



暗黒物質直接探索のための液体 CF_4 スペクトロメーターの開発

神戸大学 谷口紘大

身内賢太郎 東野聡 中野佑樹^A 水越慧太^B

富山大学^A 東北大学^B

2025年 9月17日

暗黒物質(ダークマター)

- 標準模型の枠組みを超えた未発見粒子
- **WIMP(Weakly Interacting Massive Particle)**

- 暗黒物質の有力候補

- 直接探索実験

- 稀にWIMP — 原子核の弾性散乱を起こす

- スピン依存する (SD) 散乱

- スピン依存しない (SI) 散乱

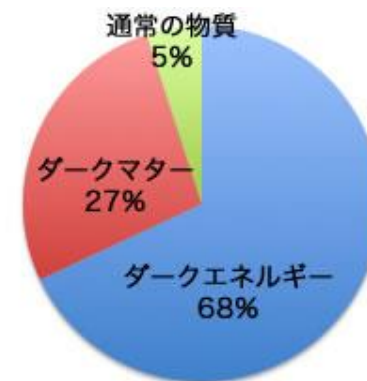
- **SD散乱**

- 散乱弾面積が標的原子核のスピン量に依存

$$\sigma_{\chi-N}^{SD} \propto \lambda^2 J(J+1)$$

λ : ランデ因子, J : 標的原子核のスピン量

^{19}F がSD散乱において有利に働く



<https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/xmass/darkmatter.html>

標的原子核ごとの $\lambda^2 J(J+1)$

同位体	J	$\lambda^2 J(J+1)$
^{19}F	1/2	0.647
^{23}Na	2/3	0.041
^{127}I	5/2	0.007
^{129}Xe	1/2	0.124
^{131}Xe	3/2	0.055

[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0927-6505\(96\)00047-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0927-6505(96)00047-3)

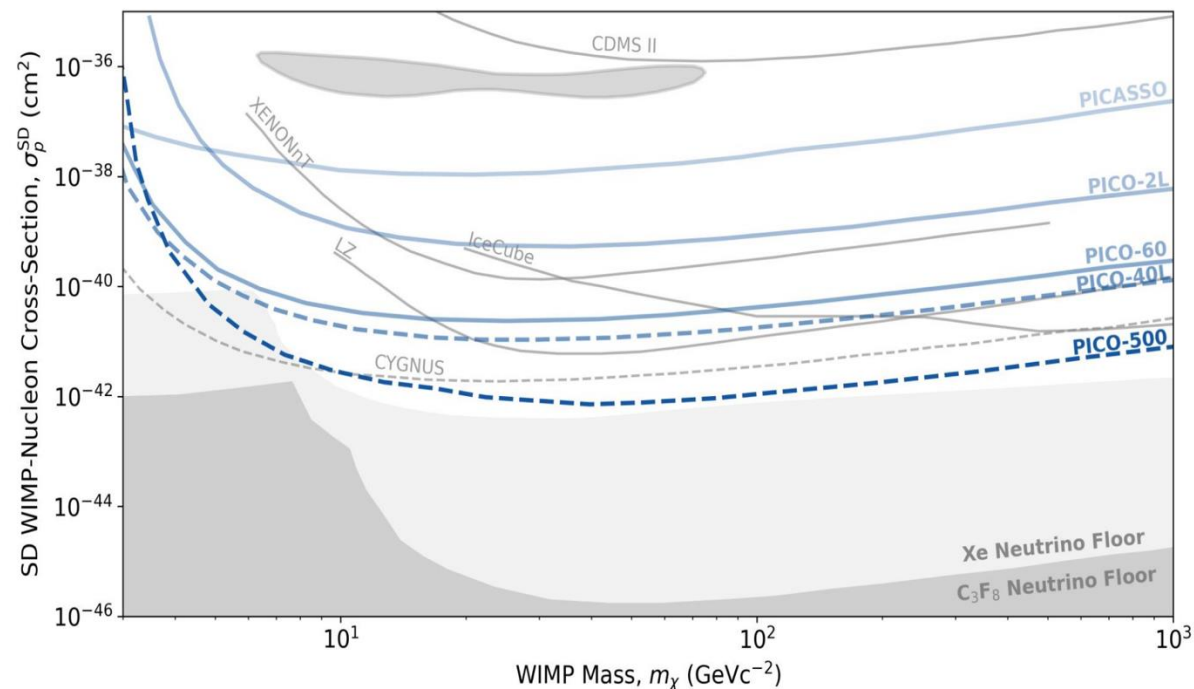
実験のモチベーション

➤ PICO-60実験

- フッ素化合物(C_3F_8 : 52.2 kg)を用いた泡箱検出器でSD探索
 - SD探索において最も強い制限
 - $3.2 \times 10^{-41} \text{ cm}^2 @ 25 \text{ GeV}/c^2$
 - 次世代PICO-500が準備中
- PICO実験では、エネルギー情報を見していない



エネルギースペクトルを得られる実験を計画する



<https://indico-cdex.ep.tsinghua.edu.cn/event/175/contributions/2350/>

実験のコンセプト

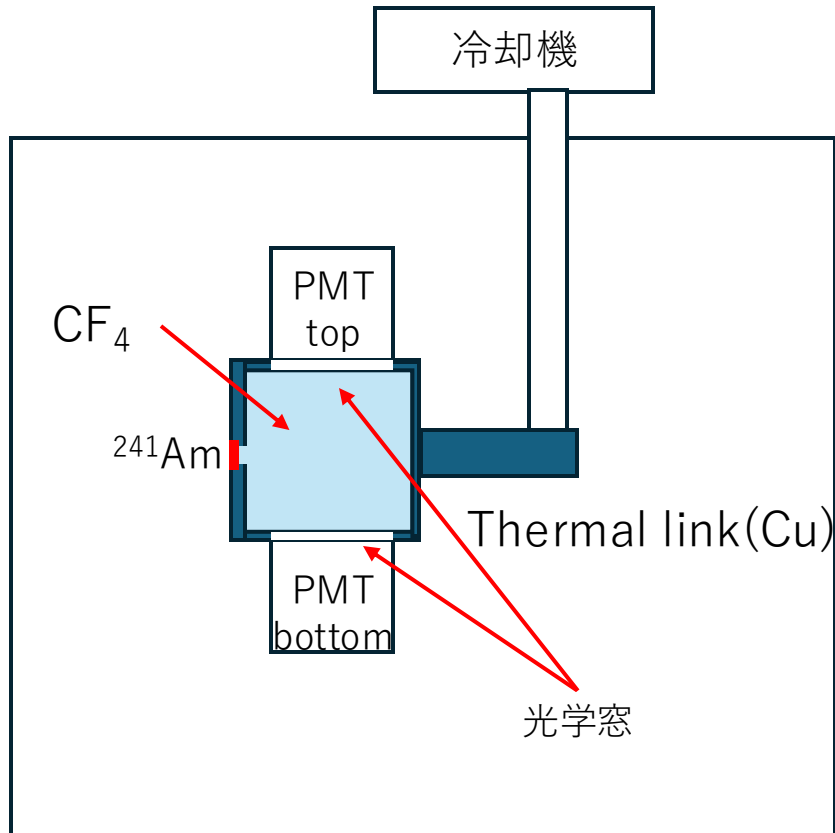
- ^{19}F をターゲット原子核とした**シンチレータ**を使用
 - CF_4 を用いる ← 発光することが知られている
- 将来的に**大型検出器**で暗黒物質探索を行いたい
- 高感度に向け大質量化 → **液体 CF_4** を用いる
- 基礎的なシンチレータとしての特性の理解を目指す
 - 液体 CF_4 で発光をみる

実験装置

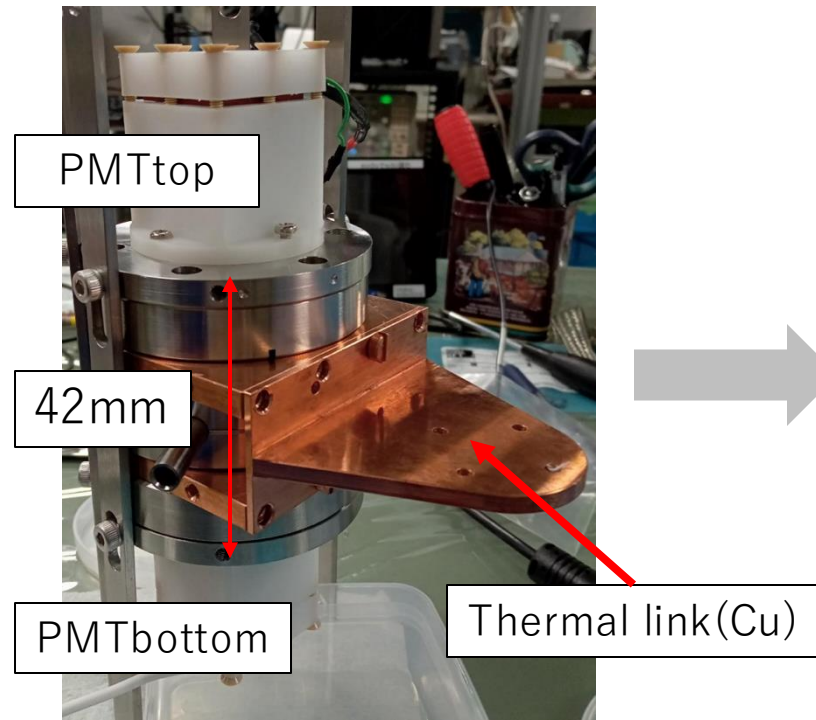
- 検出器を冷却機に銅プレートで熱的に接触
 - 検出器内を CF_4 の沸点(-128度)以下まで冷却
- 光学窓を取り付けPMTを外付けする
- 検出領域内に ^{241}Am 設置



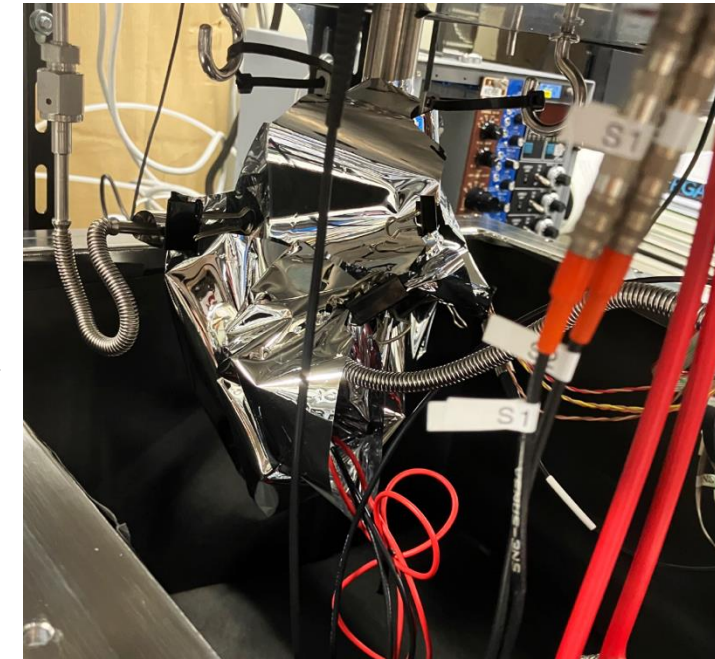
浜松ホトニクスのパMT使用
R8520-406



真空容器の中の様子



検出器
 $22 \times 22 \times 42$ (高さ) mm^3



アルミマイラで巻いて
熱輻射を抑える

データ取得

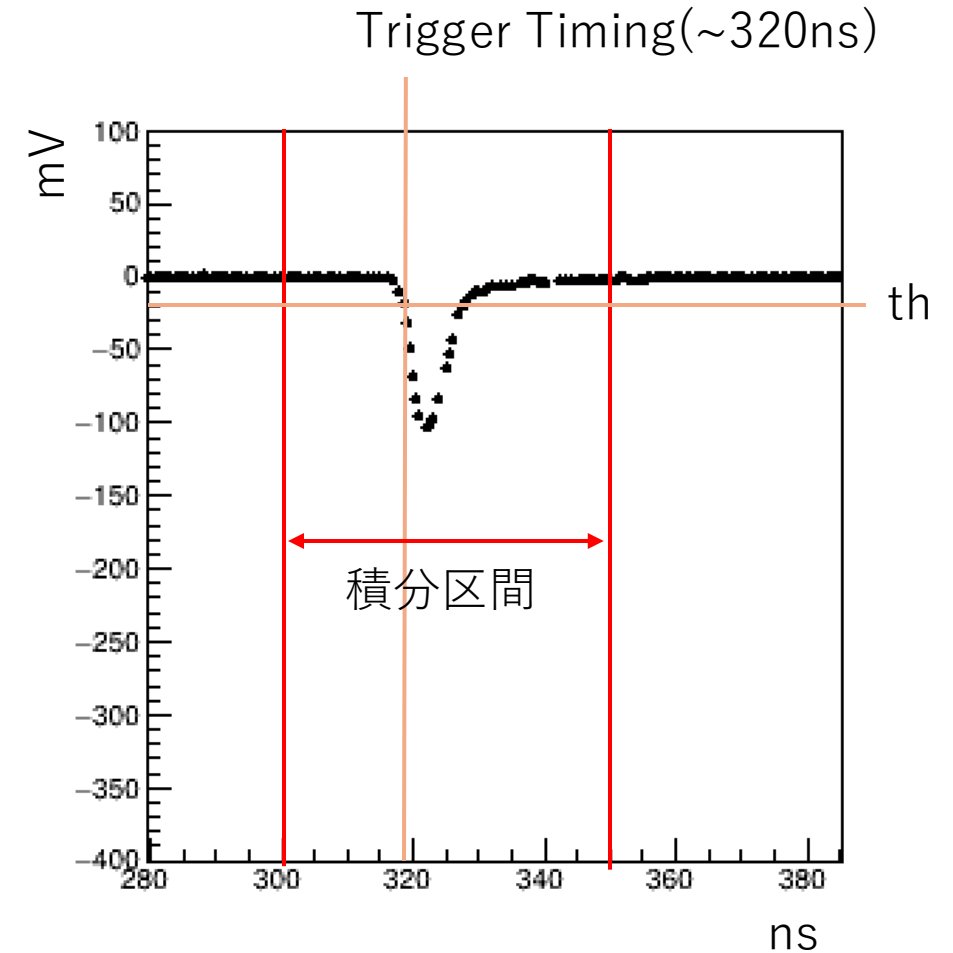
- PMTからの電荷信号を直接見る
- FADC(DRS4)を用いて信号を波形情報として取得する
- FADC(DRS4)のハードウェアトリガ
 - and Trigger(コインシデンスイベントのみ取得)
 - or Trigger(閾値を超えた全てのイベント取得)
- Trigger Timing(~ 320 ns)の手前 ~ 20 ns後ろ ~ 30 nsの50 ns (300 $\sim$ 350 ns)を時間積分し電荷量を計算



DRS4

サンプリングレート : 2 GHz

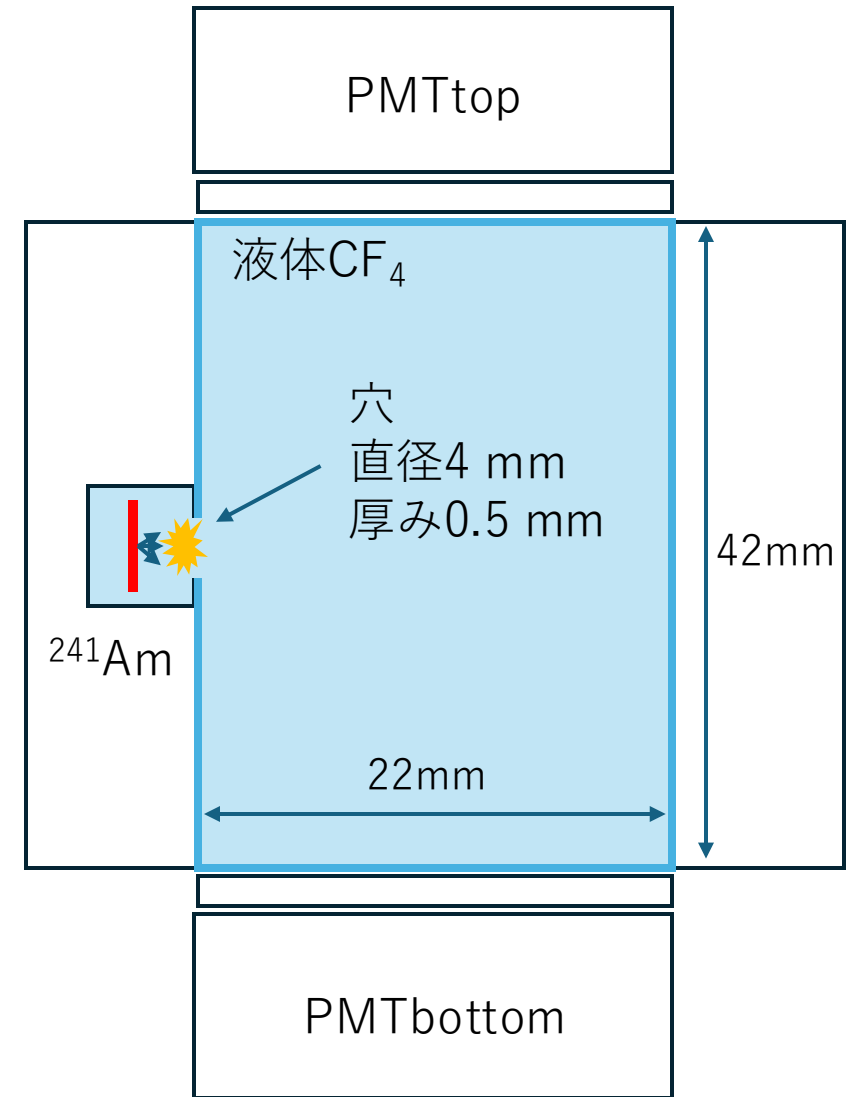
ダイナミックレンジ : -500 ~ 500 mV



PMTtopの平均波形

液体CF₄でのα粒子(²⁴¹Am線源：~5.5 MeV)による発光を見る

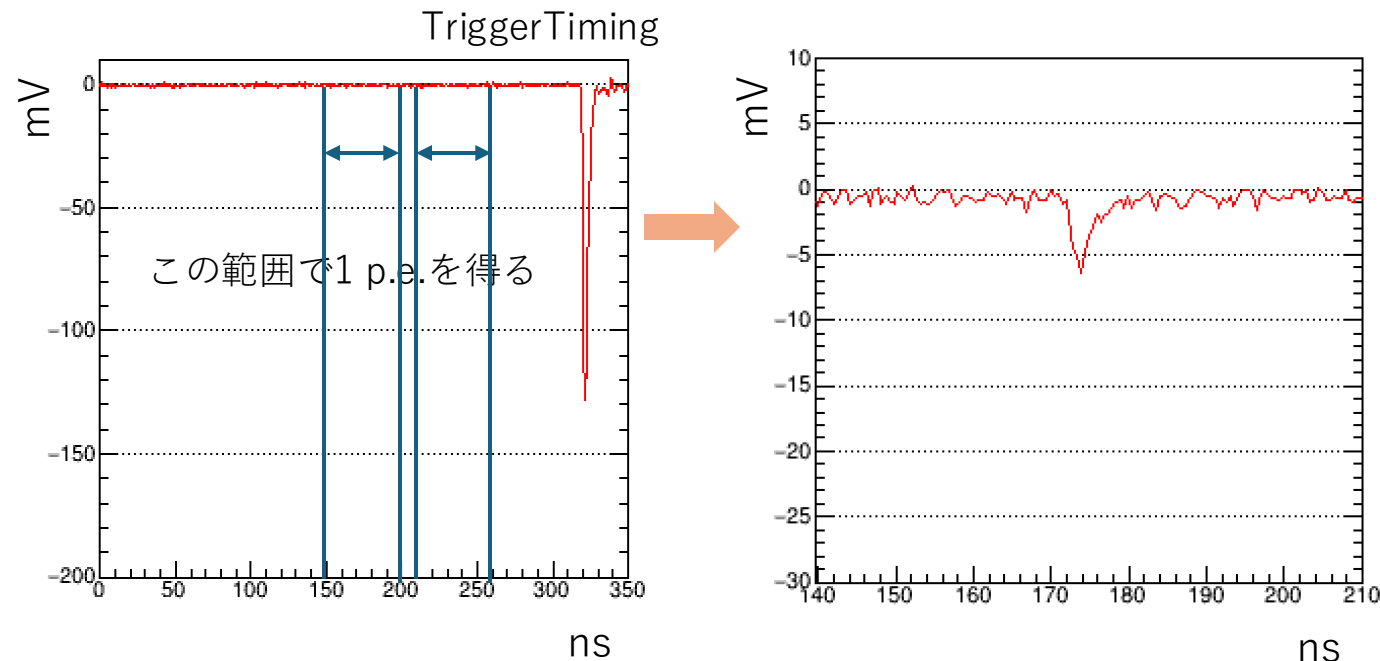
- 気体(密度0.0037 g/cm³)では、5.5 MeVのα粒子は~15 mm走る
- ↓
- 検出領域内で発光したものを見れる
- 液体CF₄(密度1.6 g/cm³)では、5.5 MeVのα粒子は数μmしか走らない
- ²⁴¹Amを設置しているポケットの穴の部分でエネルギーを落とし切る
- ↓
- ポケットの穴の部分で発光したものを見る
 - 発光量の評価には不適



検出器の拡大図

PMTのGain測定(常温)

- 光量を見るためにPMTのGain(1p.e.)を測定
- Trigger Timing手前の150~200 ns , 210~260 nsの区間で-4mV以下の波形を選んで時間積分
- PMTのHV値を調整してGainを揃えた

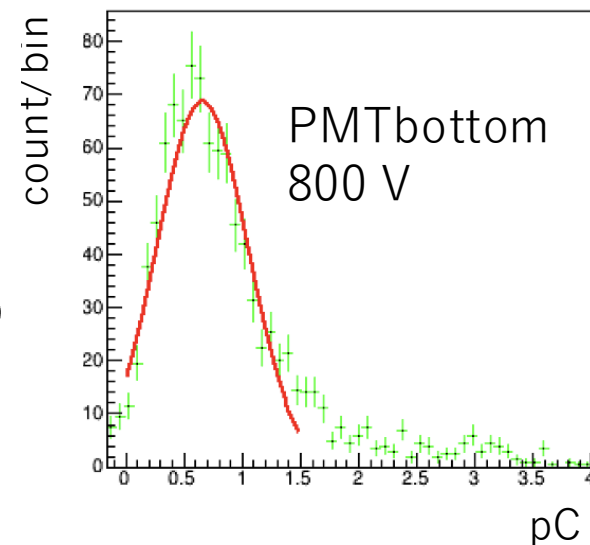
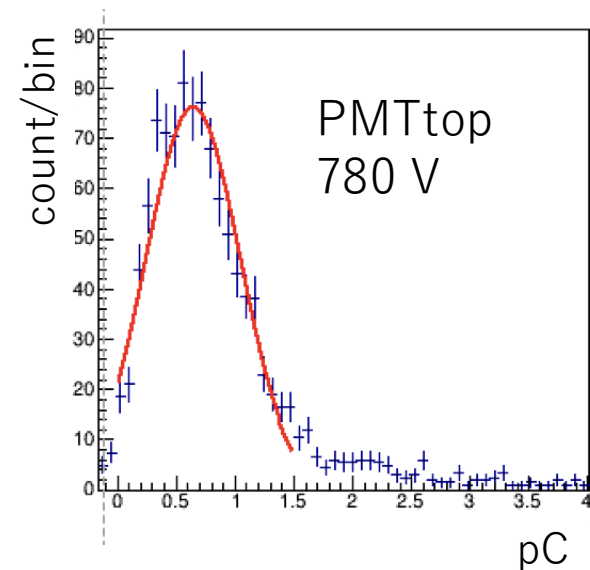


- TriggerTiming前の波形を見る

- 1 p.e.の波形例

両PMTのゲイン

PMTtop : 3.4×10^6 , PMTbottom : 3.4×10^6



1 p.e.電荷分布

※今回液体でのGainを測れていない

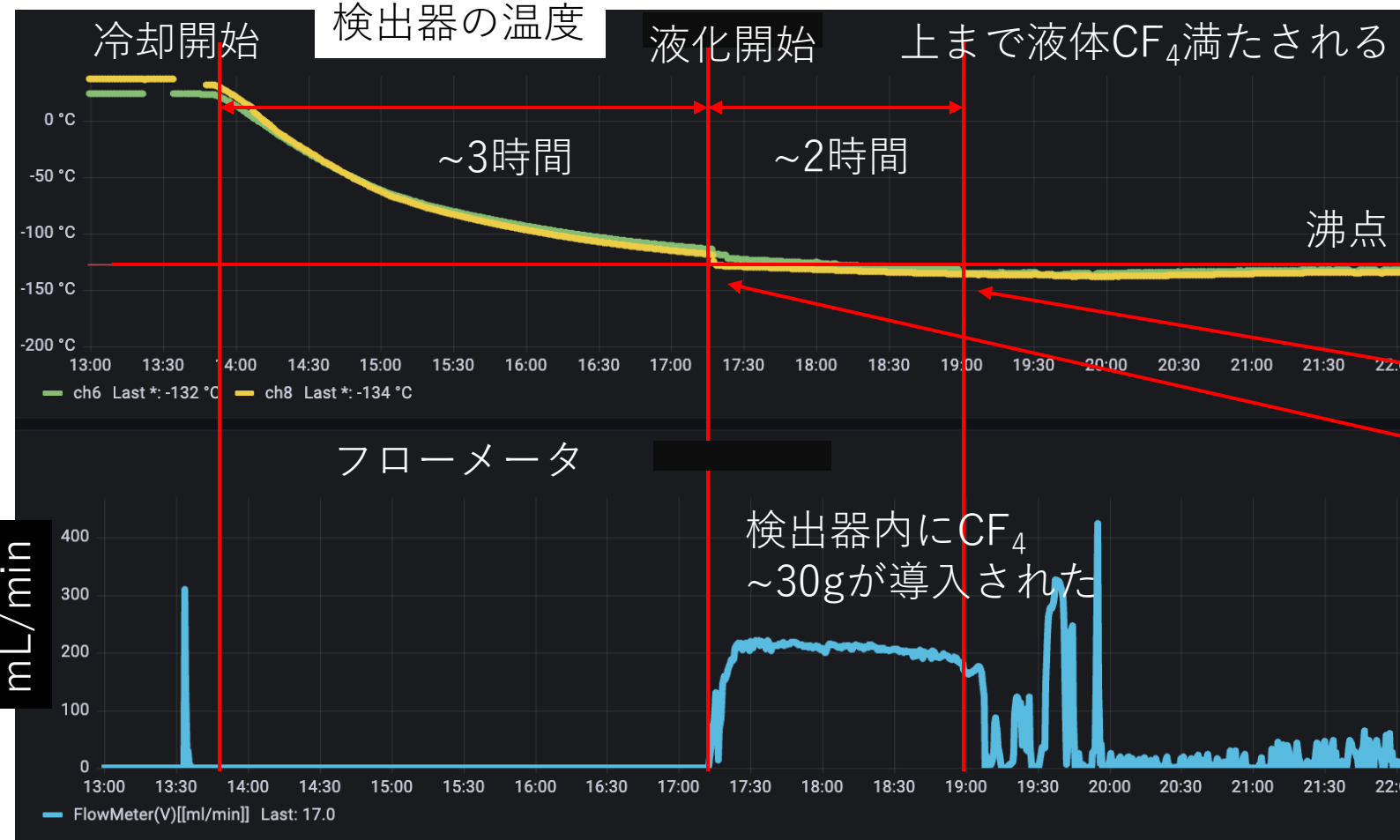
先行研究にて
~-110度まで冷却しても
Gain変化がほとんど
ないことがわかっている

今回は
~-128度まで冷却しても
Gain変化がないとした

検出器を冷却

- 冷却してから約3時間でCF₄の沸点(-128度)を下回る
- 沸点を下回った直後に流量が200倍増加
- 液化できた

CF ₄	
気体密度	0.0037 g/cm ³
液体密度	1.6 g/cm ³
沸点/融点	-128°C/-184°C



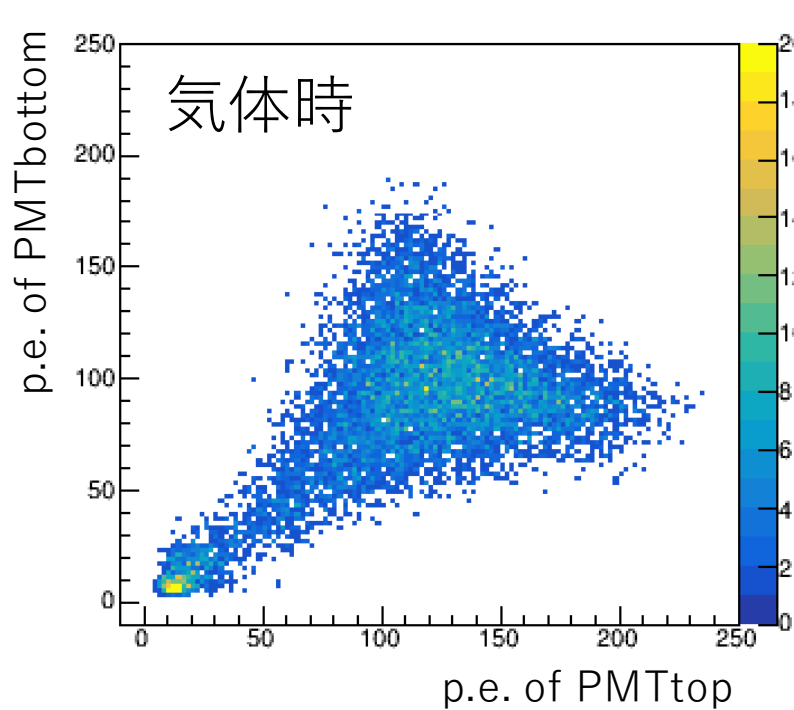
温度モニタ
■ 検出器上
■ 検出器下

CF₄の特性

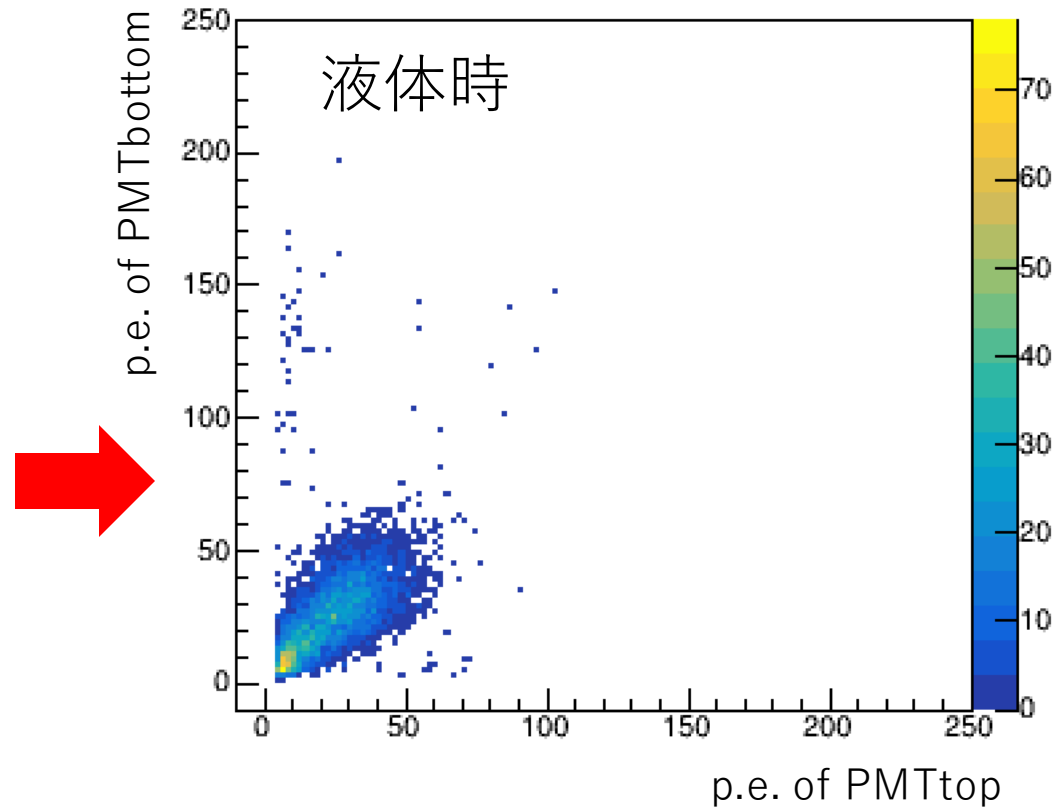


液化のタイミングで熱伝導率が変化
傾きが変化する

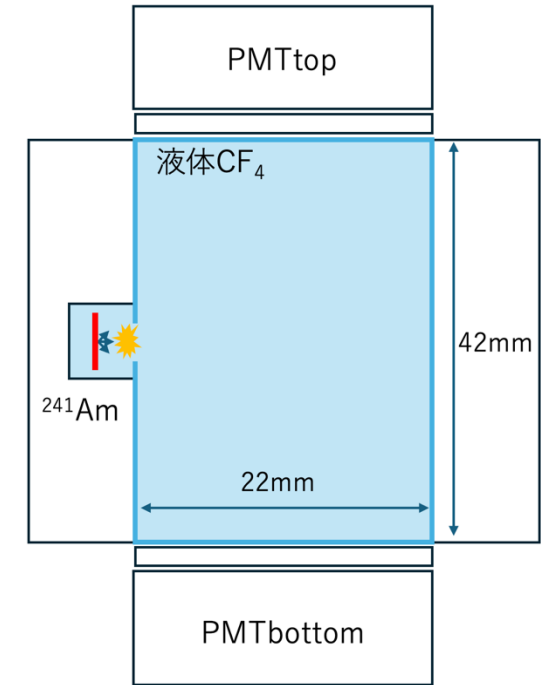
CF₄の発光測定



気体CF₄の2つのPMTの光量分布
➤ 気体時、検出領域内で光ったものをみる



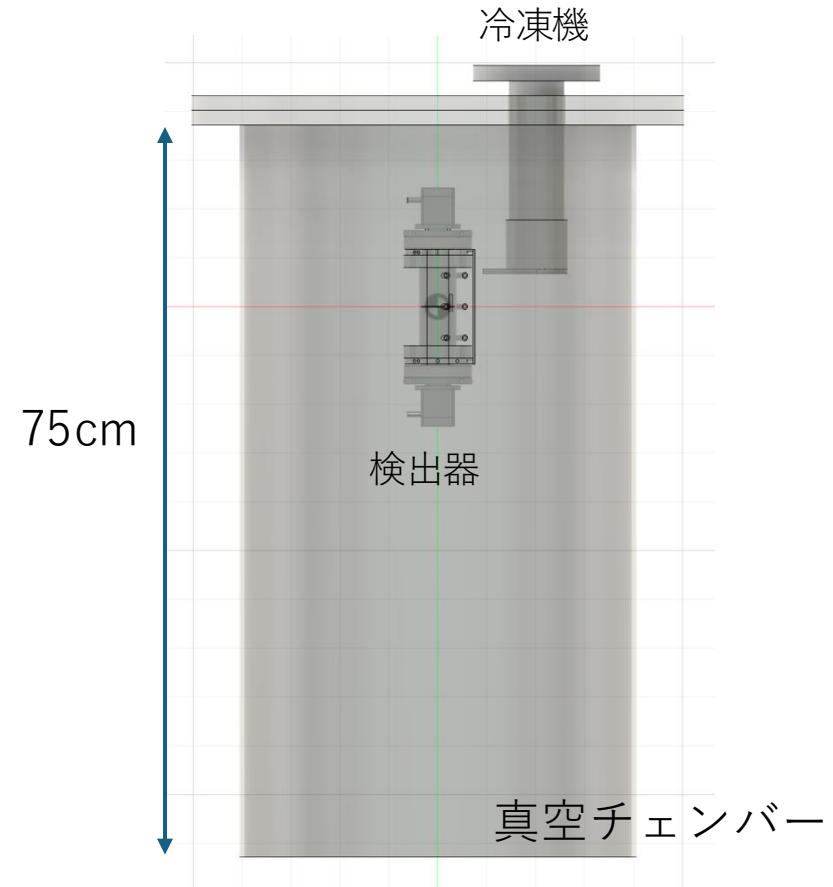
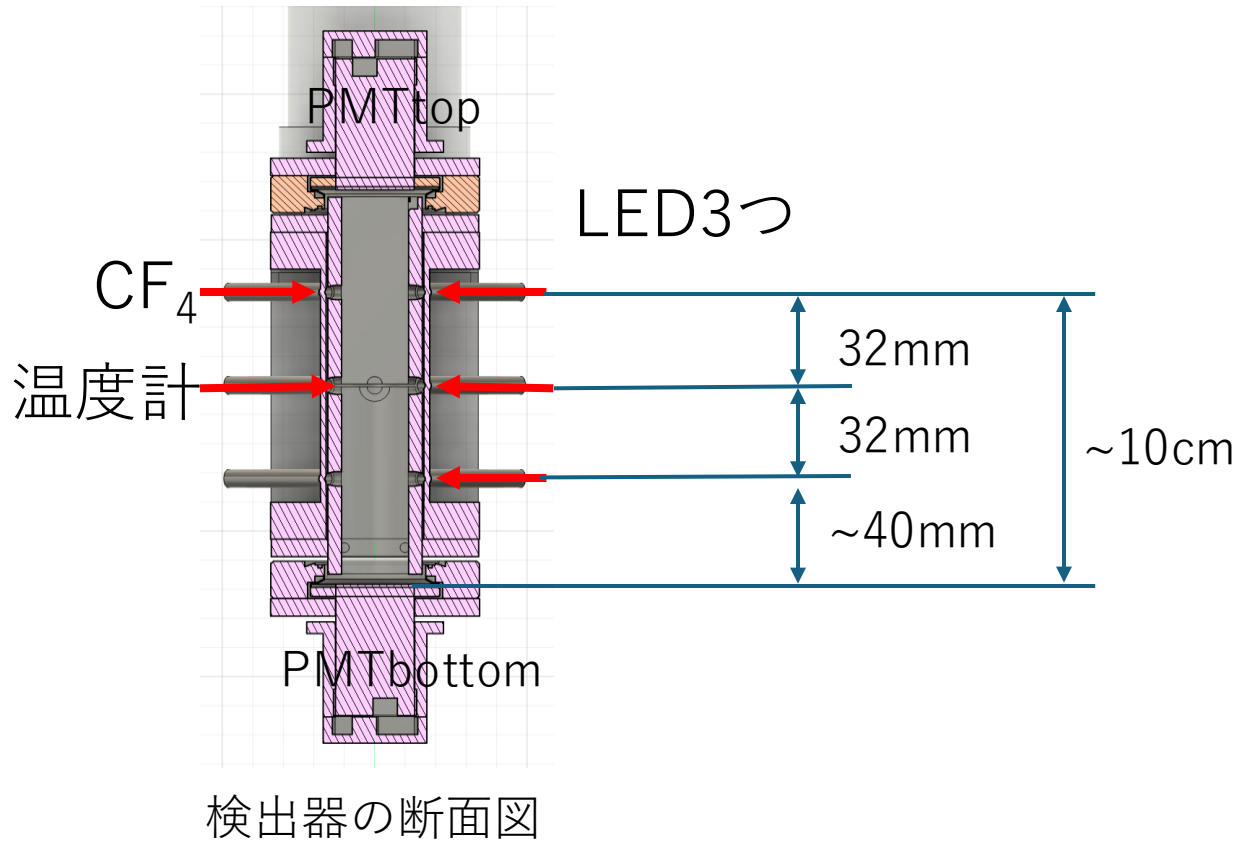
液体CF₄の2つのPMTの光量分布



- 液体時、コインシデンス信号を確認(ポケットの穴で光ったもの)
(²⁴¹Am α source ~5.5 MeV由来)
- **液体CF₄は光る、自身を透過する**

新しい検出器の開発

- 液体 CF_4 の自己吸収測定を行うための検出器を開発中
- 中にLEDを3つ仕込む



展望とまとめ

➤ 展望

- ^{241}Am のガンマ線($\sim 60\text{ keV}$)で定量的に光量を見る
- 液体 CF_4 での**自己吸収**、**粒子識別**について調べる

➤ まとめ

- WIMPs-核子のSD散乱において ^{19}F が有利に働く
- ^{19}F を含む **CF_4** を用いてエネルギースペクトルを得たい
- 将来的に検出器の大型 & 大質量化を目指す→**液体 CF_4** を用いる

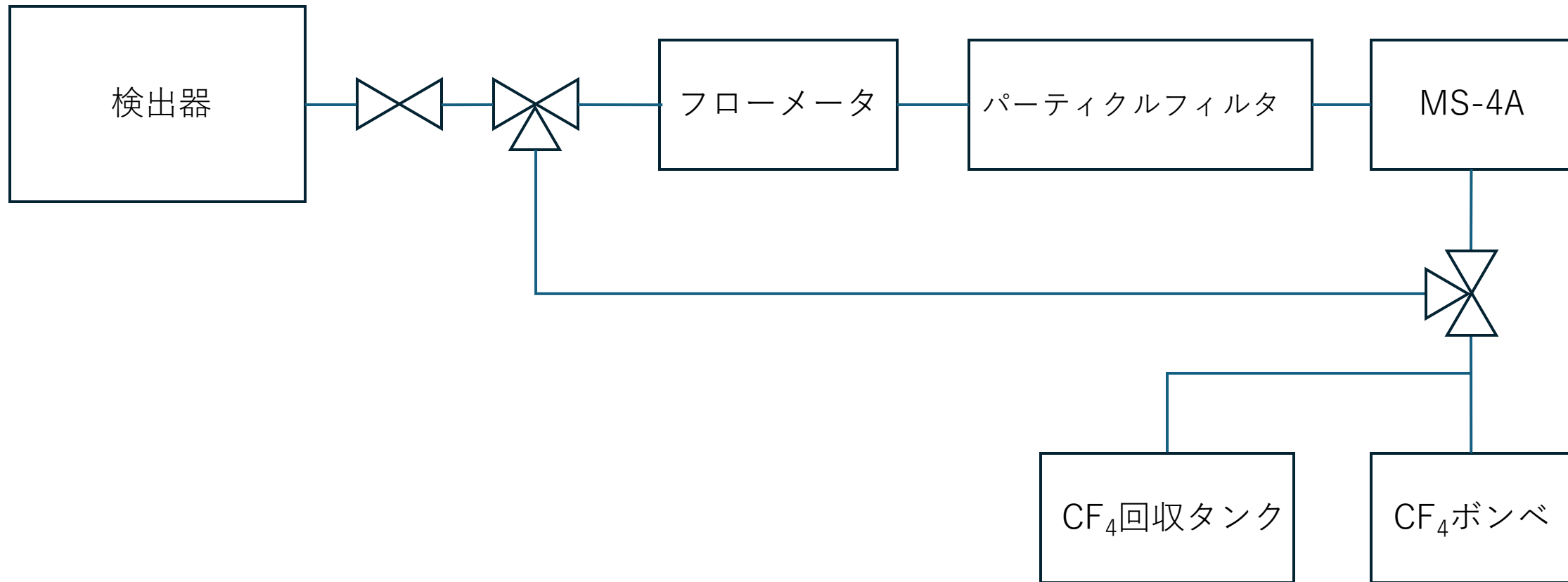


- 検出器領域を CF_4 沸点以下まで冷却できる**装置を開発**
- **CF_4 の液化に成功**している
- **液体 CF_4 は光る、自身を透過する**

Back Up

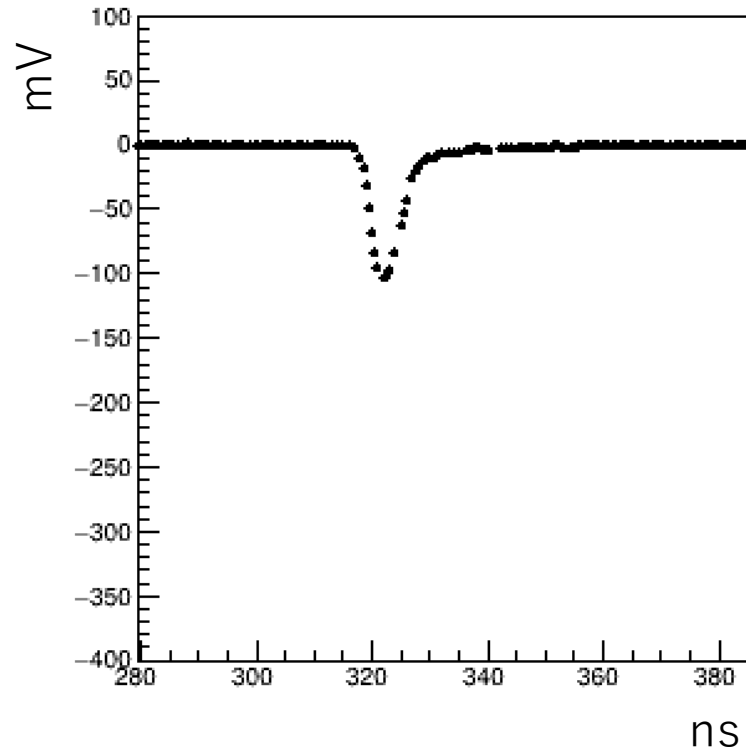
循環系

➤ 冷却時はCF₄回収タンクからCF₄を導入していく

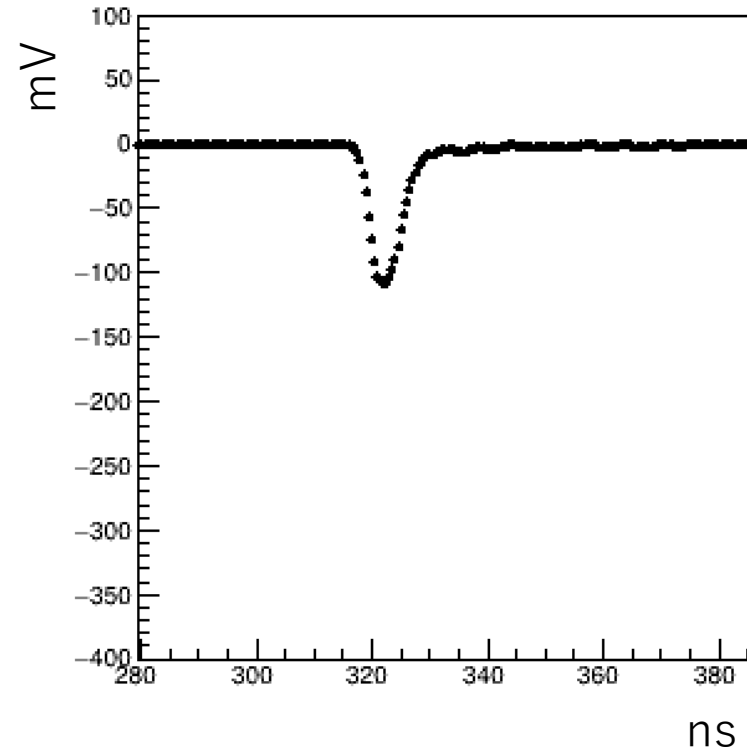


液体CF₄の発光測定

- 平均発光波形
- nsオーダーの短い発光

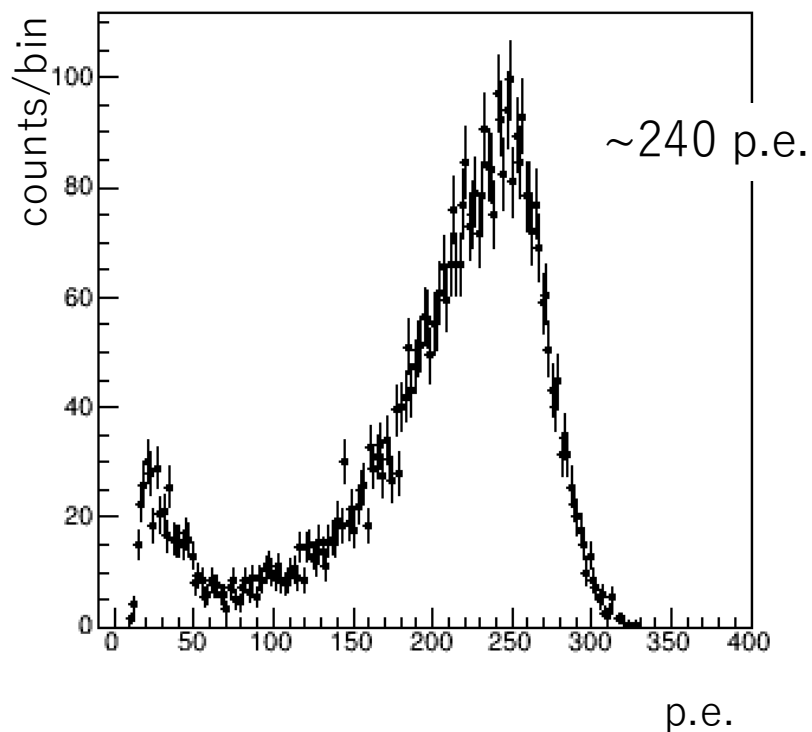


PMTtopでの平均発光波形

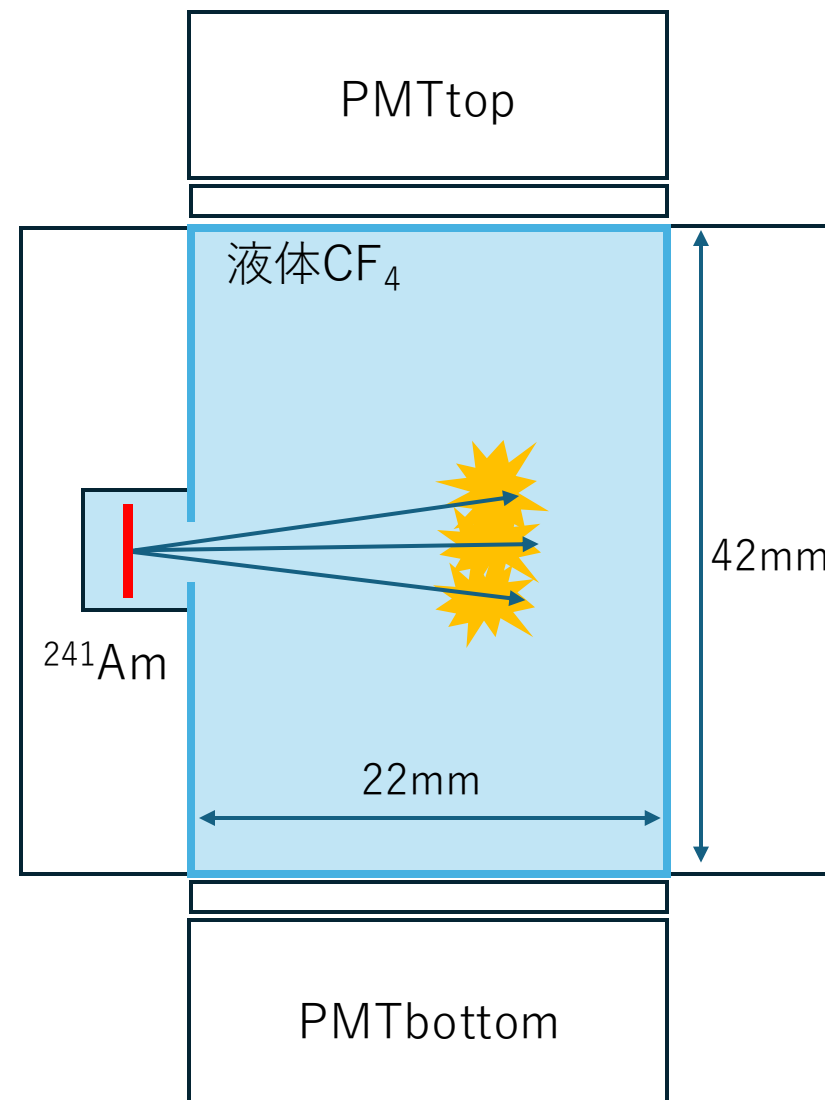


PMTbottomでの平均発光波形

気体CF₄での α 粒子(²⁴¹Am線源: ~5.5 MeV)による発光

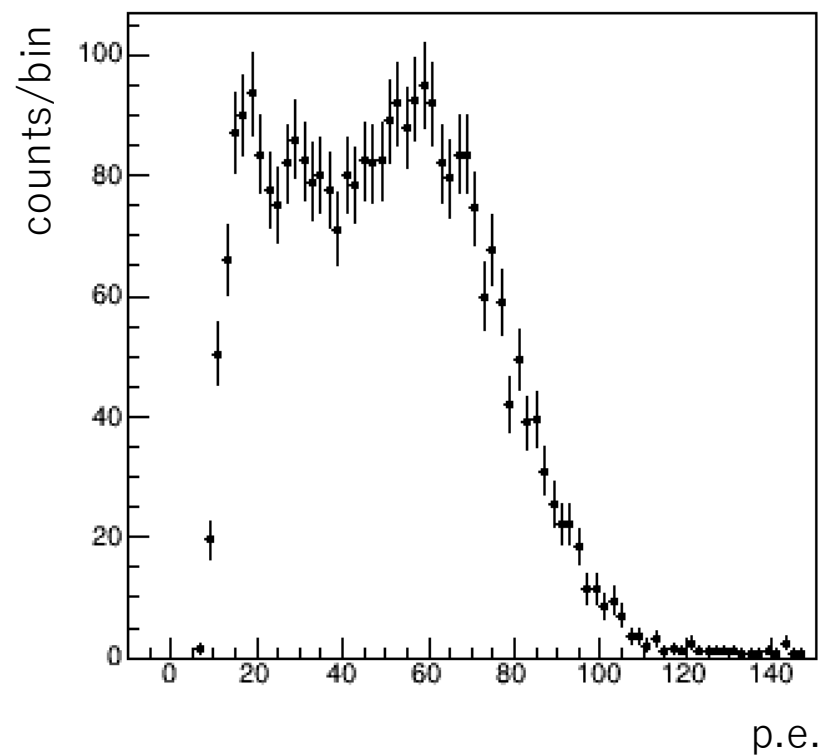


光量分布(PMTtop+PMTbottom)

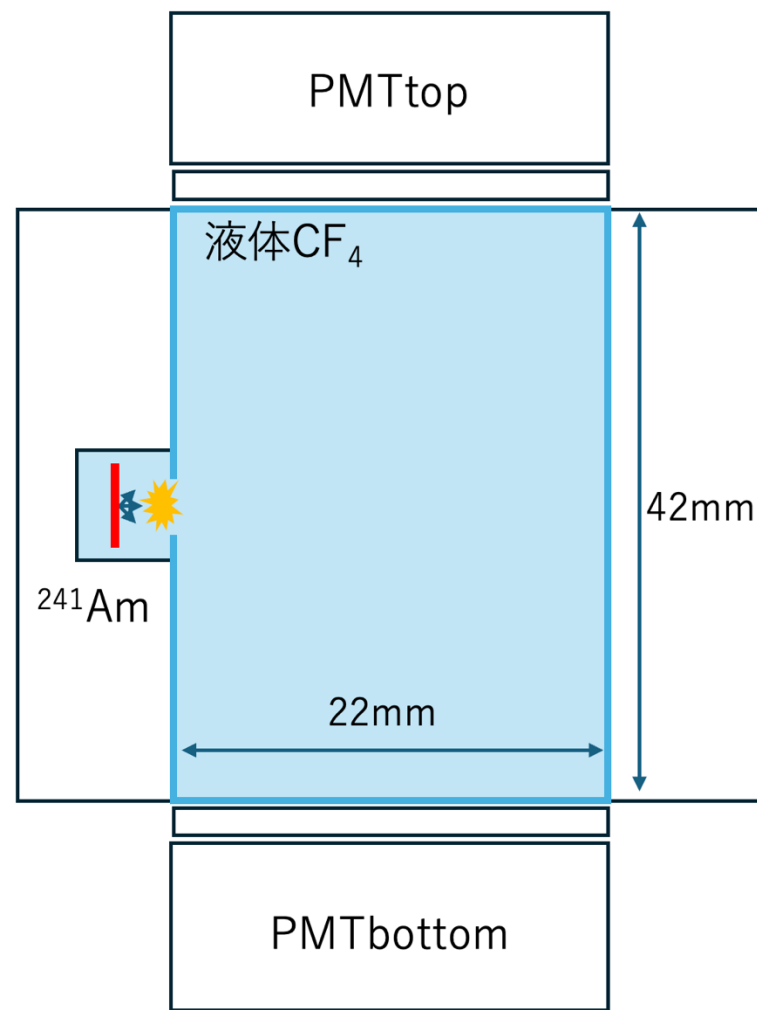


検出器の拡大図

液体時の光量分布

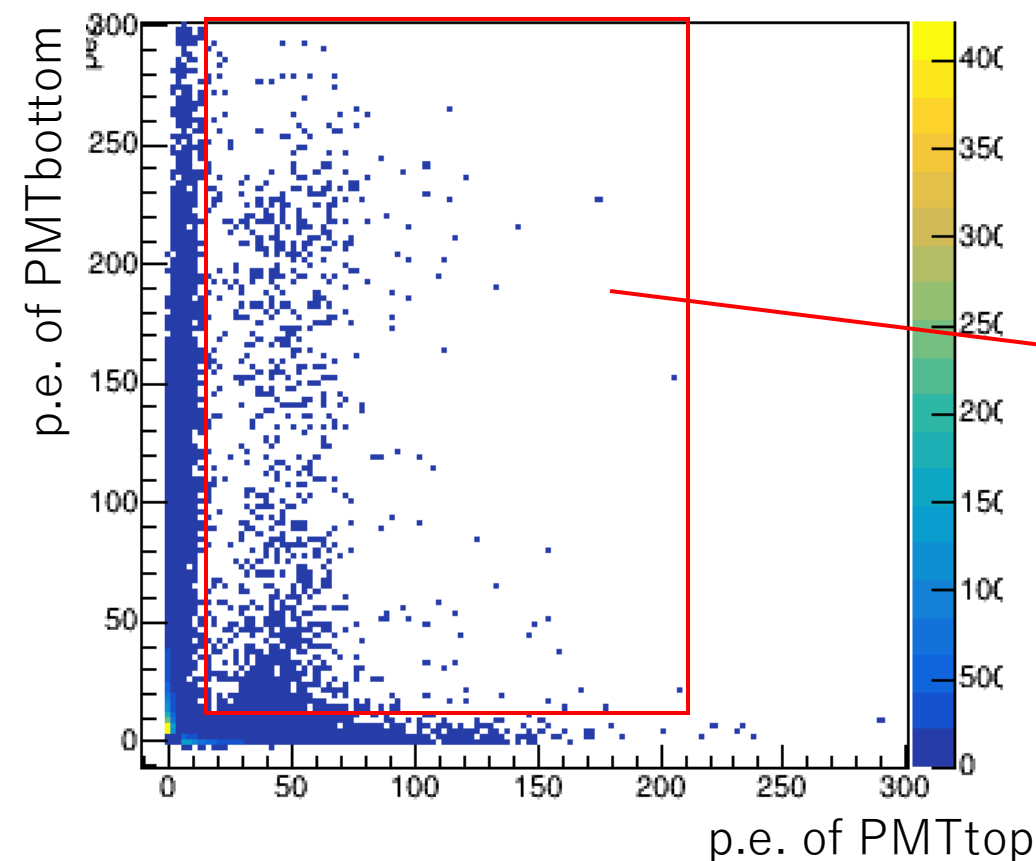


光量分布(PMTtop+PMTbottom)

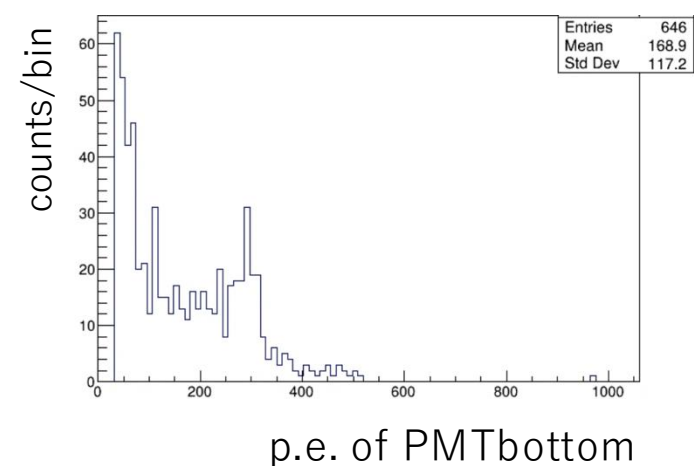
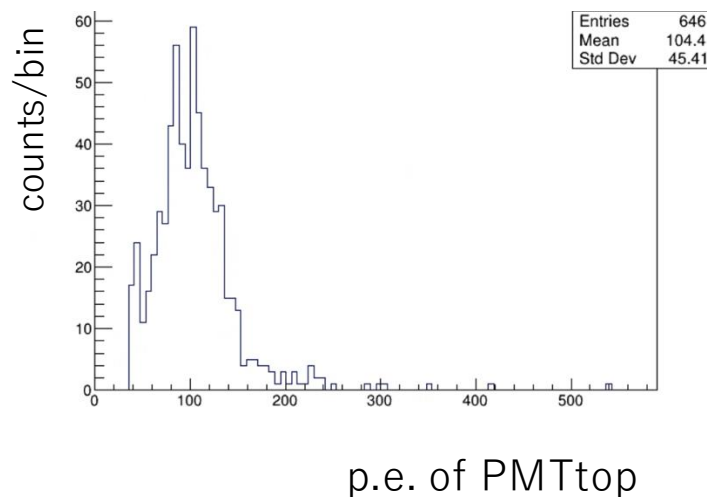


アルミ箔でアルファをメクラにしていた時

- 液体時、PMTの上と下で発光量(100~300photon)の違うものが見えていた
- コインシデンスレートが低く、検出器に降り注ぐミュオンフラックスの値(実測値)とほぼ一致してた
- ミューオンが光学窓と液体CF₄で落とすエネルギーからチェレンコフ発光量を計算すると数百photon
- ²⁴¹Amの60keVガンマ線を見ようとするするとミュオンが邪魔になる & まだGainが足りなかった

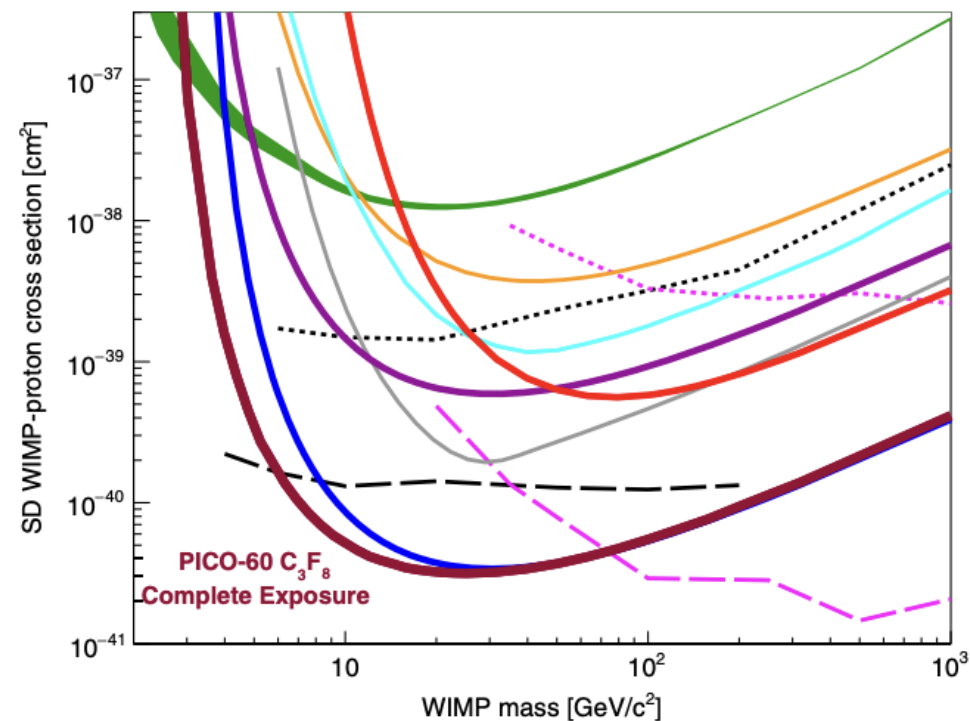


コインシデンスレート : 1.0×10^{-2} Hz
ミュオンレート : 1.6×10^{-2} Hz



Dark matter search results from the complete exposure of the PICO-60 C₃F₈ bubble chamber

PICO-60での2回目の
Exposure:1404kg*day



90%信頼区間でのSD WIMP-proton cross section

青：1回目のexposure

緑：PICASSO

橙：SIMPLE

桃：IceCube(点線)

紫：PICO-2L(点線)

赤：PICO-60 CF₃I

シアン：PANDAX-II

黒：SuperK(点線)

<https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.100.022001>

PICO-60実験について

- 検出器内部の圧力や温度を変化させて、エネルギー閾値を設定することができる→低閾値化(2.45 keV)
- 泡ができる時の音の強さによってアルファ線事象を識別
- 電子反跳に対して感度がない
- 検出器内をカメラで撮影
- エネルギー閾値

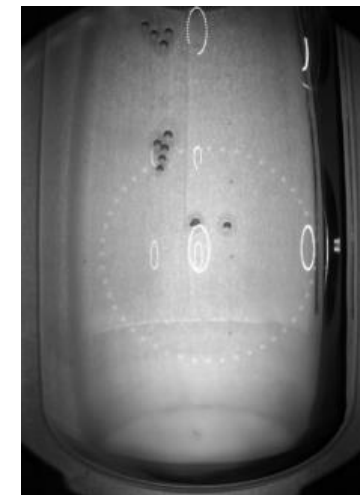
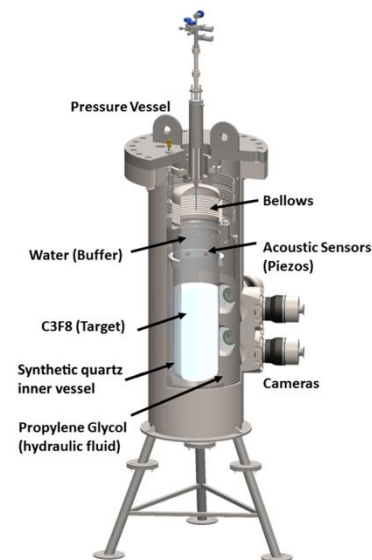
$$\text{➤ } E_T = 4\pi r_c^2 \left(\sigma - T \frac{\partial \sigma}{\partial T} \right) + 4\pi r_c^3 \rho_b (h_b - h_l) - \frac{4\pi}{3} (P_b - P_l)$$

- APパラメーター

$$AP = A(T) \sum_j G_j \sum_n C_n(\vec{x}) \sum_{f_{min}^n}^{f_{max}^n} f \times psd_f^j,$$

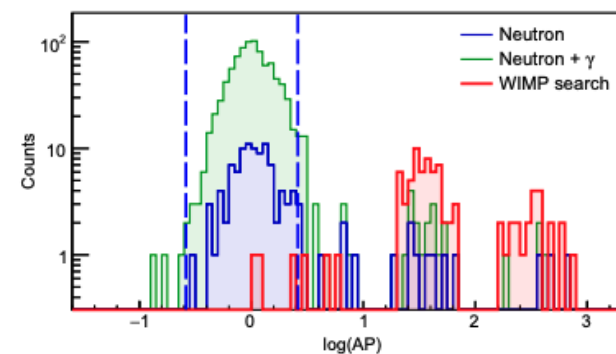
- G_j : j番目のセンサーのゲイン
- $C_n(x)$: 泡の位置依存性
- f : 周波数
- PSD: パワースペクトル密度

R_c : 泡の限界半径
 σ : 表面張力
 T : 温度
 ρ_b : 泡の蒸気密度
 h : 泡と液体のエンタルピー
 P : 泡と液体の圧力



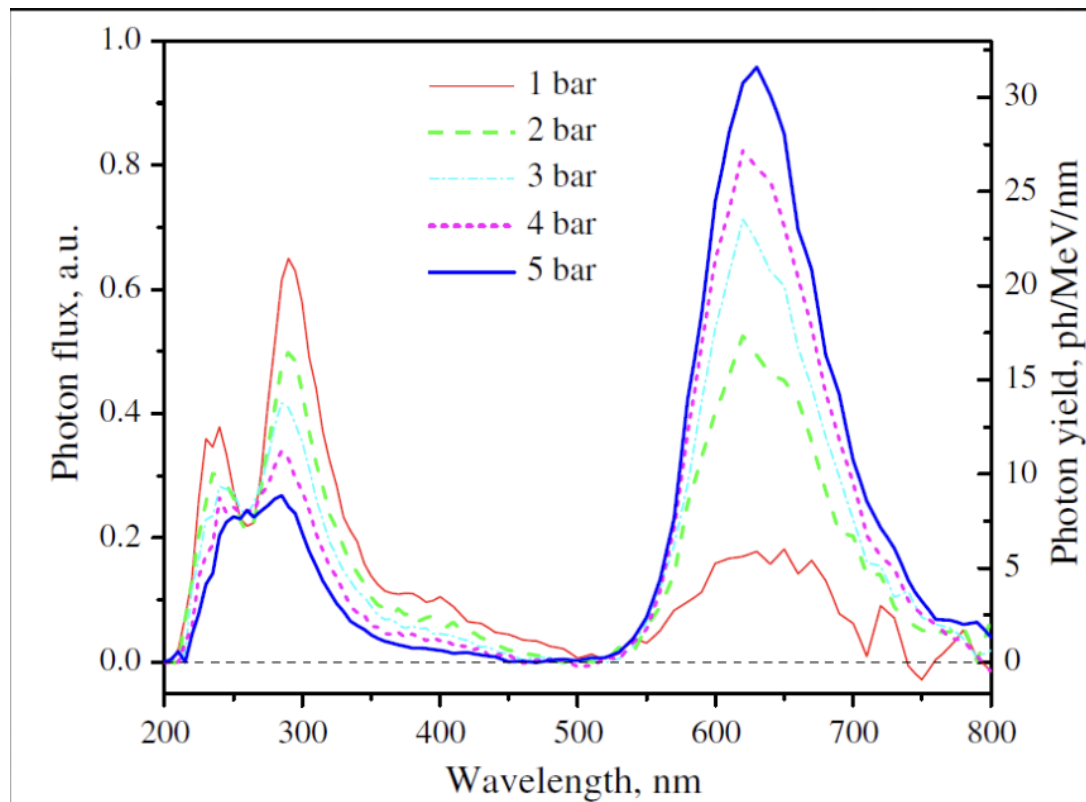
- 直径60cm、高さ167cm 検出器内の泡生成の様子

ROI



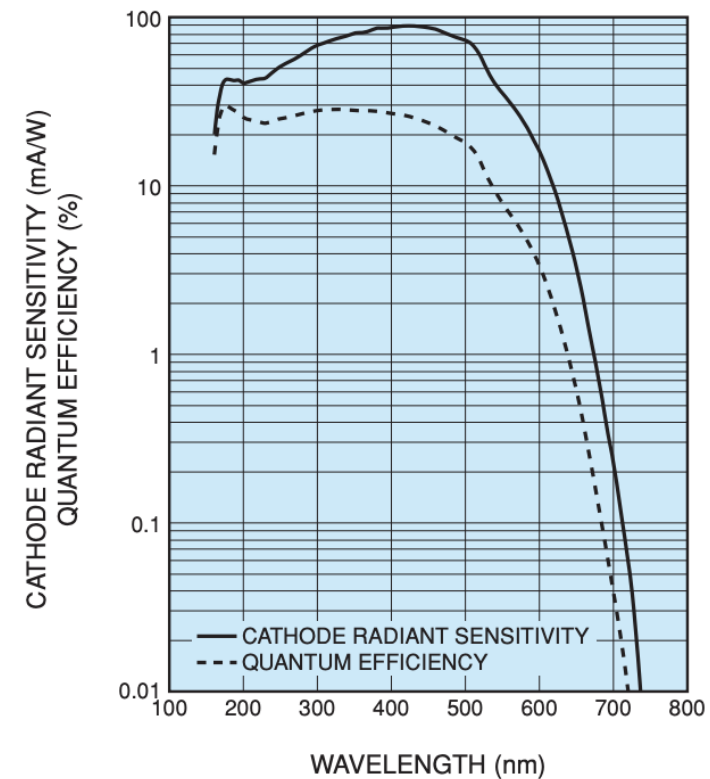
APスペクトル
APは音の強さを表すパラメータ

CF₄ガスでの発光波長スペクトル



NIM B 268(2010)1456

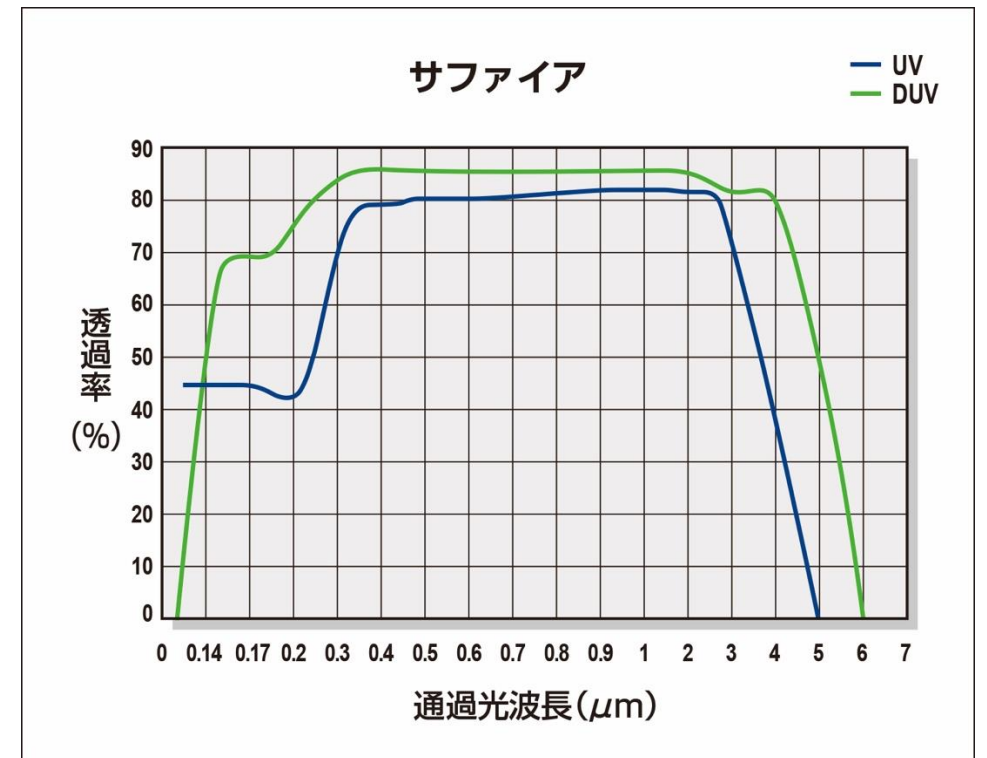
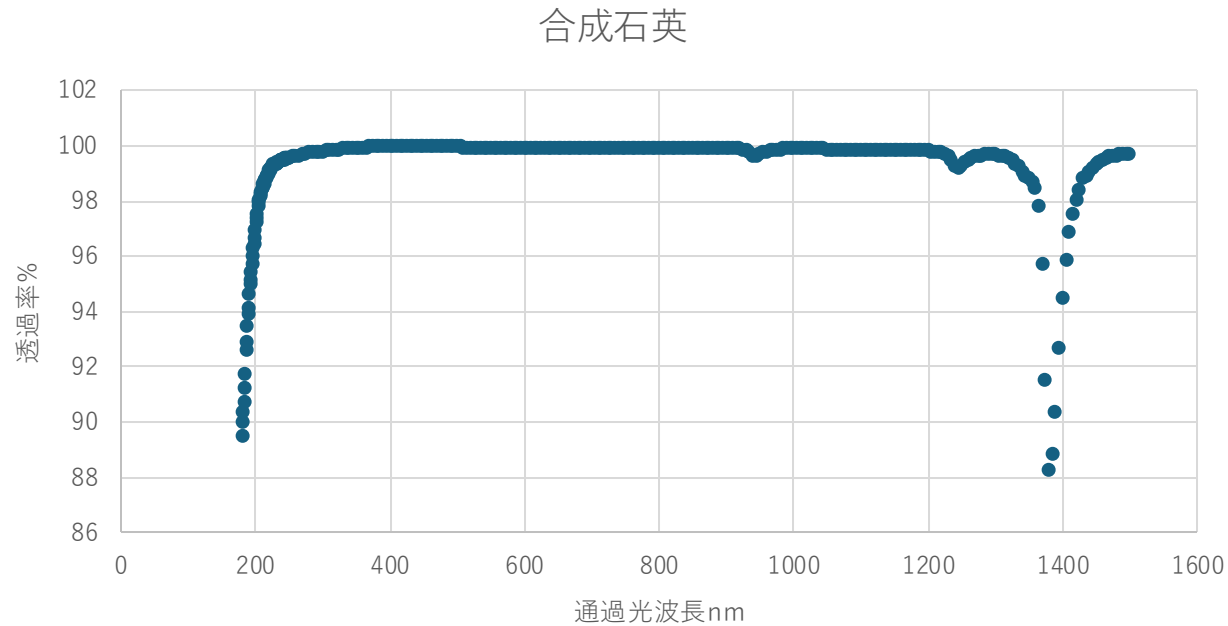
Figure 1: Typical spectral response



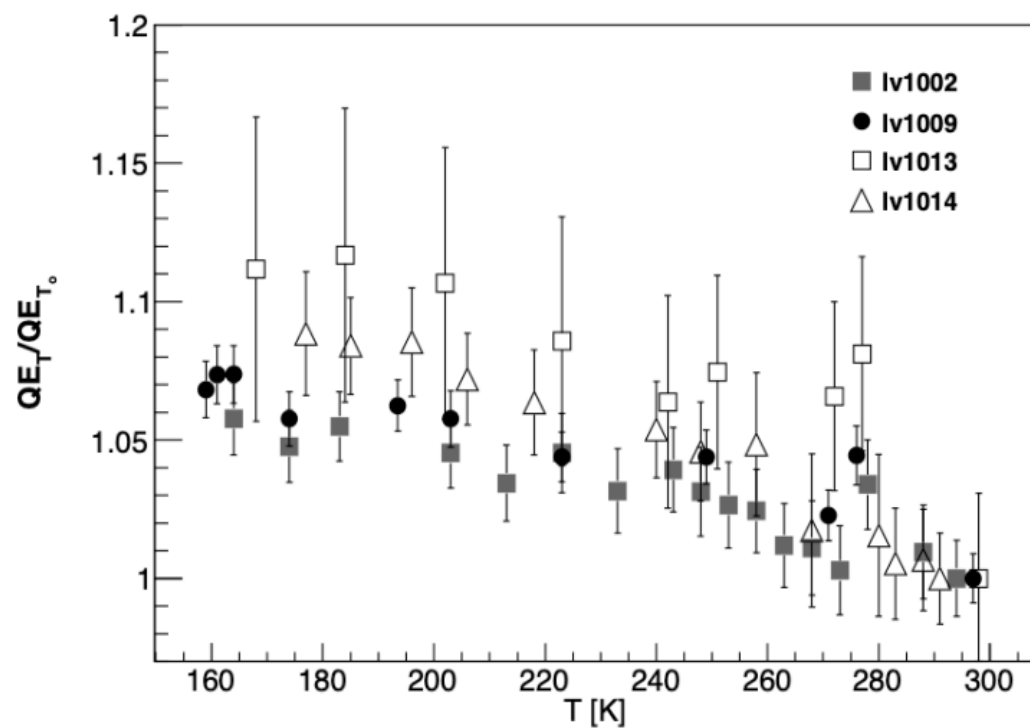
PMTの感度

使用した光学窓

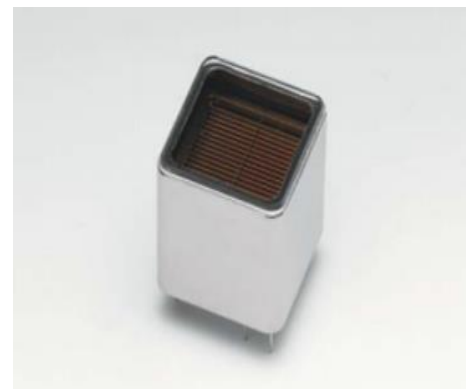
- 上に合成石英
- 下にサファイアガラス



温度とPMTのQEの関係



JINST 7 P10005



浜松ホトニクスのパMT使用
R8520-406

➤ https://www.psi.ch/sites/default/files/2020-02/manual_rev51.pdf

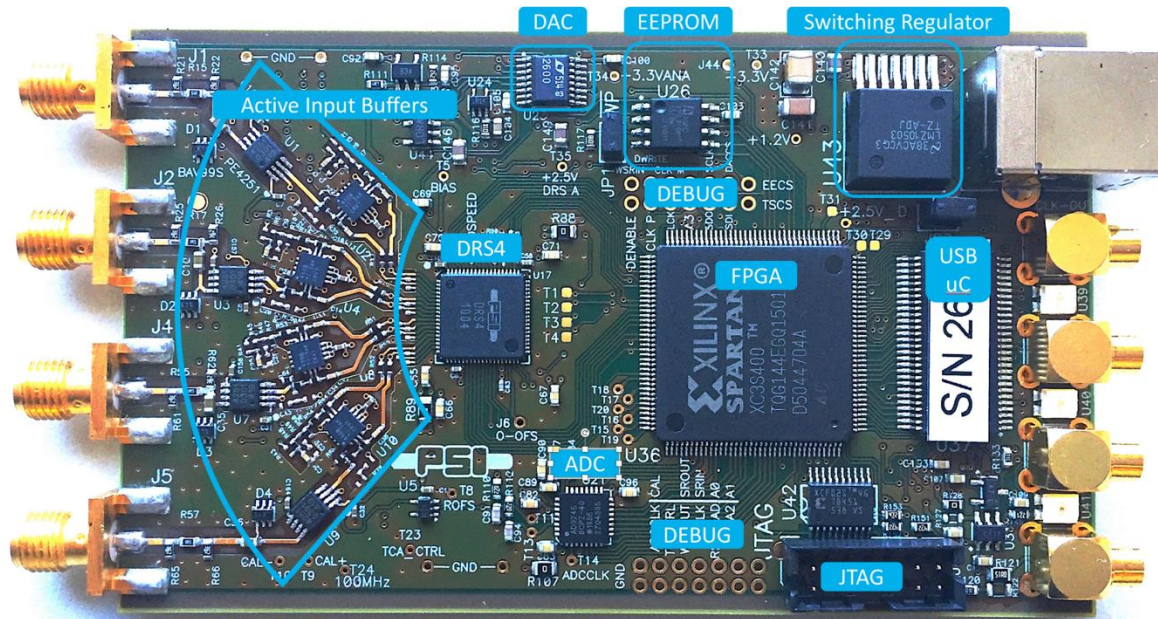


Figure 1: Picture of the DRS4 Evaluation Board V5.1 with different components

The DRS4 chip, which has been designed at the Paul Scherrer Institute, Switzerland by Stefan Ritt and Roberto Dinapoli is a Switched Capacitor Array (SCA) capable of digitizing eight channels at sampling speeds up to 5 GSPS and 1024 sampling points. This chip is available through the PSI technology transfer program for other institutes and organizations. In order to simplify the design process to integrate the DRS4 chip into custom electronics, an evaluation board has been designed, which demonstrates the basic operation of the chip. It has SMA connectors for four input channels CH1 to CH4, an USB 2.0 connector and MMCX connectors for triggering and clock synchronization (Figure 1). The board is powered through the USB port and contains an on-board trigger logic. It comes with MS Windows®, Linux and Mac OSX drivers and two application programs. It is basically equivalent to a four channel 5 GSPS digital oscilloscope.

Since the DRS4 chip has differential inputs, the board uses four active buffers (THS4508 from Texas Instruments®) to convert the 50-Ohm terminated single ended inputs into differential signals. Analog switches in front of the buffers (ADG901 from Analog Devices®) are used to de-couple the inputs during calibration. Two reference voltages are generated by the on-board 16-bit DAC to measure the offset and gain of all DRS4 storage cells for calibration. The four analog inputs are AC coupled and have a input range of 1 V peak-to-peak. The DRS4 is read out with a 14-bit ADC (AD9245 from Analog Devices®) and a FPGA (Xilinx® Spartan 3). The USB connection is implemented with a micro controller (Cypress® CY2C68013A). The high speed modus of the USB 2.0 bus allows for data transfer rates of more than 20 MB/sec.

