



# 液体CF<sub>4</sub>を用いた暗黒物質直接探索 のための検出器の開発

神戸大学 谷口紘大

身内賢太郎 東野聡 生井凌太 鈴木啓司 水越慧太<sup>A</sup> 中野佑樹<sup>B</sup>

JAXA<sup>A</sup> 富山大学<sup>B</sup>

2025年 3月19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
- **WIMPs(Weakly Interacting Massive Particle)**

- 暗黒物質の有力候補
- 直接探索実験
  - WIMPs-核子の弾性散乱
    - スピン依存する (SD) 散乱
    - スピン依存しない (SI) 散乱

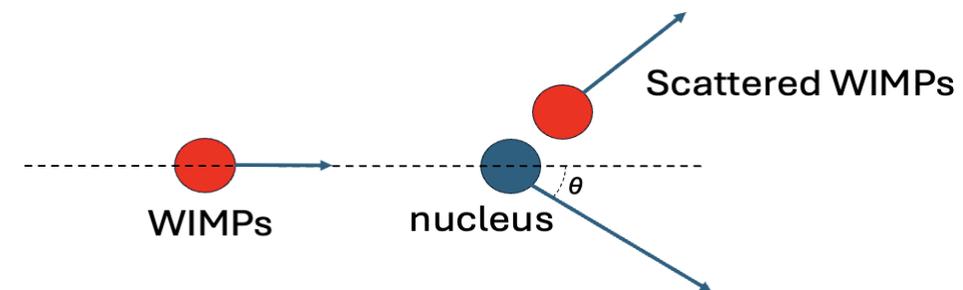
## ➤ SD散乱

- 散乱断面積が標的原子核のスピン量に依存する

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

$\lambda$ : ランデ因子

$J$ : 標的原子核のスピン量



WIMPsによる原子核反跳

標的原子核ごとの $\lambda^2 J(J+1)$

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

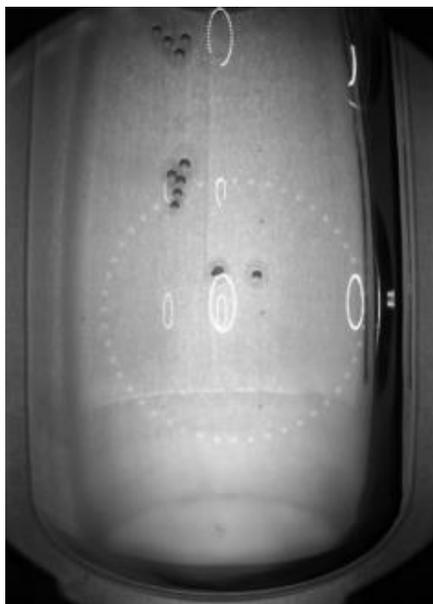
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0927-6505\(96\)00047-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0927-6505(96)00047-3)

**$^{19}\text{F}$ がSD散乱において有利に働く**

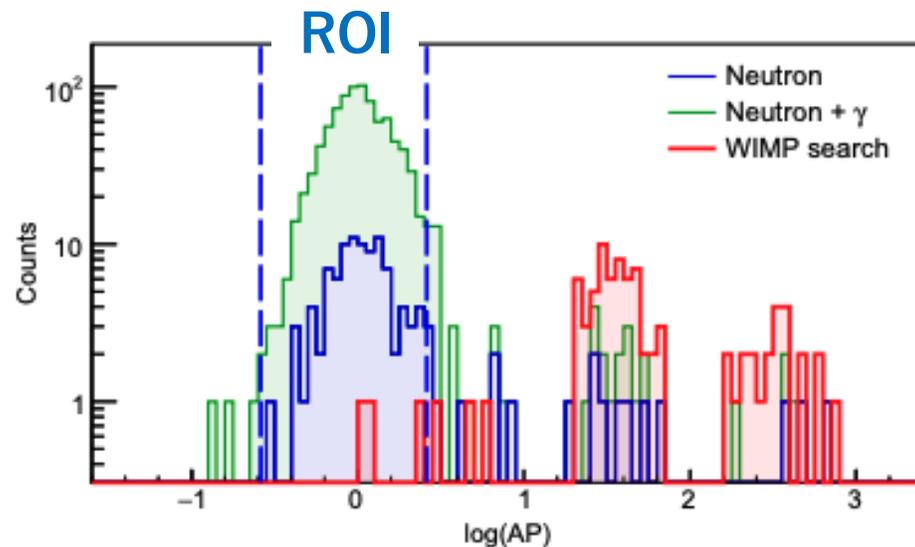
# 実験のモチベーション

## ➤ PICO-60実験

- フッ素化合物( $C_3F_8$ : 52.2 kg)を用いた**閾値型の泡箱検出器**
- 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

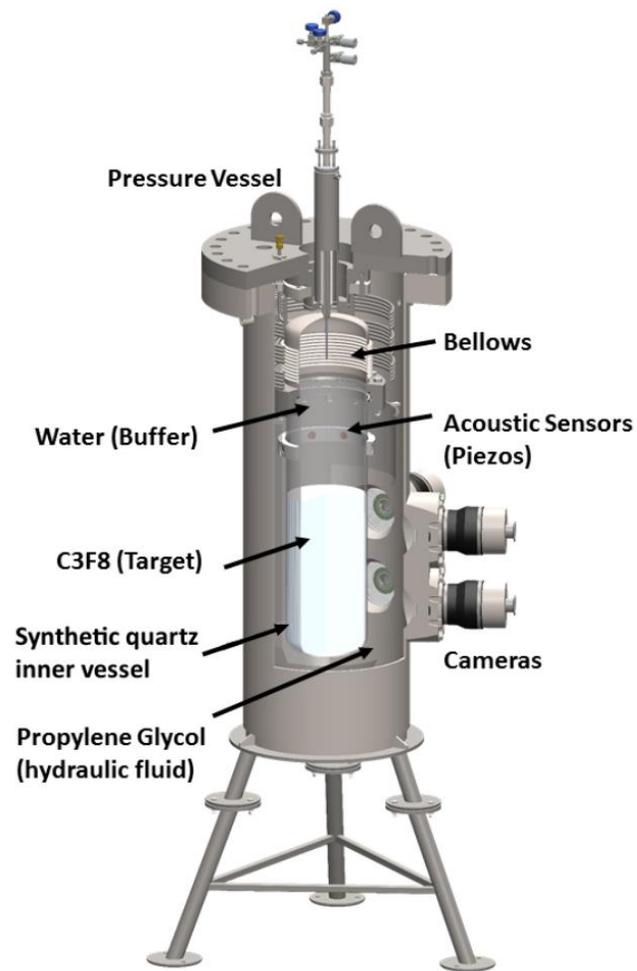


検出器内の泡生成の様子



APスペクトル

APは音の強さを表すパラメータ



➤ 直径60cm、高さ167cm

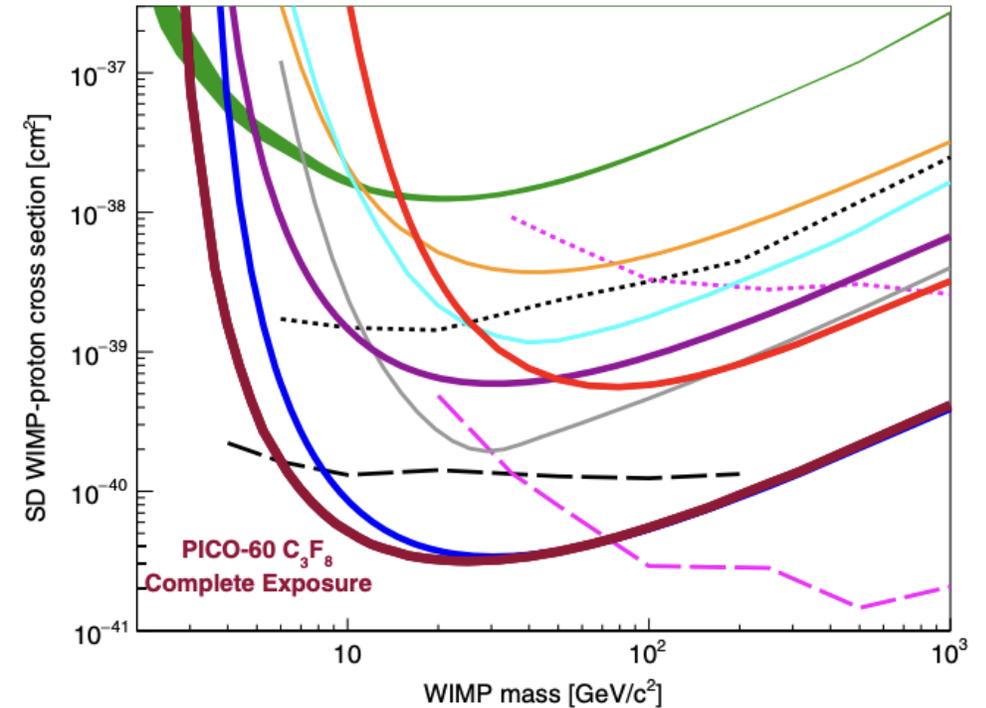
# 実験のモチベーション

- SD散乱において**最も強い制限**をかけている実験  
 $3.2 \times 10^{-41} \text{ cm}^2 @ 25 \text{ GeV}/c^2$
- 低閾値化によって低質量領域で感度向上
- 次世代PICO-500が準備中
- PICO実験ではどの反跳エネルギーで泡生成反応が起こったかは見ていない



**エネルギースペクトルを得られる  
手法の確立を目指す**

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>

# 実験のコンセプト

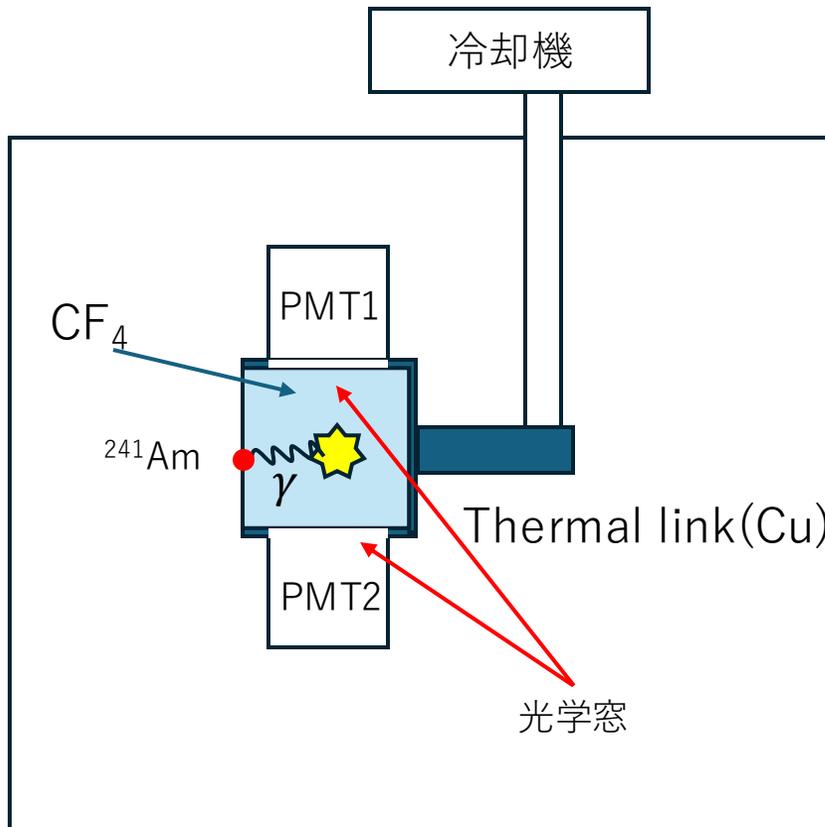
- $^{19}\text{F}$ をターゲット原子核とした**シンチレータ**を使用
  - $\text{CF}_4$  (比較的安価)
- 将来的に**大型化**を目指す
  - 既存の実験に、標的物質を入れ替える提案をする
- 大型化→**液体 $\text{CF}_4$** を用いる
- 基礎的なシンチレータとしての特性の理解を目指す
  - 液体 $\text{CF}_4$ で発光をみる

# 実験装置

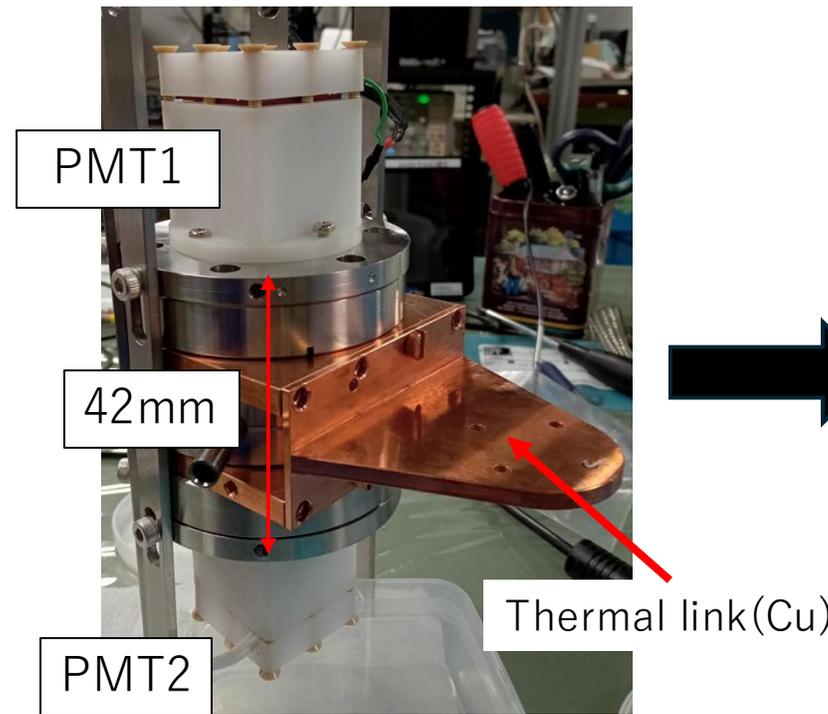
- 真空容器内に検出器を設置
- 光学窓を取り付けPMTを外付けする
- 検出器を冷却機に銅プレートで熱的に接触
  - 検出器内を $\text{CF}_4$ の沸点以下まで冷却



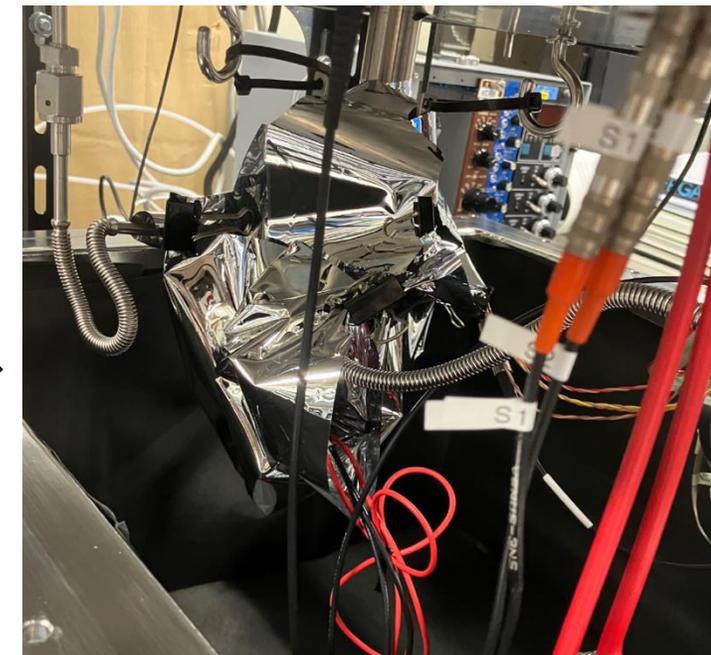
浜松ホトニクス社のPMT使用  
R8520-406



真空容器の中の様子



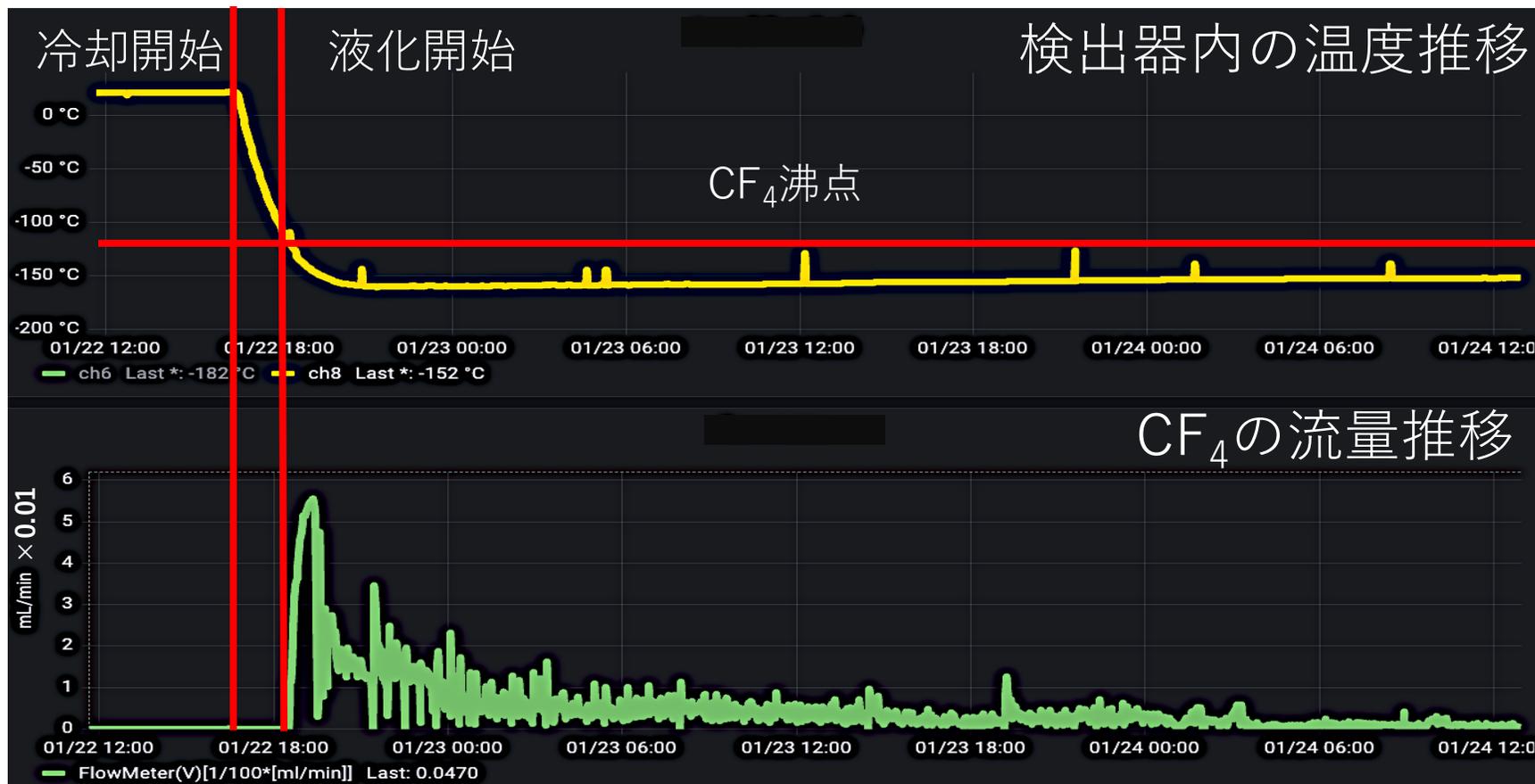
検出器  
 $22 \times 22 \times 42\text{mm}^3$



アルミマイラで巻いて  
輻射を抑える

# 冷却試験

- 冷却してから約2時間でCF<sub>4</sub>の沸点を下回る
- 沸点を下回った直後に流量が100倍増加
  - 液化が始まった

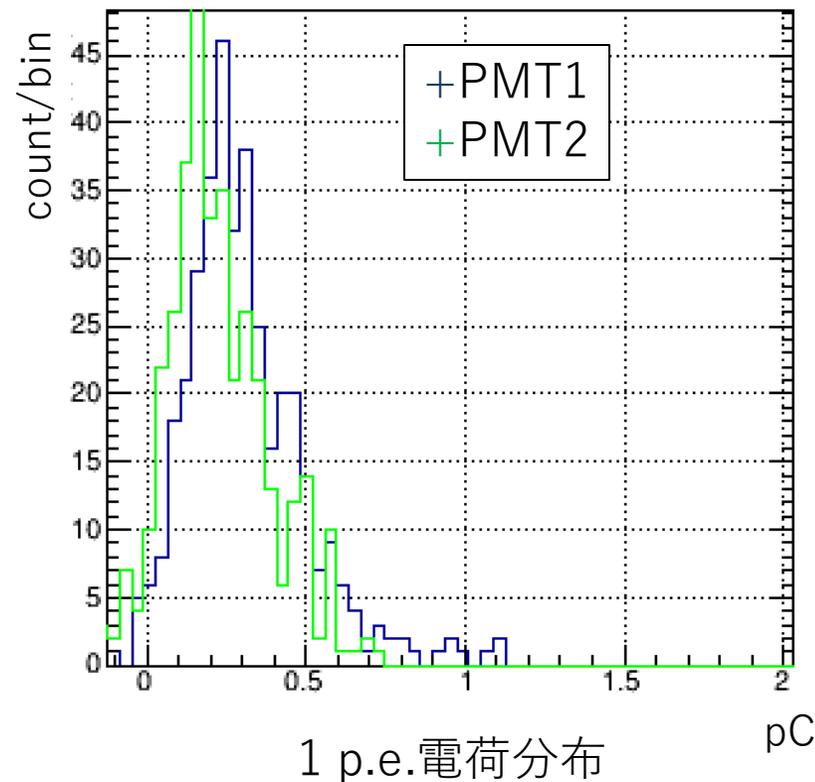
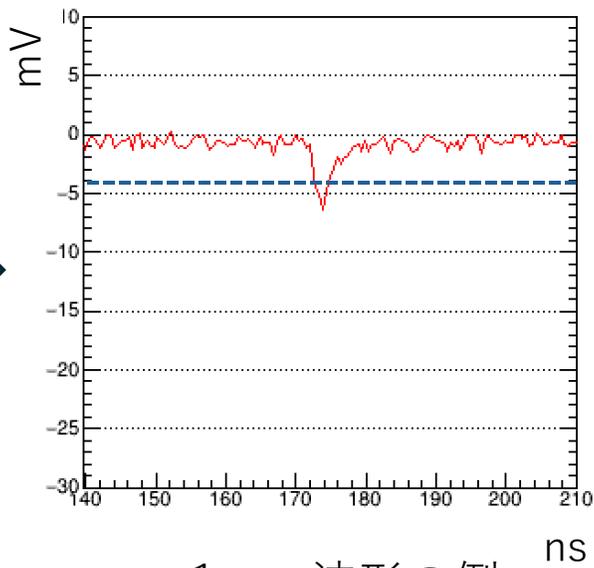
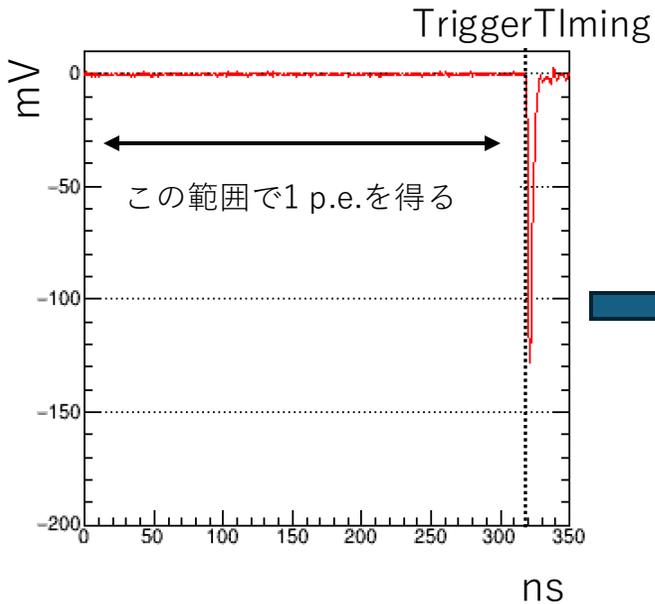
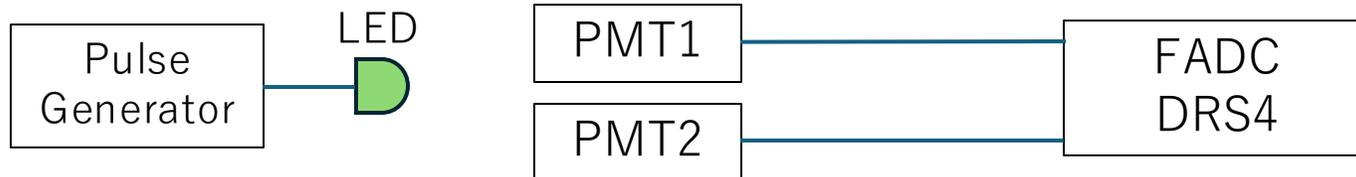


CF <sub>4</sub>	
分子量	88g/mol
密度(気体)	$3.76 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$
密度(液体)	1.60 kg/m <sup>3</sup>
沸点/融点	<b>-128°C/-184°C</b>

CF<sub>4</sub>の特性

# 1p.e.の測定

- 光量を見るために 1 p.e.を測定
- LEDの光を直接PMTで見る
- baselineから -4 mV離れた波形の周囲 50 nsを積分



- TriggerTiming前の波形を見る

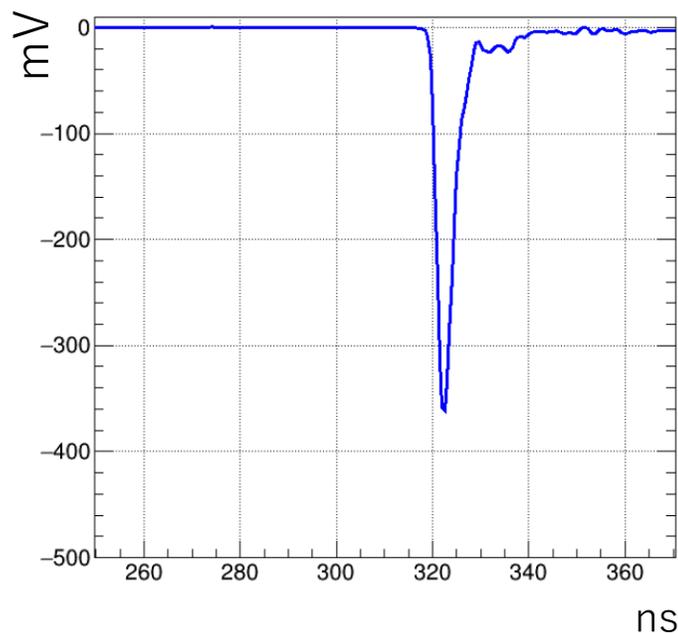
両PMTのゲイン  
PMT1 :  $1.3 \times 10^6$ , PMT2 :  $1.0 \times 10^6$

# 液体CF<sub>4</sub>の発光測定

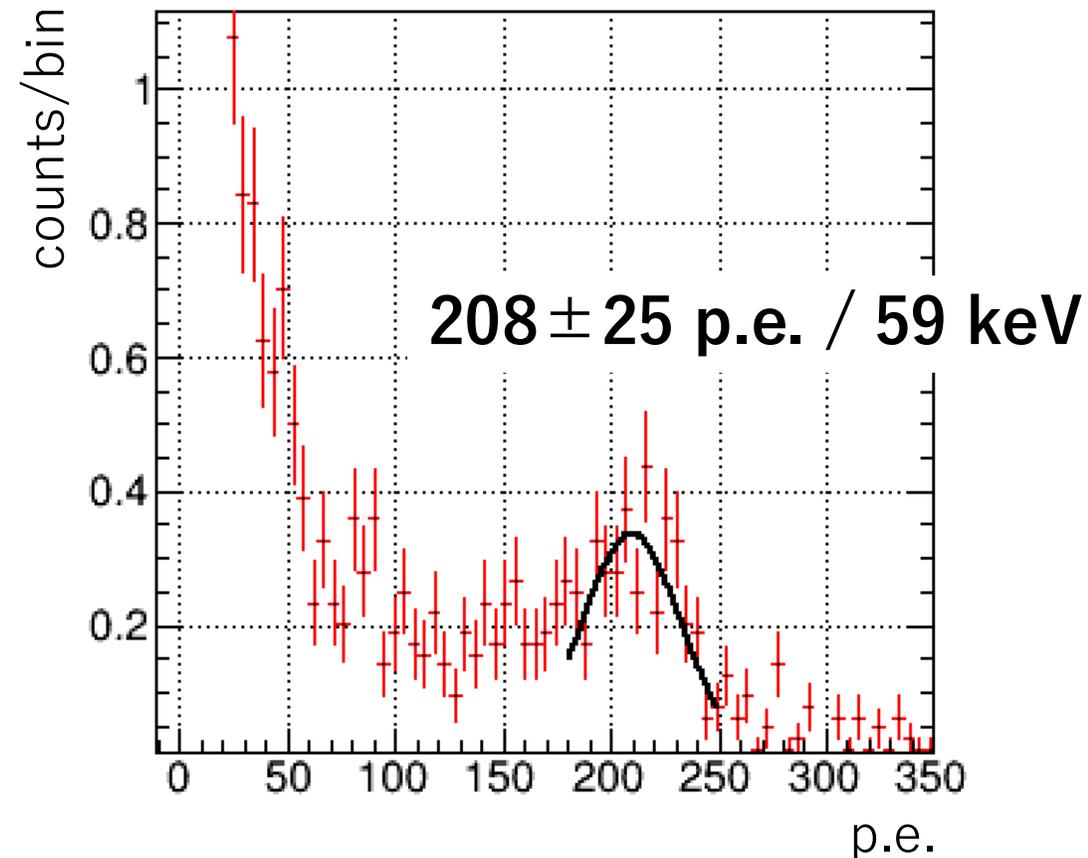
- 検出器内を液体CF<sub>4</sub>で満たす
- <sup>241</sup>Amの 59 keVガンマ線を用いて発光を見る
- 2つのPMTのコインシデンスでみる

## ➤ 液体CF<sub>4</sub>の発光を確認！

- 208 ± 25 p.e./59 keVの光量を観測



- ← 液体CF<sub>4</sub>の平均発光波形
- nsオーダーの短い発光



発光スペクトル

# まとめと展望

## ➤ まとめ

- WIMPs-核子のSD散乱において $^{19}\text{F}$ が有利に働く
  - $^{19}\text{F}$ を含む $\text{CF}_4$ 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化を目指す→**液体 $\text{CF}_4$** を用いる
- ↓
- 検出器領域を $\text{CF}_4$ 沸点以下まで冷却できる**装置を開発**
  - **$\text{CF}_4$ の液化に成功**している
  - $^{241}\text{Am}$  59 keVガンマ線照射時、**液体 $\text{CF}_4$ の発光**を確認した
    - $208 \pm 25$  p.e. / 59 keV

## ➤ 展望

- 液体 $\text{CF}_4$ での**自己吸収、粒子識別**について調べる

# Back Up

# PICO-60実験について

➤ エネルギー閾値

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

➤ APパラメーター

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

$R_c$ : 泡の限界半径

$\sigma$ : 表面張力

T: 温度

$\rho_b$ : 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

➤  $G_j$ : j番目のセンサーのゲイン

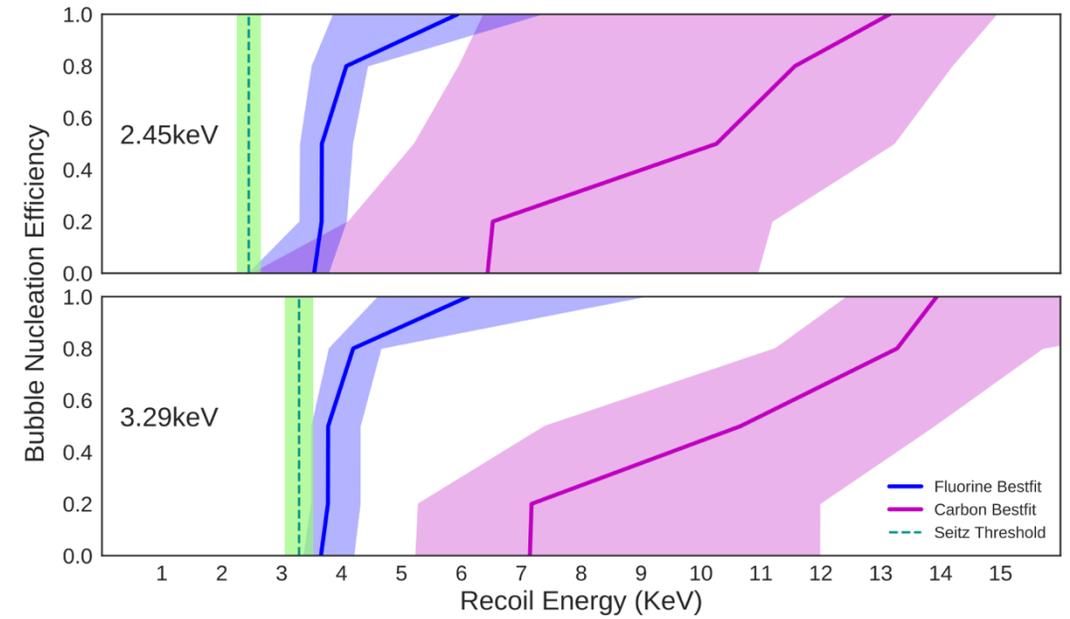
➤  $C_n(x)$ : 泡の位置依存性

➤ f: 周波数

➤ PSD: パワースペクトル密度

# PICO-60実験について

- 1回目のexposureでのthreshold : 3.29 keV
- 2回目のexposureでのthreshold : 2.45 keV
- 影は $1\sigma$



# CF<sub>4</sub>ガスでの発光波長スペクトル

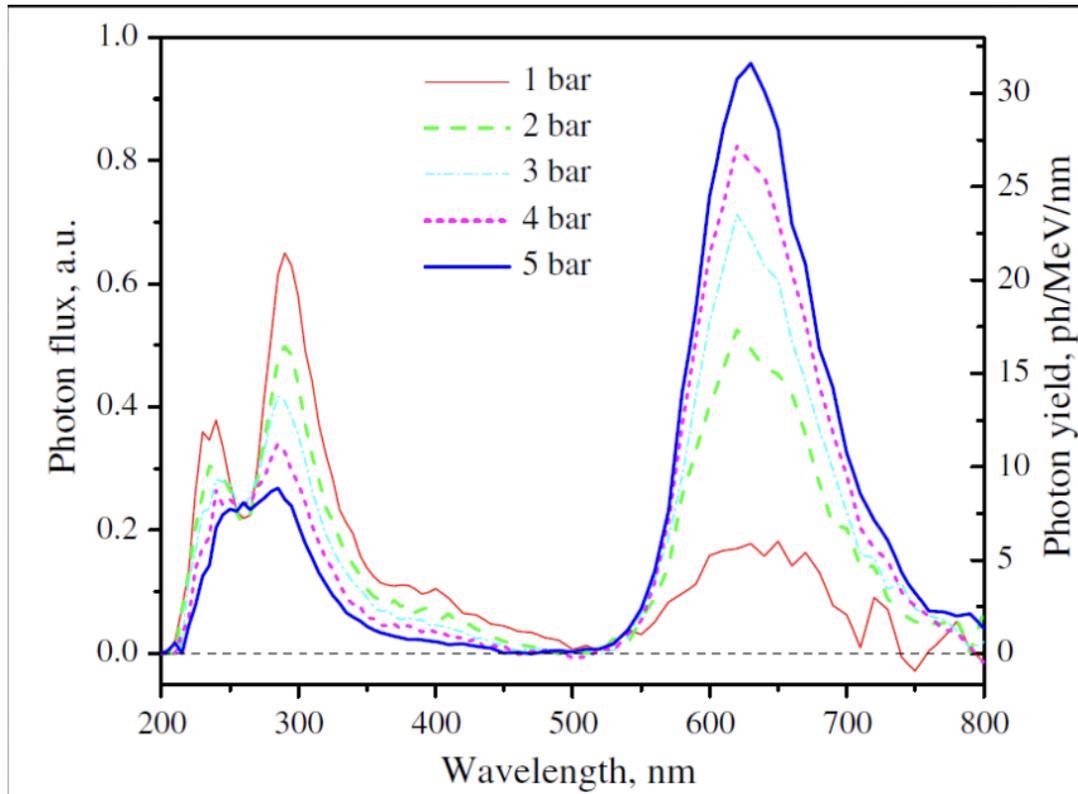
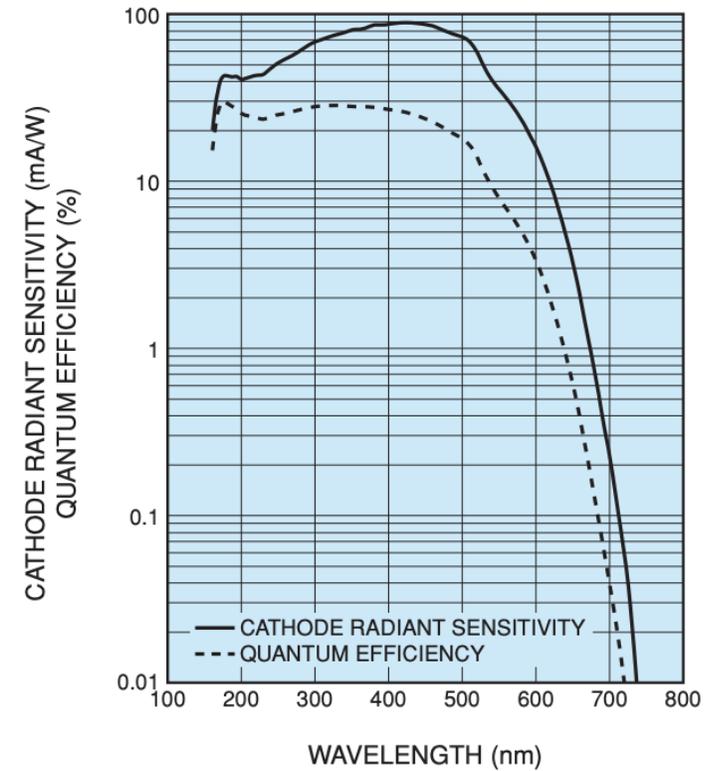


Figure 1: Typical spectral response



NIM B 268(2010)1456

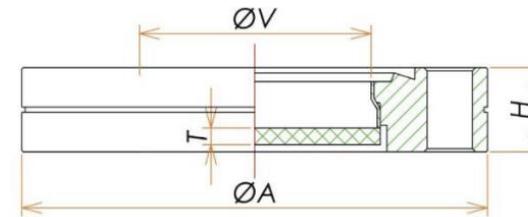
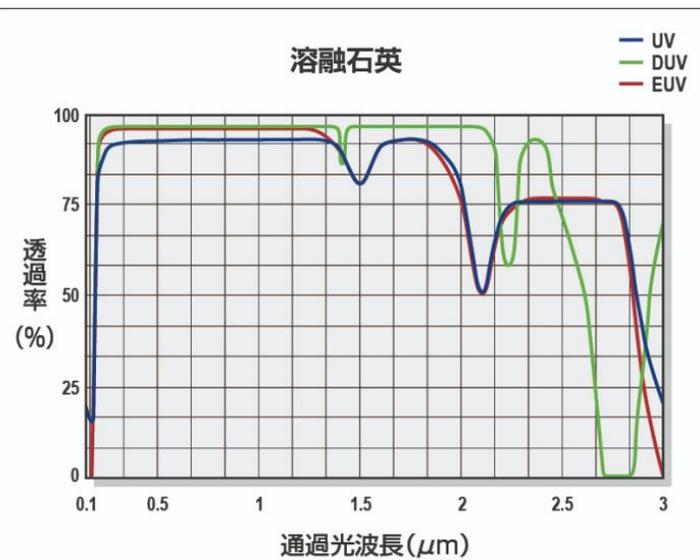
PMTの感度

# 使用した光学窓

## ➤ 熔融石英

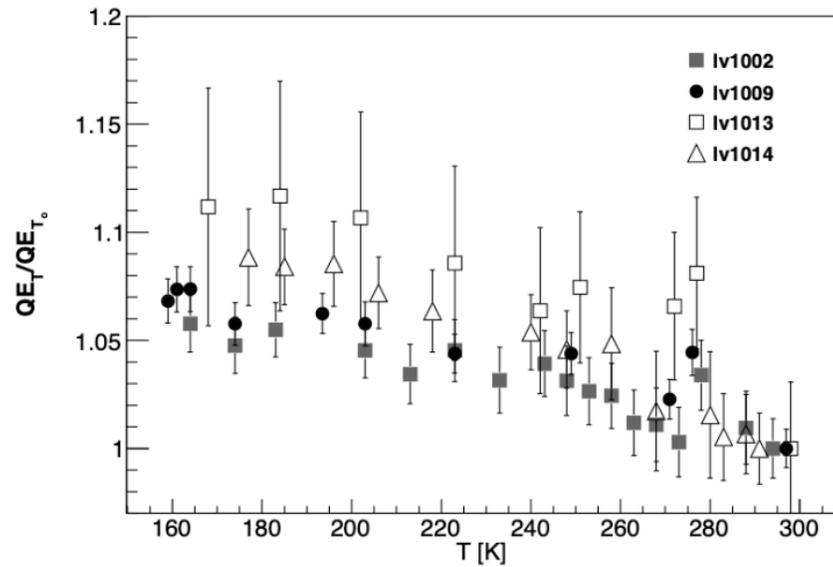
- 窓

▶ <a href="#">21313 / ICF70VPFS</a>	SUS304	70	70	12.7	3.3	35	UV	現在庫数 11個 当日出荷可能 欠品時 別途回答	86,700円 (税込9%)
-------------------------------------	--------	----	----	------	-----	----	----	-----------------------------	----------------



# 温度とPMTのQEの関係

➤ 160Kでは5-11%の上昇があった



JINST 7 P10005



浜松ホトニクス(PMT)使用  
R8520-406

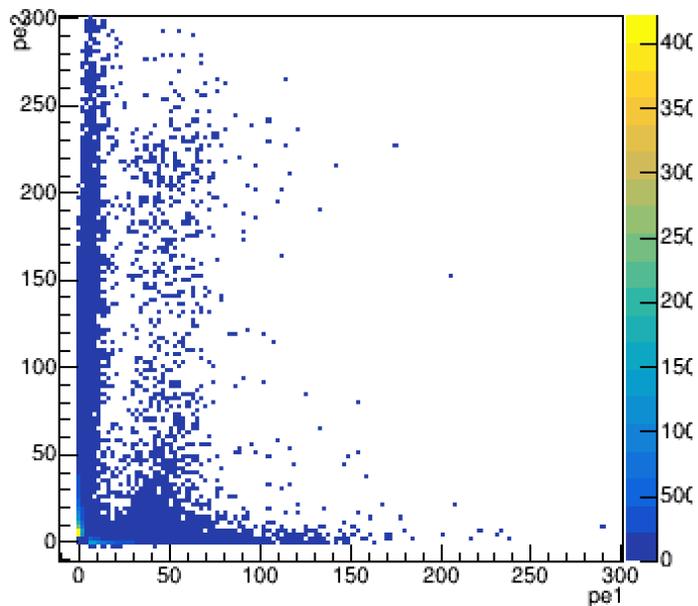
$$N_{Observe} = N_{Original} \times \Omega \times \epsilon_{QE}$$

$N_{Observe}$	:観測光量
$N_{Original}$	:生成光量
$\Omega$	:PMTの立体角
$\epsilon_{QE}$	:PMTのQE

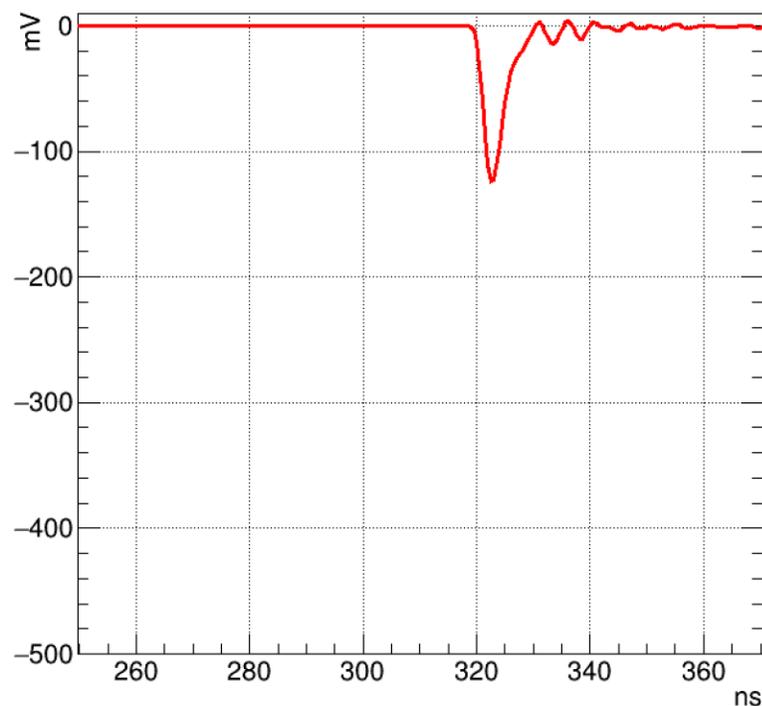
- 光電面被覆率~25 %
- QEは常温で~30 %、液化温度以下では最大で15 %弱の上昇  
(JINST 7 P10005)
- 液体CF<sub>4</sub>の観測光量 : 208 p.e./59 keV
- 観測光量から液体CF<sub>4</sub>の生成光量を計算 : ~39000 p.e./ MeV
- 液体Xeの発光量 : 42000 p.e./ MeV(文献値)
- 液体Xeの**90 %程度**の発光量をもつ

# もう片方のPMTでの発光

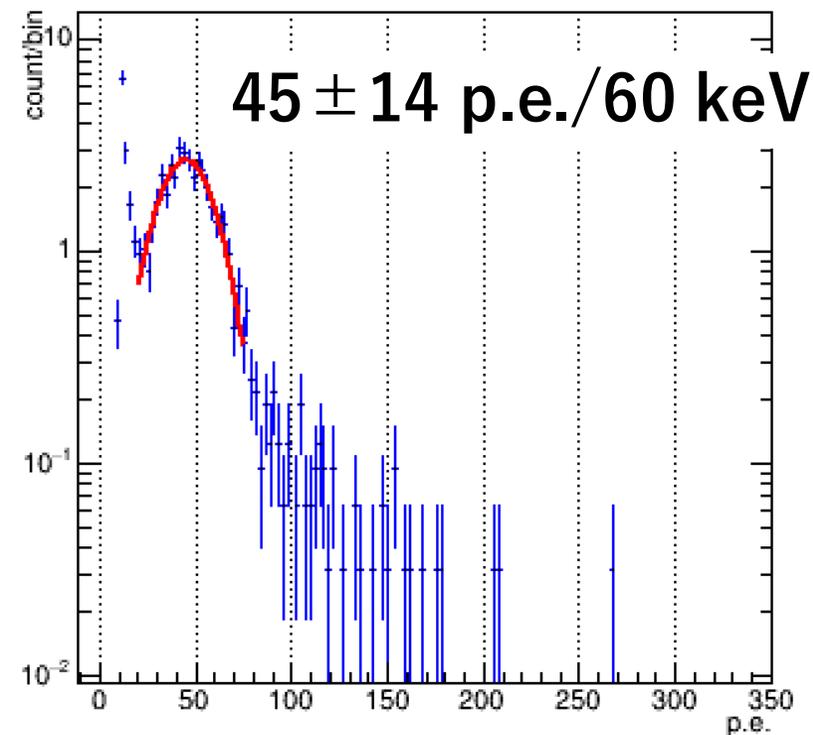
- PMT1(検出器上部)では、PMT2よりも小さな光量が観測された
- Gainの違いを考慮しても3倍ほど光量が違う
- 検出器の上部までは完全に液化されてなかった？



PMT1とPMT2の光量



液体 $\text{CF}_4$ の平均発光波形



発光スペクトル

- 今回使用したDRS4
- Sampling Rate 2GHz
- Dynamic Range -0.5~0.5V

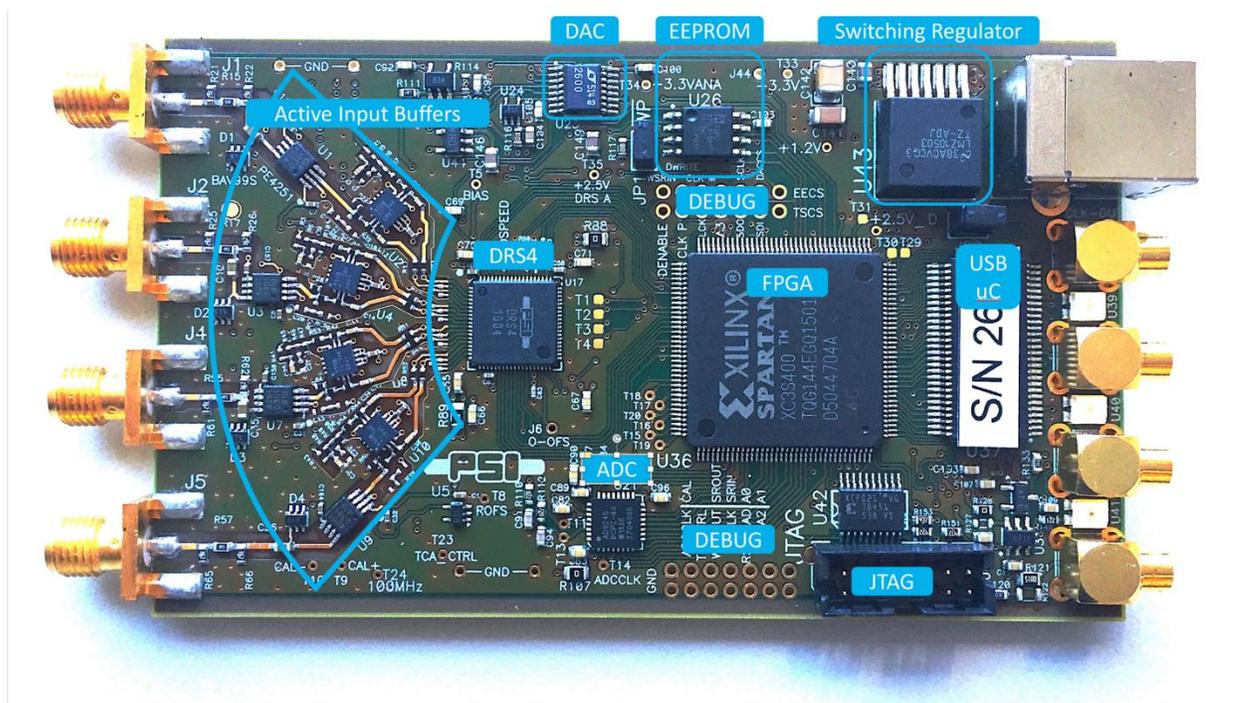


Figure 1: Picture of the DRS4 Evaluation Board V5.1 with different components

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.

