



将来の暗黒物質探索実験のための 低ダークカウントレートSiPMの開発

名古屋大 理学研究科 M2

尾崎公祐

2020/06/02 2020年度オンライン領域研究会

暗黒物質直接探索の現状

- ▶ Weakly Interacting Massive Particle(WIMP)が有力候補の1つ
- ▶ 液体キセノンを用いたXENON1T実験が世界最高感度での探索を進めている

▶ 2相式Time Projection Chamber

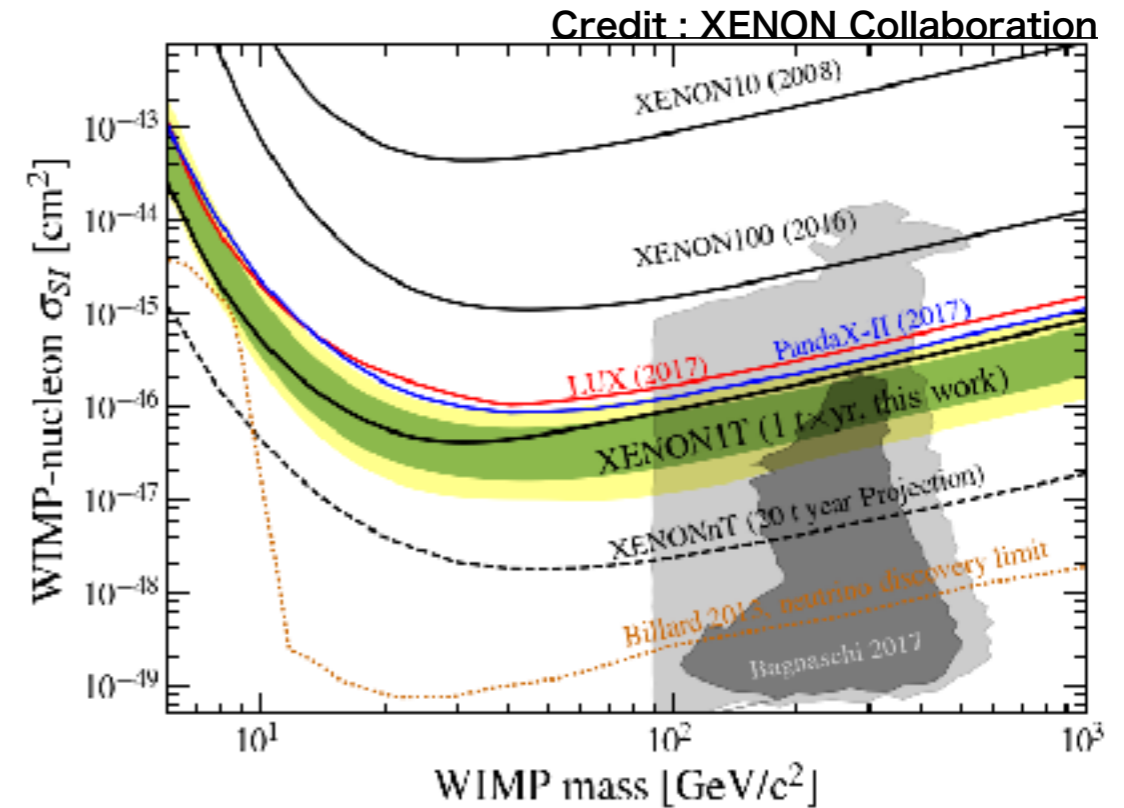
- 電子反跳： γ 線
- 原子核反跳：中性子、暗黒物質

▶ 将来の大型検出器では光検出器(光電子増倍管(PMT))に含まれるウランやトリウムといった放射性物質に由来する中性子バックグラウンドが問題になってくる

→次世代の光検出器として、放線性物質含有量の少ないSiPMが期待されている

SiPMとPMTに含まれる放射性物質の量 (mBq/m^2)

Sample type	^{238}U	^{226}Ra	$^{228}Ra(^{232}Th)$	^{228}Th	^{40}K
SiPM Silicon chips	<20	<3	<0.7	4	<14
SiPM Quartz window	<130	0.9	<0.1	1	40(2)
SiPM Quartz packaging	<60	1.1	1.1	1	<1
PMT R11410-21	<4000	160	160	120	3700



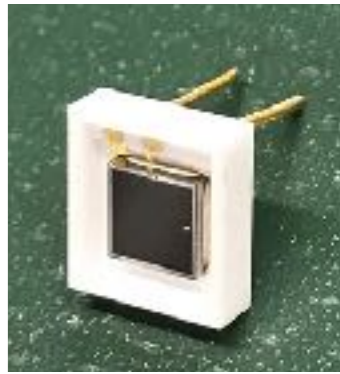
[1]L. Baudis et al 2018 JINST 13 P10022

SiPM vs PMT

[2] Barrowel al. JINST,12P01024

[3] G. Gallina, P. Giampa, F. Retière et al. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 940 (2019) 371-379

- ▶ 浜松ホトニクスS13370 : VUV光(液体キセノンシンチレーション光: $\lambda = 175 \text{ nm}$)に感度を持つSiPM
- ▶ 真空紫外光対応のSiPMとXENON1T実験で使用されるPMTの比較[2][3]



■ : Bad ■ : Good

Photo Sensor	SiPM 13370-3050CN	PMT R11410-21
Operation Voltage	~50V	~1500V
Gain	~ 2×10^6 @ $V_{\text{over}}=6\text{V}$	~ 5×10^6
Photon Detection Efficiency@175 nm	~13 %	~27%
Dark Count Rate (DCR) @165 K	~0.1- 0.8Hz/mm ²	~0.01 Hz/mm ²

- ▶ 暗黒物質の反跳エネルギーは小さい(~10 keV)ため検出の閾値を下げたい。
- ▶ Dark Count Rate が高いと検出器同士のアクシデンタルコインシデンスレートが上がり、検出エネルギー閾値を上げる必要がある。
- ▶ DCRをPMTと同程度(~0.01Hz/mm²)以下まで下げる必要がある。

▶ Dark Count Rateの起源

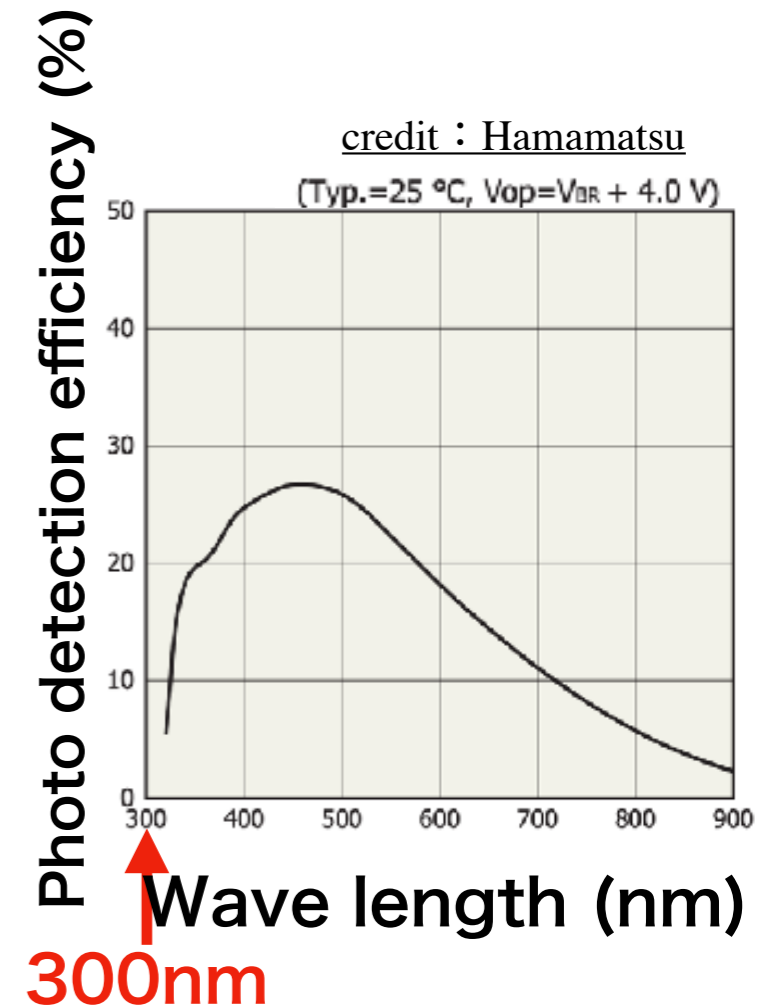
- 熱励起 : 温度に依存
- トンネル効果 : 内部の電場強度に依存 (低温で支配的)

→内部の電場強度を弱めることで低温におけるDCRの低減が可能 [4]

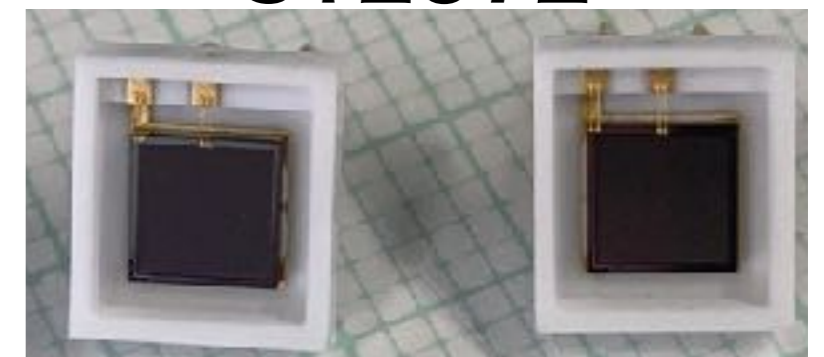
▶ Physical properties (25°C)

credit : Hamamatsu

Hamamatsu SiPM	S12572-015C-SPL SPL SiPM	S12572-015C-STD STD SiPM
Operation Voltage	~100V	~65V
Gain	~1.6×10 ⁵	~2.1×10 ⁵
有効受光面サイズ	3mm×3mm	
Number of pixels	40000	
Pixel pitches	15μm	
Fill factor	53%	
Sensitivity	Not sensitive to VUV light	
Package	Ceramic	
Trench	No trench	



S12572

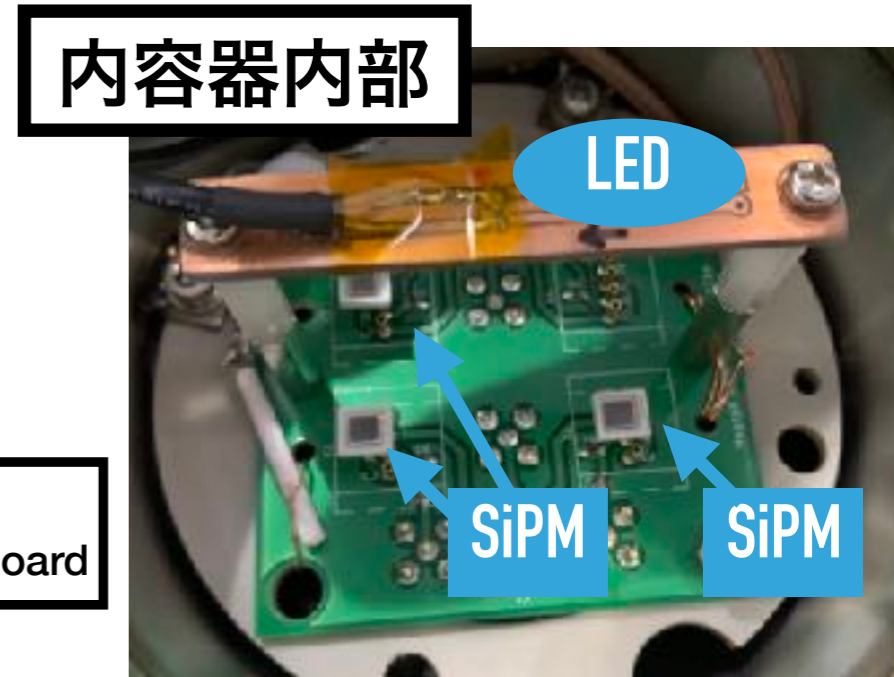
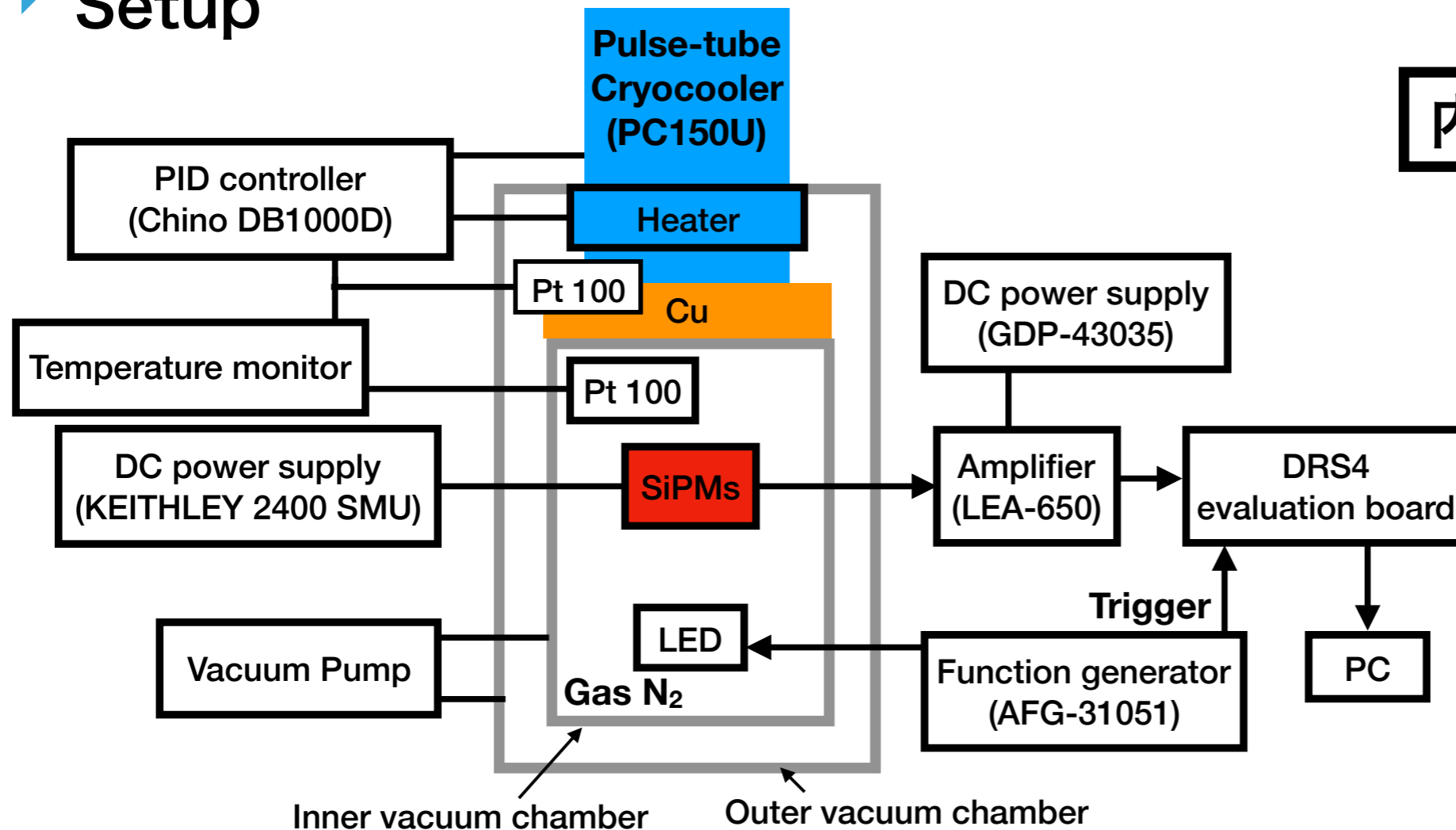


SPL SiPM

STD SiPM

- ▶ SPLは低温におけるDark Count Rateを低減するため、STDの内部の電場強度を弱めたもの

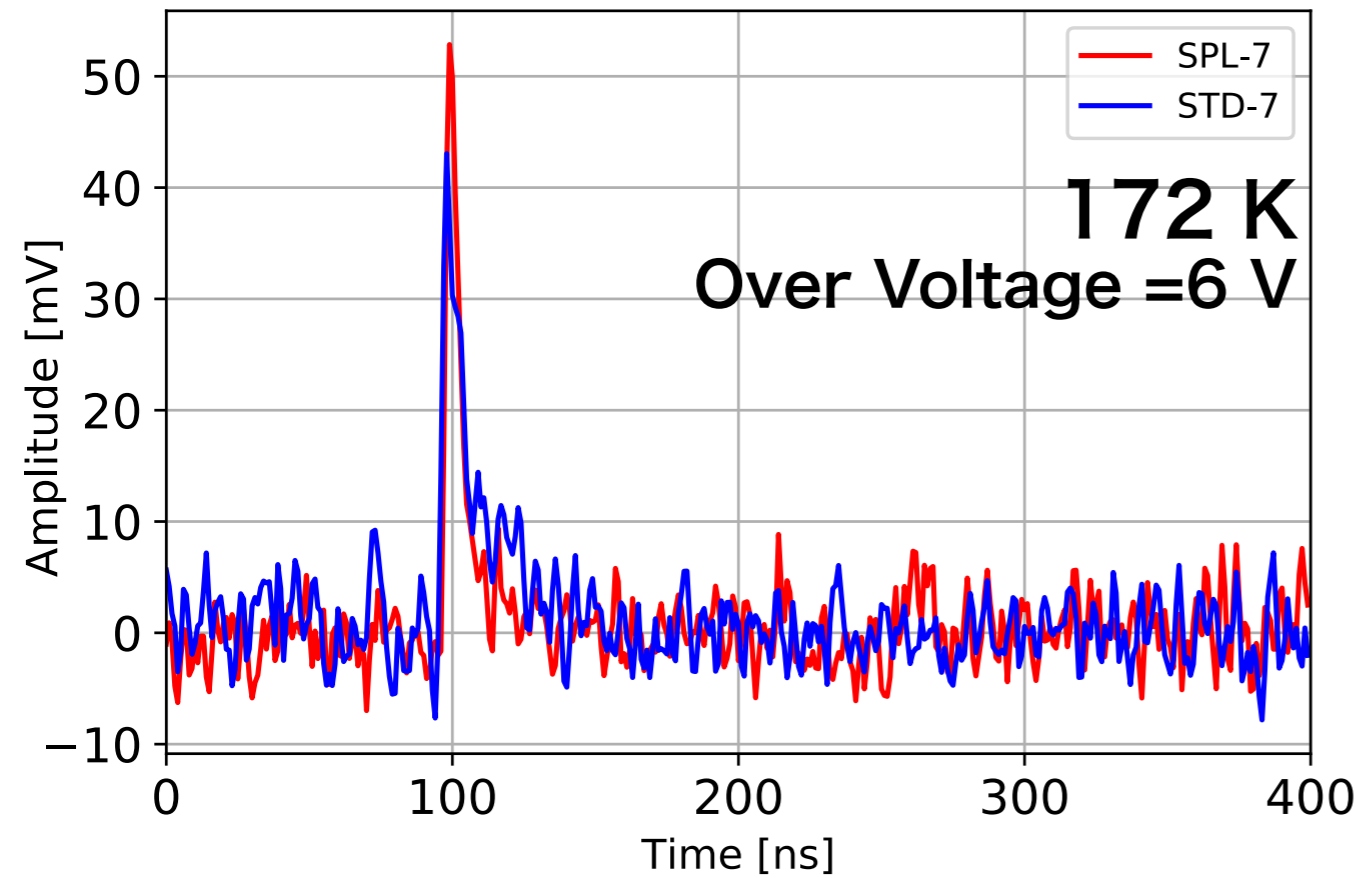
Setup



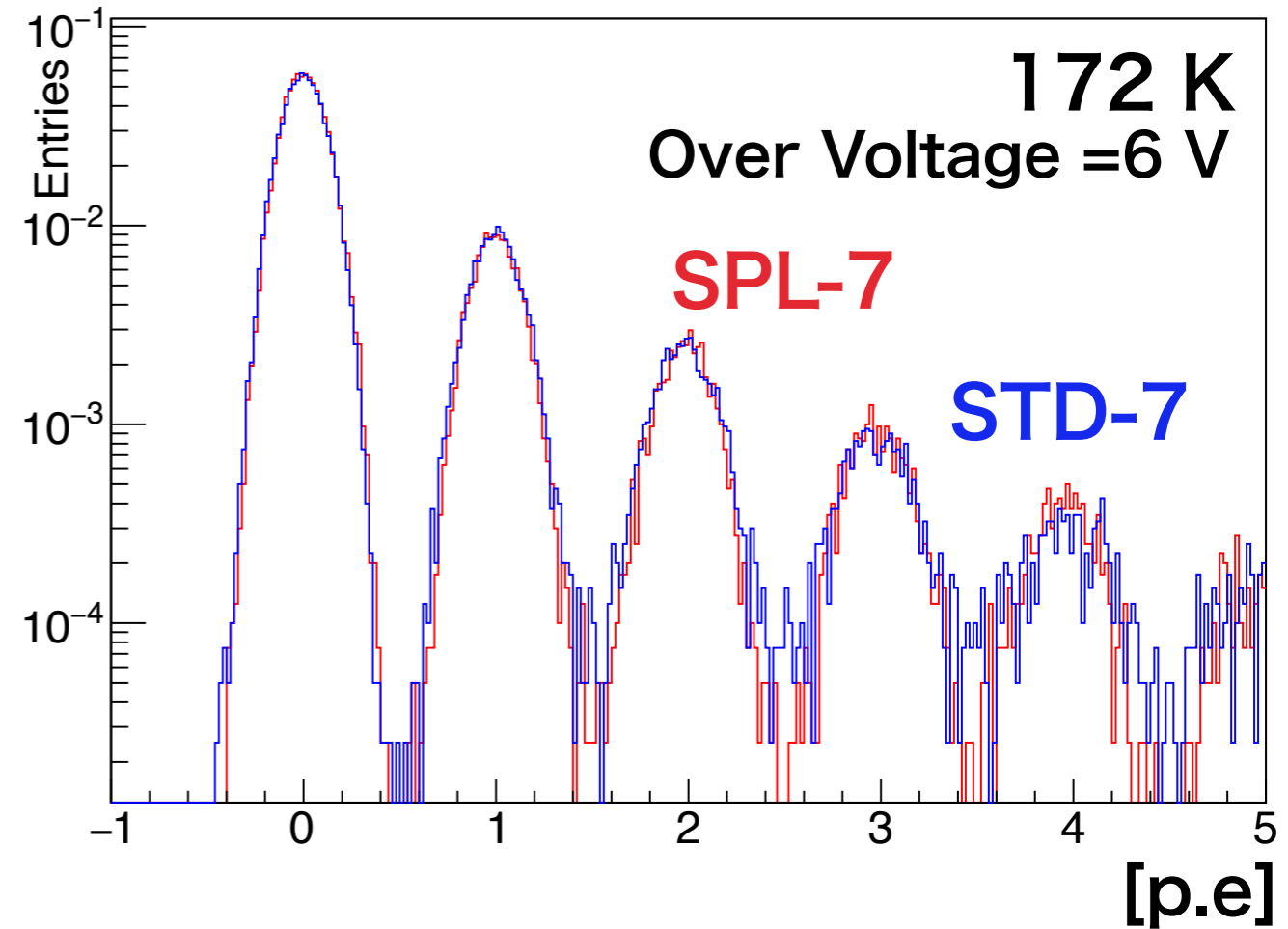
▶ LED : $\lambda = 375 \text{ nm}$

- ▶ Temperature : 298 K ~ 153 K
- ▶ LED ON : Single photoelectron spectrum, Gain, Pulse Height, Breakdown Voltage
- ▶ LED OFF : Dark Count Rate

▶ **Waveform**



▶ **Single photoelectron spectrum**

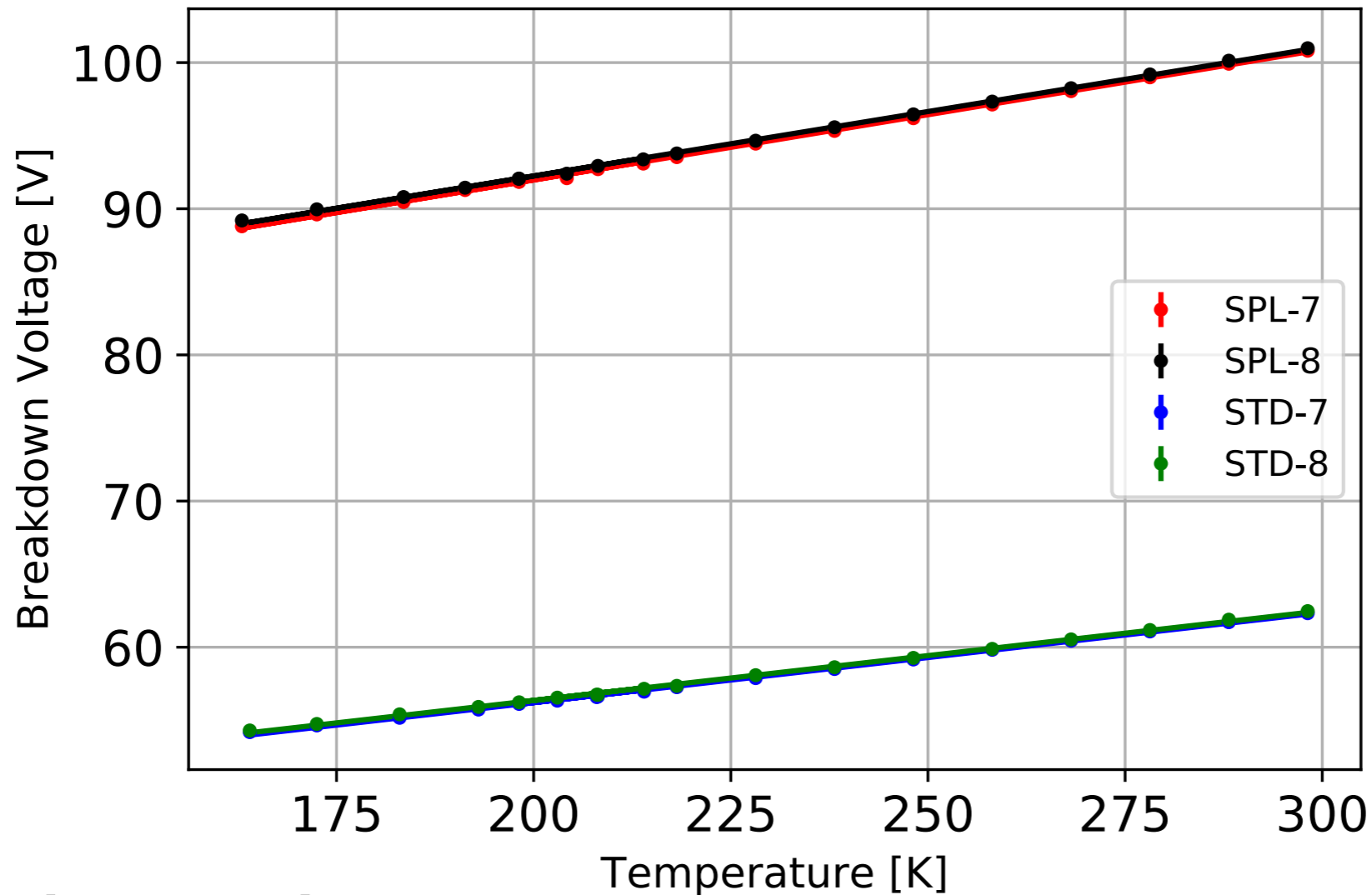


▶ 波形はSPLとSTDではほとんど変わらない

	Gain	1p.e. 分解能
SPL-7	1.6×10^5	$13.1 \pm 0.1 \%$
STD-7	2.1×10^5	$13.4 \pm 0.1 \%$

▶ 1p.e. 分解能はほとんど変わらない

▶ Temperature vs Breakdown Voltage



温度計数 p1

▶ Breakdown voltage

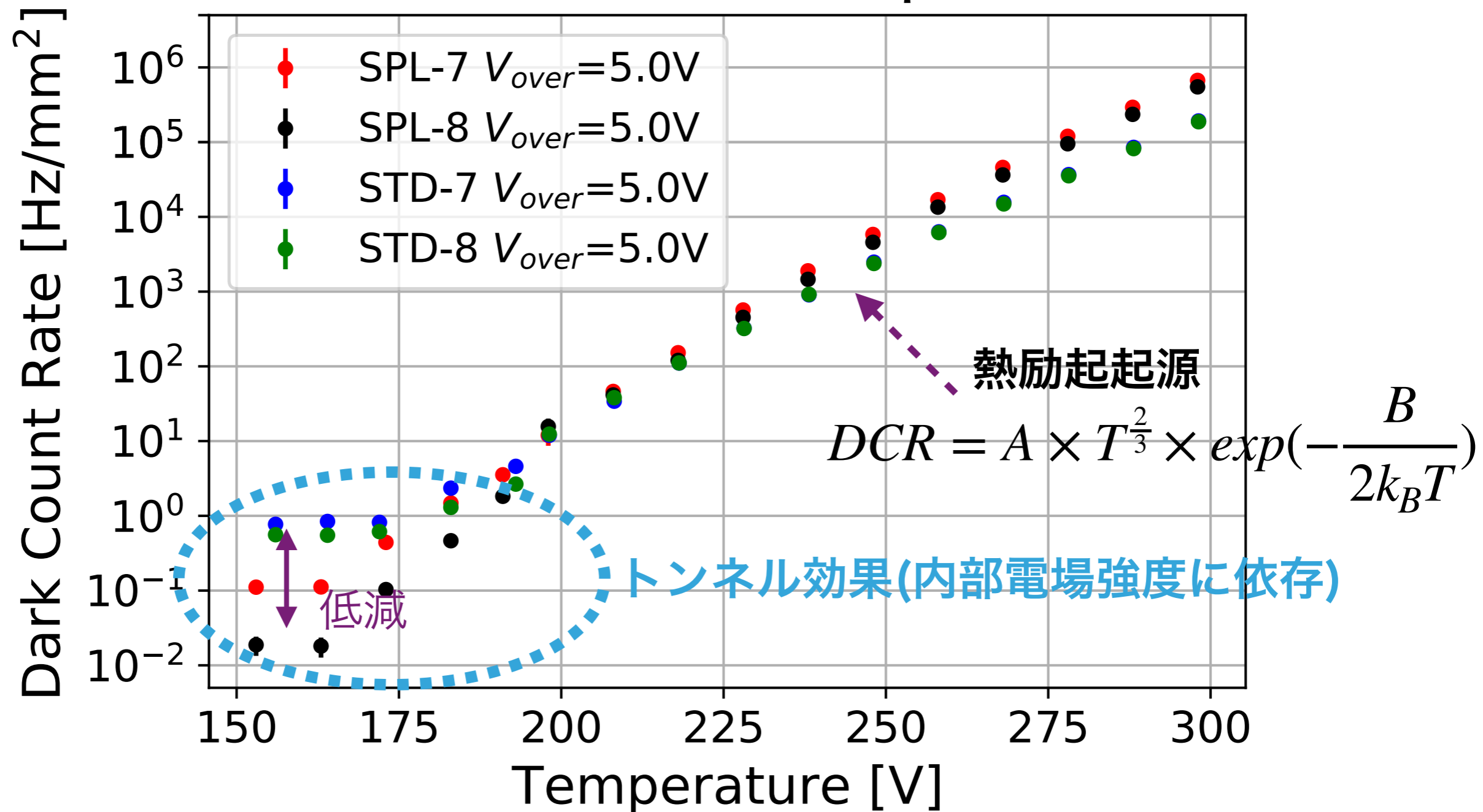
温度が低下することで格子振動が抑制され
増倍が起きやすくなるためBreakdown
Voltageは温度に対して下がった

$$V_{br} = p_0 + p_1 \times T$$

SPL7	88.3 ± 1.1 mV/K
SPL8	87.0 ± 1.0 mV/K
STD 7	61.2 ± 0.8 mV/K
STD 8	60.7 ± 0.8 mV/K

Dark Count Rate (DCR)

- ▶ The dark count rate as a function of temperature



- ▶ 常温から200 K付近にかけてはDCRは熱励起起源の半導体中のキャリア密度に従う。
- ▶ 200 Kよりも低温ではトンネル効果によるダークカウントが支配的になる。
- ▶ 内部電場を弱めたことでトンネル効果の寄与を小さくし、6-54 倍DCRを低減できた。

Summary

- ▶ SiPMは液体キセノンを用いた暗黒物質探索実験において、光電子増倍管 (PMT) に代わる光検出器として期待されている
→ ダークカウントが非常に大きいことが課題
- ▶ この問題を解決するため浜松ホトニクスとの協力のもと、ダークカウントの小さいSiPMを開発中である。
- ▶ 内部電場構造を変えることで、低温においてトンネル効果に由来するDCRを抑制することができた。Factor 6~54 (個体差が大きい)
- ▶ 真空紫外光(~175nm)に感度を持つSiPM (S-13370)のダークカウントは、液体キセノン温度 (165 K) において 0.1-0.8 [Hz/mm²]のため、この方法を適応することで、0.01 [Hz/mm²]を達成できる可能性がある。

Outlook

- ▶ 今回測定したSiPMは真空紫外光に感度がないため、真空紫外光にも感度をもつ、ダークカウントの小さいSiPMを開発する