



液体 CF_4 を用いた暗黒物質直接探索の ための検出器の開発

第1回 学術変革 「地下稀事象」 若手研究会@富山大学

2025/3/6~8

神戸大学 M1 谷口紘大

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

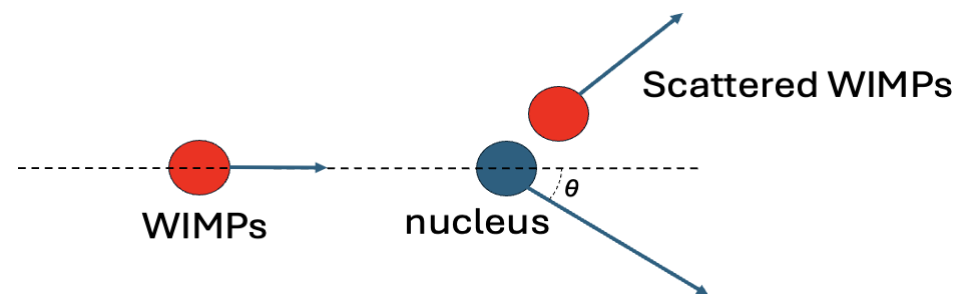
➤ SD散乱

- 散乱弾面積が標的原子核のスピン量に依存する

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

λ : 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 $\lambda^2 J(J+1)$

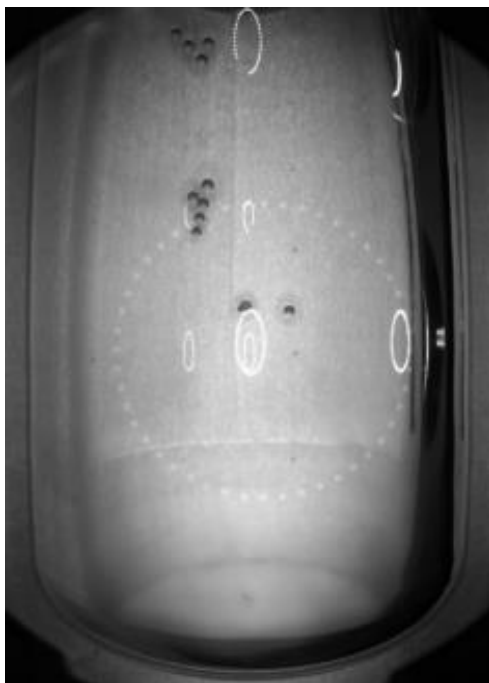
同位体	J	$\lambda^2 J(J+1)$
¹⁹ F	1/2	0.647
²³ Na	2/3	0.041
¹²⁷ I	5/2	0.007
¹²⁹ Xe	1/2	0.124
¹³¹ Xe	3/2	0.055

¹⁹FがSD散乱において有利に働く

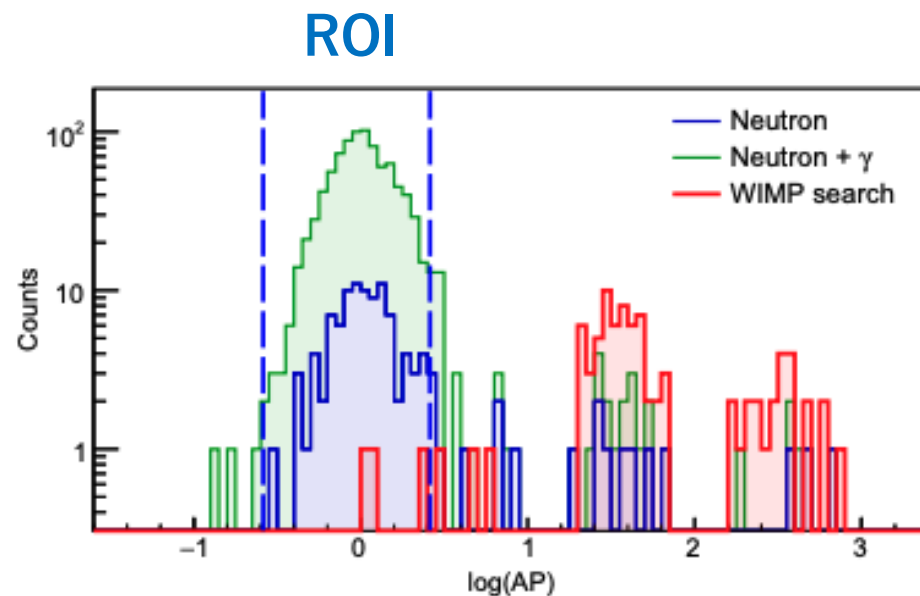
実験のモチベーション

➤ PICO-60実験

- フッ素化合物(C_3F_8 :52.2kg)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、energy thresholdを設定することができる→**低閾値化**
- 検出器内をカメラで撮影
- 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

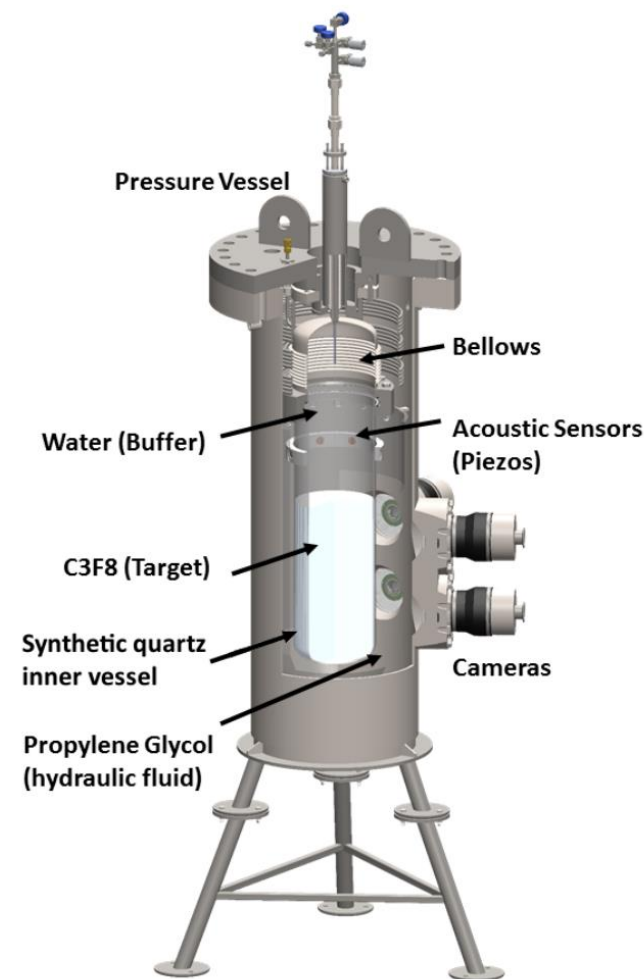


検出器内の泡生成の様子



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

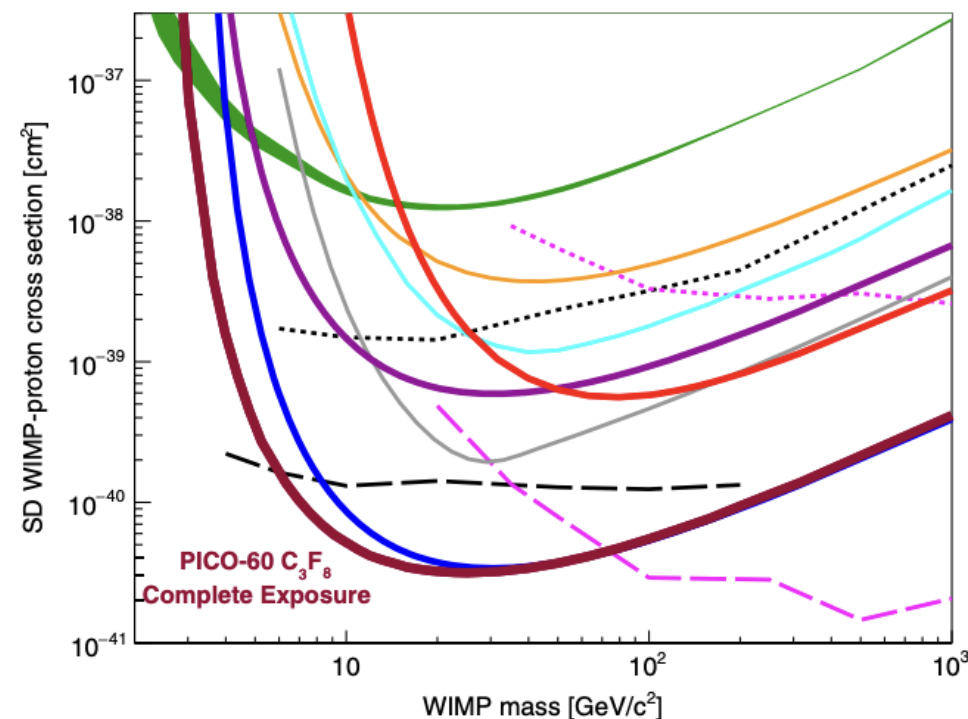
実験のモチベーション

- 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えない



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: 1404 kg*day



90%信頼区間でのSD WIMP-proton cross section

青：1回目のexposure	紫：PICO-2L
緑：PICASSO	赤：PICO-60 CF3I
橙：SIMPLE	シアン：PANDAX-II
桃：IceCube	黒：SuperK

実験のコンセプト

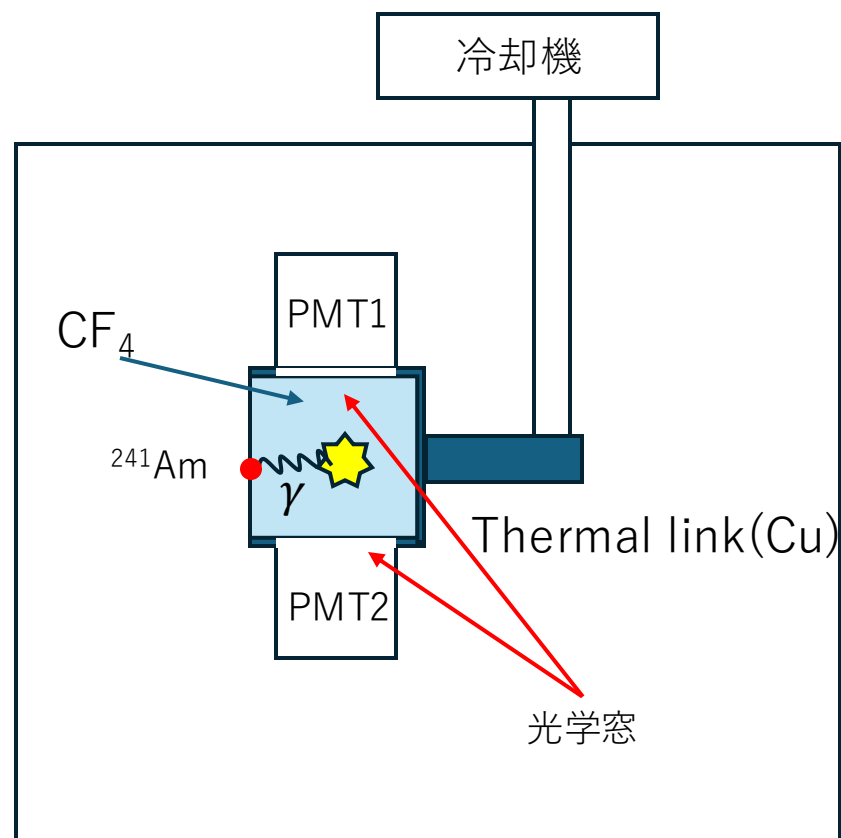
- ^{19}F をターゲット原子核とした**シンチレータ**を使用
 - CF_4 (比較的安価)
- 将来的に**大型化**を目指す
 - 既存の実験に、標的物質を入れ替える提案をする
- 大型化→**液体 CF_4** を用いる
- 基礎的なシンチレータとしての特性の理解を目指す
 - 液体 CF_4 で発光をみる

実験装置

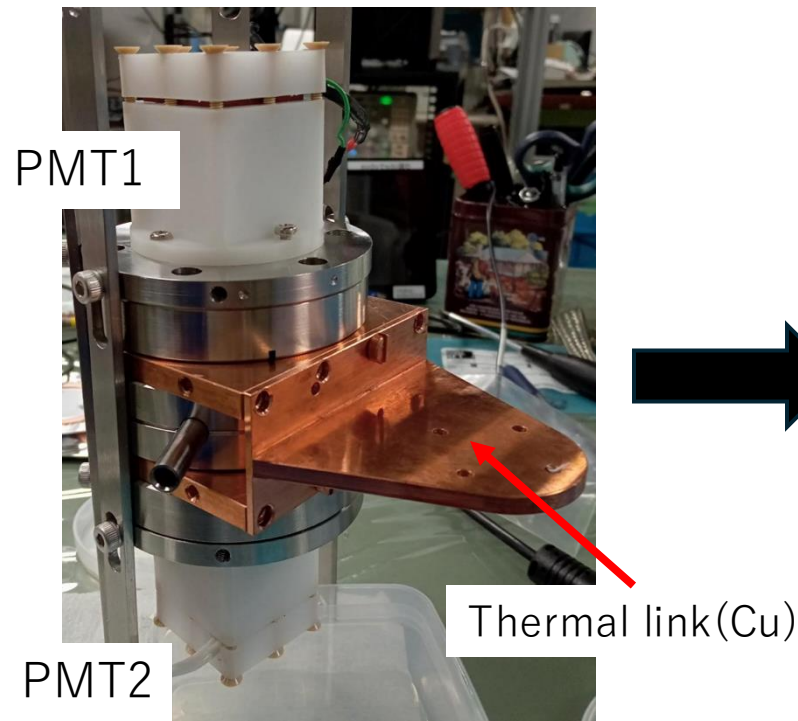
- 真空容器内に検出器を設置
- 光学窓を取り付けPMTを外付けする
- 検出器を冷却機に銅プレートで熱的に接触
 - 検出器内を CF_4 の沸点以下まで冷却



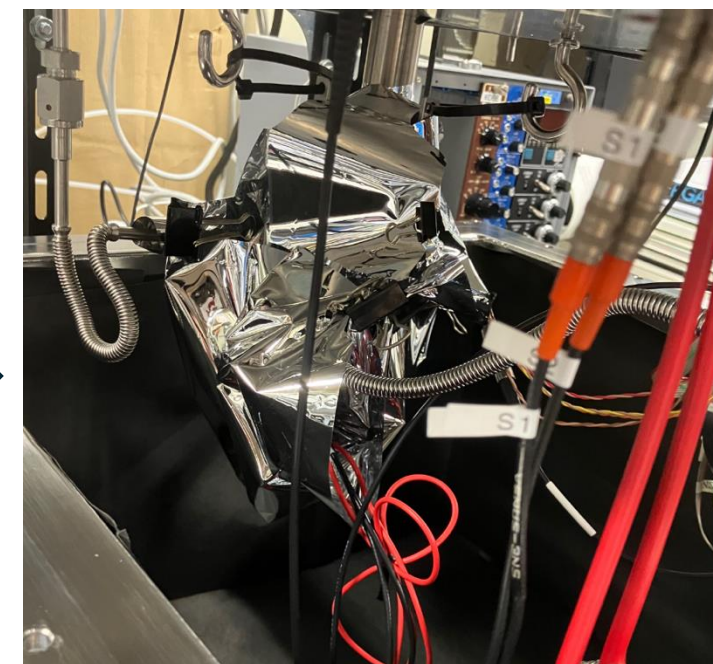
浜松ホトニクスのパMT使用
R8520-406



真空容器の中の様子



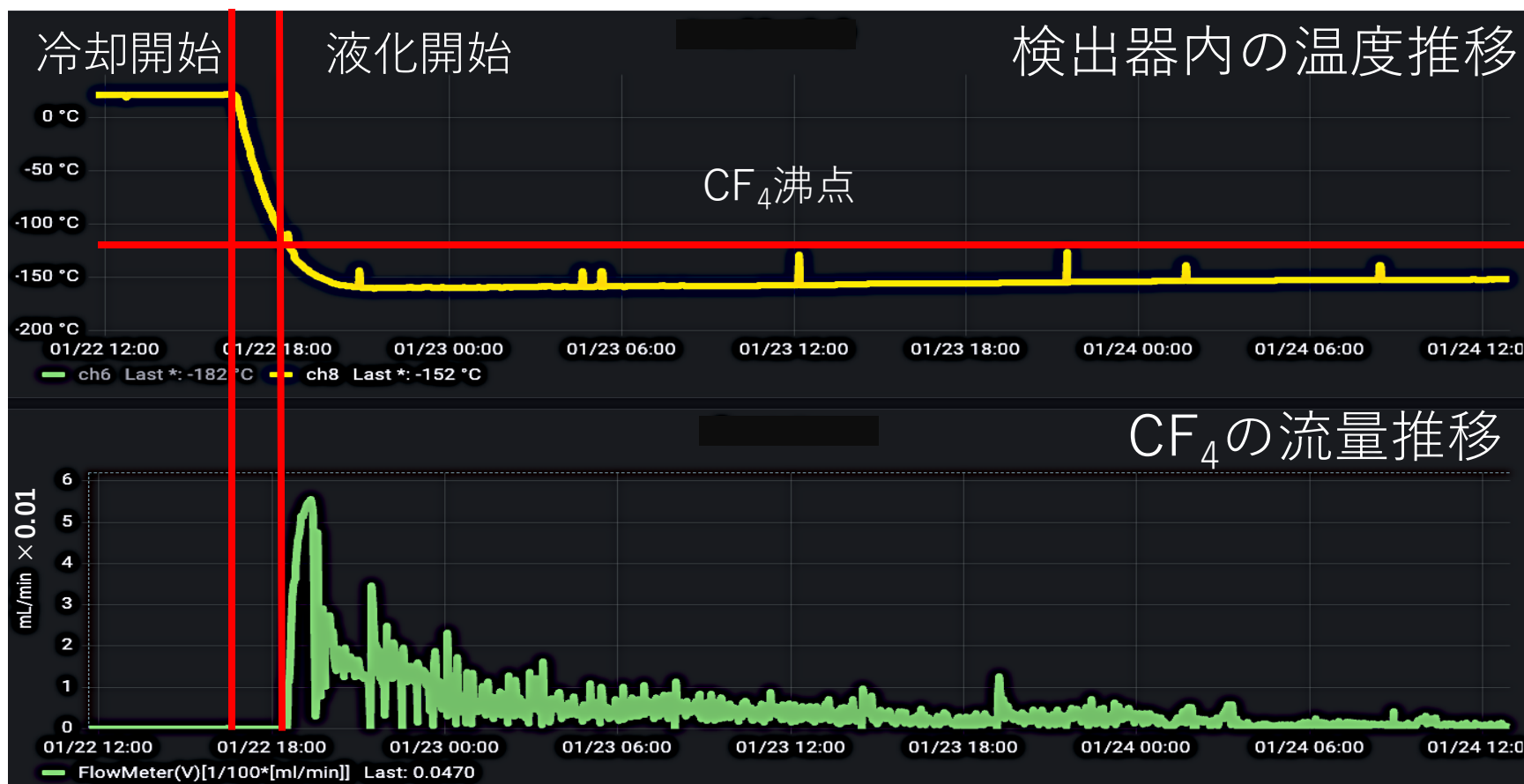
検出器
 $22 \times 22 \times 42 \text{mm}^3$



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CF₄の沸点を下回る
- 沸点を下回った直後に液化が始まった

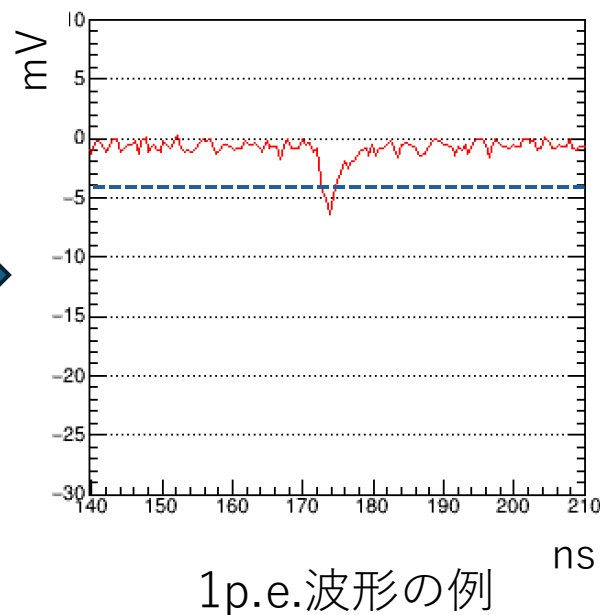
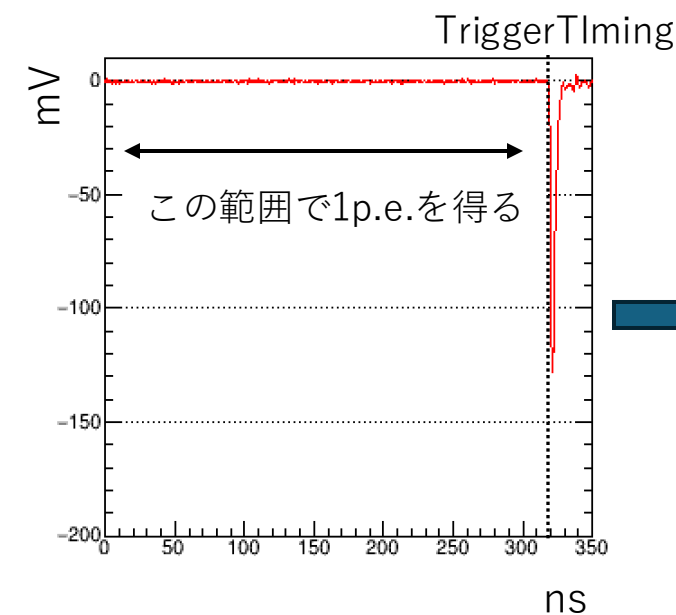
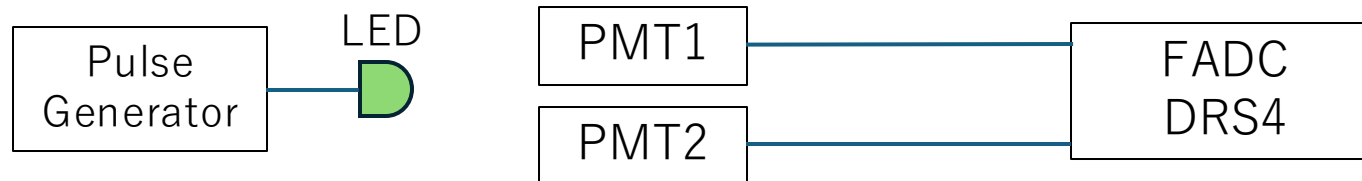


CF ₄	
分子量	88g/mol
密度(気体)	$3.76 \times 10^{-3} \text{kg/m}^3$
密度(液体)	1.60kg/m^3
沸点/融点	-128°C/-184°C

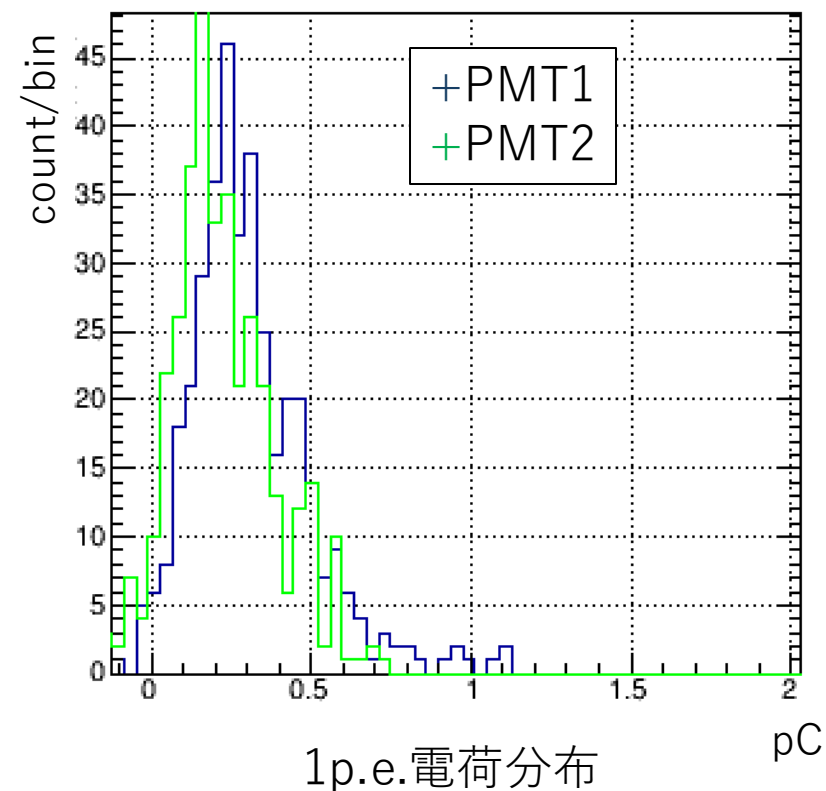
CF₄の特性

1p.e.の測定

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



- TriggerTiming前の
波形を見る



両PMTのゲイン

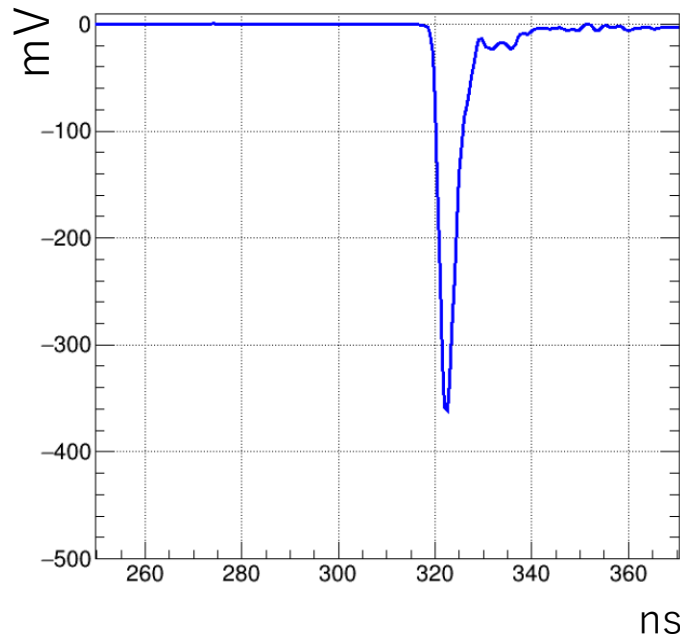
PMT1 : 1.3×10^6 , PMT2 : 1.0×10^6

液体CF₄の発光測定

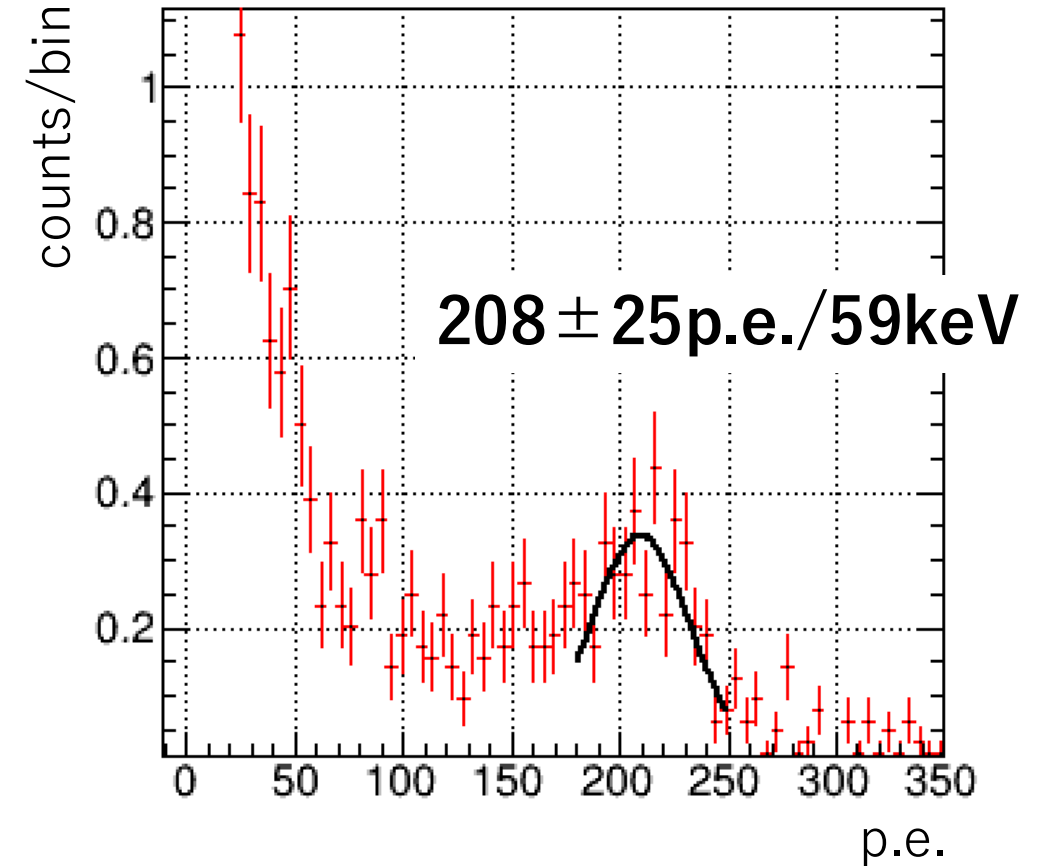
- 検出器内を液体CF₄で満たす
- ²⁴¹Amの59keVガンマ線を用いて発光を見る
- 2つのPMTのコインシデンスでみる

➤ 液体CF₄の発光を確認！

- $208 \pm 25 \text{ p.e./59keV}$ の光量を観測



- ← 液体CF₄の平均発光波形
- nsオーダーの短い発光



発光スペクトル

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

$N_{Observe}$	:観測光量
$N_{Original}$	:生成光量
Ω	:PMTの立体角
ε_{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CF₄の観測光量 : 208p.e./59keV
- 観測光量から液体CF₄の生成光量を計算 : ~39000p.e./MeV
- 液体Xeの発光量 : 42000p.e./MeV(文献値)
- 液体Xeの**90%程度**の発光量をもつ

まとめと展望

➤ まとめ

- 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
- ^{241}Am 59keVガンマ線照射時、**液体 CF_4 の発光**を確認した
 - $208 \pm 25 \text{ p.e./59keV}$

➤ 展望

- 液体 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

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

➤ APパラメーター

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

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

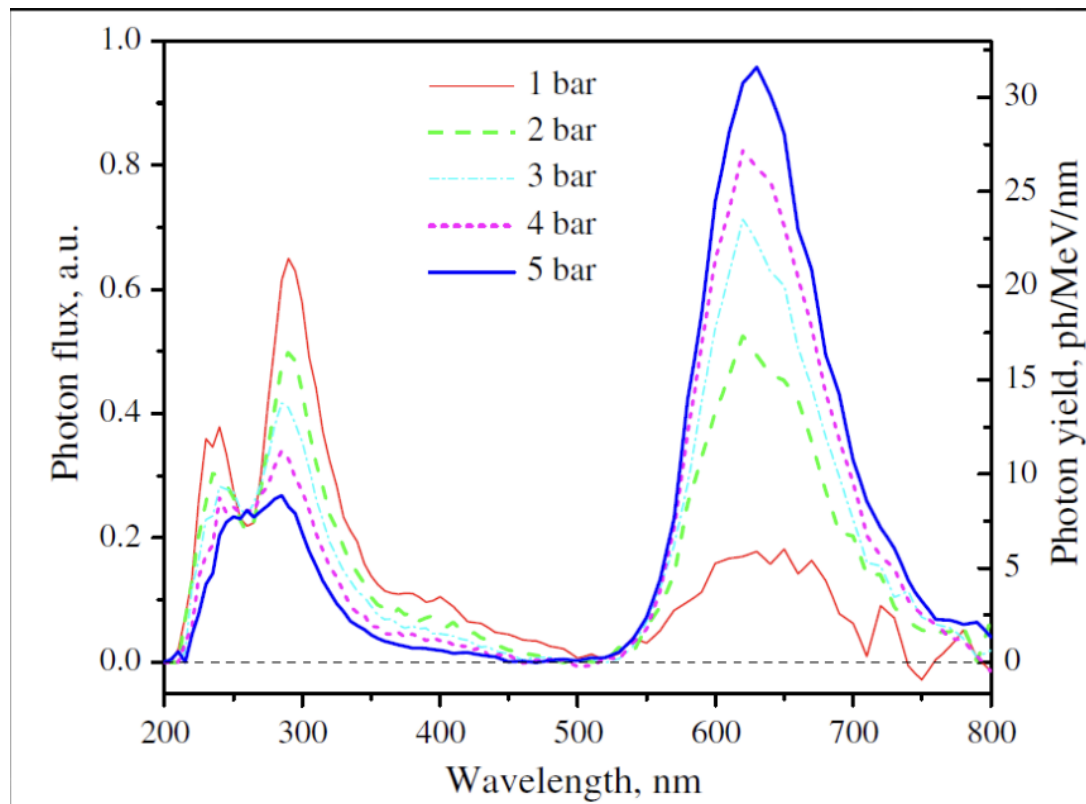
➤ G_j : j 番目のセンサーのゲイン

➤ $C_n(x)$: 泡の位置依存性

➤ f : 周波数

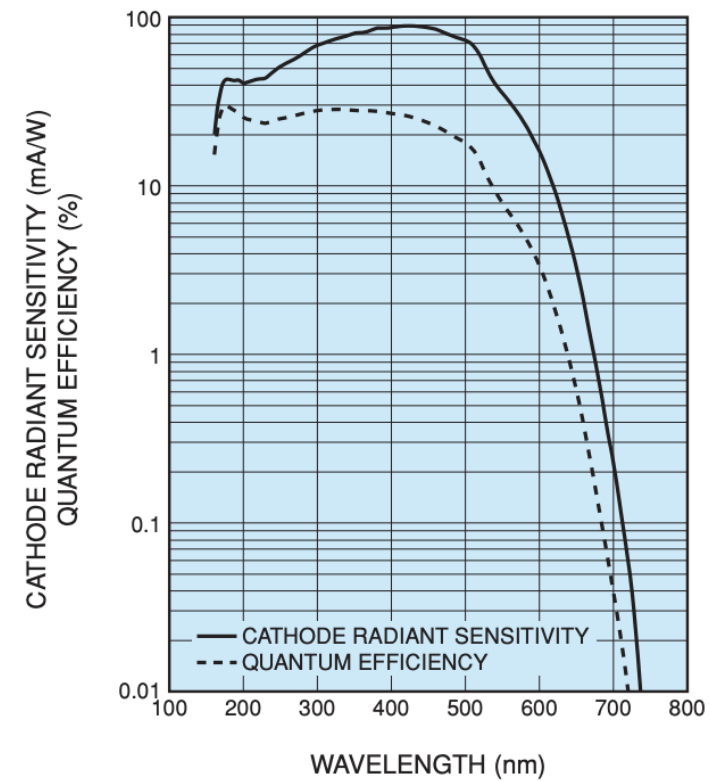
➤ PSD: パワースペクトル密度

CF₄ガスでの発光波長スペクトル



NIM B 268(2010)1456

Figure 1: Typical spectral response



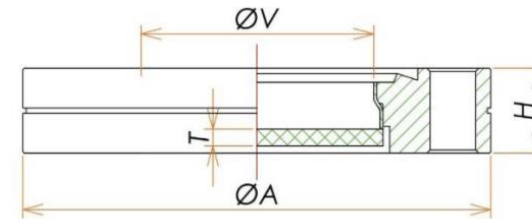
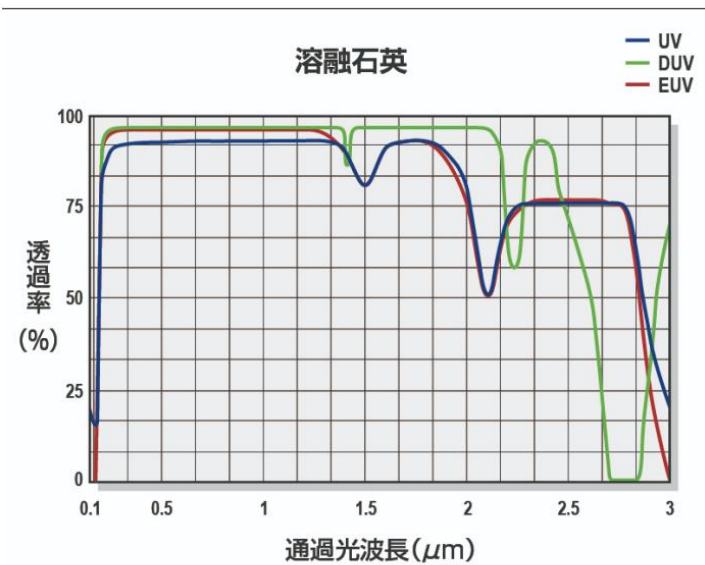
PMTの感度

使用した光学窓

➤ 熔融石英

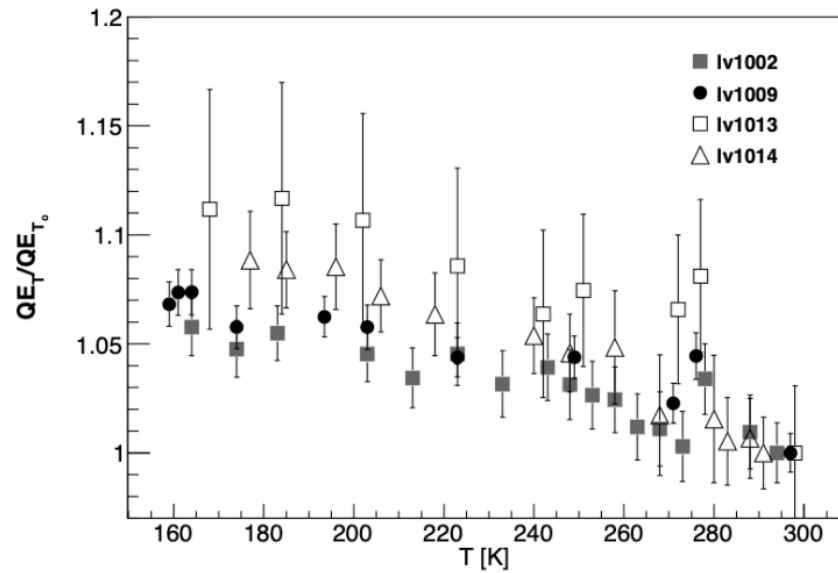
- 窓

▶ 21313 / ICF70VPFS	SUS 304	70	70	12.7	3.3	35	UV	現在庫数 欠品時	11個 当日出荷可能 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



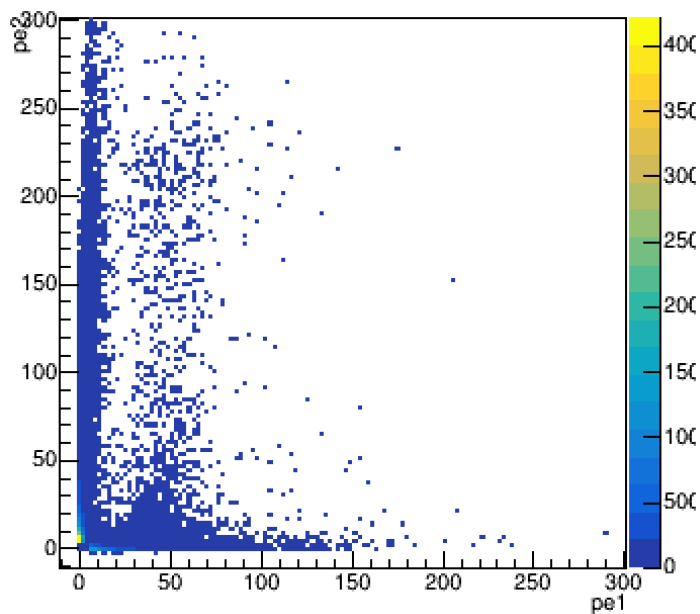
JINST 7 P10005



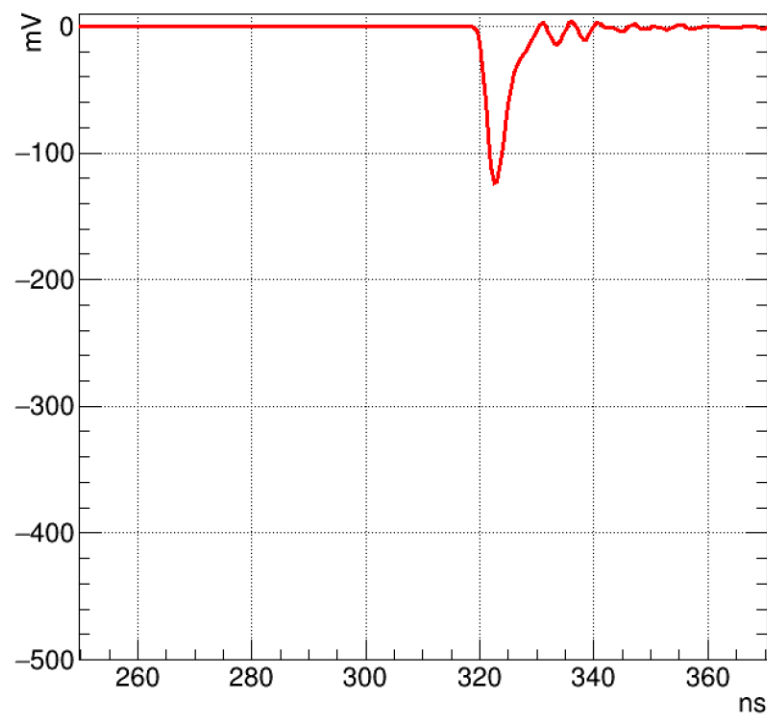
浜松ホトニクス(PMT)使用
R8520-406

もう片方のPMTでの発光

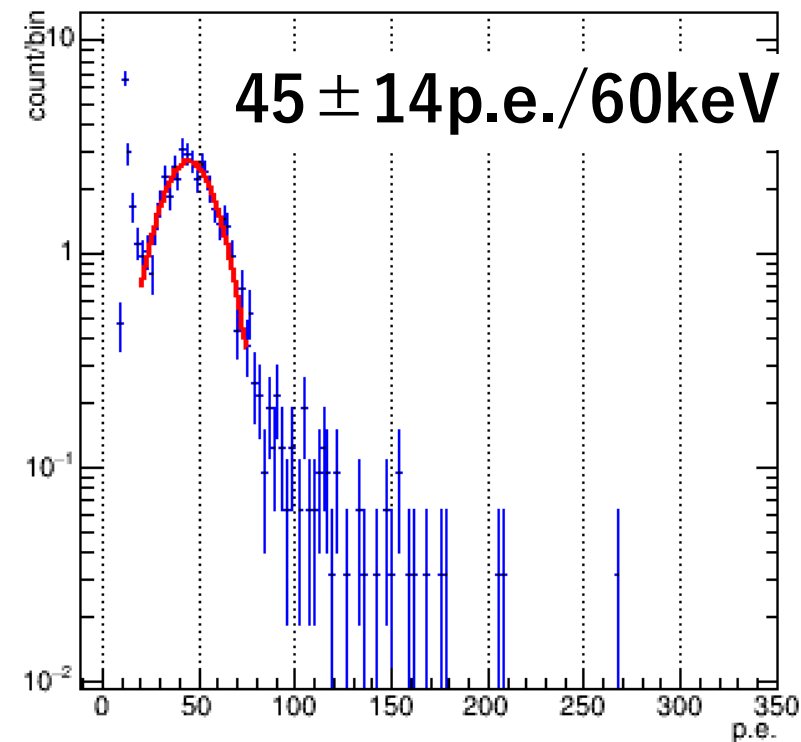
- PMT1(検出器上部)では、PMT2よりも小さな光量が観測された
- Gainの違いを考慮しても3倍ほど光量が違う
- 検出器の上部までは完全に液化されてなかった？



PMT1とPMT2の光量



液体 CF_4 の平均発光波形



発光スペクトル

DRS4

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

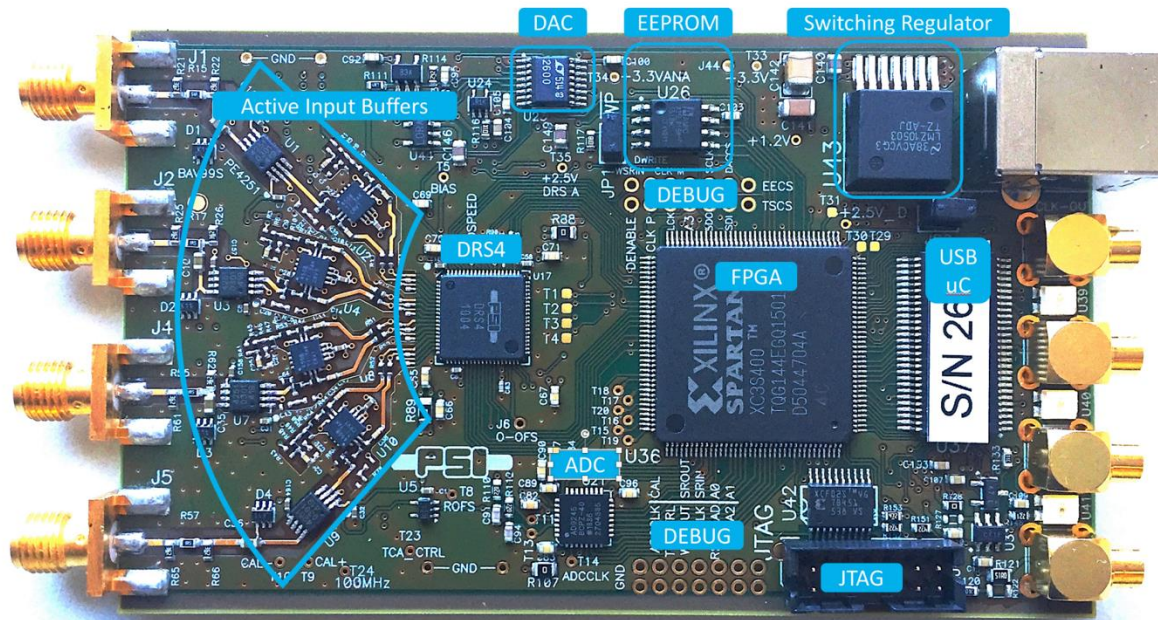


Figure 1: Picture of the DRS4 Evaluation Board V5.1 with different components

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.



