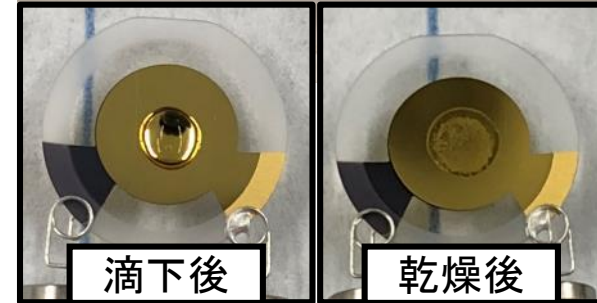
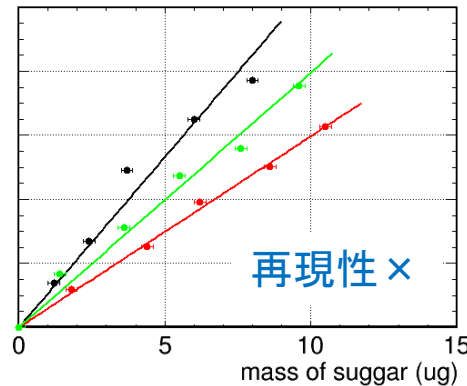
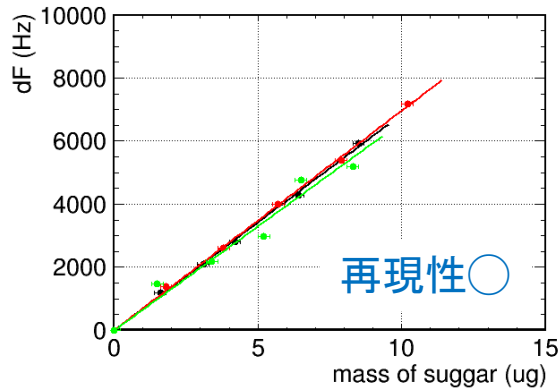
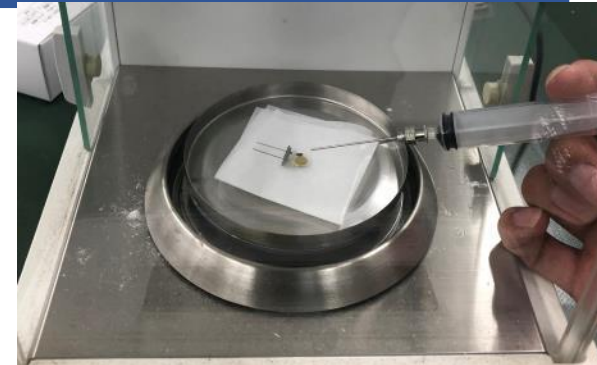
□ 蒸着装置内への導入

- ピンフィードスルーを介して容器内部に導入
- 容器内では50cm分の延長ケーブルの先にQCMを設置



□ QCMの個体差と測定再現性

- 砂糖水溶液を用いて、付着量と周波数変化の関係を確認
 - 水溶液の質量を測りながら、電極面に滴下
 - 滴下後、乾燥させ周波数変化を測定
 - 5個体検査 -> 3個体が再現性O

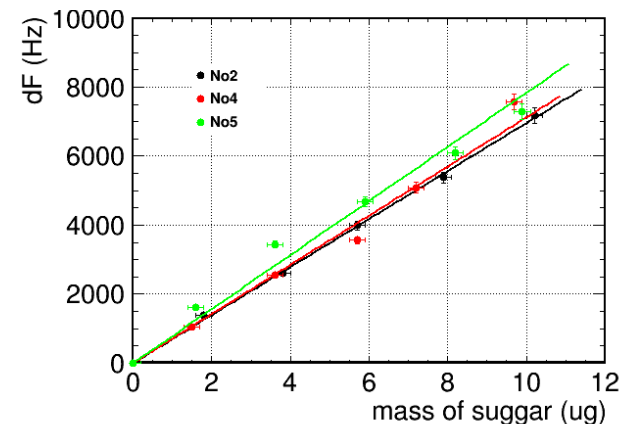


- 周波数変化 ΔF から蒸着膜厚 Δt に変換

$$\Delta t = \frac{\Delta F}{\alpha \times A} \times \frac{1}{\rho_{TPB}}$$

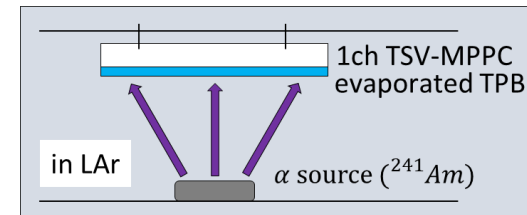
$$\left(\begin{array}{l} \Delta F_{sugar} = \alpha \times m_{sugar} \\ \text{TPBの密度} : \rho_{TPB} = 1.079 \text{ g/cm}^3 \\ \text{QCM電極面積} : A = 2.5^2 \pi \text{ mm}^2 \end{array} \right)$$

再現性の良い3個体



LAr波長変換光に対する光子検出効率 (PDE) を測定

- 受光面に期待される光子数: $\mu_{expected} = 2400$ photon
- Amイベントの入射光子数と検出光子数との比をPDEとする

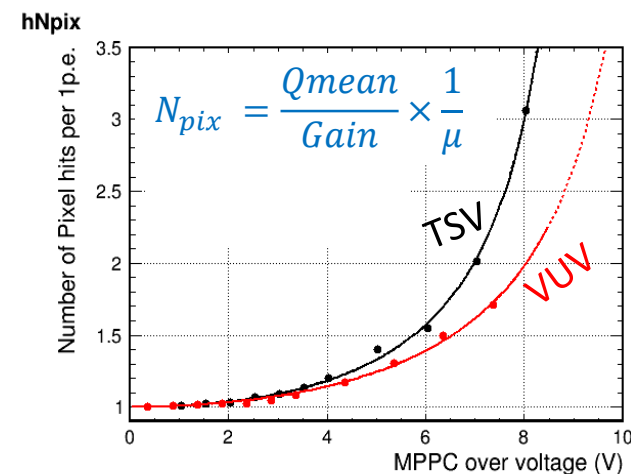
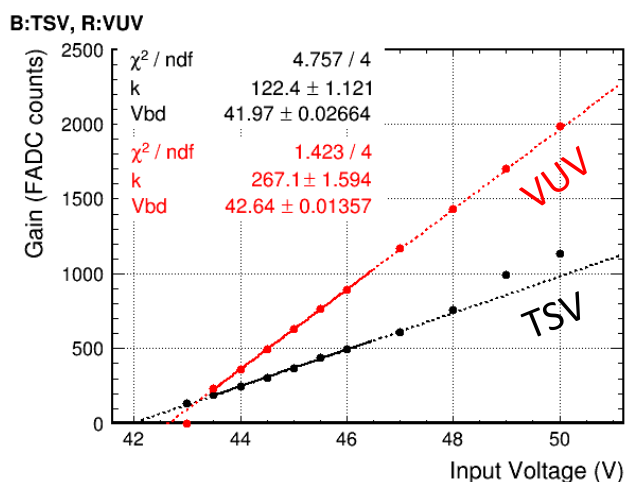
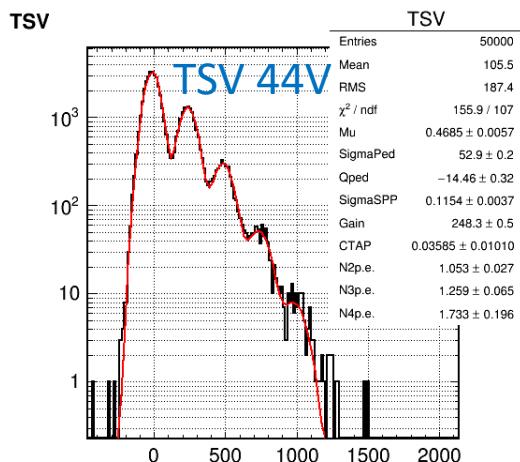
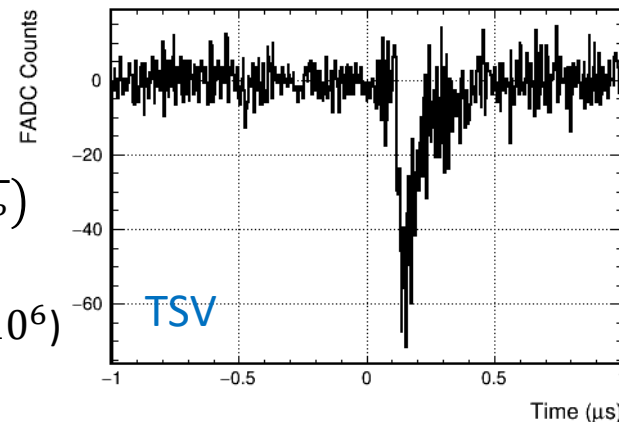


● Gain/ N_{pix}

- LEDデータを用いて算出 (光量=few p.e.)
- 光量分布を以下の関数でfit

$$f(x) = P(0; \mu)Gaus(Q_{ped}, \sigma_{ped}) + (1 - X)P(1; \mu)Gaus(Q_{ped} + Gain, \sqrt{\sigma_{ped} + \sigma_{SPP}}) + nGaus$$

- $Gain \sim (2.05 \pm 0.19) \times 10^6$ (cf. スペックシート: 1.9×10^6)
- N_{pix} : V_{ov} が大きいほど大



PDE測定 (PDE算出)

- PDEを以下の式で算出

$$PDE = \frac{Q_{Am}}{Gain} \times \frac{1}{N_{pix}} \times C_{occupancy} \times \frac{1}{\mu_{expected}}$$

検出光子数
立体角より計算

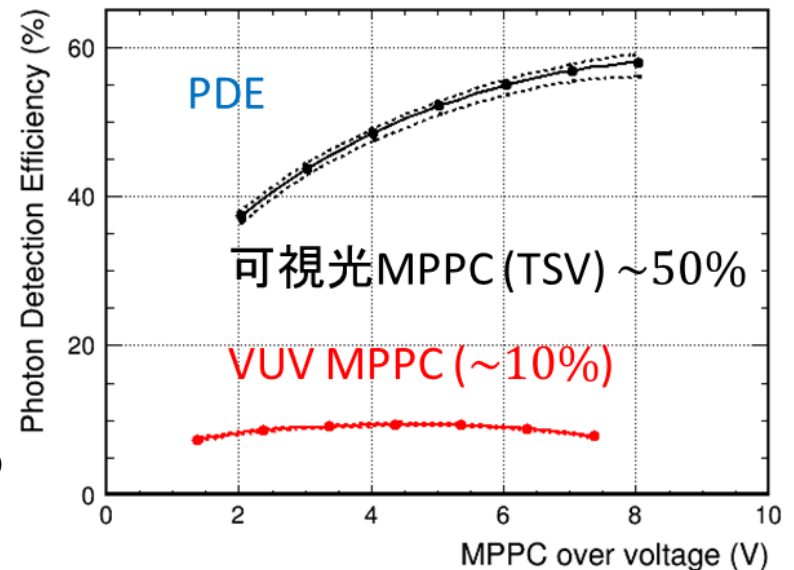
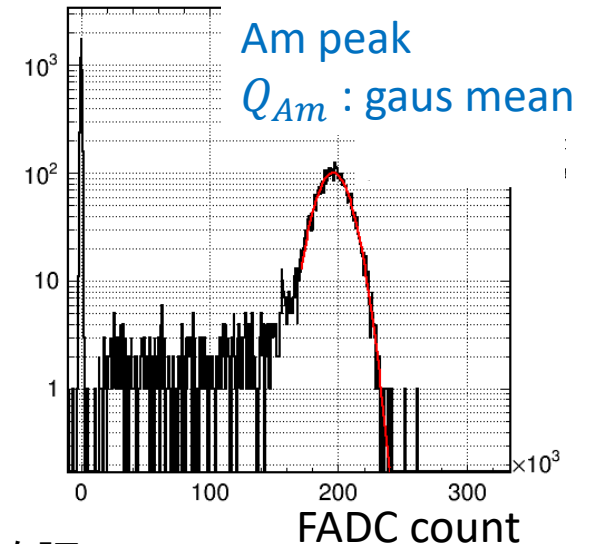
($C_{occupancy}$: 同一pixelに入る分を補正)

- 測定結果

- 既にLAr運用実績があるVUVタイプと同様に、以下を確認
 - ✓ LAr蛍光の読み出しが可能 (w/ TPB)
 - ✓ Gain/NpixがVovに伴い上昇
- TSVのLAr+TPBに対するPDEが>50%
Vovが大きいほどPDE大

- TSV-MPPCについて、以下をクリア

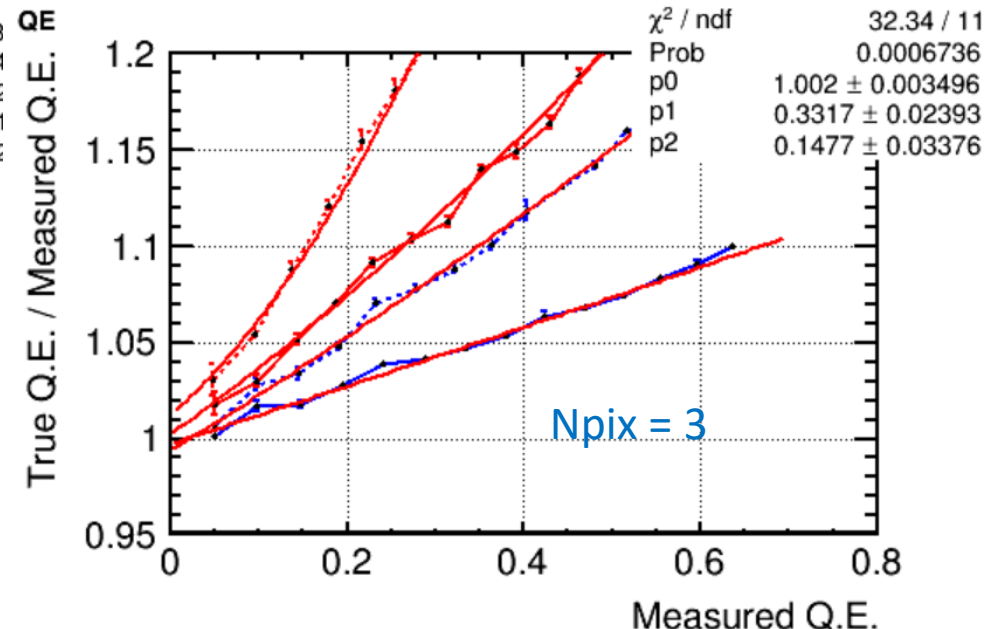
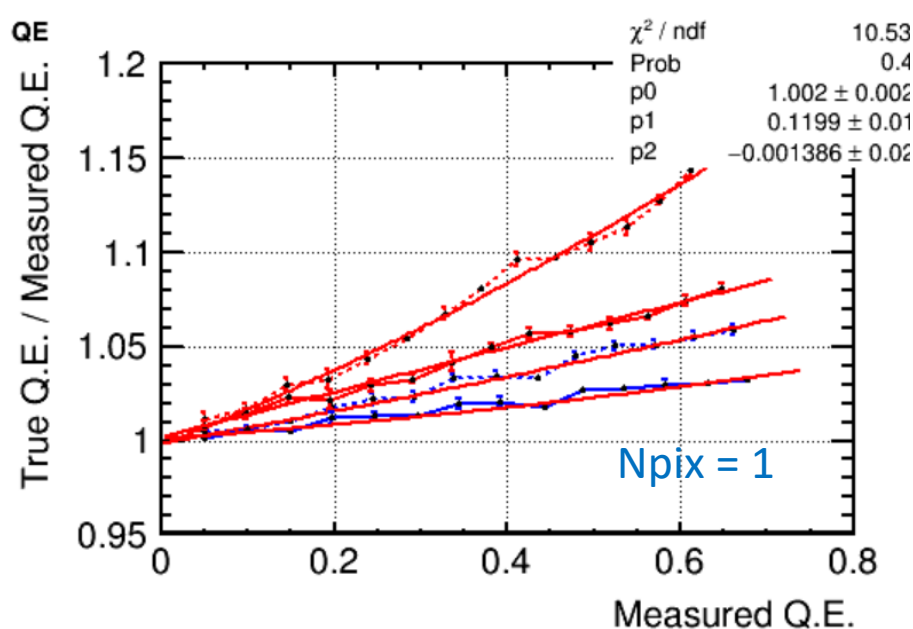
- ✓ LArの極低温環境下 (87 K)で駆動する
- ✓ LAr波長変換光 (420 nm)に高い感度を持つ
- 3. 十分な光検出面積を確保できる



Cocupancy: 同一pixelに入る確率補正

以下のように toyMC でAm 波形を再現し、補正ファクターを決定

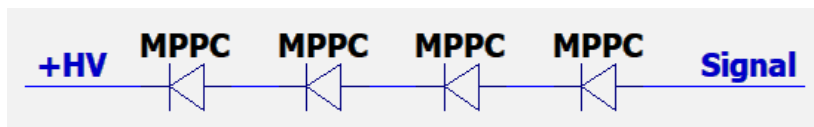
- Fast, Slowの時定数 10ns , 1.5 us Slow/Total = 0.25 にしたがって発光時間を乱数で決定
- その時間を起点としてMPPCの応答波形をExp function (50U:40ns , 100U: 160ns)を生成
- 1pixあたり複数の光電子がありかつその波形が重なり合う場合、足しあげるのではなく最大値をとるようにする
- 最後に波形のヒストグラムを積分して補正後の光量に換算する



受光面積を確保しつつ、チャンネル数を抑えるためにマージ回路を実装する

● 直列

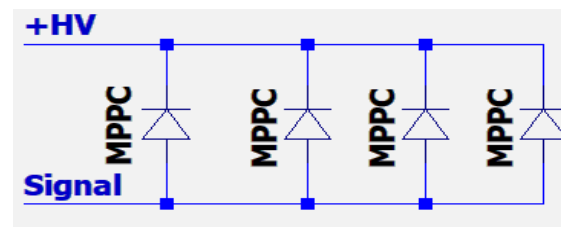
- 時定数が短くなる
- × Gainが減少
- × 必要印加電圧が段数に比例



● 並列

- 必要印加電圧が増加しない
- Gainが増加
- × 時定数が長くなる

$$\text{Gain} \propto C_{MPPC}$$
$$\tau = RC$$



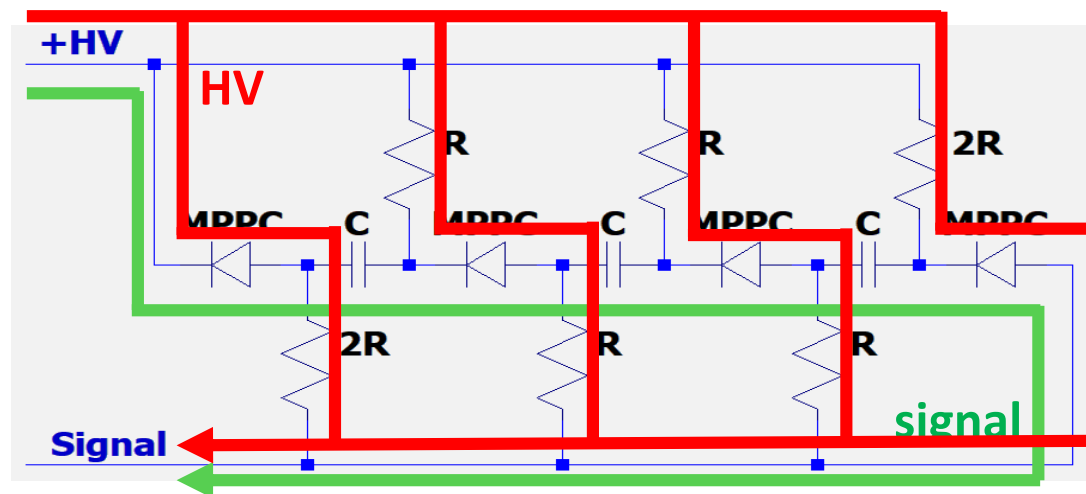
● ハイブリッド (MEGを参考)

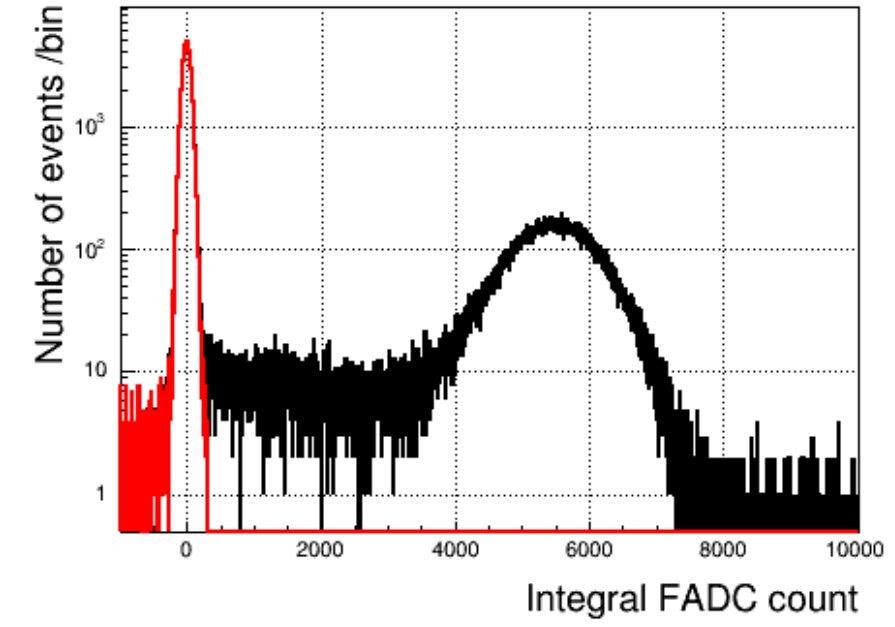
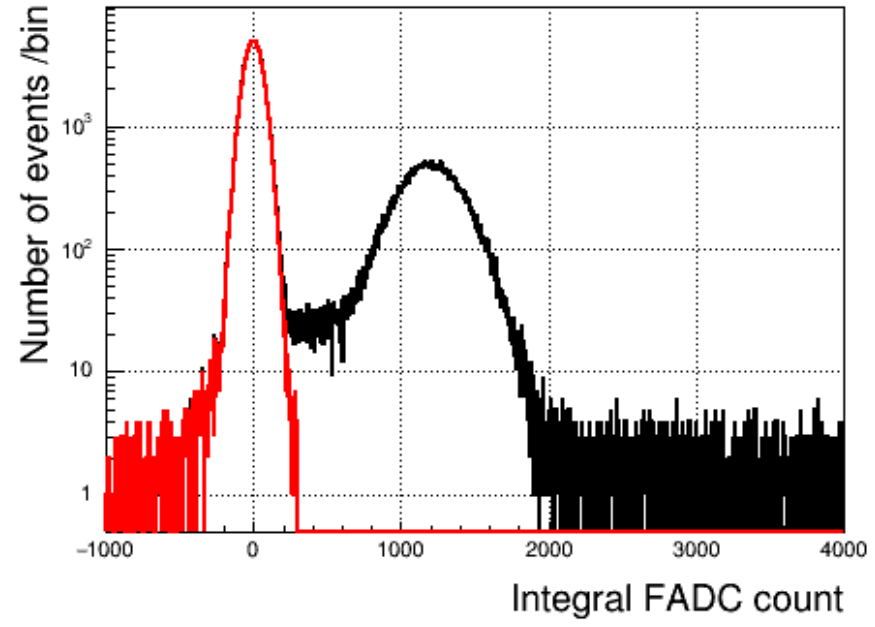
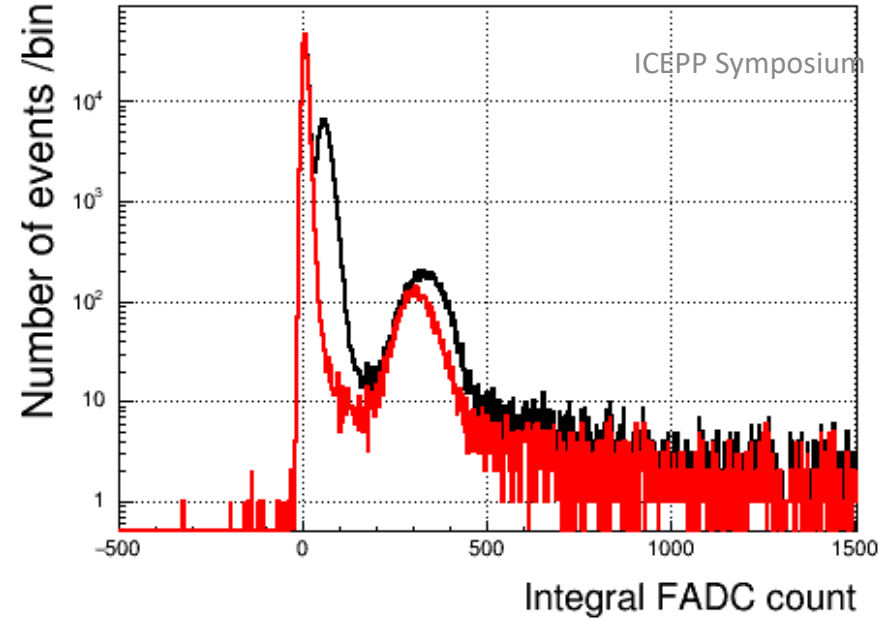
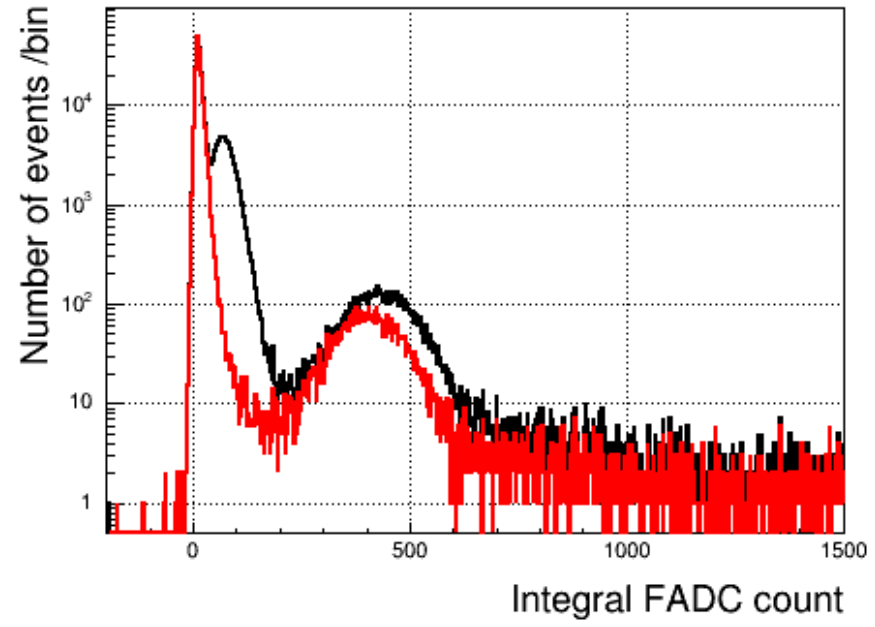
[K. Ieki, et al., Nucl. Instrum. Methods A 925 \(2019\) pp148-155](#)

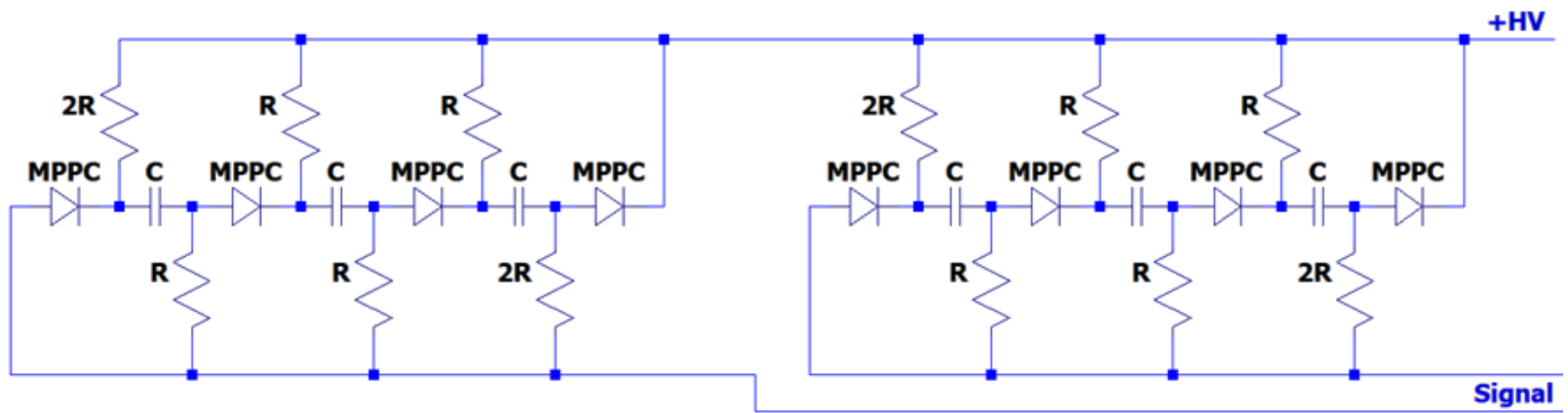
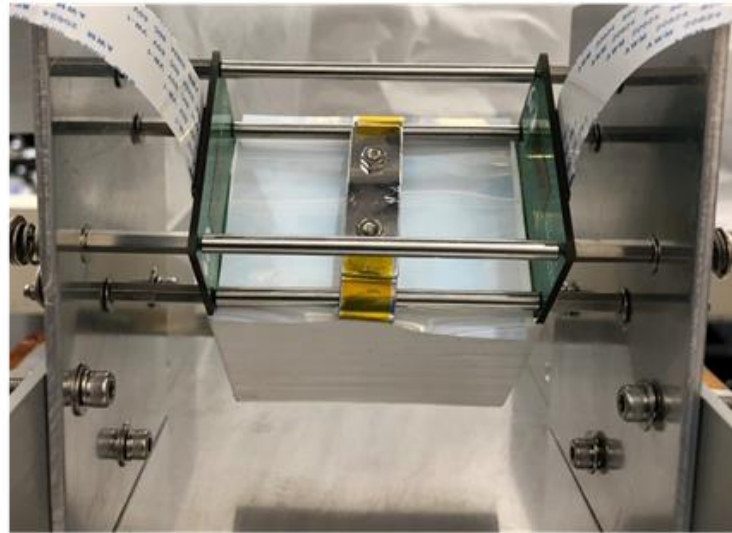
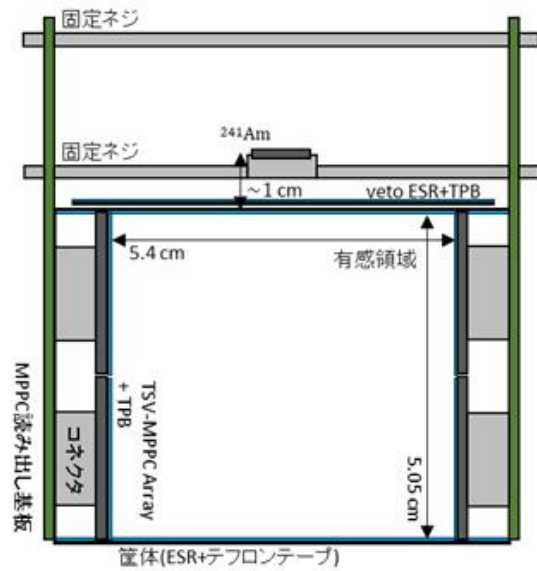
印加電圧と信号のラインが異なる

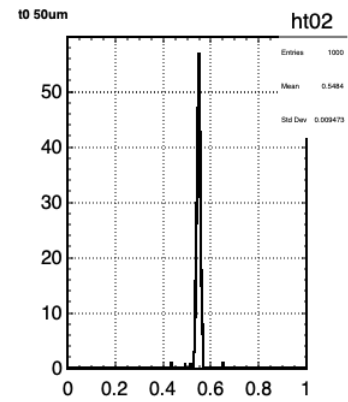
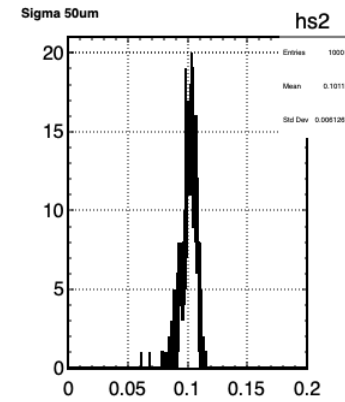
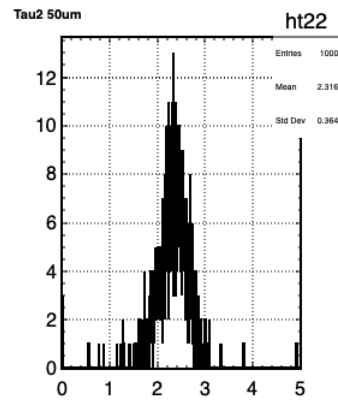
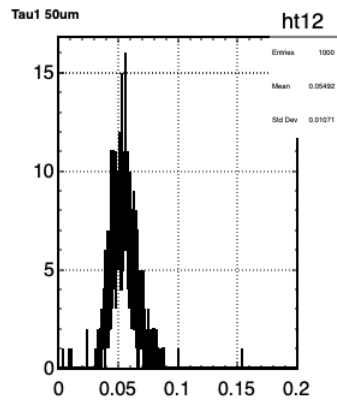
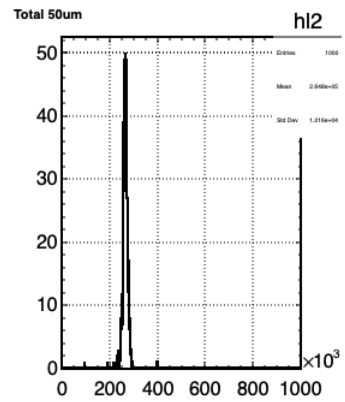
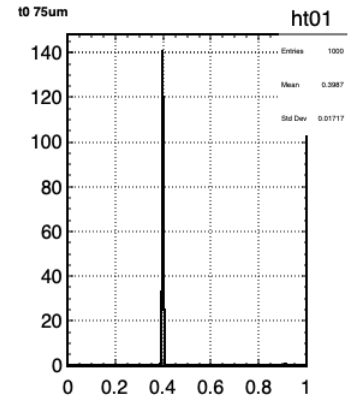
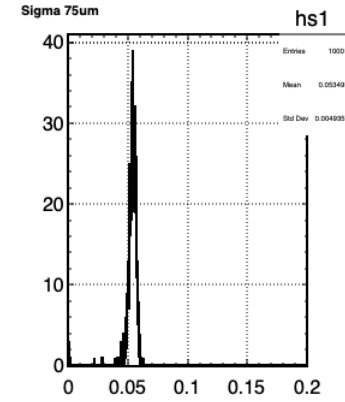
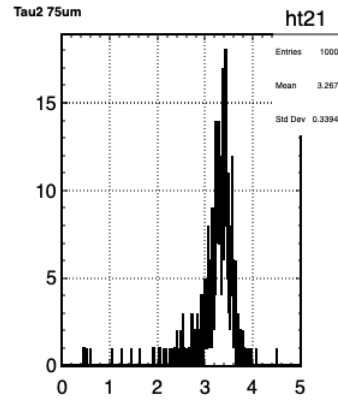
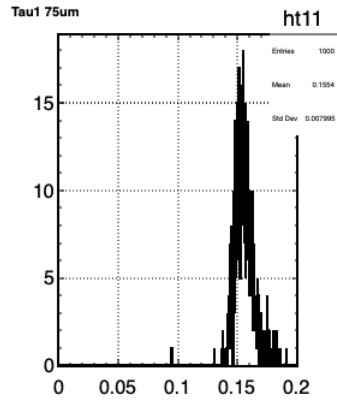
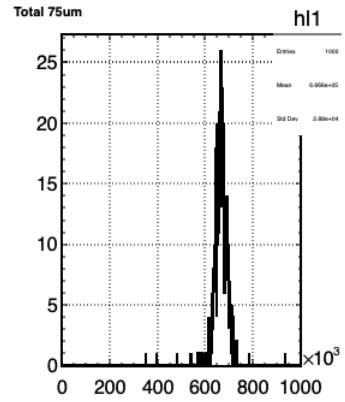
➡ 直列/並列のいいとこ取り

- 時定数が短くなる
- 必要印加電圧が増加しない
- × Gainが減少

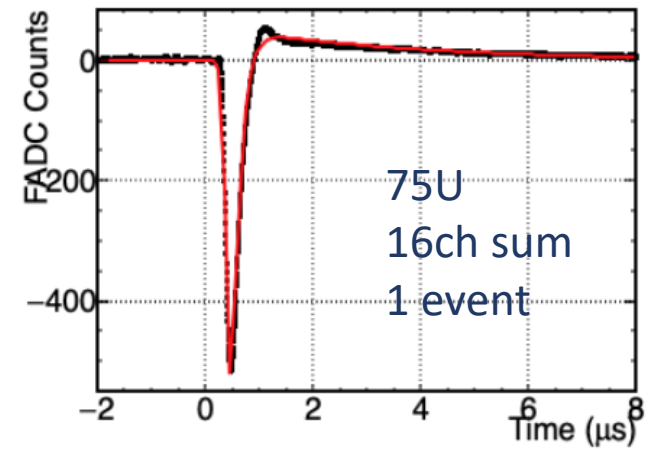
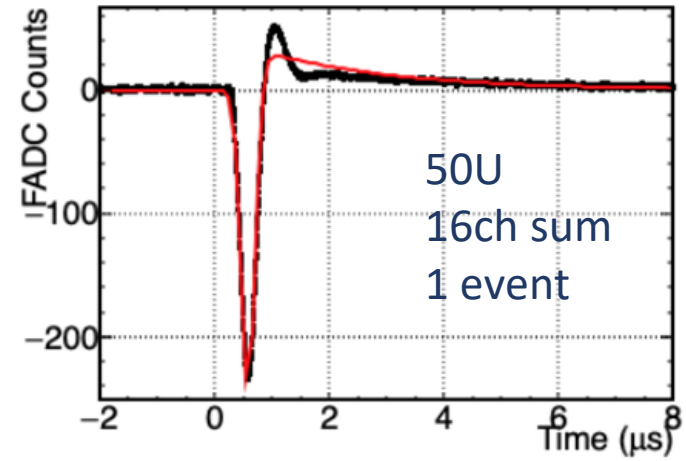
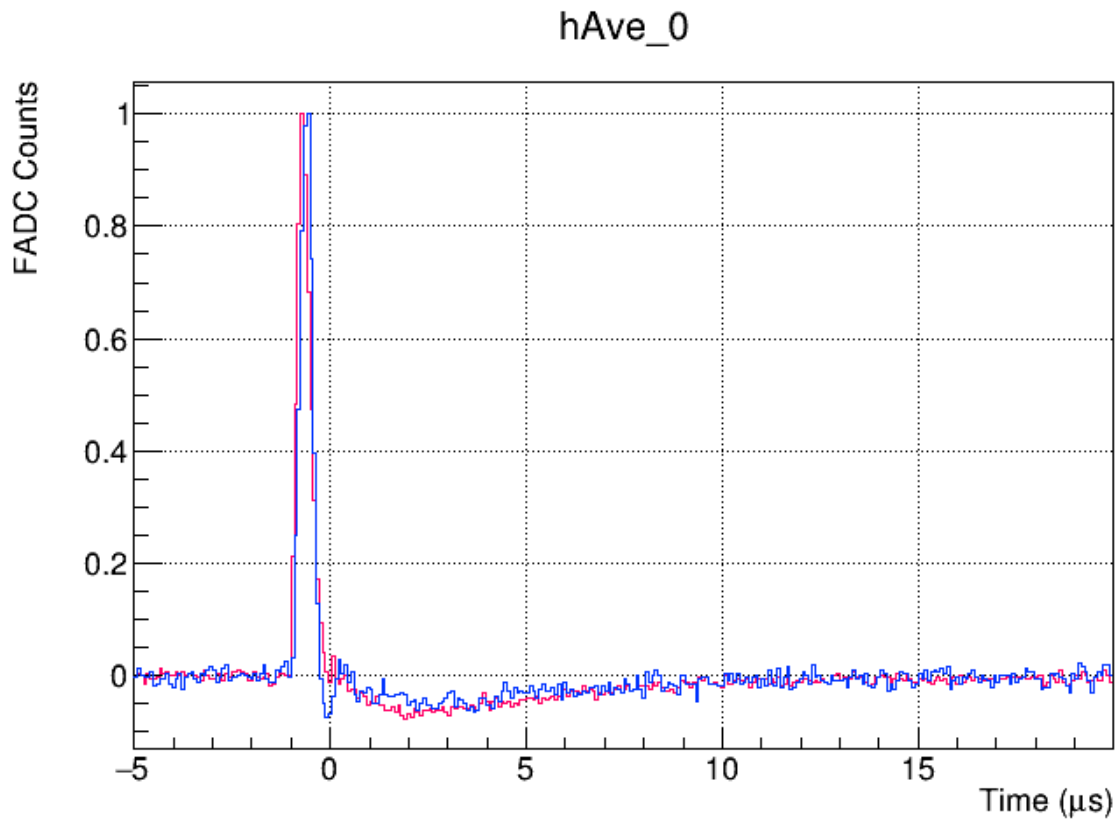


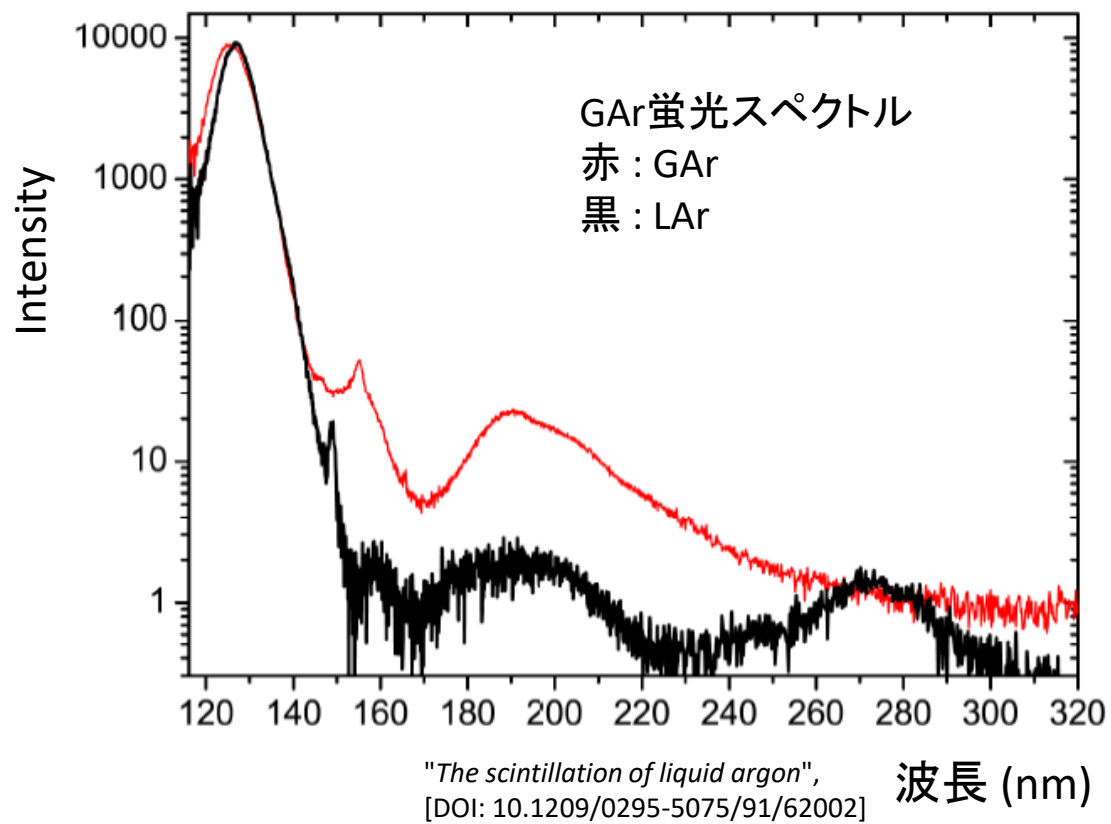






$$f_{\text{MPPC}}(t) = -A \times \left(\text{exGaus} \left(t; t_0, \frac{1}{\tau_1}, \sigma \right) - \text{exGaus} \left(t; t_0, \frac{1}{\tau_2}, \sigma \right) \right)$$





TSV-MPPCのPDEをスペック通り($V_{ov}=6V$)かつ、75Uと50Uに20photonずつ分配されることを仮定した場合に、期待される光量は
 $20 \text{ photon/keVee} * 53\% + 20 \text{ photon/keVee} * 62\% = 23 \text{ p.e./keVee}$

