

スピン依存する暗黒物質検出のための 液化CF₄スペクトロメータの開発

神戸大理

前田剛志 水越慧太 身内賢太郎

講演番号：16aSK-4

2020年9月16日 日本物理学会 2020 秋季大会

暗黒物質

- 暗黒物質
 - 観測結果により存在は強く示唆されている
 - 未だ検出には至らず
- WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles)
 - 暗黒物質の最有力候補
 - 稀に原子核と相互作用し、原子核反跳を起こす
 - スピン依存する(Spin dependent, SD)散乱
 - スピン依存しない(Spin independent, SI)散乱
- SD散乱
 - 散乱断面積がスピンの依存する

$$\sigma \propto \lambda^2 J(J + 1)$$

λ : ランデ因子

J : 標的原子核のスピンの大きさ

σ : SD散乱の際のWIMPと原子核との散乱断面積

標的原子核ごとの $\lambda^2 J(J + 1)$

元素	J	$\lambda^2 J(J + 1)$
F	1/2	0.647
Na	3/2	0.041
I	5/2	0.007
Xe	1/2	0.124
Xe	3/2	0.055

J. Ellis et al. PLB263(1991) 259 – 26

今回の実験

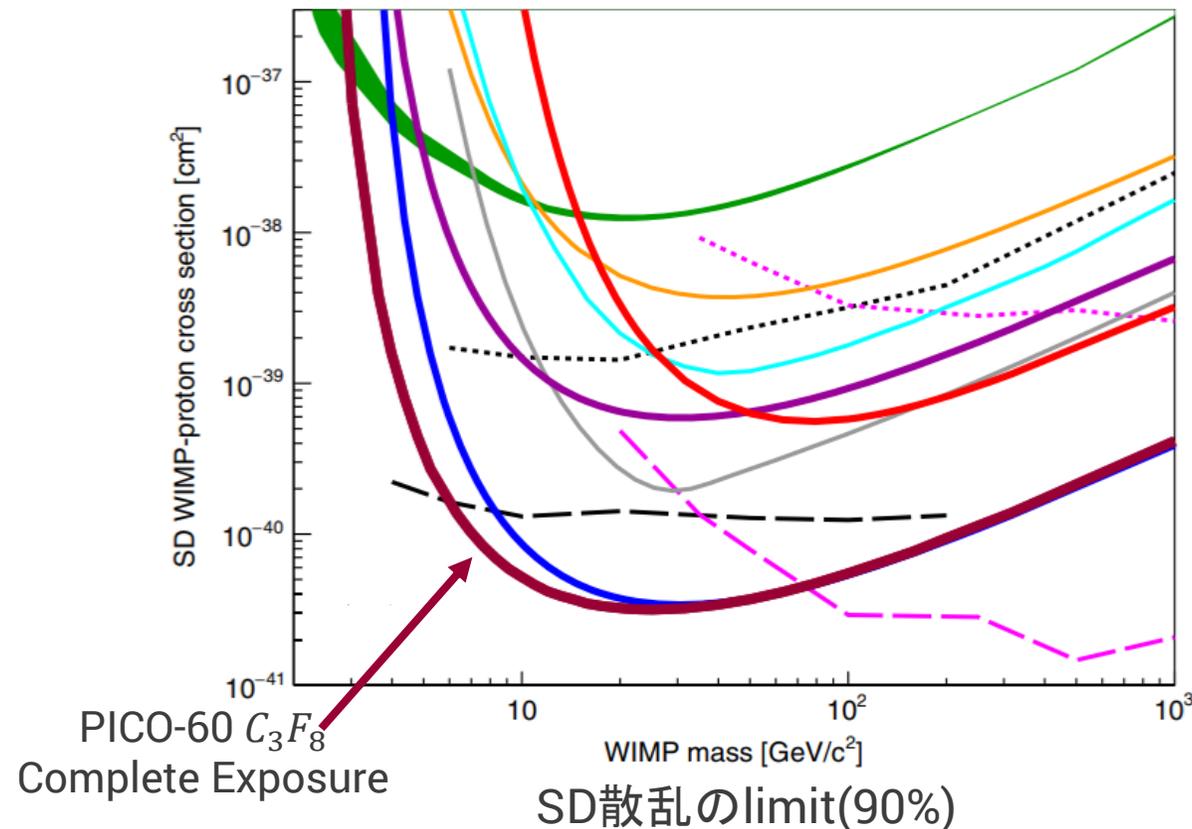
• PICO実験

- フッ素化合物を用いた泡箱検出器
- 検出器内部の圧力や温度を変化させて energy thresholdを設定することが出来る
- 対象粒子の energy thresholdを定められる
- SD散乱観測で最も強い制限をかけている

CF₄ガスを用いてenergy spectrumを得られる検出器の確立を目指す

• 今回の実験

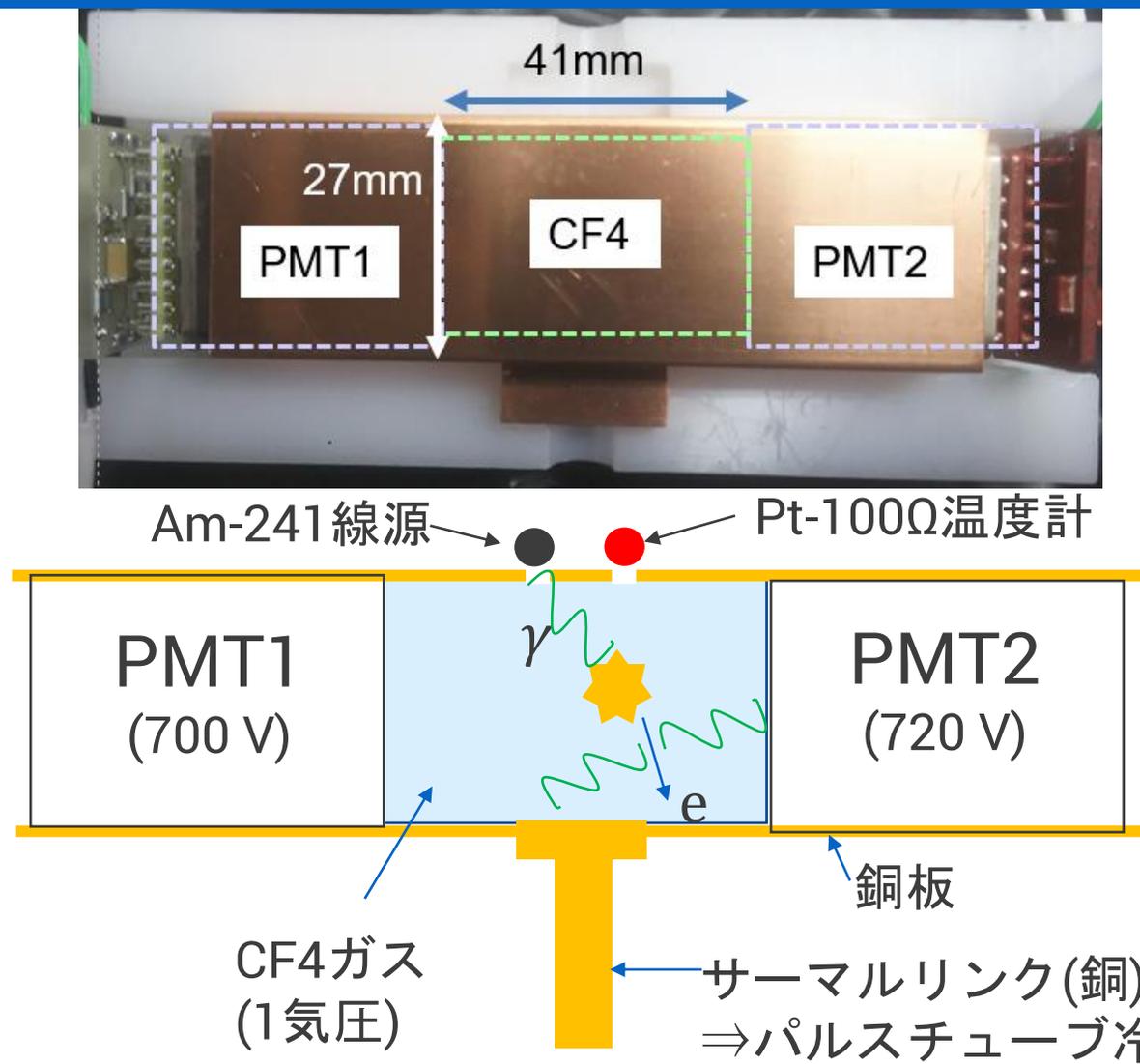
- CF₄ガスに60 keVガンマ線を照射
- 励起したCF₄からの発光を検出
- 冷却(-10°C)により光量が上昇
- 液化の前段階の実験



C. Amole et al. PRD100(jul, 2019) 02200

実験装置

検出器の設計



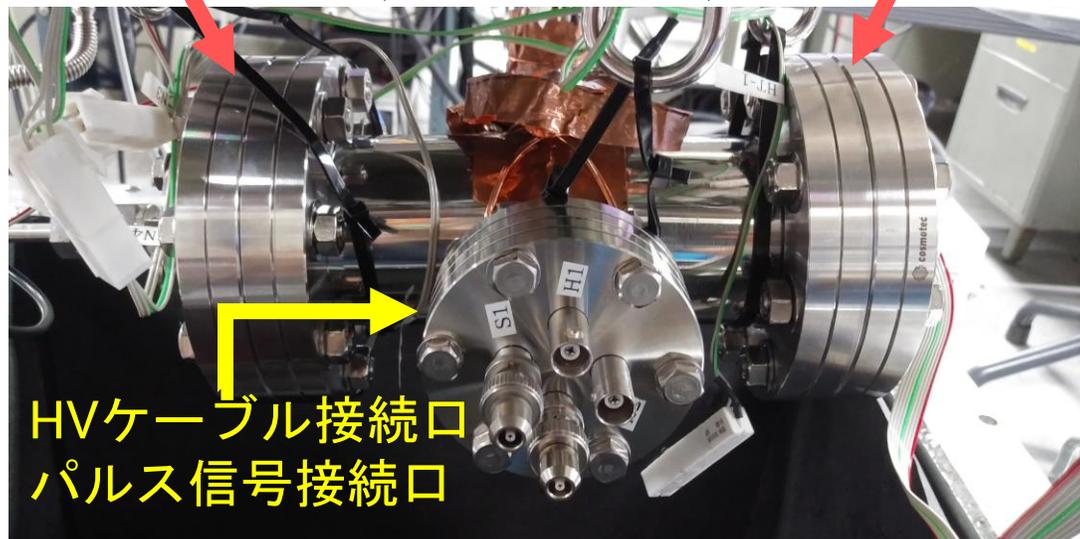
- 低温作動用PMTを使用
 - 浜松ホトニクス製R8520-406
光電面：20.5mm×20.5mm
- パルスチューブ冷凍機で約-10°Cまで冷却
- Am-241線源
 - 5.4 MeVのアルファ線
 - 60 keVのガンマ線

検出器周り/外真空容器

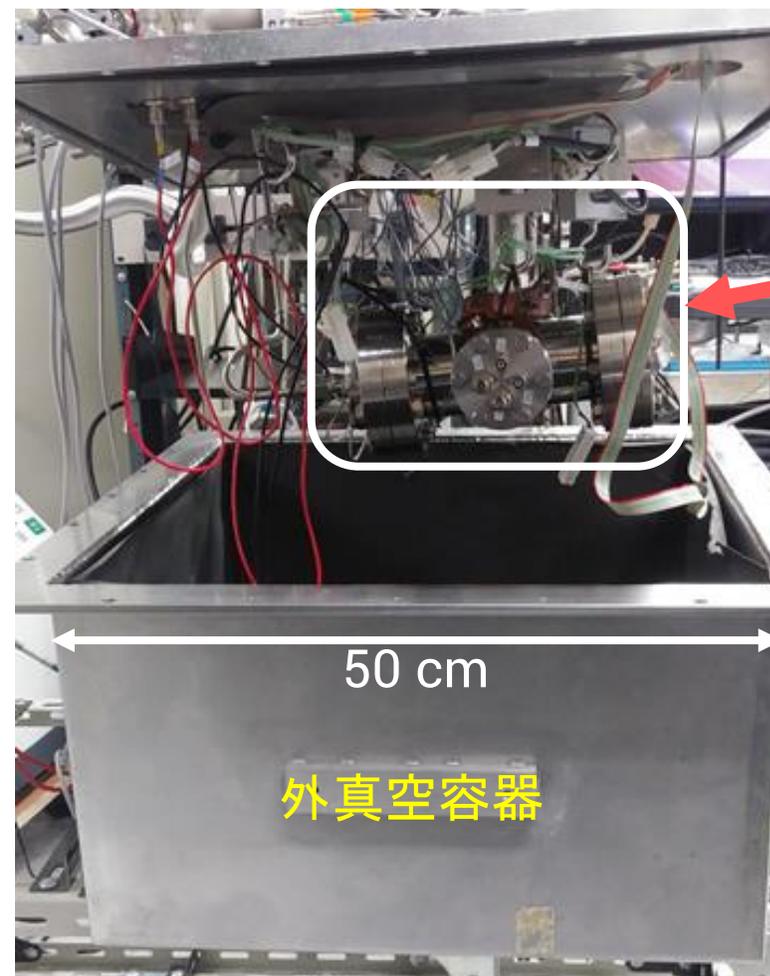
CF4流入口

サーマルリンク側
(冷凍機と接続)

温度計用ケーブル
グランドなど



ICFフランジ(中に検出器が入っている)



外真空容器は1気圧のCF4で満たす
∵検出器からのリークがあったため

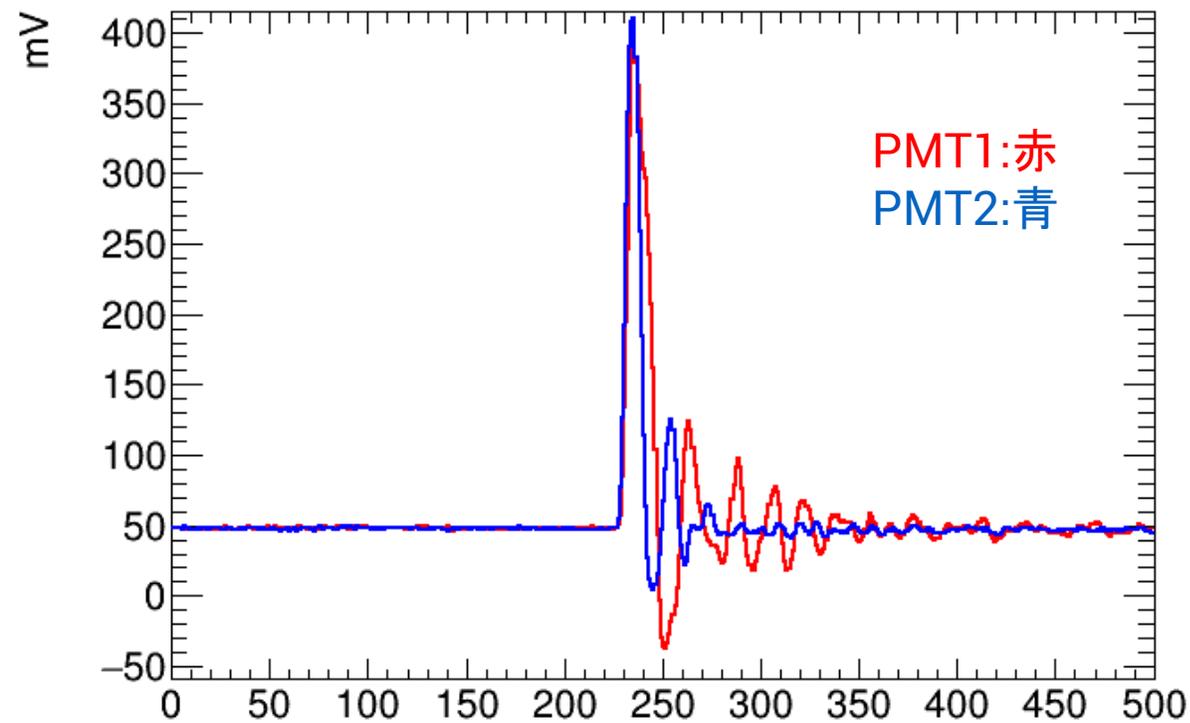
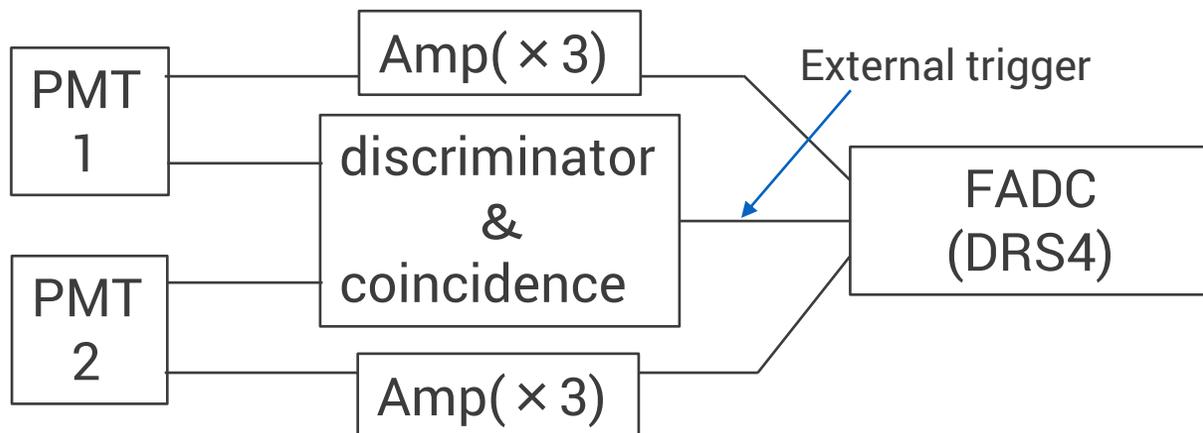
データ取得

測定時間



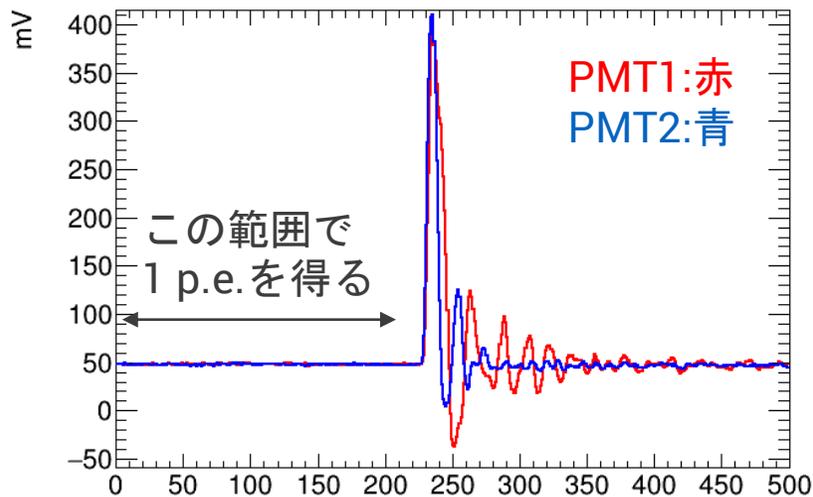
DAQ

- DRS4により取得
- Sampling rate : 約1GHz
- ダイナミックレンジ : -0.1V~0.9V

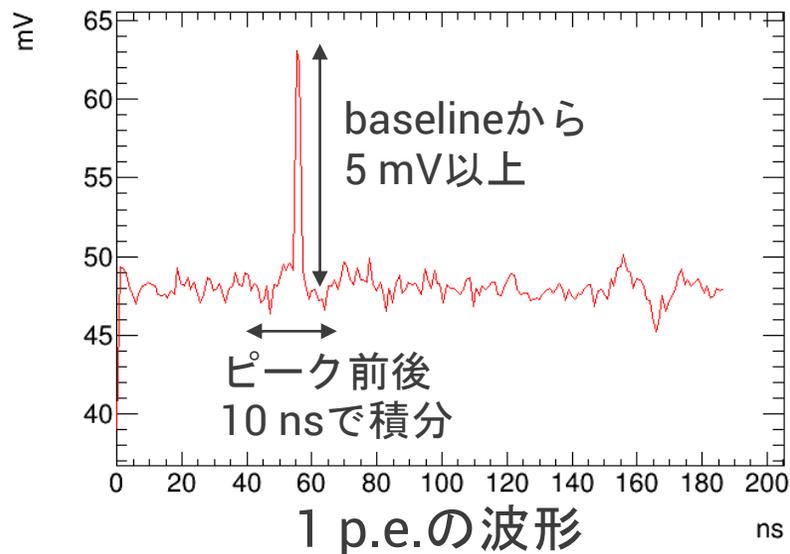


CF4発光による典型的な波形 ns

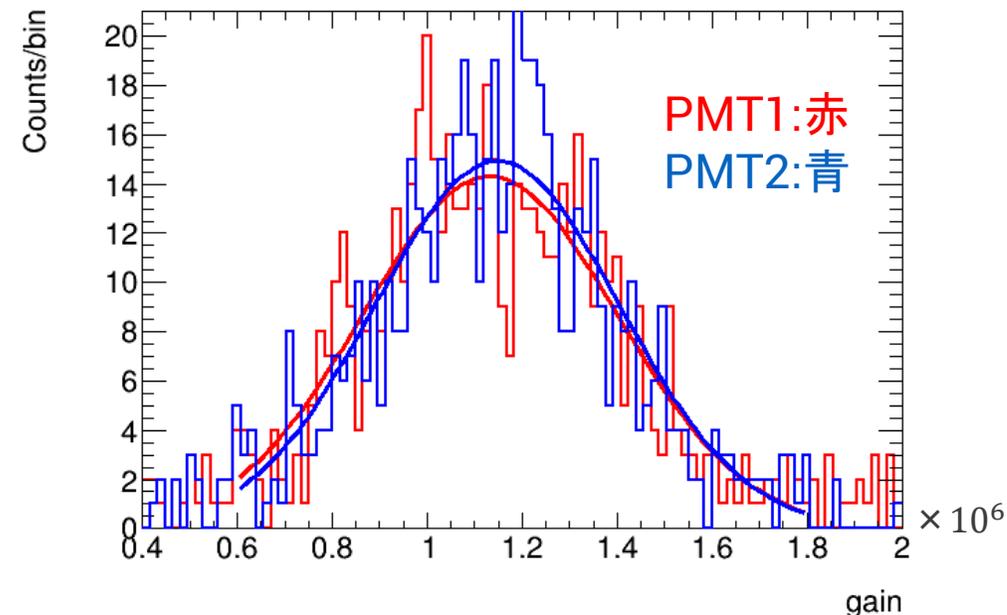
PMTのゲイン測定



CF₄発光による典型的な波形^{ns}

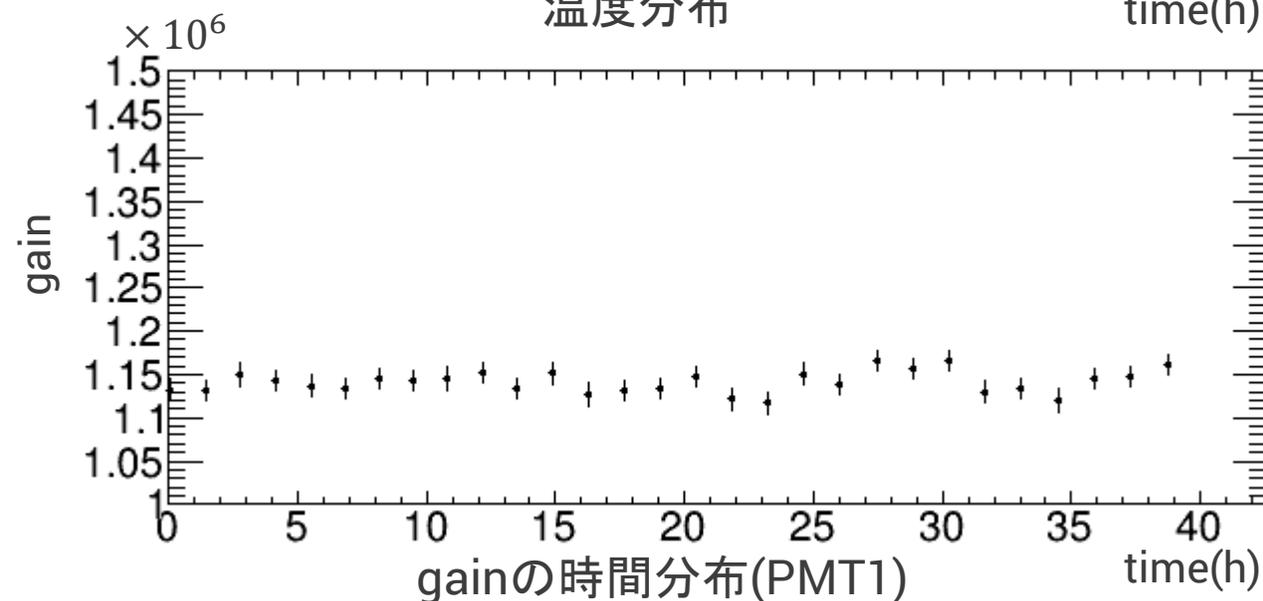
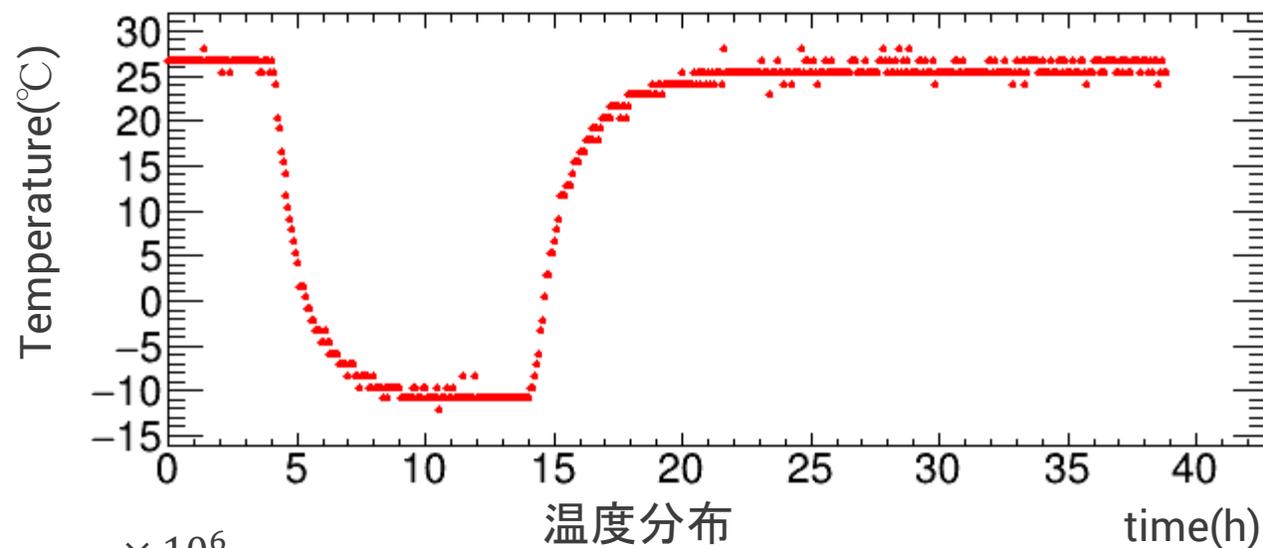


光量(何 photoelectron(p.e.)分なのか)を知るために1 p.e.当たりの電荷量を求めてPMTのゲインを調べる



10,000 eventsごとのPMTゲイン分布

PMTのゲイン時間分布



- 10,000 eventsごとに得られたPMTのゲイン値をプロット
- 両PMTのゲインは温度依存せず
- 10,000 eventsごとに全時間で算術平均

$$\text{PMT1} : 1.1 \times 10^6, \text{PMT2} : 1.1 \times 10^6$$

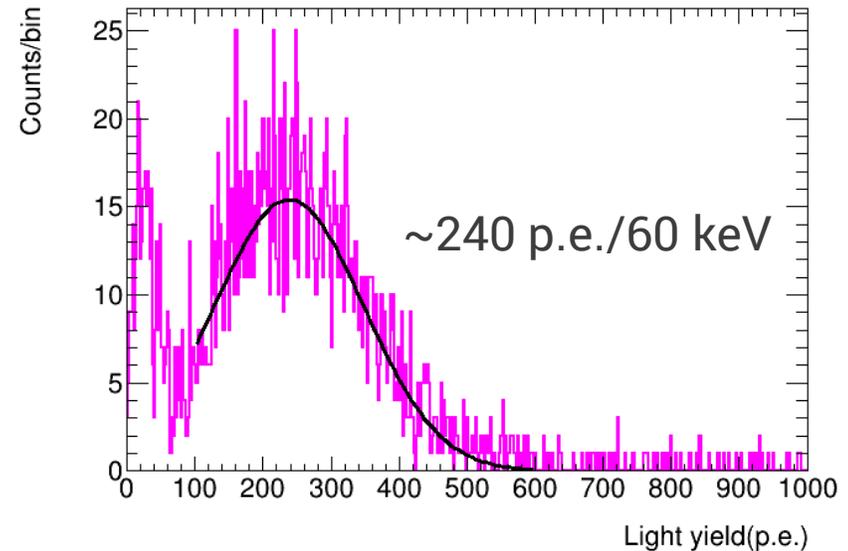
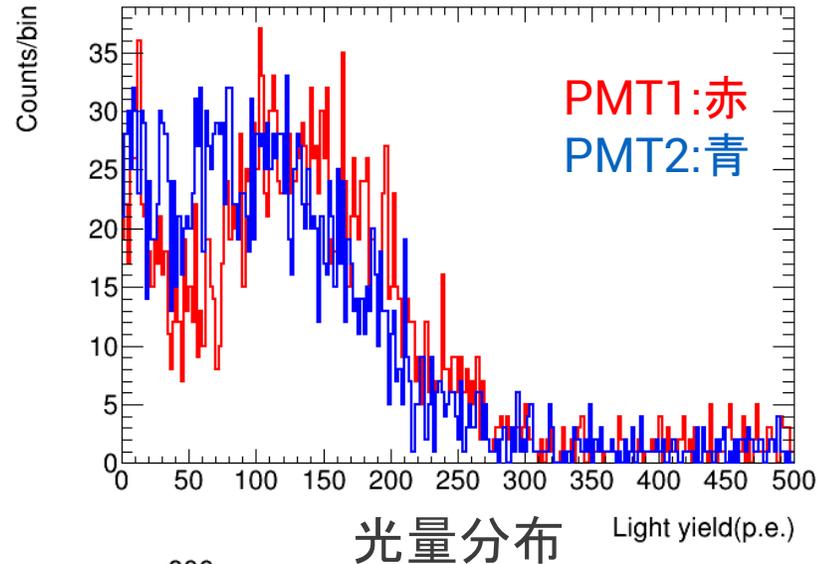
- 常温時(0~4 h)と冷却時(10~14 h)、それぞれ分けて算術平均しても同じ値となる



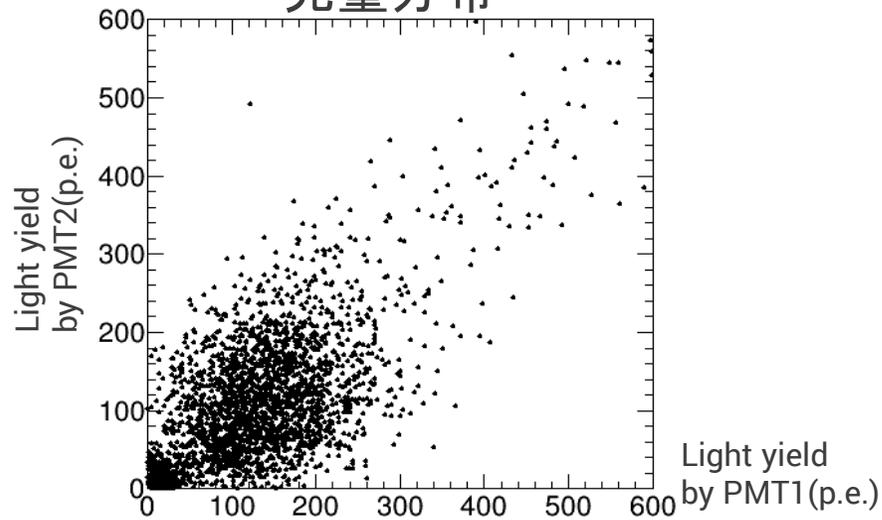
各PMTで得られた光量を求める、及びそれらの足し合わせが可能になった

解析結果

光量分布(常温時)



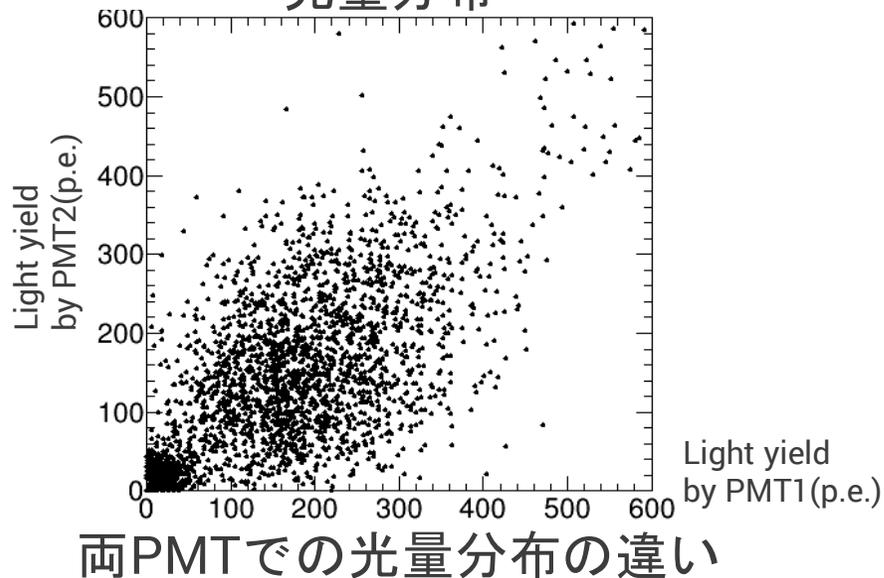
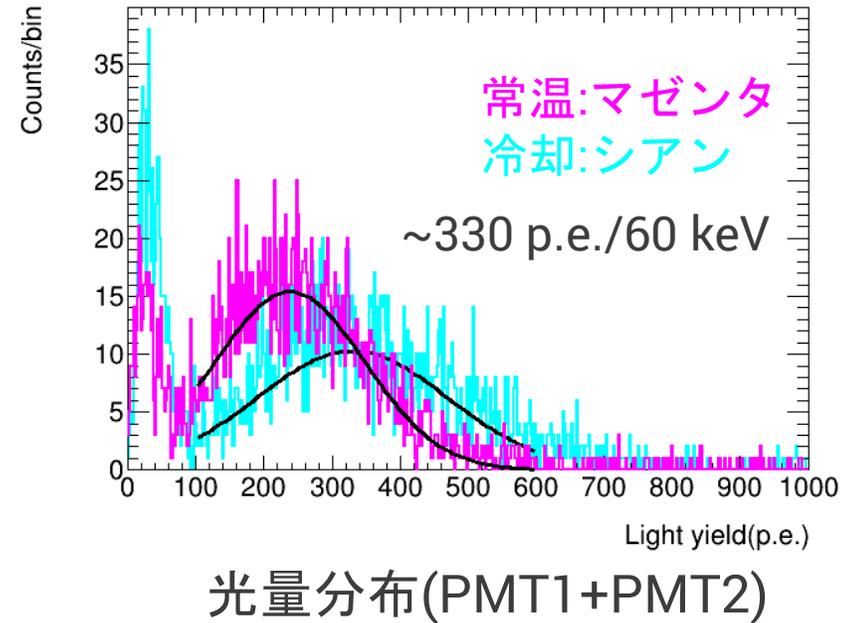
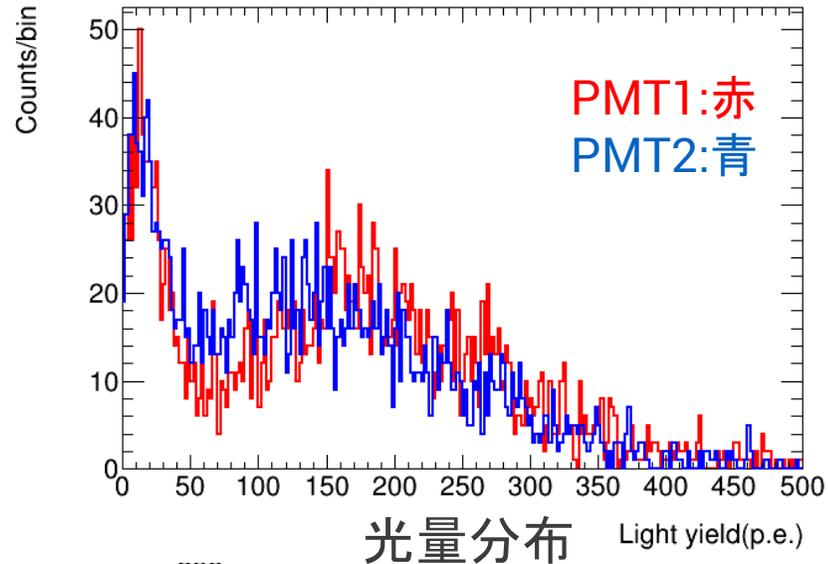
光量分布(PMT1+PMT2)



両PMTでの光量分布の違い

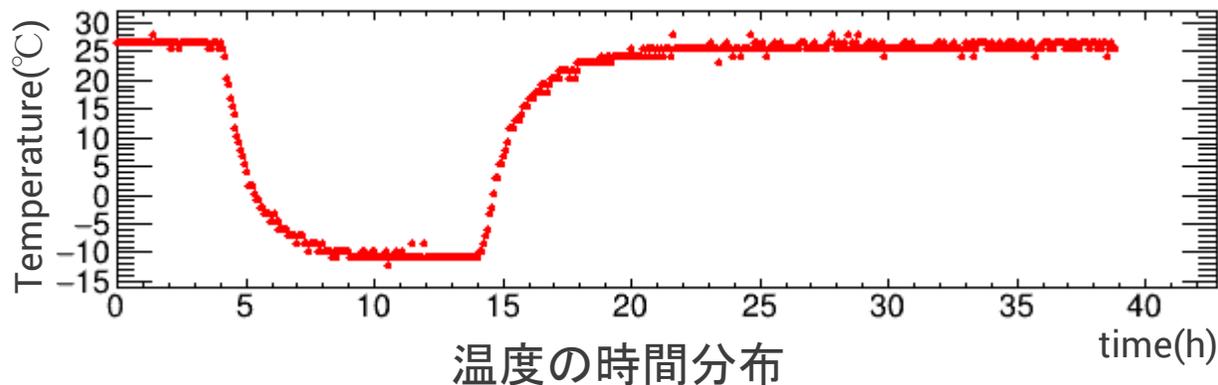
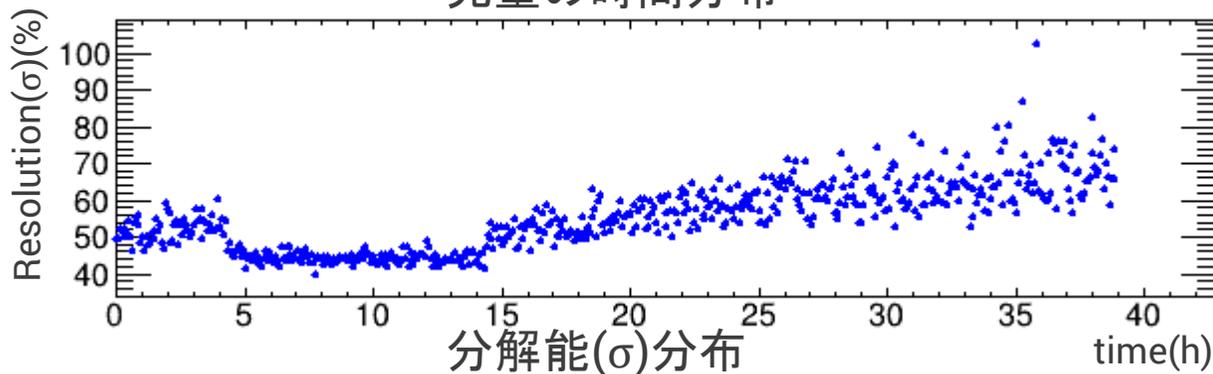
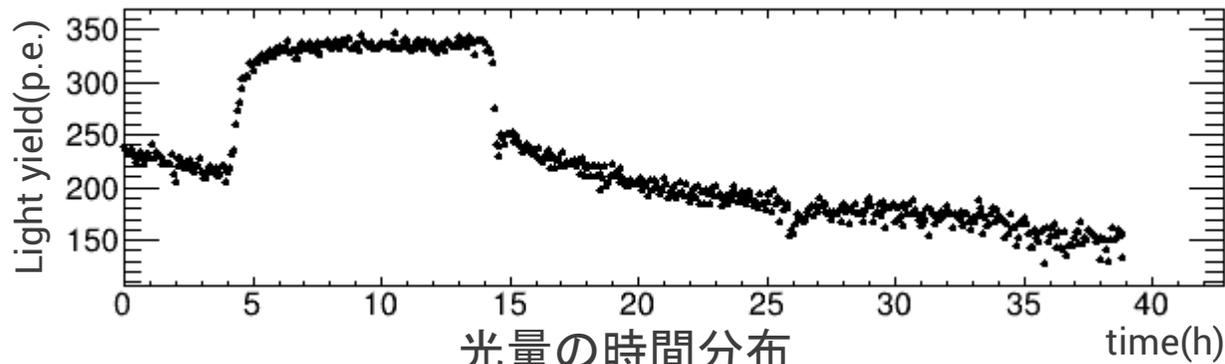
- 発光の強さ(光量)はガンマ線由来である
- 両PMTの間に光量の大きな偏りは見られない
- 光電面被覆率~20%

光量分布(冷却時)



240 p.e.から330 p.e.に約40%の光量増加

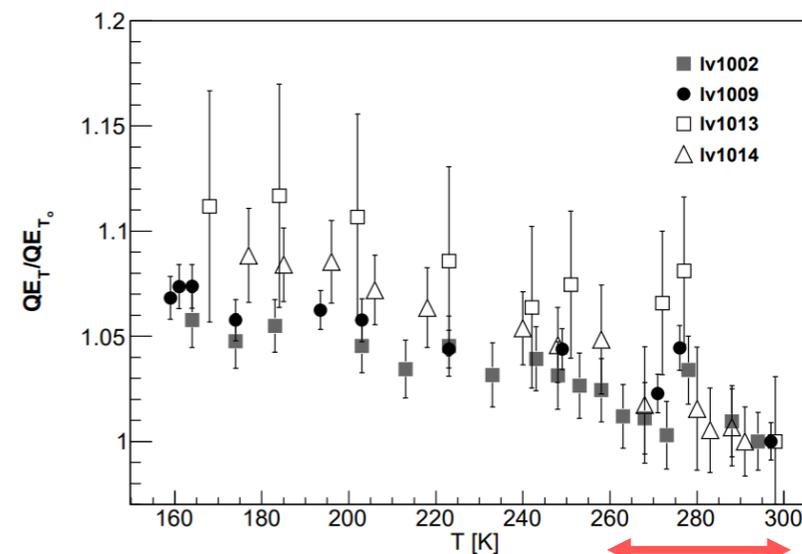
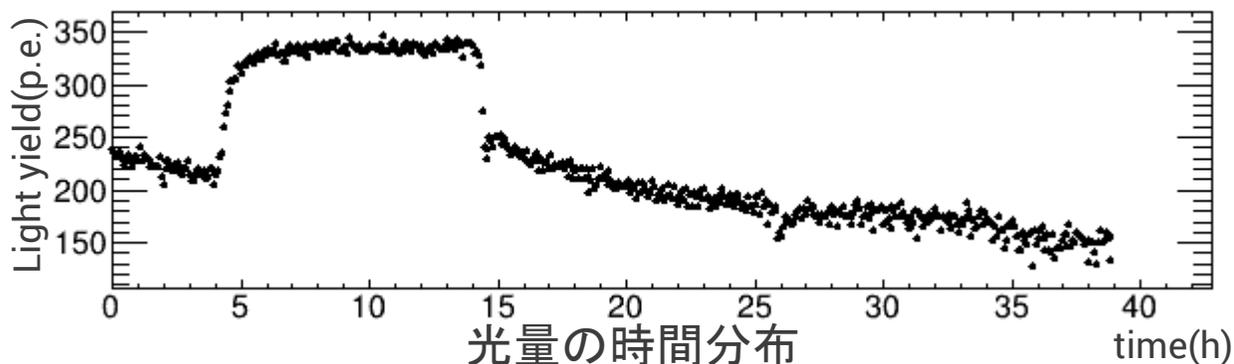
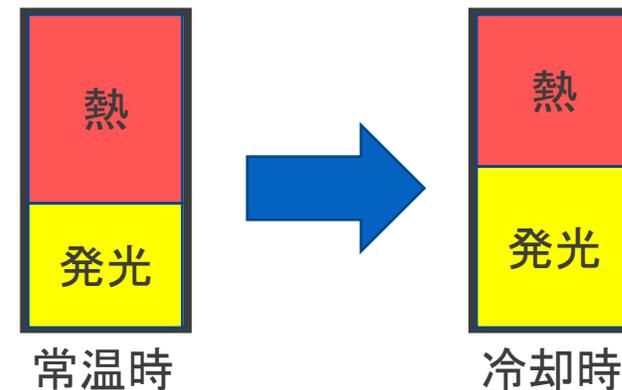
結果



- 光量増加
 - 常温時 : 240 p.e.
 - 冷却時 : 330 p.e.
 - **約40%の増加**
 - 常温時は時間経過と共に光量が減少
- 分解能の向上
 - 冷却時の分解能は約45%まで向上
 - 常温時は光量減少に伴って分解能が徐々に悪くなる

議論

- 常温で光量が下がる理由
 - out gass (特に水蒸気) の影響
- 冷却により光量が上がる理由
 - 励起状態の緩和の際、発光の割合が増加
- PMTの量子効率
 - 光量40%上昇は量子効率の上昇によるものではない



PMTの量子効率の割合

E. Aprile et al. JINST7(oct, 2012) P10005

まとめ

- 光量増加
 - -10°C への冷却により CF_4 からの発光の強さが40%増加することが分かった
- 分解能向上
 - 冷却により光量、すなわちエネルギーに関して分解能が向上することが分かった
 - 冷却により、精度良いエネルギースペクトルを得られる
- 応用
 - 大規模化してより広範囲のエネルギーの測定を可能にする
 - 課題：ガス注入が検出器内部で済むように、より厳しくガスリークを抑えなくてはならない
- 液化
 - 次の発表で CF_4 を液化した際の実験結果について発表される

Back up

PMTに関する情報

HAMAMATSU
PHOTON IS OUR BUSINESS

PHOTOMULTIPLIER TUBE R8520-406

FEATURES

- For low temperature operation down to -110 °C
- Low radioactivity 26 mm (1 Inch) square
- High UV sensitivity by synthetic silica window

APPLICATIONS

- High energy physics
- Astrophysics
- Academic research

SPECIFICATIONS

GENERAL

Parameter	Description / Value	Unit
Spectral response	160 to 650	nm
Wavelength of maximum response	420	nm
Window material	Synthetic silica	—
Photocathode	Material: Bialkali	—
	Minimum effective area: 20.5 × 20.5	mm
Dynode	Structure: Metal channel	—
	Number of stages: 10	—
Operating ambient temperature	-110 to +50	°C
Storage temperature	-110 to +50	°C
Weight	22.9	g

MAXIMUM RATINGS (Absolute maximum values)

Parameter	Value	Unit
Supply voltage	Between anode and cathode: 900	V
	Between anode and last dynode: 150	V
Average anode current	0.1	mA

CHARACTERISTICS (at 25 °C)

Parameter	Min.	Typ.	Max.	Unit
Cathode sensitivity	Luminous (2856 K)	80	100	—
	Blue sensitivity index (CS 5-58)	9.0	11.0	—
	Radiant at 420 nm	—	100	—
	Quantum efficiency at 175 nm	—	30	—
Anode sensitivity	Luminous (2856 K)	40	100	—
	Gain	—	1 × 10 ⁶	—
Anode dark current (After 30 minute storage in darkness)				
	—	2	20	nA
Time response	Anode pulse rise time	—	1.8	ns
	Electron transit time	—	12.4	ns
	—	—	—	—

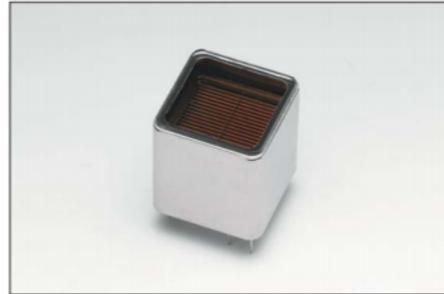
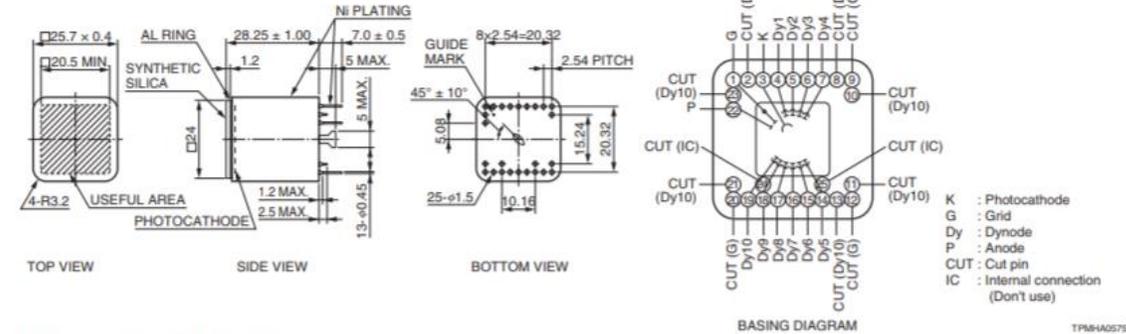
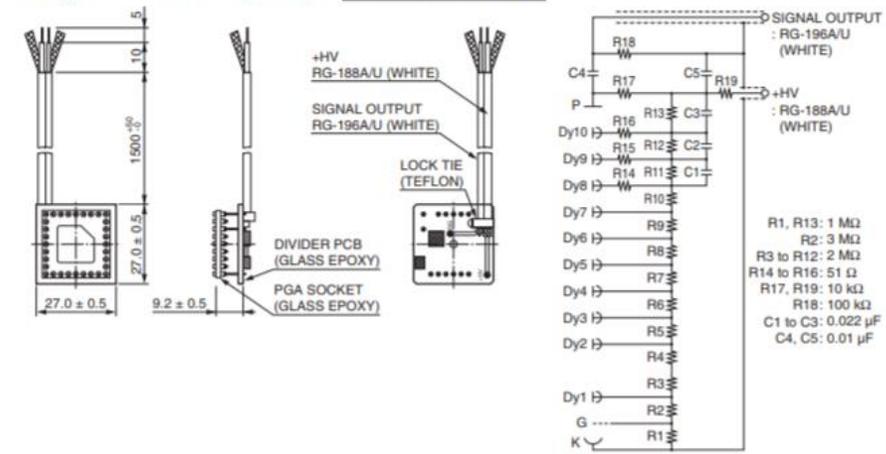


Figure 3: Dimensional outline (Unit: mm)



[ACCESSORIES] (Unit: mm)

● D type socket assembly E13416 **SOLD SEPARATELY**



Serial Number	(1) 陰極感度 (Sk) μA/lm	(2) 陽極感度 (Sp) A/lm	(3) 陽極暗電流 (Idb) nA	(4) 陰極青感度指数 (Skb)
LV1732	108.0	489.0	1.00	11.80
LV1742	129.0	841.0	3.50	12.30
LV1743	134.8	1010.0	2.60	12.40

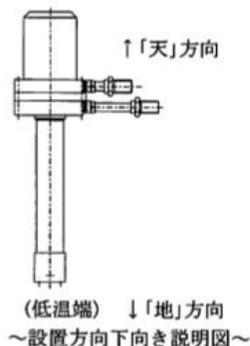
1. 概要

パルスチューブ冷凍機は、弊社がこれまでに培ってきた極低温小型冷凍機技術を基にして、新たに開発した超低振動パルスチューブ冷凍機です。新開発のパルスチューブ冷凍機は冷凍発生部に可動部品を全く持っていないため、これまでの機械式冷凍機で問題となっていた運転振動をきわめて小さくする事に成功しました。

2. 性能 (システム構成については、図1をご参照下さい)

最低到達温度 : 40K/35K (50/60Hz)
冷却時間 : 20分以内 (77Kまで)
冷凍能力 : 11W/14W (50/60Hz)

※. 上記仕様値は、設置方向下向き、連結管φ6.35長さ2m
及び1Lバッファータンクありの場合の数値です。



3. 機器仕様

3. 1. コールドヘッド

型式 PDC08型
寸法 W79×D161×H298 (図2をご参照下さい)
重量 約1.5kg

3. 2. モーターユニット

型式 M601型
寸法 W109×D186×H139 (図5をご参照下さい)
重量 約3.8kg

3. 3. コンプレッサー

型式 SA112型
寸法 W373×D449×H396 (図4をご参照下さい)
重量 約40kg
使用環境 周囲温度:10~35℃、相対湿度:85%以下
コード類 冷凍機コード:5m、電源コード:5m

3. 4. モレキュラーボット

寸法 W102×D280×H313 (図7をご参照下さい)
重量 約2.3kg

・ 冷凍機に関する情報

用いた冷凍機はアルバック・クライオ製のパルスチューブ冷凍機(PDC08+SA112型)である

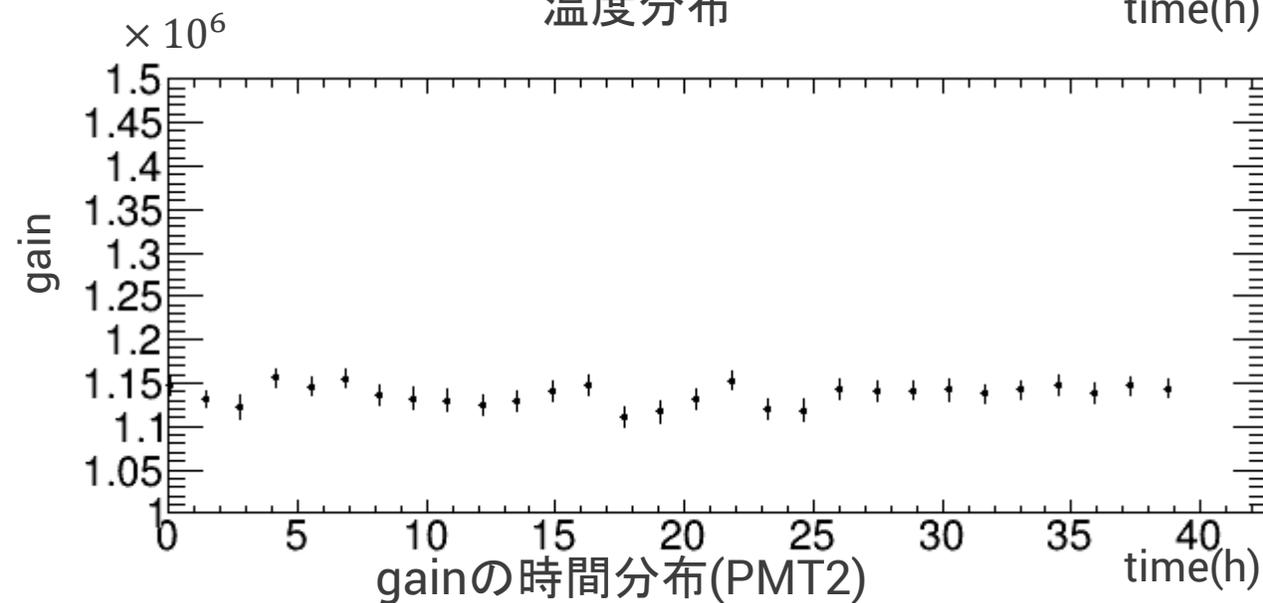
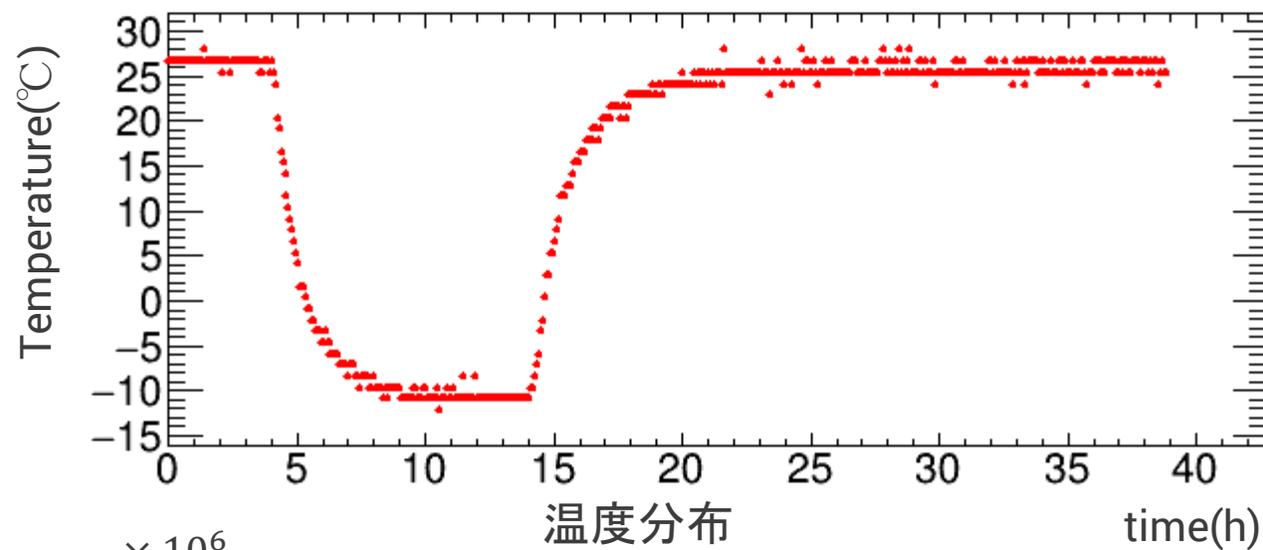
4. ユーティリティ

4. 1. 所要電源 AC100V (50/60Hz 単相)
4. 2. 消費電力 約1.1/1.3kW (50/60Hz)
4. 3. ブレーカー容量 20A以上

※ コンプレッサーの設置場所から、電源コード(5m)が届く範囲にAC100V電源(アース付コンセント)を御準備下さい。

※ 出来るだけ単独電源で御使用下さい。

PMTのゲイン時間分布(PMT2)



結果&圧力分布

